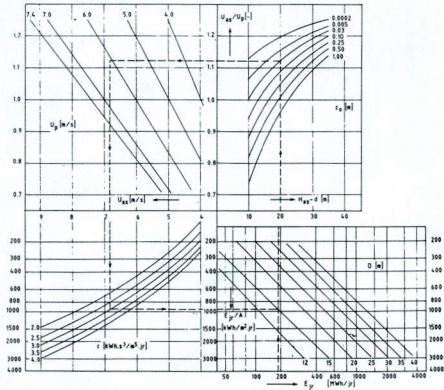
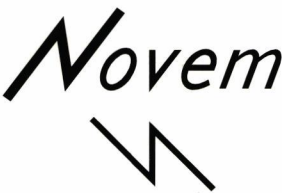


Handboek energie-opbrengsten van windturbines

Bijlagen (tweede editie)



Ref.nr. : 88-145
Dossiernr. : 8724-18262/003
Datum : mei 1991
P

Titel
HANDBOEK ENERGIE-OPBRENGSTEN VAN
WINDTURBINES

2^e EDITIE

BAND 2: BIJLAGEN 1 TOT EN MET 20

Eindredactie:

F.J. Verheij - MT-TNO, Apeldoorn
L. v.d. Snoek - MT-TNO, Apeldoorn

Bijdragen van:

CE, Delft
ECN, Petten
EZH, Voorburg
KNMI, De Bilt
RUU, Utrecht

Contactpersonen:

B.J.C.M. Rutten
A.P.W.M. Curvers
D. v.d. Velden
J. Wieringa
A.J.M. van Wijk

Trefwoord(en):

- windenergie
- opbrengstberekeningen
- windklimaat

ST-code:

C.19.3

Samengesteld in opdracht van:

Nederlandse Maatschappij voor Energie
en Milieu B.V. (NOVEM)
Utrecht

88-145/R.24/CAP

2

INHOUDSOPGAVE BAND 2: BIJLAGEN 1 t/m 20

INLEIDING

1. GEGEVENS METEOSTATIONS
2. TOPOGRAFISCHE COÖRDINATEN
3. WINDSNELHEIDSKAARTEN VAN NEDERLAND
(z = 10, 40 en 60 m)
4. MACROWINDSNELHEIDSKAART VAN NEDERLAND
5. -
6. TERREINRUWHEID EN NULPUNTSVERPLAATSING
7. MESORUWHEIDSKAART VAN NEDERLAND
8. MESOWRIJVINGSSNELHEID
9. -
10. -
11. RUWHEIDS- EN HOOGTE-CORRECTIEFACTOR VOOR METHODE III
12. OBSTAKELCORRECTIEFACTOR (HUIZEN, BOMEN, DIJKEN)
13. OBSTAKELCORRECTIEFACTOR (WINDTURBINES)
14. WINDPARKCORRECTIEFACTOR
15. WEEGFACTOR PER WINDRICHTINGSECTOR
16. JAARGEMIDDELDE STABILITEITSCORRECTIESNELHEID
17. WEIBULL-WINDSTATISTIEK
18. OPBRENGSTFACTOR VOOR WINDTURBINES
19. VERMOGENSKARAKTERISTIEK VAN WINDTURBINES
20. JAARLIJKSE ENERGIE-OPBRENGST VOLGENS METHODE I

INLEIDING BIJ DE BIJLAGEN

Het Handboek Energie-opbrengsten van windturbines bestaat uit twee banden: de eerste band beschrijft de drie berekeningsmethodieken inclusief voorbeeldberekeningen en geeft nog achtergrondinformatie; de tweede band bestaat uit bijlagen, die bij de diverse stappen in de berekeningsmethoden geraadpleegd dienen te worden. Voor de opsplitsing in twee banden is gekozen om heen en weer geblader tot een minimum te beperken.

De bijlagen behorend bij de berekeningsmethoden zijn genummerd 1 t/m 20, overeenkomstig de stapnummers van de methodieken. Niet in elke stap is een bijlage nodig. In de inhoudsopgave is dit aangegeven met een dwarsstreepje.

De in de bijlagen genoemde literatuur is in elke bijlage afzonderlijk opgenomen.

88-145/R.24/CAP

bijlage 1-1

Bijlage 1 GEGEVENS METEOSTATIONS

Voor de vier, in stap 1 van methode III genoemde, meteostations zijn de potentiële windsnelheden $U_{p,i}$, de macrowindsnelheid U_h en de correctiefactoren $C_{W,i}$ berekend, zie tabel 1.1.

Welk station gebruikt dient te worden is afhankelijk van de windturbine locatie.

LS Texel : voor locaties niet verder dan 5 km van de kustlijn en dan alleen in methode III voor de zogenaamde "zeesectoren" (zie stap 11);

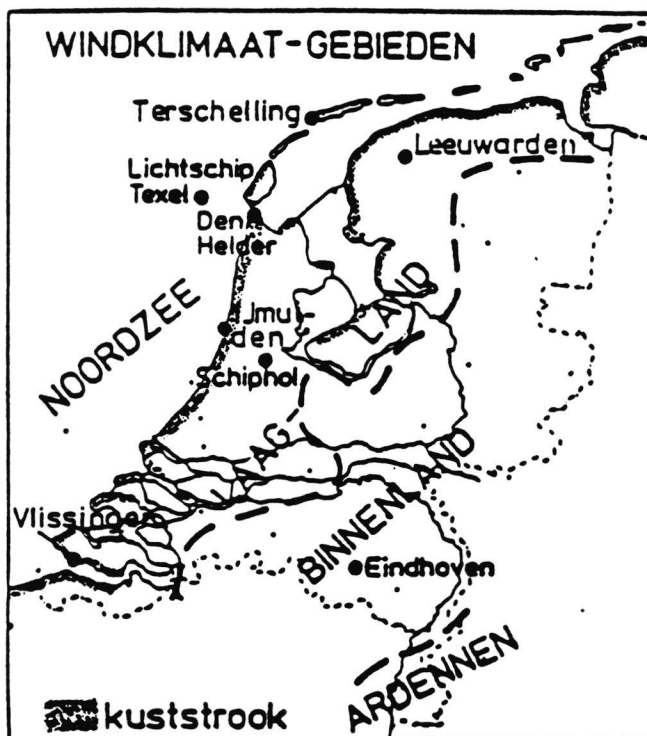
IJmuiden-duin: voor locaties niet verder dan circa 1 km van de kustlijn, voor de Waddeneilanden en indien de macrowindsnelheid $U_h \geq 12$ m/s (zie bijlage 11);

Schiphol : voor laagland locaties, zie figuur 1.1;

Eindhoven : voor binnenland locaties, zie figuur 1.1.

Tabel 1.1 De potentiële windsnelheid U_p per windrichtingssector i , de macrowindsnelheid U_h en de correctiefactor C_W per windrichtingsector i voor de meteostations LS Texel (zeelocatie) IJmuiden-duin (kustlocatie), Schiphol (laaglandlocatie) en Eindhoven (binnenlandlocatie).

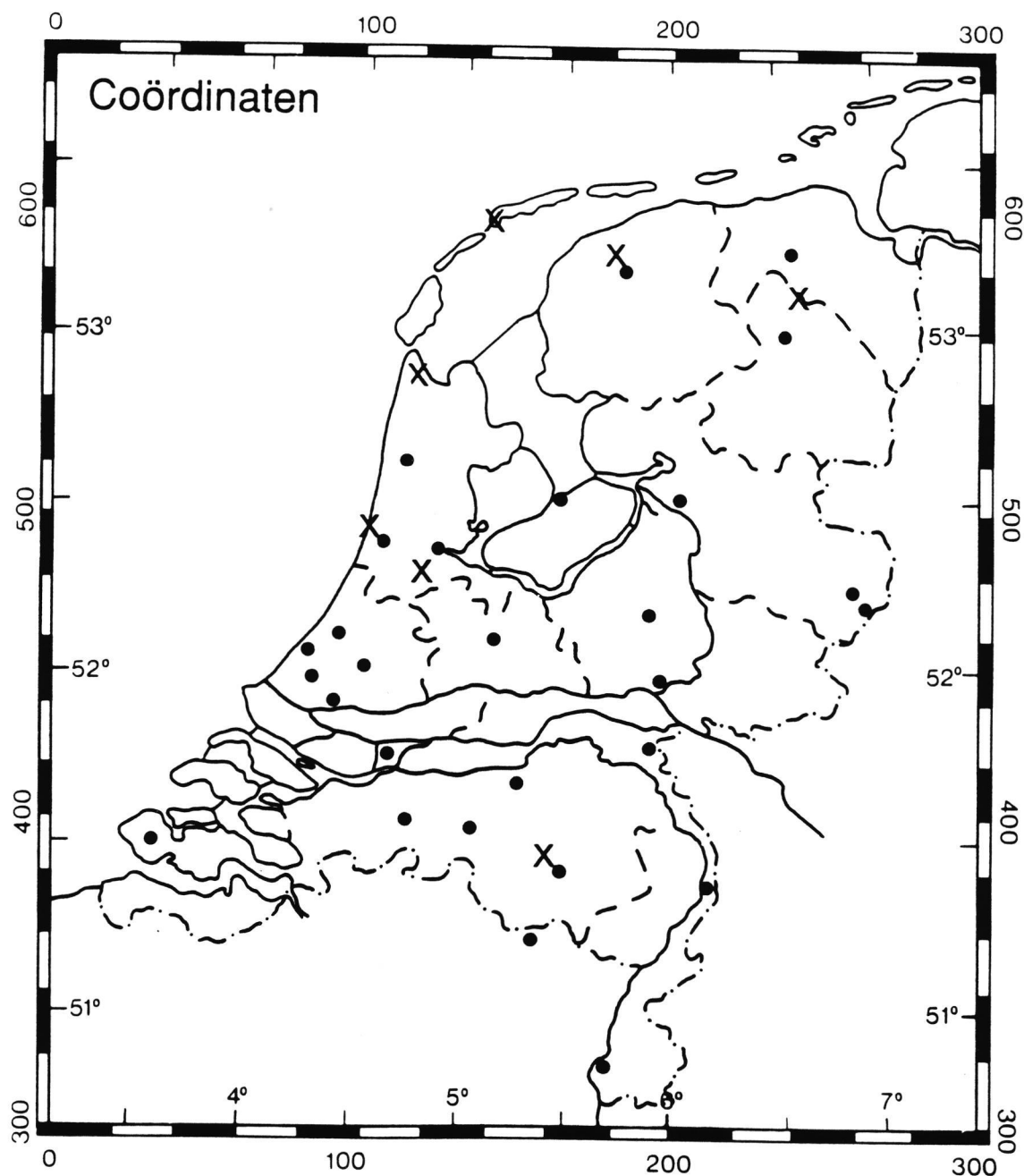
wind- richting- sector i	wind- richting (in °)	LS TEXEL		IJMUIDEN-DUIN		SCHIPHOL		EINDHOVEN	
		U_p	C_W	U_p	C_W	U_p	C_W	U_p	C_W
		U_h		U_h		U_h		U_h	
		(m/s)	(-)	(m/s)	(-)	(m/s)	(-)	(m/s)	(-)
1	0 ± 15	7.14	1.00	5.55	1.00	4.58	1.16	3.92	1.18
2	30 ± 15	6.34	1.00	4.96	1.19	5.27	1.19	3.85	1.18
3	60 ± 15	6.87	1.00	5.85	1.19	5.64	1.20	4.61	1.20
4	90 ± 15	7.05	1.00	5.42	1.10	4.76	1.24	4.48	1.25
5	120 ± 15	6.37	1.00	4.42	1.14	3.97	1.20	3.75	1.25
6	150 ± 15	6.24	1.00	4.70	1.19	4.65	1.19	3.28	1.22
7	180 ± 15	7.13	1.00	5.70	1.19	5.00	1.22	4.25	1.18
8	210 ± 15	7.92	1.00	7.44	1.00	6.09	1.11	5.65	1.15
9	240 ± 15	8.08	1.00	7.45	1.00	6.90	1.10	5.79	1.14
10	270 ± 15	8.31	1.00	7.45	1.00	6.47	1.15	5.55	1.13
11	300 ± 15	8.36	1.00	7.14	1.00	6.09	1.11	5.07	1.12
12	330 ± 15	8.02	1.00	6.33	1.00	5.40	1.11	4.62	1.17
1 t/m 12	U_p	7.32		6.03		5.40		4.57	
1 t/m 12	U_h	-		12.3		11.7		9.9	



Figuur 1.1 Windklimaat-gebieden in Nederland: kust, laagland en binnenland.

Literatuur

- [1] Haspel, B. van den, P.E.J. Vermeulen en A. van Beek;
Bepaling C_W -factoren;
CE, Delft, mei 1986.
- [2] Korevaar, C.G.;
Climatological data of the Netherlands lightvessels over the period
1949-1980;
KNMI, WR-87-9, De Bilt, 1987.
- [3] Oemraw, B.;
Stationbeschrijvingen windwaarneming;
 - Schiphol, periode 1937-1980 (2^e geheel herziene druk);
KNMI, TR-5a, De Bilt, 1982.
 - Eindhoven (VB), periode 1949-1980;
KNMI, TR-29, De Bilt, 1982.
 - IJmuiden, periode 1919-1980;
KNMI, TR-73, De Bilt, 1985.



Figuur 2.1 Topografische coördinaten voor Nederland.

In de kaarten zijn enkele windstations (Terschelling, De Kooy, Leeuwarden, IJmuiden-duin, Schiphol, Vlissingen en Eindhoven) aangeven met kruisjes. Als houvast voor lokalisatie zijn verder de provinciehoofdsteden en een aantal andere bekende grote plaatsen aangeduid met rondjes.

88-145/R.24/CAP

bijlage 2-2

De geografische coördinaten, Noorderbreedte (NB) en Oosterlengte (OL), kent iedereen uit de aardrijkskunde. Deze hebben voor kaartmeetwerk echter het bezwaar, dat ze systematisch vervormd worden door de bolvorm van de aarde. Alleen nabij de evenaar is een vlak van 1 graad breedte en 1 graad lengte ongeveer vierkant, aan de polen is een dergelijk vak driehoekig.

Op kaarten van Nederlandse topografische diensten ("stafkaarten") worden daarom gewoonlijk topografische coördinaten Y en X gebruikt met stappen van 1 km ten Noorden en ten Oosten van Auxerre, ten zuiden van Parijs. Het nulpunt is daar gelegd om de volgende redenen: ten eerste zijn bij deze keuze beide coördinaten nooit negatief; ten tweede is bij deze keuze de Y-coördinaat (in N-Z-richting) overal in Nederland groter dan de X-coördinaat (in O-W-richting), zodat vergissingen bij gebruik uitgesloten zijn. De topografische coördinaten X en Y worden ook wel "Amersfoortse coördinaten" genoemd.

Globale waarden van Y en X ergens in Nederland kunnen worden afgelezen in de marges van de hier bijgevoegde kaart (figuur 2.1). Voor precieze waarden zijn topografische kaarten nodig.

Indien van een bepaalde locatie de geografische coördinaten (NB en OL) bekend zijn, dan zijn de topografische coördinaten als volgt te berekenen:

$$Y = 111.22 * NB - 5338, X = 68.63 * OL - 215.$$

(Hierbij moeten NB en OL decimaal worden gegeven en niet in minuten en seconden - bijvoorbeeld in plaats van 52°45 dient 52.75 gebruikt te worden.)

Voor de meteostations, die gebruikt worden bij Methode III, zijn Y en X gegeven in onderstaande tabel:

Station	Y-coördinaat	X-coördinaat	Macrowind (m/s)
LS Texel	559	85	n.v.t.
IJmuiden-duin	497	100	12.3
Schiphol	479	112	11.7
Eindhoven	384	157	9.9

Bijlage 3 WINDSNELHEIDSKAARTEN VAN NEDERLAND ($z = 10, 40$ en 60 m)

De drie windsnelheidskaarten in deze bijlage geven jaargemiddelde windsnelheden op hoogten 10 m, 40 m en 60 m. Alle drie de kaarten bevatten informatie over de grootschalige klimatologische windvariatie (macro-wind) en de plaatselijke mesoruwheid (situatie ≈ 1970). De kaarten voor 40 m en 60 m bevatten bovendien een correctie voor de stabiliteitseffecten, en geven daarmee de werkelijke gemiddelde windsnelheid op die hoogten ter plaatse; verdere correctie voor locoruwheid is voor deze twee kaarten niet nodig.

Evenwel, de 10 m-kaart dient om de wind te bepalen beneden 35 m in afhankelijkheid van de kleinschalige terreinruwheid, de locoruwheid z_0 . De werkelijke gemiddelde windsnelheid U_{as} op willekeurige hoogte $H_{as} < 35$ m kan voor het afwisselende Nederlandse landschap niet hanteerbaar in kaart worden gebracht op een schaal groter dan $\approx 1:50.000$. Daarom is de 10 m-kaart een kaart van de potentiële wind U_p , dat is een referentiewindsnelheid die ter plaatse zou voorkomen op een hoogte van 10 m boven zeer open terrein. Op basis van deze "rekenwindsnelheid" U_p kan men de windsnelheid U_{as} boven willekeurig terrein voldoende nauwkeurig afleiden, wanneer de locoruwheid z_0 bekend is. Grafische methoden en formules voor een dergelijke windsnelheidstransformatie worden elders in dit Handboek vermeld.

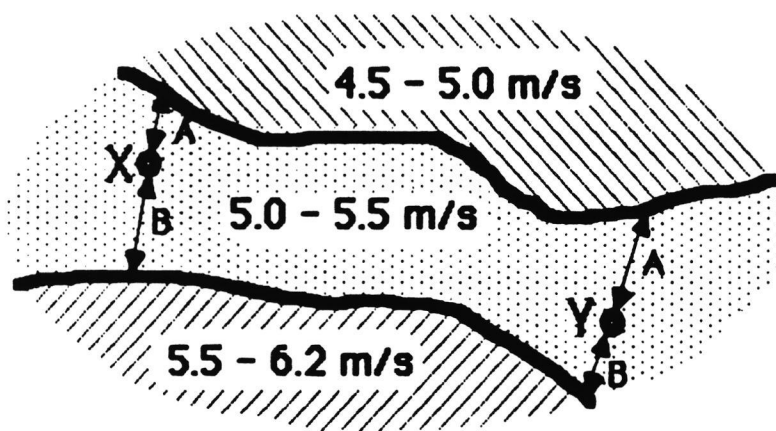
De kaarten zijn ontworpen om de wind boven land te bepalen. Aan de kust neemt de potentiële wind meer dan een klasse van 0.5 m/s toe, zodat in de U_p -kaart aan de kust een snelheidssprong optreedt.

De snelheidssprong wordt verklaard uit de berekening van U_p : boven land geldt voor open terrein een ruwheid van 0.03 m, boven zee geldt voor open terrein een ruwheid van 0.0002 m (zie ook bijlage 6). Door de geringere terreinruwheid wordt de wind boven zee minder sterk afgeremd dan boven land, met als gevolg een beduidend hogere jaargemiddelde windsnelheid. Voor nadere informatie over de wind aan de kust wordt verwezen naar de bijlage 11.

In de kaarten zijn de windsnelheden aangegeven in windgebieden met een breedte van 0.5 m/s. Door de grote variabiliteit van de wind in ruimte

en tijd heeft klimatologische modellering een onzekerheid van ± 0.2 m/s in de verkregen windsnelheid, zodat meer gedetailleerde karteringsnauwkeurigheid niet verantwoord is. Evenwel, voor windenergie-berekeningen is het verstandig om afrondingsfouten te voorkomen. Daarom dient men de plaatselijke gemiddelde windsnelheid te schatten tot op ± 0.1 m/s nauwkeurig. Hiertoe moet men interpoleren tussen de grenzen van de windgebieden op de kaart.

Bij het interpoleren is het uitgangspunt, dat de windsnelheid lineair verandert tussen de grenzen van opeenvolgende windgebieden. In figuur 3.1 worden voorbeelden gegeven van lineaire interpolaties:



Figuur 3.1 Lineaire interpolatie van windsnelheden.

Stel, op de kaart is een bepaalde windturbinelocatie gegeven. Bij interpolatie trekt men eerst door het locatiepunt de kortst mogelijke verbindinglijn tussen de aangrenzende windgebieden. Langs deze lijn is de afstand tot het gebied met de laagste windsnelheid A, en de afstand tot het gebied met de hoogste windsnelheid B. Dan is op de locatie zelf de windsnelheid:

$$U_{\text{locatie}} = 5.0 + \left(\frac{A}{A+B} \right) \times 0.5 \text{ m/s}$$

(bij de in het voorbeeld gegeven grenzen van 5.0 en 5.5 m/s). In het voorbeeld schatten we dus: voor locatie X, $U = 5.2$ m/s; voor locatie Y, $U = 5.3$ m/s.

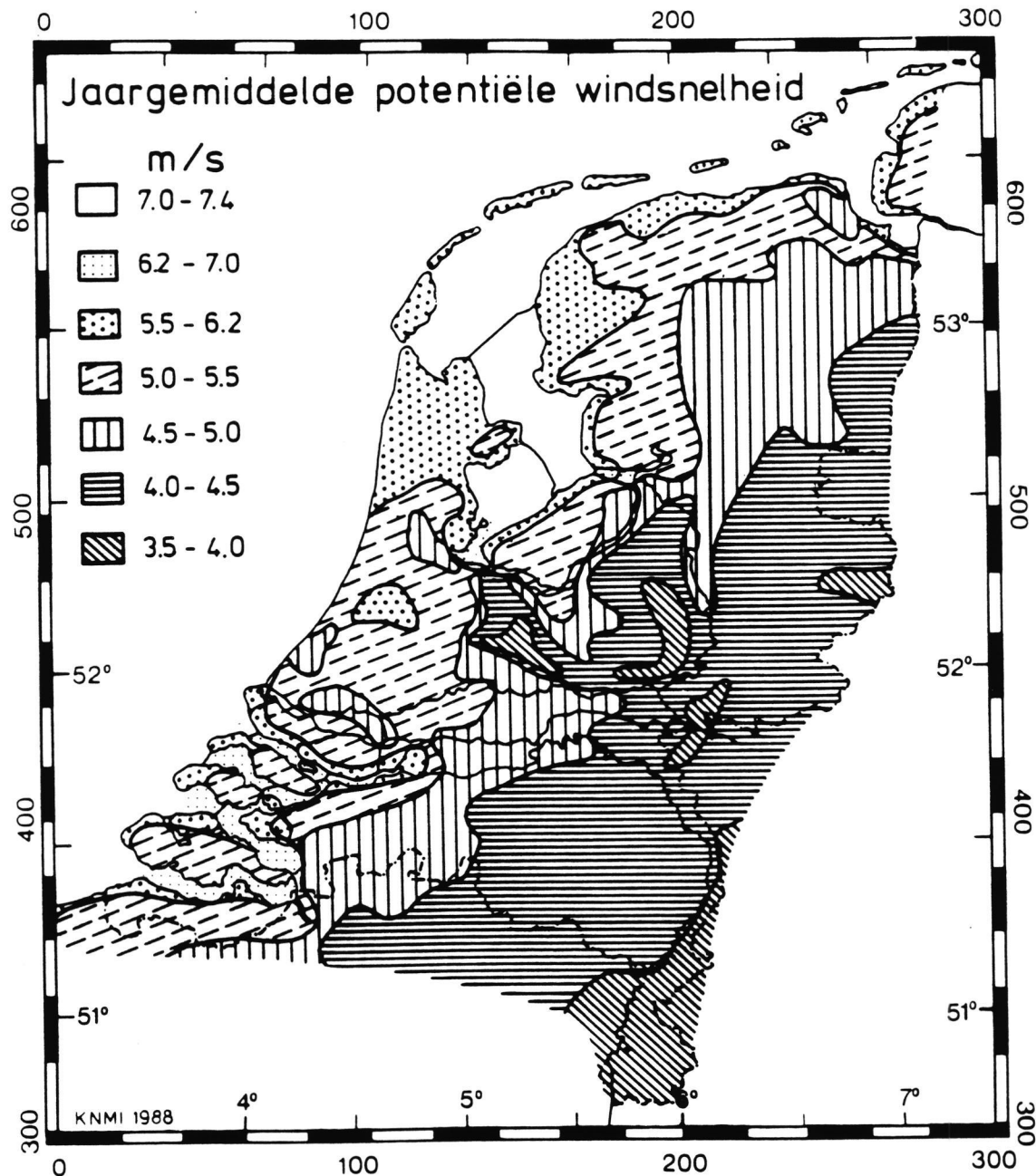
In twee gevallen geeft deze interpolatie-aanpak problemen. Allereerst zijn er op de kaart enige "eilanden" met maar één buitengrens. Voorbeelden vindt men in Zuid-Holland, waar enerzijds op vrijwel alle kaarten de zuidelijke Haarlemmermeer en omgeving in een hogere windklasse zit dan de omgeving, terwijl anderzijds de stadsgebieden van Den Haag en Rotterdam in een lagere windklasse zitten. In zulke eilandgebieden is een realistische aanname dat het centrum van het "eiland" 0.3 m/s hoger, of lager, is dan de rand. Men kan dan interpoleren tussen rand en midden volgens het hierboven gegeven voorbeeld.

Een tweede probleemsituatie treedt op, wanneer het beschouwde windgebied grenst aan een groot wateroppervlak (Noordzee, Waddenzee, IJsselmeer). Men kan dan aannemen dat de windsnelheid aan de kust gelijk is aan de bovengrens van het windgebied - dus bijvoorbeeld voor de U_p -kaart kan worden gesteld, dat aan de kust van Friesland de windsnelheid 6.2 m/s is. Dan kan opnieuw worden geïnterpoleerd tussen de gebiedsgrens in het binnenland en de kust.

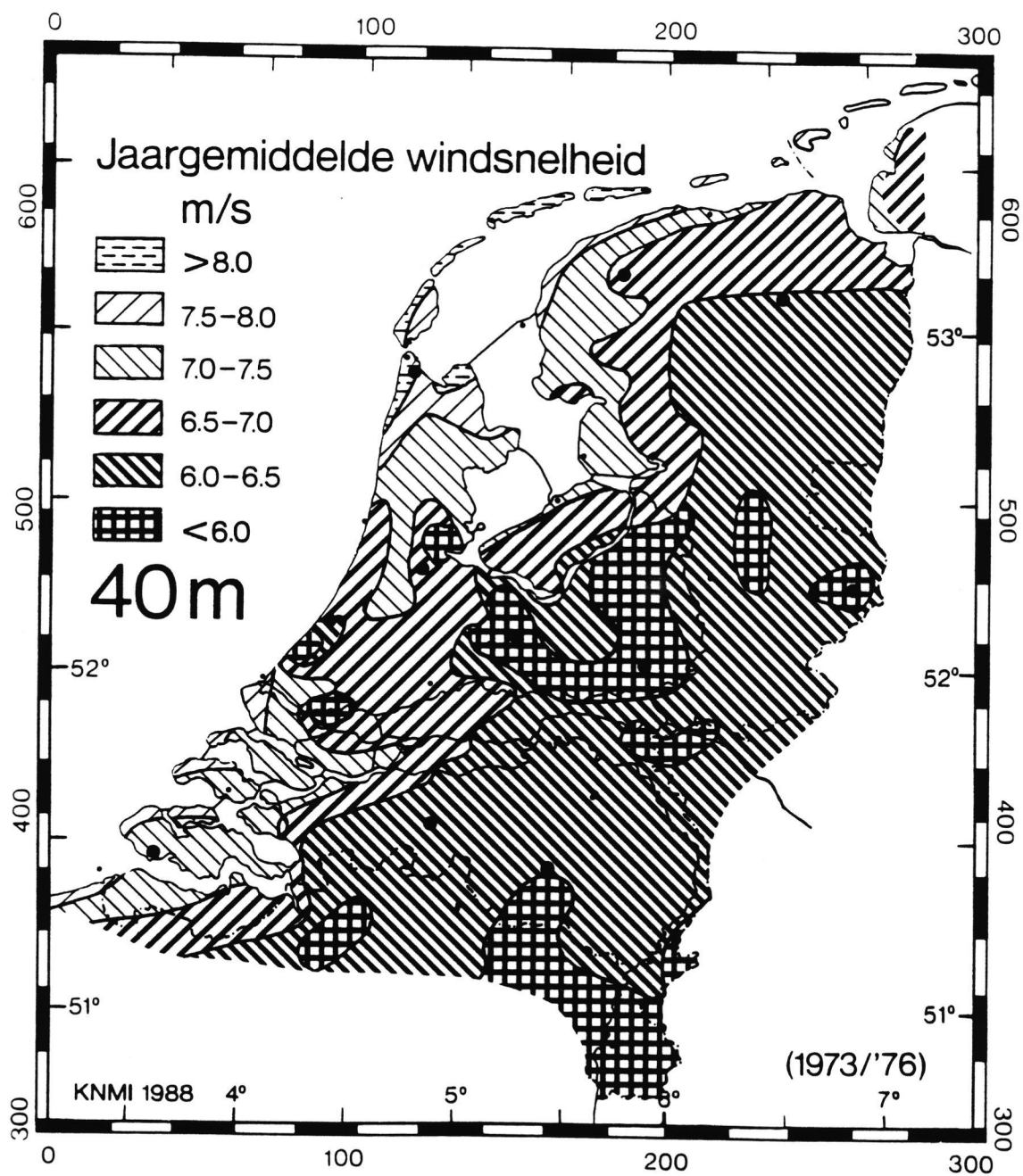
Voor hoogten boven 35 m moet men de 40 m- en 60 m-kaarten gebruiken. Wanneer H_{as} een andere waarde heeft, bijvoorbeeld 45 m, dan moet de plaatselijke gemiddelde windsnelheid worden bepaald op beide kaarten. In de volgende stappen worden deze windsnelheden gebruikt om de windsnelheid op ashoogte uit te rekenen.

In twee gebieden zijn de kaarten niet geheel betrouwbaar. Op de brede zee-armen in Zeeland waait het iets harder dan aan de Zeeuwse kust maar niet zo hard als op zee, en er is een merkbare afname in de richting van Brabant. Bovendien zijn windrichtingseffecten in deze zee-armen groot. Deze overgangssituatie is aangegeven door de zee-armen te kleuren in een hogere windklasse dan de klasse van de kust, maar dit mag slechts als ruwe benadering worden beschouwd.

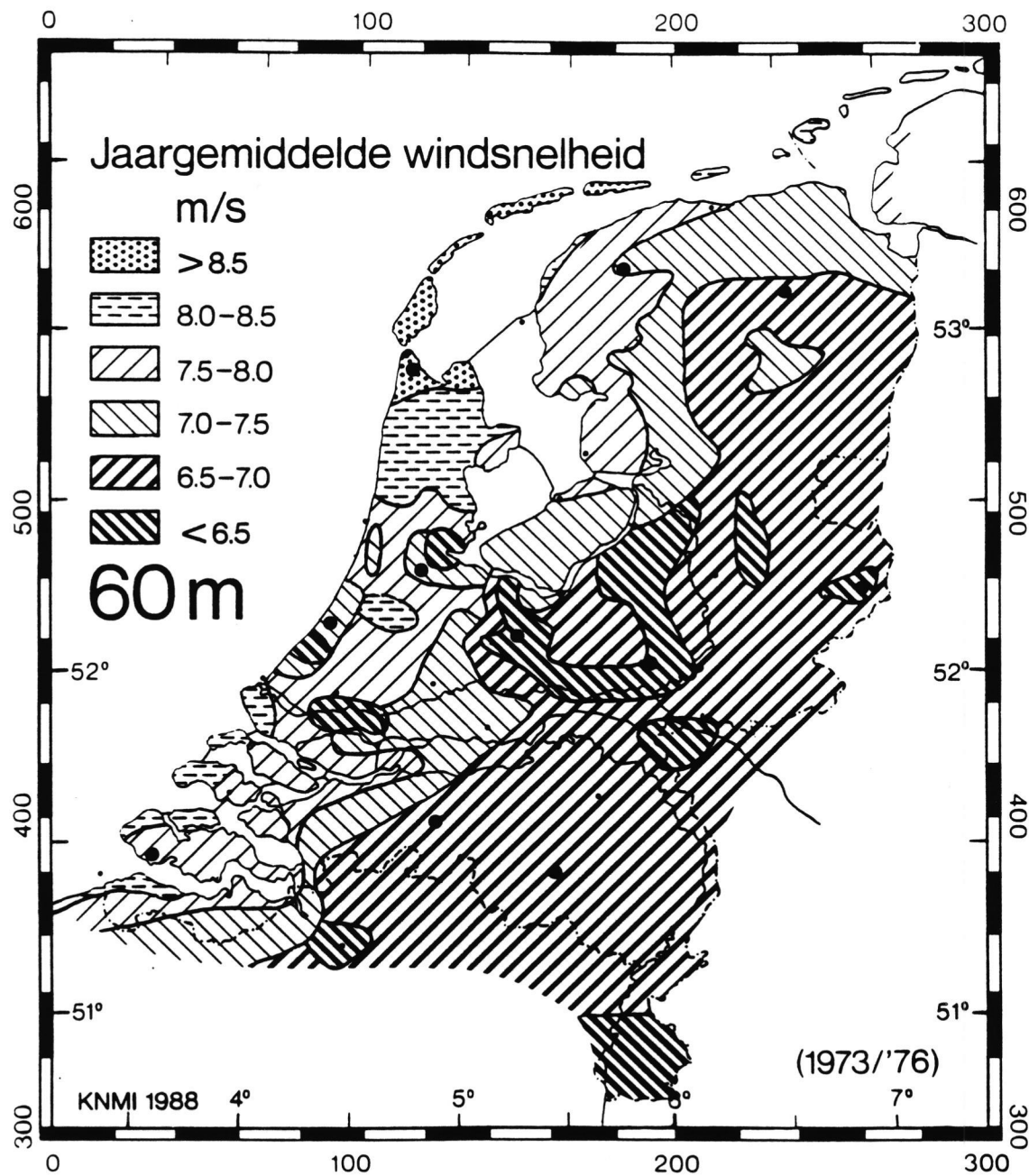
Nog groter is de onzekerheid in Limburg ten zuiden van Venlo, omdat het gebruikte model niet meer toepasbaar is wanneer de hoogteverschillen in het terrein meer bedragen dan enige tientallen meters per kilometer afstand. In Zuid-Limburg zijn dus de kaart-windsnelheden niet meer dan grootte-orde schattingen voor eventuele vlakke delen van het landschap.



Figuur 3.2 De windsnelheidskaart van Nederland voor de jaargemiddelde potentiële windsnelheid (10 m hoogte).



Figuur 3.3 De windsnelheidskaart van Nederland voor de jaargemiddelde windsnelheid op 40 m hoogte.



Figuur 3.4 De windsnelheidskaart van Nederland voor de jaargemiddelde windsnelheid op 60 m hoogte.

88-145/R.24/CAP

bijlage 3-7

Literatuur

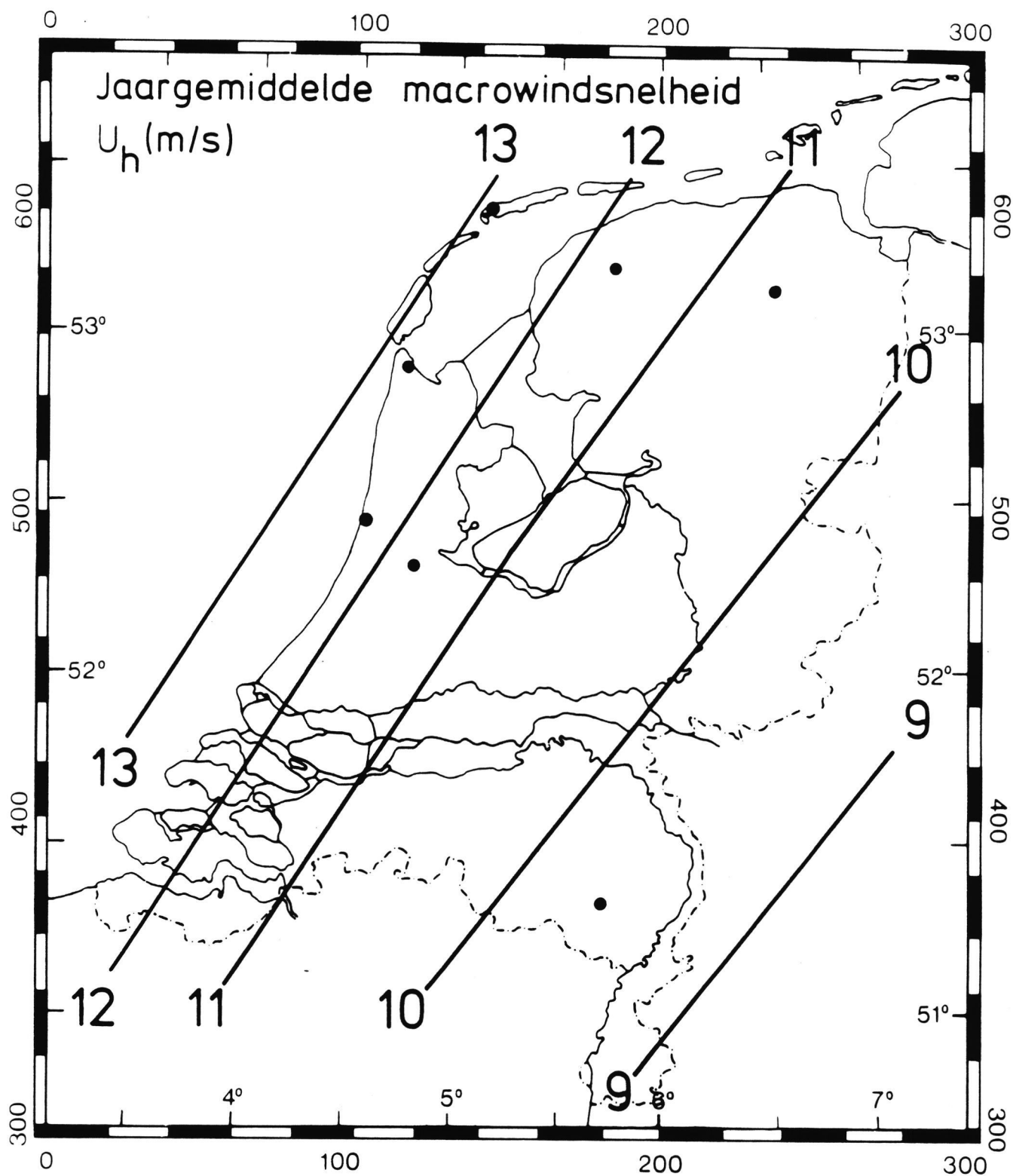
- [1] Monna, W.A.A. and J.G. van der Vliet;
Facilities for research and weather observations on the 213 m tower
at Cabauw and at remote locations;
KNMI, WR-87-5, De Bilt, 1987.

- [2] Wieringa, J.;
Overzicht van publikaties over het Nederlands windklimaat;
KNMI, TR-41, De Bilt, 1983.

- [3] Wieringa, J. en P.J. Rijkoort;
Windklimaat van Nederland;
Staatsuitgeverij, Den Haag, 1983.

- [4] Wieringa, J.;
Kartering van Nederland's windklimaat boven 40 m hoogte;
Nationale Windenergie Conferentie 1988, pp. 102-106,
Noordwijkerhout, februari 1988.

Bijlage 4 MACROWINDSNELHEIDSKAART VAN NEDERLAND



Figuur 4.1 De isolijnenkaart boven Nederland voor de jaargemiddelde macrowind. De getalwaarden zijn alleen geldig voor landlocaties.

88-145/R.24/CAP

bijlage 4-2

De bijgevoegde kaart, figuur 4.1, geeft de jaargemiddelde waarde van de macrowind, dat is een reken-windsnelheid op geostrofe hoogte (≥ 500 m), onafhankelijk van de ruwheid op meso- of loco-schaal.

De macrowind U_h wordt in dit Handboek op twee manieren gebruikt. Voor methode II is het een rechtstreekse invoer-grootte: uit de plaatselijke waarde van U_h wordt met de plaatselijke waarde van de mesoruwheid - en voor lage hoogten ook voor de locoruwheid - de plaatselijke gemiddelde windsnelheid bepaald. Voor methode III dient U_h om te corrigeren voor grootschalige klimatologische verschillen tussen het gekozen meteostation en de windturbine-locatie.

Voor bepaling van U_h kan lineair worden geïnterpoleerd op de kaart (figuur 4.1). Een alternatief is mogelijk, wanneer van de locatie en van het meteostation de topografische coördinaten Y en X bekend zijn (bijlage 2).

Daartoe dienen allereerst de rekenwindsnelheden U_{h1} , U_{h2} , en U_{h3} berekend te worden. Deze snelheden en de lokale jaargemiddelde macrowindsnelheid U_h worden berekend met onderstaande vergelijkingen.

$$U_{h1} = 5.63 + (0.0255 \cdot Y) - (0.0370 \cdot X) \quad \text{als } Y > (1.69 \cdot X) + 215$$

$$U_{h1} = 9.67 + (0.0067 \cdot Y) - (0.0053 \cdot X) \quad \text{voor overige gevallen}$$

$$U_{h2} = 7.84 + (0.0179 \cdot Y) - (0.0324 \cdot X) \quad \text{als } Y > (2.25 \cdot X) + 149$$

$$U_{h2} = 9.49 + (0.0069 \cdot Y) - (0.0078 \cdot X) \quad \text{voor overige gevallen}$$

$$U_{h3} = 7.25 + (0.0175 \cdot Y) - (0.0248 \cdot X) \quad \text{als } Y > (1.88 \cdot X) + 164$$

$$U_{h3} = 8.67 + (0.0088 \cdot Y) - (0.0086 \cdot X) \quad \text{voor overige gevallen}$$

Tenslotte:

$$U_h = 3.78 + 0.0047 \cdot Y - 0.0074 \cdot X + [(U_{h1} + U_{h2} + U_{h3})/6]$$

De nauwkeurigheid van de U_h -bepaling is landelijk gemiddeld ± 0.3 m/s (zie Wieringa [1]), hetgeen leidt tot een onzekerheid van ± 0.2 m/s in de berekende jaargemiddelde wind beneden 80 m hoogte. Bij de kaartranden (Noord-Groningen, Zeeland en vooral Limburg) is de onzekerheid wat groter, en in het midden van het land wat kleiner.

88-145/R.24/CAP

bijlage 4-3

Literatuur

[1] Wieringa, J.;

Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind
speed averages;

Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112 (1986), pp. 867-889.

88-145/R.24/CAP

bijlage 6-1

Bijlage 6 TERREINRUWHEID EN NULPUNTSVERPLAATSING

Inleiding

Bij de bepaling van het jaargemiddelde windklimaat op ashoogte H_{as} van een windturbine is de terreinruwheid in de plaatselijke omgeving van essentieel belang. In paragraaf 2.2 in dit handboek is reeds duidelijk gemaakt dat hierbij twee ruimteschalen van belang zijn: dicht rondom de lokatie tot circa 1 km ("locoruwheid" z_0) en verder weg tot op 5 à 10 km ("mesoruwheid" z_{om}).

De ruwheid van het terrein neemt toe met toenemende begroeiing en met toenemende hoogte en dichtheid van aanwezige obstakels. Het is een maat voor de windremmende werking van het terrein. De invloed van de ruwheid neemt toe met afnemende hoogte en is het sterkst merkbaar in de oppervlaktelaag: het onderste deel van de planetaire grenslaag.

De mesoruwheid z_{om} geeft aan in hoeverre de wind op regionale schaal wordt afgeremd en de locoruwheid z_0 brengt de nabije ruwheid in rekening. Bij grotere ashoogten wordt de mesoruwheid belangrijker en bij kleinere ashoogten is de locoruwheid meer van belang. De bepaling van de terreinruwheid is voor beide soorten ruwheid gelijk. Er is immers geen principieel verschil tussen z_0 en z_{om} als zodanig. Alleen de invloedssfeer verschilt. Bij de bepaling van z_{om} moet van een groter gebied de ruwheid worden ingeschat dan bij de bepaling van z_0 . Bij gebruik van methode III wordt de ruwheid per windrichtingssector ingeschat, bij de andere methoden dient een veel groter gebied in één terreinruwheid te worden beschreven.

Het op het oog samennemen van verschillende landschapstypen gaat alleen goed als de ruwheden ervan niet al te zeer verschillen. Als dit wel zo is, verdient de meer complexe rekenmethode III de voorkeur omdat hiermee ruwheden voor kleinere gebieden apart in rekening worden gebracht.

In deze bijlage gaat het uitsluitend over het inschatten van de terreinruwheid, ongeacht de grootte van het in te schatten gebied. Eerst wordt in een korte kwalitatieve beschrijving ingegaan op de windremmende werking van het aardoppervlak en vervolgens wordt een klasse-indeling voor

88-145/R.24/CAP

bijlage 6-2

terreinruwheid besproken en worden praktische hulpmiddelen aangereikt voor het juist indelen van een bepaald terrein in één van deze klassen.

Invloed van terreinruwheid op het windaanbod

De mate waarin de wind bij afnemende hoogte in snelheid afneemt, is afhankelijk van verticale uitwisseling van bewegingsenergie met onderliggende luchtlagen. Deze uitwisseling van beweging treedt sterker op naarmate:

- a) de turbulentie in de oppervlaktelaag groter is: bij koude wind boven ruw terrein;
- b) de lucht uit de oppervlaktelaag door warmte-effecten opstijgt.

In beide gevallen veroorzaakt lucht van onder af extra wrijving en turbulentie voor de hogere, aandrijvende, luchtlagen. Het effect hiervan werkt twee kanten op:

- de wind wordt tot op grotere hoogten afgeremd;
- naar beneden toe vindt eveneens energie-uitwisseling plaats waardoor de lucht in de onderste lagen juist meegesleurd wordt en de windsnelheid kan toenemen.

De thermische invloeden onder b) worden in paragraaf 2.2 van dit handboek besproken. De mechanische turbulentie a), wordt bepaald door de terreinruwheid.

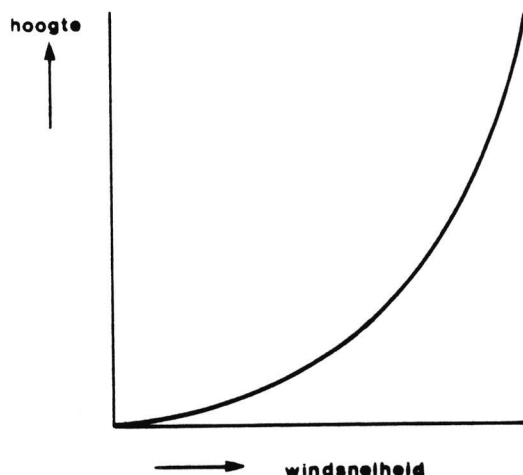
Het windprofiel

In de onderste luchtlagen is de windsnelheid als functie van de hoogte vanaf het aardoppervlak vast te leggen in een zogenaamd windprofiel. Dit profiel is in de oppervlaktelaag van 0 tot 60 m te benaderen door een logaritmische functie. Het windprofiel heeft een vorm zoals in figuur 6.1 is afgebeeld. De steilheid van dit logaritmische profiel is afhankelijk van obstakels en oneffenheden: lucht wordt gedwongen om om een obstakel heen te stromen. Daardoor wordt de lucht die normaal vlak langs het obstakel zou stromen gehinderd en zal ook naar buiten toe uitwijken, daarmee de omgevingslucht hinderen etc. Op deze wijze ontstaat een gebied van verstoorde wind (die een geringere snelheid heeft dan de onge-

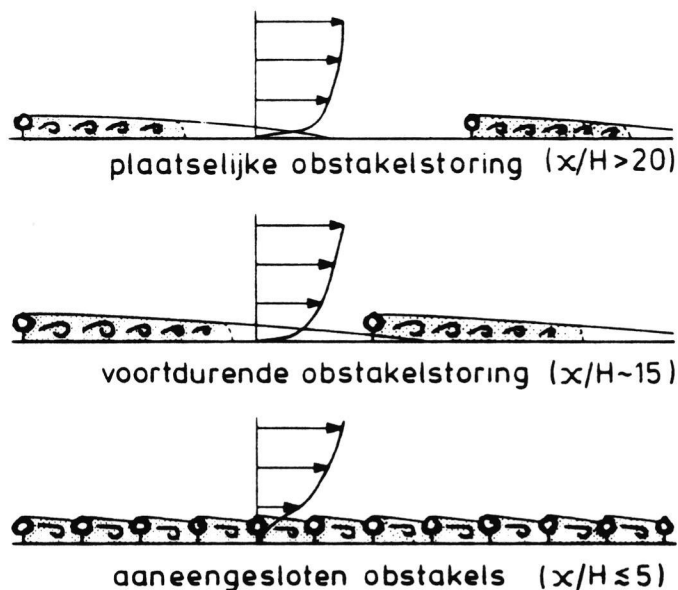
88-145/R.24/CAP

bijlage 6-3

stoorde wind, zie bijlage 12) en turbulenties, dat windafwaarts van het obstakel in omvang toeneemt: het zog. Anderzijds heeft de lucht die om een zog stroomt de neiging om lucht uit het zog 'mee te sleuren'. Hierdoor wordt het oorspronkelijke windprofiel uiteindelijk weer hersteld en lost het zog op.



Figuur 6.1 Logaritmisch windprofiel.



Figuur 6.2 Invloed van de gemiddelde afstand tussen obstakels met hoogte H_{ob} op het windprofiel, uitgaande van 80% hersteld windprofiel. X = gemiddelde afstand vanaf bovenwinds obstakel (Figuur is overgenomen uit "Windklimaat van Nederland" van J. Wieringa & P.J. Rijkoort).

Nulpuntsverplaatsing en ruwheidslengte

Indien in een zog opnieuw een obstakel voorkomt, treedt een nieuwe verstoring op. Als dit verschijnsel meermalen achtereen optreedt is er sprake van een constant verstoord windprofiel (zie figuur 6.2). Als op vergelijkbare hoogten regelmatig verstoringen optreden, zal het windprofiel als geheel de neiging vertonen om naar grotere hoogte te verschuiven. Laag tussen de obstakels is dan eigenlijk geen sprake meer van een profiel, maar van zeer variabele wind met veel vlagen en turbulenties.

De mate waarin het windprofiel verschuift wordt aangegeven met de zogenaamde nulpuntsverplaatsinghoogte d (displacement).

Vanaf hoogte d geldt het logaritmisch windprofiel. Bij veel obstakels (ruw terrein) zal er veel verticale uitwisseling van windsnelheid zijn. De toename van de windsnelheid met de hoogte is dan klein (steil profiel). Bij minder grillig terrein is de snelheidsgradiënt groter: een minder steil profiel. Om de grilligheid van gebieden te verrekenen wordt de ruwheidslengte z_0 gebruikt. Hoe grilliger het terrein, hoe groter z_0 . Let wel: z_0 is een rekenlengte en slaat niet direct op afmetingen van obstakels en ruwheden. z_0 kan variëren tussen enkele tienden van mm boven zee tot 2 m boven zeer ruw gebied.

Ruwheidsklassen

Om de invloed van de terrein-ruwheid te kwantificeren, is een indeling gemaakt van acht verschillende gebiedsklassen met bijbehorende ruwheden. Elke klasse vertegenwoordigt een ruwheidslengte en een nulpuntverplaatsing welke als gemiddelde gelden voor bijpassende gebieden.

Met een indeling in acht ruwheidsklassen is het niet mogelijk ieder gebiedstype exact te beschrijven. De gebruikte klasse-indeling moet daarom gezien worden als een richtlijn aan de hand waarvan vergelijkbare gebieden bij elkaar kunnen worden ingedeeld.

Bij de indeling in ruwheidsklassen moet een gebied zoveel mogelijk uniform worden geklasseerd. Erg veel ruwheidsovergangen maken de bereke-

ningen nodeloos ingewikkeld en zeker niet nauwkeuriger. Er moet daarom eerder op km-schaal worden gewerkt dan kleiner, waar men vlug toe geneigd is.

Een goede methode om gebieden te klasseren is, uitgaande van een vlak gebied, de voorkomende obstakels te beoordelen op hoeveelheid en hoedanigheid. Als een gebied wordt gekenmerkt door regelmatig terugkerende vergelijkbare obstakels zoals begroeiing, bebouwing of infrastructuur, dan dient dit in de gebiedsklasse tot uiting te komen. Voor incidentele obstakels, die dus niet beeldbepalend zijn, wordt zonodig los van de terreinruwheid gecorrigeerd in een later stadium van de berekeningen (obstakelcorrecties, bijlage 11). Voor de beoordeling van gebieden geven zogenaamde 'bird-eye-views' vaak een goed beeld van de omgeving omdat een groot gebied tegelijk kan worden overzien. Een goed hulpmiddel hierbij vormen de topografische kaarten (schaal 1:25.000) die van heel Nederland beschikbaar zijn. Voor beoordeling met het oog, is het aanbevelenswaardig om een zo hoog mogelijk standpunt in te nemen, obstakels te beklimmen of het terrein te bezien vanuit zolderramen. Dit levert aanzienlijk betere informatie dan waarneming vanaf de grond.

Bij twijfel of obstakels wel of niet in de ruwheidsklasse moeten worden opgenomen, moet men zich realiseren dat een obstakelzog tot 30 à 50 maal de obstakelhoogte windafwaarts van invloed is op het windaanbod. Als het totale zoggebied van de beschouwde obstakels groter is dan het resterende gebied, zal in het algemeen een hogere ruwheidsklasse moeten worden gehanteerd.

In de directe turbine-omgeving is het van belang hoe ruwheden georiënteerd zijn ten opzichte van de turbinelocaties. Bomenrijen, kassen en dergelijke in de richting van de locatie hebben een beperkte invloed op aanstromende wind. Open (water-)vlaktes kunnen bij een beperkte breedte toch een grote vrije strijklengte hebben in de turbinerichting, wat het windaanbod ten goede komt.

De bijgevoegde klassebeschrijving zal in combinatie met terreinschetsen en topografische kaartvoorbeelden een beeld verschaffen van de indeling

88-145/R.24/CAP

bijlage 6-6

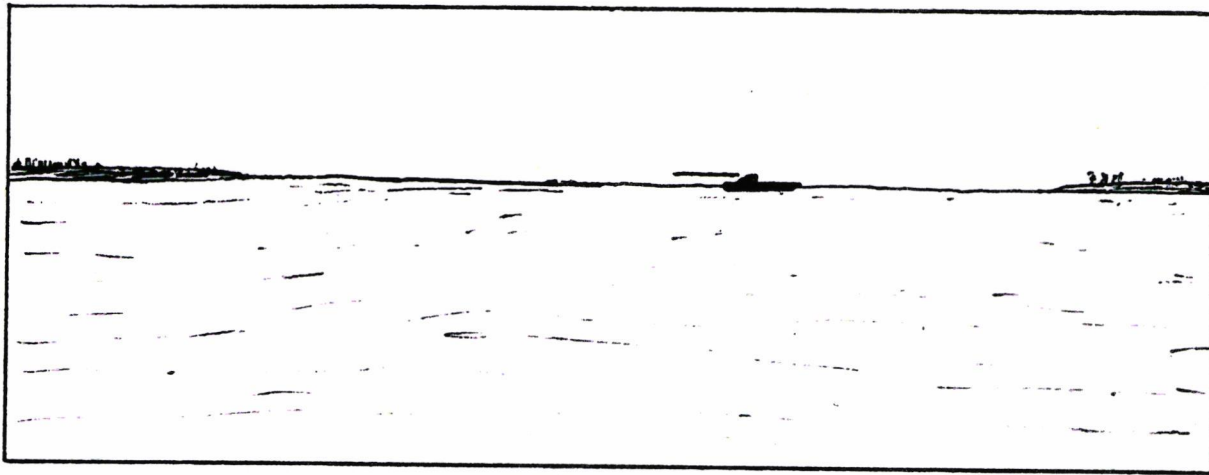
in acht terreinklassen. Bij terreinbeoordelingen moet men zich realiseren dat in opbrengstberekeningen meestal uitgegaan wordt van jaarlijkse wind- en opbrengstgemiddelden. De terreintoestand kan in de tijd veranderen, zowel per seizoen als in de loop der jaren. Dit geldt met name voor bouwland en bomenrijen, maar ook voor bijvoorbeeld stadsuitbreiding. Voorzichtigheid is dus geboden.

88-145/R.24/CAP

bijlage 6-7

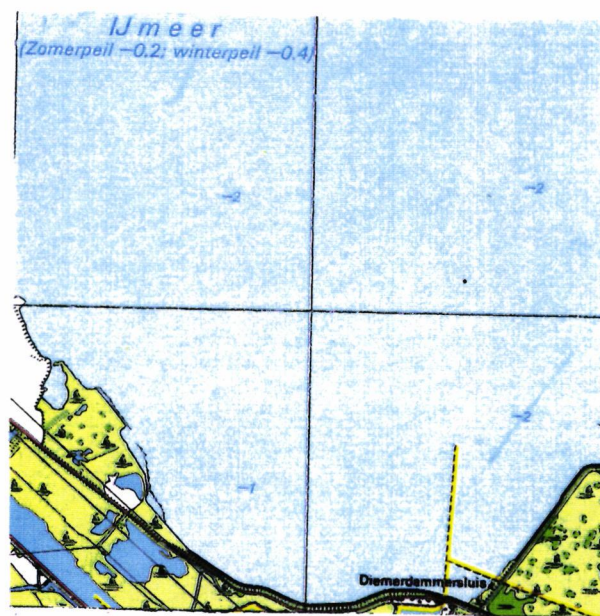
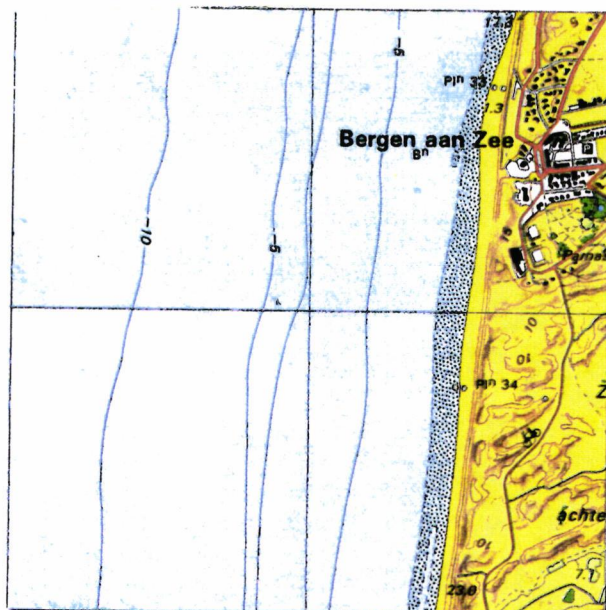
Tabel 6.1 De klasse-indeling van de terreinruwheid. H_{ob} is de gemiddelde obstakelhoogte voorkomend in een bepaald terrein.

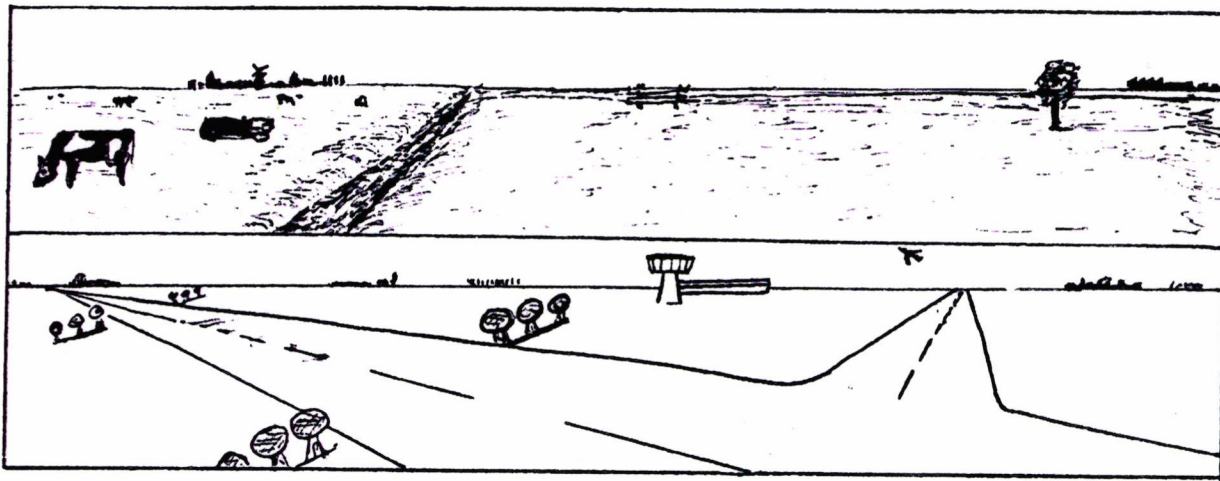
Klasse	z_0 [m]	d [m]	Totaalbeeld	Obstakels	Opmerkingen, v.b.
1	0.0002	0	open water vrije strijklengte	geen, golven uitgezonderd	zee; IJsselmeer
2	0.005	0	vlak en glad	niet noemenswaardig; onopvallend	strand; brede rivieren en plassen, vrije vrije strijklengte tussen de 400 m en 5 km
3	0.03	0	vlak, oppervlakkig begroeid	weinig; oppervlakkig	gras- en heidevlakten startbanen
4	0.1	0	regelmatige lage begroeiing	verspreid; open bomen- rijen en boerderijen op onderlinge afstand > 20 H_{ob}	bouwland; weiland met dwarssloten < 20 sloot- breedten van elkaar
5	0.25	0.3 H_{ob}	ruw en open met afwisselende begroeiing	boerderijen; dubbele rijen bebladerde bomen op onderlinge afstand > 15 H_{ob} ; kassengebied	mais; lage boomgaarden; hoog struikgewas
6	0.5	0.5 H_{ob}	veel gezichtsbepalen- de obstakels met open ruimten ca. 10 H_{ob}	gebouwengroepjes; stukken bos; hoge boomgaarden	kleine dorpjes; buiten- wijken; laag begroeide duinen
7	1	0.7 H_{ob}	overheersend obstakels met tussenruimten tot ca. 5 H_{ob} ; lage en middelhoge gebouwen	opgenomen in totaal- beeld: evt. verspreide hoogbouw	grote dorpen; de meeste steden; regelmatig bos; vol industriegebied
8	2	0.7 H_{ob}	zeer ruw en onregel- matig	veel grote hoogte- verschillen	hoge bossen met open plekken, steden met veel hoogbouw, raffinaderijen e.d.



klasse 1 $Z_0 = 0.0002 \text{ m}$

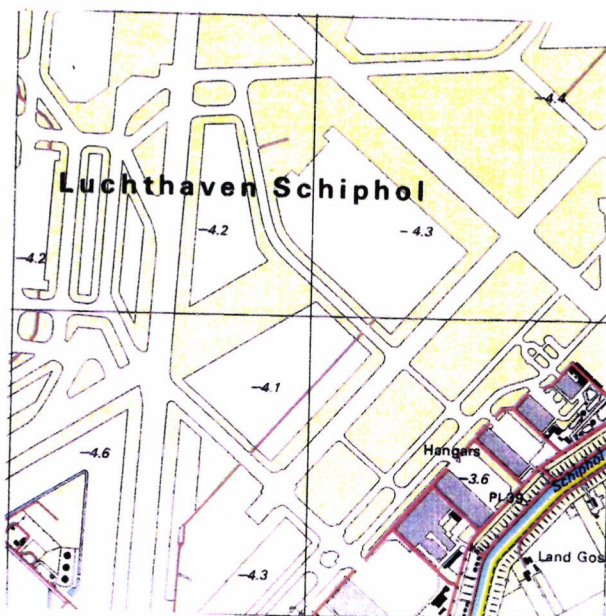
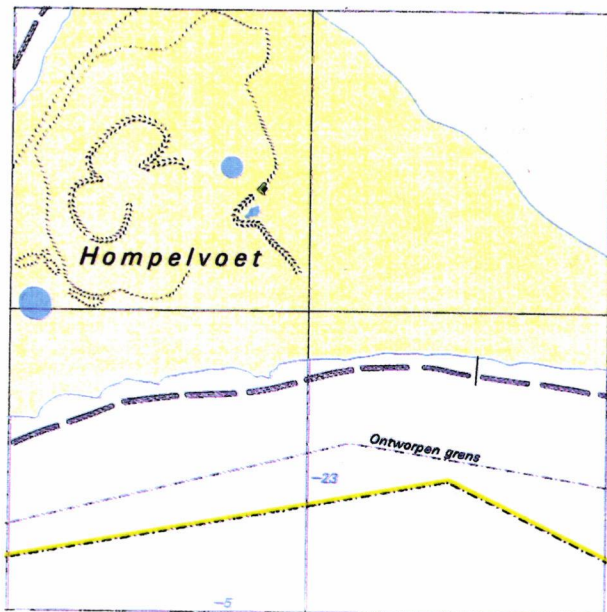
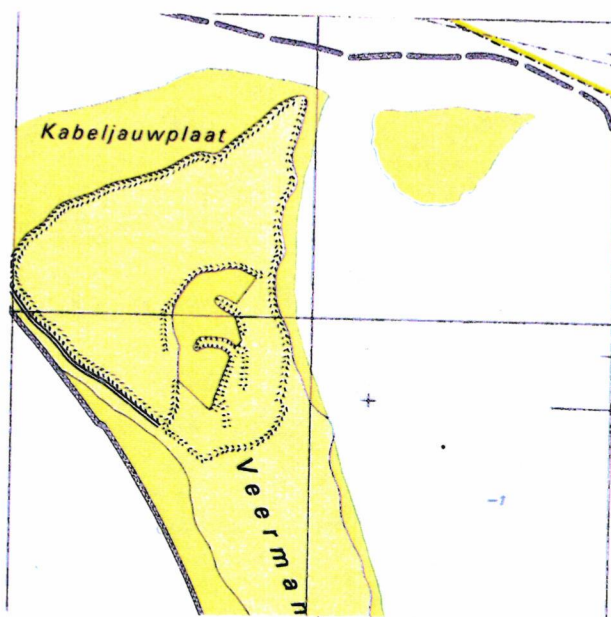
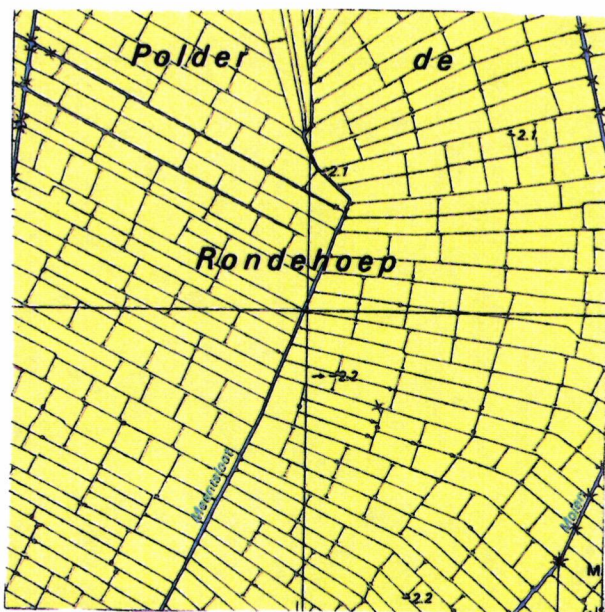
Open zee of plas (ongeacht de hoogte der eventuele golven), wad of gladde ijs- of sneeuwvlakte, met bovenwindse uitgestrektheid van tenminste enige kilometers.

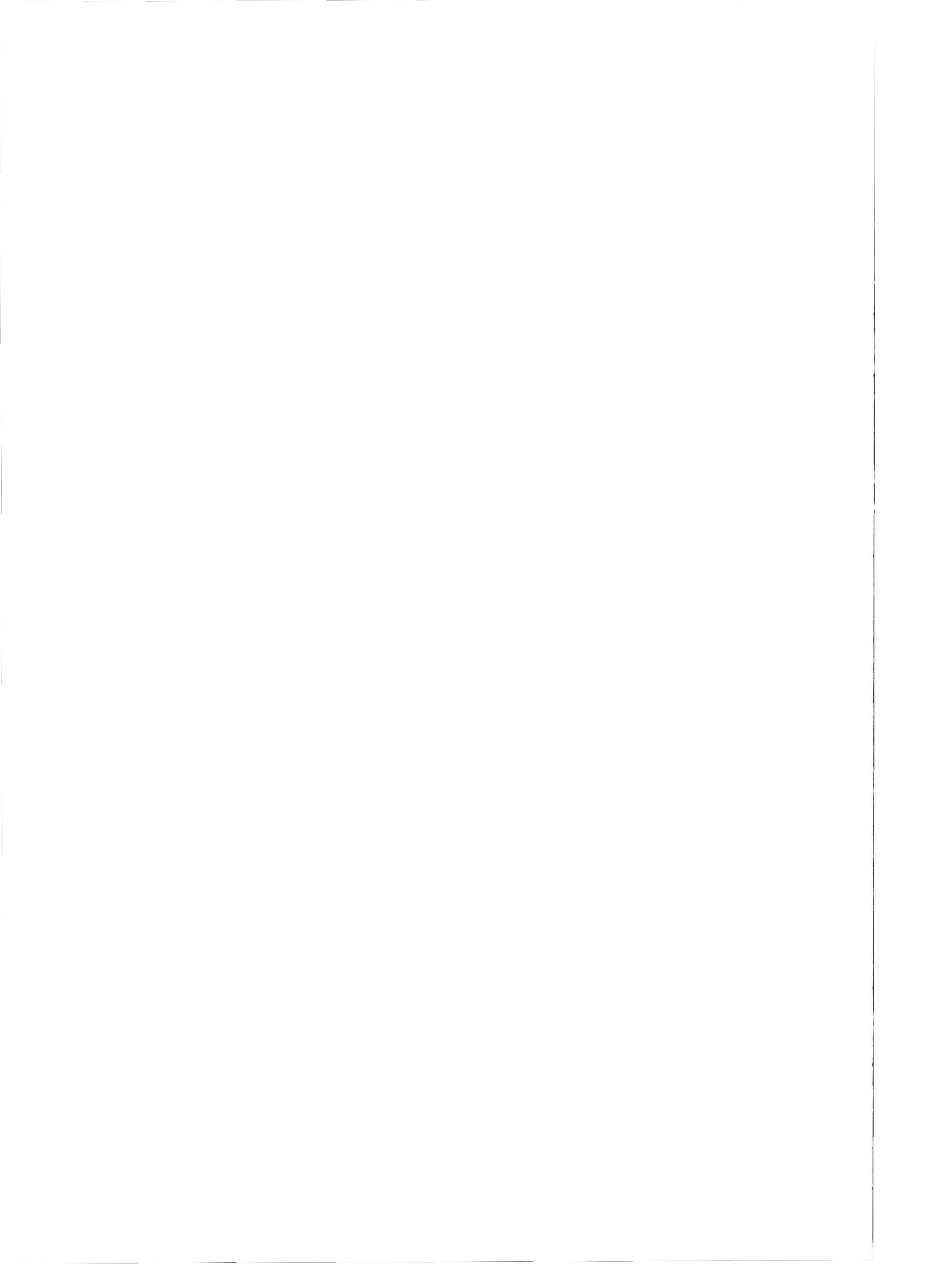


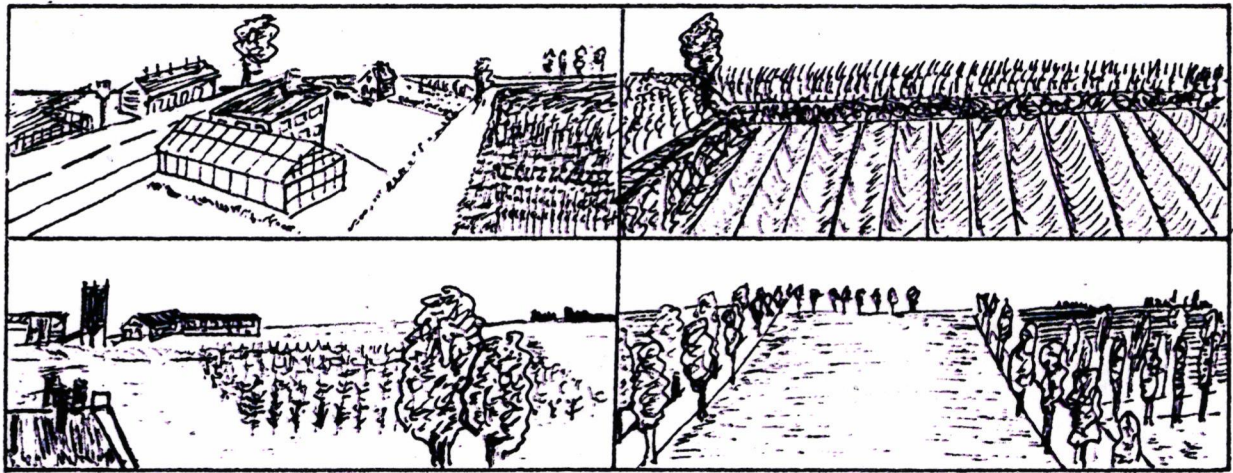


klasse 3 $Z_0 = 0.03 \text{ m}$

Vlak land met alleen oppervlakkige begroeiing (gras, heide) en soms lage obstakels. Bijvoorbeeld weideland zonder heggen of bomenrijen, braakliggend of pas ingezaaid bouwland.

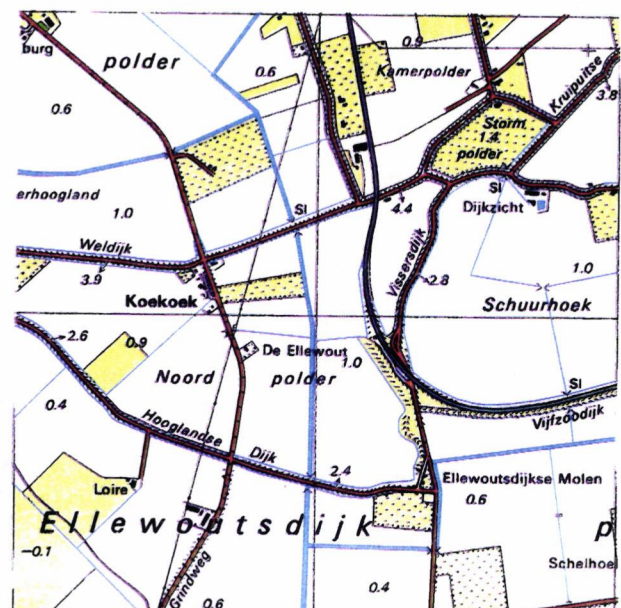
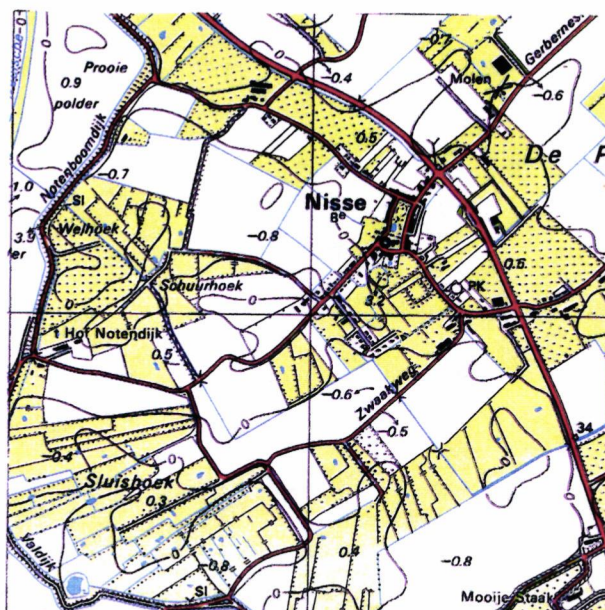
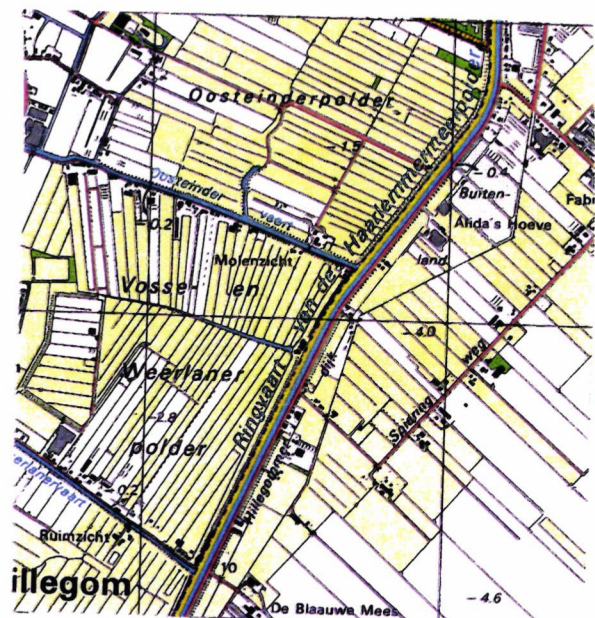
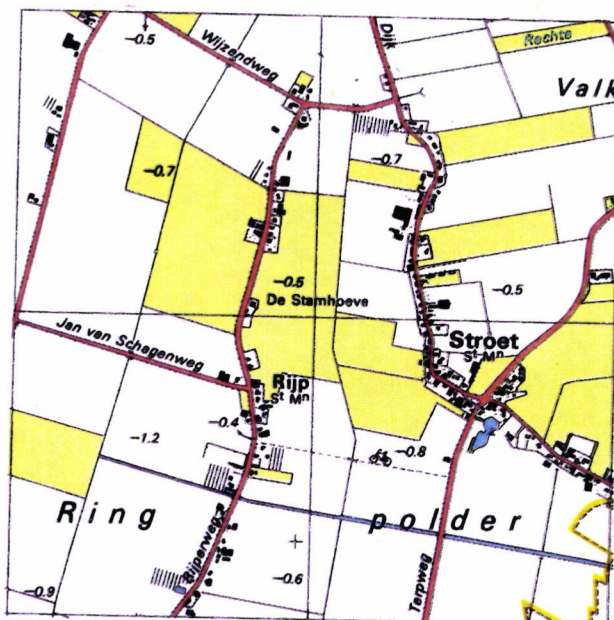






klasse 5 $Z_0 = 0.25 \text{ m}$

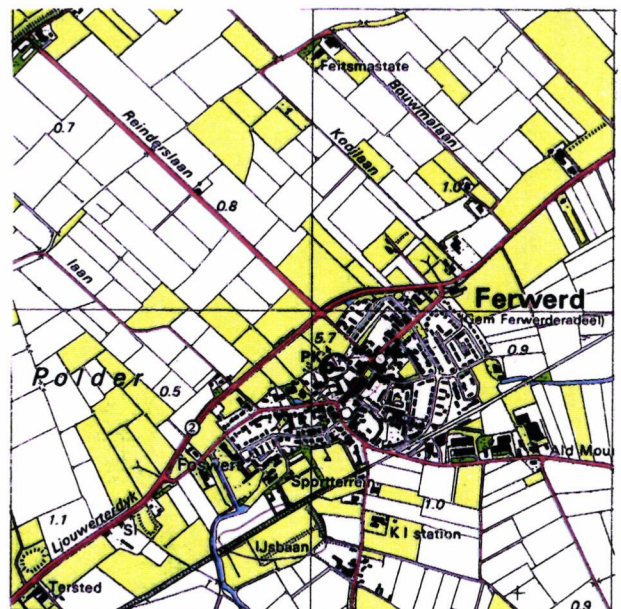
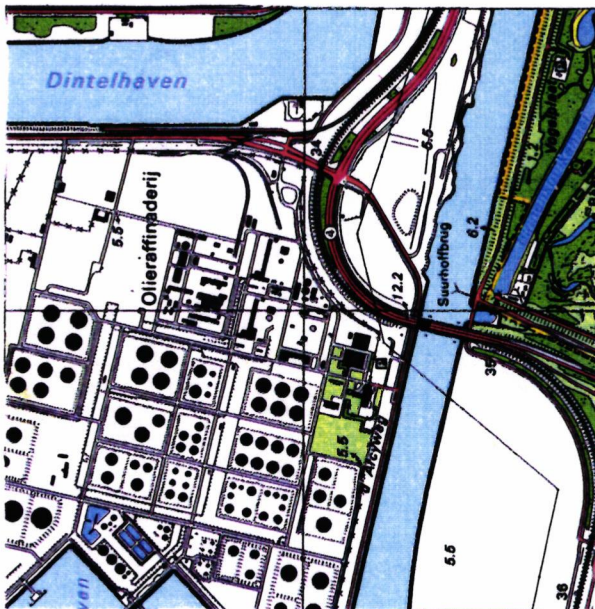
Bouwland met afwisselend lage en hoge gewassen, wijngaarden, maisvel-
den e.d. ($d \approx H_0$). Grote obstakels (dubbele rijen bebladerde bomen, lage
boomgaarden enz.) met onderlinge afstanden van omstreeks $15 \times$ hun
hoogte ($d \approx 0.3 H_0$).

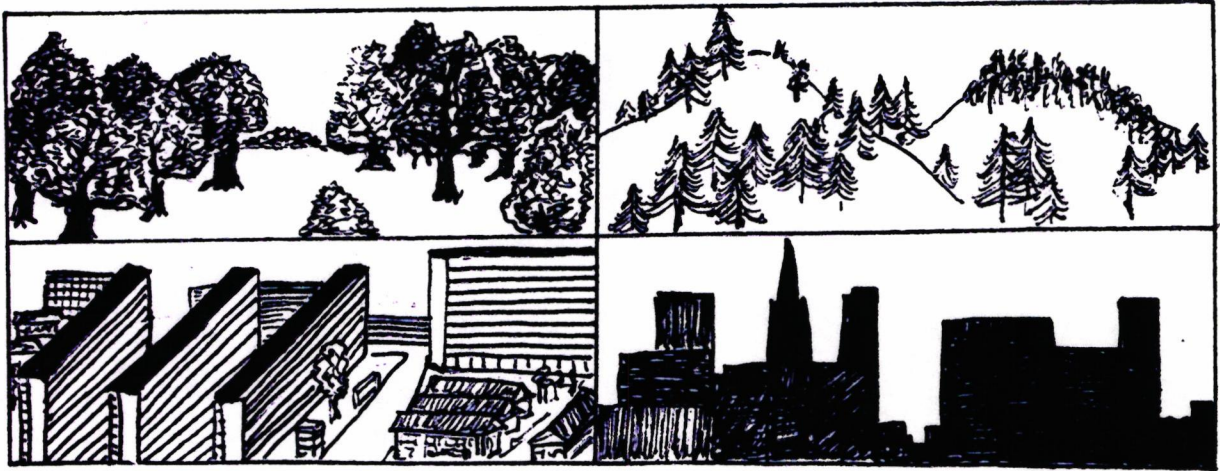




klasse 7 $Z_0 = 1.0 \text{ m}$

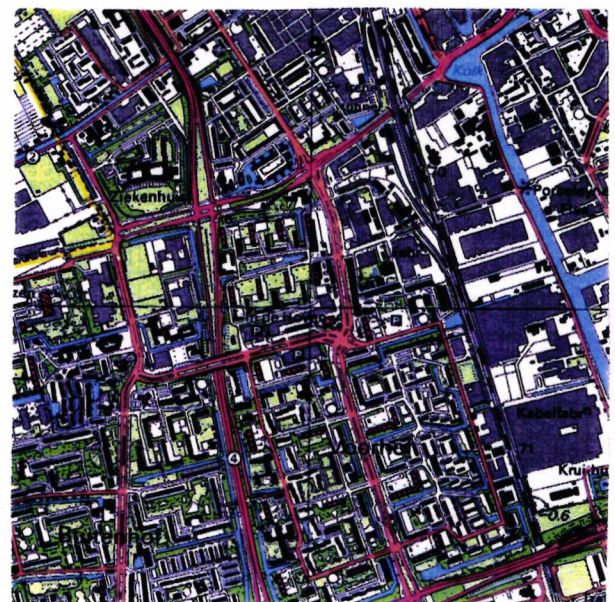
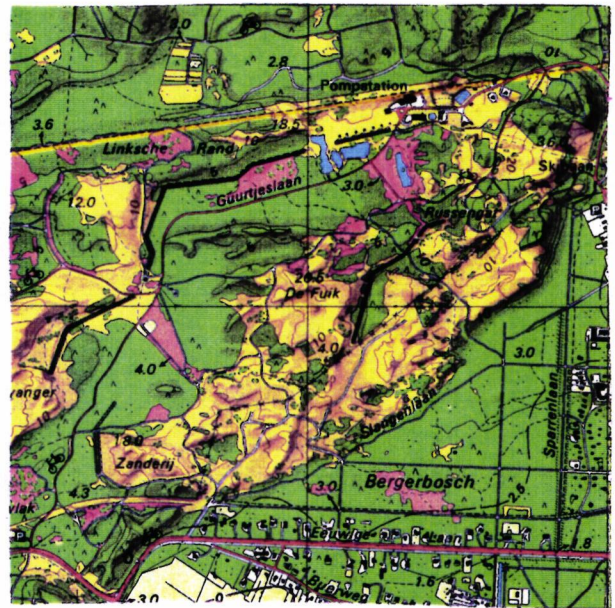
Bodem regelmatig en volledig bedekt met vrij grote obstakels, met tussen-gelegen ruimten niet groter dan een paar obstakelhoogten. Bijvoorbeeld grote bossen, lage en middelhoge bouw in dorpen en kleine steden ($d \approx 0.7 H_0$).



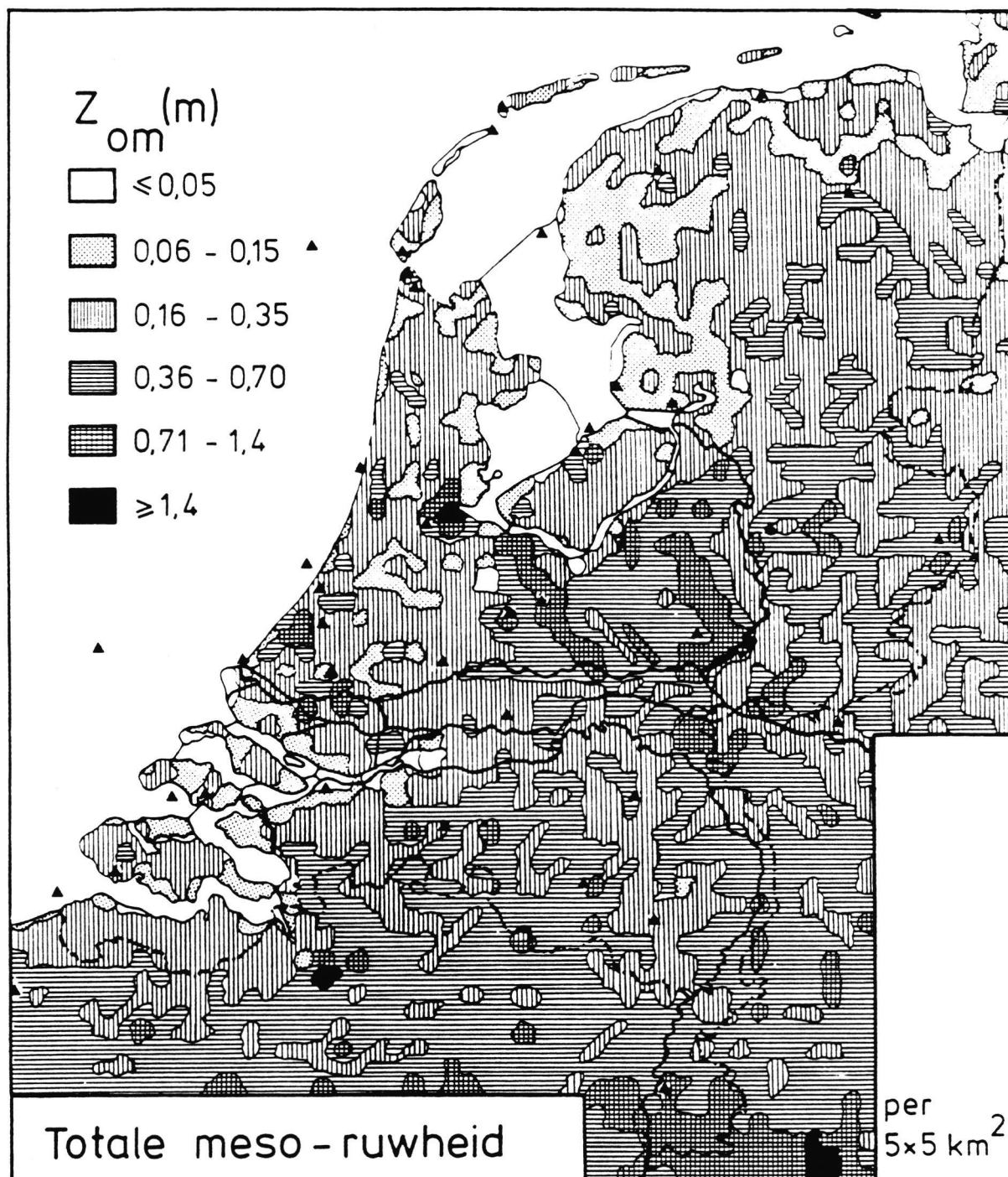


klasse 8 $Z_0 = 2.0 \text{ m}$

Centrum van grote stad met afwisselend laag- en hoogbouw. Ook: bossen met grote oude bomen en veel onregelmatig open plekken ($d \approx 0.7 H_0$).



Bijlage 7 MESORUWHEIDSKAART VAN NEDERLAND



Figuur 7.1 Mesoruwheidskaart van Nederland, situatie in 1971.
In deze kaart zijn tevens hoogteverschillen verwerkt.
De kaart is overgenomen uit "Windklimaat van Nederland"
van J. Wieringa en P.J. Rijkoort.

88-145/R.24/CAP

bijlage 8-1

Bijlage 8 MESOWRIJVINGSSNELHEID

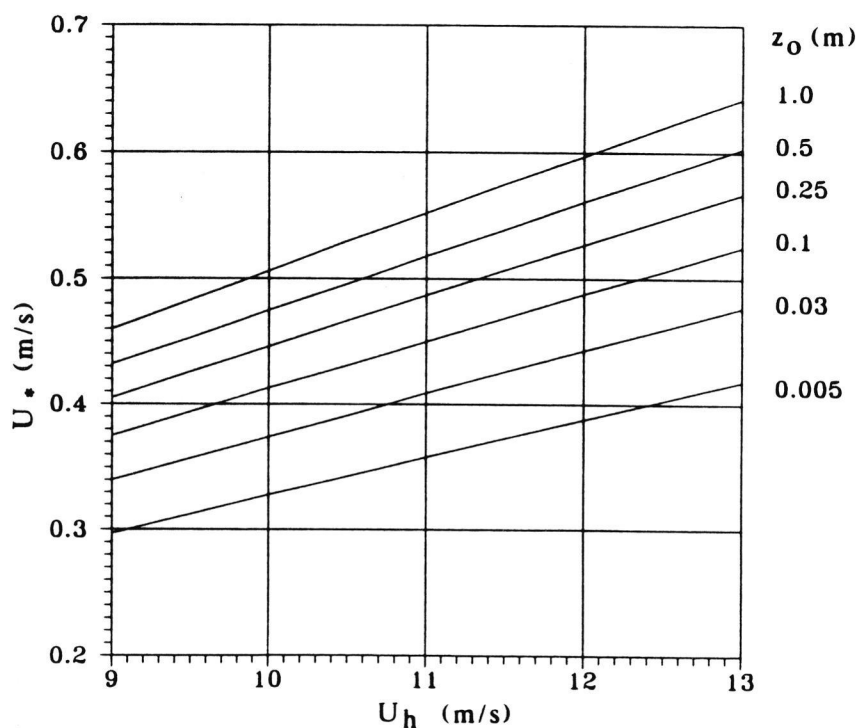
De mesowrijvingssnelheid u_{*m} , die het windveld op 60 m hoogte bepaald, hangt af van macrosnelheid U_h en de mesowruwheid z_{om} (N.B.: niet de locoruwheid z_o !). De relatie tussen deze drie is de geostrofische weerstandswet.

Rechtstreeks kan men deze bepaling doen met onderstaande grafiek. Het lijnverloop in de grafiek geeft evenwel aan, dat de relatie niet zonder meer numeriek te lineariseren valt. Een eenvoudige lineaire rekenrelatie vereist daarom een tussenstap, namelijk berekening van de hoek α tussen macrowind en oppervlaktewind met behulp van de formule:

$$\alpha = 35.64^\circ + 2.502 \ln z_{om} - 0.2333 U_h$$

Deze relatie geldt voor het praktische werkgebied van windturbine-locaties ($0.03 \text{ m} \leq z_{om} \leq 0.5 \text{ m}$, $9 \text{ m/s} \leq U_h \leq 13 \text{ m/s}$) met een onzekerheid van $\pm 0.3^\circ$. Daaruit volgt direct de mesowrijvingssnelheid via:

$$u_{*m} = 0.091 U_h \sin \alpha.$$



Figuur 8.1 De mesowrijvingssnelheid u_{*m} als functie van de macrowindsnelheid voor diverse waarden van z_{om} .

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-1

Bijlage 11 RUWHEIDS- EN HOOGTE-CORRECTIEFACTOR VOOR METHODE III

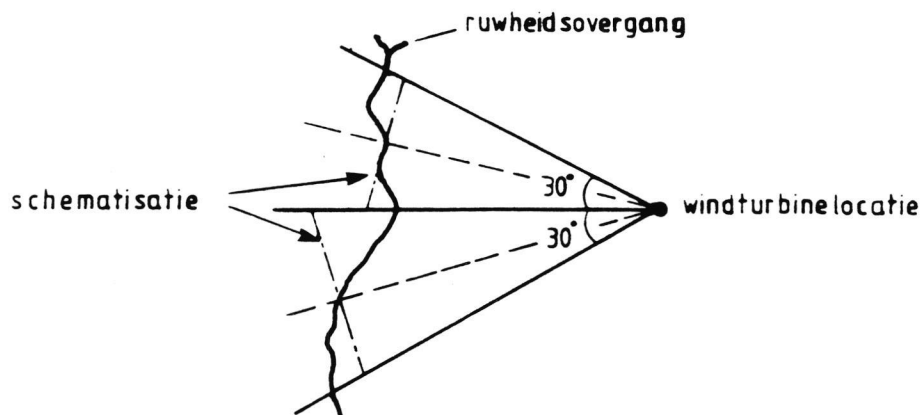
De windsnelheid op een potentiële windturbinelocatie wordt ondermeer bepaald door de omgevingsruwheid en de ashoogte. Met behulp van de factor C_Q kunnen potentiële windsnelheden van meteolocaties worden gecorrigeerd voor de lokale omgevingsruwheid en een andere hoogte. Per windrichtingssector van 30° wordt een waarde voor de factor C_Q berekend. In deze bijlage wordt de methodiek gegeven om de factor C_Q te kunnen berekenen. Daartoe wordt eerst in paragraaf 11.1 ingegaan op de gegevens omtrent de ruwheid die per 30° -sector moeten worden verzameld. Daarna wordt in paragraaf 11.2 aangegeven wanneer er sprake is van een 'land-sector' en wanneer er sprake is van een 'zeesector'. Tenslotte worden de berekeningsmethoden voor landsectoren (paragraaf 11.3) en voor zeesectoren (paragraaf 11.4) gepresenteerd, aangevuld met een procedure (paragraaf 11.5) die Stap A van de 'landsectorenmethode' vervangt indien er in een windrichtingssector een land/zee overgang is tussen 5 en 10 km van de windturbine-locatie.

11.1 Ruwheidsclassificatie per 30° sector

De terreinruwheid rondom de turbinelocatie moet tot een afstand van 10 km per 30° -sector in kaart worden gebracht. In bijlage 6 wordt uiteengezet hoe de ruwheidslengte en de nulpuntsverplaatsing van een terrein kunnen worden ingeschat.

Bij een indeling in 30° -sectoren moeten een drietal punten ten aanzien van deze ruwheidsclassificatie per sector worden verduidelijkt.

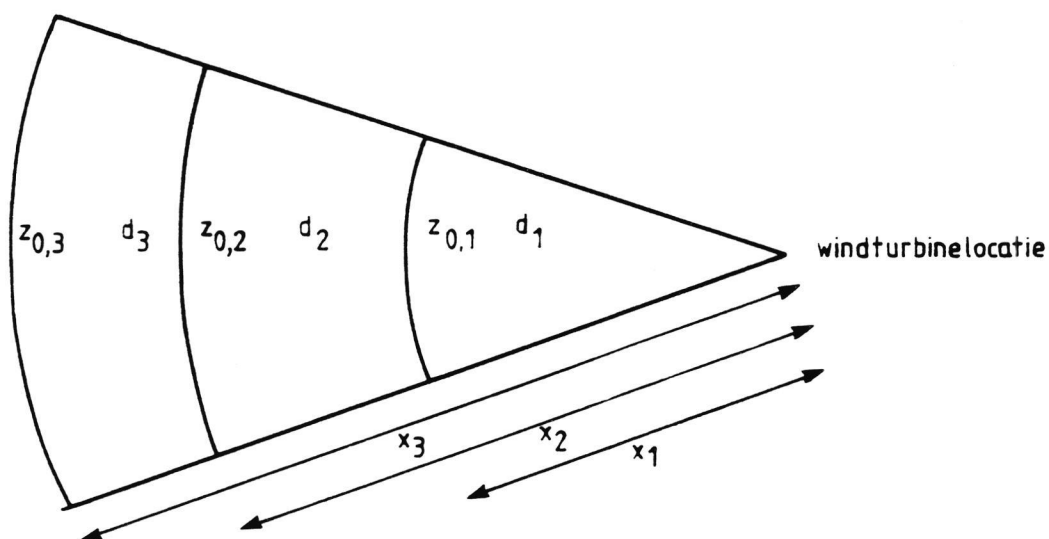
- De gekozen ruwheidswaarden en de afstand tot de ruwheidsovergangen worden toegewezen aan de hartlijn van een 30° -sector. Scheve ruwheidsovergangen worden hierbij dus geschematiseerd tot 'rechte' overgangen, zie figuur 11.1.



Figuur 11.1 Schematisering van ruwheidsovergangen.

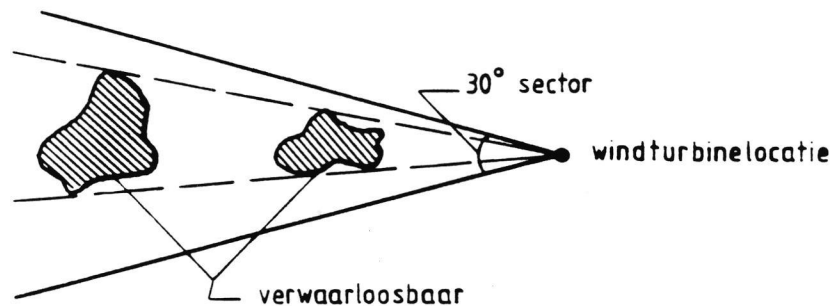
- Het aantal ruwheidsgebieden wordt, per 30°-sector, beperkt tot drie, te weten $z_{0,1}$, $z_{0,2}$ en $z_{0,3}$. Er kunnen dus maximaal twee ruwheidsovergangen optreden. De afstand van de turbine locatie tot de ruwheidsovergang wordt aangeduid met x . De nummering van de ruwheidsgebieden en de afstand tot de ruwheidsovergangen begint vanaf de turbine locatie en wordt aangeduid met subscript k ($k = 1, 2$ of 3). Figuur 11.2 verduidelijkt de nummering van de ruwheidsgebieden en de afstanden tot de ruwheidsovergangen.

Indien geen ruwheidsovergang aanwezig is geldt voor het gehele terrein $z_0 = z_{0,1}$. Dit geldt eveneens voor de nulpuntsverplaatsing $d = d_1$.



Figuur 11.2 Nummering van de ruwheidsgebieden en de afstanden tot de ruwheidsovergangen.

- De invloed van 'ruwheidseilanden' wordt weggelaten als de breedte zo gering is dat de omsloten hoek, gezien vanuit de turbinelocatie, kleiner is dan 15° , zie figuur 11.3.

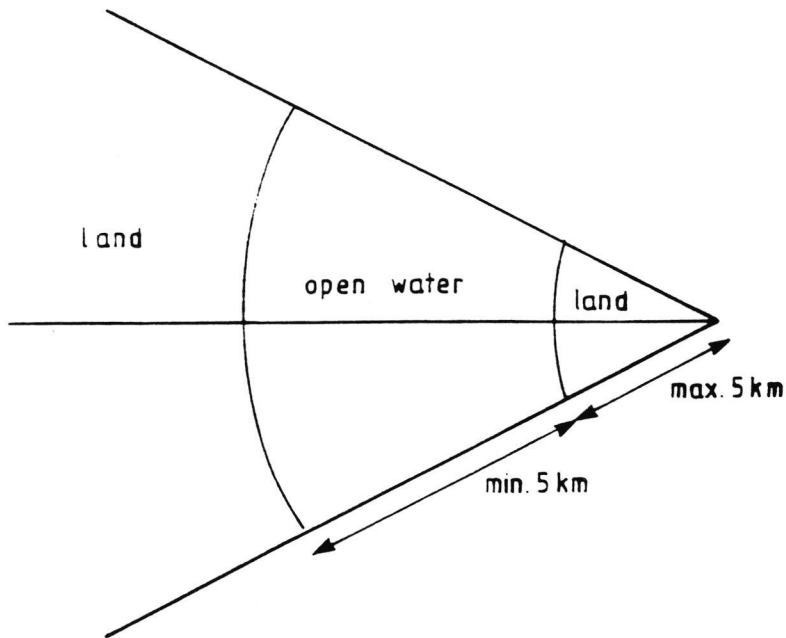


Figuur 11.3 Verwaarlozing van ruwheidseilanden.

Per windrichtingssector i zijn nu de invoergrootheden voor de berekening van $C_{Q,i}$ met betrekking tot de omgevingsruwheid aanwezig.

11.2 Opsplitsing in land en zeesectoren

De bepaling van de C_Q factor voor sectoren waarbij de wind grotendeels aanstroomt over land verloopt anders dan de bepaling van de C_Q factor voor sectoren waarbij de wind voor een groot deel aanstroomt over open water. Allereerst moet dus bepaald worden of we te maken hebben met een 'landsector' danwel met een 'zeesector'. Een 'zeesector' wordt daarbij als volgt gedefinieerd. Indien de afstand van de turbinelocatie tot aan het water kleiner is dan 5 kilometer en de lengte van het open stuk water waarover de wind aanstroomt minimaal 5 kilometer bedraagt dan is er sprake van een 'zeesector'. In alle andere gevallen is er sprake van een 'landsector'. Figuur 11.4 maakt deze definitie van een 'zeesector' visueel. Voor de 'zeesectoren' dient verder nog opgemerkt te worden dat, indien er zich na het stuk open water van minimaal 5 km nog een ruwheidsovergang bevindt binnen de eerder genoemde 10 km, dit niet meer meegenomen hoeft te worden in de berekeningen. Voor 'zeesectoren' is het verst van de windturbine verwijderde terrein dus per definitie open water.



Figuur 11.4 Definitie van het begrip 'zeesector'.

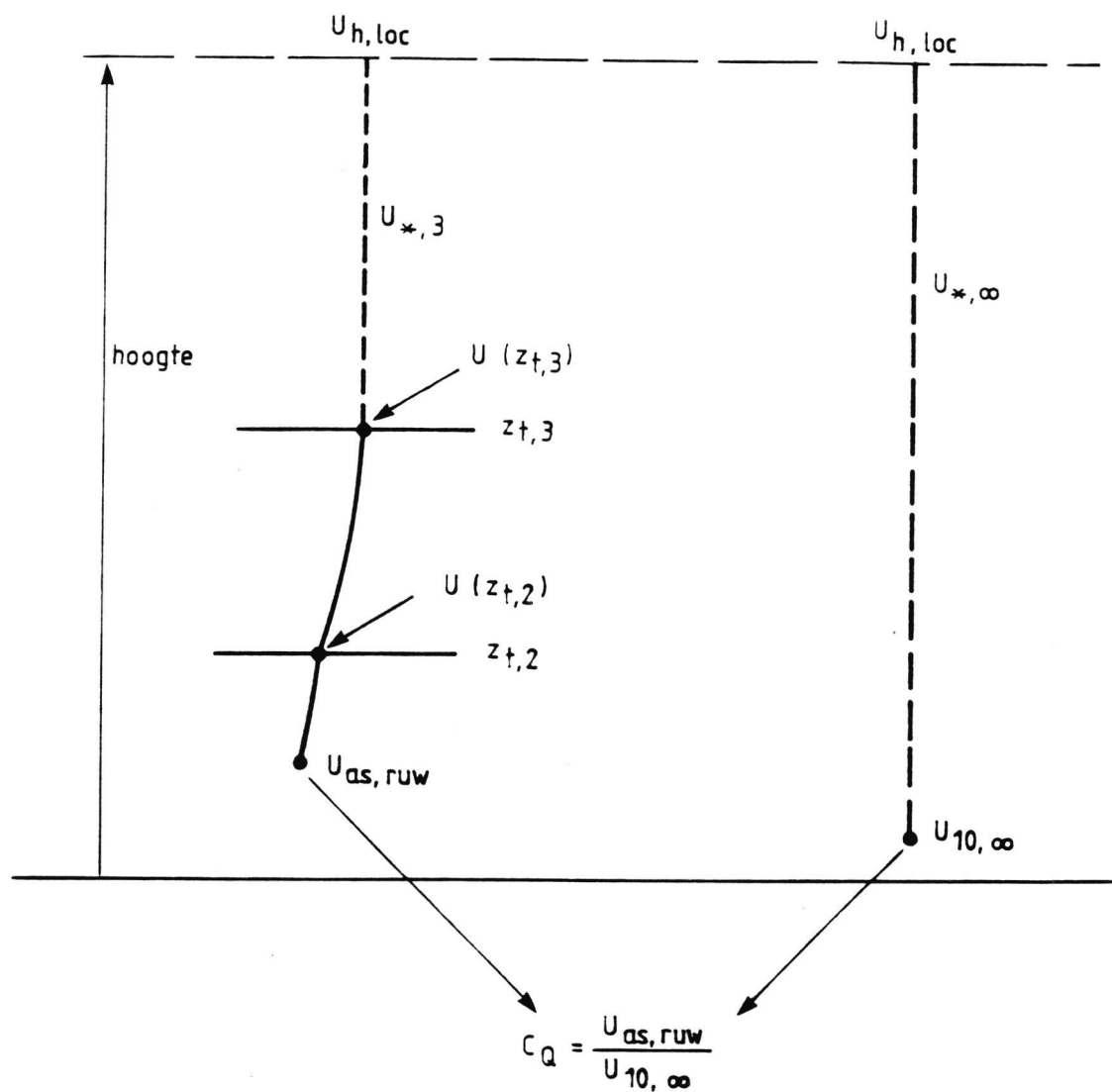
Zeesectoren komen dus alleen voor bij locaties aan de kust van de Noordzee, de Waddenzee en het IJsselmeer en in sommige gevallen bij locaties in Zeeland. Voor 'zeesectoren' moet de procedure "Berekening C_Q factor voor zeesectoren" (par. 11.4) worden gevolgd. Voor 'landsectoren' moet de procedure "Berekening C_Q factor voor landsectoren" (par. 11.3) worden gevolgd. De C_Q factor berekend via de ene methode kan dan ook niet zondermeer worden vergeleken met de C_Q factor berekend via de andere methode.

Indien voor bepaalde sectoren de 'zeesectoren' procedure moet worden gevolgd, dan wordt de potentiële windsnelheid voor de betreffende sectoren gegeven door de potentiële windsnelheid boven zee (de gegevens van het meteostation Lichtschip Texel moeten dan worden gebruikt, zie bijlage 1). Voor 'zeesectoren' geldt verder dat C_W en C_M gelijk zijn aan 1. Voor de 'landsectoren' moeten de gegevens van de potentiële windsnelheid van een landlocatie worden gebruikt. Daarbij kan gekozen worden uit de meteostations IJmuiden-Duin, Schiphol en Eindhoven. Open water heeft in deze sectoren een ruwheidslengte $z_0 = 0.005$ m.

Bij kustlocaties komt het dus voor dat een deel van de sectoren bepaald wordt via de potentiële windsnelheid boven zee en een deel van de sectoren bepaald wordt via de potentiële windsnelheid van een landstation (indien de turbinelocatie niet verder dan circa 1 km van de kustlijn gelegen is, op de Waddeneilanden ligt of indien $U_h \geq 12$ m/s dienen de gegevens van IJmuiden-Duin gebruikt te worden, voor de overige kustlocaties die van Schiphol).

11.3 Berekening C_Q factor voor landsectoren

Het principe voor de bepaling van de C_Q factor voor landsectoren is gebaseerd op het schalen van de macrowindsnelheid naar de gewenste ashoogte. Allereerst wordt de macrowindsnelheid, $U_{h,loc}$, geschaald naar ashoogte waarbij rekening wordt gehouden met de diverse ruwheidslengten en ruwheidsovergangen. Het resultaat voor deze sectoren is U_{asruw} , de windsnelheid op ashoogte waarbij alleen rekening gehouden is met ruwheidseffecten. Ten tweede wordt de macrowindsnelheid geschaald naar 10 meter hoogte met een ruwheidslengte van 0.03 meter, dit levert de windsnelheid $U_{10,\infty}$. Het quotient van deze 2 windsnelheden ($U_{asruw}/U_{10,\infty}$) is nu de C_Q factor. Figuur 11.5 geeft een schets van deze berekeningswijze van de C_Q factor.



Figuur 11.5 Schets van de berekeningswijze van de C_Q factor voor landsectoren.

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-7

Het onderstaande schema geeft aan hoe de factor C_Q voor landsectoren berekend moet worden.

Stap	Omschrijving	Te berekenen grootheden			Ruwheid 0.03 m
		Een ruwheid	Twee ruwheden	Drie ruwheden	
A	u_* berekenen	$u_{*,1}$	$u_{*,2}$	$u_{*,3}$	$u_{*,\infty}$
B	z_t berekenen	--	$z_{t,2}$	$z_{t,2} ; z_{t,3}$	--
C	$U(z_t)$ berekenen	--	$U(z_{t,2})$	$U(z_{t,2}) ; U(z_{t,3})$	--
D	U_{asruw} berekenen	U_{asruw}	U_{asruw}	U_{asruw}	--
E	$U_{10,\infty}$ berekenen	--	--	--	$U_{10,\infty}$
F	C_Q berekenen	$C_{Q,i}$	$C_{Q,i}$	$C_{Q,i}$	--

Stap A: Berekening van de wrijvingsnelheid u_*

De wrijvingsnelheid u_* moet berekend worden uit de macrowindsnelheid op de turbinelocatie ($U_{h,loc}$). Deze macrowindsnelheid is bepaald in stap 5. De bepaling van deze u_* verloopt hetzelfde als beschreven in stap 8 van methode II.

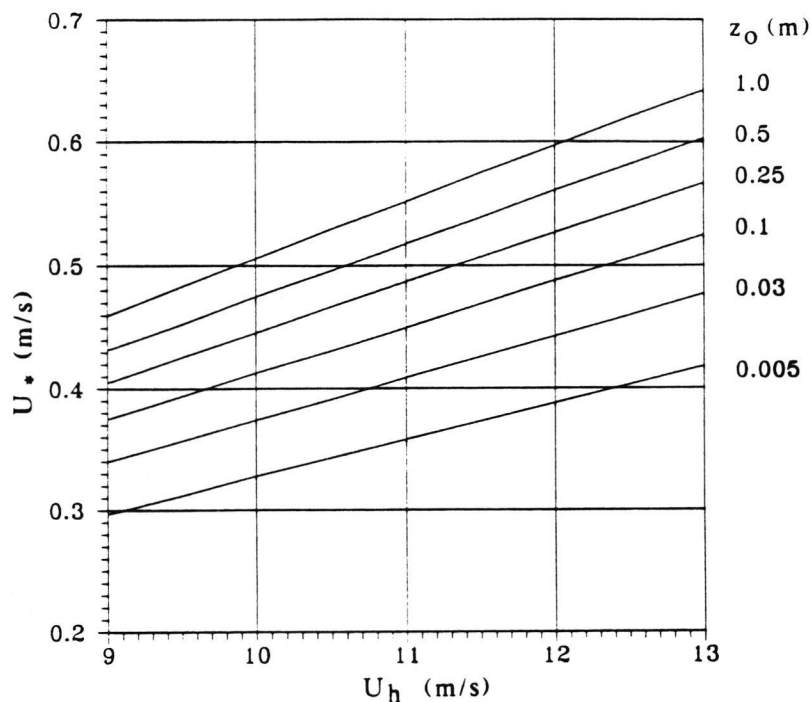
$$u_{*,k} = 0.091 U_{h,loc} \sin \alpha$$

$$\alpha = 2.5 \ln(z_0) - 0.23 U_{h,loc} + 35.6^\circ$$

Bij de bepaling van $u_{*,k}$ wordt z_0 gegeven door $z_{0,k}$. Bij de bepaling van $u_{*,\infty}$ wordt z_0 gegeven door 0.03 meter.

De u_* kan ook worden afgelezen uit figuur 11.6 waarin u_* is uitgezet als functie van U_h en z_0 .

Indien in de sector tussen 5 en 10 km van de windturbine-locatie een land/zee overgang voorkomt, dient $u_{*,k}$ te worden bepaald via de procedure beschreven in paragraaf 11.5. Hierna kan met Stap B van de 'landsectorenmethode' verder worden gegaan.



Figuur 11.6 u_* als functie van U_h en z_0 .

Stap B: Berekening van de interne grenslaaghoogte z_t

De interne grenslaaghoogte moet berekend worden uit een impliciete relatie. Dit kan alleen via een iteratieve procedure. De impliciete relatie voor de interne grenslaaghoogte z_t is als volgt

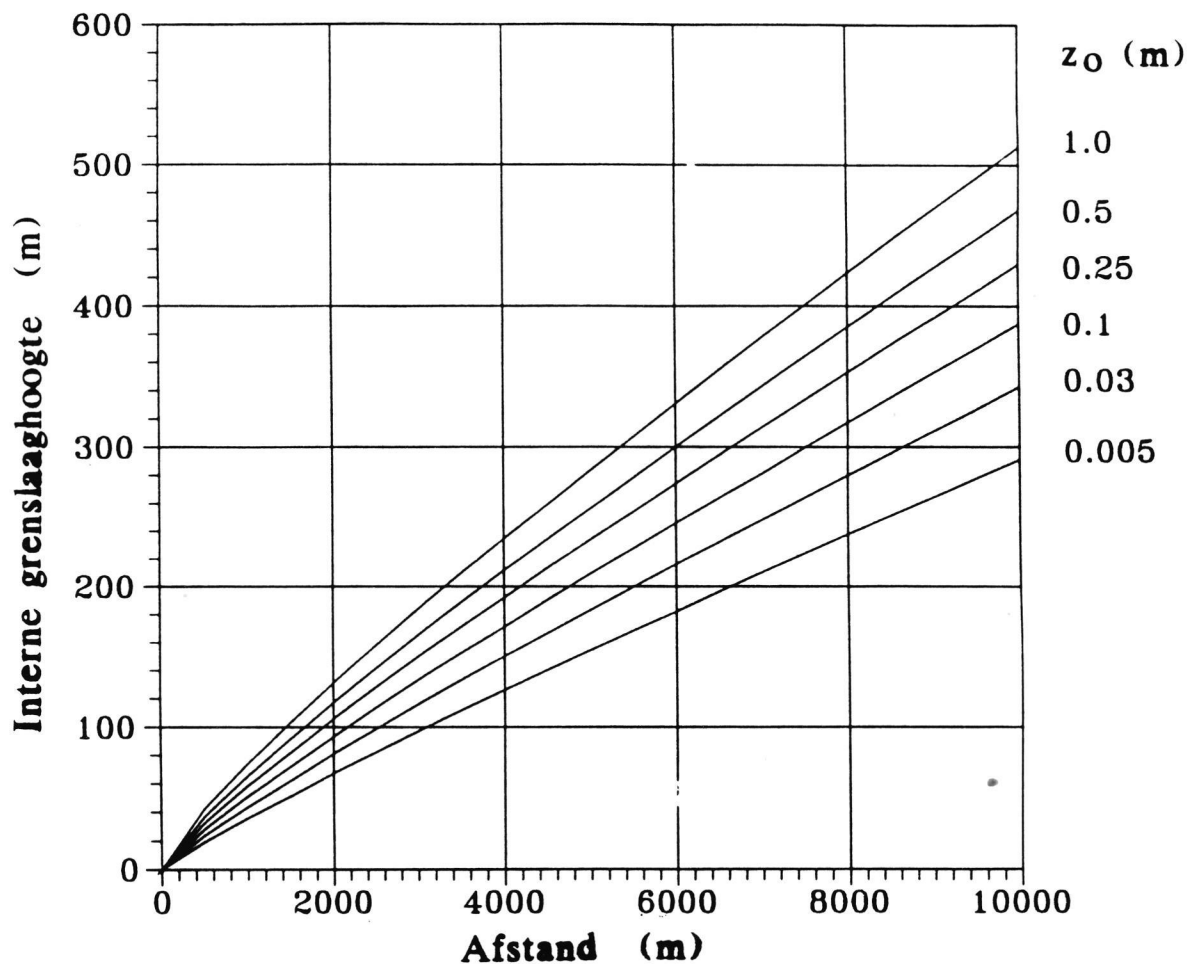
$$0.32 X = z_t \ln (z_t / z_0^+)$$

In deze impliciete vergelijking moet voor de ruwheidslengte z_0 de grootste van de twee ruwheidslengten grenzend aan de ruwheidsovergang worden genomen (dit is aangeduid met z_0^+).

Deze impliciete relatie kan benaderd worden door een eenvoudige relatie, die voor de berekening van z_t gebruikt kan worden.

$$z_t = 0.32 (z_0^+)^{0.2} (X)^{0.8}$$

Voor het gemak is in een grafiek (figuur 11.7) de waarde van z_t uitgezet als functie van X (de afstand van de windturbine tot de grenslaagovergang) en van z_0 .



Figuur 11.7 De interne grenslaaghoogte z_t als functie van de afstand tot de grenslaagovergang X, voor verschillende ruwheidslengten z_0 .

Stap C: Berekening van de windsnelheid op de hoogte z_t

- Twee ruwheden, één ruwheidsovergang

De windsnelheid op de hoogte van de interne grenslaag $z_{t,2}$ wordt gegeven door de formule

$$U(z_{t,2}) = (u_{*,2}/0.4) \ln(z_{t,2}/z_{0,2})$$

- Drie ruwheden, twee ruwheidsovergangen

De windsnelheid op de hoogte van de interne grenslaag $z_{t,3}$ wordt gegeven door de formule

$$U(z_{t,3}) = (u_{*,3}/0.4) \ln(z_{t,3}/z_{0,3})$$

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-10

De windsnelheid op de hoogte van de interne grenslaag $z_{t,2}$ wordt gegeven door de formule

$$U(z_{t,2}) = U(z_{t,3}) \left(\ln(z_{t,2}/z_{0,2}) / \ln(z_{t,3}/z_{0,2}) \right)$$

Stap D: Berekening van de windsnelheid op ashoogte

- Eén ruwheid, geen ruwheidsovergang

De windsnelheid op ashoogte wordt gegeven door de formule

$$U_{asruw} = (u_{*,1}/0.4) \ln((H_{as}-d_1)/z_{0,1})$$

- Twee ruwheden, één ruwheidsovergang

Er zijn nu twee situaties te onderscheiden, te weten; de ashoogte ligt boven de interne grenslaaghoogte $z_{t,2}$ of de ashoogte ligt onder deze interne grenslaaghoogte.

$$1) H_{as} > z_{t,2}: U_{asruw} = (u_{*,2}/0.4) \ln((H_{as} - d_2)/z_{0,2})$$

$$2) H_{as} < z_{t,2}: U_{asruw} = U(z_{t,2}) \left(\ln((H_{as} - d_1)/z_{0,1}) / \ln(z_{t,2}/z_{0,1}) \right)$$

- Drie ruwheden, twee ruwheidsovergangen

Er zijn drie situaties te onderscheiden, te weten: de ashoogte ligt boven de interne grenslaaghoogte $z_{t,3}$, de ashoogte ligt tussen de eerste en tweede interne grenslaaghoogte of de ashoogte ligt onder de interne grenslaaghoogte $z_{t,2}$.

$$1) H_{as} > z_{t,3} : U_{asruw} = (u_{*,3}/0.4) \ln((H_{as}-d_3)/z_{0,3})$$

$$2) z_{t,2} < H_{as} < z_{t,3}: U_{asruw} = U(z_{t,3}) \left(\ln((H_{as}-d_2)/z_{0,2}) / \ln(z_{t,3}/z_{0,2}) \right)$$

$$3) H_{as} < z_{t,2} : U_{asruw} = U(z_{t,2}) \left(\ln((H_{as}-d_1)/z_{0,1}) / \ln(z_{t,2}/z_{0,1}) \right)$$

Stap E: Berekening van de windsnelheid op 10 m hoogte bij $z_0 = 0.03$ m

De windsnelheid op 10 meter hoogte bij een uniforme ruwheid van 0.03 meter kan direkt berekend worden uit u_* via de formule

$$U_{10,\infty} = (u_{*,\infty}/0.4) \ln(10/0.03)$$

Stap F: Berekening van C_Q

De ruwheids- en hoogte-correctiefactor wordt nu gegeven door de formule

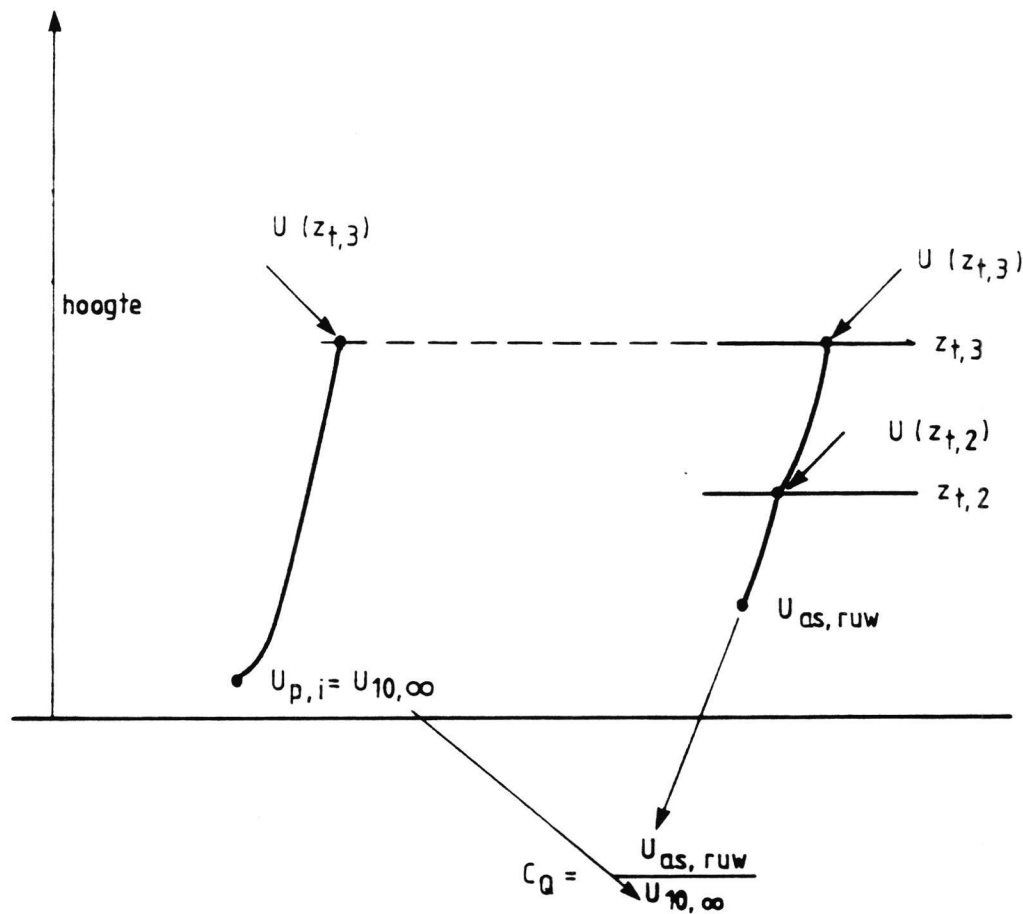
$$C_Q = U_{asruw}/U_{10,\infty}$$

11.4 Berekening C_Q factor voor zeesectoren

Het principe voor de bepaling van de C_Q factor voor zeesectoren is gebaseerd op het schalen van de potentiële windsnelheid op 10 meter hoogte boven open water naar de gewenste ashoogte. De potentiële windsnelheid boven open water wordt geschaald naar ashoogte waarbij rekening wordt gehouden met de diverse ruwheidslengten en ruwheidsovergangen. Het resultaat voor deze sectoren is U_{asruw} ; de windsnelheid op ashoogte waarbij alleen rekening gehouden is met ruwheidseffecten. De potentiële windsnelheid voor de desbetreffende sector boven open water is U_p . Het quotiënt van deze 2 windsnelheden (U_{asruw}/U_p) is weer de C_Q factor. Figuur 11.8 geeft een schets van deze berekeningswijze van de C_Q factor.

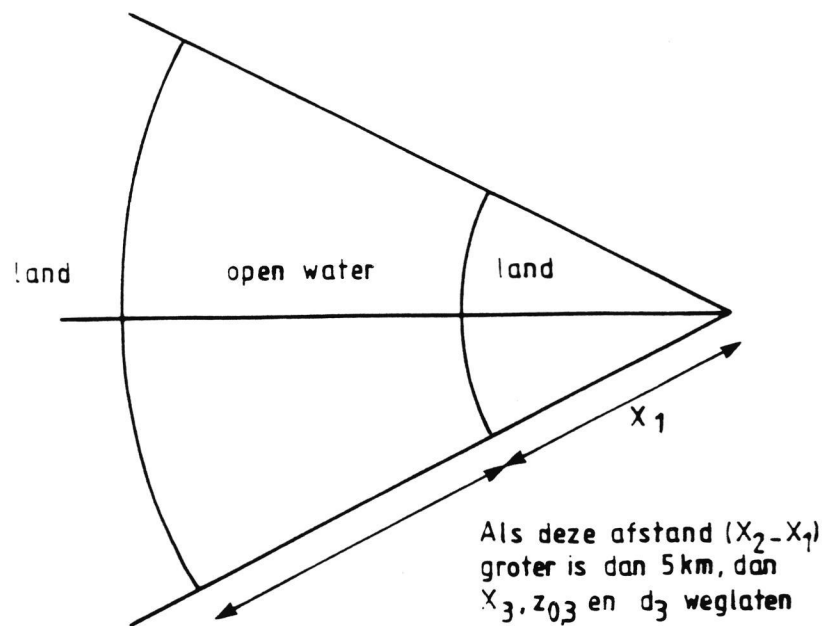
88-145/R.24/CAP

bijlage 11-12



Figuur 11.8 Schets van de berekeningswijze van de C_Q factor voor zeesectoren.

Bij deze procedure moet worden opgemerkt dat het verst van de windturbine verwijderde terrein per definitie altijd open water is. Hiervoor geldt: $z_0 = 0.0002$ meter en de nulpuntsverplaatsing $d = 0$. Ook al zou na een open stuk water van meer dan 5 kilometer nog een overgang naar land plaatsvinden dan wordt dit niet meegenomen. Er wordt vanuit gegaan dat de windsnelheid zich boven dit open stuk water zodanig herstelt dat de potentiële windsnelheid boven open water als uitgangspunt kan worden gebruikt. Figuur 11.9 geeft een illustratie van deze opmerking.



Figuur 11.9 Illustratie van het weglaten van land/zee overgang na een vrije aanstroming over open water van minimaal 5 kilometer.

Het onderstaande schema geeft aan hoe de factor C_Q voor zeesectoren berekend moet worden.

Stap	Omschrijving	Te berekenen grootheden			Ruwheid 0.0002 m
		Een ruwheid	Twee ruwheden	Drie ruwheden	
A	u_* berekenen	--	--	--	--
B	z_t berekenen	--	$z_{t,2}$	$z_{t,2} ; z_{t,3}$	--
C	$U(z_t)$ berekenen	--	$U(z_{t,2})$	$U(z_{t,2}) ; U(z_{t,3})$	--
D	U_{asruw} berekenen	U_{asruw}	U_{asruw}	U_{asruw}	--
E	U_p berekenen	--	--	--	$U_{10,\infty}$
F	C_Q berekenen	$C_{Q,i}$	$C_{Q,i}$	$C_{Q,i}$	--

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-14

Stap A: Berekening van de wrijvingssnelheid u_*

De wrijvingssnelheid u_* hoeft in de procedure voor de zeesectoren niet bepaald te worden.

Stap B: Berekening van de interne grenslaaghoogte z_t

De interne grenslaaghoogte moet berekend worden uit een impliciete relatie. Dit kan alleen via een iteratieve procedure. De impliciete relatie voor de interne grenslaaghoogte z_t is als volgt

$$0.32 X = z_t \ln(z_t/z_0^+)$$

In deze impliciete vergelijking moet voor de ruwheidslengte z_0 de grootste van de twee ruwheidslengten grenzend aan de ruwheidsovergang worden genomen (dit is aangeduid met z_0^+).

Deze impliciete relatie kan benaderd worden door een eenvoudige relatie, die voor de berekening van z_t gebruikt kan worden.

$$z_t = 0.32 (z_0^+)^{0.2} (X)^{0.8}$$

Voor het gemak is in een grafiek (figuur 11.6) de waarde van z_t uitgezet als functie van X (de afstand van de windturbine tot de grenslaagovergang) en als functie van z_0 .

Stap C: Berekening van de windsnelheid op de hoogte z_t

- Twee ruwheden, één ruwheidsovergang

De windsnelheid op de hoogte van de interne grenslaag $z_{t,2}$ wordt gegeven door de formule

$$U(z_{t,2}) = U_p (\ln(z_{t,2}/0.0002)/\ln(10/0.0002))$$

Bedacht moet worden dat in dit geval voor terrein 2 geldt: $z_0 = 0.0002$ en $d = 0$.

- Drie ruwheden, twee ruwheidsovergangen

De windsnelheid op de hoogte van de interne grenslaag $z_{t,3}$ wordt weer gegeven door de formule

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-15

$$u(z_{t,3}) = U_p (\ln(z_{t,3}/0.0002)/\ln(10/0.0002))$$

De windsnelheid op de hoogte van de interne grenslaag $z_{t,2}$ wordt gegeven door de formule

$$U(z_{t,2}) = U(z_{t,3}) (\ln(z_{t,2}/z_{0,2})/\ln(z_{t,3}/z_{0,2}))$$

Stap D: Berekening van de windsnelheid op ashoogte

- Eén ruwheid, geen ruwheidsovergang

De windsnelheid op ashoogte wordt gegeven door de formule

$$U_{asruw} = U_p (\ln(H_{as}/0.0002)/\ln(10/0.0002))$$

Bedacht moet worden dat in dit geval het terrein alleen maar bestaat uit open water: $z_0 = 0.0002$ en $d = 0$.

- Twee ruwheden, één ruwheidsovergang

Er zijn nu twee situaties te onderscheiden, te weten: de ashoogte ligt boven de interne grenslaaghoogte $z_{t,2}$ of de ashoogte ligt onder de interne grenslaaghoogte

$$1) H_{as} > z_{t,2}: U_{asruw} = U_p (\ln(H_{as}/0.0002)/\ln(10/0.0002))$$

$$2) H_{as} < z_{t,2}: U_{asruw} = U(z_{t,2}) (\ln((H_{as} - d_1)/z_{0,1})/\ln(z_{t,2}/z_{0,1}))$$

Bedacht moet worden dat in dit geval voor terrein 2 geldt: $z_0 = 0.0002$ en $d = 0$.

- Drie ruwheden, twee ruwheidsovergangen

Er zijn drie situaties te onderscheiden, te weten; de ashoogte ligt boven de interne grenslaaghoogte $z_{t,3}$, de ashoogte ligt tussen de eerste en tweede interne grenslaaghoogte of de ashoogte ligt onder de interne grenslaaghoogte $z_{t,2}$.

$$1) H_{as} > z_{t,3} : U_{asruw} = U_p (\ln(H_{as}/0.0002)/\ln(10/0.0002))$$

$$2) z_{t,2} < H_{as} < z_{t,3}: U_{asruw} = U(z_{t,3}) (\ln((H_{as} - d_2)/z_{0,2})/\ln(z_{t,3}/z_{0,2}))$$

$$3) H_{as} < z_{t,2} : U_{asruw} = U(z_{t,2}) (\ln((H_{as} - d_1)/z_{0,1})/\ln(z_{t,2}/z_{0,1}))$$

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-16

Stap E: Berekening van de windsnelheid op 10 m hoogte bij $z_0 = 0.0002$ m

De windsnelheid op 10 meter hoogte bij een uniforme ruwheid boven open water van 0.0002 meter is in de opzet van deze methodiek het uitgangspunt, dus

$$U_{p,loc} = U_{p,met} (= U_{10,\infty})$$

Stap F: Berekening van C_Q

De ruwheids- en hoogte-correctiefactor wordt nu gegeven door de formule

$$C_Q = U_{asruw}/U_p$$

11.5 Berekening van de wrijvingswindsnelheid u_* voor open water in landsectorenmethode

Zoals gesteld in paragraaf 11.3 van deze bijlage dient in geval er een land/zee ruwheidsovergang optreedt op een afstand groter dan 5 kilometer maar kleiner dan 10 kilometer van de windturbine-locatie de u_* voor open water bepaald worden. Deze u_* wordt niet gegeven door de formule beschreven in stap A van de landsectorenmethode. De wrijvingssnelheid u_* voor open water wordt berekend via een interpolatieformule, waarmee bereikt wordt dat de windsnelheid berekend via de 'zeesectorenmethode' aansluit op de windsnelheid die berekend wordt met de 'landsectorenmethode'.

De hierna beschreven procedure levert, via de bepaling van u_* , de in de landsectorenmethode benodigde $u_{*,k}$ op. Na deze procedure kan dan ook paragraaf 11.3 vanaf stap B verder gevolgd worden om U_{asruw} en uiteindelijk C_Q te kunnen bepalen.

De hier beschreven procedure is dus niets anders dan een vervanging van stap A in de landsectorenmethode indien er een land/zee ruwheidsovergang tussen 5 en 10 kilometer vanaf de windturbine-locatie optreedt.

De berekening van $u_{*,k}$ verloopt in het kort als volgt.

$$u_{*start} = 0.015 + 0.025 U_h$$

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-17

$$u_{*}(5) = \frac{U_{asruw}(zee,5) \cdot U_{10,\infty}}{U_{asruw}(land,5) \cdot U_{p,i}(land) \cdot C_{W,i} \cdot C_M} \cdot u_{*start}$$

$$u_{*}(10) = \frac{U_{asruw}(land,10,geen\ overgang)}{U_{asruw}(land,10,wel\ overgang)} \cdot u_{*start}$$

$$u_{*,k} = u_{*}(5) + ((X' - 5)/5) (u_{*}(10) - u_{*}(5))$$

Hierbij is:

u_{*start} een wrijvingsnelheid (modelgrootheid);

$u_{*}(5)$ wrijvingswindsnelheid (modelgrootheid) indien de land/zee ruwheidsovergang op 5 kilometer zou liggen;

$u_{*}(10)$ wrijvingswindsnelheid (modelgrootheid) indien de land/zee ruwheidsovergang op 10 kilometer zou liggen;

$U_{asruw}(zee,5)$

U_{asruw} berekend via de zeesectorenmethode en met een land/zee overgang op 5 kilometer afstand;

$U_{asruw}(land,5)$

U_{asruw} berekend via de landsectorenmethode en met een land/zee overgang op 5 kilometer afstand;

$U_{asruw}(land,10,geen\ overgang)$

U_{asruw} berekend via de landsectorenmethode zonder een land/zee overgang in rekening te brengen;

$U_{asruw}(land,10,wel\ overgang)$

U_{asruw} berekend via de landsectorenmethode waarbij een land/zee overgang op 10 kilometer afstand in rekening is gebracht;

$U_{10,\infty}$ de windsnelheid op 10 m hoogte bij een uniforme ruwheidslengte van 0.03 m (stap 11E);

$U_{p,i}(land)$ de potentiële windsnelheid per sector van het landmeteo-station (Schiphol of IJmuiden-Duin) (stap 1);

$C_{W,i}$ de bijbehorende correctiefactor per sector (Stap 1);

C_M de correctiefactor voor klimatologische verschillen (Stap 5);

X' dit is de afstand van de turbine-locatie (km) tot de land/zee ruwheidsovergang. Afhankelijk van het aantal terreinen kan dit X_1 of X_2 zijn.

88-145/R.24/CAP

bijlage 11-18

De genoemde snelheden en afstand worden nader toegelicht in de hierna beschreven sub-stappen A'.1 tot en met A'.4.

Stap A'.1: De berekening van u_{*start}

De startwaarde voor $u_{*,k}$ wordt bepaald via de relatie

$$u_{*start} = 0.015 + 0.025 U_h$$

Deze startwaarde dient als invoer voor de berekening van $U_{asruw}(land,5)$ en $U_{asruw}(land,10,wel\ overgang)$, zie stappen A'.2 en A'.3.

Stap A'.2: De berekening van $u_*(5)$

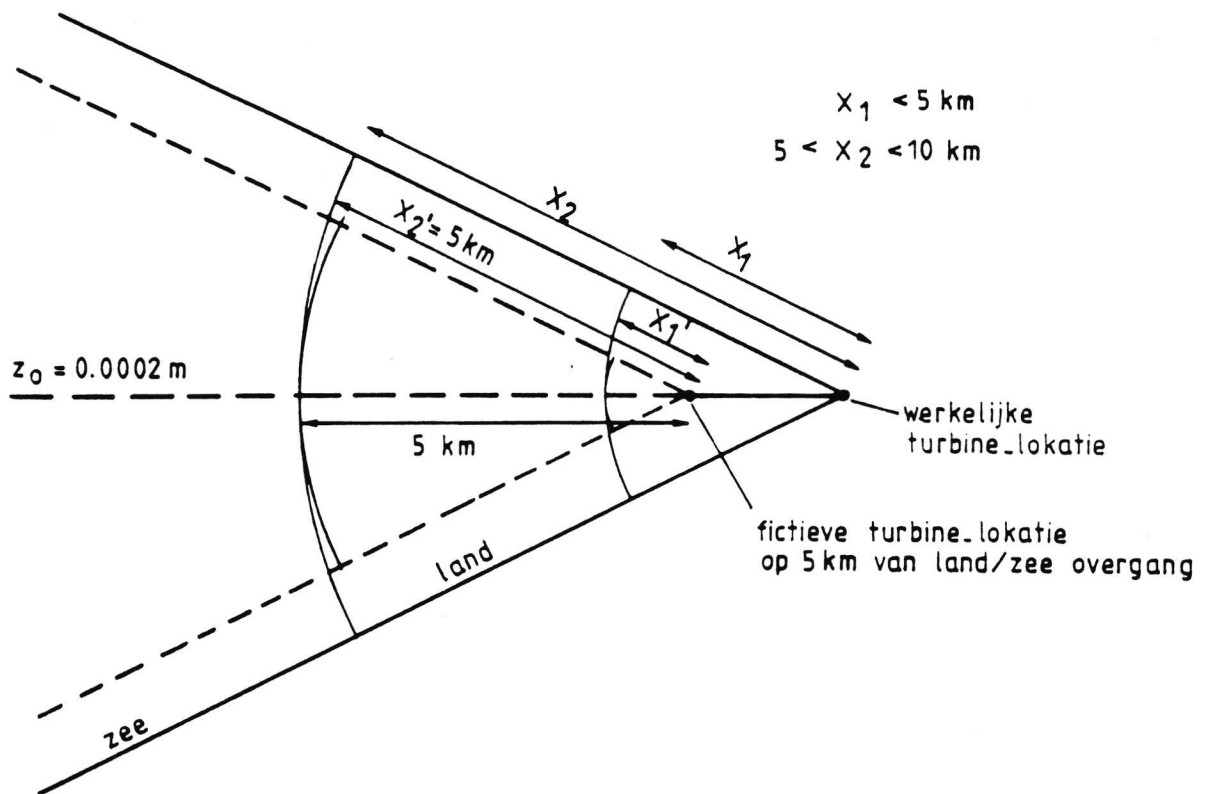
De waarde van $u_*(5)$ wordt berekend met de relatie

$$u_*(5) = \frac{U_{asruw}(zee,5) \cdot U_{10,\infty}}{U_{asruw}(land,5) \cdot U_{p,i}(land) \cdot C_{W,i} \cdot C_M} \cdot u_{*start}$$

De snelheden $U_{asruw}(zee,5)$ en $U_{asruw}(land,5)$ dienen hierbij te worden berekend met behulp van de stappen B tot en met D van respectievelijk paragraaf 11.4 (Berekening C_Q factor voor zeesectoren) en van paragraaf 11.3 (Berekening C_Q factor voor landsectoren). Hierbij is het uitgangspunt dat de windturbine-locatie zich op 5 kilometer afstand van de land/zee overgang bevindt.

In principe is dit een nieuwe locatie, waarvoor een aparte ruwheidskartering gemaakt zou moeten worden. Voor de berekening van $u_*(5)$ kan echter worden volstaan met het verschuiven van de locatie over de hartlijn van de sector totdat een afstand van 5 kilometer tot aan de land/zee ruwheidsovergang is bereikt, zie ook figuur 11.10. De diverse afstanden tot de ruwheidsovergangen en de ruwheidslengten zijn dan voor deze situatie af te lezen uit de al gemaakte ruwheidskartering voor de werkelijke turbine-locatie.

Deze nieuwe afstanden en ruwheidslengten moeten gebruikt worden in de stappen B tot en met D. Voor de ruwheidslengte van open water dient de waarde $z_0 = 0.0002$ m te worden ingevuld. Voor u_* dient de waarde van u_{*start} te worden ingevuld.



Figuur 11.10 Verschuiving van de windturbine-locatie over de hartlijn van de sector totdat de afstand tot de land/zee overgang 5 km is.

Stap A'.3: De berekening van $u_*(10)$

De waarde van $u_*(10)$ wordt berekend met de relatie

$$u_*(10) = \frac{U_{\text{asruw}}(\text{land}, 10, \text{geen overgang})}{U_{\text{asruw}}(\text{land}, 10, \text{wel overgang})} \cdot u_{*\text{start}}$$

De berekening van de snelheden $U_{\text{asruw}}(\text{land}, 10, \text{geen overgang})$ en $U_{\text{asruw}}(\text{land}, 10, \text{wel overgang})$ dienen hierbij te worden berekend met behulp van respectievelijk de stappen A tot en met D en de stappen B tot en met D van paragraaf 11.3 (Berekening C_Q factor voor landsectoren). Hierbij is het uitgangspunt dat de windturbine-locatie zich op 10 kilometer afstand van de land/zee overgang bevindt. In het eerste geval (geen overgang) wordt de land/zee overgang niet in rekening gebracht (in de normale landsectorenmethode wordt er eveneens geen ruwheidsovergang

88-145/R.24/CAP

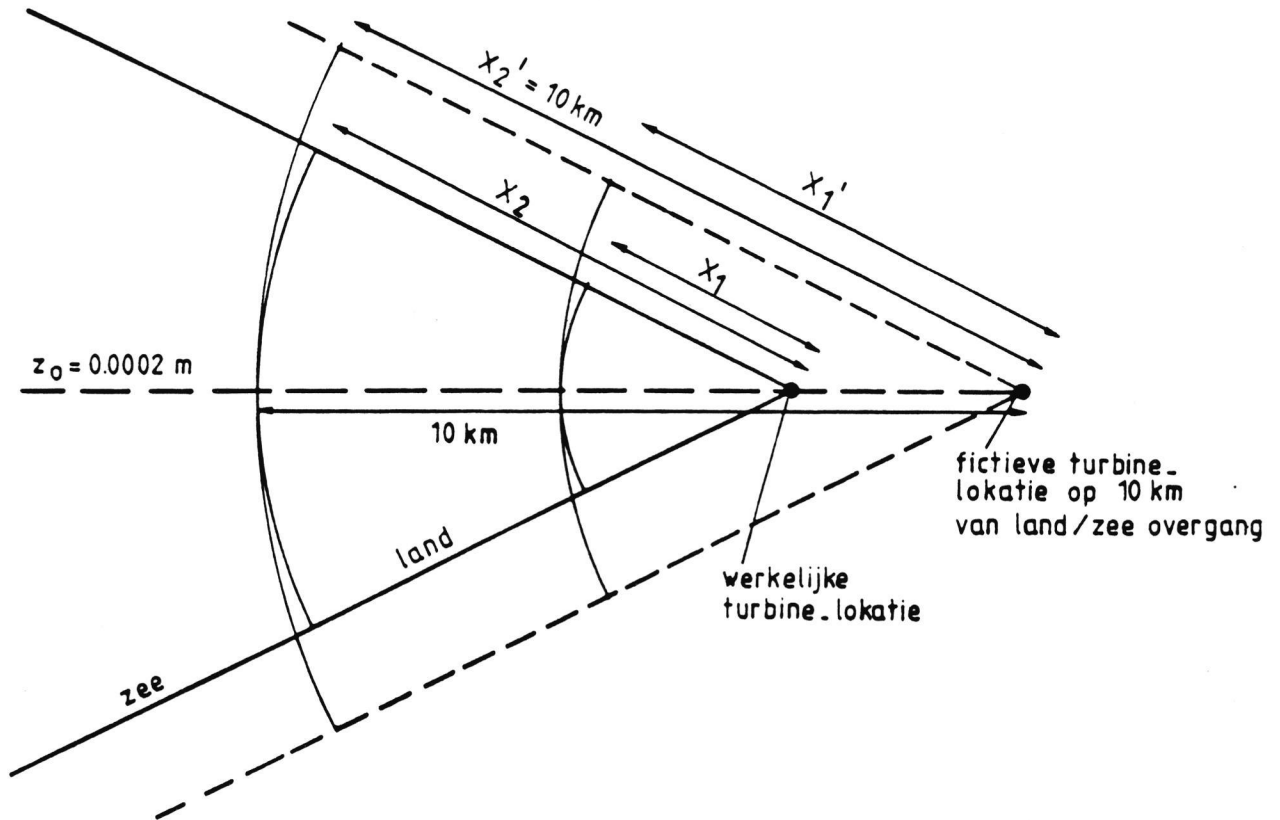
bijlage 11-20

op 10 km van de locatie in rekening gebracht), in het tweede geval (wel overgang) wordt deze overgang wel in rekening gebracht.

Ook hier is in principe sprake van een nieuwe locatie waarvoor een nieuwe ruwheidskartering gemaakt zou moeten worden. Maar ook nu kan via verplaatsing over de hartlijn, ditmaal van de tegenoverliggende sector (!), een voldoende betrouwbaar beeld verkregen worden. Voor het terrein tussen de werkelijke en de fictieve locatie dient de ruwheid $z_{0,1}$ van terrein 1 te worden aangehouden, zie ook figuur 11.11.

In de berekening van $U_{asruw}(\text{land}, 10, \text{geen overgang})$ dient u_* berekend te worden via stap A van de landsectorenmethode.

In de berekening van $U_{asruw}(\text{land}, 10, \text{wel overgang})$ dient voor u_* de waarde van U_{*start} te worden ingevuld. Voor de ruwheidslengte van open water dient weer de waarde $z_0 = 0.0002 \text{ m}$ te worden ingevuld.



Figuur 11.11 Verschuiving van de windturbine-locatie over de hartlijn van de tegenoverliggende sector totdat de afstand tot de land/zee overgang 10 km is.

Stap A'.4: De berekening van $u_{*,k}$

De waarde van $u_{*,k}$ wordt berekend met de relatie

$$u_{*,k} = u_*(5) + ((X' - 5)/5) (u_*(10) - u_*(5))$$

Deze berekende $u_{*,k}$ is de waarde die uiteindelijk in de berekening voor C_Q voor de desbetreffende sector dient te worden gebruikt. In de formule dient voor X' de afstand van de werkelijk turbine-locatie tot aan de land/zee overgang te worden ingevuld. De afstand X' is gelijk aan X_1 indien de sector bestaat uit twee terreinen en gelijk aan X_2 indien de sector bestaat uit drie terreinen.

De berekening van C_Q verloopt hierna volgens de stappen B tot en met F van paragraaf 11.3 (Berekening C_Q factor voor landsectoren). Voor de ruwheidslengte van open water dient weer de waarde $z_0 = 0.0002$ m te worden ingevuld. De op deze manier voor elke sector verkregen waarde van C_Q dient tenslotte te worden ingevuld in stap 14 ter berekening van de uiteindelijke waarde van de totale correctiefactor $C_{III,i}$.

Literatuur

- [1] Wijk, A.J.M. van e.a.;
Resultaten coast project;
Sectie NS&S, RUU, nr. NSS-87-03, Utrecht, januari 1987.

- [2] Wijk, A.J.M. van e.a.;
Een model voor het opschalen en transformeren van de windsnelheid in kustgebieden;
Sectie NS&S, RUU, nr. NSS-87-10, Utrecht, mei 1987.

- [3] Wijk, A.J.M. van e.a.;
Een model voor de opschaling en transformatie van de windsnelheid in kustgebieden;
Nationale Windenergie Conferentie 1988, pp. 260-264,
Noordwijkerhout, februari 1988.

- [4] Wijk, A.J.M. van;
Handboek Methode III, opzet en verantwoording;
Vakgroep Natuurwet. & Samenleving, RUU, Utrecht, juni 1989.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-1

Bijlage 12 OBSTAKELCORRECTIEFACTOR (HUIZEN, BOMEN, DIJKEN)

12.1 Inleiding

Huizen, bomen en dijken vormen obstakels die de vrije stroming van de wind over het aardoppervlak beïnvloeden. Dit uit zich in zowel een afname van de gemiddelde windsnelheid stroomafwaarts van een obstakel als in een toename van de windsnelheidsfluctuaties. De invloed van een obstakel kan zich, afhankelijk van het soort obstakel, windafwaarts uitstrekken tot 30 à 50 keer de obstakelhoogte.

Door de afscherming door een dergelijk obstakel kan de energie-opbrengst van een windafwaarts geplaatste windturbine aanzienlijk worden gereduceerd. Dit is met name het geval wanneer deze obstakels ten opzichte van de windturbine in een veel voorkomende windrichtingsector staan opgesteld. In Nederland is dit veelal de zuid-westelijke windrichting. Daarnaast zal door de toegenomen windsnelheidsfluctuaties de vermoeiingsbelasting op een dergelijke windturbine kunnen toenemen. Voor geïnteresseerden wordt verwezen naar het "Handboek Ontwerpwindgegevens voor windturbines, deel 1" van Pfeiffer e.a. [6].

Ook voor en boven een obstakel is het windveld verstoord. Hiervoor is in het algemeen weinig betrouwbaar onderzoeksmateriaal bekend. In het algemeen kan worden aangenomen dat op 2 keer de obstakelhoogte voor het obstakel en 5 keer deze hoogte boven het obstakel de afwijking van de windsnelheid ten opzichte van de ongestoorde stroming kleiner dan 5% is. In gevallen waarin meer gedetailleerde informatie gewenst is, is nader onderzoek aan de betreffende situatie vereist, bijvoorbeeld in de vorm van experimenteel onderzoek aan schaalmodellen in een windtunnel.

Voor de bepaling van de windsnelheidsreductie als gevolg van obstakels is gekozen voor een grafische methode. Per obstakelcategorie wordt een basisgrafiek gegeven die de windsnelheidsreductie weergeeft als functie van de windafwaartse afstand en de hoogte boven het terrein. Hierbij wordt de windrichting loodrecht op de lange obstakelzijde van de rechtehoekig veronderstelde obstakels aangenomen. Vervolgens worden met een aantal hulpgrafieken voor bijzondere situaties correctiefactoren bepaald. Met deze correctiefactoren wordt de afstand tussen windturbine en

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-2

obstakel zodanig aangepast dat in de betreffende basisgrafiek de beschuttingsfactor (C_B) kan worden afgelezen.

12.2 Overzicht zogparameters

Hoe het zog windafwaarts van een obstakel zich ontwikkelt hangt af van het soort obstakel en van het karakter van de aankomende wind. De zogparameters worden hiertoe dan ook onderscheiden in obstakel- en stromingsparameters.

De obstakelparameters bepalen vooral de sterkte van de aanvankelijke verstoring (zowel snelheidsafname als turbulentietoename), terwijl de stromingsparameters vooral de snelheid bepalen waarmee het normale windveld zich weer herstelt.

De obstakelparameters staan hieronder gegeven in volgorde van belangrijkheid voor de zogontwikkeling. Voor zowel de obstakel- als de ashoogte dient rekening gehouden te worden met een eventuele nulpuntsverplaatsing.

Obstakelparameters

1. Relatieve breedte (W_{ob}/H_{ob})

Van de obstakelparameters heeft de obstakelbreedte de sterkste invloed, met name wanneer de breedte van het obstakel kleiner is dan 10 keer de obstakelhoogte ($W_{ob}/H_{ob} < 10$). Onder obstakelbreedte wordt verstaan: de breedte van het obstakel loodrecht op de geldende windrichting.

2. Doorlaatbaarheid (φ)

Doorlatende obstakels, als bijvoorbeeld een bomenrij, zijn onder te verdelen in twee groepen. Bij een doorlaatpercentage groter dan 35% is sprake van een overheersende doorstroming van het obstakel; is het doorlaatpercentage kleiner dan 35% dan overheerst de omstroming van het obstakel. In het laatste geval dient de bomenrij als een huizenrij beschouwd te worden. Deze tweedeling maakt de vaststelling van de door de grote verschillen in verschijningsvorm op zich moeilijk

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-3

te schatten doorlaatbaarheid van boomsingels en dergelijke minder onzeker.

Figuur 12.1 geeft een overzicht van een aantal soorten vegetatie en hun doorlaatbaarheid.

3. Relatieve obstakeldiepte (D_{ob}/H_{ob})

De relatieve obstakeldiepte, dat wil zeggen de afmeting van het obstakel in stromingsrichting, heeft slechts een beperkte invloed op het zog. Een grotere obstakeldiepte werkt, door de iets betere "stroomlijning", reducerend op de afmetingen van het zog.

4. Obstakelgeometrie

De obstakel geometrie speelt slechts een ondergeschikte rol bij de bepaling van de zogafmetingen, zeker bij scherprandige obstakels.

Een zeer flauwe helling van de windopwaartse zijde ($< 35^\circ$) of de windafwaartse zijde ($< 17^\circ$) veroorzaken een verkorting van het zog. Dit komt eigenlijk alleen voor bij zeedijken met een zeer flauw zeezijdig talud.

Een speciale geometrie ontstaat wanneer obstakels in een rij of groep staan opgesteld. Dit komt in paragraaf 12.3 aan de orde.

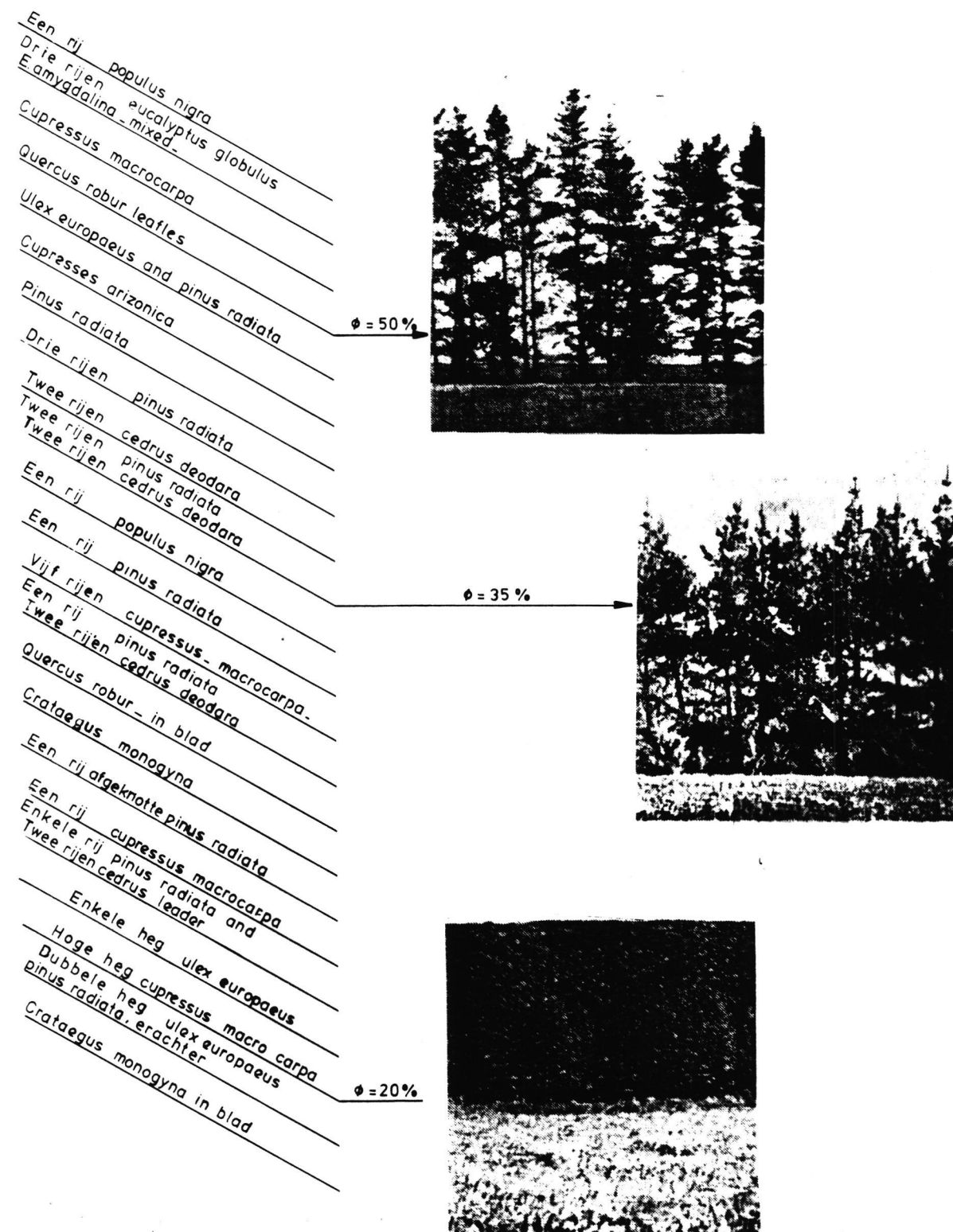
Stromingsparameters

5. Aanstroomrichting (β)

Bij de stromingsparameters is vooral de aanstroomrichting van belang. Met name voor brede obstakels ($W_{ob}/H_{ob} > 10$) is deze parameter bepalend voor de afmetingen van het zog. De zoglengte neemt ongeveer af met de cosinus van de aanstroomrichting ten opzichte van de normaal op het obstakel. Voor smalle obstakels ($W_{ob}/H_{ob} < 2$) kan beter met de projectie loodrecht op de windrichting worden gerekend.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-4



Figuur 12.1 Visuele vaststelling van de doorlaatbaarheid ϕ van natuurlijke windschermen.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-5

6. Eindeffect (Y_e/H_{ob})

Over een groot deel van de breedte van een breed obstakel is de zog-diepte constant. Naar de einden toe neemt zij echter af. Deze eindzone reikt tot circa 3 keer de obstakelhoogte binnen de obstakelrand.

7. Relatieve terreinruwheid (z_0/H_{ob})

De ruwheidsparameter (z_0) karakteriseert de verticale gradiënt in de aankomende wind alsmede de mate van turbulentie van die wind op een bepaalde hoogte. Voor relatief zeer glad terrein, dat wil zeggen met zeer kleine relatieve ruwheid ($H_{ob}/z_0 > 2000$), is de aanstromende wind als uniform en weinig turbulent te beschouwen. Door deze lage turbulentie is de interactie tussen de buitenstroming en het zog gering wat resulteert in een diep zog. Bij ruwer terrein zal de toegenomen terreinruwheid het zog verkorten. Dit effect geldt echter alleen bij brede obstakels. Een breed en tevens dicht obstakel ondervindt hierbij de meeste invloed.

De afmetingen van een zoggebied windafwaarts van een obstakel hangen af van de obstakel- en stromingsparameters. Het zog dijt uit of krimpt in, al naar gelang de combinatie van deze parameters.

Nu blijkt dat bij variatie van deze parameters de onderlinge afstanden tussen de gebieden met constante snelheidsreductie in het zog (vrijwel) niet veranderen als de zogafmetingen dimensieloos worden weergegeven.

Door de invloed van de diverse parameters op deze wijze te benaderen wordt een eenvoudige methode voor de bepaling van obstakel-effecten mogelijk. Elk obstakel wordt hierbij ondergebracht in één van de obstakelcategorieën: huizen, bomen of dijken.

Voor deze categorieën zijn drie basisgrafieken (figuren 12.2, 12.3 en 12.4) opgesteld waarin de snelheidsreductie wordt weergegeven op de hartlijn van het zog achter het obstakel ten opzichte van de ongestoorde situatie. Deze basisgrafieken gelden voor 'basisomstandigheden', dat wil zeggen aanstroming over glad terrein ($z_0 = 0.03$ m) loodrecht op de lange zijde van een breed obstakel. Voor situaties die hiervan afwijken worden een aantal hulpgrafieken gegeven (figuren 12.5 t/m 12.8). Hierin wordt

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-6

een correctiefactor gegeven voor de afstand stroomafwaarts van het obstakel. Met deze correctiefactor wordt de effectieve afstand tussen windturbine en obstakel bepaald. Voor deze effectieve afstand geldt dat:

$$\frac{X_e}{H_{ob}} = \frac{X}{H_{ob}} \cdot \frac{1}{\lambda_\beta \cdot \lambda_e \cdot \lambda_w \cdot \lambda_r}$$

waarin:

λ_β : correctiefactor voor de aanstroomrichting (fig. 12.5)

λ_e : correctiefactor voor de eindeffecten (fig. 12.6)

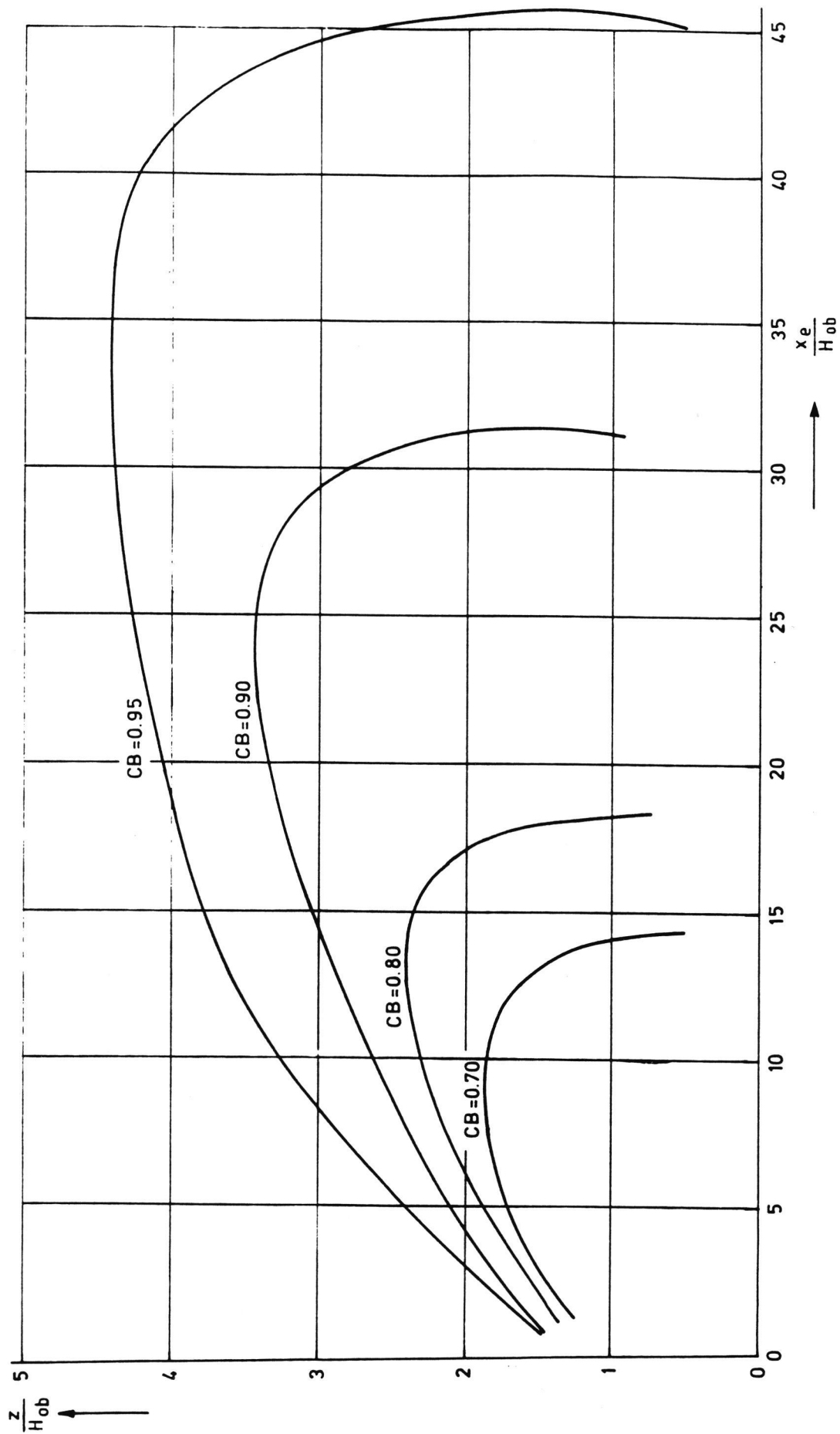
λ_w : correctiefactor voor de eindige breedte (fig. 12.7)

λ_r : correctiefactor voor de terreinruwheid (fig. 12.8)

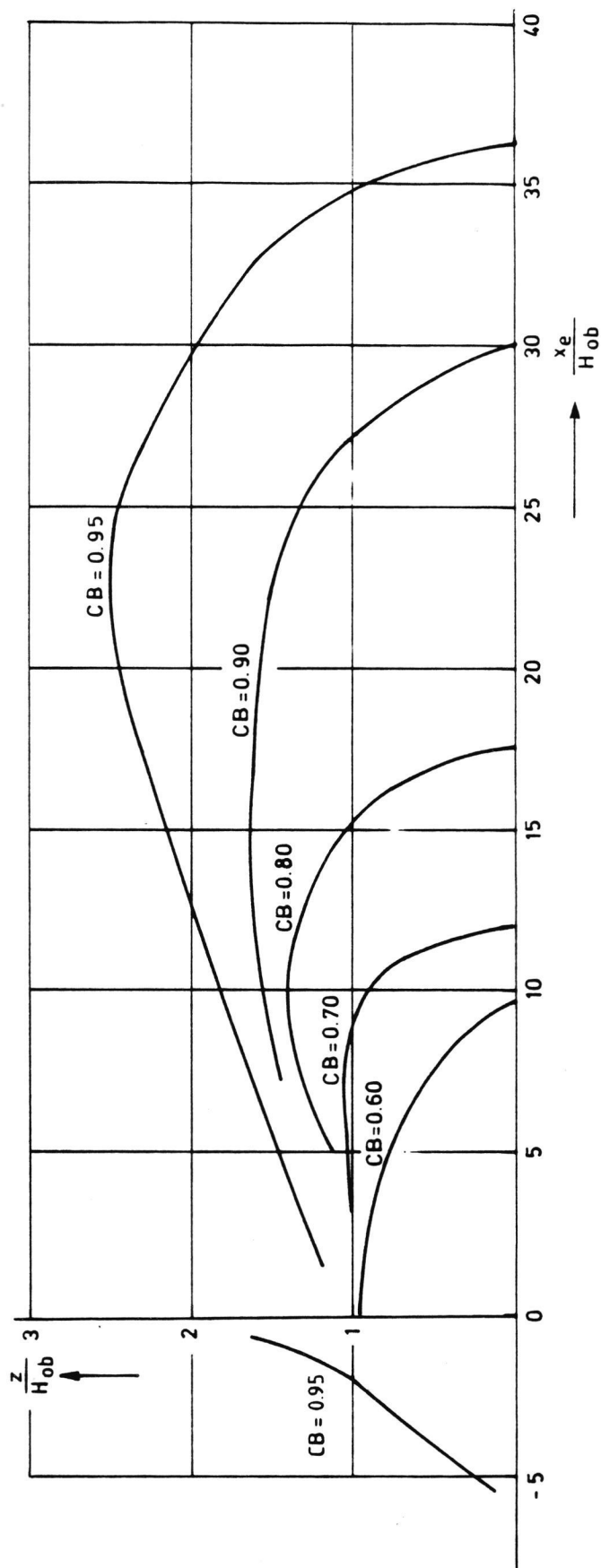
Met deze effectieve afstand kan in de basisgrafiek de bijbehorende beschuttingsfactor worden afgelezen.

88-145/R.24/CAP

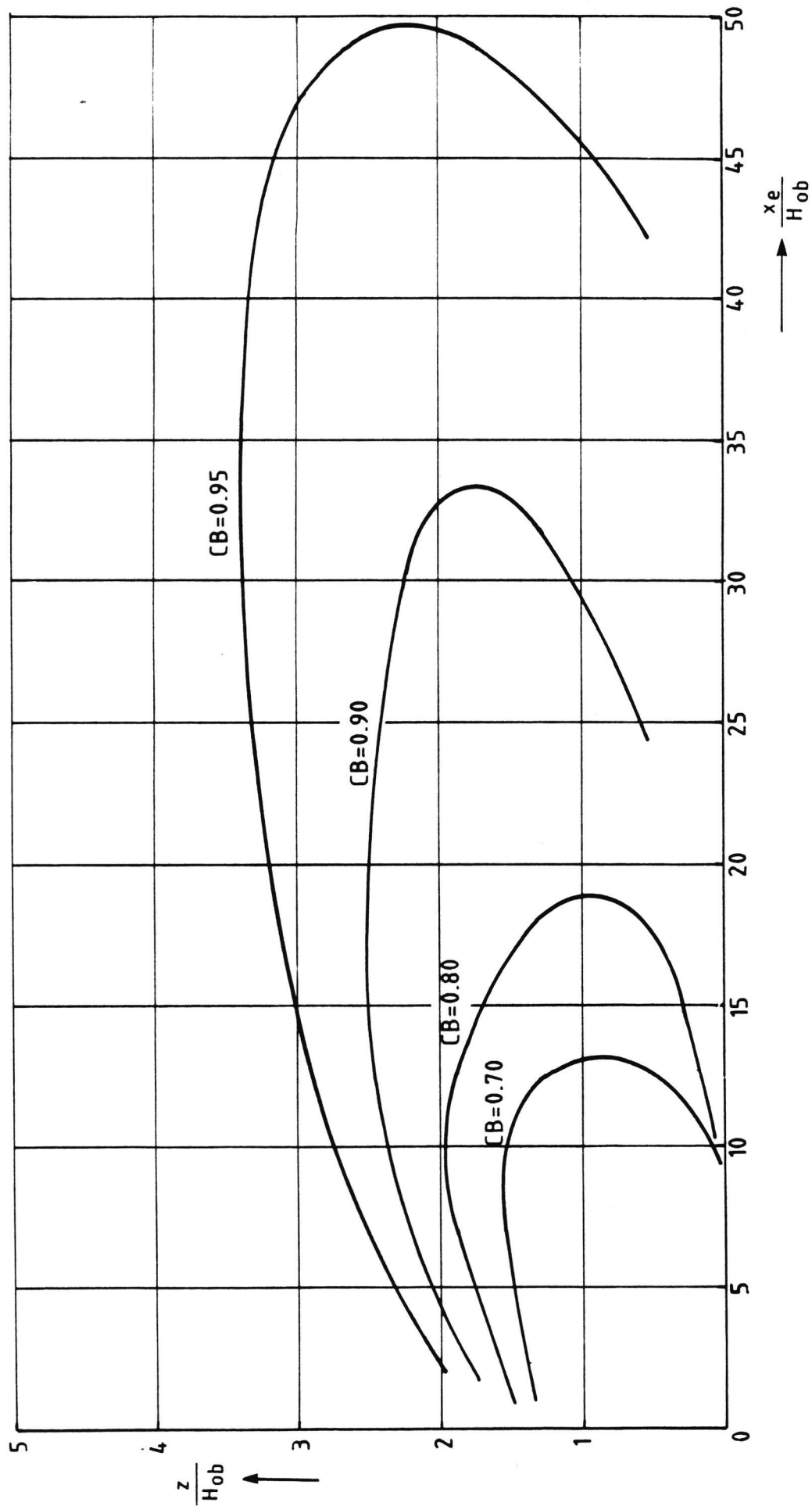
bijlage 12-7



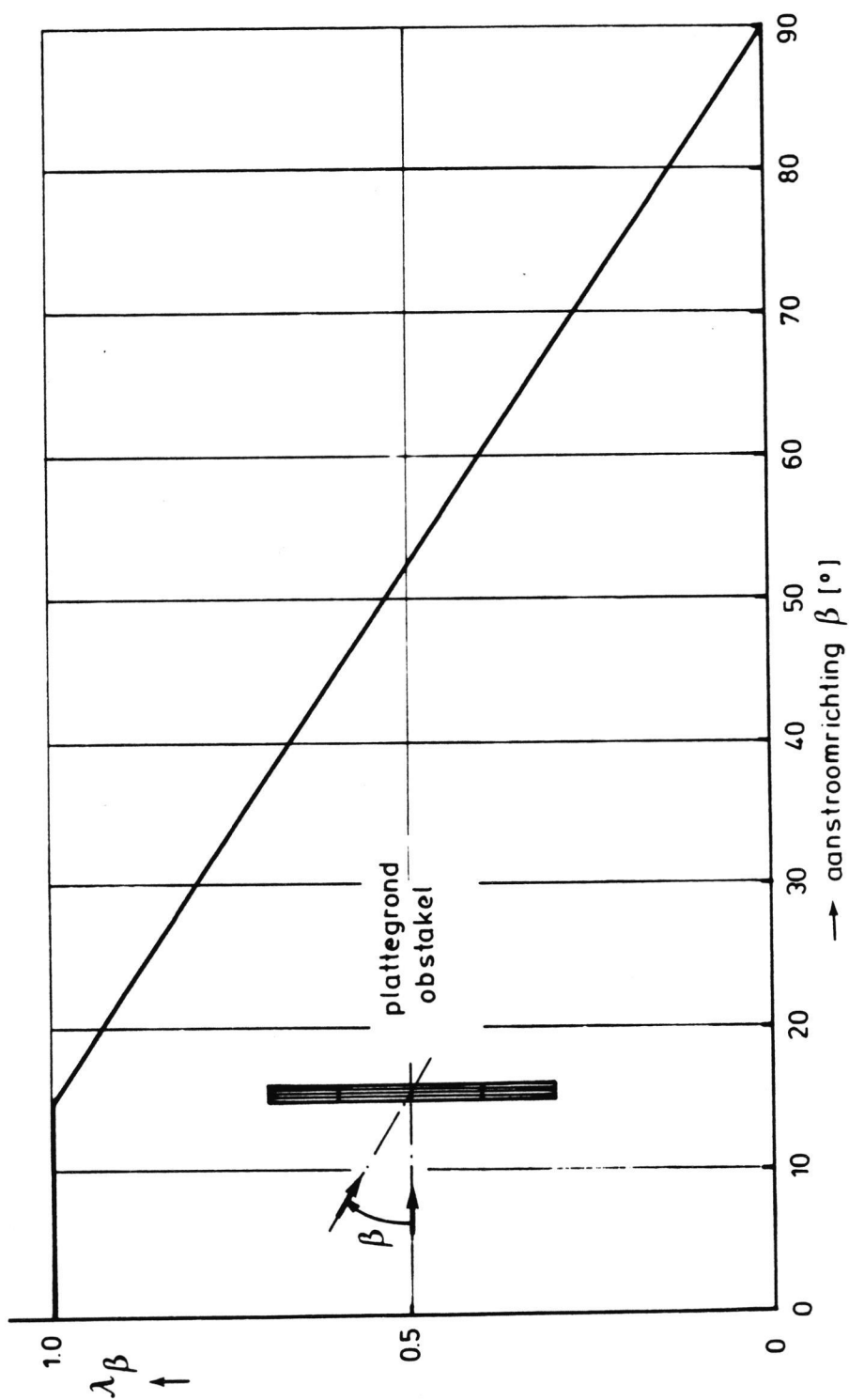
Figuur 12.2 Basisgrafiek. Het windsnelheidsverloop in het middenvlak achter een HUIS bij loodrechte wind ($\frac{W_{ob}}{H_{ob}} \approx 9$)



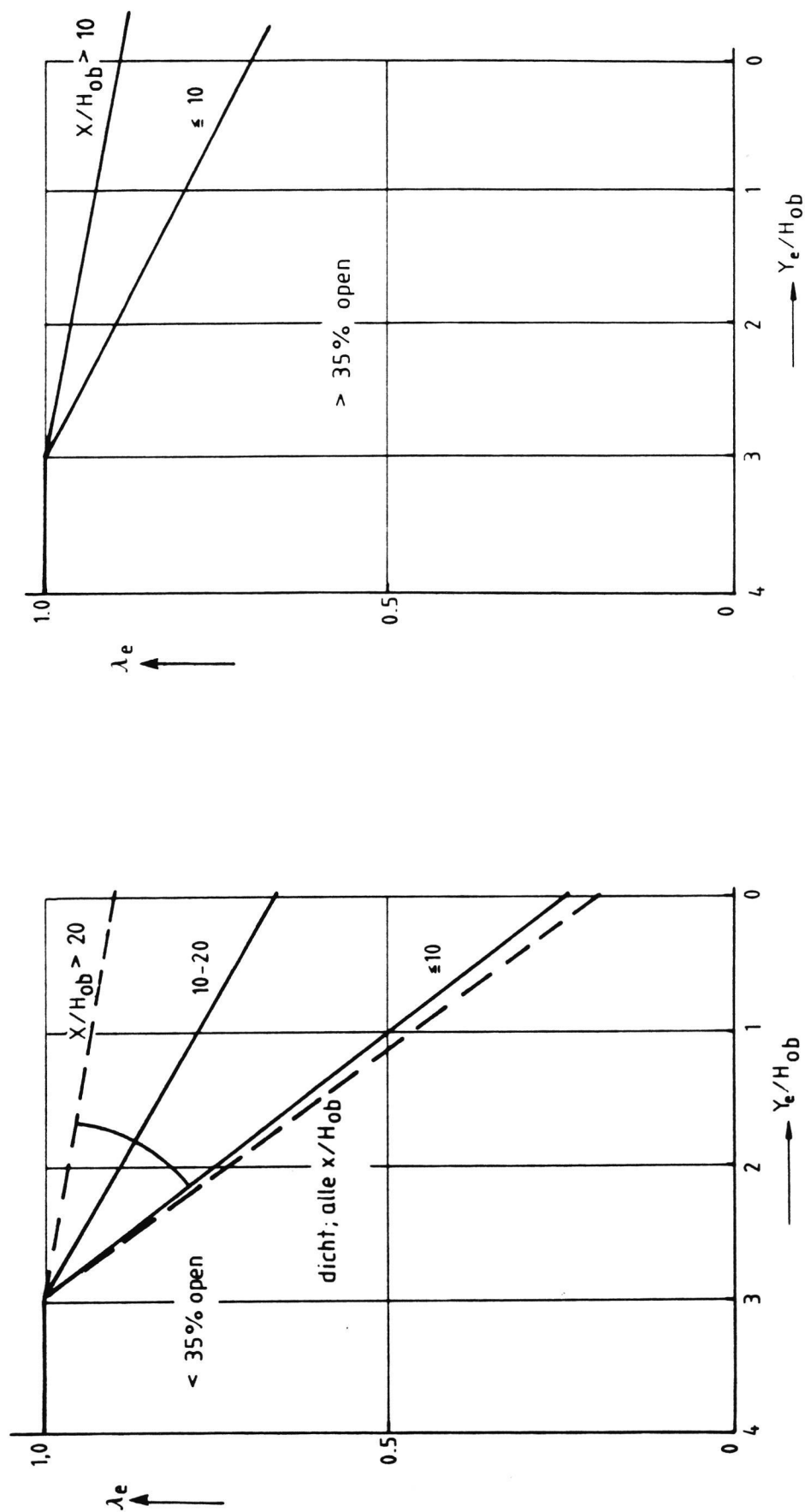
Figuur 12.3 Basisgrafiek. Het windsnelheidsverloop in het middenvlak voor en achter een meer dan 35% open BOOMSingel (windschermen etc.) bij loodrechte wind.



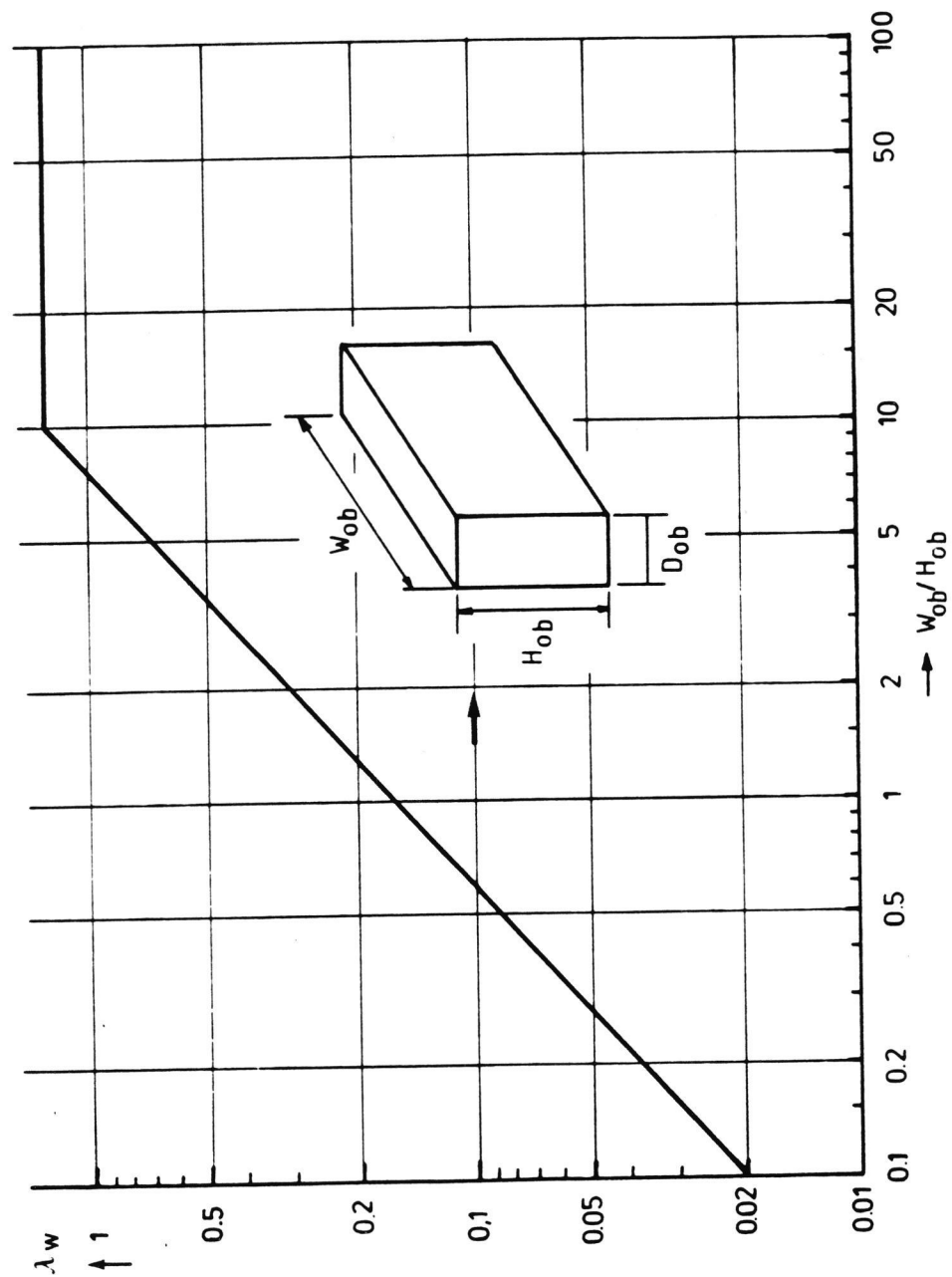
Figuur 12.4 Basisgrafiek. Het windsnelheidsverloop in het middenvlak achter een DIJK bij loodrechte wind.



Figuur 12.5 Hulpgrafiek. Effect van de aanstroomrichting op de zogafmetingen.



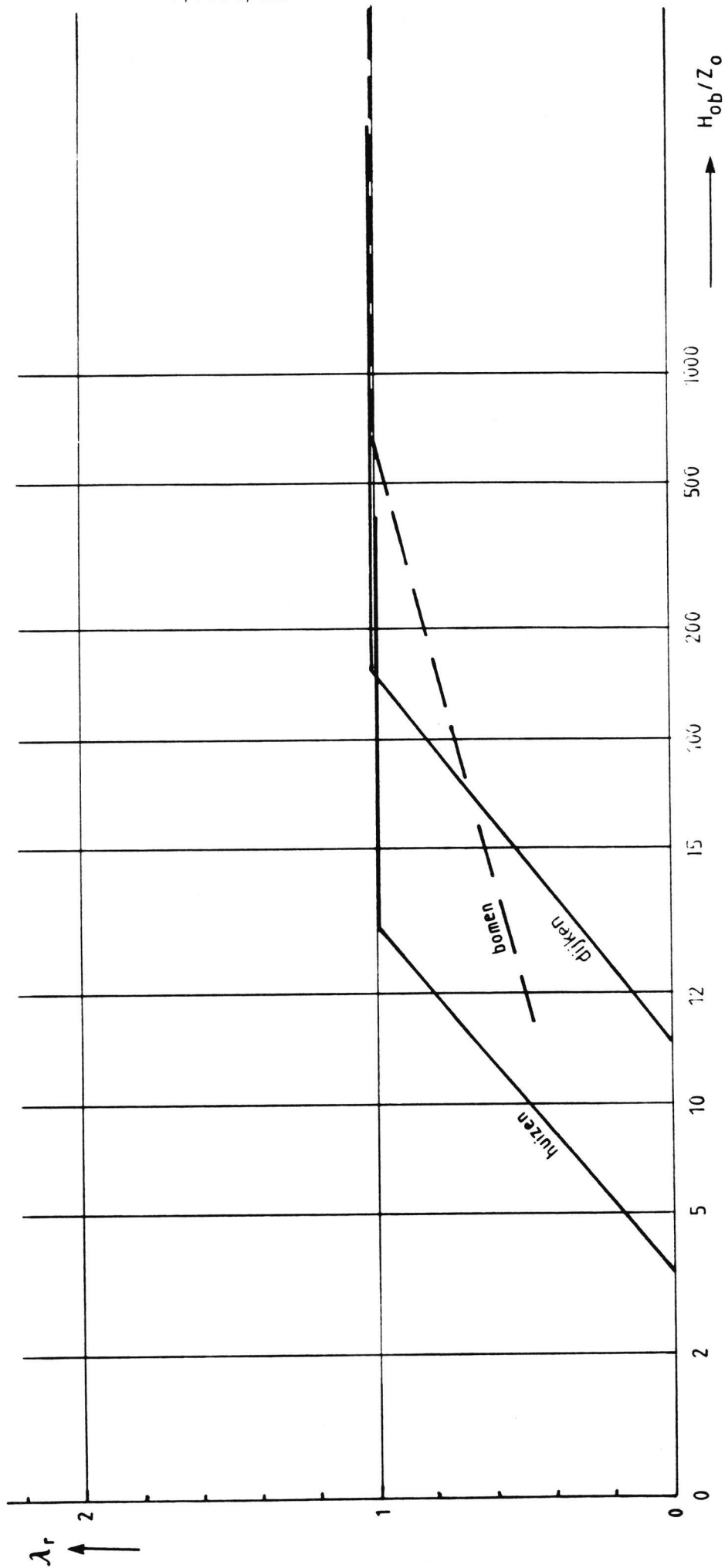
Figuur 12.6 Hulpgrafiek. Effect van de obstakelranden op de zogafmetingen ($Y_e = 0$ is obstakeleinde).



Figuur 12.7 Hulpgrafiek. Effect van de relatieve obstakelbreedte op de zogafmetingen.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-13



Figuur 12.8 Hulpgrafiek. Effect van de relatieve terreinruwheid z_o/H op de lengte van het zog.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-14

12.3 Obstakelgroepen

Zoals gesteld in de vorige paragraaf onder punt 4 "Obstakelgeometrie" ontstaat een speciale geometrie als obstakels in een rij of groep staan opgesteld.

Een rij obstakels is te beschouwen als een meer of minder doorlatend scherm. Voor een "dichte" huizenrij (doorlaatpercentage < 35) dient de basisgrafiek voor huizen gebruikt te worden. Voor een "open" huizenrij (doorlaatpercentage > 35) wordt de basisgrafiek voor de bomenrij gebruikt.

Als obstakels zo dicht bij elkaar staan dat ze elkaars stroming beïnvloeden wordt gesproken van obstakelgroepen.

Het effect van groepen obstakels op het windafwaartse windveld volgt niet eenvoudig uit de voor vrijstaande obstakels uitgewerkte methode.

Om te kunnen bepalen welke aanpak gehanteerd moet worden bij obstakelgroepen, wordt het begrip obstakelconcentratie F_{ob}/O_{ob} geïntroduceerd (F_{ob} = frontale obstakeloppervlak; O_{ob} = het groepsterrein oppervlak). De navolgende indeling wordt gemaakt.

A. Lage obstakelconcentratie

Bij zeer verspreide obstakelligging ($F_{ob}/O_{ob} < 0.01$) is er sprake van geïsoleerde obstakels.

Hierop is de hierboven beschreven methode voor de bepaling van de obstakelcorrectie van toepassing.

B. Hoge obstakelconcentratie

Bij hoge obstakelconcentratie ($F_{ob}/O_{ob} > 1.0$) "ziet" de stroming geen individuele obstakels meer en is er - althans bij groepen van enige omvang - sprake van een algemene ruwheid.

Deze ruwheid zal in het algemeen vrij groot zijn, dat wil zeggen een ruwheidslengte van 1 à 2 cm. Daarnaast moet rekening worden gehouden met een nulpuntsverplaatsing d in de orde van de obstakelhoogte H_{ob} . Voor de berekening van de windsnelheidscorrectie, als gevolg van deze ruwheid wordt verwezen naar bijlage 6.

C. Gemiddelde obstakelconcentratie

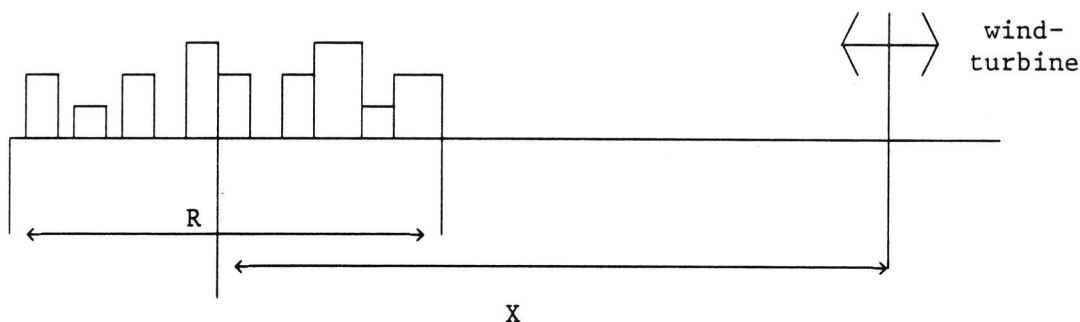
In het gebied van gemiddelde obstakelconcentraties ($0.01 < F_{ob}/O_{ob} < 1.0$) is er sprake van een obstakelgroep.

Voor de berekening van de windsnelheidscorrectie als gevolg van een obstakelgroep ontbreekt een methode.

Daar echter blijkt dat een obstakelgroep in sommige gevallen meer het karakter van een vrijstaand obstakel heeft en in andere meer dat van een algemene ruwheid kunnen obstakelgroepen in de voornoemde categorie A of B worden ondergebracht. Het indelingscriterium wordt hierna besproken.

De belangrijkste parameter voor het karakter van de stroming na een obstakelgroep blijkt de groepsafmeting in windrichting, de zogenoemde strijklengte R.

wind U



- Bij geringe strijklengte vertoont de stroming een specifiek zog karakter, vergelijkbaar met de situatie van een enkel vrijstaand obstakel. Zowel het windsnelheidsprofiel als het turbulentieprofiel variëren met de afstand X tot de obstakelgroep.

Een redelijke benadering is de obstakelgroep vervangen te denken door een wand ter breedte van de groep en een hoogte gelijk aan de gemiddelde obstakelhoogte. Op deze wijze kan weer van de standaard zog effect grafieken voor vrijstaande huizen, of bij geringe obstakeldichtheid van die voor meer of minder doorlatende windschermen gebruik worden gemaakt.

Dit "vervangende wand" concept is eerder toegepast door Halitsky [1] en blijkt ook in het geval van de windturbinelocatie Camperduin [3] met een kleine woonwijk op 250 m afstand, de situatie redelijk goed weer te geven.

- Bij grote strijklengte krijgt de stroming een specifiek grenslaag karakter, vergelijkbaar met de stromingssituatie boven ruw terrein. Zowel het verticale snelheidsprofiel als het turbulentieprofiel worden onafhankelijk van de stroomafwaartse afstand X, ofwel de stroming is in evenwicht.

De berekeningswijze voor de windsnelheidsreductie op ashoogte van de windturbine is dan als die voor ruwheidsovergangen (bijlage 11). Zeer smalle groepen, met een omsloten hoek gezien vanuit de locatie die kleiner is dan 15° , blijven buiten beschouwing.

Een complicerende factor in de bepaling van de minimaal benodigde strijklengte voor stromingsevenwicht is dat deze afhangt van de obstakeldichtheid λ .

$\lambda = F_{ob}/O_{ob}$ indien afmetingen van obstakels in obstakelgroepen bekend zijn.

$\lambda = \frac{\bar{H}_{ob}}{\bar{D}_{ob}} \cdot \frac{S_{ob}}{O_{ob}}$ indien alleen globale informatie over obstakelgroep aanwezig is.

(F_{ob} = frontale obstakeloppervlak;

O_{ob} = het groepsterrein oppervlak;

S_{ob} = het door obstakels bezette grondoppervlak;

$\bar{H}_{ob}$ = gemiddelde obstakelhoogte;

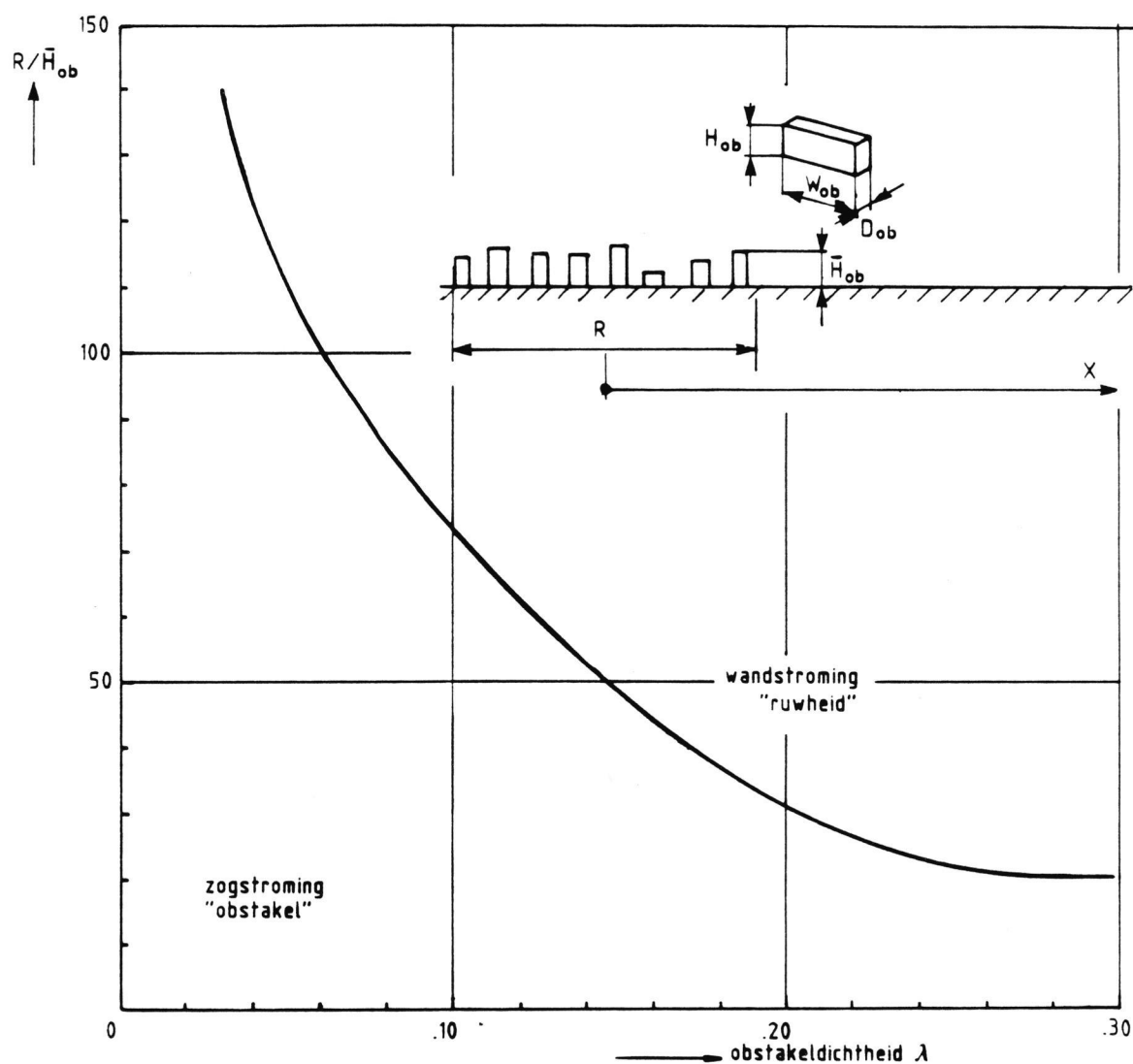
$\bar{D}_{ob}$ = gemiddelde obstakeldiepte).

Op grond van onderzoek van Hussain [2] en Vermeulen [7] kan het in figuur 12.9 geschetste verband tussen de strijklengte en de obstakeldichtheid worden gegeven.

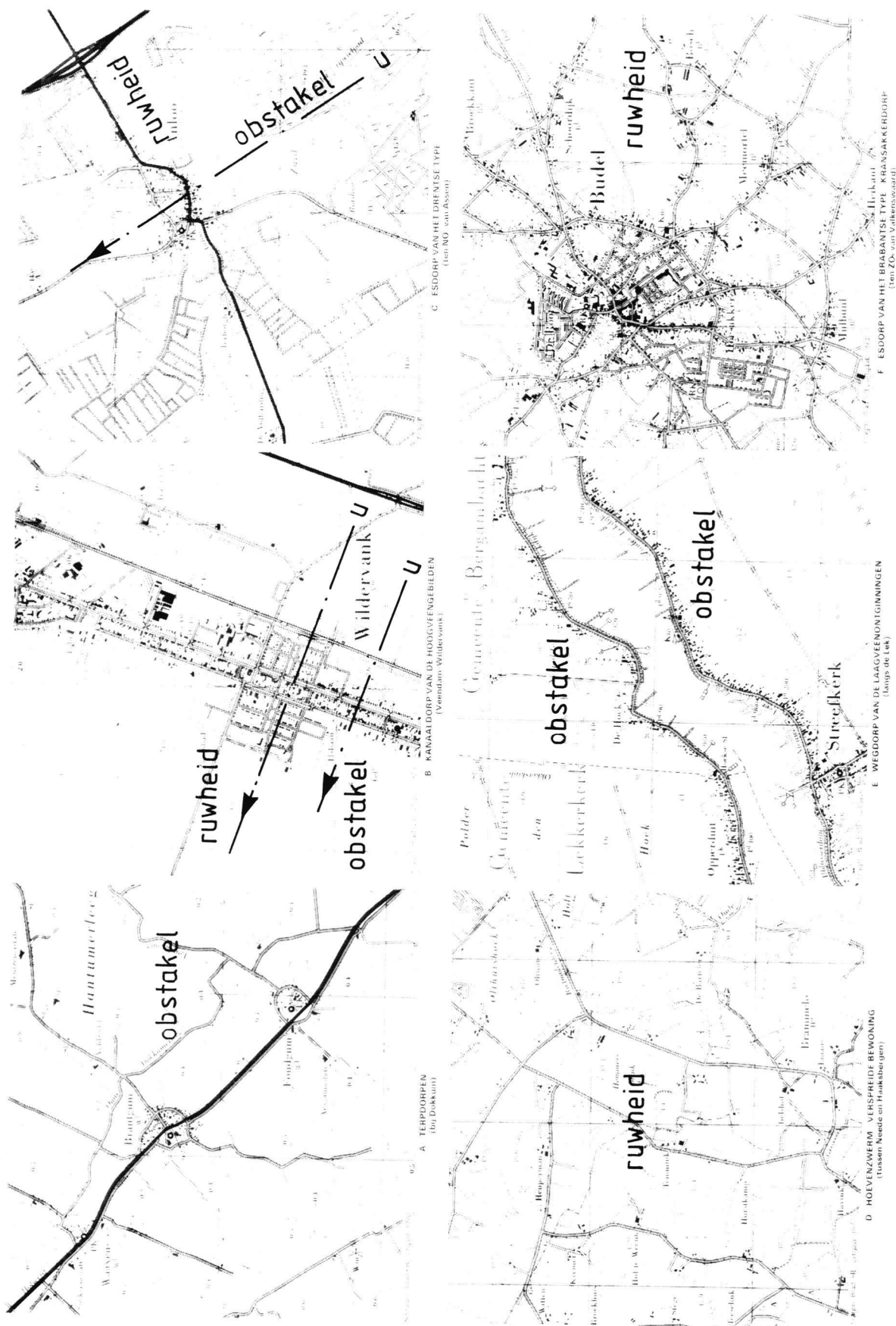
Hiermee kan dan een groep obstakels eenvoudig worden ingedeeld als obstakel of als wandruwheid.

Als van wandruwheid sprake is kan de ruwheidslengte z_0 en de verplaatsingshoogte d worden bepaald aan de hand van de ruwheidsclassificatie uit bijlage 6.

Voor enige obstakelgroepen, ontleend aan de Grote Bos Atlas [8], is in figuur 12.10 de indeling gemaakt. De bebouwingshoogte is ca. 8 m verondersteld. In de voorbeelden van het Kanaaldorp en het Esdorp is het indelingsresultaat afhankelijk van de windturbinelocatie en de windrichting.



Figuur 12.9 Strijk lengte R benodigd voor ontstaan van stabiele wandstroming (beste schatting uit meetresultaten, referentie [2], [7]).



Figuur 12.10 Indelingsvoorbeelden van bebouwingwijken.

12.4 Voorbeeldberekening van de methode voor zogeeffectbepaling

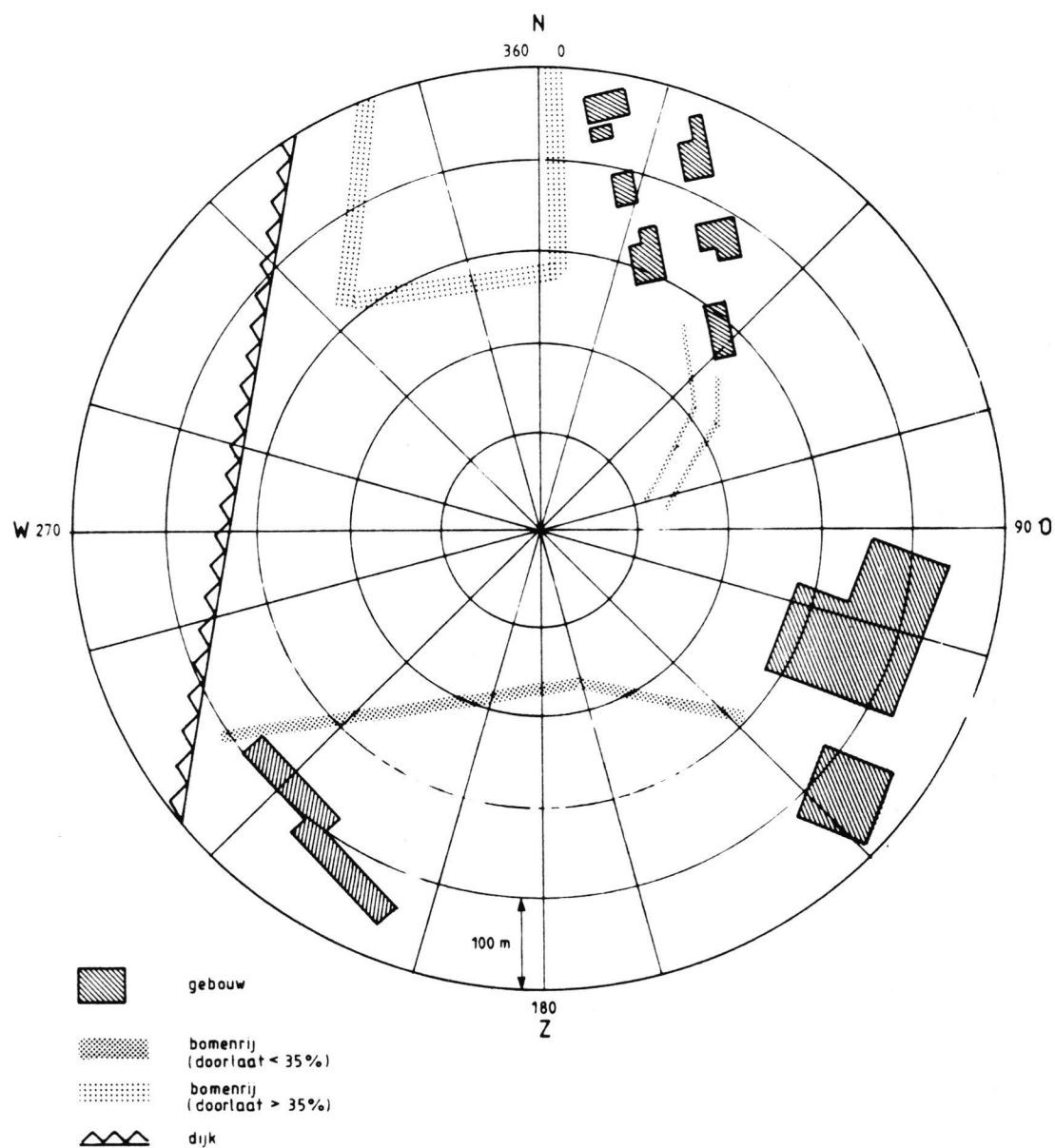
Ter illustratie van de gehanteerde rekenmethode wordt hierna een voorbeeld gegeven van de obstakelcorrectieberekening voor WT-L (zie hoofdstuk 10).

In figuur 12.11 is een gefingeerd voorbeeld geschetst van een mogelijke windturbine locatie enkele kilometers landinwaarts van de kust. De windturbine met een as-hoogte van 20 m. wordt hierbij geplaatst gedacht in het middelpunt van de cirkel.

De terreinruwheid wordt voor het gehele gebied op $z_0 = 0.03$ m gesteld. Als vuistregel kan worden aangenomen dat obstakels merkbaar zijn tot op 50 keer de obstakelhoogte. De afmetingen van het gebied waarin voor de aanwezige obstakels correctiefactoren worden berekend volgt uit deze vuistregel.

In het voorbeeld is uitgegaan van een gebied met een straal van 500 m. Dat houdt dus in dat buiten dit gebied geen obstakels meer voorkomen op een afstand minder dan 50 keer de obstakelhoogte. Aan de rand van dit gebied zou een obstakel kunnen staan tot 10 m. hoog.

Getracht is het voorbeeld zodanig te construeren dat alle mogelijke correctiefactoren bij de bepaling van de obstakelcorrectie een keer de revue passeren. Hiertoe is gebruik gemaakt van een aantal verschillende obstakels en obstakeleigenschappen. In figuur 12.11 zijn de diverse obstakels aangegeven en benoemd. Tabel 12.1 geeft de diverse stappen in de berekening weer, resulterend in de correctiefactor C_B .



Figuur 12.11 Een gefingeerd voorbeeld van een windturbinelocatie nabij de kust.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-21

Tabel 12.1 Het resultaat van de berekening van de obstakelcorrectiefactoren voor de obstakels in figuur 12.11.

sector	soort obstakel	X	H _{ob}	W _{ob}	β	X/H _{ob}	λ_β	λ_e	λ_w	λ_r	X_e/H_{ob}	H_{as}/H_{ob}	C _B
0	<u>bomen</u> (<35%) ($Y_e/H_{ob} = 2.2$)												
	sector 20°	280	20	250	0	14	1.00	0.80	1.06	1.00	17	1.0	0.84
	huizen	450	10		30	45	0.82	1.00	1.06	1.00	52	2.0	1.00
30	<u>huizen</u>	300	10		45	30	0.65	1.00	1.06	1.00	44	2.0	0.95
60	<u>bomen</u> (>35%)	180	9	200	30	20	0.82	1.00	1.06	0.88	26	2.2	0.95
90	<u>loods</u>	400	12	180	15	33	1.00	1.00	1.06	1.00	31	1.7	0.91
120	<u>loods</u>	400	12	180	0	33	1.00	1.00	1.06	1.00	31	1.7	0.91
	silo sector 10°	450	20	100	10	23	1.00	1.00	0.70	1.00	32	1.0	0.97
150	<u>bomen</u> (>35%)	200	9	150	45	22	0.65	1.00	1.06	0.88	37	2.2	1.00
180	<u>bomen</u> (>35%)	180	9	350	10	20	1.00	1.00	1.06	0.88	21	2.2	0.93
210	<u>flat</u> sector 25°	400	30	200	0	13	1.00	1.00	0.80	1.00	17	0.7	0.80
	bomen (>35%)	210	9	350	45	23	0.65	1.00	1.06	0.88	38	2.2	1.00
240	dijk	400	5		40	80	0.60	1.00	1.00	1.00	133	4.0	1.00
	<u>flat</u> ($Y_e/H_0 = 0.8$)	400	30	200	0	13	1.00	0.40	0.80	1.00	42	0.7	0.94
	bomen (>35%)	350	9	300	60	39	0.40	1.00	1.06	0.88	104	2.2	1.00
270	dijk	320	5		10	64	1.00	1.00	1.06	1.00	60	4.0	1.00
300	dijk	350	5		20	70	1.00	1.00	1.06	1.00	66	4.0	1.00
330	<u>bomen</u> (< 35%)	300	20	250	20	15	1.00	1.00	1.06	1.00	14	1.0	0.72

De eerste kolom geeft het midden van de windrichtingsector. In de tweede kolom staan de obstakels genoemd. Bij bomen wordt het doorlaatpercentage gegeven. Sector 20° betekent dat het obstakel slechts 20° ($\approx 2/3$ deel) van de windrichtingsector bestrijkt. Onderstreping geeft aan dat het betreffende obstakel maatgevend is voor de betreffende windrichtingsector. De volgende 9 kolommen zijn invoergegevens en resultaten verkregen met behulp van de hulpgrafieken. Hierop volgen twee kolommen met getallen die op de assen van de basisgrafieken staan en waarmee uiteindelijk C_B bepaald wordt.

Voor de obstakelcorrectieberekening volgens methode III worden de windrichtingen opgedeeld in 30° sectoren. Deze windrichtingssectoren zijn aangegeven in figuur 12.11. De 0° sector bevat dus windrichtingen tussen 345 en 15°; de 30° sector tussen 15 en 45° etc.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-22

In totaal zijn er dus 12 windrichtingssectoren waarvoor een obstakelcorrectiefactor wordt bepaald.

De methode is ongewijzigd toepasbaar voor methode II voor de zuidwestsector; voor de restsector is methode II niet bruikbaar. Mocht de restsector veel obstakels bevatten, dan dient methode III te worden toegepast.

In de 0° sector vinden we achtereenvolgens een rij 20 m hoge bomen (waarvan in dit voorbeeld het doorlaatpercentage kleiner dan 35% gesteld is, dus vergelijkbaar met een huizenrij) en een rij woningen met een gemiddelde nokhoogte van 10 m. De afstand van de bomenrij tot de windturbine bedraagt 280 m. De relatieve afstand uitgedrukt in de obstakelhoogte wordt dan $X/H_{ob} = 14$.

Achtereenvolgens worden nu de verschillende correctiefactoren bepaald waarmee de effectieve afstand tot de windturbine kan worden berekend.

De aanstroomrichting van het obstakel is in dit geval vrijwel loodrecht ($\beta = 0^\circ$) zodat $\lambda_\beta = 1.0$.

De afstand van het midden van de bomenrij (in deze sector) tot aan de obstakelrand bedraagt ca. 45 m, oftewel $Y_e/H_{ob} = 2.2$. (N.B. Deze afstand dient bepaald te worden loodrecht op de gemiddelde windrichting in dat deel van de windrichtingssector waar het obstakel zich bevindt, in dit geval dus ca. 355° .)

De factor Y_e/H_{ob} is kleiner dan 3 zodat met een eindeffect rekening moet worden gehouden. Uit figuur 12.6 blijkt dat voor $Y_e/H_{ob} = 2.2$ een correctiefactor λ_e volgt van 0.8.

De breedte van de bomenrij loodrecht op de windrichting bedraagt 250 m zodat met $W_{ob}/H_{ob}=12.5$ er sprake is van een breed obstakel. Uit figuur 12.7 volgt dat $\lambda_w = 1.0$.

De terreinruwheid wordt voor het gehele gebied gesteld op $z_0 = 0.03$ m. De inverse van de relatieve terreinruwheid voor deze bomenrij wordt dan $H_{ob}/z_0 = 667$. Uit figuur 12.8 blijkt dan dat met een correctiefactor λ_r van 1.00 gerekend moet worden.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-23

Voor de effectieve afstand tussen windturbine en obstakel vinden we nu $X_e/H_{ob} = 14/(1.0 \cdot 0.8 \cdot 1.0 \cdot 1.0) = 18$.

De ashoogte van de turbine bedraagt $H_{as} = 20$ m zodat voor de relatieve ashoogte $H_{as}/H_{ob} = 1.0$ wordt gevonden.

Met deze twee parameters vinden we in figuur 12.2 op deze combinatie van afstand en hoogte een reductie in windsnelheid van $C_B = 0.76$. Het deel van de 0° sector dat dit obstakel in beslag neemt bedraagt 20° , dat wil zeggen $2/3$ van de totale sector. De uiteindelijke beschuttingsfactor wordt hierdoor met $2/3$ gereduceerd tot 0.84 volgens:

$$C_B = 2/3 \cdot 0.76 + 1/3 = 0.84$$

De huizenrij staat op een afstand van ongeveer 450 m. Met een gemiddelde hoogte van 9 m komt dit neer op een relatieve afstand van 50 keer de obstakelhoogte. Op deze afstand is geen obstakelinvloed meer te verwachten volgens figuur 12.2, zodat voor deze obstakels een beschuttingsfactor $C_B = 1.0$ kan worden aangehouden.

Het grootste obstakeleffect in de 0° sector wordt dus gevonden voor de bomenrij ($C_B = 0.84$). Deze beschuttingsfactor wordt nu toegepast voor de gehele windrichtingssector.

De overige windrichtingssectoren worden nu op dezelfde wijze behandeld. Het resultaat hiervan wordt gepresenteerd in de hierboven gegeven tabel 12.1

De voor iedere sector maatgevende beschuttingsfactor is onderstreept weergegeven.

Het blijkt dat met name het flatgebouw in de 210° sector en de bomen in de 0° , 60° , 180° en 330° sectoren grote invloed hebben.

Literatuur

[1] Halitsky, J.;

Wake and Dispersion Models for the EBR-II Building Complex;
Atm. Environment, Vol. 11, pp. 557-596, 1977.

88-145/R.24/CAP

bijlage 12-24

- [2] Hussain, M.;
A study of the Wind Forces on Low Rise Building Arrays and their Application to Natural Ventilation Design Methods;
University of Sheffield, November 1978.
- [3] Leene, J.A. en P.E.J. Vermeulen;
Windtunnel onderzoek naar het windveld bij de windturbine-locatie Camperduin;
MT-TNO, 84-08478, Apeldoorn, juli 1984.
- [4] Leene, J.A.;
Obstakel-zogeffecten, Verbetering en uitbreiding ten behoeve van de definitieve versie Handboek Energie-opbrengsten van windturbines;
MT-TNO, 8724-11192, Apeldoorn, maart 1987.
- [5] Leene, J.A.;
Bepaling van obstakel effecten bij energie-opbrengst berekeningen van windturbines;
Nationale Windenergie Conferentie 1988, pp. 282-287,
Noordwijkerhout, februari 1988.
- [6] Pfeiffer, A.E. e.a.;
Handboek Ontwerpwindgegevens windturbines, deel 1;
Holland Windturbine, 87-1708.1, Utrecht, november 1987.
- [7] Vermeulen, P.E.J.;
Inventarisation and Evaluation of Methods to Determine the local Wind Statistics;
MT-TNO, 83-04376, Apeldoorn, April 1983.
- [8] Grote Bos Atlas;
Wolters, Groningen, 1986.

88-145/R.24/CAP

bijlage 13-1

Bijlage 13 OBSTAKELCORRECTIEFACTOR (WINDTURBINES)

De berekening van zogeeffecten van windturbines wijkt in het algemeen af van die van obstakelzogeeffecten zoals beschreven in bijlage 12.

In deze bijlage wordt de invloed van één turbine op de windsnelheid stroomafwaarts beschreven. De invloed van meerdere turbines op de windsnelheid is van belang voor berekeningen aan windturbineparken. Dit laatste wordt behandeld in stap 14 van methode III en in bijlage 14.

In het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Windenergie en het International Energy Agency-onderzoekprogramma op het gebied van windenergie is het MILLY-rekenprogramma ontwikkeld (Vermeulen e.a. [1], [2]). Een uitbreiding van dit rekenprogramma, genaamd FARMS, is gebruikt bij de berekeningen van de in deze bijlage gepresenteerde resultaten.

Net als bij de obstakels van bijlage 12 is in het zog van een windturbine de gemiddelde windsnelheid lager dan voor de turbine. De omstandigheden voor de turbine worden aangeduid met de ongestoorde windsnelheid U_0 .

In de figuren 13.1 en 13.2 is voor een grote en een middelgrote windturbine de snelheidsreductiefactor C_B uitgezet tegen de plaats achter de turbine.

Voor deze figuren zijn de berekeningen uitgevoerd met invoerparameters die min of meer kenmerkend zijn voor de meeste middelgrote en grote turbines:

88-145/R.24/CAP

bijlage 13-2

Tabel 13.1 Invoergegevens voor de figuren 13.1 en 13.2.

	middelgrote turbine	grote turbine
ongestoorte turbulentie-niveau	20%	16%
terreinruwheid	$z_0 = 0.10 \text{ m}$	$z_0 = 0.10 \text{ m}$
tweebladige machine met tipsnelheidsverhouding	$\lambda = 9$	$\lambda = 9$
vermogenscoëfficiënt	$C_p = 0.40$	$C_p = 0.40$
thrustcoëfficiënt	$C_T = 0.84$	$C_T = 0.84$
ashoogte	$H_{as} = 20 \text{ m}$	$H_{as} = 50 \text{ m}$
rotordiameter	$D = 20 \text{ m}$	$D = 50 \text{ m}$

De snelheid $U(z)$ in het zog volgt bij bekende windsnelheid $U(z)_0$ uit:

$$U(z) = C_B(z) \cdot U(z)_0$$

De snelheidsreductiefactor C_B is afhankelijk van de parameters vermeld in tabel 13.1. Uit berekeningen blijkt echter dat vooral de thrustcoëfficiënt C_T en in mindere mate het ongestoorde turbulentie-niveau van invloed zijn. De invloed van de overige parameters op C_B is verwaarloosbaar, al moet bedacht worden dat het turbulentie-niveau afhankelijk is van de ashoogte en de terreinruwheid.

Een hogere waarde van C_T betekent een hogere weerstand en dus grotere snelheidsverminderingen in het zog.

De snelheidsreductiefactor C_B kan uit de figuren 13.1 en 13.2 worden berekend middels de relatie:

$$C_B = 1 - f + f \cdot C_{B,C_T = 0.84}$$

waarin de factor f een functie is van C_T , waarvoor geldt:

$$C_T = 0.70 \quad f = 0.7$$

$$C_T = 0.84 \quad f = 1.0$$

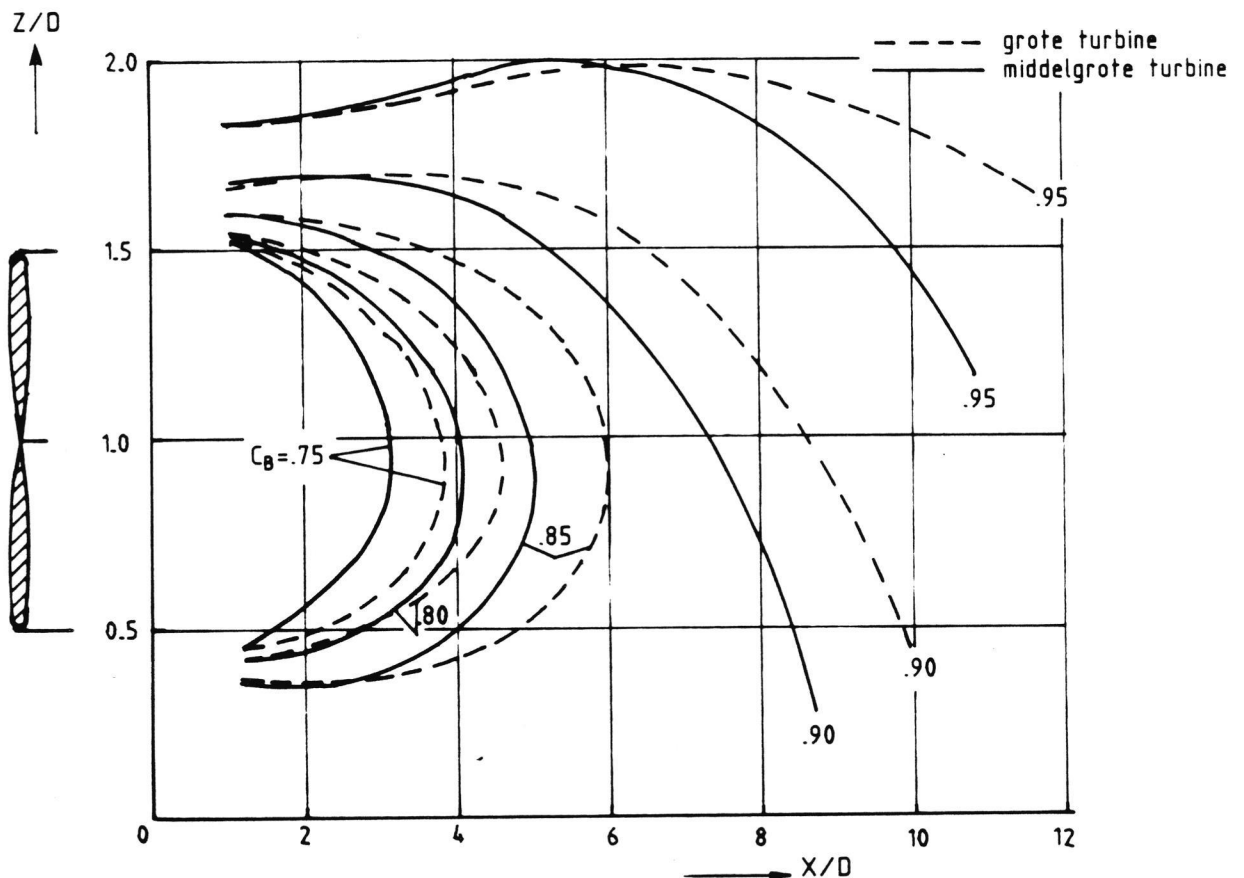
$$C_T = 0.90 \quad f = 1.3$$

88-145/R.24/CAP

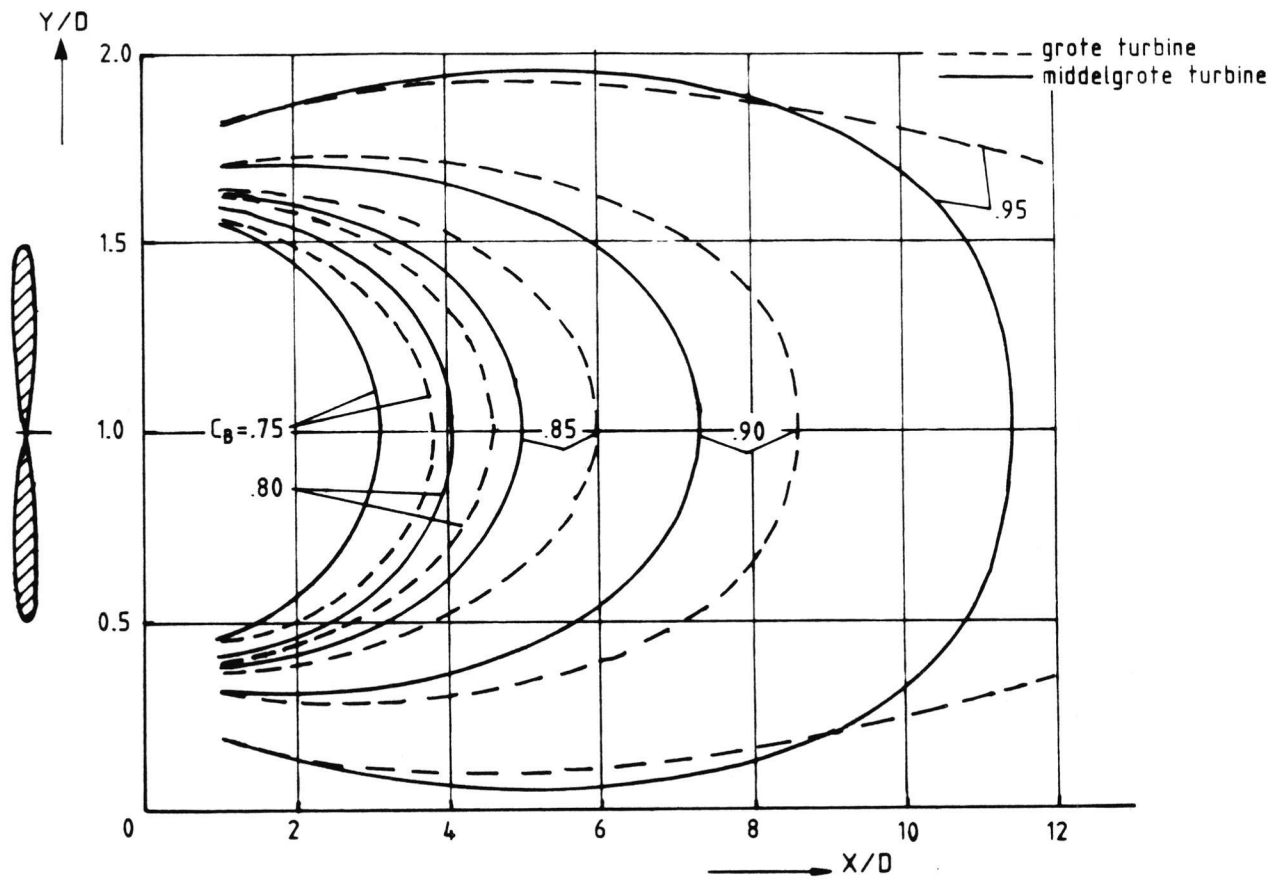
bijlage 13-3

Voor tussenliggende waarden van C_T kan de factor f met behulp van lineaire interpolatie voldoende nauwkeurig worden bepaald.

In het algemeen is de rotorweerstand afhankelijk van de snelheid. Voor een voldoende nauwkeurige berekening van de zogeeffekten kan echter worden uitgegaan van de gemiddelde C_T behorend bij de windsnelheden tussen 5 en 10 m/s.



Figuur 13.1 Snelheidsreductie achter een windturbine
(z = coördinaat is de hoogterichting).



Figuur 13.2 Snelheidsreductie achter een windturbine
(y = coördinaat is de dwarsrichting).

Literatuur

- [1] Vermeulen, P.E.J. and P.J.H. Builtjes;
Mathematical modelling of wake interaction in wind turbine arrays.
Part I;
MT-TNO, 81-01473, Apeldoorn, 1981.
- [2] Vermeulen, P.E.J. and J.B.A. Vijge;
Mathematical modelling of wake interaction in wind turbine arrays.
Part II;
MT-TNO, 81-02834, Apeldoorn, 1981.
- [3] Vermeulen, P.E.J. and P.J.H. Builtjes;
Practical applications of a mathematical wake interaction model;
4th International Wind Energy Conference, Stockholm, September 1982.

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-1

Bijlage 14 WINDPARKCORRECTIEFACTOR

In een windpark zijn de windturbines als elkaars obstakel te beschouwen. Om deze obstakelinvloed te berekenen, wordt de windparkcorrectiefactor C_{park} geïntroduceerd. C_{park} geeft het parkgemiddelde relatieve verlies aan windaanbod aan. Deze factor is altijd kleiner dan 1, waaruit blijkt dat het gemiddelde windaanbod voor een windturbine in een windpark kleiner is dan dat voor een solitair geplaatste turbine in dezelfde omgeving.

De berekening van de parkcorrectiefactor maakt dat de berekening van de energie-opbrengst nog "handmatig" uitgevoerd kan worden. In feite zou voor elke turbine in het park een obstakelcorrectiefactor per windrichtingsector berekend moeten worden. Dit leidt bij een park van slechts enkele turbines al tot een enorme hoeveelheid rekenwerk. C_{park} is echter een goede benadering van de werkelijkheid mits er gerekend wordt met één parkgemiddelde ruwheid en de invloed van obstakels gering is. Dit zal voor de meeste parken het geval zijn. In overige gevallen is het gebruik van beschikbare rekenmodellen (zie verderop in deze bijlage) aanbevelenswaardig.

De windparkcorrectiefactor zal kleiner zijn naarmate het park uit meer turbines bestaat en de onderlinge afstand tussen de turbines geringer is. Verder is deze factor afhankelijk van de oriëntatie van het park ten opzichte van de meest voorkomende windrichting. Voor een windpark in lijnopstelling is bij overheersende zuidwestelijke wind een zuidoost-noordwest georiënteerde opstelling gunstiger dan een zuidwest-noord-oost georiënteerde.

Verschillende combinaties van onderlinge turbineafstand, park lay-out, oriëntatie en terreinruwheid kunnen tot grote verschillen in de energie-opbrengst leiden. Verschillen tot 20% voor dezelfde locatie zijn mogelijk.

In het kader van het NOW en het IEA-onderzoekprogramma is het MILLY-rekenprogramma ontwikkeld (Vermeulen e.a. [2], [3]). In het kader van het NOW is eveneens het model GISPE ontwikkeld (Rutten en Van Eeden [1]).

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-2

Met behulp van deze twee modellen zijn de windsnelheidsverminderingen, gemiddeld over het park, per sector van 5° berekend. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een aantal eenvoudige parkconfiguraties (lijn- en carré-opstellingen) met dezelfde invoergegevens als gebruikt in bijlage 13. Gebleken is dat de beide turbines geen noemenswaardige verschillen vertoonden met betrekking tot de windparkcorrectiefactor. De resultaten zijn in deze bijlage gepresenteerd zowel in grafiek- als in tabelvorm en zijn geldig voor beide voorbeeldturbines. In iedere grafiek zijn de resultaten gegeven voor drie verschillende relatieve afstanden s/D (s is de afstand tussen twee turbines, D is de rotordiameter). De bovenste lijnen horen bij $s/D = 10$, de middelste bij $s/D = 6$ en de onderste bij $s/D = 4$.

De resultaten zijn alleen geldig voor windparken bestaande uit identieke turbines en eenvoudige parkgeometrieën. In onderstaande overige gevallen wordt aanbevolen om gebruik te maken van de genoemde rekenmodellen:

- grote windparken;
- afwijkende, bijzondere parkgeometrieën;
- sterk afwijkende meteorologische condities;
- het gebruik van verschillende turbines in één park;
- een aantal sterke ruwheidsovergangen in de omgeving van het park;
- een aantal invloedrijke obstakels in de nabije omgeving van het park.

Evenals voor de obstakelcorrectiefactor in bijlage 13, geldt ook voor de C_{park} factor dat deze sterk afhankelijk is van de weerstandscoefficiënt C_T . Een hogere waarde voor C_T betekent een hogere turbine weerstand en dus grotere snelheidsverminderingen in het zog.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor $C_T = 0.84$. Voor afwijkende C_T kan C_{park} op analoge wijze als in bijlage 13 worden berekend. Alleen voor de factor f gelden andere waarden:

$$C_{\text{park}} = 1 - f + f \cdot C_{\text{park}, C_T = 0.84} \quad (1)$$

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-3

waarin voor f geldt:

C_T	f
0.70	0.7
0.84	1.0
0.90	1.2

Voor tussenliggende waarden van C_T kan de factor f met behulp van lineaire interpolatie voldoende nauwkeurig worden bepaald. In het algemeen is de rotorweerstand afhankelijk van de windsnelheid. Voor een voldoende nauwkeurige berekening van de zogeeffecten kan echter worden uitgegaan van de gemiddelde C_T behorend bij de windsnelheden tussen 5 en 10 m/s.

Voor het aflezen van C_{park} (voor $C_T = 0.84$!) dienen de volgende stappen uitgevoerd te worden:

1. Bepaal voor elke windrichtingsector van 30° hoe groot de aanstroomhoek α is, afgerond op 5° . In figuur 14.1 is aangegeven hoe deze hoek is gedefinieerd.
2. Bereken α_1 en α_2 als volgt:
$$\alpha_1 = \alpha - 15^\circ$$
$$\alpha_2 = \alpha + 15^\circ$$

Teken deze hoeken in de grafiek van het desbetreffende windpark in. De grafiek wordt zo in 12 regelmatige stukken verdeeld.
3. Bepaal nu voor elke 30° sector de gemiddelde C_{park} door over de zes 5° -sectoren te middelen. (De waarden kunnen ook uit de bijbehorende tabel gehaald worden.)
4. Corrigeer met vergelijking 1 van deze bijlage voor afwijkende C_T . De 12 windparkcorrectiefactoren $C_{park,i}$ zijn nu bekend.

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-4

Voorbeeldberekening van de windparkcorrectiefactor

In deze voorbeeldberekening wordt uitgegaan van drie turbines in een lijnopstelling waarvan de volgende gegevens bekend zijn:

- $H_{as} = 20 \text{ m}$
- $D = 20 \text{ m}$
- $C_T = 0.80$
- $s = 80 \text{ m}$
- de verbindingslijn tussen de turbines staat onder een hoek van 45° met de Noord-Zuid-as (NW-ZO lijnopstelling).

De onderlinge afstand s is gelijk aan $4 D$; de onderste lijnen uit figuur 14.2 dienen dus gebruikt te worden.

1. In figuur 14.2 komt 0° (Noord, het midden van windrichtingssector 1) overeen met een aanstroomhoek α van 45° . Een overzicht van de windrichtingsectoren met de bijbehorende aanstroomhoeken is gegeven in onderstaande tabel 14.1.
2. Een overzicht van de hoeken α_1 en α_2 is in dezelfde tabel te vinden.
3. De windparkcorrectiefactoren $C_{park,i}$ zijn nu af te lezen van figuur 14.2 en/of te berekenen met behulp van de getallen in de bijgeleverde tabellen. De resultaten staan in tabel 14.1.
4. Met $C_T = 0.80$ wordt de factor f :

$$f = 1.0 - \left(\frac{0.84-0.80}{0.84-0.70} \cdot 0.3 \right) = 0.91$$

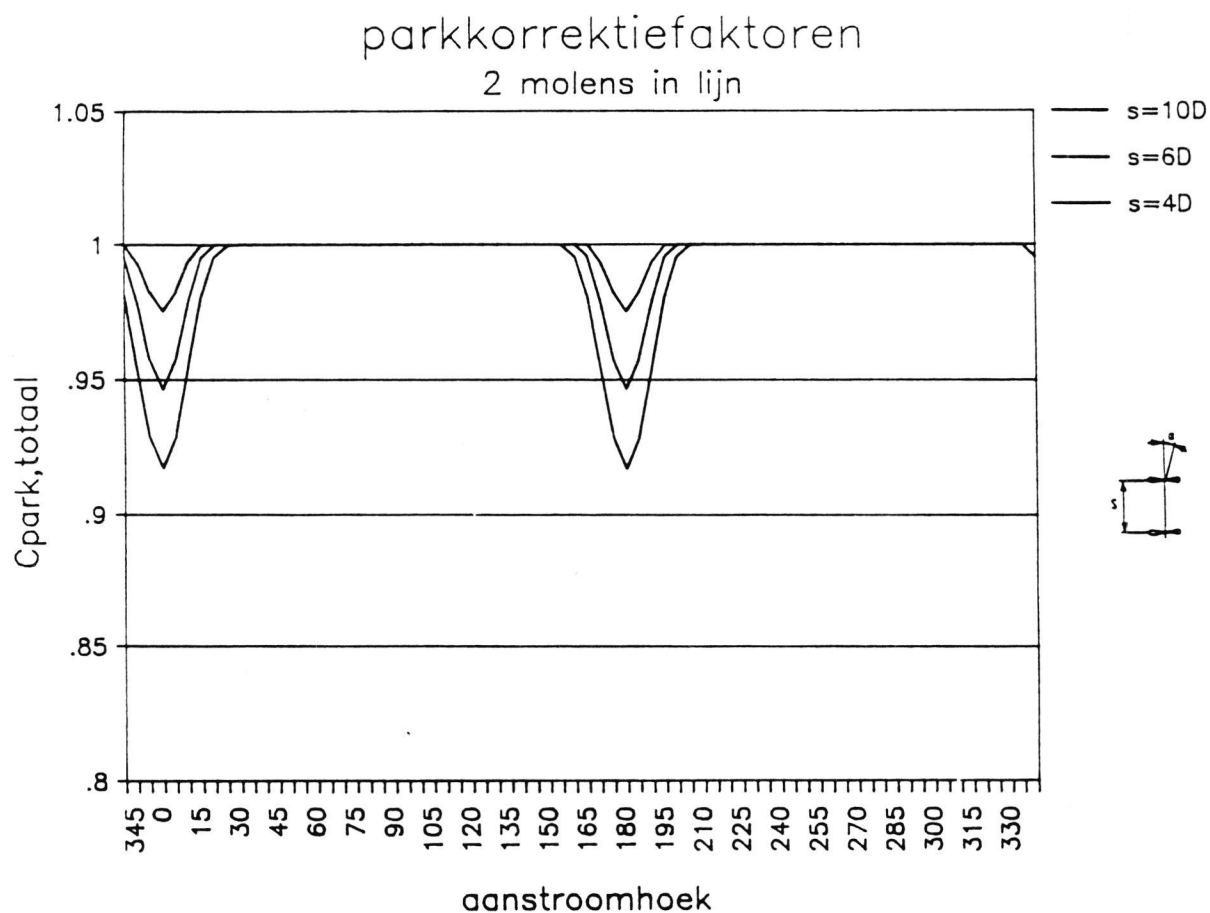
Hiermee worden de parkcorrectiefactoren gelijk $0.09 + 0.91 \cdot$ de getalwaarden van stap 3 (zie tabel 14.1).

88-145/R.24/CAP

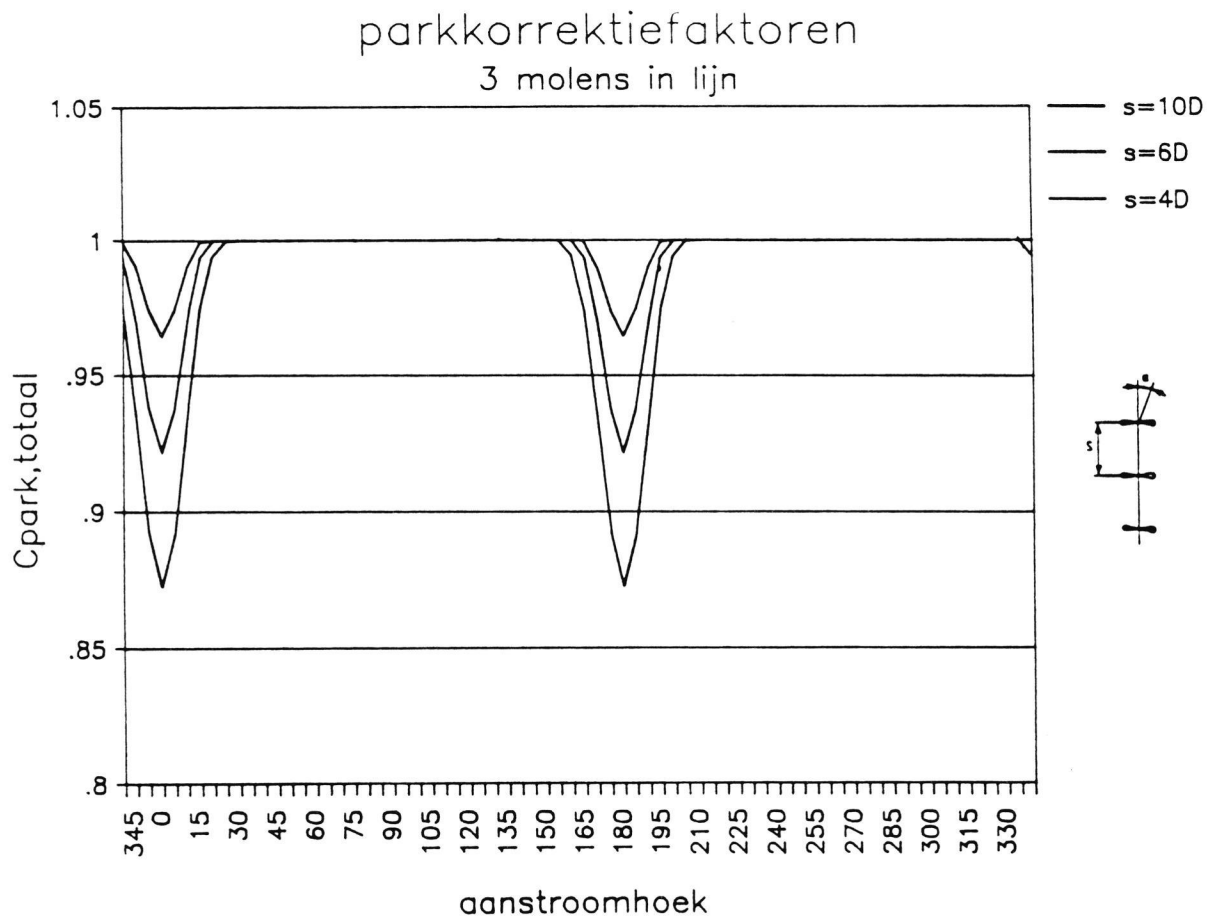
bijlage 14-5

Tabel 14.1 Overzicht van de resultaten van de stappen 1 t/m 4 van bijlage 14. De resultaten van stap 4 zijn de gewenste windparkcorrectiefactoren.

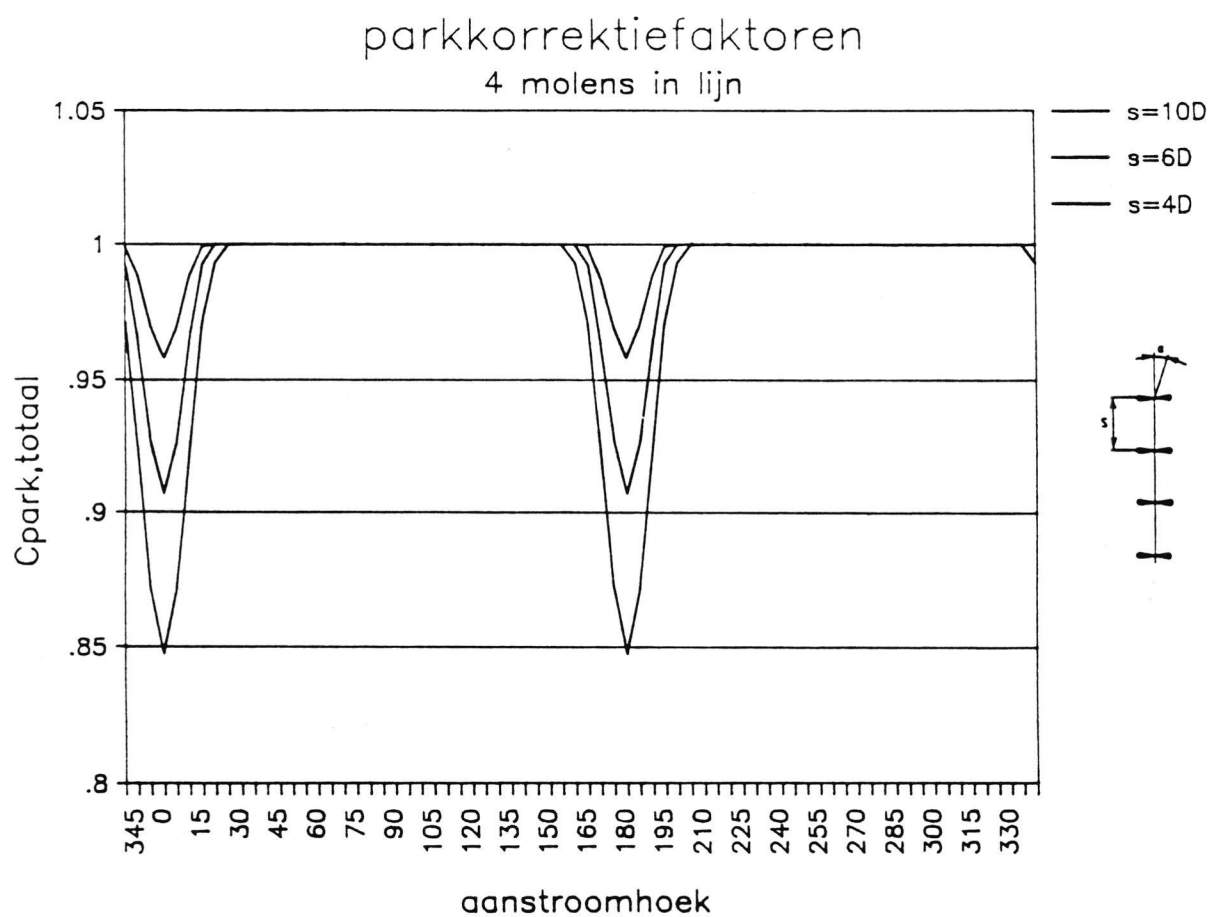
stap	1	2		3	4
windrichting- sector	aanstroom- hoek α (in °)	hoeken α_1 α_2 (in °)		windpark- correctiefactor ($C_T = 0.84$) (-)	windpark- correctiefactor ($C_T = 0.80$) (-)
1	45	30	60	1.00	1.00
2	75	60	90	1.00	1.00
3	105	90	120	1.00	1.00
4	135	120	150	1.00	1.00
5	165	150	180	0.96	0.93
6	195	180	210	0.96	0.93
7	225	210	240	1.00	1.00
8	255	240	270	1.00	1.00
9	285	270	300	1.00	1.00
10	315	300	330	1.00	1.00
11	345	330	0	0.96	0.93
12	15	0	30	0.96	0.93



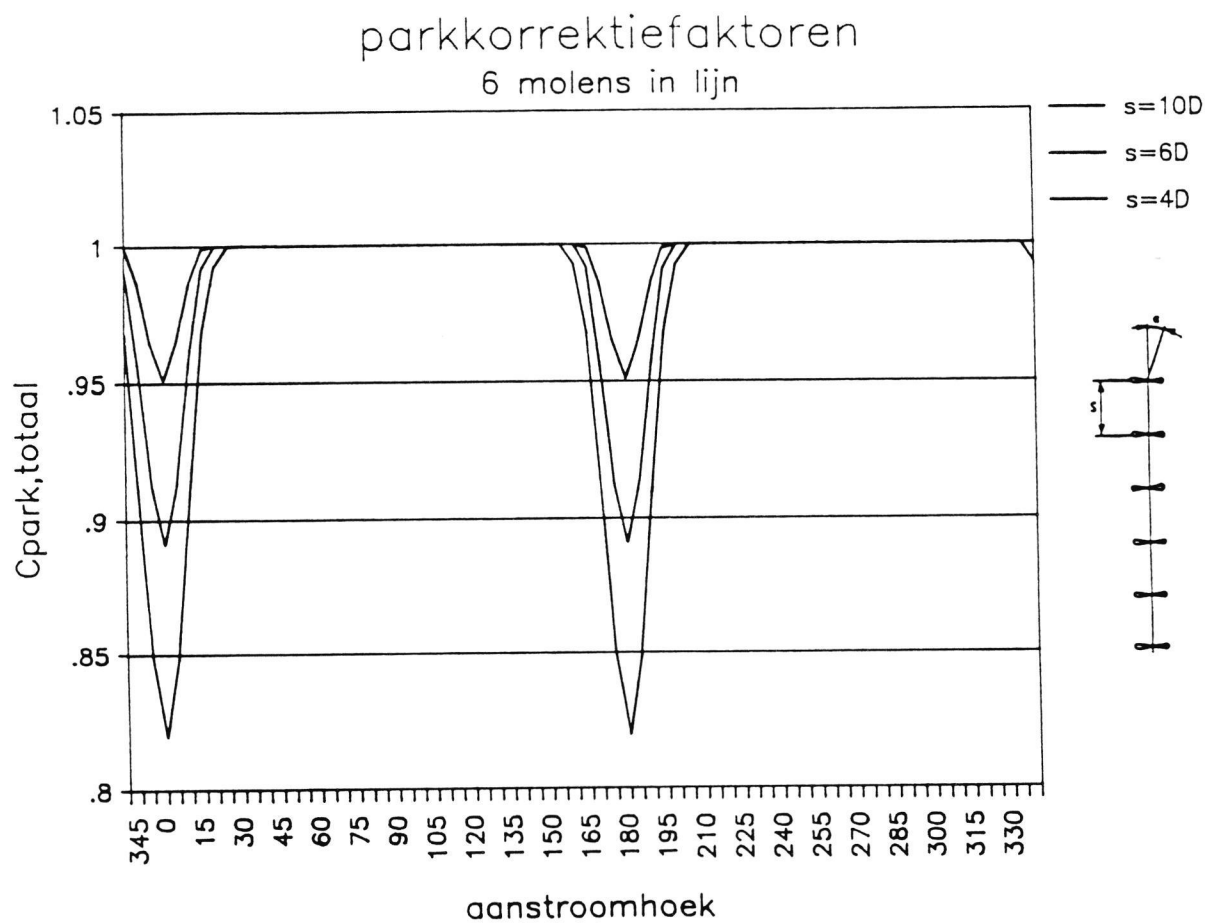
Figuur 14.1 Windparkcorrectiefactoren als functie van de aanstroomhoek α voor 2 turbines in lijnopstelling.



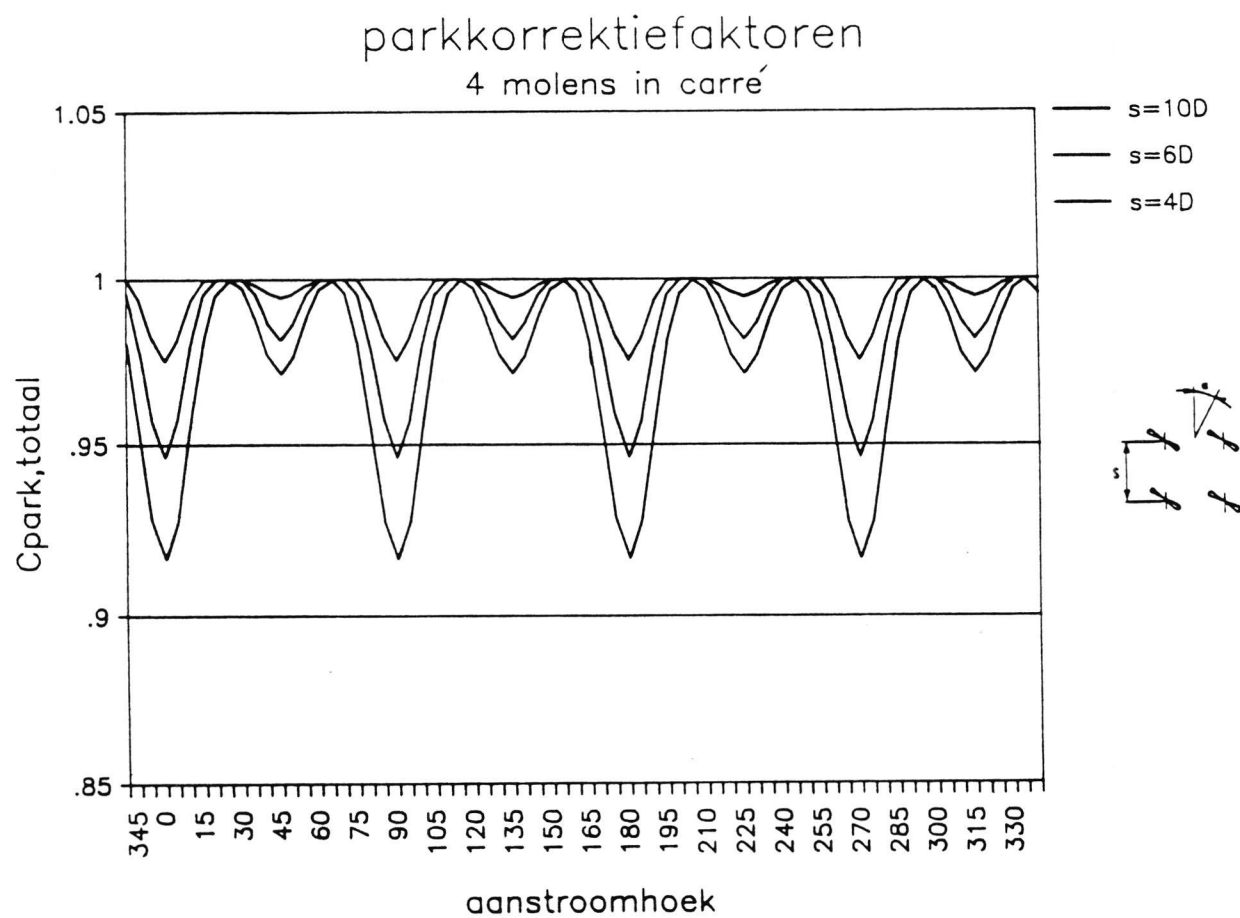
Figuur 14.2 Windparkcorrectiefactoren als functie van de aanstroomhoek α voor 3 turbines in lijnopstelling.



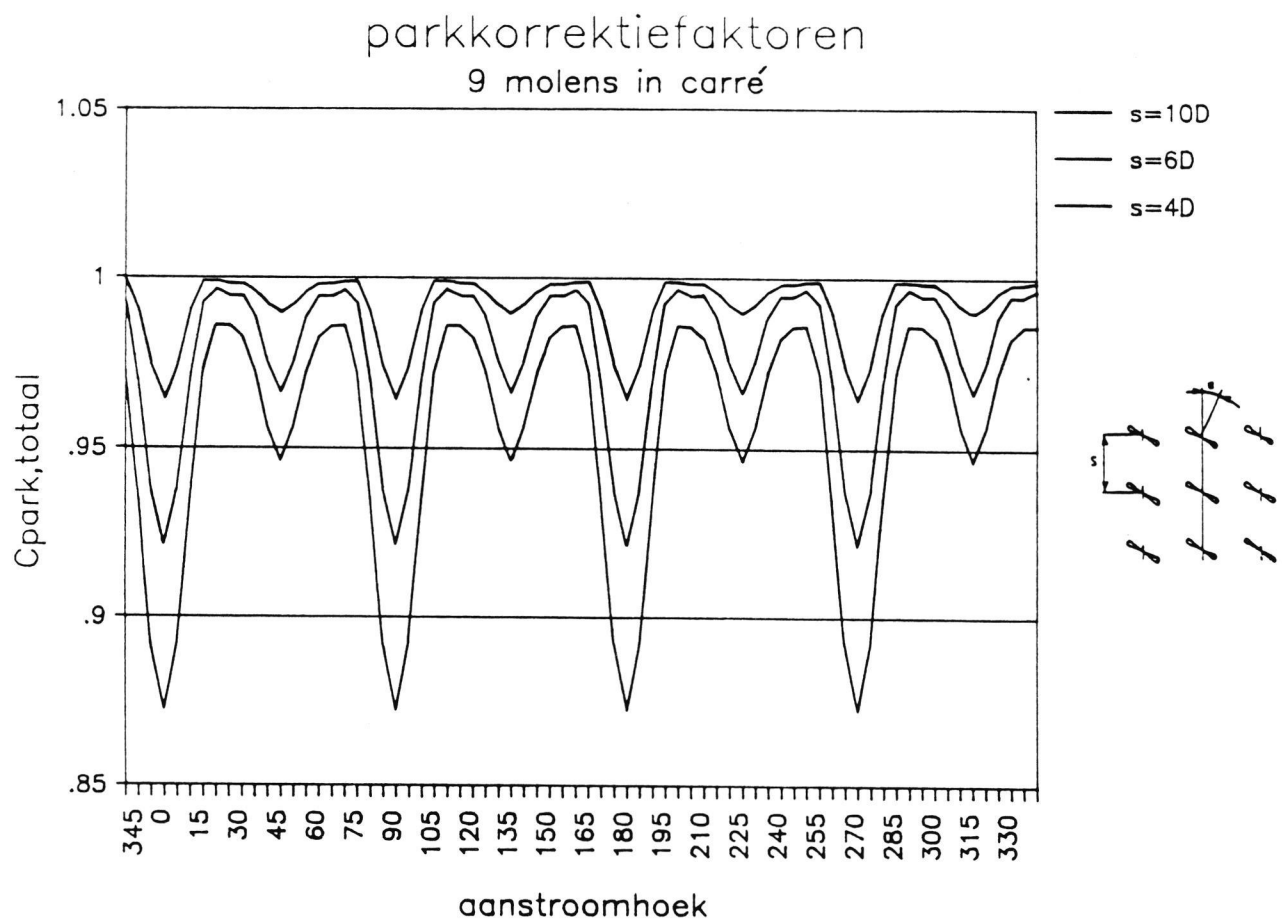
Figuur 14.3 Windparkcorrectiefactoren als functie van de aanstroomhoek α voor 4 turbines in lijnopstelling.



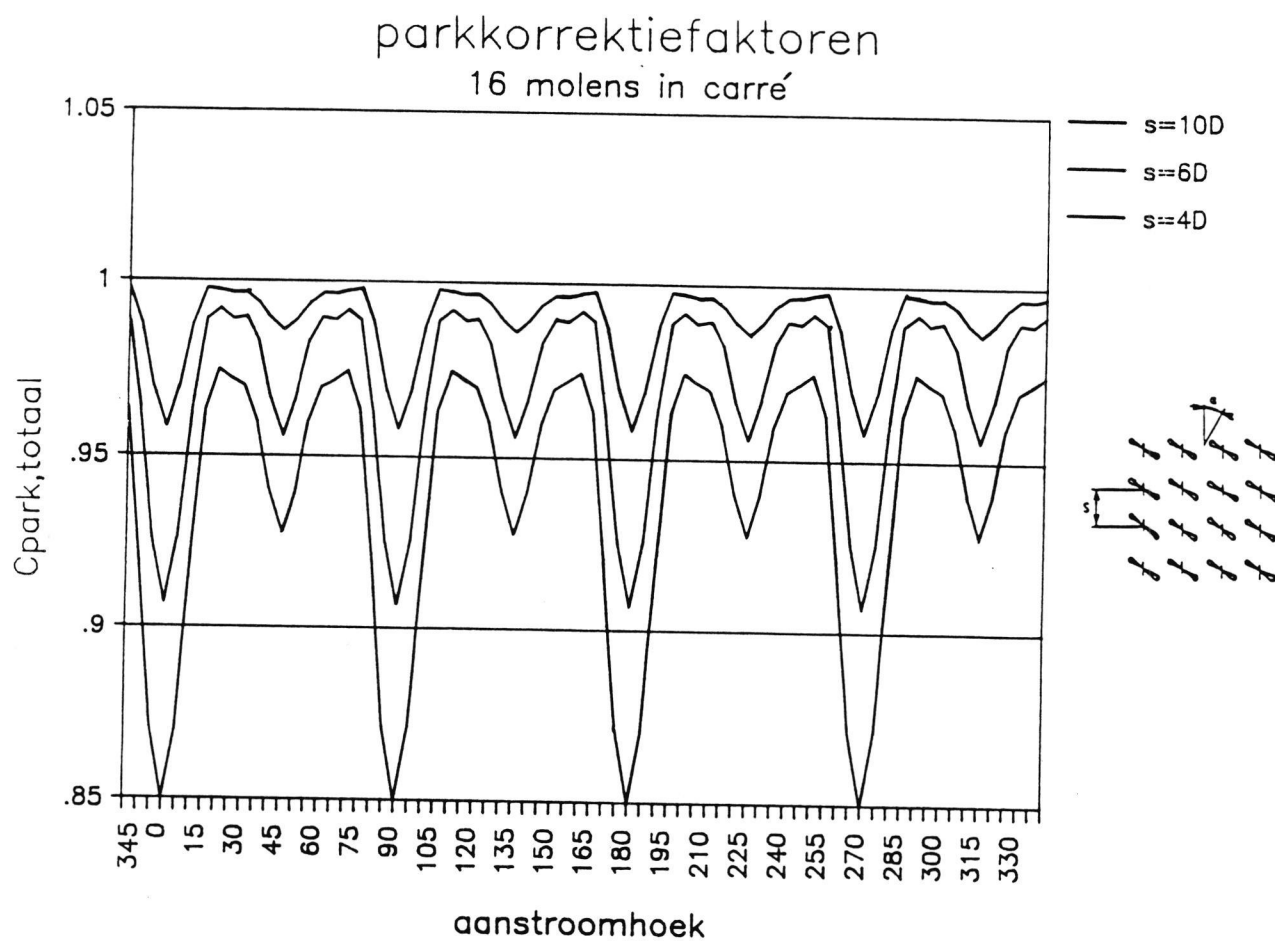
Figuur 14.4 Windparkcorrectiefactoren als functie van de aanstroomhoek α voor 6 turbines in lijnopstelling.



Figuur 14.5 Windparkcorrectiefactoren als functie van de aanstroomhoek α voor 4 turbines in carré-opstelling.



Figuur 14.6 Windparkcorrectiefactoren als functie van de aanstroomhoek α voor 9 turbines in carré-opstelling.



Figuur 14.7 Windparkcorrectiefactoren als functie van de aanstroomhoek α voor 16 turbines in carré-opstelling.

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-13

Tabellen bijlage 14 De windparkcorrectiefactor per 5° sector voor enkele eenvoudige parkconfiguraties (lijn- en carré-opstelling). Voor elke configuratie zijn de resultaten vermeld voor onderlinge afstanden van respectievelijk 10, 6 en 4 diameter.

beginhoek		resultatentabel										parkcorrectie per 5 gradenhoek				
		-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25						
16 molens in carre																
10 D		.998	.988	.969	.958	.969	.988	.998	.997	.996						
6 D		.989	.963	.926	.907	.926	.963	.989	.992	.989						
4 D		.963	.921	.871	.847	.871	.921	.963	.975	.972						
9 molens in carre																
10 D		.999	.990	.974	.964	.974	.990	.999	.999	.998						
6 D		.993	.970	.938	.921	.938	.970	.993	.996	.995						
4 D		.972	.935	.892	.872	.892	.935	.972	.986	.986						
4 molens in carre																
10 D		1.000	.993	.982	.975	.982	.993	1.000	1.000	1.000						
6 D		.995	.979	.957	.946	.957	.979	.995	1.000	1.000						
4 D		.981	.955	.928	.917	.928	.955	.981	.996	1.000						
6 molens in lijn																
10 D		.999	.986	.964	.951	.964	.986	.999	1.000	1.000						
6 D		.992	.957	.913	.891	.913	.957	.992	1.000	1.000						
4 D		.967	.911	.848	.820	.848	.911	.967	.993	1.000						
4 molens in lijn																
10 D		.999	.988	.969	.958	.969	.988	.999	1.000	1.000						
6 D		.993	.964	.926	.907	.926	.964	.993	1.000	1.000						
4 D		.971	.924	.871	.847	.871	.924	.971	.993	1.000						
3 molens in lijn																
10 D		.999	.990	.974	.964	.974	.990	.999	1.000	1.000						
6 D		.994	.970	.938	.921	.938	.970	.994	1.000	1.000						
4 D		.974	.935	.892	.872	.892	.935	.974	.994	1.000						
2 molens in lijn																
10 D		1.000	.993	.982	.975	.982	.993	1.000	1.000	1.000						
6 D		.995	.979	.957	.946	.957	.979	.995	1.000	1.000						
4 D		.981	.955	.928	.917	.928	.955	.981	.996	1.000						

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-14

Tabellen bijlage 14 vervolg.

[illegible]

88-145 / R.24 / CAP

bijlage 14-15

Tabellen bijlage 14 vervolg.

[illegible]

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-16

Tabellen bijlage 14 vervolg.

[illegible]

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-17

Tabellen bijlage 14 vervolg.

beginhoek	165	170	175	180	185	190	195	200	205
16 molens in carre									
10 D	.998	.988	.969	.958	.969	.988	.998	.997	.996
6 D	.989	.963	.926	.907	.926	.963	.989	.992	.989
4 D	.963	.921	.871	.847	.871	.921	.963	.975	.972
9 molens in carre									
10 D	.999	.990	.974	.964	.974	.990	.999	.999	.998
6 D	.993	.970	.938	.921	.938	.970	.993	.996	.995
4 D	.972	.935	.892	.872	.892	.935	.972	.986	.986
4 molens in carre									
10 D	1.000	.993	.982	.975	.982	.993	1.000	1.000	1.000
6 D	.995	.979	.957	.946	.957	.979	.995	1.000	1.000
4 D	.981	.955	.928	.917	.928	.955	.981	.996	1.000
6 molens in lijn									
10 D	.999	.986	.964	.951	.964	.986	.999	1.000	1.000
6 D	.992	.957	.913	.891	.913	.957	.992	1.000	1.000
4 D	.967	.911	.848	.820	.848	.911	.967	.993	1.000
4 molens in lijn									
10 D	.999	.988	.969	.958	.969	.988	.999	1.000	1.000
6 D	.993	.964	.926	.907	.926	.964	.993	1.000	1.000
4 D	.971	.924	.871	.847	.871	.924	.971	.993	1.000
3 molens in lijn									
10 D	.999	.990	.974	.964	.974	.990	.999	1.000	1.000
6 D	.994	.970	.938	.921	.938	.970	.994	1.000	1.000
4 D	.974	.935	.892	.872	.892	.935	.974	.994	1.000
2 molens in lijn									
10 D	1.000	.993	.982	.975	.982	.993	1.000	1.000	1.000
6 D	.995	.979	.957	.946	.957	.979	.995	1.000	1.000
4 D	.981	.955	.928	.917	.928	.955	.981	.996	1.000

bijlage 14-18

[illegible]

bijlage 14-19

beginhoek

16 molens in carre

.998	.988	.969	.958	.969	.900	.950	.989
.989	.963	.926	.907	.926	.963	.992	.989
.963	.921	.871	.847	.871	.921	.975	.972

9 molens in carre

.999	.974	.964	.974	.990
.993	.938	.921	.938	.970
.972	.892	.872	.892	.935
.986	.935	.892	.935	.972
.986	.972	.972	.972	.993
.995	.996	.990	.990	.999
.996	.999	.999	.999	.999
.986	.986	.986	.986	.986

4 molens in carre

1.000	.993	.982	.975	.982	.993	.982	.993	1.000	1.000
1.000	.979	.957	.946	.957	.979	.957	.979	.995	1.000
1.000	.955	.928	.917	.928	.955	.917	.928	.981	1.000
1.000	.981	.955	.928	.928	.955	.928	.928	.996	1.000

6 molens in lijn

[illegible]

4 molens in lijn

[illegible]

3 molens in lijn

[illegible]

2 molens in lijn

[illegible]

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-20

Tabellen bijlage 14 vervolg.

[illegible]

88-145/R.24/CAP

bijlage 14-21

Literatuur

- [1] Rutten, B.J.C.M. en M. van Eeden;
GISPE, Geografisch Informatie Systeem Park Energie-opbrengst;
CE, Delft, mei 1989.
- [2] Vermeulen, P.E.J. and P.J.H. Builtjes;
Mathematical modelling of wake interaction in wind turbine arrays.
Part I;
MT-TNO, 81-01473, Apeldoorn, 1981.
- [3] Vermeulen, P.E.J. and J.B.A. Vijge;
Mathematical modelling of wake interaction in wind turbine arrays.
Part II;
MT-TNO, 81-02834, Apeldoorn, 1981.
- [4] Vermeulen, P.E.J.;
Invloed van zogeeffecten op de plaatskeuze van windturbines;
Nationale Windenergie Conferentie 1981, Veldhoven, juni 1981.
- [5] Vermeulen, P.E.J. and P.J.H. Builtjes;
Practical applications of a mathematical wake interaction model;
4th International Wind Energy Conference, Stockholm, September 1982.

88-145/R.24/CAP

bijlage 15-1

Bijlage 15 WEEGFACTOR VOOR WINDRICHTINGSSECTOREN

De terreinomstandigheden in de omgeving van een turbinelocatie zijn niet in alle richtingen even belangrijk. Het waait immers vaker en gemiddeld ook harder uit het Zuidwesten dan uit bijvoorbeeld het Noorden.

De richtingsafhankelijkheid van ruwheids- en obstakelinvloeden kan in de berekeningen worden betrokken door ze te "wegen" met behulp van weegfactoren (f_i).

In onderstaande tabel zijn deze weegfactoren weergegeven.

Tabel 15.1 De weegfactor f_i per windrichtingssector.

Sector i	(windrichting)	f_i
1	0 ± 15	0.0582
2	30 ± 15	0.0587
3	60 ± 15	0.0745
4	90 ± 15	0.0811
5	120 ± 15	0.0450
6	150 ± 15	0.0545
7	180 ± 15	0.0817
8	210 ± 15	0.1316
9	240 ± 15	0.1410
10	270 ± 15	0.1167
11	300 ± 15	0.0830
12	330 ± 15	0.0740
totaal		1.0000

88-145/R.24/CAP

bijlage 16-1

Bijlage 16 JAARGEMIDDELDE STABILITEITSCORRECTIESNELHEID

Uit het gebruikte adiabatisch model voor het jaargemiddeld Nederlands windklimaat (Wieringa [5]) volgt een kwantitatief juiste beschrijving van het windveld op de oorspronkelijke meethoogte, ≈ 10 m. Het windveld op hogere rekenhoogten (bijvoorbeeld 60 m, of de grenslaaghoogte h) heeft evenwel systematisch te lage windsnelheden, omdat de atmosfeer gemiddeld niet neutraal-stabiel is. De noodzakelijke correctie voor deze fout hangt af van het plaatselijk stabiliteitsklimaat. Ter bepaling van deze correctie is op elf representatieve windstations de windsnelheid per uur op stabiliteits-afhankelijke wijze getransformeerd naar 40, 60, 80 m hoogte met de methode van Van Ulden en Holtslag ([2], [3]). Jaargemiddelde correcties van deze stations zijn daarop per hoogte geografisch gemiddeld over Nederland. De gemiddelde correcties bleken overeen te stemmen met onafhankelijke omhoogtransformaties op andere stations en met metingen op masten (Wieringa [6]).

De correctie-velden voor de hoogten 40, 60 en 80 m zijn nu samengevat in één correctieveld, dat op die drie hoogten precies overeenstemt met het oorspronkelijke. Extrapolatie van dit totaalveld boven 80 m is niet betrouwbaar. Het bleek bij deze geografische gemiddelden nodig om afzonderlijke aansluitende rekenvelden te bepalen voor NW-Nederland en voor de rest van Nederland. Het totale correctieveld is hieronder samengevat als functie van de topografische coördinaten Y en X en van de hoogte H_{as} .

De onderstaande vergelijkingen zijn echter alleen geldig voor windturbines met een effectieve ashoogte H_{aseff} groter dan 35 à 40 m. In de laatste alinea wordt een procedure gegeven voor turbines met lagere ashoogten.

Als voldaan wordt aan de plaats-criteria, dat hetzij $Y > (0.214 X + 562)$ hetzij zowel $X < 150$ als $Y > (0.583 X + 414)$ (dat is in Noord-Holland en op de Waddeneilanden), dan geldt:

$$\begin{aligned} \Delta U_{as,n} = & (0.96 \cdot 10^{-2} - 1.18 \cdot 10^{-4} \cdot H_{as} + 1.10 \cdot 10^{-6} \cdot H_{as}^2) \cdot Y + \\ & (-4.8 \cdot 10^{-3} + 1.42 \cdot 10^{-4} \cdot H_{as} - 1.16 \cdot 10^{-6} \cdot H_{as}^2) \cdot X + \\ & (-3.96 + 4.64 \cdot 10^{-2} \cdot H_{as} - 4.11 \cdot 10^{-4} \cdot H_{as}^2) \end{aligned}$$

88-145/R.24/CAP

bijlage 16-2

Elders in het land (waar niet voldaan wordt aan genoemde criteria) geldt:

$$\Delta U_{as,n} = (-1.30 \cdot 10^{-3} - 6.17 \cdot 10^{-5} \cdot H_{as} + 3.76 \cdot 10^{-7} \cdot H_{as}^2) \cdot Y + \\ (2.90 \cdot 10^{-3} + 4.98 \cdot 10^{-5} \cdot H_{as} - 1.95 \cdot 10^{-7} \cdot H_{as}^2) \cdot X + \\ (0.40 + 3.00 \cdot 10^{-2} \cdot H_{as} - 1.73 \cdot 10^{-4} \cdot H_{as}^2)$$

Typische uitkomsten van deze berekening bedragen $0.3 \text{ m/s} < \Delta U_{as} < 1.5 \text{ m/s}$, met een onzekerheid $\leq \pm 0.2 \text{ m/s}$ in het merendeel van het land. Alleen op de Waddeneilanden worden grotere correcties gevonden dan verantwoord lijkt, maar dit kan niet worden gecheckt bij gebrek aan toetsingsmateriaal aldaar.

Voor windturbines met een effectieve ashoogte kleiner dan 35 à 40 m kan de jaargemiddelde stabiliteits-correctiesnelheid na lineaire interpolatie als volgt bepaald worden.

- Bereken $\Delta U_{as,n}$ op 40 m hoogte. Bovenstaande vergelijkingen kunnen dan vereenvoudigd worden tot:

Voor $Y > (0.214 X + 562)$ hetzij $X < 150$ en $Y > (0.583 X + 414)$:

$$\Delta U_{40,n} = 6.64 \cdot 10^{-3} Y - 9.76 \cdot 10^{-4} X - 2.76.$$

In de overige gevallen:

$$\Delta U_{40,n} = -3.17 \cdot 10^{-3} Y + 4.58 \cdot 10^{-3} X + 1.32$$

- De correctiesnelheid op ashoogte wordt tenslotte berekend met:

$$\Delta U_{as,n} = \frac{H_{aseff} - 10}{30} \cdot \Delta U_{40,n}$$

(De correctiesnelheid op 10 m is gelijk aan 0 m/s.).

Literatuur

- [1] Holtslag, A.A.M.;

Estimates of diabatic wind profiles from near surface weather stations;

Boundary-layer Meteorology, 29 (1984), pp. 225-250.

88-145/R.24/CAP

bijlage 16-3

- [2] Holtslag, A.A.M. and A.P. van Ulden;
Simple estimates of nighttime surface fluxes from routine weather data;
KNMI, WR-82-4, De Bilt, 1982.
- [3] Holtslag, A.A.M. and A.P. van Ulden;
A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data;
J. of Climate and Applied Meteorology, vol. 22, no. 4, April 1983.
- [4] Holtslag, A.A.M. en A.J.M. van Wijk;
Transformatie van de wind naar hoogten boven 30 m voor opbrengst-berekeningen van windturbines;
Nationale Windenergie Conferentie 1985, Noordwijkerhout, december 1985.
- [5] Wieringa, J.;
Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages;
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112 (1986), pp. 85-110.
- [6] Wieringa, J.;
Kartering van Nederlands windklimaat boven 40 m hoogte;
Nationale Windenergie Conferentie 1988, pp. 102-106,
Noordwijkerhout, februari 1988.
- [7] Wijk, A.J.M., A.A.M. Holtslag and W.C. Turkenburg;
Wind profile stability corrections; their influence on wind energy assessment studies;
EWEC 1984, pp. 96-101, Hamburg, October 1984.
- [8] Wijk, A.J.M. et al;
Development of a diabatic procedure for wind speed extrapolation in a coastal region;
EWEC 1986, pp. 261-265, Rome, October 1986.

88-145/R.24/CAP

bijlage 17-1

Bijlage 17 WEIBULL-WINDSTATISTIEK

In de Methoden II en III wordt gebruik gemaakt van de Weibull-frequentie-verdeling. Met deze verdeling kan de kans van voorkomen van een windsnelheidsklasse berekend worden.

Aangezien we nu over een mathematisch beschreven kansverdeling van de windsnelheid beschikken kan deze voor elk willekeurig snelheidsinterval worden bepaald. Omdat bij een bepaalde windsnelheid de frequentie moet worden vermenigvuldigd met het windturbinevermogen, dient het snelheidsinterval dus op de gegeven vermogenskarakteristiek aan te sluiten. Voor de eenvoud wordt uitgegaan van een 1 m/s interval, een andere mag uiteraard ook gekozen worden.

De Weibull-verdeling wordt vastgelegd door de jaargemiddelde windsnelheid U en de vormfactor k . Beide zijn een functie van de hoogte. De jaargemiddelde windsnelheid U is verder van een aantal andere factoren afhankelijk (zie stappen 1 t/m 16), de vormfactor k is voor een kustlocatie anders dan voor een binnenlandlocatie.

De windsnelheid U_{as} legt de schaalfactor a vast ¹⁾:

$$a_{as} = 1.13 \cdot U_{as}$$

De vormfactor k_{as} wordt berekend met:

$$k_{as} = k_{10} + 0.0084 (H_{as} - 10)$$

waarbij: $k_{10} = 2.0$ voor locaties tussen 0 en 500 m van de kustlijn;

$k_{10} = 1.9$ voor locaties tussen 500 m en 5 km van de kustlijn;

$k_{10} = 1.8$ voor de overige landlocaties.

¹⁾ De schaalfactor a is via een zogenaamde gammafunctie ook nog afhankelijk van de vormfactor k . Dit is weergegeven in de factor 1.13. Deze factor mag voor de in Nederland voorkomende k -waarden constant verondersteld worden (afwijking kleiner dan 1%).

88-145/R.24/CAP

bijlage 17-2

Dit k_{as} -profiel sluit goed aan bij alle bestaande meetreeksen van hoge meteomasten. De klassieke zogenaamde Justus-Mikhail relatie:

$$k_{as}/k_{10} = 1/(1 - 0.09 \ln (H_{as}/10))$$

blijkt niet betrouwbaar te zijn, zie Wieringa [1].

De Weibull-verdeling ziet er als volgt uit:

$$f(U)dU = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{U}{a}\right)^{k-1} \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{U}{a}\right)^k \right\} dU$$

Hierin is $f(U)dU$ de kans van voorkomen van de windsnelheid U .

De kans dat snelheden kleiner dan de windsnelheid U voorkomen wordt gegeven door de waarschijnlijkheids-functie $F(< U)$ die volgt uit integratie van de frequentieverdeling:

$$F(< U) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{U}{a}\right)^k \right\}$$

Het is nu mogelijk om per windsnelheidsklasse uit te rekenen hoeveel % van de tijd deze windsnelheid voorkomt. Uiteraard zijn alleen windsnelheden tussen de in- en uitschakelsnelheid van de turbine (zie stap 19) van belang.

$$F_j = \exp \left\{ - \left(\frac{U_{j-1}}{a}\right)^k \right\} - \exp \left\{ - \left(\frac{U_j}{a}\right)^k \right\}$$

waarin: F_j = de kans van voorkomen van windklasse j is

$$U_{j-1} = \text{ondergrens van klasse } j = U_j - \frac{1}{2}\Delta U_j$$

$$U_j = \text{bovengrens van klasse } j = U_j + \frac{1}{2}\Delta U_j$$

$$\Delta U_j = \text{klassebreedte} = 1 \text{ m/s}$$

Uitgaande van een jaargemiddelde windsnelheid $U_{as} = 6.35 \text{ m/s}$ (dus $a_{as} = 7.18 \text{ m/s}$) en een vormfaktor $k_{as} = 2.17$, zal de kans van voorkomen van windsnelheidsklasse $j=9$ op hoogte H_{as} gelijk zijn aan:

$$F_{j=9} = \exp \left\{ - \left(\frac{8}{7.18}\right)^{2.17} \right\} - \exp \left\{ - \left(\frac{9}{7.18}\right)^{2.17} \right\} = 0.0870$$

88-145/R.24/CAP

bijlage 17-3

Met behulp van de berekende of gegeven U_{as} en k_{as} kan nu een tabel gemaakt worden met de windklassen j tussen U_{ci} en U_{co} (zie stap 19) en de kans van voorkomen van deze klassen.

Literatuur

[1] Wieringa, J.;

Shapes of annual frequency distributions of wind speed observed
on high meteorological masts;

Bound.-Layer Meteor., 47 (1989), pp. 85-110.

88-145/R.24/CAP

bijlage 18-1

Bijlage 18 OPBRENGSTFACTOR VOOR WINDTURBINES

Uit beschouwingen van Smulders [1] en Beurskens [2] volgt dat in principe de jaarlijkse energieproduktie E_{jr} van windturbines bepaald wordt door:

- de grootte van de windturbine,
het door de rotor bestreken oppervlak $A = \pi/4 \cdot D^2$ (A in m^2) is hiervoor de relevante parameter;
- het lokale windaanbod,
uitgedrukt in jaarlijkse gemiddelde windsnelheid op ashoogte U_{as} (U in m/s).

De simpele vuistregel die dit verband weergeeft is:

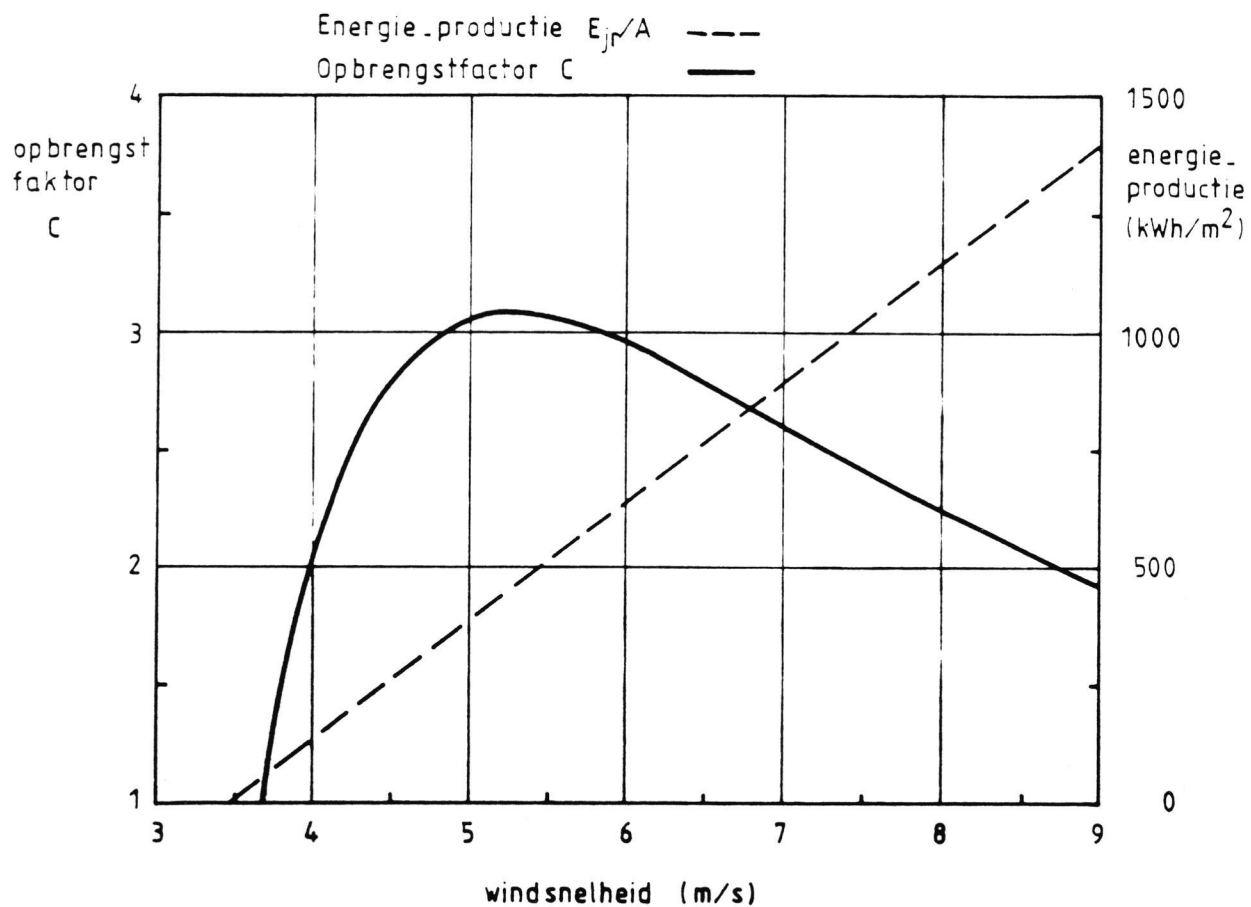
$$E_{jr} = c * U_{as}^3 * A \quad (\text{kWh/jaar})$$

De evenredigheids-constante c in deze vuistregel wordt de opbrengstfactor genoemd.

Ten gevolge van kwaliteitsverbetering van windturbines is de opbrengstfactor c tussen 1982 en 1987 toegenomen van ca. 2 tot ruim 3 [3]. Ten behoeve van berekeningen van de globale opbrengst (methode I) kan over het algemeen een opbrengstfactor $c \approx 3$ worden toegepast.

Dit is geldig voor turbines met een beschikbaarheid van 100%.

Bovenstaande vuistregel is afgeleid voor het Nederlandse windklimaat. Toepassing van $c = 3$ is eigenlijk alleen geldig bij jaargemiddelde windsnelheden van 5 à 6 m/s . Indien de gemiddelde windsnelheid lager of hoger is zal een lagere opbrengstfactor gelden. Illustratief is in dit geval figuur 18.1 waarin voor een willekeurige windturbine de potentiële jaarlijkse energieproduktie E_{jr} en de opbrengstfactor c als functie van de jaargemiddelde windsnelheid U_{as} staat weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat de opbrengstfactor voor een bepaalde gemiddelde windsnelheid maximaal is en dat bij hoge windsnelheden afneemt.



Figuur 18.1 De opbrengsfactor c en de energie-opbrengst per m² rotoroppervlak E_{jr}/A als functie van de jaargemiddelde windsnelheid U_{as} .

88-145/R.24/CAP

bijlage 18-3

Literatuur

- [1] Smulders P.T.;
Energie-opbrengst van windturbinesystemen voor elektriciteits-
produktie en de prijs van de opgewekte energie;
Rapport TU Eindhoven, afdeling Technische Nat., R 521 D,
januari 1982.

- [2] Beurskens H.J.M.;
Opbrengst windmolens;
Duurzame Energie nr. 5, pp. 9-12, juni 1982.

- [3] Borg v.d. N., Curvers. A. en W. Stam;
De energieproduktie van windturbines;
Energie Spectrum, 88-7/8, pp. 172-178, juli/augustus 1988.

Bijlage 19 VERMOGENSKARAKTERISTIEKEN VAN WINDTURBINES

In de tekst van band 1 van dit handboek is verschillende malen een gestileerde vermogenskarakteristiek gebruikt, welke is opgesteld aan de hand van een beperkt aantal gemeten curven van turbines met een rotor-diameter tussen 15 - 25 meter. Deze gestileerde curve bestaat uit een kwadratisch deel en een gedeelte van constant vermogen.

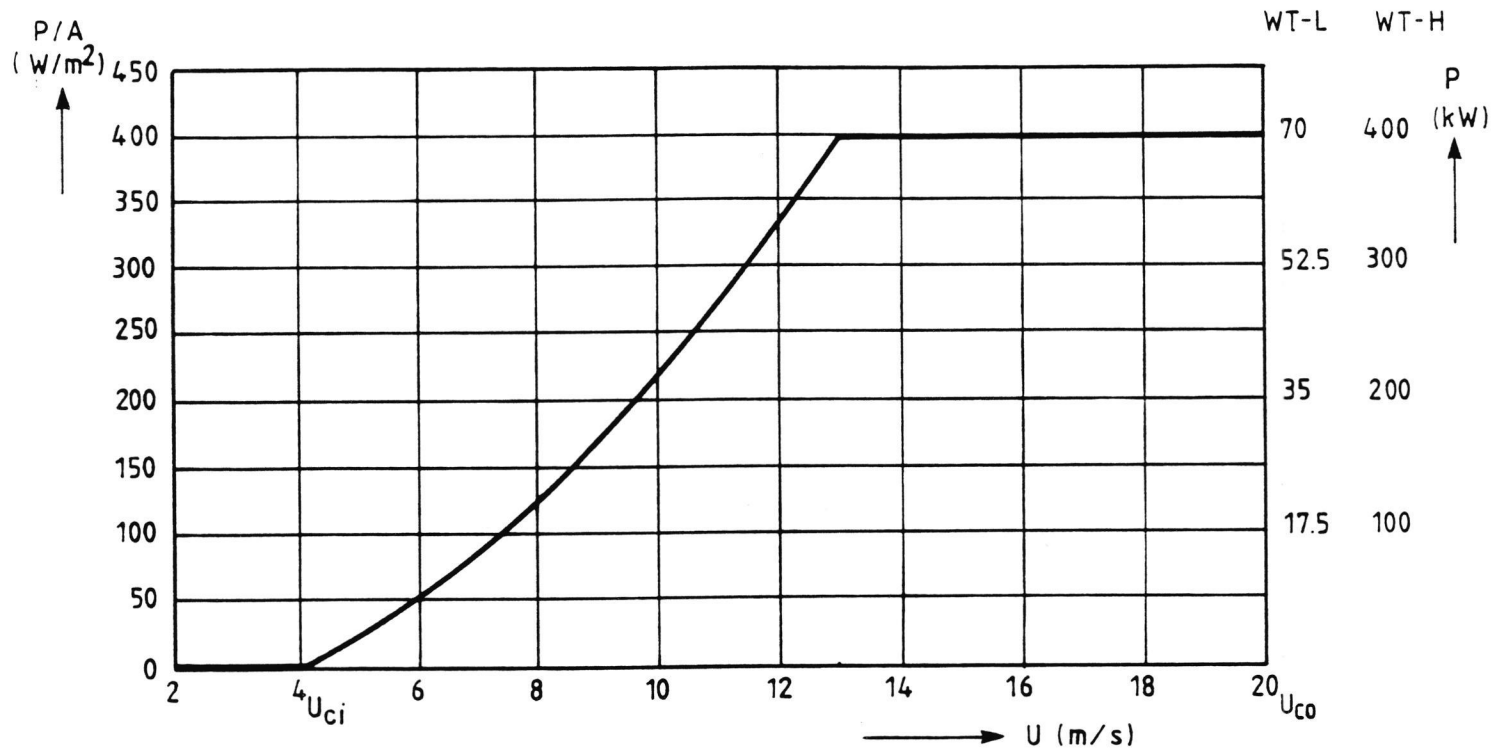
Voor algemene beschouwingen, bijvoorbeeld de gevoeligheidsanalyse; Band 1 hoofdstuk 8, voldoet een dergelijke karakteristiek prima. Voor een opbrengstschatting van een bepaalde turbine op een gegeven locatie is echter de gemeten karakteristiek van de betreffende turbine gewenst.

In onderstaande referentielijst zijn de karakteristieken van de windturbines opgenomen die in het kader van de certificering door ECN zijn gemeten. Ten gevolge van produktverbeteringen en ontwerpveranderingen zullen ook de karakteristieken aan veranderingen onderhevig zijn. Daarnaast zullen van nieuwe typen turbines karakteristieken aan dit lijstje worden toegevoegd. In principe is de benodigde informatie bij fabrikant of ECN op te vragen.

Een voorbeeld van een vermogenskarakteristiek wordt gegeven in figuur 19.1. In deze figuur is langs de verticale as het vermogen per vierkante meter rotoroppervlak gegeven, terwijl normaal gesproken hier het geleverde vermogen P (uitgedrukt in kW) staat. De hier gebruikte presentatie maakt het echter mogelijk om voor windturbines van verschillende grootte het geleverde vermogen per windsnelheidsklasse te bepalen.

Ter illustratie is in figuur 19.1 ook de omzetting in "echte" vermogenskarakteristieken aangegeven voor de windturbines WT-L en WT-H uit de voorbeeldberekeningen van hoofdstuk 10.

De in figuur 19.1 gepresenteerde karakteristiek is geldig voor de meeste gangbare windturbines in Nederland.

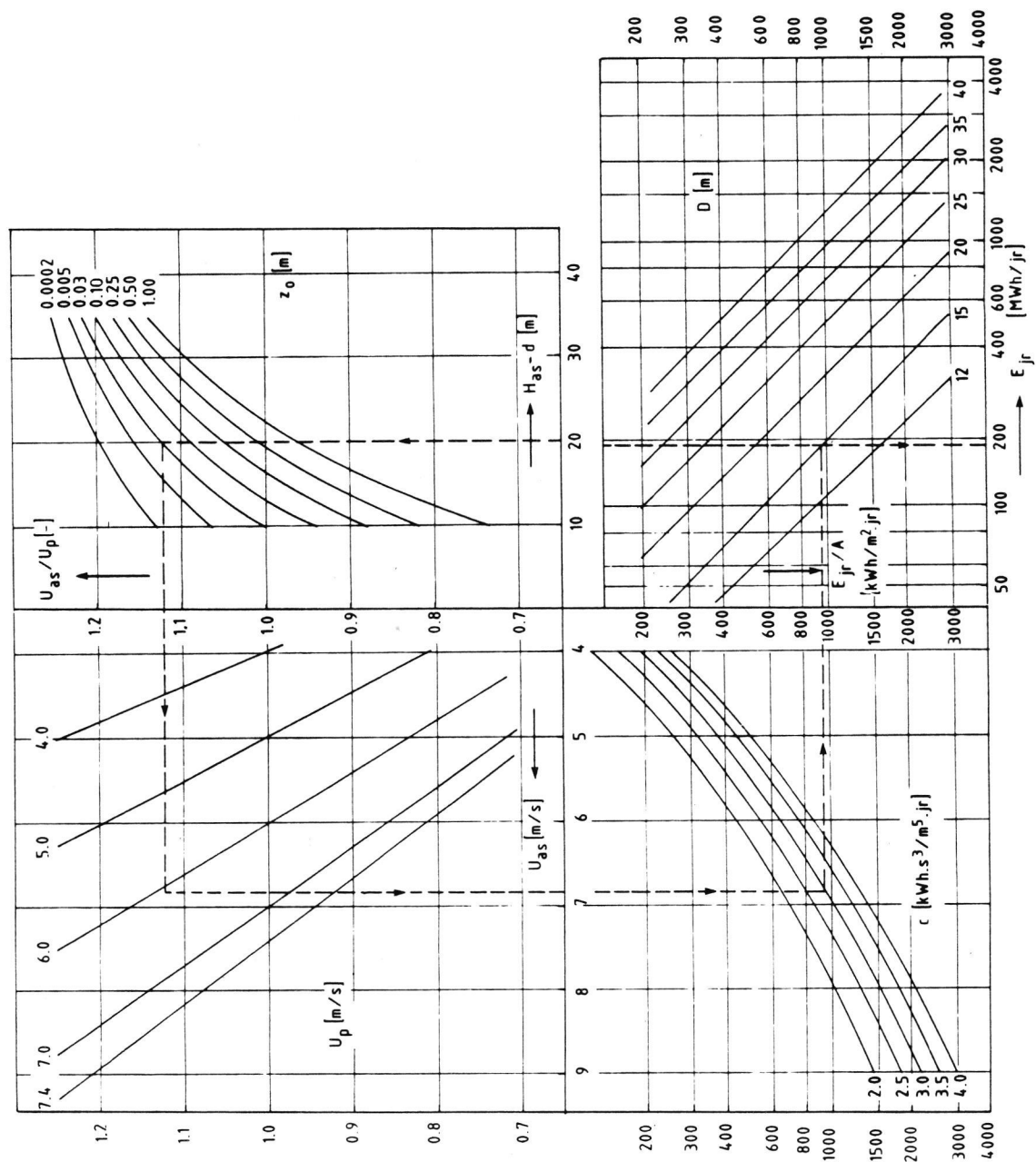


Figuur 19.1 De vermogenskarakteristiek voor de meeste gangbare windturbines in Nederland. Langs de verticale as staat het windturbinevermogen per vierkante meter rotoroppervlak. Langs de rechter verticale as zijn de turbinevermogens (in kW!) van de voorbeeldturbines WT-L en WT-H uit hoofdstuk 10 vermeld.

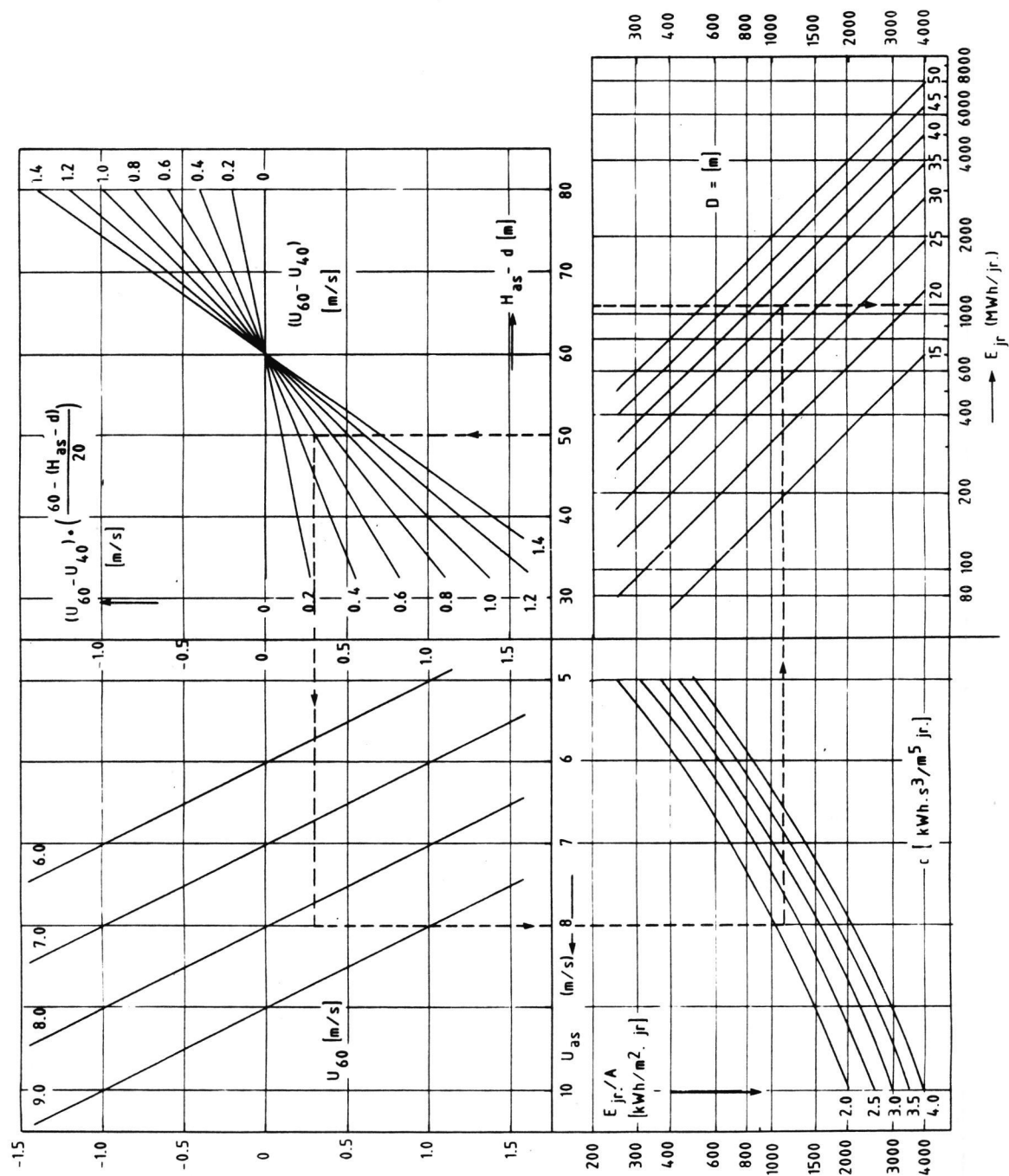
Literatuur

- [1] N.J.C.M. van der Borg, A. Curvers en W.J. Stam;
De energieproductie van windturbines;
Energie Spectrum 88-7/8, pp. 172-176, augustus 1988.
- [2] Bijlage certificaat BKC-87-01;
Lagerwey LW 15/75 windturbine.
- [3] Bijlage certificaat BKC-87-02;
Bouma 20 m/160 kW windturbine.
- [4] N.J.C.M. van der Borg en W.J. Stam;
Opbrengstmetingen aan de Aerotech 23 PI 250 turbine op het ECN-
windturbinetestveld;
Rapport ECN-PB-88-2, Petten, 1988.
- [5] N.J.C.M. van der Borg, en W.J. Stam;
Opbrengstmetingen aan de Aerotech 14 PI 50 Windturbine te Zürich
(Fr);
Rapport ECN-PB-88-3, Petten, 1988.
- [6] N.J.C.M. van der Borg, en W.J. Stam;
Opbrengstmetingen aan vier HMZ-WindMaster 25/300 windturbines op de
locatie te Urk;
Rapport ECN-PB-88-8, Petten, 1988.
- [7] N.J.C.M. van der Borg, en W.J. Stam;
Opbrengstmetingen aan de Aerotech 17 PI 100 turbine op het ECN-
windturbinetestveld;
Rapport ECN-PB-88-14, Petten, 1988.
- [8] Stork FDO-WES Beverwijk;
Results from the NEW ECS-45 measurements program;
Part one - Results, Part two - Tables/Figures;
Rapport Stork-WES-6100-88-03, November 1988.

Bijlage 20 JAARLIJKE ENERGIE-OPBRENGST VOLGENS METHODE I



Figuur 20.1 Bepaling van de jaarlijkse energie-opbrengst voor wind-turbines met een effectieve ashoogte kleiner dan 35 m. De getrokken lijn geeft de voorbeeldsituatie uit paragraaf 10.1 voor WT-L.



Figuur 20.2 Bepaling van de jaarlijkse energie-opbrengst voor wind-turbines met een effectieve ashoogte groter dan 35 m. De getrokken lijn geeft de voorbeeldsituatie uit paragraaf 10.1 voor WT-H.