

**stichting
mathematisch
centrum**



AFDELING MATHEMATISCHE BESLISKUNDE

BN 10/71

DECEMBER

P.J. WEEDA

BEPALING VAN DE OPTIMALE OOGSTCAPACITEIT OP EEN LANDBOUWBEDRIJF MET BEHULP VAN SIMULATIE

2e boerhaavestraat 49 amsterdam

BIBLIOTHEEK MATHEMATISCH CENTRUM
AMSTERDAM

Printed at the Mathematical Centre, 49, 2e Boerhaavestraat, Amsterdam.

The Mathematical Centre, founded the 11-th of February 1946, is a non-profit institution aiming at the promotion of pure mathematics and its applications. It is sponsored by the Netherlands Government through the Netherlands Organization for the Advancement of Pure Research (Z.W.O), by the Municipality of Amsterdam, by the University of Amsterdam, by the Free University at Amsterdam, and by industries.

1. Inleiding

In 1966 en 1967 werd door de opdrachtgever *) in samenwerking met het Mathematisch Centrum een simulatiemodel ontworpen, teneinde de optimale oogst- en oogstverwerkingscapaciteit van een landbouwbedrijf te bepalen. Dit model is beschreven in [1] en [2]. Gedurende 1971 werd dit model verder ontwikkeld en uitgebreid. Het resultaat hiervan is een tweetal simulatieprogramma's geweest, welke door de auteur van dit rapport zijn geschreven.

Het eerste programma is ingericht voor de capaciteitsplanning op lange termijn. Met dit programma zijn een aantal combinaties van maai-dors-, droog- en opslagcapaciteit doorgerekend. De resultaten hiervan zijn weergegeven in sectie 11 en hebben als basis gediend voor het bepalen van de gewenste capaciteit van een nog te stichten tweede silo-bedrijf.

Het tweede programma zal jaarlijks worden gebruikt voor de capaciteitsplanning op korte termijn. Dit houdt in het simuleren van de oogstwerkzaamheden tijdens de dan reeds begonnen werkelijke oogstperiode op basis van de op dat moment beschikbare gegevens. De beslissing die moet worden genomen is het wel of niet inzetten van extra maaidorscapaciteit in de vorm van loonwerkers. Beide programma's kunnen worden gebruikt om nieuwe tarwerassen kwantitatief te kunnen waarden.

2. De bedrijfssituatie

De werkzaamheden bij de oogst omvatten: .

- a) het maaien en dorsen van de gewassen;
- b) het transport naar en de ontvangst bij de droger;
- c) het opslaan en drogen van vochtig graan;
- d) de afvoer per schip van gedroogd graan.

Op het totale bebouwde oppervlak van 18000 ha worden vier gewassen geteeld: koolzaad, gerst, haver en tarwe. Voor de oogst wordt gebruik gemaakt van maaidorsers. De snelheid waarmee het maaien en dor-

*) De afdeling Operationeel Onderzoek van de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.

sen geschiedt is afhankelijk van de vochtigheid van het gewas. Na het maaien en dorsen wordt het gewas naar de drooginstallatie getransporteerd. Hier wordt het tijdelijk opgeslagen in de ontvangstruimte. Indien het graan reeds voldoende droog is wordt het vanuit de ontvangstruimte rechtstreeks naar het gereedliggende schip gebracht. Indien het graan te vochtig is wordt het in de opslagruimte opgeslagen om gedroogd te worden.

Het aantal maaidorsers, de opslagcapaciteit en de droogcapaciteit moeten nu zodanig worden vastgesteld dat de gemiddelde jaarlijkse oogstkosten bestaande uit de gewasverliezen en de kosten van het oogstapparaat minimaal zijn. De beslissingsvariabelen bij de capaciteitsbepaling zijn het aantal maaidorsers x , de droogcapaciteit y in tonnen per uur en de opslagcapaciteit z . Het is ook mogelijk met het programma een onderzoek te doen naar de meest gewenste oppervlakteverdeling tussen de gewassen.

3. Indeling van de vochtigheid van het gewas in vochtklassen

De bepaling van de optimale oogstcapaciteit wordt bemoeilijkt door de grote variatie in het weer tijdens de oogstperiode. Het weer bepaalt de vochtigheid van de korrels en deze bepaalt in sterke mate het verloop van de oogstwerkzaamheden. Het te oogsten gewas wordt daartoe ingedeeld in vier vochtklassen op grond van het vochtpercentage p van de korrels. Deze vier vochtklassen worden onderling gescheiden door een drietal grenzen g_1 , g_2 en g_3 welke per gewas zijn vastgesteld. De oogstwerkzaamheden zijn voor iedere vochtklasse verschillend.

Vochtklasse 1 heeft niet te worden ingedroogd en kan direkt worden afgevoerd; er geldt $0 < p \leq g_1$.

Vochtklasse 2 moet worden ingedroogd tot vochtklasse 1, doch dit indrogen heeft niet meteen te gebeuren; er geldt $g_1 < p \leq g_2$.

Vochtklasse 3 moet zo gauw mogelijk worden ingedroogd tot vochtklasse 2 met het oog op de beperkte houdbaarheid; er geldt $g_2 < p \leq g_3$.

Vochtklasse 4 is te vochtig om te worden geoogst; er geldt $p > g_3$.

Tijdens de oogstperiode is het gewas op ieder tijdstip in een van deze vier vochtklassen. De oogstperiode van een gewas kan worden opgevat als een reeks van aaneengesloten tijdsintervallen met constante vocht-klasse per tijdsinterval. Deze tijdsintervallen zullen voortaan vochtintervallen worden genoemd. Aangenomen wordt dat het graan bij aankomst in de ontvangstruimte dezelfde vochtklasse heeft als het graan te velde.

Uit het bovenstaande volgt verder dat alleen graan van vochtklasse 2 en 3 wordt opgeslagen in de opslagruimte om te worden gedroogd.

4. Berekening van de vochtintervallen uit de actuele weergegevens.

De simulatie wordt uitgevoerd met de actuele weergegevens in de maanden juli, augustus en september vanaf 1931 tot heden. De weergegevens worden per gewas omgerekend tot vochtintervallen. Voor deze omrekening zijn twee aparte programma's geschreven door H. van Vliet van de Rekenafdeling, die de invoer van de vochtintervallen leveren voor de twee simulatieprogramma's.

De weergegevens bestaan uit de tijdstippen waarop een weeromslag heeft plaatsgevonden en twee grootheden welke respectievelijk de aard en de intensiteit van het weer bepalen in de tijdsintervallen tussen twee opeenvolgende omslagtijdstippen. Deze tijdsintervallen zullen we in het vervolg weerintervallen noemen. De twee gegeven grootheden zijn het weertype j , dat weergeeft of er sprake is van straling ($j=1$), dauw ($j=2$) of regen ($j=3$) en de intensiteit w van het weerkenmerk.

Stel dat voor een bepaald jaar de omslagtijdstippen gegeven worden door de reeks t_n , $n = 0, 1, 2, \dots, N$. Het tijdstip t_N is het laatste omslagtijdstip voor 1 oktober. Voor ieder gewas zijn per jaar gegeven een begintijdstip, een bij dit tijdstip behorend vochtpercentage en een eindtijdstip. Het begintijdstip en eindtijdstip voor gewas k geven we aan met t_{n_k} en t_{N_k} $k = 1, 2, 3, 4$ respectievelijk.

Voor haver en tarwe welke het laatste maaidorsrijp zijn geldt $N_3 = N_4 = N$, terwijl voor koolzaad en gerst N_1 resp. N_2 zo gekozen

zijn dat de oogst in ieder geval uiterlijk op dat tijdstip gereed is. Per gewas k worden nu op de tijdstippen t_m , $m = n_k + 1, \dots, N_k$ de bijbehorende vochtpercentages $p_m(k)$ berekend met de formule

$$(1) \quad p_m(k) = b(k, j_{m-1}) - (b(k, j_{m-1}) - p_{m-1}(k)) e^{-c(k, j_{m-1}) w_{m-1}}.$$

Hierin zijn $b(k, j)$ en $c(k, j)$ constant voor vaste k en j . Deze berekening wordt per jaar voor iedere gewas uitgevoerd.

Verondersteld wordt nu dat het vochtpercentage met voldoende nauwkeurigheid tijdens een weerinterval lineair verloopt. De vochtintervallen worden dan bepaald door de volgende uitgangspunten:

1. De vochtklasse stellen we 4 in de volgende gevallen
 - a) als $p > g_3$,
 - b) als $j = 3$ (regen),
 - c) gedurende het dagelijks tijdsinterval tussen 19.00 en 9.00 uur dat er geen oogst plaatsvindt.

In de gevallen b) en c) ligt de oogst stil maar er wordt wel gedroogd en kan voor de simulatie zonder bezwaar de vochtklasse 4 gesteld worden.

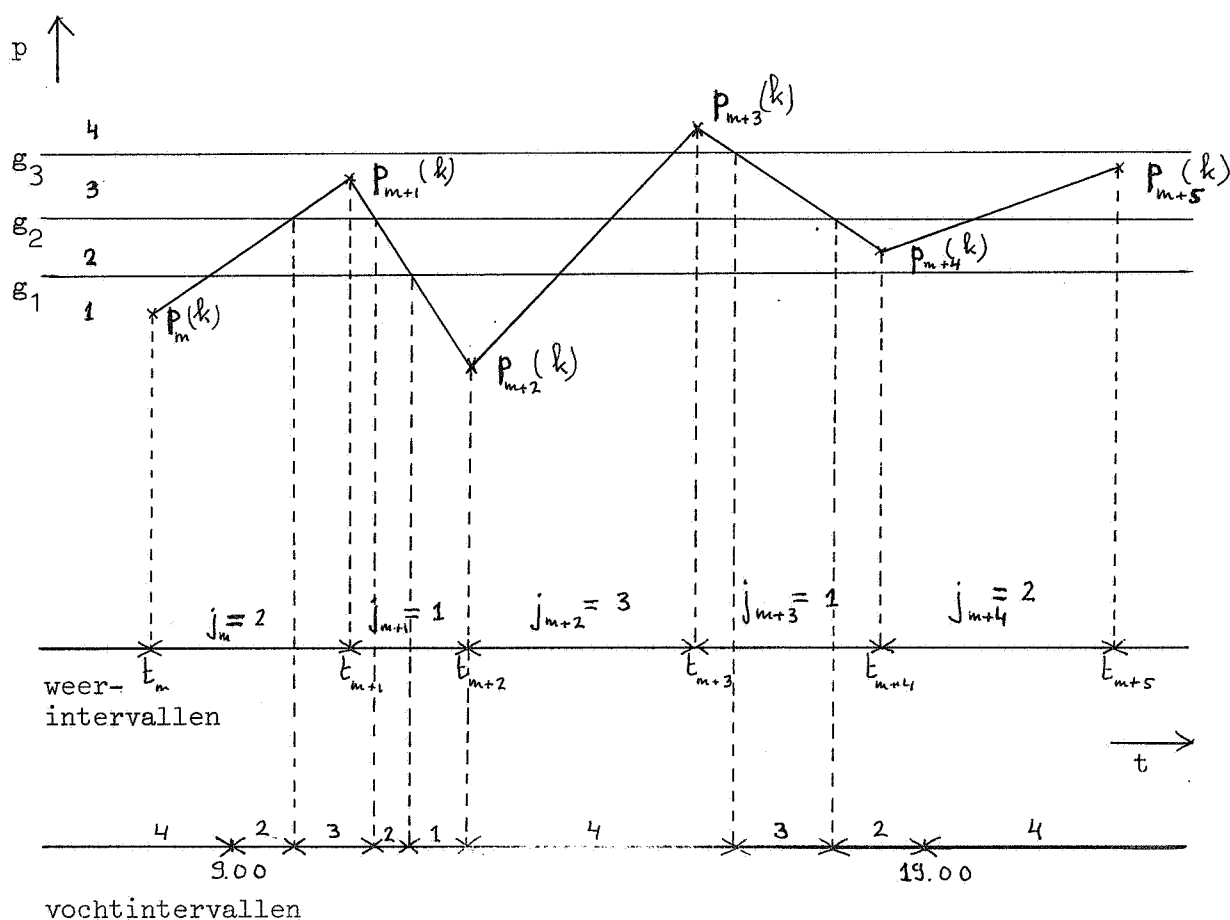
2. In de overige tijdsintervallen worden de vochtintervallen bepaald door de snijpunten van de rechte lijnen door $p_m(k)$ en $p_{m+1}(k)$, $m = n_k, \dots, N_k - 1$ met de grenzen g_1 , g_2 en g_3 .

De procedure is toegelicht in figuur 1.

Het eerste invoerprogramma gaat uit van ponskaarten van de opdrachtgever, waarop de tijdstippen t_m en de bijbehorende vochtpercentages $p_m(k)$ voor $k = 1, 2, 3, 4$ en $m = n_k, \dots, N_k$ voor ieder te simuleren jaar voorkomen. In dit programma worden de vochtintervallen berekend en uitgevoerd. De uitvoer van dit programma dient als invoer van het simulatieprogramma voor de capaciteitsplanning op lange termijn. Hiervan behoeft de omrekening in weerintervallen slechts eenmaal te geschieden.

Het tweede invoerprogramma verzorgt de invoer van het simulatieprogramma voor de capaciteitsplanning op korte termijn. Hierbij moeten

de vochtpercentages wel eerst worden berekend met formule (1). Daarna vindt de omrekening tot vochtintervallen plaats. Dat beide berekeningen moeten worden gedaan hangt samen met het gebruik van het 2e simulatieprogramma. Hierbij wordt van de weergegevens van een of meer jaren uit het verleden gebruik gemaakt. Het begintijdstip, het beginvochtpercentage en het eindtijdstip zijn per gewas voor het huidige jaar bekend. Het vochtverloop wordt per gewas doorgerekend op basis van de weergegevens uit een daartoe gekozen periode uit het verleden.



Figuur 1. De constructie van de vochtintervallen uit de weerintervallen.

5. De kosten van het oogstapparaat

De volgende kosten van het oogstapparaat worden bij de simulatie in rekening gebracht.

1. De kosten van de maaidorsers met bijbehorend materieel en personeel. Het gaat hier om de kosten van
 - a) maaidorsers
 - b) wieltrekkers
 - c) rupstrekken
 - d) zaadwagens
 - e) personeel.

De jaarlijkse vaste kosten zijn voor ieder van deze onderdelen gespecificeerd afhankelijk van het aantal maaidorsers x . Van de onderdelen a), b) en e) zijn ook de kosten per uur bij volledige dorscapaciteit voor ieder gewas gespecificeerd. Deze uurkosten zijn eveneens afhankelijk van het aantal maaidorsers.

2. De kosten van de ontvangstcapaciteit. Ook deze categorie is gekoppeld aan het aantal maaidorsers en is daarnaast afhankelijk van het wel of niet inzetten van loonwerkers, indien het door hen geoogste graan op het eigen bedrijf wordt gedroogd. De kosten van dit onderdeel zijn gegeven als vaste jaarlijkse kosten.
3. De kosten van de opslag. Deze omvatten vaste jaarlijkse kosten, afhankelijk van de opslagcapaciteit z .
4. De kosten van het drogen. Deze omvatten eveneens slechts vaste jaarlijkse kosten welke afhangen van de droogcapaciteit y .

Alle kosten componenten zijn berekend op vervangingsbasis. Bij deze berekening is rekening gehouden met de bezettingsgraad van de onderdelen.

6. De verlieskosten

Tijdens het op het veld staan en het oogsten treden korrelverliezen op, welke achteraf kunnen worden gemeten nadat de oogst heeft

plaatsgevonden. Aan deze meetresultaten over een aantal jaren is door de Plantenteeltkundige dienst een kwadratische funktie aangepast welke het percentage van de geoogste hoeveelheid geeft welke verloren is gegaan. Dit percentage wordt gegeven door $at^2 + bt + c$ waarvan t de tijd in dagen voorstelt na de rijpingsdatum. In het programma wordt gewerkt met het gemiddelde verliespercentage op de n^e dag na de rijpingsdatum dat volgt uit

$$(2) \quad \int_n^{n+1} (at^2 + bt + c) dt = an^2 + (a+b)n + \frac{1}{3}a + \frac{1}{2}b + c.$$

De bijbehorende kosten worden verkregen door dit verliespercentage eerst te vermenigvuldigen met de dagoogst in tonnen waardoor de verliezen in tonnen worden verkregen en vervolgens met de prijs per ton.

Bij tarwe treden na de schotdatum behalve extra korrelverliezen ook kwaliteitsverliezen op. De extra korrelverliezen bedragen 50% van de normale korrelverliezen zoals die uit (2) volgen. De kwaliteitsverliezen worden berekend door per geoogste ton na de schotdatum een vast bedrag in rekening te brengen.

Wegens het ontbreken van de weergegevens na 1 oktober kan de simulatie na deze datum niet worden voortgezet. Voor de korrelverliezen en de oogstkosten per ton na 1 oktober tezamen wordt totaal de helft van de prijs per ton in rekening gebracht.

7. De simulatie van de opgeslagen hoeveelheden vochtig graan

Beschouwd wordt in deze sectie het verloop van de opgeslagen hoeveelheden van vochtklassen 2 en 3 als funktie van de tijd gedurende een vochtinterval $[r,s)$. Voor dit onderdeel van de simulatie is in het programma een aparte procedure ontwikkeld. Deze procedure wordt per run van 36 jaar ongeveer 9000 maal aangeroepen.

Aan het begin van een vochtinterval wordt eerst de aanvoer in tonnen per uur van geoogst graan naar de ontvangstruimte berekend welke gedurende het beschouwde vochtinterval geldt. Hiertoe wordt het aantal maaidorsers x vermenigvuldigd met de maaidorssnelheid welke geldt voor het gewas en de heersende vochtklasse, en daarna met een

factor welke het percentage van de tijd aangeeft dat een maaidorsen daadwerkelijk met maaidorsen bezig is. De aanvoer van vochtklasse i $i = 1, 2, 3$ geven we aan met a_i . Daar vochtklasse 1 niet wordt opgeslagen is a_1 voor het simuleren van de opgeslagen hoeveelheden niet van belang, maar natuurlijk wel voor het verloop van de oogst zelf. Voor de wiskundige beschrijving van dit onderdeel van de simulatie voeren we de volgende notatie in:

$v_i(t)$ = hoeveelheid van vochtklasse i , $i = 2, 3$, aanwezig in de opslagruimte op tijdstip $t \in [r, s)$,

$v(t) \stackrel{\text{def}}{=} v_2(t) + v_3(t)$,

b_i = hoeveelheid van vochtklasse i , welke per uur wordt ingedroogd tot vochtklasse $i - 1$, $i > 1$ en $b_1 \stackrel{\text{def}}{=} 0$,

h_i = helling van het lineair verloop van de aanwezige hoeveelheid van vochtklasse i , $i = 2, 3$,

$h \stackrel{\text{def}}{=} h_2 + h_3$.

Op tijdstip $t = r$ aan het begin van het vochtinterval $[r, s)$ zijn o.a. bekend $v_2(r)$, $v_3(r)$, a_2 en a_3 . Van a_2 en a_3 is hoogstens één positief. Indien de vochtklasse 1 of 4 is, zijn beide nul. Vochtklasse 3 heeft bij het indrogen voorrang hetgeen betekent dat vochtklasse 3 eerst geheel ingedroogd moet worden tot vochtklasse 2 alvorens aan het indrogen van vochtklasse 2 kan worden begonnen. Vochtklasse 3 wordt ingedroogd met een snelheid y ton per uur, terwijl vochtklasse 2 wordt ingedroogd tot vochtklasse 1 met een snelheid van $2y$ ton per uur. De factor 2 is het gevolg van het feit dat $g_3 - g_2 = g_2 - g_1 = 4\%$, zodat vochtklasse 3 gemiddeld 4% moet worden ingedroogd tot het gemiddelde vochtpercentage van vochtklasse 2 en vochtklasse 2 gemiddeld 2% om de grens g_1 van vochtklasse 1 te bereiken.

De maximale opslagcapaciteit bedraagt z ton. De aanwezige hoeveelheid $v_3(t)$ van vochtklasse 3 mag met het oog op bederf niet meer dan $44y$ bedragen. Dit is de hoeveelheid die in twee dagen kan worden ingedroogd, rekening houdend met het feit dat er 22 uur per etmaal echt gedroogd wordt.

Indien $v(t)$ de waarde z bereikt gaat een fraktie μ , $0 \leq \mu \leq 1$ van de oorspronkelijke aanvoer door. De helling van de totaal aanwezige hoeveelheid wordt dan gegeven door $h(\mu)$. μ is nu het grootste getal ≥ 0 en ≤ 1 , waarvoor $h(\mu) = 0$.

Indien $v_3(t)$ de waarde $44y$ bereikt dan gaat een fraktie μ_3 van de aanvoer a_3 door zodanig dat $h_3(\mu_3) = 0$.

In principe gelden de volgende algemene formules voor het verloop van de opgeslagen hoeveelheden gedurende een vochtinterval $[r, s)$.

$$(3) \quad v_i(t) = v_i(r) + h_i(t-r), \quad \text{voor } i = 2, 3,$$

$$(4) \quad h_i = a_i + b_{i+1} - b_i, \quad \text{voor } i = 2, 3,$$

$$(5) \quad v(t) = v(r) + h \cdot (t-r),$$

$$(6) \quad h = a_2 + a_3 - b_2.$$

In deze formules hangen de hellingen h_2 en h_3 beide af van $v_2(t)$ en $v_3(t)$. Er kunnen zich de volgende 6 situaties voordoen.

Situatie S_1 : de droger wordt geheel ingezet in vochtklasse 3, de ruimte is niet vol en er is minder dan $44y$ van vochtklasse 3. Er geldt

$$v_3(t) \text{ en } h_3 \text{ niet beide nul,}$$

$$v_2(t) \geq 0,$$

$$v_3(t) < 44y,$$

$$v(t) < z.$$

Voor b_i geldt dat $b_3 = y$ en $b_2 = 0$.

Voor h_i geldt volgens (4) dat $h_3 = a_3 - y$ en $h_2 = a_2 + y$.

Uit (6) volgt $h = a_2 + a_3$.

Situatie S_2 : de droger wordt geheel ingezet in beide vochtclassen en de ruimte is niet vol. Er geldt

$$v_3(t) = 0 \text{ en } h_3 = 0,$$

$$v_2(t) \text{ en } h_2 \text{ niet beide nul,}$$

$$v(t) < z.$$

Voor b_i geldt dat $b_3 = a_3$ en $b_2 = 2(y - a_3)$.

Voor h_i geldt volgens (4) dat $h_3 = 0$ en $h_2 = a_2 + a_3 - 2(y - a_3)$.

Voor h volgt uit (6) dat $h = a_2 + a_3 - 2(y - a_3)$.

Situatie S_3 : de droger wordt uitsluitend benut voor het indrogen van de aanvoer en de ruimte is leeg. Er geldt

$$v_3(t) = 0 \text{ en } h_3 = 0$$

$$v_2(t) = 0 \text{ en } h_2 = 0.$$

Situatie V_1 is identiek met S_1 , maar dan met volle ruimte, dus $v(t) = z$. De aanvoer bedraagt μa_i voor vochtklasse i , $i = 2, 3$. Daar $h(\mu) = \mu a_2 + \mu a_3$ volgt uit de definitie van μ

$$(7) \quad \mu = 0.$$

Het gevolg van (7) is dat $h_3 = -y$ en $h_2 = y$.

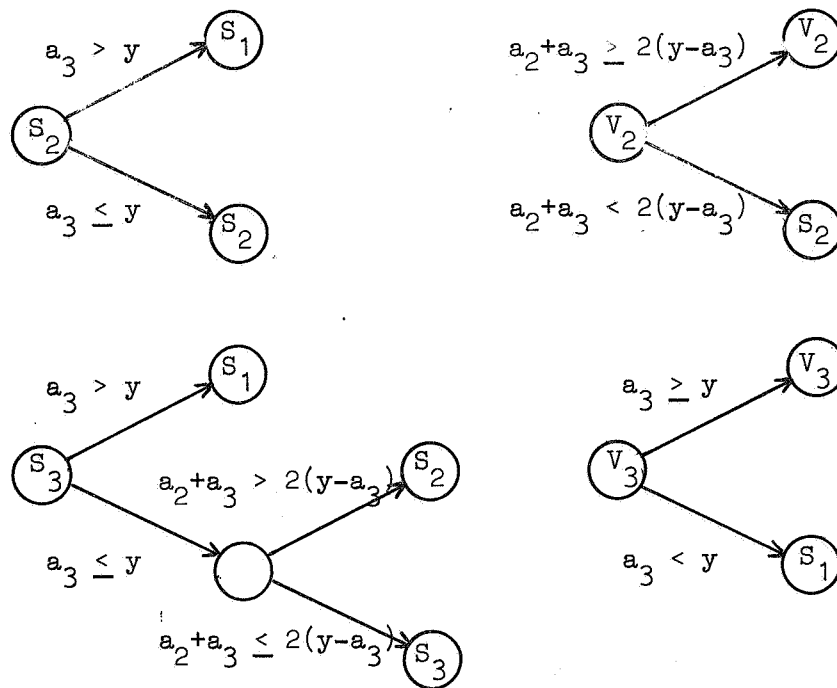
Situatie V_2 is identiek met S_2 , maar dan met volle ruimte, dus $v(t) = z$. De aanvoer bedraagt μa_i voor vochtklasse i , $i = 2, 3$. Daar $h(\mu) = \mu a_2 + \mu a_3 - 2(y - \mu a_3)$ volgt uit de definitie van μ

$$(8) \quad \mu = \frac{2y}{a_2 + 3a_3}.$$

Situatie V_3 is identiek met S_1 behalve dat $v_3(t) = 44y$ in plaats van $v_3(t) < 44y$. De aanvoer van vochtklasse 3 bedraagt $\mu_3 a_3$. Daar $h_3(\mu_3) = \mu_3 a_3 - y$ volgt uit de definitie van μ_3

$$(9) \quad \mu_3 = \frac{y}{a_3}.$$

De situatie aan het begin van het vochtinterval $[r, s)$ wordt bepaald op grond van de oude situatie en de nieuwe aanvoeren a_2 en a_3 . Daar bij een oude situatie S_1 of V_1 geldt dat $v_3(r) > 0$ en deze hoeveelheid altijd eerst moet worden ingedroogd blijft de situatie ongewijzigd. In de overige situaties kan wel een wijziging optreden. Figuur 2 geeft hierover uitsluitsel.



Figuur 2. Bepaling van de situatie op $t = 2$ uit de oude situatie.

Gedurende het vochtinterval $[r, s)$ kunnen nul, een of meer situatieveranderingen optreden. Stel dat op tijdstip t , $r \leq t < s$ de situatie bekend is. Door de volgende gebeurtenissen kan een situatieverandering optreden in het tijdsinterval (t, s) :

- a) Vochtklasse 3 bereikt $44y$ (tijdstip t_0). t_0 volgt uit

$$(10) \quad t_0 = t + \frac{44y - v_3(t)}{h_3}.$$

- b) De ruimte loopt vol (tijdstip t_1). t_1 volgt uit

$$(11) \quad t_1 = t + \frac{z-v(t)}{h}.$$

c) Vochtklasse i , $i = 2, 3$ raakt uitgeput (tijdstip t_i). t_i volgt uit

$$(12) \quad t_i = t - \frac{v_i(t)}{h}.$$

Indien we definieëren

$$(13) \quad \bar{t}_k = \begin{cases} t_k & \text{als } t < t_k < s \\ s & \text{anders,} \end{cases}$$

dan volgt het tijdstip $t_{\min}$, waarop de eerstvolgende situatieverandering na t plaatsvindt, uit

$$(14) \quad t_{\min} = \min_{k=0,1,2,3} \bar{t}_k.$$

Er vindt geen situatieverandering in (t,s) plaats als $t_{\min} = s$. Een overzicht van de situatieveranderingen welke kunnen optreden, wordt aangetroffen in onderstaande tabel. Een streepje correspondeert met $\bar{t}_k = s$.

$t_{\min} =$	$\bar{t}_0$	$\bar{t}_1$	$\bar{t}_2$	$\bar{t}_3$
$S_1 \rightarrow$	V_3	V_1	-	S_2
$S_2 \rightarrow$	-	V_2	S_3	-
$S_3 \rightarrow$	-	-	-	-
$V_1 \rightarrow$	-	-	-	S_2 of V_2
$V_2 \rightarrow$	-	-	-	-
$V_3 \rightarrow$	-	V_1	-	-

Tabel 1. De mogelijke situatieveranderingen.

Indien $t_{\min} = \bar{t}_3$ in situatie V_1 dan wordt de oorspronkelijke aanvoer hersteld. Vervolgens wordt μ opnieuw bepaald uit (6). Indien $\mu \geq 1$ wordt de nieuwe situatie S_2 anders V_2 .

Hetzelfde resultaat als met de hierboven beschreven simulatie tijdens een vochtinterval $[r, s)$ kan worden verkregen met lineaire programmering. Hiertoe voeren we de volgende variabelen in

x_i = gerealiseerde totale aanvoer van vochtklasse i , $i = 2, 3$ tijdens $[r, s)$.

y_i = totale hoeveelheid graan van vochtklasse i welke tijdens $[r, s)$ wordt ingedroogd tot vochtklasse $i - 1$, $i = 2, 3$.

De formulering luidt:

$$(15) \quad \max: y_3 + \epsilon y_2$$

onder de voorwaarden:

$$\begin{aligned} x_i &\leq a_i(s-r) & i = 2, 3 \\ y_3 + \frac{1}{2}y_2 &\leq y(s-r) \\ v_3(s) &\leq 44y \\ v_2(s) + v_3(s) &\leq z \\ (16) \quad v_3(r) + x_3 - y_3 &= v_3(s) \\ v_2(r) + x_2 + y_3 - y_2 &= v_2(s) \\ \left. \begin{aligned} v_i(s) &\geq 0 \\ x_i &\geq 0 \\ y_i &\geq 0 \end{aligned} \right\} & i = 2, 3 \end{aligned}$$

Uit de tweede voorwaarde volgt dat bij $\epsilon < \frac{1}{2}$ de gewenste voorrang van vochtklasse 3 bij het indrogen wordt verkregen.

Per situatieverandering moeten de volgende grootheden worden bijgehouden:

1. de op die dag geoogste hoeveelheid,
2. de aanwezige hoeveelheden in de opslagruimte,
3. het equivalent aantal uren dat er op volle capaciteit gedorst is,
4. de niet-gebruikte maaidorscapaciteit,
5. de niet-gebruikte droogcapaciteit.

In deze opsomming spreken 1. en 2. voor zichzelf. Met behulp van 1. wordt de te velde aanwezige hoeveelheid van het gewas bijgehouden. Het equivalent aantal uren dat er op volle capaciteit gedorst is moet per gewas worden bijgehouden voor de berekening van de variabele kosten van maaidorsers, wieltrekkers en personeel. De niet-gebruikte droogcapaciteit en maaidorscapaciteit worden bijgehouden om informatie te verkrijgen over de bezettingsgraad van deze capaciteiten

De korrelverliezen worden dagelijks berekend uit de dagoogst, evenals de extra korrelverliezen bij tarwe na de schotdatum. Om de kwaliteitsverliezen bij tarwe na de schotdatum te berekenen wordt het aantal gedorst tonnen na de schotdatum bijgehouden. Dit aantal vermenigvuldigd met een vast bedrag levert de kosten ten gevolge van kwaliteitsverlies.

8. De simulatie van de oogstperiode

De 4 gewassen worden in de volgorde koolzaad, gerst en haver/tarwe geoogst. Haver en tarwe worden gedeeltelijk tegelijk geoogst. In de simulatieprogramma's echter wordt slechts één gewas tegelijk geoogst. Dit is mogelijk door de opslagruimte, de droogcapaciteit en de maaidorscapaciteit in twee gelijke delen over de gewassen haver en tarwe te verdelen.

Een gewas mag worden geoogst zodra het rijp is. De rijpingsdata van de 4 gewassen zijn per oogstjaar gegeven. Bij het gereedkomen van een gewas kan pas de volgende dag met het volgende gewas worden begonnen.

De rijpingsdata worden aangegeven met r_k , de gereeddata met h_k en

de begindata van de oogst met c_k van de gewassen $k = 1, 2, 3, 4$. Met koolzaad ($k=1$) wordt op de rijpingsdatum begonnen. Met gerst ($k=2$) kan slechts worden begonnen als koolzaad gereed is en met haver ($k=3$) en tarwe ($k=4$) slechts indien gerst gereed is. De begindata c_k , $k = 1, 2, 3, 4$ volgen uit

$$\begin{aligned}
 c_1 &= r_1 \\
 c_2 &= \max[h_1+1, r_2] \\
 c_3 &= \max[h_2+1, r_3] \\
 c_4 &= \max[h_2+1, r_4].
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

De h_k $k = 1, 2, 3, 4$ worden door simulatie bepaald terwijl de begindata c_k uit de h_k en de gegeven r_k volgen met (17). Haver en tarwe worden beide geoogst in de dagen d , waarvoor geldt

$$\max[c_3, c_4] \leq d \leq \min[h_3, h_4]
 \tag{18}$$

zodat in deze periode de splitsing van de maaidorscapaciteit wordt doorgevoerd. Meteen na de gereeddatum van gerst worden de droog- en opslagcapaciteit en de opgeslagen hoeveelheden per vochtklasse in tweeën gedeeld zodat er in feite twee aparte silo's ontstaan. Vanaf de dag dat een der gewassen gereed is, wordt weer met één droger en één opslagruimte gewerkt en worden de aanwezige hoeveelheden in de opslagruimte per vochtklasse bij elkaar opgeteld. Gescheiden droging en opslag vindt dus plaats in de dagen d waarvoor geldt

$$h_2+1 \leq d \leq \min[h_3, h_4].
 \tag{19}$$

Indien een gewas voor de rijpingsdatum van het volgende gewas gereed is vindt alleen droging plaats tot de rijpingsdatum van het volgende gewas is bereikt. Dit tijdsinterval is weer te beschouwen als een vochtinterval met vochtklasse 4, zodat de procedure beschreven in sectie 7 kan worden gebruikt.

In het simulatieprogramma voor de capaciteitsplanning op korte termijn is de mogelijkheid ingevoerd met twee tarwerassen te werken, ras 1 en ras 2. Deze rassen hebben verschillende verliesformules, maaidorscapaciteiten, rijpingsdata en schotdata. Ras 1 heeft prioriteit bij de oogst. Laat r_{4j} de rijpingsdatum, h_{4j} de gereeddatum en c_{4j} de begindatum zijn voor ras $j = 1, 2$. De begindata volgen uit

$$(20) \quad \begin{aligned} c_{41} &= \max[h_2+1, r_{41}] \\ c_{42} &= \begin{cases} \max[h_2+1, r_{42}] & \text{als } r_{42} < r_{41} \\ h_{41} + 1 & \text{als } r_{42} \geq r_{41}. \end{cases} \end{aligned}$$

Als $r_{42} < r_{41}$ kan ook $h_{42} < r_{41}$ zijn. De oogst ligt dan stil gedurende de dagen d waarvoor $h_{42} < d < r_{41}$.

Met deze voorziening is het mogelijk geworden voor een tweetal tarwe rassen de meest gewenste oppervlakteverdeling te bepalen.

9. Bepaling van de optimale inzetperiode van loonwerkers

Loonwerkers kunnen slechts in de gewassen gerst en tarwe worden ingezet, indien ze niet in deze gewassen werkzaam zijn bij de pachters. De oogstperiode bij de pachters wordt met een aparte simulatie bepaald en begint altijd op de rijpingsdatum van het gewas. Gedurende de overblijvende periodes kunnen ze bij de opdrachtgever worden ingezet. In beide programma's wordt per jaar eerst de oogst afgewerkt zonder loonwerkers en vervolgens wordt de optimale inzetperiode voor dat jaar bepaald. Het optimaliteitskriterium hierbij is het minimum van de som van de kosten van het oogstapparaat en de verlieskosten voor het betreffende jaar.

De kosten van de inzet van loonwerkers bedragen een vast bedrag per gedorste ton onafhankelijk van het tijdstip. De verliezen zijn een stijgende functie van de tijd verlopen sinds de rijpingsdatum van het gewas. Het is dus optimaal per gewas zo vroeg mogelijk loonwerkers in te zetten.

Ter bepaling van de optimale duur van de inzetperiode wordt een aantal verschillende inzetperiodes gesimuleerd. Daar het verdere verloop van de oogst door de inzet beïnvloed wordt is het noodzakelijk per inzetperiode de simulatie tot en met de laatste oogstdag van het jaar door te zetten. Aangezien het voldoende is de optimale inzetperiode op twee dagen nauwkeurig te kunnen bepalen, worden slechts inzetperiodes uitgetest met lengtes, die een veelvoud van 2 dagen zijn. Stel dat de oogst bij de pachters gereed is op de dag f_k van gewas $k = 2, 4$. Dan kunnen de loonwerkers ingezet worden op de dagen d waarvoor $f_2+1 \leq d \leq \min[h_2, r_4]$ voor gerst en $f_4+1 \leq d \leq h_4$ voor tarwe. Eerst worden ze ingezet op de dagen $f_2 + 1$ en $f_2 + 2$ in gerst, waarna de resterende oogstperiode opnieuw doorgerekend wordt. Vervolgens worden ze ingezet op de dagen $f_2 + 3$ en $f_2 + 4$, etc. Hierbij worden de inzetdagen van de voorgaande run niet opnieuw gesimuleerd. Hiervoor is het noodzakelijk dat alle relevante grootheden op de dag, waarop een run begint oproepbaar zijn. Dit zijn o.a. de grootheden 1 t/m 5 opgesomd aan het eind van sectie 7 en een Bool'se variabele die aangeeft of de oogstcapaciteit gesplitst is over haver en tarwe of niet.

Een belangrijk verschil tussen beide simulatieprogramma's betreft het drogen van het door loonwerkers gedrorste graan. Bij de capaciteitsplanning op lange termijn wordt verwacht dat het drogen op het eigen bedrijf plaatsvindt. Dit betekent dat het door loonwerkers gedrorste graan bij de aanvoer a_i , $i = 2, 3$ moet worden opgeteld en verder volgens de in sectie 7 besproken methode per vochtinterval dient te worden verwerkt. Het heeft dan geen zin loonwerkers in te zetten op dagen, waarop de ruimte zonder inzet van loonwerkers reeds volloopt. Om dit te bereiken wordt in het programma voor iedere run ook per dag onthouden of inzet kan plaatsvinden. Bij het bepalen van het volgende toe te voegen tweetal inzetdagen kan hiermee dan rekening worden gehouden.

Het drogen van het door loonwerkers gedrorste graan op het bedrijf heeft verder gezien de opzet van de simulatie ten gevolge, dat de eigen maaidors-, droog- en opslagcapaciteit gesplitst moet worden over koolzaad en gerst gedurende de dagen d waarvoor $f_2+1 \leq d \leq h_1$. Dit laatste treedt op als $h_1 \geq f_2+1$ dus als koolzaad nog niet gereed is als inzet in gerst reeds mogelijk is.

In het programma voor de capaciteitsplanning op korte termijn wordt uitgegaan van de huidige situatie, waarbij het door loonwerkers geoogste graan buiten het bedrijf worden gedroogd. Het aandeel van de loonwerkers behoeft dus niet in de berekeningen tijdens een vochtinterval te worden opgenomen. Wel strekt de invloed van de inzet zich ook hier over de resterende oogstperiode uit. Het eerder gereedkomen van een gewas beïnvloed niet alleen de begindatum van het volgende gewas, maar ook de aanwezige hoeveelheden in de opslagruimte op die datum.

10. De verschilpunten tussen het huidige en het vorige model

Het huidige model verschilt op de volgende punten van het model beschreven in [1] en [2]:

1. Er wordt nu gewerkt met de actuele weergegevens. In het vorige model was er per etmaal één tijdsinterval, waarvoor de gemiddelde aanvoeren per uur van de drie wachtklassen voor ieder gewas door de opdrachtgever van te voren waren berekend.
2. De opgeslagen hoeveelheid van vochtklasse 3 was in het vorige model onbegrensd.
3. De verliesformules waren in het vorige model nog niet bekend. De verliezen werden berekend met een exponentieële formule met een zeer ruw geschatte parameter.
4. Het kostenmodel was niet in de programma's opgenomen; alleen de korrelverliezen werden met het simulatieprogramma berekend.

In het vorige onderzoek waren de volgende onderwerpen in het geheel niet opgenomen:

1. Schotverliezen.
2. De inzet van loonwerkers en de bepaling van de optimale inzetperiode.
3. Capaciteitsplanning op korte termijn.
4. Onderzoek naar de eigenschappen van tarwerassen.

11. Resultaten *)

Met het simulatieprogramma van de capaciteitsplanning op lange termijn zijn 27 combinaties van maaidorsers, opslag- en droogcapaciteit doorgerekend. Hiervan werd bij 13 combinaties per jaar de optimale inzetperiode van loonwerkers bepaald met bijbehorende minimale kosten. Het inzetten van loonwerkers geeft aanleiding tot een extra bedrag aan vaste kosten voor de dan noodzakelijke grotere ontvangstcapaciteit (zie sectie 5).

In tabel 2 zijn de gemiddelde jaarlijkse kosten over 36 jaar bij een aantal maaidorsers (x), droogcapaciteit in tonnen/uur (y) en opslagcapaciteit in m^3 (z) gegeven. Bij de combinaties die ook met loonwerkers zijn doorgerekend, zijn de gemiddelde kosten behorende bij de optimale inzetperiode gegeven. De kosten zijn uitgedrukt in miljoenen guldens. Het optimum is met * aangegeven. (Zie pag. 20.)

Het tweede programma heeft gedurende de oogstperiode van 1971 dienst gedaan. Hiervan werd een zestal jaren uit het verleden gebruikt, waarvan 2 met een slecht, 2 met een gemiddeld en 2 met een goed weerbeeld. Op grond van de resultaten is de prognose opgesteld dat het niet lonend zou zijn loonwerkers in te zetten. Deze prognose moet nog worden geverifieerd met de nacalculatie van de oogst van 1971.

12. Verdere ontwikkeling van het simulatiemodel

Het wordt noodzakelijk geacht in de nabije toekomst rekening te houden met een beperkte afvoermogelijkheid van graan van vochtklasse 1. De beschikbaarheid van schepen voor de afvoer is de laatste jaren afgenomen. Hierbij wordt gedacht aan een eindige maximale afvoercapaciteit in tonnen per uur, die dagelijks gedurende een vast tijdsinterval gerealiseerd kan worden. Buiten dit tijdsinterval is de afvoer nul. Hiervoor zal de procedure voor de simulatie tijdens een vochtinterval moeten worden uitgebreid. Deze maximale afvoercapaciteit is verder slechts per week constant. Er wordt over gedacht om de wekelijkse wisselingen in de afvoercapaciteit te beschrijven met behulp van een Markov-keten. Verder zal de tot nu toe gevolgde procedure voor het schatten van de schotverliezen worden herzien.

*) De hier gepresenteerde en andere resultaten worden opgenomen in een intern rapport van de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.

x	y	z	zonder loonw.	met loonw.
65	60	8000	6,786	
65	60	12000	6,778	6,355
65	60	16000	6,876	
65	80	8000	6,688	6,222
65	80	12000	6,800	6,325
65	80	16000	6,924	6,435
65	100	12000	6,875	6,332
90	60	8000	6,136	
90	60	12000	6,153	6,086
90	80	8000	6,042	
90	80	12000	6,093	6,070
90	80	16000	6,184	
90	100	8000	6,032 *	6,012 *
90	100	12000	6,110	6,105
90	100	16000	6,231	6,217
90	120	12000	6,165	6,159
115	80	12000	6,423	
115	100	8000	6,393	
115	100	12000	6,491	6,521
115	100	16000	6,608	
115	120	12000	6,536	
115	120	16000	6,643	6,671
140	80	12000	7,435	
140	100	12000	7,525	
140	120	8000	7,431	
140	120	12000	7,530	
140	120	16000	7,646	

Tabel 2. De resultaten van 27 capaciteitscombinaties.

13. Literatuur opgaven

- [1] J.H. van Kampen, Optimizing harvesting operations on a large-scale grainfarm, Proefschrift Landbouwhogeschool te Wageningen, maart 1969.

- [2] J.H. van Kampen, A.P. Roos en P.J. Weeda, Simulatie van de graanoogst op een grootlandbouwbedrijf, opgenomen in Operationele Research in Nederland, Marka serie No. 104.

