

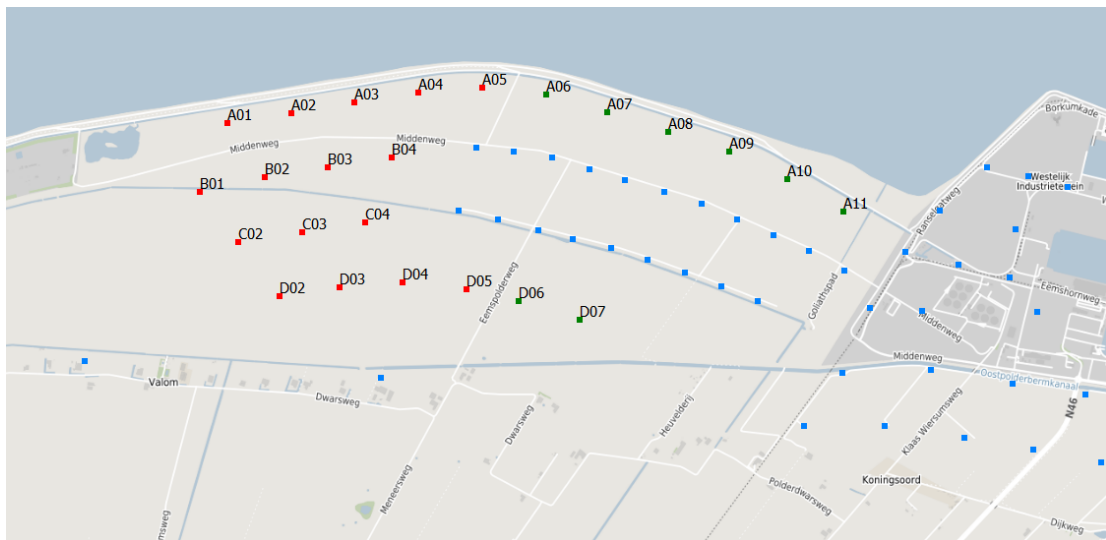
## Notitie

**Contactpersoon** Luc Verhees (TAUW)  
**Datum** 30 mei 2023  
**Kenmerk** N001-1291512VLU-V01-prr-NL

# Aanvulling fase 2 van luchtkwaliteitsonderzoek Windpark Eemshaven West

## 1 Inleiding

In 2021 is door TAUW in opdracht van Pondera Consult het onderzoek 'Effect windpark Eemshaven-West op de lokale luchtkwaliteit' uitgevoerd, met kenmerk R001-1282197VLU-V02-ssc-NL en datum 16 december 2021. Het onderzoek uit 2021 heeft betrekking op de plaatsing van 16 nieuwe windturbines in fase 1 van windpark Eemshaven-West. Voorliggende aanvullende notitie op het rapport uit 2021 geeft een **kwalitatieve analyse** van het effect van de plaatsing van acht windturbines in fase 2. Er zijn geen nieuwe berekeningen uitgevoerd.



*Figuur 1.1 Locatie van de 16 turbines van windpark Eemshaven-West fase 1 in rood en fase de acht turbines van fase 2 in groen. Bestaande of reeds vergunde turbines in blauw*

Emissies van luchtverontreinigende stoffen vanuit de Eemshaven zorgen lokaal voor een verhoging van de concentratieniveaus van deze stoffen. De windturbines van windpark Eemshaven-West kunnen een mogelijk effect hebben op de verspreiding van deze industriële emissies.

In het onderzoek uit 2021 is voor fase 1 het effect onderzocht van het geplande windturbinepark op de luchtkwaliteit in de omgeving. Het berekenen van de concentratieniveaus van stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>), fijnstof (PM10)<sup>1</sup> en benzeen is uitgevoerd met een op maat toegesneden versie van het verspreidingsmodel STACKS, waarin de beïnvloeding van de windturbines op het verspreidingsgedrag van de emissies is opgenomen.

De volgende vragen zijn in 2021 onderzocht:

1. Wat zijn de concentratieniveaus van NO<sub>2</sub>, PM10 en benzeen in de omgeving van de Eemshaven?
2. Hoe worden de concentratieniveaus beïnvloed door de huidige bestaande en vergunde windturbines?
3. Wat is het effect op de concentratieniveaus ten gevolge van plaatsing van de nieuwe turbines in windpark Eemshaven-West?
4. Zijn er overschrijdingen van grenswaarden te verwachten?

In hoofdstuk 2 worden kort de conclusies van het onderzoek uit 2021 gegeven. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de mogelijke effecten van de acht extra turbines van fase 2.

## 2 Concentratieniveaus en beïnvloeding door bestaande turbines en turbines van fase 1

De concentratieniveaus in het onderzoeksgebied (zie figuur 2.1 en 2.2) zijn voor Nederlandse begrippen laag. Deze worden met name bepaald door de achtergrondconcentraties. Voor NO<sub>2</sub> liggen de jaargemiddelde concentratieniveaus<sup>2</sup> in het onderzoeksgebied tussen de 5 en 11 µg/m<sup>3</sup> en voor PM10 rond de 14 à 15 µg/m<sup>3</sup>. De concentratieniveaus voor NO<sub>2</sub> en PM10 liggen daarmee zeer ruim onder de wettelijke grenswaarden (zie tabel 2.1). Aan de WHO-advieswaarde voor NO<sub>2</sub> en PM10 wordt in het grootste deel van het onderzoeksgebied ook al voldaan. In de geel en oranje gekleurde gebieden in figuur 2.1 en 2.2 wordt de WHO-advieswaarde nog niet gehaald. In tabel 2.1 worden ook de door de Europese commissie op 26 oktober 2022 voorgestelde aangescherpte grenswaarden gegeven. Deze nieuwe grenswaarden zouden uiterlijk in 2030 in moeten gaan<sup>3</sup>. Voor het onderzoeksgebied geldt dat aan deze potentiële toekomstige grenswaarden ook nu al wordt voldaan.

Met het STACKS rekenmodel is de bijdrage aan de concentratieniveaus van de qua emissies zes grootste bedrijven in de Eemshaven berekend (zie paragraaf 3.3 en 4.1 uit het rapport van 2021).

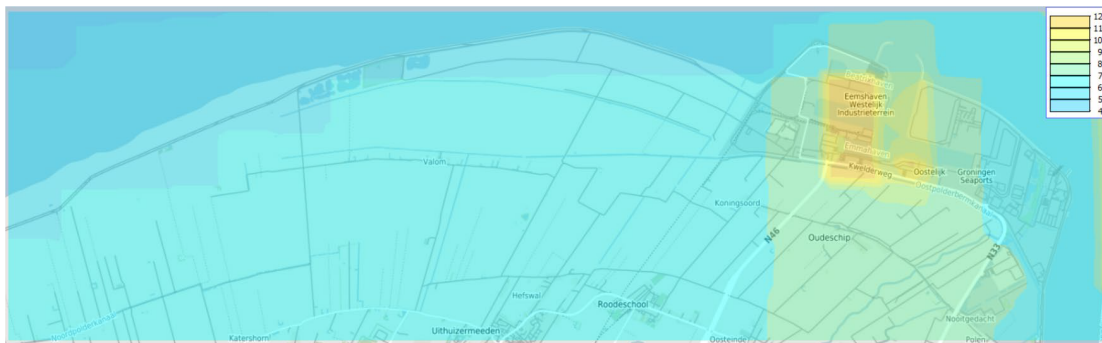
---

<sup>1</sup> PM10 is de benaming voor fijnstofdeeltjes in de lucht (PM: Particulate Matter) die kleiner zijn dan 10 micrometer

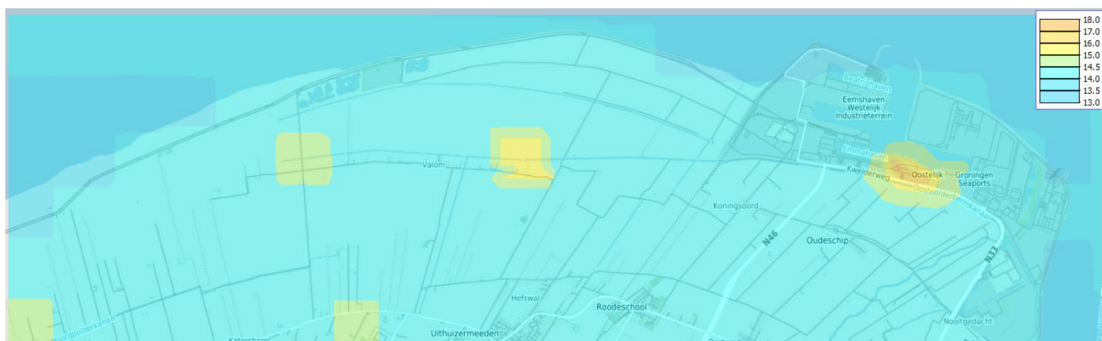
<sup>2</sup> De berekeningen zijn uitgevoerd voor zichtjaar 2021 waardoor de concentratieniveaus hoger liggen dan wanneer voor 2023 of voor toekomstige jaren gerekend zou worden aangezien de concentratieniveaus in Nederland een dalende trend laten zien

<sup>3</sup> Zie onder andere <https://www.schoneluchtakkoord.nl/actueel/nieuws-schone-lucht-akkoord/algemeen/voorstel-nieuwe-eu-richtlijn-luchtkwaliteit/>

Lokaal rondom de lage bronnen van Theo Pouw kan de bijdrage aan de jaargemiddelde concentraties oplopen tot boven de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{NO}_2$  en  $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{PM}_{10}$ . De hoge bronnen, met een veel hogere emissie dan de emissie van Theo Pouw, verspreiden hun rookgassen over een veel groter gebied, maar op leefniveau is de bijdrage van deze bronnen toch beperkt. Op de locatie van het nieuwe windpark Eemshaven-West bedraagt de bijdrage van de zes beschouwde bedrijven in de Eemshaven ongeveer  $0,12$  tot  $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{NO}_2$  en  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{PM}_{10}$ . Ten opzichte van het totale concentratieniveau is de bijdrage vanuit de Eemshaven dus beperkt. Een belangrijk aspect hierbij is ook dat de overheersende zuidwesten windrichting in Nederland ervoor zorgt dat de luchtkwaliteit ten noordoosten van de Eemshaven sterker negatief wordt beïnvloed door de industriële emissies in de Eemshaven dan in het onderzoeksgebied ten westen van de Eemshaven.



*Figuur 2.1 Jaargemiddelde  $\text{NO}_2$  concentratie in het onderzoeksgebied in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (zichtjaar 2021)*

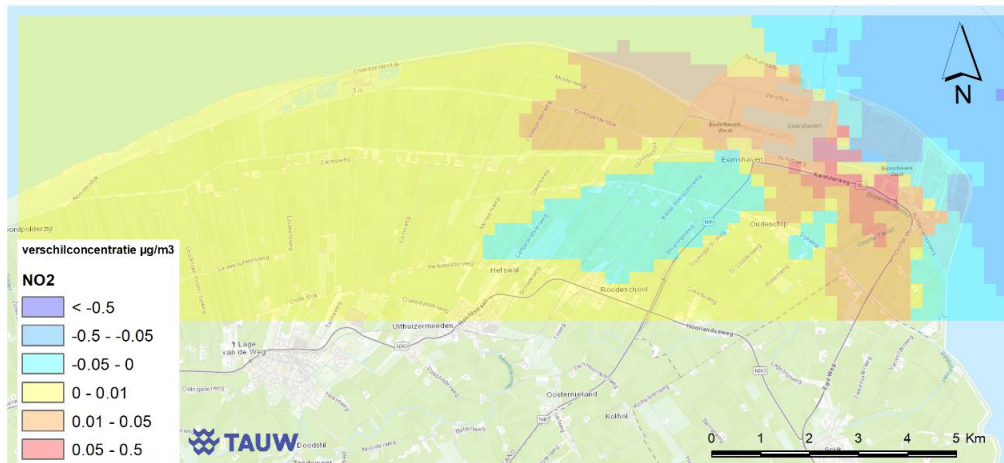


*Figuur 2.2 Jaargemiddelde  $\text{PM}_{10}$  concentratie in het onderzoeksgebied in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (zichtjaar 2021)*

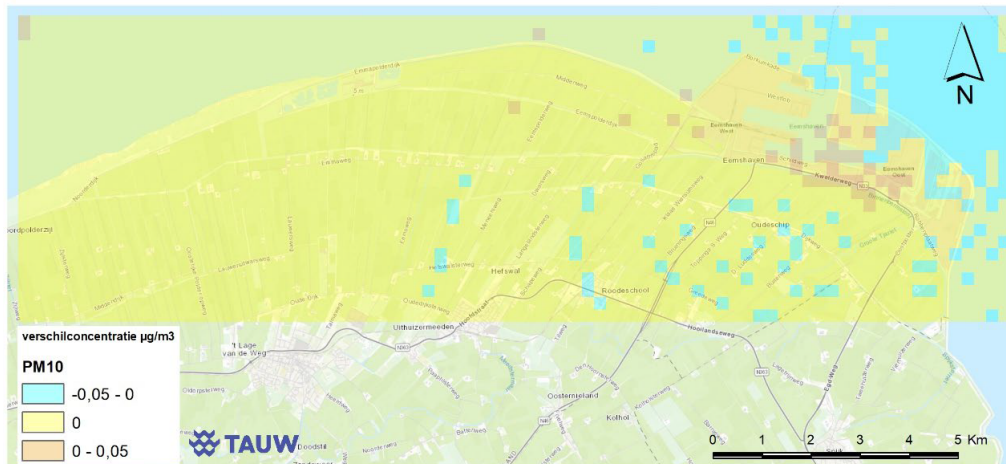
Tabel 2.1 Overzicht van wettelijke grenswaarden en WHO-advieswaarden van de beschouwde stoffen

Stof	Type norm	Grenswaarde in Nederland en EU	WHO-advieswaarden	Voorstel nieuwe grenswaarden per 2030
NO <sub>2</sub>	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
	Daggemiddelde concentratie	-	-	50 µg/m <sup>3</sup> , mag max. 18x per jaar worden overschreden
PM <sub>10</sub>	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m <sup>3</sup>	15 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
	Daggemiddelde concentratie	50 µg/m <sup>3</sup> , mag max. 35x per jaar worden overschreden	-	45 µg/m <sup>3</sup> , mag max. 18x per jaar worden overschreden

Met het STACKS rekenmodel is ten eerste het effect op de concentratieniveaus bepaald van de 115 bestaande en vergunde windturbines die in en rondom de Eemshaven aanwezig zijn. Uit de berekeningen volgt dat er een groot gebied is waar de concentraties toenemen ten gevolge van de aanwezigheid van de huidige windturbines (het geel/oranje/rode gebied in figuur 2.3). Deze toenames zijn echter zeer beperkt; voor het grootste deel gaat het om toenames tot 0,01 µg/m<sup>3</sup> voor NO<sub>2</sub> en voor een kleiner gebied (grotendeels gelegen in Eemshaven zelf) van meer dan 0,05 µg/m<sup>3</sup>. Om dit in perspectief te plaatsen: een toename in concentraties van meer dan 1,2 µg/m<sup>3</sup> op leefniveau wordt aangemerkt als ‘in betekende mate’. Voor projecten of te vergunnen activiteiten die ‘niet in betekende mate’ (< 1,2 µg/m<sup>3</sup>) bijdragen aan de concentratieniveaus hoeft geen toets aan de wettelijke grenswaarden plaats te vinden. Er is ook een gebied (blauw in de figuur 2.3) waar de concentraties iets afnemen ten gevolge van de aanwezigheid van de windturbines. Voor PM<sub>10</sub> zijn de effecten zo goed als verwaarloosbaar, zie figuur 2.4.



Figuur 2.3 Verschil in jaargemiddelde NO<sub>2</sub> concentratie tussen de situatie met windturbines (alle bestaande / vergunde turbines) en de situatie zonder windturbines. Rood is een toename in concentraties ten gevolge van de turbines, blauw een afname



*Figuur 2.4 Verskil in jaargemiddelde PM10 concentratie tussen de situatie met windturbines (alle bestaande / vergunde turbines) en de situatie zonder windturbines*

Het potentiële effect van de 16 nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 1 is berekend door de uitkomsten van de berekening met de 115 bestaande / vergunde windturbines te vergelijken met de uitkomsten van de berekening met 131 windturbines (115 plus de 16 nieuwe turbines). Het resultaat is dat de 16 turbines geen extra toe- of afnames in de concentratieniveaus geven opzichte van het scenario de 115 bestaande / vergunde windturbines. Op geen enkel rekenpunt is een toe- of afname berekend van meer dan 0,00 µg/m<sup>3</sup>.

### 3 Effecten windpark Eemshaven-West fase 2

De acht turbines van fase 2 liggen tussen de Eemshaven en de turbines van fase 1 in. Van de acht turbines liggen er zes ten noorden en twee ten zuiden van twee rijen reeds bestaande turbines (11 en 9 stuks), zie figuur 1.1.

De precieze afmetingen van de turbines zijn nog niet bekend. Dit geldt voor zowel voor fase 1 als voor fase 2. De rotordiameter bedraagt minimaal 130 en maximaal 165 meter. De ashoogte bedraagt minimaal 120 en maximaal 160 meter. In de berekeningen voor fase 1 uit 2021 is uitgegaan van een rotordiameter van 160 meter en een ashoogte van 145 meter.

Het effect van de acht turbines uit fase 2 op de lokale luchtkwaliteit is verwaarloosbaar aangezien:

- de effecten van de 16 turbines van fase 1 verwaarloosbaar zijn en minder dan 0,01 µg/m<sup>3</sup> bedragen van de jaargemiddelde concentratieniveaus op leefniveau voor stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>), fijnstof (PM10) en benzeen
- dat de rotordiameter potentieel vijf meter groter kan worden dan waarmee in de berekeningen van 2021 van uit is gegaan (165 versus 160 meter) heeft geen effect op de uitkomsten. Een iets grotere rotor zal voor iets meer menging zorgen

In die gevallen dat de windturbines een negatief effect op de luchtkwaliteit op leefniveau zouden hebben (wat dus niet het geval is), worden de luchtverontreinigende stoffen vanuit hoge industriële schorstenen dan juist extra verdund waardoor het negatieve effect op leefniveau minder wordt

- aanvullend geldt voor de invloed van de zes noordelijke turbines van fase 2:
  - bij west-noord-westelijke wind zorgen de turbines van fase 1 en de bestaande turbines voor extra turbulentie en menging, en een daling in windsnelheid, alvorens de Eemshaven wordt bereikt<sup>4</sup>. In het onderzoek van 2021 is vastgesteld dat deze turbines geen significant effect hebben op de concentratieniveaus op leefniveau voor de benedenwinds gelegen woonlocaties. Dit geldt daarmee ook voor de zes noordelijke turbines van fase 2 die op eenzelfde wijze gepositioneerd zijn ten opzichte van de Eemshaven
  - bij oost-zuid-oostelijke wind is het eventuele effect van de zes noordelijke turbines van fase 2 niet van belang aangezien er in het verlengde van de industriële emissiebronnen in de Eemshaven en deze zes turbines en geen woningen liggen maar water (de Waddenzee)
  - bij noordelijke en zuidelijke windrichting is er geen beïnvloeding van de zes zuidelijke turbines van fase 2 aangezien er geen emissiebronnen bovenwinds zijn gelegen
- aanvullend geldt voor de invloed van de twee zuidelijke turbines van fase 2:
  - bij een oostelijke tot oost-noord-oostelijke wind liggen de twee zuidelijke turbines van fase 2 ten opzichte van de industriële emissiebronnen in de Eemshaven in de luwte van de bestaande turbines met ashoogtes van 98 meter (blauw stippen in figuur 1.1). Deze twee turbines voegen geen extra menging meer toe (de pluim is al breder dan het zog van de nieuwe turbines) en voegen dan ook geen potentieel negatief effect meer toe aan de het effect van de tussengelegen windturbines
  - bij een westelijke wind liggen de twee zuidelijke turbines van fase 2 ten opzichte van de industriële emissiebronnen in de Eemshaven in de luwte van de turbines van fase 1. Dit is echter niet van belang, en daarmee ook niet voor het eventuele effect van de turbines van fase 2, aangezien er in het verlengde van de twee zuidelijke turbines van windpark Eemshaven-West en de industriële emissiebronnen in de Eemshaven geen woningen liggen maar water (de Eems)
  - bij noordelijke en zuidelijke windrichting is er geen beïnvloeding van de twee zuidelijke turbines van fase 2 aangezien er geen emissiebronnen bovenwinds zijn gelegen

Geconcludeerd wordt dat de acht nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 2 geen invloed hebben ( $< 0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) op de jaargemiddelde concentratieniveaus op leefniveau voor stikstofdioxide ( $\text{NO}_2$ ), fijnstof ( $\text{PM}_{10}$ ) en benzeen. Daarbij geldt dat de concentratieniveaus in het studiegebied overal ruim onder de wettelijke grenswaarden liggen.

---

<sup>4</sup> Hierbij wordt opgemerkt dat dit vooral geldt voor de 'eerstelijns' turbines. Turbines die erachter staan zorgen nauwelijks voor extra menging en een verdere afname van de windsnelheid





## **Effect windpark Eemshaven-West op de lokale luchtkwaliteit**

**23 november 2021**

## Verantwoording

<b>Titel</b>	Effect windpark Eemshaven-West op de lokale luchtkwaliteit
<b>Opdrachtgever</b>	Pondera Consult
<b>Projectleider</b>	Ramon van Bruggen
<b>Auteur(s)</b>	Luc Verhees, Ivo Quax
<b>Tweede lezer</b>	Hans Erbrink (ESC)
<b>Projectnummer</b>	1282197
<b>Aantal pagina's</b>	20
<b>Datum</b>	23 november 2021
<b>Handtekening</b>	Ontbreekt in verband met digitale verwerking. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

## Colofon

TAUW bv  
Handelskade 37  
Postbus 133  
7400 AC Deventer  
T +31 57 06 99 91 1  
E info.deventer@tauw.com



## Inhoud

1	Inleiding en vraagstelling .....	4
2	Windturbine-effecten .....	5
2.1	Invloed van windturbines op verspreiding van emissies/rookgassen.....	5
2.2	Implementatie windturbine-effecten in het STACKS rekenmodel .....	8
2.3	Nauwkeurigheid .....	10
3	Aanpak en uitgangspunten.....	10
3.1	Nieuwe turbines windpark Eemshaven-West fase 1 .....	10
3.2	Bestaande windturbines.....	12
3.3	Emissiebronnen in de Eemshaven.....	13
3.4	Overige uitgangspunten en modelparameters .....	15
3.4.1	Zichtjaar .....	15
3.4.2	Modelgebied en rekenpunten .....	15
3.4.3	Terreinruwheid .....	15
4	Resultaten .....	16
4.1	Bijdrage Eemshaven aan concentratieniveaus, zonder de windturbines.....	16
4.2	Effecten bestaande windturbines .....	17
4.3	Effecten nieuwe turbines windpark Eemshaven-West .....	18
4.4	Toetsing aan grens- en advieswaarden .....	18
5	Conclusies.....	19
6	Referenties .....	20
Bijlage 1	Kenmerken bestaande turbines Eemsgebied	
Bijlage 2	Details emissiebronnen	
Bijlage 3	Beschrijving combinatie zogmodel en pluimverspreiding	

## 1 Inleiding en vraagstelling

Vattenfall en Stichting Eemswind hebben plannen om het windpark Eemshaven-West te ontwikkelen in de Emmapolder, ten westen van de Eemshaven.

De emissies van luchtverontreinigende stoffen vanuit de Eemshaven zorgen lokaal voor een verhoging van de concentratieniveaus van deze stoffen. De geplande windturbines van windpark Eemshaven-West kunnen een mogelijk effect hebben op de verspreiding van deze industriële emissies. In voorliggend onderzoek is het effect onderzocht van het geplande windturbinepark op de luchtkwaliteit in de omgeving. Het onderzoek is uitgevoerd door TAUW in samenwerking met Erbrink Stacks Consult.

Het berekenen van de concentratieniveaus van stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>), fijnstof (PM10)<sup>1</sup> en benzeen is uitgevoerd met een op maat toegesneden versie van het verspreidingsmodel STACKS, waarin de beïnvloeding van de windturbines op het verspreidingsgedrag van de emissies is opgenomen. Deze uitbreiding van het STACKS model is state-of-the-art en al eerder toegepast op andere locaties in Nederland en daarbuiten (zie de referentielijst in hoofdstuk 6) en gepubliceerd op een NATO/CCMS conferentie (Erbrink, J.J. en Verhees, L., 2012).

De volgende vragen zijn onderzocht:

- Wat zijn de concentratieniveaus van NO<sub>2</sub>, PM10 en benzeen in de omgeving van de Eemshaven?
- Hoe worden de concentratieniveaus beïnvloed door de huidige bestaande en vergunde windturbines?
- Wat is het effect op de concentratieniveaus ten gevolge van plaatsing van de nieuwe turbines in windpark Eemshaven-West?
- Zijn er overschrijdingen van grenswaarden te verwachten?

De vragen worden beantwoord door berekeningen uit te voeren van de verspreiding van de luchtverontreinigende stoffen in de situatie zonder de windmolens en de situatie met de windmolens. De verschillen in berekende concentraties worden toegewezen aan de effecten van de windmolens. Dit wordt gedaan door op concrete locaties in woongebieden te rekenen en door contourplots te maken, zodat een totaal ruimtelijk inzicht wordt verkregen van de concentraties in het hele gebied.

In deze rapportage wordt in hoofdstuk 2 eerst een algemene uitleg gegeven van de effecten die de windmolens op de verspreiding van stof- en rookpluimen kunnen hebben, en de wijze waarop deze effecten zijn geïmplementeerd in het STACKS rekenmodel. In hoofdstuk 3 worden alle uitgangspunten van de modelberekeningen beschreven, voor zowel de windturbines, de emissiebronnen in de Eemshaven, en diverse algemene rekeninstellingen. In hoofdstuk 4 volgen de berekeningsresultaten en in hoofdstuk 5 de conclusies.

---

<sup>1</sup> PM10 is de benaming voor fijnstofdeeltjes in de lucht (PM: Particulate Matter) die kleiner zijn dan 10 micrometer

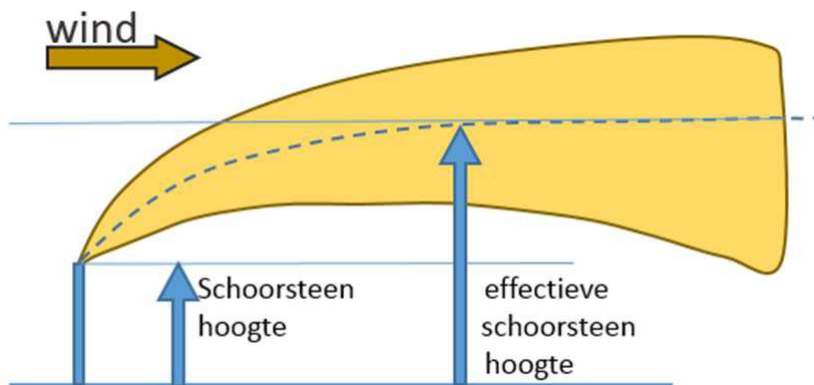
## 2 Windturbine-effecten

### 2.1 Invloed van windturbines op verspreiding van emissies/rookgassen

Windturbines halen energie uit het windveld en kunnen daardoor de verspreiding van rookgassen vanuit schoorstenen en diffuse emissies beïnvloeden. De windsnelheid achter een windturbine (het zogenaamde zog) is daarom een stuk minder dan vòòr de turbine. Direct achter de windturbines is de windsnelheid ongeveer de helft lager dan ervòòr. Door het draaien van de wieken en door de verschillen in windsnelheid onder en boven dit zog, worden ook extra wervelingen opgewekt, de zogenaamde turbulentie. Deze turbulentie zorgt ervoor dat rook dat in het zog terecht komt sterker wordt verspreid (en dus verdund) dan buiten dit zog. Dit sneller verspreiden gaat naar boven èn naar beneden.

Een proces dat speelt bij rookgassen met een hoge temperatuur is dat deze na het verlaten van de schoorsteenmond 'doorstijgen' in de atmosfeer (warme lucht stijgt op), zie figuur 2.1. Deze zogenaamde pluimstijging is hoger bij weinig wind en veel minder bij veel wind. Een rookpluim komt dus voor elk uur (bij een geschikte windrichting) hoger of lager in het zog van de windturbine terecht.

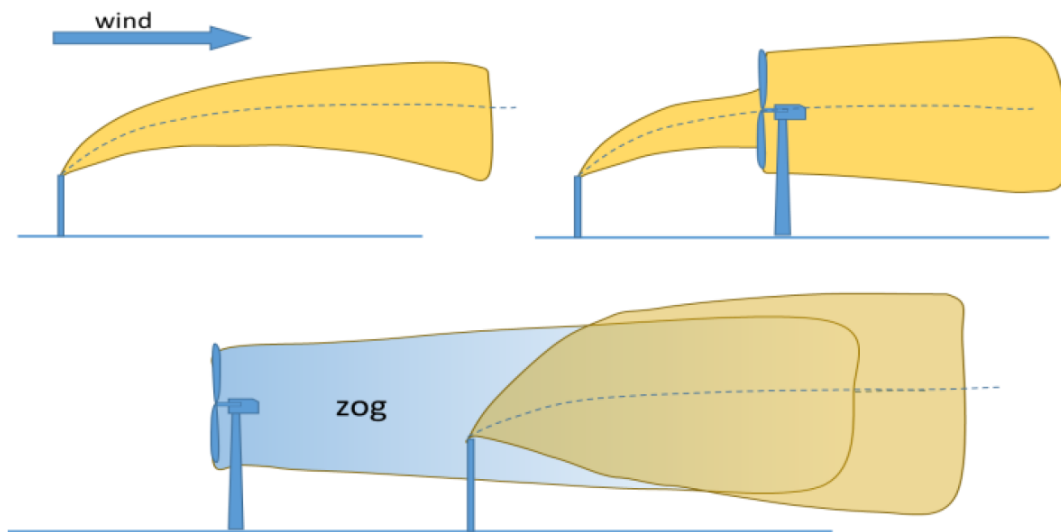
Samengevat komt het erop neer dat een pluim in het zog sterker verdund wordt (meer menging), maar langzamer weg waait omdat de windsnelheid direct achter de windmolen lager is. Bij rookgassen met een hoge temperatuur kan daarbij ook de pluimhoogte veranderen: door de snelle opmenging in het zog verdwijnt de warmte sneller uit de pluim waardoor deze minder ver stijgt.



Figuur 2.1 Principe van pluimstijging, door de warmte-inhoud kan een rookpluim een flink eind stijgen in de atmosfeer

Hoe het effect van windturbines uitwerkt op de grondconcentraties hangt af van verschillende factoren:

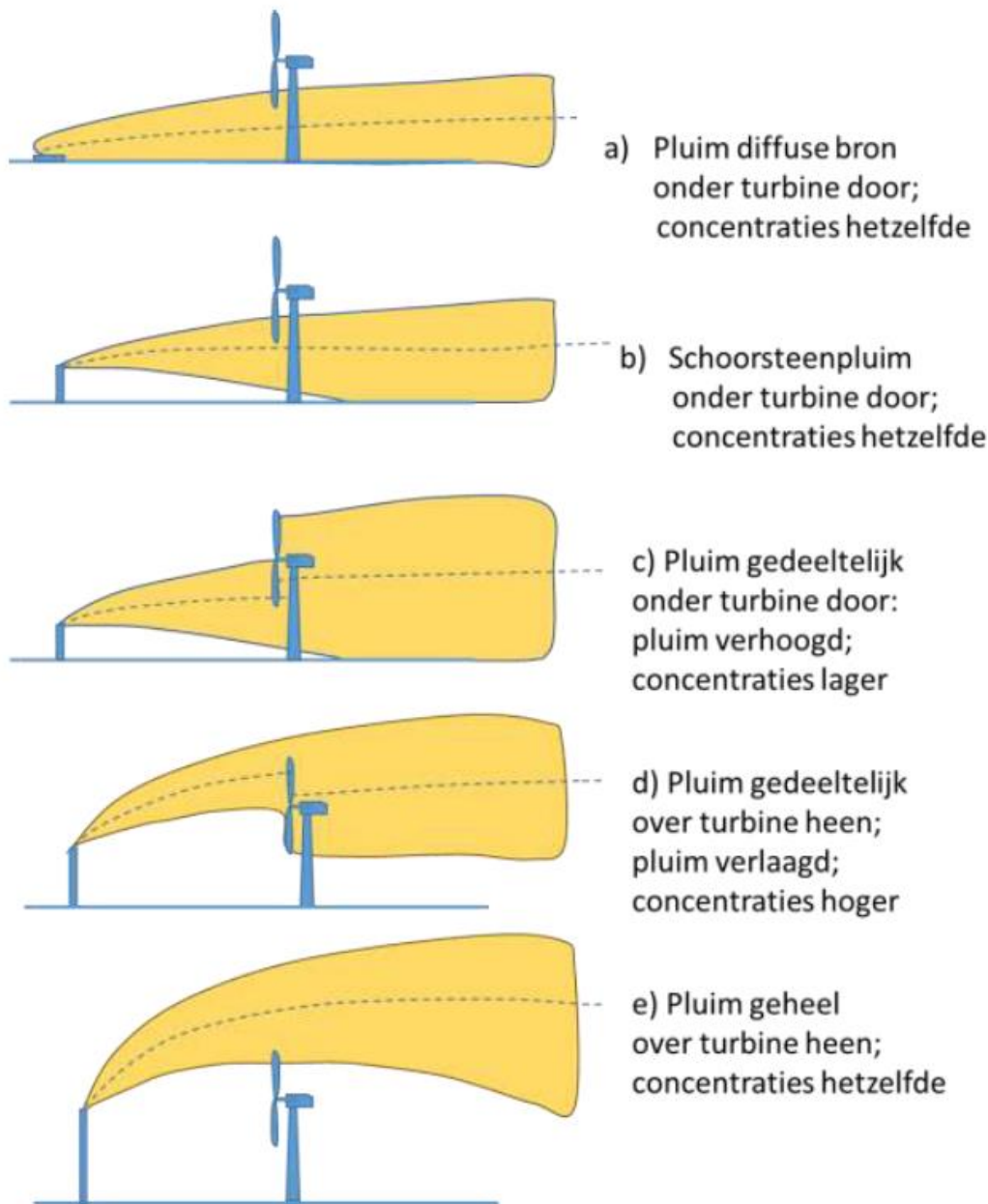
1. Of de schoorsteen vòòr de windturbine staat of dat de windturbine vòòr de schoorsteen staat; dit hangt uiteraard van de windrichting af (zie figuur 2.2)
2. Of de rookpluim laag of juist hoog in zog achter de windturbine komt, dus hoe hoog/laag de schoorsteen is ten opzichte van de as van de windmolen



Figuur 2.2 Pluimverspreiding zonder windmolen (linksboven) en twee mogelijke situaties met windmolen: de windmolen staat bovenwinds of benedenwinds van de windmolen(s)

Als de schoorsteen vòòr de windmolen staat komt de rookpluim bij geschikte windrichtingen in het zog van de windturbine terecht. Als de rookpluim dan nog laag bij de grond is, zal de pluim niet eens (of nauwelijks) in het zog terecht komen: moderne windmolens zijn zo hoog dat de rookpluim als snel hoger dan 50 m moet komen om in het zog terecht te kunnen komen. Naarmate de schoorsteen hoger is, zal een groter deel in het zog komen en dan (bij benadering) onmiddellijk verspreid worden. Als de gemiddelde pluimhoogte lager is dan de hoogte van de turbine-as zal dit doorgaans tot een extra verdunning leiden die lagere grondconcentraties geeft. De pluim wordt als het ware juist van de grond weg-verdund. Als de gemiddelde pluimhoogte daarentegen hoger is dan de hoogte van de turbine-as zal dit doorgaans ook tot een extra verdunning leiden maar die dan juist tot hogere grondconcentraties leidt. Hier wordt de pluim als het ware juist naar de grond toe gemengd. Als de pluim meestal in zijn geheel boven de turbine-as uitstijgt, dan is er weer nauwelijks beïnvloeding en heeft de windturbine weinig effect op de verspreiding. In figuur 2.2 is dit schematisch aangeduid. Daarin geeft de bovenste situatie (a) de situatie voor wegverkeer en diffuse bronnen weer (opslaghopen en degelijke bronnen), die zich op de grond bevinden. Diffuse bronnen kunnen in principe nooit een verslechtering van de luchtkwaliteit te zien geven door plaatsing van windmolens.

Als de windmolen vòòr de schoorsteen staat dan komt de rookpluim bij geschikte windrichtingen al direct in het zog van de windturbine terecht. In het zog is de windsnelheid lager, maar de menging sterker. Deze twee effecten compenseren elkaar deels of geheel. Een rookpluim die warm is bij het verlaten van de schoorsteen stijgt nog een stuk hoger in de lucht; deze pluimstijging hangt af van de windsnelheid op pluimhoogte. Bij een lagere windsnelheid (zoals in het zog) stijgt de pluim hoger dan bij hogere windsnelheden. En door de sterkere menging wordt de pluim sneller naar de grond verdund, dit geeft enige verhoging van de concentraties. Het netto effect van deze twee effecten is dat de grondconcentraties lang niet zo sterk beïnvloed kunnen worden als de omgekeerde situatie (schoorsteen bovenwinds).



Figuur 2.3 Beïnvloeding van rookpluimverspreiding door een windmolen; effect van toenemende schoorsteenhoogte bij bovenwindse situering van de schoorsteen ten opzichte van de windmolen

#### Effect van windturbines op achtergrondconcentraties

De achtergrondconcentraties worden bepaald door de optelsom van alle andere (op grotere afstand gelegen) bronnen. Door de verspreiding in de lucht zijn deze stoffen dan al over de hele dikte van de menglaag verspreid: het maakt dan niet uit of de concentratie op 1, 10, 100 of 300 meter hoogte wordt beschouwd: deze achtergrondconcentraties zijn op alle hoogtes hetzelfde. Een windturbine kan dan de wind of de menging beïnvloeden, de achtergrondconcentraties worden daardoor niet veranderd: ze zijn al over de hele hoogte uniform opgemengd. De pluimen van bronnen dichtbij zijn juist niet uniform verdeeld over de dikte van de menglaag: de windturbines kunnen de concentraties van deze lokale pluimen natuurlijk wel beïnvloeden.



## 2.2 Implementatie windturbine-effecten in het STACKS rekenmodel

Het rekenmodel STACKS is een implementatie van het Nieuw Nationaal Model (NNM) en voldoet aan de eisen van de Standaard Rekenmethode 3 (SRM3) zoals beschreven in Regeling beoordeling luchtkwaliteit 2007. SRM3 is speciaal voor industriële emissies opgesteld. STACKS is door het ministerie van I&W goedgekeurde rekensoftware<sup>2</sup> voor berekeningen conform SRM3 (en daarbij SRM1 en SRM2 voor berekeningen voor wegverkeer) ten behoeve van vergunningverlening en voor bestemmingsplannen. Met SRM3 kan echter geen rekening worden gehouden met de invloed van windmolens op de verspreiding.

De relevante processen in het zog zijn aan het STACKS rekenmodel toegevoegd; er zijn verschillende functies toegevoegd om te beschrijven wat er gebeurt met stof- en rookpluimen als deze door de windmolen worden ingevangen. De functies betreffen de windsnelheid in het zog (deze kan direct achter de windmolen tot 50 % à 60 % bedragen van de ingaande windsnelheid), de turbulentie in het zog en de zogafmetingen, alles als functie met de afstand windafwaarts na de windmolen. Onderscheid is gemaakt tussen de situatie dat de schoorsteen bovenwinds of benedenwinds van de windmolen staat, zie figuur 2.3.

Er is verder weinig onderzoek gedaan naar de interactie tussen windturbines en rookpluimen. De Universiteit van Glasgow (Fletcher en Brown, 2010) heeft een studie uitgevoerd die een vergelijkbare werkwijze voorstelt als in dit rapport met het rekenmodel STACKS is beschreven. In het ADMS model (het nationale verspreidingsmodel van Engeland, vanaf 2013) is een module opgenomen die de wind en turbulentie in het zog van een windturbine beschrijft (Stidworthy et al, 2011). Figuur 2.3 toont ter illustratie een situatie waarbij zichtbaar is dat de windturbines het pluimgedrag beïnvloed.

Er zijn de afgelopen jaren voor diverse situaties berekeningen uitgevoerd met het STACKS model met de uitbreiding voor windturbines; onder andere voor locaties in/bij Apeldoorn, Zutphen, Harlingen, Duiven, Beerse (Vlaanderen) en bij Tata Steel (zie referentielijst). De toevoegingen windturbine-effecten in STACKS zijn door experts van RIVM op hun merites beoordeeld. Daarbij is gesteld dat er een plausibele werkwijze is gebruikt.

Het STACKS model is een uur-voor-uur model. In het model is een meteorologische database opgenomen welke voor elk uur meteorologische parameters bevat zoals windrichting, windsnelheid en temperatuur, welke de verspreiding van rookgassen en emissies bepalen. Standaard wordt voor prognostische berekeningen (voor toekomstige nog te realiseren situaties) een historische reeks van 10 jaar (87.600 uren) doorgerekend zodat een nauwkeurig beeld wordt verkregen van de concentraties die in de omgeving zullen gaan optreden.

---

<sup>2</sup> Zie <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/regelingen/2011/07/04/overzicht-goedgekeurde-rekenmethoden>



*Figuur 2.4 Windmolens kunnen de verspreiding van rook en stof beïnvloeden. Bron foto: Interaction of an Eulerian Flue Gas Plume with Wind Turbines. Timothy M. Fletcher en Richard E. Brown (2010)*

De specifiek in het STACKS model opgenomen functies die de invloed van de windturbines beschrijven zijn alleen van toepassing wanneer de windrichting (dit wordt dus per uur bepaald voor een periode van 10 jaar) zodanig is dat interactie tussen rookpluim en windmolen plaatsvindt. Deze interactie kan plaatsvinden voor de hele pluim, maar ook voor gedeelten van pluimen. Het kan immers zo zijn dat een deel van de pluim wordt ingevangen in het zog terwijl een ander deel zich aan het zog onttrekt. Dat maakt dat het ene deel van de pluim zich anders gedraagt dan het andere deel van de pluim. Voor een Gaussisch verspreidingsmodel als STACKS is dat lastig, omdat een pluim steeds beschreven wordt als één geheel. Daar waar deze aspecten aan de orde zijn, wordt steeds een conservatieve (voorzichtige) keus gemaakt, zodat de impact niet onderschat wordt. Als er geen interactie plaatsvindt tussen windmolen en rookpluim, wordt de normale beschrijving van de pluimverspreiding in het rekenmodel gevolgd<sup>3</sup>. Een gedetailleerde beschrijving van de functies die in het STACKS model zijn opgenomen en die de effecten van windturbines op de verspreiding van rookgassen/emissies beschrijven zijn opgenomen in bijlage 3.

Tot slot wordt opgemerkt dat het STACKS model rekening houdt - zoals ook in deze studie voor de Eemshaven het geval is - met een veelheid van bronnen en windturbines. Voor alle bronnen en windmolens worden de posities ten opzichte van elkaar bepaald. Per uur wordt nagegaan welke schoorsteen bovenwinds dan wel benedenwinds van één van de windmolens staat. Op grond van de posities en de windrichting wordt per uur bepaald welke pluim door welke windmolen beïnvloed wordt. Daarbij wordt beïnvloeding door één molen (de dichtstbijzijnde) berekend.

---

<sup>3</sup> STACKS is een Gaussische pluimmodel; een niet-Gaussische pluimvorm wordt daarom als een Gaussische vorm benaderd. Het zog (aanvankelijk min of meer een blokvorm) wordt een Gaussvorm door de diameter van het zog te vertalen naar een Gaussische verdeling met diameter=3 maal sigma-waarde. Sigma is de standaardafwijking van de Gaussische verdeling

### 2.3 Nauwkeurigheid

Rekenmodellen voor luchtkwaliteit zijn altijd benaderingen van de werkelijkheid. De nauwkeurigheid voor toepassing op lokale schaal ligt in de orde van grootte van enkele tientallen procenten. Hoewel de modelopzet is gemaakt door zorgvuldig de interactie tussen windmolen en rookpluimen te beschrijven, is het nog steeds een benadering. De uitkomsten zullen minder nauwkeurig zijn dan van het originele Nieuw Nationaal Model (NNM). De nauwkeurigheid van de berekende bijdrage van bronnen zal naar verwachting binnen een factor twee zijn. Opgeteld bij een achtergrond, die nauwkeuriger is (ruwweg 10 à 20 %), kan gesteld worden dat de resultaten voldoende betrouwbaar zijn om a) aan te geven of de windmolens een negatief dan wel positief effect hebben en b) om de resultaten toetsen aan de grenswaarden die in Nederland gelden.

## 3 Aanpak en uitgangspunten

De volgende vragen zijn onderzocht:

- Wat zijn de concentratieniveaus van NO<sub>2</sub>, PM10 en benzeen in de omgeving van de Eemshaven?
- Hoe worden de concentratieniveaus beïnvloed door de huidige bestaande en vergunde windturbines?
- Wat is het effect op de concentratieniveaus ten gevolge van plaatsing van de nieuwe turbines in windpark Eemshaven-West?
- Zijn er overschrijdingen van grenswaarden te verwachten?

Om de berekeningen uit te kunnen voeren waarmee bovenstaande vragen beantwoord worden, zijn alle relevante bronnen in het STACKS rekenmodel ingevoerd. In paragrafen 3.1 en 3.2 worden eerst de kenmerken van de nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 1 en bestaande turbines in het Eemsgebied gegeven. Paragraaf 3.3 gaat in op de emissiebronnen in de Eemshaven en in paragraaf 3.4 komen de diverse modelparameters aan de orde.

### 3.1 Nieuwe turbines windpark Eemshaven-West fase 1

De geplande 16 turbines van windpark Eemshaven-West fase 1 liggen relatief ver van de industrie in de Eemshaven. De dichtstbijzijnde van de 16 turbines wordt op ongeveer 4 km van het eerste grote industriële bedrijf geplaatst. In tabel 3.1 zijn de posities van de windmolens gegeven in rijksdriehoekskoördinaten. De coördinaten van de windmolens zijn tevens in figuur 3.1 aangegeven. De precieze afmetingen van de turbines zijn nog niet bekend. Uitgegaan is van een voor de verspreiding van de rookgassen worst-case situatie waarin de ashoogte 145 meter bedraagt en de rotordiameter 160 meter.

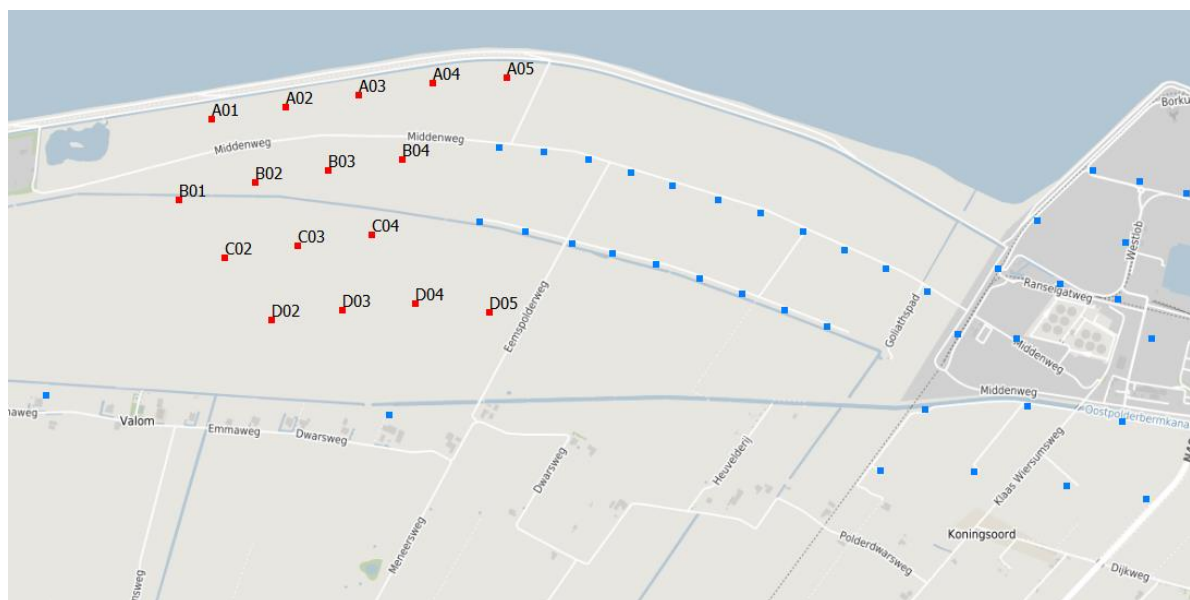
Voor het bepalen van de zogeparameters gebruikt het verspreidingsmodel de thrustcoëfficiënten. Thrustcoëfficiënten bepalen welk deel van de windkracht wordt omgezet in de stuwkracht voor de generator (voor de elektriciteitsproductie) en zijn afhankelijk van het ontwerp van de windturbine. Naarmate de windsnelheid toeneemt wordt er een kleiner deel van de kracht die de wind uitoefent, omgezet in elektriciteit. De in het onderzoek aangehouden Ct-curve van de 16 nieuwe turbines is te zien in figuur 3.2. De aanspreeknelheid is 2,5 m/s en de maximale windsnelheid is 22 m/s.

**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

Bij hogere windsnelheden wordt de molen stilgelegd (de wieken worden zo gedraaid dat er geen windkracht meer op uitgeoefend wordt: de zogenaamde vaanstand). De tabellen met de thrustcoëfficiënten zijn als fitcurves in het STACKS rekenmodel ingebouwd.

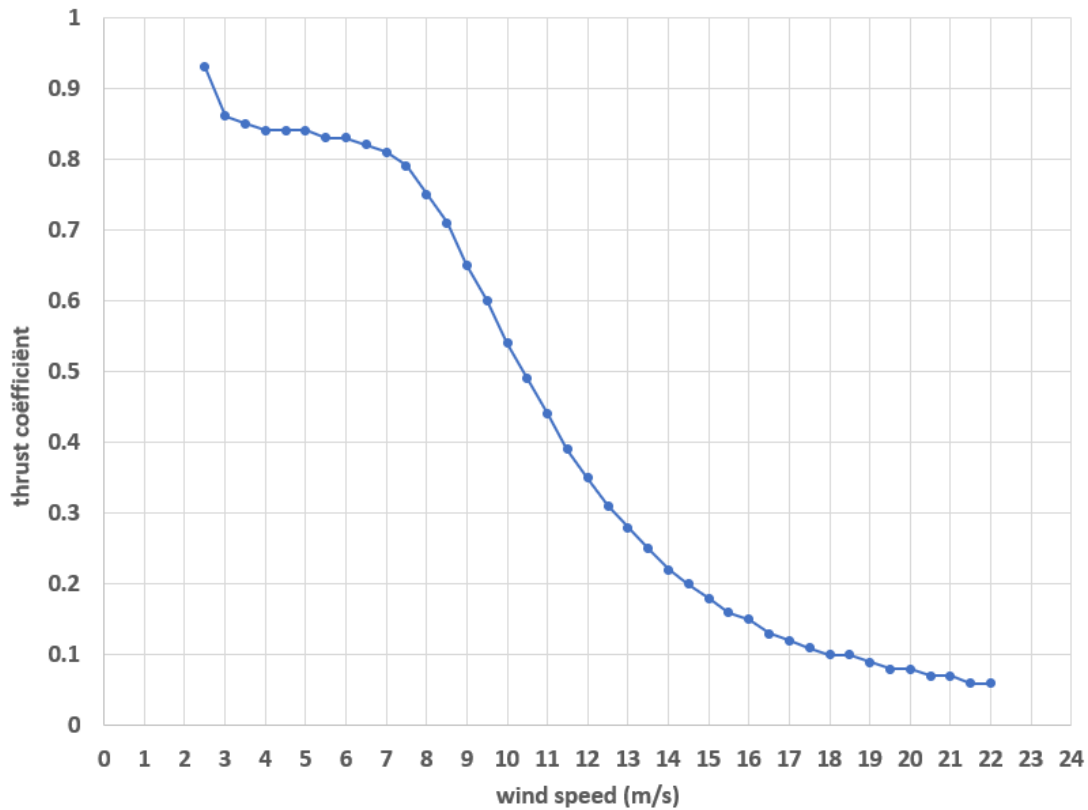
Tabel 3.1 Coördinaten van de 16 nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 1

ID	X-coördinaat	Y-coördinaat
A01	243378	609247
A02	243868	609325
A03	244358	609404
A04	244848	609482
A05	245342	609519
B01	243160	608711
B02	243665	608825
B03	244154	608904
B04	244644	608981
C02	243462	608325
C03	243951	608403
C04	244440	608480
D02	243776	607910
D03	244245	607980
D04	244731	608018
D05	245225	607965



Figuur 3.1 Locatie van de 16 nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 1 in rood. Bestaande of reeds vergunde turbines in blauw

Kenmerk R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

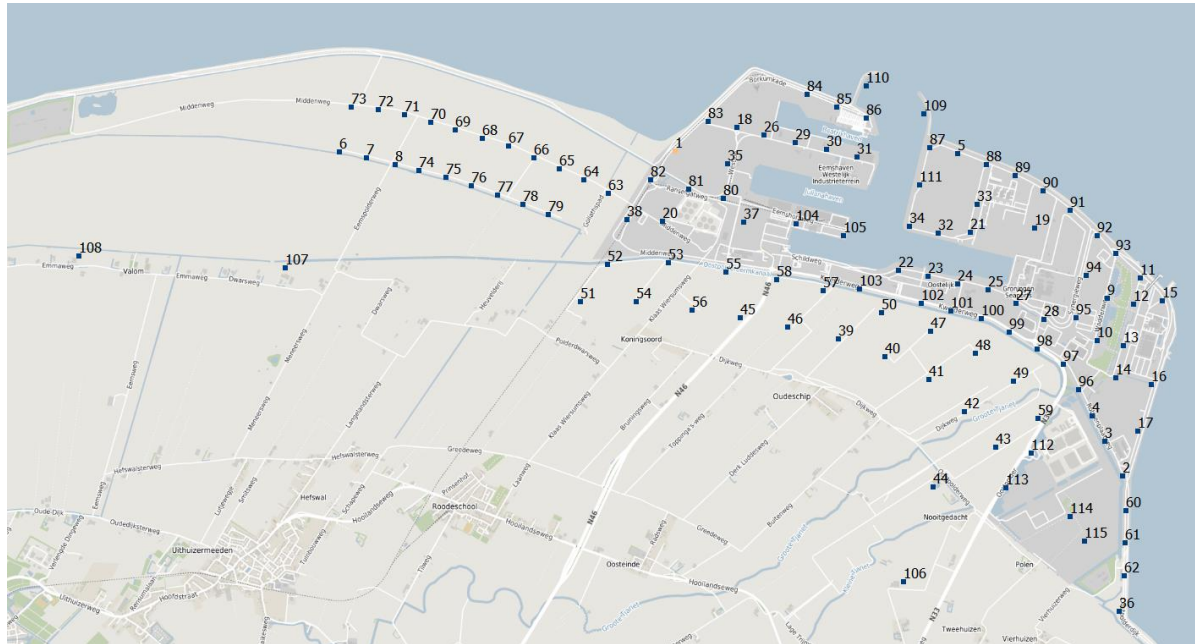


Figuur 3.2 Ct-curve van de 16 nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 1

### 3.2 Bestaande winturbines

In en rondom de Eemshaven bevinden zich al ruim honderd windmolens van diverse afmetingen. Al deze windturbines zijn in het model opgenomen. De kenmerken van de turbines zijn geleverd door de opdrachtgever. Figuur 3.3 laat op de kaart de ligging van deze 115 bestaande (of reeds vergunde) windturbines zien. In bijlage 1 is een lijst opgenomen met de coördinaten, ashoogte en rotordiameter van deze turbines. De Ct-curves van de turbines worden niet gegeven. Deze zijn namelijk niet openbaar, maar zijn wel opgenomen in het STACKS model ten behoeve van voorliggend onderzoek. Het nummer van de turbines in figuur 3.3 komt overeen met de nummering (ID) in bijlage 1.





Figuur 3.3 Ligging van de 115 bestaande en vergunde windturbines in en rondom de Eemshaven

### 3.3 Emissiebronnen in de Eemshaven

In dit onderzoek zijn de emissies van NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> en benzeen beschouwd die vrijkomen in de Eemshaven. De emissies en bronkenmerken van de volgende zes grote en relevante bedrijven zijn aangeleverd door de omgevingsdienst Groningen en in het STACKS model ingevoerd:

- Engie
- RWE
- Theo Pouw
- Vattenfall
- VOPAK
- Holland Malt

De overige bedrijven in de Eemshaven hebben een verwaarloosbare emissie ten opzichte van de zes beschouwde bedrijven. De invloed van windturbines op de emissies vanuit lage bronnen (< 10 meter) is afwezig of verwaarloosbaar (zie paragraaf 2.1). Lage puntbronnen zijn echter wel in de berekeningen meegenomen, oppervlaktebronnen niet. De In bijlage 2 is een lijst opgenomen van alle bronnen en bronkenmerken die in dit onderzoek zijn meegenomen. Figuur 3.3 toont de bronnen op de kaart.

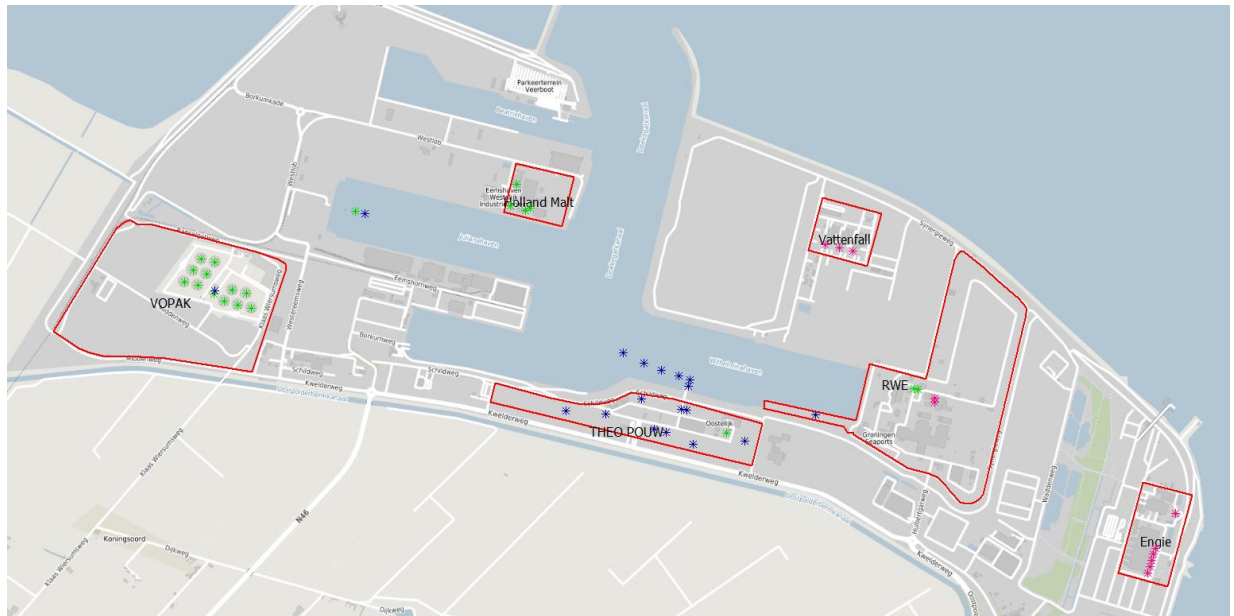
Voor NO<sub>2</sub> geldt dat de hoge bronnen (vanaf 65 m) van Engie, RWE en Vattenfall samen 99,15 % van de NO<sub>2</sub> emissies voor hun rekening nemen, met de volgende verdeling:

- Engie: 64,78 % (7.651 ton/jaar)
- RWE: 17,44 % (2.059 ton/jaar)
- Vattenfall: 16,93 % (2.000 ton/jaar)

De PM<sub>10</sub> emissies liggen een stuk lager en zijn voor 90,36 % afkomstig van RWE (106 ton/jaar) en voor 6,96 % van Theo Pouw (8,2 ton/jaar).

**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

De benzeen emissies zijn met in totaal 20 kilo per jaar aanzienlijk lager. Van deze 20 kilo wordt een kleine 17 kilo geëmitteerd op het terrein van VOPAK.



*Figuur 3.4 Ligging van de emissiebronnen in Eemshaven. Roze sterretjes: bronnen > 50 meter hoog, groen: bronnen 10 tot 50 meter hoog, blauw: bronnen < 10 meter hoog*

De bijdragen van alle relevante bedrijven en hun emissiebronnen zijn met het rekenmodel STACKS doorgerekend. De bronbijdrage van deze bronnen wordt opgeteld bij de achtergrondconcentratie om tot een totaal concentratieniveau te komen.

De achtergrondconcentraties (ook wel GCN: Grootchalige Concentratiekaarten Nederland) worden jaarlijks door het RIVM geactualiseerd en zijn in het STACKS rekenmodel opgenomen. De achtergrondconcentratiekaarten zijn kaarten met een resolutie van 1 km. De bijdrage van de Eemshaven is hier ook al in opgenomen. Door de emissiebronnen van de Eemshaven in het model op te nemen, en de bijdrage aan de concentratieniveaus met hoge ruimtelijke resolutie te berekenen, is er dus feitelijk sprake van een dubbel telling. Deze dubbel telling heeft echter geen consequenties voor de conclusies die uit deze studie getrokken worden aangezien a) de concentratieniveaus in noordoost Groningen zeer ruim onder de wettelijke grenswaarden liggen en een overschatting van het totale concentratieniveau hiervoor dus geen gevolgen heeft, en b) deze dubbel telling geen effect heeft op de berekening van eventuele toe- of afnames in concentraties ten gevolge van windturbines.

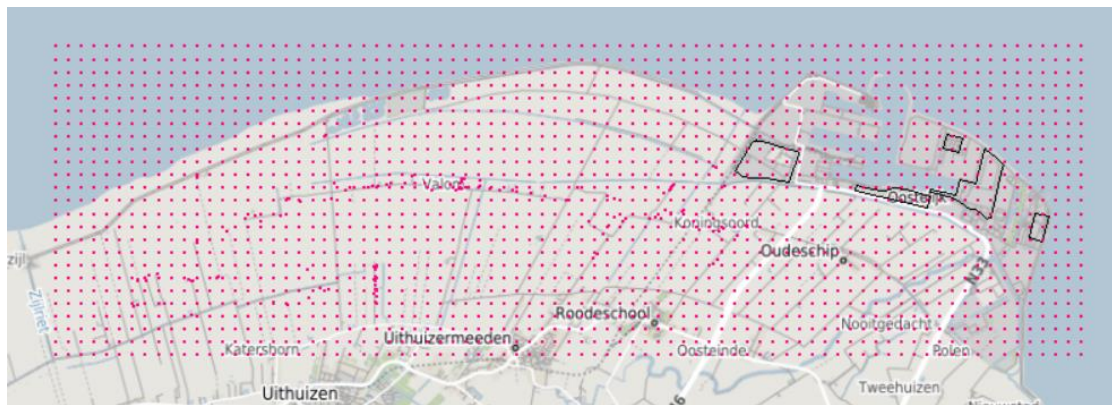
### 3.4 Overige uitgangspunten en modelparameters

#### 3.4.1 Zichtjaar

De berekeningen zijn uitgevoerd voor het zichtjaar 2021. Het zichtjaar heeft geen invloed op de berekende bijdrage van de industriële bronnen in de Eemshaven en geen invloed op de berekende effecten van de windturbines. Alleen de achtergrondconcentraties, en daarmee en de totale concentratieniveaus, worden beïnvloed door het zichtjaar. Richting de toekomst dalen de achtergrondconcentratieniveaus. Door te rekenen met zichtjaar 2021 is worst-case gerekend.

#### 3.4.2 Modelgebied en rekenpunten

De concentratieniveaus zijn berekend voor een gebied van 20 bij 6 kilometer (het modelgebied). Er zijn rekenpunten geplaatst om de 250 meter (in totaal 2025 punten) en op alle woningen in het modelgebied (120 woningen). Figuur 3.5 toont het modelgebied en alle rekenpunten.



Figuur 3.5 Modelgebied van 20 x 6 km en alle rekenpunten binnen het modelgebied

#### 3.4.3 Terreinruwheid

De terreinruwheid is een maat voor obstakels aan het oppervlakte zoals gebouwen, bomen en taluds. De terreinruwheid voor het beschouwde modelgebied is 0.06 m. De terreinruwheid wordt door STACKS bepaald op basis van de meest recente LGN-kaart (Landelijk Grondgebruik Nederland).

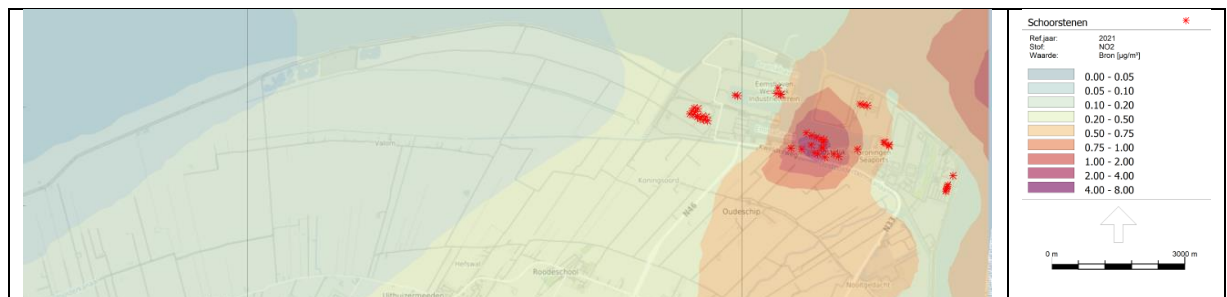
## 4 Resultaten

In paragraaf 4.1 en 4.2 worden rekenresultaten getoond en besproken. In hoofdstuk 5 worden kort en bondige conclusies gegeven.

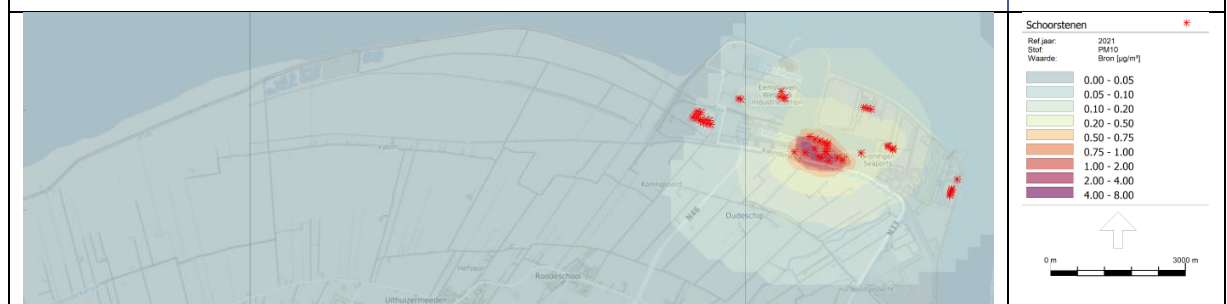
### 4.1 Bijdrage Eemshaven aan concentratieniveaus, zonder de windturbines

Met het STACKS rekenmodel is de bijdrage aan de concentratieniveaus van de qua emissies zes grootste bedrijven in de Eemshaven (zie paragraaf 3.3) berekend. De bijdrage van deze bedrijven aan de jaargemiddelde concentratie wordt getoond in figuur 4.1 en 4.2 voor respectievelijk NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub>. De bijdrage van benzeen is verwaarloosbaar (minder dan 0,01 µg/m<sup>3</sup>).

Lokaal rondom de lage bronnen van Theo Pouw kan de bijdrage aan de jaargemiddelde concentraties oplopen tot boven de 2 µg/m<sup>3</sup> voor NO<sub>2</sub> en 0,5 µg/m<sup>3</sup> voor PM<sub>10</sub>. De hoge bronnen, met een veel hogere emissie dan de emissie van Theo Pouw, verspreiden hun rookgassen over een veel groter gebied, maar op leefniveau is de bijdrage van deze bronnen toch beperkt. Op de locatie van het nieuwe windpark Eemshaven-West bedraagt de bijdrage van de zes beschouwde bedrijven in de Eemshaven ongeveer 0,12 tot 0,15 µg/m<sup>3</sup> voor NO<sub>2</sub> en 0,01 µg/m<sup>3</sup> voor PM<sub>10</sub>.



Figuur 4.1 Jaargemiddelde NO<sub>2</sub> bijdrage Eemshaven (zes grootste bedrijven) in µg/m<sup>3</sup>

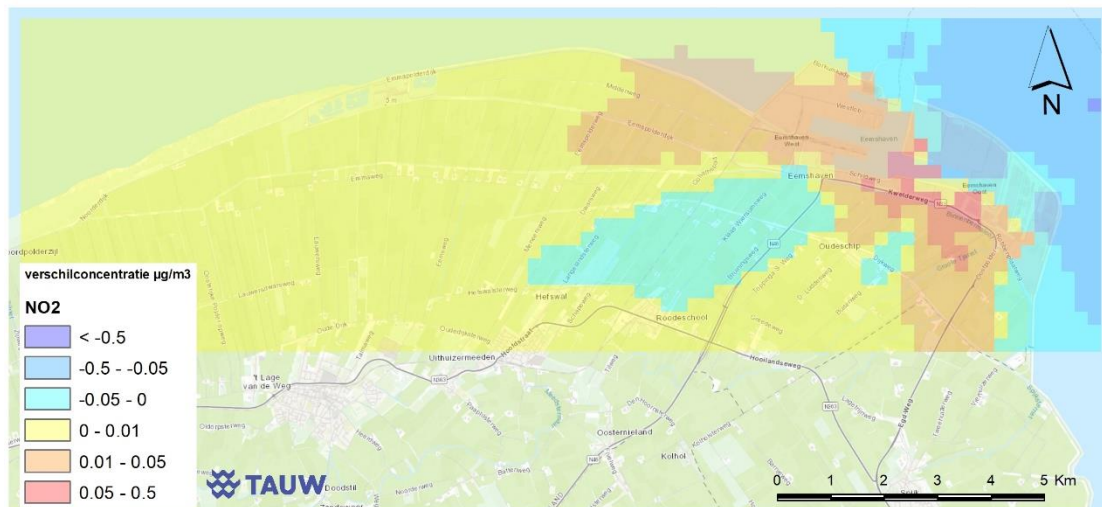


Figuur 4.2 Jaargemiddelde PM<sub>10</sub> bijdrage Eemshaven (zes grootste bedrijven) in µg/m<sup>3</sup>

## 4.2 Effecten bestaande windturbines

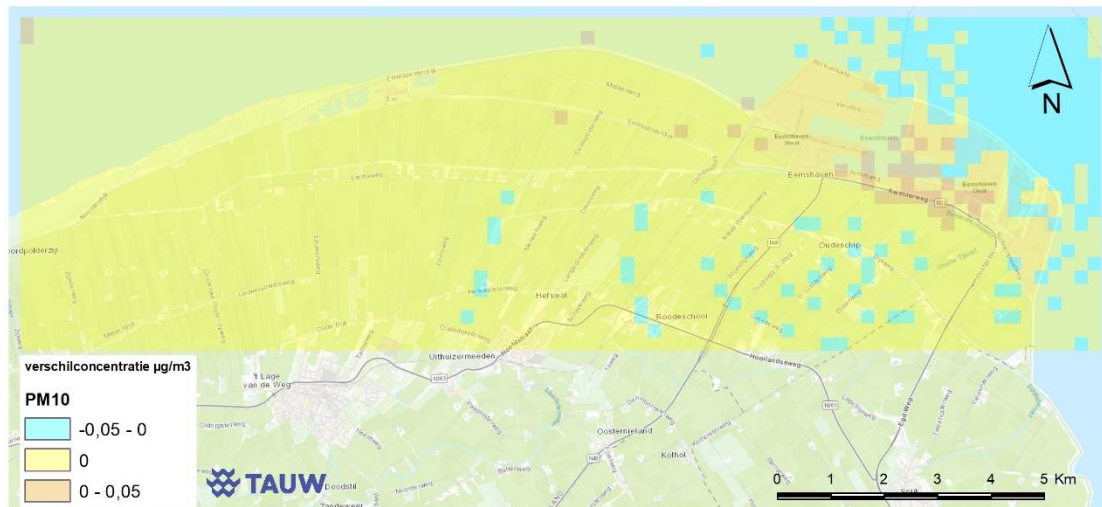
Met het STACKS rekenmodel is ten eerste het effect op de concentratieniveaus bepaald van de 115 bestaande en vergunde windturbines die in en rondom de Eemshaven aanwezig zijn. Dit effect is bepaald door de berekende concentraties in het scenario waarbij geen rekening wordt gehouden met de invloed van windturbines af te trekken van de concentraties van het scenario waarbij wel rekening wordt gehouden met invloed van deze 115 windturbines.

Uit de berekeningen volgt dat er een groot gebied is waar de concentraties toenemen ten gevolge van de aanwezigheid van de windturbines (het geel/oranje/rode gebied in figuur 4.3). Deze toenames zijn echter zeer beperkt; voor het grootste deel gaat het om toenames tot  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voor  $\text{NO}_2$  en voor een kleiner gebied (grotendeels gelegen in Eemshaven zelf) van meer dan  $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Om dit in perspectief te plaatsen: een toename in concentraties van meer dan  $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  op leefniveau wordt aangemerkt als 'in betekende mate'. Voor projecten of te vergunnen activiteiten die 'niet in betekende mate' ( $< 1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) bijdragen aan de concentratieniveaus hoeft geen toets aan de wettelijke grenswaarden plaats te vinden. Er is ook een gebied (blauw in de figuur 4.3) waar de concentraties iets afnemen ten gevolge van de aanwezigheid van de windturbines. Voor  $\text{PM}_{10}$  zijn de effecten zo goed als verwaarloosbaar, zie figuur 4.4.



Figuur 4.3 Verskil in jaargemiddelde  $\text{NO}_2$  concentratie tussen de situatie met windturbines (alle bestaande / vergunde turbines) en de situatie zonder windturbines. Rood is een toename in concentraties ten gevolge van de turbines, blauw een afname





Figuur 4.4 Verskil in jaargemiddelde PM10 concentratie tussen de situatie met windturbines (alle bestaande / vergunde turbines) en de situatie zonder windturbines. Rood is een toename in concentraties ten gevolge van de turbines, blauw een afname

### 4.3 Effecten nieuwe turbines windpark Eemshaven-West

Het potentiële effect van de 16 nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 1 is berekend door de uitkomsten van de berekening met de 115 bestaande / vergunde windturbines (zie vorige paragraaf) te vergelijken met de uitkomsten van de berekening met 131 windturbines (115 plus de 16 nieuwe turbines). Het resultaat is dat de 16 turbines geen extra toe- of afnames in de concentratieniveaus geven opzichte van het scenario de 115 bestaande / vergunde windturbines. Op geen enkel rekenpunt wordt een toe- of afname berekend van meer dan 0,00 µg/m<sup>3</sup>.

### 4.4 Toetsing aan grens- en advieswaarden

De relevante stoffen/componenten die in dit onderzoek worden beschouwd zijn NO<sub>2</sub>, PM10 en benzeen. Voor deze stoffen gelden de wettelijke grenswaarden die worden gegeven in tabel 4.1. Daarnaast zijn er de aanzienlijk strengere advieswaarden van de World Health Organisation (WHO). Deze laatste zijn recent aangescherpt door de WHO, maar zijn in de EU niet ingevoerd.

Tabel 4.1 Overzicht van grens- en advieswaarden van de in deze studie beschouwde stoffen

Stof	Type norm	Grenswaarde in Nederland en EU	WHO advieswaarde
NO <sub>2</sub>	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub>	Jaargemiddelde concentratie	40 µg/m <sup>3</sup>	15 µg/m <sup>3</sup>
	Etmaalgemiddelde concentratie	50 µg/m <sup>3</sup> mag max. 35x/jaar worden overschreden	45 µg/m <sup>3</sup> mag max. 1% van aantal dagen worden overschreden
Benzeen	Jaargemiddelde concentratie	5 µg/m <sup>3</sup>	-

De concentratieniveaus in het onderzoeksgebied (zie figuur 4.5 en 4.6) worden met name bepaald door de achtergrondconcentraties. Voor NO<sub>2</sub> liggen de jaargemiddelde concentratieniveaus in het onderzoeksgebied tussen de 5 en 11 µg/m<sup>3</sup>. Voor PM10 liggen de jaargemiddelde concentratieniveaus rond de 14 à 15 µg/m<sup>3</sup>.

**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

Het aantal PM10 overschrijdingsdagen bedraagt 6 dagen per jaar. De concentratieniveaus voor NO<sub>2</sub> en PM10 liggen daarmee zeer ruim onder de wettelijke grenswaarden. Aan de WHO advieswaarde voor NO<sub>2</sub> en PM10 wordt in het grootste deel van het onderzoeksgebied ook al voldaan. In de geel en oranje gekleurde gebieden in figuur 4.5 en 4.6 wordt de WHO advieswaarde nog niet gehaald.



Figuur 4.5 Jaargemiddelde NO<sub>2</sub> concentratie in het onderzoeksgebied in µg/m<sup>3</sup>



Figuur 4.6 Jaargemiddelde PM10 concentratie in het onderzoeksgebied in µg/m<sup>3</sup>

## 5 Conclusies

De hoofdvraag van deze studie luidt of de 16 nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West de concentraties van luchtverontreinigende stoffen in de directe omgeving negatief kunnen beïnvloeden. Dit zou kunnen gebeuren wanneer de rookpluimen vanuit (hoge) schoorstenen in de Eemshaven bij noordoosten tot zuidwesten windrichting richting te windturbines waaien en in het zog achter de turbines terecht komen. De berekeningen met het STACKS rekenmodel wijzen uit dat de 16 nieuwe turbines geen invloed hebben (< 0,01 µg/m<sup>3</sup>) op de jaargemiddelde concentratieniveaus op leefniveau voor stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>), fijnstof (PM10) en benzeen.

Er is wel een klein effect berekend op de concentratieniveaus ten gevolge van de 115 bestaande/vergunde windturbines in en rondom de Eemshaven; voor een gebied van circa 20 km<sup>2</sup> zijn de jaargemiddelde NO<sub>2</sub> concentraties daardoor met 0,01 tot 0,05 µg/m<sup>3</sup> verhoogd. Deze toename is echter zeer beperkt en ligt ruim onder de 'in betekende mate' grens van 1,2 µg/m<sup>3</sup>. De 16 nieuwe turbines van windpark Eemshaven-West fase 1 voegen daar verder geen verslechterend effect aan toe. In het studiegebied liggen de concentratieniveaus overal ruim onder de wettelijke grenswaarden.

## 6 Referenties

- Stidworthy, D. Carruthers, J. Hunt, 2011. CERC activities under the TOPFARM project: Wind turbine wake modelling using ADMS
- Timothy M. Fletcher and Richard E. Brown, 2010. Interaction of an Eulerian Flue Gas Plume with Wind Turbines. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 - 7 January 2010, Orlando, Florida
- DNVGL, 2017. Interaction of stacks-plumes with wind turbines, CELSE - Centrais Elétricas de Sergipe S.A. Brasil. Proj.no: 10073298
- Erbrink, J.J. 2019. Effect windturbines op de luchtkwaliteit in en rond Beerse. Rapport 2019R001, 28 januari 2019
- Erbrink, J.J. en Verhees, L., 2012. Enhanced dispersion from tall stacks in the vicinity of modern wind mills. In: Air Pollution Modelling and its Application XXII, edited by Douw G. Steyn, Peter J.H. Builtjes, pp 755-758
- KEMA, 2010. Luchtkwaliteit onderzoek REC Harlingen. Rapport 55106127-TOS/HSM 10-4410
- KEMA, 2008 (J.J. Erbrink en S.M.J. Houben). Interactie tussen windturbines en emissies van Fibroned: effecten op de luchtkwaliteit. Rapportnr. 59751399-TOS/MEC 08-9079
- Erbrink, 2016a. Impact windmolens op verspreiding van luchtverontreiniging Windmolens Spuisluis en de emissies van Tata Steel. Rapport ErbrinkStacks R2016001
- Erbrink, 2016b. Windpark Tata Steel en luchtkwaliteit. Rapport ErbrinkStacks R2016002



**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

**Bijlage 1**

**Kenmerken bestaande turbines  
Eemsgebied**

Kenmerk R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

ID	Type	X-coörd.	Y-coörd.	Ashoogte (m)	Rotor-diameter (m)
1	2B-Energy	248875	608572	105	140
2	Enercon E82 3MW	253831	604981	100	82
3	Enercon E82 3MW	253636	605360	100	82
4	Enercon E82 3MW	253490	605646	100	82
5	Vestas V117-3.45MW	252008	608547	93.5	117
6	Vestas V112-3.3MW	245161	608566	100	90
7	Vestas V112-3.3MW	245463	608501	100	90
8	Vestas V112-3.3MW	245775	608421	100	90
9	Enercon E82 3MW	253662	606943	100	82
10	Enercon E82 3MW	253548	606476	100	82
11	Enercon E82 3MW	254026	607172	100	82
12	Enercon E82 3MW	253954	606875	100	82
13	Enercon E82 3MW	253843	606417	100	82
14	Enercon E82 3MW	253758	606067	100	82
15	Enercon E82 3MW	254272	606915	100	82
16	Enercon E82 3MW	254151	605985	100	82
17	Enercon E82 3MW	253996	605473	100	82
18	Vestas V90 3MW	249556	608833	105	90
19	Vestas V90 3MW	252854	607720	105	90
20	Vestas V90 3MW	248736	607792	105	90
21	Vestas V90 3MW	252144	607675	105	90
22	Vestas V90 3MW	251347	607248	105	90
23	Vestas V90 3MW	251676	607186	105	90
24	Vestas V90 3MW	252006	607106	105	90
25	Vestas V90 3MW	252338	607034	105	90
26	Vestas V90 3MW	249863	608750	105	90
27	Vestas V90 3MW	252652	606888	105	90
28	Vestas V90 3MW	252956	606705	105	90
29	Vestas V90 3MW	250210	608668	105	90
30	Vestas V90 3MW	250551	608586	105	90
31	Vestas V90 3MW	250891	608504	105	90
32	Vestas V90 3MW	251793	607667	105	90
33	Vestas V90 3MW	252220	607986	105	90
34	Vestas V136-3.6MW	251467	607739	140	136
35	Vestas V136-3.6MW	249459	608427	140	136
36	Vestas V117-3.6MW	253794	603479	117	117
37	Lagerwey L136-4.5MW	249631	607787	132	136
38	Lagerwey L136-4.5MW	248340	607818	132	136
39	Lagerwey L136-4.5MW	250680	606491	155	136
40	Lagerwey L136-4.5MW	251196	606296	155	136
41	Lagerwey L136-4.5MW	251688	606042	155	136

Kenmerk R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

ID	Type	X-coörd.	Y-coörd.	Ashoogte (m)	Rotor- diameter (m)
42	Lagerwey L136-4.5MW	252080	605688	155	136
43	Lagerwey L136-4.5MW	252427	605295	155	136
44	Lagerwey L136-4.5MW	251732	604852	155	136
45	Lagerwey L136-4.5MW	249594	606725	155	136
46	Lagerwey L136-4.5MW	250122	606623	155	136
47	Lagerwey L136-4.5MW	251701	606578	155	136
48	Lagerwey L136-4.5MW	252197	606333	155	136
49	Lagerwey L136-4.5MW	252625	606025	155	136
50	Lagerwey L136-4.5MW	251157	606782	155	136
51	Lagerwey L136-4.5MW	247827	606909	155	136
52	Lagerwey L136-4.5MW	248126	607315	155	136
53	Lagerwey L136-4.5MW	248805	607337	155	136
54	Lagerwey L136-4.5MW	248451	606902	155	136
55	Lagerwey L136-4.5MW	249440	607236	155	136
56	Lagerwey L136-4.5MW	249066	606814	155	136
57	Lagerwey L136-4.5MW	250512	607025	155	136
58	Lagerwey L136-4.5MW	249999	607151	155	136
59	Lagerwey L136-4.5MW	252891	605613	155	136
60	Vestas V90 3MW	253864	604596	100	90
61	Vestas V90 3MW	253855	604236	100	90
62	Vestas V90 3MW	253850	603877	100	90
63	Enercon E82 3MW	248142	608104	98	82
64	Enercon E82 3MW	247865	608255	98	82
65	Enercon E82 3MW	247592	608379	98	82
66	Enercon E82 3MW	247311	608501	98	82
67	Enercon E82 3MW	247034	608625	98	82
68	Enercon E82 3MW	246747	608713	98	82
69	Enercon E82 3MW	246447	608805	98	82
70	Enercon E82 3MW	246172	608890	98	82
71	Enercon E82 3MW	245885	608978	98	82
72	Enercon E82 3MW	245590	609026	98	82
73	Enercon E82 3MW	245294	609056	98	82
74	Enercon E82 3MW	246045	608352	98	82
75	Enercon E82 3MW	246336	608279	98	82
76	Enercon E82 3MW	246622	608188	98	82
77	Enercon E82 3MW	246907	608088	98	82
78	Enercon E82 3MW	247190	607981	98	82
79	Enercon E82 3MW	247472	607870	98	82
80	Enercon E82 3MW	249412	608052	98	82
81	Enercon E82 3MW	249023	608155	98	82
82	Enercon E82 3MW	248609	608251	98	82
83	Enercon E82 3MW	249242	608904	98	82



Kenmerk R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

ID	Type	X-coörd.	Y-coörd.	Ashoogte (m)	Rotor- diameter (m)
84	Enercon E82 3MW	250336	609195	98	82
85	Enercon E82 3MW	250665	609061	98	82
86	Enercon E82 3MW	250997	608936	98	82
87	Enercon E82 3MW	251691	608611	98	82
88	Enercon E82 3MW	252326	608422	98	82
89	Enercon E82 3MW	252643	608296	98	82
90	Enercon E82 3MW	252952	608132	98	82
91	Enercon E82 3MW	253251	607912	98	82
92	Enercon E82 3MW	253547	607637	98	82
93	Enercon E82 3MW	253756	607438	98	82
94	Enercon E82 3MW	253425	607194	98	82
95	Enercon E82 3MW	253312	606728	98	82
96	Enercon E82 3MW	253344	605929	98	82
97	Enercon E82 3MW	253172	606215	98	82
98	Enercon E82 3MW	252882	606381	98	82
99	Enercon E82 3MW	252579	606570	98	82
100	Enercon E82 3MW	252263	606722	98	82
101	Enercon E82 3MW	251933	606803	98	82
102	Enercon E82 3MW	251603	606884	98	82
103	Enercon E82 3MW	250916	607049	98	82
104	REpower 6M126	250216	607768	117	126
105	REpower 6M126	250738	607640	117	126
106	EWT DW54/900	251402	603809	40	54
107	Vestas V52-850kW	244561	607278	40	52
108	Vestas V52-850kW	242278	607409	40	52
109	GE 5.5-158	251630	608983	141	158
110	GE 5.5-158	250992	609288	141	158
111	Vestas V136-3.6MW	251582	608193	140	136
112	Lagerwey L136-4.5MW	252819	605227	132	136
113	Lagerwey L136-4.5MW	252538	604846	132	136
114	Lagerwey L136-4.5MW	253250	604530	132	136
115	Lagerwey L136-4.5MW	253410	604258	132	136



**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

**Bijlage 2**

**Details emissiebronnen**

Kenmerk R001-1282197VLU-V01-los-NL

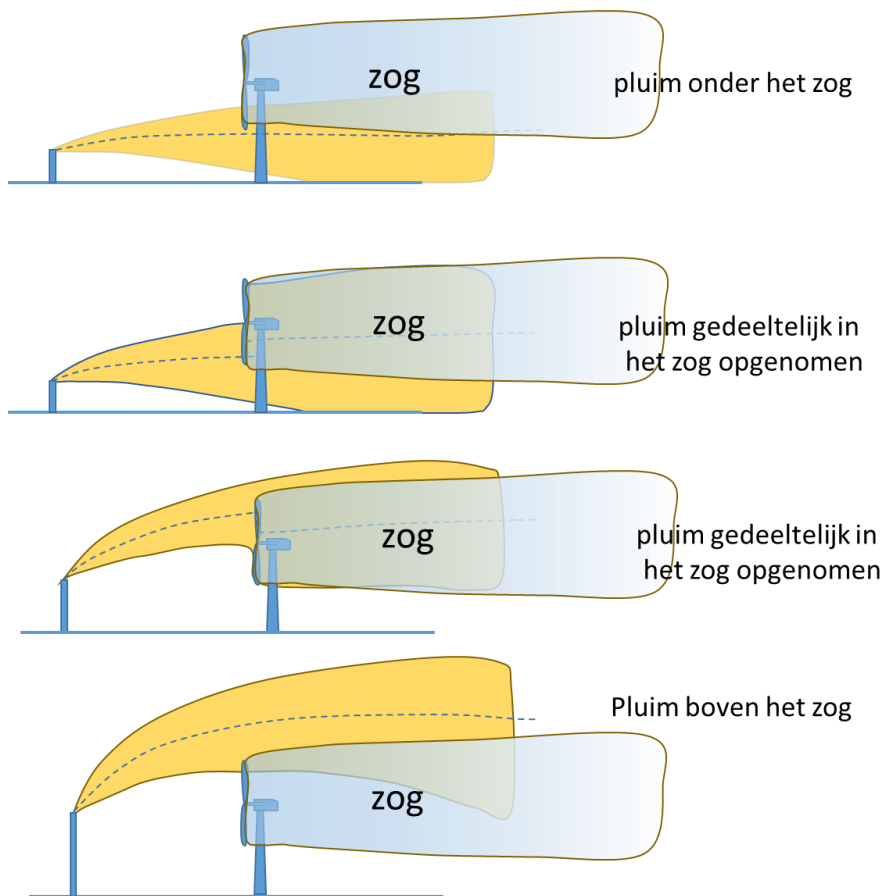
nr.	Bedrijf	omschrijving	X-coörd.	Y-coörd	emissie- hoogte(m)	diameter (m)	Flux (Nm3/s)	rookgas- temp. (K)	bedrijfsuren per jaar	emissie		
										NO2 (ton/jaar)	PM10 (ton/jaar)	benzeen (kg/jaar)
1	RWE	RWE, inst A	252976	607213	120	8	650	320	8760	1029.65	51.40	0.00
2	RWE	RWE, inst B	252980	607235	120	8	650	320	8760	1029.65	51.40	0.00
3	RWE	RWE, Biomassa opslag 1	252866	607287	20	1.2	0.92	285	8760	0.00	0.88	0.00
4	RWE	RWE, Biomassa opslag 2	252890	607281	20	1.2	0.92	285	8760	0.00	0.88	0.00
5	RWE	RWE, kolenschip	252335	607143	10	1	1.31	285	8760	0.00	0.88	0.00
6	Theo Pouw	6. 21	251859	607047	45	2	13	285	8000	22.56	1.50	3.46
7	Theo Pouw	7. 9	251208	607147	1.5	0.2	0.1	285	2500	30.00	0.87	0.00
8	Theo Pouw	8. 6	251533	607051	1.5	0.2	0.1	285	1000	0.35	0.10	0.00
9	Theo Pouw	9. 7	251468	607068	1.5	0.2	0.1	285	3500	0.37	0.28	0.00
10	Theo Pouw	10. 8	251399	607231	1.5	0.2	0.1	285	4000	0.32	0.05	0.00
11	Theo Pouw	11. 10	251642	607171	1.5	0.2	0.1	285	4000	0.05	0.05	0.00
12	Theo Pouw	12. 11	251612	607175	1.5	0.2	0.1	285	4000	0.05	0.05	0.00
13	Theo Pouw	13. 12	251956	607001	1.5	0.2	0.1	285	4000	0.05	0.05	0.00
14	Theo Pouw	14. 13	251679	606984	1.5	0.2	0.1	285	4000	0.05	0.40	0.00
15	Theo Pouw	15. 15	251650	607297	1.5	0.2	0.1	285	4000	0.40	0.01	0.00
16	Theo Pouw	16. 16	251659	607334	1.5	0.2	0.1	285	2000	0.01	0.01	0.00
17	Theo Pouw	17. 16	251301	607476	1.5	0.2	0.1	285	2000	0.01	0.01	0.00
18	Theo Pouw	18. 16	251411	607423	1.5	0.2	0.1	285	2000	0.01	0.01	0.00
19	Theo Pouw	19. 16	251506	607384	1.5	0.2	0.1	285	2000	0.01	0.01	0.00
20	Theo Pouw	20. 16	251600	607354	1.5	0.2	0.1	285	2000	0.01	0.01	0.00
21	Theo Pouw	21. 14	250991	607164	1.5	0.2	0.1	285	4000	0.01	0.01	0.00
22	Vattenfal	Vattenfal Steg 1	252389	608060	85	8	412	385	8760	666.67	0.00	0.00
23	Vattenfal	Vattenfal Steg 2	252464	608042	85	8	412	385	8760	666.67	0.00	0.00
24	Vattenfal	Vattenfal Steg 3	252539	608025	85	8	412	385	8760	666.67	0.00	0.00
25	Engie	Steg 3	254165	606425	65	8	590	355	8760	1344.22	0.00	0.00
26	Engie	Steg 4	254155	606393	65	8	590	355	8760	1344.22	0.00	0.00
27	Engie	Steg 5	254145	606360	65	8	590	355	8760	1344.22	0.00	0.00
28	Engie	Steg 6	254136	606328	65	8	590	355	8760	1344.22	0.00	0.00
29	Engie	Steg 7	254126	606294	65	8	590	355	8760	1344.22	0.00	0.00
30	Engie	EC 20	254273	606612	128	9	100	808	2500	929.97	0.00	0.00
38	VOPAK	1. Tank_1	249272	607797	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
39	VOPAK	2. Tank_2	249300	607718	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
40	VOPAK	3. Tank_3	249197	607815	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
41	VOPAK	4. Tank_4	249227	607736	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
42	VOPAK	5. Tank_5	249152	607754	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
43	VOPAK	6. Tank_6	249102	607964	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
44	VOPAK	7. Tank_7	248984	607921	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
45	VOPAK	8. Tank_8	249057	607903	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
46	VOPAK	9. Tank_9	248938	607858	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
47	VOPAK	10. Tank_10	249013	607841	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
48	VOPAK	11. Tank_11	249028	607982	22	2.99	17.3	285	8760	0.00	0.00	0.95
49	VOPAK	47. Lichter	249912	608227	5	0.5	2	285	690	0.05	0.06	0.00
50	VOPAK	48. zeeschip	249858	608240	15	1	7.9	285	414	0.52	0.07	0.33
51	VOPAK	51. pigging	249096	607796	22	0.5	0.1	285	36	0.00	0.00	0.00
52	VOPAK	49. pompplateau 1	249100	607810	4	2	0.1	285	8760	0.00	0.00	5.99
53	Holland Malt	Stookinstallatie mouterij	250726	608386	50	1	6.81	423	6570	11.35	0.00	0
54	Holland Malt	Stookinstallatie mouterij	250694	608270	50	1	6.81	423	6570	11.35	0.00	0
55	Holland Malt	stoffilter	250775	608245	15	0.7	2.2	300	4380	0.00	0.87	0
56	Holland Malt	stoffilter	250798	608258	50	0.7	2.2	300	4380	0.00	0.52	0
<b>TOTAAL</b>										<b>11787.9</b>	<b>110.4</b>	<b>20.2</b>

## **Bijlage 3**

## **Beschrijving combinatie zogmodel en pluimverspreiding**

**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

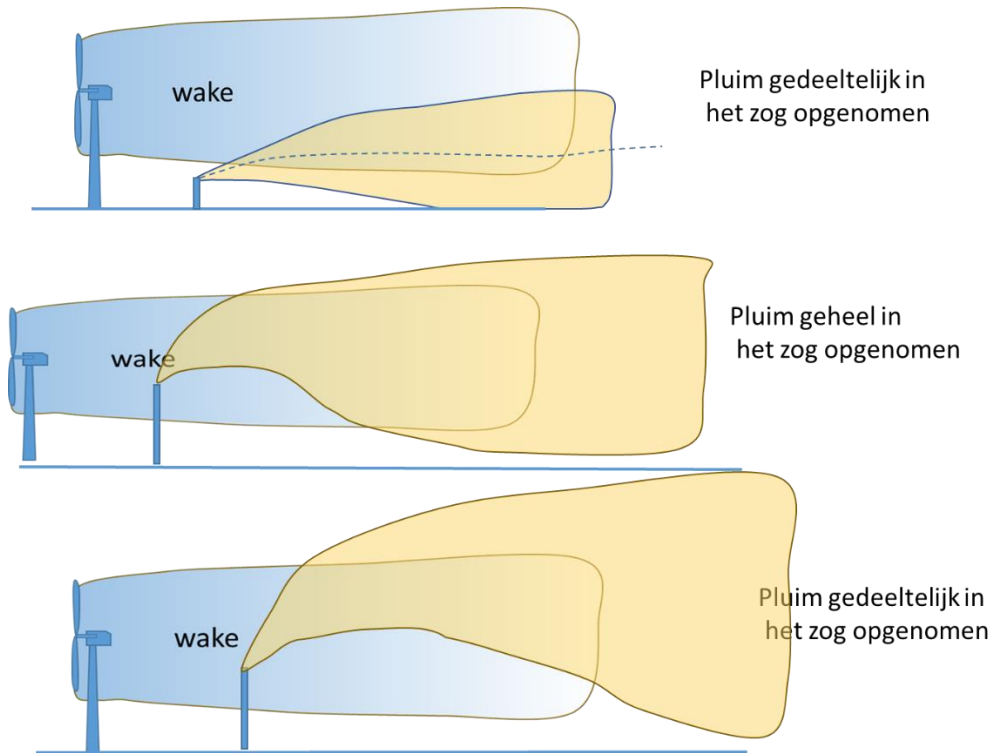
Het zogmodel wordt geparametriseerd met dezelfde wind- en turbulentieparameters als gedaan wordt bij de pluimverspreiding in het Gaussische STACKS model. Dit maakt het eenvoudig om de pluimafmetingen en dispersieparameters aan te passen aan de zogafmetingen en turbulentie-intensiteit. Dit kan voor alle situaties met verschillende schoorsteenhoogtes en turbine-ashoogtes. Om zo realistisch mogelijk te modelleren, onderscheiden we verschillende situaties. We onderscheiden twee hoofdsituaties: de pluim is bovenwinds of benedenwinds van de windmolen, zie figuur B3.1 en B3.2.



*Figuur B3.1 De schoorsteen is bovenwinds van de windturbine en de pluim wordt geheel of gedeeltelijk ingevangen in het zog*

De pluim kan onder het zog of boven het zog worden getransporteerd. De bovenwindse pluim kan geheel of gedeeltelijk in het zog worden ingevangen. Als de pluim benedenwinds is, is het zo dat pluimverspreiding plaatsvindt met een lagere windsnelheid en met hogere turbulentie in het zog. Evenzo kan de pluim *geheel of gedeeltelijk* in het zog worden ingevangen.

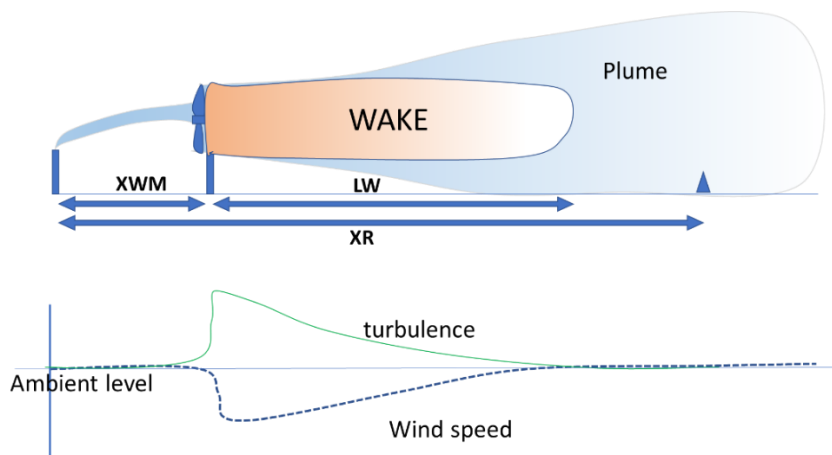
Kenmerk R001-1282197VLU-V01-Ios-NL



Figuur B3.2 De windturbine is bovenwinds van de schoorsteen en de pluim wordt geheel of gedeeltelijk ingevangen in het zog (engels: 'wake')

Voorts wordt er geïnterpoleerd voor allerlei tussenliggende situaties: pluim bevindt zich ergens achter het zog, of ergens in het zog en voorts gedeeltelijk boven of onder het zog. Dit is zo gemaakt om de verspreiding zo goed mogelijk te simuleren. De criteria voor gedeeltelijke invang (pluim is bovenwinds van de windturbine) zijn:

- $X_R > X_{WM}$ , d.w.z. de pluim moet de windturbine gepasseerd zijn
- $Pluimas > 1.5 \times \text{top van de rotor}$  en  $< 0.5 \times \text{basis van de rotor}$ , en
- $\sigma_z < \text{rotor diameter}$



Figuur B3.3 Parameters voor het interpolatieschema: schoorsteen bovenwinds



**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

Parameter P zorgt ervoor dat er wordt geïnterpoleerd tussen het condities in het zog (windsnelheid en turbulentie) en de condities in de omgevingslucht:

Als  $X_R < X_{wake}$ :

$$P = [(X_{wake} - X_R) * P_{wake} + (X_R - X_{WM}) * P_a] / L_{wake}$$

Als  $X_R > X_{wake}$ :

$$P = [L_{wake} P_{wake} + (X_R - X_{wake}) * P_a] / (X_R - X_{WM})$$

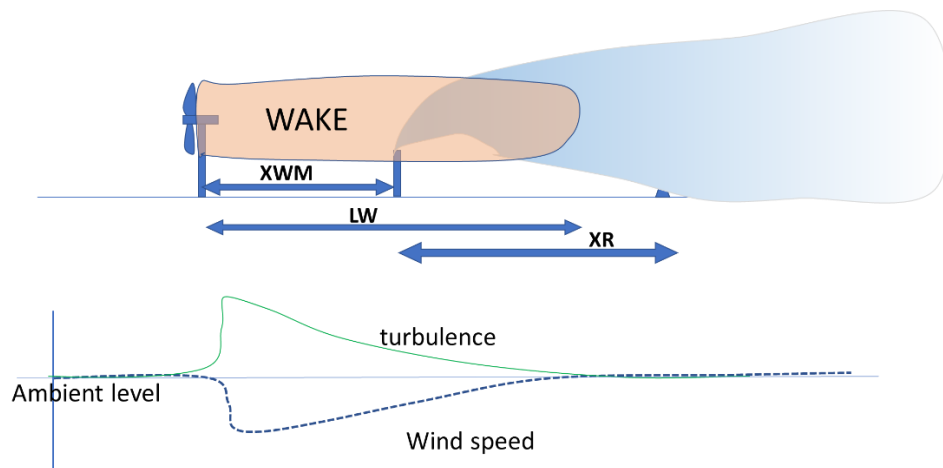
- $X_R$  is de afstand van schoorsteen tot receptor
- $X_{wake}$  is de afstand van schoorsteen tot het einde van het zog
- $X_{WM}$  is de afstand van de schoorsteen tot de windturbine

De verspreidingsparameters worden dus lineair geïnterpoleerd.

Als de windturbine bovenwinds van de schoorsteen staat, wordt de interpolatie-parameter P op de volgende manier bepaald:

Als  $X_R > X_{WAKE}$  schoorsteen in het zog en receptorpunt na (achter) het zog:

$$P = [\{X_R - (L_{wake} - X_{WM})\} * P_a + (L_{wake} - X_{WM}) * P_{wake}] / X_R$$



*Figuur B4.4 Parameters voor het interpolatieschema: schoorsteen benedenwinds*

Als  $X_R < X_{WAKE}$  dus zowel schoorsteen als receptorpunt bevinden zich in het zog. Voor deze situatie worden de zog-waarden voor zowel de positie van het receptorpunt en die van de schoorsteen bepaald en hiervan worden de gemiddelde waarden berekend.

**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

De parameters die voor de bepaling van de zogcondities nodig zijn, worden als volgt berekend. De berekening van de pluimverspreiding wordt bepaald door de turbulentieparameters  $\sigma_v$  en  $\sigma_w$  en de tijdschaal van turbulentie  $T_l$  (zie Erbrink, 1995). In het zog wordt de turbulentie intenser, dus de waarden van  $\sigma_v$  en  $\sigma_w$  worden groter, terwijl de waarde van  $T_l$  juist kleiner wordt (de turbulentie wervels, die voor verspreiding zorgen, worden dan uit elkaar geslagen).

De afmetingen van het zog worden afgeleid van de formules van Taylor (1993, turbulentie en zog afmetingen) en Vermeer (2003, windsnelheid afname).

De formules:

$$\frac{\Delta V}{V_{hub}} = \Delta_s \left( \frac{x_s}{x} \right)^n : \quad \text{afname van de windsnelheid achter de windturbine.}$$

$$\Delta_s = 1 - (1 - C_T)^{\frac{1}{2}} : \quad \text{de initiële windafname, functie van de thrustcoëfficiënt } C_T$$

$$\frac{X_s}{D} = 0.97 \left( \frac{m+1}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \left( \frac{u'_a}{0.51} \right)^2 + \left( \frac{0.22(m-1)^2}{m^2 - 4m + 1} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} : \text{ de zoglengte } x_s$$

$$m = (1 - C_T)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{de axiale inductie factor}$$

$$b = \left( \frac{3.56 C_T}{8 \Delta_s (1 - \Delta_s)} \right)^{0.5} \quad \text{de breedte van het zog (b)}$$

De extra turbulentie als functie van de afstand tot de turbine (x)

$$\Delta I = 1.31 C_T^{0.71} I_a^{0.68} (x/x_s)^{-0.96}$$

$I_a$	de turbulentie intensiteit van de omgevingslucht ( $\sigma_w/u$ )
$\Delta V$	het snelheidsverschil ten opzichte van de ongestoorde situatie
$V_{hub}$	wind op de hoogte (en voor) de turbine as
$D$	wind turbine diameter
$X$	afstand tot de wind turbine
$X_s$	zog lengte
$\Delta_s$	de initiële windafname, functie van de thrustcoëfficiënt $C_T$
$n$	relaxatie constante. $n \approx 1$
$\Delta I$	versterkingsfactor voor de turbulentie parameters $\sigma_v$ en $\sigma_w$

Met gegeven thrustcoëfficiënten  $C_T$  kunnen de breedte van het zog plus de gegenereerde extra turbulentie worden berekend en opgeteld bij de atmosferische turbulentie,  $\sigma_{v,w\_total}^2 = \sigma_{v,w}^2 + \sigma_{v,w\_turbine}^2$  met als turbulentietijdschaal  $T_L = 0.15b - 0.08$  in het zog.

**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

Hiermee worden de waarden van  $\sigma_y$  en  $\sigma_z$  in het zog berekend. De pluimhoogte in het zog wordt berekend met de gereduceerde windsnelheid, de toegenomen turbulentie parameters en de verlaagde waarde van de turbulentie-tijdschaal  $T_L$  in het zog (voor de downwind situatie). Ook hier wordt de pluimstijging nog steeds incrementeel (stapsgewijs) berekend, zoals ook in het Paarse boekje is aangegeven, dat betekent met hoogtestapjes van 10 m waarbij de omgevingscondities steeds aangepast worden (temperatuur en wind).

Pluimstijging wordt ongewijzigd berekend wanneer de schoorsteen bovenwinds van de windmolen is. In het algemeen resulteert dit model in een versterkte verspreiding wanneer de pluim bovenwinds van de windmolen is en veel minder veranderde verspreiding wanneer de schoorsteen in het zog wordt geplaatst (pluim is benedenwinds van de windmolen).

In het geval dat de schoorsteen zich buiten het zog bevindt, vindt er geen interactie plaats: de pluimverspreiding wordt op de reguliere manier berekend. In de versie van het model die in deze studie is gebruikt, wordt de lengte van de zog  $X_s$  driemaal de waarde genomen die verkregen werd door de bovenstaande formulering, dit is gedaan om de zoglengte in overeenstemming te brengen met literatuurgegevens.

Merk op dat met toenemende windsnelheid de waarde van  $c_T$  afneemt. Dit resulteert in kleinere waarden van  $m$  en dus een kortere zoglengte. Dit wordt veroorzaakt doordat het verschil tussen de omgevingswindsnelheid en de windsnelheid in het zog dan kleiner is.

Ten slotte moet hier een korte opmerking worden gemaakt naar aanleiding van enkele foto's gemaakt door vliegtuigen, die (veel) lange zichtbare zoglengtes van windturbines laten zien, zoals in figuur B3.5.



*Figuur B3.5 In stabiele condities boven zee is het zog van windturbines in bijzondere omstandigheden goed zichtbaar*

**Kenmerk** R001-1282197VLU-V01-Ios-NL

In een analyse van Charlotte B. Hasager et al. (2017) concluderen de auteurs dat door een uitzonderlijk geval van koudwater-advectie-mist en stabiele omstandigheden het zog over een lange afstand zichtbaar is. Door de stabiele gelaagdheid is het zog van de turbines lang en smal met een glad uiterlijk. De mist in het nabije zog wordt veroorzaakt door opwaarts bewegende luchtpakketjes uit de ondiepe mistlaag; de lucht bereikt de dauwpunttemperatuur in de onderste delen van het zog van het windpark, waardoor er mist ontstaat in een kegelvormige zogstructuur, die met de wind mee wegwaait van de turbines.

Boven land is van veel hogere ruweidslengte sprake, wat resulteert in meer mechanische turbulentie door het proces van wrijving over land. De lengte van het zog boven land zal in het algemeen veel korter zijn, ook omdat opwaartse en neerwaartse stromingen in niet-stabiele omstandigheden snel de zogturbulentie zullen gaan domineren.

Dit wordt ook nog geïllustreerd door een studie naar verticale windprofielen benedenwinds van windturbines. In een artikel van Yu-Ting Wu en Fernando Porté-Agel (2012) wordt het effect van de oppervlakterutheid bestudeerd met LES (large eddy's simulatie). De afstand vanaf de windturbine waar de windsnelheidsafname tot nul is gedaald, wordt snel korter naarmate de ruweidslengte toeneemt. Op een afstand van 15 keer de diameter van de windturbine is het zog verdwenen. De auteurs concluderen: "Een hogere rutheid geeft hogere turbulentie intensiteiten. Deze leiden tot hogere turbulentieniveaus die ook het zog binnendringen en dus tot een snellere overgang van zog-condities naar 'normale' omgevingscondities dan bij de veel minder turbulente stromingen over de gladdere (zee) oppervlakken".

#### *Referenties bij Bijlage 3*

- L.J. Vermeer et al, 2003. Wind turbine wake aerodynamics, *Progress in Aerospace Sciences* 39 (2003) 467-510, Pergamon, 2003.
- Erbrink, 1995. Turbulent Diffusion from Tall Stacks. The use of advanced boundary layer meteorological parameters in the Gaussian dispersion model "STACKS", PhD Thesis, April 1995, 228 pp.
- Taylor, G.J., 1993. Development of an improved eddy viscosity model of a wind turbine wake. Report prepared by TNO, CEC project JOUR-0087, June 1993.
- Charlotte Bay Hasager, Nicolai Gayle Nygaard, Patrick J. H. Volker, Ioanna Karagali, Søren Juhl Andersen and Jake Badger, 2017. Wind Farm Wake: The 2016 Horns Rev Photo Case. *Energies* 2017, 10, 317; doi:10.3390/en10030317.
- Yu-Ting Wu and Fernando Porté-Agel (2012). Atmospheric Turbulence Effects on Wind-Turbine Wakes: An LES Study. *Energies* 2012, 5, 5340-5362.