

METINGEN EN MODELONTWIKKELING BINNENVAART

Modelvalidatie

Ministerie I&M

Rapport nr.: 14-3202

Datum: 2014-11-20



Projectnaam:	Metingen en modelontwikkeling binnenvaart	DNV GL - Energy
Rapport titel:	Modelvalidatie	KEMA Nederland B.V.
Klant:	Ministerie I&M	Postbus 9035
Contactpersoon:	A. Bezemer	6800 ET ARNHEM
Datum:	2014-11-20	
Project nr.:	74105772	
Unit:	CES/ECS	Tel: +31 26 356 9111
Rapport nr.:	14-3202	KvK 09080262

Taak en doelstelling: Validatie van het NNM, uitgebreid met scheepvaartmodule aan metingen bij het Amsterdam Rijnkanaal

Auteur:



J.J. Erbrink

Beoordeeld:



J.J. de Wolff

Goedgekeurd:



L.B.M. van Kessel

BELANGRIJKE MEDEDELING EN DISCLAIMER

Dit document is auteursrechtelijk beschermd en mag alleen aan derden beschikbaar worden gesteld in zijn geheel en voorzien van deze mededeling en disclaimer. Dit document noch een gedeelte ervan mag openbaar worden gemaakt in het kader van een openbare aanbieding of prospectus dan wel een beursnotering of een circulaire of mededeling op de beurs, zonder de uitdrukkelijke voorafgaande schriftelijke toestemming van de DNV GL entiteit die dit document heeft opgesteld ("DNV GL").

Indien en voor zover de wet dat toelaat, is noch DNV GL noch enige groepsmaatschappij ("de Groep") verantwoordelijk op grond van een contract, onrechtmatige daad, nalatigheid daarbij inbegrepen, of op enige andere wijze, jegens derden (daarvan uitgezonderd de Klant). Geen van de Groep deel uitmakende entiteit is aansprakelijk voor enig verlies of schade hoe dan ook geleden als gevolg van enig handelen, nalaten of verzuim (ontstaan door onachtzaamheid of anderszins) door DNV GL, de Groep of diens medewerkers, onderaannemers dan wel agenten. De inhoud van dit document vormt één geheel met de aannames en voorbehouden die daarin zijn opgenomen dan wel in hetzelfde verband anderszins zijn gecommuniceerd. Dit document bevat mogelijk technische detailinformatie die uitsluitend bedoeld is voor personen met de relevante expertise.

Dit document is samengesteld op basis van informatie beschikbaar ten tijde van het opstellen ervan. Het is niet uitgesloten dat dergelijke informatie daarna verandert of is veranderd. Behalve indien en voor zover een opdracht tot het verifiëren van informatie en gegevens uitdrukkelijk met de Klant is overeengekomen, is DNV GL op geen enkele wijze verantwoordelijk in verband met onjuiste informatie of gegevens die zij van haar Klant of een derde heeft ontvangen, dan wel voor de gevolgen van dergelijke onjuiste informatie of gegevens, die al dan niet in dit document is opgenomen of waarnaar in dit document wordt verwezen.

Reference to part of this report which may lead to misinterpretation is not permissible.

Rev.	Datum	Reden voor uitgave	Auteur	Beoordeeld	Goedgekeurd
0	2014-11-20	First issue	J.J. Erbrink	J.J. de Wolff	L.B.M. van Kessel



Inhoud

1	SAMENVATTING	1
2	INLEIDING.....	3
3	DE GROTE LIJN	4
4	SCHEEPSBIJDRAGEN IN CONCENTRATIES	7
5	METEODATA.....	9
5.1	Beschikbare data op locatie	9
5.2	Dataprocesing	9
5.3	Synoptische data Schiphol	10
6	DATA ANALYSES	12
6.1	AIS data	12
6.2	Scheepsdata en concentratiepieken koppelen	13
6.3	Emissies van de scheepvaart	19
6.4	Overige kenmerken	20
7	MODELVERGELIJKING	22
7.1	Opzet	22
7.2	Meetexperiment RWS-59 op 15 augustus 2014	23
7.3	Gemiddelden over de gehele periode	25
8	SRM4	37
8.1	Werkwijze	37
8.2	Modelbeschrijving	37
8.3	Parameterschatting	39
9	DISCUSSIE	46
9.1	Analyse van de meetgegevens	46
9.2	Keuze van de invoerparameters	47
9.3	Modelaanpassingen	48
9.4	Representativiteit van de uitkomsten	49
10	CONCLUSIES.....	51
11	REFERENTIES.....	53

1 SAMENVATTING

Het Nieuw National Model (NNM) is voor stationaire bronnen (industrieën en dergelijke) ontwikkeld en ook gevalideerd aan metingen. Om scheepvaart met het NNM te kunnen doorrekenen dient in het model met een aantal scheeps-specifieke aspecten rekening te worden gehouden. Deze scheeps-specifieke aspecten zijn de laatste jaren onderwerp van discussie geweest; vooral de vraag hoe de pluimstijging van de scheepsemisies in werkelijkheid verloopt is onzeker.

In het rekenmodel STACKS zijn deze aspecten geïmplementeerd. Het model, een verbeterd en gemodificeerd NNM (Nieuw nationaal Model) is daarom bij uitstek geschikt om aan metingen te valideren. Ten behoeve van deze validatie is een meetcampagne opgezet bij het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK), waarbij over de periode van 4 maanden op 3 afstanden van het ARK continue de concentraties van verschillende stoffen is gemeten. De weersomstandigheden zijn ter plaatse met gevoelige apparatuur gedocumenteerd. Met AIS (Automatic Identification System) receivers is gedetailleerd vastgelegd welke schepen er op welk moment langs gevaren zijn.

Deze validatie had een dubbel doel:

- 1 een verspreidingsmodel, gebaseerd op NNM te modificeren zodanig dat de berekeningsresultaten overeenkomen met de metingen (dit is de primaire validatie) voor zowel NO_x als voor NO₂. Voorzien was dat de beschrijving van de instantane pluim en van de pluimstijging aanpassing behoefde. Dat bleek zo te zijn en beide aanpassingen zijn inmiddels doorgevoerd
- 2 uitgaande van het aangepaste verspreidingsmodel, een vereenvoudigd model opstellen, gebaseerd op SRM2 (voor snelwegen) en valideren aan de meetset.

Door de gemeten concentraties op verschillend detailniveau te vergelijken met de modelberekeningen (gemodificeerd NNM) is een gedegen validatie van het rekenmodel uitgevoerd. Dit detailniveau betreft:

- gemiddelde concentraties op elk der drie meetstations
- daggemiddelde en uurgemiddelde concentraties op de stations
- periode-gemiddelde concentraties per scheepsklasse, zowel NO_x als NO₂
- de omzettingsfractie van NO_x naar NO₂ voor elk van bovenstaande data-doorsneden.

De vergelijkingen laten het volgende zien:

Modeluitkomsten zijn goed met metingen in overeenstemming indien de volgende modelaanpassingen worden doorgevoerd:

- de windsnelheid vlakbij het ARK is een factor 2 lager dan verderop in open veld. De bomerij langs het ARK lijkt een significante invloed op de windsnelheid en dus op de concentraties te hebben
- de pluimstijging van de schepen kan niet verwaarloosd worden, maar toepassing van ongewijzigde pluimstijging conform NNM (het Paarse boekje) leidt tot te lage concentraties. Uit de meetdata kan worden afgeleid dat goede resultaten worden verkregen indien de pluimstijging wordt berekend door de vectorieel samengestelde wind- en vaarsnelheid te nemen in plaats van gewoon de windsnelheid en door de warmte-emissie eerst met 0,2 MW te reduceren voor berekening van de pluimstijging
- de omzetting van NO_x naar NO₂ verloopt op korte afstand van het ARK langzamer dan volgens de NNM chemie. Onder de aanname dat de pluim op deze afstanden (tot maximaal 200 m) nog niet homogeen gemengd is, kan een afstandafhankelijke correctie worden toegepast, waarmee de berekende concentraties goed in overeenstemming met de metingen zijn.

Het tweede doel van de meetcampagne is bereikt door voor drie parameters generieke functies af te leiden uit de voor de scheepvaart aangepaste NNM (STACKS) berekeningen. Het gaat om deze drie parameters:

- 1 de verticale verspreiding
- 2 de pluimhoogte
- 3 de omzettingssnelheid van NO_x naar NO₂, weergegeven door een K-factor.

Indien toegepast in STACKS worden resultaten verkregen die dicht (<20% afwijking op jaargemiddelde concentraties) liggen bij de oorspronkelijke resultaten van STACKS. Daarmee is een goed uitgangspunt gecreëerd om een volledig SRM4 model operationeel te maken.



2 INLEIDING

De bijdrage van scheepvaart aan de luchtkwaliteit is niet zo goed bekend. Er is in Nederland nog geen officiële (door het ministerie goedgekeurde) rekenmethode om de scheepsbijdrage (binnenvaart enerzijds en zeevaart anderzijds) te bepalen. In praktijk maken verschillende partijen hiervoor eigen keuzes, veelal door een conservatieve aanpak toe te passen. In veel gevallen wordt een work-around bedacht, waarvan in het geheel niet duidelijk is of dit een verantwoorde aanpak is. Om de bijdrage van de scheepvaart en het effect van de eventuele maatregelen op de luchtkwaliteit meer onderbouwd te kunnen vaststellen is het nodig om een rekenmodel te gebruiken dat de instemming kan hebben van relevante partijen. Een goede aanzet tot een dergelijk consensusmodel is in samenwerking met verschillende partijen in 2010-2011 opgesteld. Eerst is in 2009 in opdracht van de DCMR een voorstudie gestart onder leiding van KEMA en onder auspiciën van een breed samengestelde begeleidingscommissie. Dit heeft een vervolg gehad in een meer uitgewerkte studie in 2010-2011, waarbij een principe consensus is bereikt over de wijze van vaststelling van de emissies en het verspreidingsmodel (binnenvaart en zeevaart). Een doorvertaling naar een eenvoudiger standaardrekenmethode (SRM2) bleek lastiger te zijn dan vermoed. In die studie is als aanbeveling meegegeven dat "de warmte emissie van de binnenvaart een belangrijk gegeven is en nog onvoldoende onderbouwd. De voorgestelde waarden in dit rapport moeten gezien worden als een eerste aanzet. Aanbevolen wordt de warmte emissie van de binnenvaart beter te verankeren aan meetgegevens."

Over de bijdrage van de binnenvaart aan de GCN waarden (grootschalige concentraties in Nederland) is enkele malen stevige discussie geweest (vooral over de te hanteren warmte-emissie en het effect ervan op de pluimstijging) en deze bijdrage is enkele malen herzien. Voor de AERIUS Calculator in de Programmatisch Aanpak Stikstof (PAS-) is een correcte berekening van de bijdrage van schepen ook van belang. De bijdrage van de binnenvaart is van belang op alle drukke vaarwegen; de bijdrage van de zeevaart is regionaal en beperkt tot de grote havengebieden zoals het Rotterdams havengebied (en in minder mate in andere havens).

Het ontbeert momenteel aan een degelijke validatie aan buitenlucht meetgegevens. In het verleden hebben de uitgevoerde metingen niet geresulteerd in een gekalibreerd model voor bijdragen van (binnen)scheepvaart. Wel zijn diverse aanzetten geweest om te komen tot een vorm van validatie, maar dit heeft niet geleid tot een geaccepteerde validatie. In 2013 is een groep deskundigen bij elkaar geweest om te bespreken of en op welke manier metingen mogelijk en nodig zouden zijn om tot een verbeterd en/of gekalibreerd emissiemodel te komen. Tijdens en na de bijeenkomst zijn meerdere ideeën op tafel gelegd. Na evaluatie van deze ideeën is een projectvoorstel geformuleerd en uiteindelijk tot uitvoering hiervan overgaan. In een aparte rapportage (ECN, 2014) zijn de metingen vastgelegd. In dit rapport wordt de vergelijking met modelberekeningen gepresenteerd en wordt voorgesteld hoe de modellering van de binnenvaart het beste kan worden uitgevoerd.

3 DE GROTE LIJN

Met de uitgevoerde metingen aan het Amsterdam Rijn Kanaal (ARK) is het mogelijk om onderscheid te maken tussen achtergrond en scheepsbijdrage. Dit vormt de basis voor alle modelvergelijkingen. Modelkalibratie vindt plaats met het NNM, uitgebreid met aanpassingen voor de scheepvaart. Dit model is in 2011 beschreven in (KEMA, 2011). In concreto wordt het STACKS rekenhart hiervoor gebruikt. STACKS is het door het ministerie I&M goedgekeurde versie van het NNM, uitgebreid met modules voor wegverkeer, depositie en geur. Vergelijking aan de meetdata kan relatief gemakkelijk plaatsvinden aan de gemiddelde meetresultaten van de hele meetperiode. Maar om inzicht te krijgen in een goede interne modelwerking is het nodig de resultaten aan meteo-subsets te toetsen: dag- nacht, diverse selecties aan windsnelheden en stabiliteitsklassen. Toetsing aan NO_x (dispersie) en NO₂ (omzetting) is nodig, om de dispersie en omzettings-modules in het model separaat te valideren. Om de resultaten vertaalbaar te maken naar andere vaarwegen (met een andere mix aan binnenvaartschepen) is het nodig om te toetsen aan subsets van scheepsklassen (grote / kleine schepen; grote schepen: grote emissie, veel warmte, kleine schepen: weinig warmte, lage emissie). Uitkomsten hiervan voor onderscheiden scheepstypen en situaties worden gebruikt om dispersiecurven te ontwikkelen voor een SRM4 model.

Om de validatie uit te voeren zijn de volgende stappen gevolgd:

- 1 Analyse en uitwerken van meteometingen,
- 2 Analyse van de concentratiemetingen,
- 3 Analyse van de AIS data
- 4 Koppeling van afzonderlijke scheeps- concentratiepieken aan de scheepgegevens (welk schip hoort bij welke piek)
- 5 Vergelijking van modelberekeningen met meetdata.
- 6 Modelaanpassingen realiseren op basis van de resultaten
- 7 Voorstellen voor een vereenvoudigde SRM4 rekenmethode voor de binnenvaart.

Ad 1. Verwerking van de meteorologische metingen, combinatie van deze metingen met de synoptische metingen die het KNMI op Schiphol uitvoert. Schiphol is ongeveer 20 km van de meetlocatie verwijderd en dat is in meteorologisch zin een korte afstand. Windrichting en windsnelheid, evenals de stabiliteit van de atmosfeer zijn lokaal bepaalde parameters, deze moeten te allen tijde afgeleid worden van lokale metingen. Hiervoor zijn op alle drie de locaties meetgegevens van sonische windmeters beschikbaar. De weersgegevens voor de modelvalidatie zijn steeds tot uurgemiddelde uitgewerkt. Middelen over een uur van de windgegevens voor het bepalen van pluimtrajecten is niet voldoende; hiervoor is het windrichtings- en windsnelheidssignaal steeds glijdend gemiddeld over een korte tijd (4 minuten).

Ad 2. Verwerking van de concentratiemetingen, zodanig dat een goede scheiding plaatsvindt tussen achtergrond concentratie en scheepsbijdragen. De scheepsbijdragen bestaan steeds uit concentratiepieken, die in plots steeds duidelijk zijn te identificeren. Om dit te automatiseren zijn algoritmes ontwikkeld om deze scheiding zo goed mogelijk te doen plaatsvinden. Hiervoor zijn per station andere parameter-instellingen gebruikt; pieken dichtbij het ARK zijn heel uitgesproken, steil en relatief van korte duur. Pieken op de andere stations beslaan een langere tijd, zijn 'vlageriger' (bestaan uit meerdere subpieken) en steken veel minder boven de achtergrondconcentratie uit. De piekidentificatie is het best uit te voeren op het NO_x -signaal. De afgeleide pluimbreedtes worden dan tevens voor het NO₂ signaal gebruikt. De concentratiepieken zijn vervolgens gekenmerkt door een integraal, een sigma-waarde (standaarddeviatie) en afstand tot het ARK.

Ad 3. Verwerking van de AIS gegevens, zodat de pieken die uit de analyse volgen gekoppeld kunnen worden aan individuele schepen. De AIS gegevens zijn ter plaatse opgenomen, maar tevens is gebruik gemaakt van een databestand dat welwillend ter beschikking is gesteld door Marinetraffic. De AIS data

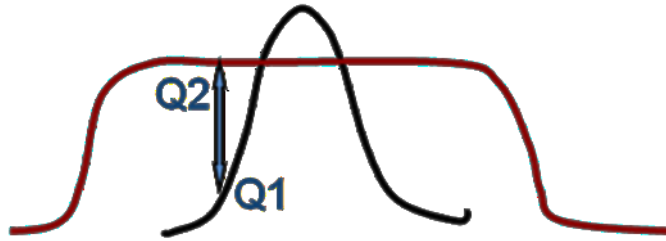
bestaan uit vaarsnelheid en locatiecoördinaten van het schip en voorts een serie gegevens over de kenmerken van het schip: lengte, breedte, vaarrichting, naam van het schip, diepgang en dergelijke. Voor de analyse zijn alleen de coördinaten, de afmetingen en de vaarrichting gebruikt. De andere gegevens zijn of minder betrouwbaar of zijn niet uniek (de naam bijvoorbeeld). In beginsel kunnen de emissies uit de scheepgrootte klassen worden bepaald met het Prelude model. Uit inleidende berekeningen is gebleken dat de emissies (in Prelude) vrijwel lineair schalen met het product van lengte en breedte van het schip. Daarom worden deze lineaire functies aanvankelijk toegepast in plaats van aparte Prelude berekeningen. Omdat hiermee de metingen niet verklaard konden worden, is in tweede instantie een verbeterde en gedetailleerde analyse van de lokale scheepvaart emissies door TNO gemaakt en in dit onderzoek gebruikt. De hieruit afgeleide NOx- en warmte emissies zijn gerapporteerd en in de modelberekeningen in dit rapport toegepast.

Ad 4. De koppeling van de scheepspieken aan afzonderlijke schepen, die uit de AIS data zijn gefilterd is nodig om een analyse te kunnen maken van diverse scheepstypen. Hiervoor worden de concentratiepieken in de tijd vergeleken met de locatie van schepen op het ARK. In de AIS data zijn de locatiegegevens en de vaarsnelheid en -richting doorgaans redelijk betrouwbaar. Echter, niet alle schepen geven AIS data en in sommige gevallen worden wel de coördinaten gegeven, maar voorts geen informatie over de kenmerken van het schip. In beginsel bevatten de AIS data informatie over vaarsnelheid, afmetingen van schip, beladingsgraad, reisbestemming, soort schip en dergelijke, maar deze worden lang niet altijd (correct) opgegeven door de schipper. Dat maakt de analyse van AIS lastiger en daarom is de analyse uitgevoerd op alleen die schepen, waarvan de afmetingen, vaarsnelheid en coördinaten van bekend zijn. Binnen de randvoorwaarden van dit project is het niet mogelijk om meer uitgebreide analyse van de scheepsdata uit te voeren. Een analyse op individuele scheepspieken is mede daarom niet erg zinvol, wel op de statistiek ervan. Indien per scheepsklasse (al of niet in combinatie met een weerklasse) voldoende scheepspassages zijn geregistreerd, kan voor zo'n subset aan metingen wel een analyse gemaakt worden. Er wordt dan vanuit gegaan dat de statistiek van zo'n subset correct is, hoewel de individuele scheepspieken niet goed te duiden zijn.

Ad 5. De modelberekeningen worden uitgevoerd met het STACKS rekenhart, versie 2014.1. Dit model berekent per uur de bijdrage van de scheepvaart, door uit te gaan van een lijnbronbenadering, conform de beschrijving in het Paarse boekje (hoofdstuk 5). Een lijnbron kan wiskundig worden ingebouwd door de normale Gaussische formulering toe te passen met een "correctie" op de bronterm (de emissie dus):

$$Q_2 = Q_1 \frac{\sigma_y \sqrt{2\pi} \cdot \left(\operatorname{erf}\left(\frac{b-y}{\sigma_y \sqrt{2}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{b+y}{\sigma_y \sqrt{2}}\right) \right)}{4b \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \quad [1]$$

Waarin Q1 en Q2 de bronterm en de gecorrigeerde bronterm voorstellen (zie figuur 1) en b de effectieve breedte loodrecht op de wind. De afstand tot de pluimas is gegeven door y.



Figuur 1 Correctie op de bronterm bij toepassing van een lijnbron als puntbron

Een lijnbronbenadering is niet geschikt voor NO_2 berekeningen, daarom wordt NO_2 berekening uitgevoerd voor een normaal puntbronmodel, waarbij de emissie-per schip als invoer wordt gebruikt en in plaats van de normale windsnelheid de vectorieel opgetelde wind- en vaarsnelheid. Deze laatste wordt tevens gebruik voor de berekening van de pluimstijging.

Ad 6. Bij aanvang van het project is al aangegeven, dat voor de binnenvaart twee parameters onvoldoende bekend zijn: de mate van pluimstijging en de afmetingen van de instantane pluimen. De focus bij de analyse en de modelberekeningen ligt daarom op deze twee parameters. Op basis van de metingen worden voorstellen besproken om deze aan te passen. De instantane pluimafmetingen zijn af te leiden uit de metingen van afzonderlijke NO_x pieken. De mate van pluimstijging is niet direct uit de metingen af te leiden (de pluimhoogte wordt immers niet gemeten), maar getracht is deze zodanig te schalen dat het concentratie-profiel met de afstand redelijk beschreven kan worden. Immers, voor een koude (grond)bron is het verval van concentraties met de afstand anders dan voor hogere en/of koude pluimen.

Ad 7. In het projectvoorstel is aangegeven, dat op basis van de uitkomsten van de analyses een formulering gegeven zal worden voor een SRM4 model. SRM4 is dan een modelvorm, analoog aan SRM2. In SRM2 worden voor snelwegen eenvoudige functies aangenomen voor de dispersie en de NO_2 vorming, voor een belangrijk deel gefit op de uitkomsten van SRM3. Voor scheepvaart komt er dan een dimensie bij, namelijk de pluimstijging door de warmte-inhoud van de uitlaatgassen van de schepen. Zoals bij ad 6 al is opgemerkt, wordt de dispersie met de afstand significant anders als er sprake is van warmte-inhoud van de rookpluimen.

4 SCHEEPSBIJDAGEN IN CONCENTRATIES

Uit de meetdata worden de kenmerkende waarden van de individuele pieken afgeleid. Dat gaat op de volgende wijze:

De tijdreeks aan NO_x en NO₂ metingen wordt eerst gefilterd, zodat de achtergrondconcentraties worden verwijderd en alleen de bijdragen van de individuele schepen overblijven. Daartoe worden eerst negatieve concentraties op nul gezet en wordt er glijdend gemiddeld over 30 seconden (15 waarden) voor station 1, 60 seconden voor station 2 en 120 seconden voor station 3. Dit is nodig om de peak-to-mean verhouding te verbeteren en dus het ruisniveau te verminderen. Nadeel hiervan is dat er enigszins piekverbreding optreedt, maar door de middelingstijd per station verschillend te laten zijn, wordt dit beperkt. Vervolgens wordt het 20-percentiel van deze gemiddelde waarden bepaald. Dit wordt als achtergrondwaarde voor en na de piek gehanteerd. Door het niveau dat hoort bij dit 20-percentiel af te trekken van het oorspronkelijk signaal worden de pieken verkregen. Deze pieken kunnen afkomstig zijn van schepen (bij een gunstige windrichting) maar ook van wegverkeer of onbekende bronnen. Ook is het mogelijk dat er pieken van schepen op de Vecht (ten oosten van de meetlocaties) worden gemeten. Door per station een windrichtingseis op te leggen, wordt bepaald of het een schip op het ARK betreft of niet. Hiervoor wordt de windrichting van station 1 gebruikt, deze wordt voor dit doel glijdend gemiddeld over 4 minuten. In tabel 1 is aangegeven welke windrichtingssectoren zijn gekozen. Een windsnelheidseis is niet opgelegd.

Tabel 1 Windrichtingsgrenzen om scheepsbijdrage op het ARK te bepalen.


station	windrichting 1	windrichting 2
1	210	350
2	210	340
3	220	335

Er zijn ook pieken die binnen de windrichtingseisen vallen en waarbij een schip kon worden geïdentificeerd, maar waarvan de AIS data te weinig unieke informatie gaf over welk type schip het betrof. In dat geval is de piek wel gerapporteerd als afzonderlijke (scheeps) piek, maar kan niet in de modelvalidatie per scheepsklasse worden gebruikt.

Er zijn ook pieken die helemaal niet aan schepen gekoppeld kunnen worden; deze worden niet als individuele piek gerapporteerd, maar worden wel opgenomen in de uurgemiddelde concentraties, die aan bronnen worden toegeschreven.

De resultaten van de piek-analyse worden op 4 niveaus weggeschreven:

- 1 de scheepspieken (zoals hierboven beschreven), per piek
- 2 de uurgemiddelde concentraties, NO_x, NO₂, ozon en andere parameters afgeleid uit pieken, die a) aan schepen kunnen worden gekoppeld; b) die niet aan afzonderlijke schepen kunnen worden gekoppeld, maar wel binnen de windrichtingssector van dat meetstation vallen en dus geacht worden afkomstig te zijn van schepen (zonder AIS identificatie) en c) die gemiddeld zijn over alle pieken, of ze nu wel of niet aan schepen en windrichting kunnen worden gekoppeld. Deze laatste is meer ter documentatie om later te bijvoorbeeld te kunnen nagaan of er sprake is van andere interfererende bronnen
- 3 de gedetailleerde gegevens per piek waaruit de Gaussische fit van is afgeleid. Deze bestanden zijn als hulp achteraf bedoeld, als er onverklaarbare waarden in de files met uurgemiddelde waarden of de files met de piekinformatie staan

- 
- 4 de afzonderlijke scheepsinformatie per piek (zie punt 1) is gegeven in aparte bestanden, die gebruikt worden om de modelruns mee te voeden. Deze bestanden bevatten in principe informatie die steeds spoort met de informatie die in de bestanden met gedetailleerde gegevens per piek staan. In enkele gevallen zijn deze laatste bestanden met de hand aangepast, omdat er records in voor kwamen die zeer grote waarden voor de instantane pluim bevatte; het format was dan niet leesbaar voor de vervolg bewerkingen. Het betreft hier dan een enkel tiental records op een totaal van enkele duizenden.

Deze bestanden zijn gemaakt voor NO_x en voor NO₂ afzonderlijk. Dit is zo opgezet dat de NO_x en NO₂ synchroon lopen zodat de NO₂ en NO_x concentraties aan elkaar gekoppeld kunnen worden en conclusies getrokken kunnen worden over de omzetting van NO_x naar NO₂.

5 METEODATA

5.1 Beschikbare data op locatie

In de rapportage over de meetdata is gedocumenteerd welke data er op welke locatie is gemeten. Voor de modelberekeningen is vooral gebruik gemaakt van de metingen met de 3D sonic. Deze geeft noodzakelijke informatie over de wind, de stabiliteit van de atmosfeer en indirect over de ruwheid van het terrein. Deze laatste is nodig om goede dispersie berekeningen te kunnen uitvoeren. Om een koppeling te maken van concentratiepieken aan scheepslocaties is de windrichting van het eerste station gebruikt. Deze meetmast is 6 m hoog (effectief 3 a 4 m, na aftrek van de terreinhoogteverschillen) en geeft voor windrichtingen uit de richting van het ARK betrouwbare data; voor andere windrichtingen (noorden- en zuidenwind) kan hiervan geen gebruik gemaakt worden vanwege de obstructie van bomen.

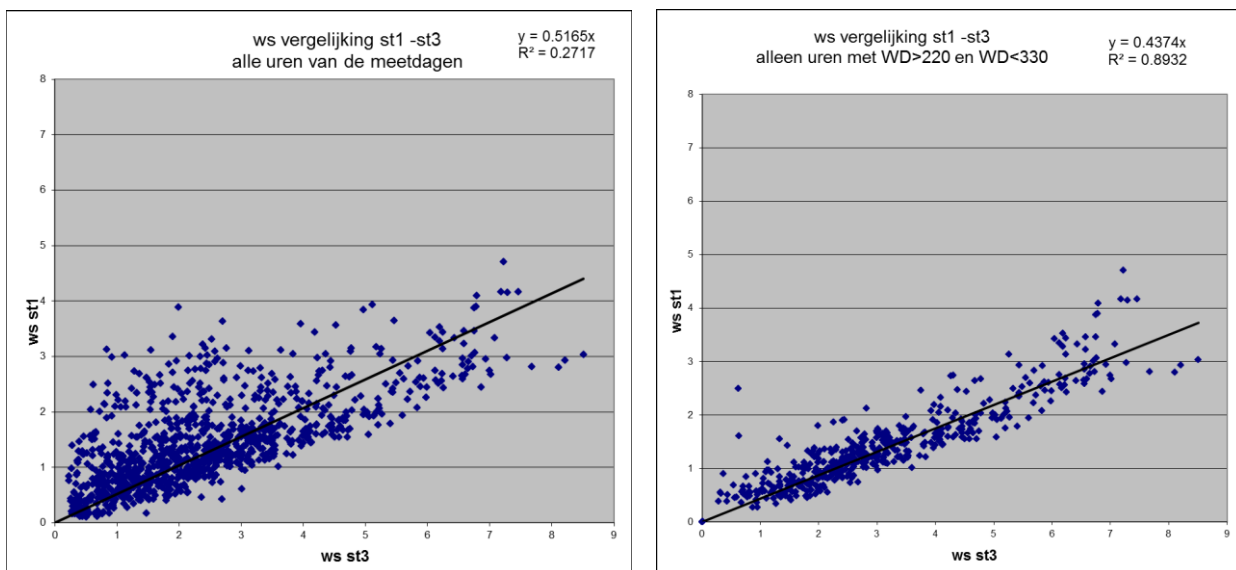


Figuur 2 Positie van meetstation 1, vlak naast het ARK

5.2 Dataprocessing

De relevante data van de sonic omvatten: de u, v en w componenten van de wind, de waarden van u^* , Monin-Obukhov lengte en de heatflux. De gegevens worden gelezen; de windsnelheid en windrichting berekend en waarden worden naar uurgemiddelden omgerekend. Dat gebeurt door de heatflux en de u^* waarden over een uur te middelen en dan de Monin-Obukhov lengte hieruit te berekenen (de door de sonic afgegeven Monin-Obukhov lengte wordt dus niet gebruikt). Ook de windrichting wordt per uur berekend door de oost-west en de noord-zuid componenten te middelen en dan de windrichting opnieuw te berekenen. De berekende waarden worden in aparte bestanden weggeschreven om als invoer voor de modelberekeningen te worden gebruikt.

Bij het vergelijken van de windsnelheid op het eerste meetstation (dicht bij het ARK) en het derde meetstation (de 3D sonic) bleken de windsnelheden sterk te verschillen. In figuur3 is de vergelijking gegeven voor alle geldige uren en voor alleen die uren dat de windrichting een redelijk ongestoorde aanstroming garandeert.



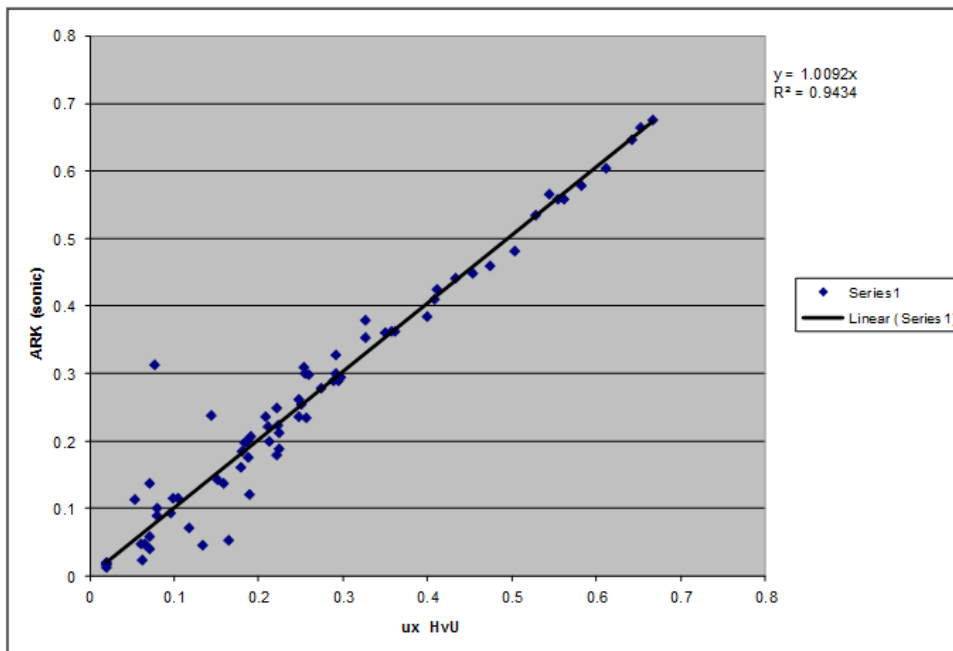
Figuur 3 Windsnelheden, gemeten op station 1 en 3: effect van obstructie door bomen, huizen in de nabijheid van het meetstation (linker beeld). Station 1 geeft lagere windsnelheden door de bomen langs het ARK (factor 2, rechter beeld)

Uit deze analyse blijkt dat de windsnelheid op station 1 ruwweg een factor twee lager is dan op station 3. De metingen op station 3 zijn al eerder vergeleken met die van het KNMI station Schiphol en die bleken goed overeen te komen. Daarom is als werkhypothese aangenomen dat de bomenrijen langs het ARK het windveld sterk beïnvloeden. Dat betekent dat het transport van rookpluimen van schepen naar het eerste station met een lagere windsnelheid gemodelleerd moet worden. Bij de modelberekeningen is uitgegaan van de meteo metingen van de 3D sonic op station 3 en deze meetwaarden zijn vervolgens aangepast voor de meetlocaties 1 en 2. De windsnelheden voor de NOx modelberekeningen voor station 1 zijn door 2 gedeeld en voor station 2 met 25% verminderd. Er wordt vanuit gegaan dat op station 2 de windobstructie nog licht merkbaar zal zijn. Binnen het kader van dit project is het niet mogelijk deze effecten grondiger uit te werken; gezien alle verdere onzekerheden, lijkt dit aan aanvaardbare aanpak.

5.3 Synoptische data Schiphol

De meteorologische metingen op locatie bevatten veel informatie, maar niet alle gegevens zijn beschikbaar om het verspreidingsmodel in diverse modes te kunnen runnen. Daarom zijn de meteorologische data aangevuld met de synoptische meetgegevens van het KNMI station Schiphol, dat op minder dan 20 km afstand is gelegen. De gegevens die aanvullend zijn betreffen bewolgingsgraad en globale zoninstraling. De overige gegevens, zijn gebruikt als check op de data die op locatie zijn verzameld. Een belangrijke check is uitgevoerd op de gemeten windrichting en – windsnelheid.

Om de ruwheidslengte van het terrein te bepalen is gebruik gemaakt van de u^* waarden die met de sonic zijn bepaald. De u^* waarden kunnen ook berekend worden met het schema van Van Ulden en Holtslag, indien de ruwheid bekend is. Door deze berekening met verschillende ruwheidslengtes te bepalen en te vergelijken met de gemeten u^* waarden, wordt de ruwheidslengte gevonden, zie figuur 4.



Figuur 4 Waarden van u^* , afgeleid van Schiphol (x-as), vergeleken met u^* gemeten met de sonic op station 3: afgeleide ruwheid blijkt 3 cm te zijn

6 DATA ANALYSES

6.1 AIS data

Uit de signalen van de AIS zijn de relevante scheepskenmerken afgeleid en is een analyse gemaakt om afzonderlijke schepen te koppelen aan afzonderlijke gemeten NO_x (en NO₂) pieken.

AIS uitgangsgedata zijn verkregen van RIVM, die een bestand welwillend ter beschikking heeft verkregen van Marin traffic en later aangevuld met door TNO geanalyseerde data. Deze data zijn gefilterd, zodanig dat alleen informatie wordt bewaard die betrekking heeft op het stuk van ARK die voor deze studie van belang is en voor de dagen dat er zinvolle metingen zijn vergaard. Een voorbeeld hiervan is hieronder gegeven.

Tabel 2 Voorbeeld van de AIS gegevens

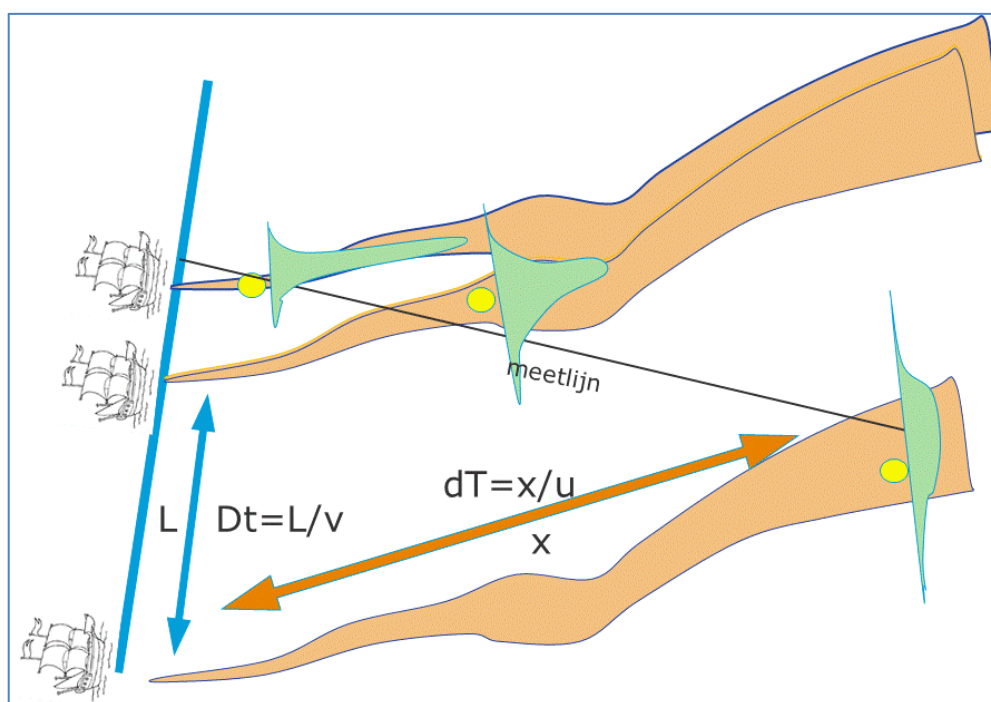
datum	tijd	code schip	snelheid	richting	afstand	X	Y	mode	lengte	breedte	diepgang	type
08 04	07 58 23	244660823	6.1	189.5	710	129215	472349	0	50	7	0.3	79
08 04	07 58 25	244690985	8.7	189.2	601	128990	471045	15	85	9	1	79
08 04	07 58 34	244660823	6.1	189.8	739	129209	472309	0	50	7	0.3	79
08 04	07 58 36	244690985	8.8	189.1	555	128985	471017	15	85	9	1	79
08 04	07 58 44	244660823	6.1	189.5	775	129201	472264	0	50	7	0.3	79
08 04	07 58 46	244690985	8.8	189.1	509	128979	470983	15	85	9	1	79
08 04	07 58 54	244660823	6.1	189.5	807	129194	472220	0	50	7	0.3	79
08 04	07 58 54	244690985	8.8	189.3	463	128974	470952	15	85	9	1	79
08 04	07 59 05	244660823	6.1	189.1	835	129186	472175	0	50	7	0.3	79
08 04	07 59 05	244690985	8.8	189	417	128972	470923	15	85	9	1	79
08 04	07 59 15	244660823	6.1	187.9	866	129179	472130	0	50	7	0.3	79
08 04	07 59 17	244690985	8.8	189	366	128965	470894	15	85	9	1	79
08 04	07 59 25	244660823	6.1	188.7	902	129170	472081	0	50	7	0.3	79
08 04	07 59 25	244690985	8.9	189.3	324	128960	470859	15	85	9	1	79
08 04	07 59 34	244690985	8.9	189	278	129163	472040	15	85	9	1	79
08 04	07 59 46	244690985	8.9	189.1	231	129156	471995	15	85	9	1	79
08 04	07 59 54	244690985	8.8	189.3	185	129148	471950	15	85	9	1	79
08 04	08 00 01	244050337	7.4	9.4	898	129141	471905	0	98	10	0.4	79
08 04	08 00 04	244690985	8.8	189	140	129001	470845	15	85	9	1	79
08 04	08 00 10	244050337	7.5	8.5	860	129134	471860	0	98	10	0.4	79
08 04	08 00 18	244690985	8.7	190.2	90	129007	470882	15	85	9	1	79
08 04	08 00 24	244690985	8.8	190.4	53	129126	471810	15	85	9	1	79
08 04	08 00 30	244050337	7.5	10.5	777	129119	471769	0	98	10	0.4	79
08 04	08 00 32	244710331	7.3	190.4	919	129021	470963	5	-99	-99	-99	-99
08 04	08 00 34	244690985	8.7	190.9	33	129271	472613	15	85	9	1	79
08 04	08 00 36	244710331	7.3	190.5	908	129110	471725	5	-99	-99	-99	-99
08 04	08 00 38	244710331	7.3	190.3	896	129269	472602	5	-99	-99	-99	-99
08 04	08 00 38	244050337	7.6	10.4	744	129267	472591	0	98	10	0.4	79
08 04	08 00 42	244710331	7.3	190.5	885	129027	470994	5	-99	-99	-99	-99
08 04	08 00 44	244710331	7.3	190.7	873	129265	472580	5	-99	-99	-99	-99
08 04	08 00 46	244690985	8.7	191	61	129263	472569	15	85	9	1	79
08 04	08 00 46	244710331	7.3	190.6	862	129101	471681	5	-99	-99	-99	-99
08 04	08 00 50	244050337	7.5	10.1	701	129261	472557	0	98	10	0.4	79
08 04	08 00 50	244710331	7.3	190.5	850	129034	471036	5	-99	-99	-99	-99

De snelheid is gegeven in knopen (dit is 1.852 km/uur), de mode geeft aan of het schip vaart, stilligt of andere dingen doet, maar bleek in praktijk niet erg betrouwbaar. Het type schip geeft aan of het bijvoorbeeld een tanker, bulkschip betreft, maar meestal werd een niet-informatieve code afgegeven, deze is dus niet bruikbaar. De 'afstand' is een door RIVM geschatte afstand van het schip tot de meetlijn (lijn over de meetstations waar het ARK kruist). Deze waarde is in dit rapport niet gebruikt.

In het AIS bestand komen overigens soms opmerkelijke getallen voor: er zijn schepen waarbij voor de vaarsnelheid over enige tijd steeds nul is gegeven. Wat we hieruit moeten afleiden is niet duidelijk. En tweemaal is een schip geïdentificeerd met een lengte van meer dan 550 m. De AIS data zijn in tweede instantie aangevuld en gecorrigeerd door TNO met onderbouwde schattingen van de NO_x emissie en de warmte uitstoot.

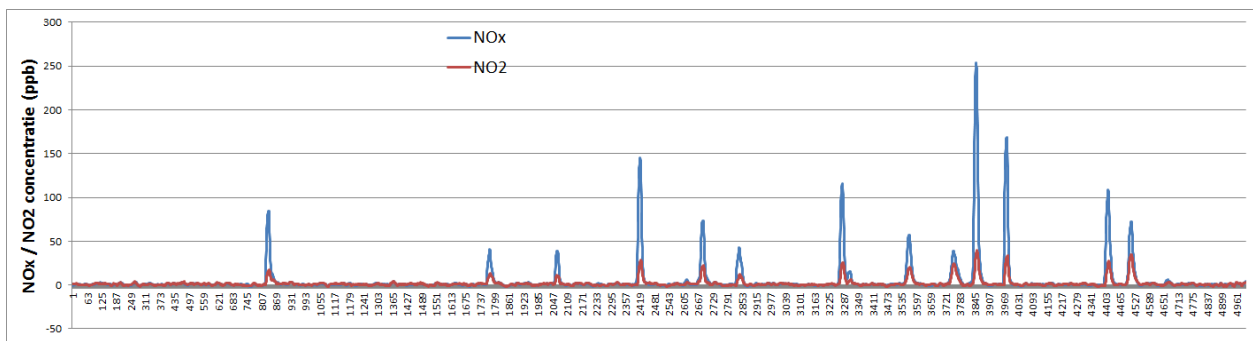
6.2 Scheepsdata en concentratiepieken koppelen

De analyse methode wordt geïllustreerd in figuur 5.



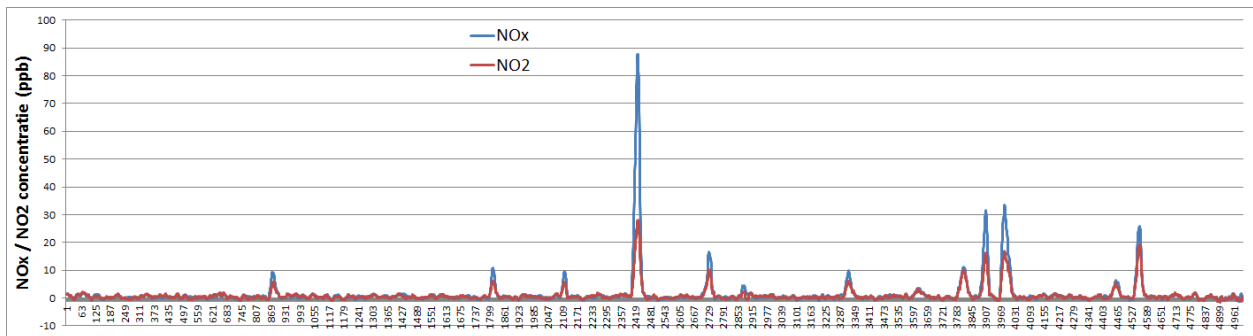
Figuur 5 Schematische voorstelling analyse methodiek om concentratiepieken aan schepen te koppelen, zie verder de tekst

De eerste stap is het identificeren van de concentratiepieken in de meetreeksen. Uit de gemeten concentraties is eerst in excel bepaald wat de achtergrondconcentratie van NO_x en NO₂ is en wat de piekconcentraties zijn, die afkomstig kunnen zijn van lokale bronnen. Op station 1 (het dichtst bij het ARK) is dit geen lastige opgave; de pieken zijn duidelijk te onderscheiden van de achtergrond, zie figuur 6.



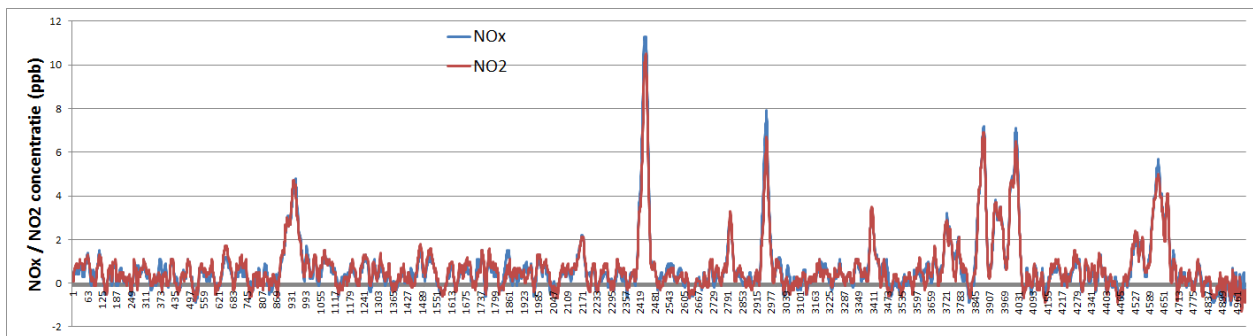
Figuur 6 NOx en NO₂ concentraties op station 1. (8 april, 3-6 uur), na aftrek van de achtergrondconcentraties

Voor station2 wordt de piekanalyse al iets lastiger, zie figuur 7. De piekconcentraties zijn lager waardoor de pieken niet altijd meer goed van de achtergrond zijn te scheiden.




Figuur 7 NOx en NO₂ concentraties op station 2. (8 april, 3-6 uur), na aftrek van de achtergrondconcentraties

De piekanalyse wordt voor station 3 zo gecompliceerd dat een duidelijke piekherkenning en dus koppeling aan schepen alleen in een heel beperkt aantal gevallen mogelijk is zie figuur 8.



Figuur 8 NOx en NO₂ concentraties op station 3. (8 april, 3-6 uur), na aftrek van de achtergrondconcentraties


Als gevolg van het grote verschil in piekconcentratie op de verschillende stations was het nodig om voor het scheiden van de pieken van de achtergrond per station 1, 2 en 3 andere instellingen te gebruiken.



Bij de piekscheiding van de achtergrond is voor elke meetwaarde aangegeven of het een piek betreft en of niet: de data krijgen een 'pieklabe' mee per meetwaarde. De plots van figuur 6, 7 en 8 laten zien wat het meetsignaal in NO_x en NO₂ is, na aftrek van de achtergrond. De keuze van de parameters is zodanig dat het gemiddelde signaal in de residuen waar geen piek is, ongeveer nul is: dit is dan het ruisniveau. Op punten waar er relatief veel pieken zijn, kan het voorkomen dat er feitelijk iets te veel achtergrond van de pieken is afgetrokken. Dit is dan zichtbaar in het signaal doordat de start en het eind van een piek negatieve concentraties te zien geeft, zie bijvoorbeeld, het signaal op station3, de laatste pieken. Bij elke piek wordt daarom het concentratieniveau zodanig gecorrigeerd dat de laagste waarde in de piek precies nul is; alle andere waarden worden hiermee gecorrigeerd.

De volgende stap is het opzoeken van een schip uit het AIS bestand, dat deze piek veroorzaakt kan hebben. Op basis van het 4 minuut glijdend gemiddelde windrichtingssignaal en de hierbij behorende windsnelheid (ook 4 minuut gemiddeld!) wordt bepaald op welke plaats op het ARK het schip van een bepaalde piek verwacht wordt. Dit windsnelheidssignaal wordt gemiddeld over de breedte (in s) van de piek. Deze locatie wordt naar het noorden en naar het zuiden uitgebreid met een afstand (en dus tijd, rekening houdend met de vaarsnelheid van schepen) zodat een 'zoekgebied' ontstaat. Dit zoekgebied is voor station 2 groter dan voor station 1 en voor station 3 weer groter. Voor station 1 is de afstand maximaal 250 m. Hierbij wordt tevens rekening gehouden met de windrichting zelf; immers bij een noordelijke of zuidelijke wind (buiten de sector 225 en 325 graden) moet deze afstand groter zijn dan wanneer de wind loodrecht op het ARK staat. Wanneer de windrichting groter is dan 325 of kleiner dan 225 dan wordt deze waarde gekozen, binnen deze windrichtingsgrenzen wordt lineair geïnterpoleerd van 150 → 250 m. Voor station 2 en 3 is een afstand gebruikt die respectievelijk tweemaal en driemaal zo groot is. Wordt in dit afstandsinterval op het ARK één schip gevonden dan wordt verondersteld dat de piek door dit schip is veroorzaakt. Wordt geen schip gevonden in dit interval, dan wordt de piek niet verder gerapporteerd. Worden meerdere schepen gevonden dan wordt de piek ook niet verder gerapporteerd. Indien een piek maar één maximum kent, dan is deze procedure eenduidig. Indien een piek die aan schip gekoppeld kan worden meerdere (sub)pieken kent, is de methode minder eenduidig. Het kan daarom voorkomen dat één schip aan meerdere pieken wordt gekoppeld. Deze worden niet geskipt. Bij de piekanalyse is een piek verder in de breedte nog uitgebreid naar weerszijden met een serie metingen, rekening houdend met de mogelijkheid dat er om de primair gevonden piek nog kleinere subpieken kunnen zijn. Ook is dit gedaan omdat in de piekidentificatie de pieken stelselmatig iets te smal werden gedefinieerd, omdat een punt in de piek pas als piek wordt aangemerkt als deze significant boven de achtergrond uitsteekt.

De aldus verkregen pieken (bronbijdragen) met schepen worden in een volgende analyseslag bewerkt, zodanig dat per piek de gemiddelde concentratie, de maximale concentratie, de sigma-waarde (in tijd, dus in seconden) en de integraal (in ppb.s) worden bepaald. Uit de sigma-waarden in seconden worden de sigma-waarden in m berekend, door de vaarsnelheid en locatie van het betreffende schip te beschouwen. De snelheidscomponent die loodrecht op de windrichting staat is dan de snelheid (in m/s) waarmee de sigma-waarde in tijd wordt vermenigvuldigd. De sigma-waarde kan op twee manieren uit de pieken afgeleid worden: door berekening van het tweede moment (de standaarddeviatie) of door de meetdata te fitten op een Gaussische functie. Dit laatste gebeurt met een brute force methode: er wordt eenvoudig een hele set van mogelijke combinaties van waarden voor midden, sigma en integratieconstante doorgerekend en de waardenset met de kleinste som-der-kwadraten van de afwijkingen tussen meet- en rekenwaarden, is de gezochte fit. De hierbij behorende sigma-waarde is de waarde die wordt gerapporteerd. Omdat het om een groot (potentieel) aantal pieken gaat, is het niet praktisch om visueel te beoordelen of de fit redelijk is of niet. Daarom wordt ook de correlatiecoëfficiënt van deze fit beschouwd; de waarde ervan is een goede indicatie van de overeenkomst van de piek met de gauss-vorm.



Ook kan het voorkomen dat twee of meer schepen zo dicht bij elkaar varen dat de pieken in elkaar overlopen. Om dit punt te ondervangen wordt per piek nagegaan hoeveel en welke schepen verantwoordelijk zouden kunnen zijn voor deze piek. Indien er dan één schip gevonden is (binnen op gegeven marges), wordt deze piek aan dit schip toegekend. Indien er meerdere schepen worden gevonden, dan wordt deze piek niet verder als een afzonderlijke piek gerapporteerd en geskipt voor de verdere analyse. Indien er geen schepen gevonden zijn binnen het zoek-window van de routine die de AIS data analyseert, dan wordt deze piek ook niet verder gerapporteerd en voorts buiten de analyses gehouden.

Van de gevonden pieken die aan schepen zijn gekoppeld worden de volgende parameters berekend:

- tijdstip
- afstand tot het schip
- de integraal (ppb.s)
- gemiddelde van scheepspiek
- maximale concentratie
- de standaarddeviatie van de piekbreedte (in m) berekend als het 2^e moment
- de standaarddeviatie van de piekbreedte (in m) berekend door de piek te fitten op een normale verdeling, tevens wordt de correlatiecoëfficiënt van deze fit gegeven.
- de windrichting en – snelheid behorend bij deze piek
- de ozonconcentratie in de piek
- de scheepskenmerken: (AIS code, lengte, breedte en snelheid van het schip).

De afstand van schip tot gemeten piek wordt berekend uit de windrichting en windsnelheid. Voor station 1 wordt tevens rekening gehouden met de vaarrichting. Schepen houden doorgaans rechts op het ARK en varen gemiddeld 20 m uit het midden van het ARK zodat de afstand tot station 1 (ongeveer 50 m van het ARK) significant beïnvloed wordt door de vaarrichting.

De resultaten van de piek-analyse worden in enkele bestanden weggeschreven, zie hoofdstuk 4. Voorbeelden hiervan zijn hieronder gegeven.

Tabel 3 Resultaten piek analyse per piek

st	dag		tijd		afstand	integraal	gempiek	max-conc	cor-conc	2emom	hoek	ws	ozon	code	L	B	D	snelh	
1	3	26	2	29	32	84	1353	52	34	-1	28.84	305.65	0.81	48.37	2.45E+08	80	8	0	-3.19
1	3	26	3	59	34	38	1550	60	30	-2	38.62	302.75	0.76	46.72	2.44E+08	70	8	0	4.12
1	3	26	4	16	22	102	966	91	25	-4	91.64	319.1	0.82	40.06	2.45E+08	19	10	2.3	-4.01
1	3	26	4	28	32	38	1748	62	28	0	30.84	302.41	0.78	37.19	2.12E+08	110	14	3.4	3.19
1	3	26	4	34	8	82	1474	74	19	-1	55.04	304.01	0.74	37.42	2.45E+08	110	12	0.2	-3.6
1	3	26	5	1	42	107	2827	122	35	-4	102.92	321.53	0.7	35.65	2.11E+08	111	12	2.4	-4.22
1	3	26	5	31	10	96	1206	132	37	-6	157.98	315.84	0.81	27.82	2.12E+08	110	11	2.2	-3.6
1	3	26	5	34	40	132	133	164	3	-1	225.43	333.55	0.79	26.64	2.45E+08	177	11	0.3	-4.27
1	3	26	5	45	12	45	535	159	13	-3	197.55	313.43	0.71	26.56	2.45E+08	105	10	0	4.12
1	3	26	5	57	10	81	395	90	5	-2	91.71	302.21	0.61	25.76	2.45E+08	80	8	0	-3.5
1	3	26	5	59	24	78	311	98	5	-3	128.92	299.18	0.57	25.84	2.45E+08	80	8	0	-3.5
1	3	26	6	2	58	82	555	258	25	-15	424.31	304.08	0.62	25.84	2.12E+08	86	11	0	-4.63
1	3	26	7	9	30	167	118	601	24	-13	1127.29	344.47	1.28	48.75	2.45E+08	-99	-99	-99	3.81
1	3	26	8	20	2	77	1289	32	21	2	31.68	297.16	0.33	55.02	2.45E+08	57	7	0.3	-3.6
1	3	26	10	20	8	96	2960	51	36	2	45.77	230.38	0.94	61.49	2.45E+08	-99	-99	-99	-4.27
1	3	26	10	21	50	97	2066	19	31	3	39.36	220.4	0.98	61.15	2.45E+08	-99	-99	-99	-4.22
1	3	26	10	40	0	56	1977	36	26	0	27.86	221.29	0.75	60.46	2.45E+08	110	11	0	4.17
1	3	26	10	43	0	75	345	63	10	-1	58.86	251.67	0.81	60.38	2.44E+08	105	12	1.5	-3.7
1	3	26	10	54	24	81	879	104	15	-4	107.04	243.72	0.73	59.61	2.44E+08	-99	-99	-99	-4.12
1	3	26	10	58	44	128	990	200	73	-20	314.7	340.26	2.52	58.91	2.11E+08	173	10	1.1	3.86
1	3	26	12	26	54	137	2835	73	40	-2	41.21	341.38	0.95	63.75	2.45E+08	110	12	0	3.96
1	3	26	12	29	2	82	849	23	16	0	36.72	330.74	1.18	64.08	2.47E+08	20	4	1.6	4.53
1	3	26	13	14	18	243	355	51	7	-1	52.96	349.03	1.05	58.32	2.45E+08	-99	-99	-99	4.01
1	3	26	13	17	0	157	2346	72	43	-3	43.73	338.57	1.1	58.06	2.45E+08	60	10	0	-3.09
1	3	26	13	19	52	43	955	58	27	-3	51.67	311.48	0.93	57.61	2.45E+08	40	6	0.1	4.01
1	3	26	13	25	32	32	325	83	9	-4	102.32	285.8	0.7	57.41	2.45E+08	-99	-99	-99	3.65
1	3	26	13	26	36	30	61	230	6	-6	418.27	259.35	0.8	57.28	2.45E+08	-99	-99	-99	3.65
1	3	26	13	30	44	79	888	104	25	-4	105.15	245.57	0.61	57.4	2.45E+08	80	7	0.3	-3.86
1	3	26	13	32	24	36	22	523	5	-4	992.98	298.4	0.65	56.01	2.45E+08	105	12	0	3.5
1	3	26	13	34	20	31	43	594	7	-5	1112.47	246	0.78	55.64	2.45E+08	105	12	0	3.55
1	3	26	13	53	50	32	761	46	27	-3	31.58	288.07	0.92	61.57	2.45E+08	75	10	1.1	3.19
1	3	26	13	56	52	34	1048	49	20	-1	29.57	294.23	1.02	61.16	23712644	86	8	0.3	5.09
1	3	26	14	12	40	43	1480	66	38	-4	51.74	310.74	1.09	61.27	2.45E+08	77	8	1	4.68
1	3	26	14	16	32	42	1619	63	34	-3	42.89	309.93	0.7	61.28	2.05E+08	57	8	0.1	4.48
1	3	26	14	18	44	30	884	54	20	-3	36.67	257.77	0.99	61.13	2.45E+08	134	11	0	5.09
1	3	26	14	21	26	84	738	115	25	-6	130.97	305.97	1.07	61.93	7395039	57	7	0	-3.96
1	3	26	14	32	4	89	3215	68	57	-2	55.2	310.15	0.95	62.89	2.45E+08	-99	-99	-99	-3.55
1	3	26	14	36	58	90	729	118	28	-6	140.9	311.31	1.29	62.72	2.45E+08	86	10	0.8	-3.09
1	3	26	14	39	14	109	1541	81	43	-5	78.59	325.82	1.37	62.34	2.45E+08	39	5	0.2	-2.73
1	3	26	14	43	58	72	199	32	22	-2	44.02	284.78	1.11	62.14	2.45E+08	39	5	0.3	-3.91
1	3	26	14	47	30	104	387	131	20	-4	172.87	320.07	1.09	61.85	2.45E+08	85	9	25.5	-4.42
1	3	26	14	50	2	116	37	638	6	-4	1205.69	328.58	1.22	62.44	2.45E+08	116	8	1	-4.22
1	3	26	15	6	52	71	186	29	5	0	28.18	280.16	1.15	63.2	2.45E+08	55	7	0	-4.06
1	3	26	15	9	42	83	1049	22	45	-3	31.05	304.54	1.24	63.7	2.44E+08	70	8	0	-4.53
1	3	26	15	13	32	51	-16	-1677	7	-4	3438.94	224.96	0.97	63.45	2.05E+08	110	10	2	3.4
1	3	26	15	25	38	30	79	156	7	-3	250.18	259.45	0.94	63.67	2.05E+08	70	8	0.2	3.96
1	3	26	15	27	26	73	638	77	12	-3	71.04	212.61	1.17	63.69	2.05E+08	70	8	0.2	3.96
1	3	26	15	34	0	55	1408	69	37	-4	53.95	322.27	0.8	62.86	2.44E+08	110	11	0.4	3.86

In tabel 4(met uurgemiddelde concentraties) zijn achtereenvolgens gegeven:

- 1 datum (maand, dag) en tijd (uur)
- 2 aantal pieken in dat uur (met een 'pieklabel'), gekoppeld aan een schip (nuurpiek)
- 3 de uurgemiddelde concentratie van pieken, die een 'pieklabel' hebben (U_{gc} in $\mu g/m^3$)
- 4 de gemiddelde concentratie over alle residuen (dus na aftrek van de achtergrond, eenvoudig het gemiddelde van het meetsignaal in dat uur, wel of geen pieklabel); respectievelijk voor NO_x (PNO_x) en NO_2 (in het geval dat het een NO_2 bestand betreft)
- 5 de gemiddelde concentratie over alleen die pieken (met pieklabel), die aan één schip gekoppeld konden worden ($Pschip$). Dit betreft dus minder pieken dan bij de vorige twee punten (u_{gc} en PNO_x), maar de waarde ervan kan toch hoger zijn. Dit komt doordat de pieken die aan schepen zijn gekoppeld, ook gecorrigeerd zijn voor de base-line van de piek. Het komt soms voor dat het NO_x signaal negatieve waarden geeft als gevolg van de methode van piekextractie. Om te voorkomen dat de integraalwaarde dan veel te laag wordt ingeschat, wordt de base-line van de piek eerst op nul gezet. De base-line is de lijn vanaf het begin van de piek tot het einde van de

piek (die kan dus "scheef" lopen). Het zijn déze pieken waar de hele modelanalyse voor is uitgevoerd

- 6 de gemiddelde concentratie over alle residuen (dus na aftrek van de achtergrond, eenvoudig het gemiddelde van het signaal in dat uur); respectievelijk voor NO_x (NO_xWD) en NO₂ (in het geval dat het een NO₂ bestand betreft), dus gelijk aan PNO_x, maar nu binnen de windrichtingssector waarbij scheepsbijdragen mogelijk zijn (zie tabel 1)
- 7 de O₃ concentratie in dit uur
- 8 de windsnelheid, gemeten op station 1 (m/s), ongecorrigeerd. Deze is gebruikt om de koppeling te maken tussen scheepspassage en optreden van NO_x en NO₂ pieken. De waarden zijn gemiddeld over alleen de meetwaarden die met pieken corresponderen. De berekende waarden verschillen daarom iets voor station 1, 2 en 3.

Tabel 4 Resultaten piek analyse, uurgemiddelde waarden

maand	dag	uur	nuurpiek,	ugc,	PNO _x ,	Pship	NO _x WD,	O ₃	ws (st1)
4	8	1	0	0.00	1.35	0.00	0.00	18.88	1.69
4	8	2	0	0.00	1.33	0.00	0.00	13.88	1.75
4	8	3	0	0.11	6.25	0.00	0.24	21.50	2.31
4	8	4	3	2.73	2.79	1.64	1.40	21.69	2.33
4	8	5	4	3.95	3.38	3.08	1.69	23.98	2.43
4	8	6	3	2.82	1.87	2.57	0.94	27.35	1.78
4	8	7	6	3.13	3.43	2.14	1.72	23.41	1.65
4	8	8	2	4.44	4.54	0.88	2.27	25.62	1.71
4	8	9	4	7.91	3.87	4.92	1.93	22.39	1.68
4	8	10	6	5.51	3.21	4.26	1.60	23.31	1.84
4	8	11	3	3.36	2.77	1.54	1.39	28.96	2.60
4	8	12	2	1.00	1.18	0.27	0.59	35.11	2.89
4	8	13	6	4.54	4.02	4.03	2.01	29.96	2.56
4	8	14	7	5.67	3.80	4.96	1.90	28.78	2.48
4	8	15	6	2.61	1.36	2.61	0.68	27.79	2.27
4	8	16	6	3.82	3.39	2.39	1.70	31.75	2.84
4	8	17	3	1.85	2.93	0.80	1.30	34.34	2.98
4	8	18	4	7.70	6.47	3.48	3.24	31.56	2.40
4	8	19	6	5.52	3.89	5.42	1.95	27.46	1.72
4	8	20	4	8.27	5.41	7.61	2.71	33.14	1.84
4	8	21	4	6.24	5.43	3.53	2.71	27.88	1.15
4	8	22	1	9.29	9.67	2.92	4.15	30.64	1.22
4	8	23	5	6.51	4.44	4.83	2.07	18.91	0.80
4	8	24	4	7.71	1.66	7.71	0.83	15.13	0.69
4	13	1	1	1.62	1.77	0.83	0.82	15.32	0.79
4	13	2	2	3.99	3.99	1.97	1.88	15.76	0.79
4	13	3	0	0.00	0.70	0.00	0.27	17.60	1.00
4	13	4	1	0.43	0.89	0.43	0.44	20.34	1.05
4	13	5	3	2.40	2.48	2.06	1.24	24.09	1.12
4	13	6	0	0.00	0.57	0.00	0.28	28.91	1.28
4	13	7	3	3.32	1.39	3.32	0.70	23.74	1.09
4	13	8	2	3.61	3.09	2.10	1.54	21.80	0.82
4	13	9	5	3.43	2.29	2.73	1.14	20.66	0.97
4	13	10	4	3.10	2.59	2.24	1.31	26.29	1.53
4	13	11	2	2.14	1.57	1.60	0.77	31.32	1.83
4	13	12	2	2.24	2.57	0.67	1.29	32.58	1.91
4	13	13	2	2.03	1.52	1.28	0.76	34.39	1.78
4	13	14	5	2.18	1.70	1.60	0.85	28.55	1.63
4	13	15	4	3.34	3.05	2.15	1.53	30.27	1.58
4	13	16	3	1.17	1.03	1.17	0.51	33.59	2.01
4	13	17	2	0.94	0.98	0.94	0.49	33.77	1.91
4	13	18	4	3.79	3.10	2.93	1.55	31.20	1.72
4	13	19	1	1.09	1.25	0.22	0.63	37.47	1.78
4	13	20	2	6.29	5.93	2.69	2.96	33.73	1.33
4	13	21	4	4.81	2.31	3.92	1.14	30.02	0.91

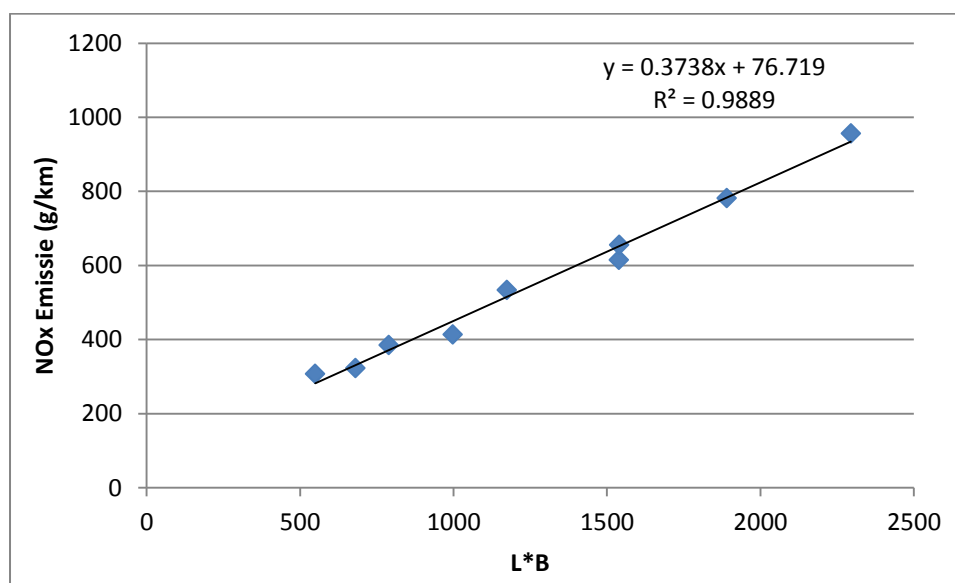
De kolom met Ugc is primair gebruikt om de met STACKS berekende bijdragen van schepen te toetsen aan metingen. Voor NO_x en NO₂ zijn aparte tabellen gemaakt, Ugc is in het NO_x bestand de scheepsbijdrage aan NO_x op de drie stations; in de NO₂ bestanden is scheepsbijdrage aan NO₂ op de drie stations. Zoals eerder aangegeven, is de gemiddelde concentratiebijdrage van station 3 niet erg bruikbaar voor modeltoetsing op afzonderlijke scheepsklassen. De koppeling aan schepen is daarbij niet het grootste probleem, maar wel de bepaling van de integraal over een piek (immers: wat is nog een piek op station 3) en dus de scheepsbijdrage in een uur. Het toetsen van berekeningen aan de waarden van NO_xWD en NO₂WD leek wel mogelijk: de totale bronbijdragen binnen een windsector over een uur. In dit laatste geval is niet gelet op de identificatie van wel/niet een piek in het NO_x signaal, eenvoudigweg alle meetwaarden (na aftrek van de achtergrond) zijn dan gemiddeld. Dit is in een tussenrapportage van dit project toegepast. Later – in deze definitieve rapportage – is niet meer gewerkt

met het bestand van uurgemiddelde concentraties. In de model analyse is alleen gebruik gemaakt van de berekende pieken die aan scheepstypen zijn gekoppeld.

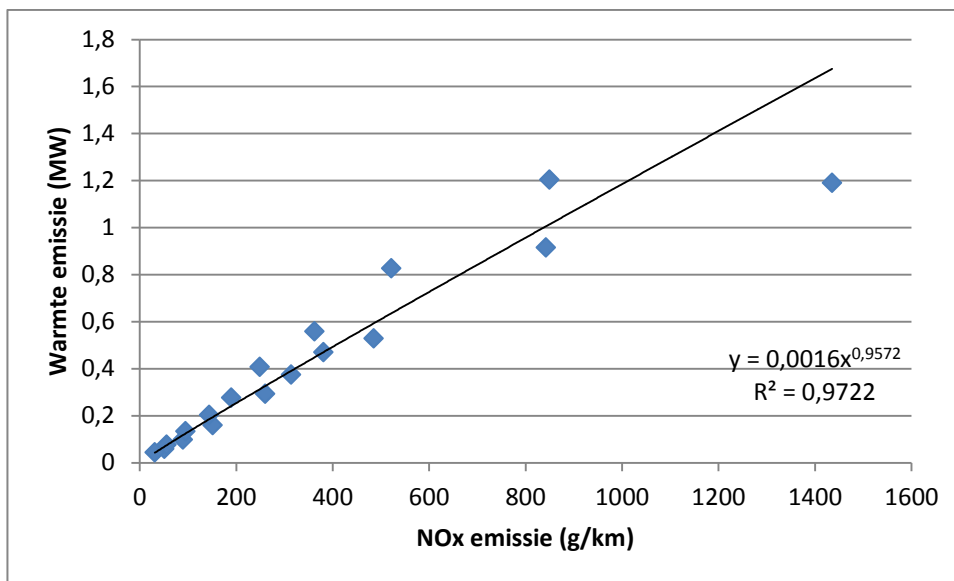
6.3 Emissies van de scheepvaart

Voor het uitvoeren van modelberekeningen met STACKS is het nodig om de emissies van de schepen, die in de piekanalyse zijn geïdentificeerd, te schatten. Voorafgaand aan de analyses van de metingen is een testberekening met STACKS gedaan op basis van scheepvaartintensiteiten die uit rapportages van Rijkswaterstaat (2009) zijn af te leiden. Deze scheepvaartintensiteiten zijn voorts onderverdeeld naar scheepsgrootteklassen en met behulp van Prelude omgezet naar emissies per km vaarweg. Voor de onderhavige analyse is een alternatieve werkwijze gevolgd, wel gebaseerd op Prelude, maar niet zodanig dat elke schip een emissie uit Prelude krijgt toegewezen. De emissies (in Prelude) schalen vrijwel lineair schalen met het product van lengte en breedte van een schip (zie figuur 9). Daarom worden deze lineaire functies toegepast in plaats van aparte Prelude berekeningen.

Ook de warmte emissie is dan met een eenvoudige functie te berekenen. Deze functies voor NO_x emissies en warmte emissie zijn in eerste instantie in het STACKS rekenhart ingevoerd en per schip gehanteerd om de emissies te bepalen. Later (en zoals in het vervolg verder is geanalyseerd) zijn beter schattingen van TNO gebruikt voor de NO_x emissies en de warmte uitstoot.



Figuur 9 De relatie tussen de NO_x emissies en het oppervlak van het schip (LxB)



Figuur 10 De relatie tussen de NOx emissie en de warmte emissie van een schip


In de loop van het project is besloten de emissies van de schepen op een meer gedetailleerde wijze te bepalen. In samenwerking met TNO is een werkwijze opgesteld om op grond van AIS gegevens en kennis over de afhankelijkheid van de emissie van vaarsnelheid, beladingsgraad, diepgang en dergelijke de emissie per schip te bepalen. Uiteindelijk zijn deze gegevens gebruikt in plaats van de Prelude uitvoer in de modelvalidatie. Een voordeel daarbij is dat het scheepstype volgens de AVV indeling direct is meegeleverd. Dat maakt dat een eigen indeling uit de lengte en breedte van het schip overbodig werd.

6.4 Overige kenmerken

Uit de AIS data is niet af te leiden waar de uitlaat van het schip zich bevindt. Voor het bepalen van de pluimstijging is dit echter wel relevant. Uit eigen waarnemingen (foto's van binnenvaartschepen op Waal en ARK) is af te leiden dat ongeveer de helft van de schepen een uitlaat bezit die zich aan de achterkant van het schip bevindt. Bij de andere helft van de schepen bevindt de uitlaat zich op de kajuit of anderszins bovenop het schip.



Figuur 11 Voorbeelden van de locatie van de uitlaat van schepen



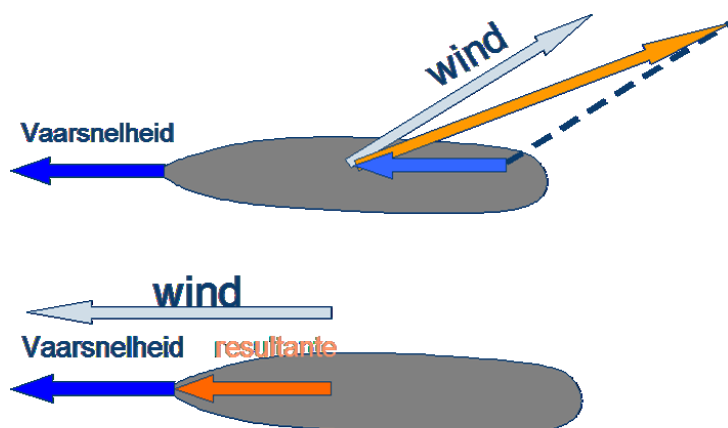
Een uitlaat op de achterzijde van het schip kan ertoe leiden dat de rookgassen van het schip onvoldoende stijgvermogen hebben om zich aan het zog van het schip te onttrekken. In dat geval kan er overwogen worden om de pluimstijging van het schip in het geheel niet in rekening te brengen. Een ander punt waarover per schip geen informatie beschikbaar is, is de hoogte van de uitlaat van het schip. Bij de modelberekeningen kan geen onderscheid gemaakt worden en gekozen is voor een vaste hoogte van 3 m. Voor de uittredesnelheid van de uitlaatgassen is een lage waarde van 1,5 m/s gekozen.

7 MODELVERGELIJKING

7.1 Opzet

Voor de modelberekeningen is uitgegaan van het rekenmodel STACKS, aangepast voor scheepvaart. In de voorstudie uit 2010 zijn de volgende aanbevelingen gegeven:

- het aantal lijnbronnen op een vaarweg wordt bepaald door het aantal scheepsklassen maal 2 (heen en teruggaande schepen)
- bij het berekenen van de pluimstijging dient rekening gehouden te worden met de vaarsnelheid indien de vaarmodus dit aangeeft. Hiervoor wordt een vectorieel opgetelde windsnelheid en vaarsnelheid (de resultante) gehanteerd (zie figuur 12)



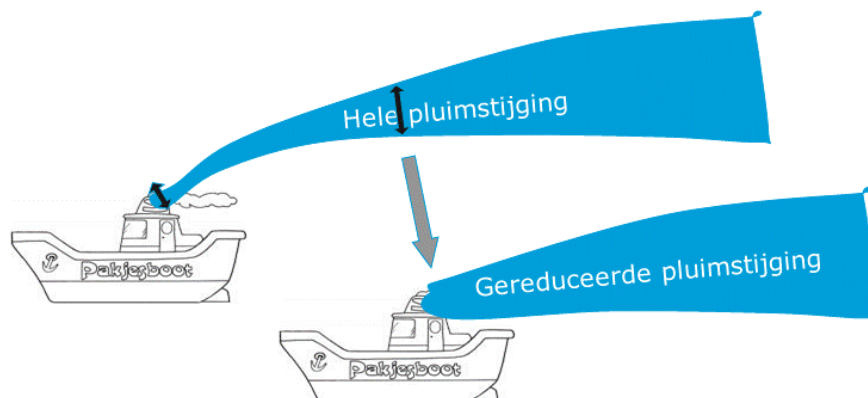
Figuur 12 Voor de berekening van de pluimstijging worden de vaarsnelheid en windsnelheid vectorieel opgeteld

- er wordt geen rekening gehouden met het effect van eventuele opbouw, dus de gebouwroutine wordt niet gebruikt. De initiële dispersie (σ_y en σ_z) heeft een onderwaarde van 0,5m
- er wordt geen impuls-pluimstijging berekend.

Deze elementen zijn in STACKS geïmplementeerd. Voorts is het model wat in- en uitvoer betreft afgestemd op de specifieke bestandsformaten van dit project. Ten slotte is het model zo ingericht dat gemakkelijk selecties van de invoer doorgerekend kunnen worden (bijvoorbeeld per scheepsklasse).

Modelberekeningen zijn steeds uitgevoerd voor elk schip afzonderlijk. Dat betekent dat voor elk uur in de meetperiode het aantal 'bronnen', dat doorgerekend moet worden, steeds verschilt. Alleen uren met geldige scheepsinformatie (dus vooral: NO_x emissie, warmte-uitstoot en vaarsnelheid van het schip moeten bekend zijn) worden doorgerekend. Tevens worden de berekeningen beperkt tot die uren dat er meteo informatie beschikbaar is en er geldige metingen aan concentratiepieken zijn geëxtraheerd uit de meetdata. Ten slotte moeten de pieken ook nog eens zijn herkend als 'piek' in de Excel analyse die leidt tot bestanden met NO_x en NO₂ concentraties, waarin de locaties van de pieken zijn aangegeven. De concentraties worden over deze uren gemiddeld. Alle andere uren worden buiten de berekeningen gehouden en tellen dus ook niet mee in berekende gemiddelde waarden of in frequentieverdelingen van uurgemiddelde concentraties.

De pluimstijging zoals normaal berekend met NNM wordt in de berekening slechts ten dele verdisconteerd, vanwege het gemelde effect van schepen, die de uitlaat aan de achterzijde hebben, en de eventuele obstructie van de scheepsopbouw zelf, zie figuur 13.



Figuur 13 Bij verspreidingsberekeningen voor schepen wordt de pluimstijging slechts ten dele verdisconteerd

STACKS berekeningen worden in de reguliere STACKS versie uitgevoerd met de halve pluimstijging; dit was tot de start van dit project de standaard methodiek in STACKS. Een gereduceerde pluimstijging is mogelijk door de pluimstijging voor een deel te verrekenen, bijvoorbeeld door 50% van de pluimstijging te kiezen. Maar binnen dit project is als alternatief bedacht om een deel van de pluimstijging af te trekken; dus in plaats van het nemen van een fractie wordt dan een korting toegepast.. Aanleiding voor deze gewijzigde aanpak is de beschouwing van het pluimstijgkarakter: door het effect van de scheepsopbouw treedt initiële verdunning op, die afhangt van het schip en niet of minder -van de warmte-inhoud van de pluim. Modelmatig is deze werkwijze eenvoudig te implementeren: dit is equivalent met het korten van de warmte emissie met een vast getal. Hierdoor zullen schepen met lage warmte emissie hun pluimstijging in het geheel kunnen verliezen, terwijl grotere schepen wel een verminderde pluimstijging hebben, maar toch nog een flink effect hiervan laten zien in de resulterende concentraties.

7.2 Meetexperiment RWS-59 op 15 augustus 2014

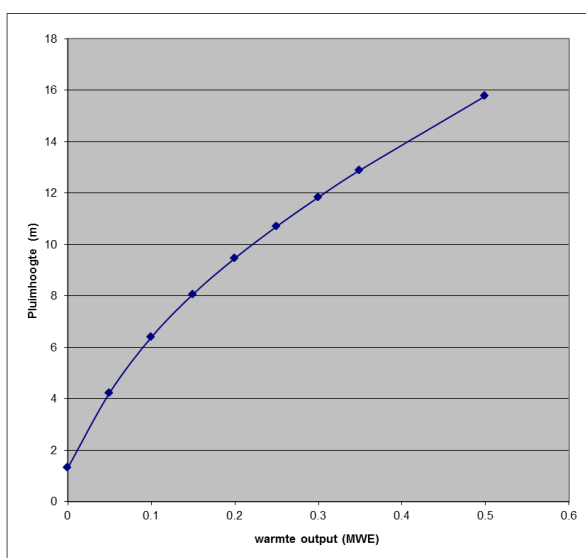
Het hierboven beschreven pluimstijgkarakter is essentieel voor de beschrijving van het concentratieverloop met de afstand. In de analyse van de concentraties in samenhang met de warmte emissie bleek een multiplicatief model (bijvoorbeeld 50% van de pluimstijging verrekenen) verkeerd uit te pakken, terwijl het additief model in overeenstemming met de resultaten bleek zijn. Om hier meer grip te krijgen is een veldexperiment op vrijdag 15 augustus met een schip van Rijkswaterstaat uitgevoerd. RWS heeft hiervoor de RWS59 ter beschikking gesteld. Met dit vaartuig is gedurende een periode van uur heen en weer gevaren langs de meetlocatie, zodat de pluimen op de NOx en andere monitoren zichtbaar was.

Daarbij is tevens gebruik gemaakt van een rookpatroon die in de uitlaat is geplaatst. De RWS59 heeft de uitlaat bovenop de opbouw staan. Tijdens dit experiment is op film vastgelegd dat de rookpluim in de periode van de rookemissie continue in het zog van de opbouw werd gezogen (zie figuur 14).

Het logboek vermeldt de volgende passages:

tijd	Locatie	brandstofverbruik (l/uur)	warmte emissie
15.48	langs de oostelijke oever	28	0.08
15.58	langs de westelijke oever	28	0.08
16.02	midden van het ARK	115	0.33
16.09	midden van het ARK	100	0.29
16.13	midden van het ARK	50	0.14
16.25	midden van het ARK	51	0.14
16.32	midden van het ARK	110	0.32
16.45	midden van het ARK, rook	50	0.14

De warmte output van het schip is berekend op maximaal 0,33 MW. Tijdens de rookemissie is deze waarde lager geweest: 0.14 MW. Met deze waarde en met de geschatte afmetingen van de opbouw van het schip zijn model berekeningen uitgevoerd om na te gaan of het waargenomen pluimgedrag ook modelmatig kan worden verklaard. In het STACKS model wordt bij binnenvaartschepen niet gedetailleerd rekening gehouden met het obstructiegedrag van de opbouw. In de eerdere studies is voorgesteld dit wel te doen voor zeevaart. Immers zeeschepen hebben afmetingen van de scheepsopbouw niet zeker niet genegeerd kunnen worden, daarom is voor dit experiment de RWS59 als brontype 'zeeschip' ingevoerd in het STACKS model. Met dit gegeven zijn diverse modelruns gedaan met verschillende waarden voor de warmte output en een vaarsnelheid van 10 knopen. In figuur 14a is dan de gemiddelde pluimhoogte tegen de warmte output gegeven. Daarin is zichtbaar dat de pluimhoogte snel daalt met afnemende warmte output en bij een waarde van ongeveer 0.15 MW is de pluimhoogte ongeveer gelijk aan de opbouwhoogte (6m plus een stukje impulsstijging). Dit betekent dat het model met gebouwmodule de pluimdaling door de opbouw ook voorspelt, wellicht nog iets aan de voorzichtige kant. Al met al geeft dit veldexperiment aan dat er inderdaad sprake is van pluimdaling door de scheepsopbouw en dat een offset van 0,20 MW een redelijke waarde lijkt te zijn.



Figuur 14a Met STACKS berekende pluimdaling voor de RWS59 op 15 augustus 2014: de pluimstijging van rookpluim achter de opbouw is bij ongeveer 0,10 a 0,15 MW geneutraliseerd



Figuur 15 Veldexperiment met de RWS59 op 15 augustus 2014: duidelijk is te zien dat de rookpluim van het schip achter de opbouw neerwaarts wordt getrokken

7.3 Gemiddelden over de gehele periode

7.3.1 Generaal

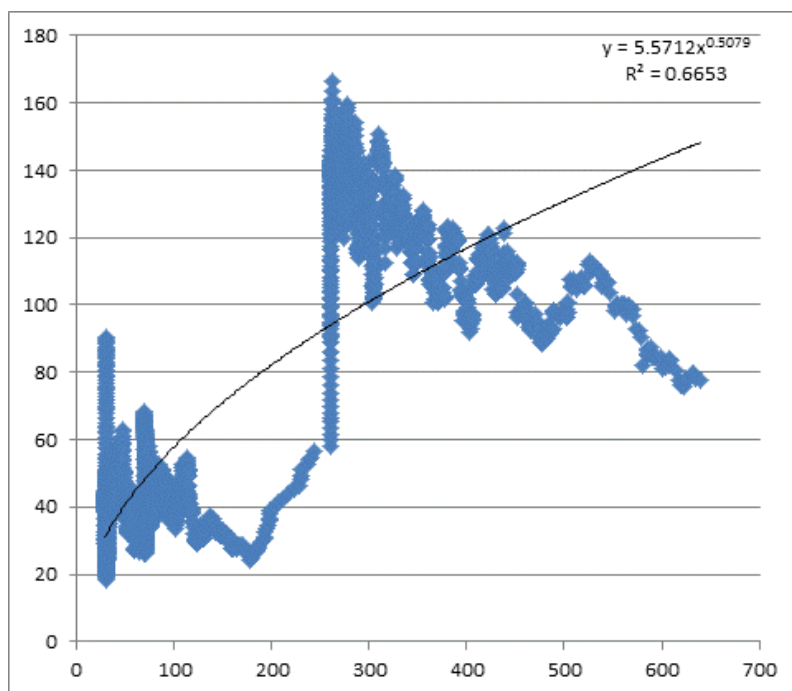
Over de meetperiode zijn 608 uren beschikbaar waarbij aan alle voorwaarden is voldaan. In die periode zijn 2354 schepen geïdentificeerd. Voor deze uren is de gemiddelde concentratie over de hele periode berekend en vergeleken met de gemeten waarden op station 1, 2 (en 3), zie tabel 4.

Om de NO₂ concentraties te kunnen berekenen is naar de geanalyseerde waarden van de instantane pluimafmetingen gekeken. Weliswaar wordt alleen in het horizontale vlak gemeten met de monitoren (we hebben dus geen verticale concentratieprofielen), maar het is verdedigbaar om de instantane

pluimafmetingen in het horizontale vlak gelijk te stellen aan die in het verticale vlak zodat σ_{yi} een schatter is voor σ_{zi} . Uit alle waarnemingen zijn de waarden van sigma-i tegen de berekende afstand tot het schip uitgezet. Het heeft weinig zin om dat één op één gepaard te doen, vanwege de inherente stochastiek van de atmosfeer. Daarom zijn de waarnemingen van sigma-i eerst gesorteerd naar de afstand (dus met continue oplopende afstand) en vervolgens over 10 of 20 waarnemingen glijdend gemiddeld om de scatter te verminderen. Al doende wordt een beeld gecreëerd, zoals in figuur 15.

Opvallend was daarbij dat bij de grotere afstanden (> 800 m) de instantane pluimafmetingen kleiner lijken te zijn geworden. De reden hiervoor is, zoals eerder aangegeven:, dat de afmetingen van scheepspieken soms moeilijk zijn af te leiden in de metingen; het is mede op basis van deze analyse duidelijk dat de methode van piekbreedtebepaling voor het derde station faalt en dat de sigma-i waarden voor het derde station beter uit de dataset weggelaten kunnen worden. In figuur 15 zijn ze daarom niet opgenomen.

Op deze wijze wordt een consistentere beeld verkregen. Sigma-i kan worden afgeleid uit de waarden berekend als het tweede moment of de waarden die uit de gaussische fit zijn bepaald. In de analyse is ervoor gekozen om prioriteit te geven aan de sigma-waarden uit de gaussische fit. Maar als de correlatie coëfficiënt lager is dan 0,5 wordt de waarde van het tweede moment geselecteerd. De sigma-waarde van de instantane pluim is een combinatie van deze twee methoden geworden en wordt verder alleen gebruikt voor het bepalen van een aangepaste relatie voor sigma-i ten behoeve van het berekenen van de NO → NO₂ omzettingssnelheid.



Figuur 16 Sigma-y (y-as), voor station 1 en 2; van 26/3-15 augustus, berekend uit gefitte sigma-waarden over ongeveer 3800 waarden; x-as is de bronafstand

Op basis van de uitkomsten van dit project wordt een nieuwe uitdrukking voor de instantane pluimafmetingen voor kleinere bronnen verkregen:

$$\sigma_i = 5.57 (\text{afstand})^{0.51}$$

De vergelijking van de NO_x en de NO₂ concentraties, gemiddeld per station over de gehele meetperiode is gegeven in tabel 5.

Tabel 5 Berekende en gemeten NO_x concentraties (in µg/m³) , gemiddeld over de hele meetperiode, 3 stations en niet uitgesplitst naar scheepstypen

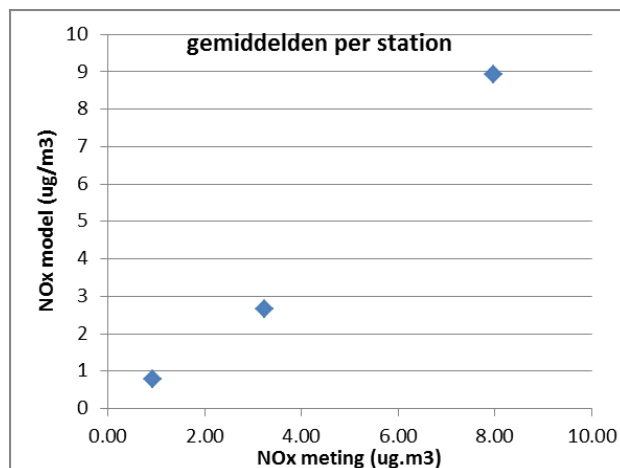
station	NO _x -meting	NO _x -model	n-schepen	uren
1	7.98	8.92	2354	608
2	3.23	2.67	1424	556
3	0.94	0.78	351	229

Het betreft hier een middeling over:

- die scheepspassages die een bruikbare AIS signaal afgegeven hebben
- en die aan een NO_x piek gekoppeld konden worden
- binnen een windrichtingssector als in tabel 1 is aangegeven
- de berekende integralen uit de piekanalyses, beschreven in paragraaf 6.2 is aangegeven. (C=integraal (ppb.s) * 1.88 (µgm⁻³/ppb) /3600 in µg/m³).

Daarbij dient een belangrijke opmerking te worden gemaakt.

Aanvankelijk waren de berekende concentraties een factor 2 hoger. Dat maakte dat de bepaalde emissies per schip (scheepsklasse) nader onder de loep zijn genomen. In een discussie met emissie-deskundigen van TNO kwam naar voren dat de emissies op locaties sterk kunnen afwijken van gemiddelde waarden zoals die in het Prelude model zijn opgenomen. Bepalende parameters daarbij zijn de beladingsgraad en de vaarsnelheid. Voor het ARK is aangenomen dat de schepen zullen varen met de vaarsnelheid, die maximaal is toegestaan. Op het ARK geldt namelijk een maximale vaarsnelheid van 18 km/uur, zijnde 10 knopen. Het brandstofverbruik (en daarmee de emissies) stijgt echter hard met toenemende snelheid. De snelheid afhankelijkheid van het brandstofverbruik en emissies gaan ruwweg met de derde macht van de snelheid. Dat maakt dat schippers geneigd kunnen zijn om de vaarsnelheid aan te passen aan economische omstandigheden door langzamer te varen om de kosten te drukken. De berekeningen met STACKS zijn daarom uitgevoerd met anderen waarden dan uit Prelude volgen. Uit de AIS data kunnen immers eenvoudig de werkelijke vaarsnelheden berekend worden. De resultaten van tabel 4 (geplot in figuur 16) zijn verkregen met deze aangepaste vaarsnelheid, door TNO geschatte warmte- en NO_x emissies. De resultaten kunnen verder worden verfijnd door per scheepsklasse te rekenen.



Figuur 17 Vergelijking berekende NOx concentraties met gemeten NOx

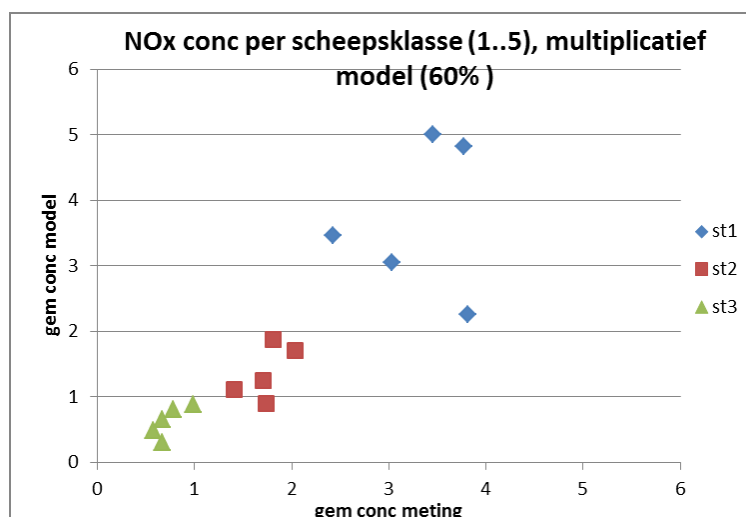
7.3.2 Per scheepstype, NOx

De berekeningen kunnen ook worden uitgevoerd per scheepsgrootteklasse.

Er is gekozen voor de volgende indeling op basis van het bruto laadvermogen van het schip en wel zodanig dat de AVV scheepstype gegroepeerd kunnen worden met tussen haakjes de aantallen schepen:

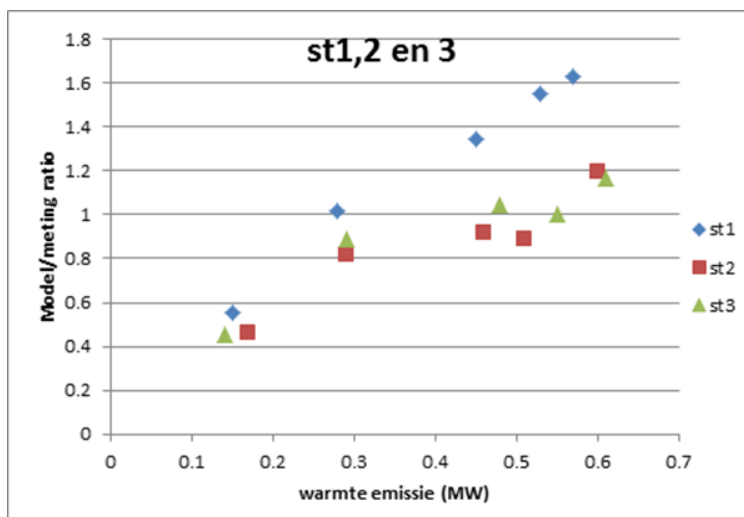
- M0 t/m M4 (663)
- M5, M6, M7 (391)
- M8 en M9 (668)
- M10, M11, M12 (536)
- C en B typen (veelal duwbakken, 96).

Dezelfde berekeningen als voor alle schepen zijn herhaald. De resultaten worden in figuur 17 gegeven.



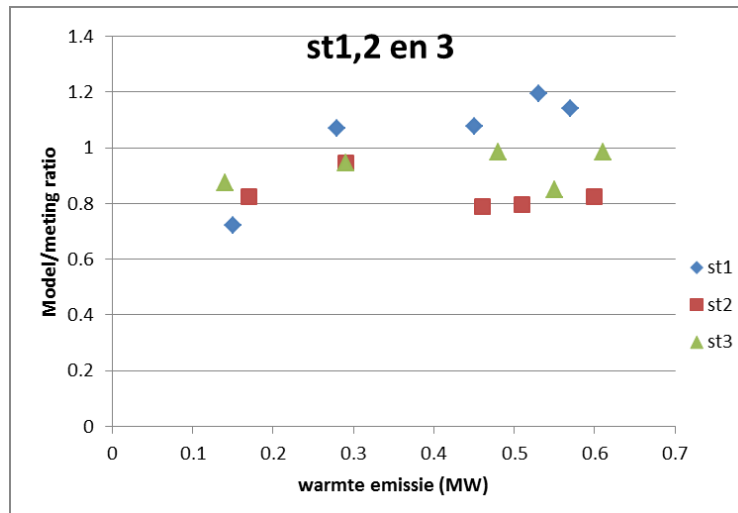
Figuur 18 Vergelijking berekende NOx concentraties met gemeten NOx, per station en per scheepsklasse. Berekeningen met STACKS en 60% van de pluimstijging verrekend

Een uitsplitsing naar scheepstypen (en dus naar warmte emissie) laat een interessant beeld zien, zie figuur 18. Geplot is de verhouding tussen berekende en gemeten NO_x concentratie (over de hele periode). Daaruit blijkt duidelijk dat voor lage warmte emissie het model de concentraties onderschat en bij hogere warmte emissies juist overschat. Dat geldt min of meer op alle 3 stations.

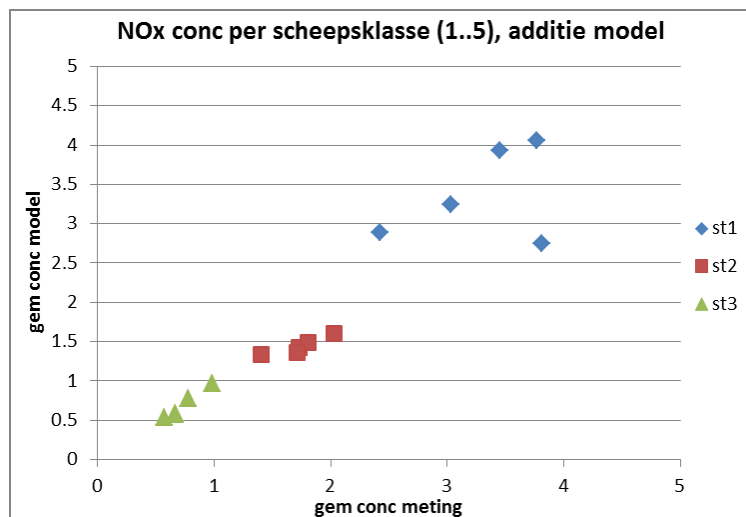


Figuur 19 Berekende verhouding modeluitkomst/meting voor NO_x, per station en per scheepstype, uitgezet naar gemiddelde warmte emissie per scheepstype, modeluitkomsten met 60% pluimstijging

De reden voor dit beeld ligt voor de hand: de pluimstijging is bij lagere warmte emissies overschat (er is in werkelijkheid minder pluimstijging) en hogere warmte emissies onderschat (er is in werkelijkheid meer pluimstijging). Wanneer de pluimstijging niet volgens een multiplicatief model, maar met een additief model wordt bepaald, kan dit pragmatisch worden rechtgetrokken (zie 7.1 blz 21). Het blijkt dat wanneer de warmte emissie voor elk afzonderlijk schip met 0,20 MW wordt verminderd, de ratio (berekend/gemeten waarden) niet langer toeneemt met de warmte emissie. zie figuur 19. Figuur 20 laat met dit inzicht de vergelijking model/meting zien, de uitkomsten zijn licht verbeterd ten opzichte van figuur 17.

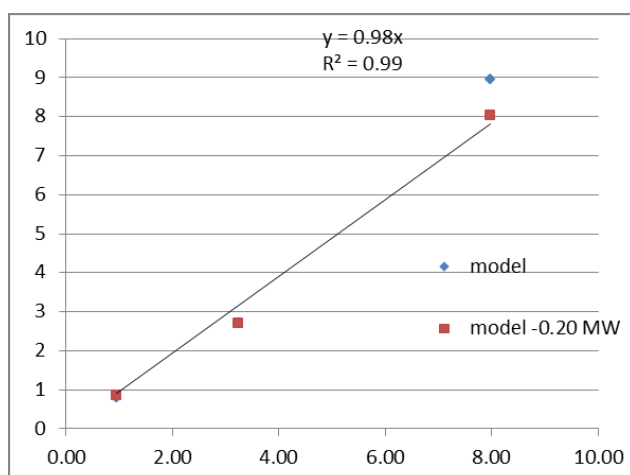


Figuur 20 Berekende verhouding modeluitkomst/meting voor NOx, per station en per scheepstype, uitgezet naar gemiddelde warmte emissie per scheepstype, modeluitkomsten met 0,20 MW aftrek van de warmte emissie per schip



Figuur 21 Vergelijking berekende NOx concentraties met gemeten NOx, per station en per scheepsklasse. Berekeningen met STACKS en pluimstijging berekend met de warmte emissie per schip verminderd met 0,2 MW

Met dit inzicht zijn opnieuw de periode-gemiddelde NOx concentraties worden berekend, zie figuur 21. Er is een kleine verbetering zichtbaar bij station 1, maar de winst zit vooral bij de verdeling naar scheepsklassen. Indien alle 5 scheepsklassen tezamen genomen worden, middelen de effecten van meer en minder pluimstijging elkaar voor deze waterweg ongeveer uit.



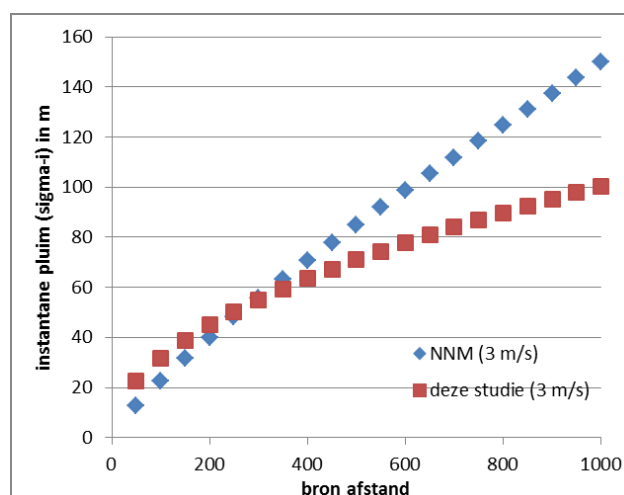
Figuur 22 Waarden van de verhouding tussen modeluitkomst en metingen voor NO_x, per station en scheepsklasse, berekend met de warmte emissie verminderd met 0,2 MW

Tot zover zijn nog steeds alleen de NO_x concentraties beschouwd. In praktijk zijn de NO₂ concentraties minstens zo interessant.

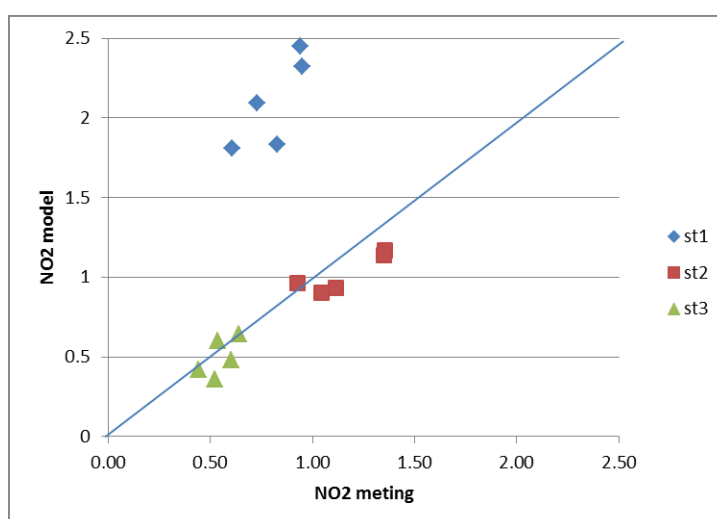
7.3.3 Per scheepstype, NO₂

In de modelruns worden tegelijk met de NO_x concentraties ook de NO₂ concentraties berekend en in outputfiles gegeven. NO₂ wordt daarbij berekend volgens de gangbare NNM methode. Deze houdt in dat in de instantane pluim de oxidatie van NO naar NO₂ met ozon wordt berekend en tevens het fotostationair evenwicht onder invloed van UV licht (dus alleen overdag en wel des te meer naar mate dat de zon meer schijnt). De instantane pluimafmetingen zijn dus relevant. Deze waren eerder afgeleid, zie paragraaf 7.2.1. Wanneer we deze aanpassing het model inbrengen worden de resultaten niet significant anders. In figuur 22 is uitgezet wat de instantane pluimdimensies zijn volgens NNM en deze studie, tegen de afstand, bij een windsnelheid van 3 m/s (ruwweg de gemiddelde windsnelheid tijdens de meetperiode). Het verschil is eigenlijk niet eens groot.

Voor NO₂ zijn voorts vergelijkingen gemaakt tussen meting en modeluitkomsten. De resultaten, uitgesplitst naar station en scheepsklasse is gegeven in figuur 23. Duidelijk is daarin te zien dat NO₂/NO_x verhouding voor station 1 sterk wordt overschat. De meest waarschijnlijke verklaring is dat op de korte afstand (zeg <500 m) de pluim nog niet homogeen gemengd is met de omgevingslucht, terwijl het model dat wel veronderstelt. Dat betekent dat binnen de instantane pluim er plukken rookpluim zijn, die nauwelijks met omgevingslucht zijn gemengd en plukken die meer zijn verdund (zie figuur 24). Dit wordt niet zichtbaar in de registratie van NO_x en of ozon monitoren. De NO_x en ozon monitoren hebben immers nog een redelijke tijdconstante (seconden) en kunnen deze snelle concentratiefluctuaties niet volgen.



Figuur 23 Instantane pluimdimensies volgens NNM (paarse boekje) en deze studie, tegen de afstand, bij een windsnelheid van 3 m/s

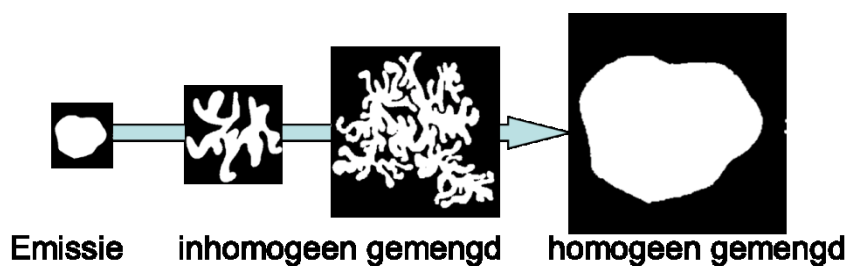


Figuur 24 Vergelijking berekende NO₂ concentraties met gemeten NO₂, per station en per scheepsklasse. Berekeningen met STACKS en pluimstijging berekend met de warmte emissie per schip minus 0,2 MW

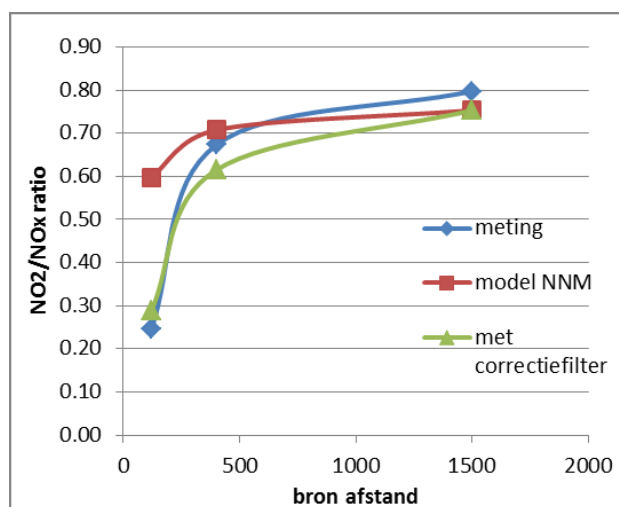
Het puur empirische correctiefilter $F(x)$ dat voor de eerste 500 m op de berekende NO₂/NO_x moet worden toegepast is:

$$F(x) = 1.3 \cdot (x - 50) / (x + 100)$$

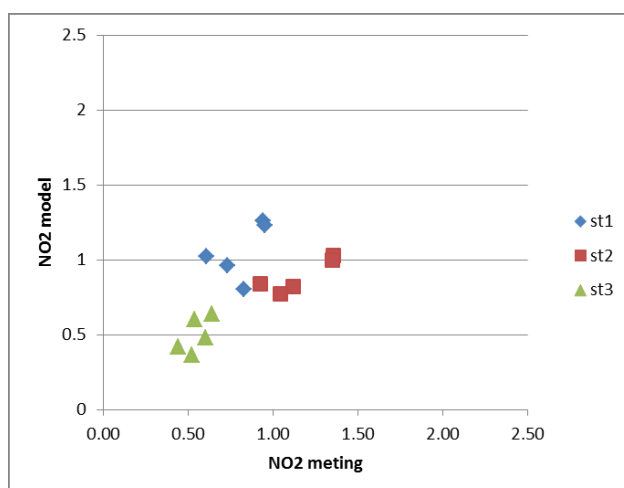
Indien dit correctiefilter wordt geïmplementeerd in het rekenmodel worden uiteraard NO₂/NO_x verhoudingen berekend die beter met de metingen overeenstemmen, zie figuur 25. En als dan de vergelijking gemaakt wordt tussen berekende en gemeten gemiddelde concentraties per station en per scheepsklasse, dan is de afwijkende positie van station 1 gecorrigeerd, zie figuur 26.



Figuur 25 De rookpluim is na emissie nog een tijdje inhomogeen gemengd, met als gevolg lagere NO_2/NO_x verhoudingen dan NNM berekent



Figuur 26 NO_2/NO_x verhouding, zoals afgeleid uit de metingen, uit berekeningen met NNM chemie en berekend met een correctiefilter



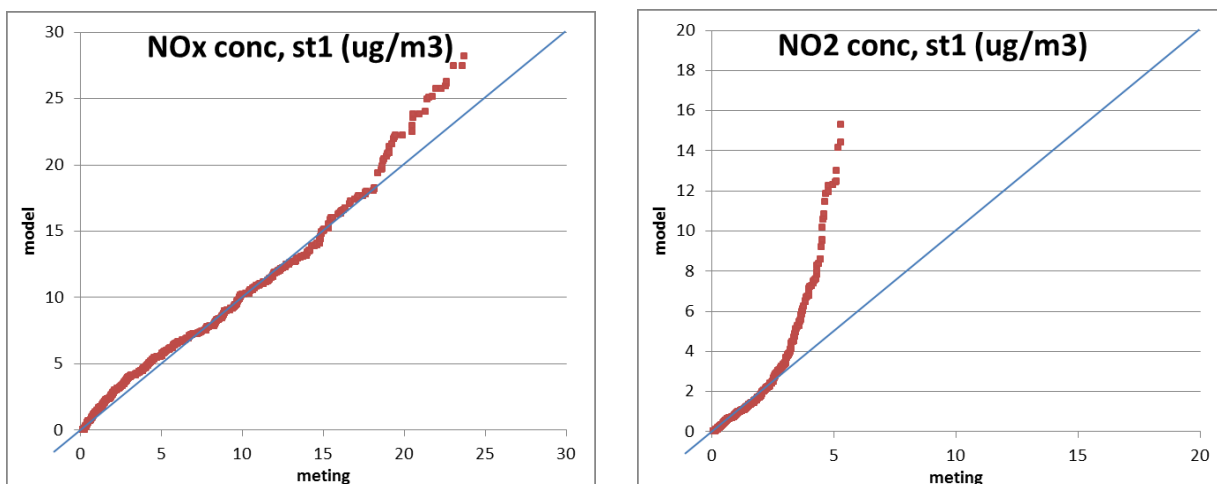
Figuur 27 Vergelijking berekende NO_2 concentraties met gemeten NO_2 , per station en per scheepsklasse. Berekeningen met STACKS en pluimstijging berekend met de warmte emissie per schip minus 0,2 MW, nu inclusief NO_2 correctiefilter

7.3.4 Uurgemiddelde concentraties: (kwantielen)

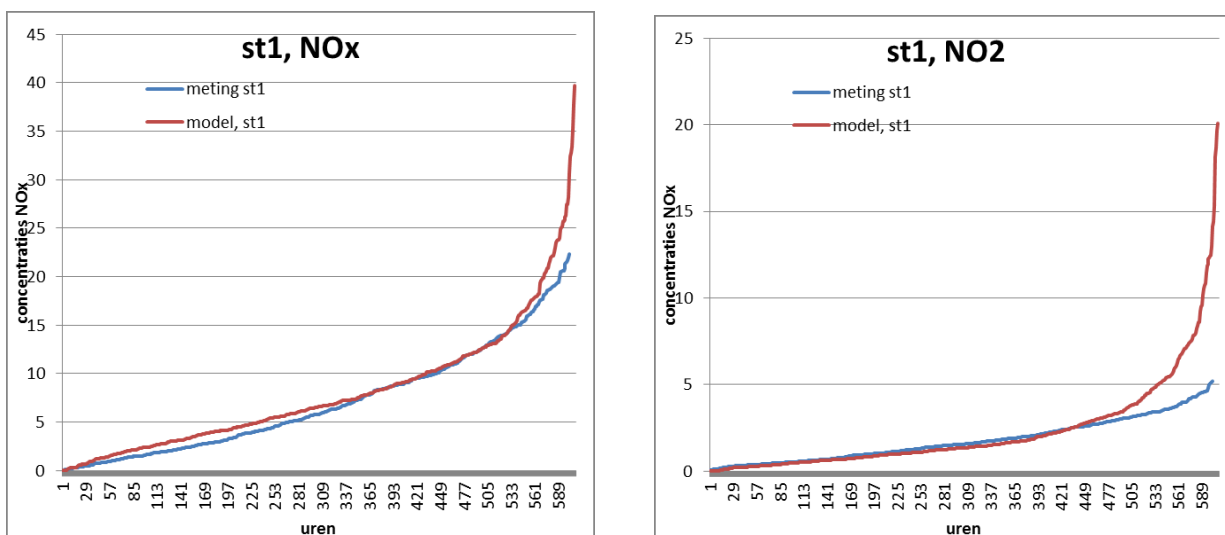
Tot nog toe zijn gemiddelde concentraties over de hele meetperiode gegeven. Dat is in principe ook de basis van de modelvalidatie. Een vergelijking op meer detail niveau is dan binnen bereik; immers de gemiddelde concentraties zijn steeds opgebouwd uit uurgemiddelden. Nu is het zo dat een vergelijking met uurwaarden die gepaard in tijd en plaats wordt gegeven altijd een grote scatter wolk te zien geeft, die dan weinig informatie geeft over de kwaliteit van het rekenmodel. In plaats daarvan is het 'beter' om beide tijdreeksen (dus per station, metingen en modeluitkomsten) eerst te sorteren met opklimmende grootte en dan beide gesorteerde reeksen tegen elkaar te plotten. Een ideale modeluitkomst laat dan een rechte 1:1 lijn zien. Voor monitorstation 1 is dit gedaan, zie figuur 27. De figuren geven duidelijk in welk concentratiegebied het model afwijkt van de metingen. Voor NO_x is het beeld vrijwel ideaal, voor NO₂ zien we dat het model de hogere NO₂ concentraties overschat. Er zitten twee nadelen aan deze figuren. Ten eerste lijkt het NO₂ plaatje te suggereren dat de helft van de concentraties wordt overschat, terwijl dat niet zo is. Ten tweede leidde de dataverwerking tot twee getallen reeksen die niet helemaal synchroon waren, zie hoofdstuk 4, punt 4. Immers: in de datareeksen met metingen is af en toe een meting verwijderd, vanwege een verkeerd print-format. In de reeksen met modeluitvoer staan deze echter nog wel, zodat in de reeks voor modelberekeningen er ook (ongeveer 1%) data verwijderd moest worden om een gelijk aantal metingen en modeluitkomsten te hebben die tegen elkaar te geplotted kunnen worden. In figuur 25 is ervoor gekozen de helft van deze 1% data van het lage concentratie-gebied te verwijderen en de andere helft van het hoge concentratiegebied.

Om dit discutabele punt voorts te omzeilen is ervoor gekozen de gesorteerde reeksen ongewijzigd te plotten in hetzelfde diagram. Dan is het niet hinderlijk dat het aantal getallen in de twee reeksen niet exact gelijk is. Dit geeft de figuur 28 voor station 1, figuur 29 voor station 2 en figuur 30 voor station 3.

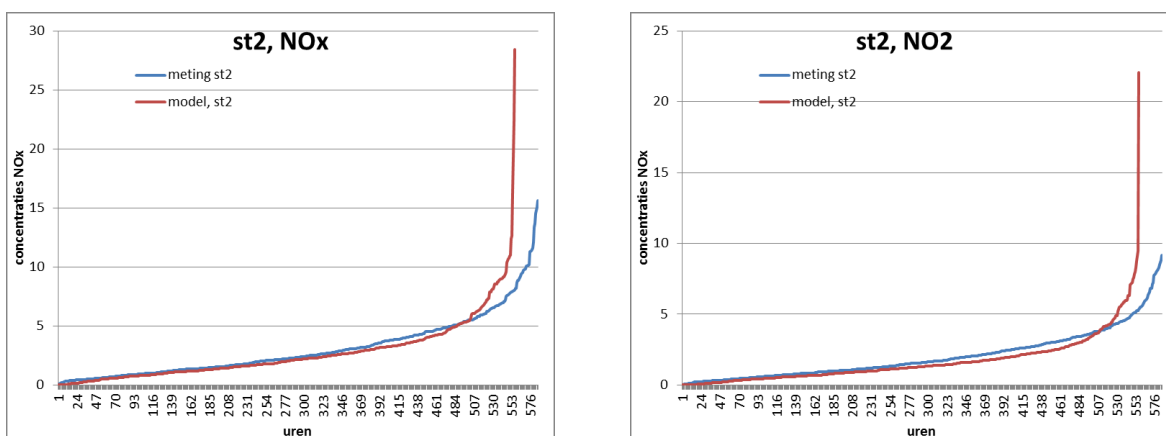
Zoals uit de figuren is te zien, is de overeenkomst voor de frequentieverdelingen van de NO_x en NO₂ concentraties bevredigend. In een beperkt aantal uren laat het rekenmodel een overschatting van de NO_x en NO₂ concentraties zien. Het is wel belangrijk dat de verdeling van uurgemiddelde concentraties ook goed overeenkomt en niet alleen dat de jaargemiddelde concentraties goed overeenstemmen. Dit is dan niet zo zeer voor NO₂ relevant, als wel voor PM₁₀. Voor NO₂ geldt dat vooral het jaargemiddelde getoetst zal worden aan grenswaarden, dus dan is de frequentieverdeling van concentraties en of die per concentratiesegment goed overeenstemmen niet zo van belang. Maar voor PM₁₀ ligt dat anders: daar is het aantal overschrijdingsdagen (ruwweg 10% van de uren in een jaar) vaak het kritische punt. Dan is het juist wel relevant dat de verdeling van concentraties ook goed overeenstemt.



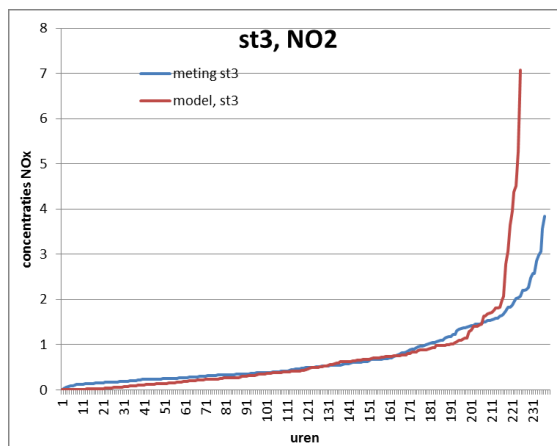
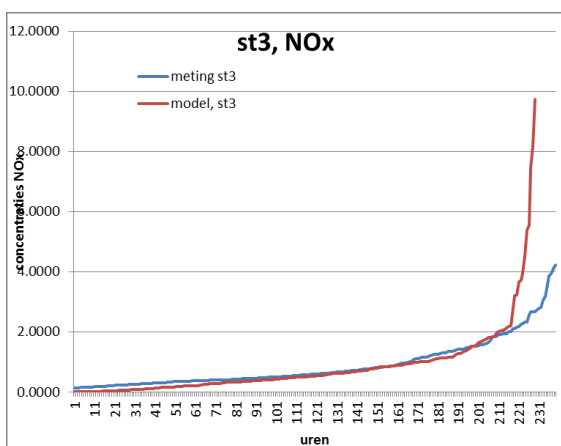
Figuur 28 Kwantielplots voor gemeten en berekende NO_x (links) en NO₂ (rechts) concentraties voor monitoring station 1



Figuur 29 Plots van gesorteerde gemeten en berekende NO_x (links) en NO₂ (rechts), concentraties voor monitoring station 1



Figuur 30 Plots van gesorteerde gemeten en berekende NO_x (links) en NO₂ (rechts) concentraties voor monitoring station 2



Figuur 31 Plots van gesorteerde gemeten en berekende NO_x (links) en NO₂ (rechts) concentraties voor monitoring station 3

8 SRM4

8.1 Werkwijze

SRM2 is bedoeld voor snelwegen en bepaalt de verdunning van verkeersemisies en de vorming van NO₂ op een pragmatische wijze, waarbij de niet de onderliggende fysica, maar afgeleide gefitte functies worden toegepast. Voor de scheepvaart is het van belang te realiseren dat de parametrisatie van de verspreiding en van de vorming van NO₂ afhankelijk is van de scheepgrootte-klasse. Immers, de emissie is afhankelijk van de scheepsgrootte (is ruwweg lineair met de waterverplaatsing), de vaarsnelheid (!) en de vaarweg (wel of niet stromend). De NO₂ vorming is afhankelijk van de NO_x emissie zelf, omdat een grotere hoeveelheid NO_x moet concurreren met eenzelfde beschikbare hoeveelheid ozon in de buitenlucht. Met andere woorden: hoe groter de emissie, hoe langzamer de omzettingsfractie met de afstand zal zijn. In het navolgende zullen de formules van SRM2, voor zover van belang, worden samengevat en worden de parameters benoemd die per scheepsklasse zullen worden afgeleid van SRM3 (STACKS) berekeningen. SRM4 rekent niet uur-voor-uur, maar maakt gebruik van verspreidingsberekeningen die worden gemiddeld over weerklassen. Door vervolgens elke klasse te wegen met de frequentie van voorkomen, wordt een jaargemiddelde bepaald. Voor deze berekeningen moet een aantal parameters bepaald worden; deze worden afgeleid uit SRM3 berekeningen. Dit wordt gedaan door in de SRM3 codes niet de uurwaarden van deze parameters te berekenen, maar door functies voor deze parameters te introduceren die zijn gemiddeld over een weerklasse. Het gaat om drie parameters:

- 1 de verticale verspreiding
- 2 de pluimhoogte
- 3 de omzettingssnelheid van NO_x naar NO₂, weergegeven door een K-factor.

Bij toepassing van deze gemiddelde functies in SRM3 (we noemen dit dan SRM3+) dienen ongeveer dezelfde jaargemiddelde resultaten te worden verkregen. Daarmee is het mogelijk een SRM4 module voor te stellen. Deze SRM4 module beschrijft de metingen in dit project dan naar behoren, binnen bepaalde marges (het projectstreven is binnen 15%).

8.2 Modelbeschrijving

Vanuit een zekere bron op positie (B) binnen het vaarwegsegment, en een rekenpunt op locatie (R) binnen of buiten het vaarwegsegment, wordt een denkbeeldige lijn BR getrokken. Op deze lijn wordt de verspreiding van de emissie Gaussisch verondersteld. Aan de hand van de richting van B tot R wordt bepaald tot welke windsector *i* de concentratie bijdrage C_[b,i] van bron B aan de concentratie op rekenpunt R behoort. Deze bijdrage wordt, na toepassing van de smallepluimbenadering, vervolgens berekend met behulp van de volgende pluimformule:

$$C_{b,i} = \frac{E d_w}{\sqrt{2\pi} \sigma_z C u} \cdot \frac{1}{\pi R_B / n} \cdot \exp\left[\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad [2]$$

met:

- E: de emissie per lengte-eenheid [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]
d_w: de lengte van een vaarwegsegment [m]
R_B: de afstand van de bron (B) tot het rekenpunt (R), de rekenafstand [m]
σ_z: de verticale verspreidingscoëfficiënt [m]
z: de hoogte van het rekenpunt [m] in praktijk 1,5 m

- C: een ruwheidsafhankelijke correctiefactor [-]
 U: de windsnelheid [m/s]
 n: het aantal windrichtingsectoren (12)
 h: pluimhoogte (bronhoogte+pluimstijging).

Voor elk rekenpunt wordt deze berekening voor alle bron posities uitgevoerd. De variabelen d_w , R_B en z zijn eenduidig voor alle combinaties van bronposities en rekenpunten in te vullen. De emissie (E), de correctie factor (C), de verticale verspreidingscoëfficiënt (σ_z) en de windsnelheid (u) worden hieronder nader toegelicht.

8.2.1 Verticale verspreidingscoëfficiënt (σ_z)

De verticale verspreidingscoëfficiënten zijn gefit aan de resultaten van berekeningen met het Nieuw Nationaal Model. De formules zijn als volgt:

$$\sigma_z = \frac{a \cdot R_B^b}{f(R_b)} + \sigma_{z0} \quad [3]$$

met een aanpassing voor grotere afstanden:

$$f(R_b) = 1 + 0.5 * (1 - e^{-(R_b / 2800)^2}) \quad [4]$$

De parameters voor SRM2 zijn in tabel 6 gegeven:

Tabel 6 Parameter waarden voor SRM2

Ruwheidsklasse (m)	Afbakening ruwheidsklasse (m)	a	b
0,03	<0,055	0,2221	0,6574
0,10	≥ 0,055 en < 0,17	0,2745	0,6688
0,30	≥ 0,17 en < 0,55	0,3613	0,6680
1,00	≥ 0,55	0,7054	0,6207

Deze waarden worden gevonden door te fitten op de resultaten van het NNM.

Voor het berekenen van de jaargemiddelde concentratie bijdrage van scheepvaart worden alle concentratiebijdragen per windsector vermenigvuldigd met de fractie van het jaar waarin sprake is van een bijdrage uit de desbetreffende windsector en vervolgens gesommeerd:

$$C_{jm} = C_{a,jm} + C_{b,jm} \quad [5]$$

met:

C_{jm} : jaargemiddelde concentratie [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

$C_{a,jm}$: jaargemiddelde grootschalige concentratie [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] : hierbij wordt gebruik gemaakt van de GCN gegevens

$C_{b,jm}$: jaargemiddelde concentratiebijdrage vaarverkeer [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

8.2.2 Omzetting van NO_x naar NO₂

De invloed van de chemische reacties (dat wil zeggen oxidatie van NO naar NO₂) dient te worden verdisconteerd voor een correcte berekening van de jaargemiddelde concentratie bijdrage. De jaargemiddelde NO₂ concentratiebijdrage scheepvaart voor stikstofdioxide wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$C_{b,i}[\text{NO}_2] = f_{\text{NO}_2} \cdot C_{b,i}[\text{NO}_x] + \frac{C_{a,i}[\text{O}_3] \cdot C_{b,i}[\text{NO}_x] \cdot (1 - f_{\text{NO}_2})}{C_{b,i}[\text{NO}_x] \cdot (1 - f_{\text{NO}_2}) + K} \quad [6]$$

met:

$C_{b,i}[\text{NO}_2]$: jaargemiddelde concentratiebijdrage verkeer aan NO₂ concentratie uit windsector i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

$C_{b,i}[\text{NO}_x]$: jaargemiddelde concentratiebijdrage verkeer aan NO_x concentratie uit windsector i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

$C_{a,i}[\text{O}_3]$: jaargemiddelde grootschalige concentratie ozon (O₃) uit windsector i [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

f_{NO_2} : gewogen fractie direct uitgestoten NO₂ [-]

K: _____ empirisch bepaalde parameter voor de omzetting van NO naar NO₂.

De waarde voor K wordt empirisch vastgesteld.

8.3 Parameterschatting

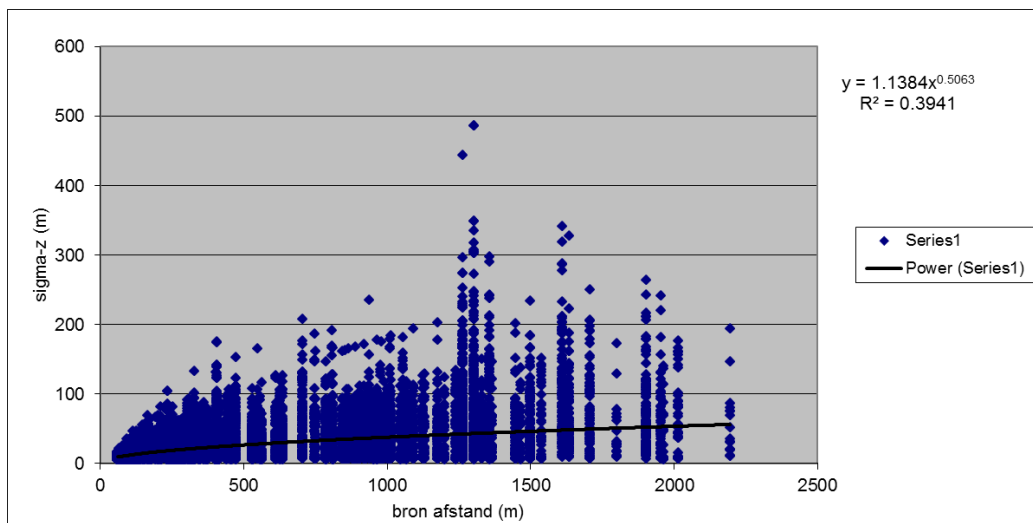
Voor SRM4 is het nodig de waarden van a en b in de bepaling van sigma-z te kiezen. En ten tweede moet de waarde van K gekozen worden in afhankelijkheid van de scheepsklasse of een andere parameter. Ten opzichte van SRM2 is er echter nog een derde parameter die om aandacht vraagt en dat is de pluimhoogte. Gezien het karakter van SRM4 in navolging van SRM2 zal deze pluimhoogte gekozen worden als tweedimensionale matrix met scheepsklasse en met windsnelheid als bepalende parameters.

8.3.1 Sigma-z

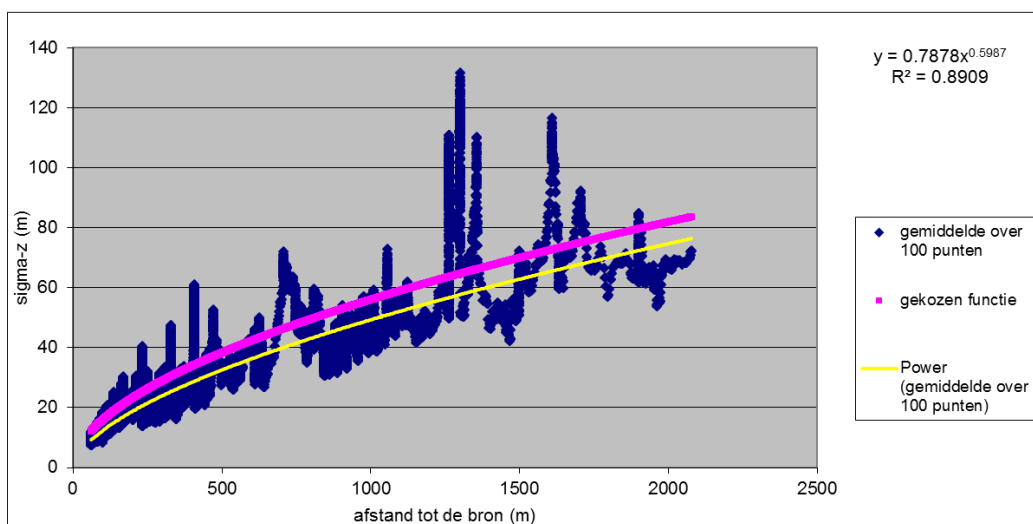
Voor binnenvaartschepen wordt een vaste waarde van σ_0 aangenomen: 5 m.

De waarde van sigma-z kan afgeleid worden uit de uurlijkse waarden van sigma-z en deze uit te zetten tegen de afstand. Vergelijking [2] is niets anders dan een pragmatische formule om de resultaten van SRM2 in overeenstemming te brengen met die van SRM3. Dezelfde procedure in hier ook gevolgd. Indien we sigma-z voor alle drie de stations uitzetten tegen de afstand wordt figuur 31 verkregen. Hierin is lastig in te zien welk verband er tussen afstand en sigma-z waarden er geldig is. Daarom zijn de berekende waarden eerst gesorteerd op afstand en daarna glijdend gemiddeld over 100 waarden (in de data reeks waren 31700 waarden aanwezig¹). Het gat in SRM4 immers toch om gemiddelde waarden met als randcondities dat de uitkomsten, gemiddeld over langere tijd weer overeenstemmen met de uitkomsten van SRM3. Figuur 32 geeft het resultaat; daarin blijkt dat er een redelijk lijn gefit kan worden door de berekende waarden van sigma-z. De formule voor deze fit is in STACKS ingebouwd en voor de 3 stations zijn wederom de (gemiddelde) concentraties NO₂ en NO_x berekend. De waarde van sigma-z werkt echter niet lineair door naar de concentratiewaarden, zodat uiteindelijk een iets andere formule in STACKS is toegepast om bevredigende resultaten te krijgen. Deze lijn is eveneens in figuur 32 gegeven.

¹ De bijdrage van de scheepvaart wordt berekend met een lijnbronmodel, conform formule [1], maar omdat een lijnbron, zeker bij het ARK een flinke lengte kan beslaan, is het nodig deze lijnbron op te delen in sub-lijnbronnen, zodat de afstand tot de bron voor begin- en eindpunt van de lengte bron min of meer hetzelfde is. Dat maakt dat het aantal (sub) bronnen veel groter wordt dan het aantal schepen.



Figuur 31 Plots van berekende waarden van sigma-z tegen de afstand; alle drie stations



Figuur 32 Plots van berekende waarden van sigma-z tegen de afstand; alle drie stations, sigma-z nu glijdend gemiddeld na sortering van de bronafstand

De gekozen functie voor sigma-z is $1.25 (X)^{0.55}$. Berekende waarden voor SRM3 (STACKS) en de SRM4 benadering is gegeven in tabel 7. Zoals te zien is, geeft de SRM4 benadering een redelijk resultaat ten opzichte van de oorspronkelijke SRM3 berekening voor de meeturen langs het ARK. Let wel: in deze exercitie zijn geen gemeten waarden verwerkt (die zijn immers gebruikt om tot de modelformulering in SRM3 te komen).

Tabel 7 Berekende NO₂ en NO_x concentraties (in µg/m³) , gemiddeld over de hele meetperiode, 3 stations en niet uitgesplitst naar scheepstypen, berekend met SRM3+ en met de SRM4 sigma-z benadering

	SRM3+		SRM4 benadering	
	NO ₂	NO _x	NO ₂	NO _x
st 1	2.32	8.03	2.84	8.46
st 2	1.66	2.70	2.02	2.81
st 3	0.64	0.85	0.62	0.70

8.3.2 Pluimhoogten

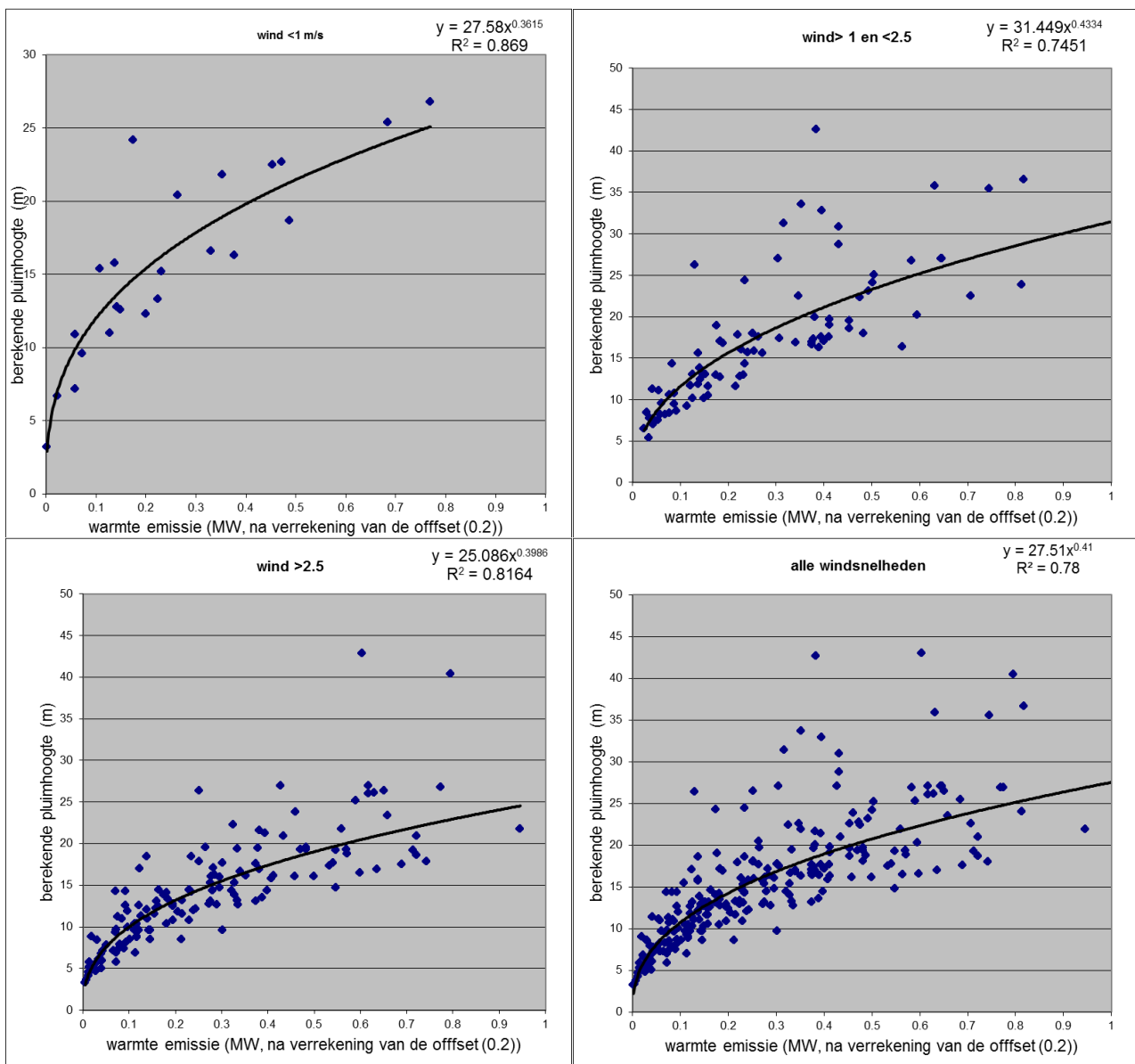
Nieuw ten opzichte van SRM2 is dat de pluimhoogte gekwantificeerd moet worden. De pluimhoogte is (voornamelijk) afhankelijk van de warmte-uitstoot en van de windsnelheid. Daarom zijn met SRM3+ de waarden van de pluimhoogten geprint, tezamen met de waarden van de windsnelheid (zoals gemeten) en de waarden van de warmte-uitstoot, gecorrigeerd met de offset waarde van 0.2 MW. Voor de pluimhoogte zijn alleen de waarden van station 1 gebruikt. De windsnelheid is gegroepeerd in drie klassen: 0 – 1 m/s; 1 – 2.5 m/s en groter dan 2.5 m/s. De wind op 10 m hoogte (de standaard meethoogte in meteorologische stations) is ongetwijfeld hoger dan deze waarden, maar voor dit doel zijn de meetwaarden voldoende. De plots voor de berekende pluimhoogten is gegeven in de figuur 33. Uit de drie figuren voor de verschillende windsnelheidsklassen blijkt niet dat de relaties, gevonden uit de fits, erg van elkaar verschillen. Voor deze toepassing kan daarom volstaan worden met één formule, voor alle windsnelheden samen. Ook hier geldt weer, dat de waarde van de pluimhoogte niet lineair doorwerkt naar de concentraties toe. Dat maakt dat de functie voor de gemiddelde waarden van de pluimhoogten niet dezelfde uitkomsten meer geeft voor NO₂ en NO_x concentraties. Daarom is de fit als uitgangspunt genomen en is de formule vervolgens gewijzigd, zodanig dat de uitkomsten weer overeenstemmen. De formule voor de pluimhoogte wordt:

$$Pluimhoogte = \frac{X}{X+25} 40 Q_w^{0.5} \quad [6]$$

Wanneer we dit in SRM3+ implementeren, samen met de formule voor sigma-z, worden waarden berekend die redelijk dicht bij de oorspronkelijk waarden liggen, zie tabel 8.

Tabel 8 Berekende NO₂ en NO_x concentraties (in µg/m³) , gemiddeld over de hele meetperiode, 3 stations en niet uitgesplitst naar scheepstypen, berekend met SRM3+ en met de SRM4 sigma-z en pluimhoogte benadering

	SRM3+		SRM4 benadering	
	NO ₂	NO _x	NO ₂	NO _x
st 1	2.32	8.03	2.72	7.69
st 2	1.66	2.70	2.03	2.80
st 3	0.64	0.85	0.62	0.71



Figuur 33 Plots van berekende waarden van de pluimhoogte tegen de warmte emissie; alle drie stations, voor drie windsnelheidsklassen en (rechtsonder) voor alle windsnelheden tezamen

8.3.3 K-waarden voor NO₂ vorming

De K-waarden voor de NO₂ vorming blijken sterk van de afstand af te hangen. Uit [6] valt af te leiden dat K berekend kan worden uit de volgende formule (indien de initiële NO₂ fractie op nul wordt gesteld):

$$K = \frac{[O_3][NO_2]}{[NO_x]} - [NO_x] \quad [7]$$

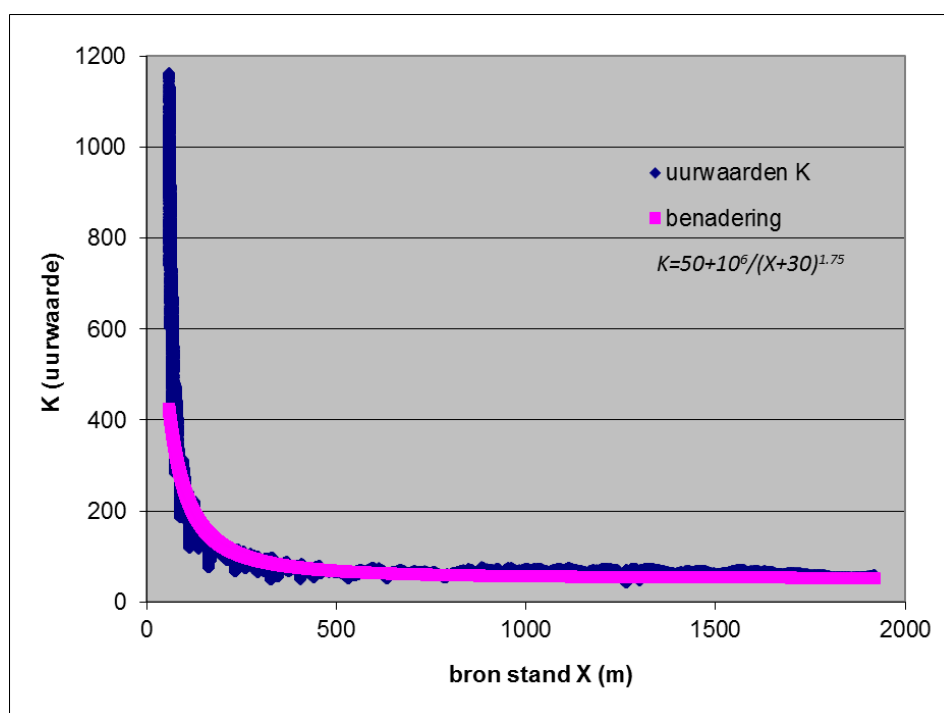
Wanneer de waarde van K per uur wordt berekend en tegen de bronafstand wordt uitgezet voor alle drie de stations wordt Figuur 34 verkregen. Daarin is te zien dat K sterk afneemt met toenemende afstanden. Uit deze figuur kan een functie worden afgeleid, maar ook hier geldt dat bij implementatie van die curve dat geenszins dezelfde uitkomsten worden verkregen, want ook K werkt niet lineair door naar de

uitkomsten. Daarom is een andere (min of meer vergelijkbare) functie gezocht, zodanig dat de uitkomsten goed worden benaderd. De functie die dan toegepast moet worden is:

$$K = 50 + \frac{1000000}{(X+30)^{1.75}} \quad [8]$$

Met X de bronafstand in meters.

Na toepassing van deze functie zijn de uitkomsten voor de drie stations redelijk goed in overeenstemming met de oorspronkelijke modelformulering, zie tabel 9 en figuur 35.

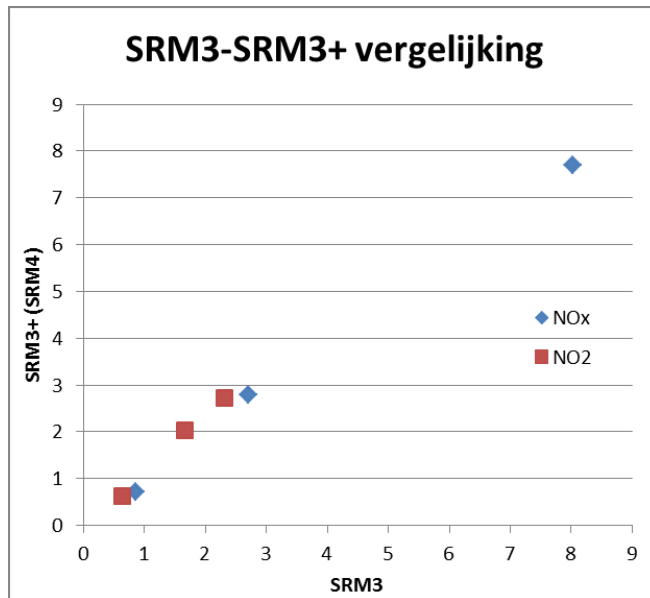


Figuur 34 Plot van berekende waarden van K (formule [8]) tegen de afstand; alle drie stations, K glijdend gemiddeld tegen (gesorteerde) afstand; benadering toegevoegd

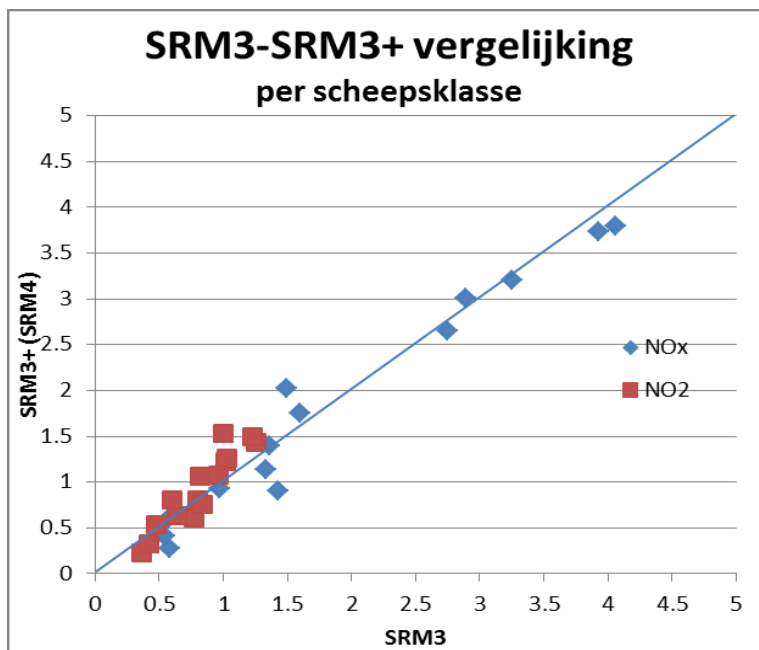
Tabel 9 Berekende NO₂ en NO_x concentraties (in µg/m³), gemiddeld over de hele meetperiode, 3 stations en niet uitgesplitst naar scheepstypen, berekend met SRM3+ en met de SRM4 sigma-z en pluimhoogte en toepassing van K als benadering voor de NO₂ vorming

	SRM3		SRM4 benadering	
	NO ₂	NO _x	NO ₂	NO _x
st 1	2.32	8.03	2.72	7.69
st 2	1.66	2.70	2.03	2.80
st 3	0.64	0.85	0.62	0.71

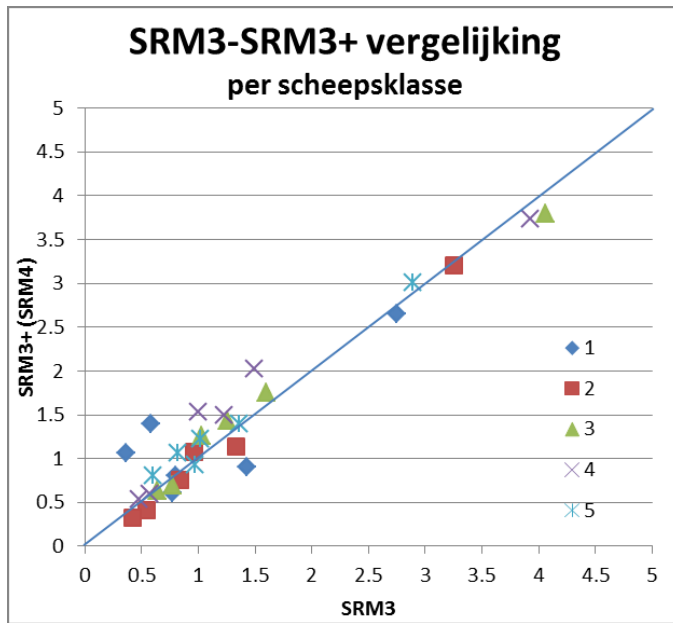
Natuurlijk is het van belang om te zien hoe deze benaderende functies zich gedragen, als de berekeningen worden uitgesplitst naar scheepsklasse. Dit is gedaan voor de NO_x en NO₂ concentraties, enerzijds om te zien of NO_x zich anders gedraagt dan NO₂, zie figuur 36. Anderzijds is een plot gemaakt, om te zien of de scheepsklassen zich significant anders gedragen, zie figuur 37.



Figuur 35 Vergelijking van berekende NOx en NO₂ concentraties, gemiddeld over alle scheepsklassen en alle uren. X-as: de normale SRM3 rekenwijze, y-as: berekend met SRM4 gemiddelde functies

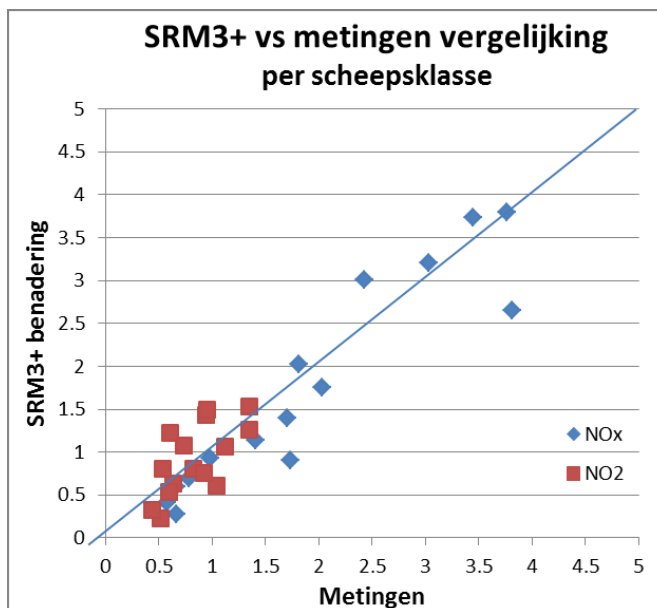


Figuur 36 Vergelijking van berekende NOx en NO₂ concentraties, nu gemiddeld per scheepsklasse. X-as: de normale SRM3 rekenwijze, y-as: berekend met SRM3+/SRM4 gemiddelde functies



Figuur 37 Vergelijking van berekende NO_x en NO₂ concentraties, nu gemiddeld per scheepsklasse. X-as: de normale SRM3 rekenwijze, y-as: berekend met SRM4 gemiddelde functies

Zowel in figuur 36 als 37 blijkt niet dat er duidelijk significante afwijkende gedragingen zijn bij toepassing van de benaderende functies. Rest nog om de uiteindelijke vergelijking van de SRM3+ benadering met de metingen te tonen. Uiteindelijk is dat waar het om gaat, zei figuur 38. De scatter is wel wat groter, maar er zijn geen systematische afwijkingen te zien, die duiden op een verkeerd mechanisme in de modellering.



Figuur 38 Vergelijking van berekende NO_x en NO₂ concentraties met SRM3+ benaderingen, gemiddeld per scheepsklasse. X-as: metingen, y-as: de SRM3+ (SRM4) rekenwijze

9 DISCUSSIE

9.1 Analyse van de meetgegevens


Het uitvoeren van veldmetingen geeft doorgaans operationele problemen, die resulteren in data-uitval en het toepassen van correcties achteraf. Deze meetcampagne was daar geen uitzondering op. Dit resulteerde in een beperkt, maar toch nog ruim voldoende aantal meetgegevens. Op grond van de windroosgegevens en de meetperiode (1 april-15 augustus) zou men ongeveer 1500 bruikbare uren mogen verwachten. Hiervan zijn er na selectie uiteindelijk ruim 600 (40%) over gebleven. Dit komt dus ten dele door data-uitval, maar ook door de eisen aan de analyseerbaarheid van de scheepspieken en de eis dat de pieken aan AIS gegevens van schepen gekoppeld moesten kunnen worden. Daarbij gold ook nog eens de eis dat er per piek slechts één passerend schip in het zoekgebied mocht zijn.

Een tweede opmerking die geplaatst kan worden, geldt de meethoogte en -locatie van de meteorologische metingen. De sonics stellen hoge eisen aan de omgeving waar ze geplaatst worden. Voor het eerste meetpunt geldt dat de locatie zeker niet ideaal was, en de analyse wellicht daardoor beïnvloed heeft. De meethoogte is weliswaar 5,5 m, maar effectief niet meer dan 3 a 4 m, waarbij het niet ondenkbaar is dat het stromingsprofiel over het ARK, de (lage) dijk en de obstructie van het boerderijcomplex zelf de meting beïnvloed heeft. In de data zelf is dit niet direct te zien, in ieder geval niet op een eenvoudige manier, die binnen dit project toegepast kon worden. Het kan ertoe geleid hebben dat niet alleen de windsnelheid beïnvloed is, maar ook het turbulentieniveau. In de modelberekeningen is het turbulentieniveau afgeleid van station 3, dat een vlak voorland had. Het turbulentieniveau bij het ARK zelf en dus de verspreiding van de rookpluimen over de eerste 100 a 250 m kan daardoor sterker zijn geweest dan op grond van de 3D-sonic metingen is berekend. Dit kan betekenen dat de verlaagde pluimstijging (via de offset van 0,2 MW) eigenlijk deels door de versterkte turbulentie is veroorzaakt. Met andere woorden: op station 1 en in mindere mate op station 2 had een wat hogere ruwheid voor de berekeningen gehanteerd moeten worden met als gevolg een vlakker verloop van de concentraties van station1 naar station3. Erg waarschijnlijk is dit niet; het is immers al getest door de initiële dispersie groter te maken, maar de vraag is of dit voldoende uitsluitel geeft. Op station 3 is mogelijk ook invloed geweest van de omringende bomen op de sonic metingen, die ertoe hebben kunnen leiden dat het windveld ter plaatse van de meting al is afgeremd. In dat geval is de waarde van u^* gekoppeld aan een te lage windsnelheid waardoor alle berekende concentraties eigenlijk wat hoger hadden moeten zijn.



Figuur 39 De grootste scheepklassen zijn in de analyse hier nauwelijks voorgekomen

Een derde opmerking geldt de werkwijze die tot de pieken heeft geleid. Hoewel de pieken zelf op zich goed zijn gedetecteerd, is het duidelijk dat op station 2 en zeker op station 3 de pluimen van de schepen uit meerdere pieken bestaan. Zonder een diepere analyse van de meetgegevens was het niet mogelijk om meerdere pieken te combineren tot één pluim van één schip. Met andere woorden: de berekende pluimbreedtes zullen in sommige (of zelfs veel) gevallen licht tot zelfs sterk onderschat zijn.



Dat blijkt wel uit de analyse van de instantane pluimbreedtes (figuur 15). De afgeleide uurgemiddelde concentraties en concentratiebijdragen per scheepsklassen zijn hierdoor niet beïnvloed, het maakt immers niet uit of een gemiddelde concentratie afkomstig is van één piek of van meerdere pieken. De analyse van de instantane pluimen echter is hierdoor niet erg betrouwbaar. Overigens wijkt de gevonden relatie voor de instantane pluimbreedte niet erg af van wat nu in het NNM is opgenomen. Het advies luidt dan ook om deze NNM-relatie niet aan te passen.

De vierde opmerking betreft de koppeling van gevonden NO_x en NO₂ pieken aan een schip. Om de transporttijd van de pluim te bepalen is de windsnelheid van station 1 genomen. Deze is eigenlijk te laag voor het hele verspreidingsveld van ARK naar station 3. Voor de koppeling is de windsnelheid gemiddeld over de tijd van de piekbreedte. Bekend is dat door het turbulente karakter van de wind de zo berekende gemiddelde windsnelheid over een relatief korte tijd, maar een beperkte (auto)correlatie in tijd en plaats heeft. Met andere woorden: de gemiddelde windsnelheid die de pluim heeft ervaren tijdens transport van schip naar monitor kan anders zijn dan welke is afgeleid van station 1. Mede om die reden is er een redelijke bandbreedte in de tijd en in de plaats genomen waarbinnen het schip zich moet bevinden, om het toe te kennen aan de NO_x-piek. De keuzen lijken redelijk goed te werken, maar het is niet uit te sluiten dat er toch wat onzekerheid is toegevoegd aan de resultaten.


Een belangrijk discussiepunt betreft de invloed van de bomenrijen. Uit de windmetingen op station 1 en 3 kon worden afgeleid dat de windsnelheid op station 1 een factor 2 lager is dan op station 3. De voor de hand liggende conclusie is getrokken dat dit door de bomenrijen moet zijn veroorzaakt. Maar helemaal zeker is dit bepaald niet. Het is mogelijk dat door een meer gedetailleerde analyse van de windmetingen (bijvoorbeeld naar windrichting en naar stabiliteit) op alle drie stations een meer onderbouwde conclusie kan worden getrokken. De vraag blijft daarom een beetje open of er voortaan een bomenfactor moeten worden toegevoegd voor het ARK (in het zomerhalfjaar). Op grond van de hier gepresenteerde analyses luidt het antwoord vooralsnog bevestigend.

Een zijdelingse opmerking kan gemaakt worden dat in de hele analyse voorbij gegaan is aan de mogelijkheid dat ook wegverkeersemisseries de metingen hebben beïnvloed. Hoe groot deze mogelijke beïnvloeding is, is niet nagegaan; het uitgangspunt is steeds geweest dat de verkeersintensiteiten op de weg langs het kanaal niet groot zal zijn.

Ten slotte zij opgemerkt dat een beter inzicht in de werking van het model wordt verkregen als de prestaties (vergelijking metingen met modeluitkomsten) worden gedaan voor subsets van de meteorologie. Interessant is vooral het gedrag van het model in a) stabiele condities en onder b) situaties met lage of juist hogere windsnelheden. Stabiele condities zijn belangrijk omdat deze op de grotere afstanden bepalend zijn voor de jaargemiddelde concentraties. Neutrale situaties dragen nog wel iets bij, maar instabiele situaties kan men bijna verwaarlozen, omdat de pluimverspreiding dan zo sterk is, dat de bijdrage aan jaargemiddelden laag is. Nadere beschouwing van deze uitsplitsingen wordt sterk aanbevolen.

9.2 Keuze van de invoerparameters

De belangrijkste opmerking die hier geplaatst kan en moet worden, betreft de keuze van de (NO_x en warmte-) emissies voor de afzonderlijke binnenvaartschepen. Zoals in het voorgaande is uitgelegd, is aanvankelijk vertrouwd op de gegevens van Prelude, inclusief de forfaitaire vaarsnelheden en beladingsgraden. Dit leidde tot te hoge berekende concentraties, die niet op een plausible wijze verklaard konden worden, anders dan dat de emissies in werkelijkheid lager moesten zijn. Daarom is de werkelijke vaarsnelheid (die gemiddeld inderdaad lager was) aanvankelijk genomen om de prelude-



emissies te corrigeren, onder de aanname dat de emissie ongeveer met de derde macht van de vaarsnelheid stijgt. De NO_x emissie is dus erg gevoelig voor de werkelijke vaarsnelheid. Door een vaarsnelheid beperking ter plaatse en uit economische overwegingen voeren de schepen systematisch langzamer dan in Prelude is aangenomen. Mede hierom is TNO halverwege het project gevraagd een schatting-op-maat te maken van de individuele schepen. De uiteindelijke modelberekeningen zijn met deze emissies uitgevoerd. Dit betekent wel dat voor de praktijk van Prelude-berekeningen er een mogelijkheid zou moeten zijn om de lokale werkelijke vaarsnelheden als invoer op te geven.

Een tweede opmerking betreft de keuze van de offset voor de warmte emissie. Deze is in deze studie op 0,2 MW gesteld, maar feitelijk zou dit beter afgestemd kunnen worden op de initiële pluimbreedte, die nu voor de time being op 5 m is gesteld. Wellicht moet deze nog gedifferentieerd worden, zodat een betere fit met de metingen per scheepsklasse gevonden zou kunnen worden.

9.3 Modelaanpassingen

Het STACKS model is gebaseerd op NNM, uitgebreid met enkele aanpassingen om het model geschikt te laten zijn voor binnenvaart. Deze uitbreidingen uit 2010/2011 omvatten toen:

- toevoegen van een lijnbronmodel om de dispersie van een vaarweg te bepalen
- aanpassen van de pluimstijgingsberekening door in plaats van de windsnelheid op pluimhoogte de vectorieel samengestelde windsnelheid en vaarsnelheid op pluimhoogte te nemen
- aanpassing van de NO_x-NO₂ omzetting door de omzetting te bepalen in een puntbronmodel met ozoninmenging, gebruikmakend van de vectorieel samengestelde windsnelheid en vaarsnelheid
- de pluimstijging dicht bij de bron wordt berekend met de 1/3-2/3 'wet'. Deze geeft de pluimstijging op korte afstanden als functie van de afstand (2/3 macht) en de warmte emissie (1/3 macht)
- de pluimstijging wordt maar voor de helft in de pluimhoogte verwerkt om het (vermoede) effect van scheepsopbouw en locatie van de uitlaat te verrekenen
- de emissiehoogte is arbitrair vastgesteld op 2,5 m

Dit uitgangsmodel dient op enkele punten te worden aangepast om de uitkomsten met de metingen overeen te laten komen. Deze aanpassingen worden nader toegelicht.

De berekening van NO_x naar NO₂ concentraties ten gevolge van de scheepvaart op een kanaal (of rivier) geschiedt in STACKS door een lijnbron aan te nemen met een bepaalde lengte en een bekende NO_x emissies (in g/s). Maar de omzetting van NO_x naar NO₂ vindt niet in een echte lijnbron plaats, maar in geïsoleerde (bewegende) puntbronnen. Om daar rekening mee te houden wordt de omzetting berekend in de individuele pluim per schip, met een emissie gedeeld door het aantal schepen per uur op ARK. Het aantal schepen moet dus ook als invoer opgegeven worden.

De berekening van de omzetting van NO_x naar NO₂ geschiedt onder invloed van ozon en toepassing van het fotostationaire evenwicht, waardoor het gevormde NO₂ weer deels wordt gedissocieerd. De berekening vindt plaats in de instantane pluim, waarbij tot nog toe is aangenomen dat de lucht in de instantane pluim homogeen gemengd is. Uit de analyses in deze studie blijkt dat deze aanname voor de korte afstanden, in ieder geval op station1 niet geldt. Daarom is een correctiefilter getuned op de metingen zodanig dat de omzettingsgraad op station 1 overeenkomt met de metingen. Deze correctie is uitgevoerd onder de aanname dat het aandeel initieel uitgestoten NO₂ 5% is.

De pluimstijging geschiedt in het NNM door de pluimstijgingsformules toe te passen. Dat betekent dat eerst de eindstijging wordt bepaald en daarna pas de dispersie wordt berekend. Voor normale

schoorstenen is dat voldoende, maar schepen hebben (flinke) emissies die vrijwel op grondniveau vrijkomen. Men moet er dan rekening mee houden dat de pluimhoogte in werkelijkheid afstandafhankelijk is. Daarom is de pluimstijging in STACKS aangepast en wordt berekend met de formule:

$$\Delta H(x) = 1.6 \frac{F^{1/3} X^{2/3}}{u(z)} \quad [9]$$

Met F de buoyancy factor ($=8.8 \cdot Q_w$, de warmte emissie in MW). Omdat u(z) afhankelijk is van de pluimhoogte, dient ΔH iteratief berekend te worden.

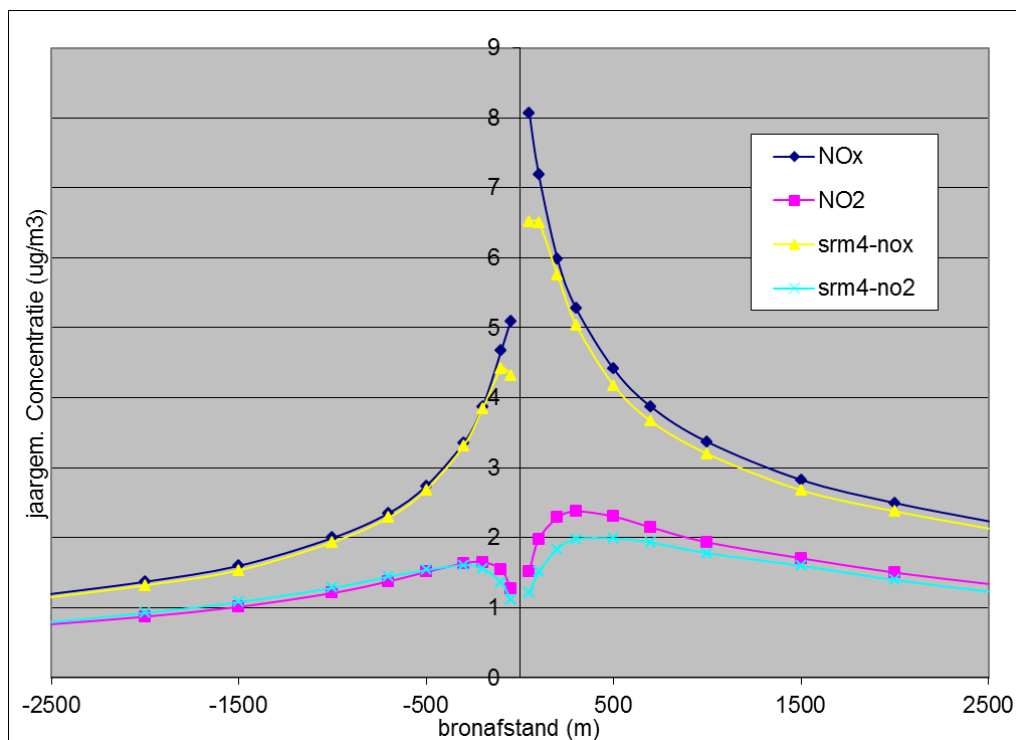
Uit deze studie blijkt het aannemelijk te zijn, dat de pluimstijging bij binnenvaart gereduceerd wordt door ofwel de locatie van de uitlaat (achterzijde/bovenop de opbouw) en/of de obstructie van de scheepsopbouw. De metingen konden het beste verklaard worden indien een offset van 0,2 MW wordt gehanteerd. Dit is gevonden onder de aanname dat de geschatte warmte output die door TNO per schip is vastgesteld ook werkelijk geldig is. Indien de warmte output in de toekomst systematisch lager blijkt te zijn, moet deze offset opnieuw worden bepaald. Een belangrijke consequentie hiervan is dat de grotere schepen minder zullen bijdragen aan de verslechtering van de luchtkwaliteit langs een vaarweg dan tot nu toe is aangenomen en de kleinere schepen (relatief) meer. Vooral voor vaarwegen waarop meer grote schepen varen, zoals de Waal en Nieuwe Waterweg kan dit van belang zijn. Een verificatie van deze extrapolatie verdient zeker aanbeveling.

9.4 Representativiteit van de uitkomsten

Over de invloed van de bomen is al één en ander gesteld. Dit maakt een doorvertaling van de uitkomsten naar andere vaarwegen alleen mogelijk, indien ervan wordt uitgegaan dat de bomen inderdaad verantwoordelijk zijn voor de gemeten verlaagde windsnelheden op station 1. Een betere onderbouwing van deze aanname is dus essentieel. Voorts is het zo dat de scheepsintensiteiten op het ARK 's nachts aanzienlijk lager zijn dan overdag. Dat maakt een doorvertaling naar andere vaarwegen alleen mogelijk door met modelberekeningen aan te tonen dat de uitkomsten correct zijn voor specifieke uren van een etmaal. Ook zal een andere vlootsamenstelling gelden voor andere vaarwegen. En op rivieren hebben schepen te maken met de stroming, heen- en terugvarende schepen hebben niet dezelfde vaarsnelheid ten opzichte van de oever (en dus de wind); dit heeft invloed op de uitkomsten.

De hier gepresenteerde periode-gemiddelde concentraties zijn zeker NIET representatief voor het jaargemiddelde. Dat komt omdat de metingen plaatsvonden in het zomerhalfjaar, terwijl in het winterhalfjaar de weersomstandigheden vanzelfsprekend anders zijn. En de scheepsintensiteit die in de analyses voorkomen is lager dan de werkelijke intensiteit. Gemiddeld zijn er ongeveer 4 (2354/608) schepen per uur in de dataset; terwijl de scheepsintensiteit op het ARK ruim 85.000 schepen per jaar bedraagt, dus ruwweg 10 schepen per uur, een factor 2,5 hoger dus. Maar de in de vorige paragrafen gepresenteerde gemiddelde concentraties betroffen steeds gemiddelden over de gekozen uren met geldige metingen en die zeggen nog niets over gemiddelden over een bepaalde tijdsperiode. Als we deze aspecten in rekening brengen, kunnen de jaargemiddelde NO_x en NO₂ concentraties berekend worden over een profiel van een vaarweg als het ARK, maar zonder bomen; met scheepsintensiteiten uniform over de uren van een dag verdeeld (in werkelijkheid is de verdeling gebiased naar de daguren) zie figuur 40. Daarin is geplot wat het NO_x en NO₂ profiel over een vaarweg (NW-ZO oriëntatie) in het midden van Nederland zou zijn, (ruwheid 10 cm) met eenzelfde vlootsamenstelling en emissies als op het ARK; 10 schepen per uur (voor alle uren van het etmaal); geen bomenrij langs de vaarweg. De berekeningen (op uurlijkse basis) zijn uitgevoerd met het STACKS model met a) de aanpassingen, die uit deze studie zijn

afgeleid; en b) met STACKS, waarin de berekening van pluimhoogte, sigma-z en NO₂/NO_x is uitgevoerd met de generieke functies in plaats van met de normale (per uur variërende) waarden voor deze parameters. De constante 50 in [8] is daarbij aangepast naar 40 om een goede match te verkrijgen. De overeenstemming is dan heel bevredigend. Tot slot kan geconcludeerd worden dat de bijdrage op jaarbasis van het ARK geen hoge waarden laat zien, lager dan tot nu toe werd verondersteld.



Figuur 40 Berekende NO_x en NO₂ concentraties met SRM3 aangevuld met scheepvaart en met SRM3+/SRM4 benaderingen, gemiddeld over 10 jaar, scheepsintensiteit 85000/jaar, uniform verdeeld over de uren van een etmaal; z₀=10 cm

10 CONCLUSIES

In de periode van april tot half augustus 2014 zijn metingen uitgevoerd aan de (NO_x en PM) emissies van binnenvaartschepen. De NO_x metingen zijn geanalyseerd en gekoppeld aan scheepsdata, die uit AIS data zijn afgeleid. De PM metingen zijn in deze studie niet gebruikt, maar worden in een separaat rapport gerapporteerd. Voor zowel NO_x als NO₂ zijn gemiddelde concentraties berekend uit de meetdata en deze zijn uitgesplitst naar scheepsklasse. De schepen zijn daarbij onderverdeeld in 5 klassen, op basis van AVV indeling, ongeveer naar bruto tonnage. Daarbij zijn in 608 uren 2354 schepen geïdentificeerd. Scheepsgegevens zijn per uur gegroepeerd en deze zijn in invoerbestanden voor modelberekeningen opgenomen. De meteorologische data zijn verzameld uit lokale metingen, aangevuld met synoptische data van Schiphol. Ook hiervan zijn uurlijkse data in invoerbestanden gevoegd.

De volgende conclusies op hoofdlijnen kunnen worden vermeld:

- met de uitgevoerde metingen is het goed mogelijk het model te valideren op de NO_x en NO₂ concentraties door de gemeten pieken te scheiden van de achtergrondconcentraties en deze pieken te integreren en vervolgens per uur te sommeren. Door de schepen in 5 scheepsklassen in te delen kon een gedetailleerde validatie plaatsvinden voor uurgemiddelde concentraties over deze subsets
- uit de metingen is af te leiden dat de pluimstijging over het algemeen niet verwaarloosd kan worden
- voor kleine emissies (tot 0,2 MW) is de pluimstijging echter wel te verwaarlozen
- de omzettingssnelheid op de korte afstand (<200 m) is niet goed met NNM chemie te beschrijven. Een correctiefunctie is nodig om de metingen te beschrijven, onder aanname dat de langzamere omzetting te wijten is aan inhomogene menging in de instantane pluimafmetingen
- een betere functie voor de instantane pluimdimensies dan nu beschikbaar in het NNM, kon niet met voldoende zekerheid worden afgeleid binnen dit project. Een nadere analyse van de NO_x instantane piekbreedten kan in dit punt wellicht verbetering brengen
- de scheepsemissies die uit de Prelude rekentool worden afgeleid kunnen sterk afwijkende waarden in de berekende concentraties geven indien niet nauwkeurig de lokale vaarsnelheid en beladingsgraad worden beschouwd
- de bomen langs het Amsterdams-Rijnkanaal lijken een sterk afremmende invloed op het windveld te hebben. De windsnelheid dicht bij het kanaal (50 m) is slechts de helft van de windsnelheid in het vrije veld. Alleen indien deze lagere windsnelheid in het model wordt verrekend, kunnen de metingen goed worden verklaard. De gemiddelde windsnelheid op station 1 was (mede daarom) erg laag: 1.5 m/s
- de vertaling naar andere vaarwegen is niet zonder meer mogelijk: het grote vaarsnelheidseffect op de emissies maakt dat goed naar de vaarsnelheid bij rivieren, waar stroming een rol speelt, moet worden gekeken
- de grootste scheepstypen (> 10000 ton, veelal meervoudige duwbakken) zijn niet in dit project beschouwd. Extrapolatie van de pluimstijgingsmethodiek lijkt wel mogelijk, maar verdient meer aandacht
- de berekende bijdrage aan de NO_x en NO₂ concentraties op jaarbasis langs het ARK laten geen hoge waarden zien, aanzienlijk lager dan tot nu toe is verondersteld.

Op basis van de validatie in dit project is het model op de volgende detailpunten aangepast:

- de pluimstijging dient niet te worden aangepast door deze voor 50% te verrekenen, maar door een offset in de warmte emissie te nemen. De offset waarde is bepaald op 0,2 MW, waarmee de warmte emissie eerst wordt verlaagd alvorens de pluimstijging te berekenen. Een reductie van 50% is in het model geschrapt

- de initiële dispersie (σ_0) is vastgesteld op 5 m
- om de NO_2 concentratie goed te beschrijven moet een correctiefunctie op de NO_x/NO_2 verhouding worden toegepast voor de eerste 500 m vanaf de bron.

En ten aanzien van SRM2/SRM4:

SRM2 lijkt aangepast te kunnen worden tot een SRM4 model door de volgende wijzigingen door te voeren:

- een andere formulering van σ_z als functie van de afstand, en uitgesplitst naar ruwheidsklassen
- een afstandafhankelijk K-waarde, voor alle scheepsklassen
- een functie voor pluimhoogte, die afhankelijk is van de warmte output.

Deze aanpassingen zijn in een aparte STACKS-versie doorgevoerd en de vergelijking met de oorspronkelijke STACKS-uitkomsten laat zien dat met deze benaderingen in plaats van de uurwaarden, resultaten worden verkregen die binnen 20% van de originele uitkomsten liggen, zowel voor de gemiddelden over alle scheepsklassen als voor de gemiddelden per scheepsklasse. Vergelijking van de modelresultaten met benaderende functies met de metingen laten geen bias zien, de residuele variantie is $0.15 (\text{ug}/\text{m}^3)^2$, ($\text{sigma}=0.4 \text{ ug}/\text{m}^3$); 85% van de variantie in de metingen kan verklaard worden.

Om SRM4 operationeel te maken moeten de benaderende functies gegeneraliseerd worden door:

- a enkele analyses te doen binnen de ARK dataset²
- b uitbreidingen naar een volledige windroos (12 windrichtingsklassen), 3 of 4 windsnelheidsklassen en enkele ruwheidsklassen.

Extrapolatie naar de grootste scheepstypen is nodig, validatie daarvan is niet voorzien en misschien niet nodig, wel is het nodig de impact hiervan in kaart te brengen. Ten slotte zijn vergelijkingen met het volledige SRM3 (STACKS) nodig om de kwaliteit van de benaderingen van SRM4 ten opzichte van SRM3 goed in beeld te hebben en om de optimale (scheeps en meteo) klassegrenzen goed te kunnen bepalen.

² De werking en parametrisatie van het model is tot nog toe voornamelijk getest voor de aparte scheepsklassen en het totaal generaal. In de meetset zijn de weeromstandigheden sterk gebiased naar lage windsnelheden en zomers weer en bovendien overdag. Om generalisatie naar een andere verdeling van weerssituaties te kunnen maken moet het model voor de aparte windsnelheidsklassen, uren van de dag en stabiliteiten aantoonbaar goed zijn geparametriseerd.



11 REFERENTIES

KEMA, 2011. Scheepvaartmodellering Fase 2: In consensus naar een nationale aanbeveling, KEMA rapport 50964435-TOS/HSM 10-4539, juni 2011.

ECN, 2014. Rapportage scheepvaartmetingen, 2014. ECN rapport ECN-E--14-044, september 2014.



DNV GL

Vanuit haar streven leven, bezit en het milieu te beschermen stelt DNV GL organisaties in staat de veiligheid en duurzaamheid van hun activiteiten te bevorderen. DNV GL biedt classificering en technische borging, naast software en onafhankelijk, deskundig advies voor de maritieme, de olie- en gas en de energiesector. Daarnaast biedt het bedrijf certificeringsservices voor klanten in uiteenlopende sectoren. DNV GL, opgericht in 1864, is actief in meer dan 100 landen over de hele wereld en telt 16.000 medewerkers, die klanten helpen richting een veiligere, slimmere en groenere wereld.