



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

**Modelleren van scheepvaartemissie
fase 1**

Harmonisatie tussen SRM3 en SRM2 voor NO_x

RIVM briefrapport 680705023/2012
P.L.Nguyen | J.Wesseling



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

Modelleren van scheepvaartemissie fase 1

Harmonisatie tussen SRM3 en SRM2 voor NO_x.

RIVM briefrapport 680705023/2012
P.L.Nguyen| J.Wesseling

Colofon

© RIVM 2012

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

P.L.Nguyen, RIVM
J.Wesseling, RIVM

Contact:
J.Wesseling
CMM
Joost.Wesseling@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van ministerie van IenM, in het kader van Stedelijke luchtkwaliteit en Mrv

Rapport in het kort

Modelleren van scheepvaartemissie fase 1

Momenteel bestaat er geen wettelijk erkende methode om scheepvaartemissies rond vaarwegen te berekenen. Diverse partijen gebruiken daarom hiervoor de standaard rekenmethode voor industrie (SRM3). Uit onderzoek van het RIVM blijkt dat scheepvaartemissies eenvoudiger met de standaard rekenmethode voor wegverkeer (SRM2) zijn te modelleren. Deze methode is minder omslachtig. Wel zijn enkele aanpassingen nodig en moeten de resultaten van SRM3-berekeningen nog op basis van metingen worden gevalideerd.

Het is wenselijk om rekenmethoden voor scheepvaartmodellering op elkaar af te stemmen, zodat deze wettelijk kunnen worden verankerd in de Regeling beoordeling luchtkwaliteit (Rbl). De studie is op verzoek van het ministerie van Infrastructuur en Milieu is uitgevoerd. In een volgende fase zullen meer testen worden gedaan om de vorming van NO₂ te berekenen.

Trefwoorden: scheepvaart, SRM2, SRM3

Abstract

Modelling of shipping emission first step

Currently there is no official method to calculate shipping emissions on waterways. Consequently, several parties use the standard calculation method for industry (SRM3) to calculate shipping emissions. A study undertaken by the National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) has shown that shipping emissions can easily be calculated by the standard calculation method for road traffic (SRM2). This method is less laborious. However, some adaptations are required and the results from SRM3 calculations still have to be validated based on measurements.

It is advisable to align modelling methods for shipping emissions so that they can be legally regulated by the Regeling beoordeling luchtkwaliteit (Rbl). This study was carried out by order of the Ministry of Infrastructure and the Environment. In the next step, more tests will be done to calculate the formation of NO₂.

Keywords: shipping, SRM2, SRM3

Inhoud

1	Inleiding—7
2	Scheepvaartdata gemodelleerd met SRM3—9
2.1	Effect van warmte-inhoud—10
2.2	Effect van ruwheid—11
2.3	Effect van vaarsnelheid—12
3	Scheepvaart modellering met SRM2—15
4	Scheepvaartemissie zonder warmte en zonder vaarsnelheid—19
5	Scheepvaart met warmte-inhoud en zonder vaarsnelheid—25
6	Scheepvaartemissie met warmte-inhoud en vaarsnelheid—29
7	Conclusies en aanbevelingen—31
7.1	Modelleren van NO _x scheepvaartemissie met SRM2—31
7.2	Aanbeveling—31
Referenties—33	
Bijlage 1: vergelijking tussen de NO_x bijdrage berekend met STACKS en met verschillende klassen van warmte-inhouden en vaarsnelheden—35	
Bijlage 2: vergelijking tussen de NO_x bijdrage berekend met STACKS en met TREDM—39	

1 Inleiding

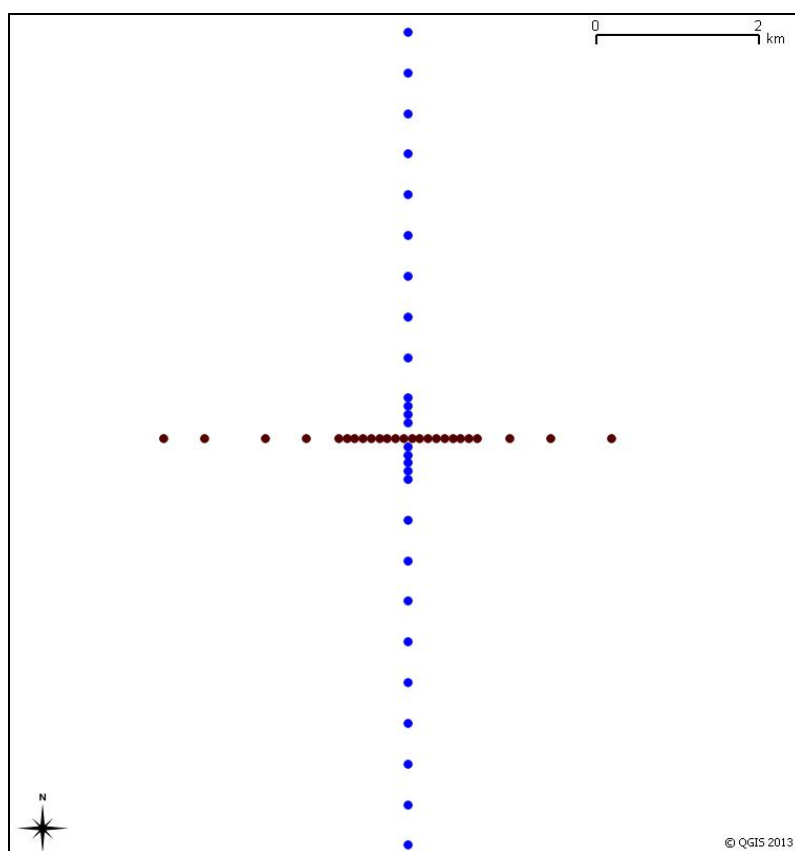
Scheepvaart wordt een relatief steeds belangrijkere bron van emissie naar de lucht. Dit is het gevolg van de dalende trend van luchtmissies door andere bronnen dan scheepvaart, terwijl de emissies van scheepvaart deze dalende trend niet vertonen. In de toekomst zou de emissie van drukke vaarwegen vergelijkbaar kunnen gaan zijn met die van snelwegen (Erbrink et al.,2011). Op dit moment valt het modelleren van scheepvaartemissie buiten het toepassingsbereik van de Standaard Reken Methoden (SRM) zoals die in de Regeling beoordeling luchtkwaliteit 2007 (Rbl 2007) zijn vastgelegd. Voor het modelleren van de verspreiding van scheepvaartemissie hanteren verschillende partijen zoals de DCMR, KEMA en TNO elk een eigen aanpak. Om onnodige discussies over de aanpak, uitvoering en resultaten van berekeningen aan scheepvaart te voorkomen is het van belang om hiervoor tot een nationale consensus te komen die uiteindelijk in de Regeling Beoordeling Luchtkwaliteit kan worden opgenomen. Deze concensus dient voor binnenvaart zowel Standaard Reken Methoden 2 als 3 te bevatten.

Een eerste vergelijking tuseen het model OPS (Operationele Prioritaire Stoffen model), SRM2 (TREDM is een SRM2 model van het RIVM dat conform de SRM2 rekent) en SRM3 (STACKS en ISL3a) liet bij lage ruwheid ($z_0=0.1$ m) en zonder warmte-inhoud en vaarsnelheid een goede overeenkomst tussen deze modellen zien (Erbrink et al.,2011). Voor andere ruwheden en meer complexe situaties (met warmte-inhoud en vaarsnelheid) is nog geen vergelijking tussen deze modellen beschikbaar. In de huidige studie wordt de mogelijkheid om de verspreiding van scheepvaartemissie met SRM2 te modelleren onderzocht, met als doel het doen van aanbevelingen die het modelleren van scheepvaartemissie met SRM2 mogelijk gaan maken. Hierbij wordt aansluiting gezocht bij SRM3. Het hier onderzochte modelleren van scheepvaartemissie met SRM2 heeft alleen betrekking tot binnenvaartemissie. Zeevaart valt momenteel buiten het toepassingsbereik van SRM2 omdat in SRM2 geen voorziening is getroffen om de invloed van de scheepopbouw in rekening te brengen.

2 Scheepvaartdata gemodelleerd met SRM3

Om SRM2 geschikt te maken voor scheepvaartemissie zijn eerst verschillende aspecten van het verspreidingsmodel aangepast en wordt vervolgens de NO_x bijdrage berekend met SRM2 gefit aan de resultaten van STACKS. De berekening met SRM3 zijn door DNV KEMA uitgevoerd met hun interne versie van SRM3, STACKS 2011.2.

Als testcase is een geschematiseerde situatie genomen. De bron heeft Oost – West ligging en een totale emissie van 5 gram per seconde over een traject met een lengte van 7 km. De bron loopt tussen de coördinaten (158500,433000) en (165500, 433000). De rekenpunten hebben allen een X-coördinaat van 162000 en Y-coördinaten van 433000±100, 200, 300, 400, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 en 5000. In figuur 1 is deze test case weergegeven. De berekening is uitgevoerd met meerjarige meteo.



Figuur 1 Testcase scheepvaartmodellering. Blauwe punten zijn locaties waarop de concentraties zijn berekend

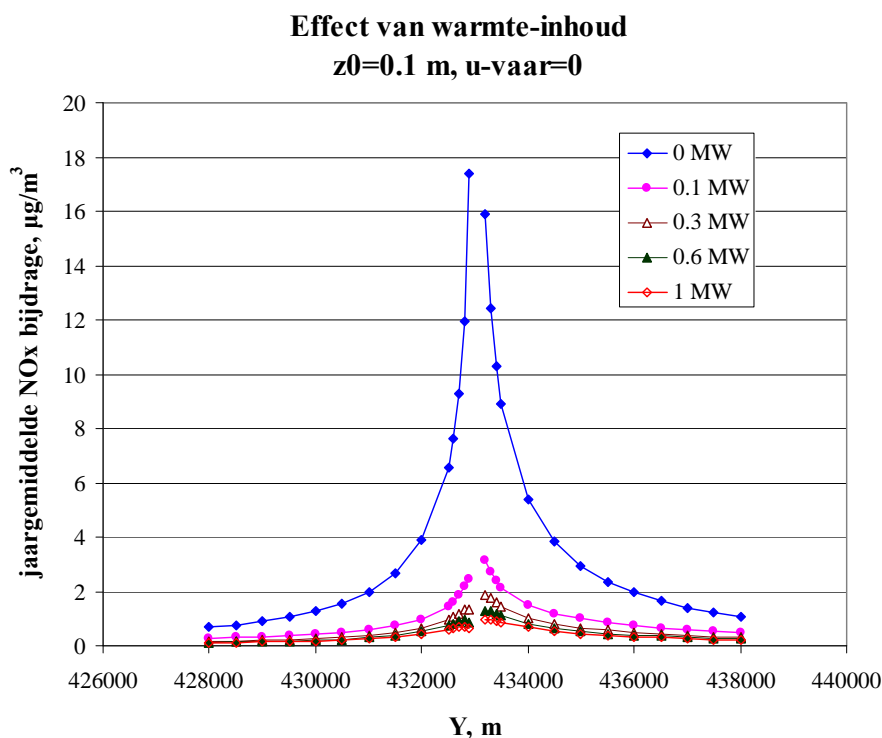
Voor deze testcase heeft DNV KEMA met verschillende vaarsnelheden (0 m/s, 3 m/s en 6 m/s) en warmte-inhouden (0, 0,1 MW, 0,3 MW, 0,6 MW en 1 MW) gerekend (levering van resultaten aan het RIVM in juni 2012). Deze berekeningen gaan uit van een stroomsnelheid van 1 m/s (stroomsnelheid van een rivier) en van 2 schepen die in tegengestelde richtingen op de waterweg varen. Bij een vaarsnelheid van 3 m/s betekent daarom dat deze schepen met snelheden van -4 m/s en 2 m/s respectievelijk, varen.

De schoorsteenhoogte is 2,5 meter, met een inwendige diameter van 0,2 meter en de uittreesnelheid is 2,6 m/s. Er is gerekend met 3 ruwheden: 0,1, 0,3 en 1m.

De resultaten van STACKS worden als de basis beschouwd waaraan het gemodificeerde SRM2 wordt gefit.

2.1 Effect van warmte-inhoud

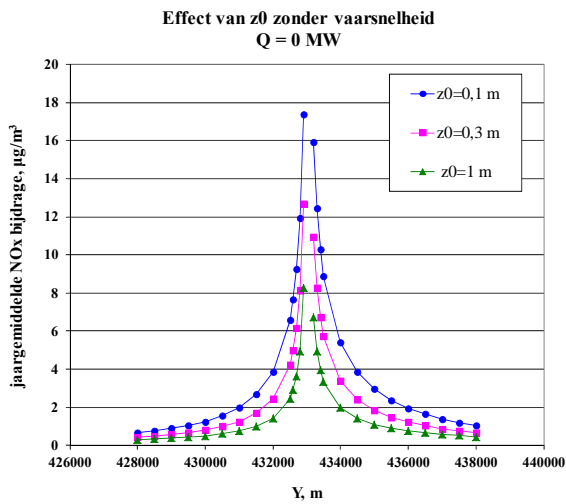
Om een indruk te krijgen van het effect van warmte-inhoud van de scheepspluim worden in Figuur 2 de NO_x bijdragen zoals berekend met STACKS (zonder vaarsnelheid en met verschillende warmteinhouden) met elkaar vergeleken. De figuur toont een groot effect van warmteinhoud op de NO_x bijdrage. Reeds bij een warmteinhoud van 0.1 MW neemt de NO_x bijdrage in de berekening snel af. Echter, als er warmteinhoud is dan heeft de hoeveelheid warmte relatief weinig invloed op de berekende NO_x bijdrage. Het absolute verschil tussen de NO_x bijdrage berekend met een warmte-inhoud van 0.1 MW en 1 MW is gering. Zonder vaarsnelheid is er praktisch geen verschil in NO_x bijdrage bij 0,6 MW en bij 1 MW.



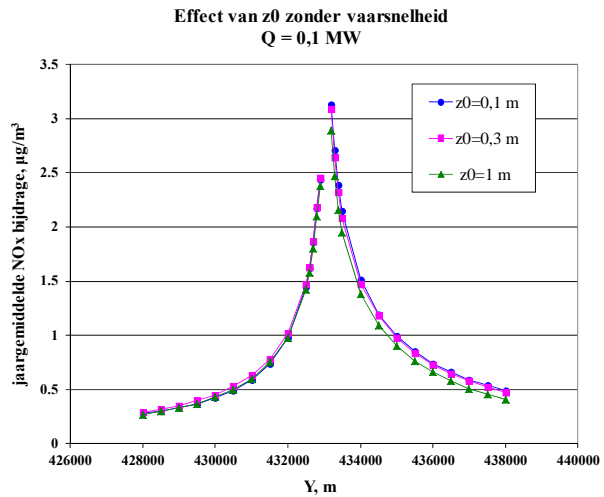
Figuur 2 Jaargemiddelde NO_x bijdrage in µg/m³ berekend met STACKS en met verschillende warmte-inhouden

2.2 Effect van ruwheid

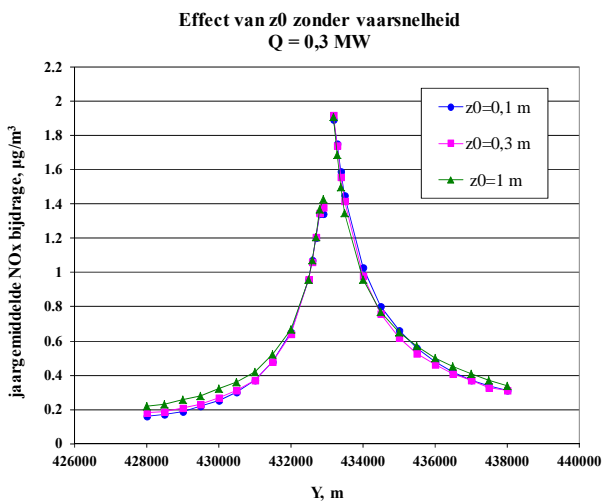
Figuren 3 t/m 6 tonen het effect van terreinruwheid, uitgedrukt als z_0 , op de NO_x bijdrage berekend met STACKS zonder vaarsnelheid. Zonder warmte-inhoud heeft de ruwheid een duidelijk effect op de berekende NO_x bijdrage: hoe hoger de ruwheid hoe lager de NO_x bijdrage. De NO_x bijdrage berekend met warmte-inhoud toont nagenoeg geen effect van de ruwheid of zelfs een (licht) omgekeerd effect (hogere NO_x bijdrage bij hogere ruwheid).



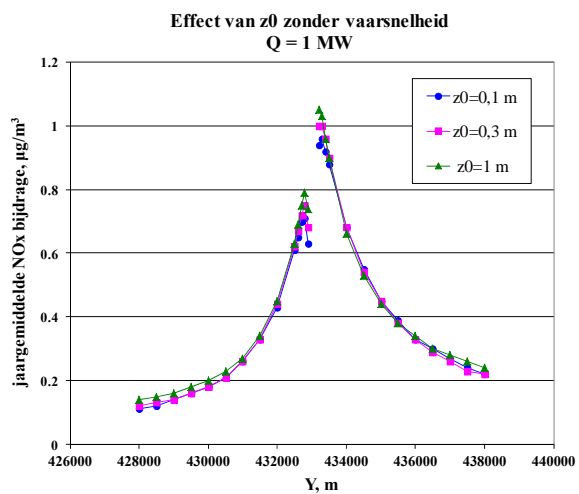
Figuur 3 (links) Jaargemiddelde NO_x bijdrage in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS zonder warmte



Figuur 4 (rechts) Jaargemiddelde NO_x bijdrage in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS en met $Q=0,1 \text{ MW}$



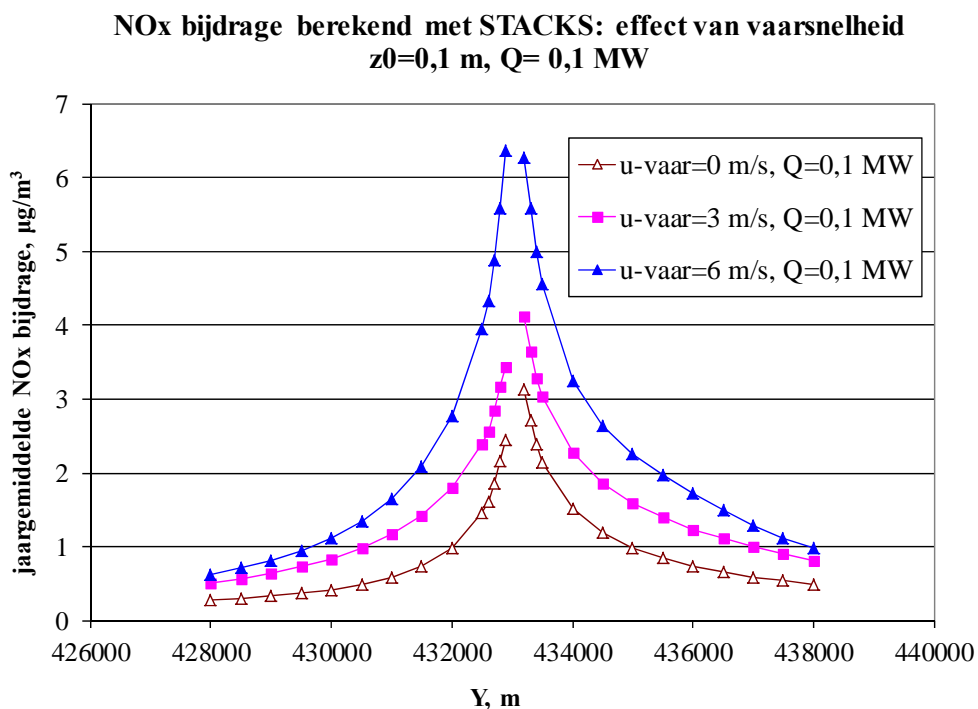
Figuur 5 (links) Jaargemiddelde NO_x bijdrage in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS en met $Q=0,3 \text{ MW}$



Figuur 6 (rechts) Jaargemiddelde NO_x bijdrage in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS en met $Q=1 \text{ MW}$

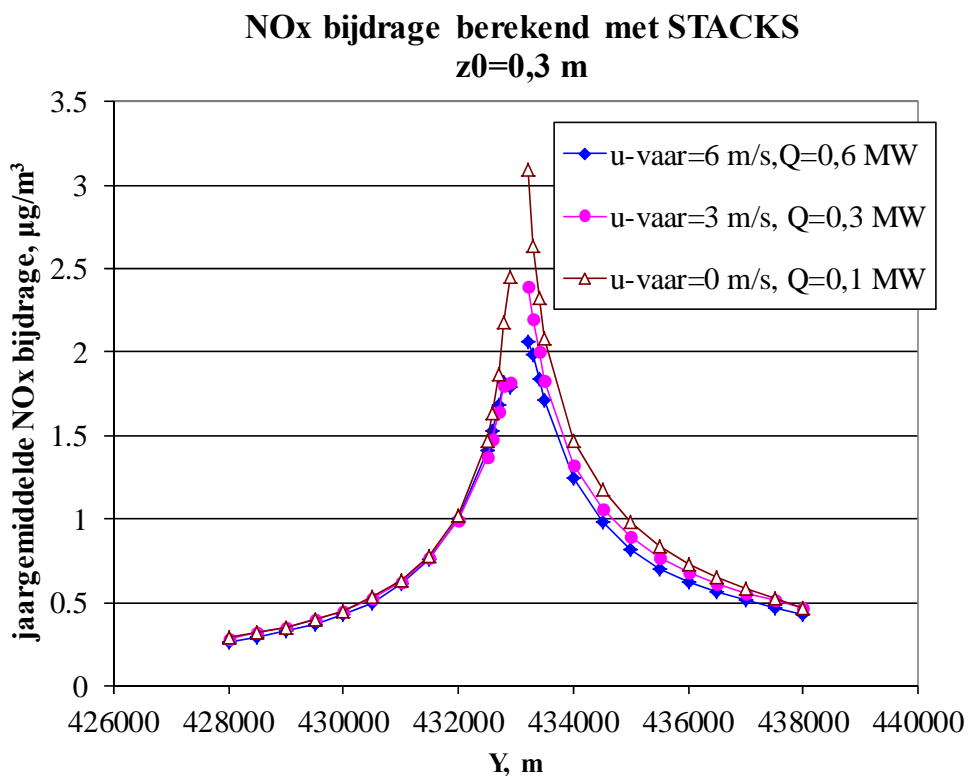
2.3 Effect van vaarsnelheid

De vaarsnelheid van een schip is van belang voor de wijze waarop een warme scheepspluim door interactie met de omgeving afkoelt. Bij een hogere snelheid is dat eerder dan bij een lage snelheid. Zonder warmte-inhoud heeft vaarsnelheid (per definitie) geen invloed op de berekende NO_x bijdrage. Met warmte-inhoud zijn de berekende NO_x bijdragen hoger bij hogere vaarsnelheid (Figuur 7). Deze resultaten van STACKS zijn in lijn met de verwachting: hogere vaarsnelheid leidt tot meer verlies van warmte van de pluim en met als gevolg, slechtere verspreiding van NO_x .



Figuur 7 Jaargemiddelde NO_x bijdrage in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS en met verschillende vaarsnelheden

In Figuur 8 zijn de NO_x bijdragen berekend met 3 verschillende warmte-inhouden en vaarsnelheden weergegeven: u-vaar=6 m/s en Q=0.6 MW, u-vaar=3 m/s en Q=0.3 MW, en u-vaar=0 en Q=0.1 MW. De figuur toont opmerkelijke overeenkomst tussen de NO_x bijdrage berekend met deze drie combinaties van warmte-inhouden en vaarsnelheden. In bijlage 1 zijn de vergelijkingen van andere klassen weergegeven. In alle onderzochte gevallen kan de NO_x bijdrage berekend met een bepaalde klasse van warmte-inhoud en vaarsnelheid bij benadering gelijk worden gesteld aan de NO_x bijdrage berekend met een lagere klasse van warmte-inhoud en vaarsnelheid. Figuur 9 toont de klassen waarvoor de berekende NO_x bijdragen bij benadering gelijk zijn.



Figuur 8 Jaargemiddelde NO_x bijdrage in µg/m³ berekend met STACKS en met verschillende vaarsnelheden en warmte-inhouden. Vanaf ruim 200-300 m van de bron is de NO_x bijdrage berekend met deze drie klassen nagenoeg gelijk.

	Q=0,1 MW	Q=0,3 MW	Q=0,6 MW	Q=1 MW
u-vaar=0 m/s				
u-vaar=3 m/s				
u-vaar=6 m/s				

Figuur 9 Klassen van warmte-inhouden en vaarsnelheden die doorgerekend zijn met STACKS. De klassen met dezelfde kleur hebben bij benadering dezelfde berekende NO_x bijdragen

3 Scheepvaart modellering met SRM2

Voor het modelleren van snelwegemissie met SRM2 wordt de verticale verspreidingscoëfficiënt met de volgende formule berekend:

$$\sigma_z = \frac{a * R_b^b}{f(R_b)} + \sigma_{z0}$$

Waarbij:

σ_z : verticale verspreidingscoëfficiënt (dispersiecoëfficiënt) [m];

σ_{z0} : startwaarde van σ_z [m];

a,b : ruwheidafhankelijke parameters [-];

R_b : afstand van de bron tot het rekenpunt [m]

Met een aanpassing voor grotere afstanden:

$$f(R_b) = 1 + 0,5 * (1 - e^{-(R_b / 2800)^2})$$

De parameters a en b zijn afhankelijk van de ruwheid en hebben voor snelweggebruik de volgende in de Rbl 2007 vastgelegde waarden:

Ruwheidklasse (m)	a	b
0,03	0,2221	0,6574
0,10	0,2745	0,6688
0,30	0,3613	0,6680
1,00	0,7054	0,6207

De initiële dispersiecoëfficiënt σ_{z0} hangt af van het type omgeving:

- buiten de bebouwde kom, de weg is geen autosnelweg: $\sigma_{z0} = 2,5$ m;
- buiten de bebouwde kom, de weg is een autosnelweg: $\sigma_{z0} = 3$ m.

Er zijn correcties vastgelegd voor het geval dat het wegvak verhoogd of verdiept ligt of als er een scherm aan de wegrand is.

Voor de hoogte van de pluim wordt aangenomen dat deze gelijk is aan 75% van de verticale pluimspreiding: pluimhoogte= $0,75 * \sigma_z$. Voor de emissiehoogte wordt aangenomen dat deze bij snelwegen gelijk aan 0 m is.

Bij scheepvaartemissie is de emissiehoogte in eerste instantie gelijk aan de schoorsteenhoogte. Indien de uittreettemperatuur van het rookgas hoger is dan

de omgevingstemperatuur wordt ook pluimstijging in rekening gebracht. Omdat de emissiehoogte bij scheepvaartemissie niet gelijk aan 0 is zou deze ook moeten voorkomen in de formule om de pluimhoogte te berekenen. Indien nodig zullen ook de parameters om verspreidingscoëfficiënt te berekenen worden aangepast.

Om de huidige formulering van SRM2 geschikt te maken voor de modellering van scheepvaart is het volgende gedaan:

- Scheepvaartemissie zonder warmte-inhoud en vaarsnelheid: de NO_x bijdrage berekend met STACKS 2011.2, zonder vaarsnelheid en warmte-inhoud en met $z_0=0.1$ m, zijn vergeleken met de NO_x bijdrage berekend met de modellen ISL3a V2010 en TREDM.
- Om een indruk te krijgen van het effect van de pluimhoogte op de NO_x bijdrage zijn de berekeningen met TREDM uitgevoerd met twee verschillende pluimhoogten:
 - o pluimhoogte = emissiehoogte
 - o pluimhoogte = emissiehoogte + $0,5 \sigma_z$

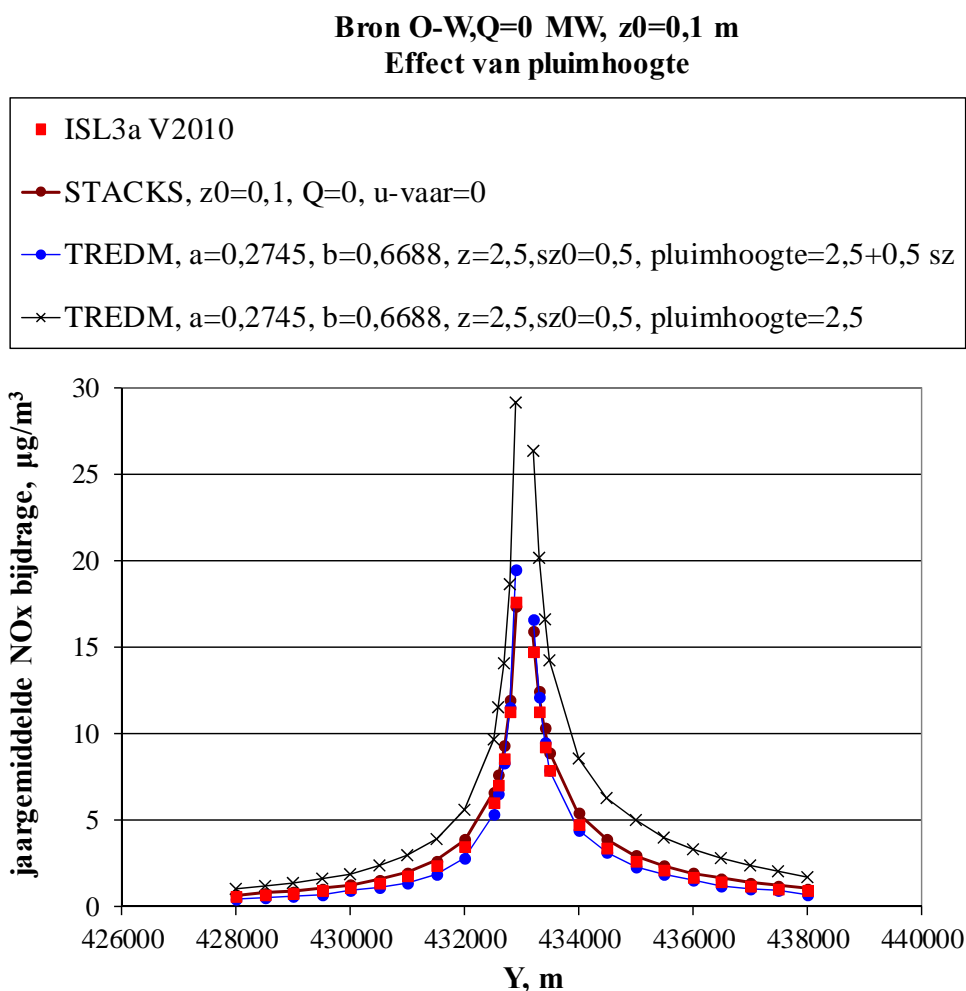
Uit deze vergelijking is gekeken welke pluimhoogte het beste resultaat geeft en of nieuwe parametrisatie van de dispersiefunctie in SRM2 en een nieuwe waarde voor de initiële dispersie (σ_{z0}) noodzakelijk zijn.

- Scheepvaartemissie met warmte-inhoud en zonder vaarsnelheid: met TREDM zijn berekeningen met effectieve pluimstijging ten gevolge van de warmte-inhoud ($Q=0,1$ MW, $Q=0,3$ MW en $Q=0,6$ MW respectievelijk) uitgevoerd, in eerste instantie uitgaande van de parameters die gevonden zijn in bovenstaande stap. De emissiehoogte is gelijk aan de schoorsteenhoogte plus de pluimstijging. De berekende NO_x bijdragen zijn vergeleken met de NO_x bijdragen berekend met STACKS 2011.2, wederom zonder vaarsnelheid. Uit deze vergelijking is opnieuw bekeken of andere parametrisatie noodzakelijk is voor het modelleren met warmte-inhoud.
- Voor het modelleren van varende schepen zou in principe een vectorieel opgetelde windsnelheid en vaarsnelheid moeten worden gehanteerd. In de praktijk verliest de pluim van een varend schip meer warmte naarmate de vaarsnelheid toeneemt. Uit paragraaf 2.3 blijkt dat een hete pluim van een varend schip kan worden benaderd met een pluim van een stilstaand schip met een kleinere warmte-inhoud. In plaats van het werken met vectorieel opgetelde windsnelheid kan ook met klassen van warmte-inhouden en snelheden werken. De hete pluim van een varend schip wordt dan gemodelleerd als de pluim van een stilstaand schip met een kleinere warmte-inhoud. De analyse in paragraaf 2.3 laat zien dat deze aanpak een redelijke benadering geeft.

In de volgende paragrafen worden de resultaten van deze aanpak weergegeven. Dit onderzoek richt zich enkel op het berekenen van de NO_x bijdrage. De omzetting van NO_x naar NO_2 zal in een volgende fase worden onderzocht.

4 Scheepvaartemissie zonder warmte en zonder vaarsnelheid

In Figuur 10 is de basisvergelijking tussen STACKS 2011.2, ISL3a en TREDM voor $z_0=0,1$ m weergegeven. De berekening met ISL3a is uitgevoerd met 25 puntbronnen en met een rookgastemperatuur van 288K. Met TREDM is gerekend met lijnbron van $714 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{s}$. Om het effect van pluimhoogte na te gaan is met TREDM met 2 pluimhoogten berekend: pluimhoogte= schoorsteenhoogte (2,5 m) en pluimhoogte=schoorsteenhoogte + $0,5 \sigma_z$. In beide berekeningen is met $\sigma_{z_0} = 0,5$ m gerekend en zijn de oorspronkelijke parameters van de dispersiefunctie in SRM2 ($a= 0,2745$, $b=0,6688$) gehanteerd.

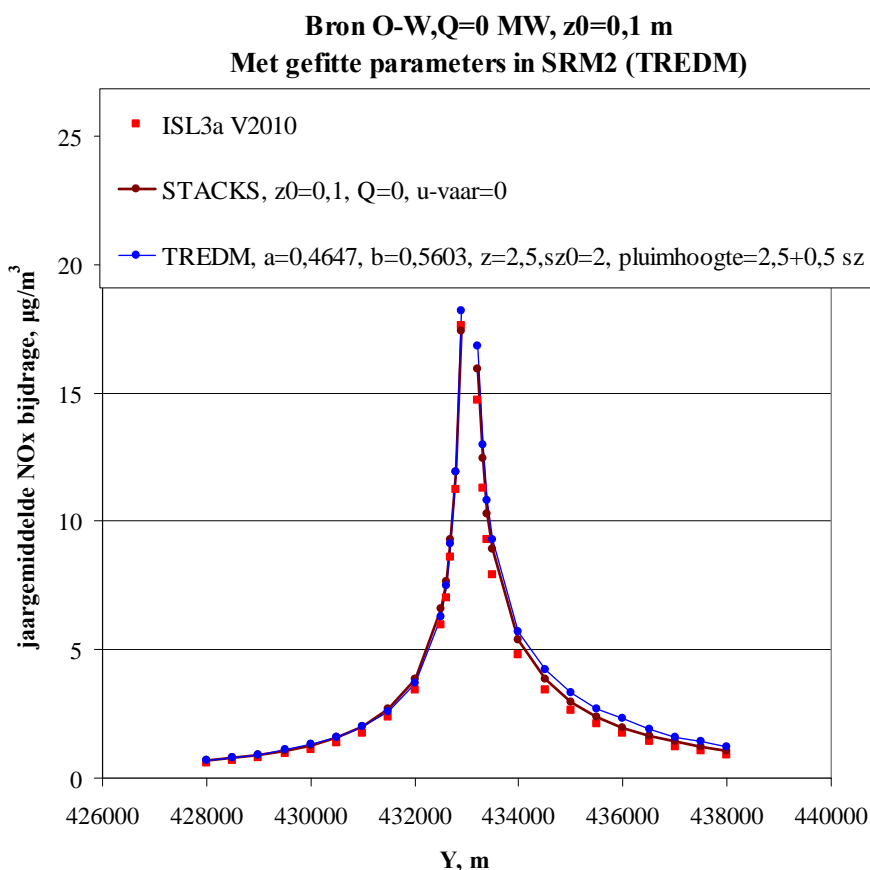


Figuur 10 Jaargemiddelde NOx bijdrage in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS, ISL3a en TREDM. De schoorsteenhoogte is 2,5 m. De berekeningen met TREDM zijn met twee verschillende pluimhoogten uitgevoerd.

Zoals verwacht is er goede overeenkomst tussen de resultaten van ISL3a en STACKS. Als de pluimhoogte in TREDM gelijk aan de schoorsteenhoogte wordt gehouden berekent TREDM over praktisch het hele profiel bijna 2 keer meer NO_x dan STACKS. Als de pluimhoogte wordt berekend als schoorsteenhoogte plus $0,5 \sigma_z$ liggen de resultaten van TREDM redelijk dicht bij de resultaten van ISL3a en STACKS. Vlak bij de bron berekent TREDM iets hogere NO_x bijdrage dan STACKS en verder af van de bron juist andersom.

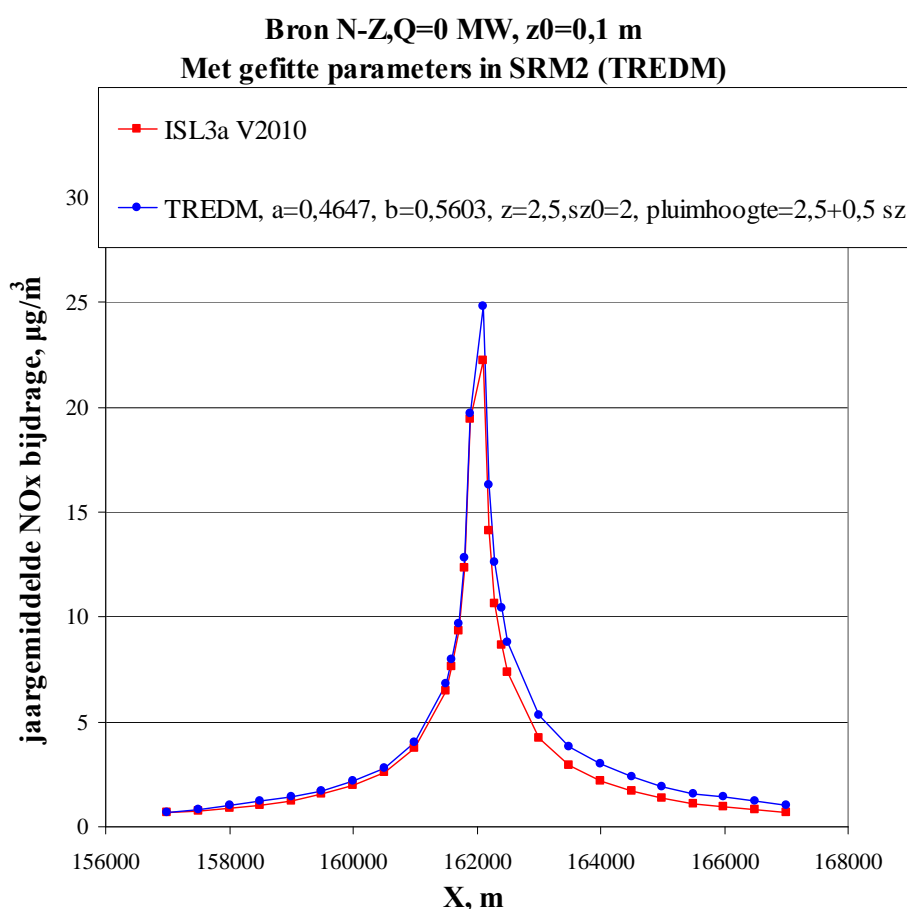
Door de NO_x bijdrage berekend met TREDM te fitten aan de NO_x bijdrage berekend met STACKS is een nieuwe set dispersieparameters a en b voor SRM2 verkregen. Een verhoging van de initiële dispersie σ_{z0} van $0,5$ naar 2 m blijkt nodig om de berekende NO_x bijdrage van STACKS vlak bij de bron te benaderen.

Figuur 11 toont de vergelijking tussen drie modellen waarbij in de berekening met TREDM, de nieuwe parameters ($a=0,4647$, $b=0,5603$) zijn gebruikt. Met deze set parameter is de overeenkomst tussen TREDM en STACKS verbeterd. Gemiddeld over alle punten is het verschil tussen STACKS en TREDM 5% , het maximale verschil bedraagt 15% .



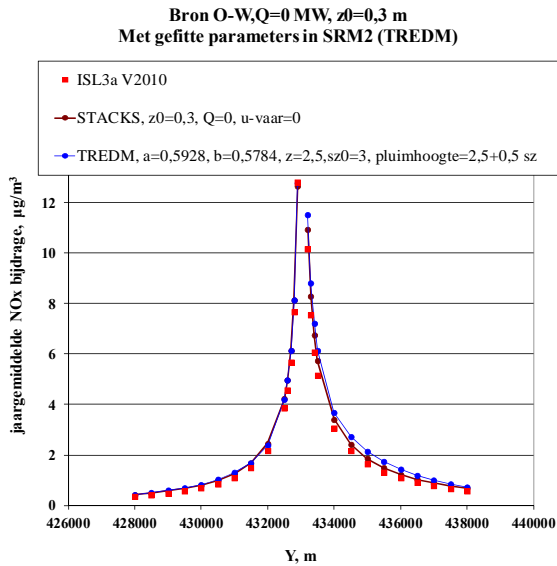
Figuur 11 Jaargemiddelde NO_x bijdrage in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS, ISL3a en TREDM. De berekening met TREDM is uitgevoerd met gefitte parameters in de dispersiefunctie.

Met de nieuwe parameters is vervolgens ook voor een Noord-Zuid bron op dezelfde locatie gerekend (Figuur 12). De bron loopt tussen de coördinaten (162000,436500) en (162000, 429500). Voor deze berekening is geen data van STACKS beschikbaar maar de vergelijking met ISL3a toont redelijke overeenkomst tussen ISL3a en TREDM. Gemiddeld over alle punten is het verschil tussen ISL3a en TREDM 15%. Westelijk van de bron is het verschil iets groter; het maximale verschil is 32%.



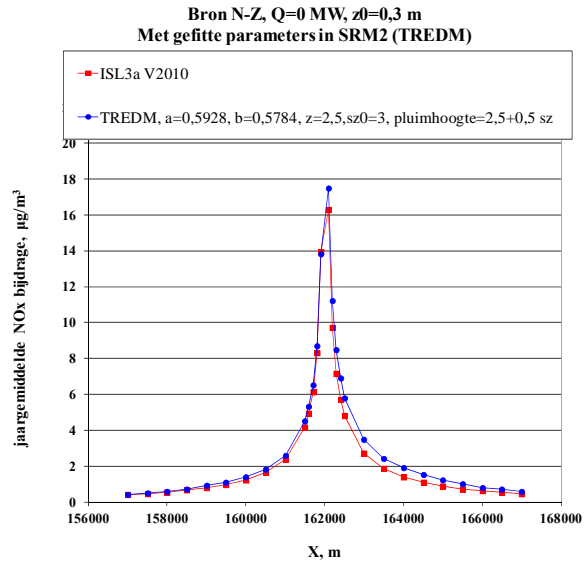
Figuur 12 Jaargemiddelde NO_x bijdrage in µg/m³ berekend met ISL3a en met TREDM voor bronnen met N-Z ligging.

Ook voor $z_0=0,3$ m en $z_0=1$ m blijkt het mogelijk om de NO_x bijdrage berekend met SRM2 te fitten aan de resultaten van STACKS (Figuren 13 tot en met 16). Met $z_0=0,3$ m is het gemiddelde verschil tussen STACKS en TREDM 5%, het maximale verschil is 14%. Met $z_0=1$ m is het gemiddelde verschil tussen STACKS en TREDM 7%; tot een afstand van 3 km van de bron is het maximale verschil is 15%.



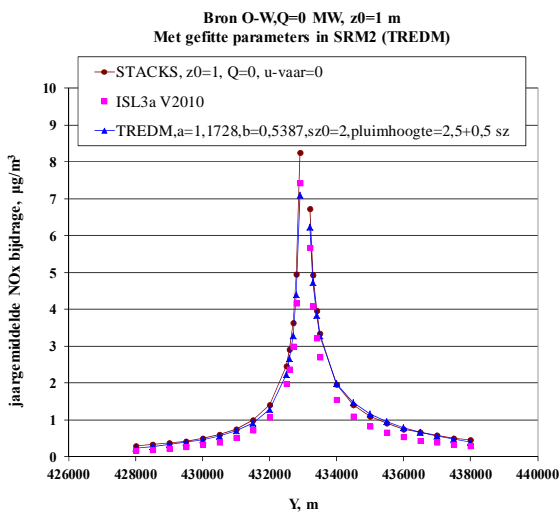
Figuur 13

(links) Vergelijking van jaargemiddelde NOx bijdragen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS, ISL3a en TREDM bij $z_0=0,3$ m



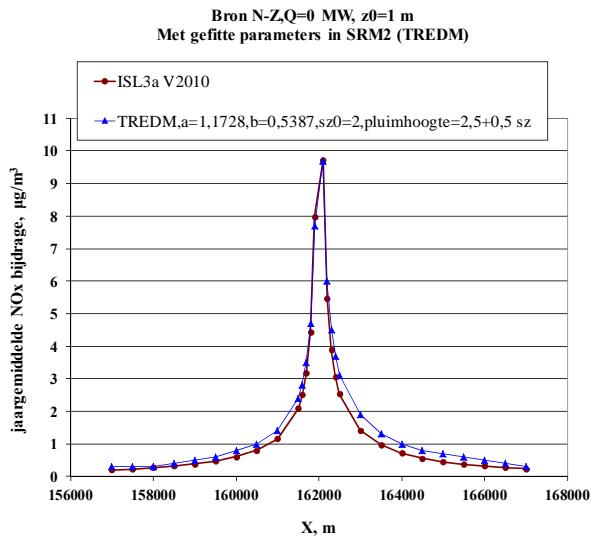
Figuur 14

(rechts) Resultaten van bronnen met N-Z ligging



Figuur 15

(links) Vergelijking van jaargemiddelde NOx bijdragen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berekend met STACKS, ISL3a en TREDM bij $z_0=1$ m



Figuur 16

(rechts) Resultaten van bronnen met N-Z ligging

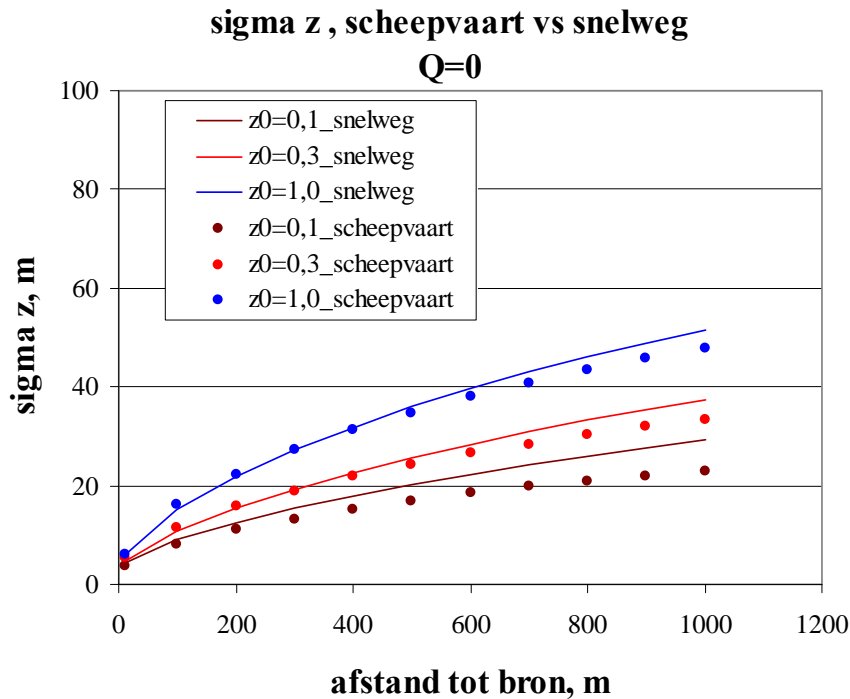
Samengevat, zonder warmte-inhoud is goede overeenkomst tussen de NO_x bijdrage berekend met SRM2 en met STACKS verkregen indien het volgende wordt aangepast in SRM2:

- emissiehoogte is gelijk aan schoorsteenhoogte,

- pluimhoogte = schoorsteenhoogte + $0,5 * \sigma_z$,
- de volgende parameters worden gebruikt in de dispersiefunctie:

Ruwheidklasse (m)	a	b	σ_{z0} (m)
0,10	0,4647	0,5603	2
0,30	0,5928	0,5784	3
1,00	1,1728	0,5837	2

In Figuur 17 zijn de verspreidingscoëfficiënten σ_z die momenteel worden gebruikt bij het modelleren van snelwegemissie zowel als de verspreidingscoëfficiënten die bij het modelleren van scheepvaartemissie (zonder warmte-inhoud en zonder vaarsnelheid) kunnen worden gebruikt, weergegeven.



Figuur 17 *Verspreidingscoëfficiënten σ_z in SRM2 bij snelwegmodellering en voorgestelde σ_z in scheepvaartmodellering*

5 Scheepvaart met warmte-inhoud en zonder vaarsnelheid

Voor het modelleren van de verspreiding van een warme pluim met TREDM wordt de schoorsteenhoogte vermeerderd met de pluimstijging Δh ten gevolge van de temperatuur. Hiervoor is gebruikt gemaakt van de formules van Briggs die ook gebruikt zijn in lange termijn model (het oude nationaal model):

$$\Delta h = 109 * \frac{Q_H^{3/4}}{u} \quad \text{voor } Q_H < 6 \text{ MW}$$

$$\Delta h = 143 * \frac{Q_H^{3/5}}{u} \quad \text{voor } Q_H \geq 6 \text{ MW}$$

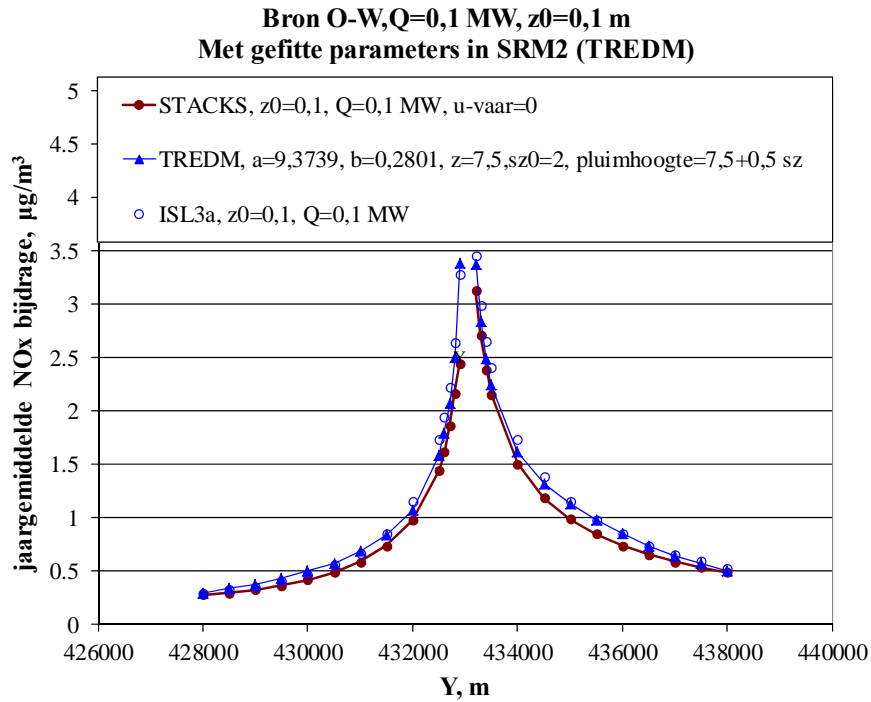
Hierin is Q_H de warmte-emissie in MW en u de windsnelheid ter hoogte van de schoorsteentop in m/s. Bij een windsnelheid van 4 m/s is de pluimstijging bij $Q=0,1$, $Q=0,3$ MW, $Q=0,6$ en $Q=1$ MW 4,9 m, 11,0 meter, 18,6 meter en 27,3 meter respectievelijk. Met een schoorsteenhoogte van 2,5 m is de emissiehoogte bij deze warmte-emissie 7,4 meter, 13,5 meter, 21,1 meter en 29,8 meter respectievelijk.

Bij het modelleren met ISL3a is de warmte-inhoud geen invoerparameter. Uit de uittretemperatuur van het rookgas, uittreesnelheid en schoorsteendiameter berekent het model de warmte-inhoud. Er zijn dus verschillende combinaties mogelijk om tot dezelfde warmte-inhoud te komen. Indien deze parameters niet te veel veranderen (diameter tot 1 meter, temperatuur tot 700 K en uittreesnelheid tot 10 m/s) blijken de resultaten nagenoeg niet afhankelijk van de gekozen parameters.

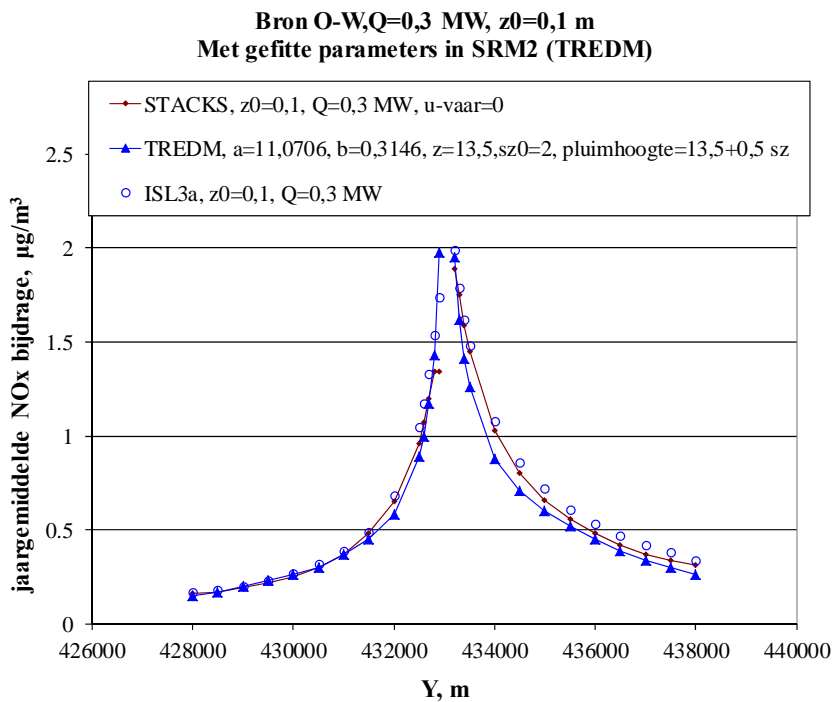
In Figuur 18,19 en 20 zijn de NO_x bijdrage berekend met STACKS, ISL3a en TREDM en met verschillende warmte-inhouds weergegeven. De berekeningen zijn met $z_0=0,1$ meter uitgevoerd. De parameters gebruikt in TREDM zijn verkregen door de NO_x bijdrage berekend met TREDM te fitten aan de resultaten van STACKS. Met de gefitte parameters in SRM2 is de overeenkomst tussen TREDM en STACKS goed. Voor afstanden vanaf 200 meter van de bron is, afgezien van enkele uitschieters bij $Q=1$ MW, het verschil tussen de modellen minder dan 20%. Dicht bij de bron is het verschil soms iets groter. Voor scheepvaartmodellering is afwijkingen op heel korte afstanden minder bezwaarlijk omdat er normaal gesproken enige afstand zit tussen de emissies op een waterweg en de toetspunten.

Met warmte-inhoud is er bij STACKS nagenoeg geen effect van ruwheid op de NO_x bijdrage. Daarom worden in de berekeningen met TREDM de parameters bij $z_0=0,1$ m voor alle ruwheden gehanteerd. In bijlage 2 is de vergelijking tussen

de NO_x bijdrage berekend met STACKS en met TREDM bij andere ruwheden weergegeven.

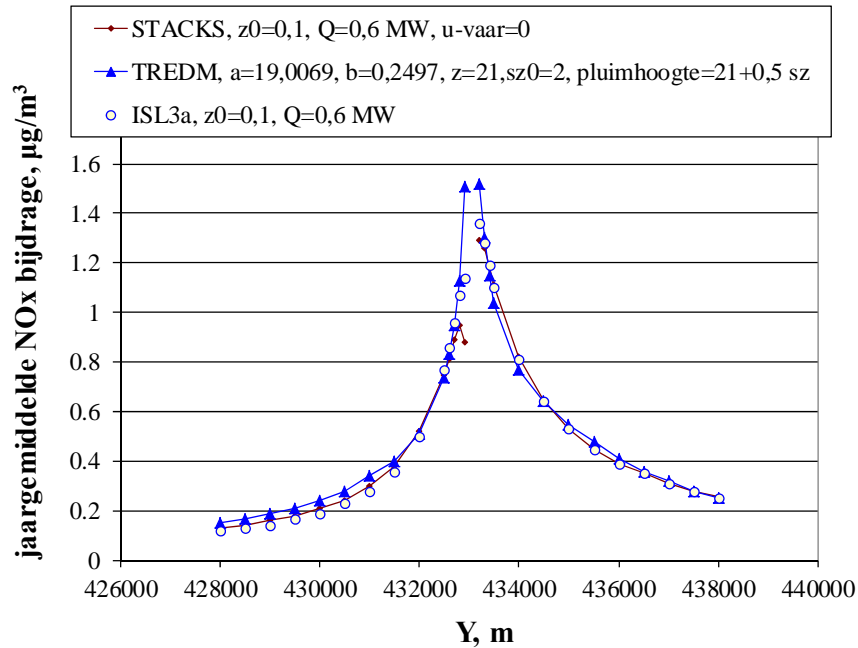


Figuur 18 Vergelijking van jaargemiddelde NO_x bijdragen in µg/m³ berekend met Q=0,1 MW en met STACKS, ISL3a en TREDM



Figuur 19 Vergelijking van jaargemiddelde NO_x bijdragen in µg/m³ berekend met Q=0,3 MW en met STACKS, ISL3a en TREDM

Bron O-W, Q=0,6 MW, z₀=0,1 m
Met gefitte parameters in SRM2 (TREDM)



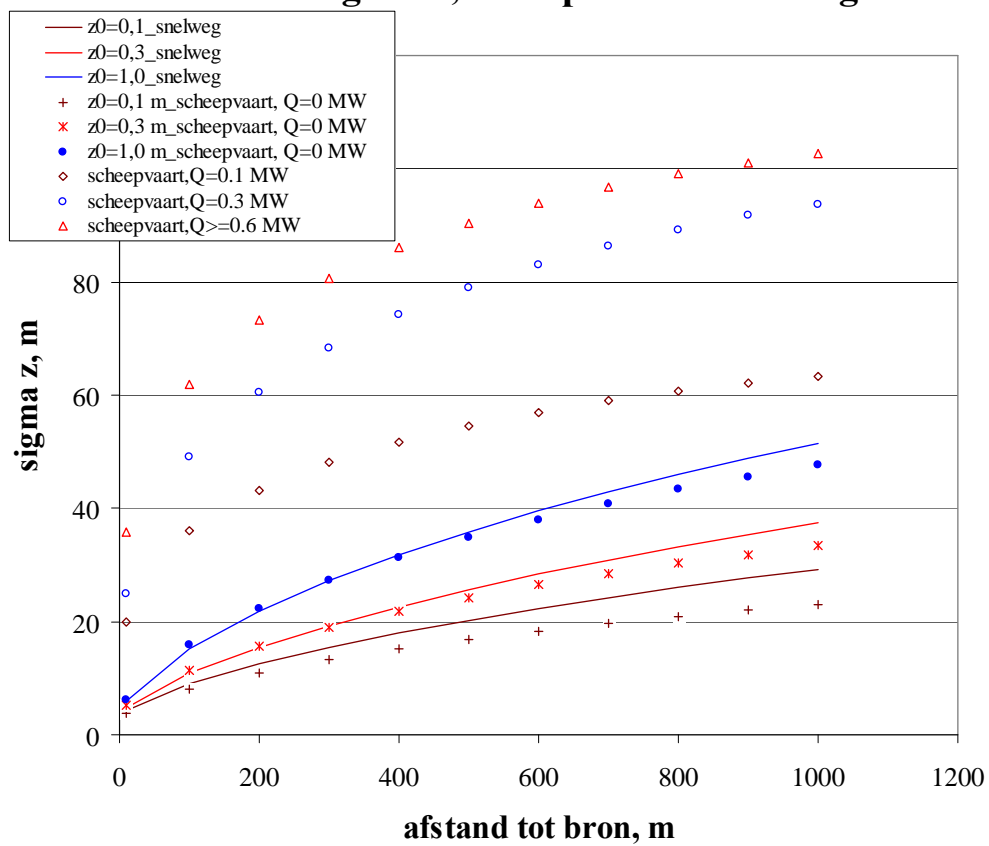
Figuur 20 *Vergelijking van jaargemiddelde NOx bijdragen in µg/m³ berekend met Q=1 MW en met STACKS, ISL3a en TREDM*

De parameters in SRM2 om de verspreiding van warme pluim van een schip te modelleren zijn dus als volgt (voor alle ruwheden):

Q (MW)	a	b	σ _{z0} (m)
0,10	9,3739	0,2801	2
0,30	11,0706	0,3146	2
>=0,6	19,0069	0,2497	2

In Figuur 21 is het verloop van alle verspreidingscoëfficiënten σ_z weergegeven.

sigma z , scheepvaart vs snelweg



Figuur 21 Verspreidingscoëfficiënten σ_z in snelweg- en scheepvaartmodellering

6 Scheepvaartemissie met warmte-inhoud en vaarsnelheid

Dit onderzoek laat zien dat bij het modelleren van scheepvaartemissie zonder vaarsnelheid, goede aansluiting tussen SRM3 (STACKS) en SRM2 (TREDM) kan worden bereikt door een nieuwe parametrisatie van SRM2. Verder blijkt uit de vergelijking in paragraaf 2 dat de NO_x bijdrage berekend met vaarsnelheid door middel van klassen te benaderen is met een berekening zonder vaarsnelheid. Dit is weergegeven in Figuur 22. De klassen met dezelfde kleur hebben bij benadering dezelfde berekende NO_x bijdragen. De NO_x bijdrage berekend met Q=0,1 MW en met vaarsnelheid is door middel van een factor te berekenen uit de NO_x bijdrage berekend zonder vaarsnelheid.

	Q=0,1 MW	Q=0,3 MW	Q=0,6 MW	Q=1 MW
u-vaar=0 m/s	Kan met SRM2 worden gemodelleerd	Kan met SRM2 worden gemodelleerd	Kan met SRM2 worden gemodelleerd	Kan met SRM2 worden gemodelleerd
u-vaar=3 m/s	De NO _x bijdrage is bij benadering gelijk aan 1,7* de NO _x bijdrage berekend met u-vaar=0 en Q=0,1 MW			
u-vaar=6 m/s	De NO _x bijdrage is bij benadering gelijk aan 2,4* de NO _x bijdrage berekend met u-vaar=0 en Q=0,1 MW			

Figuur 22: Overeenkomst tussen de NO_x bijdrage berekend met verschillende klassen van warmte-inhouden en vaarsnelheden

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Modelleren van NO_x scheepvaartemissie met SRM2

Bij het modelleren van NO_x emissie van een stilstaand schip is goede overeenkomst van resultaten van SRM2 met die van SRM3 mogelijk indien het volgende wordt aangepast in SRM2:

- emissiehoogte is gelijk aan schoorsteenhoogte, vermeerderd met de pluimstijgings berekend volgens de Briggs formule
- pluimhoogte = schoorsteenhoogte + 0,5* σ_z ,
- gewijzigde parameters in verspreidingscoëfficiënt σ_z

bij Q=0 MW:

Ruwhedklasse (m)	a	b	σ_{z0} , m
0,10	0,4647	0,5603	2
0,30	0,5928	0,5784	3
1,00	1,1728	0,5837	2

bij Q>0 MW:

Q (MW)	a	b	σ_{z0} , m
0,10	9,3739	0,2801	2
0,30	11,0706	0,3146	2
>=0,6	19,0069	0,2497	2

De NO_x emissie van een varend schip kan worden afgeleid uit de berekening zonder vaarsnelheid, gebruikmakend van de overeenkomst tussen verschillende klassen van warmte-inhouden en vaarsnelheden zoals weergegeven in Figuur 22.

7.2 Aanbeveling

- In dit onderzoek is enkel een methode gezocht om aansluiting tussen resultaten van SRM3 en SRM2 te krijgen. De gemodelleerde resultaten moeten nog worden geïnterpreteerd met metingen
- De overeenkomst tussen NO₂ bijdrage berekend met SRM2 en met SRM3 moet in een volgende fase nog worden geïnterpreteerd en liefst met metingen worden vergeleken.
- In de WLM vergadering van december 2012 heeft de werkgroep terecht opgemerkt dat het effect van vaarsnelheid afhankelijk is van de vaarrichting. In situaties waarbij niet exact evenveel schepen in beide richtingen varen zouden de resultaten anders kunnen zijn dan de gebruikte SRM3 data in dit onderzoek. Het effect van de vaarrichting moet nog worden onderzocht. Indien nodig, zou dit effect in de volgende fase van harmonisatie kunnen worden meegenomen. Ook moet het effect van stroomsnelheid anders dan 1 m/s worden onderzocht en eventueel worden meegenomen.

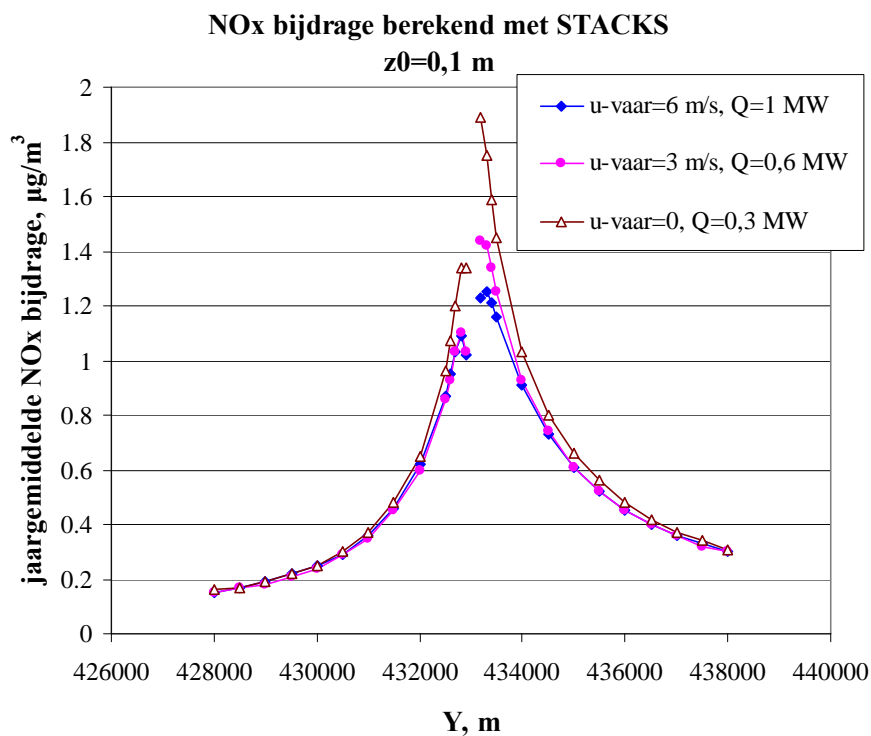
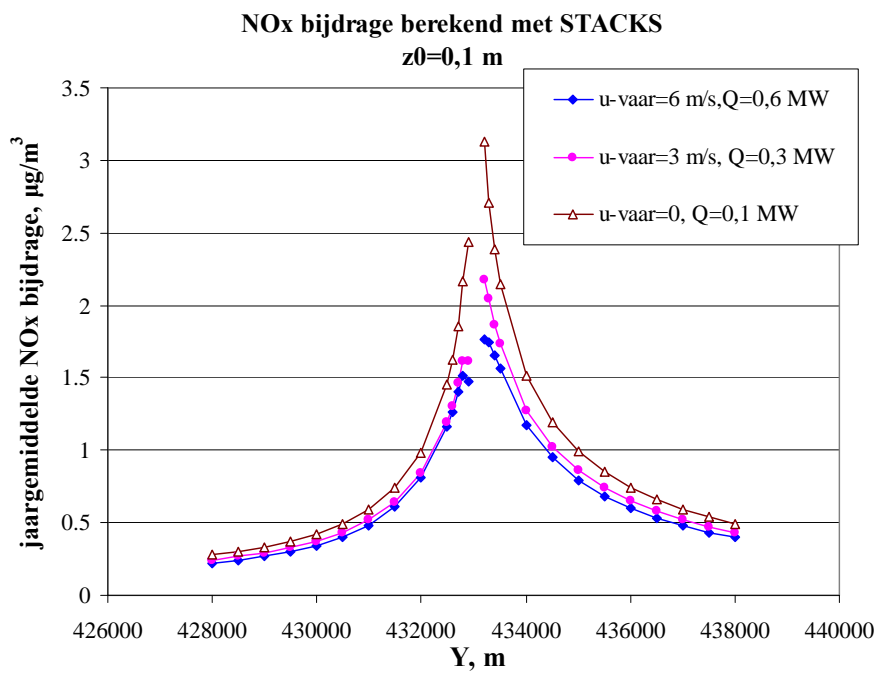
Referenties

Erbrink, J.J., de Wolff, J.J., Hulskotte, J.H.J., Jonkers, S., van Ganswijk, J.W.W., Lanse, N. (2011). Scheepvaartmodellering Fase 2: In consensus naar een nationale aanbeveling. DNV KEMA rapport 50964435-TOS/HSM 10-4539. Arnhem

http://wetten.overheid.nl/BWBR0022817/geldigheidsdatum_12-03-2013
(Februari 2013)

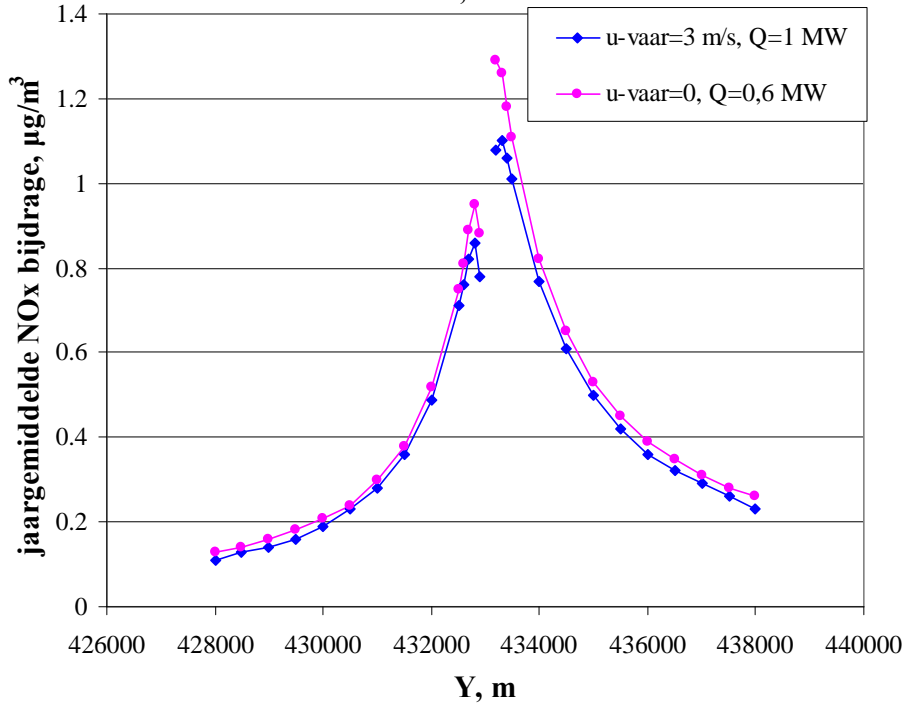
Bijlage 1: vergelijking tussen de NOx bijdrage berekend met STACKS en met verschillende klassen van warmte-inhoud en vaarsnelheden

Z0=0,1 m



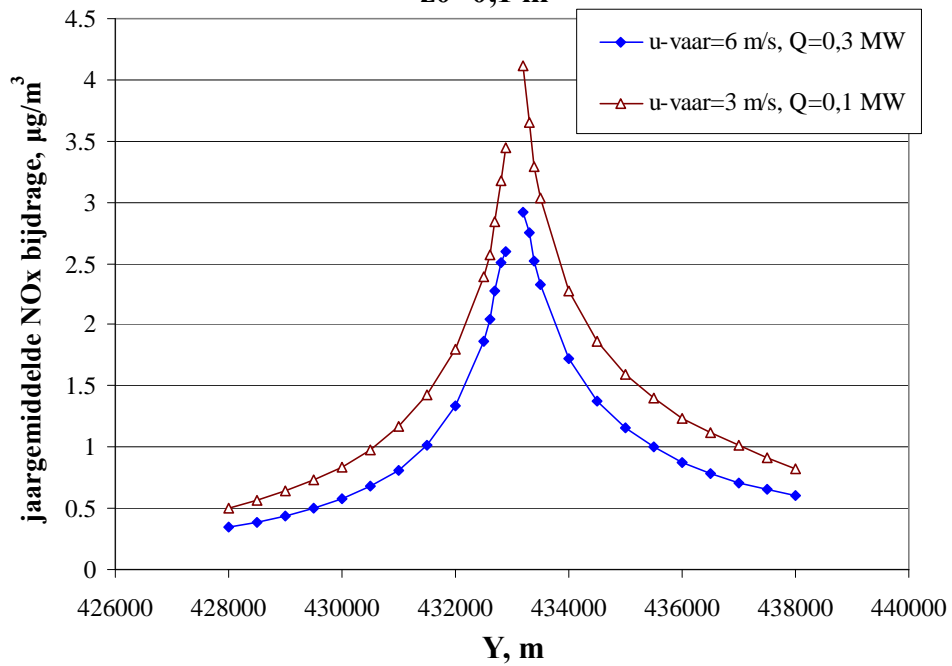
NOx bijdrage berekend met STACKS

z0=0,1 m

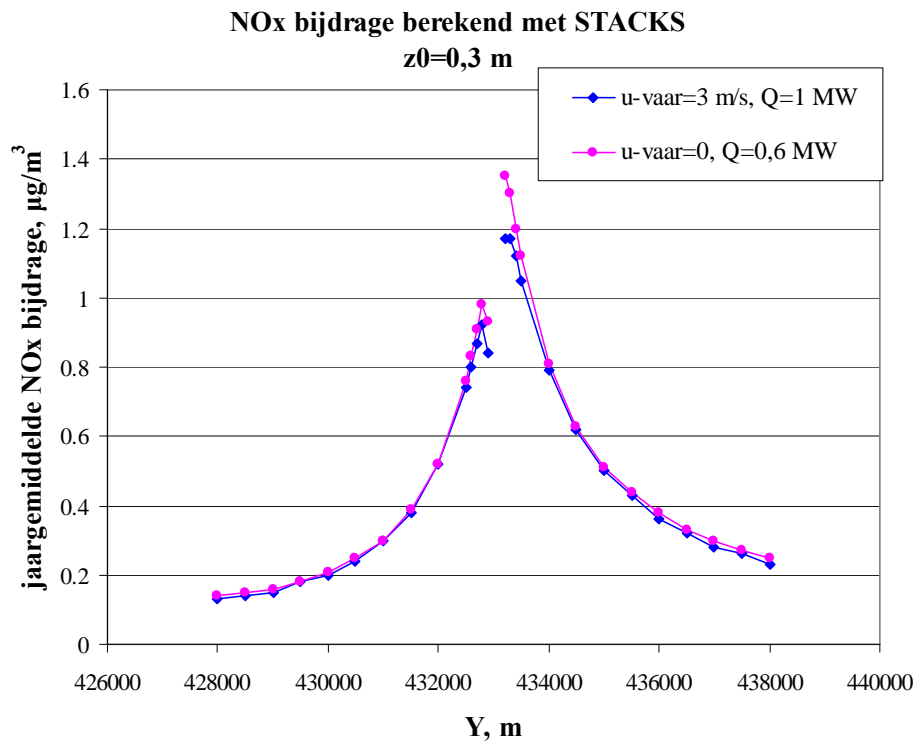
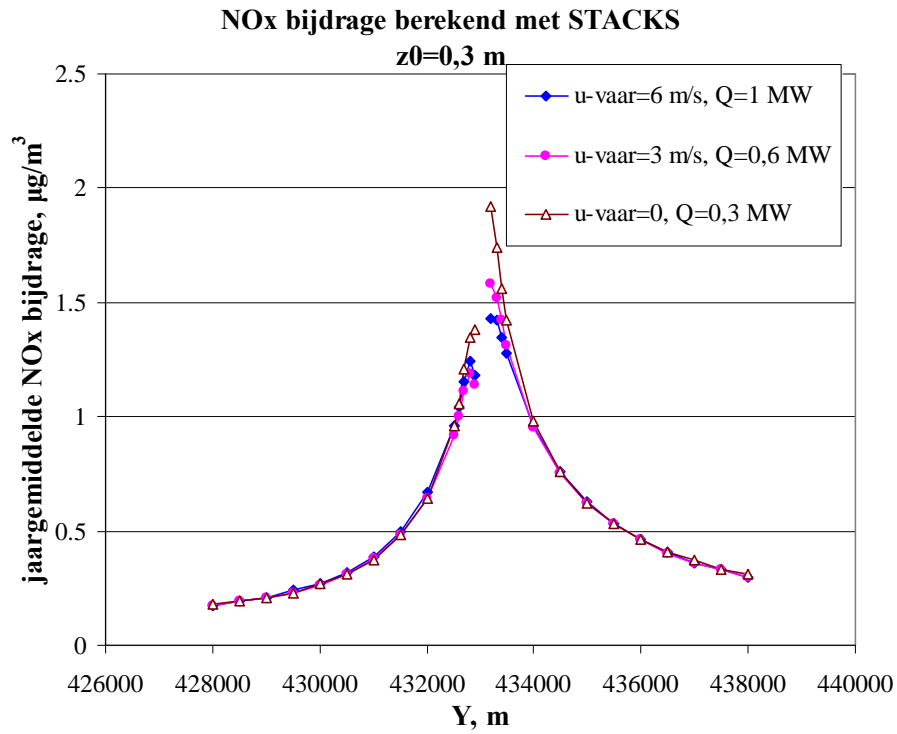


NOx bijdrage berekend met STACKS

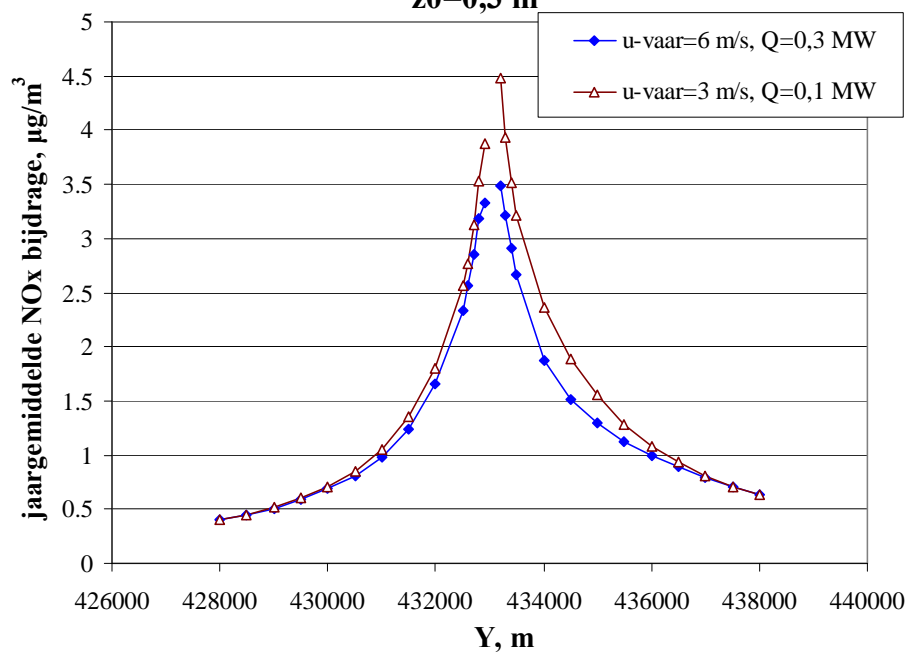
z0=0,1 m



Z0=0,3 m



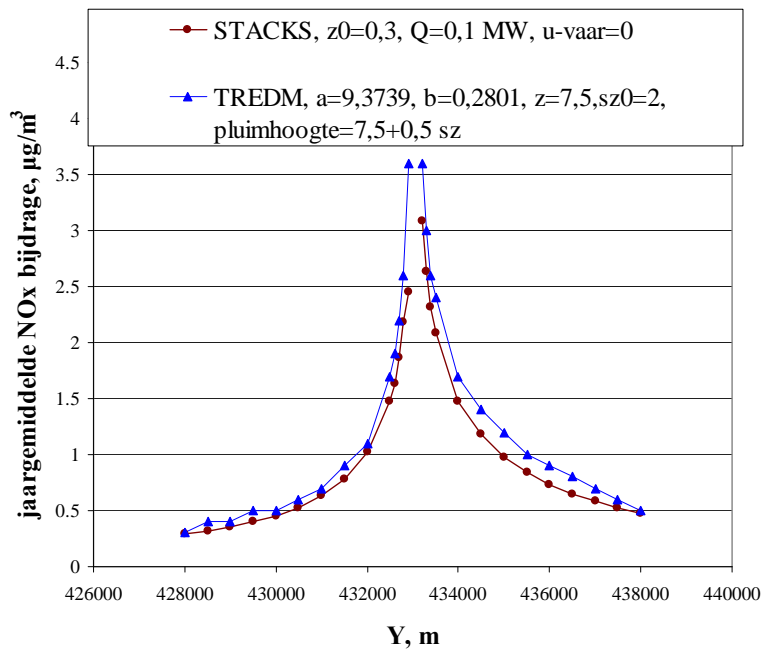
NOx bijdrage berekend met STACKS

 $z_0=0,3$ m

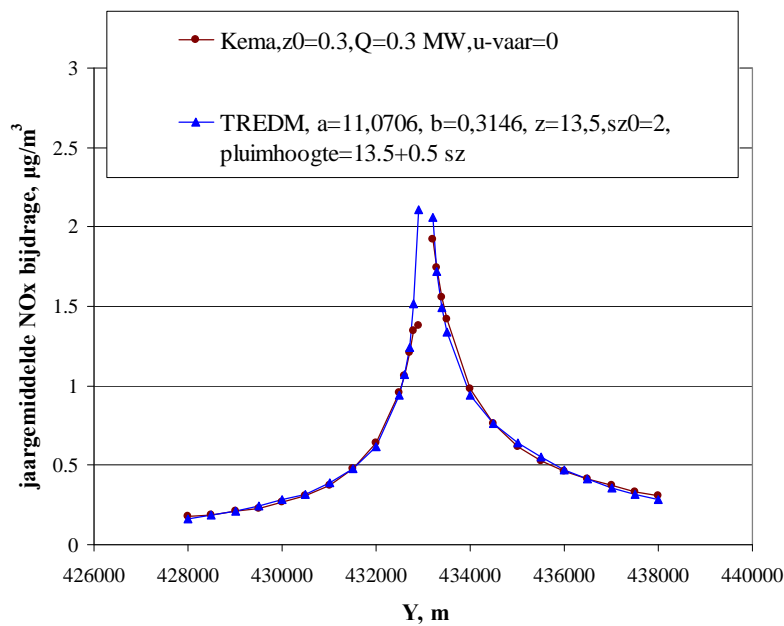
Bijlage 2: vergelijking tussen de NOx bijdrage berekend met STACKS en met TREDM

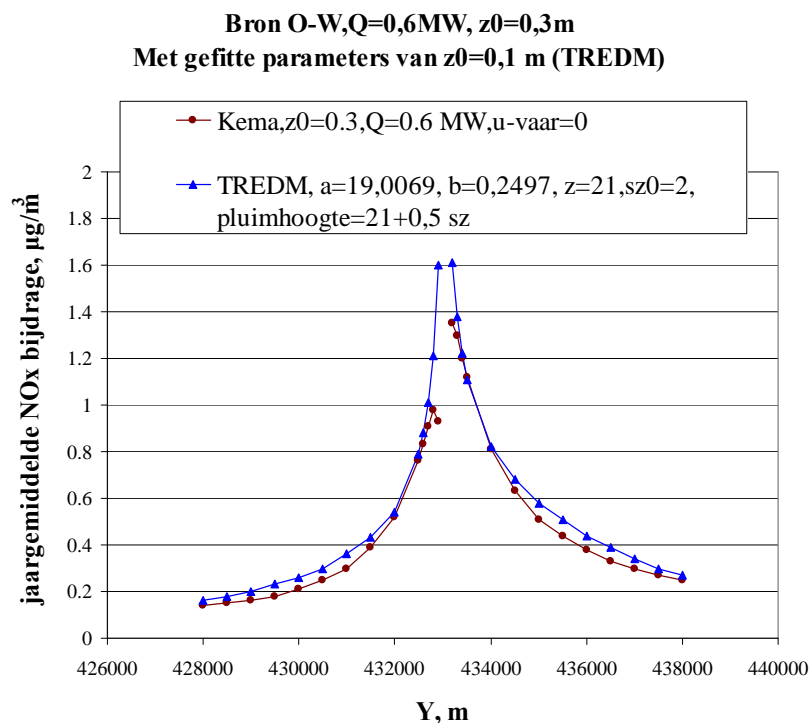
Z0=0,3 m

Bron O-W,Q=0,1MW, z0=0,3m
Met gefitte parameters van z0=0,1 m (TREDM)

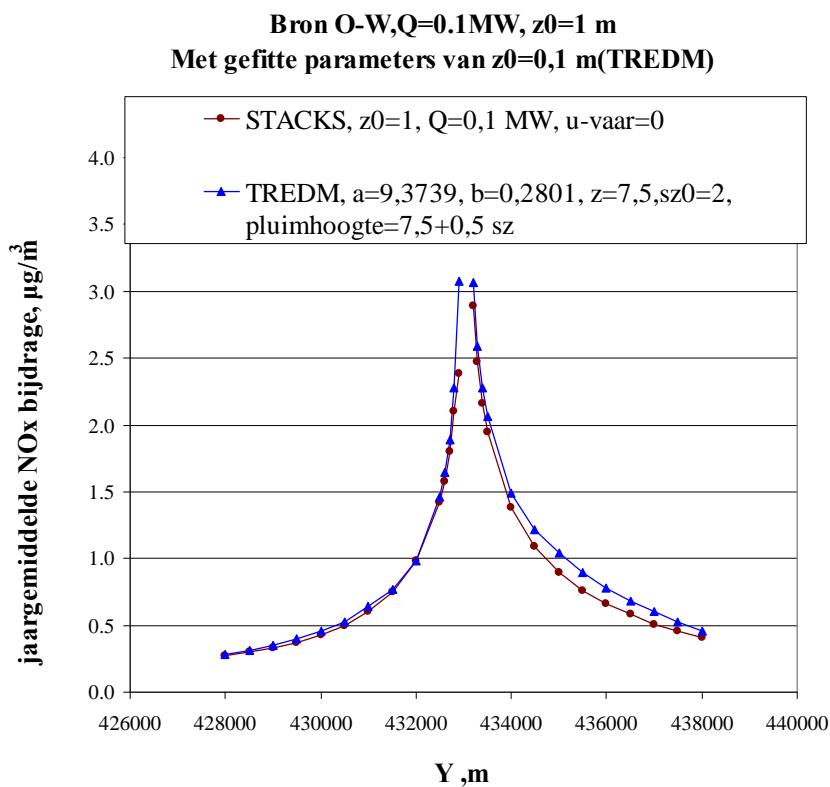


Bron O-W,Q=0,3MW, z0=0,3m
Met gefitte parameters van z0=0,1 m(TREDM)

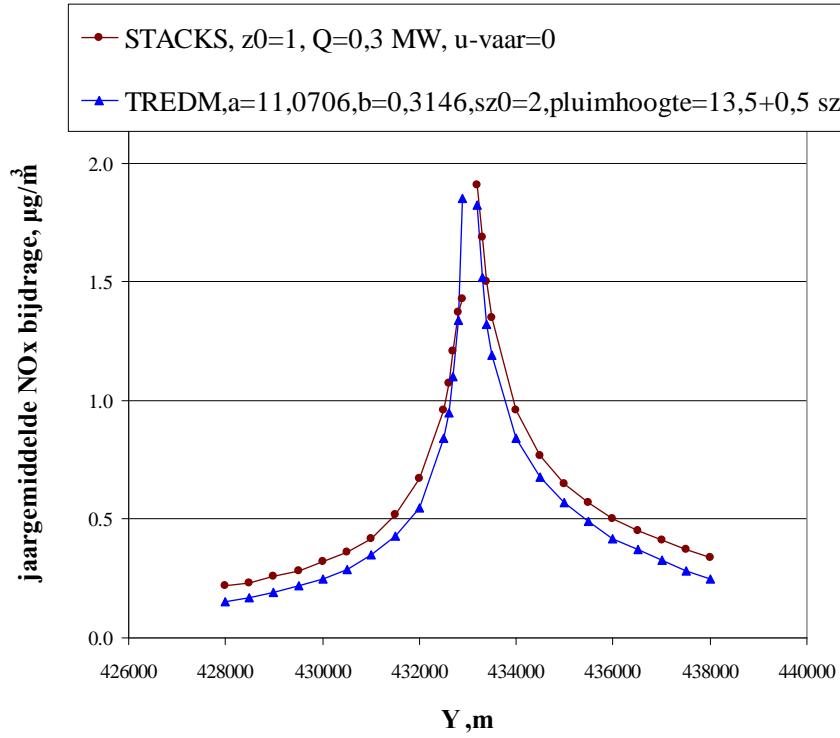




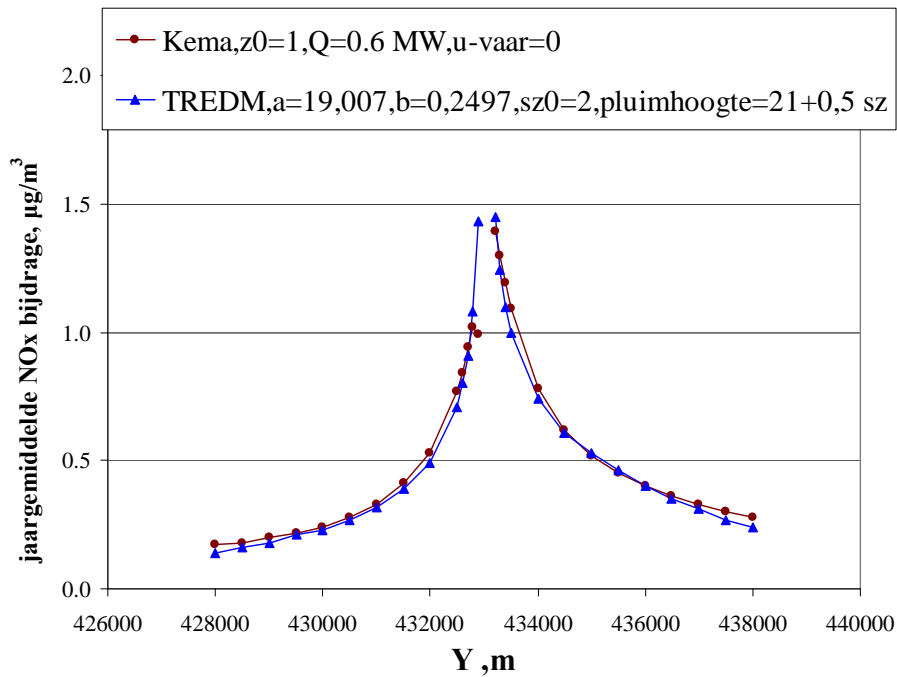
Z0=1 m



Bron O-W,Q=0.3MW, z0=1 m
Met gefitte parameters van z0=0.1 (TREDM)



Bron O-W,Q=0.6MW, z0=1 m
Met gefitte parameters van z0=0.1 (TREDM)



Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl