



Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

www.tno.nl

T 055 549 34 93

F 055 549 32 01

TNO-rapport

R&I-A R 2005/067

**Windtunnelonderzoek naar het effect van
horizontale as windturbines op een geluidswal
op de lokale NO₂ en PM₁₀ concentraties**

Datum	Maart 2005
Auteurs	G.Th. Visser J.H. Weststrate
Projectnummer	35991
Trefwoorden	-
Bestemd voor	Gemeente Barendrecht t.a.v. de heer H.C. Groeneveld Postbus 501 2991 AA Barendrecht

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Samenvatting

In opdracht van de Gemeente Barendrecht heeft TNO R&I in Apeldoorn een wind-tunnelonderzoek uitgevoerd naar het effect van horizontale as windturbines op een 10 m hoge geluidswal op de lokale luchtkwaliteit (NO₂-en PM₁₀ concentraties). De concentraties achter een geschematiseerde geluidswal met en zonder windturbines zijn met elkaar vergeleken. Hieruit blijkt dat horizontale as windturbines op een 10 m hoge geluidswal een licht positief effect hebben op de lokale luchtkwaliteit. Deze effecten gelden in principe alleen voor de bij dit onderzoek gehanteerde uitgangspunten.

Notaties

C	concentratie
E	emissie
f	frequentie van voorkomen
K	concentratiecoëfficiënt
L	lengtemaat
Q	bronsterkte
s	schaalfactor
U	windsnelheid
U10	windsnelheid op 10 m hoogte op de meteo locatie
z_0	ruwheidslengte

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Notaties	3
1. Inleiding	5
2. Methode	6
2.1 Windtunnelmetingen	6
2.1.1 Model	6
2.1.2 Windtunnel	7
2.1.3 Uitvoering	8
2.1.4 Uitwerking	9
2.2 Berekeningen	10
2.2.1 Opzet	10
2.2.2 Meteo	11
2.2.3 Emissieberekeningen	12
2.2.4 Omzetting van NO _x in NO ₂ en jaargemiddelde concentratie per receptorpunt	12
2.2.5 Achtergrondconcentratieniveaus	13
3. Beoordeling	14
4. Resultaten berekeningen	15
5. Conclusies	17
6. Referenties	18
7. Verantwoording	19

1. Inleiding

Langs de A15 bij Barendrecht is een circa 10 m hoge geluidswal geprojecteerd. De achterliggende woonwijk Carnisselande wordt hiermee afgeschermd tegen (geluids)emissies van het wegverkeer. Er wordt overwogen om op de geluidswal horizontale as windturbines te plaatsen, met als doel het opwekken van energie én het verbeteren van leef- en luchtkwaliteit in de wijk Carnisselande.

Door middel van onderzoek aan een schaalmodel in de windtunnel kan nagegaan worden welk effect horizontale as windturbines hebben op de lokale luchtkwaliteit (jaargemiddelde NO₂- en PM₁₀ concentraties).

In opdracht van de Gemeente Barendrecht heeft de Business Unit Milieu en Leefomgeving van TNO R&I in Apeldoorn daarom een windtunnelonderzoek uitgevoerd aan een sterk geschematiseerde situatie, met als doel na te gaan wat het effect zou kunnen zijn van horizontale as windturbines op een 10 m hoge geluidswal op de lokale luchtkwaliteit.

Het onderzoek is uitgevoerd in twee stappen:

A. Windtunnelmetingen:

Met behulp van metingen aan een schaalmodel in de windtunnel zijn concentratiecoëfficiënten bepaald voor een dwarsprofiel (een aantal receptorpunten loodrecht op de weg).

B. Berekeningen:

De concentratiecoëfficiënten zijn gebruikt voor het berekenen van de jaargemiddelde NO₂- en fijn stofconcentraties.

In dit rapport worden de resultaten van het onderzoek beschreven. De onderzoeksmethode wordt geschetst in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 3 wordt aangegeven hoe de metingen beoordeeld worden. De resultaten van de windtunnelmetingen worden beschreven in hoofdstuk 4. Het rapport wordt besloten met conclusies (hoofdstuk 5).

2. Methode

Het onderzoek is uitgevoerd in twee stappen:

1. Windtunnelmetingen naar de atmosferische verspreiding.
2. Berekening jaargemiddelde NO₂- en PM₁₀ concentraties.

Beide stappen zullen worden toegelicht.

2.1 Windtunnelmetingen

2.1.1 Model

Het doel van het onderzoek was om inzicht te krijgen in het effect van horizontale as windturbines op een geluidswal op de luchtkwaliteit in de directe omgeving van een autosnelweg. De absolute NO₂ en PM₁₀ concentraties in de omgeving waren niet van belang. In overleg met de Gemeente Barendrecht is daarom besloten geen specifiek omgevingsmodel van Carnisselande, de A15 en de geluidswal te maken, maar gebruik te maken van een al bij TNO aanwezig vrij veld model van een autosnelweg op een schaal van 1:250. Aan één kant van de autosnelweg is een eenvoudige geluidswal van 10 m hoog geplaatst. In werkelijkheid is de geluidswal qua vormgeving en hoogteverdeling veel complexer. De gemiddelde hoogte is echter circa 10 m.

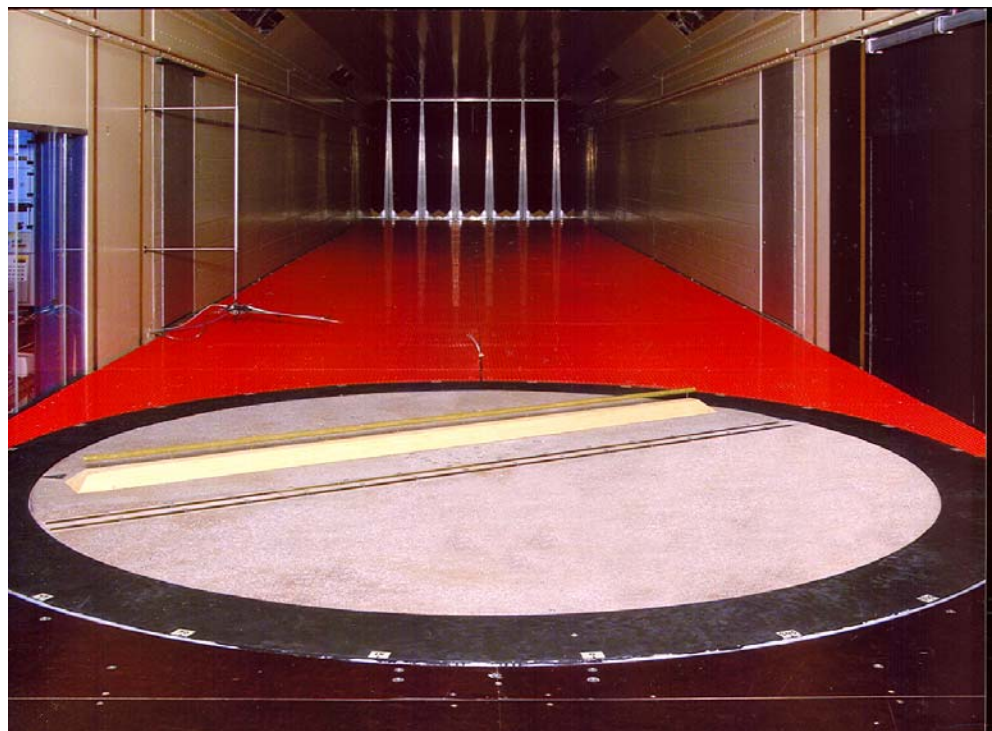
In het onderzoek zijn wel de ligging van de A15, de verkeerskenmerken van de A15 en de achtergrondconcentraties ter plaatse van Carnisselande betrokken. Er is uitgegaan van een windtunnelmodel op schaal 1:250. Het model van de geluidswal en de horizontale as windturbines is gemaakt op basis van door de Gemeente Barendrecht ter beschikking gestelde informatie met betrekking tot de geluidswal en de afstand tot de weg (Groeneveld, 2005) en de horizontale as windturbines (Leenknecht, 2005).

De uitgangspunten voor het model en de metingen worden hieronder gegeven.

- wal 10 m hoog; voetmaat 34 m; lengte 500 m;
- afstand voet wal tot wegrand: 48,5 m (de afstand voet wal-rand weg is 45-65 m; Groeneveld, 2005);
- ashoogte horizontale as rotor: 8 m;
- rotor diameter windturbines: 4 m;
- lengte windturbines: over de volledige lengte van de geluidswal.

De horizontale as windturbines zijn statisch, volgens een door TNO vaker toegepaste methode gemodelleerd. Het zog van de statische rotoren komt hierbij bij benadering overeenkomt met dat achter draaiende rotoren.

Figuur 1 laat het geschematiseerde model zien in de windtunnel van TNO.



Figuur 1 Het model van de gemodelleerde geluidswal met gesimuleerde horizontale as windturbines in de windtunnel van TNO Apeldoorn (schaal 1:250).

2.1.2 Windtunnel

Het onderzoek is uitgevoerd in de atmosferische grenslaagwindtunnel van TNO R&I te Apeldoorn. De doorsnede van deze windtunnel is $2 \times 3 \text{ m}^2$. De diameter van de draaischijf is 2,3 m.

Om uit modelonderzoek naar de werkelijkheid overdraagbare resultaten te krijgen dient:

1. het betreffende gebouw of complex geometrisch juist geschaald te worden,
2. de omringende bebouwing schematisch mee gemodelleerd te worden,
3. de eigenschappen van de aankomende wind op schaal gemodelleerd te worden.

De werkelijke situatie bij de A15 langs Barendrecht ter plaatse van Carnisselande is niet waarheidsgetrouw gemodelleerd. Er is gebruik gemaakt van een geschematiseerd model van de geluidswal, de A15 en de windturbines, op een schaal 1:250. Carnisselande is niet gemodelleerd. De eigenschappen van de aankomende wind zijn gesimuleerd door een voorland toe te passen bestaande uit lego board platen ($z_0 = 0,08 \text{ m}$ op ware grootte). Deze ruwheid komt overeen met die van weiland. De windrichting is bij het onderzoek gevarieerd door het model te draaien. Uit het bovenstaande volgt dat met de gekozen benadering niet de in werkelijkheid te verwachten NO_2 en PM_{10} concentraties in Carnisselande berekend kunnen wor-

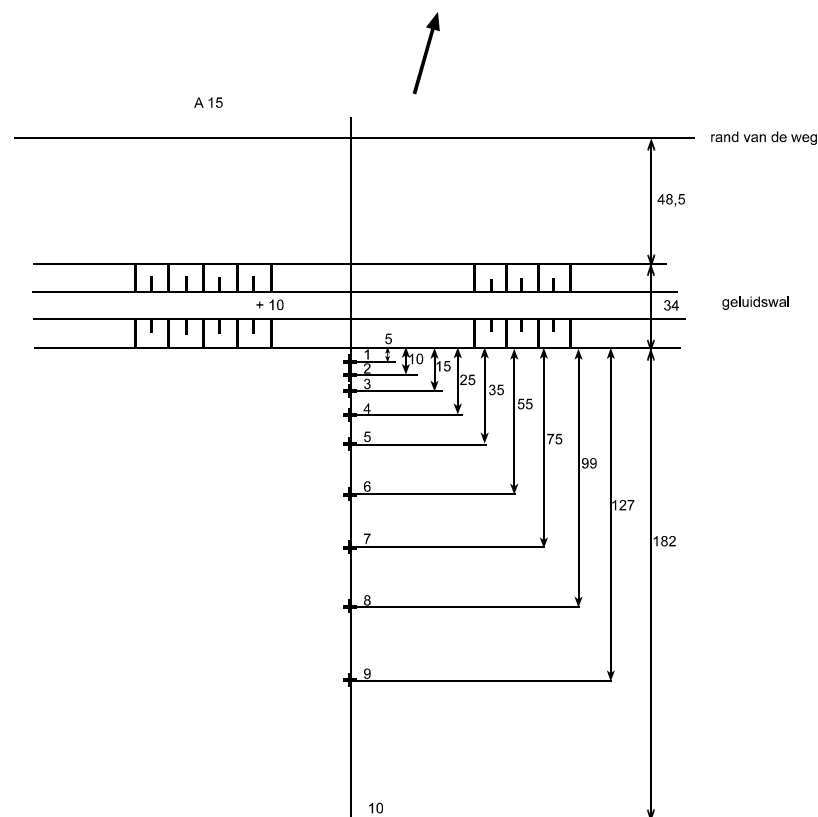
den. De berekende NO_2 en PM_{10} concentraties kunnen dus niet vergeleken worden met grenswaarden.

De resultaten van de metingen dienen relatief beschouwd te worden: het effect van een geluidswal met windturbines ten opzichte van een geluidswal zonder windturbines.

De details van de windtunnel van TNO R&I, alsmede de eigenschappen van de hierin gesimuleerde grenslaagstroming, worden uitgebreid beschreven in het profielenboek van de windtunnel.

2.1.3 Uitvoering

In de windtunnel zijn de eigenschappen van de aankomende wind over weiland gemodelleerd (zie paragraaf 2.1.2). Ook de door het verkeer opgewekte turbulentie is gemodelleerd (Wesseling/Visser, 2003). De emissies van het wegverkeer zijn gesimuleerd door middel van speciaal ontwikkelde lijnbronnen, waar lucht waaraan een tracergas is toegevoegd wordt uitgeblazen. De concentratie van dit tracergas is vervolgens op 10 plaatsen (receptorpunten), van direct achter de geluidswal tot 275 m van de weg op 1,5 m hoogte gemeten. De ligging van de receptorpunten wordt gegeven in figuur 2.



Figuur 2 Ligging receptorpunten.

Er zijn twee configuraties gemeten:

- 1) alleen geluidswal;
- 2) geluidswal voorzien van horizontale as windturbines.

De metingen zijn uitgevoerd voor 12 windrichtingen tussen 0° en 330° in stappen van 30°, bij één windtunnelsnelheid, op een referentiehoogte van 10 cm (25 m) circa 1,5 m stroomopwaarts van de draaischijf. Deze windsnelheid is continu gemeten met behulp van een propeller anemometer. Eventuele afwijkingen in de ingestelde windtunnelsnelheid zijn hier direct mee gecorrigeerd. Voor de omrekening van de windsnelheid op referentiehoogte naar de windsnelheid op 10 m hoogte op een meteolocatie is gebruik gemaakt van de in Vermeulen/Hoofman (1980) beschreven methode.

De gemeten concentraties zijn herleid naar concentratiecoëfficiënten. Hiermee kan in principe voor elke willekeurige windsnelheid de concentratie ter plaatse van een receptorpunt berekend worden.

2.1.4 Uitwerking

Indien de stromingen (en de verspreiding van gassen) bij het model en in de werkelijkheid gelijkvormig zijn, dan kunnen de in de windtunnel bij het model gemeten concentraties herleid worden naar de werkelijke situatie met behulp van de volgende modelregel:

$$\left(\frac{C.U.L^2}{Q} \right)_m = \left(\frac{C.U.L^2}{Q} \right)_{f.s} \quad [1]$$

hierin is:

- C concentratie
- U windsnelheid
- L karakteristieke lengtemaat
- Q bronsterkte

De indices m en f.s staan hier voor respectievelijk model en full-scale.

Voor de windsnelheid is de windsnelheid op 10 m hoogte in een representatief meteostation gekozen, omdat hiervoor statistische windgegevens bekend zijn.

De verhouding tussen de windsnelheid op referentiehoogte in de windtunnel en de windsnelheid op 10 m hoogte op de meteo locatie is berekend met behulp van de door Vermeulen/Hoofman (1980) beschreven koppelingmethode.

Vergelijking [1] kan ook geschreven worden als:

$$\frac{1}{s^2} \left(\frac{C.U10}{Q} \right)_m = \left(\frac{C.U10}{Q} \right)_{f.s} = K \quad [2]$$

hierin is:

- s de schaalfactor (L_{fs}/L_m)
- C concentratie (kg/m^3)
- U10 de windsnelheid op 10 m hoogte op de meteo locatie (m/s)
- Q bronsterkte uitlaatgascomponent (kg/s)
- K concentratiecoëfficiënt (m^{-2})

De concentraties bij het model in de windtunnel (C) zijn gemeten bij de uit de gemeten windsnelheid in de windtunnel bepaalde U10 en bij de in het model ingestelde bronsterkte tracergas (Q). Daarnaast is uiteraard ook de schaalfactor (s) bekend. Hiermee kan voor elk receptorpunt en voor elke windrichting de concentratiecoëfficiënt bepaald worden.

De in werkelijkheid te verwachten concentraties kunnen vervolgens berekend worden met:

$$C = \frac{K \cdot Q}{U10} \quad [3]$$

Hierin is Q de bronsterkte van de beschouwde uitlaatgascomponent. Met behulp van K kan in principe voor elke gewenste windsnelheid de concentratie van de beschouwde uitlaatgascomponent berekend worden.

In dit geval zijn de uitlaatgascomponenten NO_x en fijn stof beschouwd.

2.2 Berekeningen

2.2.1 Opzet

Met behulp van metingen aan het schaalmodel in de windtunnel zijn concentratiecoëfficiënten bepaald, waarmee op ware grootte de bijdrage van het betreffende wegvak aan de NO_x - en PM_{10} concentraties in de omgeving berekend kan worden. De NO_2 -concentratie in de buitenlucht is het gevolg van een interactie tussen de achtergrondconcentratie van ozon (O_3) en stikstofdioxiden (NO en NO_2), de plaatselijke uitstoot van stikstofoxiden ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), in dit geval het verkeer op de A15, en de instraling van zonlicht. Dit proces laat zich in de windtunnel zeer slecht nabootsen. De NO_2 -concentraties in de omgeving zijn daarom berekend met behulp van de NO_2 -module van het TNO-verspreidingsmodel voor wegverkeersmissies. Hierbij is met betrekking tot de lokale achtergrondconcentraties van O_3 en NO_2 gebruik gemaakt van een achtergrondconcentratiewindroos voor Zuid-Holland, die is geschaald naar de in 2010 volgens het RIVM verwachte achtergrondconcentratie.

Met behulp van de emissie van het wegverkeer, de langjarige windsnelheid- en windrichtingstatistiek voor Zuid-Holland zijn de jaargemiddelde NO_x en PM_{10}

concentraties uit de concentratiecoëfficiënten berekend. Voor het berekenen van de jaargemiddelde NO₂-concentraties uit de concentratiecoëfficiënten wordt tevens de NO₂-module van het TNO-verspreidingsmodel voor wegverkeeremissies toegepast. De hierboven beschreven methode biedt de mogelijkheid om de concentraties op basis van de emissies te schalen. Dit betekent dat indien de verkeersprognoses wijzigen of emissiereducerende maatregelen worden getroffen de windtunnelmetingen niet opnieuw uitgevoerd hoeven worden, maar dat dan volstaan, kan worden met het herberekenen van de concentraties. Voor NO₂ is de mate van omzetting afhankelijk van de hoogte van de bijdrage en derhalve niet lineair.

Voor het bepalen van NO₂- en PM₁₀ concentraties (inclusief achtergrondconcentraties) uit de in de windtunnel gemeten concentratiecoëfficiënten kunnen de volgende stappen onderscheiden worden:

- het in rekening brengen van de NO_x- en PM₁₀ voertuigemissie op de A15;
- het in rekening brengen van de windsnelheid (12 windrichtingen);
- het (per receptorpunt) omzetten van de NO-concentratie in NO₂ (12 windrichtingen);
- het in rekening brengen van de achtergrondconcentratie.

2.2.2 Meteo

De essentie van de berekening van de (bijdrage)concentratie ten gevolge van de wegverkeeremissies wordt in onderstaande vergelijking weergegeven:

$$\Delta C = K \times E (f_{1,45}/u_{1,45} + f_4/u_4 + f_8/u_8)$$

waarin:

ΔC	de bijdrage van het wegverkeer aan de NO _x - of PM ₁₀ -concentratie in één windrichting;
K	concentratiecoëfficiënt (windtunnelonderzoek);
E	NO _x - of PM ₁₀ bronsterkte (ter onderscheiding van de Q voor de windtunnel bronsterkte);
$f_{1,45}, f_4, f_8$	frequentie van voorkomen van de onderscheiden windsnelheidsklassen per windrichting;
$u_{1,45}, u_4$ en u_8	karakteristieke windsnelheden voor de onderscheiden windsnelheidsklassen (1.45, 4 resp. 8 m/s).

Voor de meteorologie is gebruik gemaakt van meteo gegevens voor Zuid-Holland. Deze meerjarige gegevens hebben betrekking op de periode van 1949-1970 (Commissie voor het onderzoek ten dienste van het Milieubeheer, 1976). Deze data set is onderdeel van het (oude) Nationale model (consensusmodel) voor het berekenen van de luchtkwaliteit ten gevolge van puntbronnen in het westelijke en noordwestelijk deel van Nederland. De data set onderscheidt drie windsnelheidsklassen, met de klassenmiddens van 1,45 m/sec, 4 m/sec en 8 m/sec. Voor elk van deze klassen

bevat de meteo dataset (voor twaalf windrichtingen) de frequentie van voorkomen ($f_{1,45}$, f_4 en f_8).

Op basis van bovenstaande vergelijking is de uit de windtunnelmetingen afgeleide concentratiecoëfficiënt gewogen naar de drie windsnelheidsklassen en frequentie van voorkomen van deze windsnelheidsklassen.

2.2.3 Emissieberekeningen

Met behulp van de door het RIVM opgestelde prognoses voor de emissiefactoren voor de verschillende voertuigtypen, brandstofsoorten en gemiddelde snelheden is voor de A15 een emissiesterke berekend. Bij de verwerking van het windtunnelonderzoek is uitgegaan van de gegevens met betrekking tot de verkeerssamenstelling en intensiteiten zoals aangeleverd door de opdrachtgever. Bij de berekeningen is uitgegaan van 142.700 voertuigen per etmaal, waaronder 7,3% middelzwaar en 14,6% zwaar vrachtverkeer.

Voor het berekenen van de NO_x -en PM_{10} -emissie is gebruik gemaakt van de emissiefactoren (zie Tabel 1) die door het RIVM in het kader van de Uitwerkingsnotitie Referentie Raming (UNRR) 2004 zijn ontwikkeld.

Tabel 1 NO_x - en PM_{10} emissiefactoren (UNRR 2010) [g/km].

Voertuigcategorie	Rijsnelheid [km/uur]	NO_x	Fijn stof
Personenauto's	100	0,25	0,033
Middelzware vrachtwagens	80	4,37	0,13
Zware vrachtwagens	80	5,49	0,159

2.2.4 Omzetting van NO_x in NO_2 en jaargemiddelde concentratie per receptorpunt

De NO_x -(bijdrage)concentratie (som van windtunnelbijdrage en bijdrage berekend met TNO-verspreidingsmodel voor wegverkeeremissies) per windrichting, wordt op basis van de NO_2 -achtergrondwindroos (per receptorpunt), een percentage direct geëmitteerde NO_2 (aannahme voor wegverkeer: 5%) en de ozon-concentratie per windrichting omgerekend in een NO_2 -(bijdrage)-concentratie per windrichting. Vervolgens wordt de (jaargemiddelde) NO_2 -verkeersbijdrage op basis van de frequentie van voorkomen van een bepaalde windrichting berekend. Ten slotte worden verkeersbijdrage en achtergrondconcentratie gesommeerd.

2.2.5 Achtergrondconcentratieniveaus

Voor het berekenen van de totale concentratie zijn de bijdrage van het wegverkeer en de achtergrondconcentratie gecombineerd. De achtergrondconcentraties betreffende NO₂ en PM₁₀ zijn ontleend aan de toekomstprognose van het RIVM volgens UNRR (versie 2004). De gehanteerde NO₂- en PM₁₀-achtergrondconcentraties worden weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 *Representatieve jaargemiddelde (Referentieraming) achtergrondconcentraties voor het studiegebied [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].*

Stof	2010
NO ₂ (jaargemiddelde)	29,5
PM ₁₀ (jaargemiddelde)	31,0

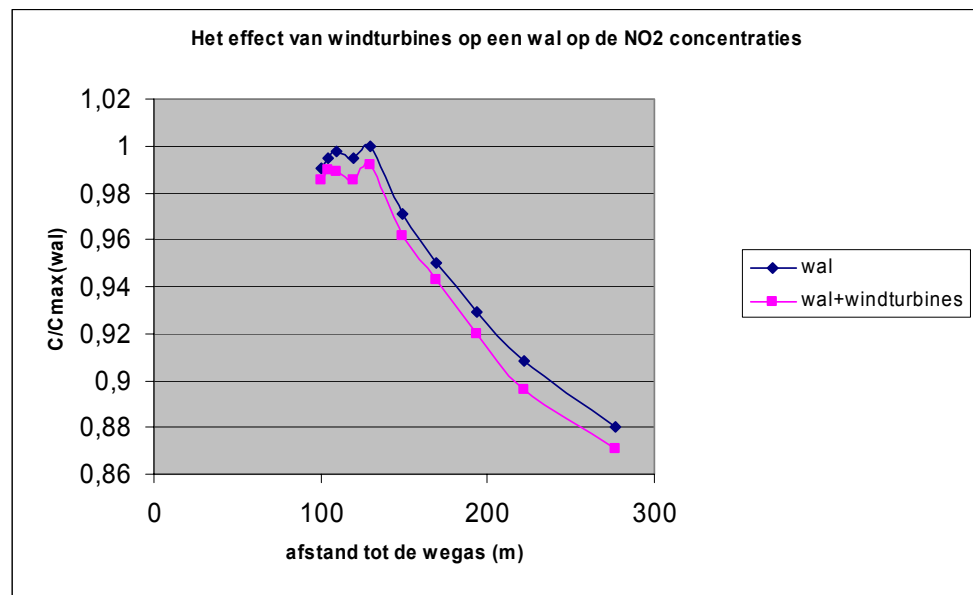
3. Beoordeling

In paragraaf 2.1 is uitgelegd dat de opzet van het onderzoek zodanig is dat de resultaten van de berekeningen niet kunnen resulteren in representatieve NO₂ en PM₁₀ concentraties. De berekende NO₂ en PM₁₀ concentraties kunnen daarom niet getoetst worden aan de luchtkwaliteitsnormen. De resultaten van de metingen zonder en met horizontale as windturbines op een geluidswal kunnen alleen relatief ten opzichte van elkaar beschouwd worden. De metingen met geluidswal, maar zonder windturbines, zijn hierbij de referentie. De metingen met geluidswal en windturbines zijn hiermee vergeleken.

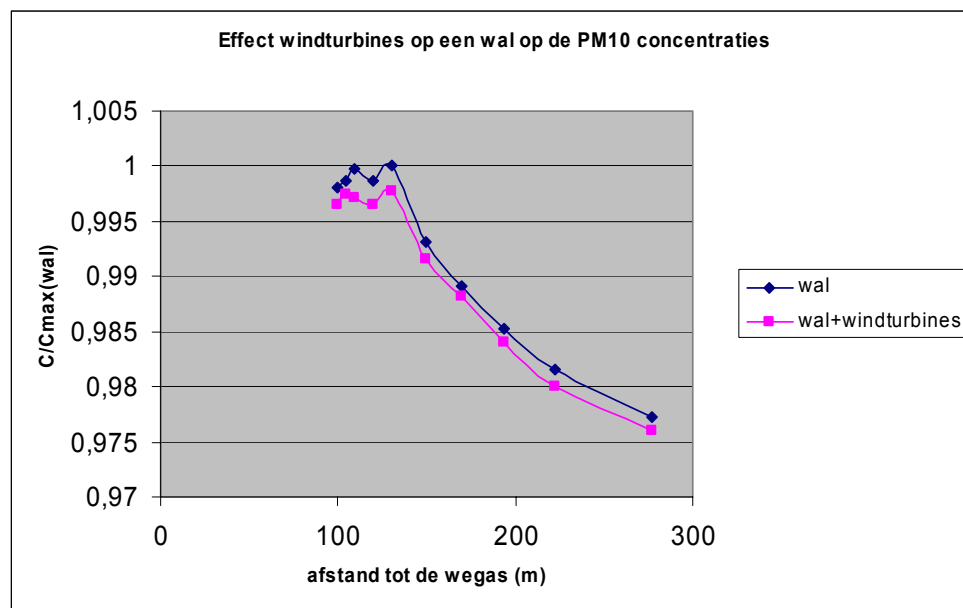
De uit de metingen berekende concentraties (C) zijn dimensieloos gemaakt tegen de maximaal gemeten concentratie in de situatie met geluidswal en zonder windturbines; C_{max(wal)}.

4. Resultaten berekeningen

De resultaten van de berekeningen worden gegeven in de figuren 3 en 4. Hieruit blijkt dat in de situatie met horizontale as windturbines op een geluidswal de NO_2 concentraties heel licht (circa 0,5 tot 1,5%) omlaag gaan ten opzichte van de situatie zonder windturbines. Ter plaatse van de woningen, op circa 250 m van de weg-as, is het (positieve) effect circa 1,5%. Bij PM_{10} zijn de effecten geringer. De eerste 30 m achter de geluidswal (3x de hoogte) blijven de concentraties vrijwel constant, daarna nemen ze snel af.



Figuur 3 Het effect van horizontale as windturbines op een 10 m hoge geluidswal op de NO_2 concentraties.



Figuur 4 Het effect van horizontale as windturbines op een 10 m hoge geluidswal op de PM₁₀ concentraties.

De berekende effecten gelden uiteraard alleen voor de geteste uitgangspunten van de horizontale as windturbines (ashoogte 8 m; rotordiameter 4 m). Bij een andere ashoogte en/of rotordiameter, of een andere afstand van geluidswal tot weg, zouden de effecten anders (kleiner of groter) kunnen zijn.

5. Conclusies

Horizontale as windturbines op een 10 m hoge geluidswal hebben een licht positief effect op de NO₂ en PM₁₀ concentraties achter de geluidswal. De berekende effecten gelden alleen voor de bij dit onderzoek gehanteerde uitgangspunten.

6. Referenties

Commissie voor het onderzoek ten dienste van het Milieubeheer (1976)

Groeneveld, H (2005)

Telefonisch onderhoud 22 februari 2005.

Leenknecht, J (2005)

Gegevens luchtonderzoek windturbines. E-mail 21 januari 2005.

Wesseling, J; Visser, G.Th. (2003)

An intercomparison of the TNO traffic models, field data and wind tunnel measurements.

TNO R 2003/207, mei 2003.

Vermeulen, P.E.J; Hooftman, P (1980).

Methode ter bepaling van het verband tussen de windsnelheid bij een gebouw en de lokale windsnelheden zoals gemeten bij een maquette in de windtunnel.

MT-TNO rapport 80-02760, 1980.

7. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Gemeente Barendrecht
t.a.v. de heer H.C. Groeneveld
Postbus 501
2991 AA Barendrecht

Namen en functies van de projectmedewerkers:

G.Th.Visser	projectleider
J.H. Weststrate	mederwerker
F.C. Balster	meetassistent

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

-

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

Februari – maart 2005

Ondertekening:

Goedgekeurd door:



Ing. G.Th. Visser
Projectleider



Dr. M.P. Keuken
Expertiseteam Milieukwaliteit