

Ref.nr. : 85-010880
Dossiernr. : 8724-11344
Datum : augustus 1985
P

Titel
ONTWERPCRITERIA VOOR KLEINE WINDTURBINES
Deel 2: Windkarakterisering

Auteur(s):
G.L.H. Beugeling
P.E.J. Vermeulen

Trefwoord(en):
- windenergie
- ontwerpcriteria
- windgegevens

ST-code:
C.19.3
F.3.2

Uitgevoerd in opdracht van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR), als onderdeel van het door het NLR, in opdracht van de Stichting Projectbeheer-bureau Energie Onderzoek (PEO), gecoördineerde project "Ontwerpcriteria voor kleine windturbines".

INHOUDSOPGAVE	<u>pag.</u>
SYMBOLENLIJST	4
SAMENVATTING	6
1. INLEIDING	7
2. METEOROLOGISCHE ACHTERGRONDEN	9
2.1 Schematisering windsnelheidsfluctuaties	9
2.2 Benodigde windgegevens	10
2.3 Beschikbare windgegevens	13
3. METHODIEK TER BEPALING VAN ONTWERPWINDGEGEVENS	16
3.1 Effectieve windsnelheidsfluctuaties	16
3.1.1 Door de rotor van een windturbine "gevoelde" windsnelheidsfluctuaties	16
3.1.2 Berekeningsresultaten effectieve windsnelheidsfluctuaties	20
3.2 Windvlagen	21
3.2.1 Inleiding	21
3.2.2 Vlaagvorm	23
3.2.3 Vermoeiingsvlagen	29
3.2.4 Extreme vlagen	30
3.3 Windrichtingsveranderingen	31
3.3.1 Inleiding	31
3.3.2 Stationaire windrichtingsveranderingen	31
3.3.3 Instationaire windrichtingsveranderingen	34
3.4 Windschering	41
3.4.1 Inleiding	41
3.4.2 Rekenmodel voor de windschering	43
3.4.3 Modelresultaten en evaluatie	46

INHOUDSOPGAVE (vervolg)	<u>pag.</u>
4. GEKOZEN ONTWERPWINDGEGEVENS	48
4.1 Extreme windsnelheid bij parkeren	48
4.2 Ontwerpgegevens bij draaiende rotor	50
4.2.1 Windvlagen	50
4.2.2 Windrichtingsveranderingen	52
4.2.3 Windschering	53
5. AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK	55
6. CONCLUSIES	57
7. REFERENTIES	60

TABELLEN

FIGUREN

APPENDICES:

- A Notatievoorstel windsnelheden
- B Rekenprogramma GUSBR

NOTATIES

Bijlage A geeft een overzicht van de gebruikte notaties voor grootheden die met "de windsnelheid" samenhangen. Hier wordt dan ook verwezen naar bijlage A voor notaties die samenhangen met "U", "u" en " ΔU ".

A	: rotoroppervlak; tevens amplitude (zie bijlage A)
B	: amplitude van het du/dt signaal (zie bijlage A)
$C_{xx}(\tau)$,	
$C_{xx}(\Delta r, \tau)$	: auto- respectievelijk kruiscovariantie functie van de grootheid x
D	: rotordiameter
$f(x)$	: kansdichtheidsfunctie van de grootheid x
H	: ashoogte
L	: Monim-Obukhov lengte (stabiliteitsparameter)
r_{L_x}	: integrale lengteschaal van de grootheid x in de richting r (zie vgl.5)
n	: frequentie
$N(o), N(A)$	: aantal doorsnijdingen in positieve richting van respectievelijk de gemiddelde waarde of de amplitude A.
$P(x>a)$	: Overschrijdingskans (kans dat de grootheid x de waarde a overschrijdt)
$P_{xx}(\Delta r, n)$	: Symmetrische Co-spectrale vermogensdichtheidsfunctie van de grootheid x.
r	: laterale (verticale of horizontale) afstand
R	: rotorstraal
$S_x(n)$	: spectrale vermogensdichtheidsfunctie van de grootheid x
t	: tijd
T_∞	: waarnemingsperiode
T_o	: halve periode
u_*	: schuifspanningssnelheid
$\bar{U}, U, u, \sigma_u$	: longitudinale windsnelheid: zie bijlage A
v	: snelheidsfluctuatie in laterale richting
V_{in}, V_{uit}	: windturbine start, respectievelijk uitschakel windsnelheid
Z	: hoogte boven de bodem
Z_o	: ruwheidsparameter

NOTATIES (vervolg)

 θ : windrichtingsfluctuatie τ : tijdsverschuiving $\rho_{xx}(\tau),$ $\rho_{xx}(\Delta r, \tau)$: auto-respectievelijk kruiscorrelatie functie van de
grootheid x $\Psi\left(\frac{z}{L}\right)$: profiel correctie functieindex

eff : geïntegreerd over het rotorvlak

SAMENVATTING

Ten behoeve van het opstellen van eenvoudig toepasbare en naar rotortype genuanceerde ontwerpcriteria voor kleine windturbines is een rekenmodel ontwikkeld om de turbulente windsnelheids- en windrichtingsfluctuaties te bepalen zoals de draaiende rotor van een windturbine die "voelt". Met behulp van dit model, dat gebruik maakt van statistische methoden kunnen, afhankelijk van gekozen criteria (overschrijdingskansen), zowel vermoeiings- en extreme "windvlagen" ten behoeve van ontwerpberekeningen geconstrueerd worden als turbulente windrichtingsveranderingen worden bepaald. Te verwachten instationaire (meso-scale) windrichtingsveranderingen worden geschat uit de literatuur over buien en frontsystemen. Een tweede rekenmodel is ontwikkeld waarmee de windschering ten behoeve van vermoeiingsberekeningen bepaald kan worden. Voor een specifieke kleine windturbine worden de verschillende ontwerpwindvlagen (voor verschillende klassen van uurgemiddelde windsnelheid op ashoogte), de turbulente windrichtingsfluctuaties en de windschering gegeven.

1. INLEIDING

Tijdens het ontwerp, en bij de beoordeling van de constructie, van kleine windturbines (diameter 5-20 meter) moet aangetoond worden dat de constructie voldoet aan criteria met betrekking tot statische sterkte, vermoeiingssterkte, stijfheid en stabiliteit. In de ontwerp-norm "Veiligheidseisen voor windturbines NEC 96" zijn daartoe, conservatief veronderstelde, schattingen opgenomen voor de statische- en dynamische belastingen.

In opdracht van de PEO is door vier instituten (NLR, ECN, TNO-MT, TNO-IBBC) een onderzoek uitgevoerd ten behoeve van de opstelling van meer genuanceerde of wellicht minder conservatieve, ontwerpcriteria die op eenvoudige wijze toegepast kunnen worden. De bijdrage van MT-TNO aan dit onderzoek heeft betrekking op het specificeren van de ontwerpwindgegevens welke bij het opstellen van de belastingsgevallen gebruikt kunnen worden.

De maatgevende windbelastingscondities voor windturbines wijken sterk af van de windbelastingscondities bij andere door wind belaste bouwwerken zoals gebouwen, hijskranen of schoorstenen. Deze afwijkingen leiden ertoe dat niet, of slechts ten dele gebruik gemaakt kan worden van de ontwerpwindgegevens uit bestaande bouwvoorschriften.

In het kader van het onderzoek "ontwerpcriteria voor kleine windturbines" zijn daarom specifieke ontwerpwindgegevens ontwikkeld.

Bij de ontwikkeling van de ontwerpwindgegevens is, in verband met het stochastische karakter van de windfluctuaties, gebruik gemaakt van statistische methoden. Hierbij wordt een relatie gelegd tussen de "kans van voorkomen" van een bepaalde fluctuatie en de "grootte" van die fluctuatie.

In de ontwikkeling van de ontwerpwindgegevens kunnen een aantal fasen worden onderscheiden, namelijk:

- uitwerken van de achtergronden
 - meteorologie
 - relevante belastingen
- keuze van de methoden;
- opstellen van de statistische relaties;

- uitwerken van de relaties tot computerprogrammatuur;
- opstellen van "mogelijke" ontwerpwindgegevens;
- keuze (door vastleggen van kansniveaus) van ontwerpwindgegevens.

In eerdere studies naar de problematiek van windbelastingen op windturbines (bijvoorbeeld Vermeulen 1981) is geconstateerd dat er een directe relatie is tussen de bij het ontwerp gebruikte rekenwijze, de eigenschappen van de betreffende windturbine en de keuze van de ontwerpwindgegevens.

Tijdens de hierboven omschreven ontwikkeling van de ontwerpwindgegevens was er dan ook een intensief overleg met de overige deelnemers aan het project. De ontwikkeling had dientengevolge vaak een iteratief karakter.

Benadrukt moet daarom worden dat bij de voortgang en afronding van het deelproject "windkarakterisering" de overige deelnemers een belangrijke rol hebben gespeeld; dit geldt in het bijzonder voor de uiteindelijke keuze van de ontwerpgegevens.

De structuur van dit verslag volgt in grote lijnen de hierboven beschreven fasering van het project. Na een uitwerking van met name enkele meteorologische achtergronden in hoofdstuk 2, worden in hoofdstuk 3 statistische relaties afgeleid tussen "kans van voorkomen" en "grootte" van een aantal windfluctuaties. Dergelijke relaties zijn opgesteld voor:

- extreme windvlagen tijdens rotorbedrijf;
- extreme windvlagen bij gefaalde beveiligingsystemen;
- vlagen ten behoeve van vermoeiingsanalysen;
- windrichtingsfluctuaties ten behoeve van vermoeiingsanalysen;
- windschering.

De in hoofdstuk 3 ontwikkelde relaties worden in hoofdstuk 4 gebruikt om concrete ontwerpwindgegevens te kiezen. De "keuze" heeft hier vooral betrekking op het vastleggen van aanvaardbaar geachte kansniveaus.

Aanbevelingen voor verder onderzoek worden gegeven in hoofdstuk 5.

Hoofdstuk 6 vat de conclusies samen.

2. METEOROLOGISCHE ACHTERGRONDEN

2.1 Schematisering windsnelheidsfluctuaties

Het is gebruikelijk om bij de statistische analyse van atmosferische windsnelheidsfluctuaties in het frequentiedomein te werken. Metingen, bijvoorbeeld één jaar data opgenomen met een bemonsteringsfrequentie van 10 Hz, worden dan weergegeven als een spectrale vermogensdichtheidsfunctie van de windsnelheidsfluctuaties $S(n)$, kortweg "spectrum", uitgezet tegen de frequentie van voorkomen.

Figuur 1A geeft zo'n spectrum van de longitudinale snelheidsfluctuaties schematisch weer, echter nu is $S_u(n)$ tegen de frequentie n uitgezet, zodat op de verticale as een maat voor de energie per frequentie- en massa-eenheid uitstaat. Een kenmerkende eigenschap van het spectrum is dat een minimum optreedt op een tijdschaal van ruwweg één uur; de zogenaamde "spectral gap". De standaard aanpak is het verdelen van het spectrum in twee stukken met de scheiding in het minimum (figuur 1B): de klimatologie en de turbulentie, elk met hun eigen statistische beschrijving:

- klimatologie - bijvoorbeeld beschreven als tijdsreeks van uurgemiddelde windsnelheid, windrichting en atmosferische stabiliteit, dus een functie van hoogte, terreinruwheid en lokatie.
- turbulentie - bijvoorbeeld beschreven als een tijdsreeks van 0,1 seconde (3-componenten) gemiddelde snelheid en dus een functie van hoogte, terreinruwheid en atmosferische stabiliteit.

Een tijdreeks van windsnelheidsfluctuaties wordt dus blijkbaar als in figuur 2 geschematiseerd. Van belang is dat de uurgemiddelde statistiek afhangt van de lokatie, bijvoorbeeld in Nederland is er verschil tussen kustgebied en binnenland, terwijl de turbulentiestatistiek niet lokatie-afhankelijk is.

Opgemerkt kan worden dat bij deze standaard aanpak in stationaire verschijnselen als bijvoorbeeld fronten en buien buiten de beschouwingen vallen.

Instationaire meso-schaal verschijnselen zoals hagelbuien of elementen van frontsystemen veroorzaken windfluctuaties over het gehele "spectral gap" gebied, vanaf ruwweg enkele minuten tot enkele uren. Vooral de optredende windrichtingsveranderingen zijn in het kader van ontwerpberoeeningen van belang. In § 3.3.3 wordt daarop ingegaan.

2.2 Benodigde windgegevens

De voor het project benodigde windgegevens zijn in de loop van het project door de deelnemers aan het onderzoek vastgesteld.

De conclusies zijn vervat in het ECN memo "belastingen op kleine windturbines" (Föllings, 1985).

Dit memo groepeeret op systematische wijze belastingen en belastingscondities.

Gedurende de levensduur van een windturbine komen normale en abnormale bedrijfsomstandigheden voor. De abnormale omstandigheden kunnen worden onderverdeeld in abnormale interne en abnormale externe omstandigheden.

Normale omstandigheden

- Fabrikage, transport en oprichten,
- Normaal bedrijf,
- Normaal parkeren.

Abnormale interne omstandigheden

- Falen tijdens normaal bedrijf,
- Idem tijdens normaal parkeren,
- Noodprocedures.

Abnormale externe omstandigheden

- Bedrijf met een extreme windvlaag,
- Parkeren tijdens extreme windsnelheden.

Uitgangspunt bij het bepalen van de belastingen op een windturbine is, dat de installatie bestand moet zijn tegen die situaties waarin één omstandigheid, hetzij intern hetzij extern, abnormaal is (enkelvoudig abnormaal).

De normale bedrijfsomstandigheden zijn vooral van belang voor bemoeiingsbelastingen en de abnormale omstandigheden voor extreme belastingen.

Voor meer details wordt verwezen naar Föllings (1985). Hier wordt volstaan met een opsomming van de benodigde belastingscondities, voorzover relevant voor de benodigde windgegevens (aangegeven met:•).

NORMALE BEDRIJFSOMSTANDIGHEDEN

Normaal bedrijf

Tijdens het normale bedrijf worden onderstaande belastingen en belastingcombinaties verondersteld op te treden.

De continue belastingen tijdens normaal bedrijf kunnen worden onderverdeeld in basisbelastingen en op deze basisbelastingen te superponeren belastingen. De simultaan optredende basisbelastingen zijn:

- zwaartekracht
- uurgemiddelde windsnelheid ($V_{in} < \bar{U} < V_{uit}$)
- toerental (centrifugaalkracht).

En de hierop te superponeren belastingen:

- windvlagen (turbulentie)
- verticale windgradiënt (windschering)
- scheve aanstroming
- toreninvloed.

Normaal parkeren

Bij normaal parkeren wordt eenzelfde indeling aangehouden als bij normaal bedrijf.

De basisbelastingen zijn:

- zwaartekracht
- uurgemiddelde windsnelheid

De hierop te superponeren belastingen:

- windvlagen (turbulentie)

ABNORMALE EXERNE OMSTANDIGHEDEN

Tijdens normaal bedrijf kan de turbine belast worden door:

- extreme windvlaag:
 (steile windgradiënten)
 (snelle windrichtingsveranderingen)

en tijdens normaal parkeren door:

- extreme windsnelheden.

ABNORMALE INTERNE BEDRIJFSOMSTANDIGHEDEN

Abnormale interne bedrijfsomstandigheden kunnen de turbine dikwijls zodanig belasten, dat gevaar voor de omgeving optreedt. Is dit het geval dan zal de faalsituatie moeten leiden tot het in werking treden van een beveiliging. Uitgangspunt bij het bepalen van de belastingen op een windturbine ten gevolge van abnormale interne omstandigheden is, dat dubbel falen niet geacht wordt op te treden (enkelvoudig falen). Er wordt dus aangenomen dat slechts één component of systeem faalt.

Föllings (1985) geeft onderstaande faalsituaties:

Faalsituatie tijdens normaal bedrijf

- A1 - Onderbreking rotor - last verbinding
 - A2 - Falende frequentievergelijker
 - A3 - Niet op spanning komen asynchrone generator
 - A4 - Bekrachtiging synchrone generator valt weg

 - B1 - Kortsluiting alle fasen
 - B2 - Kippen van de generator
 - B3 - Kippen van de mutator

 - C1 - Kortsluiting van één of twee fasen

 - D1 - Ongecontroleerd inkomen van remsystemen?

 - E1 - Falen bladverstelmechanismen

 - F1 - Falen bladverstelmechanisme van een deel van het totaal aantal bladen
 - F2 - Falen van het kruimechanisme
 - F3 - Blokkering van scharnier(en)
-

Faalsituatie tijdens normaal parkeren

- G1 - Falen van het kruimechanisme
 - G2 - Falen bladverstelmechanisme
-

Deze faalsituaties dienen gecombineerd te worden met "normaal" voorkomende windsituaties; hetzij in verband met vermoeiing-, hetzij in verband met sterkte-berekeningen.

Een samenvattend overzicht van de hierboven besproken "benodigde windgegevens" is gegeven in tabel 1. Hierin is tevens aangegeven op welke wijze de wind "beschreven" dient te worden.

Met "windvlaag" wordt bedoeld dat voor de betreffende fluctuatie een beschrijving in het tijdsdomein nodig is.

Dit is het geval in al die gevallen waarbij de dynamische responsie met behulp van computersimulaties in het tijdsdomein bestudeerd wordt (bijvoorbeeld met PHATAS of GAPAT).

Van belang is verder dat in een aantal gevallen rekening gehouden wordt met het feit dat de zeer snelle windfluctuaties slecht gecorreleerd zijn over het rotorvlak. De gehele rotor "voelt" als het ware slechts een deel van de windfluctuaties.

In tabel 1 is aangegeven (met een *) bij welke "benodigde windgegevens" met dit aspect rekening gehouden dient te worden.

Met verwijzing naar Vermeulen (1981) kan gesteld worden dat de extreme windbelasting tijdens normaal parkeren overeenkomt met de extreme windbelasting op een "bouwwerk".

Hiervoor kunnen daarom zonder meer de standaard bouwvoorschriften gehanteerd worden (TGB-1972 of eventuele herzieningen daarvan).

2.3 Beschikbare windgegevens

Uurgemiddelden

De statistiek van de uurgemiddelde wind is beschikbaar op discrete lokaties (bijvoorbeeld meteo stations) in de vorm van

- allerlei tabellen : dagelijkse gang, frequenties, etc.
- mathematische beschrijvingen : Weibull functie voor de kansdichtheid
: Fisher Tippet voor de extremen
etc.

Deze statistiek op discrete lokaties dient voor praktisch gebruik omgerekend te worden naar andere lokaties, rekening houdend met

- hoogteverschillen
- terreinruwheid.

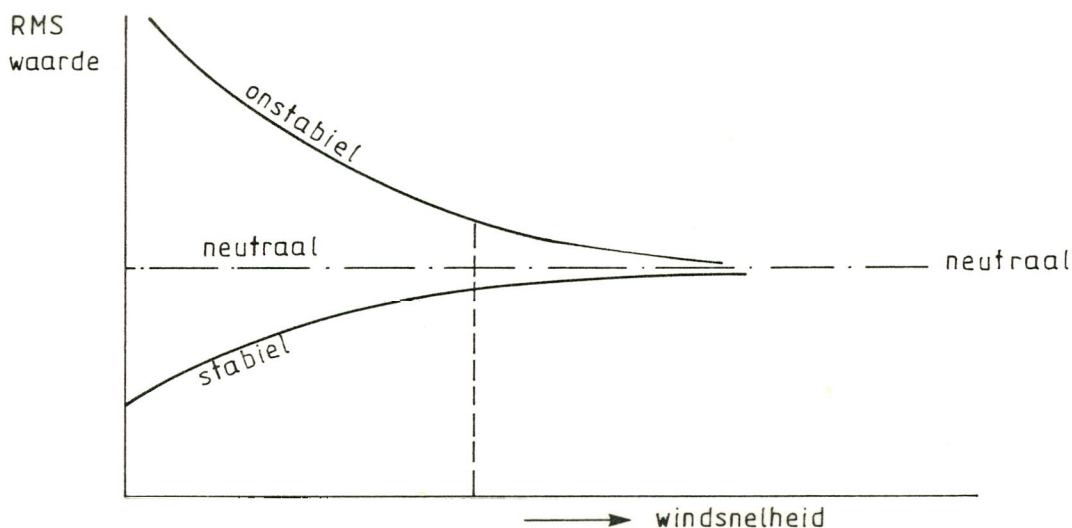
Hiervoor zijn rekenschematisaties beschikbaar welke onder meer besproken worden door Wieringa en Rijkoort (1982) en Vermeulen et Al (1983).

Turbulentie

De schaal en intensiteit van de atmosferische turbulentie is zeer sterk afhankelijk van de atmosferische stabiliteiten (= invloed thermische opbouw van de atmosfeer).

Naarmate het harder gaat waaien, wordt de atmosfeer steeds meer neutraal.

Kijken we bijvoorbeeld naar de RMS waarde van de turbulentie, dan verloopt deze als hieronder geschetst:



Bij lage windsnelheid (bijvoorbeeld 2 m/s) is de spreiding in de RMS waarde een factor 3 à 4. Deze spreiding neemt af met toenemende windsnelheid.

Boven bijvoorbeeld 5 à 10 m/s kunnen we doorgaans van een "neutrale" atmosfeer spreken.

Uitgebreid micro-meteorologisch onderzoek door tal van onderzoekinstellingen heeft geleid tot een redelijk compleet beeld van de atmosferische turbulentie onder neutrale omstandigheden, althans voorzover het de onderste tientallen meters van de atmosfeer betreft. In de

tabellen 2 en 3 is een overzicht gegeven van de micro-meteorologische informatie welke geacht kan worden "standaard" beschikbaar te zijn. Hierin is, voor zover mogelijk, tevens een schatting gegeven van de nauwkeurigheid en "kwaliteit" van de informatie.

In de literatuur kunnen diverse compilaties worden aangetroffen van "standaard" beschrijvingen van enkele of meerdere aspecten van de atmosferische turbulentie. Voorbeelden zijn Frost et al. (1978), WMO (1981), ESDU (1974).

Al deze referenties beschrijven de turbulentiestructuur als functie van de hoogte, de terreinruwheid en de windsnelheid. De beschrijving volgens ESDU is het meest compleet en is speciaal opgezet ten behoeve van windbelastingsproblemen. Bij het huidige project is daarom voor de ESDU beschrijving gekozen.

De modellering volgens ESDU geeft "standaard" turbulentiegegevens die universeel toepasbaar zijn voor relatief vlak en open terrein.

Mutaties ten gevolge van lokale verstoringen ("zog-effecten", topografische effecten) zijn voor een aantal situaties gedeeltelijk aan te geven, bijvoorbeeld met de methoden uit Vermeulen et Al., 1983. Doorgaans zijn invloeden op gemiddelde en RMS te modelleren, doch spectra en zeker kruisspectra niet.

Naast de "standaard" turbulentie gegevens zijn er ten behoeve van windturbineproblemen speciale metingen verricht, zoals naar:

- vlaagvorm
- momentane verticale shear
- over het rotorvlak gemiddelde windrichtingsfluctuaties.

Rechtstreekse toepassing van deze "speciale" metingen als ontwerp-grootheden wordt echter afgeraden omdat de metingen niet gegeneraliseerd zijn, dus ze zijn niet universeel hanteerbaar als functie van de hoogte, de terreinruwheid en de windsnelheid.

Het is daarom veelal niet mogelijk om dergelijke metingen te transformeren naar andere lokaties. De voorkeur verdient een werkwijze waarbij de speciale ontwerpwindgegevens éénduidig afgeleid worden uit de standaard turbulentiebeschrijving. De resultaten van de hierboven beschreven "speciale metingen" kunnen vervolgens gebruikt worden om de afleiding van de ontwerpwindgegevens te valideren.

Deze weg is bijvoorbeeld gevolgd voor de windschering.

3. METHODIEK TER BEPALING VAN DE ONTWERPWINDGEGEVENS

3.1 Effectieve windsnelheidsfluctuaties

3.1.1 Door de rotor van een windturbine "gevoelde" windfluctuaties

Een denkbeeldig punt in de atmosferische grenslaag voelt alle turbulente windfluctuaties zoals weergegeven door een spectrum afgeleid uit éénpunts metingen.

Dit geldt ook voor alle punten van een oppervlak, maar niet voor het oppervlak zelf. Het oppervlak middelt de windfluctuaties als het ware uit of anders gezegd de windfluctuaties zijn slecht gecorreleerd over het oppervlak, waardoor de invloed van de turbulentie geringer is dan men zou verwachten uit de som der delen.

De correlatie over een oppervlak kan in het algemeen niet afgeleid worden uit éénpuntsmetingen, maar uit metingen in één of meer punten in de ruimte gelijktijdig dan wel met een tijdsverschil tussen de metingen. De gebruikelijke vorm is de kovariantiefunctie, het gemiddelde produkt van de fluctuerende snelheidscomponenten, gemeten in één punt met tijdsverschil τ of in twee punten met separatie Δr en/of tijdsverschil τ .

Wanneer de longitudinale fluctuerende snelheidscomponent beschouwd wordt levert dit de volgende covariantiefuncties:

$$\text{één punt :} \quad C_{uu}(\tau) = \overline{u(t) u(t+\tau)} \quad (1)a$$

$$\text{twee punten :} \quad C_{uu}(\Delta r; \tau) = \overline{u(r; t) u(r+\Delta r; t+\tau)} \quad (1)b$$

Meestal worden de kovariantiefuncties genormaliseerd met de variantie:

$$\sigma_u^2 \equiv C_{uu}(0) = \overline{u^2(t)} \quad (2)$$

De genormaliseerde covariantiefuncties worden correlatiefuncties genoemd:

$$\text{één punt :} \quad \rho_{uu}(\tau) = C_{uu}(\tau) / \sigma_u^2 \quad (3)a$$

$$\text{twee punten :} \quad \rho_{uu}(\Delta r; \tau) = C_{uu}(\Delta r; \tau) / \sigma_u^2 \quad (3)b$$

De longitudinale correlatiefunctie ($\Delta r = \Delta x$) wordt afgeleid uit de autocorrelatiefunctie met behulp van de "frozen turbulence" hypothese $x = \bar{U}t$ of direct uit tweepunts-metingen. De laterale correlaties ($\Delta r = \Delta y$ of Δz) volgen uit tweepunts-metingen. Uit de "frozen turbulence" hypothese (stationair) volgt dat de autocorrelatiefunctie symmetrisch is:

$$\rho_{uu}(\tau) = \rho_{uu}(-\tau) \quad (4)$$

In isotrope turbulentie zijn de laterale (d.w.z. verticaal en horizontaal) correlatiefuncties gelijk, echter in de atmosferische grenslaag wordt zeker dicht bij oppervlak aan deze voorwaarde niet voldaan en zijn alle correlatiefuncties verschillend. Toch zal in het vervolg gebruik worden gemaakt van het gegeven dat in een (kwasi-) stationaire atmosferische grenslaag de laterale correlatiefuncties voor kleine separaties nagenoeg symmetrisch zijn $\rho_{uu}(\Delta r; \tau) \cong \rho_{uu}(\Delta r; -\tau)$. Met behulp van de correlatiefuncties zijn lengteschalen, een maat voor de gemiddelde grootte van een vlaag in een bepaalde richting, te definiëren. Voor de longitudinale component zijn dat er drie:

$$r_{L_u} = \int_0^{\infty} \rho_{uu}(\Delta r) d\Delta r \quad (5)$$

Eén longitudinale lengteschaal ($r = x$) en twee laterale lengteschalen ($r = y; z$).

Aangezien het gebruikelijk is in het frequentiedomein te werken worden de covariantiefuncties met behulp van Fouriertransformatie getransponeerd van het tijdsdomein naar het frequentiedomein. Zo is bijvoorbeeld het reeds genoemde "spectrum" $S_u(n)$ de Fouriergetransformeerde van de autokovariantiefunctie $C_{uu}(\tau)$ en heet officieel de spectrale vermogensdichtheidsfunctie. Dit paar is als volgt gekoppeld:

$$S_u(n) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{uu}(\tau) e^{-2\pi j n \tau} d\tau = 2 \int_0^{\infty} C_{uu}(\tau) e^{-2\pi j n \tau} d\tau \quad (6a)$$

$$C_{uu}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_u(n) e^{2\pi j n \tau} dn = \int_0^{\infty} S_u(n) e^{2\pi j n \tau} dn \quad (6b)$$

Eenvoudig is in te zien dat de variantie σ_u^2 gelijk is aan het oppervlak onder de kromme $S_u(n)$:

$$\sigma_u^2 = C_{uu}(0) = \int_0^{\infty} S_u(n) dn \quad (7)$$

Geheel analoog is de Fouriergetransformeerde van de covariantie $C_{uu}(\Delta r; \tau)$ de spectrale dichtheidsfunctie $S_{uu}(\Delta r; n)$, die in het geval van een symmetrische covariantiefunctie de co-spectrale dichtheidfunctie $P_{uu}(\Delta r; n)$ genoemd wordt. Deze wordt genormaliseerd met het "spectrum" in de beide punten met separatie Δr en wordt dan de co-coherentie genoemd:

$$\text{co-coherentie} = \frac{P_{uu}^2(\Delta r; n)}{S_u(n) S_u'(n)} \quad (8)$$

In een stationaire atmosferische grenslaag zijn de éénpunts-spectra $S_u(n)$ en $S_u'(n)$ gelijk zodat geschreven kan worden:

$$P_{uu}(\Delta r; n) = \sqrt{\text{co-coherentie}} S_u(n) \quad (9)$$

De co-spectrale dichtheidsfunctie wordt blijkbaar verkegen door het spectrum als het ware te wegen met de wortel uit de co-coherentie. Fysisch kan een waarde van $P_{uu}(\Delta r; n)$ voor frequentie n gezien worden als afgeleid uit de correlatie met $\tau = 0$ van het gefilterde signaal $u(t; n, \delta n)$ in de punten r en r' . Andere waarden voor $P_{uu}(\Delta r; n)$ kunnen verkregen worden door dit proces te herhalen met andere punten r en r' en met andere frequenties. De co-coherentie voor een bepaalde frequentie kan dus gezien worden als een maat voor de lengteschaal van de turbulentie geassocieerd met die frequentie, analoog aan de lengteschaal verkregen uit de correlatiefuncties. Het spectrum dat door een oppervlak "gevoeld" wordt $S_{u, \text{eff}}(n)$ kan verkregen worden door de co-spectrale dichtheidsfunctie over het oppervlak te integreren:

$$S_{u, \text{eff}}(n) = \frac{1}{A^2} \int_{A_1} \int_{A_2} P_{uu}(\Delta r; n) dA_1 dA_2 \quad (10)$$

waarin Δr - afstand tussen de centra van de oppervlakteëlementen dA_1 en dA_2 .

Omdat het spectrum over het gehele oppervlak A nagenoeg hetzelfde is volgt uit (9) en (10) (dit geldt alleen voor kleine rotoren):

$$S_{u, \text{eff}}(n) = S_u(n) \frac{1}{A^2} \int_{A_1} \int_{A_2} \sqrt{\text{co-coherentie}} dA_1 dA_2 \quad (11)$$

Aangezien deze beschouwing opgezet is voor een oppervlak in de atmosferische grenslaag en uitgewerkt is voor de longitudinale snelheidscomponent is het effectieve spectrum $S_{u,eff}(n)$, het spectrum zoals door de rotor van een windturbine "gevoeld" mits voor het oppervlakte A het rotorvlak gekozen wordt. Kiest men voor A het oppervlak van bijvoorbeeld een wiek dan is het effectieve spectrum het door de wiek "gevoelde" spectrum.

Analoog aan (7) kan ook een effectieve variantie bepaald worden uit:

$$\sigma_{u,eff}^2 = \int_0^{\infty} S_{u,eff}(n) \, dn \quad (12)$$

Kiest men voor A weer het rotorvlak dan is de effectieve variantie de door de rotor gevoelde variantie.

De effectieve variantie zal altijd kleiner of gelijk zijn aan de variantie omdat

$$0 \leq \sqrt{\text{co-coherentie}} \leq 1 \quad (13)$$

Met andere woorden de invloed van de turbulentie op de rotorbelasting is kleiner dan men zou verwachten uit een puntmeting. De optredende variantiereductie is een winstpunt voor de windturbine-ontwerper.

De hierboven uiteengezette werkwijze is gevolgd in het rekenprogramma GUSBR (appendix B). Er wordt gebruik gemaakt van spectrum en co-coherentiefunctie zoals gegeven door ESDU (1974) voor neutrale atmosferische stabiliteit en sterke wind. De invoergrootheden van dit rekenprogramma naast uiteraard de rotordiameter zijn de ashoogte, de oppervlakteruwheid en de uurgemiddelde windsnelheid. Berekend wordt onder andere de effectieve variantie van de windsnelheidsfluctuaties σ_u^2 . Ter illustratie is in figuur 3 de variantiereductie zichtbaar gemaakt. Dit voorbeeld toont dat de variantiereductie veroorzaakt wordt door de verminderde bijdrage van de hoge frequenties, precies volgens de verwachting dat kleine wervels over het rotorvlak uitmiddelen. De variantiereductie kan dan ook gezien worden als het gevolg van een laagdoorlaat-filtering van het spectrum zoals ook vergelijking (11) toont.

Zeer trage windsnelheidsfluctuaties worden door een rotor met variabel toerental omgezet in een toerentalverandering en worden als zodanig niet als belasting gevoeld. De bijdrage van deze laag frequent

windsnelheidsfluctuaties tot de variantie zoals door de rotor "gevoeld" is nihil, dus het spectrum zou tevens hoogdoorlaat gefilterd dienen te worden om het door de rotor "gevoelde" spectrum te verkrijgen. Waar de afkapfrequentie van het hoogdoorlaat-filter precies ligt hangt af van de regelstrategie, rotormassa, enz. en is dus sterk gebonden aan één bepaalde windturbine.

Het rekenprogramma GUSBR heeft een hoogdoorlaat-filter ingebouwd. De ontwerpwindvlagen worden in het project "ontwerpcriteria kleine windturbines" gebruikt als invoer voor real-time simulatieberekeningen. Hierbij worden toerentalvariëaties meegenomen en volgen eventuele belastingsreducties "vanzelf" uit de simulaties. In het vervolg wordt er bij berekeningen om bovenstaande redenen geen gebruik gemaakt van hoogdoorlaat-filters tenzij expliciet vermeld (afkapfrequentie n_{Hp}).

Het door de rotor "gevoelde" spectrum is uiteraard geldig voor een draaiende rotor. Een stilstaande rotor heeft een veel geringer oppervlak en de variantiereductie van de windsnelheidsfluctuaties ten gevolge van coherentieverlies is vrijwel verwaarloosbaar, zodat een stilstaande rotor het gehele spectrum "voelt".

3.1.2 Berekeningsresultaten effectieve windsnelheidsfluctuaties

Met behulp van het computerprogramma GUSBR in de standaardafwijking $\sigma_{u,eff}$ van het door de rotor gevoelde spectrum berekend als functie van:

- de uurgemiddelde windsnelheid $\bar{U}$
- de ashoogte H
- de rotordiameter D
- de terreinruwheid Z_o
- de afkapfrequentie n_{Hp} van het hoogdoorlaat-filter.

Het resultaat is te vinden in tabel 4 in de vorm van de verhouding $\sigma_{u,eff}/\sigma_u$. Tevens is de effectieve zero crossing-rate $N_{eff}(0)$ gegeven (zie § 3.22 vergelijking (16)).

De combinatie $\bar{U} = 13 \text{ m/s}$, $H = 20 \text{ m}$, $D = 16 \text{ m}$, $Z_o = 0,03 \text{ m}$ en $n_{Hp} = 0 \text{ s}^{-1}$ is binnen de projectgroep gebruikt als de gegevens voor een "standaard" kleine windturbine.

Geconstateerd kan worden dat het filtereffect van de laterale coherentie betreffende de $\sigma_{u,eff}/\sigma_u$ -verhouding weinig afhankelijk is van de onderzochte parameters. Voor een uurgemiddelde windsnelheid $\bar{U}$ groter dan 10 m/s ligt de verhouding in alle gevallen tussen 0,85 en 0,95, behalve wanneer gerekend wordt met een afkapfrequentie n_{Hp} voor het high pass-filter F_{Hp} :

$$\begin{aligned} F_{Hp} &= 0 & n < n_{Hp} \\ &= 1 & n \geq n_{Hp}. \end{aligned}$$

De door de rotor "gevoelde" zero crossing-rate $N_{eff}(o)$ blijkt slechts gevoelig voor de uurgemiddelde windsnelheid. Dit is consistent met het beeld van een nagenoeg constante vlaaglengthe:

$$\begin{array}{ll} \bar{U} & \text{vlaaglengthe} = \bar{U}/2N_{eff}(o) \\ [m/s] & [m] \end{array}$$

5	56
13	70
20	75

Voor alle gevallen met een uurgemiddelde windsnelheid $\bar{U} = 13$ m/s wordt een zero crossing-rate gevonden van ongeveer 1 x per 10 seconden.

3.2. Windvlagen

3.2.1 Inleiding

Het begrip vlaag ("gust") komt in de conventionele turbulentie literatuur niet voor, wel in het fysische spraakgebruik. Een mogelijke definitie voor vlaag is een samenstelling van iedere reeks discrete snelheids-tijd gebeurtenissen, die gedefinieerd kunnen worden uit een turbulentie tijdreeks, in overeenstemming met één of ander extrinsiek criterium (Powell & Connell, 1980). Het extrinsieke criterium hangt af van het doel waarvoor men een vlaag wil gebruiken. De definitie houdt niet in dat een discrete vlaag een intermitterend stukje turbulentie met grote fluctuaties

is. Toch kan het extrinsieke criterium bijvoorbeeld een minimale grootte van de windfluctuaties voor een vlaag definieren, zodat de discrete vlaag wat meer overeenkomt met de fysische betekenis van vlaag. In ieder geval wordt een discrete vlaag bepaald door snelheid en tijd, maar het valt nog te bezien of de vlaagsnelheids- en tijdschalen overeenkomen met "bekende" turbulentieschalen, die volgen uit gebruikelijke statistische analyses van het snelheids-tijdsignaal. Bij dergelijke analyses gaat het intermitterende karakter van turbulentie verloren omdat bepaalde discrete gebeurtenissen worden uitgemiddeld. Een discreet vlaagmodel zou dus niet moeten volgen uit standaard turbulentie definities maar uit de statistiek van discrete gebeurtenissen welke zijn vastgelegd door het kiezen van één of ander criterium (conditional sampling).

Verschillende criteria zijn in omloop voor de vlaagtijdschaal. Sommige auteurs gaan uit van een vastgelegde vlaagtijd, bijvoorbeeld Kerrigan (1977): "De schatting van de frequentie waarmee de windcomponent een bepaalde hoeveelheid in een bepaalde tijd verandert, wordt als belangrijk verondersteld" (de statistiek van de snelheidsverandering van een arbitrair vastgesteld tijdsinterval) of Frost et al. (1978): "De voorspelling van de vlaaggrootte veronderstelt dat de duur van de gewenste ontwerpvlaag een bekende parameter is, afgeleid uit de dynamische analyse van het systeem". Andere auteurs laten de vlaagtijdschaal variëren voor de verschillende vlagen, zoals Ramsdell (1978) die de verschillende vlaaggebeurtenissen een verschillende tijdschaal geeft (figuur 4, gust_0 en gust_1 -definities) of Powell & Connell (1980) die spreken over de meest waarschijnlijke tijd van een vlaag met een bepaalde amplitude.

Echter een vlaag blijft een schematisering van de werkelijkheid met in dit geval als doel ontwerpberekeningen voor kleine windturbines. De beoordeling van zo'n vlaag kan pas geschieden nadat bekend is voor welke soort ontwerpberekening de vlaag gebruikt wordt en wat daarbij kritisch is, de gradiënt, de amplitude en/of de duur (de totale periode of alleen de eerste helft) (figuur 5), welke overschrijdingskansen gekozen dienen te worden en wat doorgerekend gaat worden (rotor of een wiek bijvoorbeeld).

Van belang is ook voor welke turbine (ashoogte, rotordiameter, rotortraagheid) berekeningen uitgevoerd gaan worden en voor welke lokatie van de windturbine (terreinruwheid, windstatistiek). Het is duidelijk dat één enkele vlag niet voor alle gevallen geschikt zal zijn maar afhankelijk van de ontwerpspecificaties meer vlagen nodig zullen zijn.

Na een inventaris van de benodigde en beschikbare windgegevens (paragrafen 2.2, 2.3) is gebleken dat niet alle nodig geachte gegevens nodig om een vlag te construeren aanwezig zijn, zoals bijvoorbeeld de statistiek van conditioneel bemonsterde windsnelheidssignalen. Getracht is met de beschikbare statistiek zo realistisch mogelijke windvlagen te construeren, waarvoor zoals in figuur 5 geschetst, kennis nodig is van amplitude, gradiënt en duur van een vlag, kortom de vlagvorm.

3.2.2 Vlaagvorm

Om realistische vlagen te construeren is in eerste instantie informatie nodig over amplitude, gradiënt en duur van een vlag.

Amplitude

De vlagamplitude kan afgeleid worden uit de RMS-waarde van de windsnelheidsfluctuaties ($= \sigma_u$) in combinatie met een waarschijnlijkheidsdichtheidsverdeling. Voor kleine amplitudes (tot ongeveer $3 \sigma_u$) kan een Gaussische verdeling (14) gebruikt worden, maar extreme fluctuaties ($\geq 4 \sigma_u$) kunnen hiermee niet meer bepaald worden.

$$P(u > \underline{u}) = \int_{\underline{u}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_u} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{\sigma_u}\right)^2\right) du \quad (14)$$

Extreme fluctuaties worden berekend met de Fisher-Tipett I-verdeling. Dit is de verdeling van de éénmaal in een meetperiode met lengte T_∞ voorkomende maxima van een signaal met Gaussische verdeling. De kans $P(\hat{u} > a)$ dat het maximum $\hat{u}$ van meetperiodes met lengte T_∞ groter is dan a volgt uit:

$$a = \sigma_u \left\{ \sqrt{2 \ln(N(o) T_\infty)} + \frac{-\ln(-\ln(1-P(\hat{u} > a)))}{\sqrt{2 \ln(N(o) T_\infty)}} \right\} \quad (15)$$

Hierin is $N(o)$ de zogenaamde zero crossing-rate, gedefinieerd als het aantal positieve gemiddelde waarde-doorsnijdingen van sinusvormige signalen (Rice, 1945). $N(o)$ kan berekend worden uit het spectrum:

$$N(o) = \left(\frac{\int_0^\infty n^2 S(n) dn}{\int_0^\infty S(n) dn} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Nu kan volgens de Fourier-analyse ieder signaal opgebouwd worden uit sinussen en cosinussen, zodat ook voor een turbulentiesignaal de zero crossing-rate uitgerekend kan worden. Ook een door de rotor "gevoelde" zero crossing-rate $N_{eff}(o)$ kan worden bepaald door in (16) het effectieve spectrum te gebruiken. Uit (16) kan ook nog afgeleid worden dat het aantal keren dat het niveau A met positieve helling doorsneden wordt gelijk is aan:

$$N(A) = N(o) \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{A}{\sigma_u} \right)^2 \right) \quad (17)$$

Kwantitatieve gegevens met betrekking tot de grootte van de amplitude kunnen dus verkregen worden indien een overschrijdingsniveau vastgelegd wordt en het spectrum of effectieve spectrum bekend is.

Gradiënt

Het spectrum van de snelheidsgradiënt $\frac{du}{dt}$ kan analytisch afgeleid worden uit het spectrum van de snelheidsfluctuaties (Tennekes & Lumley, 1972):

$$\overline{\frac{d u(t)}{dt} \frac{d u(t^1)}{dt^1}} = \frac{d^2 C_{uu}(t-t^1)}{dt dt^1} = - \frac{d^2 C_{uu}(\tau)}{d\tau^2} \quad (18)$$

Geheel analoog aan (6) kan ook een Fourierpaar gedefinieerd worden:

$$S_{\frac{du}{dt}}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} - \frac{d^2 C_{uu}(\tau)}{d\tau^2} e^{-2\pi j n \tau} d\tau \quad (19)a$$

$$- \frac{d^2 C_{uu}(\tau)}{d\tau^2} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\frac{du}{dt}}(n) e^{2\pi j n \tau} dn \quad (19)b$$

De tweede afgeleide van de autocovariantiefunctie kan bepaald worden met behulp van (6)b:

$$- \frac{d^2 C_{uu}(\tau)}{d\tau^2} = \int_{-\infty}^{\infty} -(2\pi j n)^2 S_u(n) e^{2\pi j n \tau} dn \quad (20)$$

Eenvoudig is door vergelijken van (19)b en (20) in te zien dat het spectrum van de snelheidsgradiënt gelijk is aan:

$$S_{\frac{du}{dt}}(n) = (2\pi n)^2 S_u(n) \quad (21)$$

De variantie van de fluctuerende snelheidsgradiënt is gedefinieerd als:

$$\sigma_{\frac{du}{dt}}^2 = \int_0^{\infty} S_{\frac{du}{dt}}(n) dn \quad (22)$$

De zero crossing-rate (16) is met dit resultaat te schrijven als verhouding tussen de standaardafwijkingen van gradiënt en snelheid:

$$N(0) = \frac{\sigma_{\frac{du}{dt}}}{2\pi\sigma_u} \quad (23)$$

In tegenstelling tot de kansdichtheid van de snelheidsfluctuaties is de kansdichtheidsverdeling van de fluctuerende snelheidsgradiënt in de atmosfeer niet Gaussisch. De Gaussische verdeling geldt slechts tot ongeveer $3 \sigma_{\frac{du}{dt}}$. Metingen hebben tevens een licht negatieve skewness aangetoond, dus grote negatieve waarden komen vaker voor dan grote positieve. Figuur 6 toont twee gemeten kansdichtheidsverdelingen van $\frac{du}{dt}$ (Van Atta & Chen, 1970; Sheih, Tennekes & Lumley, 1971).

Duur

Over de duur van windvlagen die een rol spelen voor de rotorbelasting is slechts weinig bekend. Doran & Powell (1981) hebben

een empirische (conditionele) waarschijnlijkheidsrelatie opgesteld (metingen bij neutrale atmosferische stabiliteit, $\bar{U} = 10,4 \div 17,8$ m/s, $z = 6,1 \div 61$ m). Gegeven een amplitude A , dan is $T_x(A)$ de tijdspanne waarvoor geldt dat $x\%$ van de vlagen korter of even lang duren, betrouwbaar voor $A \leq 3\sigma_u$:

$$T_{25}(A) = 0,39 \frac{1}{2 N(o)} \left(\frac{A}{\sigma_u}\right)^{2,16} \quad (24)a$$

$$T_{75}(A) = 1,19 \frac{1}{2 N(o)} \left(\frac{A}{\sigma_u}\right)^{1,87} \quad (24)b$$

Sherman & Thomson (1973) gebruiken de incomplete gammaverdeling ("best fit") voor de conditionele kans dat een vlag met amplitude groter dan A een duur T heeft die groter is dan een bepaalde waarde T_A :

$$P(T > T_A \mid u > A) = \Gamma\left(\frac{A}{\sigma_u}, T\right) \quad (25)$$

Waarden rond het gemiddelde zijn niet erg betrouwbaar en voor $u > 3\sigma_u$ wordt geen oplossing gegeven. Gemeten is (ruw terrein) dat de minimum vlagduur ongeveer 8 seconden bedraagt bij hoge windsnelheid, waarbij de vlagduur gedefinieerd is als de tijd tussen twee positieve gemiddelde waarde-doorsnijdingen. Over de vlagduur van zeer zelden voorkomende vlagen kan met de beschikbare gegevens niets voorspeld worden.

Wel blijkt dat de vlagduur in het algemeen toeneemt met de amplitude. Het enig van belang zijnde criterium blijkt de minimale vlagduur tussen twee positieve gemiddelde waarde-doorsnijdingen van ongeveer 8 seconden te zijn.

Samenvattend kan gesteld worden dat als berekenbare grootheden beschikbaar zijn:

- de waarschijnlijkheidsverdeling van de amplitude A
- de waarschijnlijkheidsverdeling van de gradiënt $\frac{du}{dt}$

$$\text{tot } \frac{du}{dt} \leq 3 \sigma_{\frac{du}{dt}}$$

- de conditionele waarschijnlijkheidsverdeling van de duur T_0 van vlagen met een amplitude $A \leq 3 \sigma_u$ en een ondergrens voor de duur van een vlaag bij hoge gemiddelde windsnelheid ($T_0 \geq 4s$).

Gemist wordt voor de constructie van een vlaag:

- de conditionele waarschijnlijkheidsverdeling van de gradiënt bij gegeven amplitude (het is zeker niet noodzakelijk dat het optreden van een extreme gradiënt samenvalt met het optreden van een extreme amplitude. Wanneer geen correlatie bestaat is de kans dat een vlaag optreedt met amplitude volgend uit een overschrijdingskans van 1% én gradiënt met een overschrijdingskans van 1%, gelijk aan 0,01%.)
- informatie over de vlaagvorm. Aangezien gewerkt wordt in het frequentiedomein (spectra) is essentiële informatie over het verloop in tijd van de snelheidsfluctuaties verloren gegaan.
- overschrijdingsniveaus nodig om uit de waarschijnlijkheidsverdelingen amplitude en gradiënt te berekenen. De keuze is essentieel, de overschrijdingsniveaus zijn de criteria voor ontwerpwindvlagen. Hoofdstuk 4 geeft de criteria zoals door de projectgroep vastgesteld.

In het algemeen kan over de vlaagvorm opgemerkt worden dat maximale snelheidsgradiënten eerder op zullen treden bij de doorsnijding van de gemiddelde waarde (zero crossing) dan bij instane windsnelheden ongelijk aan de uurgemiddelde windsnelheid. Een vlaag met bijvoorbeeld een $(1-\cos)$ -vorm lijkt weinig realistisch. Empirische vlaagmodellen, zoals bijvoorbeeld het model van Frost et al. (1978), geven de maximale gradiënt op $t = 0$, dus tijdens de gemiddelde waardedoorsnijding. Een vlaagmodel als het gust_0 -model (figuur 4) lijkt dus het meest realistisch.

Voor een dergelijke vorm is dan ook gekozen. Met de berekenbare gegevens van amplitude en gradiënt is een schets te maken van de globale vorm van een vlaag (fig.7).

De vorm is mathematisch vastgelegd door een 4^e -graads polynoom voor de longitudinale fluctuerende snelheidscomponent als functie

van de tijd:

$$\tilde{u}(t) = \bar{U} + u(t)$$

$$t = 0 : u(t) = 0$$

$$\frac{du}{dt} = B$$

$$\frac{d^2u}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^3u}{dt^3} < 0$$

$$t = T_o/2 : u(t) = A$$

$$\frac{du}{dt} = 0$$

$$\frac{d^2u}{dt^2} < 0$$

Waarin $A = u_{\max}$ en $B = \left(\frac{du}{dt}\right)_{\max}$, de met behulp van gekozen overschrijdingsniveaus berekende amplitude respectievelijk gradiënt en T_o de vlagduur geschat uit (24) als $A \leq 3\sigma_u$ of elders groter dan ongeveer 4 s ($A > 3\sigma_u$). Het 4^e-graads polynoom ziet er als volgt uit:

$$u(t) = Bt + \left(\frac{32A}{T_o^3} - \frac{12B}{T_o^2}\right) t^3 + \left(\frac{16B}{T_o^3} - \frac{48A}{T_o^4}\right) t^4$$

$$\text{terwijl } T_o < \frac{4A}{B} \text{ en } 0 \leq t \leq T_o/2 \quad (26)a$$

De vlag is symmetrisch verondersteld ten opzichte van $t = T_o/2$, zodat voor de instantane vlagsnelheid geldt:

$$\begin{aligned} \tilde{u}(t) &= \bar{U} + u(t) & 0 &\leq t \leq T_o/2 \\ &= \bar{U} + u(T_o - t) & T_o/2 &\leq t \leq T_o \\ &= \bar{U} - u(t - T_o) & T_o &\leq t \leq 3T_o/2 \\ &= \bar{U} - u(2T_o - t) & 3T_o/2 &\leq t \leq 2T_o \end{aligned} \quad (26)b$$

Vergelijking (26) geeft een universele vlagvorm. In praktijk is er bij ontwerpers van windturbines behoefte aan zogenaamde extreme vlagen ten behoeve van sterkteberekeningen en aan zoge-

naamde vermoeiingsvlagen ten behoeve van vermoeiingsberekeningen. Beide vlagen kunnen beschreven worden met deze universele vlag-vorm.

Voorbeeldberekeningen van dergelijke vlagen worden gegeven in hoofdstuk 4, na het vastleggen van de overschrijdingscriteria voor amplitude en gradiënt.

3.2.3 Vermoeiingsvlagen

Vlagen ten behoeve van vermoeiingsberekeningen worden niet zo zeer gekenmerkt door extreme amplitude en gradiënt als wel door het periodieke karakter met meer gematigde amplitude en gradiënt waarbij met gematigd bedoeld wordt, representatief voor wat een windturbine tijdens zijn levensduur ondervindt. Typische amplituden en gradiënten voor vermoeiingsvlagen kunnen beschreven worden met de Gaussische waarschijnlijkheidsdichtheidsverdeling. De duur van zo'n vlag volgt "typisch" uit de zero crossing-rate:

$$T_o \cong (2 N_{\text{eff}}(o))^{-1} \quad (27)$$

Uit (24) blijkt dat bij een amplitude waarvoor geldt dat $0,9\sigma_u < A < 1,55 \sigma_u$ de met (27) bepaalde duur T_o tussen $T_{25}(A)$ en $T_{75}(A)$ ligt, dat wil zeggen dat minstens 25% van de vlagen korter duurt en maximaal 25% van de vlagen langer duurt dan T_o .

Bij gebruik van (27) voor het berekenen van de duur van een vermoeiingsvlag mag uiteraard het mathematisch criterium $T_o < \frac{4A}{B}$ (anders past geen 4^e-graads polynoom) geen geweld worden aangedaan. Door amplitude A en gradiënt B te schrijven als het produkt van een constante β (volgend uit de gekozen overschrijdingskans) en de standaardafwijking σ volgens:

$$A = \beta \sigma_{u,\text{eff}} \quad \text{en} \quad B = \beta' \sigma \frac{du}{dt}, \text{eff} \quad (28)$$

volgt met gebruikmaking van (23) dat moet gelden:

$$\beta^1 < \frac{4}{\pi} \beta \quad (29)$$

Hieraan wordt eenvoudig voldaan door gelijke overschrijdingskans voor amplitude en gradiënt te kiezen ($\beta = \beta^1$).

Samenvattend geldt voor een vermoeiingsvlaag dat:

- de vorm beschreven wordt door vergelijking (26)
- de duur T_o berekend wordt met vergelijking (27)
- de overschrijdingskansen (criteria) voor amplitude en gradiënt gelijk gekozen dienen te worden
- de amplitude en gradiënt berekend kunnen worden met de Gaussische verdeling
- de overschrijdingskans voor amplitude en gradiënt gekozen dient te worden in het interval $6 \div 18\%$ ($0,9 < \beta < 1,55$).

3.2.4 Extreme vlagen

Extreme vlagen dienen extreme windsnelheid en extreme gradiënt zoals een windturbine "in bedrijf" tijdens zijn levensduur kan ontmoeten te beschrijven. In paragraaf 3.2.2 is reeds opgemerkt dat niets bekend is over de correlatie tussen het optreden van een extreme windsnelheid en het optreden van een extreme windsnelheidsgradiënt. Gelijktijdig optreden van beiden is zeer onwaarschijnlijk bij veronderstelde ongecorreleerdheid van amplitude en gradiënt. De waarschijnlijkheidsdichtheidsverdeling van de extreme gradiënt is onbekend evenals de duur van een extreme vlaag. De extreme amplitude kan daarentegen bepaald worden met de Fisher-Tippett I-verdeling (15). Wanneer dezelfde verdeling gebruikt wordt voor de extreme gradiënt kan met behulp van vergelijking (26) de vorm van een extreme vlaag vastgelegd worden. De duur van zo'n vlaag volgt uit het criterium voor de minimale vlagduur $T_o > 4$ s (Sherman & Thomson, 1973) en het mathematisch criterium $T_o < \frac{4A}{B}$.

De te kiezen overschrijdingskansen volgen uit overwegingen betreffende de levensduurverwachting van de windturbine. Samenvattend geldt voor een extreme vlaag dat:

- de vorm beschreven wordt door vergelijking (26)
- na keuze van overschrijdingskansen voor amplitude en gradiënt extreme waarden berekend worden met de Fisher-Tippett I-verdeling (15)
- de duur T_o vastgesteld wordt in het interval $4 \leq T_o < \frac{4A}{B}$.

3.3 Windrichtingsveranderingen

3.3.1. Inleiding

Windrichtingsveranderingen in de atmosfeer kunnen beschreven worden door onderscheid te maken tussen veranderingen ten opzichte van de uurgemiddelde windrichting (turbulentie, tijdschaal 1 min. tot 1 sec., stationair) en veranderingen ten gevolge van instationaire verschijnselen zoals fronten en buien (tijdschaal 1 uur tot ca. 10 sec.).

Vanuit het standpunt van de molenontwerper gezien zijn windrichtingsveranderingen van belang voor de regeling van het kruimechanisme (turbulentie) en voor de bepaling van optredende belastingen. Afhankelijk van het molentype is er een kritieke scheve aanstromingshoek te vinden waarbij de optredende belastingen maximaal zijn.

Beschouwing van instationaire verschijnselen zal uitwijzen of de kritieke hoek bereikt wordt.

Turbulente windrichtingsfluctuaties worden bepaald in § 3.3.2 en instationaire verschijnselen worden besproken in § 3.3.3.

3.3.2 Stationaire windrichtingsfluctuaties

De bepaling van "turbulente" windrichtingsverandering zoals door de rotor van een windturbine "gevoeld" verloopt geheel analoog aan de bepaling van de door de rotor "gevoelde" windsnelheidsfluctuaties in paragraaf 3.1.1. De windrichtingsveranderingen θ worden beschouwd als variaties rond de uurgemiddelde windrichting en kunnen afgeleid worden uit het spectrum van de v-snelheidscomponent onder de volgende aannamen (zie figuur 8):

- de windrichtingsverandering θ is klein, dus
 $v \ll \bar{U}$, zodat $\tan \theta \cong \theta$
- de windsnelheidsfluctuaties zijn klein ten opzichte van de uurgemiddelde windsnelheid, dus $u \ll \bar{U}$.

Dan geldt:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v}{\bar{U} + u} \rightarrow \theta \cong \frac{v}{\bar{U}} \quad (30)$$

De autocovariantiefunctie van v is:

$$C_{vv}(\tau) = \overline{v(t) v(t+\tau)} \quad (31)$$

$$\text{met } C_{vv}(0) = \overline{v^2(t)} = \sigma_v^2 \quad (32)$$

Het vermogensspectrum van de v -component volgt uit de Fourier-transformatie:

$$S_v(n) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{vv}(\tau) e^{-2\pi j n \tau} d\tau \quad (33)a$$

en

$$\sigma_v^2 = \int_0^{\infty} S_{vv}(n) du \quad (33)b$$

Geheel analoog geldt:

$$C_{\theta\theta}(\tau) = \overline{\theta(t) \theta(t+\tau)} \quad (34)$$

$$\text{met } C_{\theta\theta}(0) = \overline{\theta^2(t)} = \sigma_{\theta}^2 \quad (35)$$

Het vermogensspectrum van θ' :

$$S_{\theta}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{\theta\theta}(\tau) e^{-2\pi j n \tau} d\tau \quad (36)$$

$$\text{en } \sigma_{\theta}^2 = \int_0^{\infty} S_{\theta}(n) dn \quad (37)$$

Nu volgt uit (30), (31) en (34):

$$C_{\theta\theta}(\tau) = C_{vv}(\tau) / \bar{U}^2 \quad (38)$$

Uit (33a), (36) en (38) volgt :

$$S_{\theta}(n) = S_v(n) / \bar{U}^2 \quad (39)$$

En uit (33)b, (37) en (39) volgt :

$$\sigma_{\theta} = \sigma_v / \bar{U} \quad (40)$$

Dus het vermogensspectrum van de windrichtingsfluctuaties is recht evenredig met het vermogensspectrum van de v-component van de windsnelheid.

Geheel analoog aan de afleiding van het door de rotor gevoelde spectrum van de (longitudinale) windsnelheidsfluctuaties loopt de afleiding van het door de rotor gevoelde spectrum van de windrichtingsfluctuaties: het vermogensspectrum wordt a.h.w. gewogen met de $\sqrt{\text{co-coherentie}}$:

$$S_{\theta\theta}(\Delta r; n) = \sqrt{\text{co-coherentie}} S_{\theta}(n) \quad (41)$$

Het door de rotor gevoelde spectrum van de windrichtingsfluctuaties wordt dan gevonden door het kruisspectrum over het rotorvlak te middelen:

$$S_{\theta, \text{eff}}(n) = \frac{1}{A^2} \int_{A_1} \int_{A_2} S_{\theta\theta}(\Delta r; n) dA_1, dA_2 \quad (42)$$

waarin Δr de afstand tussen de centra van de oppervlakteëlementen dA_1 en dA_2 is.

Uit (41) en (42) met de veronderstelling dat het vermogensspectrum over het gehele rotorvlak hetzelfde is volgt:

$$S_{\text{eff}, \theta}(n) = S_{\theta}(n) \frac{1}{A^2} \int_{A_1} \int_{A_2} \sqrt{\text{co-coherentie}} dA_1 dA_2 \quad (43)$$

$$\text{En ook : } \sigma_{\theta, \text{eff}}^2 = \int_0^{\infty} S_{\theta, \text{eff}}(n) dn \quad (44)$$

Geheel analoog aan (16) en (23) kunnen een zero crossing-rate $N(o)$ en standaard afwijking van de gradiënt $\sigma \frac{d\theta}{dt}$ berekend worden volgens :

$$N(o) = \left\{ \frac{\int_0^{\infty} n^2 S_{\theta}(n) dn}{\int_0^{\infty} S_{\theta}(n) dn} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

$$\sigma_{\frac{d\theta}{dt}} = 2 \pi \sigma_{\theta} N(o) \quad (46)$$

Het rekenprogramma GUSBR berekent het door de rotor "gevoelde" spectrum van de windrichtingsfluctuaties, en daarmee de effectieve standaardafwijking van de windrichtingsfluctuaties en -gradiënt en de effectieve zero crossing-rate.

Ter illustratie (zie Bijlage B, fig. B.6) de volgende resultaten voor de "standaard" kleine windturbine ($\bar{U} = 13$ m/s, $H = 20$ m, $D = 16$ m, $Z_o = 0,03$ m) berekend met GUSBR:

$$- \sigma_{\theta} = 6,7^{\circ}$$

$$- \sigma_{\theta, \text{eff}} = 3,1^{\circ}$$

Hieruit blijkt dat de rotor bijzonder effectief filtert ($\sigma_{\theta, \text{eff}}/\sigma_{\theta} \cong 0,5$). De gemiddelde duur van een door de rotor "gevoelde" exkursie buiten de uurgemiddelde windrichting is (fig. B.6) veel kleiner dan de duur van een longitudinale windvlaag, zodat de windrichtingsverandering zeer snel kan zijn, maar waarvoor tevens geldt dat afwijkingen van meer dan 10° zeer zelden voorkomen (let wel, onder neutrale atmosferische omstandigheden).

3.3.3 Instationaire windrichtingsfluctuaties

Voor de behandeling van windrichtingsveranderingen ten gevolge van instationaire verschijnselen (fig. 1A) wordt onderscheid gemaakt tussen fronten en buien.

Frontsystemen

Veranderingen in windsnelheid en windrichting kunnen optreden bij de passage van frontsystemen die behoren bij grootschalige weersystemen. De structuur van dergelijke frontsystemen is recent vooral bestudeerd met behulp van radartechnieken. Op grond van vooral dit nieuwe materiaal kan een redelijk beeld verkregen worden van de variabiliteit van het windveld tijdens frontpassages. Dit wordt hierna uitgewerkt voor een koufront; niet alleen omdat daar het meeste onderzoek aan gewijd is, maar vooral omdat daarbij de grootste veranderingen in windsnelheid en windrichting optreden. Bij het overzicht is met name gebruik gemaakt van de studies van Hobbs en Biswas (1979), Hobbs et al. (1980), Hobbs en Persson (1982), Carbone (1982), James en Browning (1979) en Testud et al. (1980).

Het complete koufront is een zeer grootschalig systeem. De diepte (loodrecht op het front) is ca. 100 km, en de lengte (evenwijdig aan het front) bedraagt meerdere honderden kilometers. De windsnelheidsvariaties over het gehele front treden op, op een tijdschaal van meerdere uren en zijn als zodanig voor de huidige studie niet relevant. Het koufront is echter opgebouwd uit enige kleinere elementen die op hun beurt ook weer bestaan uit nog kleinere elementen. Het koufront is in de eerste plaats opgebouwd uit "rain-band".

Figuur 9a geeft een dwarsdoorsnede door een door Hobbs et al. (1980) bestudeerd koufront, terwijl figuur 9b een horizontaal overzicht geeft. Hierin zijn met arceringen de op een bepaald tijdstip aanwezige "rain-bands" aangegeven.

Hobbs et al. (1980) geven de volgende classificatie van de "rain-bands":

- warm-sector rainbands

Dit zijn relatief diepe (25 à 50 km) brede banden die gesitueerd zijn in het warme gedeelte, vóór het koufront.

- wide cold-frontal rainbands

Deze banden zijn eveneens relatief diep en bevinden zich boven en achter het koufront (fig. 9: bands 1 t/m 4).

- narrow cold-frontal rainband

Relatief smalle (5 à 10 km) band die zich bevindt ter plaatse van de grondlokatie van het koufront (fig.9: band 5). De narrow cold-frontal rainband wordt gekenmerkt door hevige neerslag en relatief snelle veranderingen in windsnelheid en windrichting.

Fig. 9 illustreert dat de variaties in windsnelheid en windrichting vooral optreden bij de passage van de narrow cold-frontal rainband. Een karakteristieke volgorde hierbij is dat de windvector vóór het front evenwijdig aan het front is met windsnelheden van 10 à 15 m/s, terwijl achter het front (5 à 10 minuten later) de windrichting samenvalt met de trekrichting van het front; hierbij is de windsterkte afgenomen tot 5 m/s of lager.

Radarbeelden tonen aan dat de "rainbands" op hun beurt weer opgebouwd zijn uit kleinere structuren. Deze gebieden vertonen een verhevigde neerslag en worden daarom door Hobbs et al. (1980) "precipitation cores" genoemd. In de "warm-sector" en "wide cold-frontal rain bands" treden deze gebieden niet volgens een vast patroon op.

De "narrow cold-frontal rainband" is daarentegen wel opgebouwd uit een herkenbaar patroon van structuren. De gebieden met verhoogde neerslag ("precipitation cores" of "line-elements") worden afgewisseld met gebieden met veel minder neerslag ("gaps"). Volgens James en Browning (1979) treden de hevige windsnelheid- en windrichtingsveranderingen alleen op bij passage van een lijnelement.

Fig. 10 is overgenomen uit James en Browning (1979) en geeft een schematische weergave van de "narrow cold-frontal rainband".

Tijdens de passage van een "line element" wordt een windrichtingsverandering van ca. 45° in 2 minuten geconstateerd bij een windsnelheid van 10 m/s.

Ook andere door de auteurs gegeven registraties vertonen ca. 45° windrichtingsverandering binnen enkele minuten.

De lengte van de lijnelementen en de "gaps" wordt gegeven in onderstaande tabel.

	gemiddelde lengte (km)	meest waarschijnlijke lengte (km)
"gap"	9	5
"line element"	22	11

De breedte van de lijnelementen is 1.6 to 4.5 km. Kenmerkend is verder dat de bewegingsrichting van de elementen niet samenvalt met die van het gehele front. Alle elementen hebben een snelheidscomponent evenwijdig aan het front (zie fig. 10).

Hobbs en Biswas (1979) analyseren eveneens radarbeelden en komen tot vergelijkbare resultaten.

Figuur 11 geeft enkele karakteristieke resultaten met betrekking tot vorm en bewegingsrichting van de elementen (door hen "precipitation cores" genoemd).

Het is opvallend dat uit de resultaten van Hobbs en Biswas (1979) blijkt dat de oriëntatie (α_1) en de trekrichting van de elementen (α_2) nagenoeg identiek zijn. Dit betekent dat een vast punt (zoals een windturbine) door de lange as van een "precipitation core" gepasseerd wordt.

De passagetijd ($\frac{L}{V} \sim 1000 \text{ sec.}$) van zo'n element is dan relatief groot. Dit is in tegenspraak met de conclusie van James en Browning (1979) dat de gebieden met verhoogde neerslag tevens de "windshift" gebieden zijn. Hobbs en Persson (1982) hebben een nog meer gedetailleerde studie uitgevoerd van de structuur van het "narrow cold-frontal rainband". Hierbij is gebruik gemaakt van Doppler radar waarmee niet alleen de mate van neerslag maar tevens de snelheidsvector bepaald kan worden. Met veel rekenwerk op basis van vele veronderstellingen is het mogelijk om vanuit de gemeten Doppler verschuiving (afkomstig van neerslagdeeltjes) de snelheid te berekenen. De ruimtelijke resolutie van deze meettechniek is relatief gering. Doorgaans wordt gemiddeld over blokken met horizontale afmetingen van meerdere kilometers.

Bij Hobbs en Persson (1982) is de resolutie echter opgevoerd tot blokken van 240 meter. Hierdoor kunnen de elementen in het koufront tot in detail bestudeerd worden.

Figuur 12 en 13 geven resultaten van een door hen bestudeerd "narrow cold-frontal rainband" Fig. 12 toont een horizontale doorsnede waarbij de "precipitation cores" en de gebieden met sterke windrichtingsveranderingen ("windshift zones") apart weergegeven zijn.

Hieruit blijkt duidelijk dat windveranderingen niet exact gelijktijdig optreden met de verhoogde neerslag. De hevige windveranderingen vinden plaats op enkele kilometers vóór de "precipitation cores". In de gebieden tussen de "precipitation cores" vindt een meer geleidelijke verandering plaats. Ook de verticale door-

snede (fig. 13) laat zien dat windveranderingen en hevige neerslag niet samenvallen. Over de trekrichting van de "windshift zones" geven Hobbs en Persson (1982) geen informatie. Gezien de snelle windrichtingsveranderingen op grondniveau (zie fig. 10) kan echter verwacht worden dat de trekrichting van "windshift zones" min of meer samenvalt met de trekrichting van het koufront zelf.

De "windshift" zone in fig. 13 heeft een breedte van ca. 1 km. Bij een frontsnelheid van 10 m/s of 20 m/s passeert deze zone een vast punt (zoals een rotor) in 100 respectievelijk 50 seconden. Dit komt overeen met de tijdschaal waarop James en Browning (1979) snelle windrichtingsveranderingen registreren. De conclusie lijkt gerechtvaardigd dat bij de passage van koufronten windrichtingsveranderingen kunnen voorkomen van ca. 45° in ca. 60 seconden.

Hagelbuien

Kennis over de interne structuur van hagelbuien is afkomstig van een verscheidenheid aan bronnen. In de vijftiger jaren zijn vooral grondwindmetingen uitgevoerd met anemometer netwerken (raster afmetingen meerdere kilometers) zoals bij het "Thunderstorm Project Ohio". In de zestiger jaren is veel onderzoek verricht met radar waarbij alleen de mate van reflectie bestudeerd is. Recent geeft vooral de toepassing van Doppler radar (meting snelheidsvectoren) veel nieuwe onderzoeksmogelijkheden (zie bijvoorbeeld Gossard et al. (1979), Ray et al. (1981)).

Deze techniek is echter beperkt doordat de ruimtelijke resolutie gering is (middeling over blokken van enkele kilometers) en omdat alleen daar gemeten kan worden waar voldoende radarreflectie is. Andere technieken, zoals vliegtuigtraversen en satellietbeelden, geven vooral informatie over de stormstructuur op grotere hoogten. Een belangrijke bron van informatie vormt de toepassing van numerieke oplossingen van de stromingsvergelijkingen voor condities in hagelbuien (Mitchell (1975), Klemp et al. (1981)).

Al deze studies leveren een goed inzicht in de "overall" structuur van hagelbuien. Inzicht in de voor windturbines relevante variaties van het windsnelheidveld op lage hoogte (~80 meter) is echter veel minder beschikbaar. Het is gebruikelijk (Atkinson, 1981) om onderscheid te maken tussen "single cell", "multi-cell" en "super-cell" stormen, met de volgende kenmerken:

- "Single-cell" : - afmetingen 5 à 10 km
- levensduur beperkt tot één uur.
- "Multi-cell" : - afmetingen 30 tot 50 km
- de breedte is over het algemeen kleiner dan de lengte
- door de celvormige opbouw is de variabiliteit groot. De gebieden met stijgwinden vóór de storm hebben een breedte van $1\frac{1}{2}$ tot 8 km. Vergelijkbare waarden gelden voor de gebieden met daalwinden.
- "Super-cell" : - afmetingen vergelijkbaar met de "multi-cell" storm; ze zijn echter heviger, meer persistent en van een meer complexe structuur.

Figuur 14 geeft een globale indruk van de verticale structuur van een "multi-cell" storm. Met pijlen is de stromingsrichting aangegeven terwijl met de gearceerde gebieden de mate van radar reflectie is aangegeven. Opgemerkt moet worden dat fig.14 zeer schematisch is. De stroming in en rond de storm is beslist niet twee-dimensionaal. Figuur 15 geeft een suggestie voor een mogelijk stromingspatroon in de storm (uit Atkinson (1981)) waaruit blijkt dat de stroming zeer complex kan zijn. Kenmerkend voor een "multi-cell" storm is dat er achtereenvolgens nieuwe gebieden ("cellen") ontstaan die de centrumfunctie in de storm overnemen. De ruimtelijke variabiliteit in een multi-cell storm is dientengevolge relatief groot. De warme lucht vóór de storm stroomt om-

hoog en koelt af waarbij ijs en hagel gevormd wordt. Door de sterke afkoeling ontstaan koude valwinden die naar alle kanten uitvloeien. De voor de bui uitvloeiende koude lucht vormt het zogenaamde "gust front".

Over het "gust front" treden sterke gradiënten in windsnelheid en windrichting op waardoor hevige vermogensfluctuaties op kunnen treden. De passage van een "gust front" van een hagelbui geeft daardoor volgens Schlueter et al. (1979) de grootste variaties in het door een windturbinepark geleverde vermogen. Windmetingen in "gust fronts" zijn onder meer uitgevoerd door Goff (1976, 1977). Deze metingen zijn verricht met anemometers op een 400 meter hoge meetmast en aangevuld met radarwaarnemingen. Goff (1976, 1977) presenteert materiaal waaruit het verloop van windrichting en windsnelheid bij de passage van een "gust-front" afgeleid kan worden. Hierbij doet zich het probleem voor dat het "gust-front" geen stationair systeem is, doch meerdere stadia doorloopt.

Nadat de koude daalstroming in een "cel" van de storm op gang gekomen is, stroomt de koude lucht vóór de storm uit. Het stromingspatroon is kenmerkend voor een zogenaamde "gravity spread" (dichtheidsverschil met de warme lucht vóór het front). De beschikbare potentiële energie is zodanig dat de voortplantingssnelheid van het front groter is dan die van de storm. Het front verwijdt zich daardoor van de storm en neemt daarbij in kracht af. De beweging van het "gust-front" initiëert wellicht de vorming van nieuwe cellen in de storm waaruit later weer nieuwe "gust-fronts" ontstaan.

Op één lokatie kunnen daardoor verschillende fronten na elkaar passeren. Goff (1976) vindt dan ook dat er grote onderlinge verschillen te vinden zijn tussen diverse fronten. Hij geeft weliswaar een classificatie van 4 verschillende typen "gust-front" doch vermeldt tevens dat 50% van de onderzochte gevallen niet aan zijn classificatie voldoet. Heel globaal geldt de volgende volgorde bij de passage van een "gust-front". Op geringe hoogte (~ 50 m) is het tot op enkele minuten vóór het front nagenoeg windstil. Tijdens de passage van het front neemt de snelheid binnen 2 minuten toe tot ca. 20 m/s. Gedurende de volgende 10 minu-

ten is de windsnelheid en de windrichting sterk variabel. De windsterkte neemt daarbij geleidelijk af tot ruwweg 10 m/s. In de fase daarna begint de wind weer toe te nemen. Er zijn echter ook gevallen waarbij vóór het front een stroming aanwezig is, parallel aan het front.

Figuur 16 is een reconstructie van door Goff (1976) gegeven metingen. Hiertoe zijn de orthogonale snelheidscomponenten uit de door Goff gegeven figuren opgemeten, herleid tot absolute snelheden en vervolgens gesommeerd. Uit figuur 16 volgt dat bij deze fronten en vóór het front wel degelijk een sterke windstroming aanwezig is. De passage van het "gust-front" is bij Type 1 vooral te merken aan een zeer snelle verandering van de windrichting: 45° in één minuut. Bij Type 4 is de windrichtingsverandering minder groot, maar hierbij neemt de windsnelheid sterker toe. Als speciaal geval van of onderdeel van een "gust-front" kan nog gewezen worden op de door Fujita (1978, 1981) bestudeerde "micro-burst".

Figuur 17 (overgenomen uit Fujita, 1981) illustreert het snelheidsverloop bij zo'n micro-burst. Zeer hoge windsnelheden komen voor in een gebied van ruwweg 2 x 5 km². Geconstateerd kan daarom worden dat diverse soorten "gust-front" passages kunnen voorkomen en dat zowel windsnelheids- als windrichtingsveranderingen optreden.

Ook hiervoor wordt gevonden dat 45° windrichtingsverandering binnen één minuut realistisch lijkt.

3.4 Windschering

3.4.1 Inleiding

Met windschering wordt het toenemen van de windsnelheid met toenemende afstand tot de bodem in de atmosferische grenslaag bedoeld (figuur 18).

De schering wordt uitgedrukt als de som van een gemiddelde en fluctuatie:

$$\Delta U = \overline{\Delta U} + \Delta u = \bar{U}(Z_2) - \bar{U}(Z_1) + u(Z_2) - u(Z_1) \quad (47).$$

Windschering kan een belangrijke factor zijn voor de vermoeiingsbelasting van een windturbine. De gemiddelde schering kan rela-

tief eenvoudig bepaald worden mits de turbine op niet te complex terrein gesitueerd is. Vooral dicht in de buurt van obstakels (huizen, bomenrijen) kan de windschering sterk oplopen.

Metingen van windschering zijn gedaan door Fichtl (1971, 1972), Ramsdell (1978) en Doran (1981).

Zowel Fichtl (Cape Kennedy, onstabiele atmosfeer) als Ramsdell (meetoren achter grote ruwheidselementen) vonden een Pearson type IV kansdichtheidsverdeling. Dit is een scheve klokvormige verdeling. Fichtl vond bovendien dat voor $\frac{\Delta Z}{Z} \rightarrow 2$ de verdeling Gaussisch wordt.

Doran heeft gemeten onder nagenoeg neutrale stabiliteit en zijn data worden goed beschreven met de Pearson type IV kansdichtheidsverdeling voor de windschering. Vergelijking van zijn resultaten met de door Fichtl en Ramsdell opgestelde relaties voor de windschering levert een consistent beeld op.

De windscheringsdata kunnen tot 1,50 goed beschreven worden met de Gaussische verdeling, daarbuiten wordt de schering onderschat.

Ontwerpbelastingen voor windturbines ten gevolge van windschering kunnen onderverdeeld worden in:

1) vermoeiingsbelasting (stationair)

Afhankelijk van de atmosferische stabiliteit (neutraal/ niet-neutraal) kan met behulp van een aangenomen overschrijdingskans en kansdichtheidsverdeling een waarde voor de windschering berekend worden. De in tijd relatief minder voorkomende niet-neutrale stabiliteit wordt voor vermoeiingsberekeningen in het algemeen buiten beschouwing gelaten.

2) extreme belasting (instationair)

Extreme belasting ten gevolge van windschering kan gevonden worden door de extremen in schering onder neutrale en niet-neutrale atmosferische omstandigheden te vergelijken. Beide bepaald met de Pearson type IV-verdeling.

Andere extreme atmosferische condities treden op bij koufronten, donderstormen en zogenaamde "nachtelijke stralen".

De bij deze condities behorende "meteorologische structuren" hebben over het algemeen verticale afmetingen die vele malen groter zijn dan de rotorafmetingen van "kleine windturbines".

De in § 3.3.3 besproken structuren hebben verticale afmetingen in de orde van honderden meters (thunderstorm, gust front) tot vele kilometers.

Verwacht mag daarom worden dat dicht bij de bodem de verticale snelheidsgradiënt niet wezenlijk beïnvloed wordt.

Nocturnal "jets" vertonen een snelheidsmaximum vanaf hoogten in de orde van meerdere honderden meters. Kleine windturbines zullen daar niet extra door belast worden.

Verwacht wordt daarom dat "extreme shear" condities zullen optreden tijdens stationaire situaties.

Het lijkt echter weinig zinvol om extreme belastingen voor windturbines ten gevolge van windschering te bepalen. Andere belastingen, bijvoorbeeld een extreme windvlaag tijdens V_{rated} (of tijdens V_{out} voor een overtrekmachine), vallen hoger uit en zijn dus maatgevend.

Gekozen is om voor zowel neutrale als niet-neutrale atmosferische omstandigheden een vermoeiingswindscheringswaarde te bepalen met behulp van de Gaussische kansdichtheidsverdeling en een overschrijdingskans in de orde van 10%.

Hiervoor is een rekenmodel ontwikkeld dat in de volgende paragraaf uiteengezet wordt en vervolgens in paragraaf 3.4.3 vergeleken wordt met in de literatuur beschikbare meetresultaten. De resultaten, de 10% van de tijd overschreden windschering voor verschillende atmosferische stabiliteitsklassen zoals met het model berekend, worden gegeven in hoofdstuk 4.

3.4.2 Rekenmodel voor de windschering

De Gaussische verdeling voor de schering wordt afgeleid uit de simultane verdeling voor de snelheden op twee verschillende hoogten en ziet er als volgt uit:

$$f(\Delta u) = \frac{\exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u - \overline{\Delta U}}{\sigma_{\Delta u}} \right)^2 \right\}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\Delta u}} \quad (48)a$$

$$\text{voor : } \Delta U - \overline{\Delta U} \leq \frac{3}{2} \sigma_{\Delta u}$$

$$\text{met : } \overline{\Delta U} = \bar{U}(Z_2) - \bar{U}(Z_1) \quad (48)b$$

$$\sigma_{\Delta u} = (\sigma_u^2(Z_1) - 2\rho\sigma_u(Z_1)\sigma_u(Z_2) + \sigma_u^2(Z_2))^{\frac{1}{2}} \quad (48)c$$

In een neutrale grenslaag kan 48 c vereenvoudigd worden door substitutie van :

$$\sigma_u = \sigma_u(Z_1) = \sigma_u(Z_2)$$

$$\text{zodat : } \sigma_{\Delta u} \cong \sigma_u \sqrt{2(1-\rho)}$$

De correlatiecoëfficiënt $\rho(\Delta Z; \tau)$ neemt af met toenemende τ en toenemende ΔZ . Voor een windturbine is het tijdsverschil τ omgekeerd evenredig met het toerental en de separatie ΔZ evenredig met de rotordiameter. Voor gangbare toerentallen (1 HZ; $\tau = \frac{1}{2}S$) kan de correlatiecoëfficiënt benaderd worden door $\rho(\Delta Z, 0)$, waarvoor in de literatuur uitdrukkingen te vinden zijn, evenals voor het gemiddelde snelheidsprofiel en RMS-waarde σ_u in de atmosferische grenslaag.

Met bovenstaande relaties kan vervolgens de statistiek van het (quasi) momentane snelheidsverschil tussen twee lokaties berekend worden.

Het is echter niet vanzelfsprekend op welke wijze deze lokaties gekozen moeten worden. Dit is immers afhankelijk van het doel van de berekening : wisselende belasting op de as; wisselende belasting op één enkel blad etc. Tevens geldt dat op één of andere wijze ruimtelijk gemiddeld moet worden.

Mogelijke lokatiekeuzen zijn bijvoorbeeld :

- het snelheidsverschil boven/onder:

$$Z_1 = H - \frac{1}{2}D$$

$$Z_2 = H + \frac{1}{2}D$$

- het snelheidsverschil tussen lokaties met maximale "effecten", bijvoorbeeld op $\frac{3}{4}$ van de straal:

$$Z_1 = H - \frac{3}{8}D$$

$$Z_2 = H + \frac{3}{8}D.$$

In dit rapport is voor de laatste oplossing gekozen. Het model voor de schering gebruikt de hiernavolgende praktische invulling voor gemiddelde snelheidsprofiel, correlatiefunctie en RMS-waarde van de (longitudinale) snelheidsfluctuaties.

De gemiddelde windschering $\overline{\Delta U}$ wordt berekend met behulp van het longaritmischesnelheidsprofiel in de atmosferische grenslaag, hetgeen voor een windmolen met ashoogte H levert:

$$\overline{\Delta U} = \frac{\ln(Z_2/Z_1)}{\ln(H/Z_0)} * \bar{U}(H) \quad (50)$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1$$

ESDU geeft voor neutrale atmosfeer en sterke wind de verticale kruiscorrelatie ($\tau=0$) in de volgende vorm:

$$\rho_{uu}(\Delta Z; 0) = 0.592 (\tilde{r}^{1/3} K_{1/3}(\tilde{r}) - 0.5 (\tilde{r}^{2/3})^2 K_{2/3}(\tilde{r})) \quad (51) a$$

$$\text{waarin } \tilde{r} = 0.374 \frac{\Delta Z}{z_{Lu}}, \text{ dim.loze separatie} \quad (51) b$$

$$z_{Lu} = 6.3 \frac{H^{0.45}}{Z^{0.081}}, \text{ laterale lengteschaal} \quad (51) c$$

$$X^\alpha K_\alpha(X) - \text{Besselfunctie van de } 2^e \text{ soort (getabelleerd)} \quad (51) d$$

De standaardafwijking σ_u volgt uit (ESDU, 74031) :

$$\sigma_u / \bar{u} = \frac{F_u}{\ln(Z/Z_0)} \quad (52) a$$

$$\text{waarin } F_u = (0.867 + 0.556 \log Z - 0.246 \log^2 Z) \lambda \quad (52) b$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 1 & Z_0 &\leq 0.02 \\ &= 0.76/Z_0^{0.07} & 0.02 < Z_0 &\leq 1 \\ &= 0.76 & Z_0 &> 1 \end{aligned} \quad (52) c$$

Hiestler & Pennel (1981) geven voor de stabiele atmosfeer:

$$\sigma_u / u_* = 2,4 (1 - Z/L)^{1/2} \quad (53)$$

De Monin-Oboukhov lengteschaal L is een maat voor de beschrijving van de oppervlaktevraag van de atmosferische grenslaag (neutraal/niet-neutraal) voor zowel stabiele als onstabiele condities.

Panofski et al. (1977) geven voor de onstabiele atmosfeer:

$$\sigma_u / u_* = (12 - \frac{Z_i}{2L})^{1/3} \quad (54)$$

De menghoogte Z_i is afhankelijk van de stabiliteit. Voor verspreidingsberekeningen wordt doorgaans gehanteerd:

stabiliteits- klasse (Pasquill)	meng- hoogte Z_i (m)
A	1500
B	1500
C	1000
D	500
E	200
F	200

Het logaritmisch windprofiel met profielcorrectie voor niet-neutrale stabiliteit is :

$$\bar{U}/u_* = 2,5 \{ \ln (Z/Z_0) - \Psi (Z/L) \} \quad (55)a$$

$$1/L > 0 : \Psi (Z/L) = - 4,7 Z/L \quad (55)b$$

$$1/L < 0 : \Psi (Z/L) = \frac{\pi}{2} + 2 \ln \frac{1+x}{2} + \ln \frac{1+x^2}{2} - 2 \tanh(x) \quad (55)c$$

$$\text{met } x = (1-15 Z/L)^{1/4}$$

3.4.3 Modelresultaten en evaluatie

Het model is vergeleken met de metingen van Doran (1981). Zijn data zijn verkregen met behulp van meetmasten uitgerust met

3-component Gill anemometers bij vrijwel neutrale stabiliteit van de atmosfeer. De resultaten zijn te vinden in tabel 5. Het blijkt dat de turbulentie-intensiteit berekend met de ESDU-vergelijkingen te hoog (tot 42%) uitvalt, i.h.b. voor hoge ruwheid. Waarschijnlijk zijn de atmosferische omstandigheden toch licht stabiel geweest. Daarom zijn de metingen vergeleken met Hiestler & Pennell (53).

Uit tabel 5 blijkt dat ook de met (53) berekende turbulentie-intensiteit te hoog uitvalt (tot 11%) in het bijzonder voor hoge ruwheid. Wanneer een marge van 15% nauwkeurigheid in σ_u als eis gesteld wordt voldoet (53) ruimschoots. De dan berekende $\sigma_{\Delta u}$ wijkt minder dan 10% af van de gemeten waarde.

Het gemiddelde snelheidsverschil ten gevolge van schering $\overline{\Delta u}$ wordt met nauwkeurigheid <5% berekend. Het model, waarin σ_u berekend wordt met behulp van Hiestler & Pennell, beschrijft de metingen van Doran dus goed. Daarmee is het tevens consistent met de Fichtl (1971/1972) en Ramsdell (1978) data, omdat deze consistent met Doran's data zijn.

4. GEKOZEN ONTWERPWINDGEGEVENS

4.1 Extreme windsnelheid bij parkeren

Extreme windbelastingscondities bij rotorstilstand treden op (zie tabel 1):

- a) bij normaal parkeren en een abnormale externe windbelasting
- b) bij normale externe windbelasting en een faalsituatie tijdens parkeren (falende kruininrichting of bladverstelmecanisme).

Ad a) Er kan gesteld worden dat de extreme windbelasting tijdens normaal parkeren overeenkomt met de extreme windbelasting op een "bouwwerk". Hiervoor kunnen daarom zonder meer de standaard bouwvoorschriften gehanteerd worden (TGB-72 of herzieningen daarvan).

Ad b) Windsnelheden zoals ondervonden door een stilstaande rotor worden berekend uit de statistiek van de wind voor de specifieke lokatie van de windturbine. Voor de Nederlandse situatie is deze statistiek voor de verschillende meteostations bekend en kan in principe voor iedere lokatie gevonden worden. Berekeningen kunnen uitgevoerd worden volgens de methoden beschreven in "Energieopbrengsten van windturbines" (Vermeulen et al., 1983).

Bij het bepalen van de normale extreme windsnelheid bij stilstaande rotor dient in principe gebruik te worden gemaakt van een conditionele waarschijnlijkheidsverdeling voor het optreden van extreme windsnelheid én falen. Gegevens die nodig zijn voor het bepalen van zo'n conditionele verdeling ontbreken echter. Er kan echter verondersteld worden dat als een faalsituatie tijdens parkeren optreedt, deze gedurende "lange tijd" optreedt, bijvoorbeeld in de orde van één uur. Als het optreden van zo'n faalsituatie samenvalt met een "normale" storm dan zal tijdens dit uur zeker een extreme windvlaag optreden met een overschrijdingskans van 0.1% op de 3600 seconden). Daarom wordt gerekend met de "normale" extreme windsnelheid die 0,1% van de tijd tijdens een bepaalde uurgemiddelde windsnelheid optreedt. Deze bepaalde uurgemiddelde windsnelheid volgt uit de windstatistiek van een bepaalde lokatie en een criterium betreffende het percentage van de

tijd dat de uurgemiddelde windsnelheid voorkomt. Het verband tussen de extreme windsnelheid en de keuze van een criterium wordt geïllustreerd in het volgende rekenvoorbeeld.

Rekenvoorbeeld

In dit voorbeeld is gebruik gemaakt van de windstatistiek van het meteorostation Schiphol en gerekend voor een windturbine met ashoogte $H = 20$ m aldaar gesitueerd ($Z_o = 0,03$ m).

De Schipholstatistiek geeft de frequentie van voorkomen van een uurgemiddelde windsnelheid op 10 m hoogte (fig.19) welke omgerekend kan worden naar uurgemiddelde windsnelheid op ashoogte met behulp van het logaritmische snelheidsprofiel:

$$\bar{U}_H = \frac{\ln(H/Z_o)}{\ln(10/Z_o)} \bar{U}_{10} \quad (56)$$

De windsnelheid die 0,1% van de tijd overschreden wordt bij een bepaalde uurgemiddelde windsnelheid wordt berekend met behulp van de Gaussische waarschijnlijkheidsdichtheidsverdeling:

$$U_H(0,1\%) = \bar{U}_H \left(1 + 3,1 \frac{\sigma_u}{\bar{U}_H} \right) \quad (57)$$

waarin de standaardafwijking σ_u bepaald wordt met behulp van vergelijking (52). In dit geval geldt $\sigma_u/\bar{U}_H = 0,176$, zodat tevens:

$U_H(0,1\%) = 1,55 \bar{U}_H$. De resultaten zijn in de onderstaande tabel gegeven:

uurgemiddelde wind				momentane wind
optreden	% van de tijd	$\bar{U}_{10} [\frac{m}{s}]$	$\bar{U}_H [\frac{m}{s}]$	$U(0,1\%) [\frac{m}{s}]$
1x/week	0,59%	13,5	15,1	23,4
1x/maand	0,14%	18	20,2	31,2
1x/ $\frac{1}{2}$ jaar	0,023%	21	23,5	36,3
1x/jaar	0,0114%	22,5	25,2	38,9

Een criterium voor de frequentie van optreden van een uurgemiddelde windsnelheid is vastgesteld op "een paar" maal per jaar. Met behulp van bovenstaande tabel is de "normale externe" windbelasting bij faalsituaties tijdens parkeren vastgesteld op $U = 35 \text{ m/s}$.

4.2 Ontwerpgegevens bij draaiende rotor

De ontwerpgegevens bij draaiende rotor worden evenals in hoofdstuk 3 ingedeeld in windvlagen, windrichtingsveranderingen en windschering.

4.2.1 Windvlagen

Windvlagen hebben een vorm volgens het 4^{e} -graads polynoom (26) en worden onderscheiden in :

- vermoeiingsvlagen
- extreme vlagen
- extreme amplitudevlaag
- extreme gradiëntvlaag.

Om een discreet aantal representatieve vlagen op te kunnen stellen zijn drie klassen voor de uurgemiddelde windsnelheid opgesteld volgens tabel 6.

Bovendien zijn criteria nodig betreffende de overschrijdingskansen (kans op voorkomen) voor de amplitude en gradiënt. Hierover is door de deelnemers aan het project uitvoerig gesproken. Tabel 7 geeft de uiteindelijk gekozen overschrijdingskansen ingedeeld naar het soort vlaag en bovendien de duur van zo'n vlaag als exkursie boven de uurgemiddelde windsnelheid.

De vlagen zijn afhankelijk van de uurgemiddelde windsnelheid, terreinruwheid, ashoogte en rotordiameter van de windturbine.

Met de criteria van tabel 7 zijn vermoeiings- en extreme vlagen bepaald voor de windklassen volgens tabel 6 uitgaande van een windturbine met ashoogte 20 m, rotordiameter 16 m en lage terreinruwheid ($Z_0 = 0,03 \text{ m}$). Bovendien zijn nog vermoeiingsvlagen gegeven voor genoemde windturbine bij hoge terreinruwheid ($Z_0 = 1 \text{ m}$).

Vermoeiingsvlagen

Tabel 8 geeft de amplituden, gradiënten en duur van de vermoeiingsvlagen voor de snelheidsklassen en voor open en ruw terrein voor de standaard windturbine. De hiermee berekende 4^e-graads polynoom die de vorm vastleggen zijn als volgt:

glad terrein ($Z_o = 0,03$ m):

$$\begin{aligned} \text{I} &: u(t) = 0,5 t - 0,0126 t^3 + 0,0007 t^4 \\ \text{II} &: u(t) = 1,1 t - 0,05 t^3 + 0,003 t^4 \\ \text{III} &: u(t) = 1,9 t - 0,17 t^3 + 0,0205 t^4 \end{aligned}$$

ruw terrein ($Z_o = 1$ m) :

$$\begin{aligned} \text{I} &: u(t) = 0,9 t - 0,025 t^3 + 0,0012 t^4 \\ \text{II} &: u(t) = 1,9 t - 0,1148 t^3 + 0,011 t^4 \\ \text{III} &: u(t) = 3,3 t - 0,125 t^3 - 0,05625 t^4 \end{aligned}$$

De "instantane" vermoeiingsvlaag wordt gegeven met behulp van:

$$\begin{aligned} \tilde{u}(t) &= \bar{U} + u(t) & 0 \leq t \leq T_o/2 \\ &= \bar{U} + u(T_o/2 - t) & T_o/2 \leq t \leq T_o \\ &= \bar{U} - u(t - T_o/2) & T_o \leq t \leq 3T_o/2 \\ &= \bar{U} - u(2T_o - t) & 3T_o/2 \leq t \leq 2T_o \end{aligned}$$

Figuur 20 toont de vermoeiingswindvlagen voor de beide terreinruwheden zoals berekend voor klasse II.

De vermoeiingsvlagen boven stedelijk terrein leveren aanzienlijk grotere belastingen dan de vlagen boven open terrein. Toepassing van deze "stedelijke" vlagen voor alle windturbines geeft een conservatieve bepaling van de vermoeiingsschade; de meeste windturbines zouden hierdoor overgedimensioneerd kunnen worden. Bij toepassing van minder conservatieve vlagen bestaat echter de mogelijkheid dat windturbines die in (aerodynamisch) ongunstige situaties geplaatst worden door vermoeiingsschade bezwijken. Ook in open terrein kunnen obstakels aanwezig zijn waardoor extra turbulentie aanwezig is. Toepassing van de in het "Handboek Energie-opbrengsten van Windturbines" (Vermeulen et al. (1983)) gegeven schattingsmethode leert dat ook in open terrein door één enkel obstakel de turbulentie-intensiteit verhoogd kan worden tot 20 à 30% op realistische molenlokaties.

Als uitgangspunt voor de vermoeiingsvlagen is na overleg in de projectgroep gekozen voor een effectieve (door de rotor gevoelde) turbulentie-intensiteit van $\sigma_{ueff} = 25\%$. Dit komt overeen met de berekende vlagen voor stedelijk gebied.

In figuur 21 zijn lijnen van constante door deze rotor "gevoelde" turbulentie-intensiteit $\sigma_{u,eff}/\bar{U}$ uitgezet tegen ashoogte H en oppervlakteruwheid Z_o ($D = 16$ m).

De bij hoge ruwheid ($Z_o = 1$ m) bepaalde vermoeiingsvlagen zijn aangegeven door het omcirkelde meetpunt, maar zijn geldig op de gehele $\sigma_{u,eff}/\bar{U} = 0,25$ lijn. Links van deze lijn zijn deze vlagen conservatief te noemen en rechts van deze lijn treedt bij gebruik van de berekende vlagen een onderschatting van de werkelijke toestand op.

Extreme vlagen

Tabel 9 geeft de amplituden, gradiënten en duur van de extreme vlagen voor de windsnelheidsklassen (op ashoogte) waarbij gebruik gemaakt is van de Schipholstatistiek van de uurgemiddelde windsnelheid. De vorm van de vlagen is als volgt:

extreme amplitudevlaag

$$\begin{array}{lll} \text{I} & : & u(t) = 2 t - 0,0397 t^3 + 0,0028 t^4 \\ \text{II} & : & u(t) = 4 t - 0,147 t^3 + 0,014 t^4 \\ \text{III} & : & u(t) = 6,5 t - 0,4 t^3 + 0,0496 t^4 \end{array}$$

extreme gradiëntvlaag

$$\begin{array}{lll} \text{I} & : & u(t) = 2,6 t - 0,145 t^3 + 0,0172 t^4 \\ \text{II} & : & u(t) = 5,3 t - 0,581 t^3 + 0,0963 t^4 \\ \text{III} & : & u(t) = 8,6 t - 1,760 t^3 - 0,3980 t^4 \end{array}$$

De extreme vlagen zijn getekend in figuur 22 a en b.

4.2.2 Windrichtingsveranderingen

In paragraaf 3.3 is onderscheid gemaakt tussen stationaire en instationaire windrichtingsfluctuaties. De stationaire windrichtingsfluctuaties bleken weliswaar snel te zijn maar te resulteren in slechts geringe windrichtingsafwijkingen.

Berekening van de 10% van de tijd overschreden windrichtingsafwijking door deze stationaire windrichtingsfluctuaties met het programma GUSBR levert voor glad terrein ($Z_o = 0,03$ m) 5° en voor ruw terrein ($Z_o = 1$ m) 10° , geldig in alle drie de windsnelheidsklassen en voor de "standaard" windturbine ($H = 20$ m, $D = 16$ m).

Het spectrum van de door de rotor gevoelde windrichtingsfluctuaties (Bijlage B, fig. 6b) laat zien dat de tijdschaal hiervan rond de 5 seconden ligt.

Een kruiregeling is niet in staat dergelijke veranderingen te volgen. Aangezien scheve aanstroming nauwelijks van belang geacht wordt bij vermoeiingsberekeningen is het, afgezien van een verminderde opbrengst, geen bezwaar dat een turbine niet exact in de wind staat. Wanneer men bijvoorbeeld de over een periode van 10 seconden gemiddelde windrichtingsafwijking zoals door de rotor "gevoeld" bepaalt, dan blijkt ($\bar{U} = 13 \text{ m/s}$) voor de "standaard" turbine de 10% van de tijd overschreden windrichtingsafwijking slechts ongeveer 2° te zijn en de snelheid van bereiken van deze afwijking in de orde van $0,5^\circ/\text{s}$.

Beschouwingen met betrekking tot de instationaire windrichtingsveranderingen (paragraaf 3.3.3) leren dat de maximaal te verwachten scheve aanstromingshoek ongeveer 45° is, (mits er niet gekruidd wordt!) met een snelheid van veranderen van maximaal ongeveer $1^\circ/\text{s}$.

4.2.3 Windschering

Met het in paragraaf 3.4.2 uiteengezette rekenmodel voor de windschering is de 10% van de tijd overschreden en met de uurgemiddelde windsnelheid dimensieloos gemaakte windschering voor verschillende stabiliteitsklassen en ashoogte/rotordiameter/terreinruwheid-combinaties bepaald. Tabel 10 en figuur 23 geven de resultaten voor neutrale atmosferische stabiliteit ($\sigma_u/\bar{U}$ uit (53) en (55) met $1/L = 0$) en tabel 11 en figuur 24 doen hetzelfde voor niet-stabiele atmosfeer ($\sigma_u/\bar{U}$ uit (54) en (55) met $1/L < 0$, onstabiel; $\sigma_u/\bar{U}$ uit (53) en (55) met $1/L > 0$, stabiel). Bij de berekeningen is een verticale separatie $\Delta Z = \frac{3}{4}D$ gebruikt. De correlatiecoëfficiënt is berekend met behulp van (51) en is ongeacht de stabiliteit constant verondersteld terwijl in werkelijkheid een toename optreedt met toenemende stabiliteit, waardoor de dimensieloze standaardafwijking van de windschering in werkelijkheid sterker af zal nemen met toenemende stabiliteit dan tabel 11 suggereert.

Omdat windschering voor vermoeiingsberekeningen gebruikt wordt is ervoor gekozen om gebruik te maken van de gegevens voor neutrale atmosferische stabiliteit. Dit komt in tijd gezien het meest voor en treedt bovendien op bij de hogere windsnelheden. Bij dergelijke vermoeiingsberekeningen wordt de windschering in het algemeen gelineariseerd, dat wil zeggen een lineaire toename van de windsnelheid met de hoogte.

Ook voor windschering wordt gevonden dat de grootste waarden boven stedelijk gebied optreden. Met verwijzing naar de discussie in § 4.2.1 wordt hier volstaan met de constatering dat gekozen dient te worden voor de boven stedelijk gebied optredende niveaus. Uiteindelijk zijn de volgende waarden vastgesteld:

$$* \text{ gemiddelde windschering } \frac{\overline{\Delta U}}{\bar{U}} = 0.15$$

$$* \text{ 10\% van de tijd overschreden windschering } \frac{\Delta U}{\bar{U}} (10\%) = 0.40$$

5. AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Met behulp van de bekende meetgegevens is de vlaagvorm vastgelegd door middel van een 4^e-graads-polynoom. Er bestaat behoefte aan metingen die toegespitst zijn op het vaststellen van de vlaagvorm, hetgeen dient te geschieden door specifieke analyses van tijdreeksen van windsnelheid. Hiertoe dienen detectiecriteria ("conditional sampling") opgesteld te worden voor vlagen. Dergelijke metingen zijn succesvol gebleken bij het onderzoek naar coherente structuren in grenslagen van vlakke platen. De metingen dienen uitgevoerd te worden op verschillende lokaties (terreinruwheden) en bij verschillende atmosferische stabiliteitsklassen. Zoals uit dit rapport blijkt bestaat er in eerste instantie behoefte aan een waarschijnlijkheidsdichtheidsverdeling voor het optreden van een extreme gradiënt, een (conditionele) verdeling voor de duur van een vlaag en een conditionele verdeling voor het optreden van een extreme gradiënt én het optreden van een extreme amplitude.

Het rekenprogramma GUSBR maakt gebruik van spectra (snelheid, richting) voor neutrale atmosferische stabiliteit, maar kan uitgebreid worden met spectra voor de onstabiele atmosfeer. De laterale co-coherentiefunctie voor de V-component is slechts bekend voor separaties in Z-richting en het rekenprogramma gebruikt dezelfde functie voor separaties in y-richting. Deze aanname is redelijk, maar desalniettemin dienen metingen in de atmosferische grenslaag de co-coherentiefunctie te bepalen.

Het met behulp van het rekenprogramma bepaalde spectrum zoals door de rotor gevoeld is niet gecorrigeerd voor het rotatieëffect. Zogenaamd roterend bemonsteren van het snelheidssignaal levert een afwijkend spectrum op. De in GUSBR gebruikte spectra dienen aangepast te worden om dit rotatieëffect in rekening te brengen. Een tweede rotatieëffect is dat de structuur van het turbulente snelheidsveld dat de rotor nadert vervormt door het opgewekte drukveld. Opgestelde modellen die deze "turbulence distortion" beschrijven dienen toegevoegd te worden aan het rekenprogramma.

Meer algemeen is het van belang dat een studie gemaakt wordt van instationaire windsnelheidsveranderingen en andere fenomenen van de

atmosferische stroming (bijvoorbeeld "nocturnal jets", windhozen, etc.), zodat een inventaris gemaakt kan worden van wat van belang is voor windturbines. Effecten ten gevolge van een complexe situering (bebouwing, terreinruwheidsovergangen, etc.) op optredende windsnelheden dienen tevens geïnventariseerd te worden en zo mogelijk gekwantificeerd.

6. CONCLUSIES

De voor sterkte- en vermoeiingsberekeningen benodigde windgegevens zijn in dit rapport afgeleid op grond van bestaande micro-meteorologische inzichten.

Voor het merendeel van de benodigde windgegevens bleek het mogelijk te zijn om een relatie af te leiden tussen "kans van voorkomen" en "grootte" van een gegeven windfluctuatie.

Omdat weinig metingen naar "door de rotor gevoelde windvlagen" beschikbaar zijn, zijn een aantal hypothesen opgesteld ten aanzien van met name de vlaagvorm. Ter validering van deze hypothesen bestaat behoefte aan windmetingen die toegespitst zijn op het vaststellen van de vlaagvorm.

Gebruik is gemaakt van de met behulp van een rekenprogramma (GUSBR) bepaalde "door de rotor gevoelde" waarde van de windsnelheidsfluctuaties. De verhouding tussen deze effectieve RMS-waarde en de RMS-waarde is het kleinst bij hoge windsnelheid, lage ashoogte, hoge terreinruwheid en grote rotordiameter.

De volgende ontwerpgegevens zijn gekozen als uitgangspunt voor de sterkte- en vermoeiingsberekeningen:

Vermoeiingswindvlagen tijdens normaal bedrijf

- uitgangspunten:
- overschrijdingskans van de amplitude A bij gegeven windsnelheid $\bar{U}$: 10%
 - overschrijdingskans van de gradiënt du/dt bij een gegeven windsnelheid $\bar{U}$: 10%
 - terreinruwheid $z_o = 1$ meter of $(\sigma_u/\bar{U})_{eff} = 0.25$.

- resultaat:
- periodieke wisseling, beschreven met behulp van een 4^e -graads polynoom, met amplitude A en halve periode T_o .

windklasse	$\bar{U}$ m/s	A m/s	T_o s
I	7	2.3	8
II	11	3.5	6
III	15	4.7	4

Windschering tijdens normaal bedrijf

Uitgangspunten: - overschrijdingskans bij gegeven windsnelheid :
10%

- terreinruwheid 0.3 meter
- berekend voor $r = 0.75 R$

Resultaat: - 10% van de tijdoverschreden windschering :

$$\frac{\Delta U(10\%)}{\bar{U}} = 0.40$$

$$(\text{gemiddelde windschering } \frac{\overline{\Delta U}}{\bar{U}} = 0.15)$$

Windrichtingsfluctuaties tijdens normaal bedrijf

Uitgangspunten: - overschrijdingskans bij gegeven windsnelheid $\bar{U}$:
10%

- terreinruwheid $z_o = 1$ meter
- berekend voor neutrale stabiliteit (=harde wind).

Resultaat: - 10% van de tijd overschreden windrichtingsfluctuatie $\theta(10\%) = 10^\circ$.

Extreme amplitude windvlaag tijdens normaal bedrijf

Uitgangspunten: - totale overschrijdingskans amplitude A : 1 maal per 50 jaar.

- totale overschrijdingskans gradiënt du/dt : 1 à 10 maal per jaar
- terreinruwheid $z_o = 0.03$ meter.

Resultaat: - vlaagvorm beschreven als 4^e graads polynoom

- windklasse I : in 7 sec. van $\bar{U} = 7$ m/s naar $U = 15$ m/s
- windklasse II : in 5 sec. van $\bar{U} = 11$ m/s naar $U = 21.5$ m/s
- windklasse III: in 4 sec. van $\bar{U} = 15$ m/s naar $U = 28$ m/s.

Extreme gradiënt windvlaag tijdens normaal bedrijf

Uitgangspunten: - totale overschrijdingskans amplitude
A : 1 à 10 maal per jaar;

- totale overschrijdingskans gradiënt du/dt : 1 maal per 50 jaar.
 - terreinruwheid $z_o = 0.03$ meter.
- Resultaat:
- vlaagvorm beschreven als 4^e-graads polynoom
 - windklasse I: in 4.25 sec. van $\bar{U} = 7$ m/s naar $U=13$ m/s
 - windklasse II: in 3 sec. van $\bar{U} = 11$ m/s naar $U=19$ m/s
 - windklasse III: in 2.25 sec. van $\bar{U} = 15$ m/s naar $U=24,5$ m/s

Extreme windbelasting tijdens normaal parkeren

- Uitgangspunt:
- toepassing standaard bouwvoorschriften (TGB-1972, of herzieningen daarvan).

Normale windbelasting bij faalsituaties bij parkeren

- Uitgangspunt:
- overschrijdingskans van de uurgemiddelde windsnelheid $\bar{U}$: 1 à 5 maal per jaar
 - overschrijdingskans van de turbulentie bij gegeven $\bar{U}$: 0.1%
 - terreinruwheid $z_o = 0.03$ meter.
- Resultaat:
- $U = 35$ m/s.

REFERENTIES

- [1] Atkinson, B.W.,
Meso-scale atmospheric circulations.
Academic Press, London, 1981.
- [2] Van Atta, C.W., Chen, W.Y.,
Structure functions of turbulence in the atmosphere boundary layer
over the ocean
J.F.M, 1970, 44, 145-159.
- [3] Beugeling, G.L.H.,
Berekening van windsnelheidsfluctuaties ten behoeve van benutbaar-
heidsberekeningen van windturbines
MT-TNO rapport 85-076, 1985
- [4] Beugeling, G.L.H., Vermeulen, P.E.J.,
Oriënterende berekeningen aan windschering en -richting ten behoeve
van ontwerpcriteria kleine windturbines
MT-TNO notitie 5-10-1984, OC-84-23.
- [5] Carbone, R.E.,
A severe frontal rainband. Part I: Stormwide hydrodynamic structure.
J. Atmos. Sciences, Vol 39, 1982 pp 258-279.
- [6] Doran, J.C. & Powell, D.C.,
Gust characteristics for WECS. Design & performance analysis, 1980,
US Dep. of Energy : DE-AC 06-76 RLO 1830.
- [7] Doran, J.C. & Powell, D.C.,
Gust structure in the neutral surface boundary layer, 1981.
J. of Appl. Met. vol. 21, pp 14-17.
- [8] Doran, J.C.,
Some aspects of fluctuating vertical wind shears,
PNL-3771, May 1981.

- [9] ESDU,
Engineering sciences data,
Wind Engineering, Vol. 1 : Characteristics of atmospheric turbulence
near the ground, ESDU 74031(+Latere revisies) (1974).
- [10] Fichtl, G.H.,
Probability distribution of vertical longitudinal shear fluctuations
J. Appl. Meteor, 1972, 9, pp 51-63.
- [11] Fichtl, G.H.,
Standard deviation of vertical two-point longitudinal velocity
differences in the atmospheric boundary layer,
Boundary-Layer Meteor, 1972, 2, pp. 137-151.
- [12] Föllings, F.,
Belastingen op kleine windturbines
ECN memo 0.825.00-GR (0084-19); 11-3-1985.
- [13] Frost, W., Long, B.H., Turner, R.E.,
Engineering Handbook ont the atmospheric environmental guidelines
for use in wind turbine generator development,
dec. 1978, NASA Techn. paper 1889.
- [14] Fujita, T.T.,
Thunderstorm downbursts.
Proc. 3rd U.S. National Conf. Wind Eng. Res.,
Gainesville, February 26 - March 1, 1978.
- [15] Fujita, T.T.,
Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary
scales.
J. Atmosph. Sci., Vol 38, No 8, 1981 pp 1511 t/m 1534.
- [16] Goff, R.C.,
Some observations of thunderstorm-induced low-level wind variations.
J. Aircraft, Vol 14 (1977) pp 423-427.

- [17] Goff, R.C.,
Vertical structure of thunderstorm outflows
Monthly Weather Review, Vol 104 (1976) pp 1429-1440.
- [18] Gossard, E.E. et al.,
Middle scale wind patterns revealed by dual-Doppler radars
Proc. 2nd U.S. National Conf. Wind. Eng. Res., Ft. Collins,
June 22-25, 1975.
- [19] Hiestler, T.R., Pennell, W.T.,
The meteorological aspects of siting large wind turbines.
PNL-2522, Jan. 1981.
- [20] Hobbs, P.V., Biswas, K.R.,
The cellular structure of narrow cold-frontal rainbands.
Met.Soc. Vol 105 (1979) pp 723-727.
- [21] Hobbs, P.V. et al.,
The mesoscale and microscale structure and organization of clouds
and precipitation in midlatitude cyclones. Part I: A case study
of a cold front.
J. Atmos. Sciences, Vol 37 (1980) pp 568-596.
- [22] Hobbs, P.V., Persson, O.G.,
The mesoscale and microscale structure and organization of clouds
and precipitation in midlatitude cyclones. Part V: The substructure
of narrow cold-frontal rainbands.
J. Atmos. Sciences, Vol 39 (1982) pp 280-295.
- [23] James, P.K., Browning, K.A.,
Mesoscale structure of line convection at surface cold fronts.
Quart. J.R. Met. Soc. Vol 105 (1979) pp 371-382.
- [24] Kerrigan, T.C. 1977,
Spectral Estimates of a Wind Fluctuation Statistic Pertaining to
Wind Generators.
PNL-2511, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.

- [25] Klemp, J.B. et al.,
Observed and numerically simulated structure of a mature supercell
thunderstorm.
J. Atmos. Sciences, Vol 38 (1981) pp 1558.
- [26] Mitchell, K.E.,
A numerical investigation of severe thunderstorm gust fronts.
NASA CR - 2635, December 1975.
- [27] Panofsky, H, et al.,
Bound-Layer Meteo, Vol 11, 1977, pp. 355-361.
- [28] Powell, D.C. & Connel, J.R.,
Definition of gust model concepts and review of gust models,
juni 1980 U.S. Depart,. of Energy: DE-AC 06-76 RLO 1830.
- [29] Powell, D.C. 1979,
Review of Gust Model Concepts.
PNL-SA-7966, Pacific Nothwest Laboratory, Richland, Washington.
- [30] Ramsdell, J.V. 1978,
Estimates of the Number of Large Amplitude Gusts.
PNL-2508, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- [31] Ramsdell, J.V.,
Wind shear fluctuations downwind of large surface roughness elements,
J. Appl. Meteor, 1978, 17, pp. 436-443.
- [32] Ray, P.S. et al.,
The morphology of several tornadic storms on 29 May 1977.
J. Atmos. Sciences, Vol 38 (1981) pp 1643-1663.
- [33] Rice, S.O.,
Mathematical analysis of random noise,
Bell System Techn. J., 24, 46-156, 1945.

- [34] Schlueter, R.A., Park, G.L., Modir, H., Dorsey, J., Lotfallian, M.,
Impact of storm fronts on utilities with WECS arrays.
Michigan State University, USA COO/4450 - 79/2 (1979).
- [35] Sheih, C.M., Tennekes, H. Lumley, J.L.,
Airborne hot-wire measurements of the small-scale structure of
atmospheric turbulence,
The Phys. of Fluids, 14, 2, 1971.
- [36] Sherman, D.J. & Thomson, M.R.,
On the durations of gusts and lulls in the windspeed,
Austr. Def.Sc service, Structures & Material Note 391, april 1973.
- [37] Tennekes, H., Lumley, J.L.,
A first course in turbulence,
1972, Cambridge, The M.I.T. Press.
- [38] Testud, J. et al.,
A Doppler radar observation of a cold front: Three dimensional air
circulation, related precipitation system and associated wavelike
motions.
J.Atmos. Sciences, Vol 37 (1980) pp 78-98.
- [39] Vermeulen, P.E.J.,
Benodigde meteorologische gegevens voor windenergietoepassingen,
deel II: ontwerpgegevens
MT-TNO rapport 81-016255, 1981.
- [40] Vermeulen, P.E.J.,
Beschikbare windgegevens ten behoeve van "ontwerpcriteria" kleine
windturbines
MT-TNO notitie 25-4-1984.
- [41] Vermeulen, P.E.J.,
Definition of the turbulence concept in relation to wind
turbine design,
MT-TNO ref. nr. 81-09061, juli 1981.

- [42] Vermeulen, P.E.J., Hoogeveen, H., Leene, J.A.,
Energie-opbrengsten van windturbines,
MT-TNO, ref. nr. voorlopige versie, oktober 1983.

- [43] Vermeulen, P.E.J.,
Voorstel voor een onderzoekprogramma: "windgegevens voor het
ontwerp van windenergiesystemen".
MT-TNO rapport 84-010174, 1984.

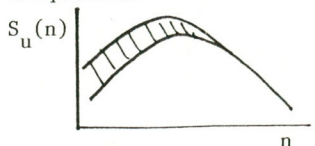
- [44] Wieringa, J., Rijkoort, P.J.,
Windklimaat van Nederland.
KNMI, (1983).

- [45] WMO
Meteorological aspects of the utilization of wind as an
energy source.
WMO Technical Note No. 175, (1981).

Tabel 1: Overzicht benodigde windgegevens (* zoals ondervonden door de gehele rotor).

belasting	bedrijf	benodigde windgegevens		
		uurgemiddeld	fluctuaties	beschrijving
<u>normaal extern</u> continu (dit leidt tot vermoeiingsbelasting)	normaal bedrijf	kansverdeling tussen V_{in} en V_{uit}	+ normale longitudinale (*) turbulentie + windschering + windrichting = (*) laterale turbulentie	windvlaag niveau/amplitude niveau/amplitude
	normaal parkeren	kansverdeling boven V_{in}	+ longitudinale turbulentie	niveau/amplitude
<u>abnormaal extern</u> (dit leidt tot extreme belastingen)	normaal bedrijf	normaal, tussen V_{in} en V_{uit}	+ extreme longitudinale (*) fluctuatie + extreme windrichtings-(*) fluctuatie	amplitude/gradiënt windvlaag windvlaag
	normaal parkeren	absoluut extreem	+ extreme fluctuatie	(niveau bij normaal parkeren $\equiv$ TGB-72)
<u>normaal extern</u> (zowel extreme als vermoeiingsbelastingen)	abnormaal intern bedrijf	normaal, tussen V_{in} en V_{uit}	+ normale longitudinale (*) turbulentie	?
	abnormaal intern parkeren	normaal, boven V_{uit}	+ normale longitudinale turbulentie	niveau/amplitude

Tabel 2 : Overzicht beschikbare turbulentie statistiek, gemeten in één ruimtelijke punt

		één punt data		
grootheid	U	V	W	opmerkingen
<u>amplitude domein</u>				
RMS-waarden	+ ($\pm 15\%$)	+ ($\pm 20\%$)	+ ($\pm 15\%$)	{ 90% binnen aangegeven marge spreiding groter bij ruw terrein
co-coherenties	$\overline{UW} : t$	$\overline{UV} \approx 0$	$\overline{VW} \approx 0$	
kansdichtheid	+ (Gaussisch)	+ (Gaussisch)	$\pm$ (Gaussisch) (afwijkingen groot)	dicht bij de bodem (< 30 m) is skewness > 0 . Hier is geen "model" voor.
<u>Frequentie domein</u>				
spectra	+	+	+	afwijkingen zijn functie van frequentie: 
kruisspectra	$\overline{UW} +$	0	0	
<u>tijdsdomein</u>				
correlatie	+ ($\square$)	+ ($\square$)	+ ($\square$)	(x) Fourier getransformeerd van spectra, meestal empirisch

U = longitudinal

V = lateraal

W = verticaal

(+ : goed; $\square$: matig; - : afwezig)

Tabel 3 : Twee punts statistiek

<u>twee punts data</u>				
grootheid	U	V	W	opmerkingen
<u>amplitude domein</u>				
joint probability	aanname : Gaussisch			(nauwelijks gemeten)
covarianties	(zie bij kruiscorrelaties)			
<u>Frequentie domein</u>				
kruisspectra	$\Delta x : +$	$\Delta x : +$	$\Delta x : +$	afwijkingen zijn functie van frequentie én separatie: dichtbij hoog frequent: geringe afwijkingen ver weg en/of laag frequent: grote afwijkingen
(reël + imaginair	$\Delta y : +$	$\Delta y : \square$	$\Delta y : +$	
+ coherentie)	$\Delta z : +$	$\Delta z : +$	$\Delta z : \square$	
<u>tijdsdomein</u>				
kruiscorrelatie	$\Delta x : + (\square)$	$\Delta x : + (\square)$	$\Delta x : + (\square)$	Fourier getransformeerd van kruisspectra: zeer complex (+) meestal empirisch ($\square$) * kruiscorrelatie bij $\tau=0$ levert instantane shear!
($\tau=0$, symmetrische	$\Delta y : + (\square)$	$\Delta y : -$	$\Delta y : + (\square)$	
+ antisymme- trische deel	$\Delta z : + (\square)^*$	$\Delta z : + (\square)$	$\Delta z : -$	

(Δ : separatie)

U, x : longitudinal

V, y : lateraal

W, z : verticaal

(+ : goed; $\square$: matig; - : afwezig)

Tabel 4 : Effectieve standaardafwijking en zero crossing-rate berekend met het rekenprogramma GUSBR

$\bar{U}$ [m/s]	H [m]	D [m]	Z_o [m]	n_{Hp} [s ⁻¹]	$\sigma_u/\bar{U}$	$\sigma_{u,eff}/\sigma_u$	$N_{eff}^{(o)}$ [s ⁻¹]
5	20	16	0,03	0	0,17	0,91	0,05
8						0,89	0,06
11						0,88	0,08
14						0,87	0,10
17						0,86	0,12
20						0,86	0,13
13	15	16	0,03	0	0,18	0,86	0,10
	20				0,17	0,87	0,09
	25				0,16	0,88	0,09
13	20	16	0,002	0	0,12	0,89	0,09
			0,011		0,15	0,88	0,09
			0,101		0,19	0,86	0,10
13	20	5	0,03	0	0,17	0,95	0,16
		8				0,93	0,13
		12				0,90	0,11
		16				0,87	0,09
		20				0,85	0,08
13	20	16	0,03	1/60	0,17	0,64	0,13
				1/120		0,75	0,11
				1/300		0,83	0,10
				1/600		0,86	0,10
13	20	16	0,03	0	0,17	0,87	0,09

Tabel 5 : Modelvergelijking met data van Doran (1981)

H = 36,6 m; $\Delta Z = 34,5$ m; $\sim$ neutrale stabiliteit.

meting	GEMETEN				BEREKEND						
	$\bar{U}(H)$	σ_u	$\Delta \bar{u}$	$\sigma_{\Delta u}$	σ_u	$\Delta \bar{U}$	$\sigma_{\Delta u}$	$\sigma_u(L)$	$\sigma_{\Delta u}$	$\rho(\Delta Z)$	Z_o
	(m/s)	m/s	m/s	m/s	ESDU	m/s	ESDU	m/s; m	m/s	ESDU	(m)
						neutraal		licht	stabiel		
8/5 - 9/5/79 periode 2	11,2	1,37	1,99	1,50	1,94	1,97	2,06	1,52 (200)	1,61	0,44	0,11
8/5 - 9/5/79 periode 1	12,3	1,58	2,21	1,64	2,13	2,17	2,26	1,67 (200)	1,77	0,44	0,11
10/12/79	13,3	1,67	1,86	1,66	2,01	1,81	2,05	1,77 ($\sim$)	1,81	0,48	0,02
14/3/80	14,6	2,09	2,07	1,97	2,21	1,99	2,25	1,94 ($\sim$)	1,98	0,48	0,02
14/12/79	18,0	2,34	2,58	2,30	2,72	2,45	2,77	240 ($\sim$)	2,45	0,48	0,02

Tabel 6 : Klassenindeling uurgemiddelde windsnelheid.

klasse	gebied [m/s]	$\bar{U}$ [m/s]
I	4 ÷ 8	7
II	8 ÷ 12	11
III	12 ÷ 20	15

Tabel 7 : Criteria in de vorm van overschrijdingsniveaus voor amplitude en gradiënt van een windvlaag.

	amplitude A [m/s]	gradiënt B [m/s ²]	duur* T _o [S]
vermoeding	10%	10%	$\frac{1}{2 N_{\text{eff}}(o)}$
extreem			
- amplitude	1/50 jaar	1 à 10/jaar	$4 \leq T_o \leq \frac{4A^{**}}{B}$
- gradiënt	1 à 10/jaar	1/50 jaar	$4 \leq T_o \leq \frac{4A}{B}$

* afronden op hele waarden

** als $\frac{4A}{B} \geq 4$ dan $T_o = \frac{4A}{B}$ anders $T_o = 4$

Tabel 8 : Vermoeiingsvlaaggrootheden voor de windsnelheidsklassen.

klasse	$\bar{U}(H)$	σ_u	$\sigma_{u,eff}$	$\sigma_{\frac{du}{dt},eff}$	N_{eff}	A	B	T_o
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s ²]	[1/s]	[m/s]	[m/s ²]	[s]
$Z_o = 0,03 \text{ m}$								
I	7	1,23	1,08	0,39	0,058	1,4	0,5	9
II	11	1,88	1,66	0,85	0,081	2,1	1,1	6
III	15	2,57	2,23	1,47	0,105	2,9	1,9	5

 $Z_o = 1 \text{ m}$

I	7	2,03	1,77	0,68	0,061	2,3	0,9	8
II	11	3,20	2,71	1,49	0,088	3,5	1,9	6
III	15	4,36	3,63	2,60	0,114	4,7	3,3	4

 $D_{rotor} = 16 \text{ m}; \quad H = 20 \text{ m}$

Tabel 9 : Extreme vlag-grootheden voor windsnelheidsklassen

klasse	$\bar{U}(H)$	A	B	T_o
	[m/s]	[m/s]	[m/s ²]	[s]
extreme amplitudevraag				
I	7	7,1	2	14
II	11	10,4	4	10
III	15	13,1	6,5	8

extreme gradiëntvraag

I	7	5,5	2,6	8,5
II	11	8	5,3	6
III	15	9,5	8,6	4,5

D = 16 m; H = 20 m; $Z_o = 0,03$ m; Schiphol

Tabel 10 : De 10% van de tijd overschreden dimensieloze schering als functie van H, D, Z_o voor een neutrale atmosfeer.

H (m)	D (m)	Z_o (m)	$\frac{\sigma_u}{L \rightarrow \bar{u}}$	$\rho(\frac{3D}{4})$	$\frac{\Delta \bar{u}}{\bar{u}}$	$\frac{\sigma_{\Delta u}}{\bar{u}}$	$\frac{\Delta U(10\%)}{\bar{u}}$
15	16	0,001	0,104	0,70	0,088	0,081	0,19
		0,03	0,161	0,64	0,136	0,137	0,31
		0,3	0,256	0,60	0,217	0,229	0,51
20	16	0,001	0,101	0,72	0,063	0,076	0,16
		0,03	0,154	0,67	0,095	0,125	0,255
		0,3	0,238	0,63	0,147	0,205	0,41
25	16	0,001	0,099	0,74	0,048	0,071	0,14
		0,03	0,149	0,69	0,073	0,117	0,22
		0,3	0,226	0,65	0,111	0,189	0,35

Tabel 11 : 10% van de tijd overschreden dimensieloze schering als functie van ashoogte en stabiliteit

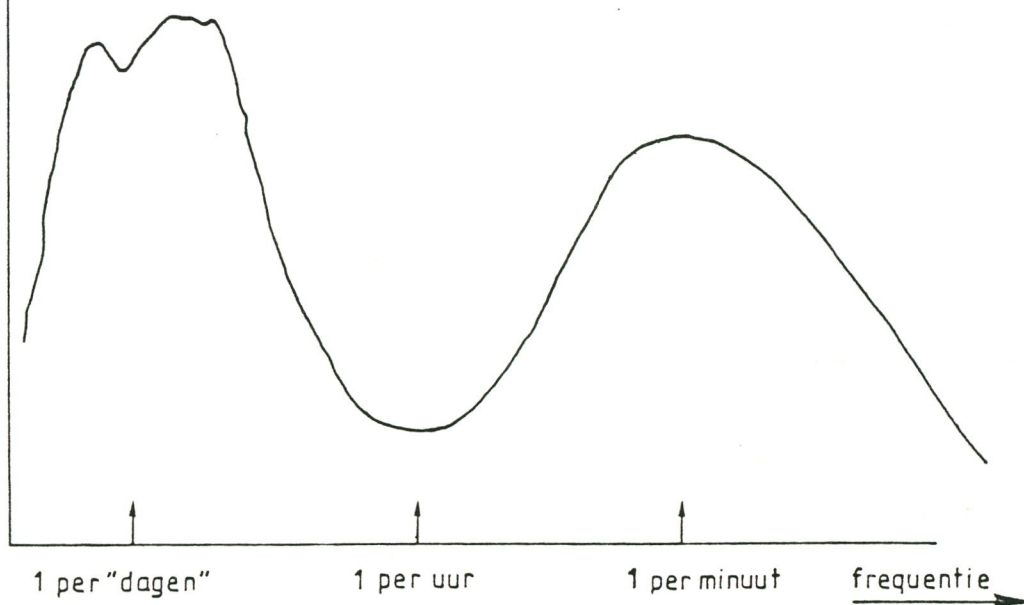
($Z = 0,03 \text{ m}$; $\Delta Z = \frac{3D}{4} = 12 \text{ m}$; $\rho (\Delta Z = 12; H = 25 \text{ m}) = 0,69$; $\rho (\Delta Z = 12; H = 40 \text{ m}) = 0,84$).

stab. klasse (Pasquill)	meng- hoogte Z_i (m)	$1/L$ (m^{-1})	H = 25 m			H = 40 m			H = 25 m	H = 40 m
			$\sigma_u/\bar{U}$	$\overline{\Delta U}/\bar{U}$	$\sigma_{\Delta u}/\bar{U}$	$\sigma_u/\bar{U}$	$\overline{\Delta U}/\bar{U}$	$\sigma_{\Delta U}/\bar{U}$	$\frac{\Delta U}{\bar{U}}(10\%)$	$\frac{\Delta U}{\bar{U}}(10\%)$
B	1500	-0,10	0,37	0,03	0,29	0,36	0,013	0,21	0,40	0,27
B	1500	-0,05	0,28	0,03	0,22	0,27	0,017	0,16	0,32	0,21
C	1000	-0,02	0,20	0,04	0,16	0,19	0,020	0,11	0,24	0,16
C	1000	-0,01	0,17	0,05	0,13	0,16	0,022	0,09	0,22	0,14
D	500	0	0,14	0,07	0,11	0,13	0,04	0,07	0,21	0,13
E	200	0,01	0,11	0,13	0,09	0,09	0,10	0,06	0,25	0,16
E	200	0,04	0	0,24	0	0	0,17	0	0,24	0,17
F	200	0,05	0	0,26	0	0	0,19	0	0,26	0,19
F	200	0,08	0	0,31	0	0	0,22	0	0,31	0,22

$n S_U(n)$



meting



klimateologie	fronten buien	turbulentie
---------------	---------------	-------------

Fig. 1A

$n S_U(n)$



schema

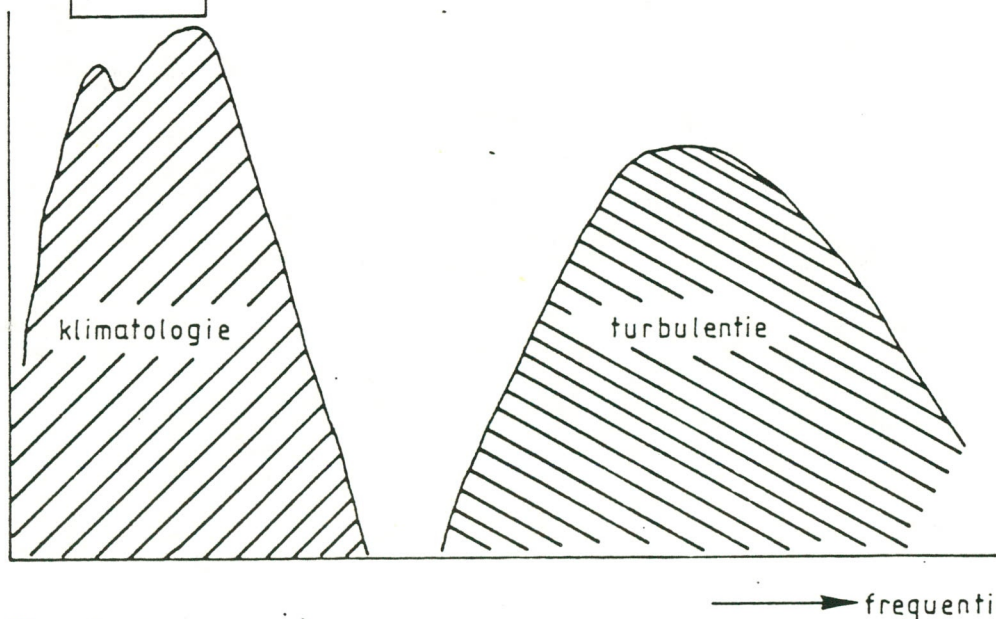
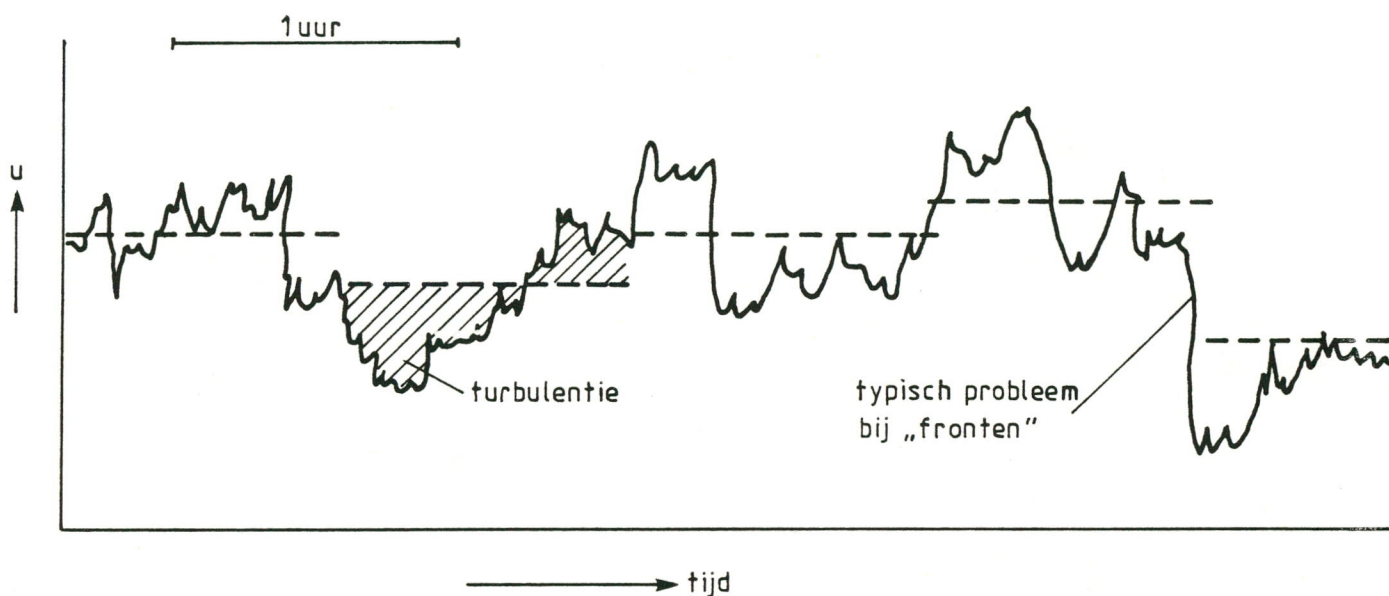
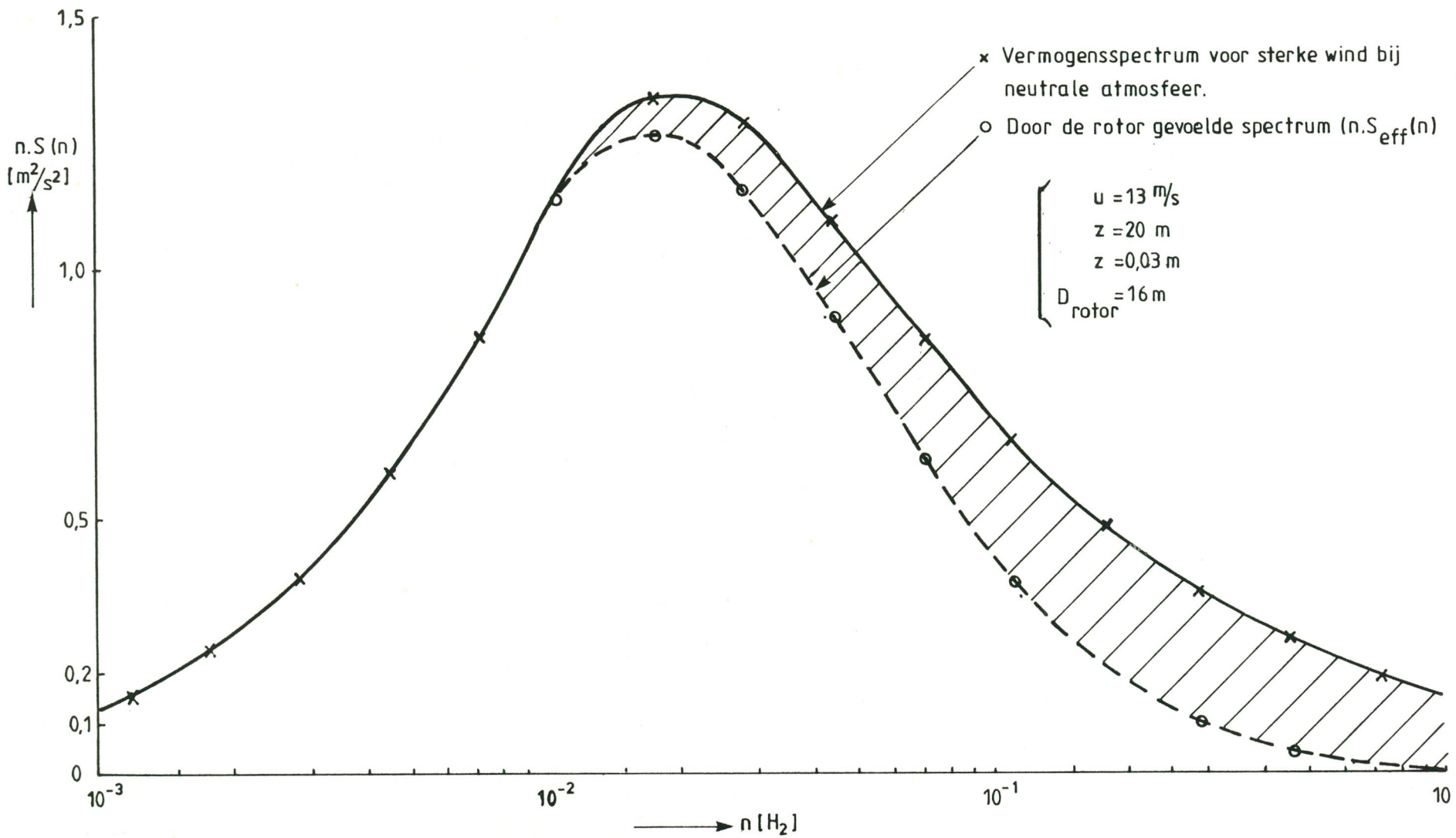


Fig. 1B



----- de uurgemiddelde wind met eigen statistiek

 de turbulentie = variatie rond het uurgemiddelde ook met eigen statistiek



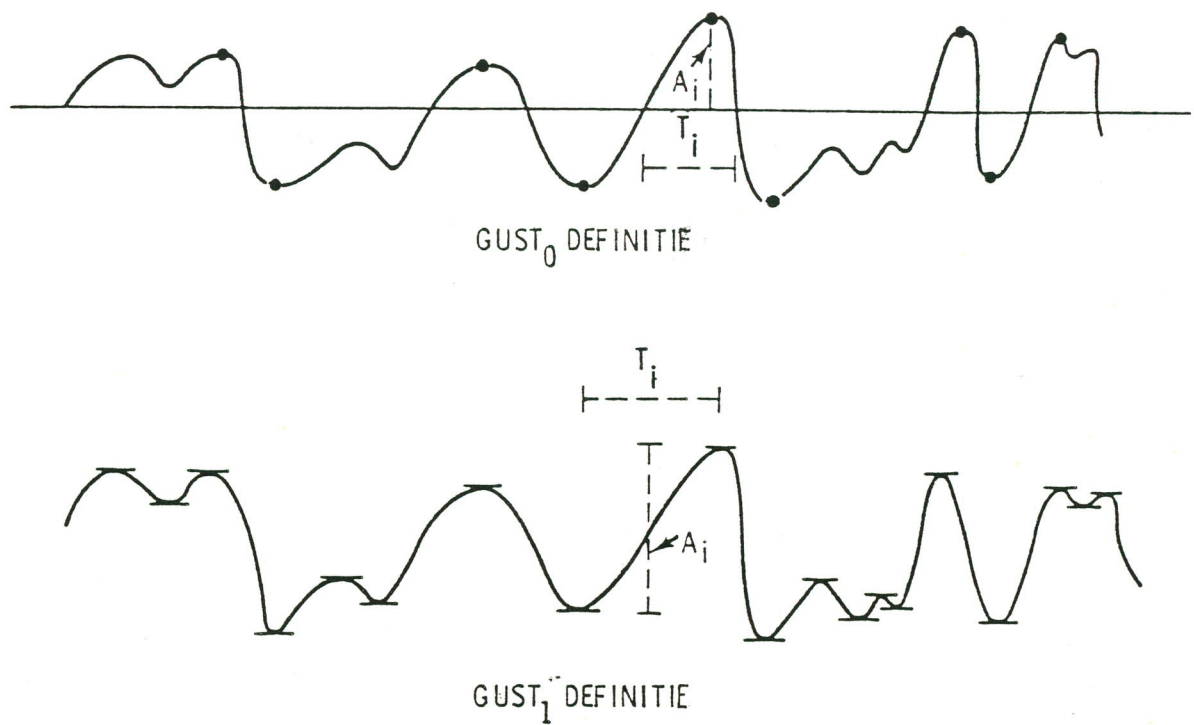


Fig.4 Vlaagdefinities (Ramsdell, 1978)

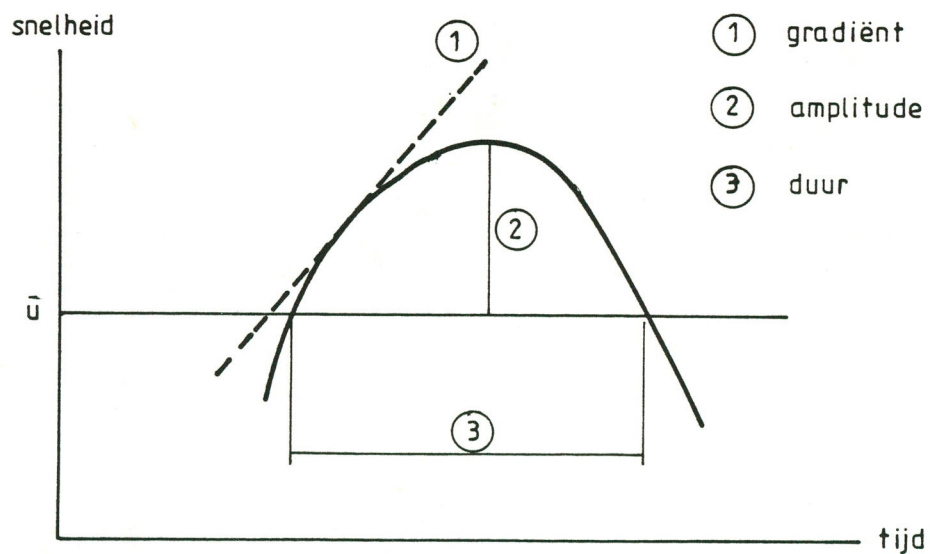
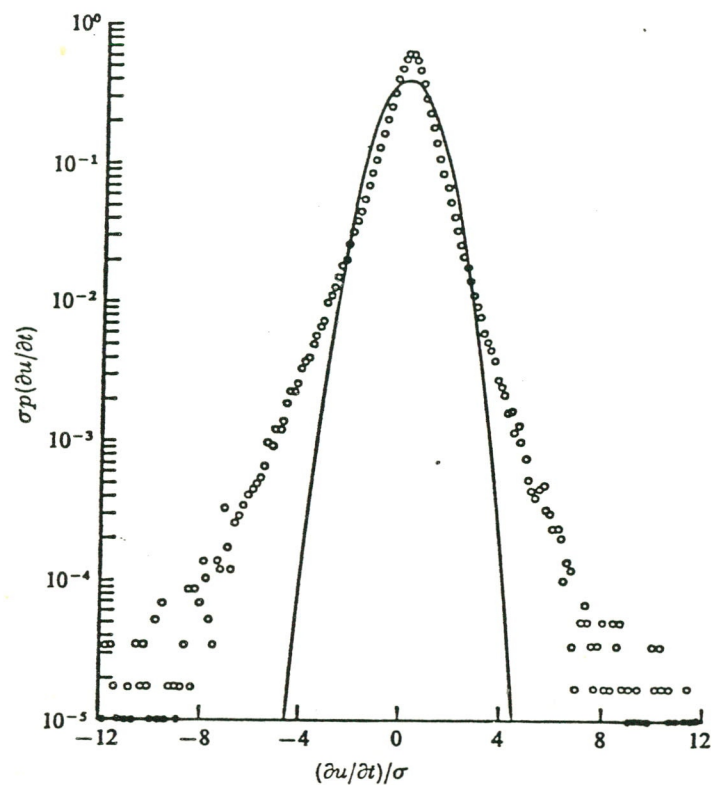
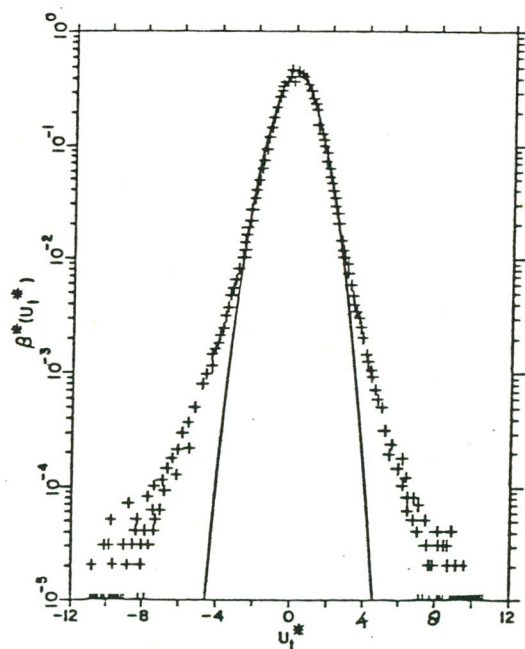


Fig.5 Schematisering van een vlaag



Probability density of $\partial u / \partial t$ for $z = 3$ m, $u = 11$ m/s. σ is the standard deviation of $\partial u / \partial t$. —, the Gaussian distribution.

Van Atta & Chen '70



Probability density of $\partial u / \partial t$. Data taken at 11:32 on 28 July 1968; +, experimental data; —, Gaussian.

$z = 108$ m

Sheih, Tennekes & Lumley '71

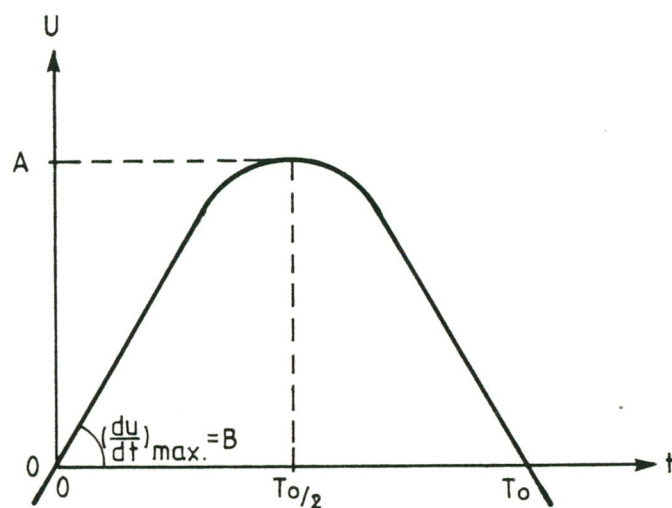


Fig.7 Vlaagvorm als exkursie boven de uurgemiddelde windsnelheid

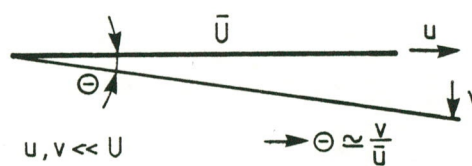
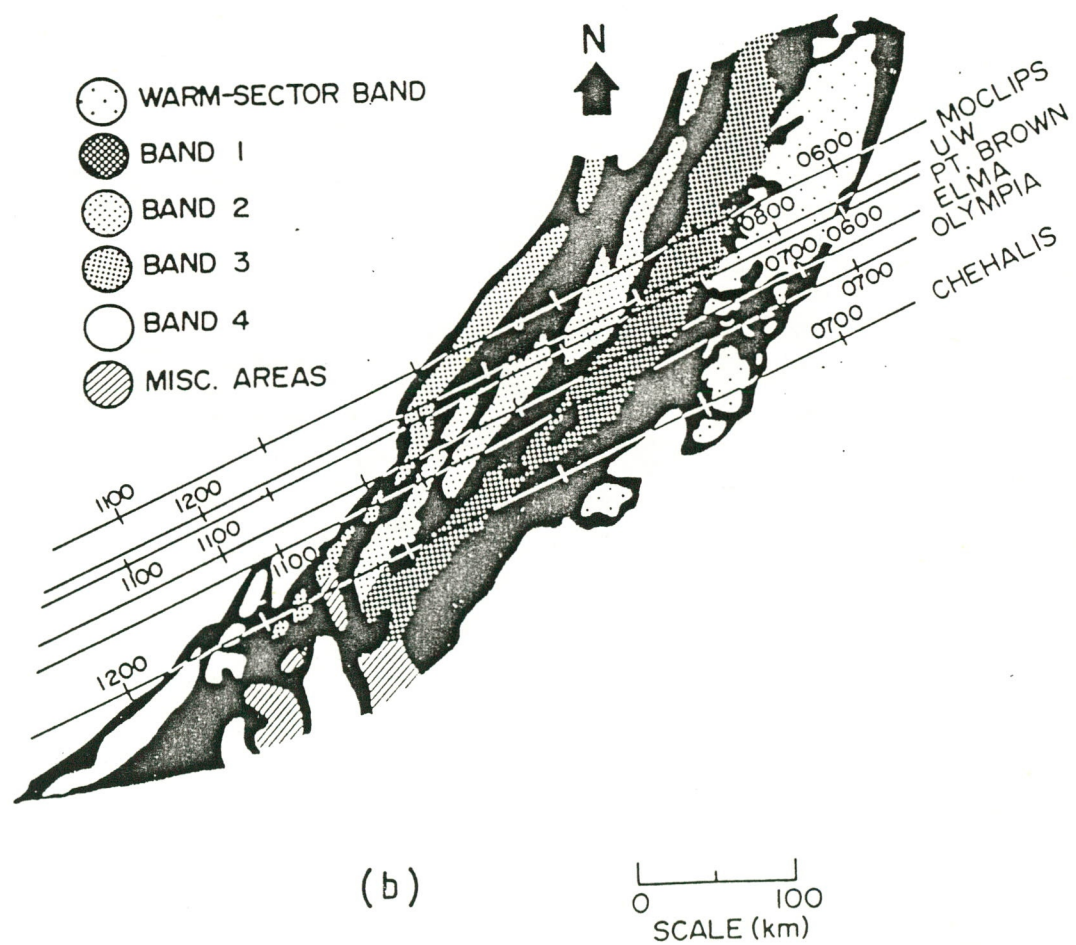
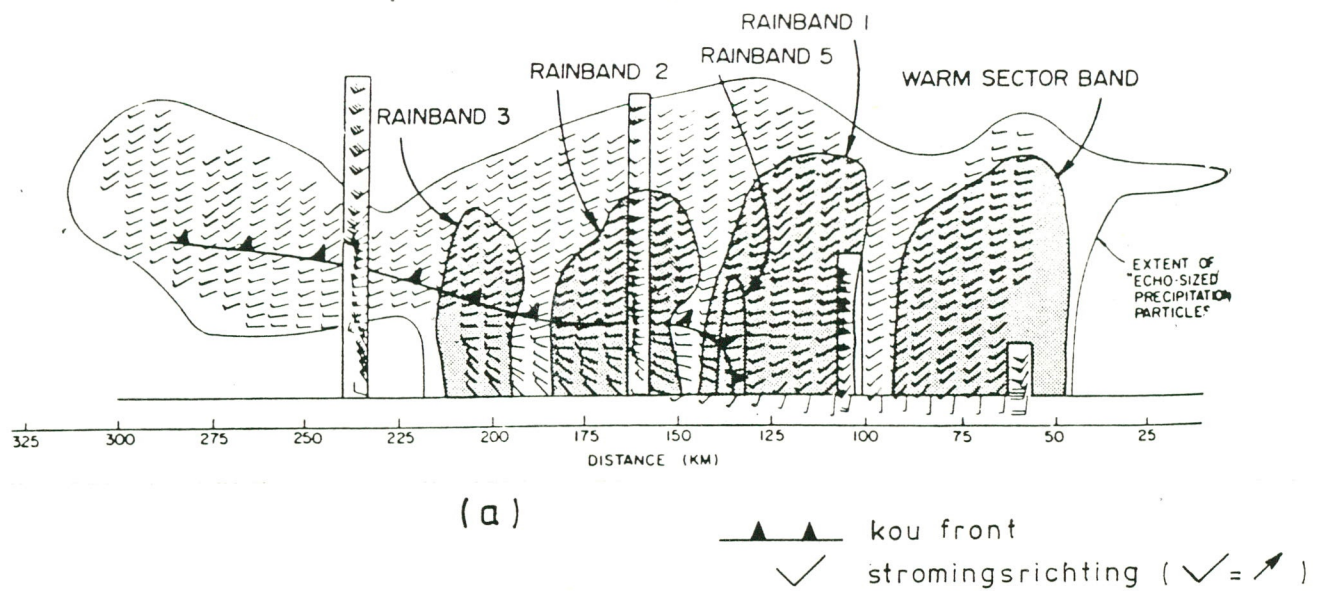


Fig.8 Windrichtingsfluctuatie Θ

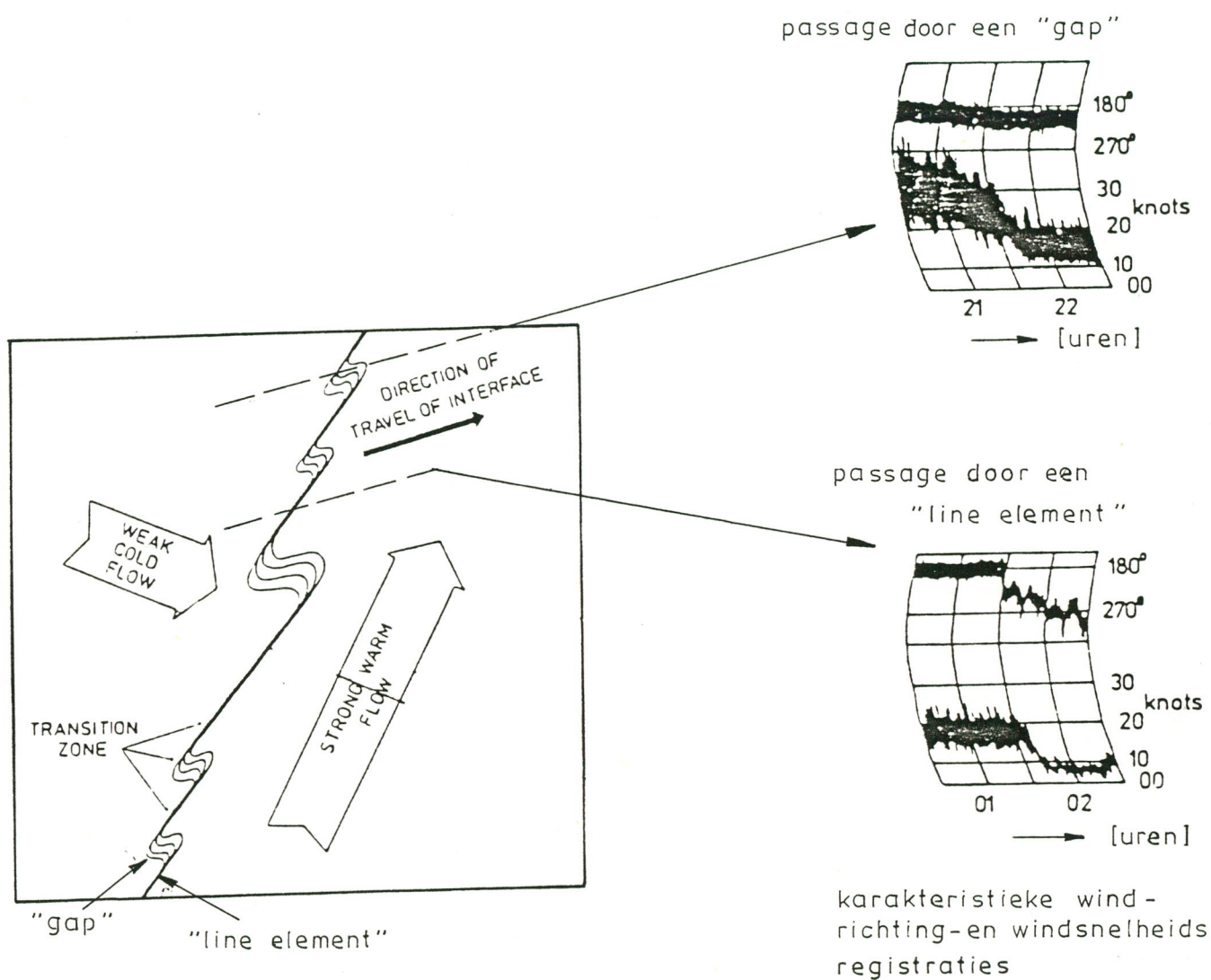


Doorsneden door een kou front; a: Verticaal, b: Horizontaal. (Hobbs et Al, 1980)

MT-TNO

11344

Fig. 9

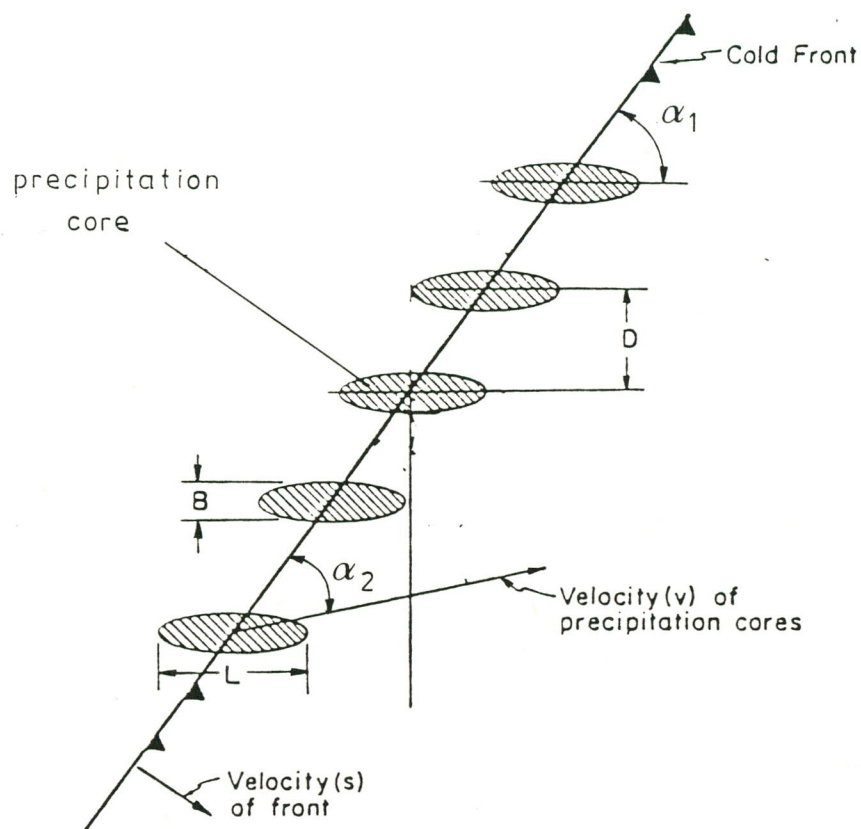


Schematisch model van een narrow cold-frontal rain-band (James, Browning, 1979)

MT-TNO

11344

Fig. 10



breedte B : 3 - 5 km
 lengte L : 16 - 27 km
 orientatie α_1 : 32° - 38°
 trekrichting α_2 : 33° - 63°
 treksnelheid v : 12 - 24 m/s
 front " S : 8 - 18 m/s

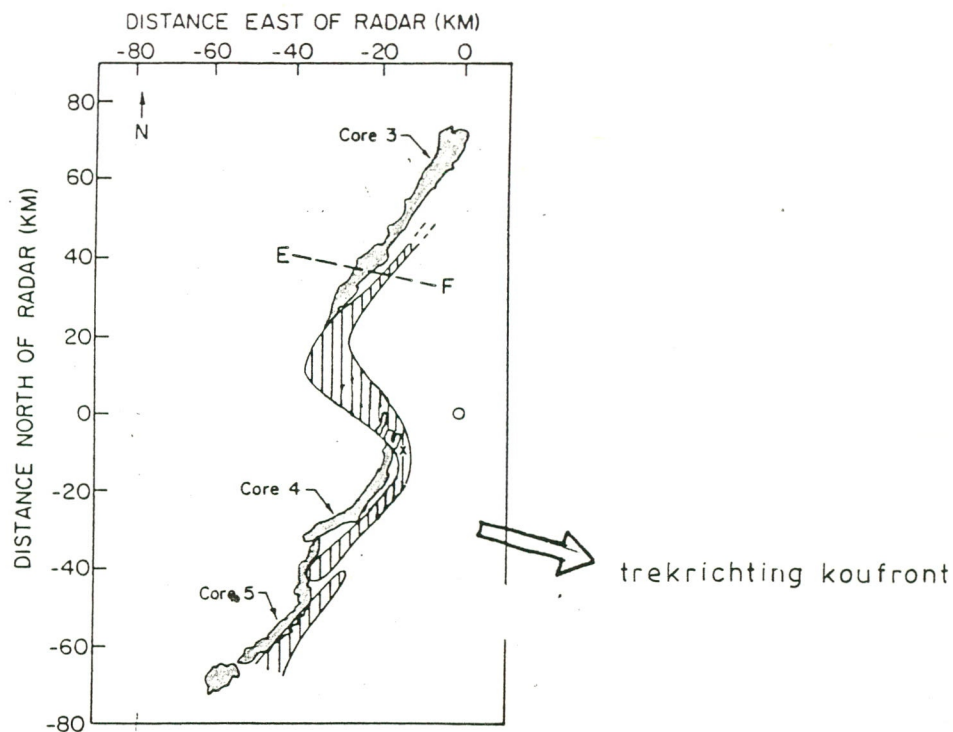


Fig. 12 : Radar doorsnede (0° elevatie)

 precipitation core
 windshift zone

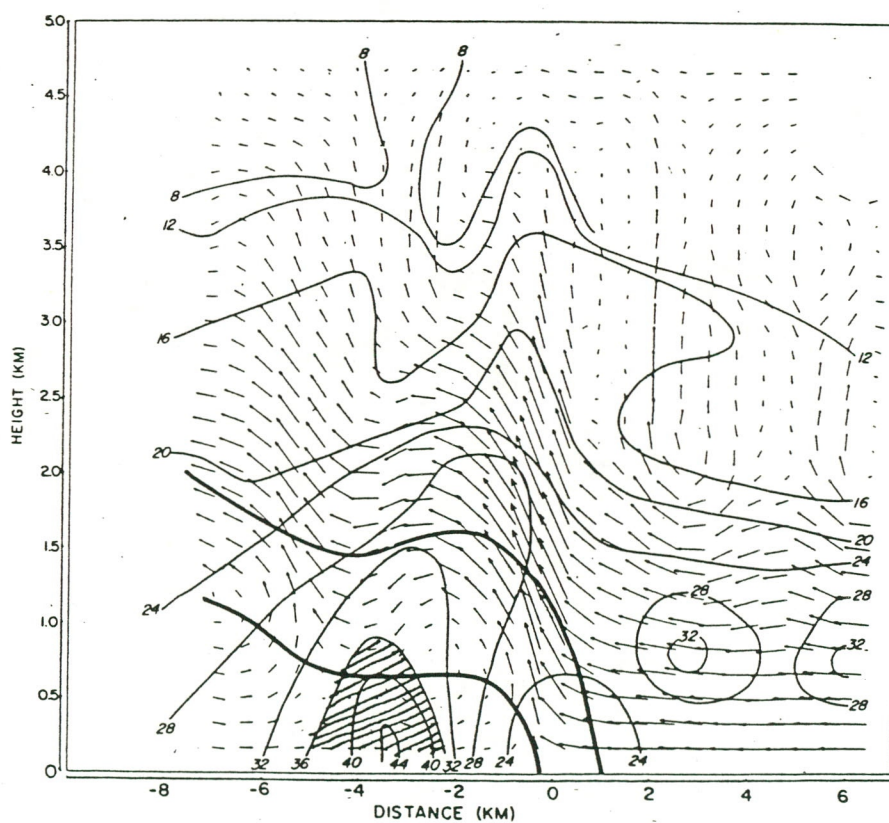
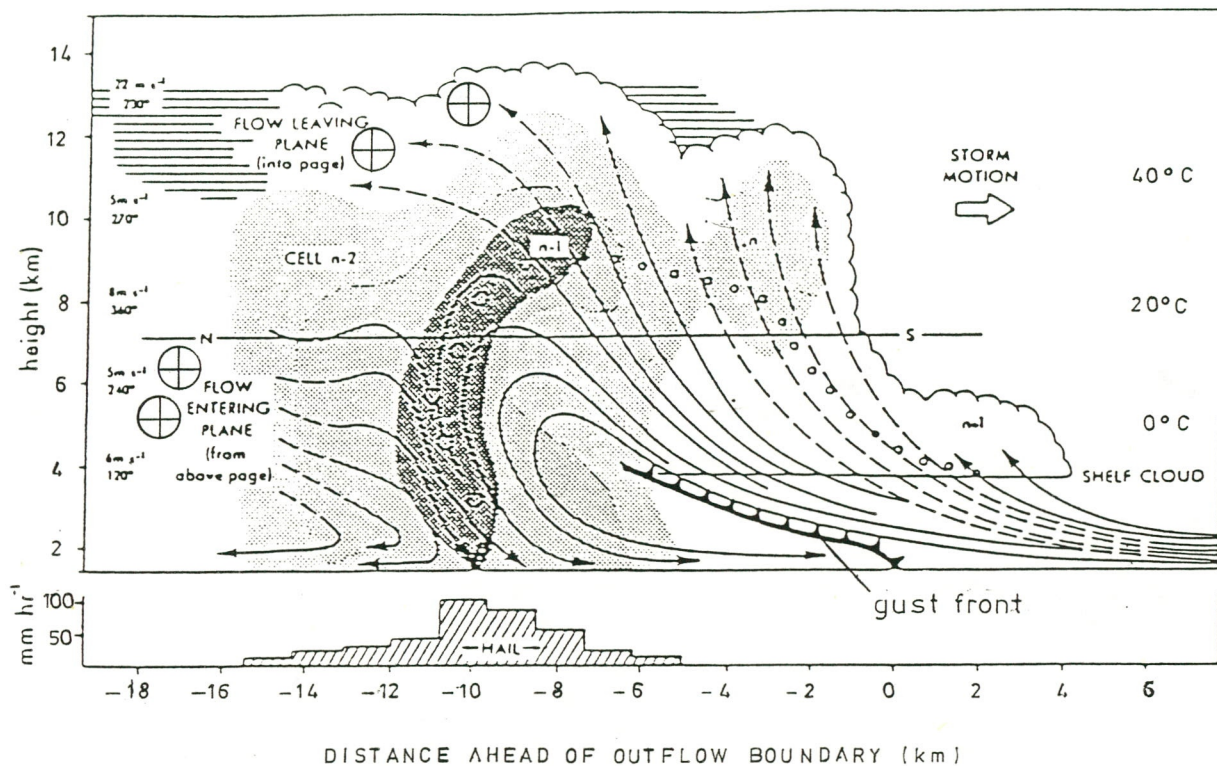


Fig. 13 Doorsnede E-F (verticaal)

 snelheid, relatief t.o.v. P.C.
 reflectie contouren (///// P.C.)
 windshift zone

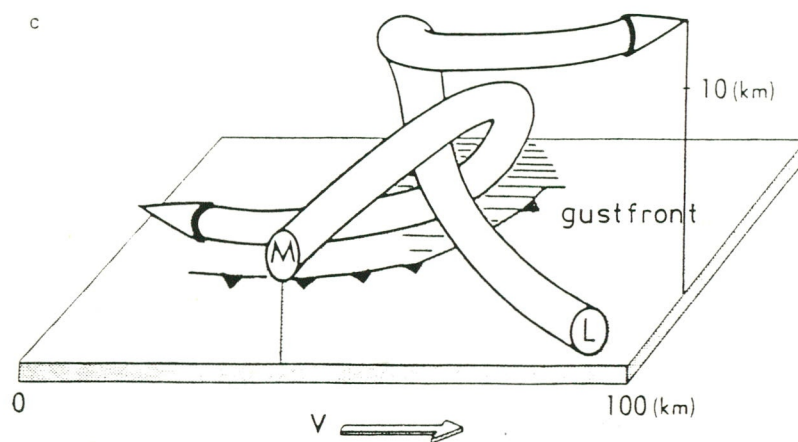


Schematische doorsnede van een hagelbui

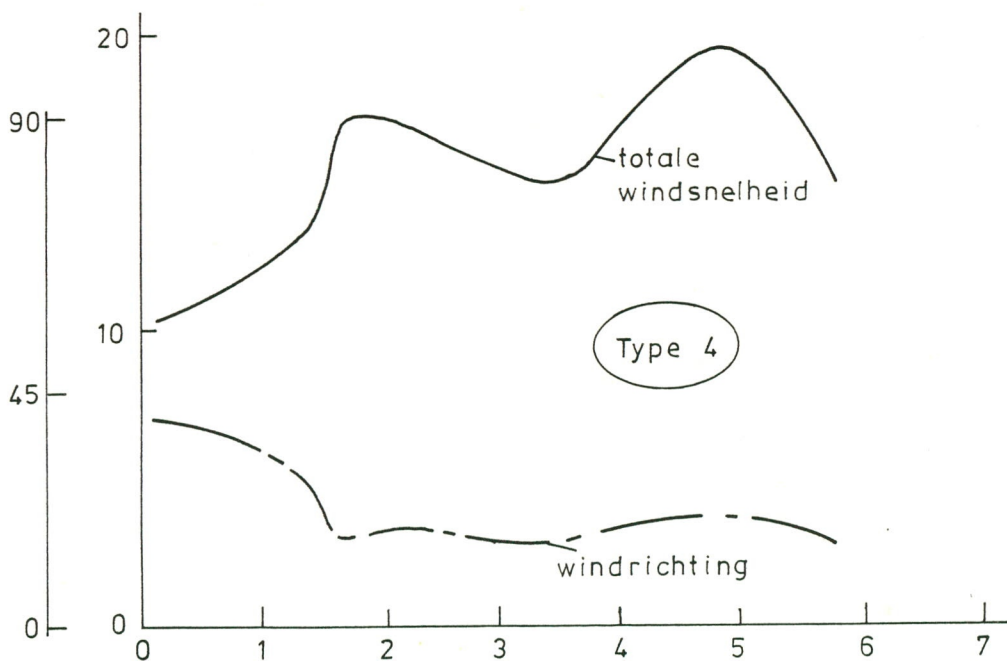
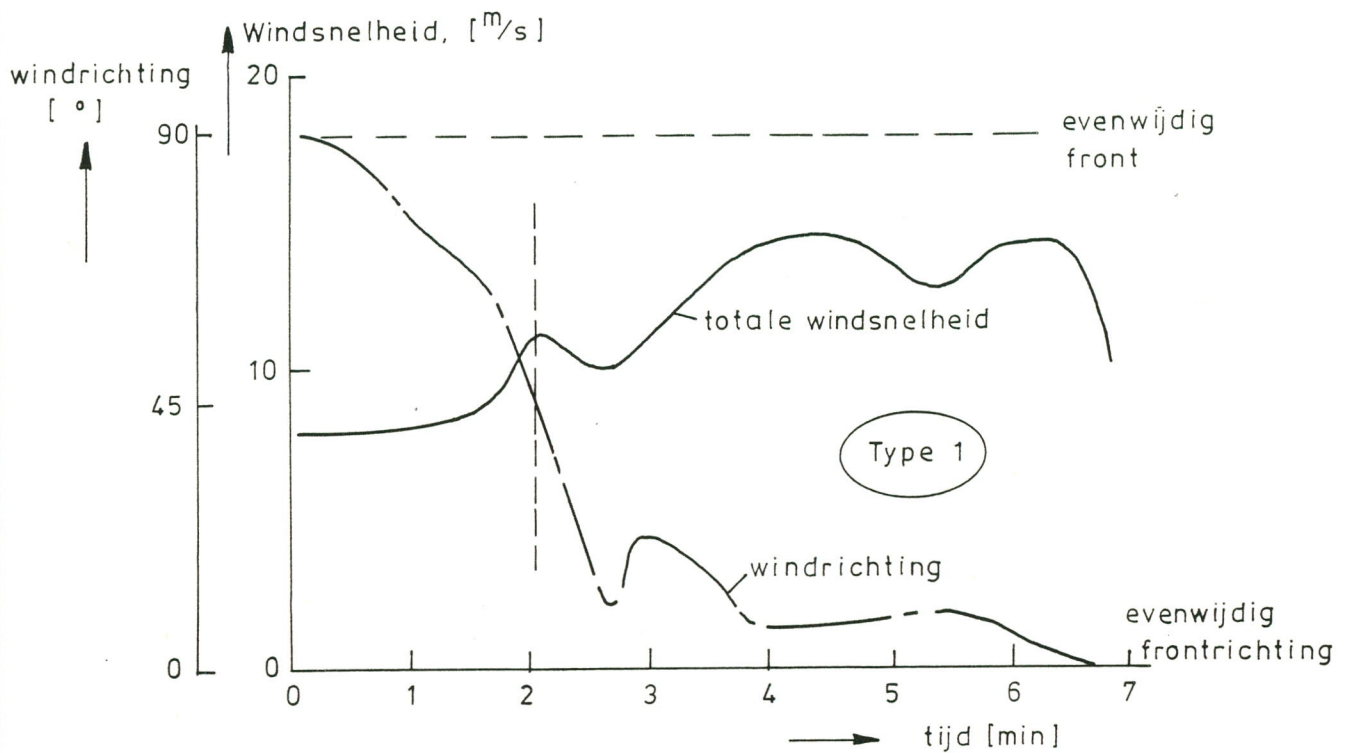
MT-TNO

11344

Fig. 14



Three-dimensional air-flow in a severe storm that travels to the right of the winds in the middle troposphere. L (low) and M (middle) refer to the main levels of origin of updraught and down-draught respectively. Hatched area shows extent of surface precipitation; barbed line the position of surface gust front. V is storm velocity.

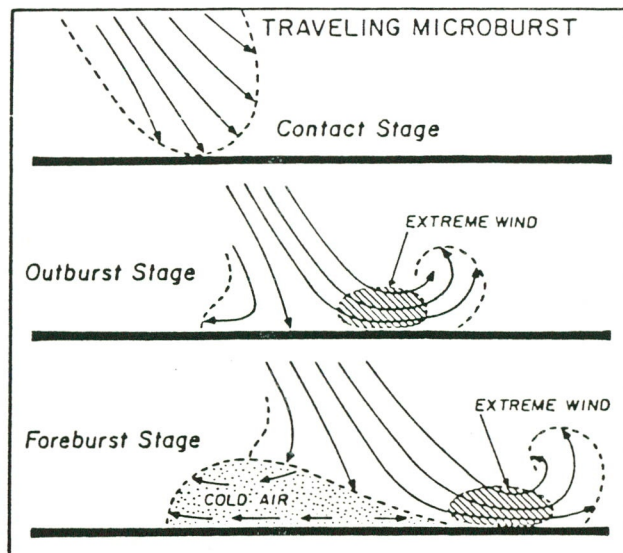


Gemeten verloop van de windsnelheid en windrichting tijdens de passage van een "gust front" (Goff, 1976)

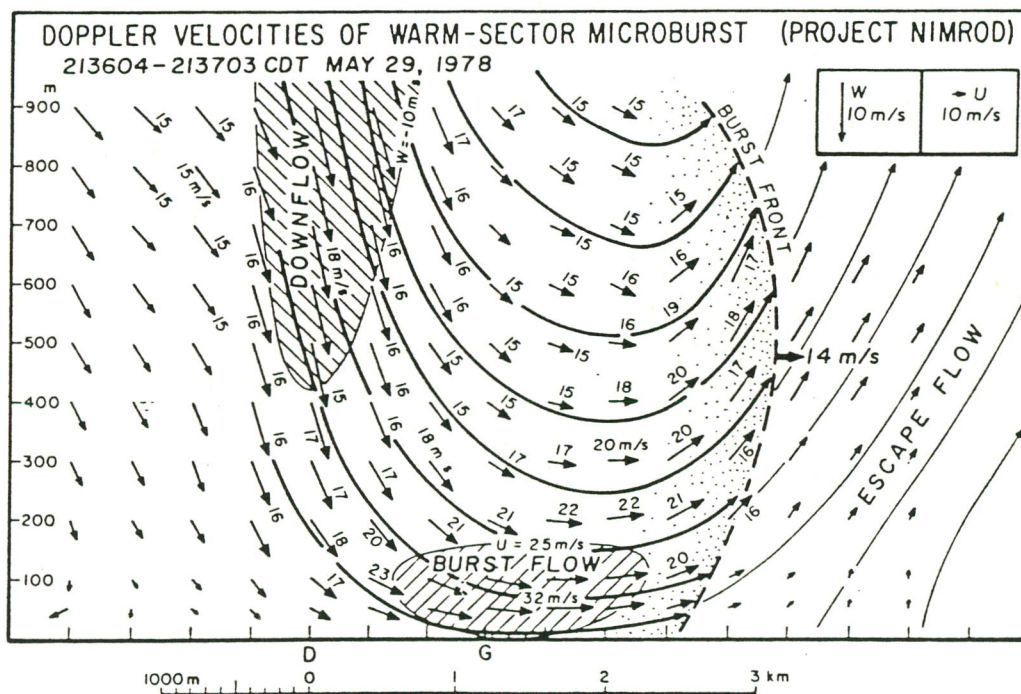
MT—TNO

11344

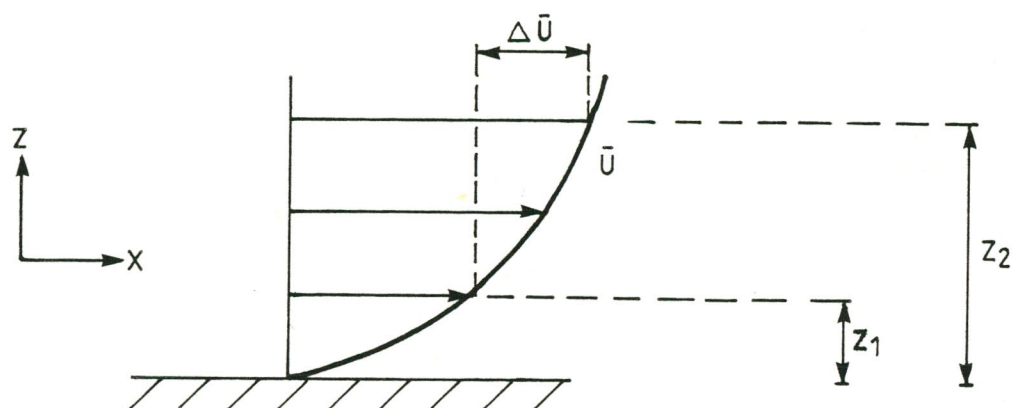
Fig. 16



Schematic diagram of a traveling microburst accompanied by an extreme wind near the ground.

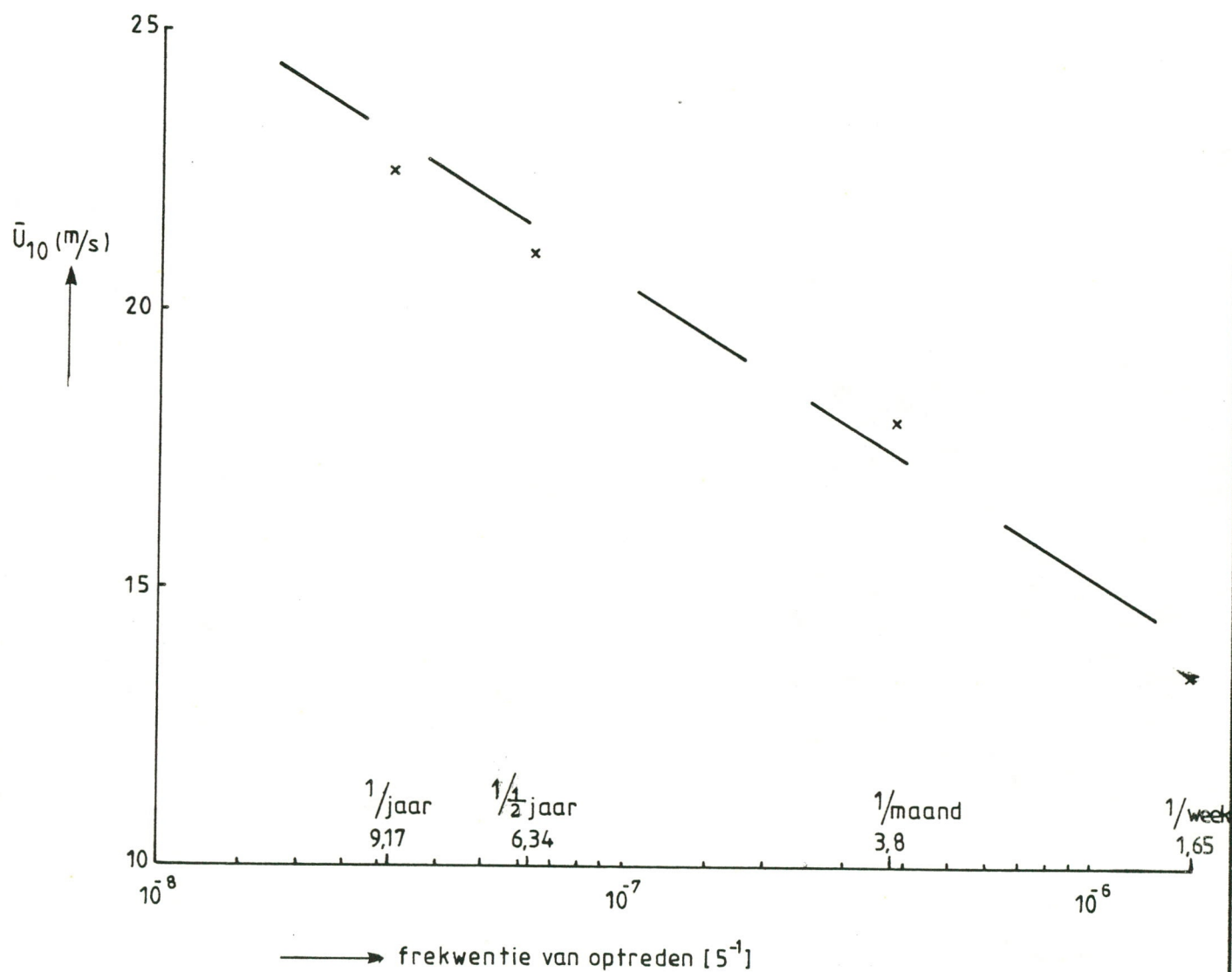


Doppler velocities of a traveling microburst. The maximum wind of the horizontal outburst flow is located 50 m above the ground. An aircraft attempting to penetrate an outburst flow will encounter a tremendous increase in the tailwind as it flies out of the high-wind core.



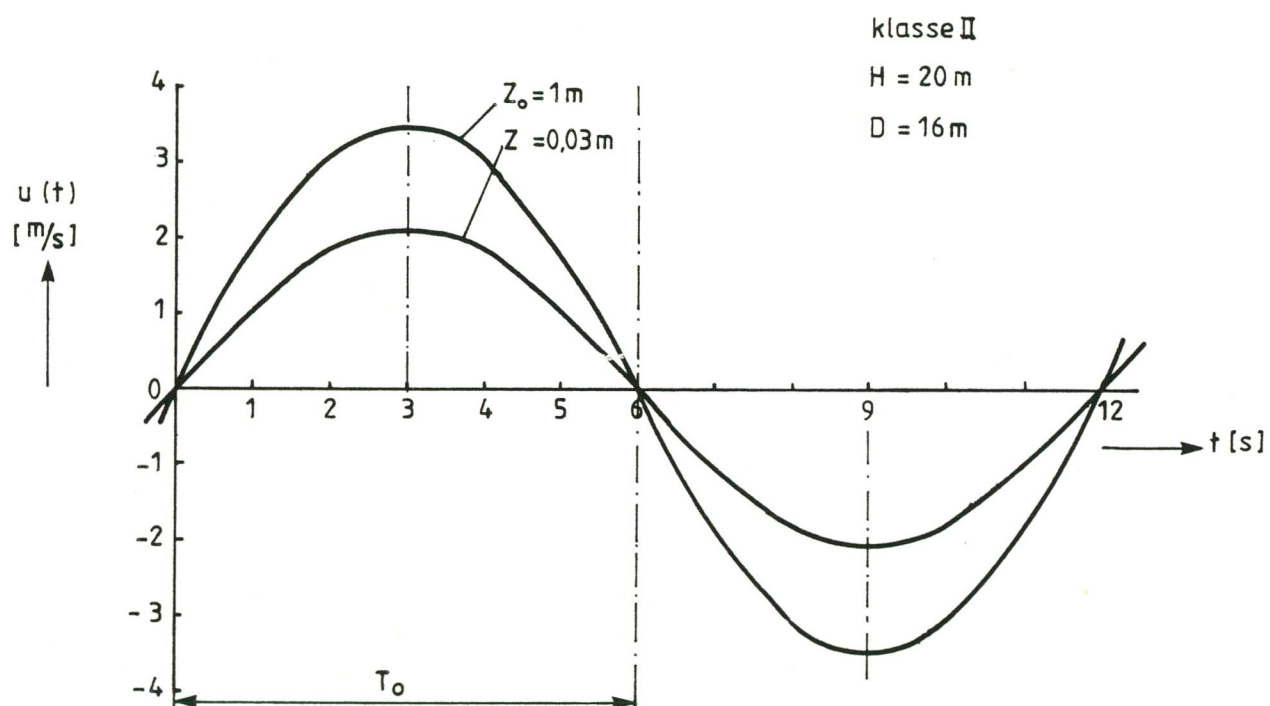
Windschering ΔU

MT_TNO
11344
Fig.18



Verband tussen uurgemiddelde windsnelheid op 10m hoogte
en frekwentie van optreden (Schiphol)

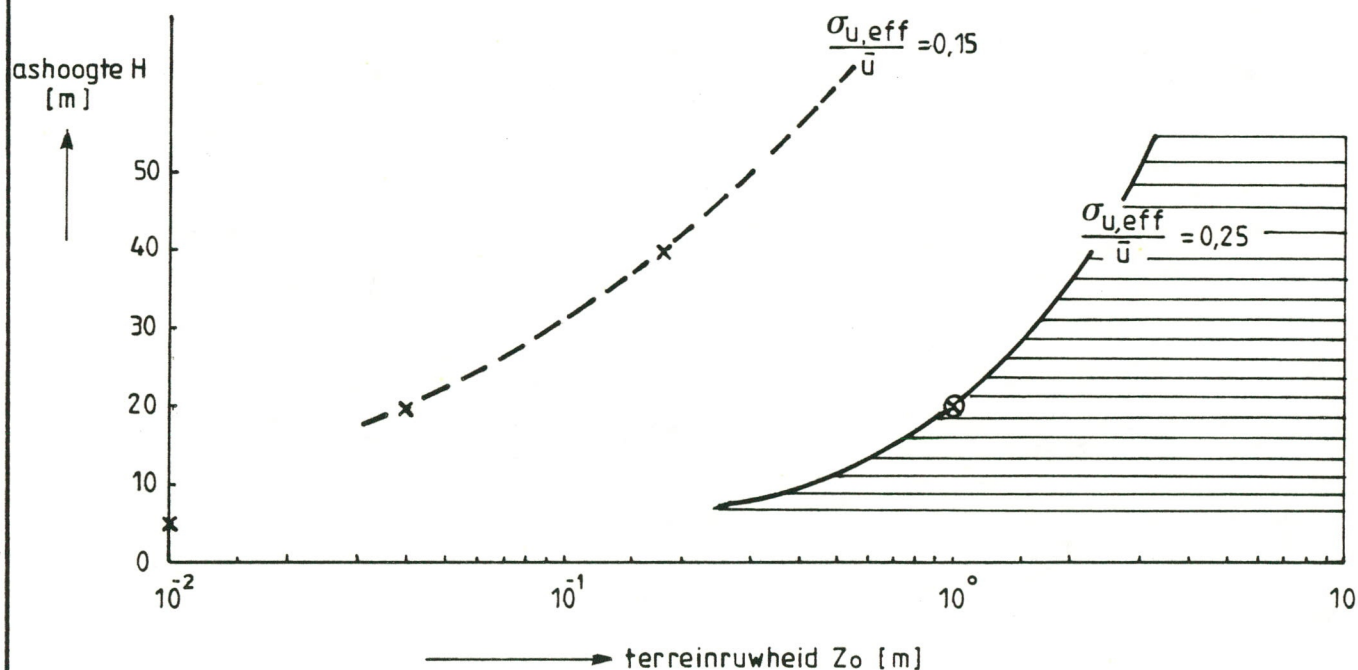
MT_TNO
11344
Fig.19



Vermoeingsvlagen voor klasse II ($\bar{u} = 11 \text{ m/s}$) voor ruw en glad
 terrein.

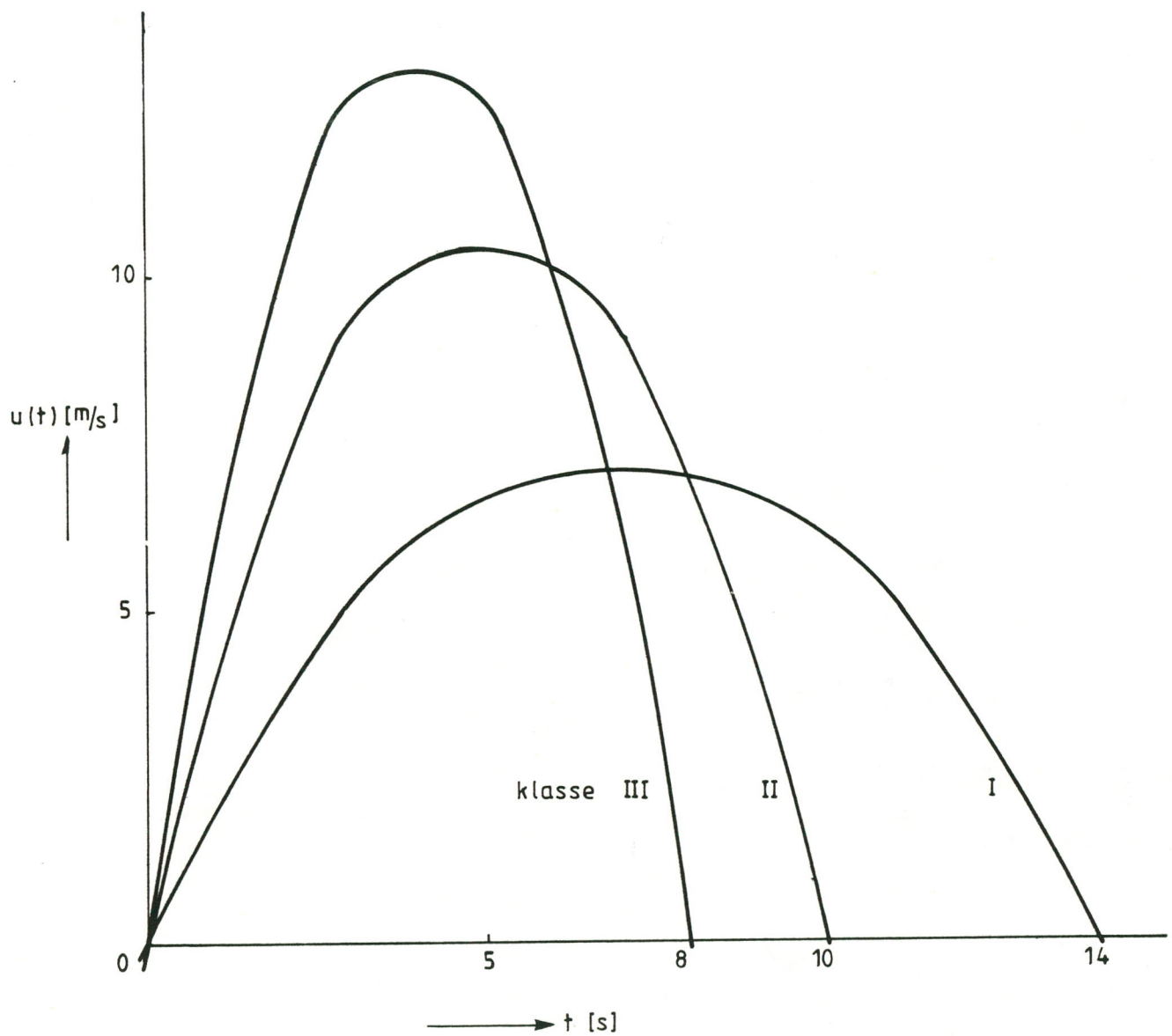
MT_TNO
 11344
 Fig. 20

In het gearceerde gebied zijn de vermoeingsvlagen niet conservatief



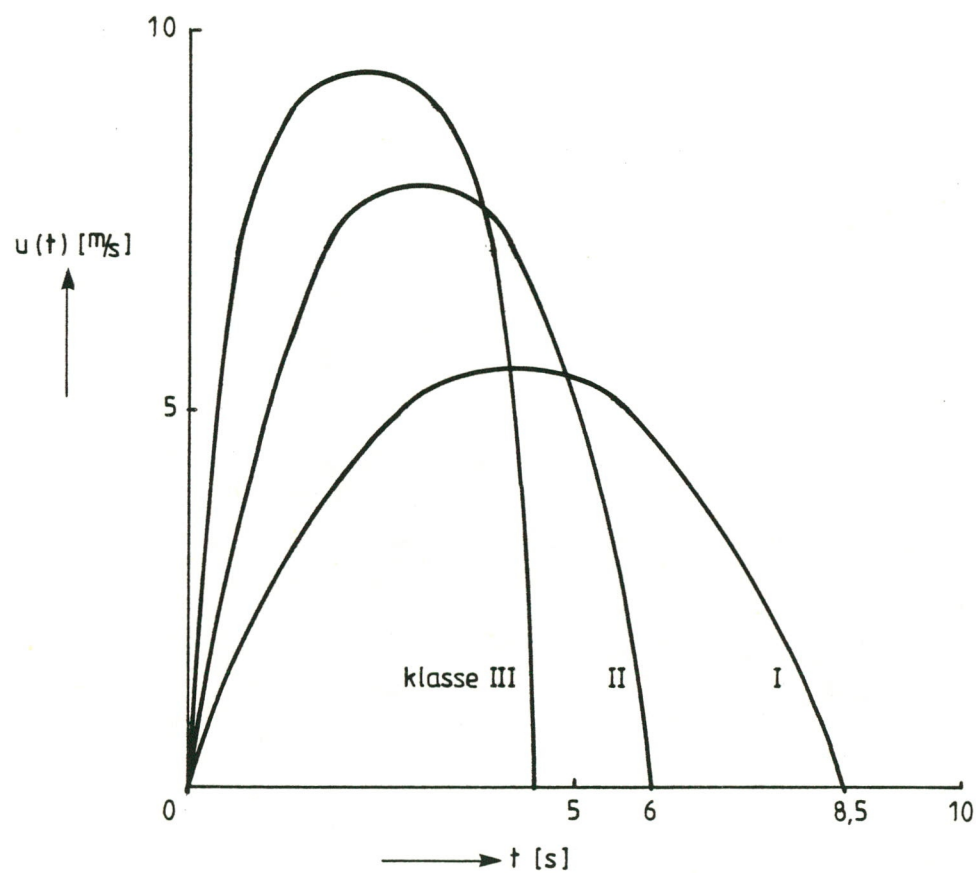
Lijnen van konstante door de rotor gevoelde turbulentieïntensiteit als functie van ashoogte H en oppervlakteruwheid Z_0 voor een rotordiameter van 16m.

MT - TNO
11344
Fig. 21



Extreme amplitudevlagen volgens tabel 6.

MT_TN0
11344
Fig. 22a



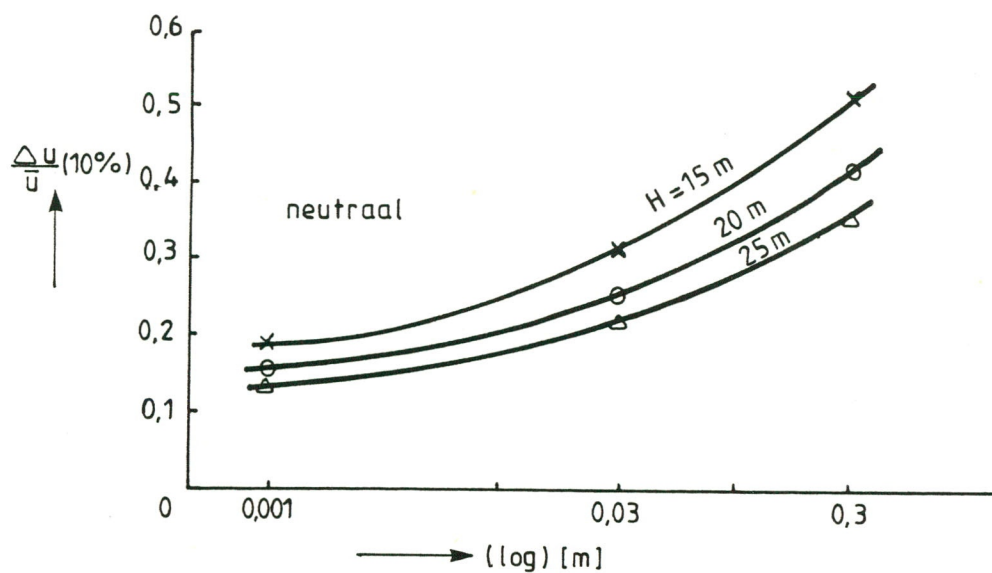


Fig. 23 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze schering als functie van Z_0 voor verschillende ashoogte H . ($D=16\text{ m}$; $\Delta Z=12\text{ m}$; tabel 7; voor grotere D schuiven de iso- H lijnen omhoog)

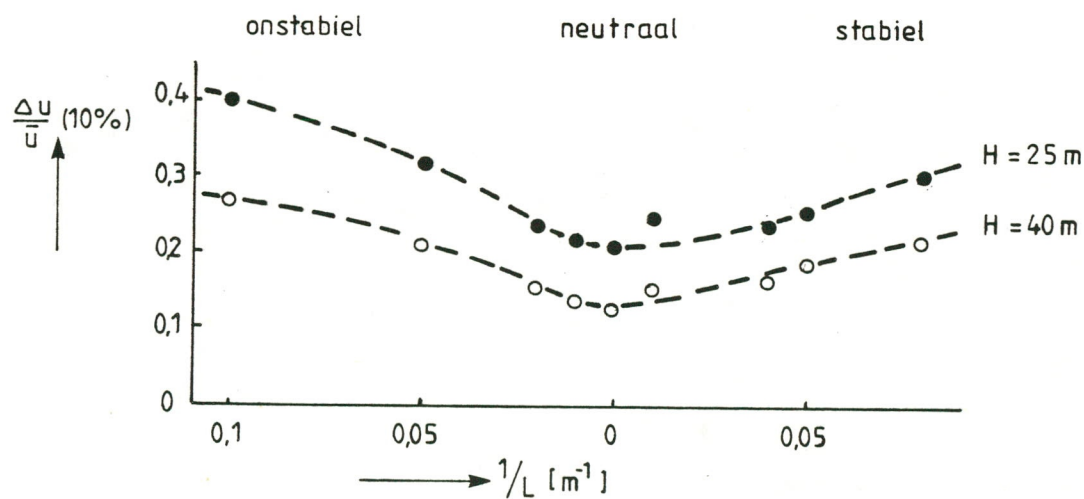
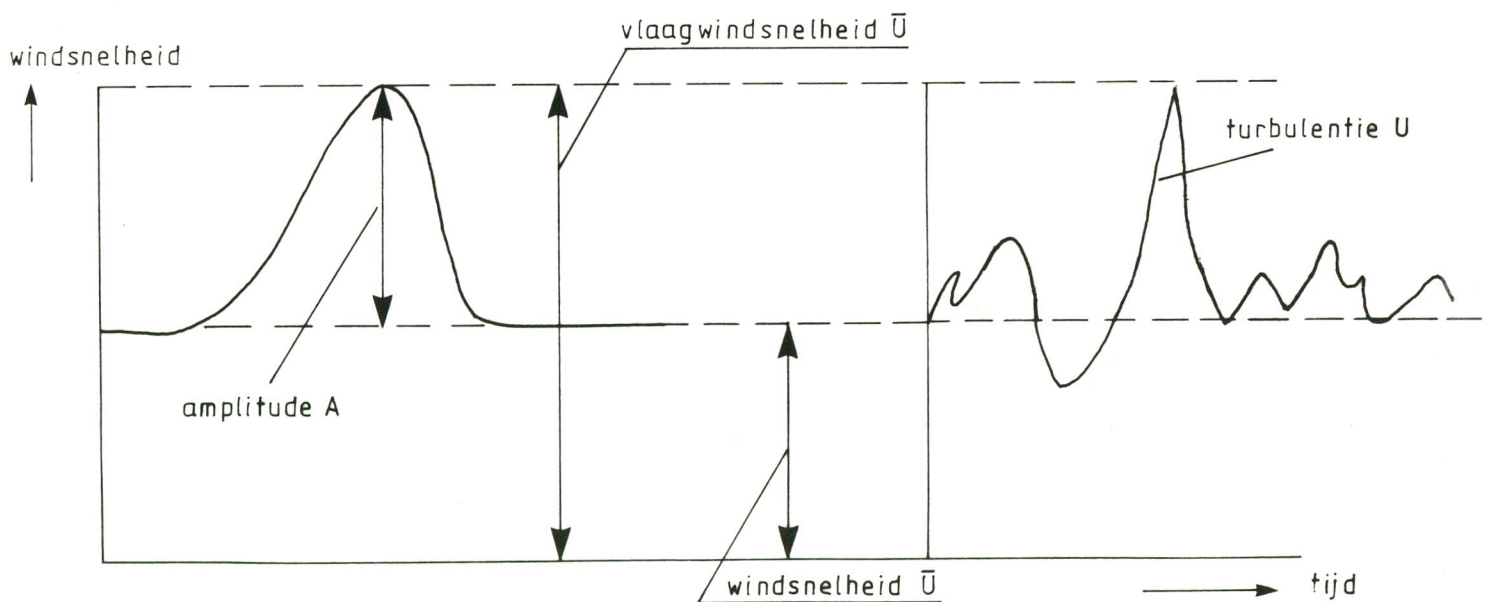


Fig. 24 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze schering als functie van van de atmosferische stabiliteit en ashoogte ($Z_0=0,03\text{ m}$; $D=16\text{ m}$; $\Delta Z=12\text{ m}$; tabel 8)

APPENDIX A

NOTATIEVOORSTEL WINDSNELHEDEN

1. Er wordt onderscheid gemaakt tussen meteorologische snelheden : U, u
 windturbine grootheden : V (bijvoorbeeld V_{in}, V_{uit})
 (alleen v wordt gebruikt voor dwarsturbulentie).
2. Er wordt voor U onderscheid gemaakt tussen
 - windsnelheid : altijd uurgemiddeld $\bar{U}$
 - momentane of
 laagwindsnelheid : altijd totaal U
 - "fluctuatie"
 "turbulentie" } : altijd rond het uurgemiddelde u, A
 "amplitude"
3. Bij fluctuaties wordt onderscheid gemaakt tussen
 stochastische grootheden : u
 deterministische grootheden : A voor snelheid
 B voor gradiënt $\frac{du}{dt}$.



4. Extremen van de windsnelheid $\bar{U}$ worden van de index "max" voorzien én van de overschrijdingskans

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\max}(T) ; T & \text{ bijvoorbeeld } 1 \times \text{ per jaar} \\ & 1 \times \text{ per 50 jaar} \\ & 10 \times \text{ per jaar} \end{aligned}$$

ter vereenvoudiging

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\text{extr.}} & : \text{ extreme windsnelheid met een voorkomen van} \\ & 1 \times \text{ per 50 jaar.} \end{aligned}$$

5. Voor turbulentie wordt gebruikt
- σ_u : RMS waarde
 - $\hat{u}(p)$: extreme fluctuatie, met overschrijdingsinformatie tussen haakjes.
6. Vlaagwindsnelheid is dus per definitie

$$U = \bar{U} + u$$

Extremen van U hangen af van overschrijdingsniveaus voor $\bar{U}$ en u

Notatie

$$\hat{U}(T,p) = \bar{U}_{\max}(T) + \hat{U}(p)$$

ter vereenvoudiging wordt een verkorte notatie ingevoerd

$$\begin{aligned} \hat{U}_{\text{extr.}} & : = \text{ extreme vlagwindsnelheid} \\ & = \text{ extreme fluctuatie (1 x per uur)} \\ & + \text{ extreme uurgemiddelde (1 x per 50 jaar)} \end{aligned}$$

7. Informatie over de hoogte waarop de snelheid betrekking heeft wordt
- òf als index toegevoegd : $\bar{U}_H$
 - òf tussen haakjes toegevoegd : $\bar{U}(Z_1)$

al naar gelang dit het duidelijkste is.

Informatie tussen haakjes heeft derhalve betrekking op de hoogte òf op de kans van voorkomen. Uit de gebruikte notatie is het verschil echter zonder meer duidelijk; bijvoorbeeld $\bar{U}_H$ (1 x per jaar), of $\bar{U}_{\text{extr.}}(H)$.

APPENDIX B

REKENPROGRAMMA GUSBR

Het rekenprogramma GUSBR volgt de methodiek zoals in de paragrafen 3.1.1 en 3.3. uiteengezet om de door de rotor van een windturbine "gevoelde" (effectieve) windsnelheids- en windrichtingsfluctuaties te berekenen.

In de literatuur zijn vele (empirische) formules voor het "power" spectrum van de turbulentie snelheidsfluctuaties te vinden. Gekozen is voor het ESDU-spectrum (sterke wind, neutrale atmosfeer), omdat naast dit spectrum nog een coherentiefunctie gegeven wordt. Het ziet er als volgt uit (fig. B 1):

$$\frac{n S_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \tilde{n}_u}{(1 + 70,8 \tilde{n}_u^2)^{5/6}} \quad (B1)a$$

$$\text{waarin} \quad \tilde{n}_u = \frac{x_{L_u} n}{\bar{U}} \quad (B1)b$$

n - frequentie (s^{-1})

x_{L_u} - longitudinale lengteschaal (m)

$\bar{U}$ - gemiddelde windsnelheid (m/s)

Dit model is afgeleid uit de van Kármán spectrale vergelijkingen, algemeen geaccepteerd als de beste analytische representatie van isotrope turbulentie. De afwijking van isotrope turbulentie bij de bodem is in rekening gebracht door de variantie σ_u^2 en lengteschaal x_{L_u} te variëren met de hoogte $\tilde{z}$ en oppervlakteruwheid Z_o , omdat zij de intensiteit en grootte van wervels (eddies) typeren. Dit is als volgt gerealiseerd:

$$x_{L_u} = 25 \cdot \frac{\tilde{z}^{0.35}}{Z_o^{0.063}} \quad (B2)$$

$$\frac{\sigma_u}{\bar{U}} = \frac{F_u}{\ln \left(\frac{\tilde{Z}}{Z_o} \right)}$$

$$\text{waarin : } F_u = [0.867 + 0.556 \log \tilde{Z} - 0.246 (\log \tilde{Z})^2] \lambda \quad (\text{B3})b$$

$$\lambda = 1 \quad \text{voor } Z_o \leq 0.02$$

$$= 0.76/Z_o^{0.07} \quad \text{voor } 0.02 < Z_o \leq 1 \quad (\text{B3})c$$

$$= 0.76 \quad \text{voor } Z_o \geq 1$$

De co-coherentiefunctie kan beschouwd worden door een e-macht (fig.B 2):

$$\sqrt{\text{co-coherentie}} = \exp. \left(- \frac{r_{A_{uu}} \cdot n \cdot \Delta r}{\bar{U}} \right) \quad (\text{B4})a$$

, waarin:

$$r_{A_{uu}} = \left(3 + \frac{135 \cdot \Delta r^{1/3}}{r_{L_u}} \right) \mu \quad (\text{B4})b$$

$$\mu = 1.91 \left(\frac{\bar{U}}{15} \right)^{1/2} - 0.49 \frac{\bar{U}}{15} - 0.42 \quad (\text{B4})c$$

$$\Delta r = \Delta y \text{ of } \Delta Z \text{ of } \sqrt{\Delta y^2 + \Delta Z^2} \quad (\text{B4})d$$

$$r_{L_u} = \frac{\sqrt{(y_{L_u} \cdot \Delta y)^2 + (z_{L_u} \cdot \Delta Z)^2}}{\sqrt{\Delta y^2 + \Delta Z^2}} \quad (\text{B4})e$$

$$y_{L_u} = 10 \cdot \frac{\tilde{Z}^{0.038}}{Z_o^{0.068}} \quad (\text{B4})f$$

$$z_{L_u} = 6,3 \cdot \frac{\tilde{Z}^{0.45}}{Z_o^{0.081}} \quad (\text{B4})g$$

Uit de theorie blijkt dat het door de rotor gevoelde spectrum een lagere variantie heeft dan het vermogensspectrum. Dit is enerzijds het gevolg van de afnemende correlatie van de snelheidsfluctuaties met toenemende afstand tussen punten van het rotorvlak en anderzijds het gevolg van het gegeven dat de rotor relatief langzame snelheidsfluctuaties volgt, dus zijn toeren-tal of afgegeven vermogen aanpast. Het eerste punt kan blijkens vgl. (11) opgevat worden als een (low-pass) filtering van het vermogensspectrum.

$$F_{Hp} = \frac{1}{A} \int_{A_1} \int_{A_2} \sqrt{\text{co-coherentie}} \, dA_1 \, dA_2 \quad (B5)$$

Het tweede punt kan opgevat worden als een (high-pass) -filtering die een functie is van de regelkarakteristiek van de windturbine. Het eenvoudigste filter is een afkapfilter met afkapfrequentie n_{Hp} :

$$\begin{aligned} F_{Hp} &= 1 & n \geq n_{Hp} , \\ &= 0 & \text{elders.} \end{aligned} \quad (B6)$$

Het rekenprogramma gedeelte windsnelheidsfluctuaties is schematisch weer-gegeven in fig. B3. De invoerparameters zijn:

- $\bar{U}$ - gemiddelde windsnelheid (m/s)
- $\bar{Z}$ - ashoogte (m)
- Z_o - oppervlakteruwheid (m)
- D_{rotor} - rotordiameter (m)
- n_{Hp} - afkapfrequentie (Hz).

De eerste drie invoerparameters leggen het vermogensspectrum (vgl. B1) vast. D_{rotor} bepaalt de laagdoorlaatfiltering (vgl. B5) en n_{Hp} de hoogdoor-laafiltering (vgl. B6).

De invoer ziet er als volgt uit:

$$\sigma_u^2 \left(\frac{m^2}{s^2} \right) - \text{variantie van de snelheidsfluctuaties (vgl. 7)}$$

$$\sigma_{u,eff}^2 \left(\frac{m^2}{s^2} \right) - \text{variantie van de effectieve snelheidsfluctuaties (vgl. 12)}$$

$$N_{eff}(o) \, (s^{-1}) - \text{o-crossing rate (vgl. 16)}$$

$U (\alpha\%) (m/s)$ - snelheid die $\alpha\%$ van de tijd overschreden wordt
(uit Gaussische verdeling)

$\sigma_{\frac{du}{dt}, eff} (m/s^2)$ - standaard deviatie van de gradiënt van de snelheidsfluctuaties (vgl. 22)

$\frac{du}{dt} (\alpha\%) (m/s^2)$ - gradiënt die $\alpha\%$ van de tijd overschreden wordt

En in tabelvorm:

$$n S_u (n) = f(n) \quad \text{en} \quad S_{uu} (n) = f(n)$$

$$n S_{u, eff} (n) = f(n).$$

$$n S_{\frac{du}{dt}, eff} (n) = f(n)$$

Ter bepaling van de effectieve windrichtingsfluctuaties wordt gebruikt gemaakt van het ESDU spectrum voor v-component (fig. B1):

$$\frac{n S_v (n)}{\sigma_v^2} = \frac{4 \tilde{n}_v (1 + 755.2 \tilde{n}_v^2)}{(1 + 283.2 \tilde{n}_v^2)^{11/6}} \quad (B7)a$$

$$\text{waarin} \quad \tilde{n}_v = x_{L_v} n / \bar{u}$$

$$x_{L_v} = 5.1 \frac{\tilde{z}^{0.048}}{z_o^{0.086}} \quad (B8)$$

$$\frac{\sigma_v}{\bar{u}} = \frac{F_v}{\ln (z/z_o)} \quad (B9)a$$

$$\text{met } F_v = 0,655 + 0,201 \log \tilde{z} - 0,095 (\log \tilde{z})^2 \quad (B9)b$$

Co-coherentie (fig. B4)

$$\sqrt{\text{co-coherentie}} = \exp. \left(- \frac{r_{A_{vv}} \cdot n \cdot \Delta r}{\bar{u}} \right) \quad (B10)a$$

$$\text{waarin : } r_{A_{vv}} = \left(\frac{135 \cdot \Delta r}{r_{L_v}} \right) \mu \quad (\text{B10})a$$

$$\mu = 1.91 (\bar{U}/15)^{\frac{1}{2}} - 0.49 (\bar{U}/15) - 0.42 \quad (\text{B10})c$$

$$\Delta r = \Delta y \text{ of } \Delta Z \text{ of } \sqrt{\Delta y^2 + \Delta Z^2} \quad (\text{B10})d$$

$$r_{L_v} = \frac{\sqrt{(y_{L_v} \Delta y)^2 + (z_{L_v} \Delta Z)^2}}{\sqrt{\Delta y^2 + \Delta Z^2}} \quad (\text{B10})e$$

$$y_{L_v} = 2 z_{L_v} \quad (\text{B10})f$$

$$z_{L_v} = 3,1 \frac{\tilde{z}_m^{0.55}}{z_o^{0.099}} \quad \tilde{z}_m = z + \frac{\Delta Z}{2}$$

$$\text{en dus : } \frac{r}{L_v} = \frac{z}{L_v} \frac{\sqrt{(2\Delta y)^2 + \Delta Z^2}}{\sqrt{\Delta y^2 + \Delta Z^2}} \quad (\text{B10})h$$

De co-coherentie (10) wordt door ESDU slechts gegeven voor verticale separatie. Zoals (B10)d toont gebruikt het rekenprogramma dezelfde co-coherentiefunctie voor laterale separaties. Hoe groot de hiermee geïntroduceerde fout in de berekening van $\sigma_{\theta, \text{eff}}$ is, is onbekend.

De hoog- en laagdoorlaatfilterfuncties F_{Hp} en F_{Lp} worden weergegeven door de vergelijkingen (B5) en B6).

Het programma, gedeelte windrichtingsfluctuaties is weergegeven in figuur B5. De invoergegevens zijn dezelfde als voor de bepaling van de windsnelheidsfluctuaties.

De invoer :	σ_v	(ESDU)	[m/s]
	σ_v	(berekend)	[m/s]
	$\sigma_{v, \text{eff}}$		[m/s]
	σ_θ		[°]
	$\sigma_{\theta, \text{eff}}$		[°]
	$\sigma_{\frac{d\theta}{dt}, \text{eff}}$		[°/s]

en tabellen $S_{\theta}(n)$, $n S_{\theta}(n)$, $n S_{\theta,eff}(n)$ versus n .

In figuur B6 is $n S_v(n)$ en $n S_{v,eff}(n)$ versus n geschetst (de piek is naar rechts verschoven, hetgeen te verwachten was daar x_{L_u} veel groter is dan x_{L_v} ; $x_{L_u} n_{u,peik} = x_{L_v} n_{v,peik} \rightarrow x_{L_u}/x_{L_v} \cong \frac{0,2}{0,02} \cong 10$).

Praktische uitvoeringberekeningen

- Bepaling van F_{Lp} . (vgl.B5)

Vergelijking (B5) is gediscretiseerd volgens:

$$\frac{1}{A^2} \int_{A_1} \int_{A_2} \sqrt{\text{co-coherentie}} dA_1 dA_2 \cong \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^N \sqrt{\text{co-coh.}} \quad (\text{B11})$$

Hiervoor is het rotorvlak ingedeeld in 44 elementen met grootte evenredig met D_{rotor} (fig. B7)

- Bepaling van de spectrumintegralen.

Integralen van spectra in de vorm $\int_0^{\infty} S(n) dn$ convergeren niet. Daarom zijn de grenzen vervangen:

$$\int_0^{\infty} S(n) dn \cong \int_{n_1}^{n_2} n S(n) d(\ln n) \quad (\text{B12})a$$

$$\text{met } n_1 = \frac{\bar{U}}{x_{L_u}} * 5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{B12})b$$

$$n_2 = \frac{\bar{U}}{x_{L_u}} * 15 \quad (\text{B12})c$$

$$\log \frac{n_{i+1}}{n_i} \leq 0.02 \quad (\text{B12})d$$

n_1 en n_2 zijn zo gekozen dat bijvoorbeeld berekening van σ_u met vergelijking (B3) vrijwel hetzelfde resultaat oplevert als met de vergelijkingen (B1) + (B12).

- Een listing van het rekenprogramma GUSBR is bijgevoegd.

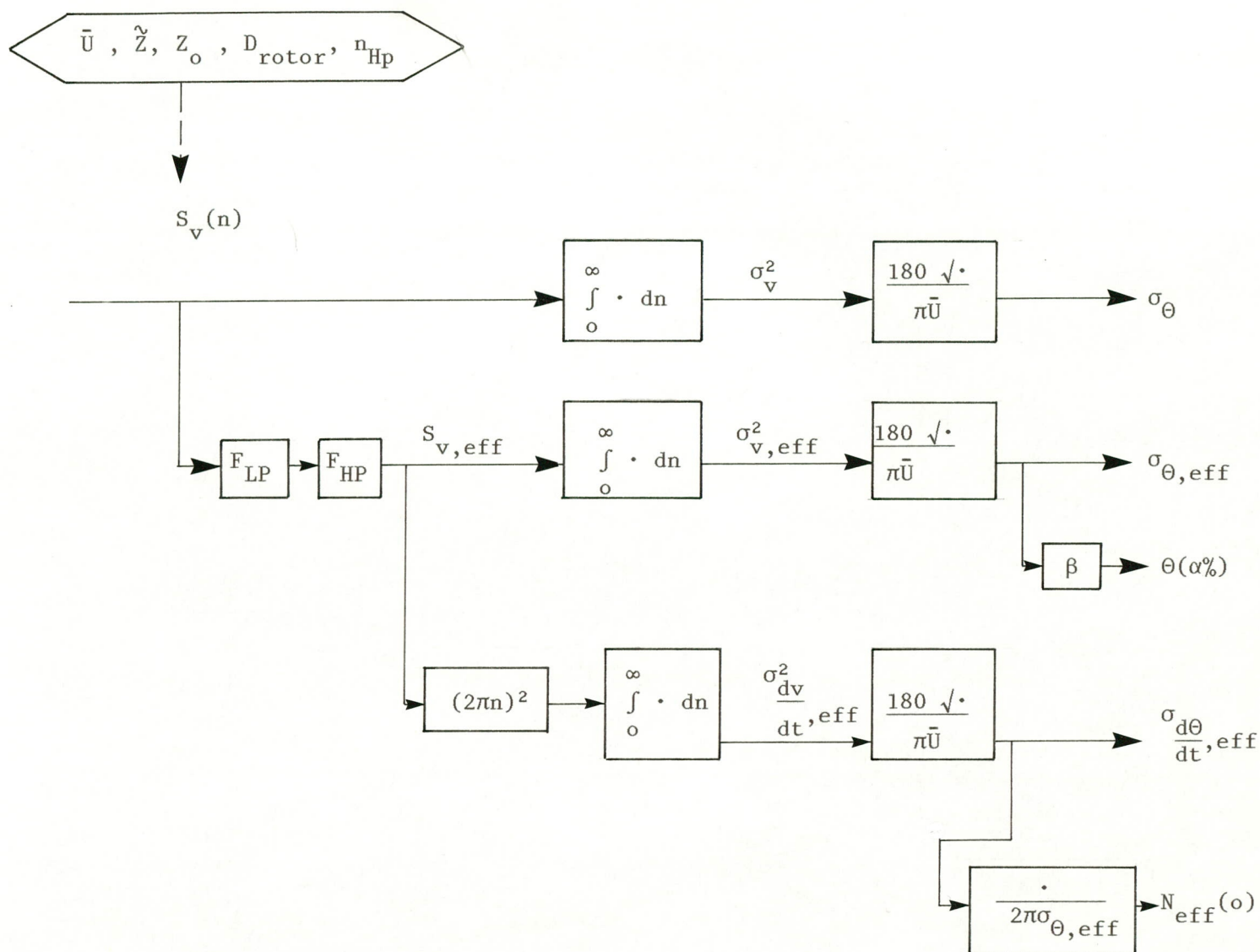
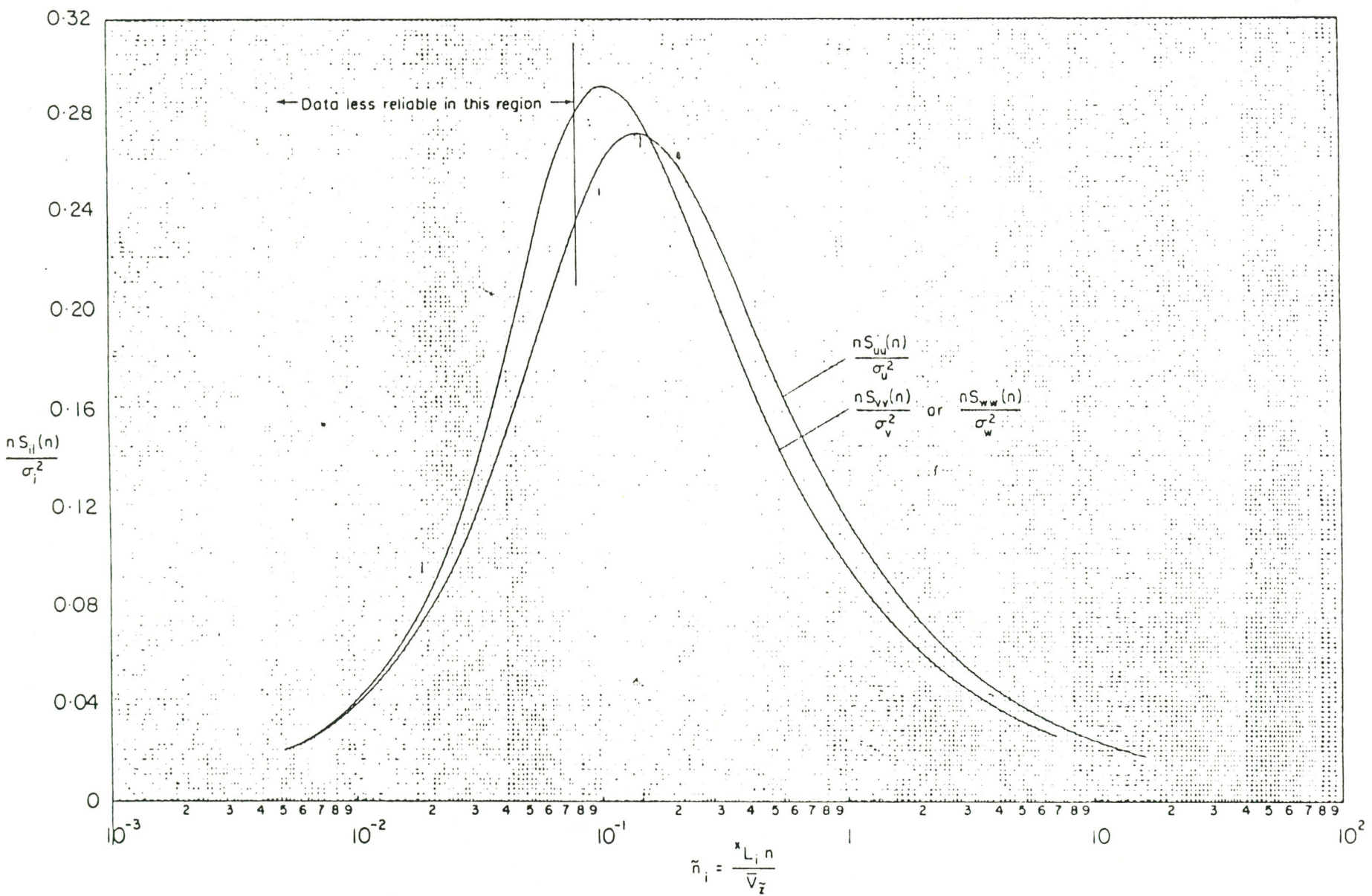
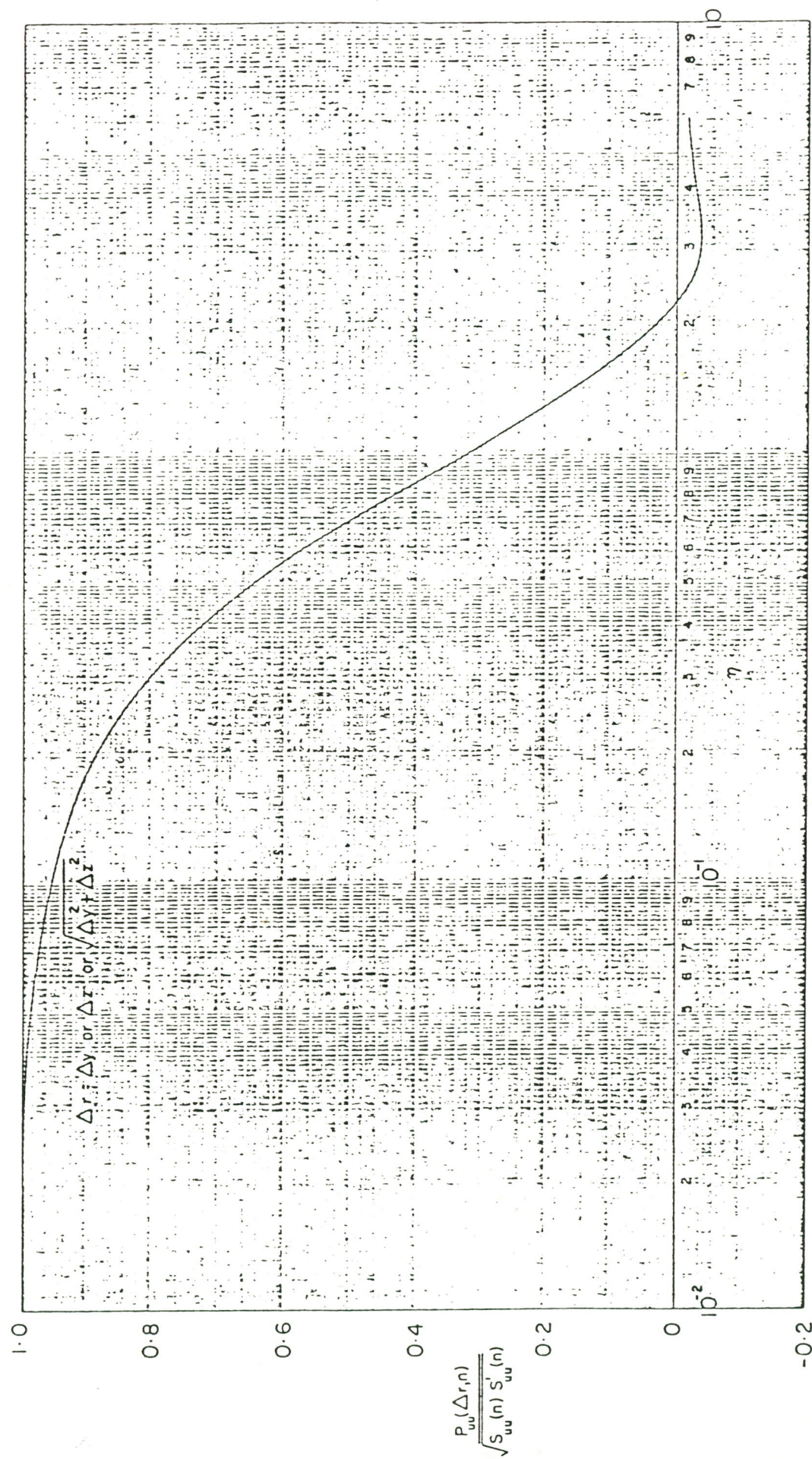


Fig. B5 Schematische weergave rekenprogramma GUSBR, gedeelte windrichtingsfluctuaties.





√CO-coherence function for u-components with transverse separations

MT-TNO
11344
Fig. B2

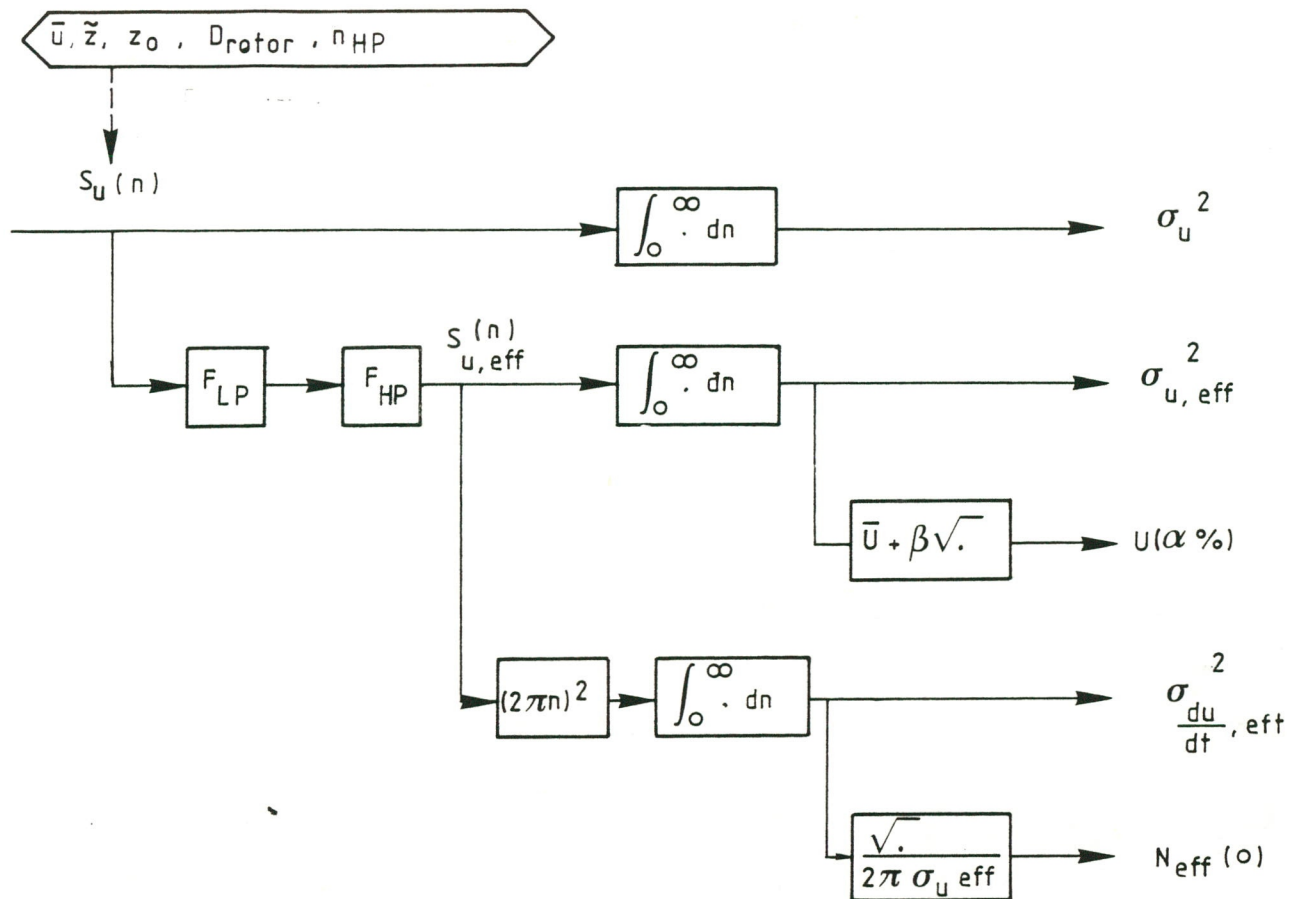


Fig.B3 Schematische weergave rekenprogramma (GUSBR), gedeelte windsnelheidsfluctuaties

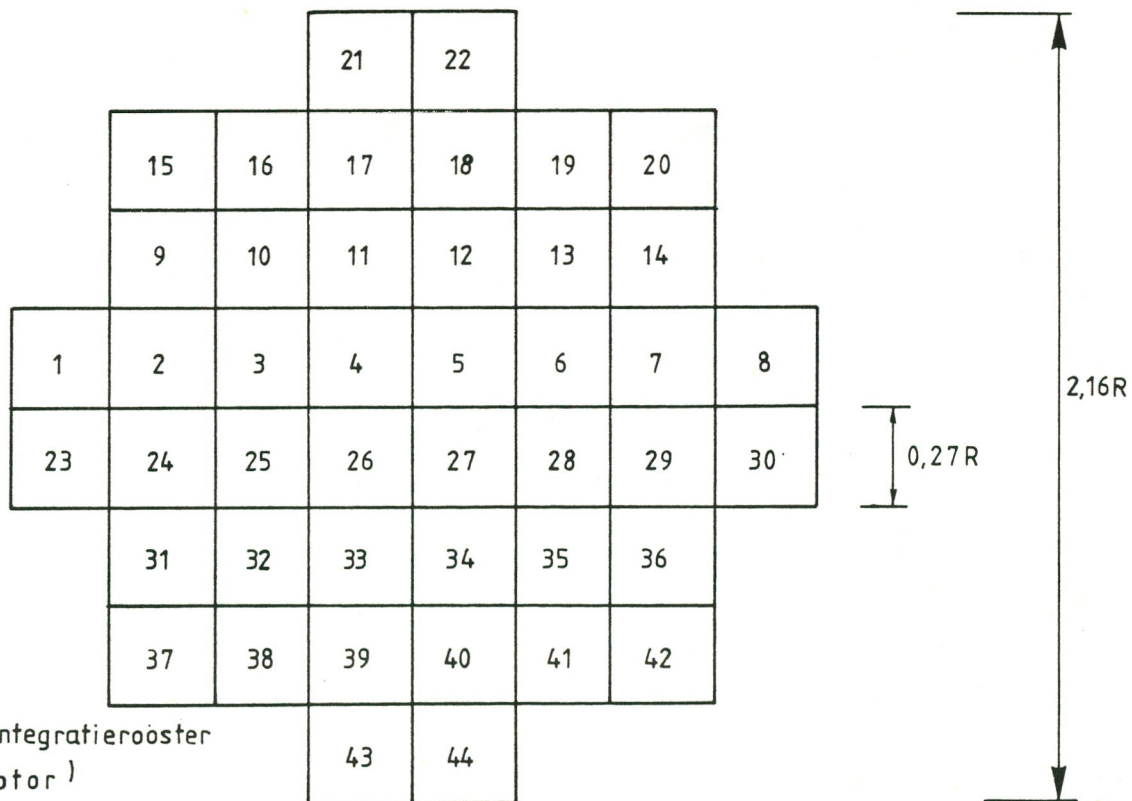
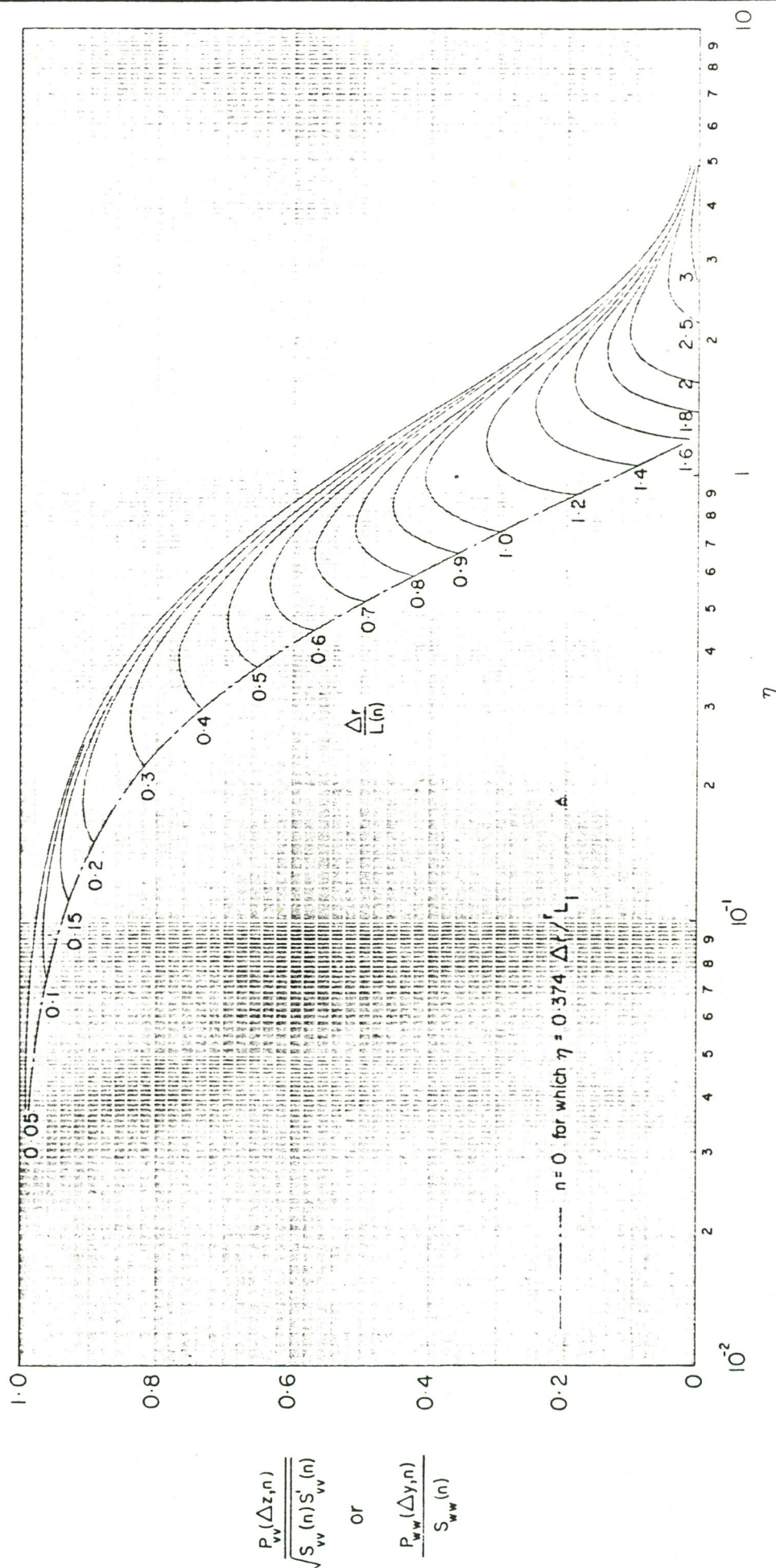
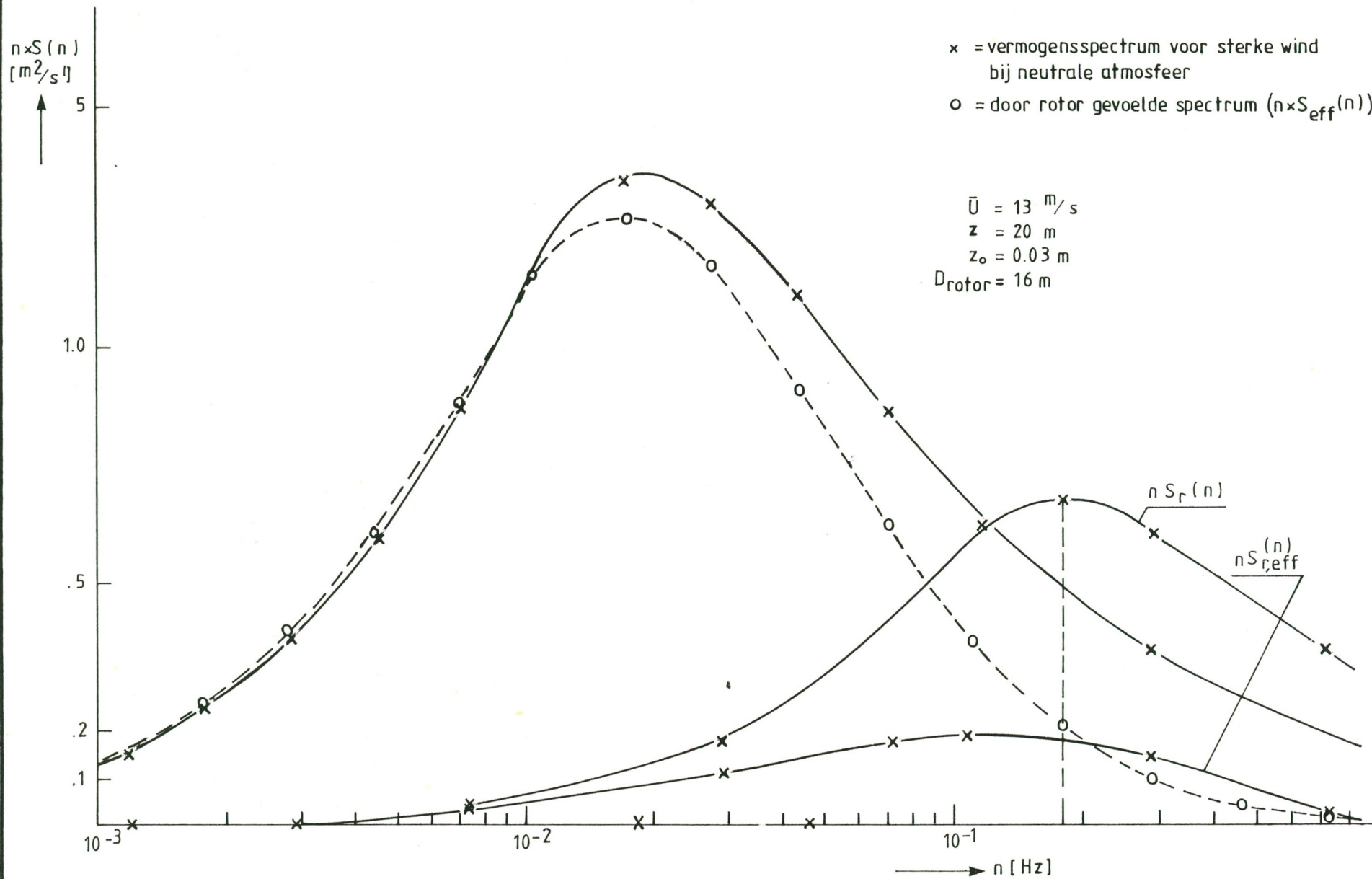


Fig.B7 Rotorvlak integratierooster
($R=1/2 D_{\text{rotor}}$)

$\sqrt{\text{CO-coherence function for } v \text{ and } w \text{ components with vertical and lateral separations respectively}}$

MT — TNO
11344
Fig.B4





```

1  FTH
2  $EMA(W,10)
3  ****
4  *
5  *          T.B.V. GUST-BEREKENINGEN MOLENS (11344)
6  *
7  *          LEO BEUGELING
8  *          STELLER : J.B.A. VYGE
9  *
10 ****
11 *
12 *
13 PROGRAM GUSBR ( ) , <840823,1202>
14 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
15 #          FLP(250) , FHP(250) , SHU1(250) , SHUE(250) , DF(250) ,
16 #          TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
17 #          RLV(44,44) , SHV1(250) , SHVE(250)
18 DIMENSION ITIM(15)
19 ALOK = .02          ! 10log(K)
20 *
21 D = 16.             !
22 AH = 20.             !
23 U = 13.             ! START WAARDEN
24 Z0 = .03            !
25 SEC= 0.             !
26 IGR= 3              !
27 *
28 CALL RSET
29
30 5 CALL FTIME (ITIM)
31 *
32 LOUT = 0
33 *
34 CALL INFOR (D,AH,Z0,U,SEC,IGR,)
35 *
36 CALL DISTA (D)
37 *
38 IF (IGR .EQ. 0) THEN
39 *
40 CALL PRINT (LOUT,0,0)
41 *
42 CALL CNSTU (U,AH,Z0,XLU,YLU,ZLU,SIGU)
43 *
44 CALL FREKW (5.E-3,15.,XLU,ALOK,U,NFR)
45 *
46 CALL HIGPA (NFR,SEC)
47 *
48 CALL SPCTU (SIGU,U,XLU,NFR,SOMU)
49 *
50 CALL LMPAU (U,NFR)

```

```

51 *
52     CALL SPUEF (NFR,SUEF)
53 *
54     CALL CROSU (NFR,SUEF,ZERU,SDUEF)
55 *
56     CALL OUTPU (LOUT,D,AH,Z0,U,NFR,SUEF,ZERU,
57 #           SOMU,ALOK,ITIM,SDUEF,SIGU)
58 *
59     CALL TABLU (LOUT,NFR)
60 ELSE
61 *
62     CALL PRINT (LOUT,0,0)
63 *
64     CALL CNSTV (U,AH,Z0,XLV,SIGV)
65 *
66     CALL FREKM (5.E-3,10.,XLV,ALOK,U,NFR)
67 *
68     CALL HIGPA (NFR,SEC)
69 *
70     CALL SPCTV (SIGV,U,XLV,NFR,SOMV)
71 *
72     CALL LMPAV (U,NFR)
73 *
74     CALL SPVEF (NFR,SVEF)
75 *
76     CALL CROSV (NFR,SVEF,ZERV,SDVEF)
77 *
78     CALL OUTPV (LOUT,D,AH,Z0,U,NFR,SVEF,ZERV,
79 #           SOMV,ALOK,ITIM,SDVEF,SIGV)
80 *
81     CALL TABLV (LOUT,U,NFR)
82 ENDIF
83 WRITE (LOUT, '( "1" ) ')
84 CALL PRINT (LOUT)
85 GOTO 5
86 20 CONTINUE
87 *
88 END
89 *
90 * INPUT INFORMATION
91 *
92 SUBROUTINE INFOR (D,AH,Z0,U,SEC,IGR)
93 CALL CURSP (0,0,3)
94 CALL DPLIN (02,24,17HGUST BEREKENINGEN,17)
95 IF(IGR .NE. 3) THEN
96     CALL DPVR1 (04,24,8HSTOPPEN ,8,IST)
97     IF(IST .EQ. 0) THEN
98         CALL CURSP (0,0,3)
99         CALL DPLIN (10,25,11H TOT ZIENS , -11)
100        CALL CURSP (19,0,0)

```



```

101      CALL EXEC (6)
102      ENDIF
103  ENDIF
104      CALL DPVR1 (04,24,13H U-COMPONENT ,13,IGR)
105      IF(IGR .EQ. 1) THEN
106          CALL DPLIN (03,45,13H V-COMPONENT , -13)
107      ELSE
108          CALL DPLIN (03,45,13H U-COMPONENT , -13)
109      ENDIF
110      CALL DPLIN (05,11,18HMOLEN DIAMETER (M),18)
111      CALL ACFLT (05,30,D,-8)
112      CALL DPLIN (07,16,14HAS HOOGE (M) ,13)
113      CALL ACFLT (07,30,AH,-8)
114      CALL DPLIN (09,15,14HSNELHEID (M/S),14)
115      CALL ACFLT (09,30,U,-8)
116      CALL DPLIN (11,23,06HZ0 (M),06)
117      CALL ACFLT (11,30,Z0,-8)
118      CALL DPLIN (13,03,26HHIGH-PASS FILTER TYD (SEC),26)
119      CALL ACFLT (13,30,SEC,-8)
120      CALL DPLIN (17,28,15H WE REKENEN NU , -15)
121      CALL CURSP (19,0,0)
122      RETURN
123      END
124  *
125  * CALCULATE THE FREQUENCY STEPS AND DELTA FR.
126  *
127  $EMA(W,10)
128      SUBROUTINE FREKW (BE,EN,XLX,ALOK,U,NFR)
129      COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
130      #          FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
131      #          TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
132      #          RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
133  *
134      VERH      = 10.**ALOK
135      BEGIN      = U*BE / XLX
136      EIND       = U*EN / XLX
137      FREQ(1)    = BEGIN
138      NFR        = 1
139      DO 10 K=2,250
140          FREQ(K) = FREQ(K-1)*VERH
141          NFR      = NFR+1
142          IF(FREQ(K) .GE. EIND) GOTO 15
143          IF(NFR      .GE. 250 ) GOTO 15
144      10 CONTINUE
145      15 DF(1)   = ( FREQ(2)-FREQ(1) ) / 2.
146      DF(NFR)   = ( FREQ(NFR)-FREQ(NFR-1) ) / 2.
147      DO 20 K=2,NFR-1
148          DF(K)  = ( FREQ(K+1)-FREQ(K-1) ) / 2.
149      20 CONTINUE
150      RETURN

```

```

151      END
152      *
153      *      POSITIONS OF THE 44 DISK ELEMENTS (LOOKING DOWNSTREAM)
154      *
155      *      -----
156      *              I 21 I 22 I
157      *              I      I      I
158      *      -----
159      *      I 15 I 16 I 17 I 18 I 19 I 20 I
160      *      I      I      I      I      I      I      I
161      *      -----
162      *      I 9 I 10 I 11 I 12 I 13 I 14 I
163      *      I      I      I      I      I      I      I
164      *      -----
165      *      I 1 I 2 I 3 I 4 I 5 I 6 I 7 I 8 I
166      *      I      I      I      I      I      I      I      I
167      *      -----
168      *      I 23 I 24 I 25 I 26 I 27 I 28 I 29 I 30 I
169      *      I      I      I      I      I      I      I      I
170      *      -----
171      *      I 31 I 32 I 33 I 34 I 35 I 36 I
172      *      I      I      I      I      I      I      I
173      *      -----
174      *      I 37 I 38 I 39 I 40 I 41 I 42 I
175      *      I      I      I      I      I      I      I
176      *      -----
177      *              I 43 I 44 I
178      *              I      I      I
179      *      -----
180      *
181      *
182      *
183      *
184      *
185      * REAL COORDINATES OF THE 44 MASHES (INDEX J) OF THE GRID
186      * ARE SUBSTITUED IN THE ARRAY CO
187      * CENTRE OF THE MILL 0.,0.
188      * CO(1,J) ORIENTATION Y
189      * CO(2,J) ORIENTATION Z
190      *
191      $EMA(W,10)
192      SUBROUTINE DISTA (D)
193      COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
194      #          FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
195      #          TEN(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
196      #          RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
197      *
198      T(R,S)=SQRT(R*R+S*S)
199      DF=.27/2.
200      AA=0.5*DF

```



```

201      BB=AA+DF
202      CC=BB+DF
203      DD=CC+DF
204  *
205  *
206  * NORMALISED COORD OF THE 44 MASHES
207      DO 10 J=1,8
208          YY=DD-(J-1)*DF
209          CO(1,J) =YY
210          CO(2,J) =AA
211          CO(1,J+22)=YY
212          CO(2,J+22)=-AA
213  10  CONTINUE
214      DO 20 J=9,14
215          YY=CC-(J-9)*DF
216          CO(1,J) =YY
217          CO(2,J) =BB
218          CO(1,J+22)=YY
219          CO(2,J+22)=-BB
220  20  CONTINUE
221      DO 30 J=15,20
222          YY=CC-(J-15)*DF
223          CO(1,J) =YY
224          CO(2,J) =CC
225          CO(1,J+22)=YY
226          CO(2,J+22)=-CC
227  30  CONTINUE
228      DO 40 J=21,22
229          YY=AA-(J-21)*DF
230          CO(1,J) =YY
231          CO(2,J) =DD
232          CO(1,J+22)=YY
233          CO(2,J+22)=-DD
234  40  CONTINUE
235  * TAKE NOW THE DIAM.IN ACCOUNT OF THE MILL
236      DO 50 J=1,44
237          CO(1,J)=CO(1,J)*D
238          CO(2,J)=CO(2,J)*D
239  50  CONTINUE
240      RETURN
241      END
242  *
243  * CALCULATE XLU,YLU,ZLU AND SIGU FOR THE U-COMPONENT
244  * CALCULATE ALSO THE 'CONSTANTS' DR AND RLU
245  * BOTH WITH INDEX I AND J
246  *
247  $EMA(W,10)
248      SUBROUTINE CNSTU (U,AH,Z0,XLU,YLU,ZLU,SIGU)
249      COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
250      #          FLP(250) , FHP(250) , SHU1(250) , SHUE(250) , DF(250) ,

```



```

251 #      TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
252 #      RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
253 *
254 T(R,S) = SQRT( R*R + S*S )
255 XLU = 25.*AH**,.35 / Z0**,.063
256 YLU = 10.*AH**,.38 / Z0**,.068
257 ZLU = 6.3*AH**,.45 / Z0**,.081
258 DO 10 I=1,44
259     DO 10 J=1,1                                ! VAN MEGE DE SYMM.
260         DY      = CO(1,J) - CO(1,I)
261         DZ      = CO(2,J) - CO(2,I)
262         DR(I,J) = T(DY,DZ)
263         RLU(I,J)= T(YLU*DY,ZLU*DZ) / DR(I,J)
264 10 CONTINUE
265 IF(Z0 .LE. .02) THEN
266     ALAM = 1.0
267 ELSE
268     IF(Z0 .GE. 1.) THEN
269         ALAM = .76
270     ELSE
271         ALAM = .76 / Z0**,.07
272     ENDIF
273 ENDIF
274 P   = ALAM*U / ALOG( AH/Z0 )
275 Q   = ALOGT( AH )
276 SIGU = P*(.867+.556*Q-.246*Q*Q)
277 RETURN
278 END
279 *
280 * CALCULATE THE UNFILTERED SPECTRUM FOR THE U-COMPONENT
281 *
282 #EMA(W,10)
283 SUBROUTINE SPCTU (SIGU,U,XLU,NFR,SOMU)
284 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
285 #      FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
286 #      TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
287 #      RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
288 *
289 P      = 4.*XLU*SIGU**2/U
290 Q      = XLU/U
291 E      = 5./6.
292 CALL VMNOV(1.,0,TEM,1,NFR)
293 CALL WSMY (Q,FREQ,1,SNU1,1,NFR)
294 CALL WMPY (SNU1,1,SNU1,1,SNU1,1,NFR)
295 CALL WPIV (70.8,SNU1,1,TEM,1,SNU1,1,NFR)
296 DO 10 K=1,NFR
297     SNU1(K) = SNU1(K)**E
298 10 CONTINUE
299 CALL WSDV (P,SNU1,1,SNU1,1,NFR)
300 CALL WDOT (SOMU,SNU1,1,DF,1,NFR)

```

```

301         RETURN
302         END
303     *
304     * LOW PASS FILTER CALCULATION BY MEANS OF 2 INTEGRALS FOR THE U-COMPONENT
305     *
306     $EMAC(W,10)
307         SUBROUTINE LUPAU (U,NFR)
308         COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
309         #         FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
310         #         TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
311         #         RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
312     *
313         AMU = 1.91*(U/15.)**.5-.49*U/15.-.42
314         Q = AMU / U
315         DO 5 I=1,44
316             DO 5 J=1,I
317                 DRR = DR(I,J)
318                 RLU(I,J)=(3.+(135.*DRR**.3333 / RLU(I,J) ) ) *DRR * Q
319     5     CONTINUE
320         DO 30 K=1,NFR
321             P = FREQ(K)
322             SOMI = 0.0
323             DO 20 I=1,44
324                 SOMJ = 0.0
325                 DO 10 J=1,I
326                     IF(I.EQ. J) THEN
327                         SOMJ = SOMJ + 1.
328                     ELSE
329                         ARG = P * RLU(I,J)
330                         SOMJ = SOMJ + EXP( -ARG ) * 2.
331                     ENDIF
332     10     CONTINUE
333             SOMI = SOMI + SOMJ
334     20     CONTINUE
335             FLP(K) = SOMI / 1936
336     30     CONTINUE
337             RETURN
338             END
339     *
340     * HIGH-PASS FILTER
341     *
342     $EMAC(W,10)
343         SUBROUTINE HIGPA (NFR,SEC)
344         COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
345         #         FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
346         #         TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
347         #         RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
348     *
349         IF(SEC .GT. 0.) THEN
350             FREQP = 1./SEC

```



```

351 ELSE
352     FREQP = 0.0
353 ENDIF
354 DO 10 K=1,NFR
355     IF(FREQ(K) .GT. FREQP) THEN
356         FHP(K) = 1.
357     ELSE
358         FHP(K) = 0.
359     ENDIF
360 10 CONTINUE
361 RETURN
362 END

363 *
364 * EFF. SPECTRUM AND EFF. RMS    U-COMPONENT
365 *
366 $EMA(W,10)
367 SUBROUTINE SPUF (NFR,SUEF)
368 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
369 #         FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
370 #         TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
371 #         RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
372 *
373 CALL WMPY (SNU1,1,FLP,1,TEM,1,NFR)
374 CALL WMPY (TEM,1,FHP,1,SNUE,1,NFR)
375 CALL WDOT (S2,SNUE,1,DF,1,NFR)
376 SUEF = SQRT(S2)
377 RETURN
378 END

379 *
380 * POS. ZERO CROSSING RATE EN SIGMA du/dt eff
381 *
382 $EMA(W,10)
383 SUBROUTINE CROSU (NFR,SUEF,ZERU,SDUEF)
384 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
385 #         FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
386 #         TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
387 #         RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
388 *
389 PI = 3.14519
390 CALL WMPY (FREQ,1,FREQ,1,TEM,1,NFR)
391 CALL WMPY (TEM,1,SNUE,1,TEM,1,NFR)
392 CALL WDOT (S2,TEM,1,DF,1,NFR)
393 SDUEF= SQRT( S2 ) * 2. * PI
394 ZERU = SDUEF / (2. * PI * SUEF)
395 RETURN
396 END

397 *
398 * OUTPUT U-COMPONENT
399 *
400 $EMA(W,10)

```



```

401 SUBROUTINE OUTPU (LOUT,D,AH,Z0,U,NFR,SUEF,ZERU,
402 # SOMU,ALOK,ITIM,SDUEF,SIGU)
403 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
404 # FLP(250) , FHP(250) , SHU1(250) , SHUE(250) , DF(250) ,
405 # TEN(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
406 # RLV(44,44) , SHV1(250) , SHVE(250)
407 DIMENSION ITIM(15)
408 *
409 WSOM = SORT(SOMU)
410 WRITE (LOUT, '( /,15X,"GUST BELASTING VOOR NEUTRALE STABILITEIT ;"
411 # ,40X,15A2)' ) ITIM
412 WRITE (LOUT, '( " MOLEN DIAMETER ",F8.3," M")' ) D
413 WRITE (LOUT, '( " AS-HOOGTE ",F8.3," m")' ) AH
414 WRITE (LOUT, '( " SNELHEID ",F8.3," M/S")' ) U
415 WRITE (LOUT, '( " Z0 ",F8.3," M")' ) Z0
416 WRITE (LOUT, '( /," n",10X,"Su(n)",10X,"Flp(n)",9X,"Fhp(n)"' )
417 DO 10 K=1,NFR,10
418 WRITE (LOUT, '(F8.4,3(3X,1PE12.5))' ) FREQ(K),SHU1(K),FLP(K),
419 # FHP(K)
420 10 CONTINUE
421 WRITE (LOUT, '( /," Sigma U (esdu) ",1PE12.5," M/S")' )
422 # SIGU
423 WRITE (LOUT, '( " Sigma U (berekend) ",1PE12.5," M/S")' )
424 # WSOM
425 WRITE (LOUT, '( " Sigma U eff ",1PE12.5," M/S")' )
426 # SUEF
427 WRITE (LOUT, '( " Sigma du/dt eff ",1PE12.5," M/S2")' )
428 # SDUEF
429 WRITE (LOUT, '( " N eff (0) ",1PE12.5," 1/S")' )
430 # ZERU
431 WRITE (LOUT, '( " FREQ: ONDERGRENS ",F8.4," HZ")' )
432 # FREQ(1)
433 WRITE (LOUT, '( " BOVENGRENS ",F8.4," HZ")' )
434 # FREQ(NFR)
435 WRITE (LOUT, '( " VERH: 10log(K) ",F8.4)' ) ALOK
436 WRITE (LOUT, '( " NUMBER OF FREQ. STEPS",17)' ) NFR
437 UM = U+1.28*SUEF
438 WRITE (LOUT, '( " Umax(10%) ",F8.4," M/S")' ) UM
439 UM = U+2.32*SUEF
440 WRITE (LOUT, '( " Umax( 1%) ",F8.4," M/S")' ) UM
441 UM = U+3.1 *SUEF
442 WRITE (LOUT, '( " Umax(.1%) ",F8.4," M/S")' ) UM
443 UM = 1.28 * SDUEF
444 WRITE (LOUT, '( " du/dt max(10%) ",F8.4," M/S2")' ) UM
445 UM = 2.32 * SDUEF
446 WRITE (LOUT, '( " du/dt max( 1%) ",F8.4," M/S2")' ) UM
447 UM = 3.1 * SDUEF
448 WRITE (LOUT, '( " du/dt max(.1%) ",F8.4," M/S2")' ) UM
449 RETURN
450 END

```



```

451 *
452 * SPECTRA U-COMPONENT
453 *
454 $EMA(W,10)
455 SUBROUTINE TABLU (LOUT,NFR)
456 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
457 # FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
458 # TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
459 # RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
460 *
461 PI = 3.141519
462 WRITE (LOUT, '( /, " SPECTRUM U-COMPONENT ;", 2/,
463 # , 5X, "n", 9X, "nSu(n)", 9X, "nSef(n)", 7X, "nSdeff(n)" )' )
464 DO 10 K=1,NFR,10
465 T1 = FREQ(K)*SNU1(K)
466 T2 = FREQ(K)*SNUE(K)
467 T3 = (2.*PI*FREQ(K)) **2, *T2
468 WRITE (LOUT, '(F8.4,3(1PE15.5))' ) FREQ(K),T1,T2,T3
469 10 CONTINUE
470 RETURN
471 END
472 *
473 *
474 * FOR THE V-COMPONENT
475 * CALCULATE XLV
476 * CALCULATE ALSO THE 'CONSTANTS' RLV,ZLV, YLV
477 * ALL WITH INDEX I AND J
478 *
479 $EMA(W,10)
480 SUBROUTINE CNSTV (U,AH,Z0,XLV,SIGV)
481 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
482 # FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
483 # TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
484 # RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
485 *
486 T(R,S) = SQRT( R*R + S*S )
487 XLV = 5.1*AH**.048 / Z0**.086
488 DO 10 I=1,44
489 DO 10 J=1,I ! VAN WEGE DE SYMM.
490 DY = CO(1,J) - CO(1,I)
491 DZ = CO(2,J) - CO(2,I)
492 ZM = CO(2,J) + AH + DZ / (CO(2,J) + AH)
493 ZLV(I,J)= 3.1*ZM**.55 / Z0**.099
494 YLV(I,J)= 2. * ZLV(I,J)
495 RLV(I,J)= T(YLV*DY,ZLV*DZ) / DR(I,J)
496 10 CONTINUE
497 P = U / ALOG( AH/Z0 )
498 Q = ALOGT( AH )
499 SIGV = P*(.655+.201*Q-.095*Q*Q)
500 RETURN

```



```

501      END
502      *
503      * CALCULATE THE UNFILTERED SPECTRUM FOR THE V-COMPONENT
504      *
505      $EMA(W,10)
506      SUBROUTINE SPCTV (SIGV,U,XLV,NFR,SOMV)
507      COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLV(44,44) , FREQ(250) ,
508      #          FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
509      #          TEN(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
510      #          RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
511      *
512      Q      = XLV/U
513      Q2     = Q*Q*755.2
514      Q3     = Q*Q*283.2
515      P      = 4*SIGV**2*Q
516      E      = 11.76
517      CALL WNPY (FREQ,1,FREQ,1,TEN,1,NFR)
518      DO 10 K=1,NFR
519          FRE2 = TEN(K)
520          SNV1(K) = P*(1.+Q2*FRE2) / (1.+Q3*FRE2)**E
521      10 CONTINUE
522      CALL MDOT (SONV,SNV1,1,DF,1,NFR)
523      RETURN
524      END
525      *
526      * LOW PASS FILTER CALCULATION BY MEANS OF 2 INTEGRALS FOR THE V-COMPONENT
527      *
528      $EMA(W,10)
529      SUBROUTINE LMPAV (U,NFR)
530      COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLV(44,44) , FREQ(250) ,
531      #          FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
532      #          TEN(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
533      #          RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
534      *
535      AMU = 1.91*(U/15.)**.5-.49*U/15.-.42
536      Q    = AMU / U
537      DO 5 I=1,44
538          DO 5 J=1,I
539              DRR = DR(I,J)
540              RLV(I,J) = 135.*DRR / RLV(I,J) * DRR * Q
541      5 CONTINUE
542      DO 30 K=1,NFR
543          P      = FREQ(K)
544          SOMI   = 0.0
545          DO 20 I=1,44
546              SOMJ = 0.0
547              DO 10 J=1,I
548                  IF(I .EQ. J) THEN
549                      SOMJ = SOMJ + 1.
550                  ELSE

```



```

551         ARG = P * RLV(I,J)
552         SOMJ = SOMJ + EXP( -ARG ) * 2.    ! *2 OM DE SYMMETRIE
553     ENDIF
554 10     CONTINUE
555         SOMI = SOMI + SOMJ
556 20     CONTINUE
557         FLP(K) = SOMI / 1936          ! = 44**2
558 30     CONTINUE
559     RETURN
560     END
561 *
562 * EFF. SPECTRUM AND EFF. RMS    V-COMPONENT
563 *
564 $EMA(W,10)
565     SUBROUTINE SPVEF (NFR,SVEF)
566     COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
567     #         FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
568     #         TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
569     #         RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
570 *
571     CALL WMPY (SNV1,1,FLP,1,TEM,1,NFR)
572     CALL WMPY (TEM,1,FHP,1,SNVE,1,NFR)
573     CALL WDOT (S2,SNVE,1,DF,1,NFR)
574     SVEF = SQRT(S2)
575     RETURN
576     END
577 *
578 * POS. ZERO CROSSING RATE EN SIGMA dv/dt eff
579 *
580 $EMA(W,10)
581     SUBROUTINE CROSV (NFR,SVEF,ZERV,SDVEF)
582     COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
583     #         FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
584     #         TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
585     #         RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
586 *
587     PI = 3.14519
588     CALL WMPY (FREQ,1,FREQ,1,TEM,1,NFR)
589     CALL WMPY (TEM,1,SNVE,1,TEM,1,NFR)
590     CALL WDOT (S2,TEM,1,DF,1,NFR)
591     SDVEF= SQRT( S2 ) * 2. * PI
592     ZERV = SDVEF / (2. * PI * SVEF)
593     RETURN
594     END
595 *
596 *
597 * OUTPUT V-COMPONENT
598 *
599 $EMA(W,10)
600     SUBROUTINE OUTPV (LOUT,D,AH,ZO,U,NFR,SVEF,ZERV,

```



```

601 # SOMV,ALOK,ITIM,SDVEF,SIGV)
602 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
603 # FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
604 # TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
605 # RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
606 DIMENSION ITIM(15)
607 *
608 RA = 180./3.14159
609 WSOM = SQRT(SOMV)
610 WRITE (LOUT,'( /,15X,"WINDRICHTINGSFLUCTUATIES VOOR NEUTRALE"
611 # " STABILITEIT :",30X,15A2)' ) ITIM
612 WRITE (LOUT,'( /,15X," EN V-COMPONENT" )' )
613 WRITE (LOUT,'( " NOLEN DIAMETER ",F8.3," M" )' ) D
614 WRITE (LOUT,'( " AS-HOOGTE ",F8.3," M" )' ) AH
615 WRITE (LOUT,'( " SNELHEID ",F8.3," M/S" )' ) U
616 WRITE (LOUT,'( " Zo ",F8.3," M" )' ) ZO
617 WRITE (LOUT,'( /," n",10X,"St(n)",10X,"Flp(n)",9X,"Fhp(n)" )' )
618 DO 10 K=1,NFR,10
619 ST = SNV1(K)/U**2
620 WRITE (LOUT,'(F8.4,3(3X,1PE12.5))' ) FREQ(K),ST,FLP(K),
621 # FHP(K)
622 10 CONTINUE
623 WRITE (LOUT,'( /," Sigma V ",1PE12.5," M/S" )' )
624 # SIGV
625 WRITE (LOUT,'( " Sigma V (berekend) ",1PE12.5," M/S" )' )
626 # WSOM
627 WRITE (LOUT,'( " Sigma V eff ",1PE12.5," M/S" )' )
628 # SVEF
629 ST = SIGV/U*RA
630 WRITE (LOUT,'( " Sigma t ",1PE12.5," GR" )' )
631 # ST
632 ST = SVEF/U*RA
633 WRITE (LOUT,'( " Sigma t eff ",1PE12.5," GR" )' )
634 # ST
635 WRITE (LOUT,'( " N eff (0) ",1PE12.5," 1/S" )' )
636 # ZERV
637 WRITE (LOUT,'( " FREQ: ONDERGRENS ",F8.4," HZ" )' )
638 # FREQ(1)
639 WRITE (LOUT,'( " BOVENGRENS ",F8.4," HZ" )' )
640 # FREQ(NFR)
641 WRITE (LOUT,'( " VERH: 10log(K) ",F8.4)' ) ALOK
642 WRITE (LOUT,'( " NUMBER OF FREQ. STEPS",I7)' ) NFR
643 UN = 1.28*ST
644 WRITE (LOUT,'( " Teta(10%) ",F8.4," GR" )' ) UN
645 UN = 2.32*ST
646 WRITE (LOUT,'( " Teta( 1%) ",F8.4," GR" )' ) UN
647 UN = 3.1 *ST
648 WRITE (LOUT,'( " Teta(.1%) ",F8.4," GR" )' ) UN
649 RETURN
650 END

```



```

651 *
652 * SPECTRA V-COMPONENT
653 *
654 #EMA(W,10)
655 SUBROUTINE TABLV (LOUT,U,NFR)
656 COMMON/W/ CO(2,44) , DR(44,44) , RLU(44,44) , FREQ(250) ,
657 # FLP(250) , FHP(250) , SNU1(250) , SNUE(250) , DF(250) ,
658 # TEM(250) , YLV(44,44) , ZLV(44,44) ,
659 # RLV(44,44) , SNV1(250) , SNVE(250)
660 *
661 PI = 3.141519
662 WRITE (LOUT, '(/, " SPECTRUM T-COMPONENT :", 2/,
663 # , 5X, "n", 9X, "nSt(n)", 9X, "nStef(n)", 7X, "Sdtef(n)" )' )
664 DO 10 K=1,NFR,10
665 T1 = FREQ(K)*SNV1(K)/U**2
666 T2 = FREQ(K)*SNVE(K)/U**2
667 T3 = (2.*PI*FREQ(K))**2.*T1
668 WRITE (LOUT, '(F8.4,3(1PE15.5))' ) FREQ(K),T1,T2,T3
669 10 CONTINUE
670 RETURN
671 END
672 *
673 END#

```



```

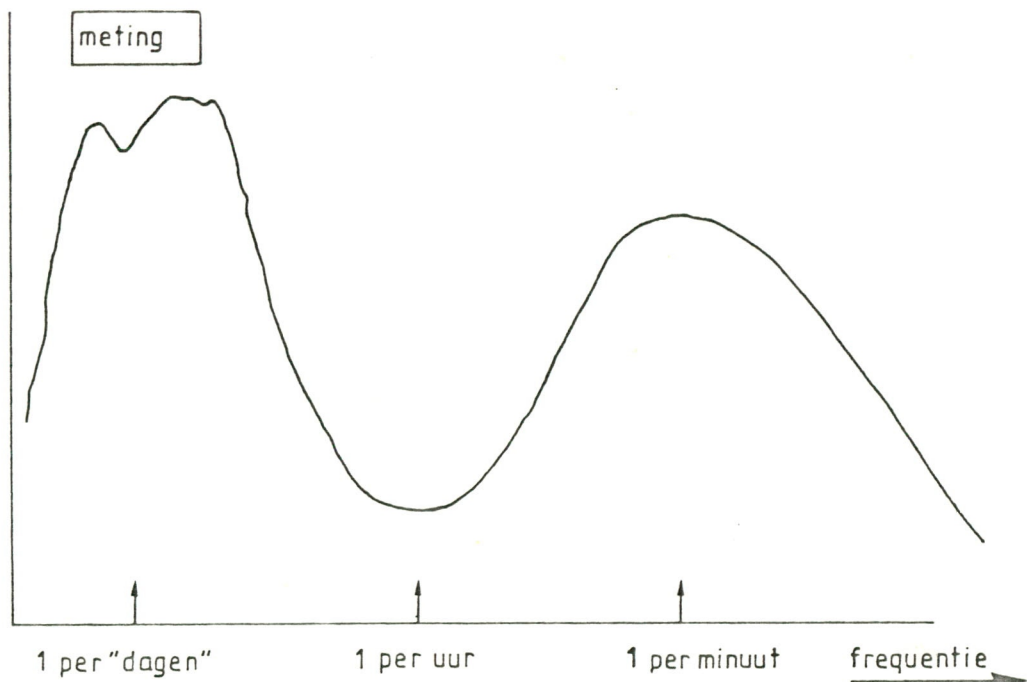
651 *
652 * SPECTRA V-COMPONENT
653 *
654 $EMAX(W,10)
655 SUBROUTINE TABLV (LOUT,U,NFR)
656 COMMON/WW/ CO(2,44), DR(44,44), RLU(44,44), FREQ(250),
657 # FLP(250), FHP(250), SNUI(250), SNUE(250), DF(250),
658 # TEM(250), YLV(44,44), ZLV(44,44),
659 # RLV(44,44), SNV1(250), SNVE(250)
660 *
661 PI = 3.141519
662 WRITE (LOUT, '(/, " SPECTRUM T-COMPONENT :", 2/,
663 # , 5X, "n", 9X, "nSt(n)", 9X, "nStef(n)", 7X, "Sdtef(n)")')
664 DO 10 K=1,NFR,10
665 T1 = FREQ(K)*SNV1(K)/U**2
666 T2 = FREQ(K)*SNVE(K)/U**2
667 T3 = (2.*PI*FREQ(K))**2.*T1
668 WRITE (LOUT, '(F8.4,3(1PE15.5))') FREQ(K),T1,T2,T3
669 10 CONTINUE
670 RETURN
671 END
672 *
673 END$

```

$n S_U(n)$



meting



klimateologie	fronten buien	turbulentie
---------------	---------------	-------------

Fig. 1A

$n S_U(n)$



schema

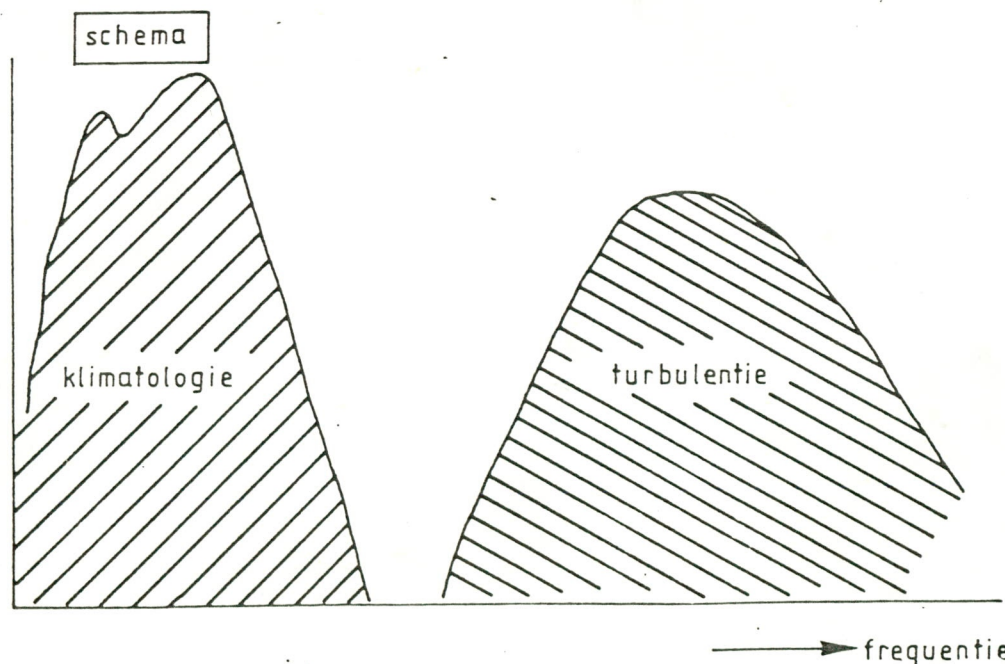
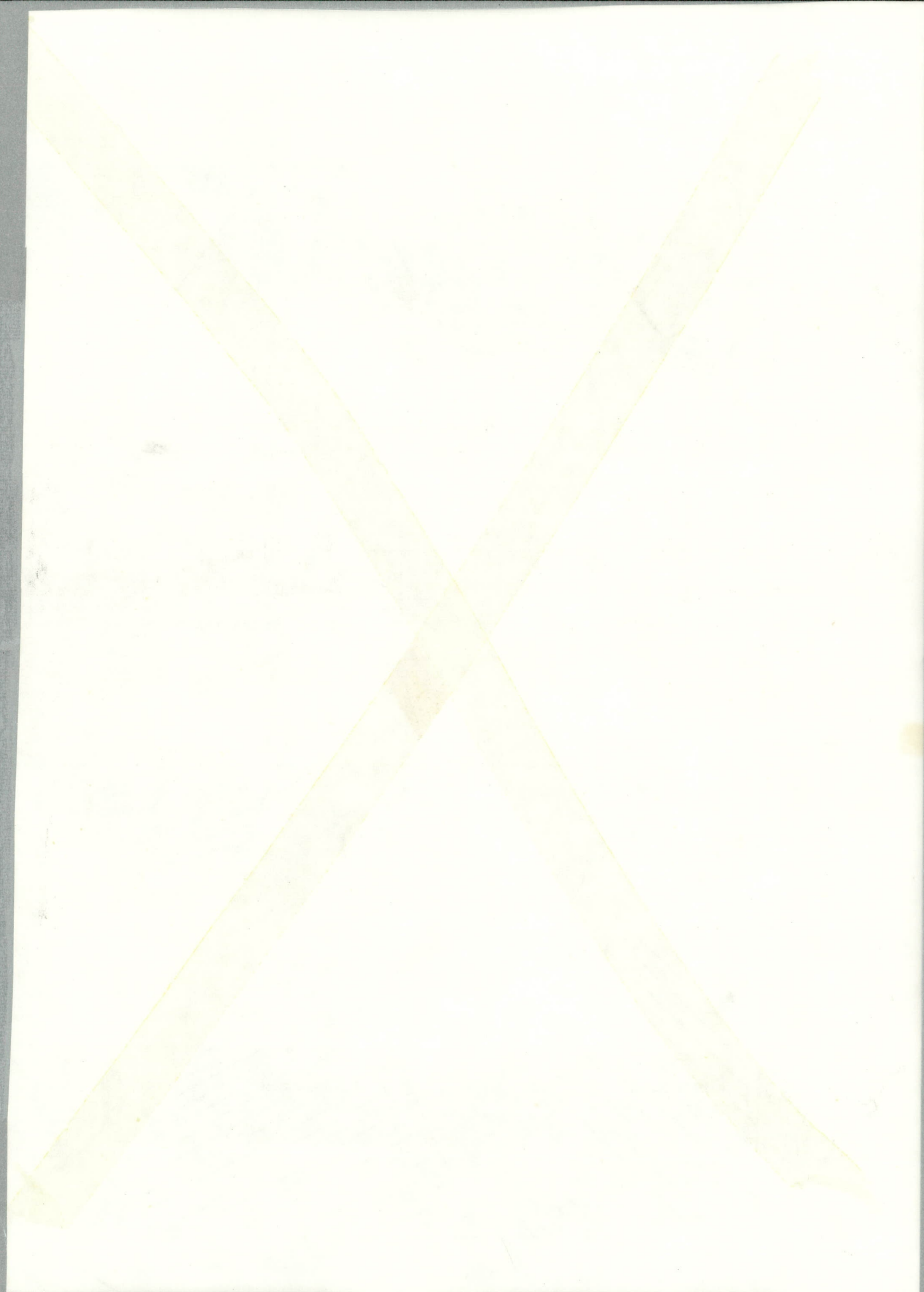
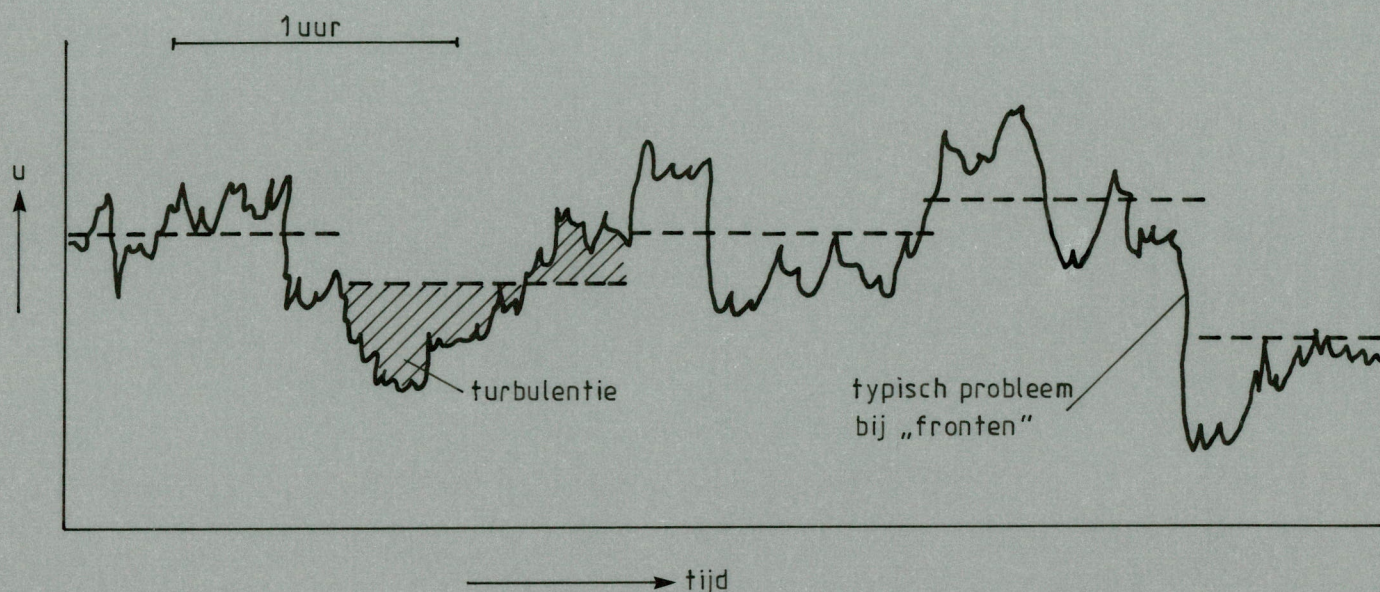


Fig. 1B

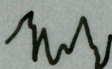


Schematizing windfluctuations

Fig. 1A en 1B
11344
MT-TNO

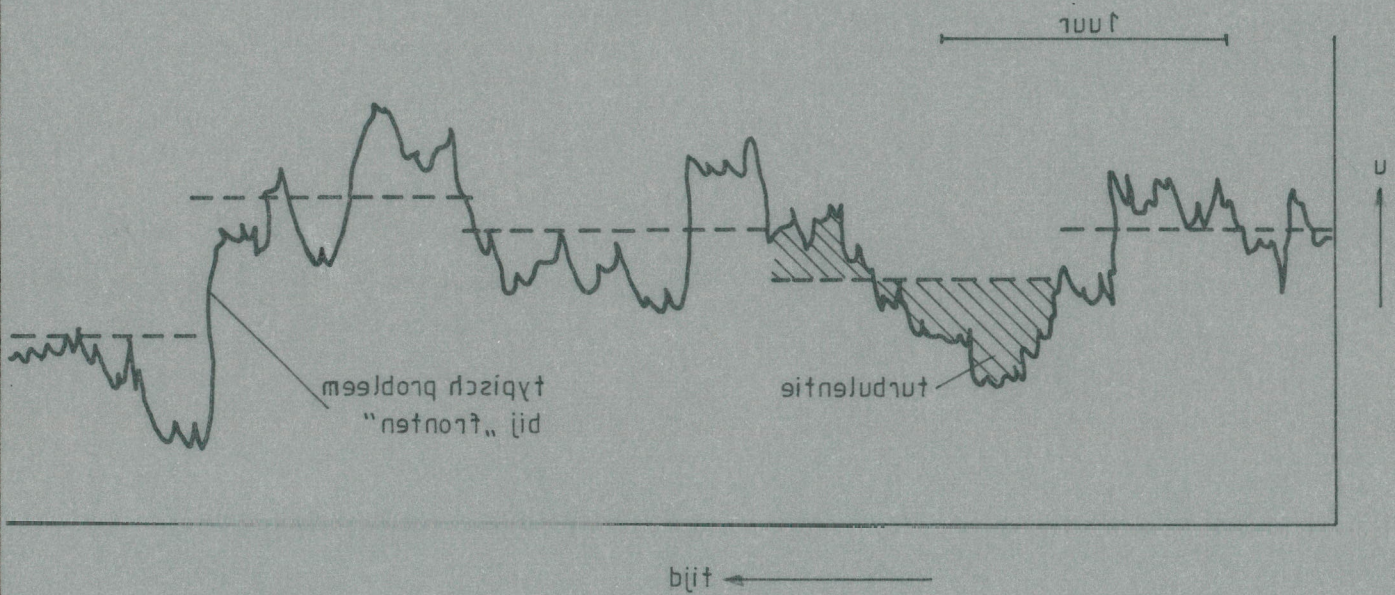


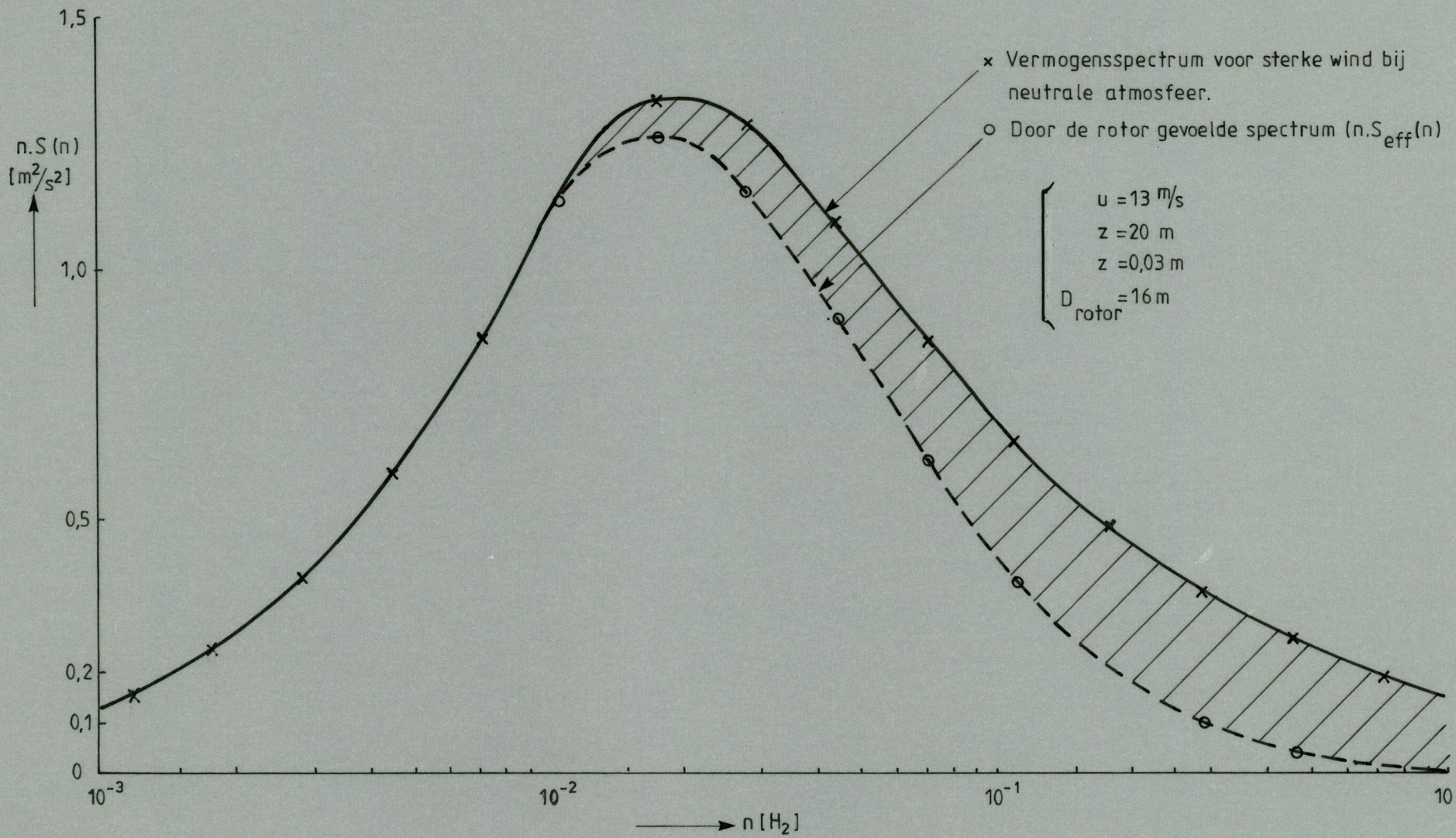
----- de uurgemiddelde wind met eigen statistiek

 de turbulentie = variatie rond het uurgemiddelde ook met eigen statistiek

de turbulentie = variatie rond het uurgemiddelde ook met eigen statistiek

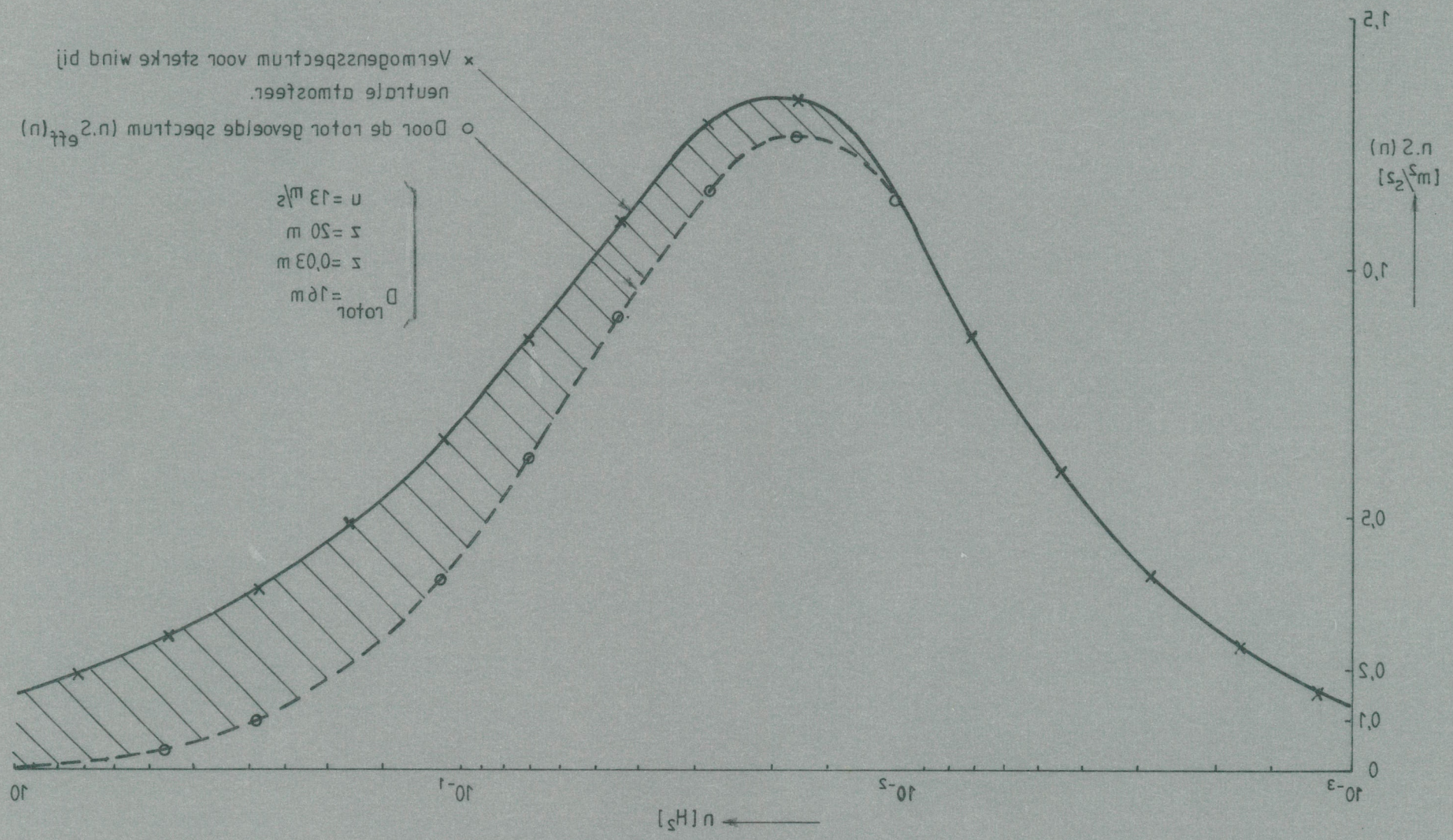
— de uurgemiddelde wind met eigen statistiek





Variantiereductie bij hoge frequenties.

Fig. 3
11344
MT-TNO



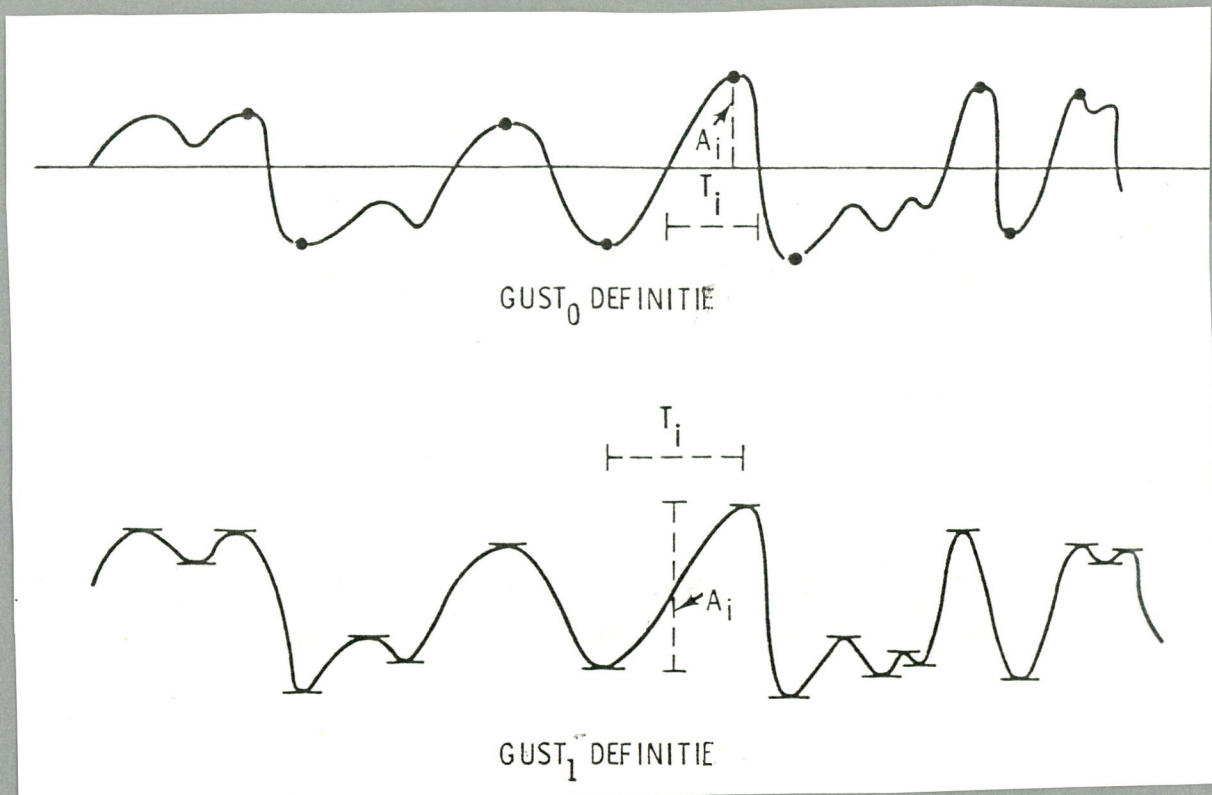


Fig.4 Vlaagdefinities (Ramsdell, 1978)

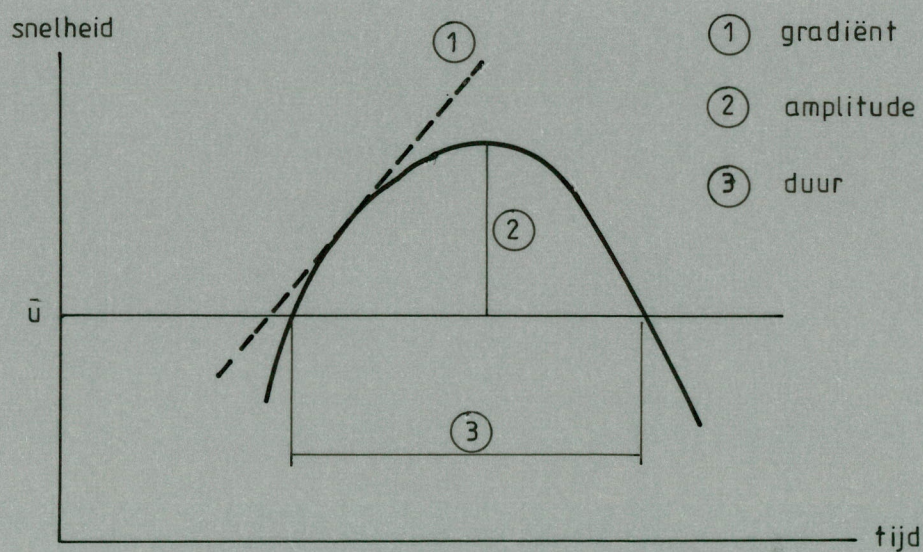


Fig.5 Schematisering van een vlaag

Fig. 4 Vlaagdefinities (Ramsdell, 1978)

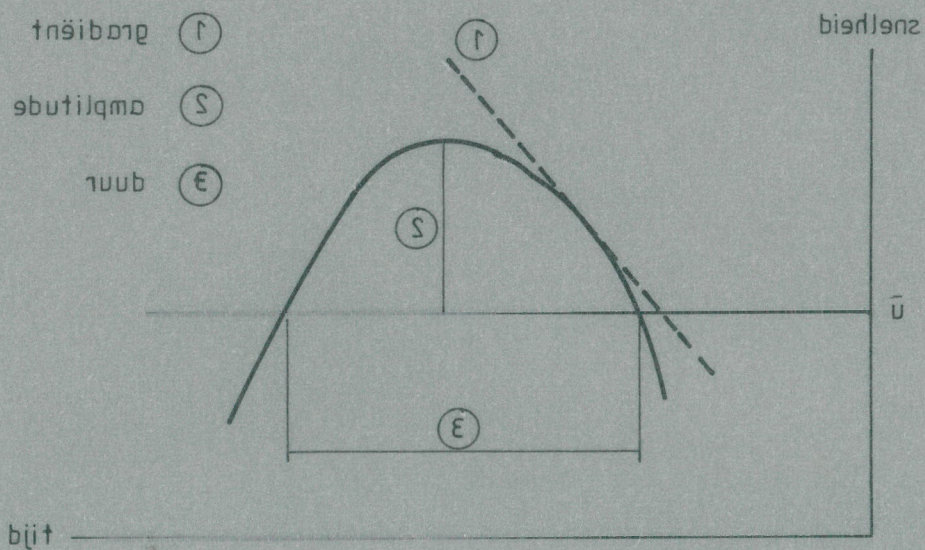
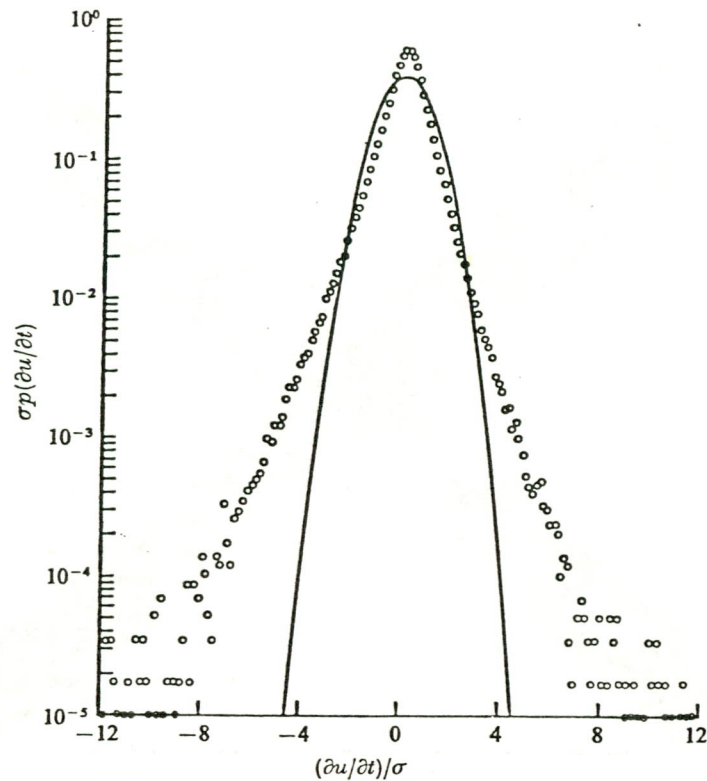
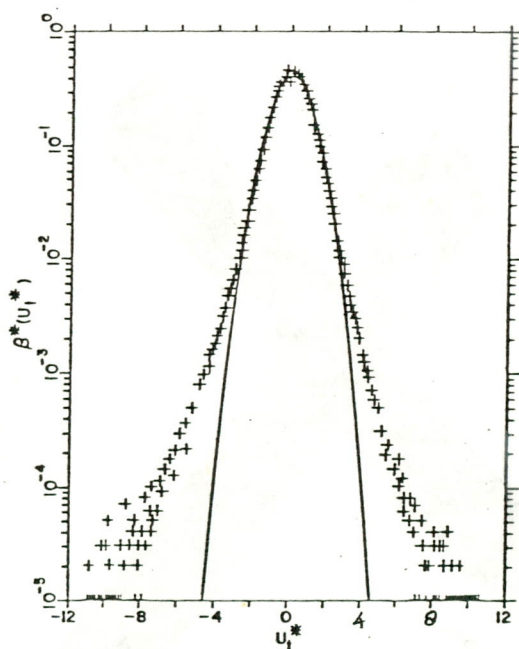


Fig. 2 Schematisering van een vloed



Probability density of $\partial u/\partial t$ for $z = 3$ m, $u = 11$ m/s. σ is the standard deviation of $\partial u/\partial t$. —, the Gaussian distribution.

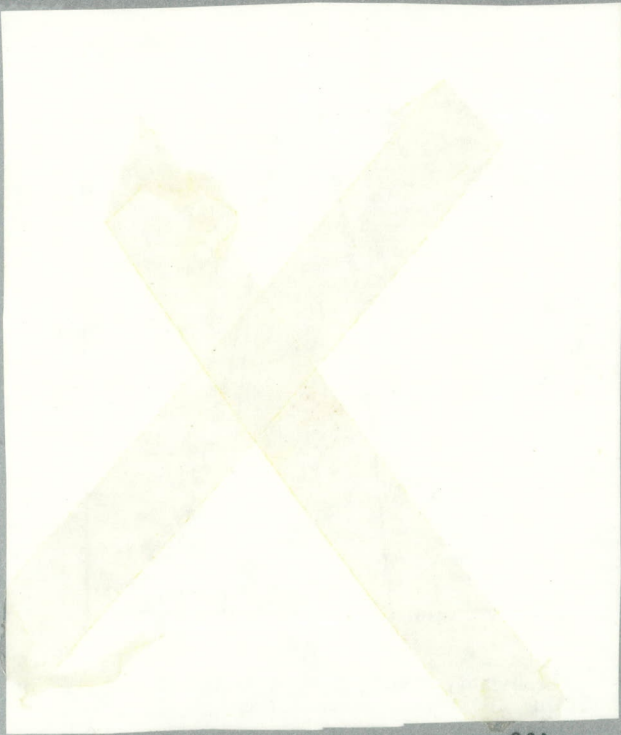
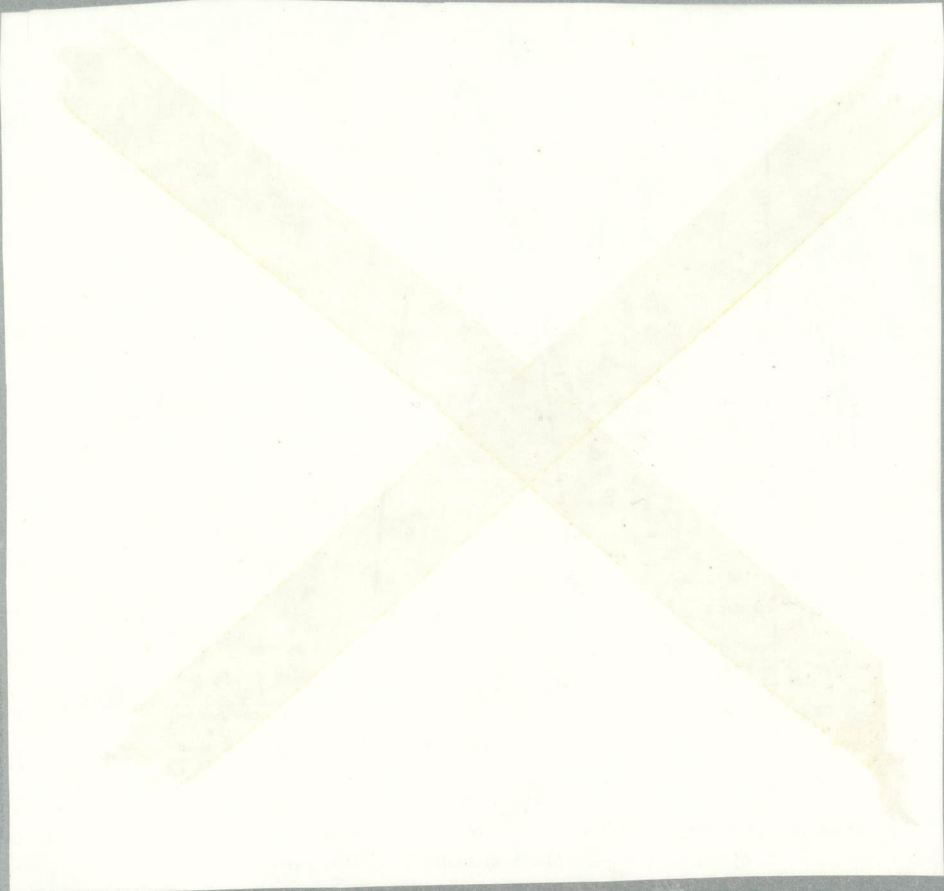
Van Atta & Chen '70



Probability density of $\partial u/\partial t$. Data taken at 11:32 on 28 July 1968; +, experimental data; —, Gaussian.

$z = 108$ m

Sheih, Tennekes & Lumley '71

Fig. 6 11344 MT-TNO	in de atmosfeer. Gemeten waarschijnlijksheidsverdelingen van $\frac{db}{dt}$
z = 108 m Sheih, Tennakes & Lumley '71	
Van Atta & Chen '70	

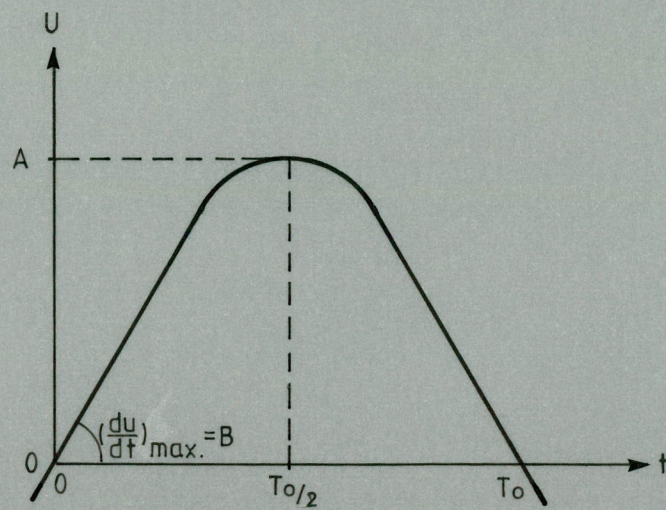


Fig.7 Vlaagvorm als exkursie boven de uurgemiddelde windsnelheid

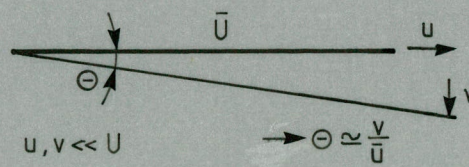


Fig.8 Windrichtingsfluctuatie Θ

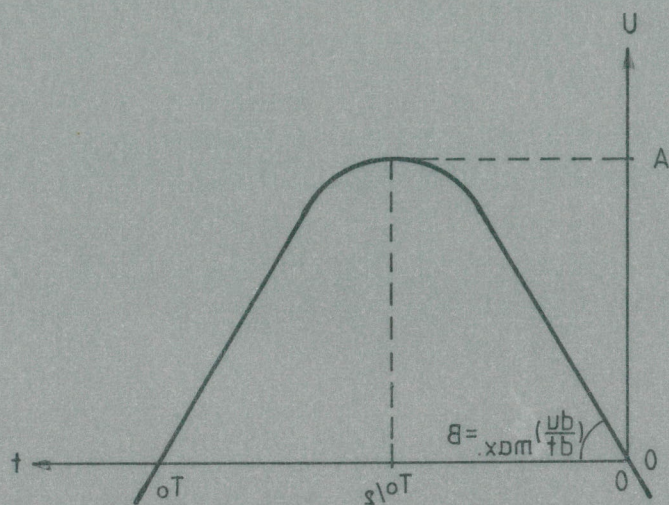


Fig. 7 Vlaagvorm als excursie boven deургemiddelde windsnelheid

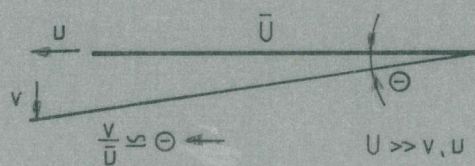
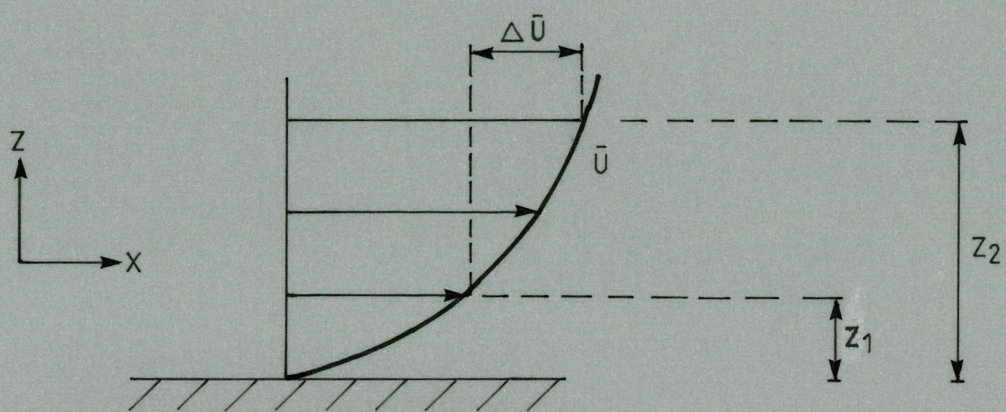
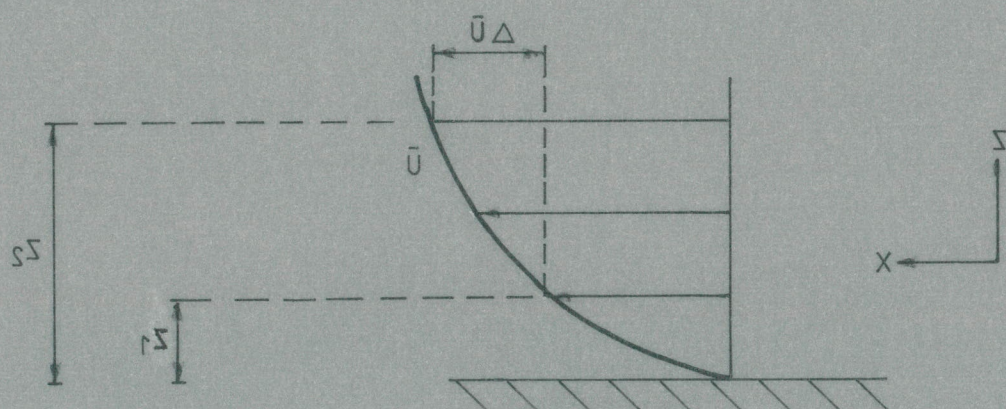
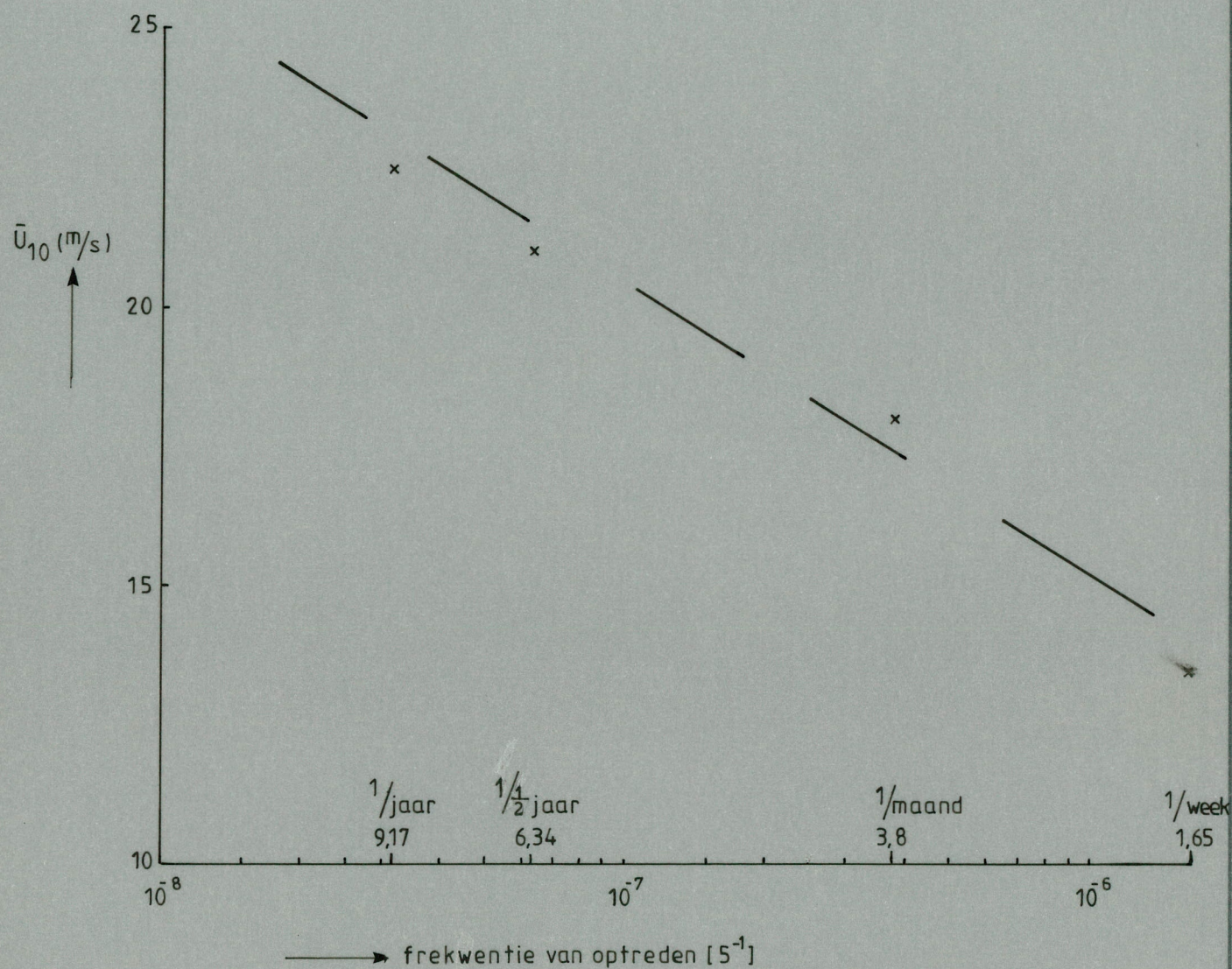


Fig. 8 Windrichtingsfluktatie Θ

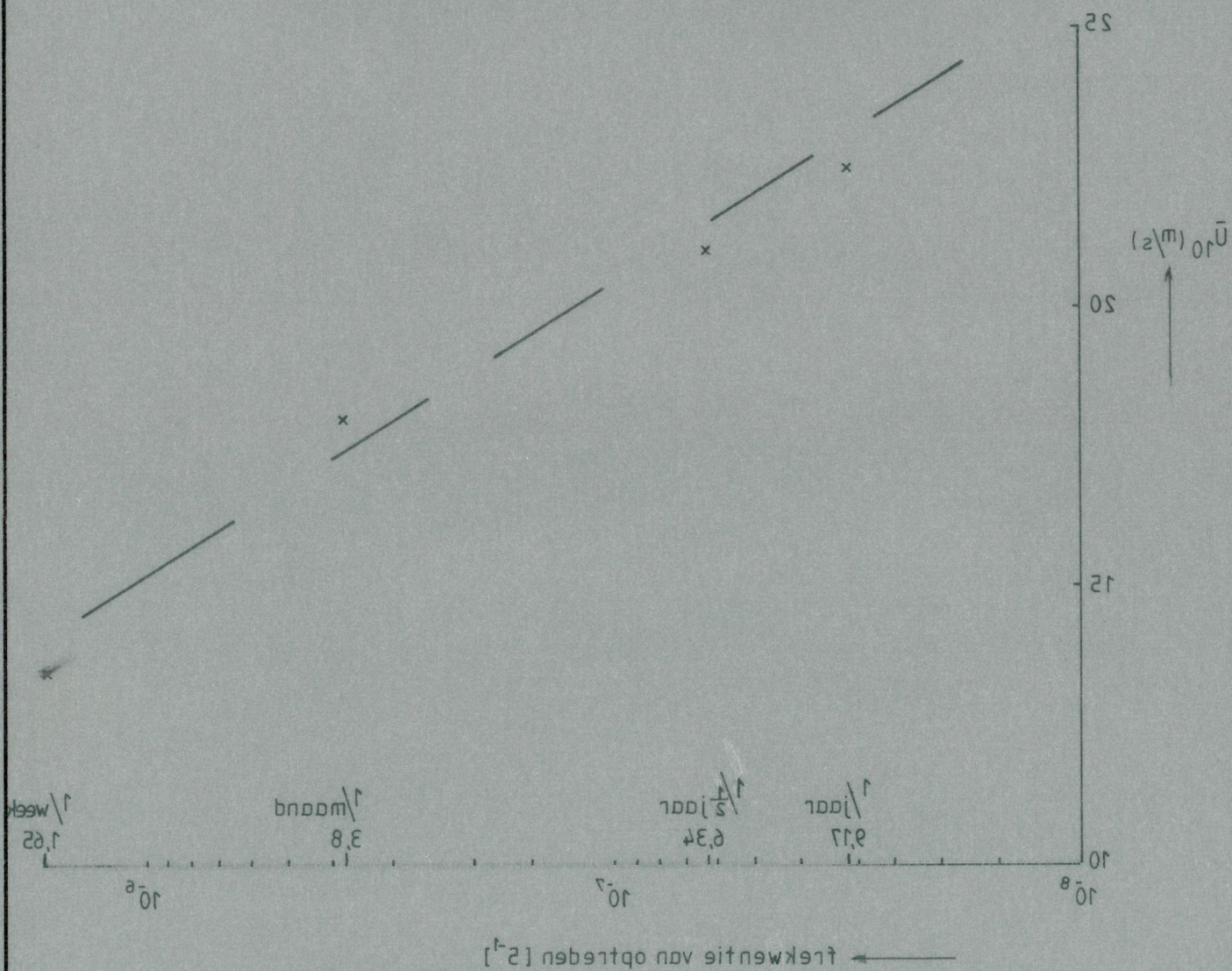


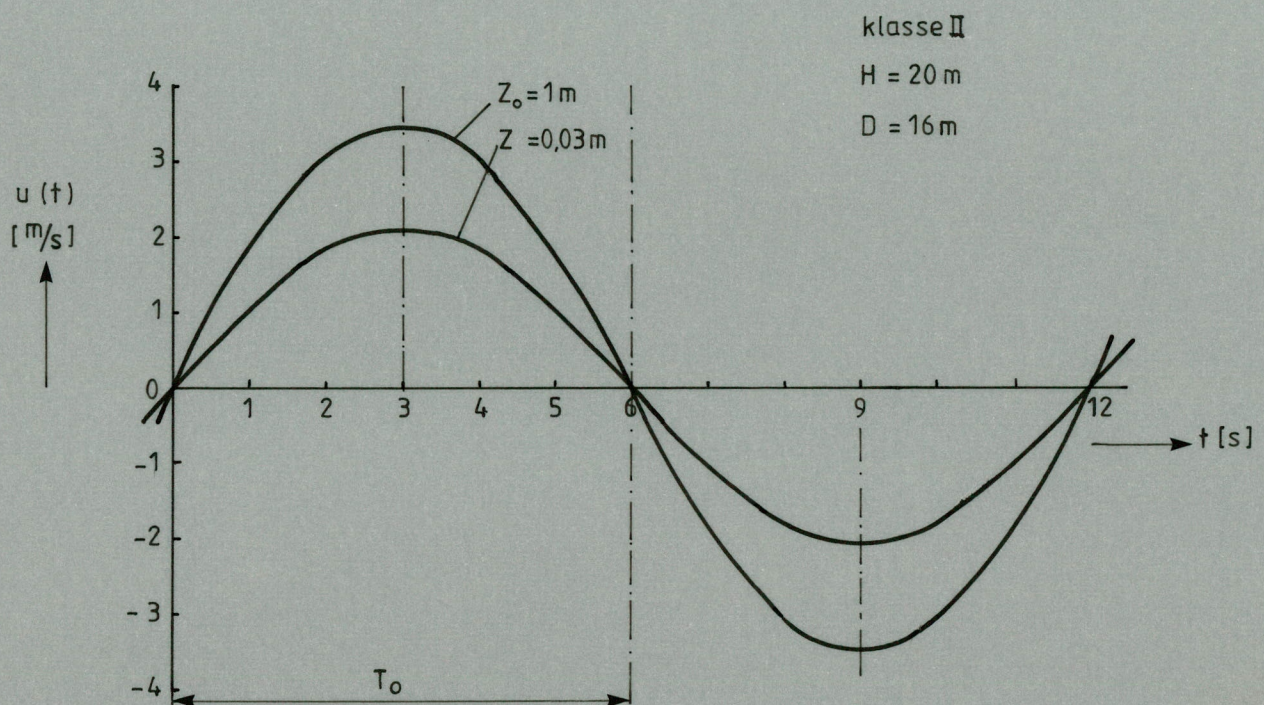




Verband tussen uurgemiddelde windsnelheid op 10 m hoogte
en frekwentie van optreden (Schiphol)

MT_TNO
11344
Fig.19





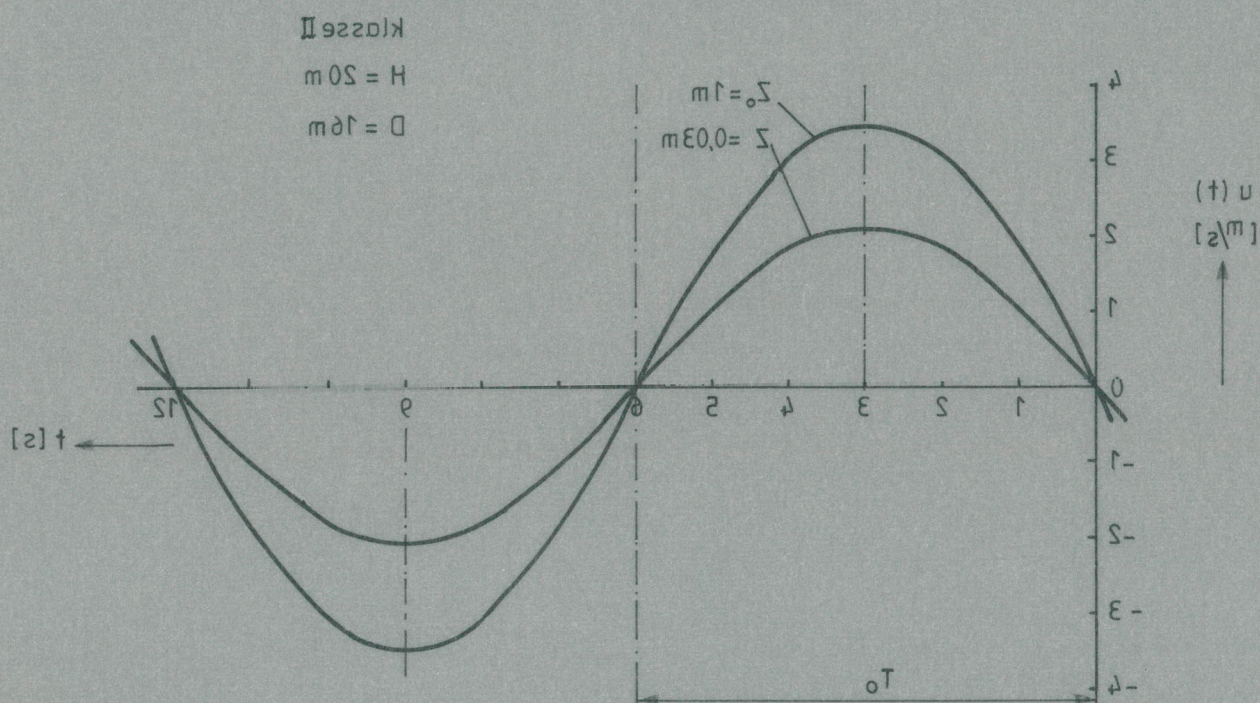
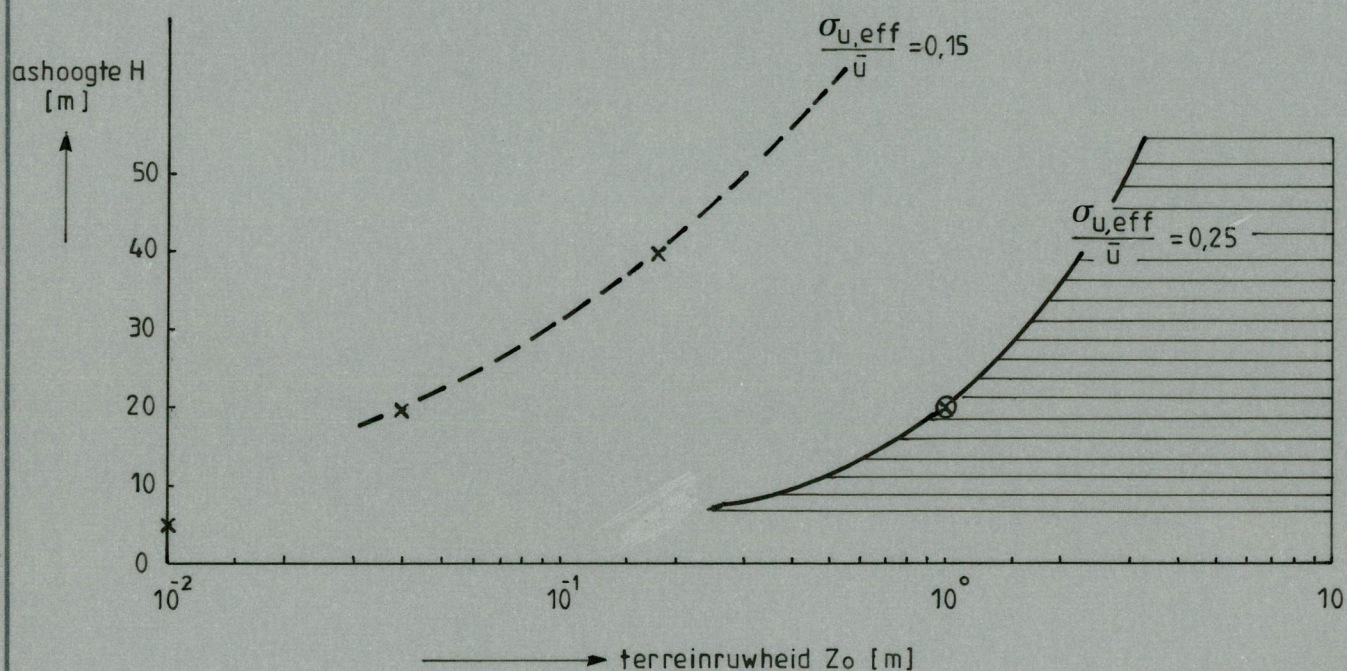


Fig. 20
 11344
 TM-TNO

Vermoedingen voor klasse II ($\bar{u} = 11m$) voor een glad
 terrein.

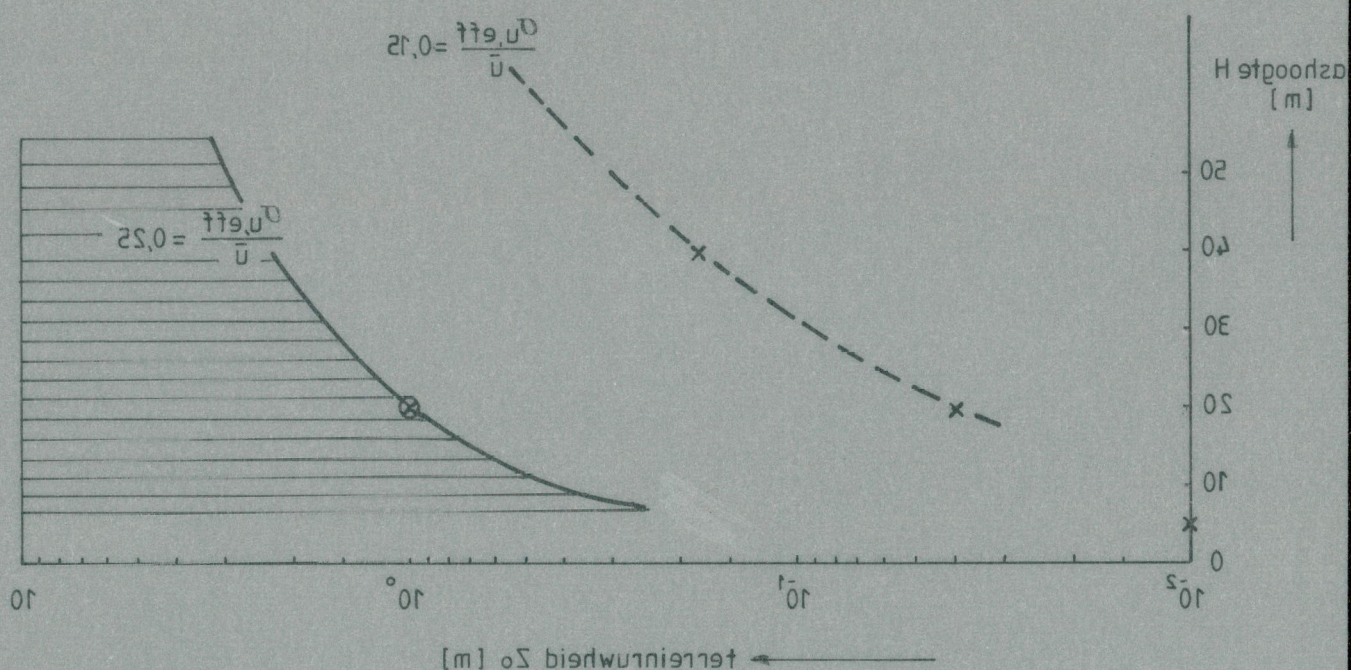
In het gearceerde gebied zijn de vermoeingsvlagen niet conservatief



Lijnen van konstante door de rotor gevoelde turbulentieïntensiteit als functie van ashoogte H en oppervlakteruwheid Z_0 voor een rotordiameter van 16m.

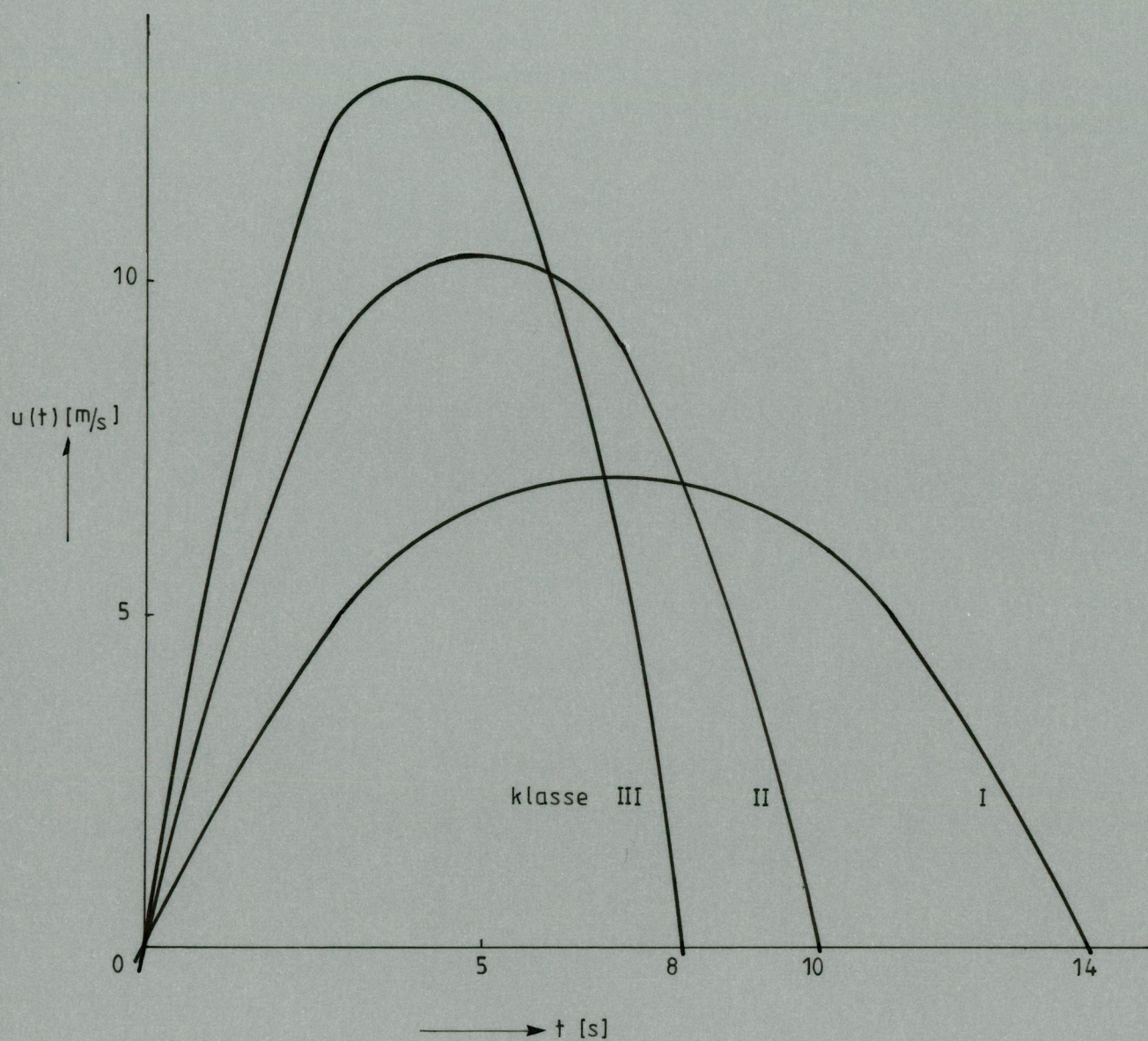
MT - TNO
11344
Fig. 21

In het gearceerde gebied zijn de
vermoedingslagen niet conservatief



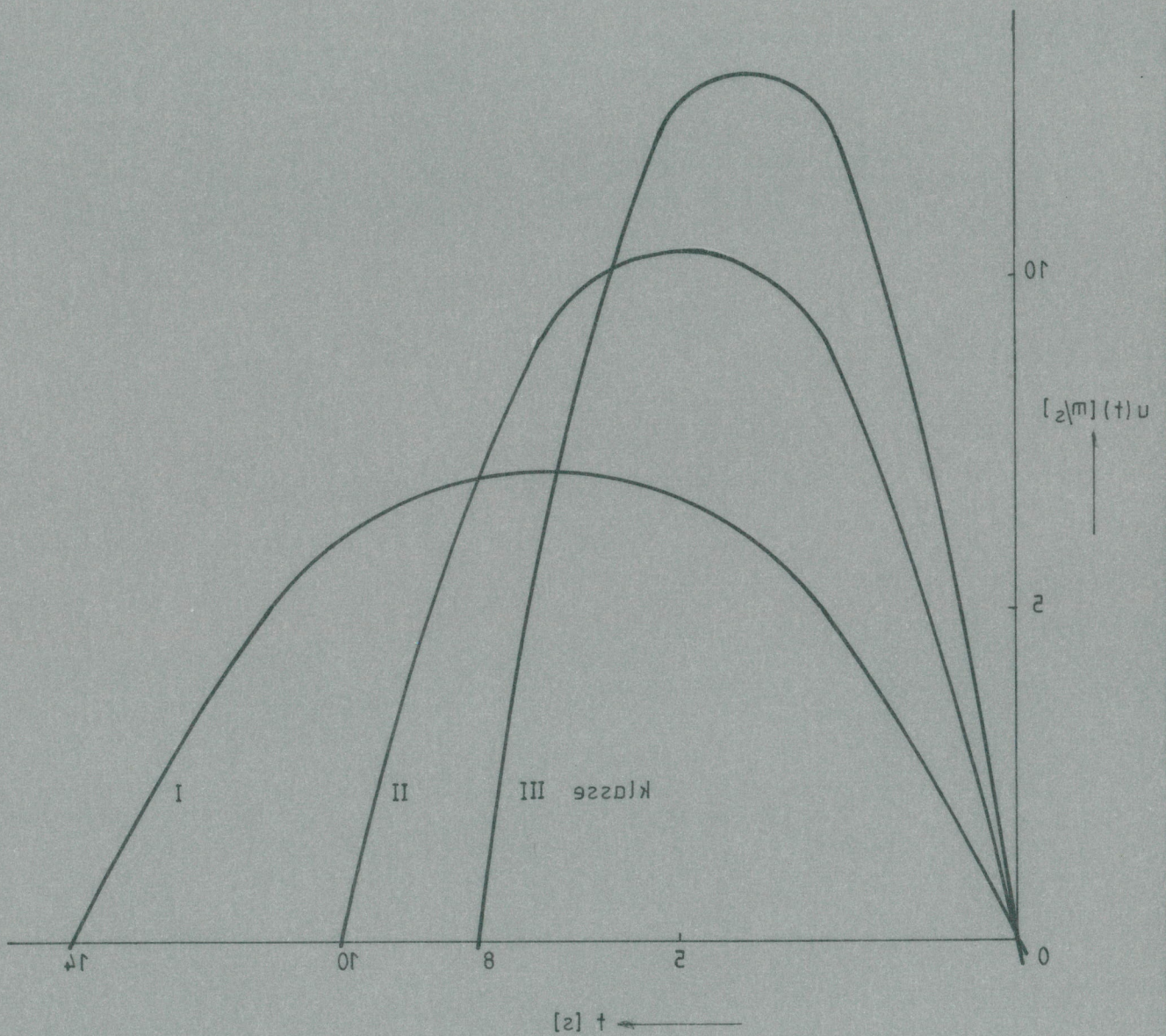
MT-TM
11344
Fig. 21

Lijnen van konstante door de rotor gevoelde turbulentintensiteit
als functie van ashoogte H en oppervlakteruwheid Δz
voor een rotor diameter van 10m.



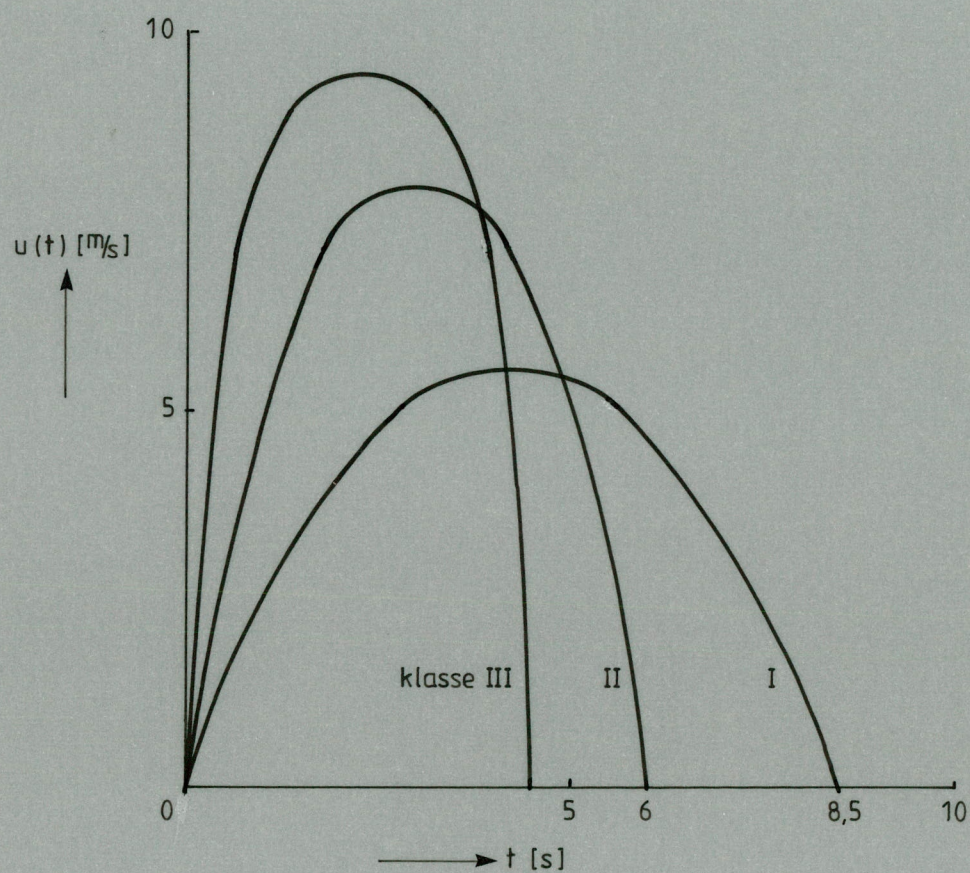
Extreme amplitudevlagen volgens tabel 6.

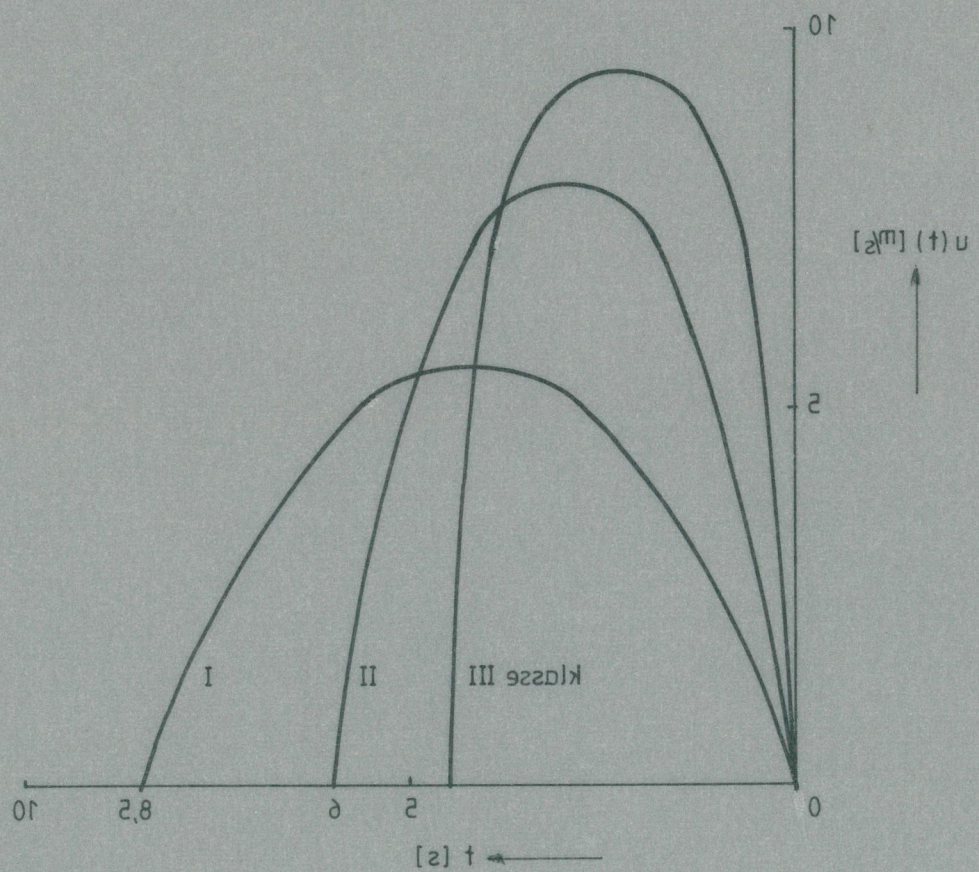
MT_TN0
11344
Fig. 22a



Extreme amplitude values according to table 6.

Fig. 25a
1344
MT-TM





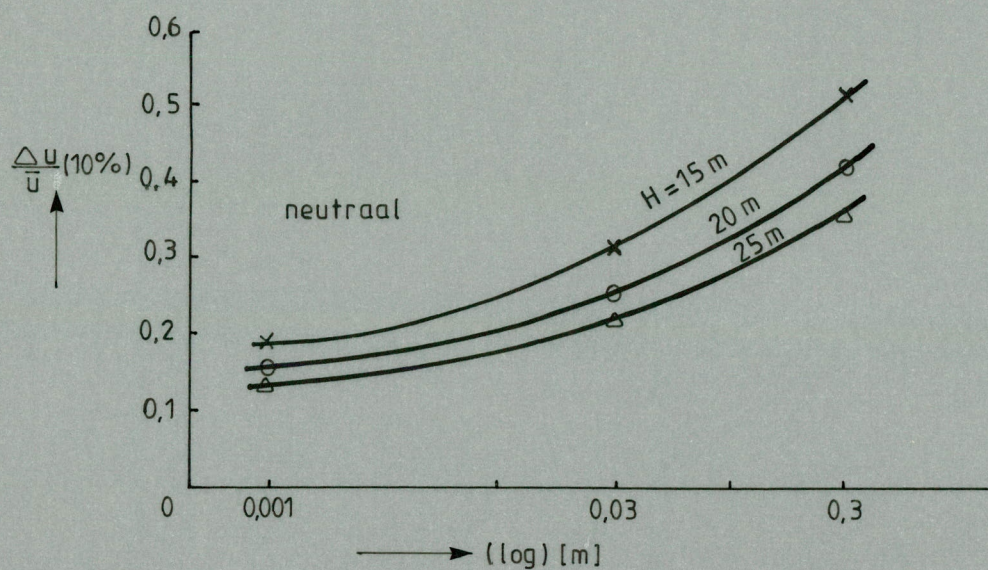


Fig. 23 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze schering als functie van Z_0 voor verschillende ashoogte H . ($D=16$ m; $\Delta Z=12$ m; tabel 7; voor grotere D schuiven de iso- H lijnen omhoog)

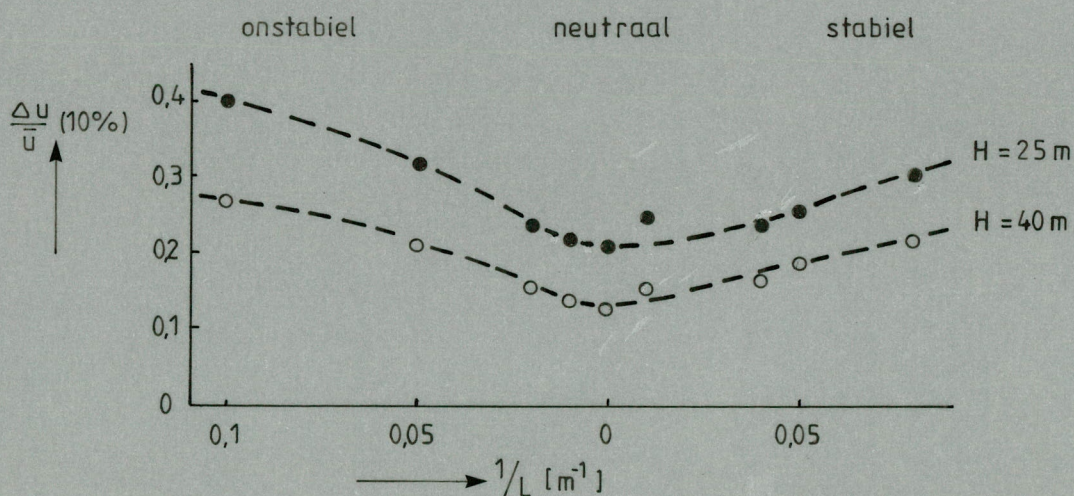


Fig. 24 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze schering als functie van van de atmosferische stabiliteit en ashoogte ($Z_0=0.03$ m; $D=16$ m; $\Delta Z=12$ m; tabel 8)

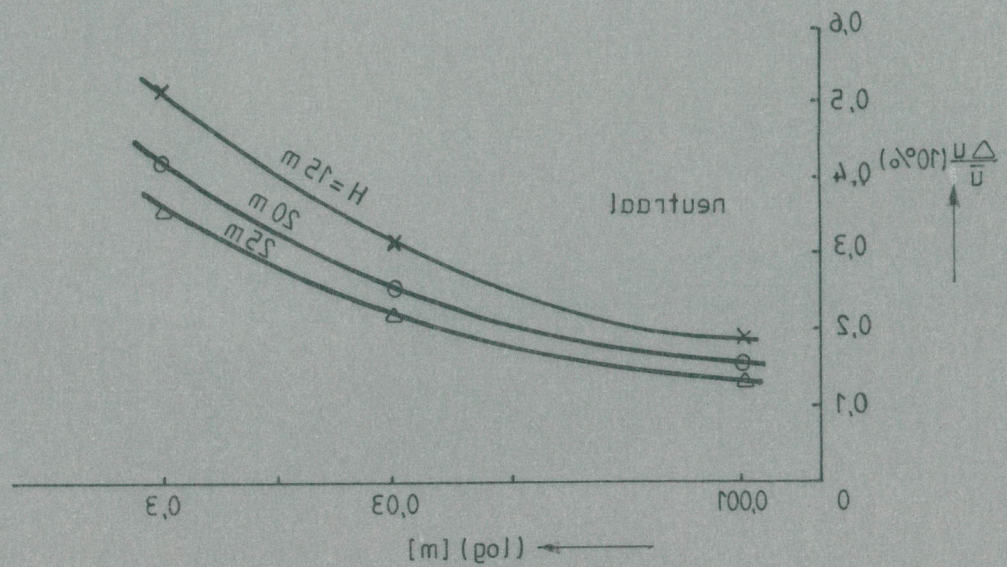


Fig. 23 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze scherping als functie van Δz voor verschillende ashoogte H. ($D=16m$; $\Delta z=12m$; tabel 7; voor grotere D schuiven de iso-H lijnen omhoog)

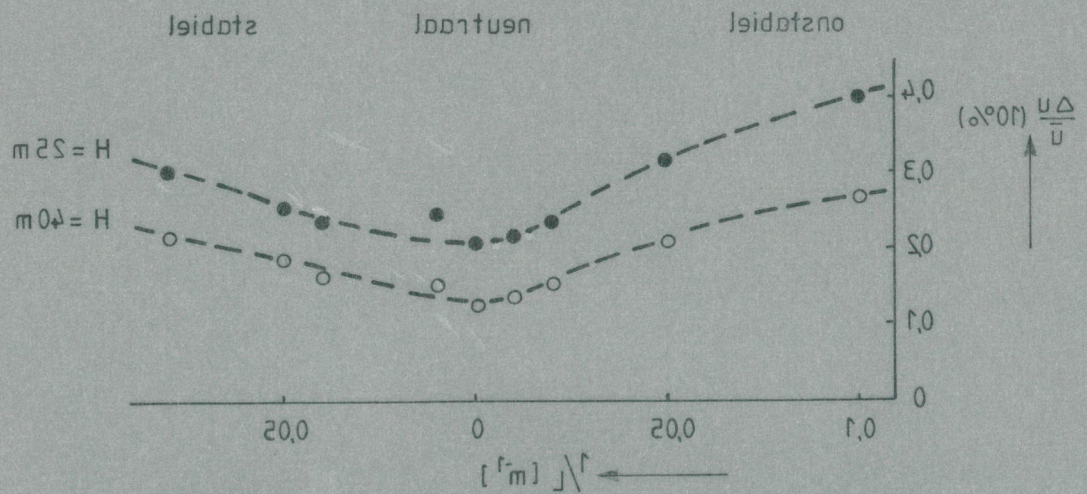
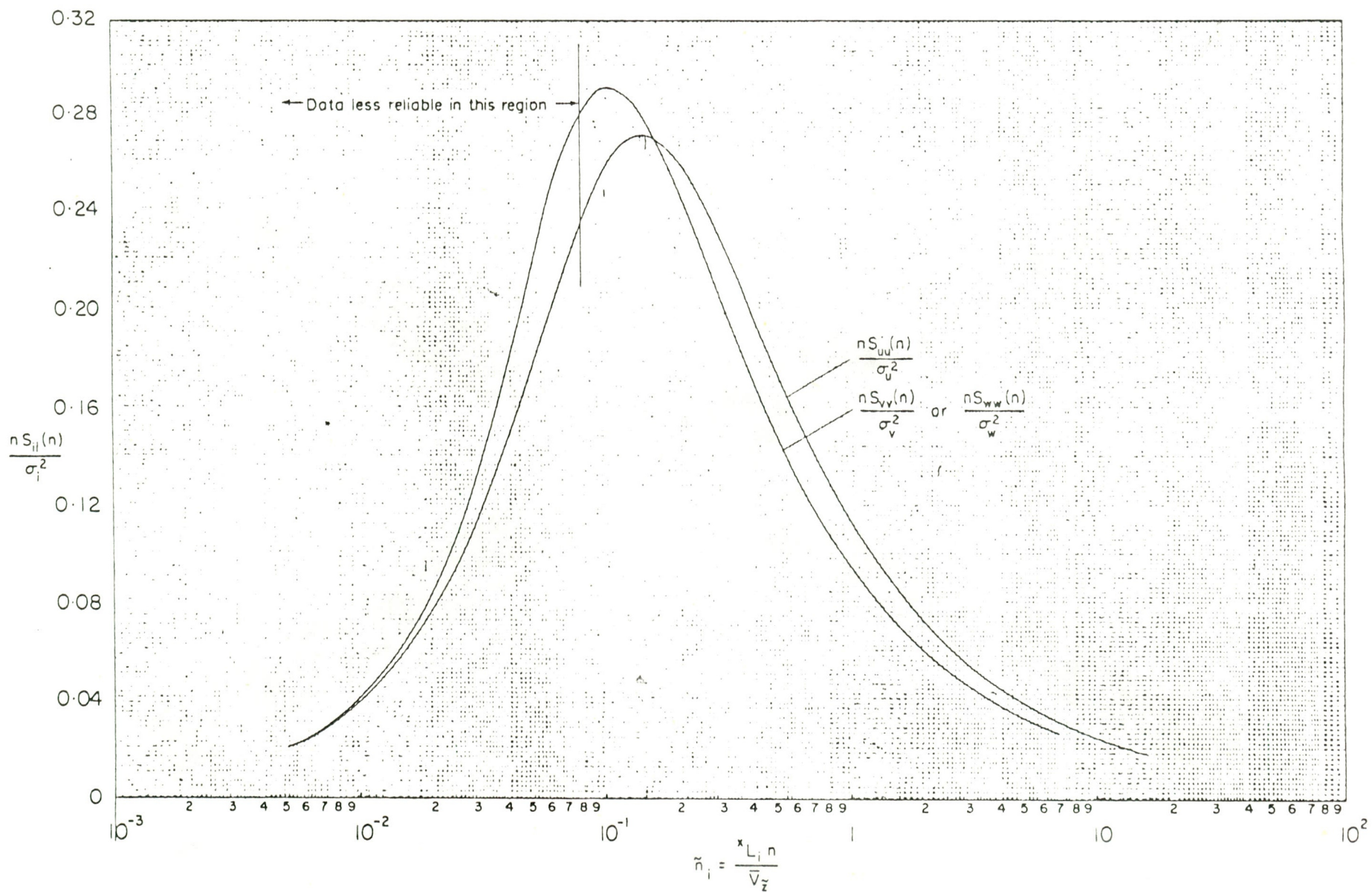


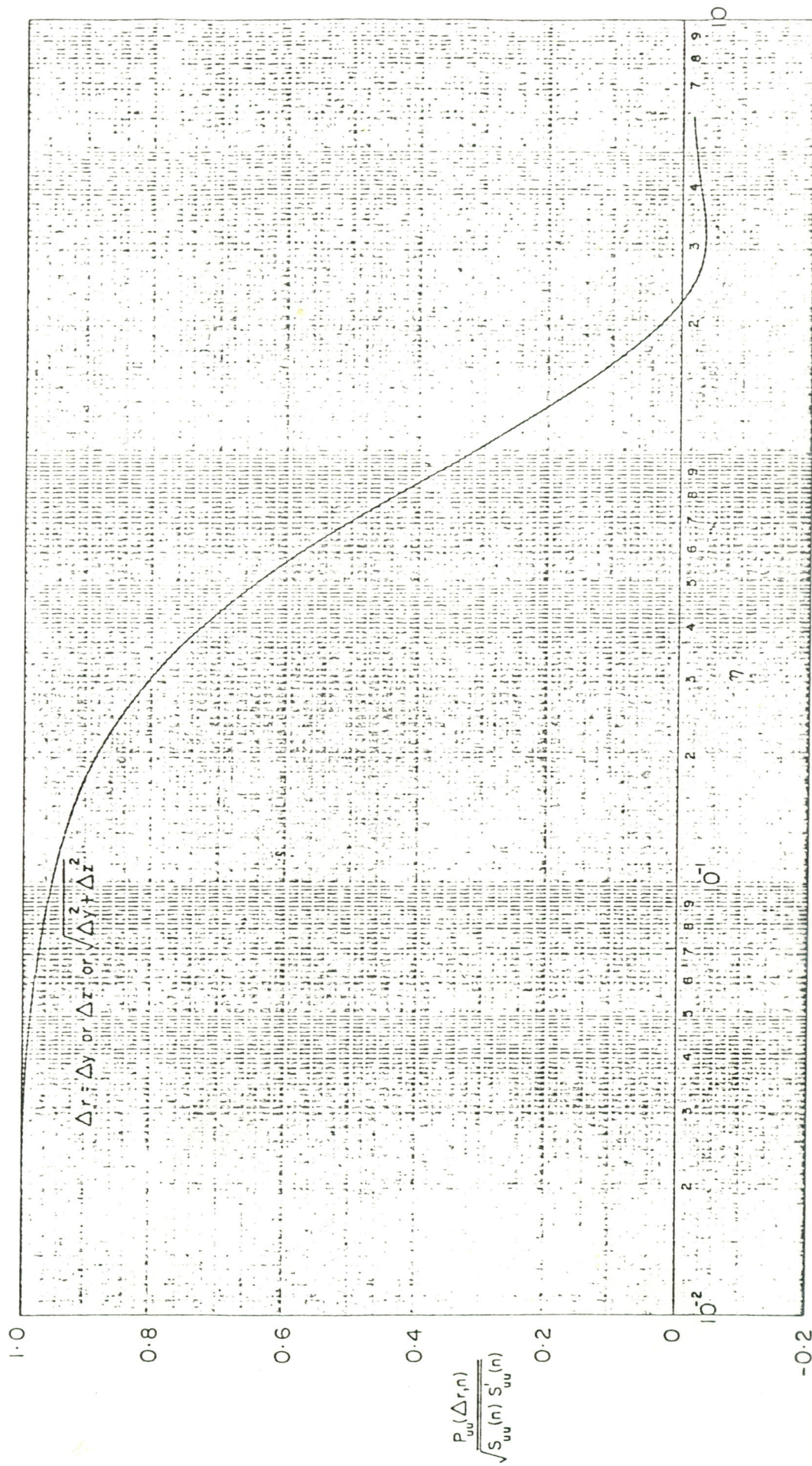
Fig. 24 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze scherping als functie van van de atmosferische stabiliteit en ashoogte ($\Delta z=0,03m$; $D=16m$; $\Delta z=12m$; tabel 8)





Power spectral density

Fig. B1
11344
MT-TNO

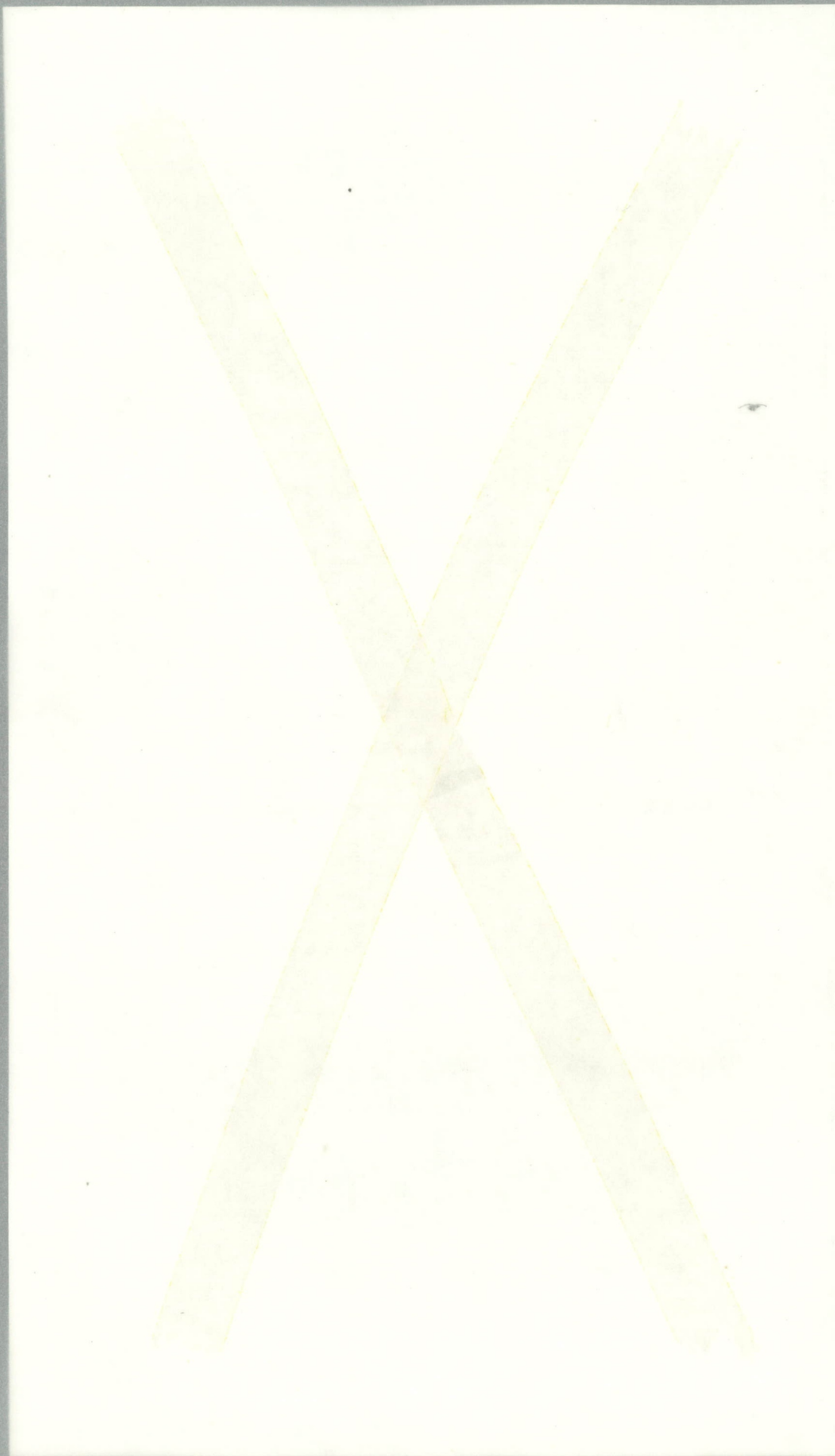


$\sqrt{\text{CO-coherence function for u-components with transverse separations}}$

MT-TNO
 11344
 Fig.B2

verses separations
CO-coherence function for n-components with trans-

Fig. B5
JJ374
M1-110



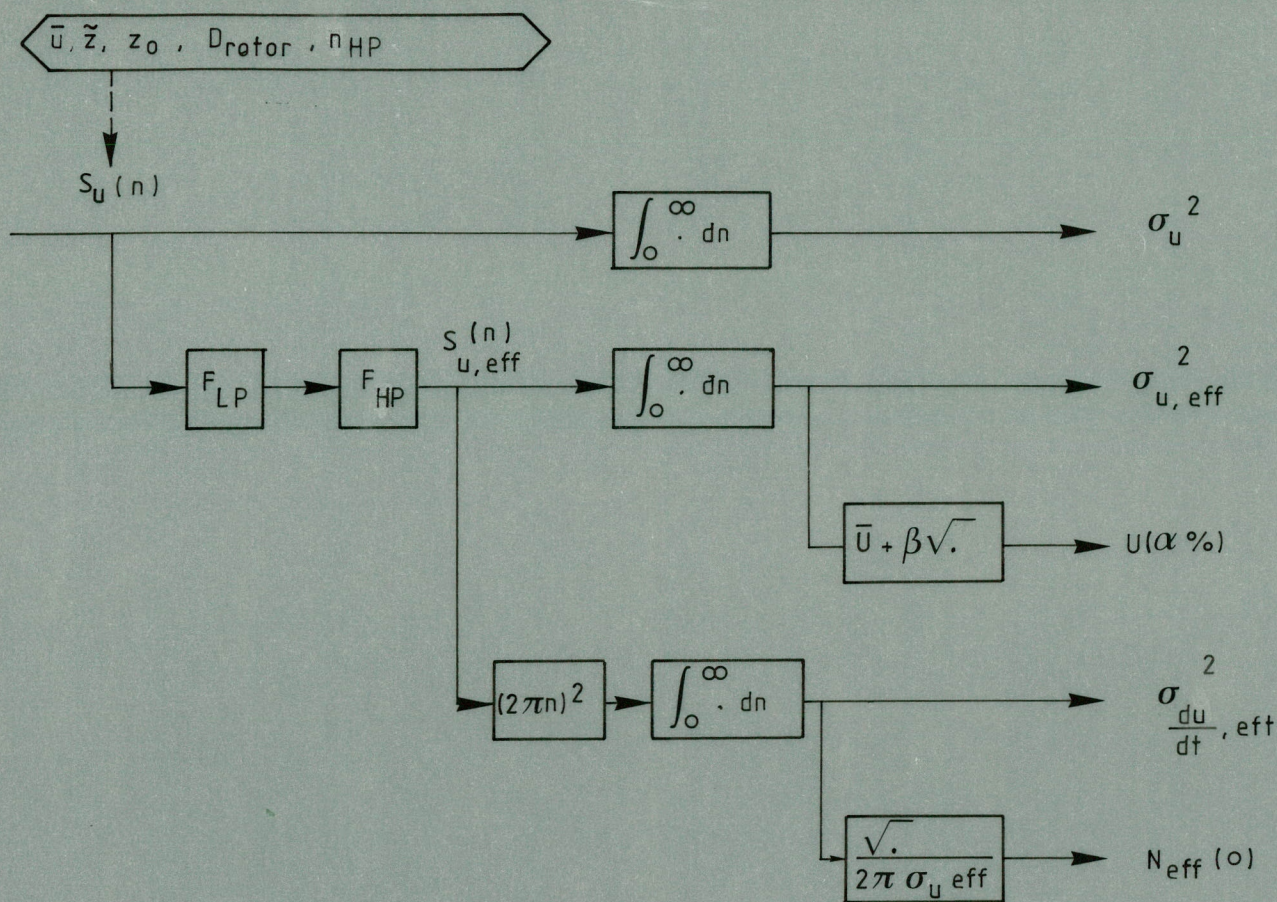


Fig.B3 Schematische weergave rekenprogramma (GUSBR), gedeelte windsnelheidsfluctuaties

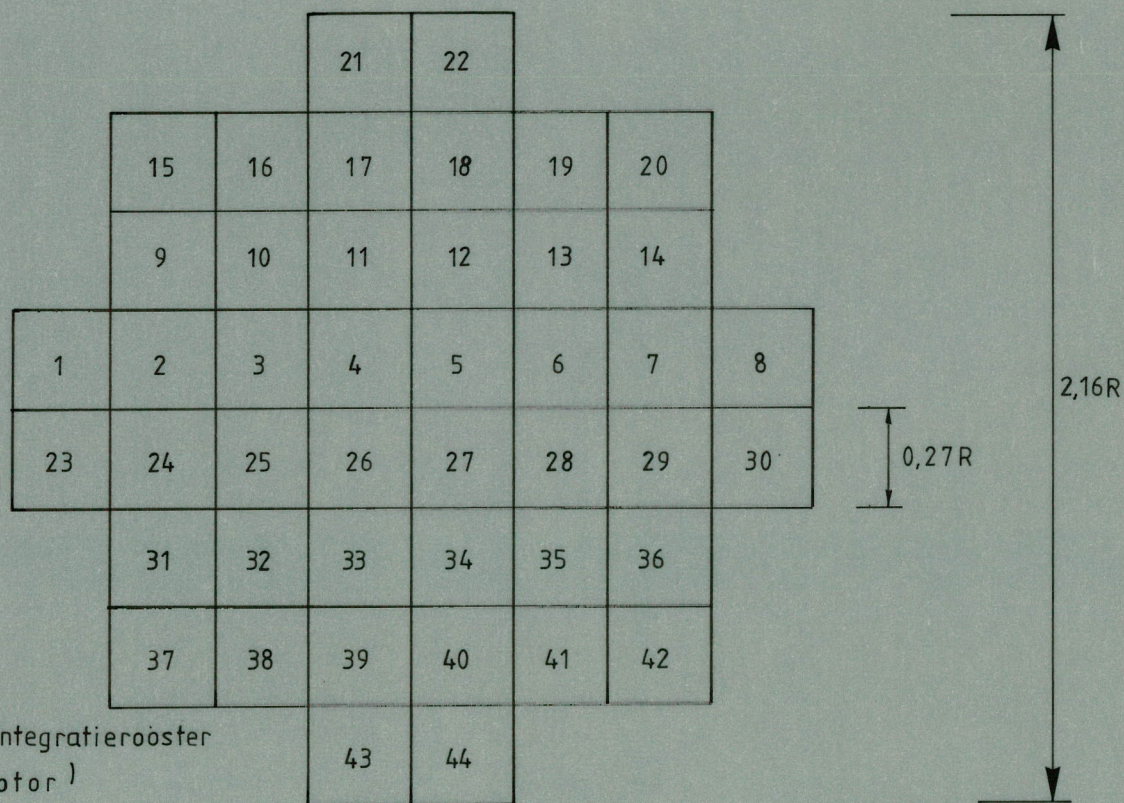


Fig.B7 Rotorvlak integratierooster
($R = 1/2 D_{\text{rotor}}$)

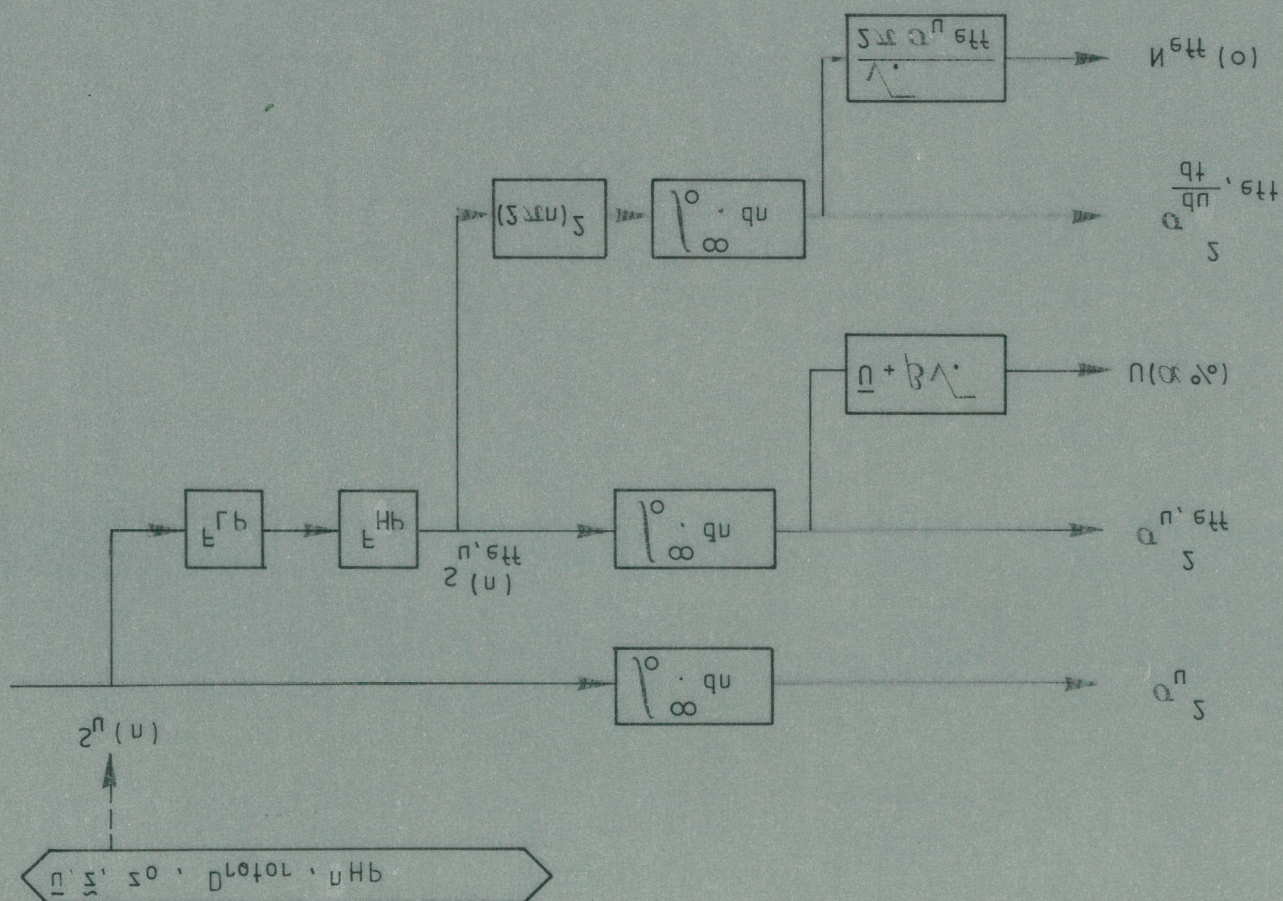
(B = $\sqrt{5}$ D^{LOLOL})

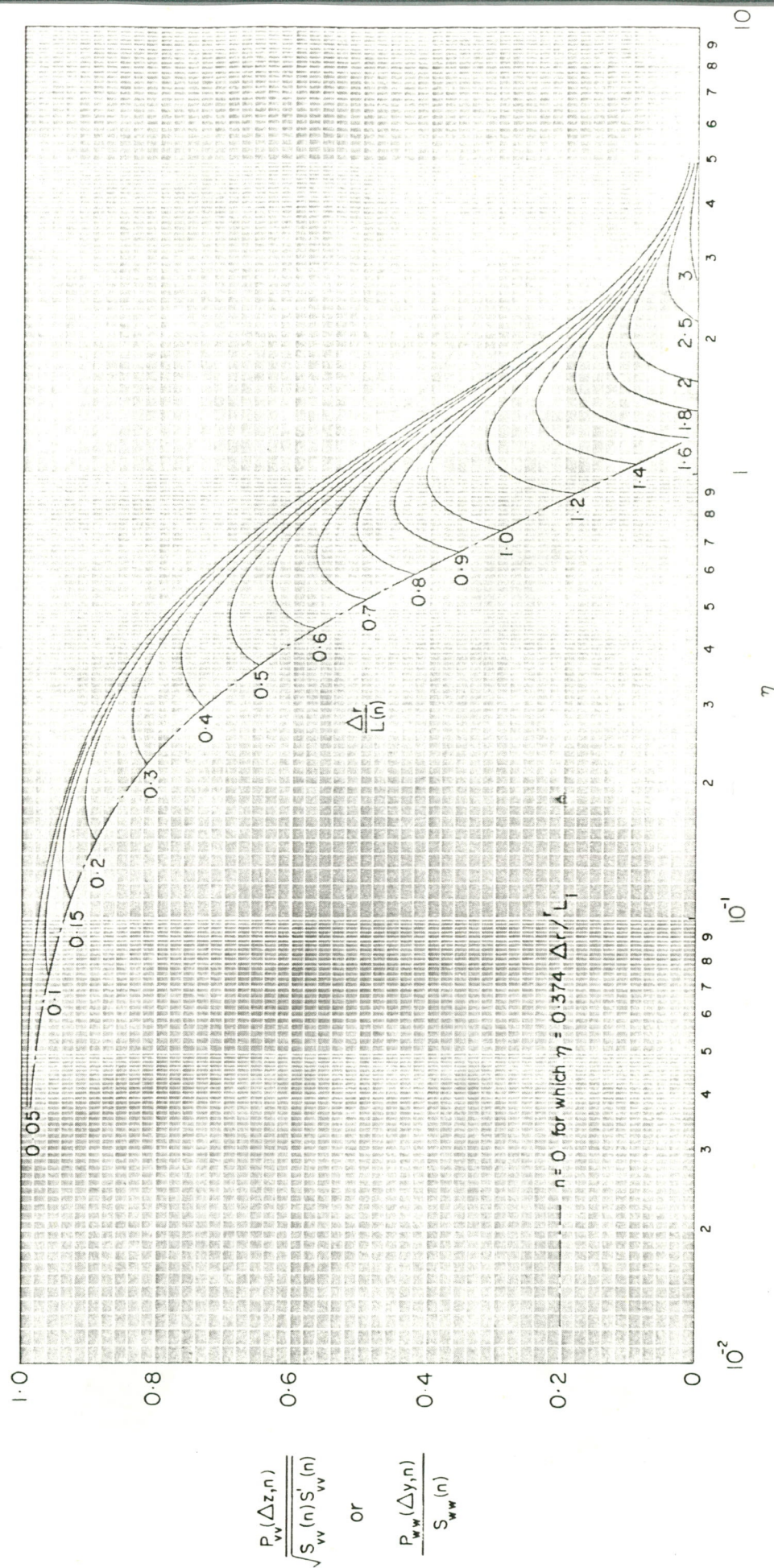
			31	32			
			31	32			
33	34	35	36	37	38	39	30.
1	2	3	4	5	6	7	8
	9	10	11	12	13	14	
	15	16	17	18	19	20	
			21	22			

5'10K

W!UQZV6[P6!QZt[PKtPσt!62

ΕΙΔ. ΒΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΜΕΣΟΓΑΛΗΣ ΕΚΚΗΣΙΟΔΙΩΜΑΤΑ (ΕΝΣ ΒΥ) 'ΔΕΦΕΕΙΤΕ



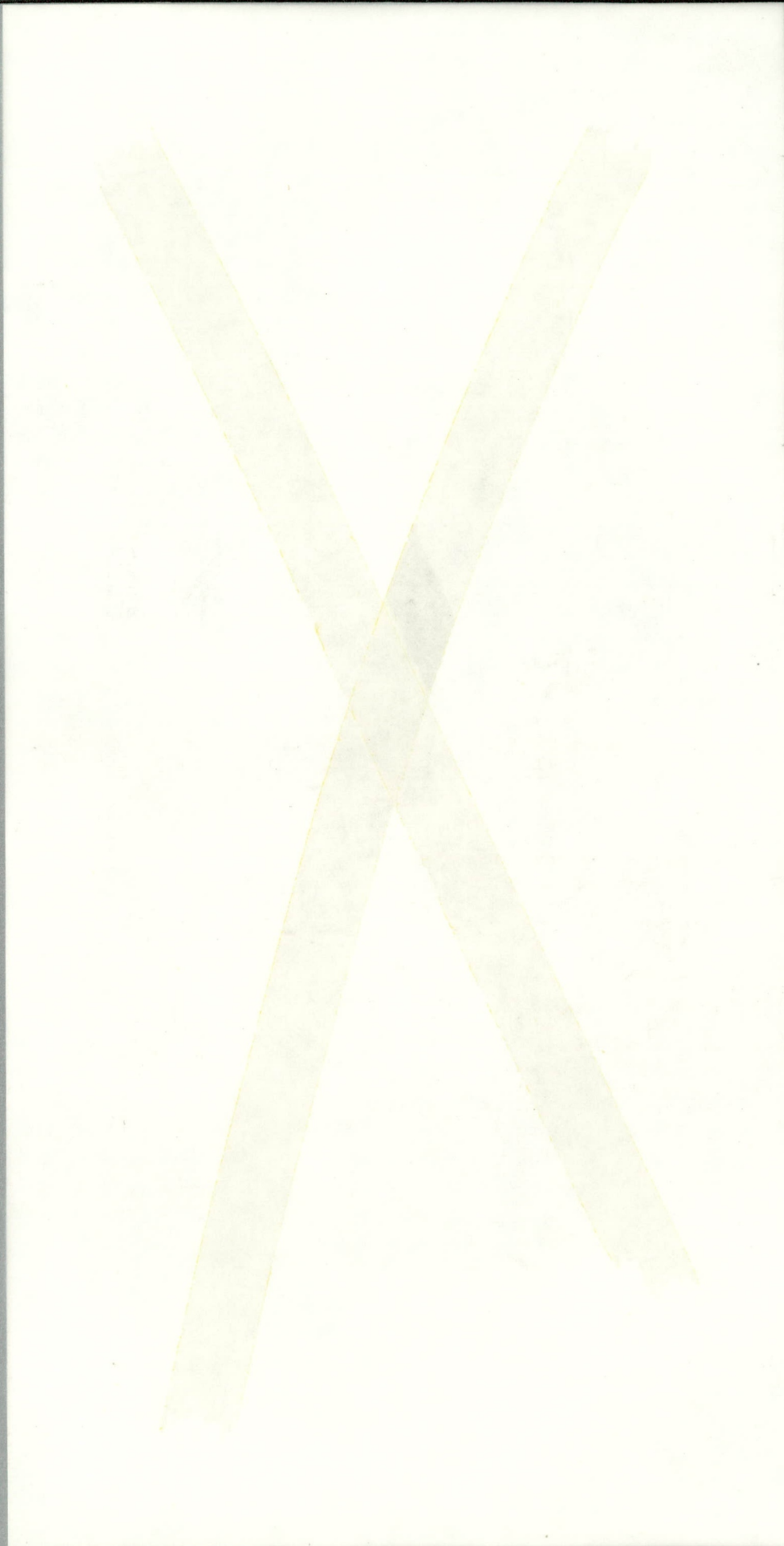


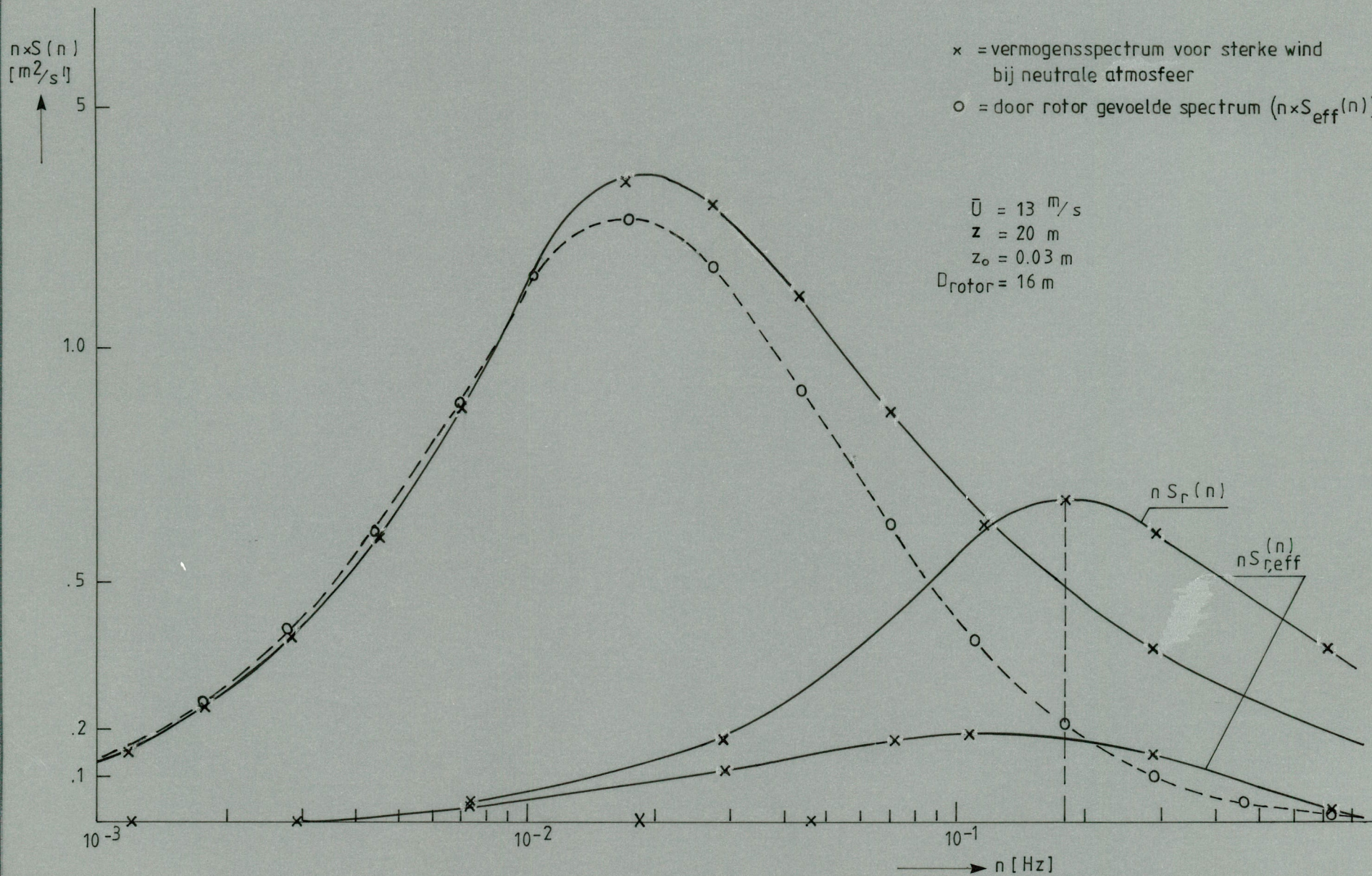
$\sqrt{\text{CO-coherence}}$ function for v and w components with vertical and lateral separations respectively

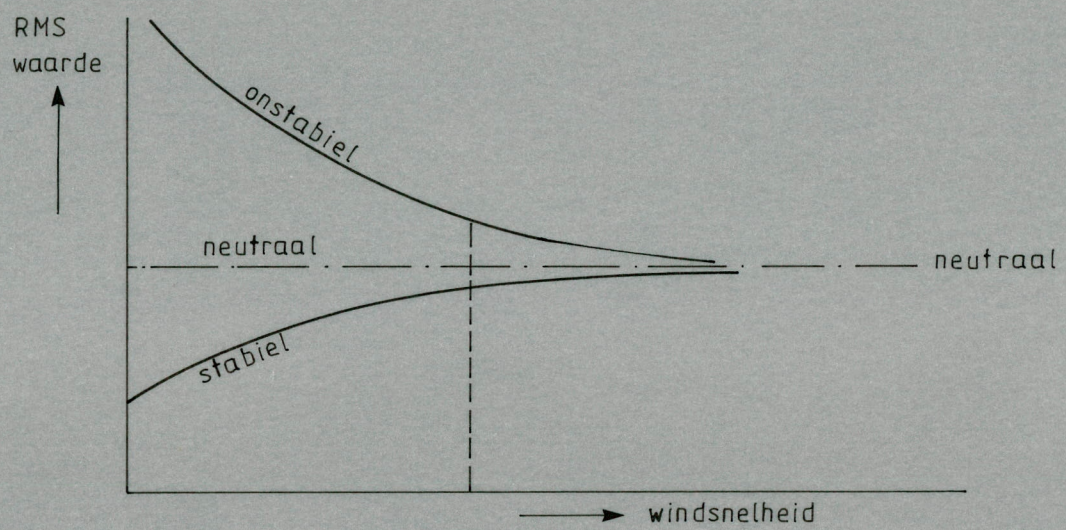
MT — TNO
11344
Fig.B4

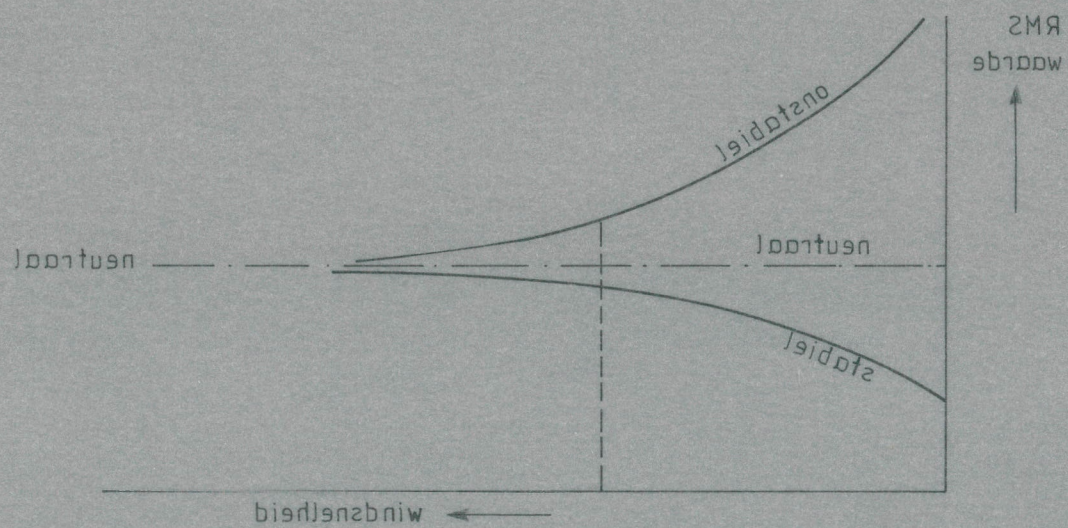
vertical and lateral separations respectively
VCO-coherence function for v and w components with

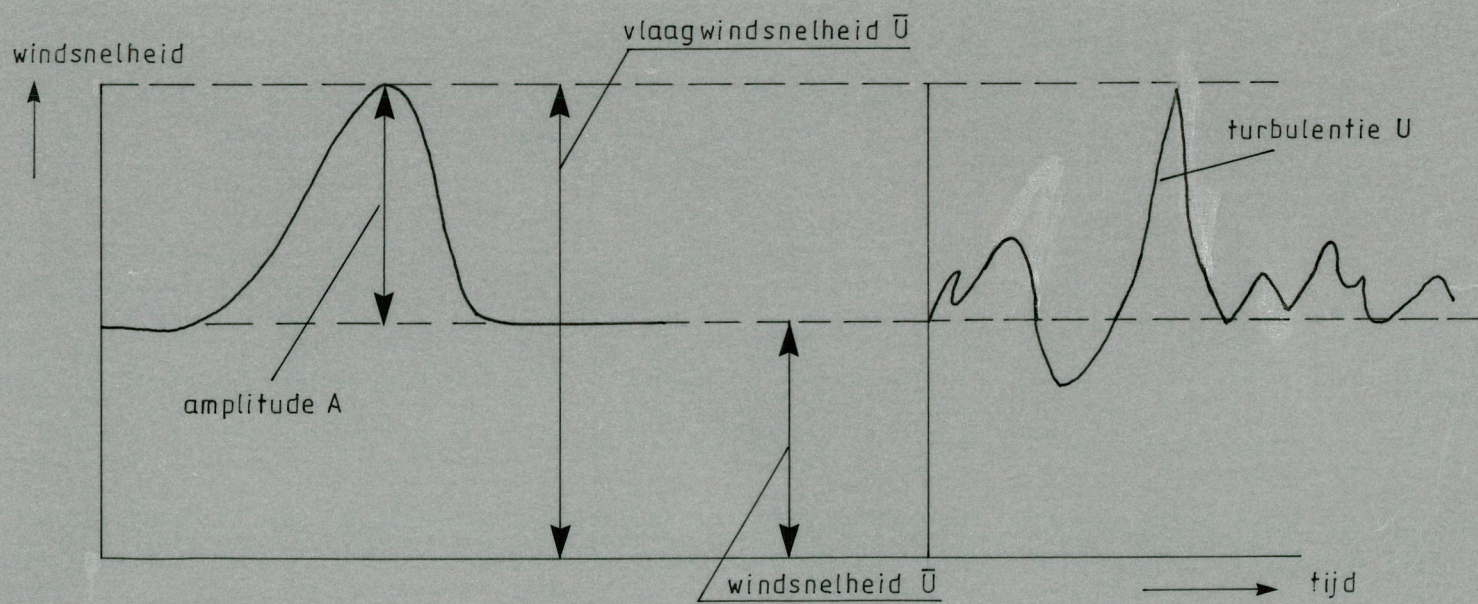
Fig. B4
11344
M1 - TNO

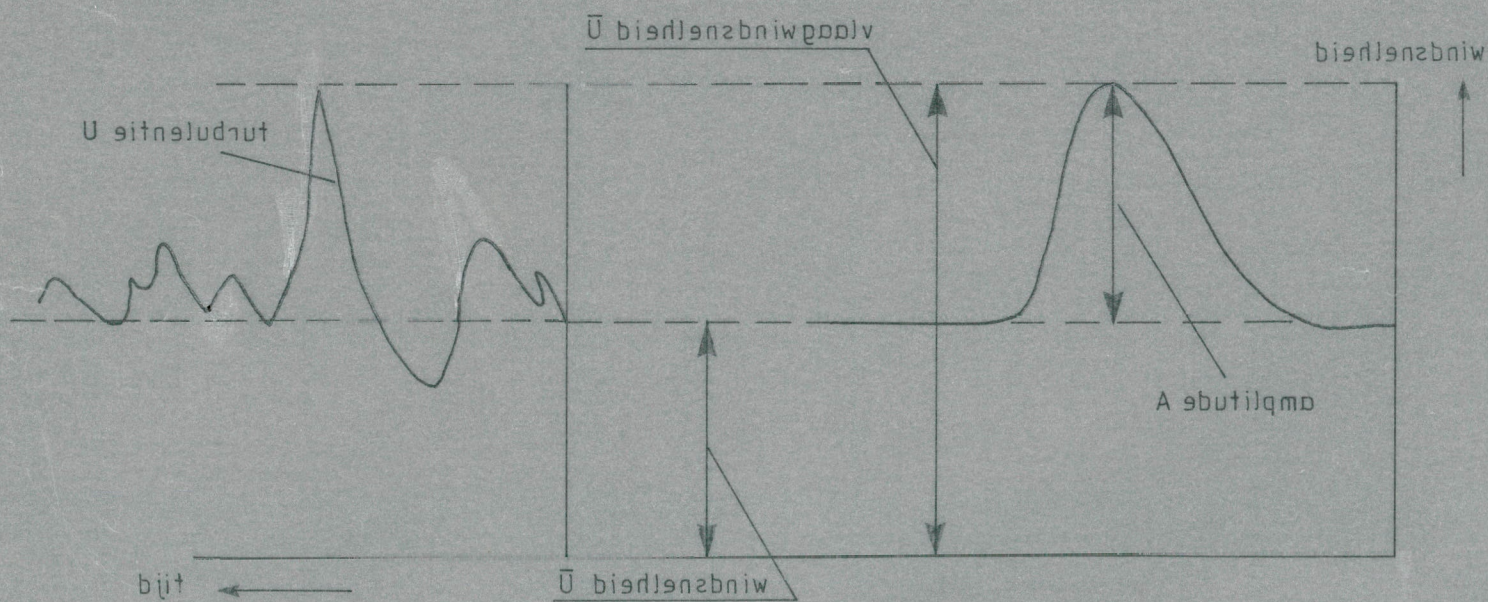




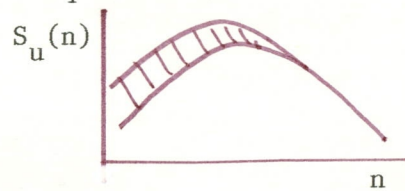








Tabel 2 : Overzicht beschikbare turbulentie statistiek, gemeten in één ruimtelijke punt

grootheid	<u>één punt data</u>			opmerkingen
	U	V	W	
<u>amplitude domein</u>				
RMS-waarden	+ ($\pm 15\%$)	+ ($\pm 20\%$)	+ ($\pm 15\%$)	{ 90% binnen aangegeven marge spreiding groter bij ruw terrein
co-coherenties	$\overline{UW} : t$	$\overline{UV} \approx 0$	$\overline{VW} \approx 0$	
kansdichtheid	+ (Gaussisch)	+ (Gaussisch)	$\pm$ (Gaussisch) (afwijkingen groot)	dicht bij de bodem (< 30 m) is skewness > 0 . Hier is geen "model" voor.
<u>Frequentie domein</u>				
spectra	+	+	+	afwijkingen zijn functie van frequentie: 
kruisspectra	$\overline{UW} +$	0	0	
<u>tijdsdomein</u>				
correlatie	+ ($\square$)	+ ($\square$)	+ ($\square$)	(x) Fourier getransformeerd van spectra, meestal empirisch

U = longitudinal

V = lateraal

W = verticaal

(+ : goed; $\square$: matig; - : afwezig)

Tabel 3 : Twee punts statistiek

		twee punts data		
grootheid	U	V	W	opmerkingen
<u>amplitude domein</u>				
joint probability	aanname : Gaussisch			(nauwelijks gemeten)
covarianties	(zie bij kruiscorrelaties)			
<u>Frequentie domein</u>				
kruisspectra	$\Delta x : +$	$\Delta x : +$	$\Delta x : +$	afwijkingen zijn functie van frequentie én separatie:
(reël + imaginair	$\Delta y : +$	$\Delta y : \square$	$\Delta y : +$	dichtbij hoog frequent: geringe afwijkingen
+ coherentie)	$\Delta z : +$	$\Delta z : +$	$\Delta z : \square$	ver weg en/of laag frequent: grote afwijkingen
<u>tijdsdomein</u>				
kruiscorrelatie	$\Delta x : + (\square)$	$\Delta x : + (\square)$	$\Delta x : + (\square)$	Fourier getransformeerd van kruisspectra: zeer complex (+)
($\tau=0$, symmetrische	$\Delta y : + (\square)$	$\Delta y : -$	$\Delta y : + (\square)$	meestal empirisch ($\square$)
+ antisymmetrische deel	$\Delta z : + (\square)^*$	$\Delta z : + (\square)$	$\Delta z : -$	* kruiscorrelatie bij $\tau=0$ levert instantane shear!

(Δ : separatie)

U, x : longitudinal

V, y : lateraal

W, z : verticaal

(+ : goed; $\square$: matig; - : afwezig)