

TNO-rapport

Ontwerpwindgegevens voor windturbines in park- of lijnopstelling

Referentienummer 93-189
Dossiernummer 112324-20415
Datum mei 1993
P

Auteur
Ir. F.J. Verheij

ST-Code
C19.3

Trefwoorden
— windenergie
— windparken
— ontwerpwindgegevens

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 partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

In opdracht van
INTRON Energie- en Milieuconsult
Ter attentie van Ir. F.J. Föllings
Postbus 226
3990 GA Houten

Samenvatting

De afdeling Stromingstechniek van het Instituut voor Milieu- en Energietechnologie TNO heeft de methode verbeterd, waarmee ontwerpers de windbelasting ten gevolge van zogeeffecten op stroomafwaartse windturbines kunnen berekenen.

Dit rapport is een op zich zelf staand document; het is norm onafhankelijk. De gebruikte aanpak is conform de overige hoofdstukken van het huidige Handboek Ontwerpwindgegevens windturbines - versie 3. Het kan echter ook worden toegepast in combinatie met andere ontwerpnormen zoals de IEC-code¹⁾.

De gemiddelde en rms-waarde van de windsnelheid in het zog worden met eenvoudige formules beschreven. Het blijkt dat deze grootheden erg gevoelig zijn voor de onderlinge afstand tussen turbines, de weerstandskarakteristiek van de windturbine en het terrein waarin de turbines geplaatst zijn.

De methode is toegepast op de turbines in Nibe en in het windpark Sexbierum. De resultaten komen goed overeen met de metingen.

¹⁾ Safety of Wind Turbine Generator Systems, IEC TC88 (sec) 21A

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
	Lijst van symbolen	4
1	Inleiding	5
2	Implementatie parkeffecten procedure voor het toepassen van de nieuwe methode voor windturbine-ontwerp	6
2.1	Het windveld in park- of lijnopstellingen van windturbines	6
2.2	Het berekenen van een windturbine-zog	9
2.2.1	De indeling van het zog	9
2.2.2	De omvang van het zog	10
2.2.3	De gemiddelde windsnelheid in het zog	12
2.2.4	De turbulentie-intensiteit in het zog	13
3	Gemaakte keuzen voor de nieuwe methode	16
3.1	Enkelvoudig of meervoudig zog	16
3.2	Zogsituaties	16
3.3	Omvang van het zog	17
3.4	Spacing	17
3.5	Vorm van het zog	17
3.6	Windrichtingsverdeling	18
3.7	Gebruikte formules	19
3.8	Beperkingen	20
4	Gevoeligheidsanalyse	21
4.1	Gebruikte invoergegevens	21
4.2	Invloed op de zogontwikkeling	21
4.3	Evaluatie	22
5	Conclusies	24
6	Referenties	25
7	Verantwoording	27

Figuren

Lijst van symbolen

Symbool	Definitie	Eenheid
C_T	thrust coëfficiënt van de windturbine	-
D	rotor diameter van de windturbine	m
H	ashoogte van de windturbine	m
I	turbulentie-intensiteit	-
R	de straal van het zog, ook wel: half-zog breedte	m
r	de afstand tot de hartlijn van het zog	m
U	gemiddelde windsnelheid	m/s
ΔU	windsnelheidsdefect, $\Delta U_{\text{wake}} = U_0 - U_{\text{wake}}$	m/s
X	afstand achter de stroomopwaartse windturbine	m
X_N	near wake length	m
z	hoogte	m
z_0	terreinruwheid, ook wel: ruwheidslengte	m
σ_u	standaarddeviatie van de windsnelheidsfluctuaties	m/s
subscripts:		
cl	centre-line, hartlijn van het zog	
0	in de ongestoorde stroming	
add	toegevoegd (ten gevolge van de zogstroming)	
wake	in de zogstroming:	
1	in de 'potential core' sectie	
2	in de 'near wake' sectie (nabije zog)	
3	in de 'far wake' sectie (verre zog)	
H	op het eind van de 'potential core' sectie	
N	op het eind van de 'near wake' sectie (nabije zog)	
F	op het eind van de 'far wake' sectie (verre zog)	

1 Inleiding

In het huidige Handboek Ontwerpwindgegevens windturbines - versie 3 (HB OWG-3, Verheij e.a. 1991) wordt de invloed van zog- en parkeffecten op stroomafwaarts geplaatste windturbines uitgedrukt in een verandering van de vermoeiingsschade. Deze aanpak is niet conform de overige hoofdstukken en is ook moeilijk te gebruiken in combinatie met andere ontwerpnormen.

NOVEM heeft INTRON Energie- en Milieuconsult, Instituut voor Milieu- en Energietechnologie TNO en ECN Duurzame Energie opdracht gegeven om een update te verzorgen van het huidige Handboek. De projectleiding is handen van eerstgenoemde. Het project heeft tot doel om het commentaar naar aanleiding van opgedane ervaringen te verwerken, een aantal ontbrekende aspecten in te vullen en het onderdeel parkeffecten verder uit te werken.

Het onderdeel parkeffecten bestaat uit de verbetering van de methode, waarmee ontwerpers de windbelasting ten gevolge van parkeffecten kunnen berekenen. De afdeling Stromingstechniek van het Instituut voor Milieu- en Energietechnologie TNO heeft dit projectdeel uitgevoerd.

In een windturbinezog treedt een snelheidsdefect en een toename van de turbulentie-intensiteit op. Hierdoor hebben vlagen een lagere gemiddelde windsnelheid en een relatief hogere amplitude, in vergelijking met ongestoorde aanstroming. Daarnaast is sprake van een extra shear, zowel verticaal als horizontaal (lateraal, dwars op de gemiddelde windrichting). Dit is verwerkt in een nieuwe methode, waarbij de effecten in termen van wind(veld) zijn uitgedrukt.

In dit rapport wordt de nieuwe methode beschreven. De procedure voor het toepassen van de nieuwe methode is in hoofdstuk 2 beschreven. Dit hoofdstuk bevat ook alle benodigde formules en kan los van de rest van het rapport gebruikt worden voor ontwerpdoeleinden. In hoofdstuk 3 worden de gemaakte keuzen, zoals zogvorm en windrichtingsverdeling, toegelicht. De gevoeligheid van de windsnelheidsafname en de toename van de turbulentie-intensiteit voor de spacing, voor de C_T - λ karakteristiek en voor de terreinruwheid z_0 wordt beschreven in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk is tevens een beknopte evaluatie uitgevoerd aan de hand van bekende meetgegevens. De conclusies zijn opgenomen in hoofdstuk 5.

2 Implementatie parkeffecten procedure voor het toepassen van de nieuwe methode voor windturbine-ontwerp

De berekening van parkeffecten ten behoeve van de windbelasting op windturbines in park- of lijnopstellingen, dient eenduidig uitgevoerd te worden. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de nieuwe methode dient te worden toegepast (paragraaf 2.1).

De tekst kan onafhankelijk gebruikt worden in combinatie met andere ontwerpnormen op dit gebied, zoals de IEC-code. Deze tekst zou bijvoorbeeld als volledige vervanging van het huidige hoofdstuk 8 van het Handboek Ontwerpwindgegevens windturbines - versie 3 kunnen dienen.

In paragraaf 2.2 staan de benodigde, bij de nieuwe methode behorende, formules.

2.1 Het windveld in park- of lijnopstellingen van windturbines

Het windveld dat wordt gevoeld door een windturbine in een park is anders dan het windveld gevoeld door een solitair opgestelde windturbine. De invloed van stroomopwaarts geplaatste windturbines op het windveld heeft voornamelijk betrekking op het turbulentie-niveau (wordt hoger) en de gemiddelde windsnelheid (wordt lager). De effecten worden kleiner naarmate de afstand tussen de turbines, de spacing X/D (ook wel: S), groter wordt.

Het blijkt dat, in het algemeen, windturbines op de tweede positie in een park- of lijnopstelling de grootste toename in de vermoeiingsschade ondervinden. In een enkel geval betreft het windturbines op de derde positie. De verschillen met de toename in de vermoeiingsschade van turbines op de tweede positie zijn dan echter gering. De hier beschreven methode beperkt zich tot enkelvoudige zoggen, en is alleen geldig voor $4 < X/D < 10$.

Het berekenen van de zogeffecten gebeurt in 4 stappen.

1. Bepaal de situatie in de ongestoorde stroming

Voor de berekening van de windsnelheid en de turbulentie-intensiteit in het windturbine-zog dienen de formules uit paragraaf 2.2 gebruikt te worden. Als basisgegevens dienen steeds de windsnelheid en de turbulentie-intensiteit in de vrije aanstroming. Dit geldt zowel voor de grootte als voor de kansverdelingen, zoals de Weibull-verdeling voor de gemiddelde windsnelheden.

2. Bepaal de zogsituatie

Er dient onderscheid gemaakt te worden in de volgende drie situaties (voor situatie B, zie ook figuur 2.1):

A. Volledig zog.

De as van de tweede turbine bevindt zich op de hartlijn van het zog. Deze situatie dient te worden toegepast voor de betreffende windrichting ± 7.5 graden;

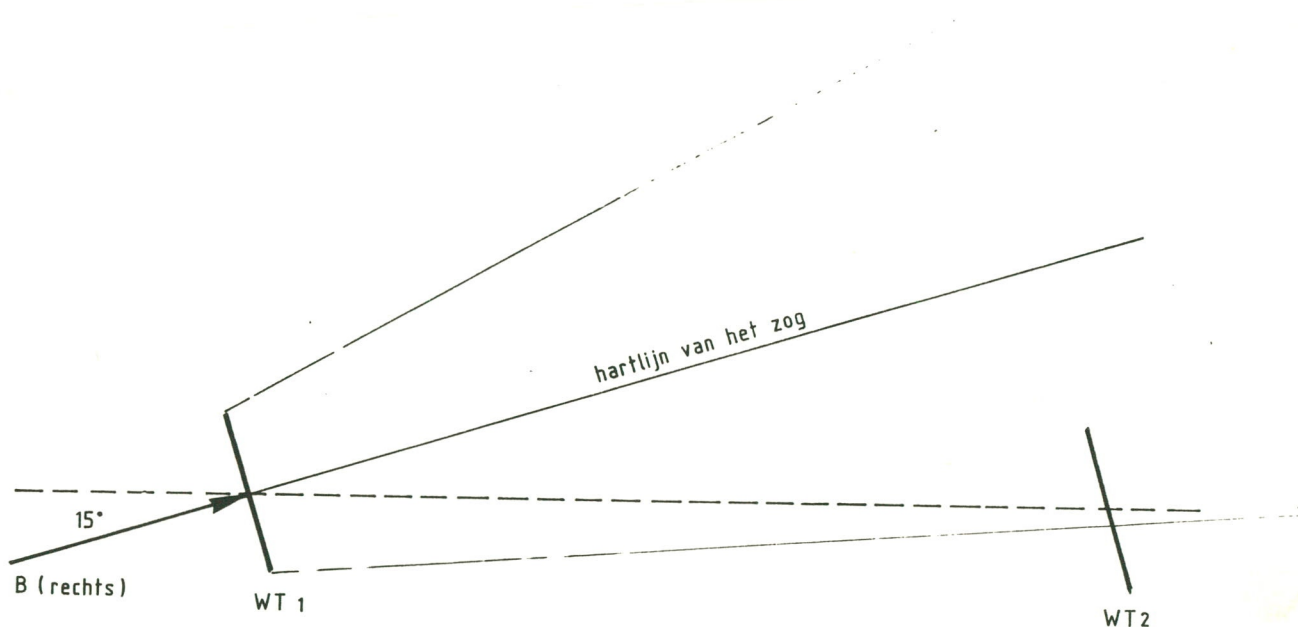
Ontwerpwindgegevens voor windturbines in park- of lijnopstelling

B. Gedeeltelijk zog.

De windrichting is 15 graden verdraaid ten opzichte van de windrichting in situatie A. De as van de tweede turbine bevindt zich dan tussen de hartlijn en de rand van het zog. Deze situatie geldt voor zowel de 'linker-' als de 'rechterhelft' van het zog! Weer dient deze situatie te worden toegepast voor de betreffende windrichting ± 7.5 graden;

C. Vrije aanstroming.

De as van de tweede turbine bevindt zich (vrijwel) buiten het zog. Deze situatie geldt voor alle overige windrichtingen.



Figuur 2.1 De geschematiseerde zogsituatie B ('rechts'). Windturbine WT2 staat gedeeltelijk in het zog van WT1. Situatie B ('links') ontstaat bij een 30 graden hogere windrichting (met de klok meedraaiend), en kan weergegeven worden door de zoglijnen te spiegelen in de verbindingslijn tussen WT1 en WT2.

3. Bereken de kans van voorkomen per zogsituatie

Wat de kans van voorkomen van de windrichtingssectoren betreft, dienen de volgende percentages aangehouden te worden voor de zogsituaties A en B:

- windrichting ligt tussen 195 en 285 graden: kans van voorkomen per 15 graden-sector is 6.5%;
- voor de overige windrichtingen: kans van voorkomen per 15 graden-sector is 3.5%.

De kans van voorkomen van de drie verschillende zogsituaties (volledig, gedeeltelijk en geen zog) wordt daarmee:

A. Volledig zog.

Afhankelijk van de windrichtingssector is de kans van voorkomen 6.5% of 3.5%. Bij lijnopstellingen bestaande uit meer dan 2 turbines, dient de kans van voorkomen van 2 windrichtingssectoren (180 graden ten opzichte van elkaar) opgeteld te worden. Bij parkopstellingen dient de kans van voorkomen van meerdere windrichtingssectoren bij elkaar opgeteld te worden!

B. Gedeeltelijk zog.

Afhankelijk van de windrichtingssector is de kans van voorkomen dus 2 maal 6.5%, 2 maal 3.5% of, voor windrichtingen in de buurt van 195 of 285 graden, 6.5% + 3.5%. Bij lijnopstellingen bestaande uit meer dan 2 turbines of bij parkopstellingen dient de kans van voorkomen van meerdere windrichtingssectoren opgeteld te worden!

C. Vrije aanstroming.

Deze situatie geldt in alle overige gevallen en dient hetzelfde behandeld te worden als de situatie van solitair opgestelde windturbines. De kans van voorkomen is 100% minus de gezamenlijke kans van voorkomen van de zogsituaties A en B.

4. Bereken het windveld per zogsituatie

Voor situatie C kan gebruik gemaakt worden van de ontwerpnormen die gelden voor solitair geplaatste windturbines.

Voor de overige twee situaties A en B dienen de resultaten als volgt gebruikt te worden:

– Gemiddelde windsnelheid.

Gebruik de ongestoorde windsnelheid U_0 voor de bepaling van de kans van voorkomen van de betreffende windsnelheidsklasse. Bereken de gemiddelde windsnelheid in het zog U_{wake} en de zogvorm met behulp van de formules in paragraaf 2.2. De zogvorm leidt tot een extra windschering.

– Turbulentie.

Gebruik de ongestoorde turbulentie σ_0 voor de bepaling van het niveau van de turbulentie aan de rand van het zog. Bereken de rms-waarde van de windsnelheid (de turbulentie) in het zog σ_{wake} met de formules uit paragraaf 2.2 (ook hiervoor is σ_0 nodig). De verhouding tussen σ_{wake} en de turbulentie in de ongestoorde stroming σ_0 , geeft een vermenigvuldigingsfactor. Met deze factor dienen de relevante grootheden, toegepast bij solitair geplaatste windturbines, vermenigvuldigd te worden.

Slechts dat deel van het zog dat de tweede turbine 'treft' is voor de berekening van de windbelasting van belang. De volgende gegevens zijn daarvoor nodig:

- de afstand tussen de rotoras en de hartlijn van het zog. Voor zogsituatie A is dat 0, voor zogsituatie B is dat $X \times \sin(15 \text{ graden})$, waarbij X de afstand is tot de stroomopwaartse turbine;
- het zogprofiel. Voor de gemiddelde windsnelheid is de vorm anders dan voor de turbulentie, zie paragraaf 2.2.

De gemiddelde windsnelheid en de turbulentie in de ongestoorde situatie beïnvloeden beiden de ontwikkeling van het windturbine-zog. Voor een andere windsnelheidsklasse, een andere ashoogte of een andere terreinruwheid, dienen de berekeningen herhaald te worden.

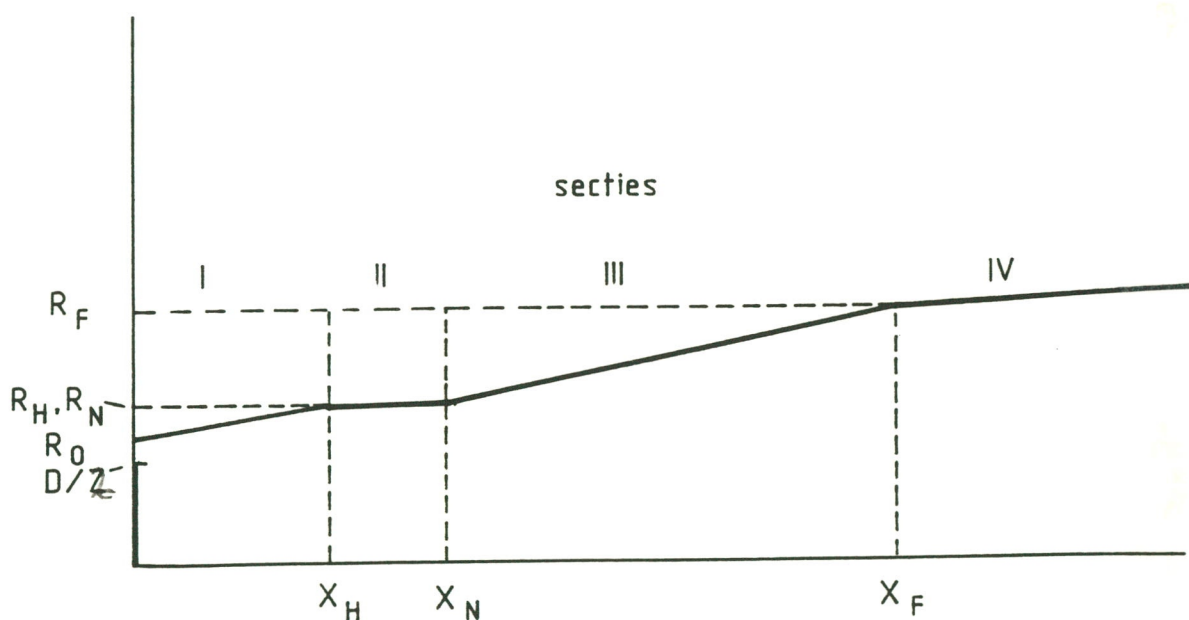
2.2 Het berekenen van een windturbine-zog

2.2.1 De indeling van het zog

TNO heeft in het verleden het parkmodel MILLY ontwikkeld (Vermeulen & Vijge 1981). In de navolgende jaren is dit model steeds verder verbeterd aan de hand van nieuwe informatie. De naam is veranderd in FARMS.

In FARMS is het zog onderverdeeld in vier secties (zie figuur 2.2):

- I. 'potential core' sectie;
- II. 'near wake' sectie;
- III. 'far wake' sectie;
- IV. 'final' sectie.



Figuur 2.2 De vier secties volgens het FARMS-model van TNO

De grootte van het zog wordt beschreven met behulp van de zogdiameter (of vaker met de half-breedte van het zog, R) en de lengte van het zog (de afstand van het be-

treffende punt tot de stroomopwaartse turbine). Beiden zijn gerelateerd aan de breedte van de 'stroombuis' ter plaatse van de turbine, R_0 :

$$R_0 = (D/2 \{ (m+1)/2 \}^{0.5}) \quad (2-1)$$

waarin D de rotordiameter is en m een weerstandsparameter, afhankelijk van de weerstandscoefficiënt C_T :

$$m = (1 - C_T)^{-0.5} \quad (2-2)$$

In paragraaf 2.2.2 wordt eerst de omvang van het zog in formulevorm beschreven voor de eerste drie secties (sectie IV is voor deze studie niet van belang). Daarna staan in paragraaf 2.2.3 de formules om het snelheidsdefect in het zog te berekenen (vergelijkingen 2-9 tot en met 2-12). Tenslotte kan met behulp van de vergelijkingen 2-13 tot en met 2-17 de turbulentie en de turbulentie-intensiteit in het zog berekend worden (paragraaf 2.2.4).

Let op: **Indien $C_T > 0.90$ bevelen wij aan om $C_T = 0.90$ in te vullen. Hierdoor wordt voorkomen dat onrealistische waarden worden berekend.**

2.2.2 De omvang van het zog

Lengte en breedte van de 'potential core' sectie

In deze sectie mengt het deel direct achter de turbine (de 'potential core') op met de omringde stroming. Een uitwisseling van energie vindt plaats dankzij turbulentie en snelheidsgradiënten. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in turbulentie in de ongestoorde stroming (aangeduid met index α), turbulentie veroorzaakt door de rotor (index λ) en turbulentie opgewekt door shear (index m).

De lengte van de eerste sectie X_H wordt als volgt berekend:

$$X_H = R_0 / \{ (dr/dx)_{\lambda, \alpha}^2 + (dr/dx)_m^2 \}^{0.5} \quad (2-3)$$

De opmenging van de stroming in het zog ten gevolge van de ongestoorde stroming en de turbulentie veroorzaakt door de rotor $(dr/dx)_{\lambda, \alpha}$ is gevonden door Luken aan de hand van de Nibe-metingen. Deze opmenging is afhankelijk van I_0 (hier aangeduid met α) en de tip speed ratio λ :

$$(dr/dx)_{\lambda, \alpha} = \{0.0750 \alpha^{0.21} + 0.457 \times 10^{-3} \lambda^{(0.71\alpha + 2.62)}\}^{0.5}$$

De opmenging van de stroming in het zog ten gevolge van de shear is afhankelijk van de weerstandsparameter m :

$$(dr/dx)_m = \{(1-m)(1.49+m)^{0.5}\} / \{9.76(1+m)\}$$

Op het eind van sectie 1 is de half-breedte van het zog R_H :

$$R_N = R_0 (0.134 + 0.124 m)^{-0.5} \quad (2-4)$$

Lengte en breedte van de 'near wake' sectie

De afstand tussen het eind van deze sectie tot de stroomopwaartse rotor wordt vaak near wake length (nabije zog lengte, X_N) genoemd. Deze lengte is afhankelijk van X_H (vergelijking 2-3):

$$X_N = \{C1 \cdot (1 - C2) / C2 \cdot (1 - C1)\} X_H \quad (2-5)$$

met

$$C1 = (0.214 + 0.144 m)^{0.5}$$

$$C2 = (0.134 + 0.124 m)^{0.5}$$

In FARMS is de breedte van het zog over de hele sectie gelijk aan die van de eerste sectie.

Lengte en breedte van de 'far wake' sectie

De lengte van de derde sectie X_F is 5 maal de lengte van het nabij zog:

$$X_F = 5 X_N \quad (2-6)$$

De bijbehorende zogbreedte R_F wordt als volgt berekend:

$$R_F = R_0 (2.38 \cdot 10^{-3} + 3.19 \cdot 10^{-2} \text{ m})^{-0.5} \quad (2-7)$$

De breedte van het zog neemt tussen X_N en X_F lineair toe. Op de plaats X_3 is de breedte R_3 :

$$R_3 = R_N + \{ (X_3 - X_N) / (X_F - X_N) \} \times (R_F - R_N) \quad (2-8)$$

2.2.3 De gemiddelde windsnelheid in het zog

Het snelheidsdefect

In FARMS wordt een uniforme snelheidsverdeling aangehouden in de eerste sectie. Het snelheidsverlies (defect) op de hartlijn ΔU_{cl} wordt berekend met behulp van de actuator disc theorie:

$$(\Delta U / U_0)_{cl,1} = (m - 1) / m$$

met U_0 de gemiddelde windsnelheid in de ongestoorde atmosferische stroming.

In de tweede sectie wordt verondersteld dat deze snelheid niet verder afneemt. Uit eerder studies blijkt echter dat dit een onderschatting is van de werkelijkheid. Het NWAKE model van National Power (Taylor 1990) geeft een betere schatting ter plaatse van X_N :

$$(\Delta U / U_0)_{cl,N} = 0.56 C_T + 0.255 \quad (2-9)$$

Vervolgens neemt het defect in de derde sectie als volgt af:

$$(\Delta U / U_0)_{cl,3} = (\Delta U / U_0)_{cl,N} (X_3 / X_N)^{-1.25} \quad (2-10)$$

Het zogprofiel van de gemiddelde windsnelheid

De windschering (in de z-richting) kan via lineaire superpositie opgeteld worden bij het snelheidsdefect in het zog (er geldt: $r = |z-H|$ in verticale en $r = y$ in laterale richting).

$$\text{verticaal: } U_{\text{wake}}(z) = U_0(z) - \Delta U_{\text{wake}}(r) \quad (2-11a)$$

$$\text{lateraal: } U_{\text{wake}}(y) = U_0(H) - \Delta U_{\text{wake}}(r) \quad (2-11b)$$

De vorm van het zog is met een normaalverdeling (ook wel: Gaussische verdeling) te beschrijven. Vermeulen & Vijge 1981 hebben een analytische beschrijving gebruikt met vrijwel dezelfde vorm:

$$\Delta U_{\text{wake}}(r) = \Delta U_{\text{cl}} (1 - r/R^{1.5})^2 \quad (2-12)$$

waarin r de afstand ten opzichte van de hartlijn is. Het profiel is as-symmetrisch. Voor $r > R$ geldt: $\Delta U_{\text{wake}} = 0$.

2.2.4 De turbulentie-intensiteit in het zog**De toegevoegde turbulentie**

In de literatuur wordt gesproken over de added turbulence σ_{add} , de turbulentie dat het zog toevoegt aan de turbulentie in de ongestoorde atmosferische stroming σ_0 . De added turbulence intensity I_{add} wordt vaak gedefinieerd ten opzichte van de ongestoorde windsnelheid:

$$I_{\text{add}} = \sigma_{\text{add}} / U_0 \quad (2-13)$$

De turbulentie in het zog, σ_{wake} , kan berekend worden door energieën op te tellen. Hiermee kan ook de turbulentie-intensiteit in het zog, I_{wake} , bepaald worden. Dit leidt tot de volgende formules:

$$\sigma_{\text{wake}}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_{\text{add}}^2 \quad (2-14)$$

$$I_{\text{wake}} = \sigma_{\text{wake}} / U_{\text{wake}} = U_0 / (U_{\text{wake}} I_0^2 + I_{\text{add}}^2)^{0.5} \quad (2-15)$$

Voor de verschillen van U_{wake} in verticale (z) en laterale (y) richting, zie vergelijkingen 2-11a en 2-11b. U_0 en I_0 zijn slechts een functie van de hoogte z. De added turbulence intensity I_{add} kan berekend worden met vergelijking 2-16.

De meest recente formule voor I_{add} , gebaseerd op een groot aantal verschillende meetcampagnes achter diverse windturbines, is afkomstig van Wastling & Tindal 1991 (zie ook hoofdstuk 4):

$$I_{\text{add}} = 1.31 C_T^{0.70} I_0^{0.68} (X_3/X_N)^{-0.96} \quad (2-16)$$

Deze waarde geldt als de maximale waarde, dus als $I_{\text{add,max}}$.

Het zogprofiel van de turbulentie

Voorzover bekend, bestaat er geen analytische beschrijving van het profiel van de added turbulence intensity. Het lijkt echter logisch dat de produktie van turbulentie in belangrijke mate de vorm bepaald. De produktie komt overeen met de snelheidsgradient, dus is de eerste afgeleide van de vorm van het snelheidsprofiel maatgevend voor de vorm van het profiel van de added turbulence. De maximale waarde wordt dan gevonden op de plaats waar de gradiënt van het snelheidsprofiel het grootst is; op ongeveer $r = 0.40 \cdot R$. Door de afgeleide te bepalen van vergelijking 2-12, wordt het profiel voor de added turbulence intensity:

$$I_{\text{add}}(r) = I_{\text{add,max}} 2.12 \times ((r/R)^{0.5} - (r/R)^2) \quad (2-17a)$$

waarin r de afstand ten opzichte van de hartlijn is. Ook dit profiel is as-symmetrisch. Voor $r > R$ geldt: $I_{\text{add}} = 0$. De constante 2.12 is zodanig, dat $I_{\text{add}} = I_{\text{add,max}}$ voor $r = 0.40 \times R$.

Behalve produktie van turbulentie, speelt ook transport van turbulentie nog een rol. Vergelijking 2-17a beschrijft de situatie waarbij de transportterm verwaarloosd is. Het transport van turbulentie zal vooral van belang zijn op die plaatsen waar het ver-

schil in snelheid tussen zog en omgeving groot is. Wij stellen dan ook voor om voor $r < 0.4 \times R$ bovenstaande formule 2-17a te vervangen door:

$$I_{\text{add}}(r) = I_{\text{add,max}} (1 - 0.5 \times (0.4 - r/R)^2) \quad (2-17b)$$

Uiteindelijk is σ_{wake} de waarde die nodig is om verdere berekeningen te kunnen maken. Deze waarde wordt gevonden door 2-17a en 2-17b in te vullen in 2-15, en het resultaat te vermenigvuldigen met U_{wake} (berekend met 2-11a of 2-11b).

Voor de berekening van windbelastingen op windturbines in park- of lijnopstellingen (slechts voor de relevante sectoren), dient σ_{wake} ingevuld te worden in de plaats van σ_u . Dit komt neer op het vermenigvuldigen van σ_u met de verhouding tussen σ_{wake} en σ_0 . In bijvoorbeeld het Handboek OWG-3, dienen de vlagamplituden A_{0P} en A_{nPt} van respectievelijk hoofdstuk 3 en 5 vermenigvuldigd te worden met deze verhouding.

3 Gemaakte keuzen voor de nieuwe methode

Om het aantal belastingsberekeningen voor windturbines in park- of lijnopstelling niet sterk te laten toenemen, zal een aantal keuzen gemaakt moeten worden. Ten behoeve van de nieuwe methode betreft het keuzen voor de volgende aspecten:

- enkelvoudig of meervoudig zog;
- zogsituaties;
- omvang van het zog;
- spacing;
- vorm van het zog;
- windrichtingsverdeling;
- gebruikte formules;
- beperkingen.

Per aspect worden hierna enkele opties genoemd, plus de uiteindelijke keuze van het projectteam. Enkele keuzen zijn al voor de start van het project gemaakt, maar zijn volledigheidshalve toch toegelicht.

3.1 Enkelvoudig of meervoudig zog

Het blijkt dat, in het algemeen, windturbines op de tweede positie in een park- of lijnopstelling de grootste toename in de vermoeiingsschade ondervinden (Van der Maarel 1989). In een enkel geval betreft het windturbines op de derde positie (Garrad et al. 1993). De verschillen met de toename in de vermoeiingsschade van turbines op de tweede positie zijn dan echter gering. Dat betekent voor de schematisering dat in veruit de meeste gevallen de betreffende windturbine of vrij aangestroomd wordt of in een enkelvoudig zog staat.

De methode beperkt zich tot enkelvoudige zogen.

3.2 Zogsituaties

Een windturbine kan onder de volgende zogsituaties opereren:

1. volledig zog;
2. gedeeltelijk zog;
3. geen zog, ongestoorde aanstroming.

Deze indeling is erg zwart-wit. Maar om het aantal belastingsberekeningen te beperken, zal de aanstroombichting in enkele discrete stappen van geen zog tot volledig zog en omgekeerd dienen te verlopen.

Het projectteam heeft besloten, onderscheid te maken in de volgende (zog)situaties:

- A. volledig zog waarbij de as van de tweede turbine samenvalt met de hartlijn van het zog van de eerste turbine;
- B. gedeeltelijk zog waarbij de tweede turbine opereert in het rechter- of linkerdeel van het zog van de eerste turbine;

- C. vrije aanstroming, waarbij de as van de tweede turbine zich (vrijwel) buiten het zog bevindt. Deze situatie geldt in alle overige gevallen en dient hetzelfde behandeld te worden als de situatie van solitair opgestelde windturbines.

Situatie B is in paragraaf 2.1 al weergegeven (figuur 2.1).

3.3 Omvang van het zog

In een windturbinezog treedt een snelheidsafname en een toename van de turbulentie-intensiteit op. Voorzover bekend, is de ruimtelijke omvang van de eerste iets beperkter is dan van de laatste. Op dit punt zijn twee opties denkbaar:

1. onderscheid tussen de omvang van het zog voor de gemiddelde snelheid en die voor de turbulentie-intensiteit;
2. een 'gemiddelde' zogomvang.

Het projectteam heeft gekozen voor de tweede optie, waarbij uitgegaan wordt van de zogomvang geldig voor de gemiddelde windsnelheid.

De breedte van het zog is afhankelijk van de afstand tot de stroomopwaartse turbine. Voor de situaties waartoe we ons hier beperken, is de breedte circa 3 maal de rotor diameter of in windrichtingen uitgedrukt: circa 30 graden (gezien vanaf de stroomopwaartse turbine).

3.4 Spacing

In Nederland worden windturbines in windparken op ongeveer 5 à 8D (5 à 8 maal de rotordiameter) uit elkaar gezet. Het heeft dus geen zin om een methode te maken waarbij het mogelijk is de zogeffecten op sterk afwijkende afstanden te berekenen. Bovendien zijn voor afstanden kleiner dan 3D nauwelijks gegevens voorhanden, is de spreiding van de resultaten van turbulentiemetingen op afstanden kleiner dan 4D groot, en worden de zogeffecten klein voor afstanden groter dan circa 10D (zie ook hoofdstuk 4).

De methode is geldig voor onderlinge afstanden tussen 4 en 10D.

3.5 Vorm van het zog

Op afstanden groter dan 4D stroomafwaarts is het zog voor de gemiddelde windsnelheid te beschrijven door een Gaussische verdeling (ook wel: normaalverdeling). Het zog voor de turbulentie-intensiteit kan, bij benadering, hiervan afgeleid worden. Het minimum van de gemiddelde snelheid in het zog ligt op ashoogte, in het hart van het zog. De maxima van de turbulentie-intensiteit liggen op circa 0.4 maal de half-breedte van het zog links en rechts van de hartlijn.

Voor de schematisering van de vorm zijn 4 opties denkbaar:

1. De werkelijke verdeling;
2. Een driehoekige verdeling;
3. Een rechthoekige, zogenaamde top hat, verdeling;
4. Een combinatie van de laatste twee.

Aangezien de analytische beschrijving van de werkelijke verdeling relatief eenvoudig is, heeft het projectteam voor de eerste optie gekozen. Voor de afstanden groter dan 4D, geldt dat het zog gelijkvormig is. De vorm van het zogprofiel kan dan met behulp van een beperkt aantal formules beschreven worden.

Het zog is in de breedte (lateraal) symmetrisch. In de hoogte (verticaal) is dit niet het geval vanwege de atmosferische grenslaag. Een goede benadering is te bereiken door as-symmetrie te veronderstellen, en het logaritmisch snelheids- en turbulentieprofiel apart in rekening te brengen. Voor de gemiddelde windsnelheid mogen beide effecten lineair opgeteld worden, voor de turbulentie-intensiteit geldt een kwadratische optelling (lineaire optelling van energieën).

3.6 Windrichtingsverdeling

De lay-out en de oriëntatie van het park ten opzichte van de overheersende windrichting hebben invloed op de kans van voorkomen van de diverse belastingsgevallen. Wat kans van voorkomen van windrichtingen betreft, kunnen we heel grof onderscheid maken in (zie onderstaande tabel 3.1, overgenomen van bijlage 15 uit het Handboek Energie-opbrengsten van windturbines (Verheij e.a. 1991)):

Wat de kans van voorkomen van de windrichtingssectoren betreft, dienen de volgende percentages aangehouden te worden voor de zogsituaties A en B uit paragraaf 3.2:

- windrichting ligt tussen 195 en 285 graden: kans van voorkomen per 15 graden-sector is 6.5%;
- voor de overige windrichtingen: kans van voorkomen per 15 graden-sector is 3.5%. ²⁾, ³⁾

De kans van voorkomen voor situatie C is 100% minus de kans van voorkomen van de zogsituaties A en B.

Voor de belastingsberekeningen zijn de aanbevelingen van het projectteam terug te vinden in paragraaf 2.1.

²⁾ De totale kans van voorkomen is door deze vereenvoudiging 102%. In situatie C, vrije aanstroming, wordt hiervoor gecorrigeerd zodanig dat de totale kans van voorkomen weer 100% is (zie ook paragraaf 2.1)

³⁾ Bij de kansverdeling is geen rekening gehouden met verschil in windsnelheidsverdeling per windrichtingssector

Tabel 1 De kans van voorkomen per windrichtingssector van 30 graden. Windrichting 0 betekent wind komend vanuit het noorden. Tussen haakjes staat het nummer van de sector

Windrichting				Kans van voorkomen	
				Werkelijk	Schema
0	±	15	(1)	0.0582	0.07
30	±	15	(2)	0.0587	0.07
60	±	15	(3)	0.0745	0.07
90	±	15	(4)	0.0811	0.07
120	±	15	(5)	0.0450	0.07
150	±	15	(6)	0.0545	0.07
180	±	15	(7)	0.0817	0.07
210	±	15	(8)	0.1316	0.13
240	±	15	(9)	0.1410	0.13
270	±	15	(10)	0.1167	0.13
300	±	15	(11)	0.0830	0.07
330	±	15	(12)	0.0740	0.07
0 tot 360				1.0000	1.02

3.7 Gebruikte formules

Er zijn diverse formules bekend voor:

- de dimensieloze snelheidsafname $\Delta U_{\text{wake}}/U_0$, $\Delta U_{\text{wake}} = U_0 - U_{\text{wake}}$;
- de turbulentie-intensiteitstoename ten gevolge van de zogstroming I_{add} , $I_{\text{add}} = \sigma_{\text{add}}/U_0$;
- de turbulentie-intensiteit in het zog I_{wake} , $I_{\text{wake}} = \sigma_{\text{wake}}/U_{\text{wake}}$;
- de dimensieloze lengte van het zogenaamde nabije zog X_N/D ;
- de dimensieloze halfbreedte van het zog R/D ;
- de vorm van het zog.

De berekeningen van de 1e, de 4e en de 5e component zijn uitgevoerd met de formules uit de meest recente versie van het TNO-model FARMS (Luken 1989) in combinatie met formules uit NWAKE, het parkmodel van National Power (Taylor 1990). Deze zijn eveneens gebruikt voor het EEG-project Dynamic Loads in Wind Farms. De berekening van de turbulentie-intensiteiten is gebaseerd op een formule van Quarton & Ainslie. De constanten in deze formule zijn aangepast volgens de aanbevelingen van Wastling & Tindal 1991. Overigens hebben zowel Wevers 1992 als Crespo 1992 ook geconstateerd dat toepassing van de oorspronkelijke formule leidt tot iets te hoge waarden voor I_{add} . In figuur 3.1 worden beide formules vergeleken met de meetresultaten van Wevers.

$$I_{\text{add}} = 1.31 C_T^{0.7} I_0^{0.68} (X/X_N)^{-0.96} \quad 4)$$

De waarde voor I_{add} is de maximale waarde. Wat het zogprofiel (de vorm van het zog) voor de gemiddelde windsnelheid betreft, is gebruik gemaakt van Vermeulen & Vijge 1981. Het profiel voor I_{add} is, voorzover bekend, nooit analytisch beschreven. Voor toepassing in ontwerpnormen, is de vorm afgeleid van de vorm voor de gemiddelde windsnelheid en vervolgens gedeeltelijk aangepast aan de hand van meetresultaten van Nibe en Sexbierum. De maxima van I_{add} liggen op $\pm 0.40 r/R$.

De genormaliseerde zogprofielen van beide grootheden zijn te zien in figuur 3.2.

Alle relevante formules zijn terug te vinden in paragraaf 2.2.

3.8 Beperkingen

Afgezien van de aangegeven begrenzingen en randvoorwaarden voor het toepassen van de methode, zijn er nog enkele beperkingen.

Er is zeer weinig informatie bekend over integrale lengteschalen van de turbulentie in zogsituaties. In nog niet gepubliceerd werk, uitgevoerd door Garrad Hassan & Partners, ECN, TNO en KEMA (EEG-project Dynamic Loads in Wind Farms), blijkt de lengteschaal het kleinst op de hartlijn van het zog en, via een bij benadering Gaussisch profiel, de waarde van de lengteschaal in de ongestoorde stroming te bereiken. In figuur 3.3 wordt de verhouding van de lengteschaal in het zog ten opzichte van de lengteschaal in de ongestoorde atmosferische stroming getoond. De lengteschalen zijn bepaald uit metingen op 4D in een enkel zog in het windpark Sexbierum. Voor deze situatie is de verhouding van de lengteschalen op de hartlijn ongeveer 0.30. Uit windtunnelmetingen in Marchwood (Engeland) is op 5D een verhouding gevonden van ongeveer 0.50 (nog niet gepubliceerd).

Diverse meetcampagnes in Sexbierum laten zien (figuur 3.4 en Verheij 1993) dat windspectra in het zog met dezelfde formule beschreven kan worden als de windspectra in de ongestoorde atmosferische stroming, mits de betreffende parameters dimensioneloos gemaakt worden met de lokale gemiddelde en variantie van de windsnelheid en de 'lokale' lengteschaal.

De gemiddelde windsnelheid en de integrale lengteschaal van de turbulentie zijn in het zog kleiner dan in de ongestoorde stroming. Omdat het dimensioneloze spectrum (op de horizontale as staat: frequentie $\times$ lengteschaal / windsnelheid) en omdat de lengteschaal in het zog sterker gereduceerd wordt dan de windsnelheid, betekent dit dat er in zogsituaties een (geringe) verschuiving van de lage naar de hoge frequenties plaatsvindt. Dit betekent dat de verhoging van de turbulentie-intensiteit naar verhouding groter zal zijn voor de nP-vlagen dan voor de OP-vlagen.

Het effect is minder sterk naarmate de tweede rotor zich 'minder' in het zog van de eerste turbine bevindt. Aangezien de mate van de verschuiving (nog) niet bekend is en er bovendien sprake is van een 2e-orde effect, beveelt het projectteam aan voorlopig dezelfde verdeling tussen OP- en nP-vlagen te hanteren als bij ongestoorde situaties.

⁴⁾ In beide referenties (Quarton & Ainslie '89 en Wastling & Tindal '91) worden de waarden voor de turbulentie-intensiteiten I uitgedrukt in procenten. Aangezien in dit rapport deze grootheden worden uitgedrukt in decimalen, is de oorspronkelijke constante 5.7 veranderd $1.31 (I_{\text{add}}(\text{in } \%)/I_{\text{add}}(\text{in dec.})) = 5.7/1.31 * \{I_0(\text{in } \%)/I_0(\text{in dec.})\}^{0.68}$.

4 Gevoeligheidsanalyse

Om inzicht te geven in het effect dat enkele belangrijke invoerparameters hebben op de zogontwikkeling, heeft TNO een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de formules in bijlage B. De HAT-25 met de 20-WPX bladen is gebruikt als voorbeeldturbine.

Tevens zijn de formules geëvalueerd aan de hand van metingen achter de Nibe-windturbines (Luken 1989, Taylor 1990) en in het windpark Sexbierum (Cleijne 1993, Verheij 1993). Een toelichting is te vinden in paragraaf 4.3.

4.1 Gebruikte invoergegevens

De zogontwikkeling, uitgeschreven in dimensieloze parameters, wordt niet of in zeer geringe mate beïnvloed door de ashoogte H , de rotordiameter D en de ongestoorde windsnelheid op ashoogte U_0 . (Indirect heeft U_0 via de C_T - λ karakteristiek wel invloed.) Voor de ondertaande berekeningen hebben deze parameters de volgende waarden: 25 m, 21.2 m respectievelijk 8 m/s.

De volgende parameters hebben wel een merkbare invloed op de zogontwikkeling. Daarbij is steeds één parameter gevarieerd en zijn de overigen constant gehouden. De basiscondities zijn tussen haakjes aangegeven:

- de dimensieloze afstand X/D achter de rotor (basis: $X/D=5$);
- de C_T - λ karakteristiek (voor $U_0=8$ m/s geldt weerstandscoefficiënt $C_T=0.79$ en tip speed ratio $\lambda=6.5$);
- de terreinruwheid z_0 (basis: $z_0=0.10$ m).

4.2 Invloed op de zogontwikkeling

In de figuren 4.1 tot en met 4.3 is de invloed van deze drie parameters op de zogontwikkeling te zien. De verandering van de volgende componenten zijn berekend (de eerste drie gelden voor de hartlijn van het zog):

- de dimensieloze snelheidsafname $\Delta U_{\text{wake}}/U_0$, $\Delta U_{\text{wake}} = U_0 - U_{\text{wake}}$;
- de turbulentie-intensiteitstoename ten gevolge van de zogstroming I_{add} , $I_{\text{add}} = \sigma_{\text{add}}/U_0$;
- de turbulentie-intensiteit in het zog I_{wake} , $I_{\text{wake}} = \sigma_{\text{wake}}/U_{\text{wake}}$;
- de dimensieloze lengte van het zogenaamde nabije zog X_N/D ;
- de dimensieloze halfbreedte van het zog R/D .

Zoals ook uit de formules in paragraaf 2.2 blijkt, is de nabije zoglengte X_N de gebruikelijke parameter voor het normeren van de zoglengte en daarmee voor het berekenen van de snelheidsafname. Deze X_N is afhankelijk van de wind- en de windturbinecondities. Windturbines worden echter op een vaste afstand uit elkaar geplaatst. Voor de gevoeligheidsanalyse is daarom gekozen voor normering met de rotordiameter D .

Aan de hand van de figuren kan het volgende geconcludeerd worden (let op: uitgangspunt is HAT-25 met 20-WPX bladen):

- Invloed van X/D .
Op $X/D=10$ is de halfbreedte van het zog $2D$; dit is slechts circa tweemaal zo breed als op $X/D=3$. Het snelheidsdefect en de added turbulence zijn sterk afhankelijk van de afstand in het zog. Op grotere afstand worden beide componenten snel kleiner.
- Invloed U_0 via C_T - λ karakteristiek.
De omvang van het zog, zowel lengte als breedte, zijn slechts in geringe mate gevoelig voor C_T - λ . Het snelheidsdefect en de added turbulence zijn hier wel erg gevoelig voor. Bij hogere snelheden zijn de zogeffecten kleiner. Overigens is ΔU in het nabije zog erg gevoelig voor C_T . Een 10% hogere waarde van C_T leidt tot een vergelijkbaar grotere waarde van ΔU en idem voor I_{wake} .
- Invloed z_0 .
De invloed van z_0 op het snelheidsdefect en op de omvang van het zog is erg klein. I_{add} neemt sterk toe bij toenemende z_0 .

Indien C_T groter wordt dan ongeveer 0.90 (veelal bij lage windsnelheden), worden er langzaam aan onrealistische waarden berekend. Bij toepassing van de formules in paragraaf 2.2, geldt dat $C_T = 0.90$ de maximale waarde is.

4.3 Evaluatie

De formules zijn toegepast op de situaties in Nibe (DK) en Sexbierum (NL). De lokale omstandigheden en turbine-gegevens zijn gebruikt voor de berekeningen. De resultaten zijn te zien in de figuren 4.4 tot en met 4.7 (Nibe) en 4.8 tot en met 4.15 (Sexbierum).

De uitgangspunten zijn als volgt:

	Nibe	Sexbierum
ashoogte H (m)	45	35
diameter D (m)	40	30
ruwheid z_0 (m)	0.08	0.05
thrust C_T (-)	0.77	0.82
tsr λ (-)	7.4	7.0
snelh. op H (m/s)	9.6	8.0

Voor Nibe is alleen de 4D enkel zog situatie nagerekend, voor Sexbierum zijn de 4, 5.5 en 8D enkel zog situaties nagerekend.

Het volgende dient nog opgemerkt te worden:

- Bij de Nibe-data zijn de rms-waarden in het zog dimensieloos gemaakt met U_0 , bij de Sexbierum-data is dat tevens gebeurd met de gemiddelde windsnelheid in het zog.

- Volgens de gegevens zou de C_T van de Holec-turbines in Sexbierum gelijk moeten zijn aan 0.75 voor de nagebootste situatie. Er zijn echter geen meetgegevens bekend. Aan de hand van de meetresultaten lijkt een waarde van circa 0.82 logischer.
- De meetresultaten zijn opgebouwd uit 1, 3 of 4 minuten reeksen. Hierdoor is de turbulentie-intensiteit circa 30% lager in vergelijking met uurgemiddelde reeksen (verlies van laagfrequente energie, zie ESDU 1985). De berekening van de omgevingsturbulentie I_0 is hiervoor gecorrigeerd.

In de figuren 4.4 (Nibe) en 4.8 tot en met 4.10 (Sexbierum) zijn de gemeten zogprofielen voor de gemiddelde windsnelheid te zien. Figuren 4.5 (Nibe) en 4.11 (Sexbierum) tonen de berekende resultaten.

In de figuren 4.6 (Nibe) en 4.12 tot en met 4.14 (Sexbierum) zijn de gemeten zogprofielen voor de turbulentie-intensiteit te zien. De Nibe-metingen zijn genormeerd met de ongestoorde windsnelheid U_0 , die van Sexbierum met de lokale windsnelheid U_{wake} . Figuren 4.7 (Nibe) en 4.15 (Sexbierum) tonen de berekende resultaten.

Zowel de maxima (10%) als de plaats van de maxima en de zogbreedten (10 tot 15%) worden goed voorspeld met behulp van de gebruikte formules. De waarden voor I_{wake} in de buurt van de hartlijn van het zog wordt iets onderschat (10 tot 20%).

5 Conclusies

Er is een methode beschreven om het windveld in een windturbinezog te karakteriseren. De methode kan in combinatie met het Handboek Ontwerpwindgegevens windturbines - versie 3, maar ook met andere ontwerpnormen zoals de IEC-code, toegepast worden.

Het is mogelijk om de gemiddelde en rms-waarde van de windsnelheid in het zog met eenvoudige formules weer te geven. Dat geldt tevens voor het profiel van beide grootheden.

De gevoeligheid van de spacing X/D , de C_T - λ karakteristiek en de ruwheidslengte z_0 op de zogontwikkeling is als volgt:

- De omvang van het zog (breedte en lengte) is nauwelijks gevoelig voor deze parameters. Alleen de breedte neemt (lineair) langzaam toe bij toenemende spacing;
- Het snelheidsdefect is sterk gevoelig voor de spacing en de C_T - λ karakteristiek en nauwelijks voor z_0 ;
- De extra turbulentie-intensiteit ten gevolge van het zog I_{add} is sterk afhankelijk voor elk van deze parameters.

Voor $C_T > 0.90$ wordt toepassing van de formules afgeraden. Aanbevolen wordt deze waarden te vervangen door $C_T = 0.90$. Overigens zullen waarden > 0.90 in het algemeen slechts optreden bij lage windsnelheden.

Vergelijking met meetgegevens van Nibe en Sexbierum laten zien dat met de gegeven formules het zog goed beschreven wordt. De methode lijkt dus geschikt voor toepassing in ontwerpnormen.

Een verificatie van deze methode in combinatie met een programma dat de windbelastingen berekend, dient nog uitgevoerd te worden. Een goede statistische foutenanalyse dient daar onderdeel van uit te maken.

6 Referenties

Beljaars, A.C.M.;

The measurements of gustiness at routine wind stations - A review;
WMO instruments and observing methods,
report no. 31, Genève, 1987.

Cleijne, J.W.;

Results of Sexbierum Wind Farm;
single wake measurements;
TNO Environmental and Energy Research,
93-082, Apeldoorn, March 1993.

Crespo, A.;

Progress report Wake and Wind Farm Modelling - UPM Contribution;
UPM, JOUR-0087,
Madrid, October 1992.

ESDU;

Characteristics of atmospheric turbulence near the ground.
Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere);
Engineering Sciences Data Item 85020,
October 1985.

Garrad, A.G. et al.;

Dynamic Loads in Wind Farms;
Proc. ECWEC'93,
Travemünde, 8-12 March 1993.

Luken, E.;

NIBE wake measurements - Data analysis and model validation;
TNO Environmental and Energy Research,
88-301, Apeldoorn, December 1988.

Luken, E.;

Windbelastingen van windturbines in parkopstelling - Literatuurstudie;
TNO-Milieu en Energie,
89-062, Apeldoorn, februari 1989.

Maarel, H.T.M. van der;

Vermoeiing van windturbines in een parkopstelling;
Holland Windturbine b.v.,
Utrecht, maart 1989.

Quarton, D. and Ainslie, J.;

Characterisation of wind turbine wake turbulence and its applications on
wind farm spacing;
ETSU WN 5096, UK, 1989.

Ontwerpwindgegevens voor windturbines in park- of lijnopstelling

Taylor, G.J.
Wake measurements on the Nibe wind-turbines in Denmark -
Part 2: Data collection and analysis;
National Power, CEC Contract EN3W.0039.UK, Leatherhead, 1990.

Verheij, F.J., Föllings, F.J. en Curvers, A.P.W.M.;
Handboek Ontwerpwindgegevens windturbines - versie 3;
TNO/INTRON/ECN, Uitgave: INTRON-Milieuconsult,
Houten, januari 1991.

Verheij, F.J., e.a.;
Handboek Energie-opbrengsten van windturbines - 2^e editie;
TNO-Milieu en Energie,
88-145, Apeldoorn, mei 1991.

Verheij, F.J.;
Dynamic Loads in Wind Farms. Analysis of wind spectra, coherence
functions and integral length scales of the turbulence;
TNO Environmental and Energy Research,
Apeldoorn, 1993 (to be published).

Vermeulen, P.E.J. and Bultjes, P.J.H.;
Mathematical modelling of wake interaction in wind turbine arrays -
Part I: Description and evaluation of the mathematical model;
TNO Environmental and Energy Research,
81-01473, Apeldoorn, February 1981.

Vermeulen, P.E.J. and Vijge, J.B.A.;
Mathematical modelling of wake interaction in wind turbine arrays -
Part II: Description of the MILLY computer program;
TNO Environmental and Energy Research,
81-02834, Apeldoorn, 1981.

Wastling, M.A. and Tindal, A.J.;
The effect of rotor characteristics on the loading spectrum and fatigue life
of a wind turbine within a wind farm;
Garrad Hassan & Partners, 197/R/2, Bristol,
December 1991.

Wevers, R., Leene, J.A. and Verheij, F.J.;
Wind measurements behind a wind turbine scale model in a wind tunnel;
TNO Environmental and Energy Research,
Apeldoorn, July 1992.

7 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

INTRON

Postbus 226

3990 GA Houten

Namen en functies van de medewerkers

Ir. F.J. Verheij - onderzoeker

C.J. Folkers - onderzoekmedewerker

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

Niet van toepassing

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad

oktober 1992 - april 1993

Ondertekening

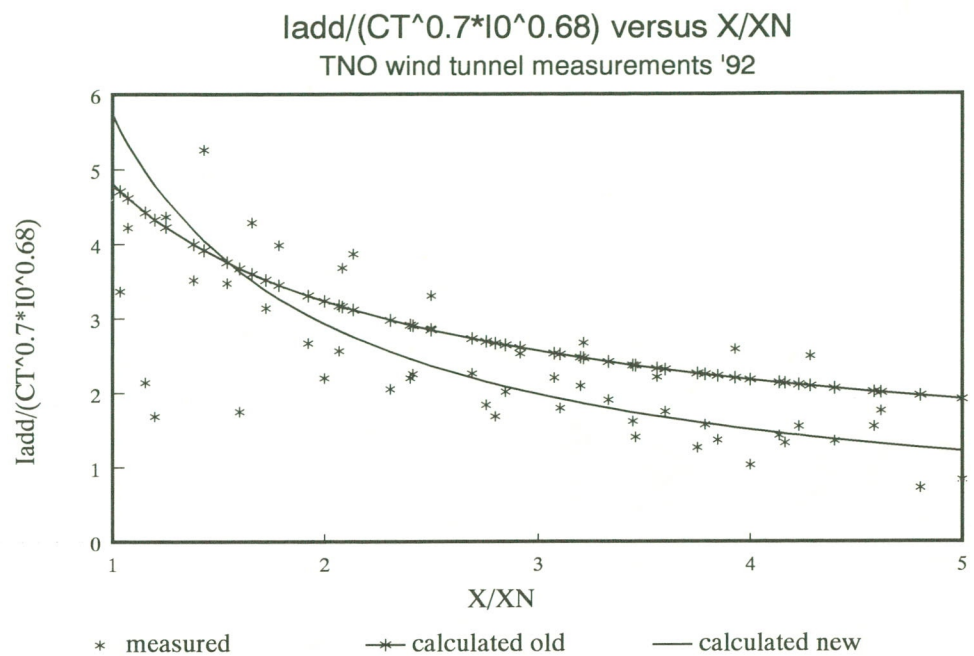
Ir. F.J. Verheij
onderzoeker

Goedgekeurd door

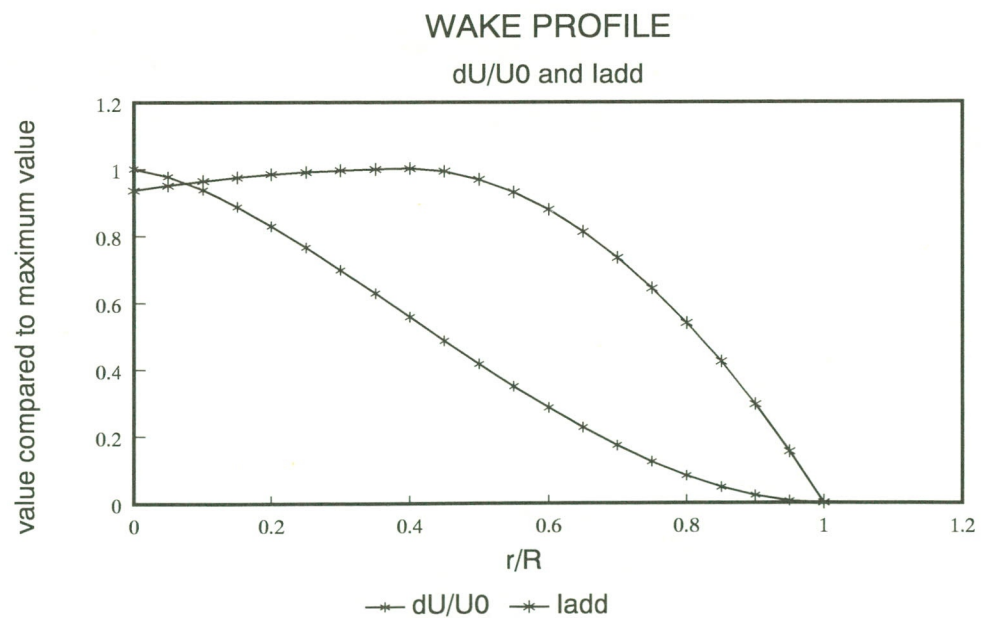
Ir. N.J. Duijm
werkgroep leider

Ontwerpwindgegevens voor windturbines in park- of lijnopstelling

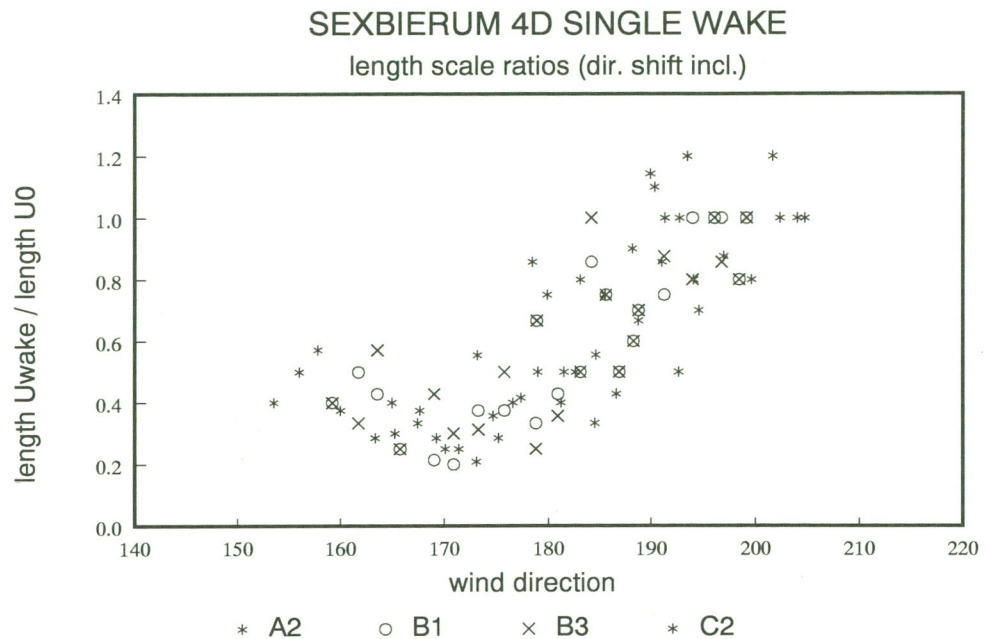
Figuren



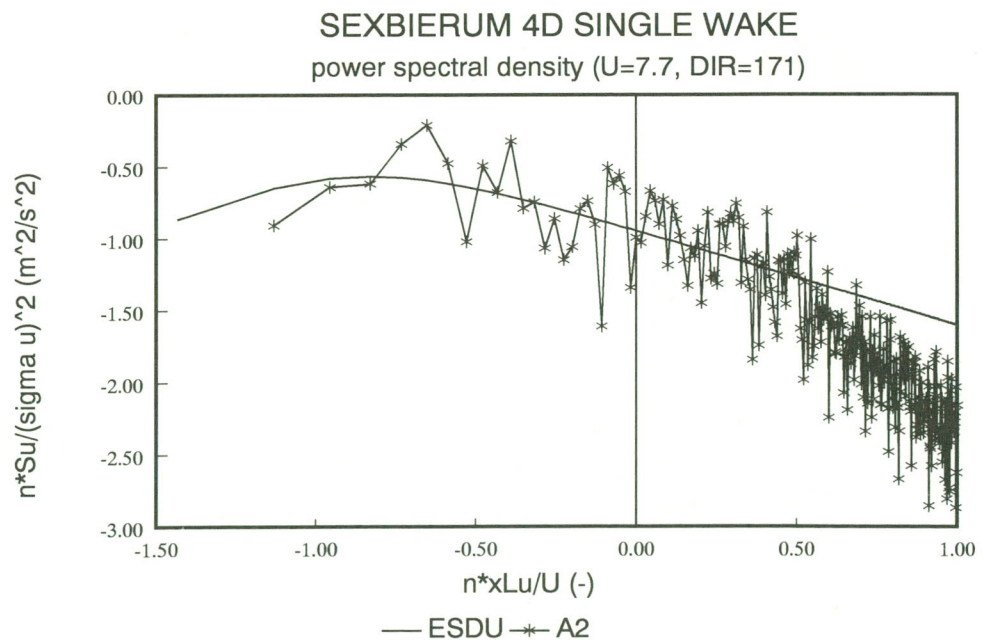
Figuur 3.1 De in TNO-windtunnel gemeten added turbulences I_{add} vergeleken met berekende waarden



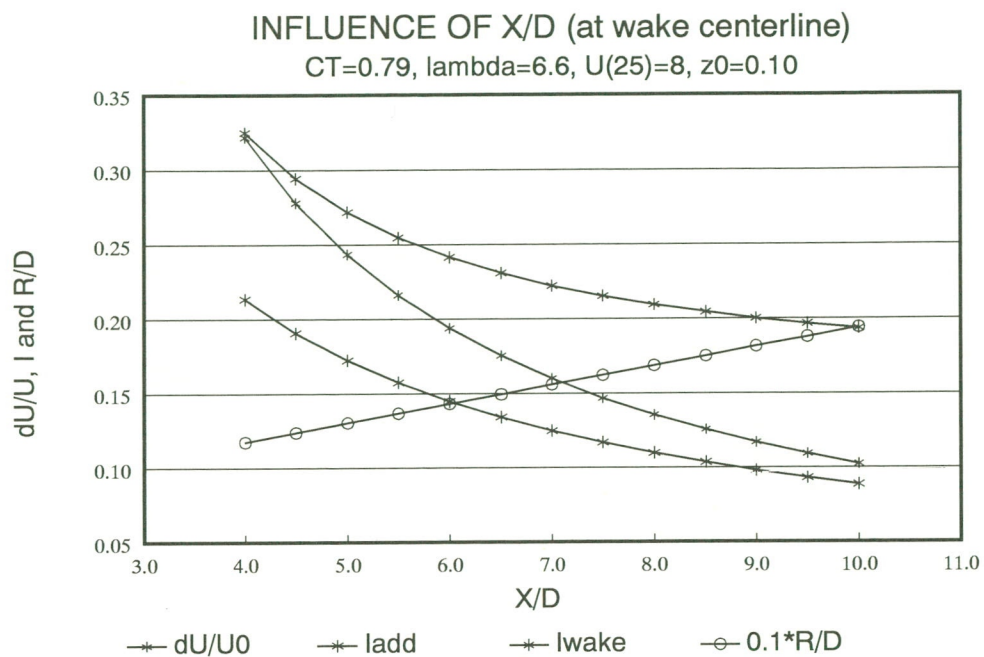
Figuur 3.2 Het dimensieloze zogprofiel voor het dimensieloze windsnelheidsverlies $\Delta U/U_0$ en de added turbulence I_{add}



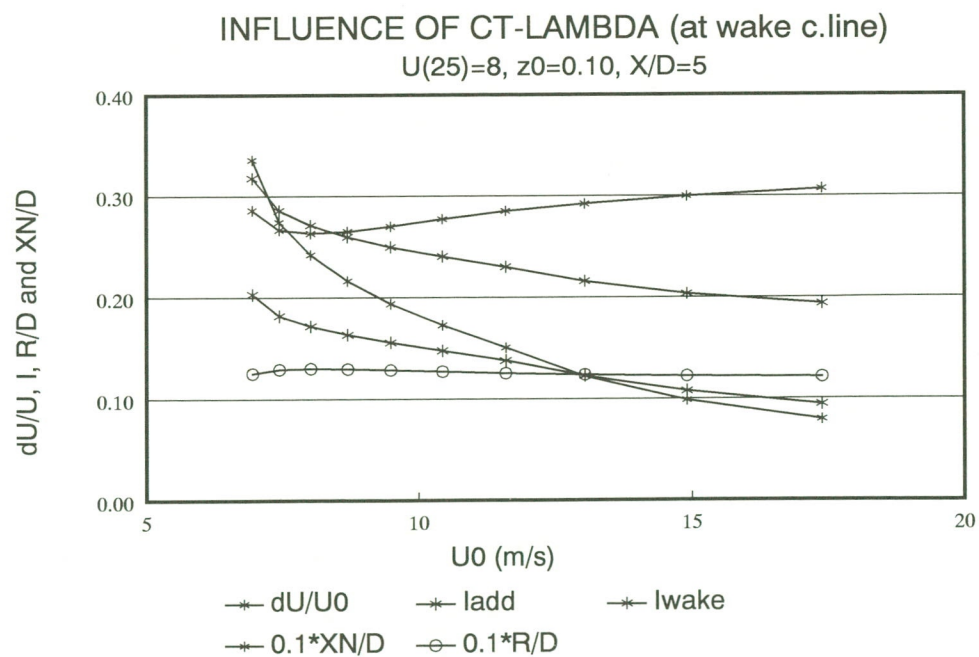
Figuur 3.3 De verhouding van de integrale turbulentie lengteschalen, gemeten in het zog (op 4D) en in de ongestoorde stroming als functie van de windrichting. De hartlijn van het zog ligt op 172 graden



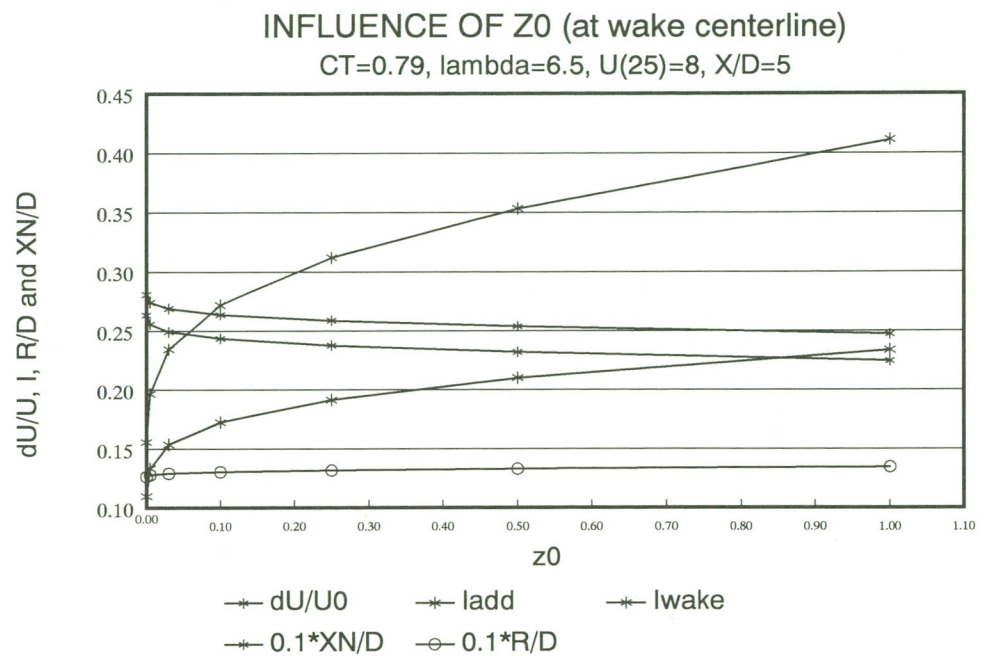
Figuur 3.4 Het windspectrum gemeten op de hartlijn van het zog op 4D (anemometer A2) vergeleken met het spectrum volgens ESDU. De spectra zijn uitgezet in dimensieloze grootheden



Figuur 4.1 De invloed van de dimensieloze afstand tot de stroomopwaartse windturbine X/D op enkele zogparameters

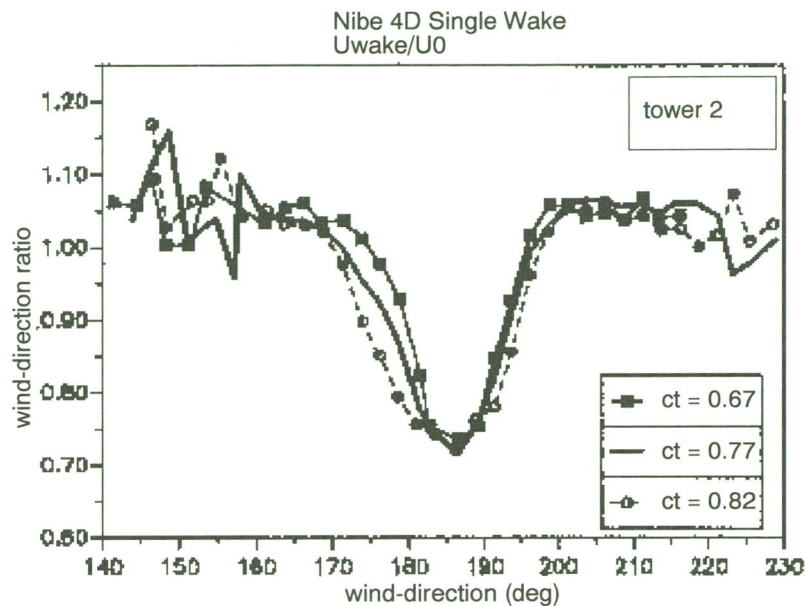


Figuur 4.2 De invloed van de $C_T-\lambda$ karakteristiek op enkele zogparameters

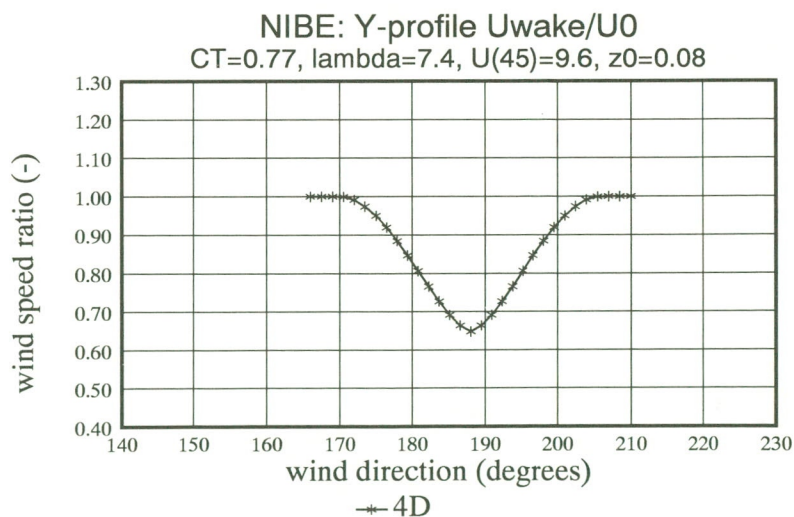


Figuur 4.3 De invloed van de terreinruwheid z_0 op enkele zogparameters

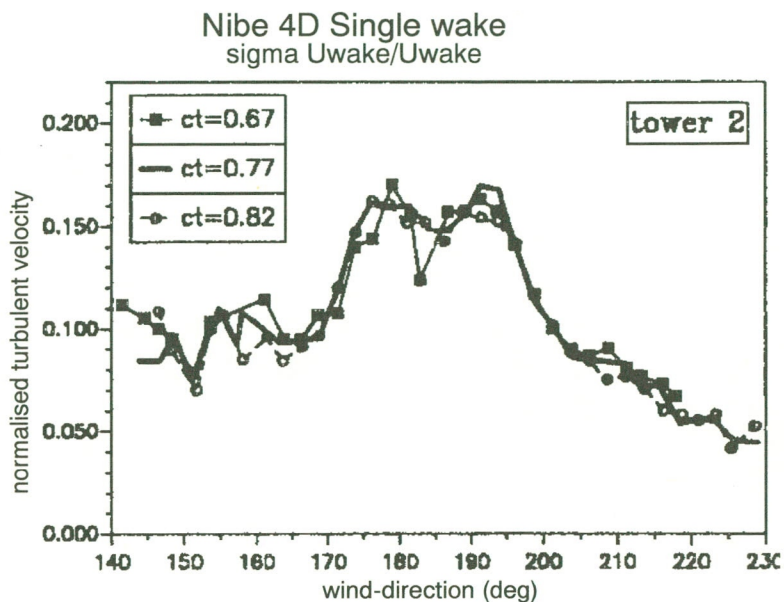
Ontwerpwindgegevens voor windturbines in park- of lijnopstelling



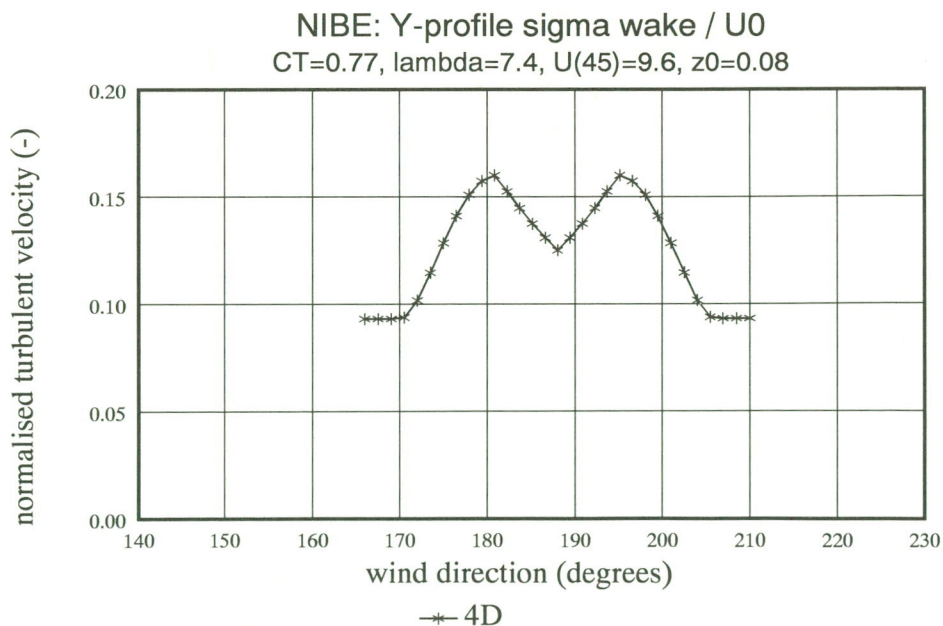
Figuur 4.4 Het zogprofiel van de dimensionloze gemiddelde windsnelheid U_{wake}/U_0 voor verschillende waarden van C_T , gemeten op 4D te Nibe



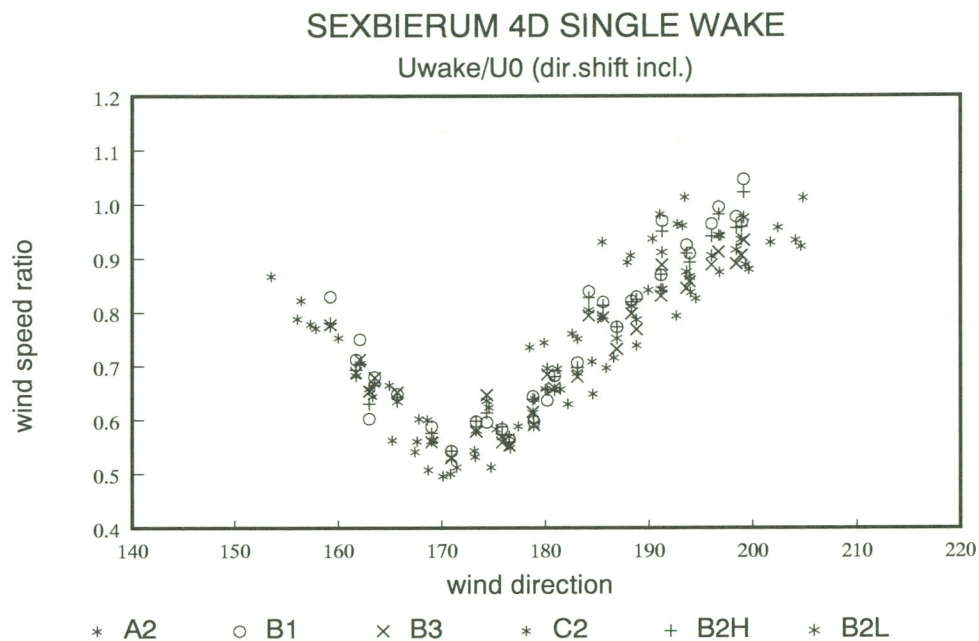
Figuur 4.5 Het berekende zogprofiel van de dimensionloze gemiddelde windsnelheid U_{wake}/U_0 op 4D. De gebruikte invoergegevens komen overeen met de condities waaronder gemeten is in Nibe



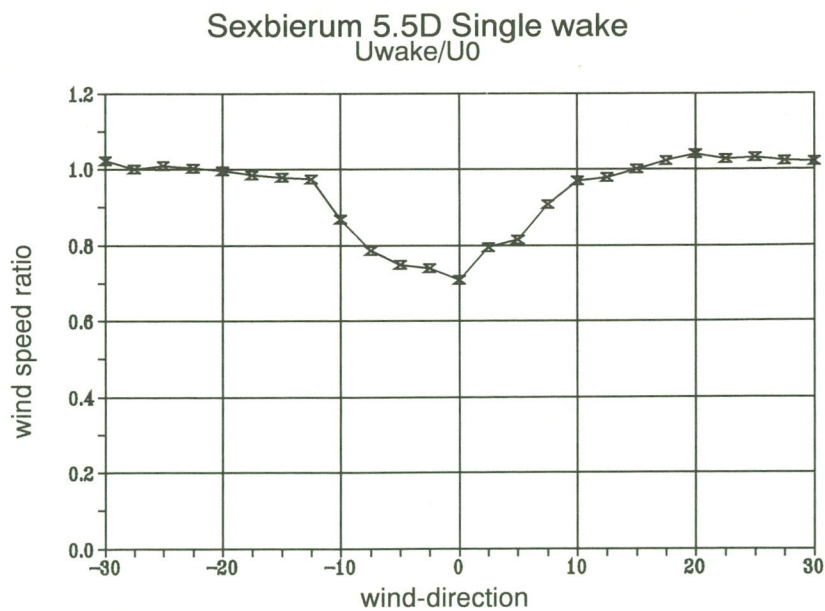
Figuur 4.6 Het zogprofiel van de turbulentie, genormeerd met de gemiddelde windsnelheid van de ongestoorde stroming, σ_{wake}/U_0 voor verschillende waarden van C_T , gemeten op 4D te Nibe



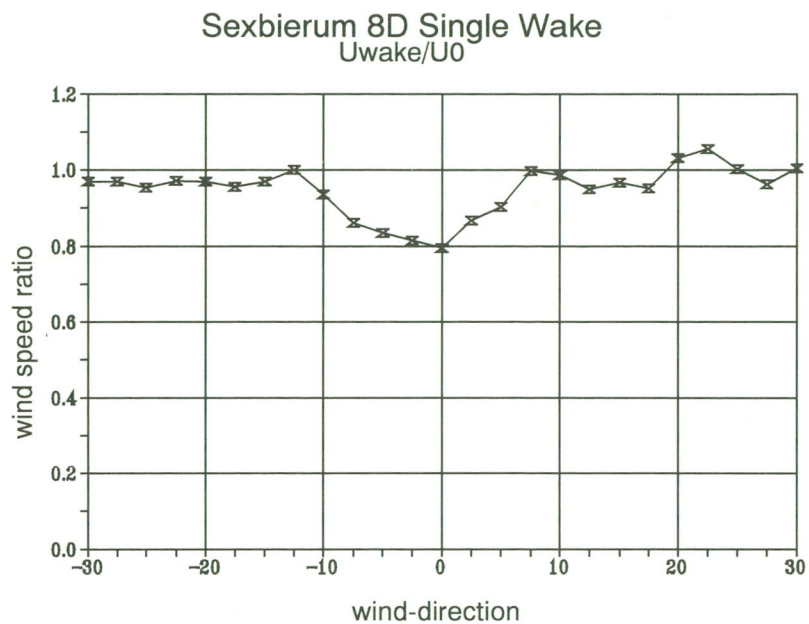
Figuur 4.7 Het berekende zogprofiel van de turbulentie, genormeerd met de gemiddelde windsnelheid van de ongestoorde stroming, σ_{wake}/U_0 op 4D. De gebruikte invoergegevens komen overeen met de condities waaronder gemeten is in Nibe



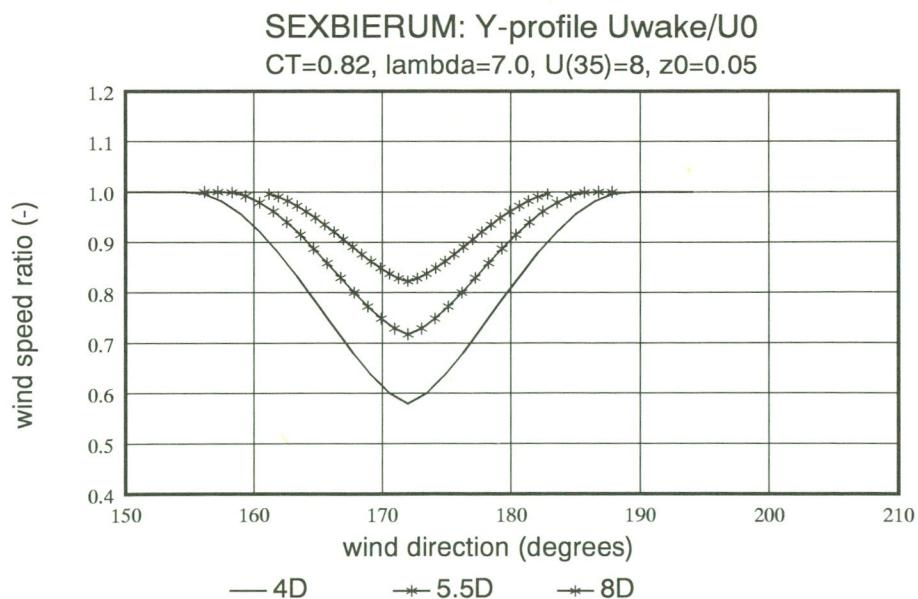
Figuur 4.8 Het zogprofiel van de dimensieloze gemiddelde windsnelheid U_{wake}/U_0 gemeten op 4D te Sexbierum. De anemometers A2, B1, B3, C2, B2H en B2L bevonden zich op verschillende posities op hoogten tussen 23 en 47 m



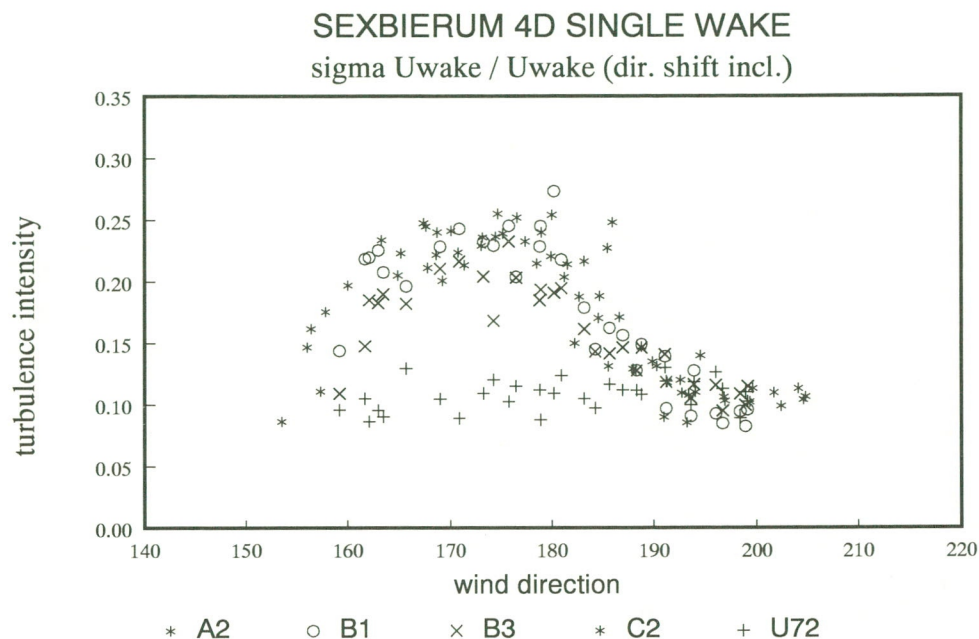
Figuur 4.9 Het zogprofiel van de dimensieloze gemiddelde windsnelheid U_{wake}/U_0 gemeten op 5.5D te Sexbierum. De anemometer bevond zich op ashoogte (35 m)



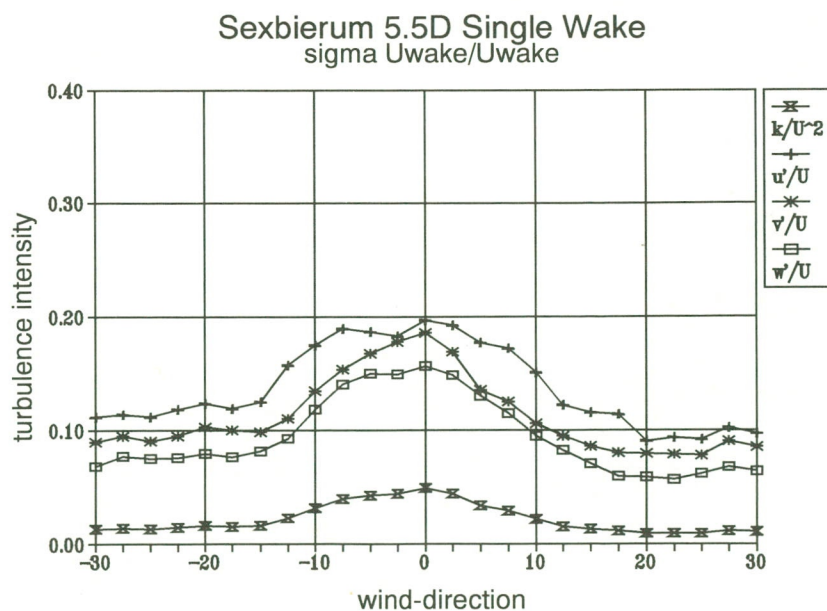
Figuur 4.10 Het zogprofiel van de dimensieloze gemiddelde windsnelheid U_{wake}/U_0 gemeten op 8D te Sexbierum. De anemometer bevond zich op ashoogte (35 m)



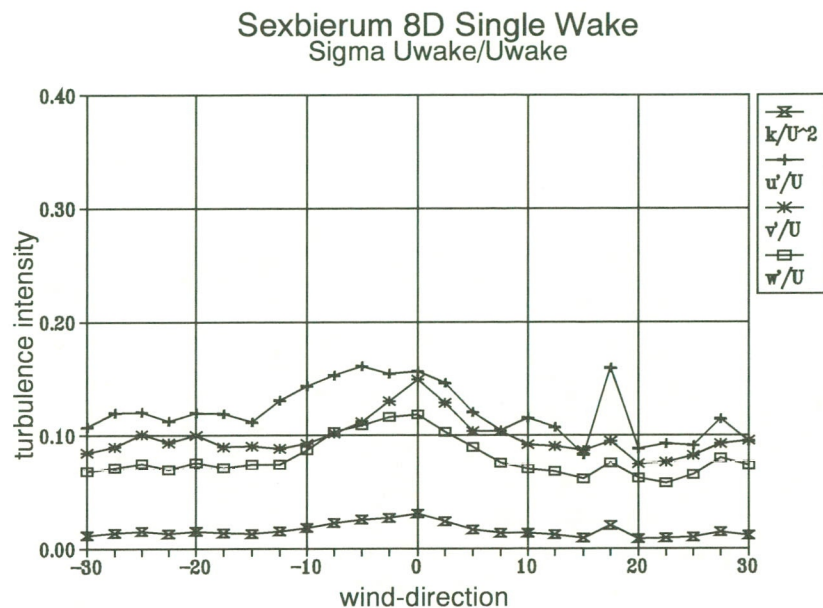
Figuur 4.11 Het berekende zogprofiel van de dimensieloze gemiddelde windsnelheid U_{wake}/U_0 op 4, 5.5 en 8D. De gebruikte invoergegevens komen overeen met de condities waaronder gemeten is in Sexbierum



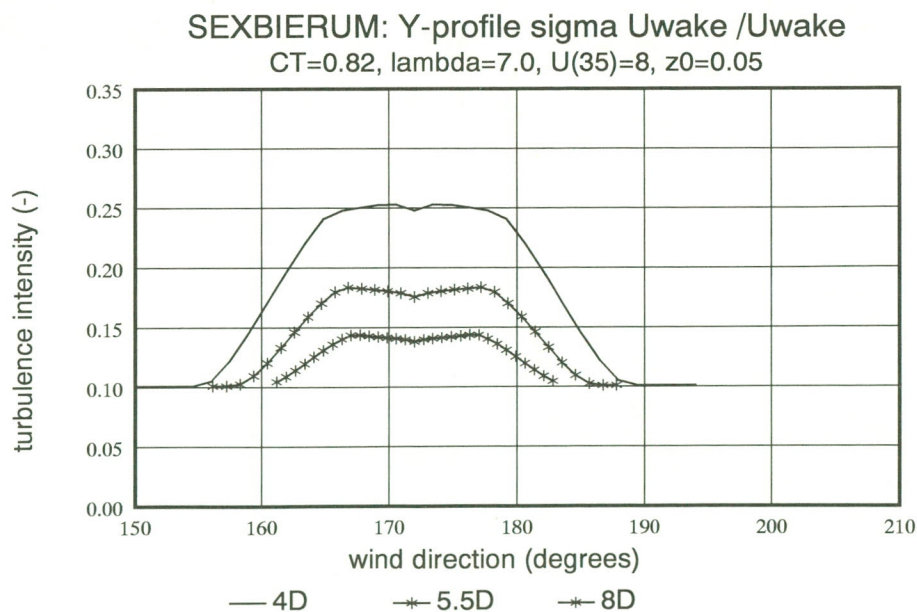
Figuur 4.12 Het zogprofiel van de turbulentie, genormeerd met de gemiddelde windsnelheid op dezelfde positie in het zog, σ_{wake}/U_{wake} , gemeten op 4D te Sexbierum. De anemometers A2, B1, B3 en C2 bevonden zich op verschillende posities op hoogten tussen 23 en 47 m. De kruisjes geven de waarden gemeten in de ongestoorde situatie



Figuur 4.13 Het zogprofiel van de turbulentie, genormeerd met de gemiddelde windsnelheid op dezelfde positie in het zog, σ_{wake}/U_{wake} , gemeten op 5.5D te Sexbierum. De anemometer bevond zich op ashoogte (35 m)



Figuur 4.14 Het zogprofiel van de turbulentie, genormeerd met de gemiddelde windsnelheid op dezelfde positie in het zog, σ_{wake}/U_{wake} , gemeten op 8D te Sexbierum. De anemometer bevond zich op ashoogte (35 m)



Figuur 4.15 Het berekende zogprofiel van de turbulentie, genormeerd met de gemiddelde windsnelheid op dezelfde positie in het zog, σ_{wake}/U_{wake} op 4, 5.5 en 8D. De gebruikte invoergegevens komen overeen met de condities waaronder gemeten is in Sexbierum