

NOTA 1425

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

ICW-nota 1425
Team Integraal Waterbeheer
Centrum Water&Klimaat
Alterra-WUR
mei 1983
Y. Bakel

POLDERBEMALING MET WINDENERGIE

ir. F.W. Zwietering

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publicaties.

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

I N H O U D

	blz.
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
2. MATERIALEN EN METHODEN	5
2.1. Algemeen	5
2.2. Windsnelheid- en neerslagcijfers	5
2.3. Computerprogramma	7
2.4. De verschillende factoren	9
2.5. Besparing contra aanschafkosten	14
2.6. Het windvermogen in de tijd	17
3. RESULTATEN EN DISCUSSIE	18
3.1. Algemeen	18
3.2. De invloed van de onderzochte factoren	18
3.3. De verdeling van het windvermogen in de tijd	25
3.4. Benutting van de windenergie	30
4. CONCLUSIES	35
LITERATUUR	37
SYMBOLEN	39
BIJLAGEN	43

VOORWOORD

Door de Ministeries van Wetenschapsbeleid en van Landbouw en Visserij werden in 1981 gezamenlijk gelden ter beschikking gesteld voor onderzoek naar de mogelijkheden van energiebesparing in de landbouw.

In dit kader valt het onderzoek naar de perspectieven voor het gebruik van windenergie bij de moderne polderbemaling, dat in de periode augustus 1981 - december 1982 op het ICW werd verricht. In de loop van 1982 werd over dit onderzoek verslag uitgebracht in de vorm van twee nota's (ZWIETERING, 1982a en 1982b). Deze nota kan worden beschouwd als eindrapport van het onderzoek.

In deze nota zullen de resultaten van het onderzoek naar de verschillende waterstaatkundige factoren die voor deze toepassing van windenergie van belang zijn besproken worden.

1. INLEIDING

In Nederland valt in het winterhalfjaar meer neerslag dan er verdamping optreedt. Om peiloverschrijdingen 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 vertoont een grillig patroon. De verdamping daarentegen geeft een veel geleidelijker beeld. Afhankelijk van de bodemeigenschappen en andere gebiedskenmerken veroorzaakt vooral de neerslag een fluctuatie in de grondwaterstand en in het peil van het oppervlaktewater. De eisen die worden gesteld ten aanzien van deze fluctuaties zijn afhankelijk van een aantal factoren, waarvan het grondgebruik en de bodemsoort de voornaamste zijn. Door middel van technische installaties zoals een gemaal kan de afvoer en daarmee de fluctuatie in het peil van het oppervlaktewater beïnvloed worden.

De bemaling kan getypeerd worden door twee grootheden, namelijk 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 deze variatie de capaciteit van de bemaling terwijl de totale hoeveelheid het aantal uren dat gemalen wordt bepaalt.

De variatie in de uitgemalen hoeveelheden per dag is groot: de gemiddeld eenmaal per jaar optredende hoogste piek is ongeveer zeven maal zo groot als de gemiddelde afvoer in die periode. Omdat de capaciteit van een gemaal over het algemeen zo groot wordt gekozen dat een afvoer die met een zekere lage frequentie mag worden verwacht nog verwerkt kan worden, wordt in de afvoerperiode slechts ongeveer 20% van de tijd gemalen.

Voor bemaling wordt op dit moment als energiebron bijna uitsluitend olie en electriciteit gebruikt. Omdat deze energiebronnen steeds direct inzetbaar zijn kan door bemaling een zeer nauwkeurige peilregeling worden gerealiseerd. Het energieverbruik is recht evenredig met het aantal uren malen. Omdat de prijs van fossiele energie de laatste jaren sterk is gestegen, kan de aanwending van andere energiebronnen (weer) aantrekkelijk worden. Dit is dan ook de reden om de mogelijkheden voor het gebruik van windenergie nader te onderzoeken.

In tegenstelling tot fossiele energie is windenergie niet altijd voorhanden. 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 die worden gesteld aan het polderpeil zal daarom altijd additioneel bemaling met olie of electriciteit mogelijk moeten blijven, tenzij men wat afdoet van de eisen die aan de handhaving van het peil worden gesteld. Omgekeerd zal een windmolen ook energie kunnen leveren in tijden dat hieraan voor de bemaling geen behoefte bestaat.

Door de bemaling ten dele uit te voeren met behulp van windenergie zal bespaard kunnen worden op de gebruikte hoeveelheid olie of electriciteit. De perspectieven voor het gebruik van windenergie zullen afhangen van de verhouding tussen enerzijds aanschaf- en onderhoudskosten van de windbemaling en anderszijds de besparing op energiekosten en de inkomsten tengevolge van de eventueel verkochte electriciteit. Dit laatste zal alleen voorkomen als de windbemaling via electriciteit werkt.

Het samenspel van de combinatie conventionele bemaling - windbemaling wordt in sterke mate bepaald door de eisen die men stelt aan het peilverloop. Voor een goed begrip van het samenspel wordt daarom uitgegaan van dit peilverloop.

Het peilverloop wordt beïnvloed door een groot aantal factoren. In de onderhavige studie zijn deze factoren verdeeld (zie ZWIETERING, 1982a) in drie groepen, te weten gebiedskenmerken, specificaties van de technische installaties en wensen ten aanzien van het peilbeheer. Zie fig. 1. Omdat deze factoren per polder verschillen, zullen ze de

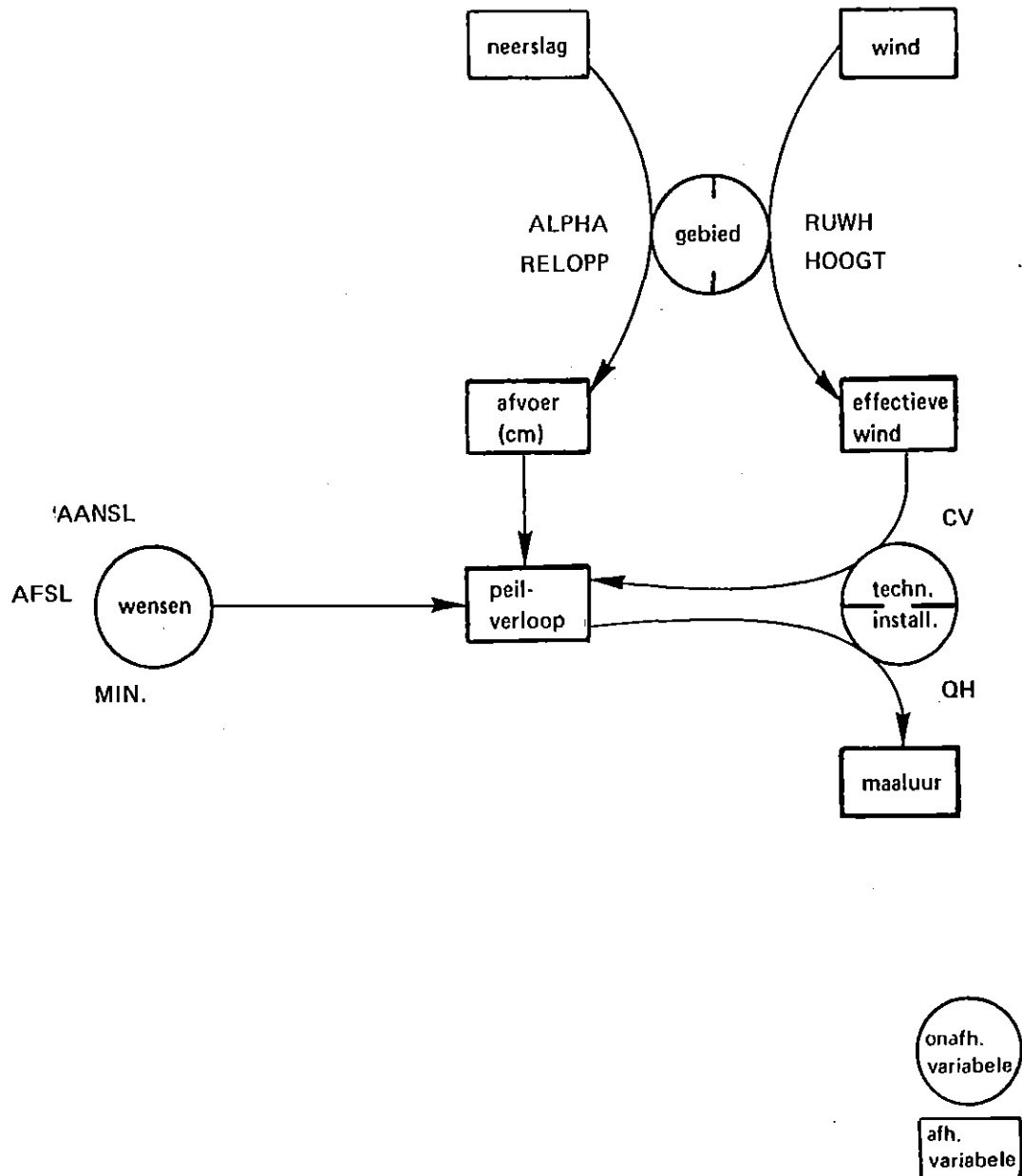


Fig. 1. De factoren die het peilverloop bepalen bij een bemaling die ten dele uitgevoerd wordt met behulp van windenergie
 AFSL = afslagpeil conventionele bemaling; ALPHA = hydrologische reactiefactor; AANSL = aanslagpeil conventionele bemaling; HOOGT = molenhoogte; MIN = minimumpeil, beneden welk de windbemaling wordt gestopt; RELOPP = relatieve oppervlakte open water; RUWH = ruwheidshoogte; CV = capaciteitverloop windbemaling bij variërende windsnelheid; QH = capaciteitsverloop conventionele bemaling bij variërende opvoerhoogte (ZWIETERING, 1982a)

mogelijkheden voor windbemaling bepalen. Zo is het bergend vermogen van een polder van belang, evenals de capaciteit van het conventioneel gemaal ten opzichte van die van de ingezette windbemaling, maar ook het type van de ingezette windmolen.

Om na te gaan hoe het peil en de bemaling verlopen onder de verschillende omstandigheden is een computerprogramma ontwikkeld waarmee deze grootheden kunnen worden gesimuleerd voor een lange periode. Dit computerprogramma (WINE) is volledig beschreven in ZWIETERING, 1982b. In het programma kan een scala van waarden voor de bovengenoemde factoren worden ingevoerd zodat de omstandigheden die zich in de verschillende polders in Nederland voordoen kunnen worden doorgerekend.

Het doel van het onderzoek was om inzicht te krijgen onder welke omstandigheden de beste kansen voor gebruik van de windenergie liggen. Er is dus gezocht naar normen ten aanzien van het type en grootte van de polder, de bemaling en het peilbeheer.

Door de simulaties werd tevens een beter inzicht gekregen in het gebruik van windenergie voor polderbemaling. Dit betreft vooral de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid met behulp van wind op te pompen water, en de verdeling hiervan in de tijd. Hiermee werd een mogelijkheid geschapen om na te gaan in hoeverre windenergie geleverd wordt op dagen dat deze benut kan worden voor bemaling.

In de volgende hoofdstukken zullen het computerprogramma, de keuze van de waarden, toegekend aan bovengenoemde factoren (zie fig. 1) en de methode die gebruikt is bij het onderzoek naar het windgedrag, en de afweging van besparing tegenover aanschafkosten in de verschillende omstandigheden aan de orde komen. Tot slot is een aantal conclusies geformuleerd die uit het onderzoek zijn te trekken.

2. MATERIALEN EN METHODEN

2.1. A l g e m e e n

Voor de simulatie van het verloop van het peil en de bemaling is gebruik gemaakt van het computerprogramma WINE. De simulatie is een aantal malen herhaald met steeds andere waarden voor de factoren uit fig. 1. Hierbij werden steeds dezelfde windsnelheid- en neerslagcijfers gebruikt, namelijk die welke golden voor de polder Ursem in Noord-Holland. Het programma berekende per dag het peil, de potentiële en reële afvoer door de veronderstelde windmolen en de afvoer door het aanwezige conventionele gemaal. Op grond van de verkregen cijfers kon de brandstofbesparing worden berekend en afgewogen tegen onder andere de aanschafkosten van de molen.

In het onderstaande worden allereerst de reeksen van windsnelheid en neerslag besproken, vervolgens het gebruik van het computerprogramma, daarna de keuze van de waarden voor de verschillende factoren en de afweging van de mogelijke besparingen tegen de aanschafkosten. Tot slot volgt dan de methode om het windgedrag te bepalen.

2.2. W i n d s n e l h e i d - e n n e e r s l a g c i j f e r s

Om resultaten te verkrijgen die een zo algemeen mogelijke geldigheid hebben is gewerkt met gegevens van een plaats die redelijk representatief is voor Nederlandse polderomstandigheden. Vervolgens is geprobeerd om deze basisgegevens met behulp van correctiefactoren om te zetten in gegevens die geldig waren voor andere gebieden. Zo kon de reeks van windsnelheden met behulp van een correctiefactor voor de terreinruwheid vertaald worden naar ieder ander gebied. Hierbij werd er dus van uitgegaan dat de niet door het aardoppervlak afgeremde windsnelheid in de hogere luchtlagen overal in de poldergebieden even groot is. Verder was het de bedoeling om eenzelfde neerslagreeks met behulp van de afvoer karakteristiek van een bepaalde polder om te zetten in een afvoerreeks, geldig voor die polder. Hierbij werd er dus van uitgegaan dat het neerslagpatroon in de verschillende poldergebieden overal hetzelfde is. In werkelijkheid zal dit patroon niet overal hetzelfde zijn.

Omdat de omzetting van neerslag in afvoer ingewikkeld is, is deze omzetting voorlopig niet uitgevoerd. In plaats daarvan is gerekend met een werkelijk opgetreden afvoerreeks. Deze was af te leiden uit maalstaten. Het patroon van deze afvoerreeks geldt dus slechts voor andere poldergebieden, voorzover die hetzelfde afvoergedrag hebben als dat van het gebied waarvan de afvoerreeks is gebruikt. Bij het gebruik van de werkelijk opgetreden reeks als een afvoerbehoefte-reeks wordt verondersteld dat tijdens perioden met afvoer nauwelijks peilverhoging optrad.

Er is veel aandacht besteed aan het vinden van een geschikte polder waarvan de cijfers gebruikt konden worden. Om het peilbeheer te simuleren was het gewenst dat overal in de polder eenzelfde peil optrad, niet gehinderd door stuwen en dergelijke. Behalve een eenvoudige waterstaatkundige opbouw, was een zekere representativiteit wat betreft afvoergedrag en terreinruwheid gewenst en verder moesten over een lange periode voldoende cijfers bekend zijn. In deze periode moest bovendien zo min mogelijk veranderd zijn.

Als basismateriaal werden de maalstaten van de polder Ursem gebruikt. Deze 955 ha grote polder ligt midden in Noord-Holland. De grond wordt voornamelijk gebruikt voor weidebouw en in mindere mate voor vollegrondstuinbouw. De bodem bestaat uit jonge zeeklei. Er is geen merkbare kwel uit de diepere bodemlagen. De vorm van de polder is regelmatig, evenals het afwateringsstelsel. Door de grote bemalingscapaciteit kon het peil van het oppervlaktewater goed worden gehandhaafd. De vorm van de sloten was zodanig dat de oppervlakte van het open water bij peilverhoging nauwelijks toenam. Het streefpeil is van 1951 tot 1970 gelijk gebleven, namelijk 297 cm -NAP wat neerkomt op ongeveer 70 cm -mv. In deze periode is de (enige) pomp dezelfde gebleven. In 1965 is de dieselmotor door een electromotor vervangen maar het toerental van de pomp is hierdoor niet veranderd. De capaciteit van het gemaal was 90 m^3 per minuut, wat neerkomt op 13.6 mm per etmaal. De opvoerhoogte was ongeveer 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.

Als te simuleren periode zijn de jaren 1951 tot en met 1970 gekozen. Van deze periode zijn ook de windsnelheden van het meest nabijgelegen landstation, namelijk Schiphol, opgevraagd. Ten bate van een eventueel later in te bouwen neerslag-afvoer-model zijn de neerslagcijfers van de stations Hoorn, Purmerend, Kolhorn en Edam van die periode verzameld.

Als afvoerseizoen is de periode van 1 oktober tot 1 april aangehouden.

2.3. C o m p u t e r p r o g r a m m a

Bij de simulatieberekeningen is gebruik gemaakt van het computer-programma WINE (ZWIETERING, 1982b). Hierin worden de verschillende factoren uit fig. 1 elk gekwantificeerd door slechts een of enkele variabelen. Verder wordt gerekend in tijdstappen waarbij gesteld wordt dat binnen een tijdstap iedere factor constant is. De afvoer-behoefte wordt per dag berekend, de windbemaling per uur, en het peil weer per etmaal. Bij het gebruik van de maalstaten wordt ervan uitgegaan dat het peil tijdens de bemaling in werkelijkheid constant is gebleven. De onnauwkeurigheden die door deze handelwijze kunnen optreden zullen nu worden besproken.

Op dagen met extreem veel neerslag zijn de gebruikte maalcijfers een slechte maat voor de afvoerbehoefte. Ook indien op het eind van een dag ineens veel neerslag is gevallen rekent het model voor die dag anders dan dat in werkelijkheid gebeurt. Het effect van deze verschillen tussen model en werkelijkheid is echter gering.

In het model wordt de relatieve oppervlakte van het open water constant verondersteld. Vanwege het lage slootpeil, de stevige en dus redelijk steile slootkanten (jonge zeekleigrond) en de geringe peilvariatie in Ursem zal deze aanname gerechtvaardigd zijn. In andere polders kunnen peilverhogingen afgezwakt worden door de dan groter worden oppervlakte van het open water.

Vanwege deze geringe peilverschillen zal ook de aanname van een constante capaciteit van het conventioneel gemaal ook niet tot fouten leiden.

De werking van de windbemaling bij de verschillende windsnelheden wordt in het model beschreven met behulp van een eenvoudige capaciteitscurve. Een voorbeeld van een dergelijke molenkarakteristiek is gegeven in fig. 2. De afgebeelde lineaire curve geldt voor een windmolen-pomp combinatie waarbij als tussenstap electriciteit wordt gebruikt. Verder geldt deze slechts voor het geval de wieken

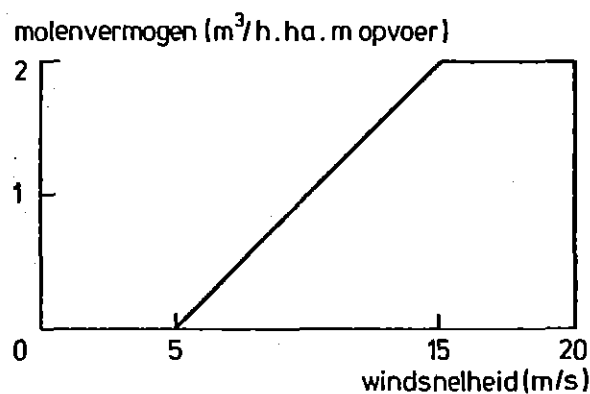


Fig. 2. Voorbeeld van een molenkarakteristiek: het molenvermogen in afhankelijkheid van de windsnelheid

slechts een enkele generator aandrijven. De momenteel meest gebruikte moderne windmolens zijn electriciteitsopwekkers. Meestal hebben ze een tweede generator waardoor lage windsnelheden beter benut kunnen worden. In het model wordt verondersteld dat een bepaald elektrisch vermogen met een constant rendement omgezet wordt in opgevoerd water. Met een aanloopmoment van de pomp en met een verlaging van het rendement bij lage windsnelheden en dus lage toerentallen wordt dus geen rekening gehouden. Het gebruik bij de berekeningen van een eenvoudige lineaire curve sluit overigens conclusies bij andere vormen van de curve niet uit. Uitspraken over de perspectieven voor een windmolen-pomp combinatie met een directe overbrenging blijken dan ook mogelijk.

2.4. De verschillende factoren

Bij de simulatie van het peil en de bemaling kunnen de factoren die het gebied, de technische installaties en het peilbeheer beschrijven vrij gekozen worden. Zodoende kan de invloed van elk bepaald worden. Aan elke factor is een zodanig traject van waarden toegekend, dat dit de meeste in Nederland voorkomende polderomstandigheden overlapt. De verschillende factoren zullen nu achtereenvolgens worden besproken. De aan deze factoren toegekende waarden fungeerden als invoer bij de verschillende simulaties (bijlage 1).

De relatieve oppervlakte van het open water (de factor RELOPP in fig. 1) heeft een zeker bergend vermogen tot gevolg afhankelijk van de toegestane peilvariatie. Dit bergend vermogen is nl. het product van de oppervlakte open water en de toegestane peilvariatie, en heeft als eenheid kubieke meters per hectare. Omdat de factoren relatieve oppervlakte open water en peilvariatie precies hetzelfde effect hebben op het aantal overschrijdingen van een bepaald peil, is in de berekening steeds slechts een van de twee gevarieerd, en wel de peilvariatie. Het effect van de andere factor was dan achteraf eenvoudig te berekenen. Tijdens de simulatie-berekeningen is de relatieve oppervlakte open water steeds 2%.

Een variatie van de hydrologische reactiefactor ALPHA is door het gebruik van afvoercijfers in plaats van neerslagcijfers (par. 2.2) niet mogelijk. De resultaten gelden dan ook alleen voor polders met een reactiefactor die ongeveer overeenkomt met die van de polder Ursem, waarvan de maalstaten zijn gebruikt.

De terreinruwheid is bepalend voor de afremming van de wind nabij het aardoppervlak. Gerekend is met ruwheidshoogten van 0.03 m (open weidegebied, startbanen van vliegvelden) en van 0.10 m (bouwland met laag gewas, weinig verspreide obstakels op vrij grote onderlinge afstand (simulatie 4 en 24)).

Door de molenhoogte te vergroten kan het effect van windafremming verkleind worden. De hoogten 20 m en 30 m werden gebruikt (simulatie 4 en 23).

In de polder Ursem was het streefpeil 297 cm -NAP. Voor het aanslagpeil van de conventionele bemaling werd een waarde van 296.5,

voor het afslagpeil van 297,5 cm -NAP aangehouden. Het verschil tussen deze twee peilen veroorzaakt een zekere traagheid in de conventionele bemaling ten opzichte van een peiloverschrijding, maar hierdoor wordt ook als het ware vooruit gemalen als het conventioneel gemaal eenmaal is aangeslagen. Door de afstand tussen deze twee peilen ook een keer groter te kiezen werd de invloed van deze afstand duidelijk (simulatie 5 en 38).

Voor het minimumpeil, tot welke waarde de windbemaling door mag werken, werd 297,5, 302,0, 309,5, 322,0 en 347,0 cm -NAP toegepast. Tezamen met een relatieve oppervlakte van het open water van 2% had dit een bergend vermogen tot gevolg van respectievelijk 1, 10, 25, 50 en 100 m³ per hectare. Een minimumpeil van 347 cm -NAP zal bij het gegeven streefpeil niet erg realistisch zijn, maar het corresponderend bergend vermogen zou wel verkregen worden bij een peilvariatie van 20 cm met een relatieve oppervlakte van 5%.

In het programma moest een overschrijdingspeil ingevoerd worden. Het aantal malen dat het eindpeil van een dag op of boven dit peil lag werd dan geteld. Bij de simulaties werd altijd een overschrijdingspeil ingevoerd dat precies halverwege de afstand tussen het streefpeil en het minimumpeil lag. Het aantal overschrijdingen van dit peil was daardoor een indicatie voor de frequentieverdeling van de eindpeilen.

Als variabele voor de capaciteit van de windbemaling is de hoeveelheid wiekoppervlakte per hectare gebruikt. Hierbij is eraan voorbijgegaan of deze wiekoppervlakte over een of meerdere molens verdeeld was. De capaciteit van een bepaalde wiekoppervlakte op zijn beurt is afhankelijk van het ontwerp van de windbemaling, gekarakteriseerd door de ontwerpsnelheid V_d . De installatiekosten van een windbemaling zijn globaal evenredig met de wiekoppervlakte.

Voor de gekozen eenvoudige vorm van de molenkarakteristiek (par. 2.3) geldt dat de vermogenslevering begint bij een windsnelheid V_c die gelijk is aan $2/3 * V_d$, en dat het maximaal vermogen wordt bereikt bij een V_r gelijk aan $2 * V_d$. Boven deze V_r is het vermogen constant (ZWIETERING, 1982A). Het vermogen van de wind dat correspondeert met een bepaalde windsnelheid is gelijk aan

$$P = \frac{1}{2} * \rho * F * V^3 \quad (1)$$

waarin:

$$\begin{aligned} P &= \text{vermogen van de wind} && (\text{J s}^{-1}) \\ \rho &= \text{soortelijke massa van lucht} && (\text{kg m}^{-3}) \\ F &= \text{wiekoppervlakte} && (\text{m}^2) \\ V &= \text{windsnelheid} && (\text{m s}^{-1}) \end{aligned}$$

In de berekeningen is voor ρ een waarde van $1,2 \text{ kg m}^{-3}$ aangehouden. Bij de ontwerp-windsnelheid wordt het windvermogen met een zeker rendement omgezet in het molenvermogen volgens formule 1. Voor andere windsnelheden wordt het rendement zoveel lager, dat het molenvermogen geen derde-machts-functie van de windsnelheid meer is maar een eerste-machts-functie. Voor de maximale capaciteit geldt dan ook:

$$Q_{\text{max}} = \frac{1}{2} * \rho * F * V_d^3 * \eta_{\text{aandr}} * \eta_{\text{werkt}} * Z^{-1} * H^{-1} * \frac{V_r - V_c}{V_d - V_c} \quad (2)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{aandr}} &= \text{rendement van windenergie tot elektrische stroom} && (-) \\ \eta_{\text{werkt}} &= \text{rendement van elektrische stroom tot opgepompt water} && (-) \\ Z &= \text{energie, nodig om } 1 \text{ m}^3 \text{ water } 1 \text{ m op te voeren} && (\text{Wh}) \\ H &= \text{opvoerhoogte} && (\text{m}) \\ Q_{\text{max}} &= \text{maximale capaciteit van de windbemaling (m}^3 \text{ uur}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ bij } H) \end{aligned}$$

Hierin is η_{aandr} opgebouwd uit een rendement van het wiekenstel, een rendement als gevolg van de aanpassing van wieken op de generator, een rendement als gevolg van mechanische overbrengingen en het rendement van de generator. Het rendement als gevolg van de aanpassing is bij V_d gelijk aan 100%, en de waarde van η_{aandr} bij V_d is gesteld op 0,30.

De η_{werkt} is het gevolg van het rendement van de electromotor en de pomp. Gekozen is een waarde van $0,85 * 0,50 = 0,425$. Het gebruik van een constante waarde voor het rendement bij verschillende windsnelheden en dus verschillende toerentallen is in par. 2.3 al besproken.

Vanwege $V_c = \frac{2}{3} V_d$ en $V_r = 2V_d$ is de laatste breuk in formule 2 altijd gelijk aan 4. De energie Z is gelijk aan 2,778 Wh. Voor H is steeds een waarde van 2,60 m aangehouden, zoals gold voor de polder Ursem.

Voor F zijn de waarden 20/3, 2/3, 2/9, 1/9, 1/15 en 1/72 $m^2 ha^{-1}$ gebruikt en voor V_d de waarden 4,5, 7,5 en 10,5 $m s^{-1}$ wat neerkomt op een startsnelheid van respectievelijk 3,5 en 7 $m s^{-1}$.

De helling van de molenkarakteristiek volgt uit

$$\nabla Q = \frac{Q_{\max}}{V_r - V_c} \quad (3)$$

waarin:

∇Q = helling molenkarakteristiek ($m^2 s \text{ uur}^{-1} ha^{-1}$)

De bij de simulaties gebruikte waarden van $Q_{\max}$ en ∇Q zijn in de tabellen 1 en 2 weergegeven.

Tabel 1. De capaciteit van de windbemaling $Q_{\max}$ ($m^3 \text{ uur}^{-1} ha^{-1}$ bij 2,60 m opvoerhoogte) als functie van de wiekoppervlakte ($m^2 ha^{-1}$) en voor verschillende ontwerpsnelheid V_d . Vermeld staat ook de startsnelheid V_c ($m s^{-1}$)

V_d	V_c	Wiekoppervlakte					
		20/3	2/3	2/9	1/9	1/15	1/72
4.5	3	25.7	2.57	0.86	0.43	0.26	0.05
7.5	5	119.1	11.92	3.97	1.99	1.19	0.25
10.5	7	327.0	32.70	10.90	5.45	3.27	0.68

Tabel 2. De helling van de molenkarakteristiek ∇Q ($\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{uur}^{-1} \text{ha}^{-1}$) als functie van de wiekoppervlakte ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) en voor verschillende ontwerpsnelheid V_d . Vermeld staat ook de start-snelheid V_c (m s^{-1})

V_d	V_c	Wiekoppervlakte					
		20/3	2/3	2/9	1/9	1/15	1/72
4,5	3	4,289	0,429	0,143	0,071	0,043	0,009
7,5	5	11,92	1,192	0,397	0,199	0,119	0,025
10,5	7	23,35	2,335	0,779	0,389	0,234	0,049

De capaciteit van de windbemaling die met een zeker wiekoppervlak correspondeert staat in tabel 3 uitgedrukt in verhouding tot de capaciteit van de conventionele bemaling. Om de invloed van de V_d op deze verhouding te elimineren is de capaciteitsverhouding altijd berekend voor een $V_d = 7,5$. Zodoende is deze capaciteitsverhouding bij een vaste opvoerhoogte alleen nog maar afhankelijk van het wiekoppervlak.

Tabel 3. De capaciteitsverhouding (-) die correspondeert met de verschillende wiekoppervlakten bij een ontwerpsnelheid $V_d = 7,5 \text{ m s}^{-1}$

	Wiekoppervlakte					
	20/3	2/3	2/9	1/9	1/15	1/72
cap. verhouding	0,047	0,47	1,42	2,85	4,74	22,76

Met behulp van deze gereduceerde capaciteitsverhouding is de capaciteit van de windbemaling uitgedrukt op een manier die onafhankelijk is van de poldergrootte en de opvoerhoogte.

De capaciteit van de conventionele bemaling is steeds $5,65 \text{ m}^3 \text{ uur}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, wat overeenkomt met $13,6 \text{ mm etm}^{-1}$ (polder Ursem).

2.5. B e s p a r i n g c o n t r a a a n s c h a f k o s t e n

Aan de hand van de aanschafkosten en de jaarlijkse opbrengsten in de verschillende omstandigheden is een eenvoudige afweging mogelijk. Deze is niet bedoeld om de economische haalbaarheid te onderzoeken maar om de gevoeligheid van de verhouding van kosten tegenover opbrengsten voor de verschillende factoren duidelijk te maken. Met een prijsstijging van fossiele energie, gunstig voor de economische haalbaarheid van een windbemaling, is geen rekening gehouden. Uit de afweging zal bijvoorbeeld wel blijken dat in een polder met een groter bergend vermogen de besparingen zich gunstiger ten opzichte van de aanschafkosten verhouden dan in een polder met een klein bergend vermogen. Ook met kosten van onderhoud is ook geen rekening gehouden. De bepaling van de gevoeligheid dient om te onderzoeken welke factoren als het belangrijkste kunnen worden beschouwd en welk traject van deze factoren voorkeur verdient.

De netto contante waarde van een investering is een economisch evaluatiecriterium, dat alle toekomstige bedragen terugrekent naar het jaar van investering volgens:

$$NCW = \frac{B_1}{1+r} + \frac{B_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{B_n}{(1+r)^n} - J \quad (4)$$

waarin:

NCW	= netto contante waarde	(f)
$B_{1\dots n}$	= baten in jaar 1 ... n	(f)
n	= levensduur	(-)
r	= rentevoet	(-)
J	= aanschafkosten	(f)

In het geval dat de baten ieder jaar even groot zijn geldt:

$$NCW = B \left(\frac{1}{1+r} + \frac{1}{(1+r)^2} + \dots + \frac{1}{(1+r)^n} \right) - J \quad (5)$$

Door sommatie van de meetkundige reeks wordt dit

$$NCW = B \left\{ \frac{1}{r} \left(1 - \frac{1}{(1+r)^n} \right) \right\} - J \quad (6)$$

De term tussen de accoladen heet de contante waarde factor.
 Het bij de berekening van de NCW toe te passen rentepercentage is vaak niet bekend. Dan kan de werkwijze worden toegepast waarbij dat rentepercentage wordt uitgerekend, waarvoor de NCW precies gelijk is aan nul. Dit percentage noemt men de interne rentevoet. Deze heeft als symbool de i :

$$B \left\{ \frac{1}{i} \left(1 - \frac{1}{(1+i)^n} \right) \right\} - J = 0 \quad (7)$$

dus geldt ook:

$$\frac{B}{J} = i \left(1 - \frac{1}{(1+i)^n} \right)^{-1} \quad (8)$$

De rechterterm in deze vergelijking is een functie van de interne rentevoet en de levensduur. In dit geval is deze term dus gelijk aan B/J .

Als baten zijn beschouwd de bespaarde brandstofkosten en de opbrengst van aan het openbaar net geleverde electriciteit. De aanschafkosten van een windbemaling worden hier verondersteld evenredig te zijn met de wiekoppervlakte. Per hectare geldt dan voor de linker term:

$$\frac{B}{J} = \frac{A * M * G * H * K_1 + (1-E) * D * K_2}{F * K_3} \quad (9)$$

waarin:

- A = aandeel van de windbemaling in de totale bemaling $(-)$
- M = aantal maaluren ingeval er geen windbemaling was $(-)$
- G = capaciteit gemaal $(m^3 \text{ uur}^{-1} \text{ ha}^{-1} (m \text{ opvoer})^{-1})$
- H = opvoerhoogte (m)
- K_1 = brandstofkosten per m^3 water per m opvoer $(f \text{ m}^{-4})$
- E = werkelijke gedeeld door potentiële afvoer door de windbemaling $(-)$

D = in totaal opgewekte windenergie

K_2 = prijs van aan het openbaar net teruggeleverde energie

(f Wh⁻¹)

F = wiekoppervlakte

(m²)

K_3 = aanschafkosten windbemaling per m² wiek

(f m⁻²)

Gerekend is met $K_1 = f 0.0015 \text{ m}^{-4}$ (ZWIETERING, 1982a), $K_2 = f 0.12 \text{ Wh}^{-1}$, $K_3 = f 750 \text{ m}^{-2}$, $G = 5.65 \text{ m}^3 \text{ uur}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (m opvoer)⁻¹ en $H = 2.60 \text{ m}$. De overige variabelen rechts van het '=' teken zijn per simulatie verschillend. Verder is gerekend met:

$$(1-E) * D = \frac{Z * H}{0.425} * \text{RELOPP} * (\text{TOTOL} - \text{TOTCAF}) \quad (10)$$

waarin:

RELOPP = relatieve oppervlakte van het open water (%)

TOTOL = totale potentiële afvoer door de windbemaling (cm)

TOTCAF = totale werkelijke afvoer door de windbemaling (cm)

Z = energie, nodig om 1 m³ water 1 m op te voeren (Wh)

0.425 = rendement van de pomp plus de aandrijving van de pomp (-)

Met behulp van de voor iedere simulatie gevonden waarde van B/J is de i berekend volgens formule 8 bij een levensduur van 20 jaar.

Ten behoeve van de presentatie in grafieken is uit deze i een factor I afgeleid. Dit is gebeurd om in de figuren de suggestie te vermijden dat een volledige economische beoordeling is geschied. De bij de verschillende simulaties gevonden waarden zijn uitgedrukt in een relatieve maat. Hiervoor is de positie van een i ten opzichte van de kleinste en grootste gevonden i gekozen:

$$I = \frac{i - i_{\min}}{i_{\max} - i_{\min}} * 100\% \quad (11)$$

waarin:

- I = afwegingsfactor van baten tegenover aanschafkosten
bij een simulatie (%)
- i = berekende interne rentevoet bij een simulatie (-)
- $i_{\max}$ = de grootst gevonden i in de verschillende
simulaties (-)
- $i_{\min}$ = de kleinst gevonden i in de verschillende
simulaties (-)

Een hoge waarde van I betekent dat de aanschafkosten zich gunstig
verhouden tot de baten vergeleken bij de andere simulaties.

2.6. Het windvermogen in de tijd

Om de bemaling voor een zo groot mogelijk deel met windenergie uit te kunnen voeren zou het gewenst zijn dat op de dagen dat gemalen moet worden de hogere windsnelheden zouden optreden. In hoeverre dagen met hogere windsnelheden inderdaad samenvallen met dagen met afvoerbehoefte is via twee benaderingen onderzocht.

Indien de neerslagverdeling zodanig zou zijn dat het op elke dag wel een beetje regende dan zou in een polder met een klein bergend vermogen en een grote windmolen-capaciteit op sommige dagen meer water afgevoerd kunnen worden dan nodig is. Zou men deze capaciteit steeds maar kleiner kiezen, dan zou uiteindelijk honderd procent van de potentiële molenafvoer voor bemaling gebruikt kunnen worden. Omdat het echter niet op iedere dag regent zal ook in de extreme situatie van een erg kleine capaciteit in een polder met een erg klein bergend vermogen de honderdprocent niet bereikt worden, maar een percentage dat afhangt van het samenvallen van dagen met neerslag met dagen met veel wind.

Naast het gedeelte van de potentiële afvoer dat werkelijk voor bemaling gebruikt wordt, kan men ook de waarde van een andere grootte beschouwen, namelijk het aandeel van de windbemaling in de totale bemaling. Indien dagen met veel neerslag altijd zouden samenvallen met dagen met veel wind, dan nog hoeft het aandeel van de windbemaling niet 100% te bedragen. Dit zal slechts het geval zijn indien de windmolen-capaciteit nooit te klein zou zijn om alle afvoer te verzorgen. Indien echter dagen met neerslag nooit zouden samenvallen met dagen met veel wind, dan zou bij een erg groot bergend vermogen het aandeel van de windbemaling toch nog redelijk kunnen zijn. Door nu weer een extreme situatie te kiezen, namelijk een zeer grote molen-capaciteit en een erg klein bergend vermogen, kan het aandeel van de windbemaling een maat zijn voor het samenvallen van dagen met neerslag met dagen met veel wind.

Als erg grote, respectievelijk erg kleine capaciteit van de windbemaling zijn wiekoppervlakten van 20/3 (in de simulaties 25, 26 en 27) respectievelijk $1/72 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ (simulaties 28, 29 en 30) gebruikt. Het bergend vermogen is gelijk gemaakt aan nul door het aanslag-, afslag- en minimumpeil allen een gelijke waarde te geven en wel van 297 cm -NAP.

3. RESULTATEN EN DISCUSSIE

3.1. A l g e m e e n

Het verloop van het peil en de bemaling is in totaal 38 maal gesimuleerd met steeds andere waarden van de factoren, beschreven in het vorige hoofdstuk. Een simulatie besloeg steeds een tijdsverloop van 19,5 afvoerseizoenen. De uitkomsten van deze 38 simulaties zijn in bijlage 1 weergegeven. Aan de hand van deze uitkomsten is de invloed van gebiedskenmerken, technische installaties en peilbeheer op de mogelijkheden van het gebruik van windenergie nagegaan.

Ook werd de omvang berekend van de totale jaarlijkse energielevering door de gekozen windmolencapaciteiten. Hierdoor was het mogelijk om niet alleen de energie die beschikbaar was voor bemaling vast te stellen, maar ook voor eventuele levering aan het openbaar electriciteitsnet. Verder kon een schatting worden gemaakt van de correlatie tussen het optreden van wind en van neerslag.

Tot slot werden de verschillende verliesposten geschat die optreden bij de omzetting van windenergie naar opgevoerde hoeveelheden water.

3.2. D e i n v l o e d v a n d e o n d e r z o c h t e f a c t o r e n

Uit vergelijking van het aantal aanvullende maaluren van het conventioneel gemaal in elke simulatie met dat in de situatie zonder windbemaling volgt het mogelijk aandeel van de windbemaling in de totale bemaling. De totale hoeveelheid uit te malen water blijft immers in alle gevallen even groot. Door de capaciteit van de windbemaling groter te kiezen zal het aandeel van de windbemaling ook groter worden. Daartegenover staat dat er dan veel dagen zullen zijn dat de capaciteit van de windbemaling onvolledig wordt benut, met andere woorden het percentage van de opgewekte energie dat benut kan worden voor bemaling neemt af.

Het aandeel van de windbemaling en de benutting van de potentiële molenafvoer blijken het sterkst beïnvloed te worden door

het bergend vermogen van de polder, de capaciteit en de startsnelheid van de windbemaling. De terreinruwheid, de molenhoogte en het verschil tussen aan- en afslagpeil blijken minder invloed te hebben. De invloed van elk van deze factoren zal nu besproken worden.

In fig. 3 staat het aandeel van de windbemaling in de totale bemaling uitgezet het bergend vermogen. In de figuur zijn verder twee andere factoren aangegeven. De capaciteit van de windbemaling is hier uitgedrukt als de gereduceerde capaciteitsverhouding ten opzichte van die van de conventionele bemaling (par. 2.4). Het aandeel van de windbemaling is duidelijk groter bij een geringere capaciteitsverhouding, dus bij een grotere capaciteit van de windbemaling.

Door vergroting van de startsnelheid van 3 naar 5 m s⁻¹ worden windsnelheden kleiner dan 5 m s⁻¹ weliswaar niet meer benut, maar de hogere windsnelheden worden beter benut (par. 2.4). Bij een grotere capaciteitsverhouding, dus een kleine windbemaling, blijkt het effect van de hogere - dat van de lagere windsnelheden te gaan overheersen, en heeft een vergroting van de startsnelheid een groter aandeel in de bemaling tot gevolg. Bij een kleine capaciteitsverhouding is dit andersom.

In fig. 4 is het gedeelte van de potentiële molenafvoer dat werkelijk voor bemaling wordt benut uitgezet tegen het bergend vermogen. De capaciteitsverhouding werkt hier door op een manier die tegenovergesteld is van die in de vorige figuur. Bij een verhouding kleiner dan 0,50 wordt slechts een klein deel van het opgewekte windvermogen gebruikt.

In de fig. 5 en 6 staat het verloop van de afwegingsfactor I op twee manieren uitgezet. Om een hoge waarde van I te verkrijgen is een capaciteitsverhouding van minstens 3 nodig. Dit komt neer op een wiekoppervlakte van hoogstens 0,1 m² per hectare bij een opvoerhoogte van 2,60 m (tabel 3), ofwel 0,04 m² wiekoppervlakte per ha per m opvoerhoogte. Een capaciteitsverhouding van minstens 3 ten opzichte van het conventioneel gemaal met een capaciteit van 13,6 mm etm⁻¹ betekent een capaciteit van hoogstens 4 mm etm⁻¹ voor de windbemaling. Overigens is deze capaciteit omgekeerd evenredig aan het rendement van de windbemalingsinstallatie. Bij een omzetting van door de wieken opgevangen windenergie tot opgepompt water met een

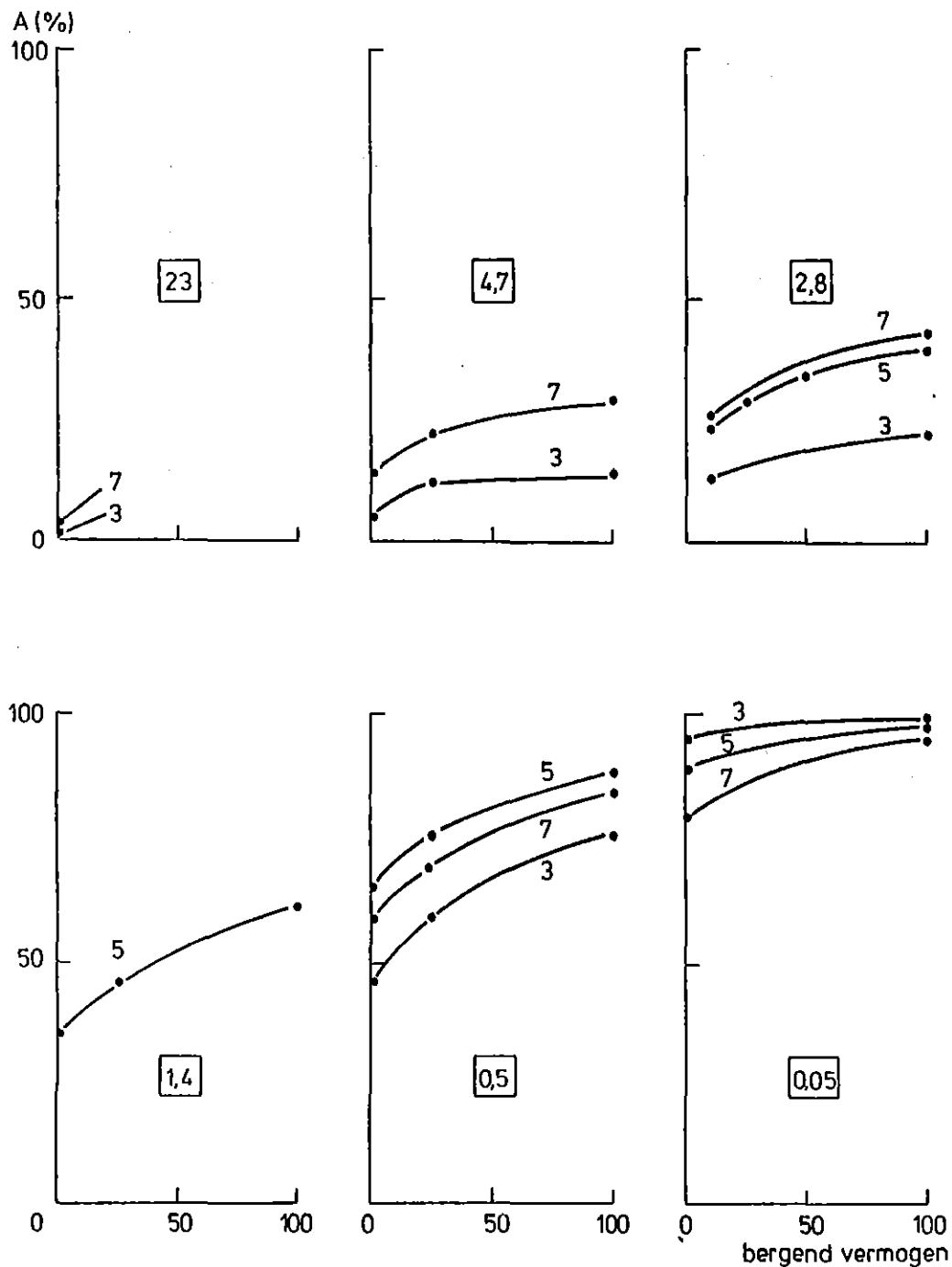


Fig. 3. Zes maal het aandeel A (%) van de windbemaling in de totale bemaling bij steeds andere capaciteitsverhouding $\boxed{23}$ en variërend bergend vermogen in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ (horizontale assen) en startsnelheid (3,5 of 7 m s^{-1}).

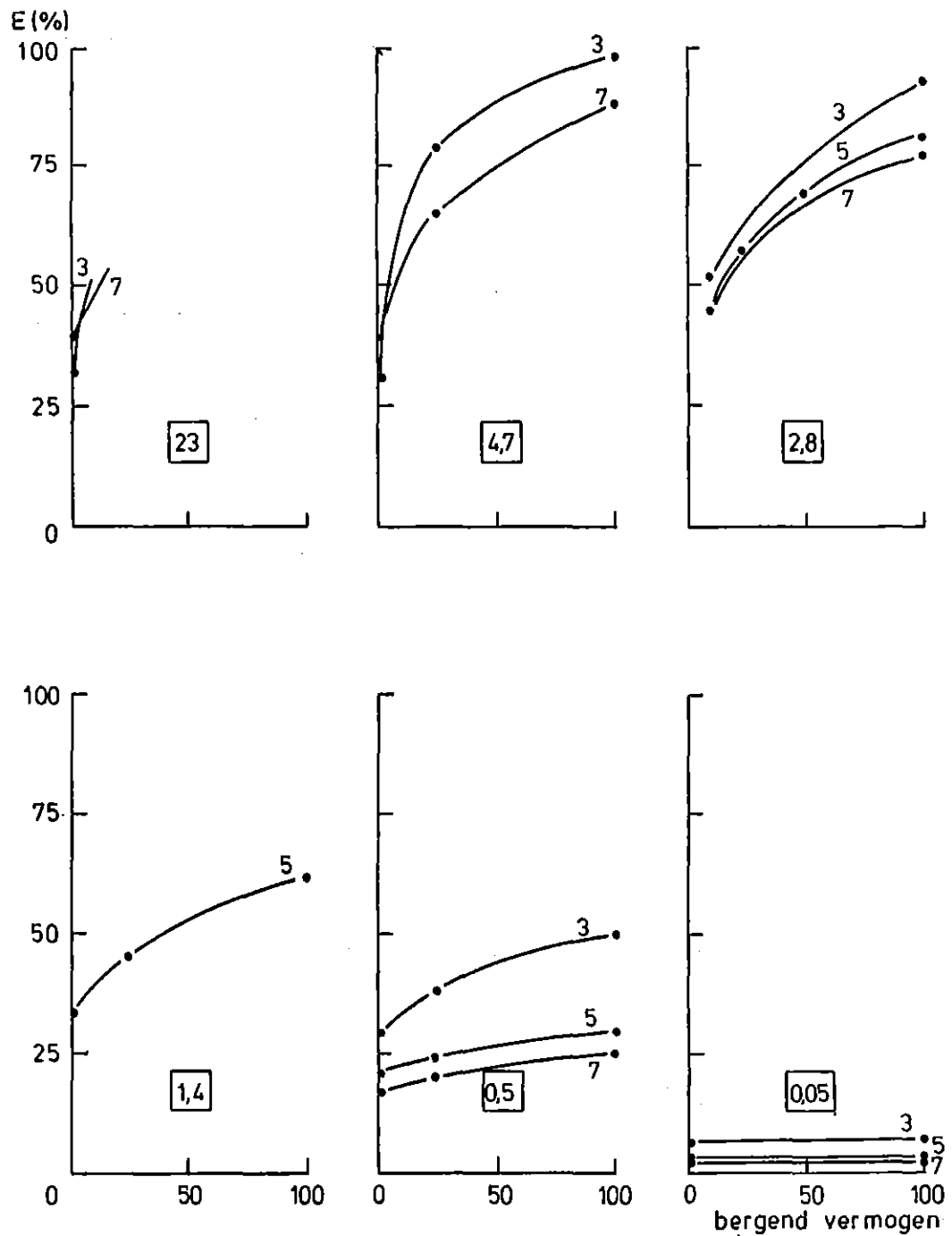


Fig. 4. Zesmaal het gedeelte E (%) bij steeds andere capaciteitsverhouding $\boxed{23}$, bergend vermogen in $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (horizontale assen) en startsnelheid (3,5 of 7 m s^{-1}). E = werkelijke- tov. potentiële afvoer door de windbemaling.

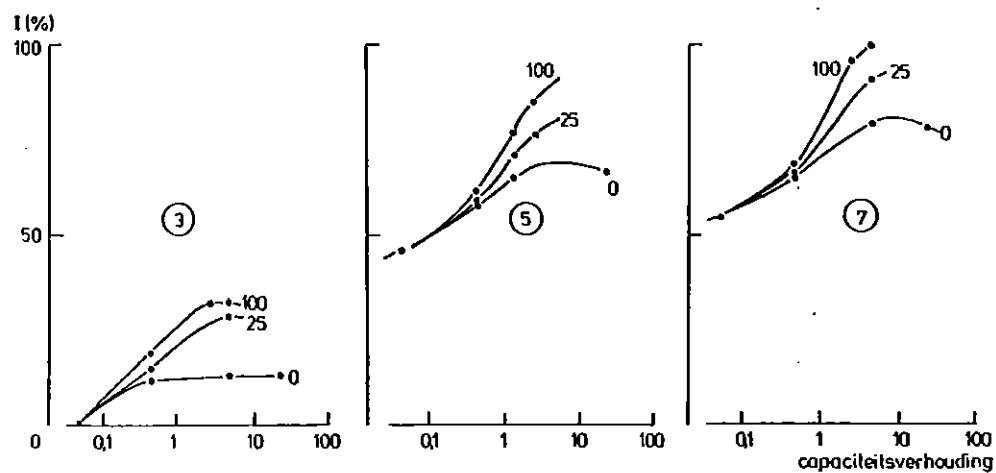


Fig. 5. De waarde van I (%) als functie van de capaciteitsverhouding bij drie verschillende startsnelheden (5). De cijfers bij de curven geven de verschillende onderzochte waarden voor het bergend vermogen van de polder.

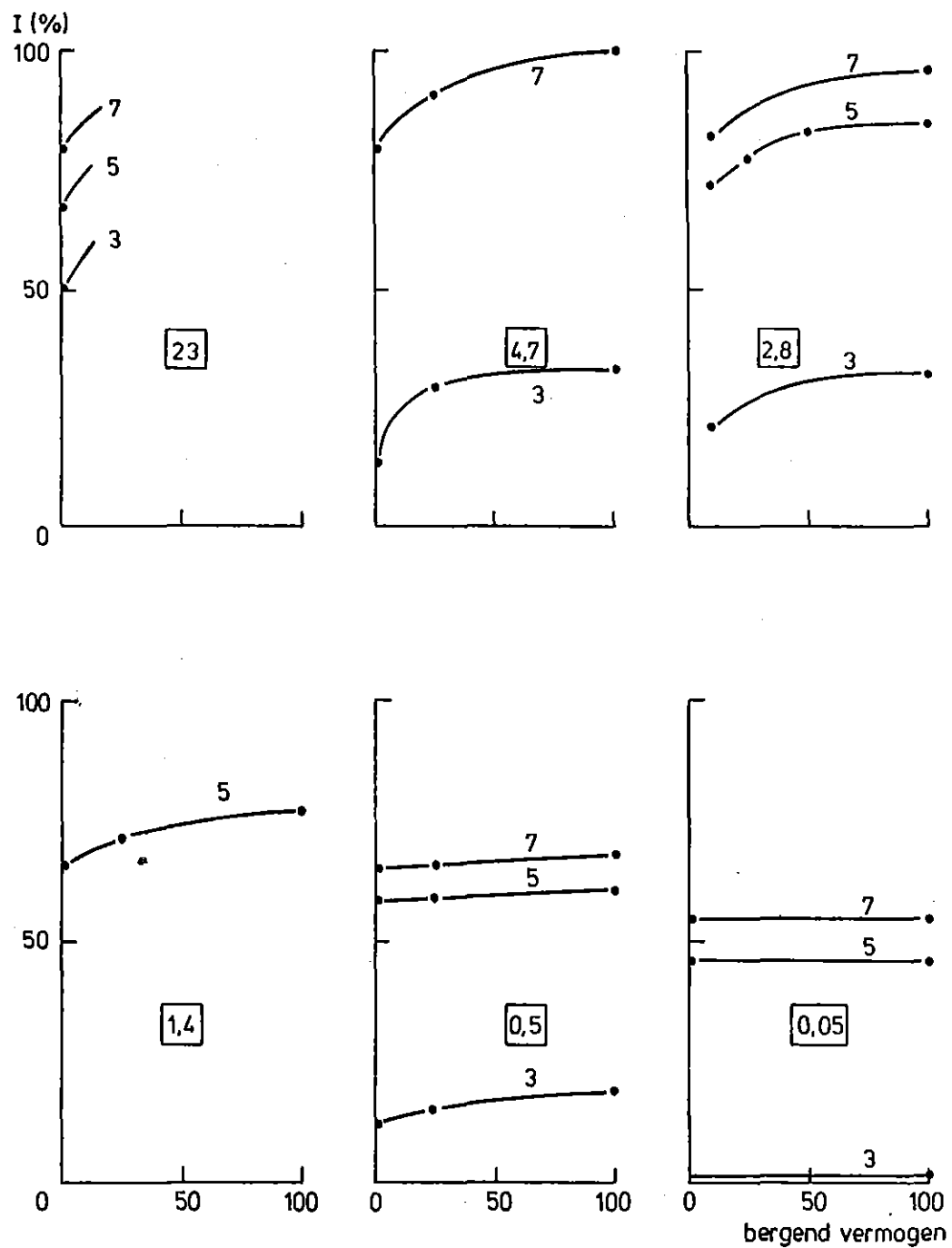


Fig. 6. De waarde van I (%) bij variërende capaciteitsverhouding $\boxed{4,7}$, bergend vermogen in m³ ha⁻¹ (horizontale assen) en start-snelheid (3,5 of 7 m s⁻¹).

rendement hoger dan de hier toegepaste 0.1275 (par. 2.4) wordt de benodigde wiekoppervlakte evenredig kleiner.

Te hoge waarden van de capaciteitsverhouding zijn in verband met het aandeel van de windbemaling (fig. 3) niet gewenst.

Door verhoging van de startsnelheid van 3 naar 5 m s^{-1} neemt de waarde van I sterk toe. Een verdere verhoging heeft minder effect. Bij capaciteitsverhoudingen in de buurt van 3 heeft een toename van het bergend vermogen een duidelijke invloed. Dit geldt vooral in het traject van 0 tot $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

De invloed van de factor terreinruwheid blijkt uit vergelijking van simulatie 4 met 24. Door vergroting van de terreinruwheid daalt de potentiële molenafvoer weliswaar met 7% maar het aandeel van de windbemaling slechts met 1%. Tussen de simulaties 4 en 23 zit een verschil in de molenhoogte. Een verhoging van deze factor van 20 naar 30 m doet de potentiële molenafvoer met 13% stijgen, maar het aandeel in de windbemaling slechts 2%. Het geringe effect van de factoren terreinruwheid en molenhoogte komt voort uit het feit dat de voor bemaling bruikbare hoeveelheid windenergie nauwelijks beïnvloed wordt door weinig frequent voorkomende piekvermogens. Dit in tegenstelling tot de jaarlijks te leveren energie, waarop deze pieken wel grote invloed hebben.

Het effect van een grotere afstand tussen het aanslag- en afslagpeil blijkt uit vergelijking van de simulaties 5 en 38. Tussen het aan- en afslagpeil zit in deze gevallen een bergend vermogen van 2 respectievelijk $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (= 2 cm peilverschil * 5% relatieve oppervlakte open water). Op de dagen dat het gemaal aanslaat wordt dus in simulatie 38 verder vooruit gemalen, zodat er voor de windbemaling op de volgende dagen minder te malen overblijft.

In simulatie 38 is het aantal conventionele maaluren dan ook 2% hoger en de werkelijke afvoer door de windbemaling 4% lager.

Bij de simulaties moest steeds een overschrijdingspeil ingevoerd worden. Het berekend aantal overschrijdingen is hier verder niet gebruikt.

De opbrengst van aan het openbaar net teruggeleverde energie levert bij een hoge startsnellheid een zekere bijdrage aan de waarde van I . In dit geval zal immers van tijd tot tijd veel meer windvermogen geproduceerd worden dan dat voor bemaling nodig is. In de simulaties 10 en 13, met startsnellheden van respectievelijk 3 en 7 m s^{-1} is de bijdrage van de factor $(1-E)*D*K_2$ aan de teller van de rechterterm van formule 9 respectievelijk 13 en 23%. Een verhoging van de prijs van de teruggeleverde energie zal via deze percentages doorwerken in de waarde van i , en dus ook weinig invloed hebben op I .

De totale aanvoer van water uit de bodem naar het open water blijkt in de doorerekende 19.5 afvoerseizoenen 33627 cm groot te zijn bij een open-water-oppervlakte van 2%. Dit komt overeen met $0.02 * 33627 = 673 \text{ cm}$ waterschijf en dit is 34 cm per afvoerseizoen.

3.3. De verdeling van het windvermogen in de tijd

Behalve het gemiddeld jaarlijks te verwachten windvermogen is ook de variatie hierin met de tijd interessant in verband met de bijdrage die dit vermogen kan leveren aan de totale jaarlijkse bemaling. De variatie over kortere perioden, bijvoorbeeld een uur, heeft tot gevolg dat een installatie niet continu op maximale capaciteit kan werken. Tot slot is de variatie van belang in verband met het feit of dagen met afvoerbehoefte al of niet samenvallen met dagen met hoge windsnellheden.

In fig. 7 staat het verloop van het jaarlijks windaanbod afgebeeld zoals dat verwerkt wordt door een windbemaling met een startsnellheid van 3 respectievelijk 7 m s^{-1} . Deze figuur is gebaseerd op de cijfers van bijlage 2. Deze potentiële afvoercapaciteit blijkt minder te variëren naarmate een lagere ontwerpsnellheid wordt gekozen. In fig. 8, gebaseerd op bijlage 3, staat het verloop van de afvoerbehoefte in de tijd. In fig. 9 tot slot, staat het verloop van het aandeel dat de windbemaling voor zijn rekening kan nemen. Deze figuur heeft betrekking op een ontwerpsnellheid van 5 m s^{-1} . Een ontwerpsnellheid van 3 m s^{-1} zal nog een regelmatiger beeld te zien geven. Fig. 9 is evenals de twee vorige figuren gebaseerd op de tussenuitkomsten van de simulaties.

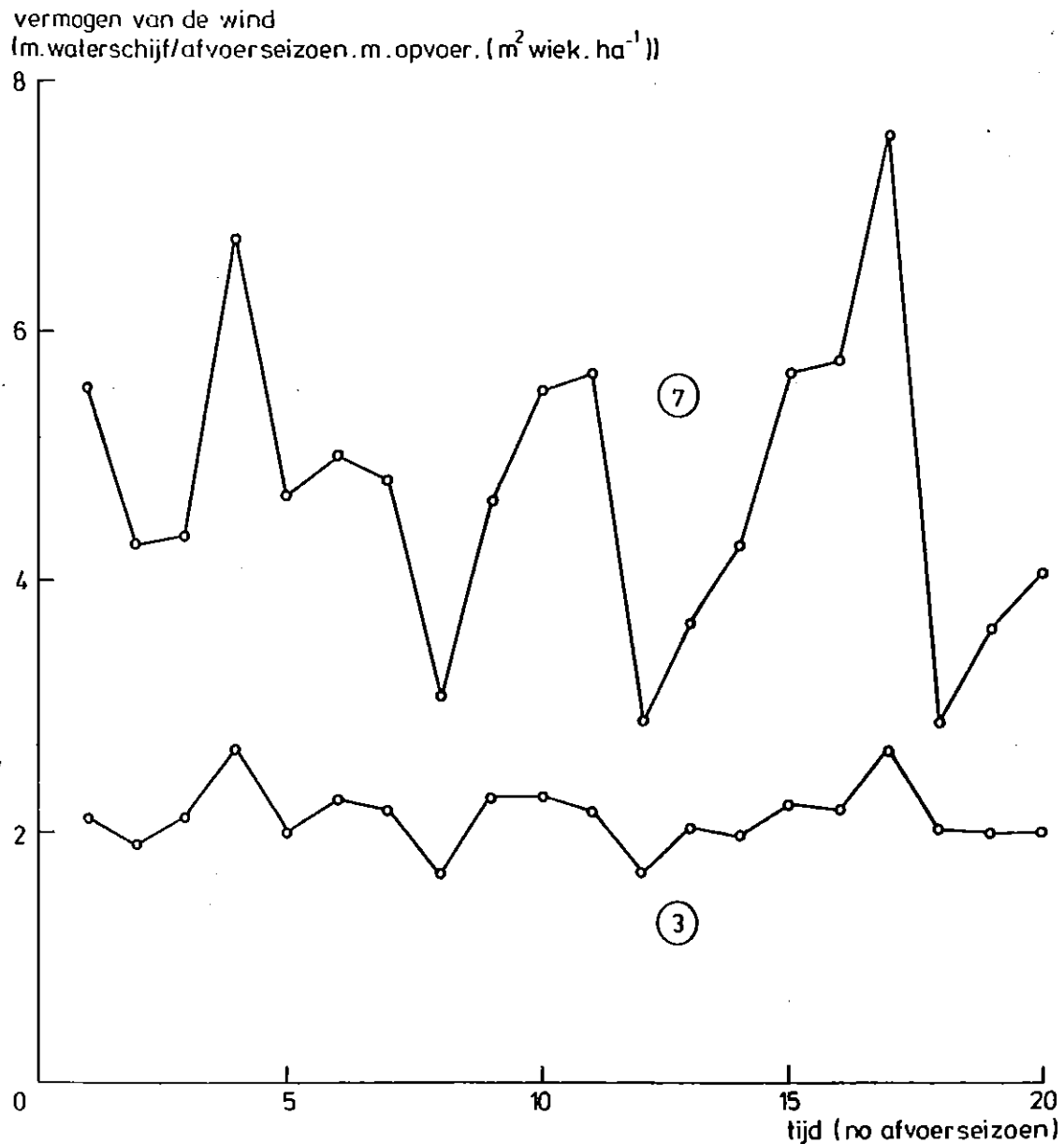


Fig. 7. Het vermogen van de wind, uitgedrukt in een aantal m waterschijf, dat per afvoerseizoen 1 m opgevoerd kan worden door een windbemaling met een wiekoppervlakte van $1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ en startsnellheden van 3 en 7 m s^{-1} ; waterschijf dit wil zeggen over zowel land- als wateroppervlak; voor rendementen zie de tekst; seizoen 1 = 1951/1952.

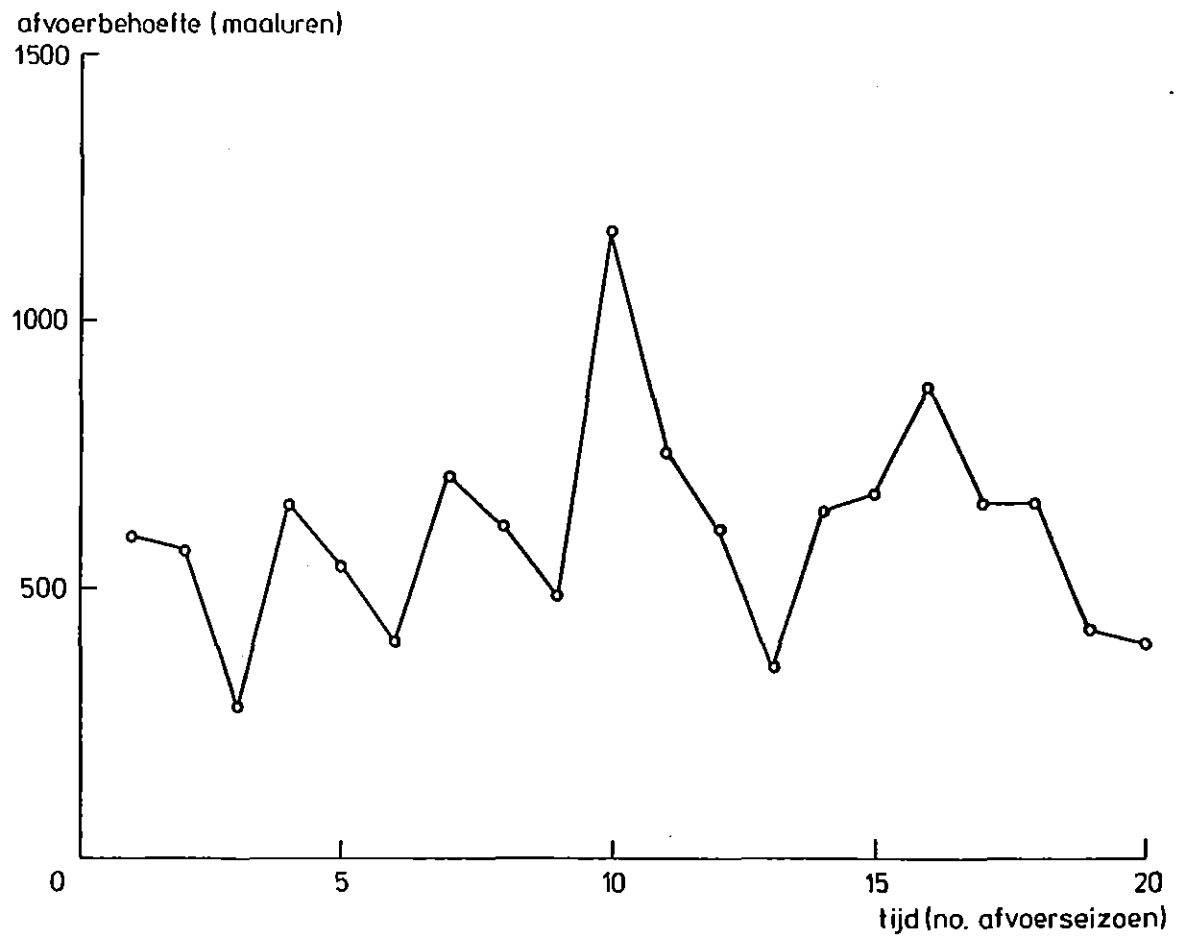


Fig. 8. De afvoerbehoefte in de achtereenvolgende afvoerseizoenen, volgens de gebruikte maalstaten; seizoen 1 = 1951/1952.

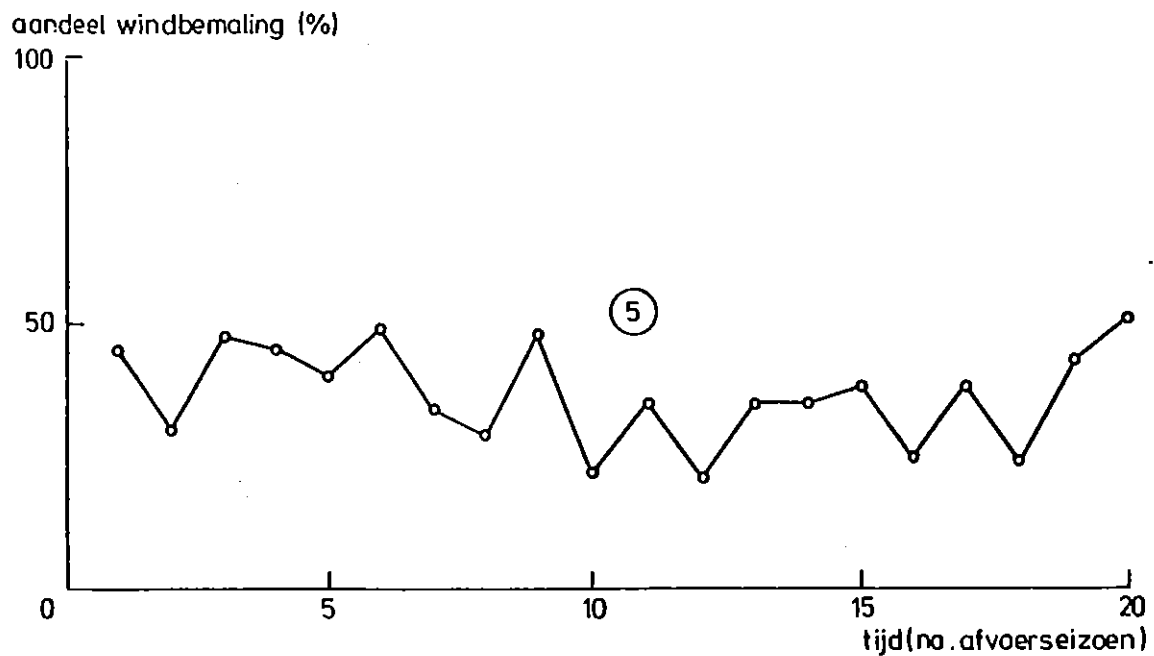


Fig. 9. Het aandeel van de windbemaling in de totale bemaling in de verschillende afvoerseizoenen, bij een capaciteitsverhouding 2.8, een startsnelheid 5 m s^{-1} en een bergend vermogen van $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

In de vorige paragraaf bleek een startsnelheid van 7 m s^{-1} nauwelijks voordeliger te zijn dan een startsnelheid van 5 m s^{-1} . Vanwege de regelmatige levering van energie zal de tweede startsnelheid de voorkeur verdienen.

De gemiddelde potentiële afvoer per afvoerseizoen bij een startsnelheid van 5 m s^{-1} is $4,22 \text{ m}$ waterschijf die over een hoogte van 1 m opgevoerd kan worden bij een wiekoppervlakte van $1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ (bijlage 2). Deze potentiële afvoer zou dus bereikt worden indien de opgewekte windenergie op ieder moment voor bemaling benut kon worden.

Maar in dit geval zal de bemalingsinstallatie nog niet ieder moment ten volle benut worden. Daarvoor zou het continu hard moeten waaien. Het maximaal vermogen van een installatie met startsnelheid van 5 m s^{-1} blijkt pas bereikt te worden bij een windsnelheid van 10 m s^{-1} en is dan $1,99 \text{ m}^3 \text{ uur}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ bij een opvoerhoogte van $2,60 \text{ m}$ en een wiekoppervlakte van $1/9 \text{ m}^2$ (tabel 1, blz. 12) overeenkomend met $1,99 * 10^{-4} * 2,60 * 9 * 4368 = 20,34 \text{ m}$ waterschijf bij een opvoerhoogte van 1 m en een wiekoppervlakte van 1 m^2 . Het quotiënt van beide opbrengsten wordt wel de belastingsfactor van de installatie genoemd en is in dit geval $4,22 : 20,34 = 21\%$.

In par. 2.6 werd gesproken over de extreme situatie van een bergend vermogen gelijk aan nul en een zeer kleine capaciteit van de windbemaling. In deze situatie zou het voor bemaling benutte deel E van de potentiële molenafvoer een maat zijn voor het al dan niet samenvallen van dagen met afvoerbehoefte met dagen met veel wind. Bij een startsnelheid van $3, 5$ en 7 m s^{-1} is E, volgens de simulaties 28, 29 en 30 respectievelijk $0,32, 0,36$ en $0,39$. Blijkbaar levert de wind ongeveer 36% van zijn vermogen op de dagen van het afvoerseizoen dat er behoefte is aan afvoer.

Deze laatste dagen beslaan gemiddeld 27% van de dagen van het afvoerseizoen (bijlage 3). Dagen met hoge windsnelheden vertonen dus nauwelijks een positieve correlatie met dagen met afvoerbehoefte.

De andere in par. 2.6 besproken extreme situatie, namelijk een bergend vermogen 0 en een erg grote capaciteit van de windbemaling, moet soortgelijke percentages leveren als hierboven, maar nu voor het aandeel dat de windbemaling in de totale bemaling heeft. In de

simulaties 25 tot en met 27 is echter te zien dat deze percentages veel hoger liggen. Hierop zal in de volgende paragraaf worden teruggekomen.

Overigens zal de overloop tussen perioden met een groot windaanbod en perioden waarin gemalen moet worden groter zijn naarmate de laatstgenoemde perioden meer gespreid zijn in de tijd. Dit zal het geval zijn in polders met kwel of polders die steeds doorgespoeld moeten worden. Naarmate een polder groter is zal de bemalingsinstallatie geleidelijker kunnen werken. Enerzijds worden plaatselijke buien afgedempt, anderszijds is de aanvoerweg naar het gemaal langer. Om dezelfde reden zullen ook polders waarin de afvoer traag reageert op neerslag, de windenergie beter kunnen benutten voor bemaling. Opgemerkt moet worden, dat polders waarin de capaciteit van het conventioneel gemaal kleiner is dan de hier bij de berekeningen aangehouden $13,6 \text{ mm.etm.}^{-1}$, de windenergie beter zullen kunnen benutten. Een kleiner gemaal zal immers langer moeten draaien om eenzelfde hoeveelheid water uit te malen. Dit betekent dat de perioden met afvoer verlengd worden en er een grotere kans bestaat op het samenvallen van perioden met wind en perioden waarin gemalen wordt.

In de vorige paragraaf werd een getal van $0,1 \text{ m}^2$ wijk per ha genoemd. Bij een startsnelheid van 5 m s^{-1} en een opvoerhoogte van $2,60 \text{ m}$ en een windbenutting van $0,55$ (fig. 4 bij bergend vermogen $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) komt dit neer op $0,55 * 2,60^{-1} * 0,1 * 422 = 8,93 \text{ cm}$ waterschijf. In de 19,5 doorberekende afvoerseizoenen bedroeg de afvoerbehoefte gemiddeld 34 cm , zodat $8,93/34 = 26\%$ op basis van windenergie kon worden uitgemaal, hetgeen overeenkomt met de waarde van het aandeel in fig. 3, dat de windbemaling innam in de totale bemaling.

3.4. B e n u t t i n g v a n d e w i n d e n e r g i e

Zoals uit het voorgaande blijkt kan niet alle potentieel door de wijkoppervlakte van de windbemalingsinstallatie opgewekte energie voor bemaling worden gebruikt. Dit is aanleiding om na te gaan waar de verschillende verliesposten zitten bij de omzetting van energie in de wind tot potentiële energie in het opgemalen water.

De wind die over een bepaald gebied waait wordt in afgezwakte vorm benut omdat ze op een beperkte hoogte wordt opgevangen boven een terrein met een bepaalde ruwheid (1). Deze afgezwakte wind wordt opgevangen door een beperkte wiekoppervlakte (2). Deze laatste is uit te drukken in een aantal m^2 per hectare of, bij vaste capaciteit van een conventioneel gemaal, in een gereduceerde capaciteitsverhouding tot dit gemaal (par. 2.4). De door een bepaalde wiekoppervlakte opgevangen windenergie wordt met een zeker rendement omgezet in opgemalen water (3). Maar deze omzetting gebeurt slechts tussen een bepaalde start- (4) en maximum-windsnelheid (5). De in dit traject van benutte windsnelheden opgewekte energie is aan een zeker maximum gebonden (6). De energie die in een bepaalde periode aldus omgezet kan worden bepaalt de potentiële afvoer door de windbemaling.

Deze potentiële capaciteit kan niet geheel voor bemaling gebruikt worden omdat er op sommige dagen geen noodzaak tot bemaling is (7) of omdat de afvoercapaciteit groter is dan nodig op die dag (8). Door het bergend vermogen van de polder kan de energie die nodig is voor de afvoer van water op de voorgaande dagen al opgewekt zijn. Hierdoor kunnen de twee vorige effecten gecompenseerd worden (9).

Indien de windsnelheid gedurende een klein deel van de dag erg hoog is dreigt door de uitmaling het peil sterk te dalen. De bemaling zal in werkelijkheid dan ook vanaf een bepaald moment gestopt worden. In het computermodel worden de uuropbrengsten van de windenergie van een dag gesommeerd, en tezamen met de aanvoer naar het oppervlaktewater verwerkt tot een peilverandering voor die dag. Door deze rekenwijze worden variaties in windenergie tijdens een dag gebufferd (10).

Het eerste effect blijkt uit vergelijking van de simulaties 23 en 24 met 4. Door verhoging van de molen van 20 naar 30 m wordt de potentiële afvoer ('TOTOL') met 13% verhoogd*. In gebieden met een grotere terreinruwheid (0,10 in plaats van 0,03) daalt deze opbrengst met 7%. De werkelijke afvoer door de windbemaling ('TOTCAF') varieert echter veel minder. Op dagen met hogere windsnelheden zal door verhoging van de molen de energieopbrengst sterk stijgen. Deze piekopbrengsten zijn voor bemaling niet goed bruikbaar. Zo werkt ook de daling van de potentiële afvoer minder sterk door in

*(zoals reeds op blz. 24 is vermeld).

de werkelijke afvoer. Voor de werkelijke afvoer op basis van wind-energie zijn de verhoging respectievelijk de verlaging 8 en 4%.

Het tweede effect, de beperkte wiekoppervlakte verklaart de verschillen in potentiële afvoer van de simulaties 4 en 33. De eerste, met een wiekoppervlakte van $0,11 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ heeft een afvoer van 1761 cm gerekend over de hele rekenperiode, de tweede met een wiekoppervlakte van $0,67 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ heeft 105 686 cm over deze zelfde tijd. De wiekoppervlakte is een keuze bij de aanschaf van een windbemaling, en zal het resultaat zijn van een afweging van kosten tegen baten. Wordt de wiekoppervlakte te groot gekozen, dan zal de potentiële afvoer namelijk te hoog worden en zal deze minder efficiënt worden benut.

Het rendement van de omzetting van door de wieken opgevangen energie naar opgevoerd water is, afhankelijk van de windsnelheid, maximaal ongeveer 12% (par. 2.4).

Een windmolen kan zodanig ontworpen worden dat hij reeds bij lage windsnelheden op gang komt. De hogere windsnelheden zullen dan slechter worden benut dan door een windmolen die bij een hogere windsnelheid op gang komt. Maar deze laatste zal over het algemeen een grotere maximum-capaciteit hebben. De combinatie van deze twee effecten leidt tot verschillen in potentiële opbrengst.

In de simulaties 1 en 7, waarin startsnelheden van 3 en 7 m s^{-1} werden ingevoerd bedraagt deze 8846 respectievelijk 19 806 cm water. De windbemaling met een lagere startsnelheid heeft een lagere potentiële afvoer maar omdat hij een groter deel van de tijd in werking is, is de energielevering veel beter gespreid in de tijd en wordt de opgewekte energie beter benut voor bemaling.

Een windmolen waarvan het vermogen meer dan lineair toeneemt met de windsnelheid zal het voordeel van de lagere- met dat van de hogere windsnelheden kunnen combineren. Dit vermogensverloop treedt onder andere op bij een molen met een directe, mechanische overbrenging. Deze molen is voor grotere capaciteiten technisch moeilijker realiseerbaar.

Het effect van de maximale windsnelheid op de energie-opbrengst is niet zo groot. Hoge windsnelheden vertegenwoordigen weliswaar een grote energie, maar deze windsnelheden komen slechts weinig voor (ZWIETERING, 1982a). De maximum windsnelheid voor de meeste windmolens is 20 m s^{-1} .

Het zevende effect, namelijk het tot op zekere hoogte samenvallen van dagen met hoge windsnelheden met dagen waarop gemalen moet worden, is in de vorige paragraaf behandeld. De dagen waarop gemalen werd bleken nauwelijks voorkeur te hebben voor dagen met hoge windsnelheid.

Daarbij komt dat op dagen met een hoge windsnelheid en noodzaak tot bemaling de capaciteit van de windbemaling te groot kan zijn. In simulatie 29 wordt van de potentieel opgewekte 2200 cm er 789 cm gebruikt voor bemaling, dit is 36%, in simulatie 32 is dit 21%.

Door het bufferend vermogen van de polder kan een teveel aan energie op andere dagen benut worden dan dat deze opgewekt is. Dit effect is duidelijk te zien aan de stijgende lijnen in de figuren 3 en 4.

Het tiende effect, de buffering van de windenergie binnen de reken-dagen van het model is waarschijnlijk de verklaring voor de verschillende uitkomsten voor het samenvallen van dagen met veel wind, met dagen met afvoerbehoefte, zoals die berekend zijn in twee extreme situaties (par. 3.3). In de situatie van een erg kleine capaciteit van de windbemaling zal dit effect geen kans hebben, in de situatie van een erg grote capaciteit wel.

Zoals boven vermeld verklaren de verschijnselen 7 tot en met 10 het feit, dat slechts een gedeelte van de uitmaling op basis van wind-energie kan geschieden, en dat de reële afvoer door de windbemaling niet gelijk is aan de potentiële. In fig. 10 staat aangegeven hoe men de figuren 3 en 4 (het aandeel en de benutting) opgebouwd kan denken uit deze verschijnselen.

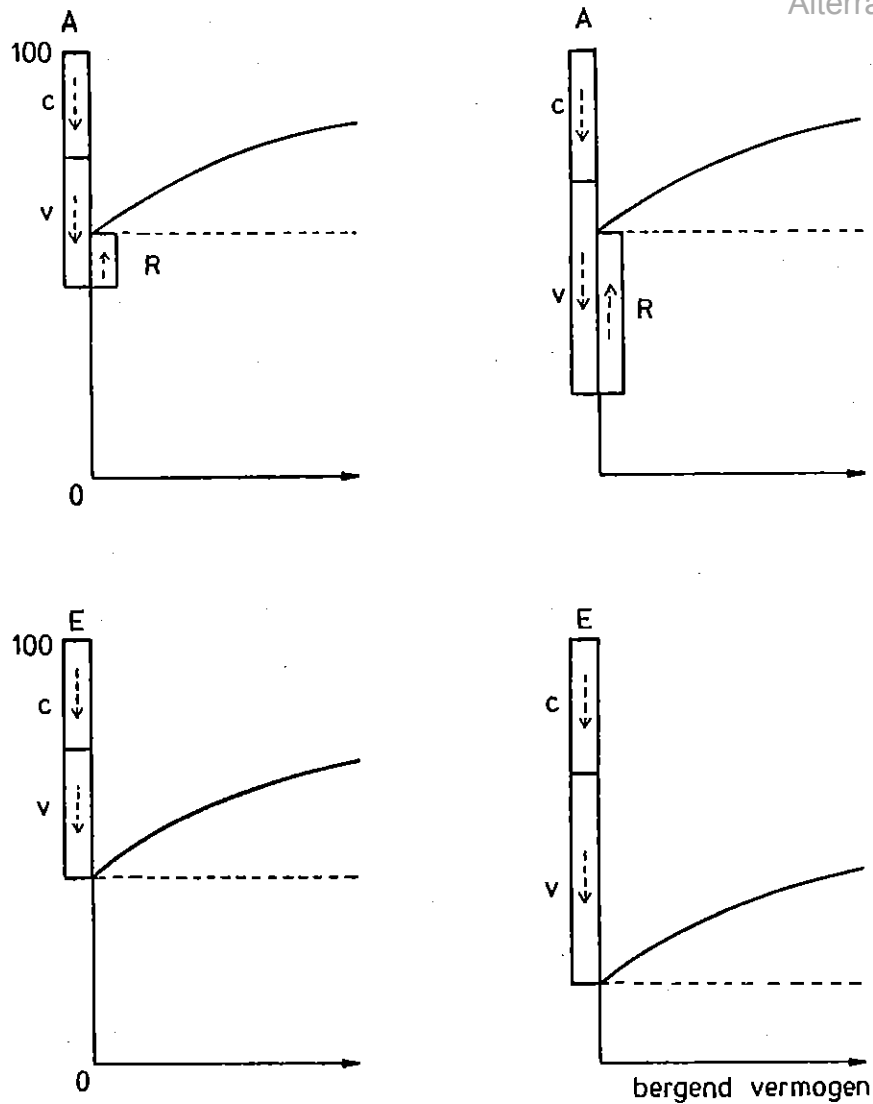


Fig. 10. De verschijnselen die leiden tot het verloop van de verschillende lijnen in de figuren 3 en 4.

A = aandeel van windbemaling in de totale bemaling, E = reële afvoer door de windbemaling als percentage van de potentiële afvoer hierdoor,

C = al of niet samenvallen van winddagen met afvoerdagen,

R = buffering binnen een dag in het rekenmodel.

Een stippellijn naar beneden is verlies, omhoog is winst. Naast deze pijlen staat het verklarend verschijnsel.

Voor verklaring zie de tekst.

4. CONCLUSIES

Het verloop van het peil van een polder werd met behulp van een computerprogramma gesimuleerd over een tijdsverloop van 20 achtereenvolgende jaren. Deze simulatie werd 38 maal herhaald waarbij de eigenschappen van de polder (bijvoorbeeld het bergend vermogen), de windbemaling en het peilbeheer steeds werden gevarieerd. Er werd vanuit gegaan, dat in de polder een conventioneel gemaal, werkend op fossiele energie, aanwezig bleef om in te kunnen zetten op momenten dat er te weinig wind was voor de windbemaling. Het in werkelijkheid opgetreden afvoergedrag van de polder werd bij de berekeningen gebruikt. Verder werd de windbemaling gekarakteriseerd met behulp van een eenvoudige vermogenscurve. Door de simulaties was het mogelijk om het effect van verschillende factoren op de toepassing van windbemaling te onderzoeken. Ook over het gedrag van de wind, voorzover van belang voor dit gebruik, werd enig inzicht verkregen.

Een windbemaling met een capaciteit ^{van} niet meer dan 4 mm etm^{-1} bleek de beste kansen te bieden. Deze capaciteit wordt verkregen indien per m opvoerhoogte een wiekoppervlakte van 0.04 m^2 per ha wordt toegepast. Voor de momenteel veel toegepaste windmolens met een diameter van 10 m houdt dit in dat deze molens het best gebruikt kunnen worden in polders met een omvang van minstens 1000 ha, indien de opvoerhoogte ongeveer 1 m is. Voor opvoerhoogten groter dan 1 m wordt de wiekoppervlakte per ha evenredig groter, en de polderoppervlakte dus evenredig kleiner.

Het bergend vermogen in het oppervlakte-water moet minstens $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ groot zijn, wat neerkomt op bijvoorbeeld 8 cm toegelaten peilvariatie bij een relatieve oppervlakte van het open water van 3%.

De aanloopsnelheid van de windbemaling dient in de buurt van 5 m s^{-1} te liggen indien in de installatie een elektrische tussenstap voorkomt. Voor installaties met een directe, mechanische overbrenging tussen wiekenstel en pomp moet de aanloopsnelheid lager liggen.

Een windbemaling wordt beter benut indien het conventioneel gemaal wordt gebruikt met een klein verschil tussen het aanslag- en afslagpeil. In polders met een grote opvoerhoogte zullen de energie-

kosten een groter aandeel in de waterschapslasten vormen. Hier zal toepassing van windenergie eerder voor de hand liggen.

Windbemaling zal allereerst in aanmerking komen in polders die een min of meer constante noodzaak tot bemaling hebben, bijvoorbeeld het optreden van kwel of als de polder een functie in het boezem-systeem heeft, dan wel veel doorspoeling plaats heeft. Verwacht kan worden dat in grotere polders de behoefte aan bemaling regelmatig in de tijd wordt. Polders waarin de afvoer relatief traag op gang komt na neerslag kunnen windenergie ook beter benutten. Ditzelfde geldt voor polders waarin het peil gedurende het afvoer-seizoen enigszins mag fluctueren, zoals in natuurgebieden.

De windbemaling zal ongeveer 30% van de totale jaarlijkse uitmaling voor zijn rekening kunnen nemen. De gemiddelde potentiële jaaropbrengst per m^2 wiekoppervlakte per hectare is een waterschijf van 400 cm hoogte die over een hoogte van 1 m opgemalen wordt.

Wat betreft het gedrag van de wind in de tijd bleek dat de windsnelheid op dagen dat gemalen moest worden niet of nauwelijks hoger was dan op de overige dagen.

LITERATUUR

Maalstaten polder Ursem 1951-1970

ZWIETERING, F.W., 1982a. Polderbemaling, windenergie. Tussenrapportage van een onderzoek naar de perspectieven voor het gebruik van windenergie bij de moderne polderbemaling.

ICW-nota 1353, Wageningen

_____ 1982b. WINE, een simulatieprogramma voor het verloop van het peil en de bemaling van een polder. ICW-nota 1391, Wageningen

SYMBOLLEN

N.B. het product van twee variabelen is in deze nota altijd aangegeven met een '*' tussen deze twee variabelen

A	= gemiddeld aandeel van de windbemaling in de totale bemaling gedurende 19.5 afvoerseizoenen	%
AANSL	= open-waterpeil waarbij conventionele bemaling werkend op olie of electriciteit, aanslaat	cm -NAP
AFSL	= peil waarbij conventionele bemaling afslaat	cm -NAP
ALPHA	= exponent van de macht waarmee de reactie van afvoer op neerslag beschreven kan worden	-
B	= economische baten in een bepaald jaar	f
CAP	= capaciteit van de conventionele bemaling bij een bepaalde opvoerhoogte	$m^3 \text{ uur}^{-1} \text{ ha}^{-1}$
CV	= het verloop van de capaciteit van de windbemaling bij variërende windsnelheid	
D	= opgewekte windenergie in 19.5 afvoerseizoenen	Wh
E	= werkelijke afvoer door de windbemaling als gedeelte van de potentiële ^{x)} afvoer door de windbemaling, gemiddeld over 19.5 afvoerseizoenen	%
F	= de gemeenschappelijke oppervlakte van de cirkels die door de ronddraaiende wieken beschreven worden. Dit betreft zoveel cirkels als er molens per hectare voorkomen	$m^2 \text{ ha}^{-1}$
η	= rendement van een omzetting van energie van de ene vorm in een andere	-
G	= capaciteit conventioneel gemaal	$m^3 \text{ uur}^{-1} \text{ ha}^{-1} (\text{m opvoer})^{-1}$
H	= opvoerhoogte	m
HOOGT	= molenhoogte	m
i	= interne rentevoet	-
I	= economische afwegingsfactor	%
J	= aanschaffkosten	f
K_1	= brandstofkosten van het over 1 m opvoeren van 1 m^3	$f \text{ m}^{-4}$

x) potentieel d.w.z. dat de windbemaling nooit gestopt behoefde te worden vanwege het bereiken van MIN

K_2	= prijs van aan het openbaar net geleverde energie	$f \cdot wh^{-1}$
K_3	= aanschafkosten windbemaling per m^2 wiek	$f \cdot m^{-2}$
M	= aantal maaluren van de conventionele bemaling indien er geen windbemaling wordt gebruikt	-
MIN	= peil, beneden welk de windbemaling buiten werking wordt gesteld	cm -NAP
MOL4	= windsnelheid waarboven de windbemaling buiten werking wordt gesteld	$m \cdot s^{-1}$
NCW	= netto contante waarde	f
OVPEIL	= een willekeurig in het computerprogramma in te voeren peil, waarvan het aantal overschrijdingen wordt berekend	cm -NAP
P	= vermogen van de wind	$J \cdot s^{-1}$
Q	= capaciteit van de windbemaling bij een bepaalde opvoerhoogte	$m^3 \cdot uur^{-1} \cdot ha^{-1}$
QH	= het verloop van de capaciteit van de conventionele bemaling, werkend op olie of electriciteit, bij variërende opvoerhoogte	
r	= rente	-
ρ	= soortelijke massa van de lucht	$kg \cdot m^{-3}$
RELOPP	= relatieve oppervlakte van het open water	%
RUWH	= ruwheidslengte van een terrein	m
SOMCA	= som over een rekenperiode, van de aanvoer naar het open water tengevolge van neerslag	cm
SOMCAF	= som over een rekenperiode, van de werkelijke afvoer door de windbemaling	cm
SOMFOS	= som over een rekenperiode, van het berekend aantal maaluren op fossiele energie	-
SOMMAL	= som over een rekenperiode, van het aantal maaluren op fossiele energie, ingevoerd ten behoeve van de aanvoerberekening	-
SOMOL	= som over een rekenperiode, van de potentiële af- voer door de windbemaling; potentieel d.w.z. dat de windbemaling nooit gestopt behoefde te worden vanwege het bereiken van MIN	cm
SOMOVE	= som over een rekenperiode, van het aantal over- schrijdingen van een opgegeven peil	-

TEN = aan het openbaar net eventueel terug te
 leveren energie; $TEN = (1-E) \cdot D \div 1000$

TOTCA.....TOTOVE = som over alle rekenperioden tezamen
 van bovengenoemde variabelen die beginnen met
 "SOM"

V_c	= windsnelheid waarbij de windbemaling op gang komt	$m \ s^{-1}$
V_d	= windsnelheid waarvan bij het ontwerp is uitgegaan	$m \ s^{-1}$
V_r	= die windsnelheid, waarboven de capaciteit van de windbemaling constant blijft	$m \ s^{-1}$
Z	= energie die nodig is om $1 \ m^3$ water 1 m op te voeren indien geen verliezen optreden	Wh

N.B. SOMCA, SOMCAF, SOMOL, TOTCA, TOTCAF en TOTOL zijn
 centimeter waterschijf van alleen het oppervlaktewater

BIJLAGEN

- 1. INVOER EN UITVOER VAN DE SIMULATIEBEREKENINGEN**
- 2. VERMOGEN VAN DE WIND IN DE VERSCHILLENDE AFVOERSEIZOENEN**
- 3. AFVOERBEHOEFTE VOOR DE VERSCHILLENDE AFVOERSEIZOENEN**

INVOER EN UITVOER VAN DE SIMULATIEBEREKENINGEN

In deze bijlage staat de invoer en de uitvoer van de simulatie berekeningen, waarvan de resultaten in de grafieken 2 tot en met 6 zijn afgebeeld. Waar hier gesproken wordt over capaciteitsverhouding betekent deze de gereduceerde capaciteitsverhouding (paragraaf 2.4). Achter 'periode' wordt steeds de begin- en einddatum van het eerste afvoerseizoen vermeld. Hierbij is 01280 de 280ste dag van jaar 01, dat is 1 oktober 1951. In iedere simulatie zijn $19.5 \times 6 \times 31 = 3627$ dagen doorgerekend. Te beginnen bij TOTAL wordt de uitvoer gegeven.

simulatiernr.	1	2	3
capaciteitsverhouding	2.8	2.8	2.8
start-windsnelheid	3	3	5
bergend vermogen	10	100	10
periode: begin	01280	01280	01280
: eind	02093	02093	02093
aantal perioden	20	20	20
RELOPP	2	2	2
ALPHA	0.7	0.7	0.7
HOOGT	20	20	20
RUWH	0.03	0.03	0.03
Vc	3	3	5
VQ	0.0715	0.0715	0.1986
Qmax	0.429	0.429	1.986
MOL4	20	20	20
CAP	5.65	5.65	5.65
AANSL	296.50	296.50	296.50
AFSL	297.50	297.50	297.50
MIN	302.00	347.00	302.00
OVPEIL	299.50	322.00	299.50
TOTMAL	11903	11903	11903
TOTFOS	10327	9249	9110
TOTOL	8846	8846	17616
TOTCAF	4572	8219	8011
TOTCA	33627	33627	33627
TOTOVE	1276	2793	1286
A	13	22	23
E	52	93	45
TEN	145	21	327
i	-0.0390	-0.0260	+0.0214
I	21	32	72

4	5	6	7
2.8	2.8	2.8	2.8
5	5	5	7
25	50	100	10
01280	01280	01280	01280
02093	02093	02093	02093
20	20	20	20
2	2	2	2
0.7	0.7	0.7	0.7
20	20	20	20
0.03	0.03	0.03	0.03
5	5	5	7
0.1986	0.1986	0.1986	0.3892
1.986	1.986	1.986	5.449
20	20	20	20
5.65	5.65	5.65	5.65
296.50	296.50	296.50	296.50
297.50	297.50	297.50	297.50
309.50	322.00	347.00	302.00
303.25	309.50	322.00	299.50
11903	11903	11903	11903
8434	7700	7214	8769
17616	17616	17616	19806
10091	12163	14196	8971
33627	33627	33627	33627
1574	1918	2269	1485
29	35	39	26
57	69	81	45
256	185	116	368
+0.0238	+0.0355	+0.0378	+0.0340
74	83	85	82

simulatiernr.	8	9	10
capaciteitsverhouding	2.8	4.7	4.7
start-windsnelheid	7	3	3
bergend vermogen	100	0	25
periode: begin	01280	01280	01280
: eind	02093	02093	02093
aantal perioden	20	20	20
RELOPP	2	2	2
ALPHA	0.7	0.7	0.7
HOOGT	20	20	20
RUWH	0.03	0.03	0.03
Vc	7	3	3
∇Q	0.3892	0.0429	0.0429
Qmax	5.449	0.257	0.257
MOL4	20	20	20
CAP	5.65	5.65	5.65
AANSL	296.50	297.00	296.50
AFSL	297.50	297.00	297.50
MIN	347.00	297.00	309.50
OVPEIL	322.00	297.00	303.25
TOTMAL	11903	11903	11903
TOTFOS	6827	11305	10496
TOTOL	19806	5304	5304
TOTCAF	15257	1691	4208
TOTCA	33627	33627	33627
TOTOVE	2331	3627	2168
A	43	05	12
E	77	32	79
TEN	155	123	37
i	+0.0500	-0.0481	-0.0286
I	96	13	29

11	12	13	14
4.7	4.7	4.7	4.7
3	7	7	7
100	0	25	100
01280	01280	01280	01280
02093	02093	02093	02093
20	20	20	20
2	2	2	2
0.7	0.7	0.7	0.7
20	20	20	20
0.03	0.03	0.03	0.03
3	7	7	7
0.0429	0.2335	0.2335	0.2335
0.257	3.270	3.270	3.270
20	20	20	20
5.65	5.65	5.65	5.65
296.50	297.00	296.50	296.50
297.50	297.00	297.50	297.50
347.00	297.00	309.50	347.00
322.00	297.00	303.25	322.00
11903	11903	11903	11903
10243	10284	9277	8452
5304	11882	11882	11882
5195	4576	7668	10445
33627	33627	33627	33627
3207	3627	2043	2754
14	14	22	29
98	39	65	88
4	248	143	49
-0.0250	+0.0299	+0.0450	+0.0552
32	79	91	100

simulatiernr.	15	16	17
capaciteitsverhouding	0.5	0.5	0.5
start-windsnelheid	3	3	3
bergend vermogen	0	25	100
periode: begin	01280	01280	01280
: eind	02093	02093	02093
aantal perioden	20	20	20
RELOPP	2	2	2
ALPHA	0.7	0.7	0.7
HOOGT	20	20	20
RUWH	0.03	0.03	0.03
Vc	3	3	3
VQ	0.4290	0.4290	0.4290
Qmax	2.574	2.574	2.574
MOL4	20	20	20
CAP	5.65	5.65	5.65
AANSL	297.00	296.50	296.50
AFSL	297.00	297.50	297.50
MIN	297.00	309.50	347.00
OVPEIL	297.00	303.25	322.00
TOTMAL	11903	11903	11903
TOTFOS	6378	4900	3017
TOTOL	53078	53078	53078
TOTCAF	15610	20170	26718
TOTCA	33627	33627	33627
TOTOVE	3627	900	921
A	46	59	75
E	29	38	50
TEN	1247	1119	896
i	-0.0494	-0.0455	-0.0415
I	12	15	19

18	19	20	21
0.5	0.5	0.5	1.4
7	7	7	5
0	25	100	0
01280	01280	01280	01280
02093	02093	02093	02093
20	20	20	20
2	2	2	2
0.7	0.7	0.7	0.7
20	20	20	20
0.03	0.03	0.03	0.03
7	7	7	5
2.3354	2.3354	2.3354	0.3972
32.696	32.696	32.696	3.972
20	20	20	20
5.65	5.65	5.65	5.65
297.00	296.50	296.50	297.00
297.00	297.50	297.50	297.00
297.00	309.50	347.00	297.00
297.00	303.25	322.00	297.00
11903	11903	11903	11903
4902	3741	1876	7763
118843	118843	118843	35232
19780	23458	30021	11696
33627	33627	33627	33627
3627	893	828	3627
59	69	84	35
17	20	25	33
3368	3243	3020	800
+0.0133	+0.0152	+0.0178	+0.0139
65	66	68	65

simulatiernr.	22	23	24
capaciteitsverhouding	1.4	2.8	2.8
start-windsnelheid	5	5	5
bergend vermogen	25	25	25
periode: begin	01280	01280	01280
: eind	02093	02093	02093
aantal perioden	20	20	20
RELOPP	2	2	2
ALPHA	0.7	0.7	0.7
HOOGT	20	30	20
RUWH	0.03	0.03	0.10
Vc	5	5	5
VQ	0.3972	0.1986	0.1986
Qmax	3.972	1.986	1.986
MOL4	20	20	20
CAP	5.65	5.65	5.65
AANSL	296.50	296.50	296.50
AFSL	297.50	297.50	297.50
MIN	309.50	309.50	309.50
OVPEIL	303.25	303.25	303.25
TOTMAL	11903	11903	11903
TOTFOS	6395	8159	8589
TOTOL	35232	19840	16450
TOTCAF	15915	10879	9649
TOTCA	33627	33627	33627
TOTOVE	1252	1403	1629
A	46	31	28
E	45	55	59
TEN	657	305	231
i	+0.0207	+0.0395	+0.0214
I	71	87	72

25	26	27	28
0.05	0.05	0.05	23
3	5	7	3
0	0	0	0
01280	01280	01280	01280
02093	02093	02093	02093
20	20	20	20
2	2	2	2
0.7	0.7	0.7	0.7
20	20	20	20
0.03	0.03	0.03	0.03
3	5	7	3
4.2895	11.9154	23.3541	0.0089
25.737	119.154	326.958	0.054
20	20	20	20
5.65	5.65	5.65	5.65
297.00	297.00	297.00	297.00
297.00	297.00	297.00	297.00
297.00	297.00	297.00	297.00
297.00	297.00	297.00	297.00
11903	11903	11903	11903
627	1276	2461	11778
530718	1056892	1188438	1106
31856	30023	26673	353
33627	33627	33627	33627
3627	3627	3627	3627
95	89	79	01
06	03	02	32
16961	34914	39500	26
-0.0634	-0.0090	+0.0017	-0.0480
0	46	55	13

simulatienr.	29	30	31
capaciteitsverhouding	23	23	0.05
start-windsnelheid	5	7	3
bergend vermogen	0	0	100
periode: begin	01280	01280	01280
: eind	02093	02093	02093
aantal perioden	20	20	20
RELOPP	2	2	2
ALPHA	0.7	0.7	0.7
HOOGT	20	20	20
RUWH	0.03	0.03	0.03
Vc	5	7	3
VQ	0.0248	0.0487	4.2895
Qmax	0.248	0.681	25.737
MOL4	20	20	20
CAP	5.65	5.65	5.65
AANSL	297.00	297.00	296.50
AFSL	297.00	297.00	297.50
MIN	297.00	297.00	347.00
OVPEIL	297.00	297.00	322.00
TOTMAL	11903	11903	11903
TOTFOS	11624	11560	61
TOTOL	2200	2478	530718
TOTCAF	789	970	35384
TOTCA	33627	33627	33627
TOTOVE	3627	3627	50
A	02	03	99
E	36	39	07
TEN	48	51	16841
i	+0.0157	+0.0306	-0.0635
I	67	79	0

32	33	34	35
0.5	0.5	0.5	0.5
5	5	5	7
0	25	100	100
01280	01280	01280	01280
02093	02093	02093	02093
20	20	20	20
2	2	2	2
0.7	0.7	0.7	0.7
20	20	20	20
0.03	0.03	0.03	0.03
5	5	5	7
1.1915	1.1915	1.1915	23.3541
11.915	11.915	11.915	326.958
20	20	20	20
5.65	5.65	5.65	5.65
297.00	296.50	296.50	296.50
297.00	297.50	297.50	297.50
297.00	309.50	347.00	347.00
297.00	303.25	322.00	322.00
11903	11903	11903	11903
4120	2987	1384	584
105686	105686	105686	1188438
21989	25601	31501	33886
33627	33627	33627	33627
3627	659	542	296
165	75	88	95
21	24	30	03
2846	2723	2522	39255
+0.0049	+0.0068	+0.0089	+0.0017
58	59	61	55

simulatiernr.	36	37	38
capaciteitsverhouding	1.4	0.05	2.8
start-windsnelheid	5	5	5
bergend vermogen	100	100	50
periode: begin	01280	01280	01280
: eind	02093	02093	02093
aantal perioden	20	20	20
RELOPP	2	2	5
ALPHA	0.7	0.7	0.7
HOOGT	20	20	20
RUWH	0.03	0.03	0.03
Vc	5	5	5
VQ	0.3972	11.9154	0.1986
Qmax	3.972	119.154	1.986
MOL4	20	20	20
CAP	5.65	5.65	5.65
AANSL	296.50	296.50	296.00
AFSL	297.50	297.50	298.00
MIN	347.00	347.00	307.00
OVPEIL	322.00	322.00	302.00
TOTMAL	11903	11903	11903
TOTFOS	4627	221	7855
TOTOL	35232	1056892	7046
TOTCAF	21934	34917	4670
TOTCA	33627	33627	13451
TOTOVE	1523	128	1812
A	61	98	34
E	62	03	66
TEN	452	34747	201
i	+0.0280	-0.0090	+0.0341
I	77	46	82

VERMOGEN VAN DE WIND PER AFVOERSEIZOEN

Aantal m waterschijf dat per afvoerseizoen 1 m opgevoerd kan worden door een windbemaling met een wiekoppervlakte van $1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$; waterschijf d.w.z. over zowel het water- als het landoppervlak van het gebied; voor rendementen zie de tekst; seizoen 1 = 1951/1952.

Afvoerseizoen	$V_c = 3$	$V_c = 5$	$V_c = 7$
1	2.11	4.58	5.55
2	1.90	3.80	4.30
3	2.12	4.05	4.36
4	2.65	5.76	6.73
5	2.01	4.07	4.70
6	2.25	4.51	5.00
7	2.17	4.31	4.81
8	1.66	2.94	3.08
9	2.29	4.36	4.64
10	2.29	4.70	5.51
11	2.17	4.68	5.65
12	1.68	2.84	2.87
13	2.05	3.64	3.67
14	1.98	3.88	4.29
15	2.22	4.67	5.65
16	2.19	4.74	5.77
17	2.66	6.13	7.57
18	2.01	3.30	2.89
19	2.00	3.59	3.62
20	1.99	3.78	4.05
Totaal	42.40	84.33	94.71
Gemiddeld	2.12	4.22	4.74

Deze cijfers zijn ontleend aan de tussenuitkomsten van de simulaties.

Ter controle: uit simulatie 1 blijkt (bijlage 1) de totale potentiële afvoer van 19.5 seizoenen bij een opvoerhoogte van 2.6 m en een wiekoppervlak van 9^{-1} een waarde van 8846 cm waterhoogte in het open water te hebben. Bij een relatieve oppervlakte van het open water van 0.02 komt dit neer op:

$$8846 * 2.6 * 9 * 0.01 * 0.02 = 41.40$$

$$41.40 + 1.00 = 42.40 \text{ m waterschijf}$$

Van seizoen 20 waren slechts resultaten beschikbaar van de eerste helft van het seizoen. De cijfers in de tabel voor dit seizoen zijn verkregen door de resultaten van de eerste helft te verdubbelen.

AFVOERBEHOEFTE PER AFVOERSEIZOEN

Seizoen	Maaldagen	Maaluren	<u>Maaluren</u> <u>Maaldagen</u>
1	47	599	12,7
2	44	577	13,1
3	24	282	11,8
4	51	661	13,0
5	44	545	12,4
6	32	408	12,7
7	61	717	11,8
8	50	570	11,4
9	46	489	10,6
10	82	1 169	14,3
11	57	757	13,3
12	48	614	12,8
13	36	358	9,9
14	56	649	11,6
15	56	682	12,2
16	69	883	12,8
17	54	661	12,2
18	49	660	13,5
19	38	423	11,1
	— +	— +	—
Totaal	944	11 704	
Gemiddeld	50	616	12,4

seizoen 1 is 1951/1952

Van seizoen 20 zijn de cijfers onvolledig

Een seizoen telt 182 dagen; $50/182 = 27\%$.

Deze cijfers zijn ontleend aan de tussenuitkomsten van de simulaties.