

32/405 (20,1) 1994.

**Modelmatige beschrijvingen van de gewasreacties op  
waterstress en/of nutriëntentekort: een literatuurstudie**

**BIBLIOTHEEK  
STARRINGGEBOUW**

**E. Westein  
M.J.D. Hack-ten Broeke**

**Rapport 391**

**DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1995**



CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS

0000 0687 7803

**17 OKT. 1995**

isn 012421 \*

## REFERAAT

Westein, E. en M.J.D. Hack-ten Broeke, 1995. *Modelmatige beschrijvingen van de gewasreacties op waterstress en/of nutriëntentekort: een literatuurstudie*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 391. 46 blz.; 4 fig.; 2 tab.; 28 ref.

Van een aantal gewasgroeimodellen zijn de vergelijkingen beschreven waarmee de door water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst wordt berekend. Het effect van waterstress op de gewasopbrengst wordt in praktisch alle modellen weergegeven als de verhouding tussen de werkelijke en potentiële transpiratie. De modellen verschillen in de wijze waarop de werkelijke transpiratie wordt berekend. De afname van de gewasgroei door stikstoftekort wordt in bijna alle modellen beschreven door een relatie tussen de bruto-droge-stofproductie en de stikstofinhoud van het gewas, waarbij wordt aangenomen dat een stikstoftekort de gewasgroei beperkt zonder direct het watergebruik door het gewas te beïnvloeden. Stikstofopname wordt in de modellen op verschillende detailniveaus beschreven.

Trefwoorden: fosforopname, gewasgroei, simulatiemodel, stikstofopname, stikstoftekort, wateropname, waterstress

ISSN 0927-4499

©1995 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)  
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.  
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812.

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (ION), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

## Inhoud

	blz.
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Watertekort	15
2.1 Gewasgroeireacties	15
2.2 Modelconcepten	15
3 Zuurstoftekort	23
3.1 Gewasgroeireacties	23
3.2 Modelconcepten	23
4 Stikstoftekort	25
4.1 Gewasgroeireacties	25
4.2 Modelconcepten	25
5 Fosfortekort	37
5.1 Gewasgroeireacties	37
5.2 Modelconcepten	37
6 Vergelijking modellen	39
6.1 EG-project 'Nitrate in soils'	39
6.2 IB-DLO modellenworkshop	39
7 Conclusies en aanbevelingen	41
Literatuur	43
<b>Tabellen</b>	
1 Overzicht van de beschouwde modellen.	12
2 De fractie vrij opneembaar water ( $p$ ) als functie van de potentiële evapotranspiratie van een gesloten gewas voor verschillende gewasgroepen (Doorenbos et al., 1978).	22
<b>Figuren</b>	
1 De dimensieloze sink term variabele $\alpha$ als functie van de absolute waarde van de drukhoogte $h$ (Feddes et al., 1988).	17
2 Het effect van de bodemtemperatuur $T_s$ op de wortelgeleidbaarheidsfactor $f_{st}$ (van Keulen & Seligman, 1987).	20
3 De relatie tussen de volumefractie vocht in de bodem ( $\theta$ ) en de verhouding	

tussen de actuele en potentiële transpiratie ( $T_{act}/T_{pot}$ ) voor een gewas/bodem combinatie (Hijmans et al., 1994).	22
4 De relatie tussen de reductiefactor voor stikstoftekort NFAC en de indices voor stikstoftekort NDEF (Godwin & Jones, 1991).	33

## Woord vooraf

In deze studie zijn de resultaten beschreven van een literatuurstudie naar de beschrijving van gewasreacties op waterstress en/of nutriëntentekort. De literatuurstudie maakt deel uit van het project 'Koppeling SWAP-ANIMO-WOFOST'. Het doel van dit project is deze modellen te koppelen op dagbasis, zodat de interacties tussen transpiratie, nutriëntenstromen en de gewasgroei beter gekwantificeerd kunnen worden. De resultaten van de literatuurstudie dienen als basis voor de (voor het gekoppelde model) nieuw te schrijven subroutines die de gewasreactie op nutriëntentekort (stikstof en fosfor), eventueel in combinatie met waterstress, beschrijven.

De projectleiding was in handen van Mirjam Hack-ten Broeke. De begeleidingscommissie bestond uit Eugène Bogaart, Barend van den Broek, Kees van Diepen, Piet Groenendijk, Jaap Huygen, Joop Kroes, Frank Tjhuis en Jan Wesseling.

## Samenvatting

Deze literatuurstudie is uitgevoerd als onderdeel van het project 'Koppeling SWAP-ANIMO-WOFOST'. Het doel van dit project is het tot stand brengen van een koppeling tussen de modellen SWAP, ANIMO en WOFOST op dagbasis, zodat de interacties tussen transpiratie, nutriëntenstromen en gewasgroei beter gekwantificeerd kunnen worden. Voor de beoogde gekoppelde berekening op dagbasis is een beschrijving nodig van de reductie van de gewasgroei bij nutriëntentekort, eventueel in combinatie met waterstress. In de literatuur bestaan hiervoor verschillende theoretische beschrijvingen. Deze beschrijvingen zijn geïnventariseerd en hieruit wordt een keuze gemaakt voor een aantal opties, die in het gekoppelde model zullen worden ingebouwd. De bijbehorende processen kunnen kwantitatief worden beschreven aan de hand van een aantal modelconcepten. Hiertoe zijn een aantal modellen, die het bodem-plant-atmosfeer-systeem beschrijven, bekeken. Naast de te koppelen modellen zijn dit: DAISY, CERES-N, NWHEAT, PAPRAN, Spring Wheat, SWACROP (oudere versie van SWAP) en WAVE. Deze modellen hebben een vergelijkbaar detailniveau als SWAP, ANIMO en WOFOST.

Om het verschil tussen de beschreven modellen beter tot uitdrukking te brengen worden ook de beschrijvingen van opname van water en de opname van nutriënten in dit rapport behandeld.

Onder waterstress wordt zowel watertekort als zuurstoftekort (een teveel aan water) verstaan. De gewasreacties op beide situaties zijn beschreven. In de modellen (behalve SWACROP) wordt het effect van watertekort op de groei van een gewas dat de bodem geheel bedekt, weergegeven als de verhouding tussen de actuele en de potentiële transpiratie. De potentiële transpiratie van een gewas wordt in de modellen berekend met behulp van een verdampingsformule (bijv. Penman, Rijtema-Monteith, Makkink). De actuele transpiratie wordt bepaald door de hoeveelheid water die het gewas uit de wortelzone kan opnemen. De wateropname door het wortelstelsel wordt in de modellen op verschillende manieren beschreven:

- met behulp van een sink term in de Richardsvergelijking (als functie van de beschikbaarheid van water in de wortelzone);
- als functie van de potentiële transpiratie, de geleidbaarheid van het wortelstelsel, de verdeling van water over het bodemprofiel en de dikte van de wortelzone.

De afname van de gewasgroei door stikstoftekort wordt in de meeste modellen beschreven door een relatie tussen de bruto drogestofproductie (of de bruto CO<sub>2</sub>-assimilatie) en de stikstofinhoud (in de bladeren) van het gewas. Er wordt aangenomen dat de gewasgroei bij stikstoftekort wordt beperkt zonder direct het watergebruik te beïnvloeden. Er zijn aanwijzingen dat deze aanname niet altijd geldig is.

Op elk tijdstip heeft het gewas een kritische stikstofinhoud, waar beneden de groei afneemt. De kritische stikstofinhoud is gewasspecifiek en is een functie van het ontwikkelingsstadium van het gewas. In de modellen wordt de actuele stikstofinhoud van het gewas vergeleken met de kritische stikstofinhoud. Als de actuele stikstofinhoud lager is dan de kritische stikstofinhoud is er vanuit het gewas een vraag

naar stikstof. Wanneer door opname uit de wortelzone niet aan de vraag kan worden voldaan, neemt de gewasgroei af doordat de fotosynthesecapaciteit van de bladeren daalt.

Voor de opname van stikstof uit de bodem zijn in de modellen twee mechanismen te onderscheiden:

- opname via de transpiratiestroom (convectie of mass flow);
- opname via diffusie naar het worteloppervlak.

Over de afname van de gewasgroei bij fosfortekort zijn weinig beschrijvingen beschikbaar. In WOFOST wordt de gewasreactie op fosfortekort beschreven door de relaties tussen opname van fosfor, stikstof en kalium en de gewasopbrengst volgens het model QUEFTS. In het model ANIMO wordt alleen de opname van fosfaat door het gewas beschreven. De selectiviteitsfactor voor fosfaat wordt aangepast, zodat de opname zoveel mogelijk gelijk wordt aan de fosforbehoefte van het gewas. Als de concentratie fosfaat in het bodemvocht daalt beneden  $0,4 \text{ mg P l}^{-1}$  dan vindt reductie van de gewasopname plaats.

De gemaakte vergelijking en ook de resultaten (met nadruk op de stikstofopname van het gewas) van de studie 'Nitrate in soils' (Vereecken et al., 1991) en de modellenworkshop van IB-DLO (de Willigen, 1991), waarin enkele van de beschreven modelconcepten met elkaar worden vergeleken, leveren geen aanwijzing op voor een keuze welk concept beter zou zijn om in WOFOST in te bouwen.

Daarom is een keuze gemaakt op grond van de volgende overwegingen:

- De beschrijvingen moeten zo min mogelijk plaats- en gewasgebonden zijn;
- Het ligt voor de hand te kiezen voor een benadering die qua detailniveau het beste aansluit bij SWAP, ANIMO en WOFOST.

De modelconcepten die hierbij het beste aansluiten zijn: DAISY, WAVE en de graslandmodule van ANIMO. Voor de correctie van de gewasgroei bij fosfortekort is alleen het modelconcept van ANIMO (gras) beschikbaar.

## 1 Inleiding

Deze literatuurstudie is uitgevoerd als onderdeel van het project 'Koppeling SWAP-ANIMO-WOFOST'. Het doel van dit project is het tot stand brengen van een koppeling tussen de modellen SWAP (nieuwere versie van SWACROP), ANIMO en WOFOST op dagbasis. Deze koppeling heeft tot doel om de interacties tussen transpiratie, nutriëntenstromen en gewasgroei beter te kunnen kwantificeren. Uitgangspunt hierbij is dat voor elke dag eerst de waterbalans van de bodem wordt berekend volgens SWAP, daarna de stikstof- en fosforhuishouding volgens ANIMO en daarna de gewasgroei volgens WOFOST. In WOFOST zelf wordt de afname van de gewasproductie door nutriëntentekort 'achteraf' berekend. Voor de beoogde gekoppelde berekening op dagbasis moet daarom in WOFOST een beschrijving van de reductie van de gewasgroei bij nutriëntentekort, eventueel in combinatie met waterstress, worden ingebouwd.

Doel van het koppelen van deze modellen is om vragen te kunnen beantwoorden op het gebied van water-, stikstof- en fosforhuishouding en gewasgroei in hun onderlinge samenhang. Op SC-DLO is geen model aanwezig dat alle genoemde componenten beschrijft. Het meest in de buurt komt het gebruik van SWACROP en ANIMO na elkaar, waarbij met SWACROP eerst de waterhuishouding in de onverzadigde zone en de daaraan gerelateerde gewasgroei wordt gesimuleerd en daarna met ANIMO de stikstof- en fosforhuishouding en eventueel (voor gras) de daaraan gerelateerde gewasgroei. Terugkoppeling naar de gewasverdamping is dan niet meer mogelijk. De berekening van de gewasgroei gebeurt bovendien in vereenvoudigde vorm ten opzichte van WOFOST, terwijl in WOFOST juist de waterstroming evenals de nutriëntenvoorziening volgens een eenvoudige benadering wordt berekend.

Vanwege de huidige veranderingen in de landbouw in Nederland is er steeds meer vraag naar een voorspelling van de effecten van die veranderingen. Zo ontstaan er vragen als: wat zal er gebeuren met de gewasproductie als er een beregeningsverbod van kracht is en de bemesting wordt verlaagd. Op zo'n vraag kan op dit moment geen afdoende antwoord worden gegeven. Het gekoppelde model biedt de mogelijkheid om naar een antwoord op een dergelijke vraag te zoeken.

In de literatuur bestaan verschillende theoretische beschrijvingen voor de gewasreacties op waterstress en nutriëntentekort. In de volgende paragrafen zijn de verschillende beschrijvingen geïnventariseerd. Uit deze beschrijvingen wordt een keuze gemaakt voor een aantal opties, die in WOFOST zullen worden ingebouwd. De bijbehorende processen kunnen kwantitatief worden beschreven aan de hand van een aantal modelconcepten. Hiertoe zijn een aantal modellen, die het bodem-plant-atmosfeer-systeem beschrijven, bekeken. In tabel 1 is een overzicht van deze modellen gegeven. Er is gekozen voor modellen die voor de gewasgroei en gewasopname een vergelijkbaar detailniveau als SWAP, ANIMO en WOFOST hebben. Zodoende zijn modellen die de gewasgroei en/of -opname relatief eenvoudig



beschrijven, zoals NITSOL/PHOSOL (Hopstaken & Uunk, 1989) en de modellen beschreven door van Drecht et al. (1991) niet meegenomen.

*Tabel 1 Overzicht van de beschouwde modellen.*

MODEL	OMSCHRIJVING	Auteurs
ANIMO <sup>1</sup>	<u>Agricultural Nitrogen Model</u>	J.T. Berghuijs-Van Dijk et al., 1985
DAISY	Danish Simulation model for transformation and transport of matter and energy in the soil plant atmosphere system	S. Hansen et al., 1990
CERES-N	Stikstofcomponent van CERES-WHEAT en CERES-MAIZE model	D.C. Godwin, C.A. Jones, 1991
NWHEAT	Simulation of <u>Nitrogen balance</u> in a system of winter <u>WHEAT</u> and soil	J.J.R. Groot, 1987
PAPRAN	<u>Production of Arid Pastures</u> limited by <u>Rainfall And Nitrogen</u>	N.G. Seligman, H. van Keulen, 1981
Spring Wheat	Crop simulation model for Spring Wheat	H. van Keulen, N.G. Seligman, 1987
SWACROP <sup>2</sup>	A water management and crop production simulation model	R.A. Feddes et al., 1988
WAVE <sup>3</sup>	<u>Water and Agrochemicals</u> in the <u>Vadose Environment</u>	M. Vanclooster et al., 1993
WOFOST	<u>World Food Studies: A model for simulating the growth of crops</u>	C.A. van Diepen et al., 1989

- 1 Voor het simuleren van de waterhuishouding moet gebruik worden gemaakt van een waterkwantiteitsmodel, zoals WATBAL of SWATRE.
- 2 SWACROP bestaat uit SWATRE (Soil Water Actual Transpiration Rate Extended) voor de simulatie van de waterhuishouding en het gewasgroeimodel (voor aardappelen) CROPR (Crop Production).
- 3 WAVE is de nieuwe naam voor het model SWATNIT (Soil Water Actual Transpiration and Nitrogen model).

Veelal afhankelijk van het specifieke doel waarvoor ze zijn ontwikkeld, verschillen de modellen sterk in de manier waarop en de mate van detail waarin de verschillende processen, die een rol spelen in de waterhuishouding van bodem en gewas zijn beschreven, en de wijze waarop die in de modellen worden gecombineerd (van Keulen & Stol, 1993).

De modellen NWHEAT, PAPRAN, Spring Wheat, WAVE en WOFOST zijn voor wat betreft de gewasgroei gebaseerd op het model SUCROS (Simple and Universal Crop Simulator) (van Keulen et al., 1982; Spitters et al., 1989). SUCROS simuleert de dagelijkse potentiële gewasgroei, d.i. de gewasgroei bij voldoende beschikbaarheid van water en nutriënten in een plaag-, ziekte- en onkruidvrije omgeving onder de heersende atmosferische omstandigheden (Spitters et al., 1989). De verschillende modellen zijn uitgebreid om de effecten van water- en/of nutriëntentekort op de gewasgroei te beschrijven.

Op basis van groeibeperkende factoren worden vaak drie niveaus voor gewasgroei onderscheiden: potentiële groei, gelimiteerde groei en gereduceerde groei (Hijmans et al., 1994).

Potentiële groei ( $P_{pot}$ ) vindt plaats als het gewas steeds is voorzien van voldoende water en nutriënten. De groei van het gewas hangt dan enerzijds af van de omgevingsfactoren, met name de hoeveelheid straling, de relatieve luchtvochtigheid en de windsnelheid en anderzijds van de gewaseigenschappen, zoals lichtonderscheppend oppervlak en de weerstand van de huidmondjes ( $P_{pot} = P_{act,1}$ ).

Bij het tweede gewasgroeiniveau is de groei van het gewas beperkt door de beschikbaarheid van water en/of nutriënten (in het bijzonder stikstof en fosfor) voor op z'n minst een deel van het groeiseizoen. Watergelimiteerde gewasgroei ( $P_{act,2}$ ) is dan lager dan de potentiële groei en nutriëntgelimiteerde gewasgroei ( $P_{act,3}$ ) is vaak lager dan de watergelimiteerde groei.

Bij gereduceerde gewasgroei zijn naast de beschikbaarheid van water en nutriënten ook factoren als onkruiden, ziekten en plagen van invloed op de gewasgroei. In de beschouwde modellen wordt gereduceerde gewasgroei niet beschreven.

Met enkele modellen (DAISY, ANIMO) kunnen wel teeltmaatregelen worden gesimuleerd, zoals zaaibedbereiding en ploegen. De meeste modellen hebben een mogelijkheid voor het simuleren van beregening.

De gewasreactie ten gevolge van waterstress en/of stikstof- en/of fosfortekort kan in algemene zin worden beschreven als een verandering in drogestofproductie. Gewasreactie in meer complete zin houdt onder meer ook een verandering in van de verdeling van drogestof over de diverse plantorganen en de herverdeling van de opgenomen stikstof over de plantorganen bij ernstig stikstoftekort.

Onder waterstress wordt zowel een tekort als een teveel aan water (zuurstoftekort) worden verstaan. De verschillende beschrijvingen van de gewasreactie ten gevolge van zowel watertekort als zuurstoftekort zijn beschreven in respectievelijk hoofdstuk 2 en 3. In de hoofdstukken 4 en 5 zijn respectievelijk de verschillende modelconcepten van de gewasreactie op stikstof- en fosfortekort beschreven. Voor de duidelijkheid zijn hierbij ook de verschillende opname-mechanismen beschreven. Hoofdstuk 6 geeft de conclusies weer van twee studies waarin de stikstofopname van enkele van de beschouwde modellen met elkaar worden vergeleken. Tot slot volgen in hoofdstuk 7 de conclusies en worden aanbevelingen gedaan met betrekking tot in WOFOST in te bouwen modelconcepten voor de gewasreactie op stikstoftekort.

## 2 Watertekort

### 2.1 Gewasgroeireacties

Watertekort leidt tot vermindering van de transpiratie door sluiting van de huidmondjes, verlaging van de turgor (= de druk die door de celwanden wordt uitgeoefend op de celinhoud; turgor geeft de individuele niet-huidig plantedelen stevigheid), vervolgens verminderde uitbreiding van het bladoppervlak, verwelking van de bladeren en tenslotte bladsterfte. Deze verschijnselen zijn allemaal aanpassingen van het gewas om het waterverbruik te minimaliseren.

### 2.2 Modelconcepten

In de modellen wordt het effect van watertekort op de gewasgroei beschreven via een afname van de transpiratie door het sluiten van de huidmondjes. De transpiratie van een gewas is afhankelijk van de hoeveelheid beschikbaar water in de bodem (wortelzone), van de dichtheid en diepte van het wortelstelsel van het gewas en van de weersomstandigheden (bijv. luchtvochtigheid). Als de hoeveelheid water in de bodem niet voldoende is om het verlies aan water door transpiratie te compenseren, sluit het gewas de huidmondjes. De transpiratie is nauw gerelateerd aan de CO<sub>2</sub>-assimilatie, omdat beide worden bepaald door dezelfde fysische principes en de opening van de huidmondjes. Afname van de transpiratie als gevolg van watertekort heeft een evenredige afname van de assimilatie tot gevolg en dus van de drogestofproductie.

Het effect van watertekort op de groeisnelheid van een gewas dat de bodem geheel bedekt, wordt vaak weergegeven door de verhouding tussen de actuele transpiratie ( $T_{act}$ ) en de potentiële transpiratie ( $T_{pot}$ ) (reductiefactor) (Tanner & Sinclair, 1983). De actuele groeisnelheid wordt dan bepaald door de potentiële groeisnelheid vermenigvuldigd met de reductiefactor:

$$P_{act,2} = \frac{T_{act}}{T_{pot}} P_{pot} \quad (1)$$

$$P_{act,2} = \text{watergelimiteerde gewasgroei [kg(CH}_2\text{O) m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{]}.$$

De potentiële transpiratie van een gewas (de hoeveelheid water die het gewas verliest bij optimale watervoorziening) wordt in de modellen berekend met behulp van een verdampingsvergelijking (bijv. Penman, Monteith-Rijtema, Makkink, e.a.). Het ontwikkelingsstadium van het gewas kan in rekening worden gebracht via de bladoppervlakte index (lai) (Ritchie & Burnett, 1971) of via een zogenaamde gewasfactor (Feddes, 1987).

De actuele transpiratie wordt bepaald door de hoeveelheid water die het gewas uit de wortelzone kan opnemen. Doorgaans wordt hierbij aangenomen dat de dichtheid van het wortelstelsel geen beperking vormt voor de opname van water uit het bodemprofiel. De wateropname door het gewas is dan alleen afhankelijk van de beschikbaarheid van water in de wortelzone en de effectieve bewortelingsdiepte van het gewas. De wateropname door het wortelstelsel wordt in de modellen op verschillende manieren beschreven.

### **SWACROP, WAVE en DAISY**

In SWACROP, WAVE en DAISY wordt de wateropname door het wortelstelsel beschreven met behulp van een 'sink term'  $S$ .

In de modellen SWACROP en WAVE wordt  $S$  op macroscopische schaal beschreven als de wateropname van een homogene en isotrope laag van de wortelzone (Feddes et al., 1978):

$$S(h,z) = \alpha(h) S_{\max}(z) \quad (2)$$

waarin

- $\alpha(h)$  = dimensieloze reductiefactor als functie van de drukhoogte  $h$ ;
- $S_{\max}(z)$  = maximale wateropname door het wortelstelsel als functie van de diepte  $z$  [ $d^{-1}$ ].

Onder niet optimale condities (water- of zuurstoftekort) wordt  $S_{\max}$  gereduceerd door de van de drukhoogte afhankelijke reductiefactor  $\alpha$ . De relatie tussen  $\alpha$  en de absolute waarde van de drukhoogte is weergegeven in figuur 1. Door het gewas wordt geen water opgenomen beneden  $|h_1|$  (zuurstoftekort, zie paragraaf 3.2) en boven  $|h_4|$  (verwelkingspunt). Tussen  $|h_2|$  en  $|h_3|$  (reductiepunt) is de wateropname maximaal. Tussen  $|h_1|$  en  $|h_2|$  wordt een lineaire relatie en tussen  $|h_3|$  en  $|h_4|$  een lineaire of hyperbolische relatie aangenomen. De waarde van  $|h_3|$  is in SWACROP afhankelijk van de potentiële transpiratie.

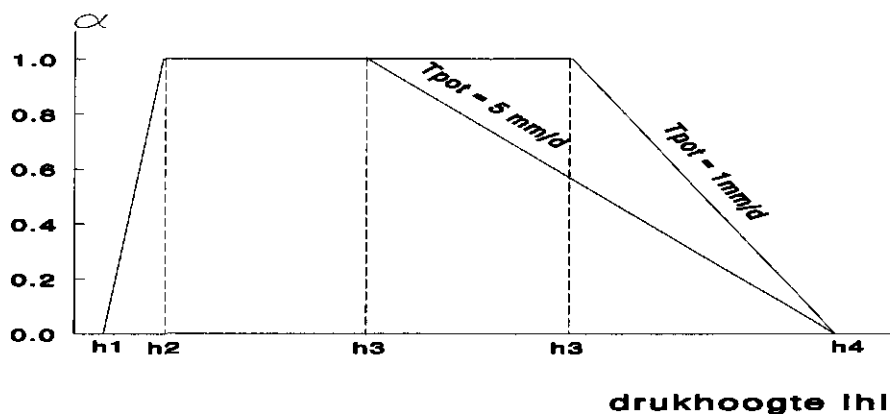


Fig. 1 De dimensieloze sink term variabele  $\alpha$  als functie van de absolute waarde van de drukhoogte  $h$  (Feddes et al., 1988).

De actuele transpiratie wordt dan berekend met:

$$T_{act} = \int_0^{z_r} S(h,z) dz \leq T_{pot} \quad (3)$$

$z_r$  = diepte van de wortelzone [m].

De watergelimiteerde gewasgroei wordt in SWACROP berekend volgens (Feddes et al., 1988):

$$P_{act,2} = 0,5 \left[ A \frac{T_{act}}{\Delta e} + q_m - \sqrt{\left( q_m + A \frac{T_{act}}{\Delta e} \right)^2 - 4 q_m A \frac{T_{act}}{\Delta e} (1 - \xi)} \right] \quad (4)$$

$A$  = maximale watergebruiksefficiëntie [ $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{mbar}$ ];

$q_m$  = maximaal mogelijke gewasgroei [ $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ];

$\Delta e$  = verzadigingsdeficiet van de lucht [mbar];

$\xi$  = mathematische parameter ( $\xi \approx 0,01$ ).

In de overige modellen wordt de watergelimiteerde gewasgroei berekend volgens vergelijking (1).

Op microscopische schaal wordt  $S$  beschreven als de wateropname door een enkele wortel. Dit is het geval in het model DAISY (Hansen et al., 1990):

$$S = L Q_r \quad (5)$$

met

$L$  = de worteldichtheid [ $\text{m m}^{-3}$ ];

$Q_r$  = wateropname per eenheid wortellengte [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ].

Met  $Q_r$  wordt de stroming van water naar het oppervlak van de wortel beschreven als een pseudo niet-stationaire radiale stroming.  $Q_r$  is onder andere een functie van de worteldiameter, de drukhoogte in de bodem en de drukhoogte in de wortel en wordt benaderd door:

$$Q_r = \frac{\theta(\psi_r) M(\psi_z) - M(\psi_r)}{\theta_s - \frac{1}{2} \ln(r_r^2 \pi L)} \quad (6)$$

met

$\theta(\psi_r)$  = volumefractie vocht in de wortel bij  $\psi_r$  [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ];

$\theta_s$  = volumefractie vocht bij verzadiging [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ];

$M$  = matrix flux potentiaal [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ];

$\psi_r$  = drukpotentiaal in de wortel [ $\text{m H}_2\text{O}$ ];

$\psi_z$  = drukpotentiaal in de bodem [ $\text{m H}_2\text{O}$ ];

$r_r$  = straal van de wortel [ $\text{m}$ ].

De actuele transpiratie wordt dan berekend conform vergelijking (3).

### **Spring Wheat**

In Spring Wheat wordt de opname van water door het wortelstelsel afgeleid uit de potentiële transpiratie en verder bepaald door de geleidbaarheid van het wortelstelsel (als functie van de bodemtemperatuur) en de actuele verdeling van water over het profiel en de bewortelingsdiepte. In Spring Wheat is het bodemprofiel verdeeld in een aantal compartimenten. In het model wordt ieder compartiment afzonderlijk behandeld. Wanneer een deel van het wortelstelsel zich in droge bodemcompartimenten bevindt, kan (gedeeltelijke) compensatie plaatsvinden door verhoogde opname uit vochtiger compartimenten. Wateropname door de wortels wordt voor elk compartiment  $i$  dan als volgt beschreven (van Keulen & Seligman, 1987):

$$r_{ui} = r_{up} f_{sm} f_{so} l_{ri} e_f \quad (7)$$

- $r_{ui}$  = actuele wateropname per compartiment [mm d<sup>-1</sup>];  
 $r_{up}$  = potentiële wateropname per compartiment per effectieve lengte van de wortelindringing [mm mm<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>];  
 $f_{sm}$  = reductiefactor voor wateropname [-];  
 $f_{so}$  = reductiefactor voor het effect van de osmotische potentiaal in de bodem [-];  
 $l_{ri}$  = wortelindringing in een compartiment [mm];  
 $e_f$  = coëfficiënt voor de wortelactiviteit [-].

De reductiefactor  $f_{sm}$  is gedefinieerd als een functie van de relatieve hoeveelheid beschikbaar water in een bodemcompartiment. Wateropname door het wortelstelsel neemt pas af als ongeveer driekwart van het beschikbaar bodemvocht is verbruikt. Het effect van de osmotische potentiaal is opgenomen voor situaties, waarin nitraat zich in de bovengrond van zwaar bemeste gronden ophoopt als gevolg van evaporatie. Deze situatie komt zelden voor. Het effect van verzilting door andere zouten wordt niet door  $f_{so}$  gedekt.

De wortelindringing in een compartiment  $l_{ri}$  is gedefinieerd als de verticale uitbreiding van de wortels in een compartiment en varieert dus tussen 0 en de dikte van het compartiment.

De coëfficiënt voor de wortelactiviteit  $e_f$  is eveneens een functie van de relatieve hoeveelheid beschikbaar water in een bodemcompartiment. Het effect van  $e_f$  is dat de wortelactiviteit afneemt voor het deel van wortelstelsel dat zich in droge bodemcompartimenten bevindt.

De potentiële wateropname per effectieve wortellengte uit een compartiment is voor alle compartimenten gelijk en gedefinieerd als:

$$r_{up} = \frac{T_{pot}}{L_{re}} \quad (8)$$

$L_{re}$  is de totale effectieve wortellengte [mm] en wordt verkregen door:

$$L_{re} = \sum_{i=1}^n l_{ri} e_f \quad (9)$$

De potentiële wateropname door het gewas  $t_{pot}$  volgt dan uit de sommatie van de wateropname uit de verschillende bodemcompartimenten:

$$t_{pot} = \sum_{i=1}^n r_{ui} \quad (10)$$

De bodemtemperatuur beïnvloedt de wateropname uit de bodem door het effect op enerzijds de geleidbaarheid van het wortelstelsel en anderzijds op de viscositeit van

het water. In Spring Wheat wordt het effect op de geleidbaarheid meegenomen door eerst de potentiële geleidbaarheid van het wortelstelsel ( $C_{pot}$ ) als functie van het wortelgewicht te bepalen (de Wit, 1978):

$$C_{pot} = \frac{W_r}{r_c} \quad (11)$$

$W_r$  = gewicht van de wortels [ $\text{kg ha}^{-1}$ ];

$r_c$  = verhouding tussen het gewicht en de geleidbaarheid van het wortelstelsel [ $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{d}$ ].

Het effect van de bodemtemperatuur wordt geïntroduceerd door:

$$C_{act} = C_{pot} f_{st} \quad (12)$$

$C_{act}$  = de actuele geleidbaarheid van het wortelstelsel [ $\text{mm dag}^{-1}$ ];

$f_{st}$  = factor die het effect van de temperatuur op de wortelgeleidbaarheid weergeeft, zie figuur 2.

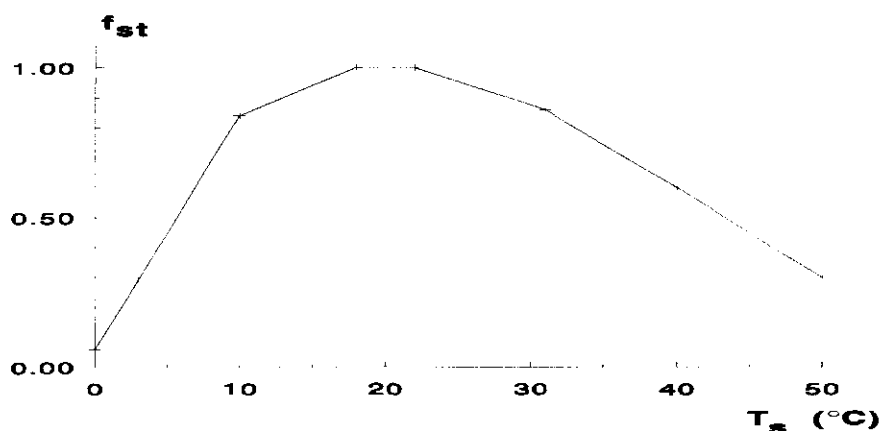


Fig. 2 Het effect van de bodemtemperatuur  $T_s$  op de wortelgeleidbaarheidsfactor  $f_{st}$  (van Keulen & Seligman, 1987).

Het effect van de bodemtemperatuur op de viscositeit wordt niet meegenomen.



De actuele transpiratie wordt dan bepaald uit:

$$T_{act} = \min (C_{acr} t_{pot}) \quad (13)$$

In PAPRAN en NWHEAT wordt de actuele transpiratie op soortgelijke wijze berekend als in Spring Wheat.

### **WOFOST**

In WOFOST wordt de afname van de gewasgroei bij watertekort beschreven door de relatie tussen de volumefractie vocht in de bodem en de verhouding tussen de actuele en potentiële transpiratie ( $T_{act}/T_{pot}$ ), zie figuur 3. Tussen een zekere kritische volumefractie vocht in de bodem ( $\theta_{cr}$ ) en de volumefractie vocht bij veldcapaciteit ( $\theta_{fc}$ ) is actuele transpiratie gelijk aan de potentiële transpiratie ( $T_{act}/T_{pot} = 1$ ). Beneden de kritische volume-fractie vocht neemt de actuele transpiratie af als gevolg van watertekort. Bij het verwelkingspunt ( $\theta_{wp}$ ) stopt de actuele transpiratie en daarmee de gewasgroei. De afname van  $T_{act}/T_{pot}$  tussen  $\theta_{cr}$  en  $\theta_{wp}$  is lineair (Supit et al., 1994):

$$T_{act} = \frac{(\theta - \theta_{wp})}{(\theta_{cr} - \theta_{wp})} T_{pot} \quad (14)$$

$\theta$  = actuele volumefractie vocht in de bodem [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ].

De kritische volumefractie vocht kan berekend worden met (van Keulen, 1986):

$$\theta_{cr} = (1 - p) (\theta_{fc} - \theta_{wp}) + \theta_{wp} \quad (15)$$

$p$  = fractie vrij opneembaar water [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ].

De fractie vrij opneembaar water ( $p$ ) is een functie van de potentiële transpiratie (voor een gesloten gewas) en het gewasgroep nummer. Voor verschillende gewassen is de fractie vrij opneembaar water bepaald bij een gegeven maximale transpiratie. De gewassen zijn hiertoe verdeeld in vijf groepen (1-5), variërend van droogtegevoelige (groep 1) tot droogteresistente (groep 5) gewassen (Doorenbos et al., 1978). Indicatieve  $p$ -waarden voor de belangrijkste gewassen bij verschillende waarden van  $T_{pot}$  zijn weergegeven in tabel 2.

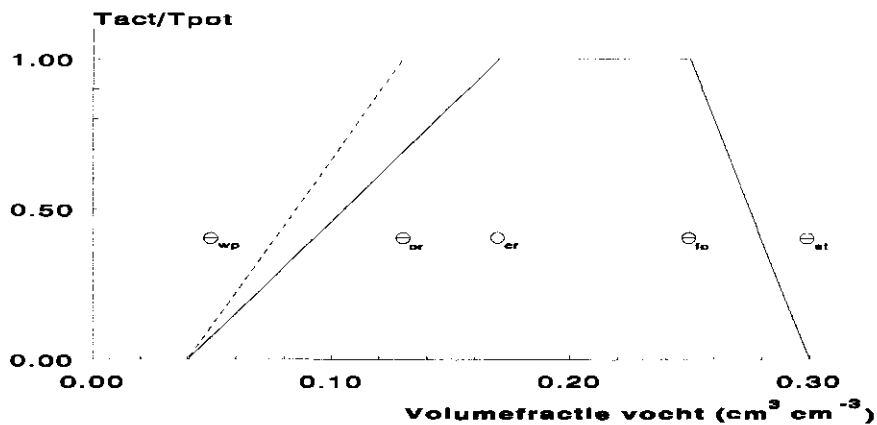


Fig. 3 De relatie tussen de volumefractie vocht in de bodem ( $\theta$ ) en de verhouding tussen de actuele en potentiële transpiratie ( $T_{act}/T_{pot}$ ) voor een gewas/bodem combinatie (Hijmans et al., 1994).

Tabel 2 De fractie vrij opneembaar water ( $p$ ) als functie van de potentiële evapotranspiratie van een gesloten gewas voor verschillende gewasgroepen (Doorenbos et al., 1978).

Gewas- groep	$T_{pot}$ in $\text{cm d}^{-1}$								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	0,45	0,38	0,30	0,25	0,23	0,20	0,18	0,16	0,15
2	0,60	0,50	0,43	0,35	0,30	0,28	0,25	0,23	0,20
3	0,75	0,65	0,55	0,45	0,40	0,38	0,33	0,30	0,25
4	0,85	0,75	0,65	0,55	0,50	0,48	0,43	0,38	0,35
5	0,92	0,85	0,75	0,65	0,60	0,55	0,50	0,48	0,45

Voorbeelden van gewassen in de verschillende gewasgroepen zijn: suikerbieten (2), aardappelen en gras (3), rijst en zonnebloemen (3-4), wintertarwe, zomergerst, veldbonen, koolzaad en korrelmaïs (4-5) en sojabonen (5) (Doorenbos et al., 1978).

## 3 Zuurstoftekort

### 3.1 Gewasgroeireacties

In een verzadigde grond wordt de gasuitwisseling met de atmosfeer sterk belemmerd, waardoor er in de grond zuurstofgebrek kan ontstaan (vooral als de grond veel verse organische stof bevat en de temperatuur hoog is). Zuurstoftekort belemmert de opname van water, vermoedelijk omdat voor het handhaven van wortelactiviteit energie nodig is. In situaties met zuurstoftekort sluiten daarom de huidmondjes om de transpiratie te reduceren (Driessen, 1986).

Op de veranderingen die als gevolg van zuurstoftekort optreden in de processen die de stikstof- en fosforbeschikbaarheid in de bodem bepalen wordt hier niet ingegaan.

### 3.2 Modelconcepten

#### *SWACROP en WAVE*

De sink term  $S$  op macroscopische schaal, zoals die wordt gebruikt in de modellen SWACROP en WAVE, geeft ook een beschrijving voor de reductie van de gewasgroei bij een teveel aan water in de bodem, zie figuur 1 het traject tussen  $|h_1|$  en  $|h_2|$ .

#### *WOFOST*

In WOFOST neemt  $T_{act}/T_{pot}$  lineair af tussen de volumefractie vocht bij veldcapaciteit ( $\theta_{fc}$ ) en de volumefractie vocht bij  $(\theta_{st} - \theta_{a,cr})$ . Hierin is  $\theta_{st}$  de volumefractie vocht bij verzadiging en  $\theta_{a,cr}$  de kritische volumefractie lucht. De kritische volumefractie lucht moet als invoer worden gegeven. De actuele transpiratie bij een teveel aan water wordt dan als volgt benaderd:

$$T_{act} = 0 \quad \text{voor } \theta > \theta_{st} - \theta_{a,cr} \quad (16a)$$

Vanaf het moment dat  $\theta > \theta_{st} - \theta_{a,cr}$  neemt  $T_{act}$  lineair af totdat na vier dagen  $T_{act} = 0$ .

$$T_{act} = \frac{(\theta_{st} - \theta_{a,cr}) - \theta}{(\theta_{st} - \theta_{a,cr}) - \theta_{fc}} T_{pot} \quad \text{voor } \theta_{fc} \leq \theta \leq (\theta_{st} - \theta_{a,cr}) \quad (16b)$$

## 4 Stikstoftekort

### 4.1 Gewasgroeireacties

Gewasgroei wordt voor een belangrijk deel beïnvloed door de beschikbaarheid van stikstof in de bodem. Als het gewas niet voldoende stikstof kan opnemen zal de groei afnemen, doordat de stikstofconcentratie in de verschillende organen beneden de maximale concentratie daalt. De groei is met name afhankelijk van de stikstofconcentratie in de bladeren. Voor veel gewassen is de CO<sub>2</sub>-assimilatie bij verschillende stikstofniveaus in de bladeren beschreven. In alle situaties bestaat een sterke samenhang tussen de stikstofconcentratie in de bladeren en hun fotosynthese-capaciteit (van Keulen & Seligman, 1987).

Bij stikstoftekort wordt allereerst de stikstof in de plant herverdeeld. In de oudere bladeren worden eiwitten afgebroken en de vrijgekomen stikstof wordt naar de groeiende delen getransporteerd.

De stikstofinhoud van een gewas heeft ook invloed op de actuele transpiratie van het gewas (Radin & Ackerson, 1981). In veel studies is aangetoond dat de watergebruiksefficiëntie, d.i. de hoeveelheid geproduceerde drogestof (kg) per kg opgenomen water, toeneemt met toenemende stikstofbeschikbaarheid.

Voor katoen is aangetoond dat bij stikstoftekort de respons van de huidmondjes op watertekort steeds gevoeliger wordt. In zulke planten sluiten de huidmondjes bij veel hogere waterpotentialen (natter) in de plant dan in planten die zijn voorzien van voldoende stikstof (Radin & Ackerson, 1981).

### 4.2 Modelconcepten

In de meeste modellen wordt de afname van de gewasgroei door stikstoftekort beschreven door de relatie tussen de bruto drogestofproductie (of de bruto CO<sub>2</sub>-assimilatie) en de stikstofinhoud (in de bladeren) van het gewas. Hierbij wordt dus aangenomen dat stikstoftekort de gewasgroei beperkt zonder direct het watergebruik van het gewas te beïnvloeden. Er zijn aanwijzingen dat deze aanname niet onder alle omstandigheden geldig is (Goudriaan & van Keulen, 1979).

In de meeste gewasgroei modellen die de effecten van stikstoftekort beschrijven wordt er van uitgegaan dat er op elk tijdstip een kritische stikstofconcentratie (of stikstofinhoud) in het gewas bestaat, waar beneden de groei afneemt. De kritische stikstofconcentratie is een functie van het ontwikkelingsstadium van het gewas en moet in de modellen als invoer worden gegeven. In de literatuur zijn voor de meeste landbouwgewassen beschrijvingen van deze relatie te vinden.

De kritische stikstofinhoud is de som van de maximale stikstofhoeveelheden in de verschillende vegetatieve organen, berekend als hun drooggewicht vermenigvuldigd met de maximale concentratie. Het aantal verschillende vegetatieve organen dat in de modellen wordt onderscheiden, kan verschillen. Zo wordt in DAISY onderscheid

gemaakt in bovengrondse plantedelen, wortels en opslagorganen<sup>1</sup>. In NWHEAT en Spring Wheat moeten de kritische stikstof-concentraties in de bladeren, stengels en wortels als functie van het ontwikkelingsstadium als invoer worden gegeven.

De actuele stikstofinhoud van het gewas wordt vergeleken met de kritische (= maximale) stikstofinhoud van het gewas. Als de actuele stikstofinhoud van het gewas gelijk is aan de maximale stikstofinhoud dan is de gewasgroei gelijk aan de watergelimiteerde gewasgroei.

De vraag naar stikstof van het gewas is het verschil tussen de maximale stikstofinhoud en de actueel in het gewas aanwezige hoeveelheid. Wanneer niet aan de vraag naar stikstof kan worden voldaan, daalt de maximale fotosynthesecapaciteit van de bladeren, waardoor de gewasgroei afneemt ten opzichte van de watergelimiteerde groei.

Opname van stikstof door het wortelstelsel hangt af van de vraag van het gewas, de maximale opname-capaciteit van het gewas en de stikstofbeschikbaarheid in de bodem. Voor de opname van stikstof zijn twee mechanismen te onderscheiden:

- opname via de transpiratiestroom (convectie of mass flow);
- opname via diffusie naar het worteloppervlak.

Opname van stikstof via de transpiratiestroom wordt beschreven in de modellen ANIMO, DAISY, NWHEAT, PAPRAN, Spring Wheat en WAVE. Diffusie van stikstof naar het worteloppervlak wordt meegenomen in NWHEAT, PAPRAN, Spring Wheat en WAVE.

### **Spring Wheat en NWHEAT**

In Spring Wheat en NWHEAT wordt de afname van de gewasgroei bij stikstoftekort ten opzichte van potentiële groei beschreven door een verandering in de waarde van de CO<sub>2</sub>-assimilatie bij lichtverzadiging afhankelijk van de stikstofconcentratie in de bladeren (van Keulen & Seligman, 1987):

$$F_{mn} = 725 n_{al} - 2,75 \quad \text{voor } F_{mn} \geq 0 \quad (17)$$

met

$$\begin{aligned} F_{mn} &= \text{bruto CO}_2\text{-assimilatie [kg ha}^{-1}\text{ h}^{-1}\text{]}; \\ n_{al} &= \text{stikstofconcentratie in de bladeren [kg kg}^{-1}\text{]}. \end{aligned}$$

De waarden 725 en 2,75 zijn parameters die alleen voor tarwe gelden. Voor andere gewassen zijn geen waarden gevonden.

Met behulp van  $F_{mn}$  kan de nutriëntgelimiteerde gewasopbrengst  $P_{act,3}$  worden berekend.

In deze modellen wordt de totale stikstofopname  $n_t$  van het gewas beschreven als het minimum van de opname door de transpiratiestroom  $n_{tr}$  en diffusie  $n_{dr}$ , de

---

<sup>1</sup> bij biet en aardappel

opnamecapaciteit van het gewas  $u_x$  en de beschikbare hoeveelheid stikstof in de wortelzone  $N_s$  (van Keulen & Seligman, 1987):

$$n_t = \min \left( n_{tr} + n_{dr}, u_x, \frac{N_s}{\Delta} \right) \quad (18)$$

$\Delta$  = tijdstap [d].

De stikstofopname met de transpiratiestroom wordt berekend als de snelheid van wateropname uit een compartiment vermenigvuldigd met de gemiddelde concentratie:

$$n_{tr} = \sum_{i=1}^n r_{ui} n_i \quad (19)$$

$n_{tr}$  = stikstofopname via de transpiratiestroom [ $\text{kg d}^{-1}$ ];

$r_{ui}$  = stroming van water naar de wortels in compartiment  $i$  [ $\text{mm d}^{-1}$ ], zie vergelijking (6);

$n_i$  = concentratie van minerale stikstof in compartiment  $i$  [ $\text{kg mm}^{-1}$ ].

Wanneer de opname met de transpiratiestroom hoger is dan de vraag van het gewas wordt stikstof actief 'uitgesloten', dus er wordt dan precies aan de vraag voldaan. Wanneer deze opname onvoldoende is om aan de vraag te voldoen, wordt verondersteld dat het restant door diffusie kan worden aangevuld, als er tenminste stikstof voorradig is. Diffusie vindt plaats zolang het ontwikkelingsstadium van het gewas kleiner is dan 0,6 en is dan maximaal  $(dt - n_{tr})/\tau_{nd}$ . Hierin is  $dt$  de totale vraag naar stikstof door het gewas [ $\text{kg ha}^{-1}$ ] en  $\tau_{nd}$  de tijdconstante voor diffusie van minerale stikstof naar de wortels [d].

De opname door diffusie in compartiment  $i$  wordt als volgt beschreven:

$$n_{di} = \begin{cases} n_{rd} \frac{N_i}{N_s} \frac{l_{ri}}{d_i}, & \text{voor } z_{ai} > z_{wi} \\ 0, & \text{overige gevallen} \end{cases} \quad (20)$$

$n_{di}$  = stikstofopname door diffusie uit compartiment  $i$  [ $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ];

$N_i$  = hoeveelheid beschikbare stikstof in compartiment  $i$  [ $\text{kg ha}^{-1}$ ];

$N_s$  = totale hoeveelheid beschikbare stikstof in de wortelzone [ $\text{kg ha}^{-1}$ ];

$l_{ri}$  = wortelindringing in een compartiment [mm];

$d_i$  = dikte van compartiment  $i$  [mm];

$z_{ai}$  = actuele volumefractie vocht in compartiment  $i$  [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ];

$z_{wi}$  = volumefractie vocht bij verwelkingspunt in compartiment  $i$  [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ].

De totale stikstofopname door diffusie  $n_{rd}$  is dus:

$$n_{rd} = \sum_{i=1}^n n_{di} \quad (21)$$

De maximale opname-capaciteit van het gewas wordt bepaald door de diepte en dichtheid van het wortelstelsel. Vroeg in het groeiseizoen is het wortelstelsel nog niet volledig horizontaal uitgegroeid, zodat niet alle stikstof in de wortelzone beschikbaar is voor het gewas. In Spring Wheat wordt de horizontale worteluitbreiding gerelateerd aan de gewasbedekking:

$$u_x = u_c \left( 1 - e^{-0,5 \frac{W_l + W_s}{f_c}} \right) \quad (22)$$

$u_c$  = potentiële stikstofopname van een gesloten gewas [ $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ];  
 $W_l, W_s$  = droog gewicht van respectievelijk de bladeren en de stengels [ $\text{kg ha}^{-1}$ ];  
 $f_c$  = factor voor de conversie van gewicht naar relatieve oppervlakte ( $f_c = 100$ ).

De hoeveelheid opgenomen stikstof wordt tenslotte verdeeld over de verschillende vegetatieve plantorganen in relatie tot hun relatieve vraag.

### DAISY

In DAISY wordt aangenomen dat bij voldoende stikstof in de bodem het gewas stikstof opneemt totdat de bovengrens van de stikstofconcentratie ( $c^*$ ) in de drogestof is bereikt. Bij een extreem lage voorraad stikstof in de bodem wordt aangenomen dat de stikstofconcentratie in de drogestof een ondergrens ( $c^o$ ) bereikt, waar beneden het gewas stopt met groeien. Tussen de boven- en de ondergrens wordt een stikstofconcentratie aangenomen ( $c^n$ ) waar beneden de gewasgroei beperkt is als gevolg van stikstoftekort en waarboven de gewasgroei niet wordt beperkt door de beschikbaarheid van stikstof. De stikstofinhoud bij de drie grenzen wordt dan als volgt uitgedrukt (Hansen et al., 1990):

$$N_c^* = \sum_{j=1}^n c_j^* W_j \quad (23)$$

$$N_c^n = \sum_{j=1}^n c_j^n W_j \quad (24)$$

$$N_c^0 = \sum_{j=1}^n c_j^0 W_j \quad (25)$$

met

$N_c^*$  = maximale stikstofinhoud van het gewas [ $\text{kg m}^{-2}$ ];

$N_c^n$  = stikstofinhoud van het gewas waar beneden de gewasgroei is beperkt [ $\text{kg m}^{-2}$ ];

$N_c^0$  = stikstofinhoud van het gewas waar beneden het gewas stopt met groeien [ $\text{kg m}^{-2}$ ];

$W$  = hoeveelheid drogestof [ $\text{kg m}^{-2}$ ].

Binnen het gewas wordt een onderscheid gemaakt naar bovengrondse plantedelen, wortels en opslagorganen (bij biet en aardappel), die zijn aangeduid met de index  $j$ . De delen hebben elk hun eigen grenzen voor de stikstofconcentratie, die afhankelijk zijn van het ontwikkelingsstadium (uitgedrukt als temperatuursom) van het gewas.

Als de stikstofinhoud van het gewas minder is dan de grens  $N_c^n$  dan wordt de gewasgroei beperkt en als de stikstofinhoud van het gewas de waarde  $N_c^0$  bereikt, stopt de groei. In situaties tussen de grenzen neemt de gewasgroei lineair af volgens (Hansen et al., 1990):

$$P_{act,3} = \frac{N_c - N_c^0}{N_c^n - N_c^0} P_{act,2} \quad (26)$$

met

$P_{act,3}$  = nutriëntgelimiteerde gewasgroei [ $\text{kg}(\text{CH}_2\text{O}) \text{ m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ ];

$P_{act,2}$  = watergelimiteerde gewasgroei [ $\text{kg}(\text{CH}_2\text{O}) \text{ m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ ];

$N_c$  = actuele stikstofinhoud van het gewas [ $\text{kg m}^{-2}$ ].

Aangenomen wordt dat het gewas stikstof opneemt totdat de bovengrens  $N_c^*$  is bereikt mits er voldoende stikstof beschikbaar is. De maximale stikstofopname kan dan worden berekend met:



$$\zeta_u^* = \min \left( l_{NH_4-N}^* + l_{NO_3-N}^* \int_0^{dr} L dt, \frac{N_c^*(t + \Delta t) - N_c(t)}{\Delta t} \right) \quad (27)$$

- $\zeta_u^*$  = maximale stikstofopname [ $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ ];  
 $l_{NH_4-N}^*$  = maximale opname van  $NH_4-N$  per eenheid wortellengte [ $kg\ m^{-1}\ d^{-1}$ ];  
 $l_{NO_3-N}^*$  = maximale opname van  $NO_3-N$  per eenheid wortellengte [ $kg\ m^{-1}\ d^{-1}$ ];  
 $L$  = worteldichtheid [ $m\ m^{-3}$ ];  
 $dr$  = diepte van de wortelzone [m].

De maximale opname van zowel ammonium als nitraat is een constante en moet als invoer worden gegeven.

### PAPRAN

In PAPRAN wordt de afname van de gewasgroei bij stikstoftekort beschreven door (Seligman & van Keulen, 1981):

$$P_{act,3} = \frac{T_{act}}{T_{pot}} P_{pot} R_N \quad (28)$$

met

$R_N$  = reductiefactor voor stikstoftekort [-].

$$R_N = 1 - \sqrt{1 - y^2} \quad (29)$$

waarin

$$y = \frac{N_c - N_c^0}{N_c^n - N_c^0} \quad 0 \leq y \leq 1 \quad (30)$$

met  $N_c$  wordt hier de stikstofconcentratie van de bladeren aangeduid, uitgedrukt als [ $kg\ (N)\ kg^{-1}\ (ds)$ ].

De stikstofopname wordt in PAPRAN beschreven als in Spring Wheat, zie vergelijkingen (17) tot en met (22).

De invloed van stikstoftekort op de verdeling van drogestof tussen de bladeren en de stengels wordt beschreven door een factor  $f$ . De waarde van  $f$  geeft de allocatie van drogestof naar de bladeren weer.  $f$  neemt af van 1 tot 0,5 als de stikstofconcentratie in de bladeren afneemt van de drempelwaarde van de stikstofconcentratie voor onbeperkte groei tot de stikstofconcentratie waar beneden het gewas stopt met groeien.

## WAVE

Ook in WAVE wordt de afname van de gewasgroei bij stikstoftekort beschreven op basis van de stikstofinhoud van de bladeren:

$$P_{act} = P_{pot} \cdot \min \left( \frac{T_{act}}{T_{pot}}, y \right) \quad (31)$$

met  $y$  als in vergelijking (30).

Het is hierdoor bij het eindresultaat voor de gewasgroei niet duidelijk of deze ontstaan is door waterstress of door stikstoftekort.

De stikstofopname wordt in WAVE beschreven door een gewasspecifiek macroscopisch opname-model, dat zowel de opname van stikstof via de transpiratiestroom als de opname door diffusie beschrijft (Vanclooster et al., 1993). De opname van stikstof wordt beperkt door een potentieel niveau:

$$\left( \frac{dN}{dt} \right)_{pot} = g N (N_{max} - N) \quad (32)$$

- $g$  = gewasspecifieke macroscopische opname [ $\text{kg d}^{-1}$ ];
- $N$  = actuele stikstofinhoud van het gewas [ $\text{kg}$ ]
- $N_{max}$  = maximale hoeveelheid geassimileerde stikstof in het gewas bij de oogst [ $\text{kg}$ ].

De potentiële stikstofopname wordt verdeeld in een convectieve (via de transpiratiestroom) en een diffuse fractie. De potentiële convectieve stikstofopname is gedefinieerd als:

$$\left( \frac{dN}{dt} \right)_{conv} = \int_0^{z_r} S_w C_i dz \quad (33)$$

- $S_w$  = convectieve wateropname door de wortels [ $\text{d}^{-1}$ ];
- $C_i$  = stikstofconcentratie [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

Als de convectieve opname groter is dan de potentiële opname wordt een reductie toegepast. De potentiële opname door diffusie wordt berekend als het verschil tussen de potentiële opname en de maximale potentiële convectieve opname, als er voldoende stikstof beschikbaar is:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{dif,pot} = \left(\frac{dN}{dt}\right)_{pot} - \left(\frac{dN}{dt}\right)_{conv} \quad (34)$$

De maximale opname van zowel ammonium als nitraat door diffusie  $S_{nt}$  wordt berekend volgens:

$$S_{nt} = \int_0^{z_r} \frac{2 \pi L n r_r D(\theta) C_i}{d\theta} dz \quad (35)$$

- L = wortellengte per oppervlakte-eenheid [ $m \ m^{-2}$ ];  
n = relatieve worteldichtheid [ $m^{-1}$ ];  
 $r_r$  = gemiddelde wortelstraal [m];  
 $D(\theta)$  = chemische diffusie coëfficiënt;  
 $d\theta$  = effectieve wortelstraal [m].

Als de berekende opname door diffusie groter is dan de potentiële opname door diffusie wordt de opname door diffusie gereduceerd. Tot slot wordt de actuele stikstofopname berekend als de som van de actuele convectieve opname en de actuele opname door diffusie.

#### **CERES-N**

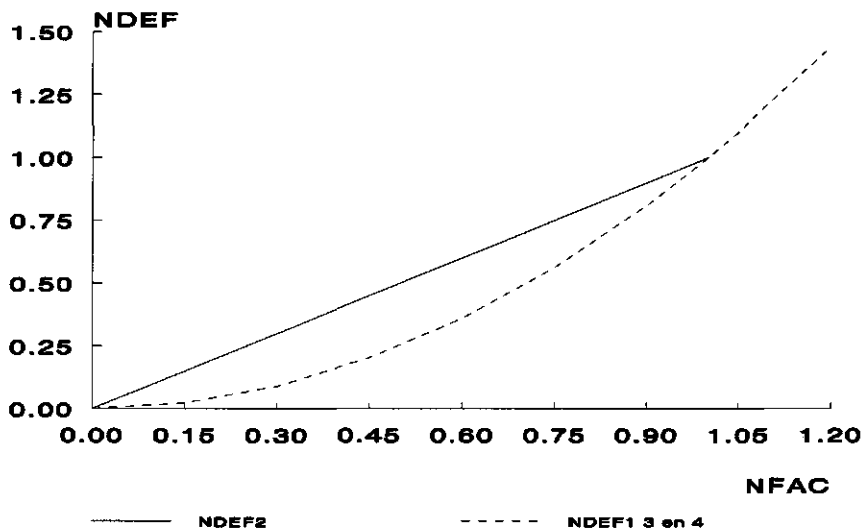
In CERES-N wordt de afname van de gewasgroei bij stikstoftekort op dezelfde wijze als in WAVE beschreven, zie vergelijking (31). De reductiefactor NFAC is gedefinieerd als (Godwin & Jones, 1991):

$$NFAC = 1 - \frac{(TCNP - TANC)}{(TCNP - TMNC)} \quad (36)$$

- TCNP = kritische stikstofconcentratie van de bovengrondse plantedelen [ $g \ (N) \ g^{-1} \ (ds)$ ];  
TANC = actuele stikstofconcentratie van de bovengrondse plantedelen [ $g \ (N) \ g^{-1} \ (ds)$ ];  
TMNC = stikstofconcentratie waar beneden het gewas stopt met groeien [ $g \ (N) \ g^{-1} \ (ds)$ ].

Omdat niet alle groeiprocessen van het gewas in dezelfde mate door stikstoftekort worden beïnvloed, worden in CERES-N een viertal indices (NDEF) gebruikt (Godwin & Jones, 1991). De eerste van deze indices (NDEF1) wordt gebruikt om de effecten van stikstoftekort op de fotosynthese per eenheid bladoppervlakte te beschrijven. De tweede index (NDEF2) beschrijft het effect van stikstoftekort op de mate van bladuitbreiding en afrijping. In het model voor tarwe wordt een derde index (NDEF3) gebruikt om de effecten op legering te beschrijven en een vierde index (NDEF4) voor

aanpassing van de mate van stikstofophoping in de korrels. De relaties tussen NFAC en de indices zijn weergegeven in figuur 4.



*Fig. 4 De relatie tussen de reductiefactor voor stikstoftekort NFAC en de indices voor stikstoftekort NDEF (Godwin & Jones, 1991).*

### **WOFOST**

In WOFOST wordt de nutriëntgelimiteerde gewasgroei 'achteraf' berekend en vergeleken met de potentiële en watergelimiteerde gewasgroei. Voor de berekening van de nutriëntgelimiteerde gewasgroei wordt gebruik gemaakt van het model QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) (Janssen et al., 1990).

In QUEFTS wordt de gewasopbrengst berekend als een functie van de beschikbaarheid van de macro-nutriënten stikstof (N), fosfor (P) en kalium (K). Er wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen de potentiële beschikbaarheid van een nutriënt in de bodem en de actuele opname van dat nutriënt. Als de beschikbaarheid van een nutriënt klein is ten opzichte van die van de twee andere nutriënten, zal de hele voorraad van dat nutriënt worden opgenomen. Het nutriënt wordt 'verdund' in de plant en de inhoud daalt tot een minimum. Is daarentegen de beschikbaarheid van een bepaald nutriënt groot ten opzichte van de andere nutriënten, dan zal de gewasgroei worden beperkt door de kleine beschikbaarheid van deze andere

nutriënten. Het nutriënt zal zich ophopen in de plant en de inhoud bereikt een maximum waarde. De actuele opname van dat nutriënt is dan kleiner dan de potentiële beschikbaarheid.

Bij een bepaalde opname van N, P of K zal de mogelijke gewasopbrengst liggen tussen de gewasopbrengst die overeenkomt met maximale ophoping en de gewasopbrengst met maximale verdunning.

QUEFTS bestaat uit vier opeenvolgende stappen (Janssen et al., 1990):

- (1) Eerst wordt de potentiële beschikbaarheid van N, P en K berekend aan de hand van de relaties tussen enkele chemische eigenschappen in de bovenste 20 cm van de bodem en de maximale hoeveelheid die het gewas van deze nutriënten kan opnemen. In QUEFTS wordt de potentiële beschikbaarheid van N, P, en K berekend aan de hand van enkele eenvoudig te meten bodemkenmerken, zoals  $\text{pH}[\text{H}_2\text{O}]$ , de hoeveelheid organische stof, P-Olsen en CEC-K met behulp van empirische formules. In WOFOST moet de potentiële beschikbaarheid van N, P en K echter als invoer worden gegeven;
- (2) In de tweede stap wordt de actuele opname van elk nutriënt berekend als functie van de potentiële beschikbaarheid van dat nutriënt, rekening houdend met de beschikbaarheid van de twee andere nutriënten;
- (3) Stap drie bestaat uit de bepaling van de gewasopbrengst (Y) bij maximale verdunning (D) en maximale ophoping (A) in de plant van respectievelijk N, P en K als functie van de actuele opname, resulterend in drie opbrengstbereiken: YND-YNA, YPD-YPA en YKD-YKA;
- (4) Tot slot wordt in stap vier de uiteindelijke gewasopbrengst geschat door combinatie van de drie opbrengstbereiken uit stap drie. Het opbrengstbereik dat volgt uit de opname van N wordt beperkt door de overlap met het bereik YPD-YPA, resulterend in een gecombineerde schatting YNP en de overlap met het bereik YKD-YKA met een gecombineerde schatting YNK. Dezelfde procedure wordt gevolgd voor P en K, resulterend in zes schattingen: YNP, YNK, YPN, YPK, YKN en YKP. De uiteindelijke schatting van de gewasopbrengst (YE) is het gemiddelde van de zes gecombineerde schattingen en ligt in de overlap van de drie opbrengstbereiken.

### **ANIMO**

ANIMO heeft een aparte module voor de simulatie van de graslandproductie. Voor de andere landbouwgewassen wordt de productie vastgelegd met standaard invoerparameters. De stikstofopname van deze gewassen wordt beschouwd als een 'verliespost' in de stikstofhuishouding van de bodem. De opname wordt voor zowel ammonium als nitraat beschreven als mass flow:

$$\frac{d [\text{NH}_4]}{dt} = - \delta_{\text{NH}_4} T [\text{NH}_4] \quad (37)$$

$$\frac{d [NO_3]}{dt} = - \delta_{NO_3} T [NO_3] \quad (38)$$

- $[NH_4]$  = concentratie ammonium [ $kg\ m^{-3}$ ];  
 $[NO_3]$  = concentratie nitraat [ $kg\ m^{-3}$ ];  
 $\delta_{NH_4}$  = selectiviteitsfactor voor ammonium [-];  
 $\delta_{NO_3}$  = selectiviteitsfactor voor nitraat [-];  
 $T$  = transpiratieflux [ $m\ d^{-1}$ ].

De selectiviteitsfactoren  $\delta_{NH_4}$  en  $\delta_{NO_3}$  worden per tijdstap bepaald aan de hand van de ingevoerde maximale stikstofopname van het gewas voor het hele groeiseizoen en de verdampingsgegevens. Voor de maximale stikstofopname worden twee perioden onderscheiden: van het moment dat het gewas begint te groeien tot het moment dat de stikstofbehoefte van het gewas daalt en vervolgens tot het einde van het groeiseizoen. Voor gras zijn de selectiviteitsfactoren van te voren vastgelegd.

De waarden van  $\delta_{NH_4}$  en  $\delta_{NO_3}$  zijn aan de bovenkant begrensd, waardoor in situaties met stikstofgebrek in de bodem de opname wordt gereduceerd:

- $\delta_{NH_4} \leq \delta_{NH_4, \max}$ ;
- $\delta_{NO_3} \leq \delta_{NO_3, \max}$ ;

De waarden van de reductiefactoren  $\delta_{NH_4, \max}$  en  $\delta_{NO_3, \max}$  zijn in ANIMO vastgelegd.

Voor grasland wordt de totale stikstofopname beschreven door een sink functie  $dU/dt$ , en wordt berekend als de som van de opname door convectie en diffusie in een radiaal wortelsysteem:

$$\frac{dU}{dt} = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{conv} + \left(\frac{dU}{dt}\right)_{dif} \quad (39)$$

De convectieve opname wordt berekend door:

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{conv} = \frac{T_{act}}{\Delta z} c \quad (40)$$

- $\Delta z$  = dikte van het bodemcompartiment [m];  
 $c$  = stikstofconcentratie in het bodemvocht [ $kg\ m^{-3}$ ].

De opname door diffusie wordt bepaald door:

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{dif} = - \left| a 2\pi r \theta \lambda D_s \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{R_0}^{R_1} \quad (41)$$

a = worteldichtheid [ $\text{m m}^{-3}$ ];

r = afstand tot het midden van de wortel [m];

$\lambda$  = labyrint factor [-];

$D_s$  = diffusiecoëfficiënt [ $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$ ];

$R_0$  = straal van de wortel [m];

$R_1$  = straal van het bodemdeel dat door de wortel wordt beïnvloed [m].

De afname van de grasgroei door stikstoftekort wordt beschreven door:

$$\left(\frac{\Delta Q_s}{\Delta t}\right)^* = Rf_N \frac{\Delta Q_s}{\Delta t} \quad (42)$$

voor de bovengrondse plantedelen, en:

$$\left(\frac{\Delta Q_r}{\Delta t}\right)^* = Rf_N \frac{\Delta Q_r}{\Delta t} \quad (43)$$

voor de wortels.

$Rf_N$  is de reductiefactor voor de afname van de grasgroei bij stikstoftekort en is gedefinieerd als:

$$Rf_N = \frac{U(t) - f_{N,s,\min} Q_s(t_0) - f_{N,r,\min} Q_r(t_0)}{f_{N,s,\min} \Delta Q_{s,gr} + f_{N,r,\min} \Delta Q_{r,gr}} \quad (44)$$

$U(t)$  = cumulatieve stikstofopname door het gewas op tijdstip t [ $\text{kg m}^{-2}$ ];

$f_{N,s,\min}$  = minimum stikstoffractie in de bovengrondse plantedelen;

$f_{N,r,\min}$  = minimum stikstoffractie in de wortels;

$Q_s(t_0)$  = de hoeveelheid bovengrondse plantedelen aan het begin van de tijdstap [ $\text{kg m}^{-2}$ ];

$Q_r(t_0)$  = de hoeveelheid wortels aan het begin van de tijdstap [ $\text{kg m}^{-2}$ ];

$\Delta Q_{s,gr}$  = toename van de hoeveelheid bovengrondse plantedelen gedurende de tijdstap [ $\text{kg m}^{-2}$ ];

$\Delta Q_{r,gr}$  = toename van de hoeveelheid wortels gedurende de tijdstap [ $\text{kg m}^{-2}$ ].

## 5 Fosfortekort

### 5.1 Gewasgroeireacties

Fosfor (P) is een onderdeel van de energierijke verbindingen, waarmee CO<sub>2</sub> wordt gereduceerd tot koolhydraten (suikers). Een tekort aan P zal dus invloed hebben op de groeisnelheid van het gewas. In werkelijkheid vormt de beschikbaarheid van fosfor voor gewasgroei in Nederland zelden een probleem. Er zijn dan ook weinig beschrijvingen met betrekking tot de afname van de gewasgroei bij fosfortekort. Wel is de situatie beschreven dat de opname van fosfor afneemt als de beschikbaarheid van stikstof in de bodem onvoldoende is.

### 5.2 Modelconcepten

#### *ANIMO*

In ANIMO wordt de opname van fosfor door het gewas beschreven als opname via de transpiratiestroom:

$$\frac{d[P]}{dt} = \delta_{PO_4} T [P] \quad (45)$$

[P] = concentratie fosfor [kg m<sup>-3</sup>];

$\delta_{PO_4}$  = selectiviteitsfactor voor fosfaat [-].

Voor de opname van fosfaat geldt evenals voor stikstof dat de selectiviteitsfactor wordt aangepast, zodat de opname zoveel mogelijk gelijk wordt aan de P-behoefte van het gewas. De bovengrens van  $\delta_{PO_4}$  wordt berekend bij een concentratie van 0,4 mg P l<sup>-1</sup> (voor maïs). Bij lagere bodemvochtconcentraties wordt de opname gereduceerd.

#### *WOFOST*

In WOFOST wordt de gewasgroeireactie op P-tekort beschreven door de relaties tussen opname van P, N en K en de gewasopbrengst volgens QUEFTS, zie paragraaf 3.2.



## **6 Vergelijking modellen**

In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten weergegeven van twee studies waarin enkele van de beschreven modelconcepten met elkaar werden vergeleken. De nadruk ligt in deze paragraaf op de stikstofopname van het gewas.

De studies zijn:

- het EG-project 'Nitrate in soils' (Vereecken et al., 1991);
- de modellenworkshop van het IB-DLO (de Willigen, 1991).

### **6.1 EG-project 'Nitrate in soils'**

In dit project zijn onder andere de modellen ANIMO, DAISY en SWATNIT (WAVE) getest voor een drietal lokaties: Askov en Jyndevad (Denemarken) met twee jaar zomergerst en Ruurlo (Nederland) met vijf jaar gras.

De gesimuleerde stikstofopnamen zijn vergeleken met de gemeten hoeveelheden stikstof in de geoogste plantedelen. Hiervoor zijn een aantal statistische criteria en regressie-analyse gebruikt, die lieten zien dat deze drie modellen elkaar bijzonder weinig ontlopen. Dit levert dus geen aanwijzing op voor een keuze welk concept beter zou zijn om in WOFOST in te bouwen.

### **6.2 IB-DLO modellenworkshop**

Tijdens deze workshop zijn de resultaten van verschillende modellen, waaronder ANIMO, DAISY, SWATNIT en NWHEAT, met elkaar vergeleken. Hiervoor is gebruik gemaakt van een gegevensset van twee groeiseizoenen wintertarwe op drie proeflokaties in Nederland met drie verschillende stikstofniveaus. Gegevens werden verkregen met betrekking tot gewasgroei en -ontwikkeling, stikstofopname en de stikstofhuishouding in de bodem.

Voor de vergelijking van de modelresultaten zijn geen statistische criteria gebruikt. De Willigen (1991) constateert geen noemenswaardige verschillen tussen de modellen voor de gesimuleerde stikstofopname. Dit betekent dat deze studie ook geen aanleiding vormt om te kiezen voor een bepaald concept.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

Uit de beschrijvingen van de gewasreactie op waterstress blijkt dat de modellen op dit punt weinig van elkaar verschillen.  $P_{act,2}$  wordt in alle beschouwde modellen, behalve SWACROP, beschreven met behulp van vergelijking (1). In SWACROP wordt  $P_{act,2}$  beschreven met vergelijking (4). De modellen verschillen echter van elkaar in de wijze waarop de actuele transpiratie wordt berekend.

De beschrijvingen van de gewasreactie op stikstoftekort zijn voor de modellen DAISY, PAPRAN, WAVE en CERES-N vergelijkbaar (vergelijkingen 26, 28, 31 en 36). Spring Wheat en NWHEAT gebruiken een formule met parameters die alleen gelden voor tarwe. Voor andere gewassen zijn geen parameterwaarden bekend. In 0ANIMO wordt de reductiefactor voor de afname van de grasgroei bij stikstoftekort bepaald uit de stikstofopname gedurende de tijdstap, de cumulatieve opname van de voorgaande tijdstappen en de benodigde hoeveelheid stikstof voor de groei van bovengrondse plantedelen en wortels gedurende de tijdstap (vergelijking 44).

SWACROP geeft geen beschrijving voor de afname van de gewasgroei bij stikstoftekort.

Bij alle modellen die de gewasreactie op stikstoftekort beschrijven wordt er van uitgegaan dat stikstoftekort de gewasgroei beperkt zonder direct het watergebruik van het gewas te beïnvloeden. In werkelijkheid zal van een gewas dat groeit onder stikstoftekort de transpiratie afnemen.

Alleen koppeling van de bestaande modellen SWAP, ANIMO en WOFOST geeft geen voldoende beschrijving van de effecten van gecombineerde waterstress en nutriëntentekort op de gewasproductie. Uit de bovenstaande beschrijvingen moet daarom een keuze worden gemaakt welke in het gekoppelde model zullen worden ingebouwd. Bij het maken van een keuze kan het volgende worden meegenomen:

- De beschrijvingen moeten zo min mogelijk plaats- en gewasgebonden zijn;
- Het ligt voor de hand te kiezen voor een macroscopische benadering, omdat deze het beste aansluit bij SWAP, ANIMO en WOFOST.

De modelconcepten die hierbij het beste aansluiten zijn de graslandmodule van ANIMO, WAVE en DAISY. Voor de correctie van de gewasgroei bij fosfortekort is alleen het modelconcept van ANIMO (gras) beschikbaar.

## Literatuur

- Diepen, C.A. van, J. Wolf, H. van Keulen and C. Rappoldt, 1989. 'WOFOST: a simulation model of crop production'. *Soil Use and Manag.* 5 nr. 1, 16-24.
- Doorenbos, J., A.H. Kassam, C. Bentvelder and G. Uittenbogaard, 1978. *Yield response to water*. U.N. Economic Commission West Asia, Rome.
- Drecht, G. van, F.R. Goossensen, M.J.D. Hack-ten Broeke, E.J. Jansen en J.H.A.M. Steenvoorden, 1991. *Berekening van de nitraatuitspoeling naar het grondwater met behulp van eenvoudige modellen*. Rapport 163. SC-DLO, Wageningen.
- Driessen, P.M., 1986. *The water balance of the soil*. In: Keulen, H. van and J. Wolf (Eds). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 76-116.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen.
- Feddes, R.A., 1987. *Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration*. In: Hooghart, J.C. (Ed). *Evaporation and weather*. CHO-TNO, Proceedings and Information 39, Den Haag, 33-45.
- Feddes, R.A., M. de Graaf, J. Bouma and C.D. van Loon, 1988. 'Simulation of water use and production of potatoes as affected by soil compaction'. *Potato Research*, 31, 225-239.
- Godwin, D.C. and C.A. Jones, 1991. *Nitrogen dynamics in soil-plant systems*. In: Hanks R.J. and J.T. Ritchie (eds). *Modelling plant and soil systems*. ASA Inc., CSSA Inc., SSSA Inc., Madison, 287-321.
- Goudriaan, J. and H. van Keulen, 1979. 'The direct and indirect effects of nitrogen shortage on photosynthesis and transpiration in maize and sunflower'. *Neth. J. of Agr. Sc.* 27, 227-234.
- Groot, J.R.R., 1987. *Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil*. Simulation Reports CABO-TT 13, WAU-TPE, Wageningen.
- Hijmans, R.J., I.M. Guiking-Lens and C.A. van Diepen, 1994. *User guide for the WOFOST 6.0 crop growth simulation model*. Technical Document 12. SC-DLO, Wageningen (final draft).
- Hopstaken, C.F. en E.J.B. Uunk, 1989. 'NITSOL/PHOSOL; modellen voor het gedrag van stikstof en fosfor in de bodem en de effecten op de waterkwaliteit'. *H<sub>2</sub>O* 22 nr. 9, 261-271.

Janssen, B.H., F.C.T. Guiking, D. van der Eijk, E.M.A. Smaling, J.Wolf and H. van Reuler, 1990. 'A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS)'. *Geoderma* 46, 299-318.

Keulen, H. van, F.W.T. Penning de Vries and E.M. Drees, 1982. *A summary model for crop growth*. In: Penning de Vries, F.W.T. and H.H. van Laar (Eds.) *Simulation of plant growth and crop production*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen 87-97.

Keulen, H. van, 1986. *A simple model of water-limited production*. In: Keulen, H. van and J. Wolf (Eds), 1986. *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 130-152.

Keulen, H. van and N.G. Seligman, 1987. *Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop*. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, Pudoc.

Keulen, H. van en W. Stol, 1993. *Efficiëntie van water- en stikstofgebruik: een simulatiestudie*. In: Keulen, H. van en F.W.T. Penning de Vries (red.). *Watervoorziening en gewasproductie*. Agrobiologische thema's 8. CABO-DLO, Wageningen, 17-39.

Radin, J.W. and R.C. Ackerson, 1981. 'Water relations of cotton plants under nitrogen deficiency. III. Stomatal conductance, photosynthesis, and abscisic acid accumulation during drought'. *Plant Physiology* 67, 115-119.

Ritchie, J.T. and E. Burnett, 1971. 'Dry land evaporative flux in a subhumid climate: II. Plant influences'. *Agron. J.* 63, 51-62.

Seligman, N.G. and H. van Keulen, 1981. *PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen*. In: M.J. Frissel and J.A. van Veen (Eds). *Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems*. Pudoc, Wageningen, 192-221.

Spitters, C.J.T., H. van Keulen and D.W.G. van Kraalingen, 1989. *A simple and universal crop simulator: SUCROS87*. In: Rabbinge R., S.A. Ward and H.H. van Laar (Eds). *Simulation and systems management in crop protection*. Simulation monographs 32. Pudoc, Wageningen, 147-181.

Supit, I., A.A. Hooijer and C. A. van Diepen (Eds.), 1994. *System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS*. Joint Research Centre, Commission of the European Communities, Brussels/Luxembourg.

Tanner, C.B. and T.R. Sinclair, 1983. *Efficient water use in crop production: Research or Re-search?* In: Taylor, H.M., W.R Jordan and T.R. Sinclair (Eds). Limitations to efficient water use in crop production. ASA Inc., CSSA Inc., SSSA Inc., Madison, 1-27.

Vereecken, H., E.J. Jansen, M.J.D. Hack-ten Broeke, M. Swerts, R. Engelke, S. Fabrewitz and S. Hansen, 1991. *Comparison of simulation results of five nitrogen models using different datasets.* In: CEC. Nitrate in soils: Soil and groundwater research report II. EUR 13501 EN, Luxembourg, 321-338.

Willigen, P. de, 1991. 'Nitrogen turnover in the soil-crop system; comparison of fourteen simulation models'. In: Groot, J.R.R., P. de Willigen and E.L.J. Verberne (Eds). Nitrogen Turnover in the Soil-Crop System. *Fert. Res.* 27 nr. 2-3, 141-149.

Wit, C.T. de, 1978. *Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops.* Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen.

#### **Niet-gepubliceerde bronnen**

Berghuijs - van Dijk, J.T., P.E. Rijtema en C.W.J. Roest, 1985. *ANIMO: Agricultural nitrogen model.* ICW Nota 1671, Wageningen.

Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen and H. Svendsen, 1990. *DAISY-A soil plant system model: Danish simulation model for transformation and transport of energy and matter in the soil plant atmosphere system.* The Royal Veterinary and Agricultural University, Department of Agricultural sciences, section of soil and water and plant nutrition, Copenhagen.

Vanclooster, M., J. Diels, P. Viaene and J. Feyen, 1993. *The SWAT-modules: theory and input requirement.* Katholieke Universiteit, Institute for land and water management, Leuven. (preliminary draft).