

NN31545.1353

NOTA 1353

juni 1982

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

POLDERBEMALING, WINDENERGIE

**TUSSENRAPPORTAGE VAN EEN ONDERZOEK NAAR DE
PERSPECTIEVEN VOOR HET GEBRUIK VAN WINDENERGIE
BIJ DE MODERNE POLDERBEMALING**

ir. F.W. Zwietering



Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.
Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

15N 161 378-01

198-411-000

VOORWOORD

Door de Ministeries van Wetenschapsbeleid en Landbouw en Visserij is in 1981 besloten om gezamenlijk gelden ter beschikking te stellen voor onderzoek naar mogelijkheden voor energiebesparing in de landbouw.

Binnen dit kader valt het onderzoek naar de perspectieven voor het gebruik van windenergie bij de moderne polderbemaling.

Dit verslag is bedoeld als een tussenrapportage van dit onderzoek.

Hierin zullen achtereenvolgens besproken worden:

- de gekozen opzet van het onderzoek;
- de verzamelde kennis, nodig voor de oplossing van het probleem;
- het model waarmee gerekend zal worden;
- de proefpolder, die gekozen is om de uitkomsten van het rekenmodel te toetsen.

I N H O U D

	Blz.
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
2. OPZET VAN HET ONDERZOEK	2
3. EIGENSCHAPPEN VAN WINDMOLENS	6
3.1. Algemeen	6
3.2. Energie in de wind	8
3.3. Aerodynamisch rendement	9
3.4. Mechanisch en elektrisch rendement	11
3.5. Aandrijving en werktuig	11
3.6. Molenkarakteristiek	15
4. WIND	23
4.1. Algemeen	23
4.2. Windsnelheid op verschillende plaatsen	23
4.3. Wind en tijd	28
4.4. Gebruikte windcijfers	32
5. COMPUTERMODEL	32
6. PROEFPOLDER	36
7. TOEPASSING RESULTATEN	38
8. SAMENVATTING	39
LITERATUUR	40
BIJLAGEN	

1. INLEIDING

In Nederland valt in het winterhalfjaar meer neerslag dan er verdamping optreedt. Om peiloverschrijdingen in het open water te voorkomen moet het neerslagoverschot worden afgevoerd. Veel gebieden kunnen hun overtollig water niet vrij lozen op oppervlaktewater met een lager peil en hebben ook onvoldoende afvoer via het grondwater. In deze gevallen zal de afvoer kunstmatig moeten geschieden door bemaling.

De neerslag valt in een grillig patroon. Verdamping gebeurt geleidelijker. Afhankelijk van de bodem en andere gebiedskenmerken veroorzaakt vooral de neerslag een fluctuatie in de grondwaterstand en in het peil van het oppervlaktewater. Afhankelijk van het grondgebruik worden eisen gesteld ten aanzien van deze fluctuaties. Door middel van technische installaties zoals een gemaal, kan de afvoer, en daarmee de fluctuatie in open-water peilen worden beïnvloed.

Twee kenmerken van het neerslagpatroon bepalen de bemaling: de totale jaarlijks af te voeren hoeveelheid water, en de variatie van de af te voeren hoeveelheid gedurende het jaar. In een gegeven gebied, en bij gegeven eisen aan de peilfluctuatie, bepaalt de variatie de grootte van het gemaal; de totale hoeveelheid bepaalt dan het aantal uren dat gemalen wordt.

De variatie in de uitgemalen hoeveelheden per dag is groot: de gemiddeld per winterhalfjaar eenmaal voorkomende grootste piek is ongeveer zeven maal zo groot als de gemiddelde afvoerbehoefte in die periode. In de gehele periode wordt zodoende slechts ongeveer 20% van de tijd gemalen.

Voor bemaling worden op dit moment als energiebron bijna uitsluitend olie en elektriciteit gebruikt. Deze energiebronnen zijn steeds direct inzetbaar, zodat via bemaling een continue peilregeling mogelijk is. Het gebruik van fossiele energie is recht evenredig met het aantal uren malen. De prijs van fossiele energie is de laatste jaren sterk gestegen.

In 1981 waren de energiekosten, nodig voor de bemaling in heel Nederland, ongeveer 20 miljoen gulden (bijlage 1).

Vanwege de gestegen energieprijzen kan de aanwending van andere energiebronnen (weer) aantrekkelijk worden. Het is dan ook alleszins de moeite waard om de mogelijkheden voor het gebruik van windenergie nader te onderzoeken.

In tegenstelling tot fossiele energie, is windenergie niet altijd voorhanden. Dit brengt consequenties met zich mee als deze energie gebruikt wordt voor polderbemaling. Op momenten dat er gemalen moet worden kan er namelijk onvoldoende wind zijn.

In de winter waait het in de kustprovincies ongeveer de helft van de tijd hard genoeg om een windmolen te laten draaien.

Bij de thans geldende hoge eisen aan het polderpeil zal altijd bemaling met olie of elektriciteit mogelijk moeten blijven, tenzij men toegeeft aan de eisen die aan de handhaving van het peil worden gesteld. Het is ook denkbaar dat voor toepassing van windenergie veranderingen in de polderinrichting nodig zijn. Het betreft dan de inrichting, voorzover die de opslag van water beïnvloedt (bijvoorbeeld vergroting van de open-waterberging door aanleg van een bergboezem).

Door de aanwending van windenergie zal vaker gemalen worden, met een kleinere capaciteit. Het peil zal hierdoor wel meer fluctueren, maar dit zal geleidelijker gebeuren. Door de bemaling ten dele uit te voeren met behulp van windenergie zal bespaard worden op de gebruikte hoeveelheid olie of elektriciteit. Hoe groot deze besparing is, hangt mede af van de noodzaak van het al of niet investeren in conventionele bemaling.

2. OPZET VAN HET ONDERZOEK

Enige tijd nadat de neerslag optreedt komt met een zekere vertraging de afvoer van water naar het oppervlaktewater op gang. Deze vertraging is afhankelijk van de hydrologische opbouw van het gebied. Naarmate de oppervlakte van het open water in het gebied kleiner is, heeft de afvoer een grotere peilverhoging tot gevolg. Om te voorkomen dat het peil te hoog wordt, wordt bij een vooraf gekozen peil, het zogenaamde aanslagpeil, het gemaal in werking gesteld. De bemaling

gaat dan door totdat een vooraf vastgesteld, lager peil, het zogenaamde afslagpeil bereikt is. Om het gemaal niet meerdere keren kort achtereen in werking te hoeven stellen wordt dit laatste peil vaak een stuk onder het aanslagpeil gekozen.

Bij windbemaling doet zich het probleem voor dat niet op elk gewenst tijdstip gemalen kan worden, omdat dit afhangt van het feit of de heersende windsnelheid voldoende groot is. Een bijkomend verschijnsel is dat de bemalingscapaciteit van een windmolen mede afhangt van de terreinomstandigheden. De wind die in een gebied waait zal afhankelijk zijn van de terreinruwheid (bijvoorbeeld verspreide bomen) afgeremd kunnen worden. Een molen zal dan met zijn wieken slechts een deel van de energie kunnen opvangen. Door de molen hoger te plaatsen zal de invloed van de afremming kleiner zijn. De bemalingscapaciteit zal dus mede van de hoogte van de molen afhankelijk zijn.

Een windmolen zal men niet altijd kunnen laten werken als er maar voldoende wind is. Om diverse redenen (klink; funderingen; veedrenking; bluswater) mag het peil van het oppervlaktewater niet te laag worden. Zodoende zal bij het gebruik van een windmolen gekozen moeten worden voor een minimumpeil. Is dit peil eenmaal bereikt, dan zal de windmolen buiten werking gesteld moeten worden.

Bij toepassing van windbemaling moet dus een aantal factoren in de beschouwing worden betrokken die van geen of weinig belang zijn bij een conventionele bemaling.

Om de verschillen tussen conventionele bemaling en windbemaling aan te geven is in figuur 1 een schematisch overzicht van de probleemstelling bij een conventionele bemaling aangegeven. We hebben hier te maken met een neerslag die door de gebiedskenmerken

- hydrologische reactiefactor α
- aandeel open water R

zorgt voor een afvoer. Door vooraf eisen te stellen aan het peilverloop wordt gekozen voor een bepaalde gemaalcapaciteit. Door de capaciteit van het gemaal bij bepaalde opvoerhoogte (de Q-H relatie) te variëren verandert niet alleen het te verwachten peilverloop doch tevens het aantal maaluren.

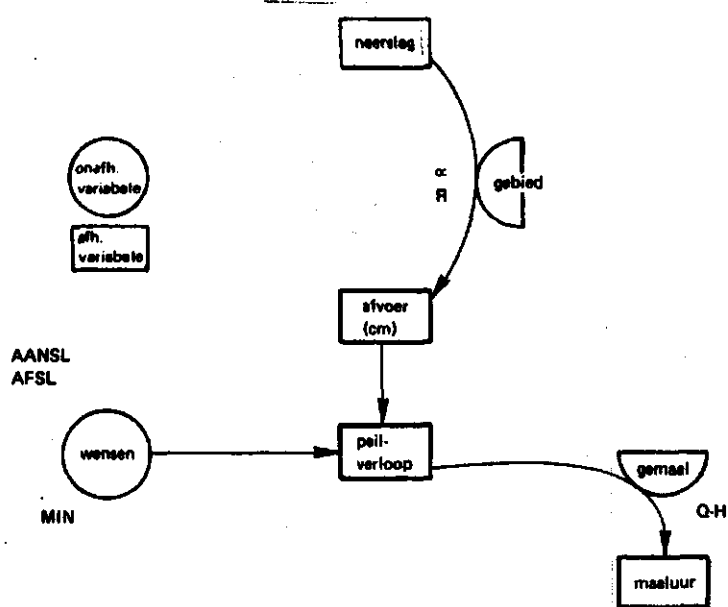


Fig. 1. Neerslag-afvoer-model,
conventionele bemaling

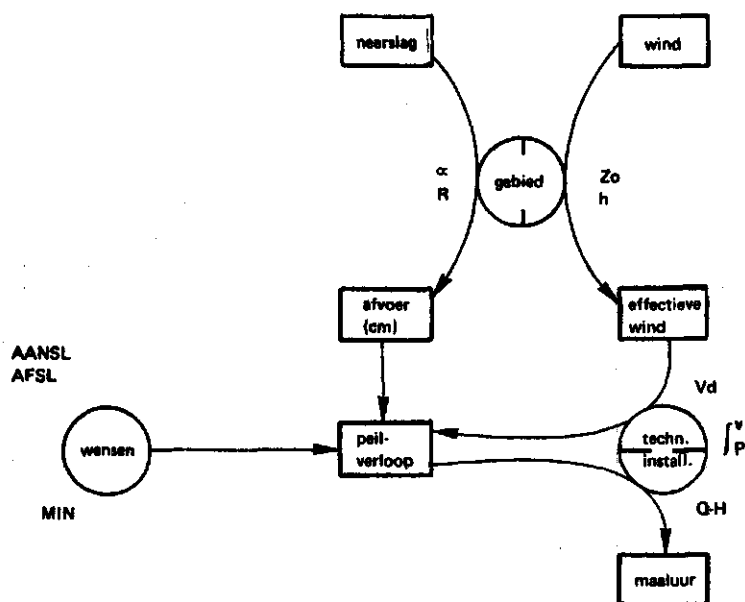


Fig. 2. De factoren die een rol
spelen bij een bemaling, die
ten dele gebeurt met behulp
van windenergie

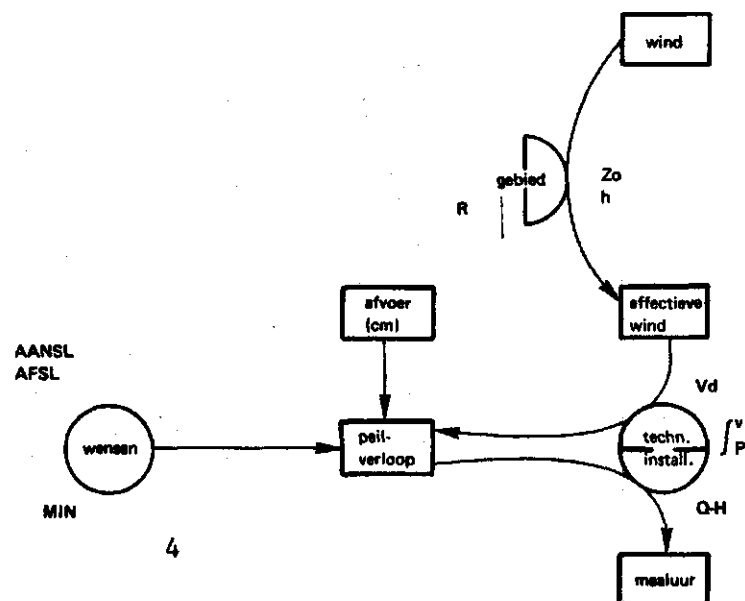


Fig. 3. Het huidige onderzoek

In figuur 2 is hetzelfde probleem weergegeven maar nu voor windbemaling. Als wederom het peilverloop in de polder centraal wordt gesteld, dan wordt dit nu door een groter aantal variabelen beïnvloed. Naast de neerslag moet nu de wind in de beschouwing worden opgenomen. Bij de gebiedskenmerken verschijnen twee nieuwe variabelen:

- de terreinruwheid Z_0
- de molenhoogte h

Deze factoren bepalen in feite de voor de windmolen effectieve wind. Wat betreft de bemaling komt er nu een probleem bij, omdat het bemalingsvermogen afhangt van

- de windsnelheid;
- het vermogen van de molen bij de diverse windsnelheden.

De vorm van dit vermogensverloop van de molen is te karakteriseren met de variabele v_d . Er kan een kleinere of grotere molen met een bepaald vermogensverloop gebruikt worden, of één of meerdere molens met eenzelfde verloop. Het totaal geïnstalleerd vermogen kan in al deze gevallen worden uitgedrukt als de integraal van het vermogen over de windsnelheid $\int P$. Zoals boven vermeld zal bij windbemaling veel langer gemalen worden, maar mag het peil niet onder een minimum dalen. In het op te stellen rekenschema moet dus naast een aanslag- en een afschlagpeil nog een minimumpeil worden toegevoegd.

Figuur 3 geeft tenslotte weer hoe het huidig onderzoek is opgezet. Allereerst is op grond van literatuuronderzoek nagegaan hoe variabelen als terreinruwheid en molenhoogte omgezet kunnen worden om te komen tot voor energie-opwekking effectieve wind. Vervolgens werden de problemen die samenhangen met de keus van de technische installatie onderzocht om tot een uitspraak te komen welk deel van de energie, aanwezig in de wind, door de molen wordt doorgegeven om mee te bemalen. Om tenslotte het aandeel van de windbemaling in de totale bemaling te kunnen bepalen is uitgegaan van het afvoerproces en de optredende windsnelheid van een daartoe geselecteerde proefpolder.

Als afvoer is voorlopig de werkelijk opgetreden afvoer gekozen

in plaats van neerslag, die getransformeerd is met behulp van een neerslag-afvoer model. Daarbij is aangenomen dat de in werkelijkheid gerealiseerde peilen voldeden aan de daaraan gestelde eisen. Omdat voor dit deel van het onderzoek een groot aantal afvoer- en windgegevens moest worden verwerkt is het gehele probleem in een computer-model omgezet. Dit model is zodanig opgezet dat voor al de bovengenoemde factoren een waarde kan worden gekozen, waarna het verloop van de gehele bemaling kan worden berekend. Met het model is mogelijk om voor elke polder waarvan maalcijfers beschikbaar zijn het deel van de bemaling te berekenen dat voor windenergie kan worden gerealiseerd. Het kan echter ook gebruikt worden om de consequenties van bijvoorbeeld een bepaald windmolenvermogen op het peil in de polder vast te stellen.

3. EIGENSCHAPPEN VAN WINDMOLENS

3.1. A l g e m e e n

Een windmolen kan dienen om energie, aanwezig in de wind, om te zetten in een andere vorm, zoals elektrische of mechanische energie. Om te weten wat van een windmolen onder diverse omstandigheden verwacht mag worden, moeten zijn eigenschappen bekend zijn.

De werking van een windmolen kan beschreven worden door hem opgebouwd te denken uit een aandrijving, een overbrenging en een werktuig. De aandrijving bestaat uit één of meer wieken aan een horizontale of verticale as. De overbrenging kan mechanisch of elektrisch gebeuren. In het laatste geval zit achter de wieken een elektrogenerator. Het werktuig kan een maalsteen, een zaag of een opvoerwerktuig zijn.

Een overbrenging die (ten dele) elektrisch is, kan voordelen hebben wat betreft bestuurbaarheid van de molen en vanwege mogelijkheden om overtollig opgewekte energie aan het net terug te leveren. Bovendien kan in dit geval op eenvoudige wijze samen met een andere aandrijving eenzelfde werktuig bediend worden. Vaak is de elektrische stroom einddoel van de molen. In dat geval ontbreekt dus het

werktuig.

Voorbeelden van windmolens staan in figuur 4. De vermogens van de meeste molens liggen in de ordegrrootte van 1 tot 100 kW (ter vergelijking: een midden-klasse auto heeft een vermogen van 40 kW).

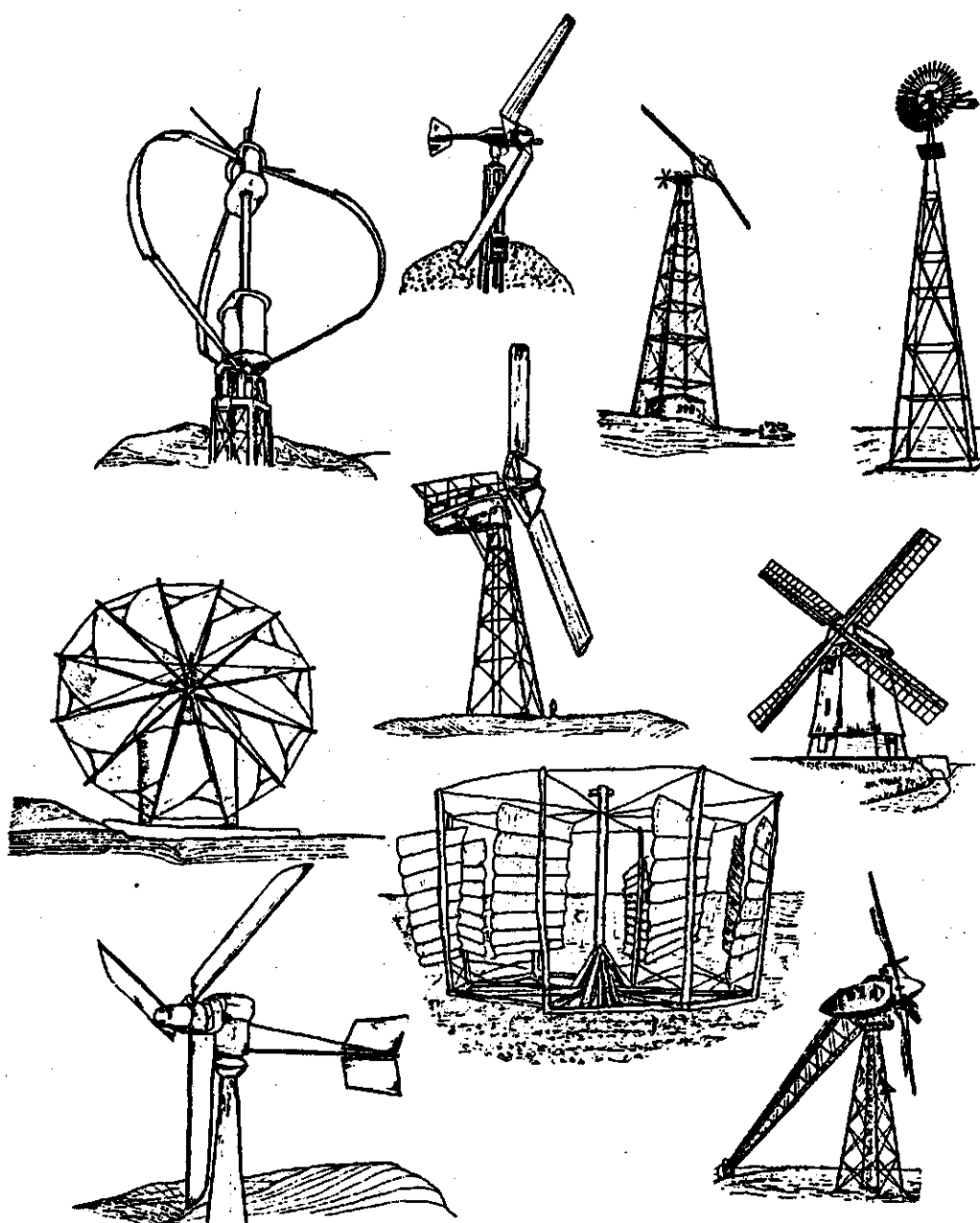


Fig. 4. Voorbeelden van windmolens (WESTRA en TOSSIJN, 1980)

De energie-omzetting door een windmolen is niet volledig. De wieken kunnen niet alle energie uit de wind opnemen. Er treden wrijvingsverliezen op en het aandrijf- en opvoerwerktuig zijn niet bij ieder toerental ideaal op elkaar afgestemd.

De werking van de windmolen wordt hier beschreven bij verschillende wieksnelheden en verschillende windsnelheden. Daartoe wordt een snellopendheid λ gedefinieerd als hoeksnelheid van de top van de wieken gedeeld door de gemiddelde windsnelheid. De diverse rendementen kunnen dan uitgedrukt worden als functie van λ .

Behalve door de keuze van een zo gunstig mogelijke waarde voor λ wordt de werking van de molen verder vastgelegd door de keuze van een ontwerp-windsnelheid v_d . Deze laatste kan afhankelijk van het windregime zodanig gekozen worden, dat een zo groot mogelijke jaaropbrengst bij het desbetreffende windregime wordt behaald. De v_d kan ook zodanig worden gekozen dat niet alleen een hoge opbrengst wordt behaald, maar dat deze opbrengst ook regelmatig gespreid is over de tijd.

Door de keuze van v_d ligt het hele vermogensverloop van de windmolen bij variërende windsnelheid vast. Dit verband heet de molenkarakteristiek.

3.2. E n e r g i e i n d e w i n d

Wind kan worden beschouwd als in beweging zijnde massa lucht. Deze draagt dus een bepaalde hoeveelheid kinetische energie in zich, die kan worden voorgesteld door:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

E = kinetische energie (J)

m = massa van de lucht (kg)

v = snelheid van de lucht (m/s)

Per tijdseenheid, en voor een doorstroemd oppervlak A , loodrecht op de richting van de wind, geldt:

$$m = \rho A v \quad (2)$$

waarin ρ = soortelijke massa van de lucht (kg/m^3)

A = doorstroemd oppervlak (m^2)

Dus is

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

waarin: P = vermogen van de wind (J/s)

De energieleverantie is dus evenredig met de derde macht van de windsnelheid (fig. 5, blz. 10).

3.3. A e r o d y n a m i s c h r e n d e m e n t

Het vermogen dat door een wiekenstel uit de wind opgenomen wordt, is evenredig met het verschil in kinetische energie voor en achter de molen; het zou dus gunstig zijn indien de snelheid achter de molen, u , zo laag mogelijk zou zijn.

Het vermogen is echter ook groter naarmate meer lucht de molen passeert, dus naarmate zowel de luchtsnelheid voor de molen, v , als de u groot zijn.

Door deze beide effecten is er een maximumwaarde voor het aerodynamisch rendement, gelijk aan $16/27 \approx 0,59$, dat bereikt wordt bij $u = \frac{1}{3}v$. De snelheidsvermindering door de molen is dan dus $\frac{2}{3}v$ (Beurskens e.a. 1974) (fig. 6).

Dit rendement wordt ook door eigenschappen van de molen beïnvloed. Bij een kleinere snellopendheid, en dus een kleinere hoeksnelheid bij eenzelfde windsnelheid, moet er achter de molen een groot zog ontstaan om toch dezelfde energie te leveren. Deze energieleverantie is namelijk gelijk aan het product van hoeksnelheid en moment dat op de molen werkt.

Dit moment is een gevolg van de snelheidsverandering van de lucht door de wiek. Dit zog wordt achter het wiekenstel opgewekt met een draaiing, tegengesteld aan die van de wieken. Omdat dit bewegende lucht is, betekent dit ronddraaiende zog een verlies van energie. Bij kleinere snellopendheid zal dit zog-effect groter zijn (Jansen en Smulders, 1977) (fig. 7).

Afhankelijk van de hoek van de wiek ten opzichte van de windrichting, ondervindt de wiek een zekere voortstuwing, maar ook een weerstand tegen zijn beweging door de lucht. Bij grotere snellopendheid

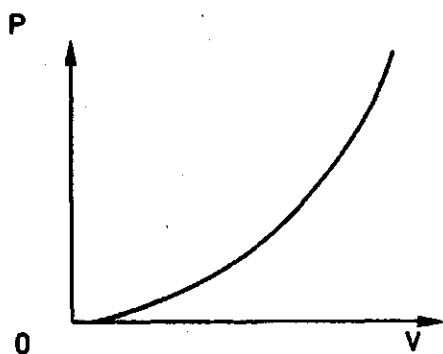


Fig. 5. Het vermogen van de wind gaat met de derde macht van de windsnelheid

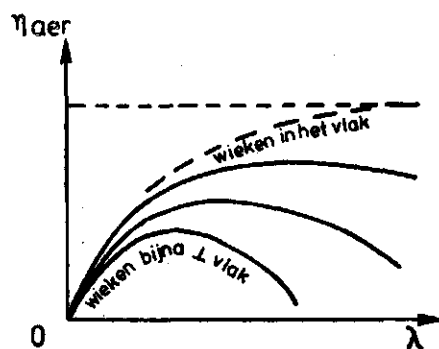


Fig. 8. De stand van de wieken ten opzichte van het vlak waarin ze draaien, bepaalt de weerstand tegen hun gang door de lucht

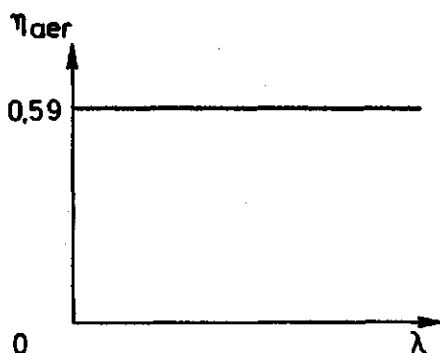


Fig. 6. Doordat achter de molen de windsnelheid niet nul is, kan slechts een bepaalde maximum energie uit de wind worden gehaald

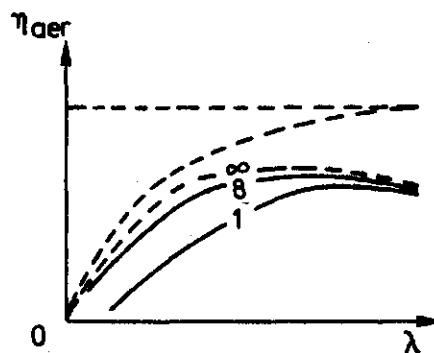


Fig. 9. Ook door een klein aantal wieken treden aerodynamische verliezen op

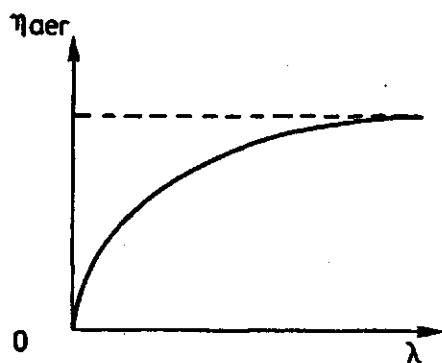


Fig. 7. Bij kleine λ treedt achter de wieken veel zog op

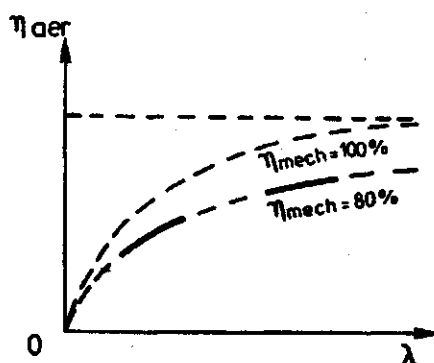


Fig. 10. Iedere molen heeft een mech. en of elektr. rendement. Twee exemplaren, werkend bij een verschillend λ -traject

wordt de windrichting, vanuit de wiek gezien, anders: het lijkt alsof de wind meer vanuit een richting tegengesteld aan de beweging van de wiek komt. Het effect van een variërende wiekstand kan experimenteel worden vastgesteld. Het resultaat heeft dan de vorm van figuur 8.

Het aantal wieken zal ook invloed hebben op het aerodynamisch rendement: hoe groter het aantal wieken, desto minder zal de langsstrijkende luchtstroom verstoord worden (fig. 9).

3.4. Mechanisch en elektrisch rendement

Alle overbrengingen zullen een zeker mechanisch rendement hebben. Het totale mechanisch rendement van moderne windmolens ligt in de buurt van 95%.

Is een van de onderdelen van de windmolen een elektrogenerator, dan zal het rendement hiervan ongeveer 90% bedragen. Zie figuur 10 en 11.

3.5. Aandrijving en werktuig

Aandrijving en werktuig zijn niet bij iedere hoeksnelheid van hun verbindingsas ideaal op elkaar afgestemd. Dit veroorzaakt een extra verlies aan energie.

De werking van zowel een aandrijving als een werktuig worden uitgedrukt in een moment-toerental kromme. In plaats van toerental (aantal omwentelingen per seconde) wordt hier verder de hoeksnelheid (aantal radialen per seconde) gebruikt. Bij de aandrijving gaat het dan om een aangeboden moment M_a , bij het werktuig om een gevraagd moment, M_v .

Het moment van het koppel, dat bij een zekere windsnelheid v door het wiekenstel geleverd wordt, varieert met de hoeksnelheid ω van de wieken. Bij $\omega = 0$ 'willen' de wieken al gaan draaien (fig. 12).

Om bijvoorbeeld een zuigerpomp te laten werken is een zeker moment nodig. Het volume van het verplaatste water en de lengte van de zuigerstang zijn bij ieder toerental even groot. Een zuigerpomp

vraagt dus een bepaald moment dat onafhankelijk is van de hoeksnelheid (fig. 13). Het gevraagd moment van andere werktuigen varieert meestal wel met de hoeksnelheid.

Zijn aandrijving en werktuig aan elkaar gekoppeld, dan zijn hun hoeksnelheden aan elkaar gelijk. Bij het op gang komen van het geheel is M_a groter dan M_v . De hoeksnelheid zal nu toenemen totdat $M_a = M_v$ (fig. 14).

Een machine, waarvoor dit stadium nooit bereikt kan worden, gaat steeds sneller draaien, totdat er iets mis gaat. Indien M_a voor de kleinste waarden van ω kleiner is dan M_v , dan moet het geheel op gang gebracht worden door iets van buiten de machine.

Bij een grotere windsnelheid v zal de lijn van M_a in figuur 12 zich verplaatsen, en daarmee ook het snijpunt S van deze lijn met de lijn voor het gevraagd moment (fig. 15).

Het totaal doorgegeven vermogen is $P = M \cdot \omega$. Het meest gunstig is het dus als S zodanig verplaatst wordt dat het product $M \cdot \omega$ zo groot mogelijk wordt (fig. 16). In het bijzondere geval dat de punten S zodanig liggen dat een lijn erdoor kwadratisch verloopt met de hoeksnelheid ω , verloopt het vermogen met de derde macht van ω . Bij een constante λ volgt hieruit ook een vermogensverloop met de derde macht van v .

Omdat het door de wind aangeboden vermogen ook verandert met de derde macht van de windsnelheid, is alleen in bovenstaand geval over een groot traject van windsnelheden een overlap mogelijk tussen het door de wind aangeboden, en het door de molen doorgegeven vermogen.

Gegeven een bepaalde windsnelheid is het mogelijk om aandrijving en werktuig zodanig te kiezen dat $M \cdot \omega$ maximaal is voor die ene windsnelheid (zie fig. 16). De vorm van de curve van M_a ligt door aerodynamische en mechanische rendementen, bij een bepaalde λ , vast. Indien de curve van M_v niet zodanig is dat de snijpunten van M_a en M_v kwadratisch verlopen met ω , dan levert de windmolen niet bij iedere windsnelheid het totaal in de wind aanwezige vermogen, vermindert met aerodynamische en mechanische verliezen. Dit wordt uitgedrukt in een aanpassings-rendement η_a .

Bij een elektrogenerator is door de constructie het verloop van

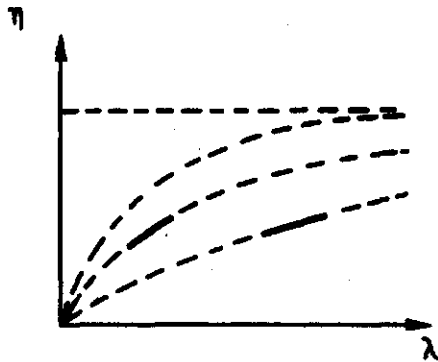


Fig. 11. Twee molens met eenzelfde rendement, dat echter verschillend is samengesteld

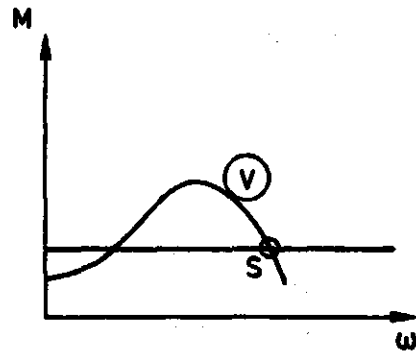


Fig. 14. Zijn aandrijving en werktuig aan elkaar gekoppeld, dan worden uiteindelijk niet alleen de hoeksnelheden, maar ook de momenten aan elkaar gelijk

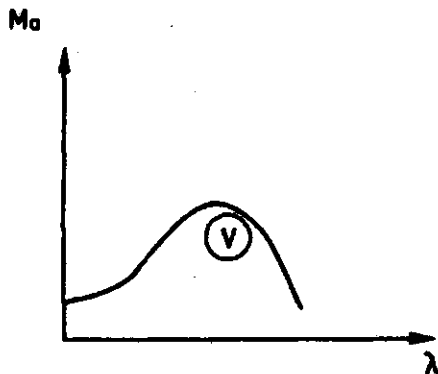


Fig. 12. Het door een wiekenstel aangeboden koppel M_a , bij een bep. windsnelheid v

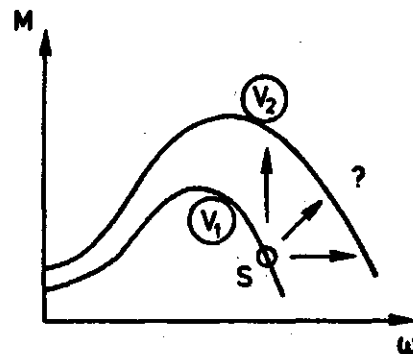


Fig. 15. Bij toenemende v zal de lijn van M_a zich verplaatsen; hoe S verschuift hangt dan af van de vorm van de lijn van M_v

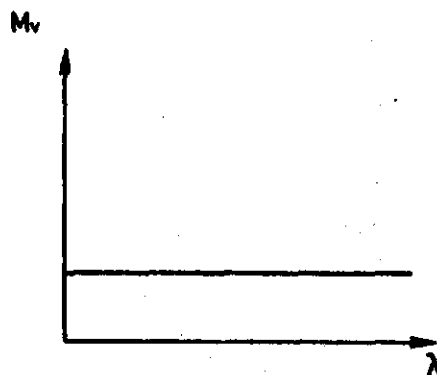


Fig. 13. Om een zuigerpomp te doen werken wordt een moment M_v gevraagd

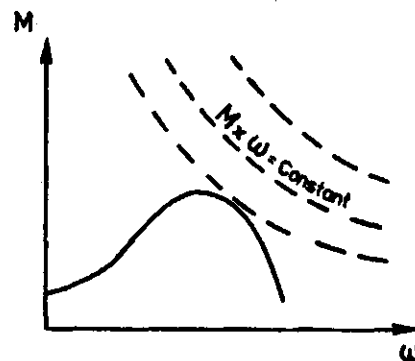


Fig. 16. Het door de molen doorgegeven vermogen is gelijk aan het produkt van M en ω

Mv met ω te beïnvloeden: een kwadratisch verloop is dan redelijk te benaderen.

De η_a van een elektrogenerator en een zuigerpomp zullen een verloop hebben zoals aangegeven in figuur 17. Hierin is v_d de gekozen windsnelheid, waarvoor $M \cdot \omega$ gelijk aan 100% wordt gemaakt door de keuze van ω .

In het bovenstaande werd er steeds van uitgegaan dat de hoeksnelheden van aandrijving en werktuig aan elkaar gelijk waren. Door middel van een tandwielkast kan er een vaste verhouding worden aangebracht tussen deze twee hoeksnelheden.

Hierdoor verandert er niets aan bovenstaande uiteenzetting.

Door introductie van een variabele verhouding tussen de hoeksnelheid van de wijk, ω_{wijk} en die van het werktuig ω_{werkt} kan over een groter traject van ω_{wijk} -waarden geprofiteerd worden van een gunstige η_a (fig. 18).

Ook door de wijkstand variabel te maken, is de η_a te verhogen (fig. 19). De lijn van M_a tegen ω wordt hierdoor gunstiger gelegd.

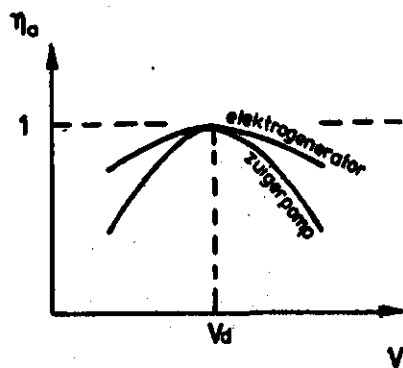


Fig. 17. Het rendement η_a , dat aangeeft in welke mate aandrijving en werktuig op elkaar aangepast zijn

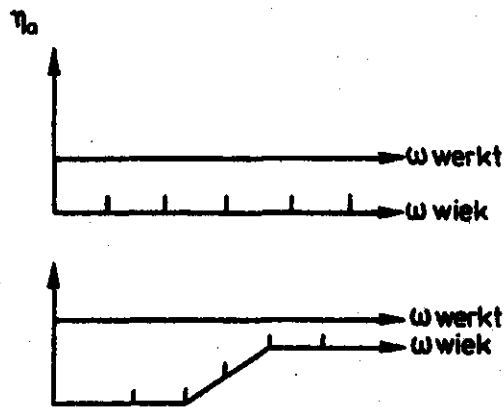


Fig. 18. De overbrenging van ω -wiel naar ω -werktuig kan variabel zijn

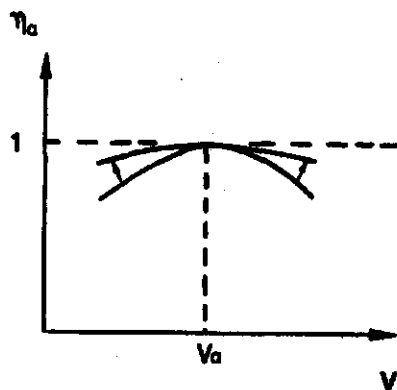


Fig. 19. Door de wiekstand variabel te maken kan de aanpassing verbeterd worden

3.6. M o l e n k a r a k t e r i s t i e k

3.6.1. Ontwerp-windsnelheid

Door de diverse verliesposten zal een molen niet het totaal in de wind aanwezige vermogen kunnen opnemen.

Wat betreft het rendement ten gevolge van de aanpassing van aandrijving op werktuig, η_a , kan een windsnelheid v_d gekozen worden, waarvoor $\eta_a = 100\%$ (§ 3.5). Deze windsnelheid heet de ontwerp-windsnelheid v_d (design).

Het werkelijk vermogensverloop bij variërende v is bij veel molens experimenteel bepaald en blijkt meestal ongeveer een rechte lijn te zijn (fig. 20).

In het volgende zal de vermogenskromme van een windmolen bij het hele traject van mogelijke windsnelheden, de zogenaamde molenkarakteristiek, behandeld worden. Hierbij wordt uitgegaan van een v_d , en een rechtlijnig verloop van het vermogen met de windsnelheid.

3.6.2. Start-windsnelheid

Uitgaande van een eenmaal gekozen v_d kan de windsnelheid, waarbij de molen begint te werken, berekend worden. Deze snelheid wordt hier aangeduid met v_c (cut in). De berekening loopt als volgt:

de derde machts kromme van het windvermogen is: $P = a v^3$ met $a = \text{constante}$.

de richtingscoëfficiënt van een raaklijn aan deze kromme is: $3a v^2$.

de richtingscoëfficiënt van een lijn, rakend bij $v = v_d$ is dan $3a v_d^2$.

en de functie van deze raaklijn is $f = 3a v_d^2 v + c$ met $c = \text{constante}$.

voor $v = v_d$ geldt dan

$$f = a v_d^3$$

dus $3a v_d^3 + c = a v_d^3$ ofwel

$$c = -2a v_d^3$$

voor $v = v_c$ geldt dan

$$f = 3a v_d^2 v_c - 2a v_d^3 = 0$$

waaruit volgt $3 v_d^2 v_c = 2 v_d^3$ ofwel $v_c = \frac{2}{3} v_d$

De start-windsnelheid is dus gelijk aan $\frac{2}{3}$ maal de ontwerpsnelheid.

Zie fig. 21.

3.6.3. Maximaal vermogen

Wil de molen ook grotere vermogens, bij hoge windsnelheden, kunnen verwerken, dan moet hij bestaan uit zwaardere onderdelen, en deze moeten sneller kunnen draaien. Dit stelt eisen aan de constructie van de diverse onderdelen.

De hogere windsnelheden komen echter ook minder vaak voor. Hun aandeel in de totale jaarlijkse energie-opbrengst zal dus ook dalen bij toenemende windsnelheid. Er moet daarom worden gekozen voor een bepaalde windsnelheid v_r (rated), waarboven het opgewekte vermogen constant wordt gehouden.

Door de waarden van het molenvermogen bij iedere windsnelheid te vermenigvuldigen met de jaarlijkse frequentie van die windsnelheid ontstaat de jaarlijkse energie-opbrengst 'van' die windsnelheid. In par. 4.3 zal de jaarlijkse frequentieverdeling behandeld worden. Deze kan beschreven worden met een zogenaamde Weibull-verdeling (zie paragraaf 4.3). De jaarlijkse opbrengst is nu uit te drukken in de relatieve opbrengst e (Lysen, 1981):

$$e = \frac{T \cdot \int_0^{\infty} P(v) \cdot f(v) \cdot dv}{(\eta_{\text{totaal}})_{\text{max}} \cdot \frac{1}{2} \rho A \bar{v}^3 \cdot T} \quad (4)$$

waarin e = relatieve energie-opbrengst	(-)
T = tijd	(uur)
P = vermogen	(J/s)
v = windsnelheid	(m/s)
f = frequentie	(-)
η = rendement	(-)
ρ = soortelijke massa van de lucht	(kg/m ³)
A = oppervlak van het wiekenstel	(m ²)
$\bar{v}$ = gemiddeld jaarlijkse windsnelheid	(m/s)

Deze e is dus gecorrigeerd voor de jaaropbrengst in het geval dat voortdurend de gemiddelde windsnelheid zou zijn opgetreden. Verder is deze gecorrigeerd voor het rendement van de molen bij v_d .

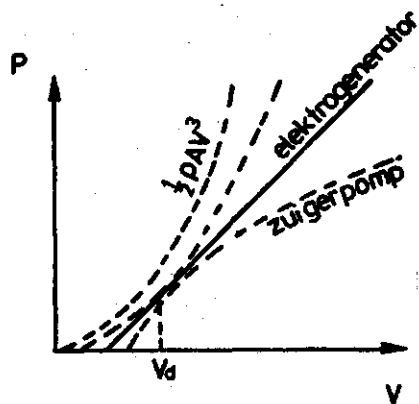


Fig. 20. Het vermogensverloop bij een elektrogenerator en een zuigerpomp als werktuig

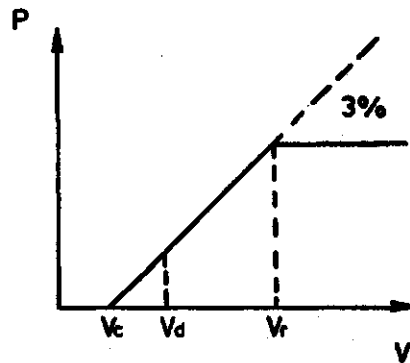


Fig. 23. Boven een bepaalde windsnelheid wordt het vermogen constant gehouden. Hierdoor wordt + 3% opbrengst verloren

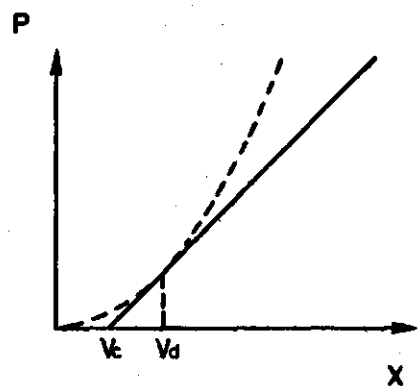


Fig. 21. De start-windsnelheid v_c ligt vast na keuze van v_d

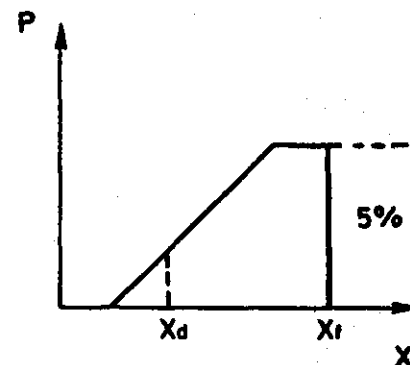


Fig. 24. Boven een dimensieloze windsnelheid x_f wordt de molen uit de windgedraaid. 5% van de uit de wind haalbare opbrengst wordt hierdoor niet benut

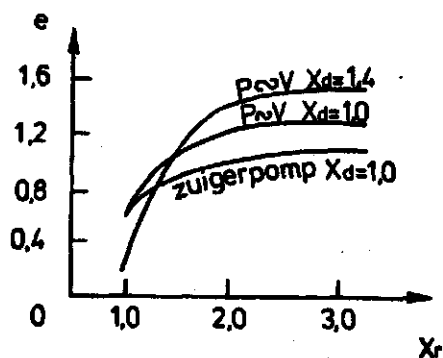


Fig. 22. De dimensieloze jaaropbrengst energie e als functie van de dimensieloze x_r (zie de tekst)

Ook de windsnelheid kan uitgedrukt worden in een relatieve grootheid, namelijk door deze te delen door de jaarlijks gemiddelde windsnelheid:

$$x = \frac{v}{\bar{v}} \quad (5)$$

waarin x = relatieve windsnelheid (-)

v = een windsnelheid (m/s)

$\bar{v}$ = de jaarlijks gemiddelde windsnelheid (m/s)

Met behulp van de waarde van e is nu te berekenen welk deel van de opbrengst verloren gaat, indien het molenvermogen boven een bepaalde windsnelheid v_r constant wordt gehouden. Deze v_r is nu uit te drukken in een relatieve windsnelheid x_r . In figuur 22 staat het verloop van e tegen x_r , bij een x_d gelijk aan 1.0 en 1.4, voor twee soorten werktuigen bij een Weibull-verdeling voor Nederlandse omstandigheden (paragraaf 4.3).

Bij een $x_d = 1.4$ is weliswaar een hoger jaartotaal te behalen, maar deze opbrengst vertoont een erg onregelmatig jaarlijks verloop, wat blijkt uit het steile verloop van e bij toenemende x_r . Figuur 22 is afgeleid uit de grafieken van het verloop van e tegen x_d voor vaste waarden van x_r (Lysen, 1981) (zie fig. 25).

Als vuistregel wordt nu vaak voor de v_r een waarde van $2 \cdot v_d$ gekozen. Dit zal een reductie van de jaaropbrengst van ten hoogste 3% veroorzaken (fig. 23).

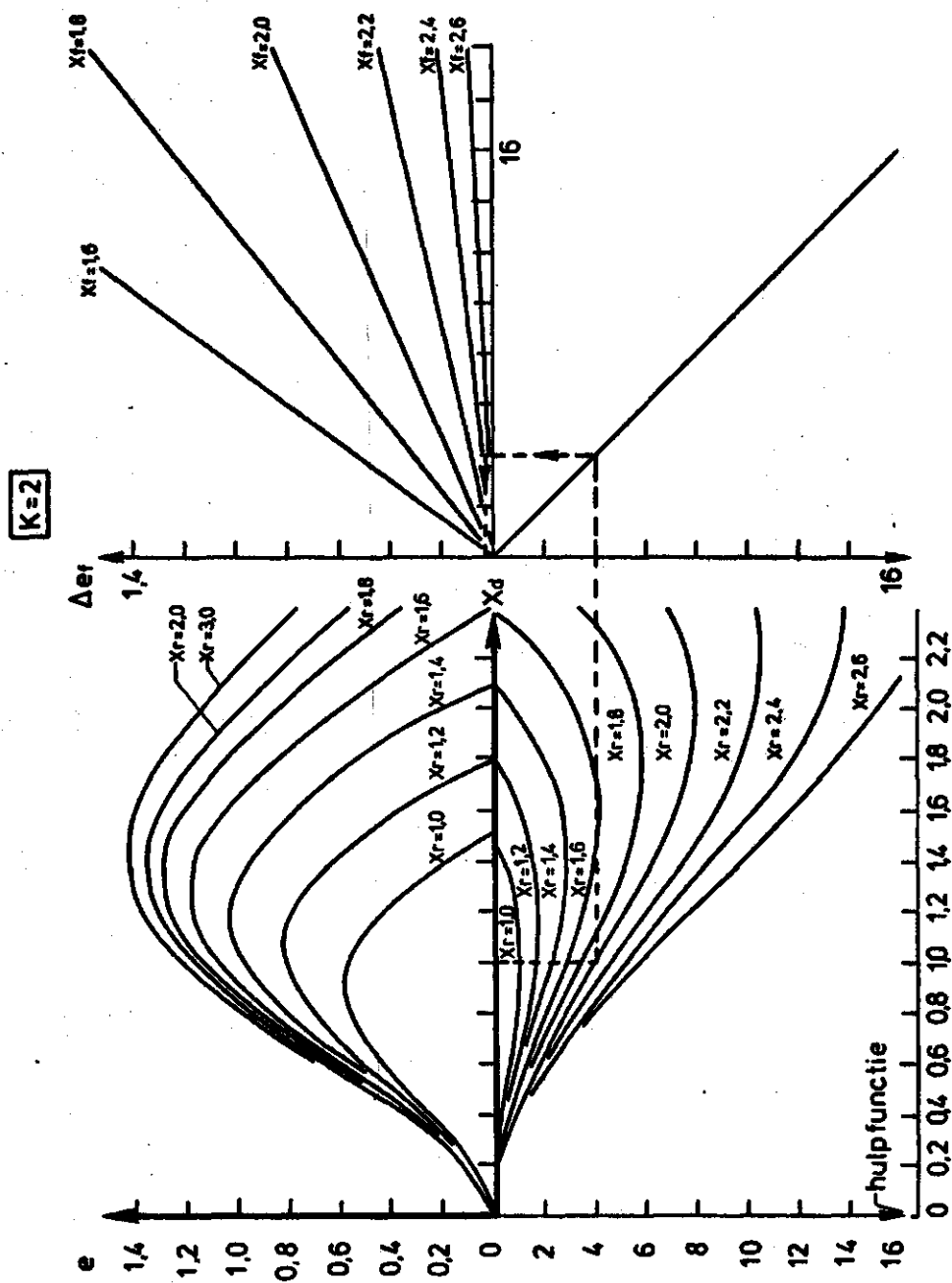


Fig. 25. Het verloop van de jaaropbrengst e bij variërende x_d , voor een aantal waarden van x_r

3.6.4. Maximale windsnelheid

Wordt de windsnelheid te hoog, dan dreigt de hele molen om te waaien. Afhankelijk van de zwaarte van de hele constructie moet er dus een windsnelheid worden ingevoerd waarboven de windvangende oppervlakte verminderd moet worden. Deze vermindering gebeurt door de molen 'uit de wind' te draaien. De snelheid waarbij dit gebeurt heet v_f (furling).

In figuur 25 is uitgaande van een x_d , (naar beneden toe) bij een bepaalde x_r , de vermindering Δe_f in de jaaropbrengst, ten gevolge van de keuze van x_f , af te lezen.

Hierbij blijkt dat bij een x_f van 2.5 tot 3.0 de vermindering onder de 5% zal blijven.

Ook wat betreft torenconstructie is dit een bruikbaar getal.

Zie fig. 24.

3.6.5. Molenkarakteristiek

Op basis van het voorgaande is nu als voorbeeld berekend hoe een molenkarakteristiek eruit ziet op basis van de volgende gegevens:

soort windregime:	$k = 2$
gemiddelde windsnelheid:	$\bar{v} = 6 \text{ m/s}$
rendement bij v_d :	$(\eta_{\text{totaal}})_{\text{max}} = 0,20$
verloop vermogen met v :	lineair
ontwerp-windsnelheid:	5,5, 6,0, en 6,5
maximaal vermogen bij:	$v_r = 2 v_d$
maximale windsnelheid bij:	$\Delta e_f = 1 \text{ tot } 10\%$
pomprendement:	0,50

Zie figuur 26.

In de figuur staat ook het geschatte vermogensverloop voor een combinatie aandrijving-werktuig die niet in een lineair vermogensverloop resulteert. Dit is het geval bij toepassing van een zuigerpomp.

Op dezelfde manier kunnen karakteristieken vervaardigd worden van molens, die ontworpen zijn op basis van andere uitgangspunten.

Deze laatste betreffen de soort combinatie aandrijving-werktuig, de grootte van de ontwerp-windsnelheid ten opzichte van de gemiddelde windsnelheid, en de grootte van het maximaal vermogen en de maximale windsnelheid. In het computermodel zijn de uitgangspunten van het ontwerp van de windmolen daarom dan ook variabel.

Onderaan de figuur staat de frequentieverdeling van de windsnelheden, die geldt voor de kustprovincies (par. 4.3: $k = 2,0$ en $\bar{v} = 6$ m/s). Uit vergelijking van de bovenste met de onderste grafiek blijkt de geringe overloop van frequenties met vermogens bij de verschillende windsnelheden. De keuze van het vermogensverloop zal een belangrijke invloed hebben op de gebruiksmogelijkheden.

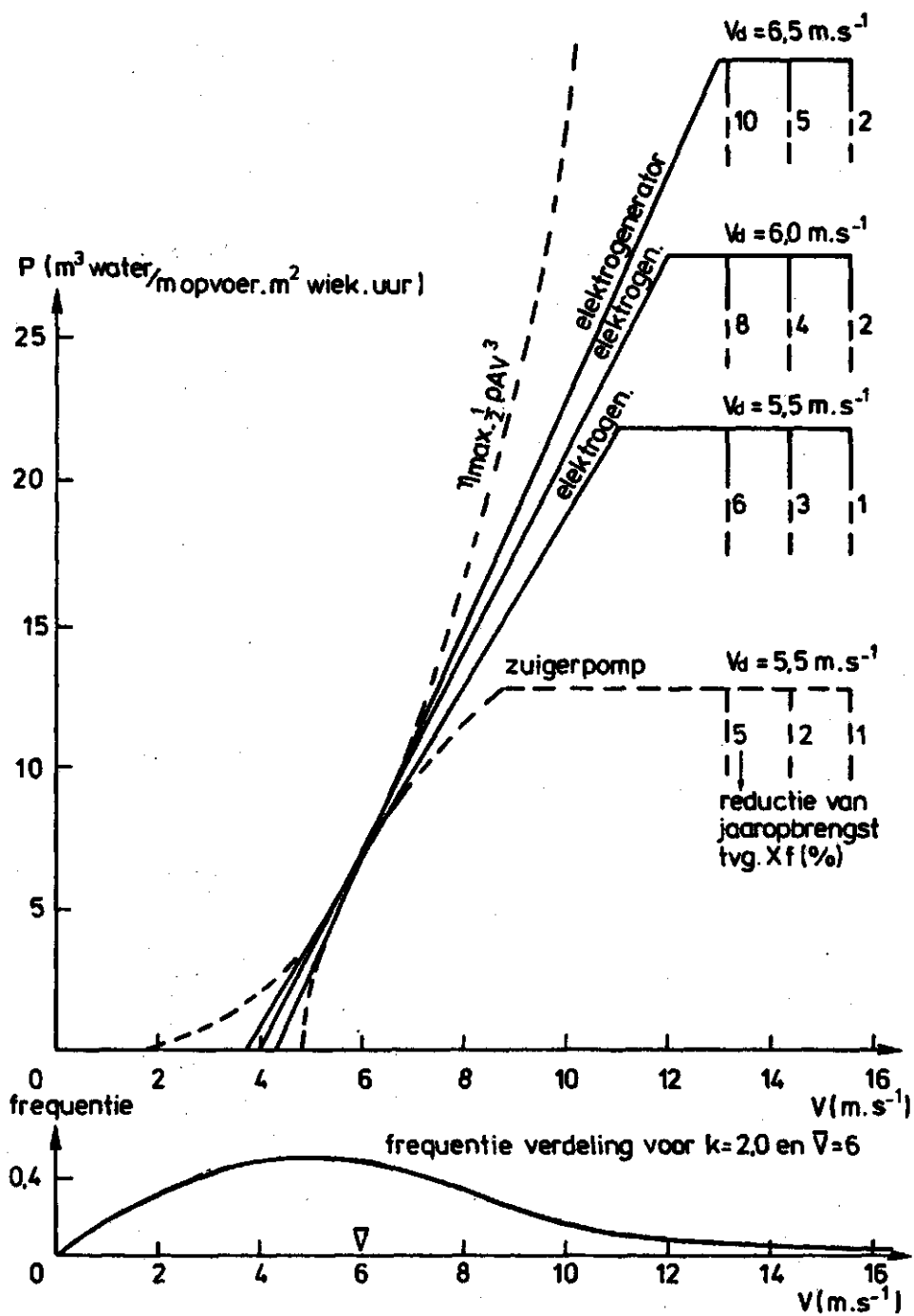


Fig. 26. MOLENKARAKTERISTIEKEN. Uitgaande van een windregiem met $k = 2,0$
 gem. windsnelheid = 6 m/s
 verschillende ontwerpsnelheid v_d
 bij $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{\text{max}} = 0,3$
 pomprendement = $0,50$, pomp met horizontale Q-H
 twee soorten werktuig

4. WIND

4.1. A l g e m e e n

In hoofdstuk 3 bleek dat het vermogen van een windmolen varieert met de windsnelheid. Het is dus van belang om te weten welke windsnelheden verwacht kunnen worden.

De windsnelheid varieert met de plaats, hoogte en de tijd. Om metingen van de windsnelheid op een bepaalde plaats te kunnen gebruiken voor berekening van de energieleverantie op een andere plaats, moet het verband tussen windsnelheid en plaats bekend zijn. De veranderlijkheid van de windsnelheid in de tijd heeft gevolgen voor metingen en berekeningen.

4.2. W i n d s n e l h e i d o p v e r s c h i l l e n d e p l a a t s e n

De windsnelheid die op een bepaalde plaats optreedt, is een gevolg van een aantal atmosferische processen. Rond de aarde hangt een dampkring: een ongeveer 1000 km dikke schil met gassen, die vanaf het aardoppervlak in steeds kleinere dichtheid voorkomen. In deze dampkring verloopt de temperatuur met de hoogte. Op basis hiervan is de dampkring verdeeld in een aantal 'sferen'. De weersomstandigheden zoals die op aarde gevoeld worden, spelen zich voornamelijk af in de onderste 9 km, de troposfeer (fig. 27). Hierin treden naast horizontale, ook verticale luchtstromingen op.

Door de zon wordt aan de evenaar meer energie ingestraald dan aan de polen. Via luchtbewegingen, op gang gebracht door verschillen in luchtdruk, zal een energiestroom ontstaan van de evenaar naar de polen. Door draaiing van de aarde, afremming aan het aardoppervlak en ongelijke opwarming van verschillende gebieden op aarde, zullen deze luchtbewegingen worden veranderd.

Vanaf de Noordpool gezien draait de aarde links om, 'onder een zich verplaatsende luchtmassa door'. Voor een waarnemer op het Noordelijk halfrond lijkt de lucht daarom een afwijking naar rechts te krijgen ten opzichte van een beweging, verklaard uit verschillen in luchtdruk. De schijnbare kracht, waarmee deze afwijking verklaard kan worden, heet de Corioliskracht.

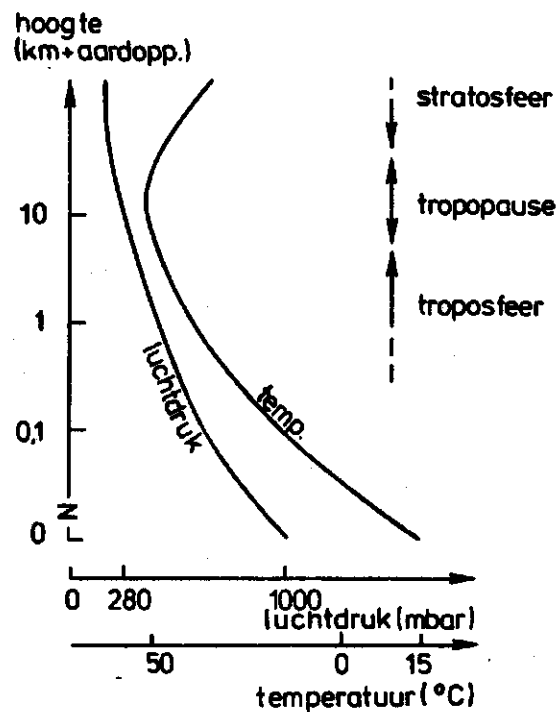


Fig. 27. In de atmosfeer variëren temperatuur en luchtdruk met de hoogte

In de onderste 1000 m boven de aardkorst wordt de lucht afgeremd. Het effect van de Corioliskracht wordt hierdoor verminderd, de lucht wordt met de aarde 'meegesleept'. Naar het aardoppervlak afdalend zal dit een steeds grotere afwijking naar links veroorzaken ten opzichte van de richting in de luchtlagen erboven.

Verblijft een luchtmasa een tijd lang boven een groot gebied met ongeveer constante opbouw, dan zal deze luchtmasa door o.a. in-straling veranderen. Boven een oceaan zal dit anders zijn dan boven een woestijn. De verdeling van oceanen en continenten over de aarde zal de luchtbewegingen dus beïnvloeden. De resulterende luchtbewegingen kunnen verklaard worden uit de luchtdrukverdeling over de aarde, weergegeven met behulp van isobaren, en de Corioliskracht. Voor kleinere hoogten boven het aardoppervlak komt daar de richtingsverandering door afremming nog bij (Bottemanne).

Op een bepaalde plaats, op een bepaald tijdstip, zal de snelheid van de luchtbeweging, de windsnelheid met de hoogte variëren. Voor dit verloop van de windsnelheid met de hoogte wordt vaak een logaritmisch verband aangenomen (Rijkoort, 1968; Wieringa, 1980):

$$v = c \ln z/z_0 \quad (6)$$

waarin v = windsnelheid (m/s)

c = constante (—)

z = hoogte, waarop v (m)

z_0 = ruwheidshoogte (m)

Deze formule is geldig tussen z_0 en 60 m, en bij een stationaire atmosfeer. Boven de 30 m kan het temperatuursverloop met de hoogte een rol gaan spelen, zodat afwijkingen voor kunnen komen. Hiervan is in deze benadering verder afgezien. De ruwheidshoogte is de hoogte boven maaiveld, waarop de windsnelheid gelijk is aan nul. In tabel 1 staan de terreinruwheden van verschillende soorten terrein (zie fig. 28 en 29). De c is een maat voor de waarde tot welke de windsnelheid stijgt op grotere hoogten (fig. 30).

Tabel 1. Klassificering van terreinruwheid voor windschattingen (ref. Wieringa, Bull. Am. Meteor. Soc. 61 (1980): 962-971)

Klasse	Terreinomschrijving	z_0 (m)
1	Open zee of meer, vrije strijklengte minstens 5 km	0.0002
2	Wad of sneeuwvlakte, geen begroeiing of obstakels	0.005
3	Weideland of braakliggend bouwland met vrijwel geen bomen of boerderijen; startbanen van vliegvelden	0.03
4	Bouwland met laag gewas, weinig verspreide obstakels op vrij grote onderlinge afstand ($>20 \times$ hoogte)	0.10
5	Cultuurland met verspreide obstakels (bomenrijen, huizen), heggen, hoge gewassen (b.v. mais)	0.25
6	Parkland met veel obstakels en weinig open ruimte ($\sim 10 \times$ obstakelhoogte), boomgaardjes, struikgewas	0.5
7	Bos, laagbouw, met regelmatige vrij dichte bedekking van obstakels (tussenruimten $\sim$ obstakelhoogte)	1.0
8	Stad met hoogbouw (windschatting NIET toepasbaar)	

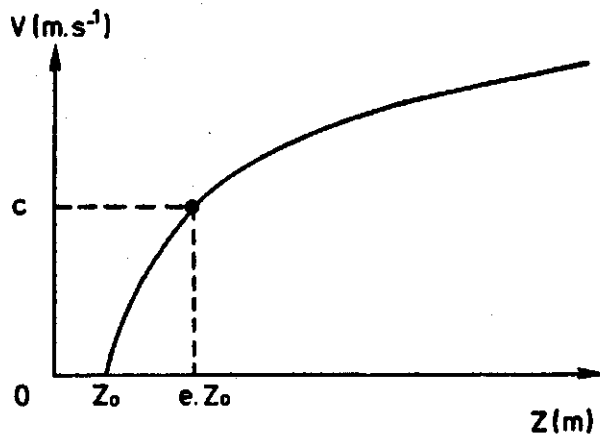


Fig. 28. Windsnelheid v als functie van hoogte boven maaiveld z , met ruwheidshoogte z_0

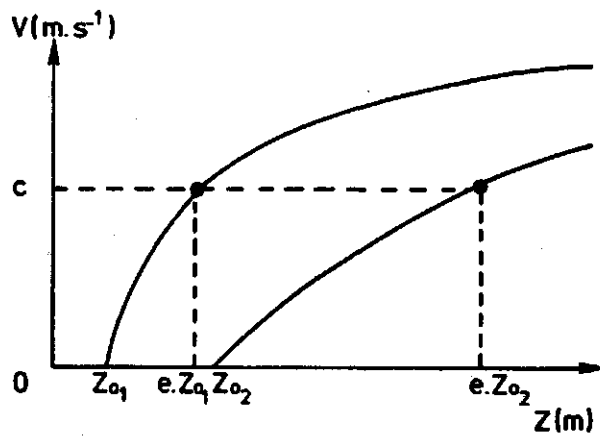


fig. 29. Het verloop van de windsnelheid v met de hoogte z , bij verschillende ruwheidshoogte z_0

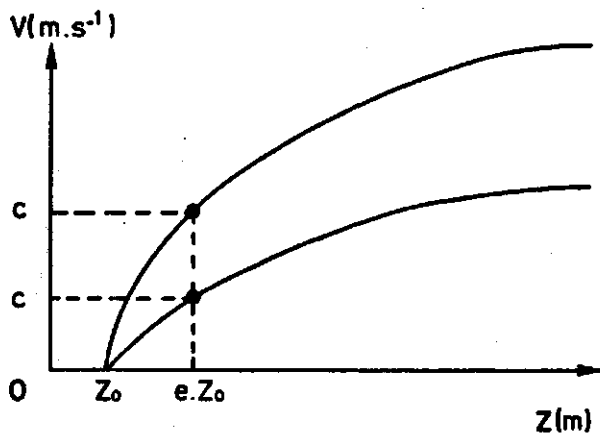


fig. 30. Het verloop van de windsnelheid v met de hoogte z , bij verschillende waarden van de constante c uit de formule $u = c \ln z/z_0$

Vanaf 60 m hoogte ondervindt de windsnelheid bijna geen invloed meer van de afremming. Door van een bepaalde plaats met een ruweidshoogte z_0 , en een gegeven waarde voor c , de windsnelheid op een bepaalde hoogte te delen door de windsnelheid die volgens formule 6 op 60 m hoogte moet heersen, ontstaat een windfractie F , die alleen nog afhankelijk is van de hoogte en de terreinruwheid:

$$F = \frac{v}{v_{60}} = \frac{\ln z/z_0}{\ln 60/z_0} \quad (7)$$

waarin F = windfractie (-)

De verhouding tussen de windsnelheden op twee plaatsen, A en B, die beide onder invloed staan van dezelfde grote luchtbeweging zal gelijk zijn aan de verhouding van de windfracties:

$$\frac{v_B}{v_A} = \frac{F_B}{F_A} = \frac{\ln z_B/z_{0B}}{\ln z_A/z_{0A}} \cdot \frac{\ln 60/z_{0A}}{\ln 60/z_{0B}} \quad (8)$$

Hiermee is de waarde van een windsnelheid te transformeren van de ene plaats naar een andere, als de hoogte en terreinruwheid van beide plaatsen bekend zijn.

Voor onderlinge vergelijkbaarheid worden windsnelheden van verschillende plaatsen vaak genormeerd, dat wil zeggen herleid naar een hoogte van 10 m en een terreinruweidshoogteklasse 3, overeenkomend met $z_0 = 0.03$ m. Een voorbeeld van deze terreinruwheid is een open weidegebied.

In fig. 31 staat de gemiddeld voorkomende windsnelheid van verschillende streken in Nederland. Deze windsnelheden zijn alleen herleid naar een standaardhoogte van 10 m. Indien ook de terreinruwheid in rekening was gebracht, zouden de regionale verschillen in het gemiddelde kleiner zijn geweest.

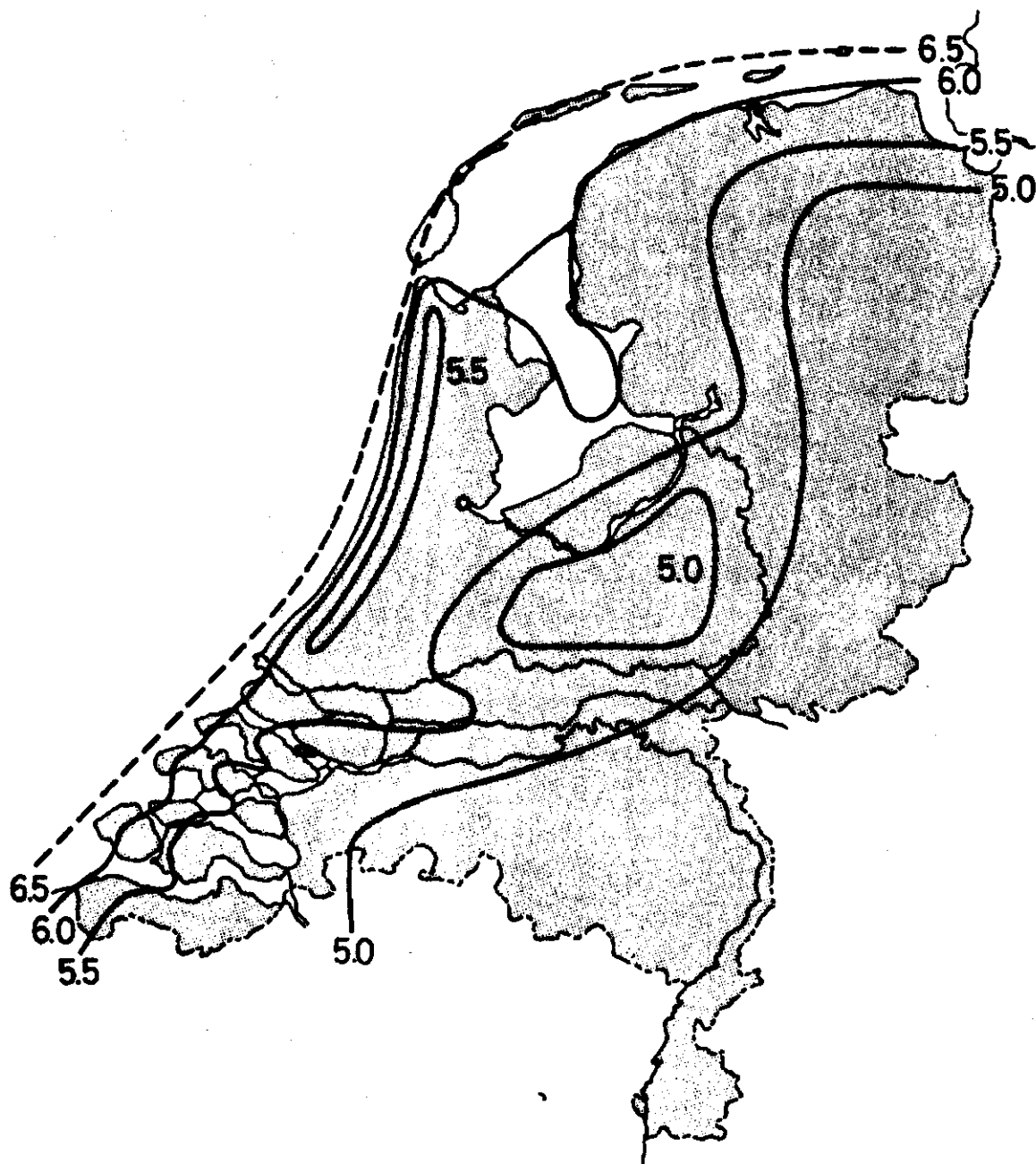


Fig. 31. Gemiddelde windsnelheid in Nederland (jaarlijks gemiddelde in m/s op 10 m hoogte) (Smit, 1980)

4.3. Wind e n t i j d

De windsnelheid is niet constant in de tijd. Bij de beschrijving van de windsnelheid voor toepassing voor windmolens zal een periode-lengte gekozen moeten worden over welke de windsnelheid constant wordt verondersteld. Behalve door het gedrag van de wind wordt deze periode ook bepaald door de meetmethode, de reactie van een molen op verande-

rende windsnelheden en het verband tussen windsnelheid en daarmee corresponderende energie.

Snelheidsveranderingen in perioden ter grootte van seconden tot minuten zijn een gevolg van turbulentie. Verschillen in uur- of daggemiddelden zijn een gevolg van veranderingen in luchtbeweging in de hogere luchtlagen. Er is een gemiddelde dagelijkse en jaarlijkse gang in de windsnelheid te onderscheiden (fig. 32 en 33). Bovendien komen niet alle windsnelheden even vaak voor (fig. 34) (Oemraw, 1981).

De frequentieverdeling van de windsnelheden kan benaderd worden met behulp van een Weibull-functie (Lysen, 1981):

$$f(v) = \frac{k}{c_W} \cdot \left(\frac{v}{c_W}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c_W}\right)^k} \quad (9)$$

waarin f = frequentie

v = windsnelheid (m/s)

k = Weibull-vorm-faktor (-)

c_W = Weibull-schaal-faktor (m/s)

Door de faktor c_W is de som van alle frequenties gelijk aan 100%.

Het windregime van iedere willekeurige plaats is nu dus te beschrijven met behulp van slechts twee variabelen: de gemiddelde windsnelheid en de Weibull-vorm-faktor k . Voor kustgebieden, zoals Nederland, is $k = 2$. In dit geval kan (9) vereenvoudigd worden tot:

$$f(x) = \frac{\pi}{2} x \cdot e^{-\frac{\pi}{4} x^2} \quad (10)$$

Zie fig. 35.

Meting van de windsnelheid geschiedt door de lengte te meten van de horizontale luchtkolom die in een bepaalde tijd de meter passeert. Bij verandering van de windsnelheid zal de molen met een zekere traagheid hierop reageren. Windsnelheden van erg korte perioden zullen dus een lage correlatie hebben met de energie-opbrengst van een molen. De traagheid zal in de orde grootte van minuten liggen.

In par. 3.2 bleek dat de energie, die met een zekere windsnelheid correspondeert, evenredig is met de derde macht van die windsnelheid. Wordt dus de energie berekend aan de hand van een windsnelheid die het

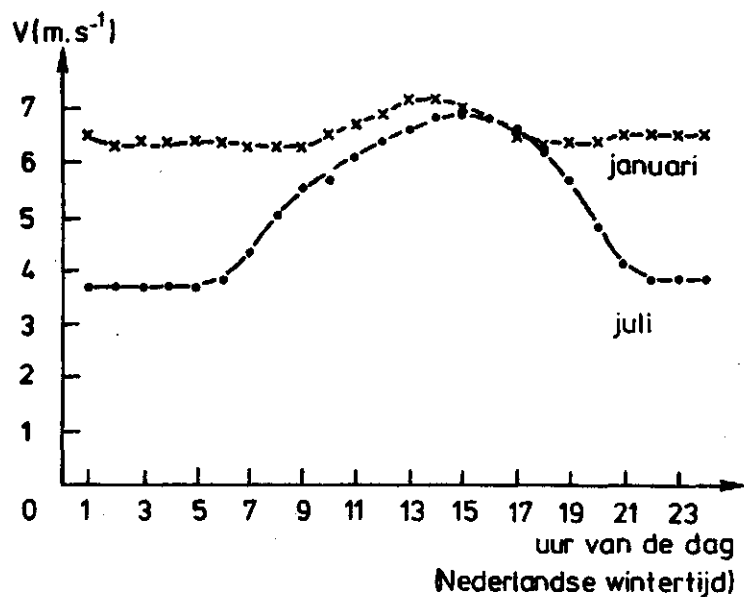


Fig. 32. Gemiddelde dagelijkse gang van de windsnelheid (Schiphol, 1951-1975: 10 m hoogte; ruwheidsklasse 3) (Oemraw, 1981)

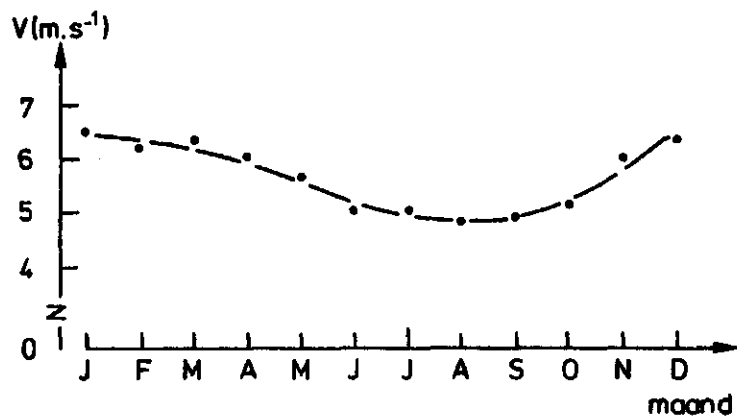


Fig. 33. Gemiddelde jaarlijkse gang van windsnelheid (Schiphol, 1951-1975: a.h.v. uurcijfers; 10 m hoogte; ruwheidsklasse 3) (Oemraw, 1981)

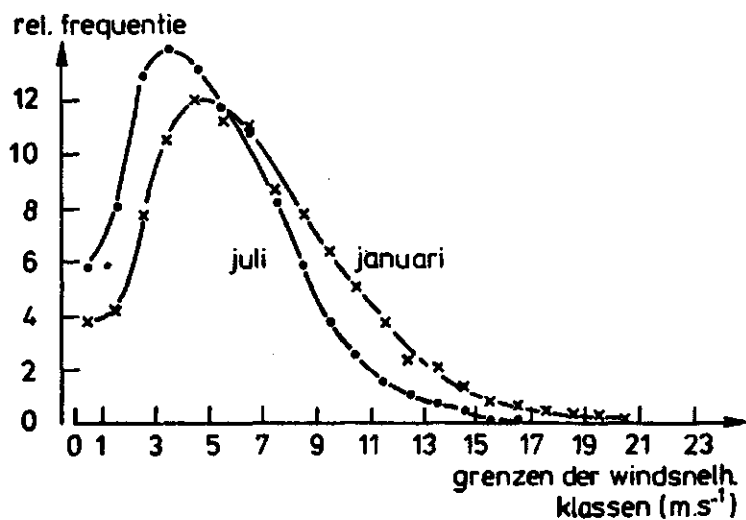


Fig. 34. Frequentieverdeling van de windsnelheden (Schiphol, 1951-1975; a.h.v. uurcijfers; 10 m hoogte; ruwheidsklasse 3) (Oemraw, 1981)

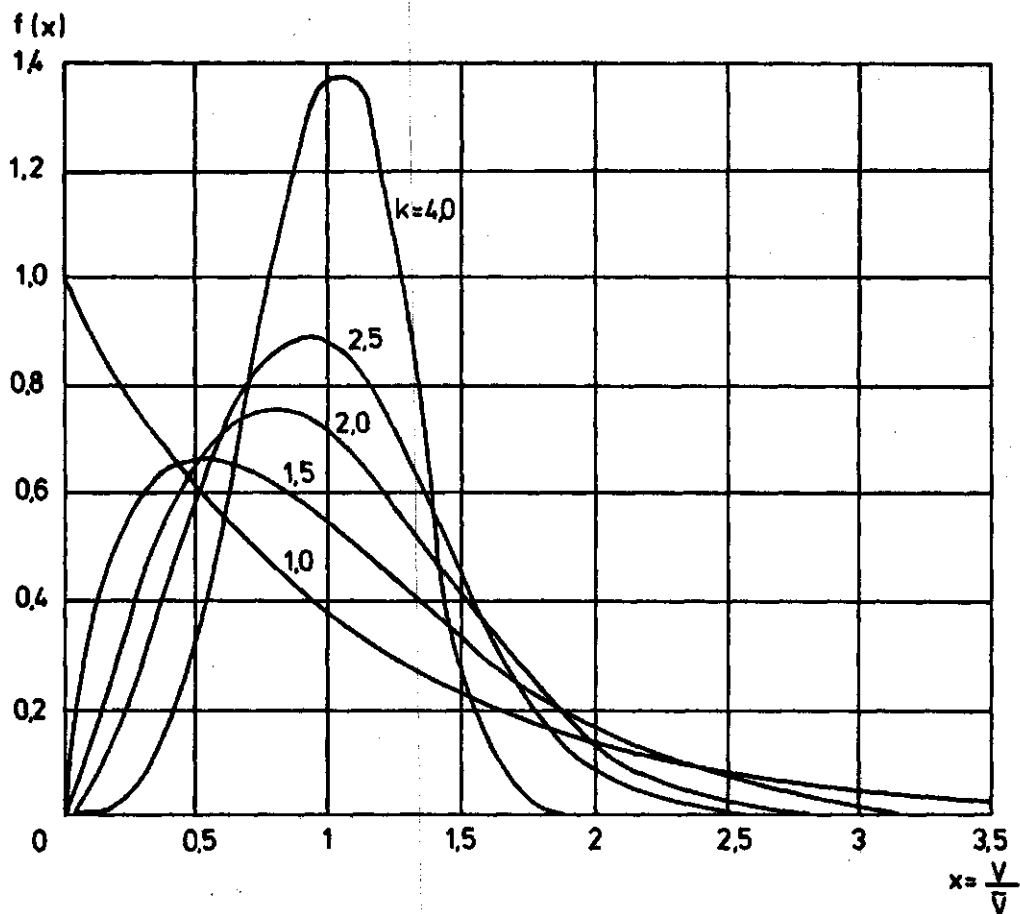


Fig. 35. Windsnelheidsverdelingen, voorgesteld met behulp van Weibull-functies met verschillende waarden van de Weibull-vormfactor k (Lysen, 1981)

rekenkundig gemiddelde is van een periode waarin de snelheid sterk heeft gevarieerd, dan levert deze berekening een belangrijke onderschatting van de energie op. Het is daarom in het algemeen gebruikelijk om bij problemen die te maken hebben met windmolens voor windsnelheden uurcijfers te gebruiken.

4.4. Gebruikte windcijfers

Wil men een uitspraak doen over het gebruik van de wind bij polderbemaling dan is een lange reeks windcijfers nodig, die bovendien geldig zijn voor een groot gebied. In tegenstelling tot neerslagstations zijn er in Nederland maar weinig stations waar windwaarnemingen worden gedaan. Van Schiphol is een lange reeks windcijfers bekend. Door omrekening via formule 8 zijn deze redelijk representatief voor grote gebieden in Noord- en Zuid-Holland (Oemraw, 1981). Gebruikt worden de cijfers van 1951-1970.

5. COMPUTERMODEL

In hoofdstuk 2 is al opgemerkt dat er geen correlatie bestaat tussen het optreden van neerslag en wind. Indien een polder wordt bemalen met windenergie mag worden uitgegaan van de hypothese dat zowel neerslag als wind invloed hebben op het peilverloop van het open water. Immers de neerslag bepaalt de afvoer, terwijl de windenergie dan de mogelijke bemaling bepaalt. Op dit peilverloop heeft echter ook een aantal andere factoren invloed. Deze zijn reeds in hoofdstuk 2 besproken. Deze factoren zijn daar onderverdeeld in gebiedskenmerken, peilwensen en specificaties van de technische installaties. Door nu het peil centraal te stellen kan op grond van een waterbalans, uitgedrukt in peilvariaties, het aantal maaluren dat nodig is worden berekend.

Omdat in het onderhavige onderzoek de capaciteit van de windmolens moet worden bepaald uit windsnelheden per uur, moet vanwege het grote aantal te verwerken gegevens gebruik worden gemaakt van de computer. Deze noodzaak werd gebruikt om een computermodel te ontwerpen waarin alle van belang zijnde factoren konden worden opgenomen.

Om problemen van omrekening van neerslag in afvoer te vermijden, werd uitgegaan van werkelijk opgetreden afvoeren. Deze gegevens werden ontleend aan een reeks van maalstaten over 20 jaren (1951-1970) van de polder Ursem (deze wordt in hoofdstuk 6 besproken). Over deze maalstaten kon worden beschikt dank zij de medewerking van Provinciale Waterstaat in Noord-Holland.

Aan de hand van het aantal maaluren en de Q-H kromme van het gemaal werden de maalstaten omgezet in afvoeren per dag. Met behulp van de relatieve oppervlakte van het open water werden deze afvoeren uitgedrukt in peilstijgingen. Het model is nu zodanig opgebouwd dat het peil van het open water op het eind van een willekeurige dag_{n-1} plus de aanvoer op dag_n een fictief eindpeil voor dag_n oplevert. Is dit fictieve peil HFICT hoger dan het aanslagpeil, dan moest op die dag bemalen worden met het gemaal, werkend op olie of elektriciteit. Deze bemaling is dan voortgezet tot een vooraf vastgesteld afslagpeil.

Bij toepassing van windbemaling wordt een minimumpeil aangenomen, dat lager ligt dan het afslagpeil. Hierdoor kan de windbemaling over meerdere dagen worden gespreid. In het model wordt per uur de bemalingscapaciteit van de windbemaling berekend aan de hand van de in te zetten molenkarakteristiek en de opgetreden windsnelheid. Daarna worden deze uurcijfers gesommeerd over de dag. De peilverlaging die hierdoor te weeg kan worden gebracht wordt afgetrokken van HFICT om het peil van de volgende dag te bepalen.

Naar keuze wordt in het model nu het volgende berekend:

- de niet door de windbemaling gerealiseerde bemaling wordt als peiloverschrijding genoteerd;
- de resterende bemalingscapaciteit wordt geleverd door het conventionele gemaal. Hieruit volgt het aandeel van de bemaling dat door de ingezette windmolen wordt gerealiseerd;
- overtollige energie van de windmolen wordt genoteerd en over de gehele berekeningsperiode gesommeerd als mogelijke levering aan het openbaar elektriciteitsnet.

Het hierboven omschreven programma dat de naam WINE (wind-neerslag) draagt, werd getoetst aan de hand van een kunstmatige reeks maal- en windcijfers. In de figuren 36 en 37 zijn de resultaten hiervan weergegeven. De term 'conv. bemaling' hierin duidt op bemaling met behulp van olie of elektriciteit. Behalve het fictieve peil, naar aanleiding waarvan eventueel het conventioneel gemaal is ingezet, is hierin het definitief bereikte peil van iedere dag af te lezen. In gevallen dat HFICT tot onder het minimumpeil dreigde te zakken, is de windmolen

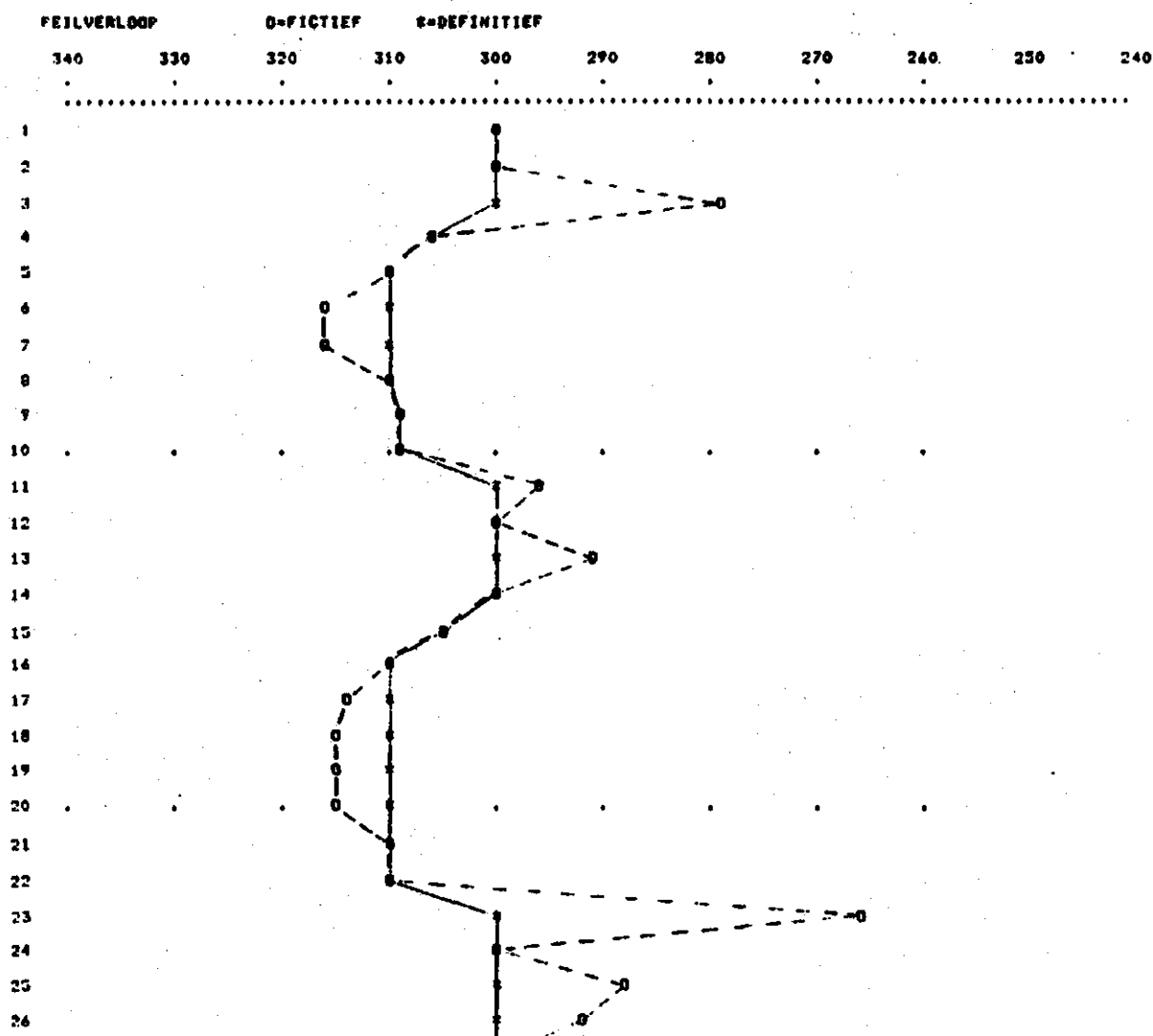
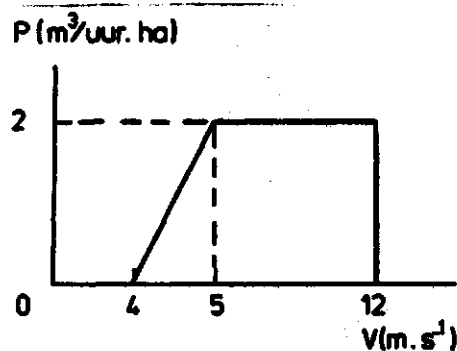


Fig. 36. Het verloop van het fictief peil HFICT en het definitief peil over 26 dagen, op basis van kunstmatige reeksen maal- en windcijfers.

rel. opp. = 0,05, ruwheidshoogte = 0,03 m, molenhoogte 10 m,
aanslagpeil = 296 cm -NAP, afslagpeil = 300 cm -NAP, minimum-
peil = 310 cm -NAP, capaciteit conv. gemaal = $6 \text{ m}^3/\text{uur.ha}$ met
horizontale Q-H kromme,
molenkarakteristiek:



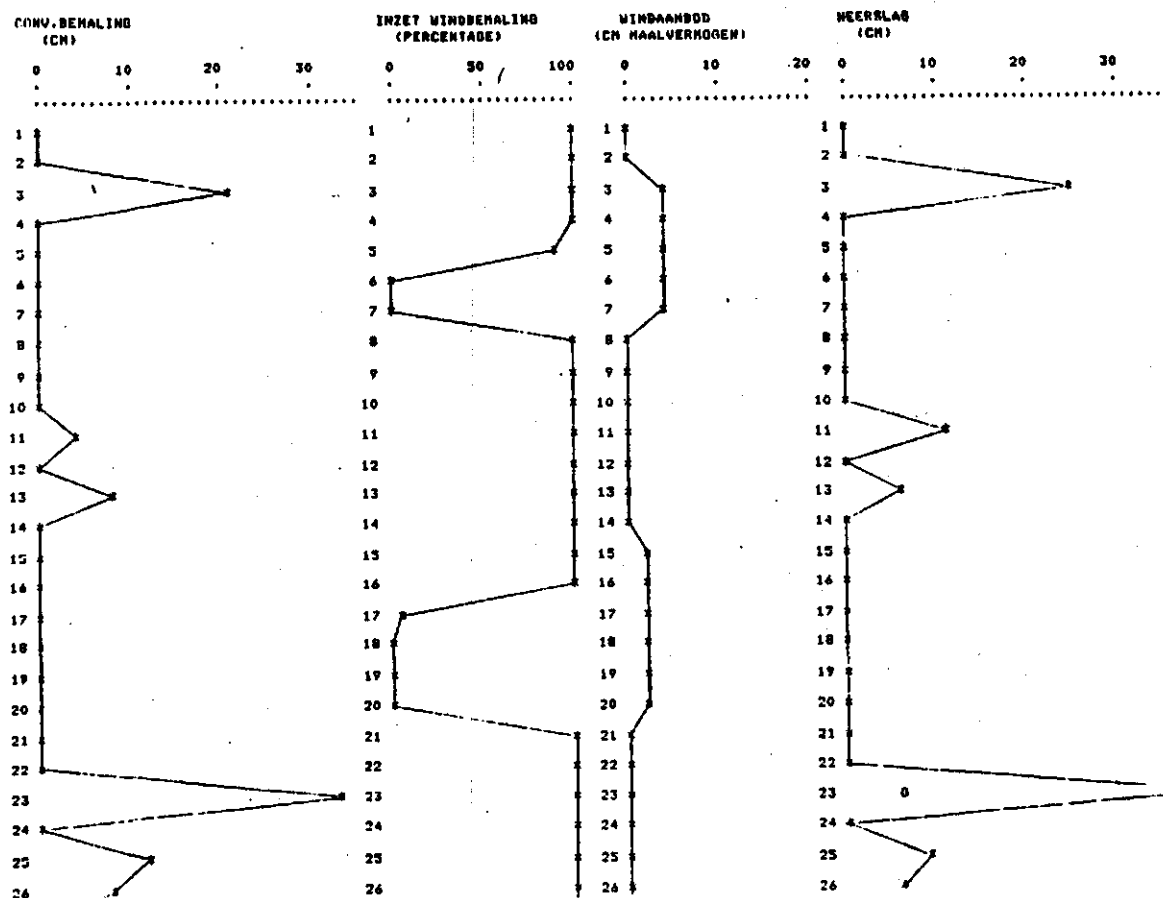


Fig. 37. Het verloop van de bemaling over 26 dagen: het aantal uren dat gemalen is met het conv. gemaal, het percentage van de tijd dat de windmolen in bedrijf is geweest, het windaanbod, en de afvoer uit de polder naar het gemaal (uitgedrukt in een neerslag die ogenblikkelijk tot afvoer leidt)
Specificaties: zie fig. 36

uit de wind gedraaid, zodat de inzet hiervan op die dag geen 100% was.

In het model kunnen onnauwkeurigheden optreden omdat de continue wisselwerking tussen het weer, het gebied en de technische installaties verdeeld wordt in afzonderlijke perioden, waarbinnen alle variabelen constant worden beschouwd. Verder is de beschrijving van een facet van het fysisch gebeuren aan de hand van een variabele soms onnauwkeurig.

Voor de rekenperiode van een dag wordt een enkel cijfer voor de neerslag gebruikt. Indien die neerslag op het einde van een dag valt, kan het model de bemaling overschatten, en voor het eindpeil van die dag een te lage stand berekenen. Indien het beginpeil op een dag laag is en het aanslagpeil dus pas na veel neerslag bereikt wordt, zal een door een vlotter bediend gemaal pas laat aanslaan, en het afslagpeil misschien niet bereiken.

In enkele gevallen lukte het bij de werkelijk gebeurde bemaling niet om de af te voeren hoeveelheid water in een dag weg te malen: het peil op het eind van de dag was nog te hoog. Bij de berekening met het model, waarin wordt uitgegaan van maalcijfers wordt voor deze dagen de af te voeren hoeveelheid onderschat.

Al deze onnauwkeurigheden in het model kunnen effect hebben op afzonderlijke dagwaarden. Omdat er over een bepaalde periode gerekend een zekere vereffening van deze effecten optreedt, zullen de totaal-uitkomsten over die periode echter niet of nauwelijks worden beïnvloed.

In het model wordt gewerkt met een overschrijdings-, aanslag- en een afslagpeil. Hiervan hebben de eerste twee een fysische betekenis. Tijdens de afslag van het gemaal is er een verhang in het oppervlaktewater. Het in het model gebruikte afslagpeil is het gemiddelde van de peilen in het oppervlaktewater tijdens de afslag van het gemaal. Het bij het gemaal gemeten werkelijke afslagpeil zal dus lager zijn.

6. PROEFPOLDER

Voor de simulatie van het verloop van de bemaling, zoals dat onder verschillende randvoorwaarden kan optreden, was het nodig over gegevens te beschikken van een bestaande polder. Van deze polder moesten gegevens over een voldoende lange periode bekend zijn. De polder moest representatief zijn voor Nederlandse poldergebieden wat betreft het afvoergedrag en de terreinruwheid. In verband met de latere uitbreiding van het model met een conversie van neerslag in afvoer was het verder gewenst een polder te kiezen met een zo eenvoudig mogelijke hydrologische opbouw.

Naast gegevens over de afvoer moesten er ook gegevens over ge-

biedskkenmerken, het peilbeheer en de technische installaties bestaan. Voor neerslagcijfers kon een beroep worden gedaan op nabijgelegen neerslagstations. Windsnelheden zijn voor polders over het algemeen niet bekend. Deze cijfers worden daarom ontleend aan een meteorologisch station.

Als eis moest verder worden gesteld dat de waterstaatkundige toestand onveranderd moest zijn gedurende de termijn waarover maalcijfers beschikbaar waren. Voor de gebiedskkenmerken houdt dit in dat het bodemgebruik, de bodemopbouw (en kunstmatige drainage) en de terreinruwheid ongeveer hetzelfde zijn gebleven. Het afwateringsstelsel moest de afvoer niet of nauwelijks belemmeren. Wat betreft het peilbeheer was het gewenst dat geen onderbemalingen aanwezig waren en dat steeds dezelfde man het gemaal heeft bediend. Verder dat alleen bemalen werd om neerslag en eventueel kwel af te voeren en niet ten behoeve van de waterkwaliteit. Het enige criterium voor al of niet malen moet de hoogte van het peil geweest zijn. Het eenvoudigst voor de berekening van de uitmaling was het wanneer er een enkel gemaal met slechts één pomp was en wanneer er verder geen uitlaten of inlaten waren.

Aan bovengenoemde eisen voldoen niet veel polders. Vaak zijn de maalstaten incompleet of is de gebiedsopbouw of het peilbeheer ingewikkeld. In de provincie Noord-Holland bestaat al een halve eeuw de verplichting om maalstaten bij te houden. De polders Wijde Wormer, Schermeer en Ursem in die provincie voldoen redelijk aan de gestelde eisen. De gegevens van deze polders zijn dan ook verzameld. In eerste instantie wordt met Ursem gewerkt.

De polder Ursem is 955 ha groot. De grond wordt voornamelijk gebruikt voor weidebouw. De bodem bestaat uit jonge zeekleigrond, die ondiep kalkarm en ondiep humusrijk tot venig is (Bodemkaart van Nederland). De vorm van de polder is regelmatig, evenals het afwateringsstelsel. Door de grote bemalingscapaciteit zal het peil van het oppervlaktewater haast nooit sterk gestegen zijn. Het water in de bodem stroomde dus af naar open water met een min of meer constant peil. Door een eventuele peilverhoging in het open water wordt niet een groter aantal sloten in de afvoer betrokken; de oppervlakte van het open water zal door een peilverhoging nauwelijks toenemen. Het streefpeil is altijd gelijk gebleven (296 cm -NAP). De huidige machinist

heeft die taak van zijn vader overgenomen. Van 1951 tot 1970 is de (enige) pomp dezelfde gebleven. In 1965 is de dieselmotor door een elektromotor vervangen. Het toerental van de pomp is hierdoor niet veranderd. De capaciteit van het gemaal is 90 m^3 per minuut (= 13,6 mm per dag) bij een opvoerhoogte van 2,60 m. Van de jaren 1951-1980 bestaan volledige maalstaten. Vanaf 1970 is er in Ursem een ruilverkaveling uitgevoerd en is er een nieuw gemaal geplaatst.

Van de neerslagstations Hoorn, West Beemster, Purmerend en Alkmaar zijn de gegevens bij het KNMI te De Bilt opgevraagd. Deze stations liggen in de buurt van de drie bovengenoemde polders.

7. TOEPASSING RESULTATEN

De resultaten van de berekeningen zullen inzicht geven in de fundamentele correlatie tussen het voorkomen van bepaalde neerslagintensiteiten en windsnelheden. Wanneer een windmolen in een gebied is geplaatst ten behoeve van de afvoer dan zal dit gebied een buffer vormen tussen de neerslag en de afvoer. De eigenschappen van deze buffer zullen bovenstaande correlatie beïnvloeden.

De verbanden tussen gebiedskenmerken, wensen ten aanzien van het peilverloop en de capaciteit en typen der technische installaties (fig. 2) zullen duidelijk worden. Gebiedskenmerken zijn dan het afvoergedrag na neerslag en afremming van de wind. Peilwensen bestaan uit een toegelaten peilvariatie en een aantal overschrijdingen. De technische installaties worden gekenmerkt door de maximumcapaciteiten en vermogenscurven van het gemaal, werkend op fossiele energie, en de windmolen. De verbanden worden eerst berekend voor een enkele polder, maar zijn met behulp van neerslag-afvoer relaties en terreinruwheden overdraagbaar naar andere polders.

De vermindering van het aantal uren malen met behulp van fossiele energie door plaatsing van een windmolen in een bepaalde polder, zal bekend worden.

Behalve het vraagstuk van verminderd energieverbruik kunnen met het model ook de effecten van de volgende actuele problemen worden berekend:

- een grotere toegestane peilvariatie, in natuurgebieden;
- een grotere slootbreedte in verband met minder onderhoud;
- een veranderd afvoergedrag na een ruilverkaveling;
- bij bemalen gebruik maken van goedkopere nachtstroom;
- de molen kan men in plaats van water laten uitmalen ook laten inmalen. In dat geval kan het peilverloop, zoals dat onder variërende randvoorwaarden bij irrigatie optreedt, gesimuleerd worden. Dit zal vooral voor ontwikkelingslanden van belang zijn.

Indien een windmolencapaciteit gelijk aan nul wordt ingevoerd, wordt gerekend aan het oude probleem van neerslag - peilwensen - bemalingscapaciteit.

8. SAMENVATTING

De bedoeling van het onderzoek was om het mogelijk aandeel van een windmolen in de totale bemaling van een polder te bepalen. Er bestaat geen samenhang tussen het voorkomen van neerslag en bepaalde windsnelheden. Wordt de wind voor bemaling gebruikt, dan blijken tussen deze twee verschijnselen vele bufferende factoren te zitten. Een samenhang wordt nu gezocht door het peilverloop over een lange periode te simuleren bij gegeven neerslag- en windreeksen, indien een windmolen zou zijn geplaatst. De mate waarin het peilverloop dan nog aanleiding geeft tot bemaling met behulp van fossiele energie, is een aanwijzing voor de samenhang tussen neerslag en wind, en een maat voor de mogelijkheid van toepassing van windbemaling.

Over het gedrag van de wind en de eigenschappen van een windmolen was in verband met het afvoerprobleem tot nu toe weinig bekend. Door literatuuronderzoek is deze kennis nu verzameld. De beschikbare maal-, wind- en neerslagcijfers waren niet bruikbaar. De maalcijfers uit de archieven werden geheel omgewerkt. De windcijfers zaten op een ongebruikelijk soort magneetbaand, temidden van allerlei andere meteorologische gegevens. Omdat de door de wind geleverde energie evenredig is met de derde macht van de windsnelheid zijn daggemiddelden niet bruikbaar. Er moest wel met uurcijfers worden gewerkt. Vanwege het grote aantal cijfers ($20 \times 365 \times 24$ rekenperioden) moest de computer worden

gebruikt. Voor de simulatie van het peilverloop bij variabele gebieds-
kenmerken, wens ten aanzien van het peilbeheer en technische instal-
laties werd een computerprogramma ontwikkeld. Dit programma werd getest
met kunstmatige reeksen maal- en windcijfers. Het zal uiteindelijk
worden gebruikt om berekeningen uit te voeren aan de hand van de echte
cijfers van een polder waarvan een onafgebroken reeks over 20 jaar be-
schikbaar is.

LITERATUUR

- ALGEMENE ENERGIERAAD, 1982. Klein Vademecum voor de energie 1982.
Staatsuitgeverij.
- AMMERS, E.W. VAN, e.a. Inleiding informatica. Dictaat Landbouwhogeschool,
Wageningen.
- BEOP, 1981. Perspectieven voor windenergie in Nederland. ECN.
- BEURSKENS, J., e.a., 1974. Windenergie. Technische Hogeschool, Eindhoven.
- BOTTEMANNE, F.A. Meteorologie en klimatologie. Landbouwhogeschool,
Wageningen.
- CBS, 1978. Statistisch zakboek 1978.
- CBS, 1981. Statistisch zakboek 1981.
- CBS, 1982. Statistiek van de elektriciteitsvoorziening in Nederland 1979.
- CULTUURTECHNISCHE VERENIGING. Cultuurtechnisch Vademecum.
- JANSEN, W.A.M. en P.T. SMULDERS, 1977. Rotor design for horizontal axis
windmills. Steering Committee for Wind Energy in Developing
Countries.
- KNMI. Windsnelheden en -richtingen van Schiphol van de jaren 1951-1970
(op magneetband).
- LYSEN, E.H., 1981. Output prediction for wind turbines in Weibull-
distributed wind regimes. Technische Hogeschool, Eindhoven.
- Maalstaten van de polders Schermeer, Ursem en Wijde Wormer.
- MOLEN, W.H. VAN DER, 1972. Waterbeheersing. Dictaat Landbouwhogeschool,
Wageningen.
- NIEUWENHUIS, C.J.H. Programmeren met behulp van Fortran IV. Dictaat
Landbouwhogeschool, Wageningen.
- OEMRAW, B., 1981. Stationsbeschrijving windwaarneming Schiphol, periode
1937-1980. Technische Rapporten KNMI.

- RIJKOORT, P.J., 1968. The increase of mean wind speed with height in the surface friction layer. Meded. en Verh. KNMI. Thesis.
- RIJKSWATERSTAAT. Waterstaatskaarten Nederland 1:50 000.
- SMIT, J., 1980. Windenergie in Nederland. ECN.
- STIBOKA. Bodemkaart van Nederland 1:200 000.
- THEIJSE, F.H., 1979. De mogelijkheden tot energiebesparing door het toepassen van windenergie bij de polderbemaling van Nederland. ECN.
- WERKGROEP AFVLOEIINGSFAKTOREN, 1979. Richtlijnen voor het berekenen van afwateringsstelsels in landelijke gebieden. Sectie en Studiering voor Cultuurtechniek.
- WESTRA, Chr. en H. TOSSIJN, 1980. Windwerkboek. Ekologische uitg.
- WIERINGA, J., 1980. Representativeness of wind observations at airports. Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 61, no. 9.
- ZEEUW, J.W. DE, 1966. Analyse van het afvoerverloop van gebieden met hoofdzakelijk grondwaterafvoer. Thesis.

ENERGIEKOSTEN VAN DE BEMALING

- Bemaling van Nederland, voorzover geschied met behulp van elektriciteit, in 1979, kostte (CBS, 1982) f 10 000 000.
- Tariefstijging elektriciteit in Nederland, 1979-1981 (bijlage 2) +55%.
- Bemaling van Nederland, geschied met behulp van dieselolie, gebruikte (BEOP, 1981) 5 500 000 liter.
- Prijs dieselolie: f 88,50 per 100 liter (bijlage 2)
- $1,55 \times 10\,000\,000 + 5\,500\,000 \times 0,885 = 15\,500\,000 + 4\,867\,500 =$
20 367 500

De bemaling kostte Nederland aan energie in 1981 ongeveer 20 miljoen gulden.

Bijlage 2

ENERGIE, OMZETTINGEN, PRIJZEN

- waterverplaatsing
1 m³ water, 1 m opvoeren = $Mgh = 10\ 000$ joule = 2.778 Wh
- het rendement van een pomp is $\pm 50\%$ (Cultuurtechnische Vereniging)
- het rendement van een dieselmotor is $\pm 25\%$ incl. onderhoud
- het rendement van een elektromotor is $\pm 85\%$ (Algemene Energieraad, 1982); incl. verliezen in transformator en leidingen
- bij elektriciteitsopwekking levert 1 joule primaire energie 0.38 joule elektrische energie.
- 1 kg dieselolie vertegenwoordigt een hoeveelheid energie van 11,6 kWh = 11,6 * 3600 kJ.
- 1 liter dieselolie weegt 0,85 kg.
- afhankelijk van het soort dieselmotor wordt HBO1 ('huisbrandolie'; dit is gasolie, b.v. thermoshell) of HBO2 (dunne stookolie) gebruikt. Zware stookolie kan alleen door grote scheepsmotoren worden gebruikt. Dieselolie in het wegverkeer is, voor de belasting groen gekleurde gasolie.
Zowel HBO1 als HBO2 kosten per 100 l, incl. 18% BTW, aangevoerd per hele tankauto in Noord- en Zuid-Holland en Utrecht, najaar 1981 - voorjaar 1982: f 88,50.
- De gemiddelde prijs van 1 kWh elektriciteit, bij een bepaalde gegarandeerde afname, voor een bepaald deel 's nachts. Deze getallen gelden voor de 25 grootste elektriciteitsbedrijven in Nederland (Vereniging van Exploitanten van Elektriciteitsbedrijven in Nederland, telefonisch):

	1979	1980	1981
100 kW, 2000 uur, 15% nachtstroom	13,6	16,7	20,1
500 kW, 3000 uur, 20-25% nachtstroom	11,5	14,8	18,2
2500 kW, 4000 uur, 25-33% nachtstroom	10,0	13,4	16,7

- De energiekosten der bemaling per m³, per m opvoer, zijn op basis van bovenstaande getallen:

Bijlage 2 (vervolg)

$$\text{elektrisch: } 2,778 * \frac{100}{50} * \frac{100}{85} = 6,5 \text{ Wh}$$

$$6,5 * 20,1 * 10^{-3} = 0,13 \text{ cent}$$

$$\text{diesel} : 2,778 * \frac{100}{50} * \frac{100}{25} = 22,2$$

$$22,2 * \frac{1}{11,6 * 1000} * \frac{100}{85} * 88,5 =$$

$$0,20 \text{ cent}$$

N.B. Dit zijn globale cijfers. Gezien de energieprijzen zijn ze ook tijdelijk.