

PUBLIKATIE

WINDKARAKTERISERING TEN BEHOEVE VAN HET
OPSTELLEN VAN ONTWERPCRITERIA VOOR
KLEINE WINDTURBINES

G.L.H. Beugeling

P.E.J. Vermeulen



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenank 501

telex 36395 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Het in deze paper beschreven onderzoek is
uitgevoerd in opdracht van het NLR, als
onderdeel van het door het NLR, in op-
dracht van de PEO, gecoördineerde project
"Ontwerp criteria voor kleine windtur-
bines".

Ref. nr. : 85-014776

Dossier nr.: 8724-13702

Datum : november 1985

Paper te presenteren op de Nationale
Windenergie Conferentie 1985.

17, 18 en 19 december 1985,

Noordwijkerhout.

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

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten
en verplichtingen van opdracht-
gever en opdrachtnemer verwezen
naar de „Algemene Voorwaarden
voor Onderzoeks- en Ontwikke-
lingsopdrachten aan TNO 1979"
dan wel de desbetreffende overeen-
komsten tussen partijen gesloten overeen-
komst.

© 1985, TNO, 's-Gravenhage

WINDKARAKTERISERING TEN BEHOEVE VAN HET
OPSTELLEN VAN ONTWERPCRITERIA VOOR
KLEINE WINDTURBINES

G.L.H. Beugeling

P.E.J. Vermeulen

Het in deze paper beschreven onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het NLR, als onderdeel van het door het NLR, in opdracht van de PEO, gecoördineerde project "Ontwerp criteria voor kleine windturbines".

Paper te presenteren op de Nationale Windenergie Conferentie 1985.
17, 18 en 19 december 1985, Noordwijkerhout.

SAMENVATTING

Er is een rekenmodel ontwikkeld ten behoeve van het opstellen van eenvoudig toepasbare en naar rotortype genuanceerde ontwerpcriteria voor kleine windturbines. Met dit model kan men de turbulente windsnelheids- en windrichtingsfluctuaties berekenen zoals de draaiende rotor van een windturbine die "voelt". Het model maakt gebruik van statistische methoden. Zowel vermoeiings- en extreme "windvlagen" ten behoeve van ontwerpberekeningen als turbulente windrichtingsveranderingen kunnen worden geconstrueerd. Voor een specifieke kleine windturbine worden de verschillende ontwerpwindvlagen (voor verschillende klassen van uurgemiddelde windsnelheid op ashoogte), de turbulente windrichtingsfluctuaties en de windschering gegeven.

INHOUDSOPGAVEPag.

SAMENVATTING

1.	INLEIDING	2
2.	MODELONTWIKKELING	4
3.	NORMALE EXTERNE BELASTING BIJ NORMAAL BEDRIJF	6
3.1	Vermoeiingswindvlagen	6
3.2	Windrichtingsfluctuaties	7
3.3	Windschering	8
4.	ABNORMALE EXTERNE BELASTING BIJ NORMAAL BEDRIJF	8
4.1	Extreme windvlagen bij normaal bedrijf	8
4.2	Extreme windsnelheden bij normaal parkeren	9
5.	NORMALE EXTERNE BELASTING ONDER FAALSITUATIES	10
5.1	Faalsituaties bij normaal bedrijf	10
5.2	Extreme windsnelheden bij gefaald parkeren	10
6.	CONCLUSIES	11

REFERENTIES

TABELLEN : 1 en 2

FIGUREN : 1 t/m 7

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 ontwerpnorm "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, ontwerp-criteria die op eenvoudige wijze toegepast kunnen worden. In de

beginfase van het project zijn door de vier instituten belastingsgevallen opgesteld welke bij het ontwerp van een windturbine in beschouwing genomen dienen te worden (zie referentie 1 voor een overzicht). Bij de berekeningen voor elk van deze belastingsgevallen zijn windgegevens nodig.

De voor het ontwerpen van windturbines benodigde windgegevens zijn niet te vinden in de bestaande bouwvoorschriften. Enkele redenen hiervoor zijn hieronder aangegeven:

- Bij bouwwerken kan de dynamische responsie veelal in het frequentiedomein beschreven worden en de normen zijn daarop gericht. Bij windturbines wordt daarentegen bijna uitsluitend in het tijdsdomein gerekend.
- Bij windturbines is de vermoeiingsanalyse uiterst belangrijk, terwijl dat bij bouwwerken veel minder het geval is.
- Bij windturbines kan de maatgevende belasting bij veel lagere gemiddelde windsnelheden optreden dan bij bouwwerken het geval is.

Vanwege deze redenen, is het noodzakelijk om een analyse uit te voeren van de voor het ontwerpen benodigde windgegevens. Dit deel van het project is uitgevoerd door MT-TNO.

Uitgaande van de belastingsgevallen welke in beschouwing genomen dienen te worden (referentie 1) is in tabel 1 een overzicht gegeven van de bij groepen belastingsgevallen voor het ontwerp "benodigde" windgegevens. In de tabel is aangegeven op welke wijze de wind "beschreven" of "geschematiseerd" dient te worden om sterkte en vermoeiingsberekeningen voor windturbines te kunnen uitvoeren. Van belang is dat in een aantal gevallen rekening gehouden wordt met het feit dat de zeer snelle windfluctuaties weinig 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.

Bij de ontwikkeling van de ontwerpwindgegevens is, in verband met het stochastische karakter van de windfluctuaties, gebruik gemaakt van beschrijvingen in kansen. Hierbij wordt een relatie gelegd tussen de "kans van voorkomen" van een bepaalde fluctuatie en de "grootte" van die fluctuatie (zie verder paragraaf 2).

Bij het opstellen van de ontwerpwindgegevens kunnen een aantal fasen worden onderscheiden, nl.:

- . uitwerken van de achtergronden - meteorologie
 - relevante belastingen;
- . keuze van de methodes;
- . opstellen van de kansbeschrijvingen;
- . uitwerken van de relaties tot computerprogrammatuur;
- . opstellen van "mogelijke" ontwerpwindgegevens;
- . keuze (door vastleggen van kansniveau's) van ontwerpwindgegevens.

Tijdens deze ontwikkeling van de ontwerpwindgegevens was er een intensief overleg met de overige deelnemers aan het project. De ontwikkeling had vaak een iteratief karakter.

Benadrukt moet daarom worden dat bij de voortgang en afronding van het deelproject "windkarakterisering" de overige deelnemers een be-

langrijke rol hebben gespeeld; dit geldt in het bijzonder voor de uiteindelijke keuze van de "kans van voorkomen" van bepaalde windfluctuaties.

2. MODELONTWIKKELING

Noodzaak tot modelontwikkeling

Kenmerkend voor de atmosferische turbulentie is:

- De snelle windfluctuaties vertonen weinig correlatie tussen ruimtelijk verschillende punten (dat wil zeggen: de fluctuaties van de windsnelheid op 2 punten op het rotorvlak verlopen in de tijd maar ten dele gelijk).
- De variaties zijn op het oog nogal willekeurig en vanwege dat stochastische karakter alleen in statistische termen te beschrijven.

Bij de analyse van sterkte en vermoeiing van windturbines is behoefte aan één deterministisch snelheidsverloop dat de responsie van de gehele rotor of delen daarvan beschrijft en waarvan bekend is hoe vaak dit verloop kan voorkomen. Beschikbaar is slechts een beschrijving van de atmosferische turbulentie in termen van rms niveau's, auto- en kruisspectra en kansdichtheidsverdelingen. De gevolgde aanpak is om via theoretische weg uit deze standaard turbulentiebeschrijving de voor het ontwerp van windturbines benodigde windgegevens af te leiden. Het uitgangspunt bij de theoretische benadering is een beschrijving van de turbulentie in het frequentie domein: de spectrale vermogensdichtheidsfunctie (hier kortweg "spectrum" genoemd) (referentie 2 en 3).

Via bewerkingen met het spectrum worden statistische kenmerken afgeleid die bij de verdere analyse van sterkte en vermoeiing gebruikt worden.

Middeling over het rotorvlak

De berekening van de over het rotorvlak gemiddelde turbulentie gaat langs strikt formele weg.

De momentane, over het rotorvlak gemiddelde windsnelheid, kan geschreven worden als de integraal over het rotorvlak van de lokale momentane windsnelheden. Via statistische technieken kan het spectrum van de over het rotorvlak gemiddelde windsnelheid berekend worden.

Ter illustratie is in figuur 1 het resultaat van zo'n berekening uitgezet.

De getrokken lijn is het spectrum zoals dat in één punt gemeten kan worden, terwijl de gestippelde lijn het over het rotorvlak gemiddelde spectrum weergeeft. Bij lage frequenties zijn beide spectra gelijk. Lage frequenties komen overeen met grote wervels in de atmosfeer met een lengte van meerdere honderden meters. Deze wervels omvatten de gehele rotor. Met toenemende frequentie nemen de wervelafmetingen af. Ten gevolge hiervan neemt ook de kans af dat zo'n snelle fluctuatie de gehele rotor treft. Het over het rotorvlak gemiddelde spectrum gaat derhalve met toenemende frequentie steeds meer afwijken van het in één punt gemeten spectrum.

Het oppervlak onder de spectrum curve komt overeen met het kwadraat van de standaarddeviatie. De standaarddeviatie van de over het rotorvlak gemiddelde windsnelheid is derhalve lager dan de in één punt bepaalde standaarddeviatie, zoals geïllustreerd in onderstaande tabel:

rotordiameter [m]	standaarddeviatie [m/s]
één punt	2.2
12	2.0
20	1.9

($U = 13$ m/s, $H = 20$ m, $Z_0 = 0.03$ m)

Beschrijving in het tijdsdomein

In figuur 2 is het verloop van de over het rotorvlak gemiddelde windsnelheid uitgezet tegen de tijd. Vanwege het stochastische karakter van de atmosferische turbulentie valt geen "kenmerkend" patroon te herkennen. Responsieberekeningen kunnen daarom in feite het beste uitgevoerd worden door tijdreeksen van de over het rotorvlak gemiddelde windsnelheid te genereren, (met behulp van statistische technieken) en deze tijdreeksen te gebruiken als invoer voor een responsieprogramma. Vanwege de grote numerieke inspanning is zo'n berekening echter hooguit toepasbaar in het eindstadium van het ontwerp van een concrete windturbine.

Veelal is er geen andere mogelijkheid dan uit te gaan van enkele deterministische patronen; kortweg "windvlagen" genoemd. Met een windvlaag wordt hier een fluctuatie rond of boven het uurgemiddelde bedoeld, met een vast verloop van de windsnelheid tegen de tijd dat uit de werkelijke turbulentie is afgeleid ten behoeve van een duidelijk omschreven responsieberekening. Vooral de laatste toevoeging is essentieel zoals hieronder blijkt.

Bij vermoeiingsberekeningen wordt het aantal uren tijdens de levensduur gesplitst in een aantal klassen voor de gemiddelde windsnelheid en wordt per klasse een vermoeiingswindvlaag gedefinieerd. De gehele tijd binnen zo'n klasse wordt "gevuld" met één en dezelfde vermoeiingswindvlaag waarbij de vermoeiing bepaald wordt door de grootte van de totale wisseling (top-top). Als eis voor een vermoeiingswindvlaag geldt derhalve dat ze periodiek is.

Bij sterkte berekeningen worden de materiaalspanningen berekend bij één of bij enkele extreem optredende windsnelheden. De grootste spanningen blijken op te treden vóór of tijdens de maximale amplitude. De bijbehorende vlagen behoeven dus niet periodiek te zijn. Figuur 2 geeft het verschil tussen beide concepten aan.

Een aantal kenmerkende grootheden van een windvlaag kunnen via theoretische weg berekend worden uit het spectrum van de over het rotorvlak gemiddelde windsnelheid.

Bij deze afleiding staat de veronderstelling centraal dat de atmosferische turbulentie Gaussisch is. In figuur 3 is aangegeven welke grootheden via statistische technieken berekend kunnen worden. Omdat de kansdichtheidsverdeling Gaussisch is kunnen overschrijdingskansen en extreme waardeverdelingen van de snelheid berekend worden. De amplitude A van een vlaag is hiermee te bepalen.

Door differentiatie van het snelheidssignaal ontstaat het verloop van de "versnelling" met de tijd. Voor een Gaussisch uitgangssignaal is het gedifferentieerde signaal eveneens Gaussisch. De kansverdeling van de versnelling du/dt kan dan berekend worden.

De gemiddelde vlagduur T_0 volgt uit het aantal doorsnijdingen van het gemiddelde niveau (zero-crossing rate) dat rechtstreeks uit het spectrum berekend kan worden.

Naast deze via statistische technieken berekenbare grootheden is bovendien gebruik gemaakt van experimentele correlaties voor de kansverdeling van de excursieduur boven een gegeven niveau.

Door overschrijdingsniveau's te kiezen voor de snelheid en voor de versnelling is de windvlaag al voor een groot deel vastgelegd. Omdat snelheid en versnelling voor een Gaussisch signaal ongecorrleerd zijn kunnen beide overschrijdingsniveau's apart vastgesteld worden. De waarschijnlijkheid van de overschrijding van de combinatie van snelheid en versnelling is dan kleiner dan de beide overschrijdingsniveau's.

Dit betekent dat de kans op gelijktijdig voorkomen van een extreme amplitude en een extreme versnelling kleiner is dan de afzonderlijke kansen.

De vlagvorm kan niet via statistische technieken uit het spectrum afgeleid worden. De veel gebruikte schematisering van vlagen via sinus of cosinus heeft als nadeel dat daarvoor één vaste relatie bestaat tussen versnelling, periode en amplitude.

Bovendien blijkt uit vergelijking met de correlaties voor de excursieduur boven een bepaald niveau dat de "top" van een sinusvormige vlaag te kort duurt.

Gekozen is daarom voor een windvlaagmodel dat opgebouwd is uit stukjes van een 4e graads polynoom; waarbij de constanten rechtstreeks afgeleid kunnen worden uit de in figuur 3 aangegeven parameters A, B en T_0 alsmede uit de eis dat de maximale versnelling B optreedt tijdens een doorsnijding van het gemiddelde niveau. Voor nadere details en achtergronden wordt verwezen naar het betreffende achtergrondrapport (referentie 4).

3. NORMALE EXTERNE BELASTING BIJ NORMAAL BEDRIJF

3.1 Vermoeiingswindvlagen

De vorm van de vermoeiingswindvlagen volgt uit de in paragraaf 2 gegeven overwegingen.

In formulevorm (zie figuur 4 voor een schets):

$$\begin{aligned}
 U(t) &= \bar{U} + u(t) & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} T_0 \\
 &= \bar{U} + u\left(\frac{1}{2} T_0 - t\right) & \frac{1}{2} T_0 \leq t \leq T_0 \\
 &= \bar{U} - u\left(t - \frac{1}{2} T_0\right) & T_0 \leq t \leq \frac{3}{2} T_0 \\
 &= \bar{U} - u\left(2 T_0 - t\right) & \frac{3}{2} T_0 \leq t \leq 2 T_0
 \end{aligned}$$

$$\text{met } u(t) = at + bt^3 + ct^4.$$

Voor elke vermoeiingsvlaag worden de amplitude A en de maximale versnelling B gekozen op grond van een overschrijdingskans (bij een gegeven uurgemiddelde windsnelheid) van 10%.

De vlagen worden opgesteld voor drie snelheidsklassen. Onderstaande tabel vergelijkt de berekende A en B voor open terrein ($Z_0 = 0.03$ m) en voor stedelijk gebied ($Z_0 = 1$ m).

klasse	gebied $\bar{U}$ [m/s]	open terrein			stedelijk gebied		
		A [m/s]	B [m/s ²]	T ₀ [s]	A [m/s]	B [m/s ²]	T ₀ [s]
I	4 ÷ 8 7	1.4	0.5	9	2.3	0.9	8
II	8 ÷ 12 11	2.1	1.1	6	3.5	1.9	6
III	12 ÷ 20 15	2.9	1.9	5	4.7	3.3	4

— ontwerpwaarden.

Omdat ook in open terrein de turbulentie sterk verhoogd kan worden door de aanwezigheid van enkele nabij gelegen obstakels is gekozen voor ontwerpwindvlagen die gebaseerd zijn op stedelijk gebied. De ontwerpvlagen worden beschreven door bovenstaande formules met voor de constanten a, b en c de onderstaande waarden.

windklasse	$\bar{U}$	a	b	c
I	7 m/s	0.9 - 0.025		0.0012
II	11 m/s	1.9 - 0.1148		0.0110
III	15 m/s	3.3 - 0.125	- 0.0563	

Voor klasse II is de vlag geschetst in figuur 4.

3.2 Windrichtingsfluctuaties

Met de methode waarmee de over het rotorvlak gemiddelde windsnelheidsfluctuaties worden berekend kunnen ook de over het rotorvlak gemiddelde windrichtingsfluctuaties ten gevolge van normale turbulentie worden berekend.

De schaal van de dwarsturbulentie (dit levert de windrichtingsfluctuaties) is veel kleiner dan de turbulentie in langsrichting ("met de wind mee").

De turbulente windrichtingsfluctuaties zijn daardoor veel minder gecorreleerd over het rotorvlak dan de fluctuaties in langsrichting.

De standaarddeviatie van de over het rotorvlak gemiddelde windrichtingsfluctuaties is hierdoor ca. 50% lager dan de "één punts" standaarddeviatie.

De tijdschaal van de turbulente windrichtingsfluctuaties is zo klein (spectrum maximum op ca. 5 seconden) dat dit door geen enkel krui-systeem gevolgd kan worden.

Vermoeiingsbelastingen worden daarom berekend alsof de rotor constant onder één vaste kruihoekfout θ staat.

Voorwat betreft de invloed van de turbulente windrichtingsfluctuaties op θ worden dezelfde uitgangspunten gehanteerd als in paragraaf 3.1, nl. overschrijdingsniveau's van 10% en stedelijke ruwheid.

Er volgt dan $\theta = 10^\circ$.

3.3 Windschering

De vermoeiingswindvlagen en de windrichtingsveranderingen zijn afgeleid uit de "over het rotorvlak gemiddelde" windstatistiek.

Omdat de turbulentie niet perfect gecorreleerd is over het rotorvlak ontstaan momentane snelheidsverschillen in zowel verticale als horizontale richtingen. Omdat deze momentane verschillen veroorzaakt worden door de turbulentie is ook het "momentane snelheidsverschil" een stochastische variabele. In het kader van het onderzoek is een methode ontwikkeld waarmee de statistiek van het momentane snelheidsverschil berekend kan worden uit de kruiscovariantie functie (zie verder het achtergrondrapport: (referentie 4)).

In de atmosfeer is er in verticale richting bovendien een tijds-gemiddeld verschil in windsnelheid dat samenhangt met het gemiddelde windprofiel.

De verticale windschering (= snelheidsverschil tussen boven- en onderzijde van de rotor) bestaat dus uit de som van een gemiddeld niveau en een fluctuerende component. Omdat de laatste een stochastische variabele is dienen ontwerpwaarden gekozen te worden door het vastleggen van overschrijdingsniveau's.

Conform de in paragraaf 3.1 en 3.2 gekozen niveau's is ook voor de windschering uitgegaan van een overschrijdingsniveau van 10%.

Figuur 5 geeft aan hoe de windschering met 10% overschrijdingskansen afhangt van ashoogte en terreinruwheid.

Voor de vermoeiingsberekeningen is uitgegaan van $\frac{\Delta U}{U} = 0.40$.

4. ABNORMALE EXTERNE BELASTING BIJ NORMAAL BEDRIJF

4.1 Extreme windvlagen bij normaal bedrijf

De vorm van de extreme windvlagen volgt eveneens uit de in paragraaf 2 gegeven overwegingen.

De windvlagen worden beschreven door onderstaande formules:

$$U(t) = \bar{U} + U(t) \quad 0 \leq t \leq \frac{1}{2} T_0$$

$$\bar{U} + U(\frac{1}{2} T_0 - t) \quad \frac{1}{2} T_0 \leq t \leq T_0$$

waarin

$$U(t) = at + bt^3 + ct^4$$

(zie ook figuren 6 en 7).

De maximale amplitude A en de maximale gradiënt (of versnelling) B kunnen worden berekend indien voor A en B overschrijdingskansen zijn gekozen. Zoals in paragraaf 2 is vermeld behoeven extreme amplituden niet samen te vallen met extreme gradiënten. Er zijn daarom twee verschillende extreme vlagen gedefinieerd waarbij hetzij de amplitude, hetzij de gradiënt extreem is. Gekozen is voor de volgende uitgangspunten.

a) Extreme amplitude windvlaag

- Totale overschrijdingskans voor de amplitude 1 maal per 50 jaar.
- Totale overschrijdingskans voor de maximale versnelling 1 tot 10 maal per jaar.

b) Extreme gradiënt windvlaag

- Totale overschrijdingskans voor de amplitude 1 tot 10 maal per jaar.
- Totale overschrijdingskans voor de maximale versnelling 1 maal per 50 jaar.

De totale kans van voorkomen wordt berekend uit de kans van voorkomen van de gemiddelde windsnelheid (voor de drie klassen: 7, 11 en 15 m/s) en de kans van voorkomen van een extreme fluctuatie. Boven stedelijk gebied neemt de amplitude weliswaar toe, doch de kans van voorkomen van de beide hoogste windsnelheidsklassen neemt sterk af. Hoe sterk de kans van voorkomen afneemt hangt af van de lokatie en de omgevingsruwheid.

Gekozen is om de extreme windvlagen te berekenen voor open terrein ($Z = 0.03$ m) in combinatie met de gemiddelde windstatistiek voor Schiphol.

Deze uitgangspunten leveren in figuren 6 en 7 de gestelde ontwerp-windvlagen, welke beschreven worden met bovenstaande formules waarbij de volgende waarden voor de constanten gebruikt kunnen worden.

klasse	$\bar{U}$ m/s	extreme amplitude			extreme gradiënt		
		a	b	c	a	b	c
I	7	2	- 0.04	0.0028	2.6	- 0.145	0.0172
II	11	4	- 0.15	0.0141	5.3	- 0.581	0.0963
III	15	6.5	- 0.40	0.0496	8.6	- 1.760	0.398

Tabel 2 geeft de bijbehorende waarde voor A, B en T_0 .

4.2 Extreme windsnelheden bij normaal parkeren

Bij deze belastingssituatie zijn de regel- en beveiligingssystemen van de turbine in normaal bedrijf terwijl de maximale uurgemiddelde windsnelheid optreedt in combinatie met de maximale turbulente fluctuatie. De regelsystemen zorgen er echter voor dat de betref-

fende rotordelen onder een gunstige hoek worden aangestroomd. De windbelasting komt in dat geval overeen met de windbelasting op een normale bouwconstructie, zodat deze belasting met de normale bouwvoorschriften bepaald kan worden, waarnaar hier dan ook verwezen wordt (TGB-1972: referentie 5, of eventuele latere herzieningen).

5. NORMALE EXTERNE BELASTING ONDER FAALSITUATIES

5.1 Faalsituaties bij normaal bedrijf

Het uitgangspunt bij de berekening van de belastingen bij intern falen is dat bij deze belastingstoestanden niet met abnormale externe omstandigheden gerekend behoeft te worden.

De bij een bepaalde faalsituatie behorende windkarakterisering hangt direct samen met de aard van de faalsituatie en met het effect van de optredende belastingen. Aard en gevolg van faalsituaties kunnen echter alleen voor een concrete uitvoering van een windturbine nauwkeurig vastgesteld worden.

Er kan dan ook geen algemeen geldende windkarakterisering worden gegeven.

Voor een concreet geval kunnen de bijbehorende windcondities afgeleid worden uit de volgende uitgangspunten:

a) Belastingstoestanden die leiden tot vermoeiingsschade.

Hiervoor kan de normale externe windbelasting (paragraaf 3) per windklasse toegepast worden. Voor faalsituaties die slechts kortstondig aanhouden ("minuten") kunnen hogere overschrijdingskansen (bijvoorbeeld 25% in plaats van 10%) toegepast worden.

b) Belastingstoestanden die leiden tot hoge spanningen.

De te kiezen "windkarakterisering" hangt af van het verloop van de spanningen met de windsnelheid. Als deze constant toenemen met de windsnelheid dient een uurgemiddelde windsnelheid gekozen te worden tussen V_{Rated} en V_{out} , een en ander afhankelijk van de geschatte frequentie van voorkomen van de faalsituatie. Bij hoge frequenties wordt V_{out} gekozen.

De bijbehorende turbulentie is afhankelijk van de duur van de faalsituatie. Als de faalsituatie langdurig ("uren") kan aanhouden dan dient de turbulente fluctuatie gekozen te worden overeenkomstig een overschrijdingsniveau van 0.1%. Bij kortstondige faalsituaties kan met lagere overschrijdingskansen gerekend worden.

Voor de toe te passen berekeningsmethoden wordt verwezen naar het achtergrondrapport Deel II: "Windkarakterisering" (referentie 4).

5.2 Extreme windsnelheden bij gefaald parkeren

De kans bestaat dat de in paragraaf 4.2 genoemde regel- en beveiligingssystemen niet correct werken. De rotordelen kunnen in dat geval ongunstig aangestroomd worden.

Vanwege de ontwerpfilosofie behoeft zo'n ongunstige situatie niet gecombineerd te worden met de voor normaal bedrijf geldende extreme windbelasting.

Gekozen is voor een evenschrijdingskans van de uurgemiddelde windsnelheid van 1 tot 5 maal per jaar, zoals deze bijvoorbeeld optreedt tijdens een hevige herfststorm.

Gebruik makend van de windstatistiek van Schiphol ($Z_0 = 0.03$ m, $H = 20$ m) geldt: (afgeronde getallen).

optreden	$\bar{U}_{10}$, [m/s]	$\bar{U}(H)$, [m/s]
10 x per jaar	18	20
2 x per jaar	21	24
1 x per 2 jaar	23	26

Als de regel- en beveiligingssystemen falen, dan treedt dat hoogstwaarschijnlijk op vanwege een of ander defect. De faalsituatie is dan pas opgeheven na reparatie.

Indien een hevige herfststorm voorkomt dan ondervindt de rotor zeker ook de tijdens dat uur optredende hoogste amplitude. Voor de turbulente fluctuatie wordt daarom een overschrijdingskans van 0.1% gehanteerd. De bijbehorende vlagfactor (= verhouding tussen extreme vlagwindsnelheid en de uurgemiddelde windsnelheid) is 1.55, berekend met $Z_0 = 0.03$ m en $H = 20$ m.

Gekozen is voor een ontwerpwindnelheid van 35 m/s.

6. CONCLUSIES

De voor sterkte- en vermoeiingsberekeningen benodigde windgegevens zijn in deze studie 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 de snelle windsnelheidsfluctuaties niet gelijktijdig optreden over het gehele rotorvlak zijn de windsnelheidsfluctuaties over het rotorvlak gemiddeld. Door deze middeling (uitgevoerd in het frequentie domein) zijn de over het hele rotorvlak "gevoelde" windvlagen te bepalen.

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

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 $z_0 = 1$ meter of $(\sigma_u/\bar{U})_{\text{eff}} = 0.25$.

Resultaat:

- periodieke wisseling, beschreven met behulp van een 4^e -graads polynoom, met amplitude A en halve periode T_0 .

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: - vlagvorm 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:

- vlagvorm 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] Föllings, F.,
Belastingen op kleine windturbines.
ECN Memo 0.825.00-GR (0084-19); 1985
- [2] Powell, D.C., Connell, J.R.,
Definition of gust model concepts and review of gust models.
Pacific Northwest Laboratories.
PNL Report PNL-3138, June 1980.
- [3] Frost, W., Turner, R.E.,
A discrete gust model for use in the design of wind
energy conversion systems.
Journal of Applied Meteorology Vol. 21 (1982) pp. 770-776.
- [4] Beugeling, G.L.H., Vermeulen, P.E.J.,
Ontwerpcriteria voor kleine windturbines
Deel 2: Windkarakterisering.
MT-TNO 85-010880, 1985.
- [5] Nederlands Normalisatie Instituut
Technische grondslagen voor de berekening van bouw-
constructies-TGB 1972.
NEN 3850.

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

(** dat wil zeggen een beschrijving in het tijdsdomein).

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	+ longitudinale turbulentie	niveau/amplitude
<u>abnormaal extern</u> (dit leidt tot extreme belastingen)	normaal bedrijf	kansverdeling, tussen V_{in} en V_{uit}	+ extreme longitudinale (*) fluctuatie + extreme windrichtings-(*) fluctuatie	amplitude/gradiënt windvlaag (**) windvlaag (**)
	normaal parkeren	absoluut extreem	+ extreme fluctuatie in longi- tudinale richting	(niveau bij nor- normaal parkeren ≡ TGB-72)
<u>normaal extern</u> (zowel extreme als vermoeiingsbelastingen)	abnormaal intern bedrijf	tussen V_{in} en V_{uit}	+ normale longitudinale (*) turbulentie	?
	abnormaal intern parkeren	(normaal) boven V_{uit}	+ normale longitudinale turbulentie	niveau/amplitude

Tabel 2 Extreme vlag-grootheden voor de windsnelheidsklassen.

klasse	$\bar{U}(H)$ [m/s]	A [m/s]	B [m/s ²]	T_o [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

$D = 16 \text{ m}$; $H = 20 \text{ m}$; $Z_o = 0,03 \text{ m}$; Schiphol

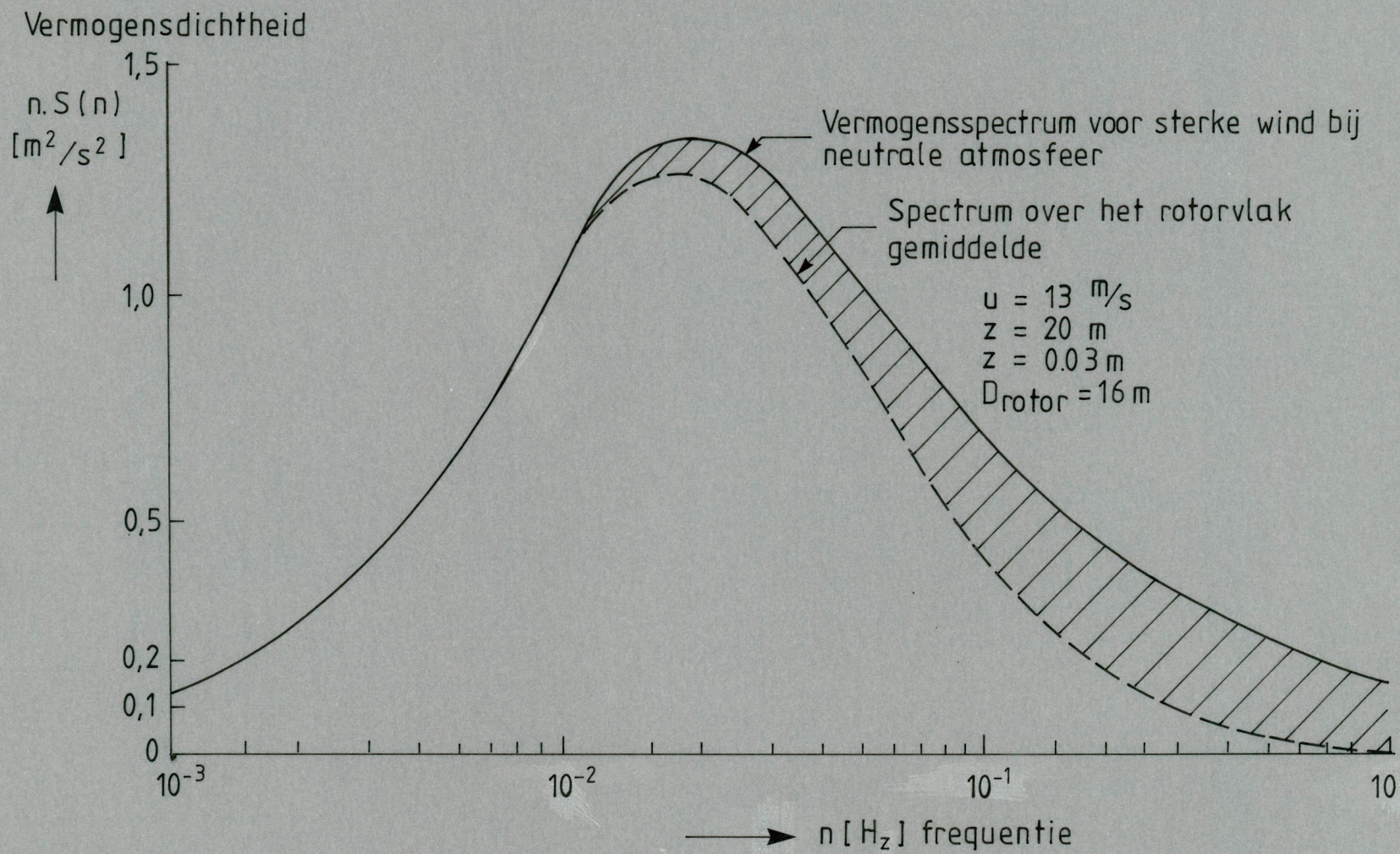
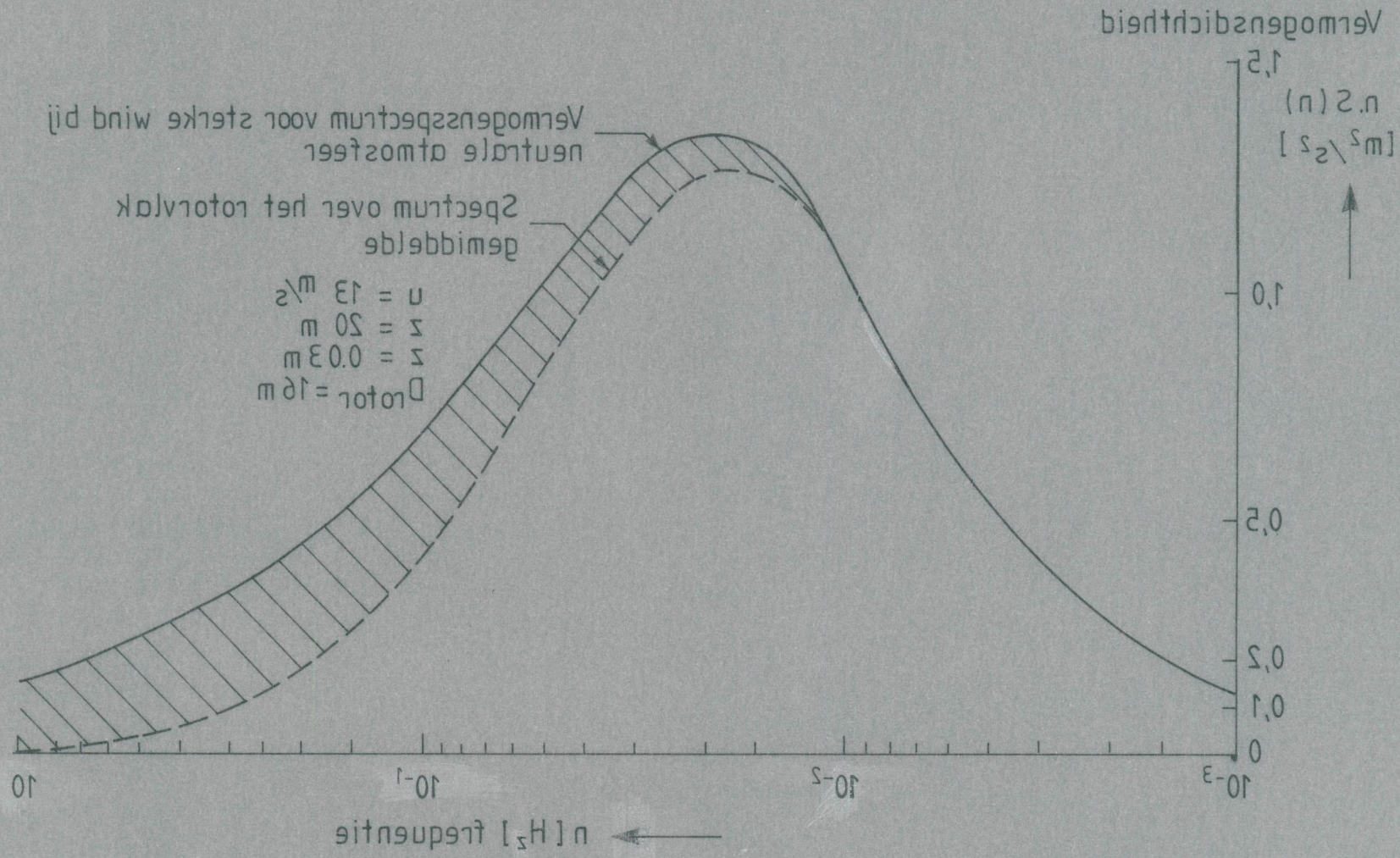


Fig.1 Variantiereductie bij hoge frequenties

Fig. 1 Variantiereductie bij hoge frequenties



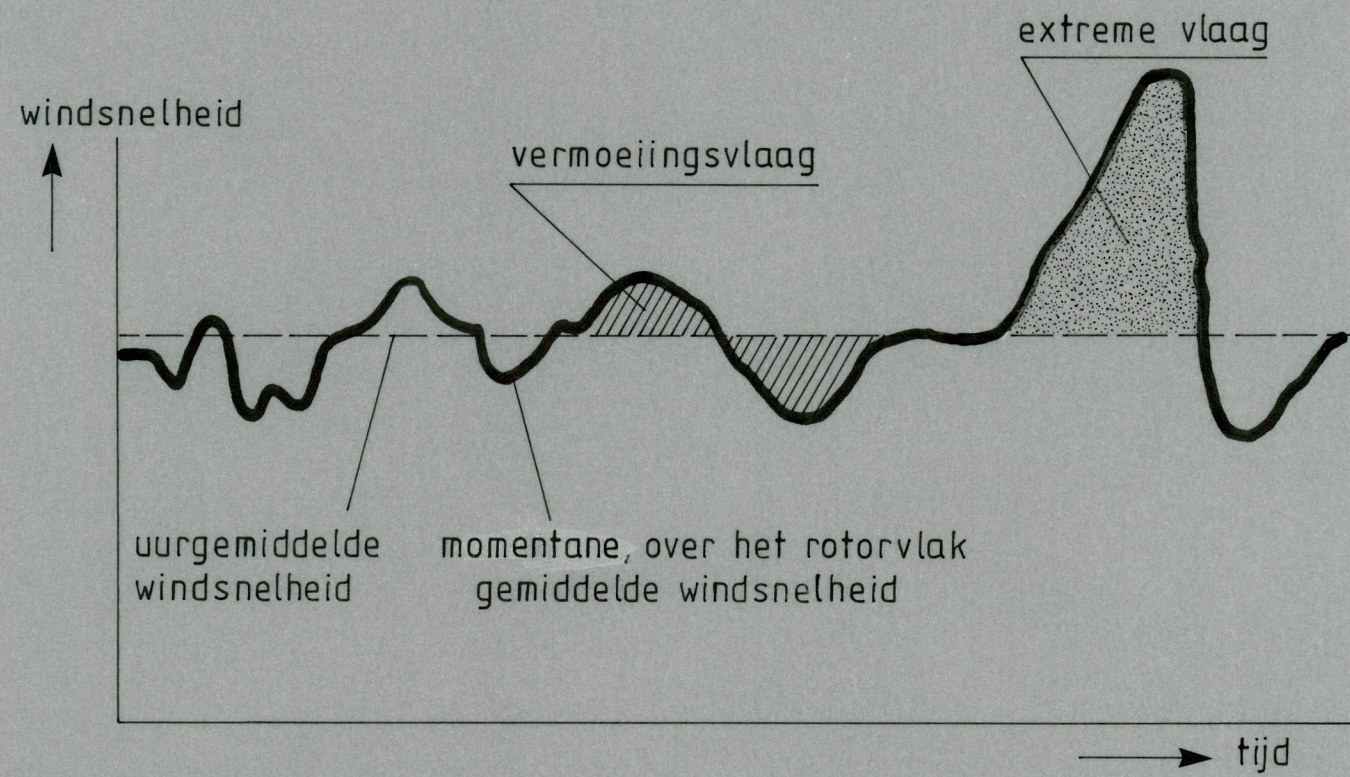


Fig. 2 Vlaag defintie

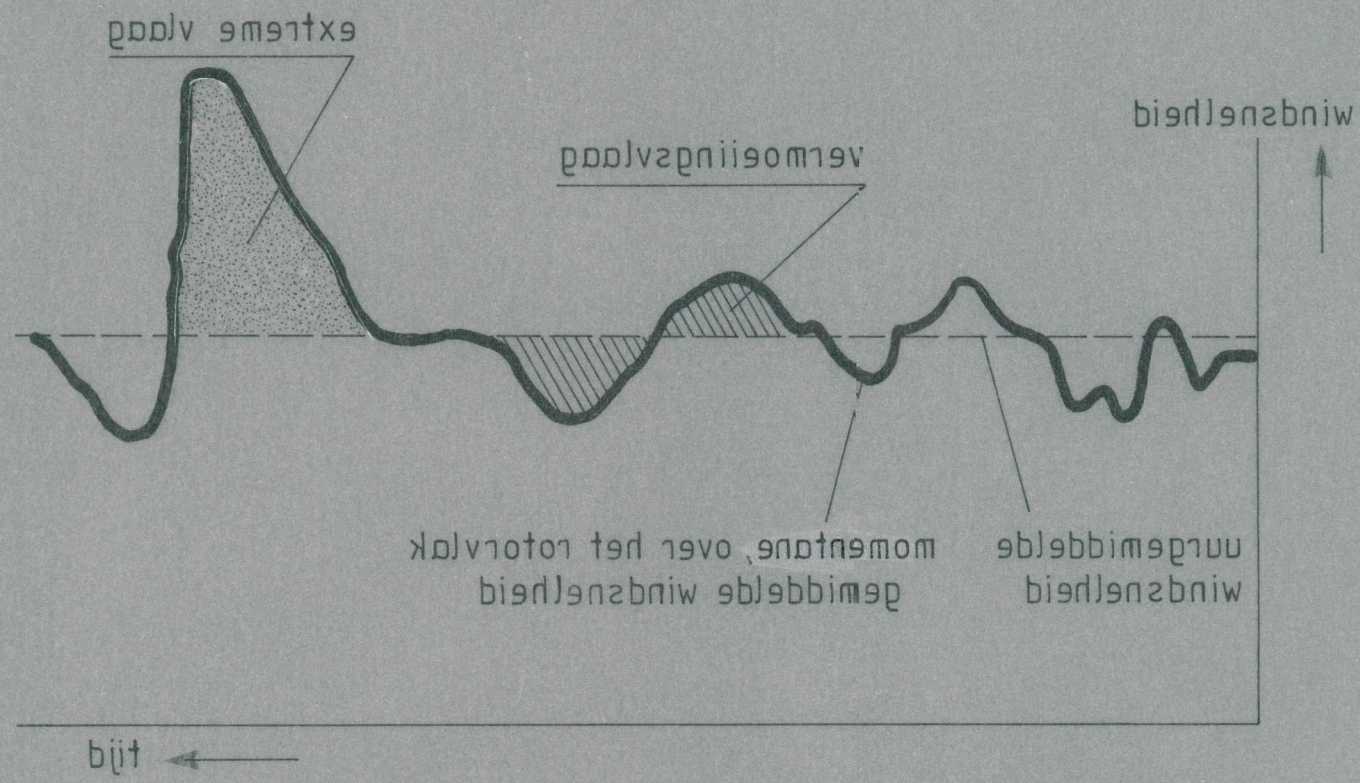
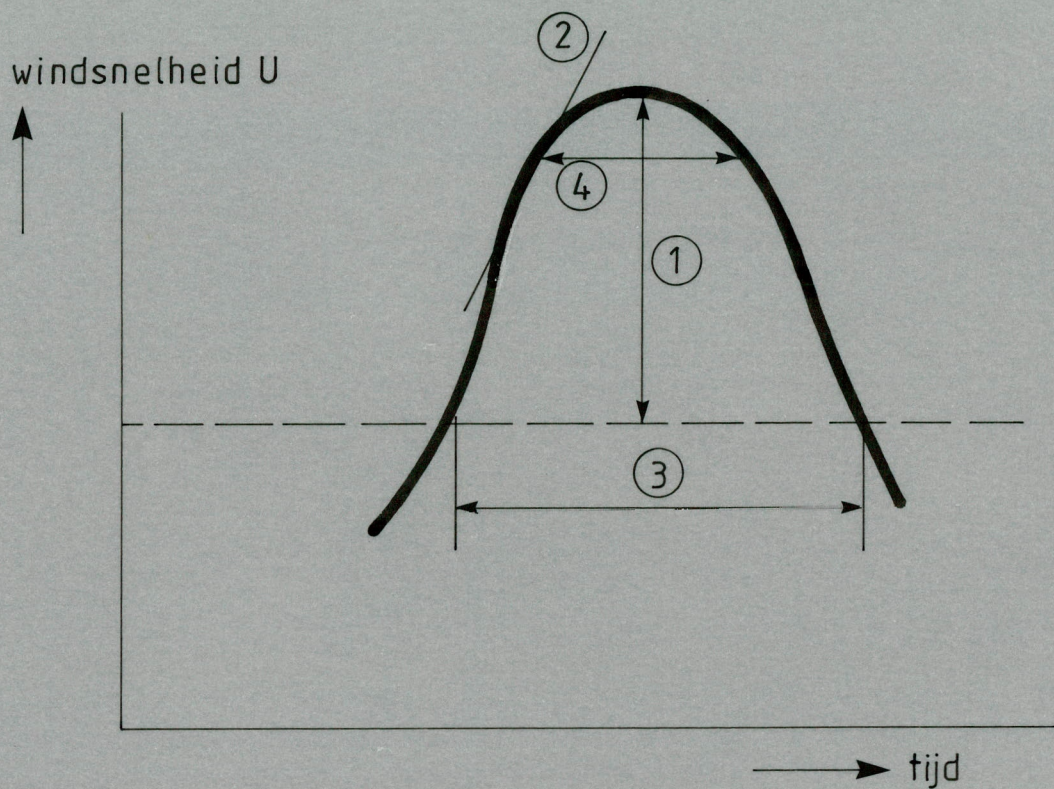


Fig. 2 Vlag definitie



via statistische technieken berekenbaar

- ① kansverdeling amplitude U (maximale waarde: A)
- ② kansverdeling versnelling dU/dt (maximale waarde: B)
- ③ gemiddelde duur T_0

empirische correlatie

- ④ kansverdeling excursieduur boven gegeven niveau

Fig.3 Vlaag schematisering

Fig. 3 Vlag schematisering

④ kansverdeling excursieduur boven gegeven niveau

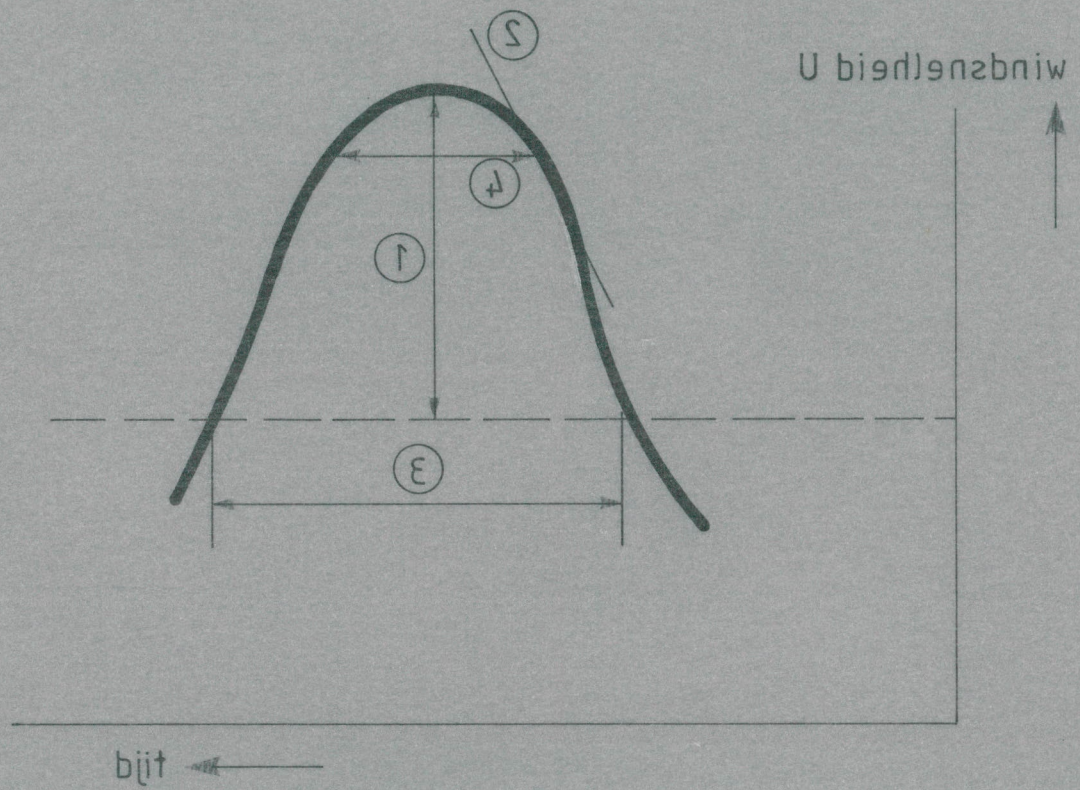
empirische correlatie

③ gemiddelde duur T_0

② kansverdeling versnelling du/dt (maximale waarde: B)

① kansverdeling amplitude U (maximale waarde: A)

via statistische technieken berekenbaar



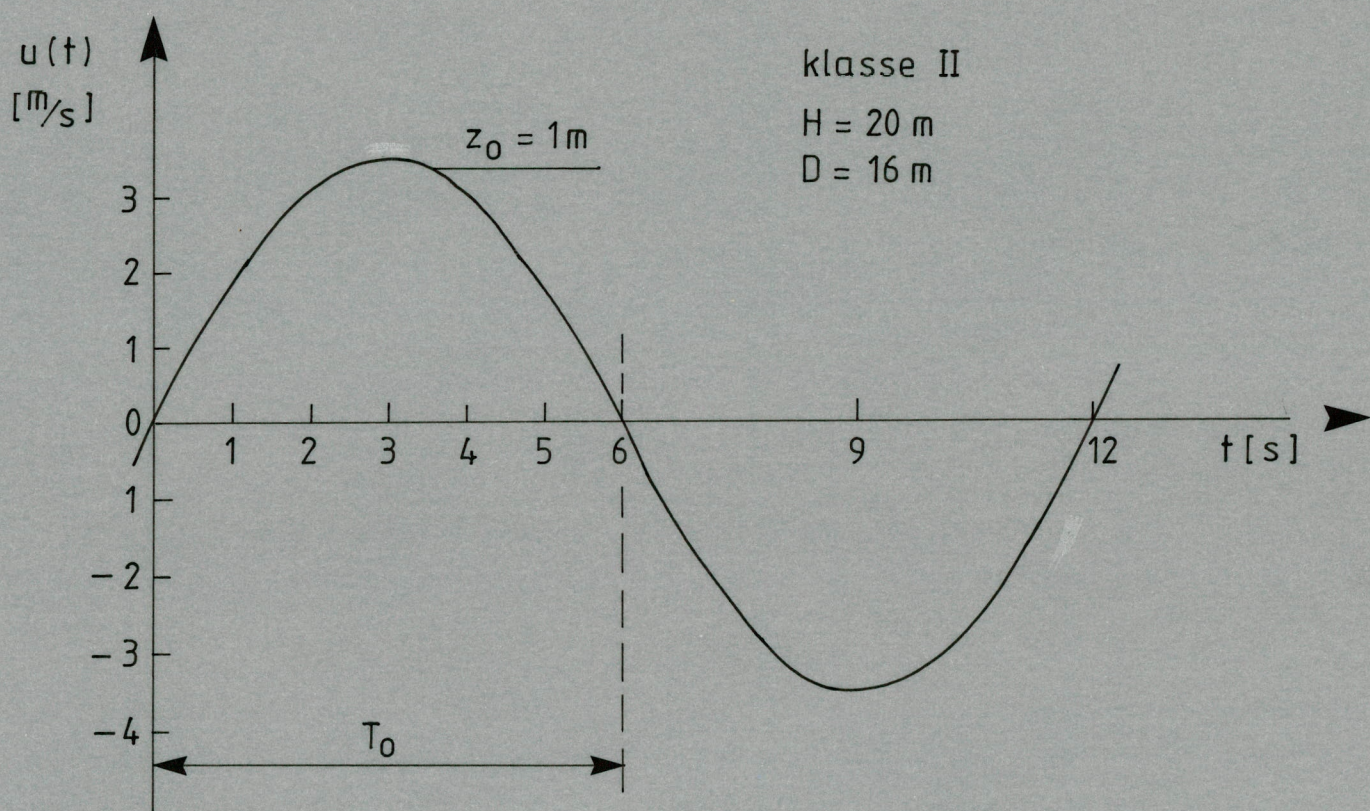
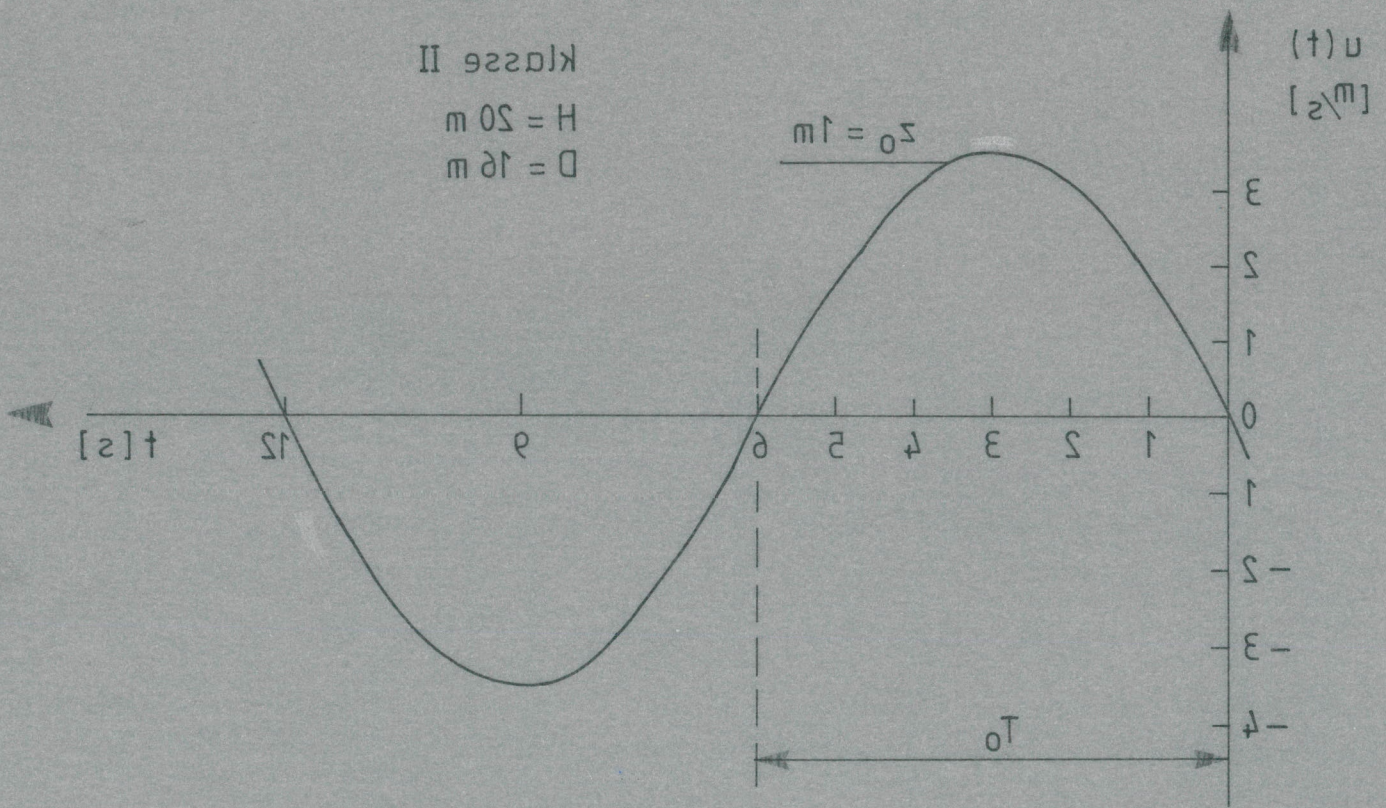


Fig. 4 Vermoeingsvlagen voor klasse II ($\bar{u} = 11 \text{ m/s}$)

Fig. 4 Vermoedingsvragen voor klasse II ($\bar{u} = 11 \text{ m/s}$)



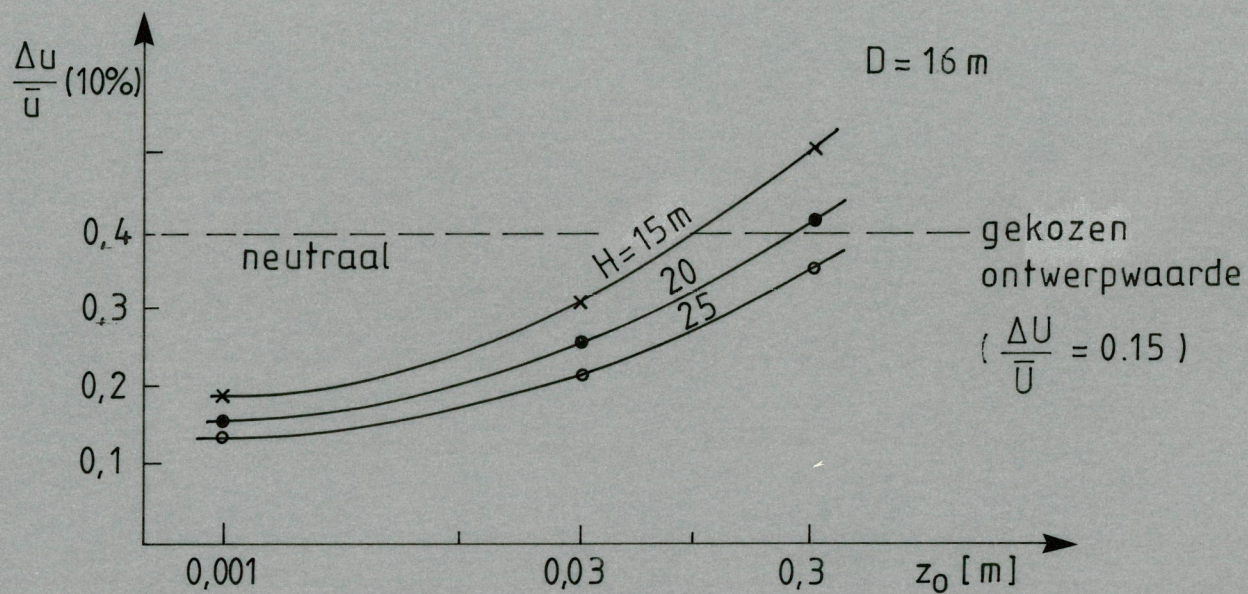


Fig.5 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze schering als functie van z_0 voor verschillende ashoogten H .

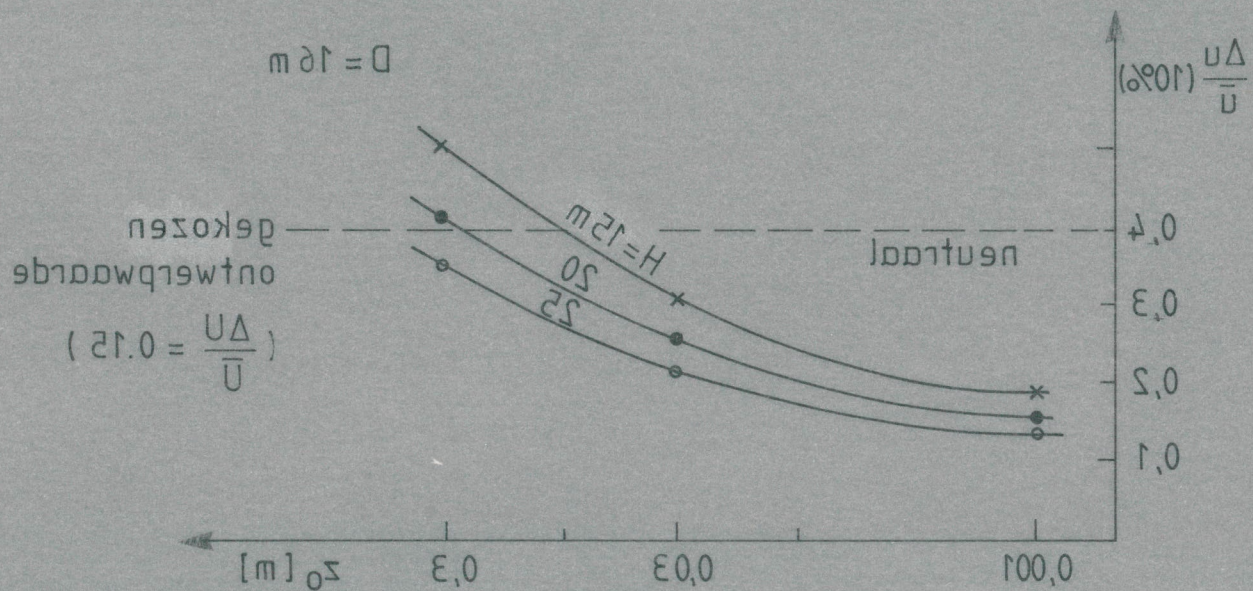


Fig. 5 De 10% van de tijd overschreden dimensieloze scherping als functie van z_0 voor verschillende ashoogten H .

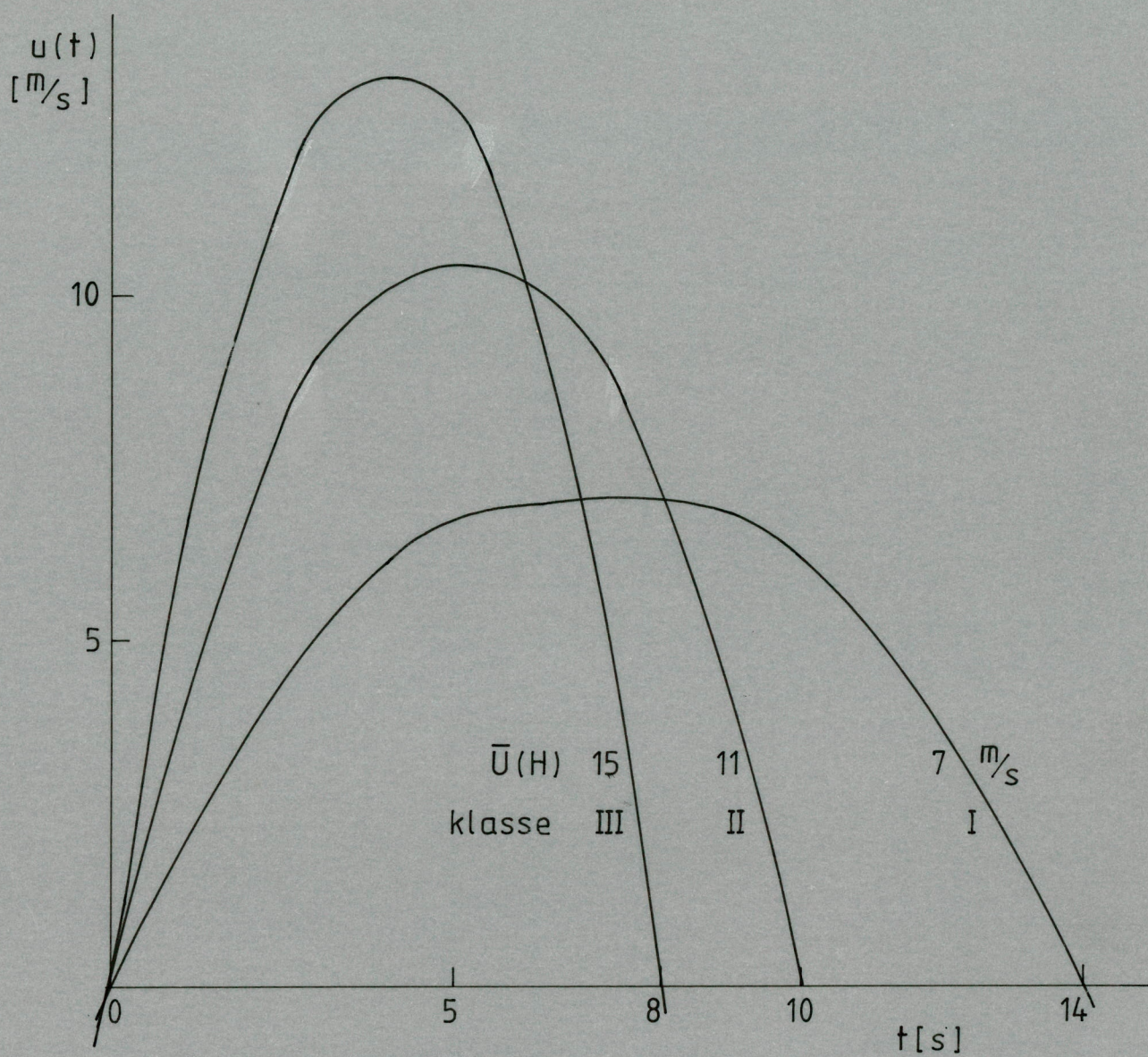
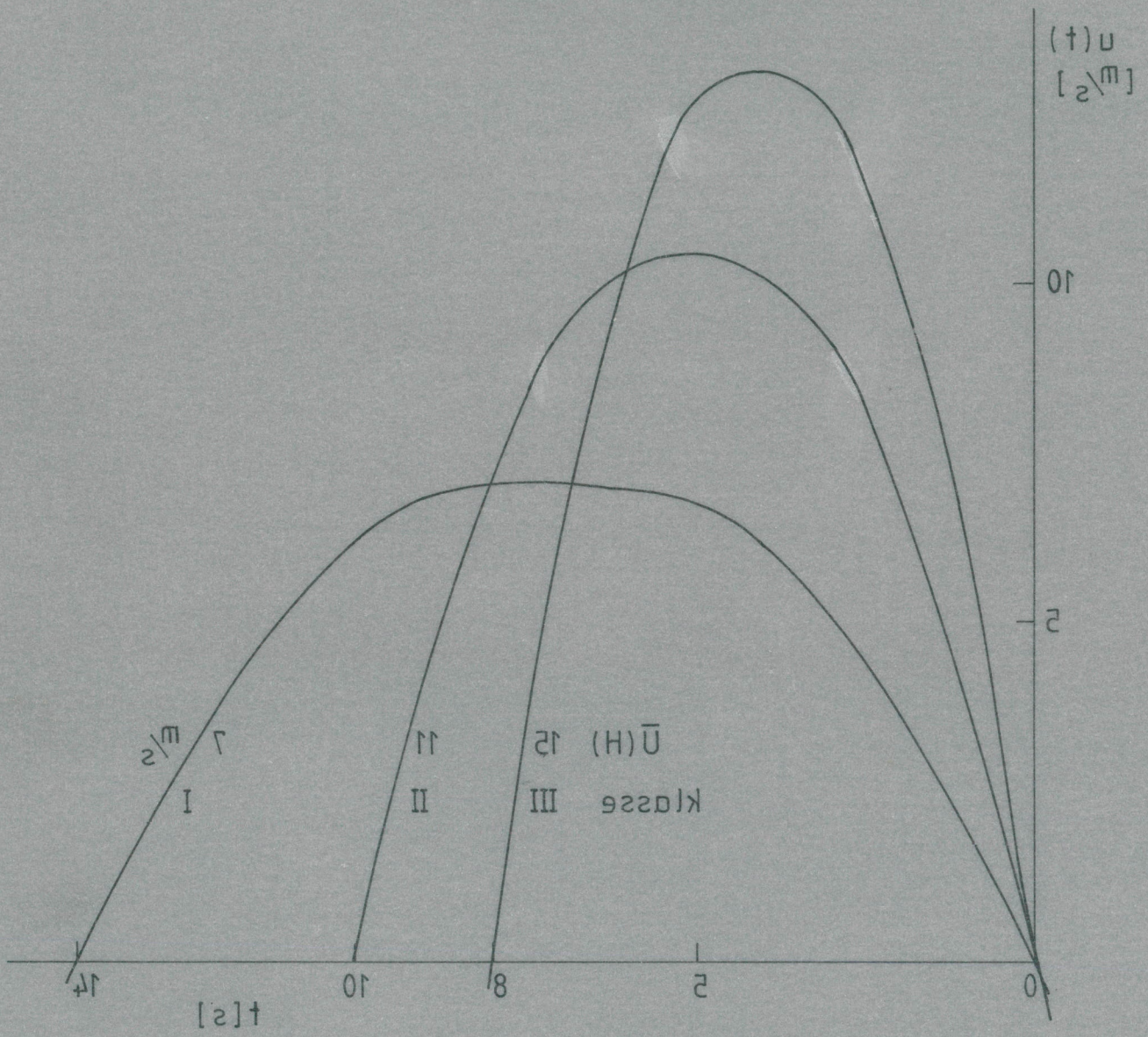


Fig. 6 Extreme amplitudevlagen

Fig. 6 Extreme amplitudenlagen



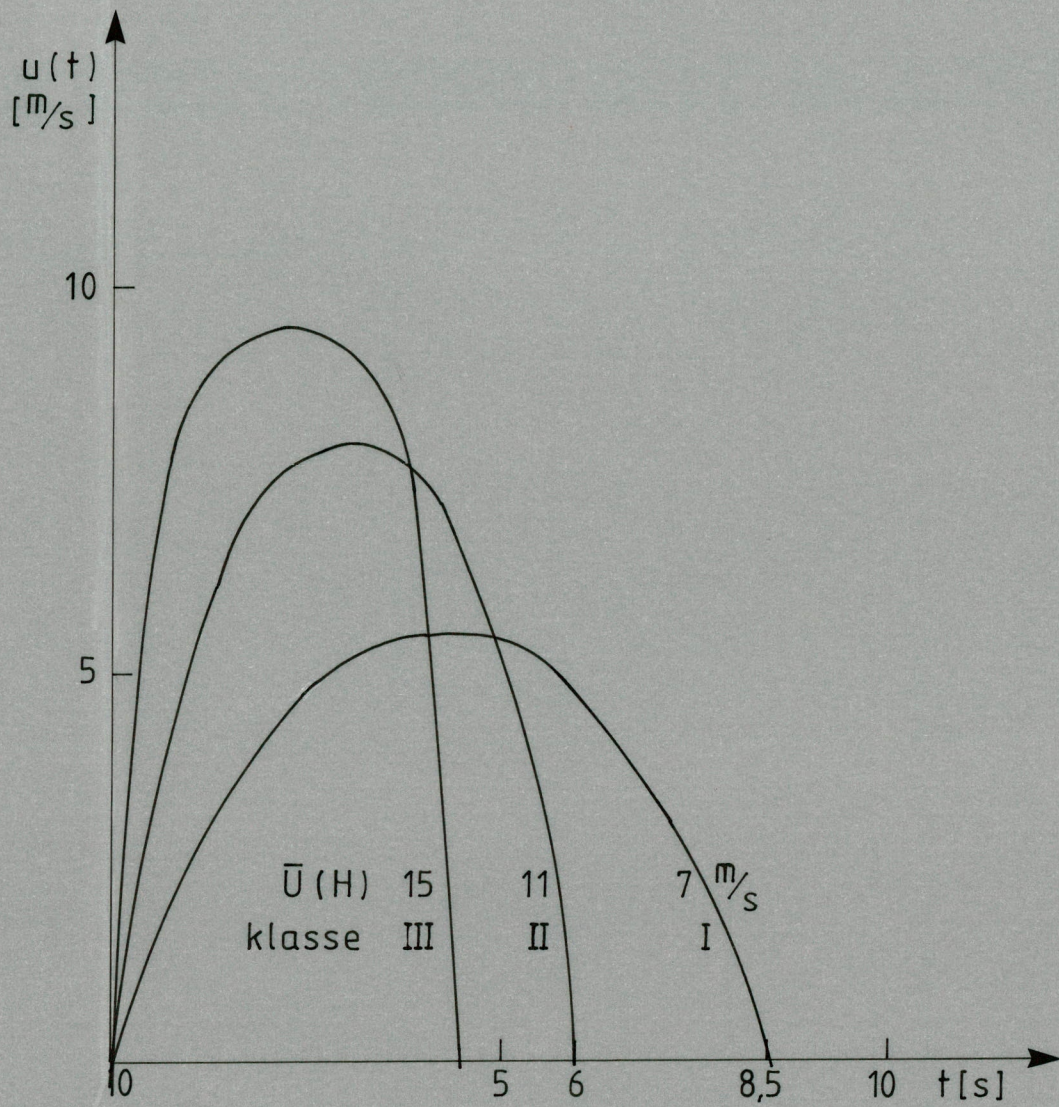


Fig.7 Extreme gradiëntvlagen

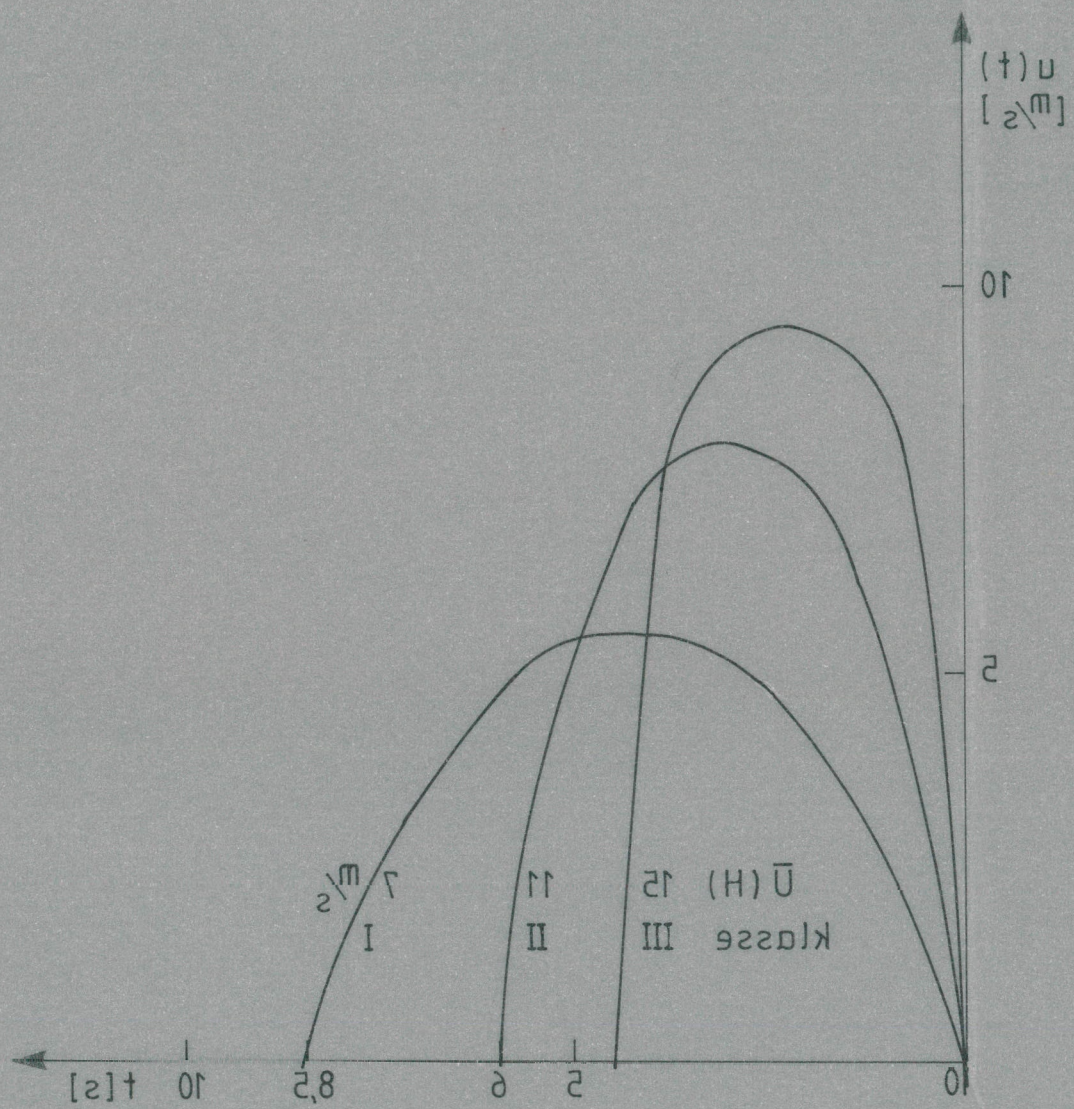


Fig.7. Extreme gradientlagen