

**GUSTO :**  
**toepassing van vlaagtheorie**  
**op windmetingen en verwachtingen**

*Ben Wichers Schreur en Gertie Geertsema*

**Scientific report = wetenschappelijk rapport; WR 2006-05**

De Bilt, 2006

PO Box 201  
3730 AE De Bilt  
Wilhelminalaan 10  
De Bilt  
The Netherlands  
<http://www.knmi.nl>  
Telephone +31(0)30-220 69 11  
Telefax +31(0)30-221 04 07

Auteurs: Wichers Schreur, B.  
Geertsema, G.





# **GUSTO: toepassing van vlaagtheorie op windmetingen en verwachtingen**

*Ben Wichers Schreur*

*Gertie Geertsema*



## Samenvatting

Bij de bepaling van de windbelasting op constructies en voertuigen spelen windvlagen een belangrijke rol. Windvlagen zijn de extremen van het turbulente, stochastische windveld. De waarschijnlijkheid waarmee een windvlaag optreedt is te bepalen uit het spectrum van de windsnelheidsfluctuaties. De kansdichtheidsverdeling van windvlagen kan vergeleken worden met het risicoprofiel van een constructie of voertuig om een aanvaardbare windbelasting te bepalen of een waarschuwniveau bij windvlaagverwachtingen.

Een meting van een windvlaag kan, net als het gedrag van een constructie of voertuig, gezien worden als de response van een filter op het aangeboden windveld. Bij de vertaling van gerapporteerde windvlagen naar specifieke toepassingen dient daarom rekening te worden gehouden met de karakteristiek van het windveld (spectrum of kansdichtheid), de karakteristiek van de meting (instrumenteigenschappen, vlaglengte, meetinterval) en de karakteristiek van de toepassing (lengteschaal, hoogte, risicoprofiel.)

De windvlaagtheorie van Wieringa [Wieringa, 1973] is op dit moment de basis voor de herleiding van windvlaagmetingen en de uitgifte van windvlaagverwachtingen op het KNMI. In

deze theorie wordt niet de volledige kansdichtheidsverdeling van windvlagen gemodelleerd, maar slechts de mediane maximale windvlaag. De theorie modelleert niet expliciet alle karakteristiek van het windveld, de windmeting en de response van constructies en voertuigen. Dit is een beperking van de mogelijke toepassingen van de theorie en van het gebruik van windmetingen en verwachtingen.

In deze rapportage wordt een windvlaagtheorie afgeleid op basis van eerder werk van Beljaars [Beljaars, 1983] waarin deze karakteristiek wel worden gemodelleerd en waarin een volledige beschrijving van de kansdichtheidsverdeling van windvlagen wordt gegeven. De kracht van deze benadering wordt gedemonstreerd aan de hand van toepassingen, waaronder de vergelijking van de numerieke modellering van verstoringen van het windklimaat door bebouwing met historische windmeetreeksen en de afleiding van een equivalente windvlaagrapportage uit numerieke weermodellen. Op grond van de brede toepasbaarheid pleiten de auteurs voor de vervanging van de Wieringa theorie door de Beljaars theorie.

Deze rapportage is een deelresultaat van het project GUSTO dat de numerieke modellering van windvlagen beoogt.



*Figure 12: De invloed van onstabieleit op de  
variantieverhouding, karakteristieke  
tijdschaal en vlagfactor 21*

## Inhoudsopgave

**Bibliografie 23**

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Fenomenologie van turbulentie en windvlagen	1
1.2	De oppervlaktelaag	1
	<i>Figure 1: Verdeling van gemeten windvlagen onder neutrale condities</i>	2
<b>2</b>	<b>Het windvlag model</b>	<b>3</b>
2.1	Windspectrum, windsnelheidsvariatie en windvlag	3
<b>3</b>	<b>De meting van de windvlag</b>	<b>5</b>
3.1	Invloed van de windmeetketen	5
	<i>Figure 2: De verhouding van de gemeten variantie tot de werkelijke variantie van het windspectrum</i>	6
	<i>Figure 3: De karakteristieke tijdschaal van het gemeten windspectrum</i>	6
	<i>Figure 4: Model van de mediane maximale windvlag in de meting</i>	7
<b>4</b>	<b>Toepassingen van vlagtheorie</b>	<b>9</b>
4.1	Relaties voor de herleiding van windmeetreeksen	9
4.2	Bepaling van de verstoring van de wind op de luchthaven Schiphol	10
4.3	Het gebruik van vlagtijd en vlaglengte voor de vertaling van operationele metingen naar specifieke toepassingen	10
	<i>Figure 5: Resultaten van modelberekeningen bij positie 01L</i>	11
	<i>Figure 6: Herleide windmetingen op windmeetmast 01L van de luchthaven Schiphol</i>	12
	<i>Figure 7: Richtingsafhankelijkheid van de terreinruwheid voor de meetposities op de luchthaven Schiphol</i>	13
4.4	Reconstructies	14
4.5	Vlaagverwachtingen	16
	<i>Figure 10: Windsnelheid en dwarswind op positie 19R ten tijde van het ongeval met de PH-TKC</i>	17
4.6	Vlaagverwachtingen uit een numeriek weervoorspellingsmodel	18
4.7	Verificatie	19
	<i>Figure 11: Vlagen en vlagfactoren berekend uit TKE van het 22km HIRLAM</i>	20





# 1. Inleiding

## 1.1 Fenomenologie van turbulentie en windvlaggen

De wind in de onderste tientallen meters van de atmosfeer is belangrijk voor een breed scala aan (economische) activiteiten. Zo is bijvoorbeeld de vermogensopbrengst van windmolens evenredig met de derde macht van de windsnelheid en is de windbelasting bepalend voor de dimensionering van de beglazing en gevelbeplating van gebouwen. Niet alleen de gemiddelde wind is van belang. Ook de variabiliteit van de wind, gekoppeld aan de dynamische eigenschappen van constructies en voertuigen is bepalend voor het gedrag van deze constructies en voertuigen. Constructies worden door wisselende windbelasting blootgesteld aan piekbelastingen en vermoeingsgevaar, voertuigen worden moeilijker bestuurbaar.

De variabiliteit van de wind is een direct gevolg van de turbulente menging van impuls in de atmosferische grenslaag. Turbulentie is al lang een onderwerp van diepgaand onderzoek [Reynolds, 1894]; [Taylor, 1915]. Al dit onderzoek heeft vooral geleid tot inzicht in de effecten van turbulentie, meer dan tot inzicht in de ware aard van turbulentie waaruit deze effecten af te leiden zouden zijn. Tennekes en Lumley [Tennekes en Lumley, 1972] definiëren turbulentie aan de hand van een aantal karakteristieke eigenschappen. De belangrijkste eigenschap van turbulentie is wellicht dat turbulentie essentieel stochastisch is: zij onttrekt zich aan een deterministische beschrijving.

In een gangbare opvatting wordt turbulentie gezien als een superpositie van wervels van allerlei grootte, verbeeld door L.F. Richardson:

Big whirls have little whirls,  
Which feed on their velocity;  
And little whirls have smaller whirls,  
And so on to viscosity.

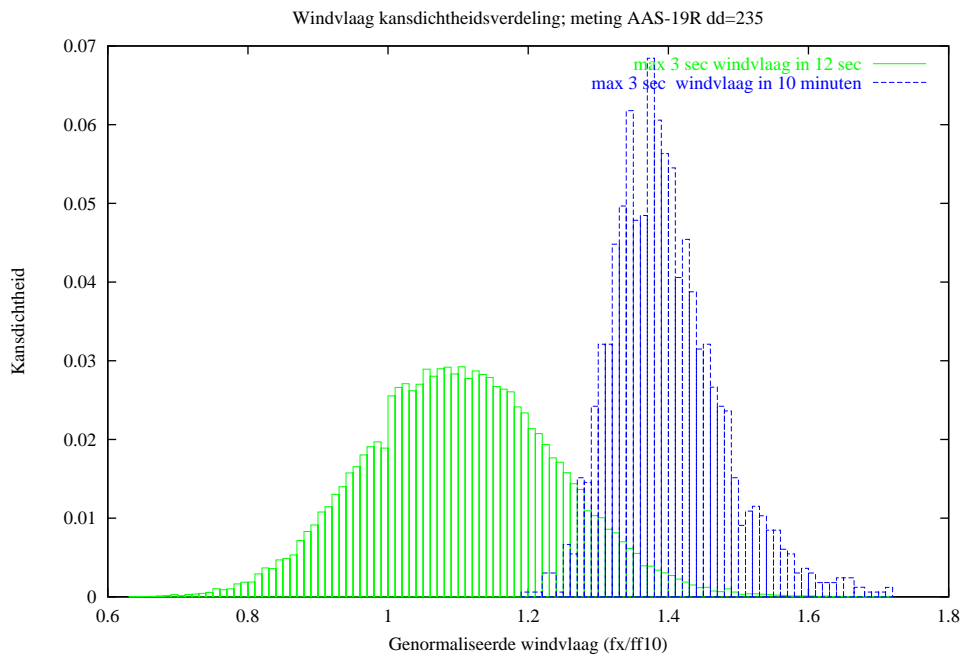
Door de snelheden die de wervels induceren en de wervelstrekkingen die hiervan het gevolg zijn wordt energie in een cascade overgedragen van grote op steeds kleinere wervels om uiteindelijk bij de kleinste schalen door moleculaire viscositeit gedissipeerd te worden. In de atmosferische grenslaag zijn de afmetingen  $l$  van de grootste wervels die de cascade aandrijven van dezelfde orde van grootte als de diepte van de grenslaag, terwijl de kleinste wervels een typische afmeting  $\eta$ , de Kolmogorov microschaal, hebben van 1 mm:  $\eta \sim R^{-\frac{3}{4}} l = \left(\frac{u}{\nu}\right)^{-\frac{3}{4}} l$

[Tennekes en Lumley, 1972] De maximale frequentie van de forcering waaraan constructies en ook elk meetinstrument wordt onderworpen door de werking van van deze wervels is dan van de orde van 1 kHz:  $f = \frac{u}{\eta}$ .

Het stochastische karakter van turbulentie, met de kleine ruimteschalen en snelle fluctuaties, maken een deterministische beschrijving onmogelijk, laat staan een deterministische voorspelling. Het is daarom noodzakelijk turbulentie en de daaruit resulterende variabiliteit van de wind op statistische wijze te karakteriseren. De grootte die daar in de praktijk voor gebruikt wordt is de windvraag: de maximale windsnelheid over een meetinterval, typisch enkele seconden lang, binnen een waarnemingstermijn of een verwachtingstermijn van typisch een tiental minuten. Het is van belang bij het opstellen van een verwachting en bij het interpreteren van waarnemingen zich te realiseren dat een windvraag een statistische grootte is. In een verwachting is de windvraag de maximale windsnelheid die met een bepaalde waarschijnlijkheid zal optreden; bij waarnemingen is de opgetreden windvraag een realisatie van een scala van mogelijke windvragen met elk een waarschijnlijkheid van optreden, die bepaald is door het karakter van de turbulentie. Figuur 1 geeft een voorbeeld van een gemeten waarschijnlijkheidsverdeling van windvragen bij harde wind over vlak terrein en onder neutrale stabiliteitscondities. Deze verdeling is sterk gepiekt en scheef. De meest waarschijnlijke windvraag is goed bepaald, maar aanzienlijke afwijkingen zijn niet onwaarschijnlijk.

## 1.2 De oppervlaktelaag

De voornaamste bronnen van turbulente kinetische energie in de atmosferische grenslaag zijn windschering en convectie. Voor de bepaling van windvragen aan het oppervlak boven uniform vlak terrein kunnen andere productiemechanismen, zoals grootschalige variaties in de orografie, variaties in de oppervlakteruwheid, de circulatie rond wolken en de faseovergangen in wolken, buiten beschouwing worden gelaten. Windschering en diensgevolge de mechanische productie van turbulente kinetische energie zijn het sterkst direct aan het aardoppervlak, waar de wind wordt afgeremd door de terreinruwheid. Bij toenemende windsterkte neemt, door het toenemen van de windschering, het belang van de mechanische productie van turbulente kinetische energie toe. Bij toenemende hoogte boven het oppervlak neemt door de afname van de windschering het belang van de mechanische productie van turbulente kinetische energie af. Het relatieve belang van de mechanische productie van turbulente kinetische energie



Figuur 1: Verdeling van gemeten windvlagen onder neutrale condities.

Gemeten kansdichtheidsverdeling van windvlagen (Luchthaven Schiphol, positie 19R, windrichting 235°.) De verdeling van instantane windvlagen is bij goede benadering Gaussisch. De verdeling van de maximale windvlaag in een tijdsinterval is een functie van de lengte van dit tijdsinterval. Naarmate het interval groter wordt verschuift de centrale waarde naar hogere vlagwaarden en wordt de verdeling scheef. De (groene) verdeling voor een 12 seconden interval is nog nagenoeg Gaussisch, de (blauwe) verdeling voor een 10 minuten interval is duidelijk scheef.

ten opzichte van de convectieve productie van turbulente kinetische energie kan voor de oppervlaktelaag bepaald worden aan de hand van schalingsoverwegingen, zoals deze voor het eerst door Monin en Obukhov [Monin en Obukhov, 1954] gegeven zijn.

De oppervlaktelaag, het onderste deel van de aardse atmosfeer, is hierbij in kwalitatieve zin gedefinieerd als de laag direct aan het oppervlak waarin de verticale variaties van de verticale fluxen verwaarloosbaar zijn. De oppervlaktelaag wordt in praktische zin dan ook gedefinieerd als de laag waarbinnen de fluxen minder dan 10% afwijken van hun waarde aan het oppervlak. Ruwweg komt daarmee de oppervlaktelaag overeen met de onderste 10% van de atmosferische grenslaag. In het bijzonder wordt de impulsflux, gekarakteriseerd door de schuifspanning  $\tau$  constant verondersteld, gelijk aan de waarde die deze aan het oppervlak heeft. Een gevolg van het constant zijn van de schuifspanning is dat in de oppervlaktelaag de windrichting nagenoeg onafhankelijk is van de hoogte.

De verticale profielen van de gemiddelde grootheden worden bepaald door de fluxen aan het oppervlak: de schuifspanning aan het oppervlak  $\tau_0$  en de warmteflux  $H$ , en door de randvoorwaarde gegeven door de terreinruwheid  $z_0$ . De schalingparameters in de Monin-Obukhov theorie zijn  $u_*$ , de wrijvingsnelheid, en  $\mathcal{L}$ , de Monin-Obukhov lengte. Hierin is

$u_*$  een snelheid gebaseerd op de schuifspanning:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (1.1)$$

en is  $\mathcal{L}$  een functie van de warmteflux  $H$  en de wrijvingsnelheid  $u_*$ . In de oppervlaktelaag zijn dus  $u_*$  en  $\mathcal{L}$ , net als de fluxen (nagenoeg) constant. Per definitie is  $\mathcal{L}$  in onstabiele omstandigheden negatief. Onder die omstandigheden is  $|\mathcal{L}|/10$  ruwweg de hoogte waarop de mechanische en de convectieve productie van turbulentie gelijk zijn. De waarde van  $\mathcal{L}$  kan erg groot zijn onder de condities van harde wind en weinig zon ( $\mathcal{L} \sim 1000$  m.) In die gevallen is in de onderste tientallen meters van de atmosfeer,  $z \ll |\mathcal{L}|/10$ , de mechanische productie van turbulentie zozeer dominant dat convectieve effecten daar verwaarloosd mogen worden. Omdat de grootste windvlagen, voor zover ze niet gerelateerd zijn aan het voorkomen van buien, onder harde windcondities optreden zal in de verdere bespreking van windvlagen van deze omstandigheden worden uitgegaan. Verondersteld wordt dat de lezer zich daarbij rekenschap geeft van de beperkingen die de gehanteerde aannames introduceren.

## 2. Het windvlaag model

### 2.1 Windspectrum, windsnelheidsvariatie en windvlaag

Het windspectrum, de windsnelheidsvariatie en de windvlaag kunnen aan elkaar worden gerelateerd. De onderstaande afleiding van deze relatie volgt in hoofdlijnen Beljaars [Beljaars, 1983]. Hoewel turbulentie geen strikt gaussisch stochastisch proces is, is uit onderzoek toch vast komen te staan dat de fluctuaties van de snelheidscomponenten in het geval van neutrale stratificatie van de atmosfeer gaussisch verdeeld zijn. In figuur 1 is een dergelijke gemeten verdeling weergegeven. De gaussische snelheidsverdeling in normaalvorm is gegeven door:

$$\varphi(\tilde{u}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\tilde{u}^2}{2}\right) \quad (2.1)$$

Hierin is  $\tilde{u}$  de genormaliseerde longitudinale snelheidsfluctuatie:

$$\tilde{u} = \frac{u(t) \cdot U}{\sigma_u} \quad (2.2)$$

De standaarddeviatie  $\sigma_u$  van de fluctuaties kan behalve uit directe metingen aan de snelheidsfluctuaties ook bepaald worden uit een spectrale analyse van de verdeling  $S_u(f)$  van de energie in het snelheidssignaal over de frequenties  $f$ :

$$\sigma_u^2 = \int_0^\infty S_u(f) df \quad (2.3)$$

Spectra van atmosferische turbulentie zijn in veldexperimenten bepaald. Kaimal et al. [Kaimal et al., 1972] geven voor het spectrum van de longitudinale snelheidsfluctuaties in de neutrale atmosferische grenslaag

$$\frac{f S_u(f)}{u_*^2} = \frac{105 f^+}{(1 + 33 f^+)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.4)$$

$$f^+ = \frac{f z}{U} \quad (2.5)$$

Voor dit spectrum geeft integratie van vergelijking 2.3

$$\sigma_u = \left[ \frac{105}{33} \cdot \frac{3}{2} \right]^{1/2} \cdot u_* = 2.185 \cdot u_* \quad (2.6)$$

Voor atmosferische turbulentie geldt in het algemeen dat de fluctuaties 10-20% zijn van de gemiddelde windsnelheid. Het is eenvoudig aan te tonen dat daaruit volgt dat de longitudinale fluctuaties  $\sigma_u$  nagenoeg gelijk zijn aan de totale windsnelheidsfluctuaties  $\sigma_M$ .

Voor een stochastisch proces  $\tilde{u}$  met een normale waarschijnlijkheidsverdeling  $\varphi(\tilde{u})$  en een spectrum  $S_u(f)$  is de kans op een extreme waarde  $\tilde{u}_x$  kleiner dan een limietwaarde  $g$  in een tijdsinterval  $T$  bepaald door [Dyhr-Nielsen, 1972]

$$P(\tilde{u}_x < g) = \Phi(g) \exp\left(-\frac{T}{\tau} \frac{\varphi(g)}{\Phi(g)}\right) \quad (2.7)$$

waarin  $\Phi$  de integraal is van de gaussische verdeling

$$\Phi(g) = \int_{-\infty}^g \varphi(x) dx = 1 - \frac{\text{erfc}(g/\sqrt{2})}{2} \quad (2.8)$$

en  $\tau$  de karakteristieke tijdschaal van het windsnelheidsspectrum

$$\tau = \left[ \frac{\int_0^\infty S(f) df}{2\pi \int_0^\infty f^2 S(f) df} \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

De variabele  $g$  is de genormaliseerde windvlaag behorende bij de gekozen waarde van  $P$ . In het algemeen zal  $g$  groot zijn,  $g > 2$ , en is  $\Phi(g) \cong 1$ . Uit vergelijking 2.7 volgt dan

$$g = \left[ 2 * \ln \left\{ \frac{T}{\tau} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln(\frac{1}{P})} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

Als nu  $R(\tilde{u}_x \geq g)$  het toegestane risico is, dat op een netwerk van  $n$  stations onder identieke omstandigheden de maximale windvlaag groter is dan  $g$ , dan moet voor de individuele stations gelden  $P \geq (1 - R)^{1/n}$  en dus

$$g = \left[ 2 * \ln \left\{ \frac{T}{\tau} \frac{n}{\sqrt{2\pi} \ln(1 - R)} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

De te verwachten genormaliseerde windvlaag is dus een functie van het risico  $R$ , het aantal stations  $n$ , de lengte van het verwachtingsinterval  $T$  en de karakteristieke tijdschaal  $\tau$  van de turbulentie. Na invertering van de normalisatie vergelijking 2.2 volgt voor de windvlaag  $G$

$$G = U \left( 1 + g \frac{\sigma_u}{U} \right) = U \left( 1 + g A \frac{u_*}{U} \right) \quad (2.12)$$

waarbij gebruik is gemaakt van vergelijking 2.6 en  $A = 2.185$ . Een alternatieve formulering voor de windvlaag  $G$ , volgend uit de numerieke gelijkheid van  $\sigma_u$  en  $\sigma_M$ , is

$$G = U \cdot (1 + g \cdot I) \quad (2.13)$$

waarin  $I$  de turbulentie intensiteit is

$$I = \frac{\sigma_M}{U} \quad (2.14)$$

De variatie van de windsnelheid met de hoogte in puur mechanische turbulentie wordt gegeven door het logaritmisch windprofiel

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2.15)$$

Hierin is  $\kappa = 0.4$  de von Karman constante en  $d$  de verdringingsdikte, welke typisch 0.7 tot 0.8 maal de hoogte van de individuele ruweheidselementen is. De verdringingsdikte kan normaal gesproken verwaarloosd worden ten opzichte van de hoogte  $z$ . Daar waar dit niet het geval is zal ook niet aan de eerdere aanname van een uniform terrein worden voldaan. Met het logaritmisch windprofiel wordt de vergelijking voor de windsnelheidsfluctuaties

$$\frac{\sigma_u}{U} = \frac{A \cdot \kappa}{\ln \left( \frac{z}{z_0} \right)} \quad (2.16)$$

en de vergelijking voor de windvraag uiteindelijk

$$G = U \cdot \left( 1 + g \cdot \frac{A \cdot \kappa}{\ln \left( \frac{z}{z_0} \right)} \right) \quad (2.17)$$

De feitelijke windvraag is dus ook nog een functie van de windsnelheid  $U$ , de hoogte boven het terrein  $z$  en de terreinruwheid  $z_0$ .

De oplettende lezer zal intussen opgemerkt hebben dat voor het aangenomen neutrale windspectrum de integraal in de noemer van vergelijking 2.9 niet convergeert en derhalve de karakteristieke tijdschaal  $\tau = 0$  en de windvraag  $g \rightarrow \infty$ . Dit is het directe, niet realistische gevolg van het feit dat het spectrum wel de energiecascade beschrijft maar niet de visceuze dissipatie op de Kolmogorov microschaal. Voor praktische toepassingen van de hier gegeven afleiding is dit echter geen belemmering. De responsies van constructies en voertuigen op forceringen door de turbulente wind kennen hun eigen tijdschalen, die gedictieerd worden door eigenschappen zoals afmeting, massa draagbaarheid, stijfheid en demping. Deze tijdschalen bepalen de kleinste schalen en frequenties in het turbulente windsnelheidsveld die relevant zijn voor de forcering van deze constructies en voertuigen. Deze tijdschalen bepalen ook de maatgevende windvraag. Typisch zijn deze schalen enkele ordes groter dan de kleinste schalen in de turbulentie. De precieze vorm van het spectrum bij hoge frequenties doet dan niet meer ter zake. Aan de hand van de response van het windmeetsysteem wordt hier in hoofdstuk 3 nader ingegaan.

### 3. De meting van de windvlaag

#### 3.1 Invloed van de windmeetketen

Het gedrag van een systeem in reactie op een uitwendige forcering is gegeven door de overbrengingsverhouding, ook wel transfer functie genaamd,

$$H = \frac{\text{output}}{\text{input}} \tag{3.1}$$

Voor eenvoudige systemen is het gedrag en dus  $H$  a priori vast te stellen. Meer complexe systemen zijn soms te reduceren tot een samenstel van eenvoudige systemen. Voor systemen die zich aan analyse onttrekken omdat ze te complex zijn, of omdat ze feitelijk een zwarte doos zijn, is de response te bepalen door, zoals vergelijking 3.1 al aangeeft het uitgangssignaal te bepalen bij verschillende ingangssignalen. Uit  $H$  kan de vermogenoverbrengingsverhouding  $|H|^2$  voor alle frequenties  $f$  bepaald worden

$$|H(f)|^2 = \frac{S_{out}(f)}{S_{in}(f)} \tag{3.2}$$

Voor de eenvoud van de discussie wordt  $|H|^2$  verder de response functie genoemd.

Met vergelijkingen 3.2 en 2.3 kan direct de verhouding tussen de varianties van het ingangs- en het uitgangssignaal bepaald worden

$$\left(\frac{\sigma_{out}}{\sigma_{in}}\right)^2 = \frac{\int_0^\infty S_{out} df}{\int_0^\infty S_{in} df} = \frac{\int_0^\infty |H(f)|^2 S_{in} df}{\int_0^\infty S_{in} df} \tag{3.3}$$

Een windsnelheidsmeetsysteem zoals bij het KNMI gebruikt wordt kan beschreven worden als een serieschakeling van drie eenvoudige systemen: een cup anemometer, een pulsenteller en een looptijdfilter.

De cup anemometer is een eerste orde systeem: de versnelling van de anemometer is recht evenredig met het verschil tussen de windsnelheid en de omloopsnelheid van de anemometer. Traditioneel wordt de response van een anemometer gegeven door de aanspreeklenkte  $l$ , de afstand die de wind heeft afgelegd in de tijd dat de anemometer is versneld tot  $(1 - e^{-1})$  maal het oorspronkelijke snelheidsverschil. De response functie van de anemometer wordt gegeven door

$$|H_A(f)|^2 = \frac{1}{1 + (2\pi f \frac{l}{U})^2} \tag{3.4}$$

Hierbij is geen rekening gehouden met niet-lineaire effecten, zoals 'overspeeding' van de anemometer, die voornamelijk

voorkomen bij hogere windsnelheden. Voor de operationele cup anemometers van het KNMI is  $l = 3.0$  m.

De pulsenteller is op te vatten als een samengesteld systeem, dat bestaat uit een looptijdfilter met een integratietijd gelijk aan het bemonsteringsinterval  $\Delta t$  en een digitale bemonstering met een frequentie  $f = 1/\Delta t$ . Door het digitale bemonsteren wordt het ingangsspectrum gediscrètiseerd en afgekapt bij de zogenaamde Nyquist frequentie  $f_c = 1/2\Delta t$ . Het vermogen bij frequenties hoger dan de Nyquist frequentie wordt teruggevouwen, ge'aliased', naar de lagere frequenties. Daardoor wordt de integraal van het vermogen en dus de variantie van het signaal niet aangetast. De bemonsteringsfrequentie die door het KNMI operationeel wordt toegepast is 4 Hz. Deze is van dezelfde orde van grootte als de maximale frequenties die door de anemometer worden doorgelaten en is aanzienlijk hoger dan de frequenties die door het uiteindelijke looptijdfilter worden doorgelaten. De effecten van de bemonstering zijn daarom verwaarloosbaar en de signalen en spectra kunnen als continu blijven worden beschouwd. De response functie van een looptijdfilter met een integratietijd  $t$  wordt gegeven door

$$|H_R(f)|^2 = \left(\frac{\sin(\pi f t)}{\pi f t}\right)^2 \tag{3.5}$$

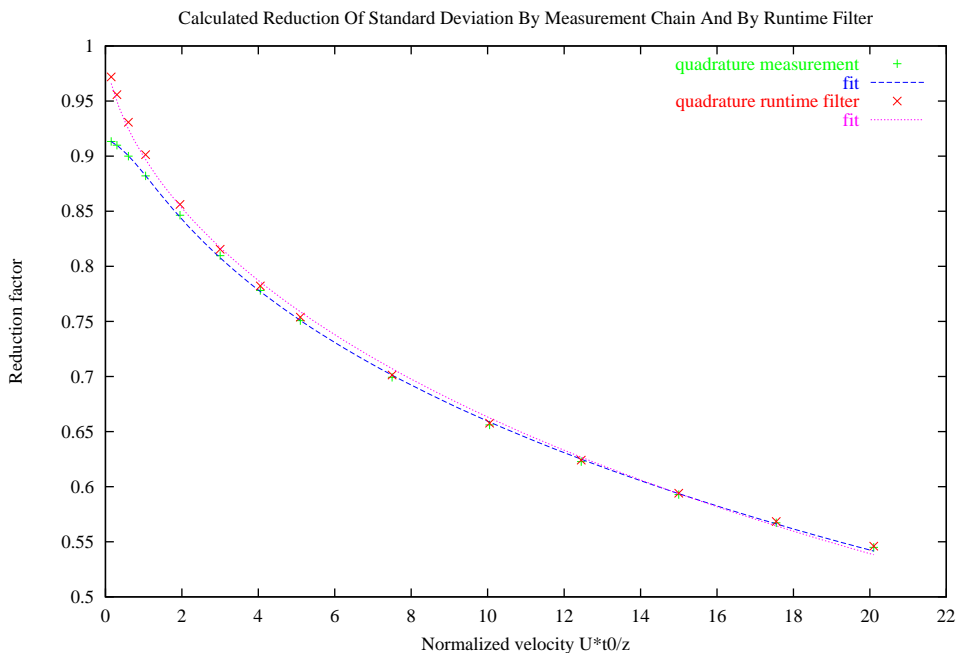
Operationeel is  $t = 3$  s.

Het uitgangsspectrum  $S_m$  van de operationele windmeetketen van het KNMI in reactie op een aangeboden neutraal windspectrum kan dus worden bepaald als

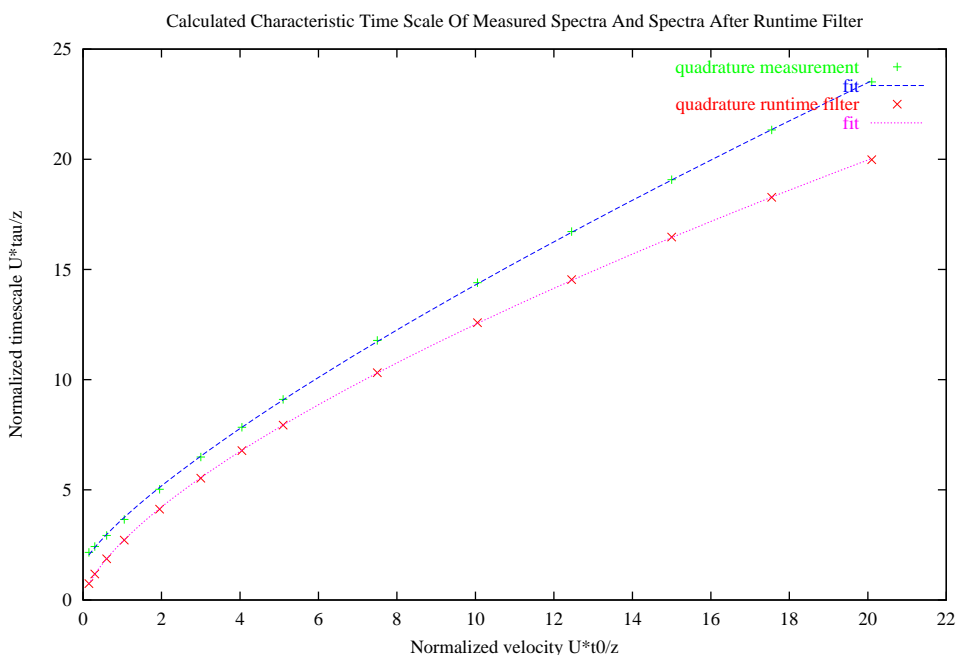
$$S_m(f) = \left(\frac{\sin(\pi f t)}{\pi f t}\right)^2 \left(\frac{\sin(\pi f \Delta t)}{\pi f \Delta t}\right)^2 \frac{1}{1 + (2\pi f \frac{l}{U})^2} S_u(f) \tag{3.6}$$

Hiermee kan door numerieke integratie van vergelijking 3.3 de verhouding tussen de gemeten variantie en de werkelijke variantie worden bepaald. Net zo kan door numerieke integratie van vergelijking 2.9 de karakteristieke tijdschaal van het gemeten spectrum worden bepaald. In figuur 2 en figuur 3 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven. Uit de variantieverhouding en de karakteristieke tijdschaal van de meting kan met vergelijkingen 2.17 en 2.10 de maximale windvlaag worden berekend, die met een frequentie  $P$  in de metingen te verwachten is. In figuur 4 is dit weergegeven voor de mediane windvlaag,  $P = 0.5$ , in een tijdsinterval  $T = 600$  s. in vergelijking met de theorie van Wieringa [Wieringa, 1973]

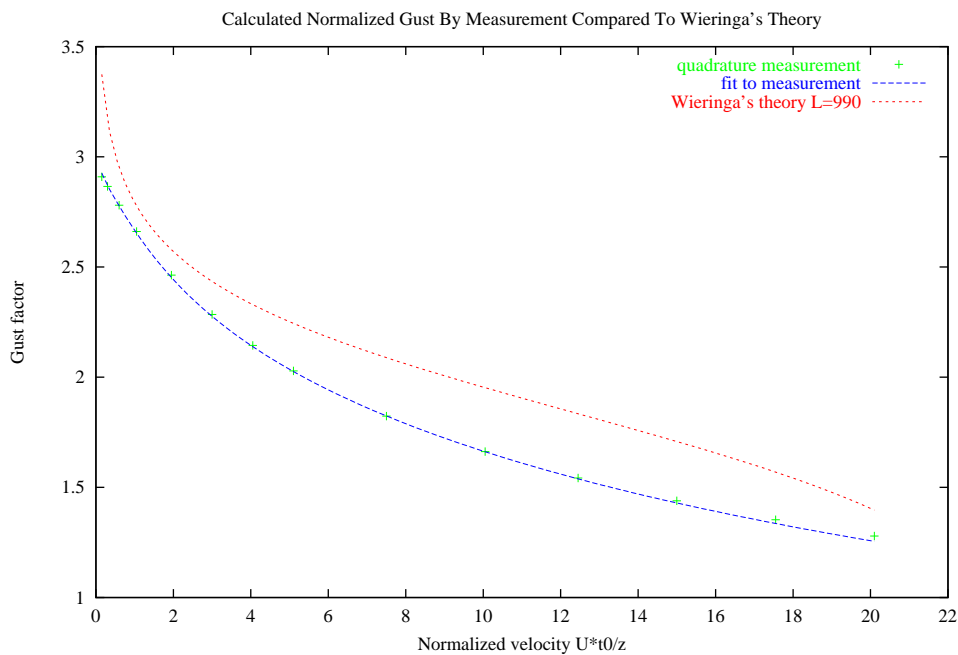
$$g = 1.42 + 0.3013 \cdot \ln\left(\frac{990}{U \cdot t} \cdot 4\right) \tag{3.7}$$



Figuur 2: De verhouding van de gemeten variantie tot de werkelijke variantie van het windspectrum. De windmeetketen filtert de windsnelheidsvariaties. De demping door het meetsysteem is afhankelijk van de genormaliseerde windsnelheid. De verhouding  $r_{\sigma} = \sigma / \sigma_u$  wordt bij goede benadering gegeven door  $r_{\sigma} = \left(1 - 0.069 \cdot \exp\left(-2.3 \cdot \frac{U_{t0}}{z}\right)\right) \cdot \exp\left(-0.116 \cdot \left(\frac{U_{t0}}{z}\right)^{0.5555}\right)$ . Bij lage windsnelheden is de mechanische demping door de cup anemometer merkbaar, bij hoge windsnelheden wordt de reductie van de variantie geheel gedomineerd door het looptijdfilter.



Figuur 3: De karakteristieke tijdschaal van het gemeten windspectrum. In de integratie van vergelijking 3 is gebruik gemaakt van de parameters voor de operationele windmeetketen:  $t_0 = 3s$ ,  $z = 10m$ . Het verloop van deze tijdschaal  $\tau$  met de windsnelheid wordt benaderd voor de windmeetketen door  $\frac{U_{t0}}{z} = 1.57 + 2.094 \cdot \left(\frac{U_{t0}}{z}\right)^{0.784}$ . De traagheid van de anemometer draagt bij aan het verhogen van de karakteristieke tijdschaal van het gemeten windspectrum en vermindert daarmee volgens vergelijking 2.10 de gemeten maximale windvraag



Figuur 4: Model van de mediane maximale windvlaag in de meting.

De mediane maximale vlag wordt bepaald door vergelijking 2.10 met  $P = 0.5$ . De genormaliseerde maximale windvlaag neemt af met de windsnelheid op vergelijkbare wijze als in de operationeel gebruikte theorie van Wieringa. Het asymptotisch gedrag bij hoge en lage windsnelheid wijkt echter af. Analyse van Wieringa's theorie geeft aan dat deze theorie degenereert bij hoge windsnelheid.





## 4. Toepassingen van vlagtheorie

### 4.1 Relaties voor de herleiding van windmeetreksen

De effectieve ruwheid van het terrein bovenwinds van een waarnemingspunt beïnvloedt niet alleen de snelheidsvariaties op dat punt, maar ook de gemiddelde windsnelheid. Een ruwer oppervlak heeft een grotere afremming van de wind tot gevolg. Bij gelijke stromingscondities aan de top van de grenslaag vermindert de gemiddelde wind op een gegeven hoogte met toenemende ruwheid. Het effect van de ruwheid op de gemiddelde wind wordt weergegeven door een beschuttingsfactor

$$F(z) = \frac{U_p(z)}{U(z)} \quad (4.1)$$

de ratio tussen de potentiële windsnelheid  $U_p$  en de actuele windsnelheid  $U$ . De potentiële windsnelheid is hierin gedefiniëerd als de windsnelheid die geregistreerd zou zijn als het terrein bovenwinds van de meetpositie open zou zijn geweest met een standaard ruwheid  $z_{wmo} = 0.03$  m. (WMO norm, meting boven open grasland.) Met toenemende hoogte  $z$  boven het terrein benadert  $F$  de waarde 1. De hoogte waarop  $F$  gelijk is aan 1, binnen een gewenste nauwkeurigheid, wordt de 'blending height'  $z_b$  genoemd. De orde van grootte van  $z_b$  is typisch  $z_b \sim 100 \cdot z_0$ . Op basis van waarnemingen adviseert Wieringa [Wieringa, 1976]  $z_b = 60$  m. boven vlak terrein. Gebruik makend van de benadering  $F(z_b) \cong 1$  en het logaritmisch windprofiel, vergelijking 2.15, volgt voor  $F(z)$ :

$$F(z) = \frac{\ln(z/z_{wmo})}{\ln(z_b/z_{wmo})} \cdot \left(1 + \frac{\ln(z_b/z)}{\ln(z/z_0)}\right) \quad (4.2)$$

Met  $z_b = 60$  en  $z_{wmo} = 0.03$  kan, onder gebruikmaking van de relatie tussen de windsnelheidsvariaties en de ruwheid (vergelijking 2.16), de beschuttingsfactor in direct verband worden gebracht met de turbulentie intensiteit  $I$

$$F(z=10) = 0.764 \cdot (1 + 2.050 \cdot I) \quad (4.3)$$

In de bepaling van de verstoring van de wind door bebouwing wordt een windsnelheidsreductiefactor  $f$  gebruikt die de inverse is van de traditionele beschuttingsfactor  $F$

$$f = \frac{1}{F} \quad (4.4)$$

In deze afleiding is de windsnelheidsreductie boven ruw terrein ten opzichte van de potentiële wind bepaald. Voor de bepaling van de beschutting door bebouwing en de bepaling van de verstoring van de representativiteit van de windme-

ting is het juister de verstoorde meting te relateren aan de windsnelheid boven een terrein met vergelijkbare ruwheid (de 'mesoschaal' ruwheid), maar zonder de verstoring door bebouwing. De verstoring kan dan bepaald worden als de verhouding tussen de windsnelheidsreductie boven het open terrein en het terrein met bebouwing.

Uit de in hoofdstuk 2 en 3 afgeleide vergelijkingen volgen de voor de herleiding van de windmeetreksen bruikbare relaties

- de verhouding van de gemeten standaardafwijking van de windsnelheid tot de werkelijke standaardafwijking
- $$r_\sigma = \left(1 \cdot 0.069 \cdot \exp\left(-2.3 \cdot \frac{U \cdot t}{z}\right)\right) \cdot \exp\left(-0.116 \cdot \left(\frac{U \cdot t}{z}\right)^{0.555}\right) \quad (4.5)$$

- de relatie tussen de turbulentie intensiteit  $I$  en de gemeten standaardafwijking  $\sigma_m$  van de windsnelheid

$$I = \frac{1}{r_\sigma} \cdot \frac{\sigma_m}{U} \quad (4.6)$$

- de relatie tussen de effectieve terreinruwheid  $z_0$  en de turbulentie intensiteit  $I$

$$z_0 = z \cdot \exp\left(-\frac{A \cdot \kappa}{I}\right) \quad (4.7)$$

met  $z = 10$ ,  $A = 2.185$  en  $\kappa = 0.4$ .

- de relatie tussen de windsnelheidsreductiefactor  $f$  en de turbulentie intensiteit  $I$

$$f = \frac{1.308}{1 + 2.050 \cdot I} \quad (4.8)$$

Voor de interpretatie van de turbulentie intensiteit in termen van vlaggerigheid is verder het verband tussen de mediane maximale vlag  $G$  en de turbulentie intensiteit  $I$  van belang, vergelijking 2.13

$$G = U \cdot (1 + g \cdot I)$$

waarbij  $g$  voor de operationele windmeetketen bepaald kan worden uit figuur 4 of uit de pertinente vergelijkingen uit de voorgaande hoofdstukken.

## 4.2 Bepaling van de verstoring van de wind op de luchthaven Schiphol

Een voorbeeld van de toepassing van de herleiding van windmeetreeksen is de begeleiding door het KNMI van de modellering van de verstoringen van het windklimaat van de luchthaven Schiphol ten gevolge van de bebouwing op het luchthaventerrein. Een statistische analyse van historische windmeetreeksen is daarbij gebruikt om de berekeningen van een CFD (computational fluid dynamics) model te calibreren, valideren, interpreteren en evalueren. Figuur 5 geeft de resultaten van het CFD model voor de windmeetmast bij touchdown 01L weer.

Van maart 1996 tot en met maart 1999 zijn voor alle zes windmeetposities op de luchthaven Schiphol de door de SIAM modules verwerkte windwaarnemingen vastgelegd. Voor elk 12 seconden interval werden ondermeer de volgende parameters opgeslagen:

- $ff_{10}$ : de gemiddelde windsnelheid over de voorafgaande 10 minuten;
- $fx_{10}$ : de maximale 3 seconden windvlaag in de voorafgaande 10 minuten;
- $fsf_{10}$ : de standaardafwijking van de windsnelheid over de voorafgaande 10 minuten;
- $dd_{10}$ : de vector gemiddelde windrichting over de voorafgaande 10 minuten.

Gebruikmakend van vergelijkingen 4.5 en 4.6 zijn de gemeten standaarddeviaties herleid tot actuele genormaliseerde standaarddeviaties van de wind die onder de aannames van harde wind en een neutrale grenslaag onafhankelijk zijn van de actuele gemiddelde windsnelheid en gelijk zijn aan de turbulentie intensiteit. Voor elke windmeetpositie is de gemiddelde turbulentie intensiteit over de gehele 3 jarige periode per 5 graden windsector berekend voor windsnelheden groter dan 7 m/s.

Uit deze turbulentie intensiteit is voor alle meetposities uit de relatie tussen ruwheid en turbulentie, vergelijking 4.7, vervolgens de richtingsafhankelijke effectieve ruwheid berekend. De resultaten zijn weergegeven in figuur 6. De berekende ruwheden variëren van 2 cm bij aanstroming over open luchthaventerrein tot 20 cm voor aanstromingen beïnvloed door nabije bebouwing, figuur 7.

Deze waarden zijn consistent met in de literatuur gerapporteerde waarden voor vergelijkbare terreincondities. In figuur 6 zijn ook de uit vergelijking 4.8 voor de reductiefactor berekende windsnelheidsreducties ten opzichte van standaard WMO meetcondities weergegeven. De historische metingen wijken op het hele luchthaventerrein niet meer dan 10% af van de referentiewaarde onder WMO condities. Als de in het algemeen grotere mesoschaal ruwheid van de omgeving van

de luchthaven als referentiewaarde wordt genomen dan zijn de afwijkingen in de gemiddelde wind door de verstoringen van gebouwen kleiner. Deze conclusies zijn geldig voor de verstoringen op de historische windmeetposities en voor zover voldaan is aan de bij de herleiding gebruikte aanname dat de windmeting niet in het directe zog van de bebouwing verricht zijn. Uit de modelberekeningen blijkt echter dat door de huidige bebouwing wel degelijk grote verstoringen kunnen worden veroorzaakt op de banen, in het bijzonder bij posities 01R en 22.

## 4.3 Het gebruik van vlaagtijd en vlaaglengthe voor de vertaling van operationele metingen naar specifieke toepassingen

Strikt genomen is de gemeten en gerapporteerde windvlaag maatgevend voor constructies en voertuigen met een vergelijkbare karakteristieke tijdschaal als de windmeetketen. Om begrip te krijgen voor de verhouding van deze windvlaag tot maatgevende windvlagen voor constructies met andere tijden en lengteschalen is het nuttig om, conform Beljaars [Beljaars, 1983], de begrippen vlaagtijd en vlaaglengthe te introduceren. De vlaagtijd is gedefinieerd als de middellingstijd  $t_0$  van een looptijdfilter dat toegepast op het neutrale windspectrum een gelijke windvlaag oplevert als de windmeetketen;  $L_0 = Ut_0$  is dan de vlaaglengthe. Toepassing van vergelijking 2.9 op een neutraal windspectrum na een looptijdfilter levert een karakteristieke tijdschaal [Beljaars, 1983]

$$\tau(t_0) = \frac{z}{U} \cdot 2.644 \cdot \left( \frac{Ut_0}{z} \right)^{0.675} \quad (4.9)$$

Deze functionele relatie is bepaald uit een fit op het resultaat van de numerieke integratie. Op vergelijkbare wijze is voor het looptijdfilter de verhouding tussen de variantie van het uitgangssignaal en de variantie van hetingangssignaal te bepalen

$$\frac{\sigma(t_0)}{\sigma_u} = \exp \left[ -0.1057 \cdot \left( \frac{Ut_0}{z} \right)^{0.67} \right] \quad (4.10)$$

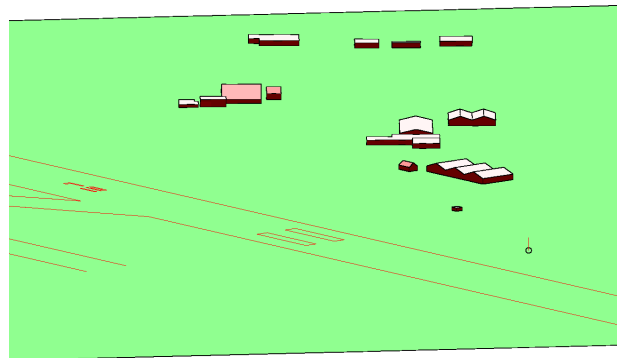
Als nu verondersteld mag worden dat voor een constructie of voor een voertuig de maatgevende windvlaag bepaald kan worden aan de hand van een equivalent looptijdfilter met looptijd  $t_c$ , waarbij  $t_c = L_c/U$  bepaald wordt uit een karakteristieke afmeting  $L_c$  van de constructie, c.q. het voertuig, dan volgt uit vergelijking 2.12 de verhouding tussen de voor deze constructie maatgevende vlag  $G_c$ , aangrijpend op een hoogte  $z_c$ , en de op een hoogte  $z_m$  gemeten vlag  $G_m$ , met een voor de meetketen kenmerkende vlaaglengthe  $L_m$  (figuur 8.)

$$\frac{G_c}{G_m} = \frac{U_c}{U_m} \cdot \frac{\left[ 1 + g_c \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_u} \right)_c \cdot \frac{\kappa A}{\ln \left( \frac{z_c}{z_{0c}} \right)} \right]}{\left[ 1 + g_m \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_u} \right)_m \cdot \frac{\kappa A}{\ln \left( \frac{z_m}{z_{0m}} \right)} \right]} \quad (4.11)$$

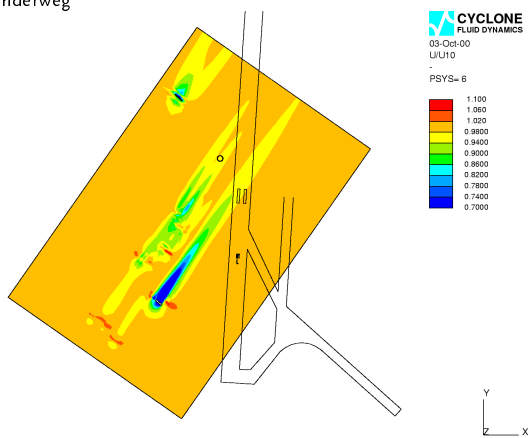
waarin  $g$  en  $\sigma/\sigma_u$  met inachtneming van vergelijkingen 2.10,



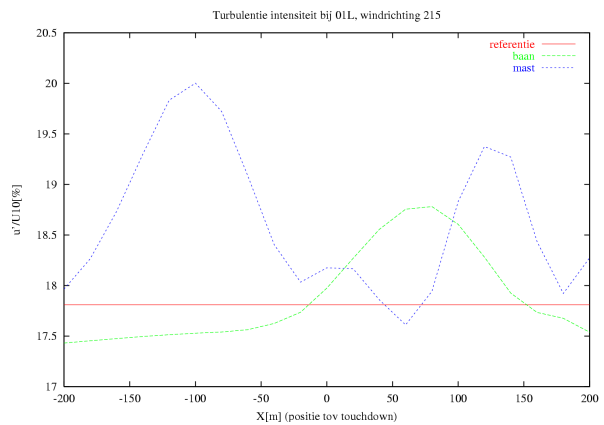
Zicht vanaf windmeetmast 01L in richting 215° op boerderijen aan de Rijnlanderweg



Modelweergave van de bebouwing aan de Rijnlanderweg



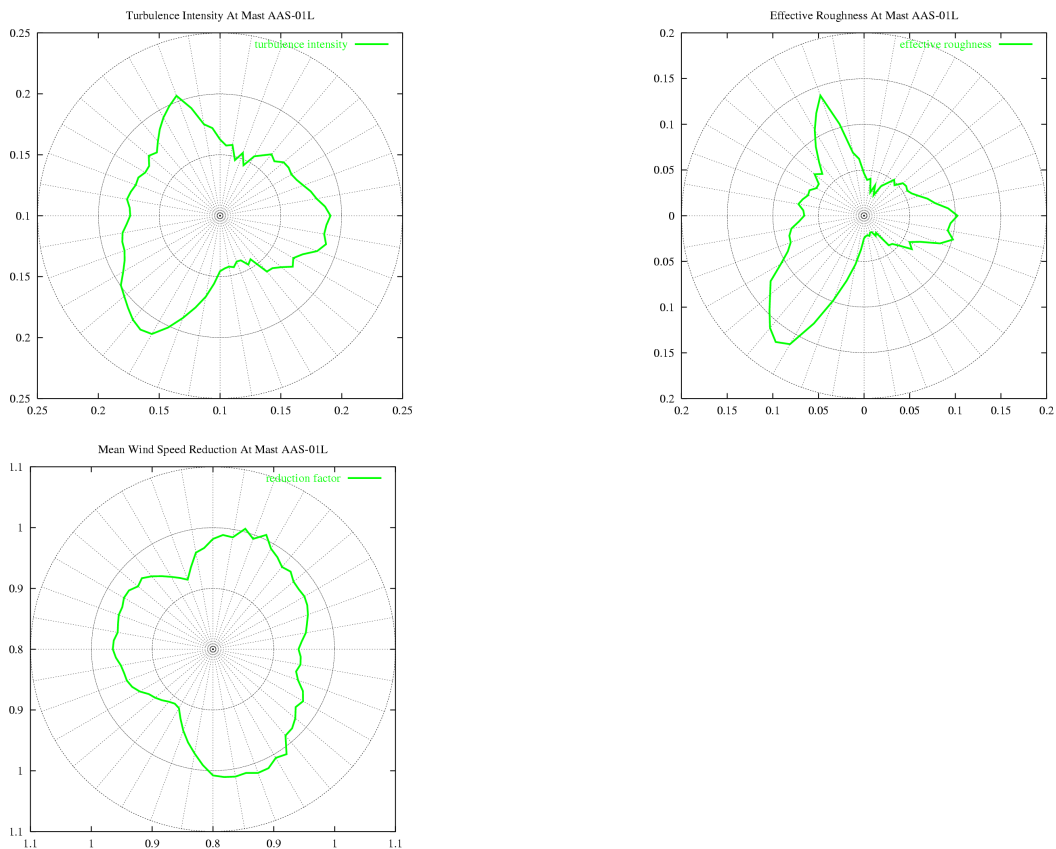
Berekende relatieve snelheidsveranderingen op 10m. hoogte.



Berekende turbulentie intensiteit op 10 m hoogte in het vlak van de baan en in het vlak van de windmeetmast als functie van de afstand tot touchdown.

Figuur 5: Resultaten van modelberekeningen bij positie 01L, windrichting 215° [Krüs en van der Ham, 2000].

In een studie van verstoringen van het windveld door bebouwing op de luchthaven Schiphol zijn modelberekeningen met een computational fluid dynamics code vergeleken met uit een langjarige reeks van waarnemingen berekende turbulentie intensiteiten en beschuttingsfactoren.



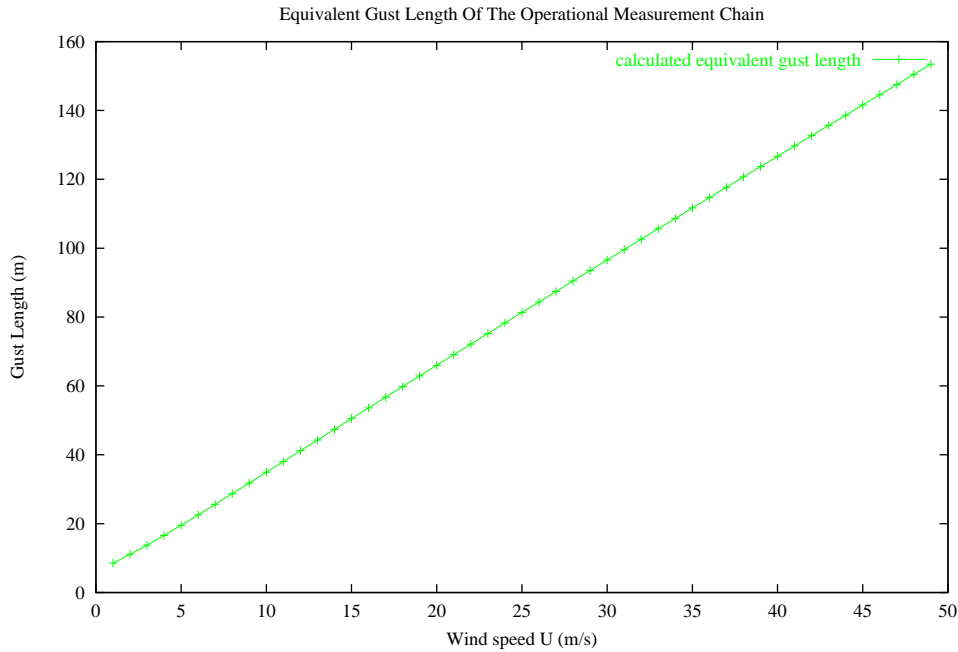
*Figuur 6: Herleide windmetingen op windmeetmast 01L van de luchthaven Schiphol.*

*Uit langjarige reeksen van metingen van gemiddelde windsnelheid en windvlagen kunnen met de in dit rapport afgeleide theorie herleid worden tot richtingsafhankelijke turbulentie intensiteit, effectieve terreinruwheid en beschuttingsfactoren.*



*Figuur 7: Richtingsafhankelijkheid van de terreinruwheid voor de meetposities op de luchthaven Schiphol.*

*Door de weergave van de richtingsafhankelijke terreinruwheid op een kaart van de omgeving van een windmeetmast (eventueel gecombineerd met een lokale inspectie, zoals in figuur 5 is weergegeven) kunnen voor de verstoring van de wind verantwoordelijke obstakels worden geïdentificeerd.*



Figuur 8: Vlaaglengthe van de operationele windmeetketen als functie van de windsnelheid.

4.9 en 4.10 geschreven kunnen worden als

$$g = \left[ 2 \cdot \ln \left\{ \frac{T}{\frac{z}{U} \cdot 2.644 \cdot \left(\frac{L}{z}\right)^{0.675} \sqrt{2\pi \ln\left(\frac{1}{P}\right)}} \right\} \right]^{1/2} \quad (4.12)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_u} = \exp \left[ -0.1057 \cdot \left(\frac{L}{z}\right)^{0.6} \right] \quad (4.13)$$

Onder aanname van een hoogte  $z_b$  waarop het effect van de lokale variaties in de terreinruwheid niet merkbaar is (de 'blending height', [Wieringa, 1976]) is de windsnelheid op die hoogte voor nabij gelegen punten gelijk. De verhouding van de windsnelheid op lagere hoogte kan dan geschreven worden als

$$\frac{U_c}{U_m} = \frac{\ln\left(\frac{z_b}{z_{0m}}\right)}{\ln\left(\frac{z_b}{z_{0c}}\right)} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_c}{z_{0c}}\right)}{\ln\left(\frac{z_m}{z_{0m}}\right)} \quad (4.14)$$

Uit deze vergelijkingen volgt dat voor constructies kleiner dan de gemeten vlaaglengthe, voor hoogten groter dan de meethoogte en boven terreinen ruwer dan het meetterrein rekening moet worden gehouden met grotere windvlagen dan gerapporteerd.

Ter illustratie kan de maatgevende vlaag berekend worden voor een klein vliegtuig  $L = 5$  m. op een hoogte  $z = 30$  m. boven een open terrein met bomenrijen en landbouwgewassen  $z_0 = 0.2$  m. in verhouding tot een op  $z_m = 10$  m. gemeten, c.q. verwachte mediane vlaag  $P = 0.5$ , bepaald door een lokale terreinruwheid  $z_{0m} = 0.03$  m., bij een gemiddelde windsnelheid  $U_m = 10$  m/s. Op vlieghoogte is dan de gemiddelde windsnelheid  $U = 11.5$

m/s. en de vlaag 1.3 maal de gemeten vlaag.

#### 4.4 Reconstructies

In vergelijking 2.11 wordt de genormaliseerde windvlaag  $g$  in relatie gebracht tot het acceptabele risico van overschrijding  $R$ . Deze vergelijking kan geïnverteerd worden en samen met vergelijking 2.13 gebruikt worden om uit de gemeten windsnelheid  $U$  en turbulentie intensiteit  $I = \sigma_M/U$ , of bekende ruwheid  $z_0$ , de waarschijnlijkheid  $R$  van een gerapporteerde windvlaag te bepalen:

$$g = \frac{G \cdot U}{\sigma_M} \quad (4.15)$$

$$R = 1 \cdot \exp \left[ \frac{-T}{\tau} \cdot \frac{n}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left( \frac{-g^2}{2} \right) \right] \quad (4.16)$$

Uit deze vergelijkingen kan dus op grond van metingen, en met kennis van de gevoeligheid van voertuigen en constructies, bepaald worden hoe waarschijnlijk het is dat schade aan voertuigen of constructies veroorzaakt is door windvlagen.

Als voorbeeld van een reconstructie wordt hier beschouwd het ongeval met een Transavia Boeing-757, registratie PH-TKC, op 24 december 1997 op Amsterdam Airport Schiphol. De Raad voor de Transportveiligheid rapporteerde uitvoerig over dit ongeval in zijn rapport 97-75/A-26 [RvT, 1999]. Bij dit rapport verscheen een jaar later een addendum [RvT, 2000] met een door het NLR op basis van gegevens uit de Flight Data Recorder FDR gemaakte windreconstructie, figuur 9. Deze windreconstructie is overwegend in overeenstemming met de meteorologische waarnemingen ter plekke, touchdown

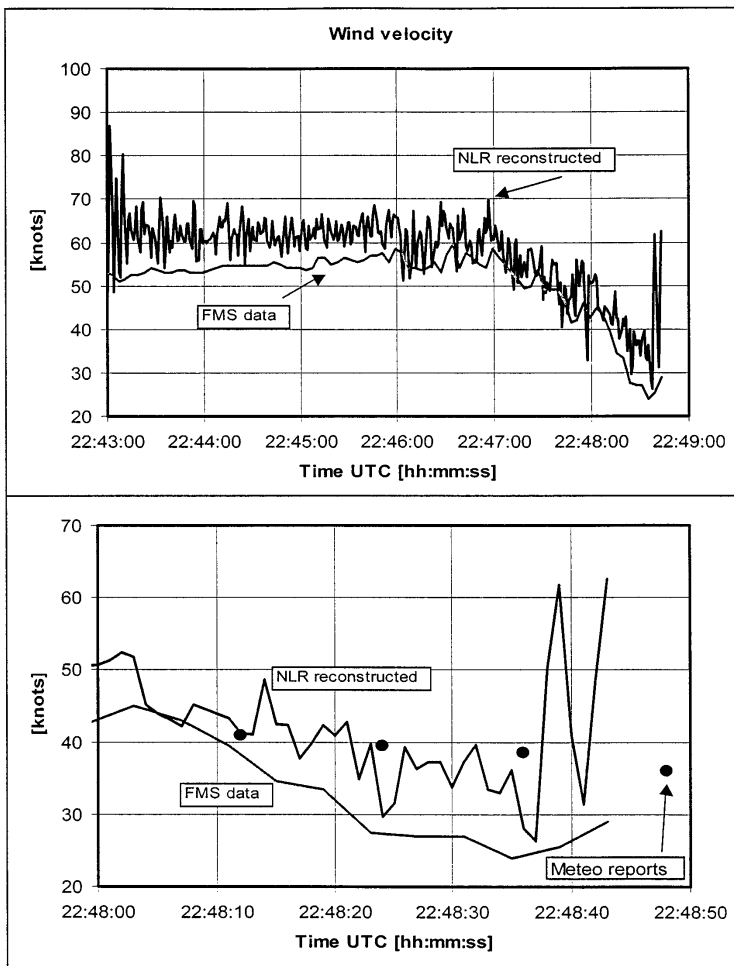


Figure 2: Gereconstrueerde windsnelheid

Figuur 9: NLR reconstructie van het windsnelheidsverloop bij het ongeval met de PH-TKC op 24 december 1997 [RvT, 2000]. De NLR reconstructie heeft een tijdsresolutie van 1 seconde, de registratie van het Flight Management System een tijdsresolutie van 3 seconden en de windmeting een tijdsresolutie van 12 seconden. De pieken aan het eind van de reconstructie wijken sterk af van het voorafgaande verloop van de gereconstrueerde windsnelheid én van de registratie van de windmeetmast en het Flight Management System.

19R, en de gegevens van het Flight Management System FMS van de PH-TKC. Alleen in de laatste seconden voor touchdown treden aanzienlijke verschillen op. De Raad voor de Transportveiligheid concludeert op basis van deze reconstructie:

Uit de nieuwe berekeningen blijkt dat, hoewel er geen sprake was van windshear, de turbulentie met name gedurende het allerlaatste gedeelte van de nadering (enige seconden voor de landing) aanmerkelijk sterker moet zijn geweest dan oorspronkelijk werd berekend. Tevens tonen de nieuwe berekeningen aan dat in deze fase van de nadering een met turbulentie gepaard gande windstoot resulteerde in een sterke verandering van windsnelheid en windrichting waardoor op dat moment een dwarswind van ruim 50 knopen ontstond. Daaraan voorafgaand bedroeg deze 25 á 30 knopen, hetgeen overeenkomt met de door de Meteo gemeten wind.

en ziet daarin een versterking van zijn aanbeveling 5.3 uit het eerdere eindrapport:

Het Geluid Preferentieel Baangebruik Systeem, GPBS, dat op Schiphol wordt gebruikt, dient te worden herzien ten aanzien van: de aanbevolen ICAO-bepalingen; **onbetrouwbaarheid van de huidige windinformatie**; potentiële risico's van vliegen in (sterke) zijwindomstandigheden; vrijheid van de Verkeersleiding om de vastgestelde GPBS-criteria te overschrijden.

In de engelstalige versie van het rapport is overigens sprake van 'uncertainty of present wind information.' Aangenomen mag worden dat de Raad voor de Transportveiligheid hier duidt op een gebrek aan representativiteit van de windrapportage, in die zin dat hij ervan overtuigd is dat actuele vlagen met regelmaat de gerapporteerde vlagen significant te boven gaan. In sectie 4.2 is ingegaan op de verstoring van de representativiteit van de windrapportage door bebouwing op de luchthaven Schiphol. Uit de daar gepresenteerde resultaten volgt dat zeker voor positie 19R de verstoringen beperkt zijn en de rapportages representatief. De conclusie van de Raad voor de Transportveiligheid is hiermee in tegenspraak en trekt de bruikbaarheid van de windrapportage en het onderliggende proces van windmeting en rapportage in twijfel. Het bewijs hiervoor zou moeten liggen in de aannemelijkheid van de windreconstructie. Dit leidt tot de concrete vraag: hoe waarschijnlijk is een vlag van 62 knopen bij de toen heersende windcondities, bekend uit de meteo rapporten.

De weersituatie en de beschikbare meteorologische informatie rond het tijdstip van het ongeval zijn weergegeven in tabel 1. Er is sprake van een licht onstabiele situatie bij een harde tot stormachtige wind uit het zuidwesten. Onder deze omstandigheden is de afgeleide vlagtheorie van toepassing

(zie ook de uitbreiding naar onstabiele situaties in sectie 4.6.) Het ongeval valt binnen de periode waarvoor een continue registratie van 12 seconden waarnemingen beschikbaar is. Figuur 10 geeft de tijdreeksen van windwaarnemingen op positie 19R en de daaruit afgeleide dwarswinden. Op het moment van het ongeval is volgens deze registraties de 10' gemiddelde windsnelheid  $U = 32$  knopen (16.25 m/s), de 10' maximale 3'' windvraag  $G = 45$  knopen (23.14 m/s) en de standaarddeviatie van de wind  $\sigma_M = 5.1$  knopen (2.64 m/s.)

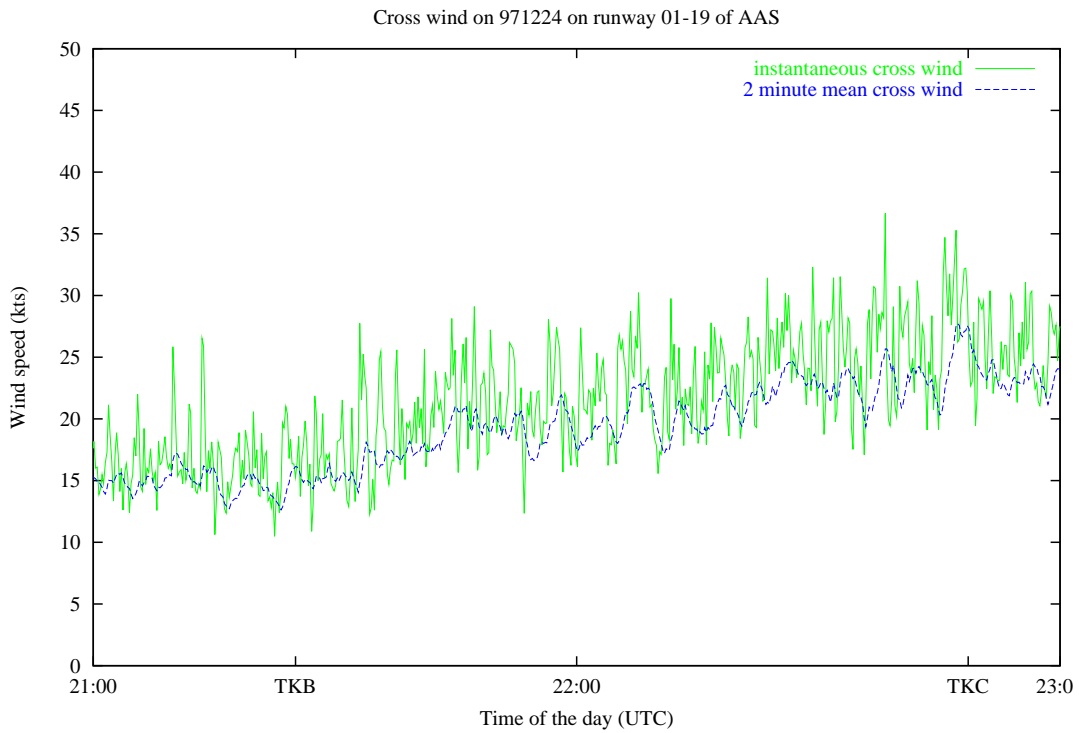
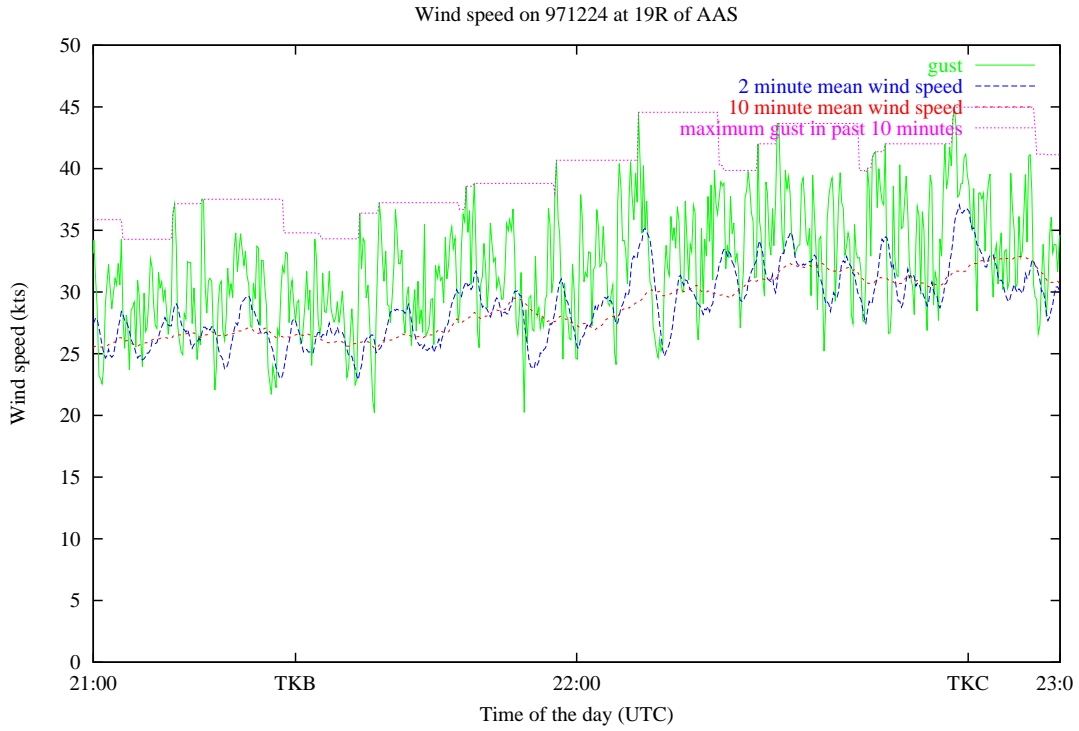
Uit  $U$  en  $\sigma_M$  en de eigenschappen van de windmeetketen volgt voor de mediane maximale gust in de meting  $G (P = 0.5) = 47$  knopen. Uit vergelijking 4.16 volgt dat de gemeten vlag een waarschijnlijkheid heeft  $R = 0.85$ , dat wil zeggen dat in 85% van alle 10' intervallen met een windsnelheid van 32 knopen en een standaarddeviatie van 5.1 knopen een maximale windvraag groter of gelijk 45 knopen zal optreden.

De NLR windreconstructie levert een windvraag van 62 knopen. De waarschijnlijkheid van zo'n vlag in de meting is opnieuw te berekenen uit vergelijking 4.16  $R = 2 \cdot 10^{-6}$ . Nu is de NLR windreconstructie gebaseerd op een 1'' gemiddelde en niet zoals de meting op een 3'' gemiddelde. Voor dit effect kan worden gecorrigeerd op analoge wijze als in vergelijking 4.11 door voor de NLR data een looptijdfilter  $t_0$  aan te nemen. Deze correctie leidt tot een standaarddeviatie  $\sigma_{NLR} = 5.9$  knopen, in overeenstemming met de door het NLR gerapporteerde waarde, en een waarschijnlijkheid van de 62 knopen vlag  $R = 3 \cdot 10^{-4}$ . De waarschijnlijkheid van een extreme vlag in de FDR registratie is door de hogere tijdsresolutie (kleinere karakteristieke tijdschaal) groter dan in de in-situ meting van de windmast. Niettemin is de door het NLR afgeleide vlag zeer onwaarschijnlijk. De resultaten van de windreconstructie zijn dan ook eerder aanleiding tot een nadere beschouwing van de reconstructie dan tot twijfel aan de betrouwbaarheid van de windrapportage.

#### 4.5 Vlagverwachtingen

In de voorgaande sectie is aangegeven hoe een vertaling gemaakt kan worden van de meting naar een specifieke toepassing, door het gebruik van een vlagtijd, c.q. vlaglengte, die de kleinste karakteristieke tijdschaal van het turbulentiespectrum bepaalt en daarmee de vlag. Op vergelijkbare wijze moet bij het opstellen van vlagverwachtingen rekening worden gehouden met de parameters van de beoogde toepassing. Naast de karakteristieke tijdschaal, of vlagtijd  $t_a$ , of vlaglengte  $L_a$ , wordt de vlagfactor  $g$  volgens vergelijking 2.11 bepaald door het acceptabele risico van overschrijding  $R$ , de grootte van het gebied waarvoor de verwachting wordt uitgegeven, bepaald door het aantal onafhankelijke stations  $n$  en de lengte van het tijdsinterval  $T$  waarbinnen de maximale vlag kan optreden. De parameters  $n$  en  $T$  hebben het zelfde effect op de mediane maximale vlag.





Figuur 10: Windsnelheid en dwarswind op positie 19R ten tijde van het ongeval met de PH-TKC

. De geregistreerde windsnelheid en dwarswindkomen overeen met de uitgegeven verwachting. De dwarswind overschrijdt de van kracht zijnde limieten van het baangebruik.

<p>a. General situation, submitted by the Royal Netherlands Meteorological Institute.                  A deep depression above Scotland is moving north-eastwards and transports mild and somewhat unstable air with a strong to stormy wind.                  Weather situation at Schiphol at approximately 22:48  <b>wind</b> on the ground 230° 33 kt, gusts 46 kt, temperature 12° C; at 500 ft 240° 45 kt, temperature 10°  <b>visibility</b> 12 km  <b>weather</b> dry  <b>clouds</b> few stratocumulus, base 2.200 ft; scattered stratocumulus, base 2.800 ft  <b>turbulence</b> moderate to severe  <b>0° C level</b> 8.000 ft  <b>icing</b> nil</p>
<p>b. Schiphol Actuals                  22:25 23032G45 200V260 9999 FEW022 SCT028 12/09 1008 NOSIG                  22:51 23032G42 9999 FEW022 SCT028 11/08 1008 NOSIG</p>

Tabel 1: Weersituatie ten tijde van het ongeval met de Transavia Boeing 757 PH-TKC.

Als bijvoorbeeld de ernst van een storm over de Noordzee wordt bepaald aan de hand van de maximaal opgetreden windstoot gedurende de hele stormpassage op het hele netwerk van kuststations, dan zal de verwachting moeten aansluiten bij deze interpretatie. Bij  $n = 10$  kuststations en een tijdsinterval  $T = 3600$  s. voor het hoogtepunt van de storm op elk individueel station is de mediane maximale vlag op het netwerk van kuststations voor een dergelijke stormpassage 10% hoger dan de mediane maximale tien minuten vlag op een individueel station ( $U = 20$  m/s).

De kracht van deze benadering, gebaseerd op het werk van Beljaars, in vergelijking tot de theorie van Wieringa is dat het effect van de parameters  $n$ ,  $T$ ,  $\tau(L_a)$  en  $R$  expliciet verrekend kunnen worden in de verwachting. Overigens is een verwachting voor een gegeven situatie altijd om te rekenen naar de parameters van een afwijkende toepassing op vergelijkbare wijze als de eerder gepresenteerde vertaling van metingen naar toepassingen.

Naast de afhankelijkheid van  $n$ ,  $T$ ,  $\tau(L_a)$  en  $R$  schaalt de feitelijke vlag ook direct met de gemiddelde windsnelheid  $U$  en is verder een functie van de hoogte boven het terrein  $z$  en de lokale effectieve terreinruwheid  $z_0$ , vergelijking 2.17. Deze ruwheid is voor een gegeven lokatie windrichtingsafhankelijk, zoals ook blijkt uit de metingen op Schiphol, figuur 7. Lokale vlagvariaties kunnen in rekening worden gebracht door op een algemene verwachting voor een groter gebied een lokale, richtingsafhankelijke, interpretatie ('downscaling') toe te passen. Als voorbeeld kan de verhouding  $v$  worden berekend tussen de vlag bij aanstroming over open luchthaventerrein,  $z_0 = 2$  cm, en de vlag bij aanstroming over bebouwing,  $z_0 = 20$  cm ( $U_p = 10$ ):  $v = 1.01$ . Ondanks het grote verschil in ruwheid is de vlag slechts 1% hoger. Dit, wellicht verrassende, resultaat is het gevolg van enerzijds de verhoging

van de vlagerigheid bij grotere ruwheid en anderzijds de compenserende werking van een vermindering van de gemiddelde windsnelheid.

#### 4.6 Vlagverwachtingen uit een numeriek weervoorspellingsmodel

Uit de voorgaande overwegingen mag de conclusie getrokken worden dat, als voor specifieke toepassingen en situaties in de meeste gevallen een vertaling gemaakt moet en kan worden, er een zekere mate van vrijheid is in het kiezen van de parameters  $R$ ,  $n$ ,  $T$ ,  $\tau$ ,  $z$  en  $z_0$  bij het opstellen van een algemene verwachting. Het verdient echter aanbeveling zoveel mogelijk aan te sluiten bij de meetpraktijk omdat dit de interpretatie, het monitoren en de verificatie van vlagverwachtingen vereenvoudigt. Aansluitend bij het voorbeeld van de stormpassage sectie 4.5 wordt hier voorgesteld deze parameterwaarden te gebruiken:

$$\begin{aligned}
 R &= P = 0.5 \\
 n &= 1 \\
 T &= 3600 \text{ s.} \\
 \tau (t_0 = 3 \text{ s.}) \\
 z &= 10 \text{ m.}
 \end{aligned}$$

Voor de waarde van  $z_0$  kan  $z_0 = 0.03$  m. worden gekozen als tegelijkertijd de windsnelheid wordt teruggerekend naar de potentiële windsnelheid  $U_p$ , of voor  $z_0$  wordt de waarde gekozen die gebruikt is in de verwachting van de actuele gemiddelde windsnelheid  $U$ . De eerste benadering is vooral geschikt als een verwachting voor een groter gebied wordt gemaakt, waarbij de omstandigheden per station variëren. De tweede benadering past bij een regionalisering van de algemene verwachting, en is nuttig bij het monitoren van de progressie van een stormveld. Bij deze regionalisering is dan

het aantal stations  $n = 1$ .

De keuzes voor  $n$  en  $T$  zijn hier gemaakt op inhoudelijke gronden. Als op de numerieke vlaagverwachting nog een statistische nabewerking, MOS, wordt losgelaten dan kan uit de regressie een optimale waarde van het product  $n \cdot T$  worden bepaald.

De geschetste vlaagverwachtingsmethodiek kan ook worden toegepast binnen een numeriek weervoorspellingsmodel, NWP model, door gebruik te maken van de terreinruwheid van het model en de wind op  $z = 10$  meter, of de wind op het onderste modelniveau en de bijhorende hoogte  $z$  van dit onderste modelniveau.

De toepassingen van deze verwachtingen worden beperkt door de aannames die in de afleiding zijn gebruikt. In het bijzonder is dat de aanname van een neutrale stratificatie van de grenslaag, zodat de mechanische productie van turbulentie overheerst, resulterend in een karakteristiek windsnelheidsspectrum  $S_u(f)$ , vergelijking 2.4, en het logaritmisch windprofiel, vergelijking 2.15. De verwachtingen zijn daarom in het bijzonder toepasbaar bij situaties met harde wind en op bewolkte dagen, waarbij stabiliteitseffecten worden onderdrukt.

De beperking tot neutrale condities kan losgelaten worden als in het NWP model ook de turbulente kinetische energie  $E$  wordt berekend. Uit de definitie van  $E$

$$E = \frac{1}{2} \cdot [(u')^2 + (v')^2 + (w')^2] \quad (4.17)$$

volgt een relatie met de turbulentie intensiteit  $I_E$

$$I_E = \frac{\sqrt{2 \cdot E}}{U} \quad (4.18)$$

Hieruit is met vergelijking 2.13 en rekening houdend met de reductie  $r_\sigma$  van de variantie door het meetstelsel een vlaagverwachting  $G_m$  equivalent aan de meting te berekenen

$$G_m = U \cdot \left( 1 + g \cdot r_\sigma \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot E}}{U} \right) \quad (4.19)$$

In deze benadering zijn dan alle effecten die in het model bijdragen aan de turbulente kinetische energie, evenals de variatie van  $E$  met de hoogte meegenomen.

In het kortetermijn weervoorspellingsmodel HIRLAM [Undén et al., 2002] wordt de turbulente kinetische energie berekend uit een prognostische vergelijking met bijdragen van windschering, verticale (on)stabiliteit, transport door turbulentie en drukkrachten en dissipatie. In deze parameterisatie ontbreekt echter het effect van diepe menging bij sterke convectie in het geval van buien. De vlaagverwachtingen uit HIRLAM moeten dus nog aangevuld worden met kansverwachtingen

voor windstoten bij buien (cf. de methode Ivens.)

In figuur 11 zijn door HIRLAM berekende vlagen en verhoudingen van de vlaag tot de gemiddelde wind weergegeven voor een situatie met harde wind, waarbij vooral de modelruwheid de vlagerigheid bepaalt, en voor een situatie waarin ook convectieve menging een rol speelt, waardoor de vlagerigheid vooral boven land toeneemt.

Als in de toepassing van vergelijking 4.18 de variantieverhouding  $r_\sigma$  uit vergelijking 4.5 en de karakteristieke tijdschaal  $\tau$  uit figuur 3 of de benaderende vergelijking 4.9 worden gebruikt, dan is de berekende vlaag welbeschouwd nog steeds een functie van het veronderstelde neutrale windsnelheidsspectrum. Hoe sterk dit effect is kan afgeleid worden uit figuur 12 waarin de afhankelijkheid van  $r_\sigma$ ,  $\tau$  en  $g$  van de onstabiele wordt weergegeven. Højstrup [Højstrup, 1982] suggereerde een uitbreiding op het neutrale spectrum voor onstabiele situaties

$$\frac{f \cdot S_u(f)}{u_*^2} = \frac{0.5 \cdot f_i^+}{(1 + 2.2 \cdot f_i^+)^{5/3}} \cdot \left( \frac{z_i}{-\mathcal{L}} \right)^{2/3} + \frac{105 \cdot f^+}{(1 + 33 \cdot f^+)^{5/3}} \quad (4.20)$$

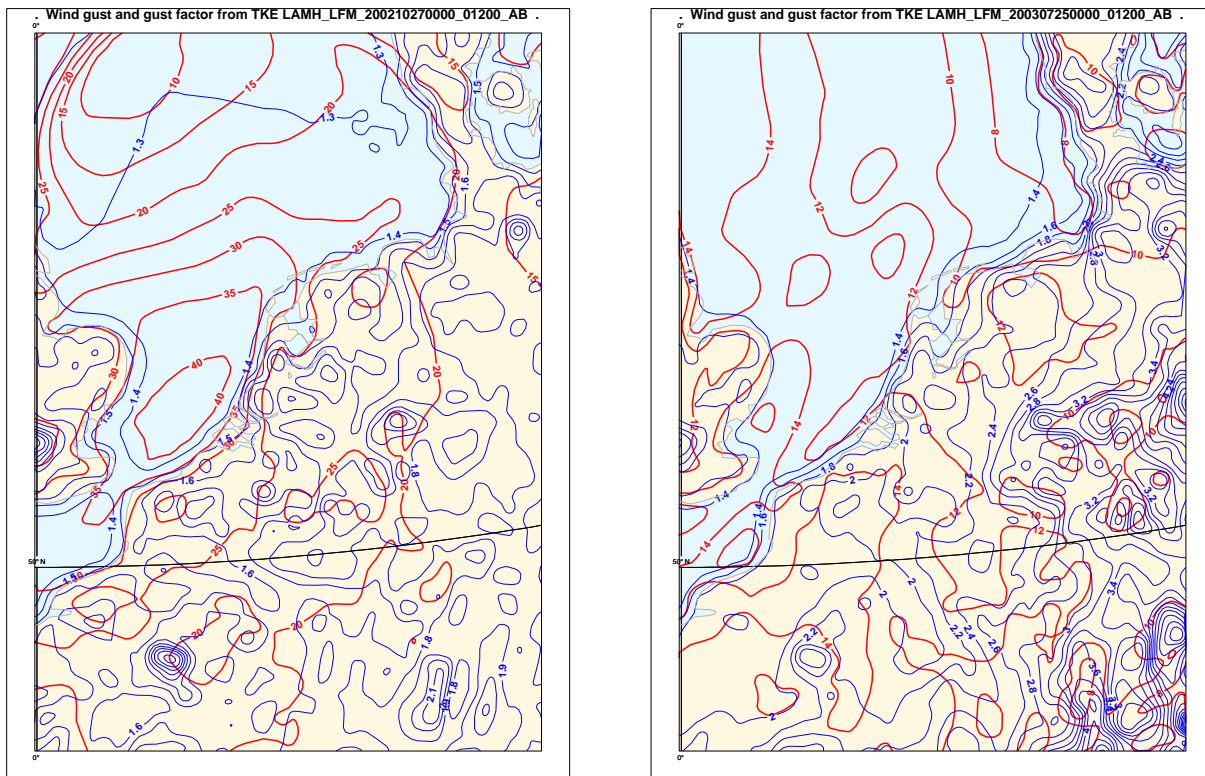
waarin als tevoren  $f^+ = fz/U$ , terwijl  $f_i^+ = fz_i/U$  de schaling van het laagfrequente deel van het spectrum met de stabiliteitsparameters  $z_i$ , de inversiehoogte, en  $\mathcal{L}$ , de Monin-Obukhov lengte, weergeeft. Als de inversiehoogte en de Monin-Obukhov lengte ook door het NWP model worden geleverd dan kan de afhankelijkheid van de stabiliteit expliciet worden berekend. Echter, uit figuur 12 blijkt dat als ook bij onstabiele omstandigheden gebruik wordt gemaakt van de neutrale waarden van  $r_\sigma$ ,  $\tau$  en  $g$  de fouten klein zijn, in het bijzonder als  $U$  klein is, zeker in verhouding tot de onzekerheid die vooralsnog besloten ligt in de bepaling van het relevante interval  $T$ .

#### 4.7 Verificatie

Bij de verificatie van vlaagverwachtingen aan waarnemingen zijn de volgende aspecten van belang:

**Een vlaagverwachting is een kansverwachting** Ook als de vlaagverwachting is gebaseerd op de uitvoer van een deterministisch NWP model vereist de vertaling van modelparameters naar een vlaagfactor dat de a priori overschrijdingskans  $R$  (vergelijking 2.11) wordt gespecificeerd. Verificatie vraagt dan om een zodanig groot ensemble van waarnemingen dat er significante uitspraken kunnen worden gedaan over de mate waarin de gemeten verdeling van vlagen overeen komt met de a priori kansdichtheid van de verwachtingen.

**De ene vlaag is de ander niet** De gemeten vlaag en de verwachte vlaag moeten op dezelfde wijze gedefinieerd worden of vertaald worden naar dezelfde waarden van  $R$ ,  $n$ ,  $T$  en  $\tau$ . Als de verificatiegegevens bestaan uit een ensemble van stationswaarnemingen van 10' maximale vlagen dan is de mediaan van deze verdeling vergelijkbaar met een vlaagverwachting waarin  $T = 600$  s.,  $P = 0.5$ ,  $n = 1$  en  $\tau(t_0)$  identiek is aan de karakteristieke tijdschaal van de meting. Als de meting echter alleen bestaat uit de maximale vlaag op een

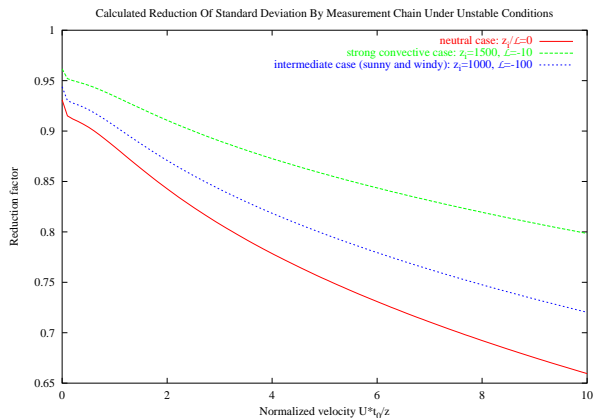


Windvlagen bij harde wind worden vooral bepaald door mechanische turbulentie. De windvlaagfactoren  $G/U$  zijn direct gerelateerd aan de oppervlakteruwheid in het model

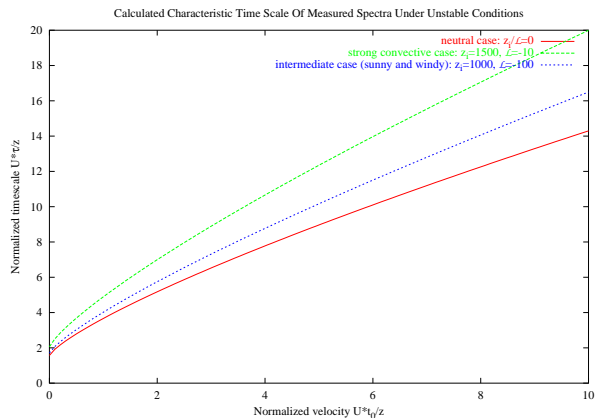
Windvlagen onder onstabele omstandigheden worden mede veroorzaakt door convectieve menging. Windvlaagfactoren  $G/U$  zijn daardoor groter dan onder stabiele omstandigheden

Figuur 11: Vlagen en vlagfactoren  $G/U$  berekend uit TKE van het 22km HIRLAM.

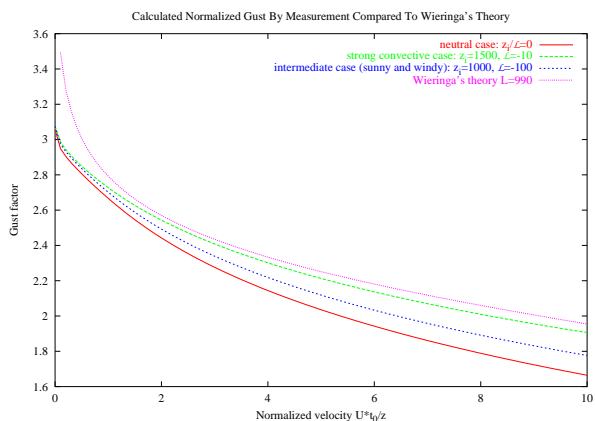
De vertaling van de door een numeriek weersverwachtingsmodel berekende turbulente kinetische energie in een windvlaag verwachting vereist een aanname over de karakteristieke eigenschappen van de toepassing van de verwachtingen of kennis van de karakteristieken van een alternatieve referentieverwachting. Ook bij de verificatie van deze vlagverwachting moet rekening worden gehouden met de representativiteit van de waarnemingen en het probabilistische karakter van de verwachting én de waarneming.



Varianteverhouding bij verschillende stabiliteitscondities



Karakteristieke tijdschaal van het windsnelheidsspectrum bij verschillende stabiliteitscondities



Vlaagfactor bij verschillende stabiliteitscondities

Figuur 12: De invloed van onstabiliteit op de varianteverhouding, karakteristieke tijdschaal en vlagfactor.

De onstabiliteit kan in het geval van droge convectie in rekening worden gebracht door het gebruik van een aangepast spectrum. Deze theorie is echter niet geëigend voor de bepaling van windstoten bij buien. Toename van de onstabiliteit leidt tot een toename van de vlagerigheid, wat te verklaren is uit de diepere menging ten gevolge van de convectie.

netwerk van stations voor een stormpassage dan zullen de parameters van de verwachting hieraan aangepast moeten worden (zie ook de voorgaande sectie) voordat een zinnige vergelijking gemaakt kan worden.

**Een waarneming is niet representatief** De modelrepresentatie van de roosterbox gemiddelde terreincondities wijkt mogelijk af van de lokale omstandigheden in de nabijheid van de windwaarneempositie. Vóór verificatie zal daarom of de verwachting vertaald moeten worden naar de lokale, richtingsafhankelijke condities op de windmeetpositie ('downscaling'), of de waarneming representatief moeten worden gemaakt voor een gebied vergelijkbaar met een roostervierkant van het model, of zowel de verwachting als de waarneming vertaald moeten worden naar standaardcondities. De eerste benadering is toepasselijk voor lokale verwachtingen, waarbij al gebruik is gemaakt van downscaling, de tweede benadering bij de beoordeling van regionale verwachtingen en de derde benadering bij algemene verwachtingen. In dit laatste geval zijn waarnemingen van verschillende windrichtingen en meetposities vergelijkbaar en is het daarmee eenvoudiger statistisch significante ensembles te genereren.

## Bibliografie

- Beljaars, A.C.M., 1983:** De invloed van meetsystemen op de waarneming van gemiddelden, standaarddeviaties en maxima., WR 83-2, KNMI, De Bilt.
- Beljaars, A.C.M., 1987:** The measurement of gustiness at routine wind stations: a review, WR 87-11, KNMI, De Bilt.
- Dyhr-Nielsen, M., 1972:** Loss of information bij discretizing hydrologic series, Hydrology papers, no. 51, Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80521.
- Højstrup, Jørgen, 1982:** Velocity spectra in the unstable boundary layer. *J. Atmos. Sci.* 39, 2239-2248.
- Kaimal, J.C., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and O.R. Cote, 1972:** Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 98, 563-589.
- Krüs, H.W. en R. van der Ham, 2000:** Bij vlagen wind (uitvoerig overzicht eerste resultaten), rapport CFD-001002, Cyclone Fluid Dynamics BV, Waalre.
- Monin, A.S., and A.M. Obukhov, 1954:** Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Trans. Geophys. Inst. Akad., Nauk USSR* 151, 163-187.
- Reynolds, O., 1894:** On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 186, 123.
- Raad voor de Transportveiligheid, 1999:** Final Report 97-75/A-26, PH-TKC Boeing 757, 24 December 1997, Amsterdam Airport Schiphol.
- Raad voor de Transportveiligheid, 2000:** Addendum, Bij Eindrapport 97-75/A-26, PH-TKC Boeing 757, 24 December 1997, Amsterdam Airport Schiphol.
- Taylor, G.I., 1915:** Eddy motion in the atmosphere, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A*, 215, 1.
- Tennekes, H., and J.L. Lumley, 1972:** *A First Course in Turbulence*, The MIT Press, Cambridge MA.
- Undén, P., et al., 2002:** HIRLAM-5 Scientific Documentation. HIRLAM-5 Project, SMHI, Norrköping, Sweden.
- Wieringa, J., 1973:** Gust factors over open water and built-up country, *Boundary Layer Meteorology*, 3, 424-441.
- Wieringa, J., 1976:** An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 102, 241-253.

Study is like the heavens's glorious sun,  
 That will not be deep-searched with saucy looks;  
 Small have continuous plodders ever won,  
 Save base authority from others' books.  
*Shakespeare*  
*Love's Labour's Lost, I.i.84.*







