

H. VAN KEULEN*

toepassing van simulatiemodellen in het landbouwkundig onderzoek in semi-aride gebieden

14

Een belangrijk deel van het landoppervlak van de aarde bestaat uit aride en semi-aride gebieden. Deze streken die over het algemeen gekenmerkt worden door lage en sterk variërende neerslaghoeveelheden, vormen een niet te verwaarlozen productiepotentieel voor landbouwkundige gewassen (Buringh e.a. (1)). Er is en wordt daarom veel landbouwkundig onderzoek in deze gebieden uitgevoerd, dat meestal echter strikt lokaal toepasbare resultaten oplevert.

In een in 1971 gestart gezamenlijk Nederlands-Israëliësch onderzoekproject over 'Actuele en potentiële productie van grasachtige gewassen onder semi-aride omstandigheden' is getracht simulatiemodellen te ontwikkelen waarin speciaal de nadruk werd gelegd op de in deze gebieden limiterende productiefactoren, zodat de in het project opgedane kennis gemakkelijker geëxtrapoleerd kan worden. Tevens werden metingen uitgevoerd om data-sets te verkrijgen, waaraan de ontwikkelde modellen zouden kunnen worden getoetst. Waar nodig en mogelijk is ook ondersteunend onderzoek gedaan om leemten in de kennis die naar voren kwamen tijdens het opstellen van de modellen, op te vullen.

In deze bijdrage wordt een korte beschrijving gegeven van de twee belangrijkste modellen die uit dit project resulteerden. De uitkomsten zullen worden getoond in vergelijking met de uitgevoerde metingen en er zal worden ingegaan op de gebruiksmogelijkheden van dergelijke modellen voor verdere onderzoek- en ontwikkelingsprojecten in soortgelijke gebieden.

het simulatiemodel ARID CROP

Omdat in een voorbereidende analyse van de situatie in deze droge gebieden, onder meer gebaseerd op werk van Tadmor e.a. (2) de beschikbaarheid van water de voornaamste limiterende factor voor de productie leek te zijn, werd in eerste instantie een daarop gericht model ontwikkeld.

Evenals voor de andere in deze uitgave beschreven modellen werd ook in dit geval gebruik gemaakt van de simulatie-taal CSMP.

Aangezien elders (Van Keulen, (3)) al een uitgebreide beschrijving van het model gegeven is, alsook een verantwoording van de toegepaste vereenvoudigingen, zal hier worden volstaan met een globaal overzicht van de belangrijkste elementen. Het model berekent de waterbalans in de bodem en daaruit het verloop van de drogestofproductie gedurende één groeiseizoen. Het gewas

wordt behandeld als een homogene stand met éénduidig bepaalde eigenschappen, terwijl een optimale voorziening met voedingsstoffen wordt verondersteld.

processen in de bodem

Voor het beschrijven van de waterbalans wordt de bodem verdeeld in een aantal met toenemende diepte dikker wordende lagen, die in dit geval allemaal dezelfde eigenschappen hebben.

Het transport van water tussen de compartimenten wordt niet gesimuleerd met behulp van potentiaalgradiënten, maar er worden beschrijvende formuleringen gebruikt, die zijn afgeleid uit gedetailleerde modellen voor waterstroming (Van Keulen & Van Beek (4)) en bodemverdamping (Van Keulen (3)). De totale hoeveelheid water die infiltreert, wordt berekend uit de dagelijkse neerslag met een correctie voor run-on of run-off invloeden. Deze hoeveelheid wordt zodanig verdeeld over de verschillende lagen, dat ze achtereenvolgens vanaf de oppervlakte gevuld worden tot

veldcapaciteit. Dit gaat door, tot alle binnendringende water is verdeeld of tot het surplus beneden de potentiële bewortelingszone is weggezakt. Bij de berekening van de directe bodemverdamping wordt rekening gehouden met de verdeling van de straling over gewas en onbegroeide bodem, en met het teruglopen van de verdamping door het uitdrogen van het oppervlak. Het totale waterverlies door verdamping wordt onttrokken aan verschillende compartimenten in afhankelijkheid van de hydraulische eigenschappen van de grond en de actuele vochtverdeling in het profiel. Er zij hier nog gewezen op het feit dat deze procedure redelijke resultaten gaf voor de lemige gronden van de Negev, maar dat voor zandige bodems, zoals in de Sahel voorkomen, minder goede uitkomsten worden verkregen.

De temperatuur in de bodem wordt berekend als een tiendaags lopend gemiddelde van de luchttemperatuur en wordt verondersteld constant te zijn over de gehele diepte van het profiel.

De wateropname door de wortels wordt bepaald door de potentiële gewasver-

* Dr. ir. H. van Keulen is als wetenschappelijk ambtenaar verbonden aan het CABO te Wageningen.

damping, terwijl rekening wordt gehouden met de vochtverdeling en de wortelverdeling in de grond. Het wortelstelsel wordt homogeen verondersteld in horizontale richting, terwijl in verticale richting een constante activiteit op alle diepten wordt aangenomen. Het effect van de bodemtemperatuur op de viscositeit van het water en de doorlatendheid van het wortelstelsel wordt in rekening gebracht.

groei en transpiratie van het gewas

Omdat in dit model de nadruk ligt op de drogestofproductie en niet op de precieze soortensamenstelling van de vegetatie, werd geen gedetailleerde beschrijving van de kieming (Janssen (5)) opgenomen. Kieming wordt verondersteld plaats te vinden, als in één van de lagen in de bovenste 10 cm van de grond het vochtgehalte boven het verwelkingspunt is en ze wordt voltooid gedacht als een temperatuursom van 150 dagen \times $^{\circ}\text{C}$ boven 0°C is bereikt. Droogt de bodem uit voordat de kieming is afgelopen, dan gaan de kiemplantjes dood en nieuwe beginnen zich dan na een volgende regenbui te ontwikkelen. Er wordt verondersteld dat aan het eind van de kieming een hoeveelheid van 100 kg droge stof per ha aanwezig is op het veld. De exacte waarde van deze beginhoeveelheid biomassa blijkt nauwelijks invloed te hebben op de totale berekende drogestofproductie, maar er kunnen belangrijke verschillen in groeipatroon optreden. Deze verschillen zijn vooral van belang in verband met de beweidingstrategie.

Nadat het 'zaailing'-stadium is bereikt, wordt de groei van het gewas bepaald door zijn transpiratiesnelheid en de efficiëntie van waterverbruik. Laatstgenoemde grootte is de reciproke van de transpiratiecoëfficiënt (De Wit, (6)) en ze wordt gevonden als de verhouding tussen potentiële groeisnelheid en potentiële verdampingssnelheid bij veronderstelling dat de waarde onafhankelijk is van de vochttoestand van de bodem en van de fysiologische leeftijd van het gewas. De potentiële transpiratiesnelheid wordt verkregen uit de dagwaarden van de weersgegevens en de toestand van het gewas via formuleringen die zijn

afgeleid uit berekeningen met een gedetailleerd model voor groei en verdamping van een gewasoppervlak (De Wit e.a., in prep. (12)). De potentiële groeisnelheid wordt bepaald uit de bruto-fotosynthese, rekening houdend met verliezen ten gevolge van onderhoudsademhaling en met de efficiëntie waarmee primaire fotosyntheseproducten worden omgezet in structureel weefsel (Penning de Vries (7)). In tabel 14.1 zijn enkele met het eerder genoemde model berekende waarden van de transpiratiecoëfficiënt gegeven in vergelijking met experimenteel in potproeven bepaalde waarden, waaruit een redelijke overeenstemming blijkt.

Door veroudering of ten gevolge van watertekort sterft het gewas af. Daalt de op het veld aanwezige hoeveelheid drogestof beneden een kritische waarde, dan wordt het gewas verondersteld dood te zijn, zodat de groei eerst na een nieuw kiemingsproces weer begint. De morfogenese van het gewas wordt niet gesimuleerd, maar het bladoppervlak wordt verkregen uit de drogestofproductie via een koppeling met een temperatuurafhankelijke 'leaf area ratio'. Het wortelstelsel wordt gedefinieerd door zowel zijn gewicht als zijn uitgestrektheid met de diepte. Voor de lengtegroei wordt aangenomen dat het wortelfront zich met een constante snelheid in neerwaartse richting verplaatst, totdat een droge bodemlaag wordt bereikt. Het

wortelgewicht wordt verkregen uit de totale toename in droog gewicht via een van de leeftijd afhankelijke verdelingsfactor voor onder- en bovengrondse delen, die zodanig werkt dat bij toenemende ouderdom steeds minder naar de wortel wordt getransporteerd.

Het ontwikkelingspatroon van de plant wordt in het model alleen bepaald door de luchttemperatuur. (Er moet op worden gewezen dat in andere situaties met name opnieuw in de Sahel, ook daglengte-effecten een grote rol kunnen spelen). Het ontwikkelingsstadium, dat wordt gekarakteriseerd door een getal tussen 0 (= establishment) en 1 (= volledige rijpheid) heeft invloed op de groeisnelheid via een reductie van de potentiële transpiratie, wat tot gevolg heeft, dat de groei kan ophouden, zelfs wanneer nog voldoende water in de grond aanwezig is.

Het model wordt uitgevoerd met tijdstappen van één dag en de gebruikte integratieroutine is die van Euler.

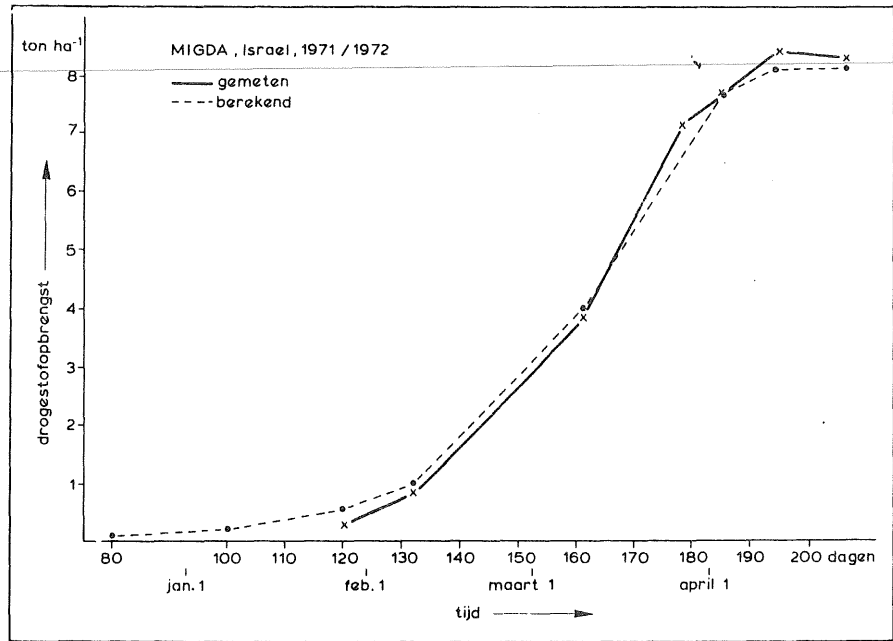
resultaten en discussie

In de figuren (14.1) en (14.2) zijn de gemeten en gesimuleerde waarden van de bovengrondse drogestofproducties gegeven voor twee groeiseizoenen. Een vergelijking van deze twee figuren toont een duidelijk onderscheid tussen de twee seizoenen: terwijl in het jaar '71/'72 het verschil tussen gemeten en

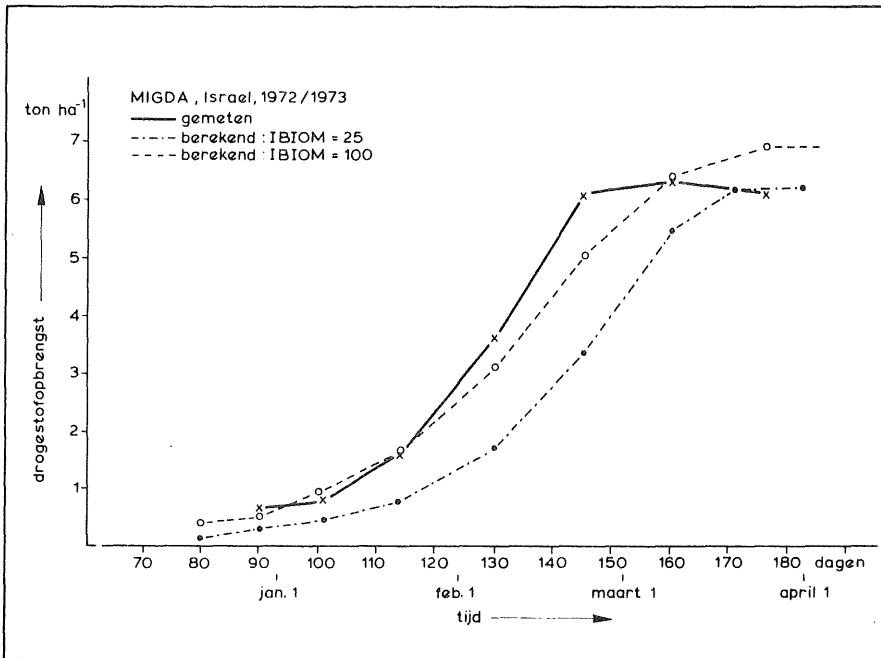
tabel 14.1. Vergelijking van gemeten en berekende transpiratiecoëfficiënten (naar Van Keulen, (3)).

planten soort	groeitijd	gemeten g H ₂ O/g DS	gesimuleerd g H ₂ O/g DS	verhouding gesim./gem.
haver (<i>Avena sativa</i>)	08-10-'71/22-11-'71	170	165	0.97
	08-10-'71/25-01-'72	79	149	1.86*
	04-10-'72/17-11-'72	235	257	1.10
	04-10-'72/05-01-'73	194	206	1.07
tarwe (<i>Triticum sativum</i>)	08-10-'71/25-01-'72	129	147	1.14
	17-10-'72/27-11-'72	217	228	1.05
	17-11-'72/16-02-'73	131	218	1.67*
	05-01-'73/16-03-'73	166	202	1.22
gerst (<i>Hordeum sativum</i>)	08-10-'71/22-11-'71	173	185	1.07
	08-10-'71/25-01-'72	104	149	1.44*
	05-10-'72/17-11-'72	217	246	1.14
	05-10-'72/23-02-'73	224	209	0.94

berekende waarde nooit de 5% overschrijdt, loopt dit in '72/'73 op tot bijna 15% op een bepaald tijdstip, zonder dat daarvoor eigenlijk aanwijsbare oorzaken zijn. Dit verschijnsel wijst nog eens op één van de impliciete moeilijkheden die aan het ontwikkelen en gebruiken van modellen verbonden zijn. De gegevens van het seizoen '71/'72 zijn namelijk voortdurend gebruikt om tijdens de ontwikkeling van het model zijn gedrag te bestuderen, de invloed van veranderingen in de structuur na te gaan enz. Wanneer zowel de modelontwikkeling als de proeven door dezelfde man of hetzelfde team uitgevoerd worden, is het bijna onvermijdelijk dat er interacties tussen beide activiteiten ontstaan. Dit leidt tot het — vaak onbewust — introduceren van subjectieve functies of relaties in het model, die, 'naar de uit-



14.1 Berekende en gemeten drogestofproductie in Migda in het seizoen 1971/1972.



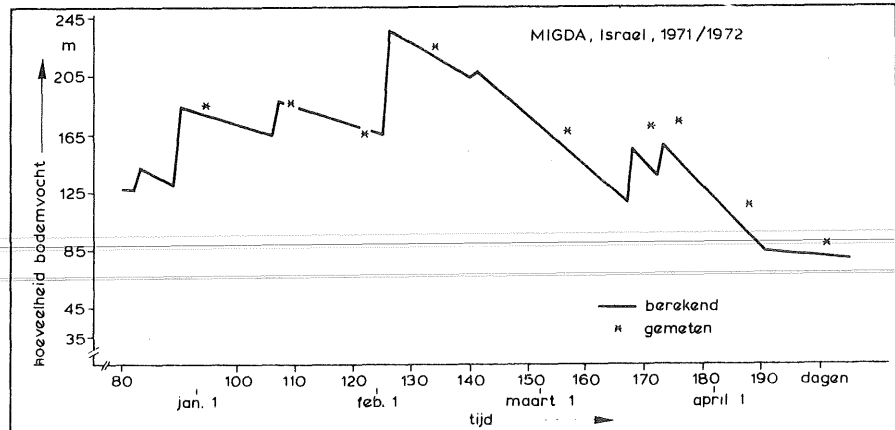
14.2 Berekende en gemeten drogestofproductie in Migda in het seizoen 1972/1973.

14.3 Berekende en gemeten hoeveelheid vocht in het profiel in het seizoen 1971/1972.

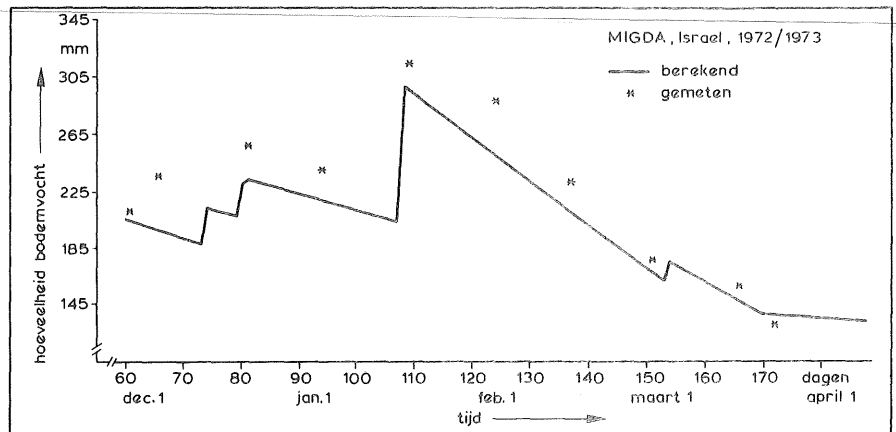
komst' toe werken. Het is daarom essentieel, dat voor verificatiedoeleinden volledig onafhankelijke waarnemingen worden gebruikt (Van Keulen (8)).

De gemeten en berekende vochthoeveelheden in de bodem (fig. (14.3) en (14.4)) stemmen in beide seizoenen goed met elkaar overeen. Dit geldt te meer als in aanmerking wordt genomen dat de meetnauwkeurigheid zelden groter is dan 10% als gevolg van inhomogeniteit van de bodem.

Een algemene vergelijking van de gemeten en gesimuleerde waarden leidt tot



14.4 Berekende en gemeten hoeveelheid vocht in het profiel in het seizoen 1972/1973.



de conclusie dat de drogestofproductie van een gewas en de waterbalans in de bodem vrij nauwkeurig worden beschreven door het simulatiemodel, onder omstandigheden waar water de belangrijkste productiebepalende factor is. Ondanks dat blijken er toch nogal wat processen te zijn, waarvan onze kennis beperkt is en waarvan een betere formulering mogelijk is. Hieruit blijkt het model ook aan dat doel van de simulatie, het opsporen van leemten in onze kennis, te beantwoorden.

toepassing van het model

Het beschreven model kan worden gebruikt om het productievermogen van een nieuw gebied te bepalen, wanneer de relevante klimaat- en bodemgegevens bekend zijn. Een voorbeeld van een dergelijke toepassing is gegeven door Penning de Vries en Van Heemst (9), die het model gebruikt hebben tijdens de voorbereiding van een project dat zich richt op de primaire productie in de Sahel. De resultaten van hun berekeningen zijn weergegeven in tabel 14.2. De voornaamste conclusies die men uit deze berekeningen kan trekken, zijn dat de omstandigheden in de Sahel, vooral met betrekking tot de bodem en het neerslagverloop, leiden tot veel grotere verliezen aan water, zowel door bodemverdamping als door percolatie, dan in de Negev. Onder de meest gunstige omstandigheden zouden echter producties haalbaar zijn tot 9000 kg drogestof per ha. Op grond van dergelijke berekeningen kan men vrij snel een inzicht verkrijgen in de onderlinge belangrijkheid van de verschillende processen en mede daarvoor kunnen gemakkelijker onderzoeksprioriteiten worden vastgesteld.

Een andere toepassingsmogelijkheid ligt in het uittesten van de invloed van bepaalde specifieke verschijnselen of van beheersalternatieven. Voor het gebied in de Negev is op deze wijze nagegaan wat het effect zou zijn van een zodanige

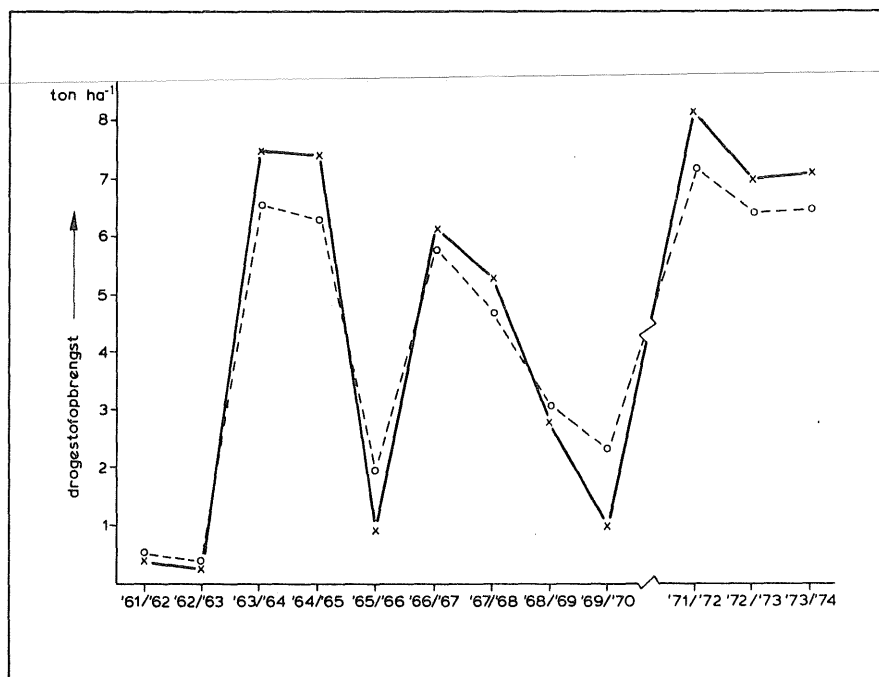
tabel 14.2a Waterhoudende eigenschappen van een aantal bodemtypen uit de Sahel.

bodemtype	veldcapaciteit g cm ⁻³	verwelkingspunt g cm ⁻³	luchtdroog g cm ⁻³	diepte bodem cm
cambisol (type 1)	0.08	0.025	0.015	100, 180
luvisol (type 2)	0.14	0.06	0.04	50, 100, 180
luvic-arenosol (type 3)	0.20	0.10	0.04	150
fluvisol, gleysol, planosol, vertisol (type 4)	0.36	0.24	0.15	100

tabel 14.2b. Drogestofproductie en waterverbruik berekend voor zeven bodemtypen en twee neerslagregimes in de Sahel.

neerslag	bodem		totale drogestofproductie (kg ha ⁻¹)	maximale levende biomassa (kg ha ⁻¹)	lengte van het groeiseizoen (dagen)	transpiratie, bodemverdamping, opslag en percolatie als percentage van de neerslag
	type	diepte (cm)				
535 mm (Mopti)	1	180	8600	6600	112	31, 41, 4, 24
	1	100	7700	6000	108	28, 41, 0, 31
	2	180	8900	6800	112	33, 48, 10, 9
	2	100	8700	6700	112	32, 48, 0, 20
	2	50	7100	5300	96	25, 48, 0, 27
	3	150	8500	6600	112	32, 65, 3, 0
267 mm (Gao)	4	100	5200	3800	88	19, 83, -2, 0
	1	180	3300	2700	64	18, 79, 3, 0
	1	100	3300	2700	64	18, 74, 3, 5
	2	180	2800	2200	56	16, 92, -8, 0
	2	100	2800	2100	56	16, 88, -4, 0
	2	50	2300	1800	52	13, 84, -1, 4
	3	150	100	100	1	0, 112, -12, 0
	4	100	0	0	0	0, 112, 15, 0

inhomogeniteit van de bodem dat die zou leiden tot plaatselijke run-off run-on. Hierbij is aangenomen dat op de helft van het oppervlak 30% van de neerslag afstroomt en dat die ten goede komt aan de andere helft van het gebied. Het resultaat van deze berekening (fig. 14.5) laat zien, dat een dergelijke inhomogeniteit leidt tot verhoogde opbrengsten in de 'magere' jaren en tot een geringe verlaging in de 'vette' jaren. Aangezien in dergelijke gebieden de beheersproblemen voornamelijk veroorzaakt worden door de grote variabiliteit in de opbrengsten van jaar tot jaar en de uiteindelijke limiterende factor de laagste opbrengst is, zou het de moeite waard kunnen zijn maatregelen te bedenken of toe te passen die het ontstaan van lokale run off - run on-situaties zouden bevorderen.



14.5 De invloed van inhomogeniteit van de bodem op de berekende jaarlijkse drogestofproduktie (getrokken lijn zonder run-off; onderbroken lijn met run-off).

de rol van stikstof

Aangezien tijdens de eerste proefnemingen in de Negev al duidelijk was geworden dat toediening van stikstofmeststoffen een aanzienlijke produktieverhoging van de natuurlijke vegetatie tot gevolg had en bovendien de resultaten van ARID CROP aantoonde dat in meer dan de helft van de jaren de opbrengst door de beschikbaarheid van stikstof werd bepaald, is er in het al genoemde project ook een model voor het gedrag van stikstof onder deze omstandigheden ontwikkeld.

beschrijving van het model

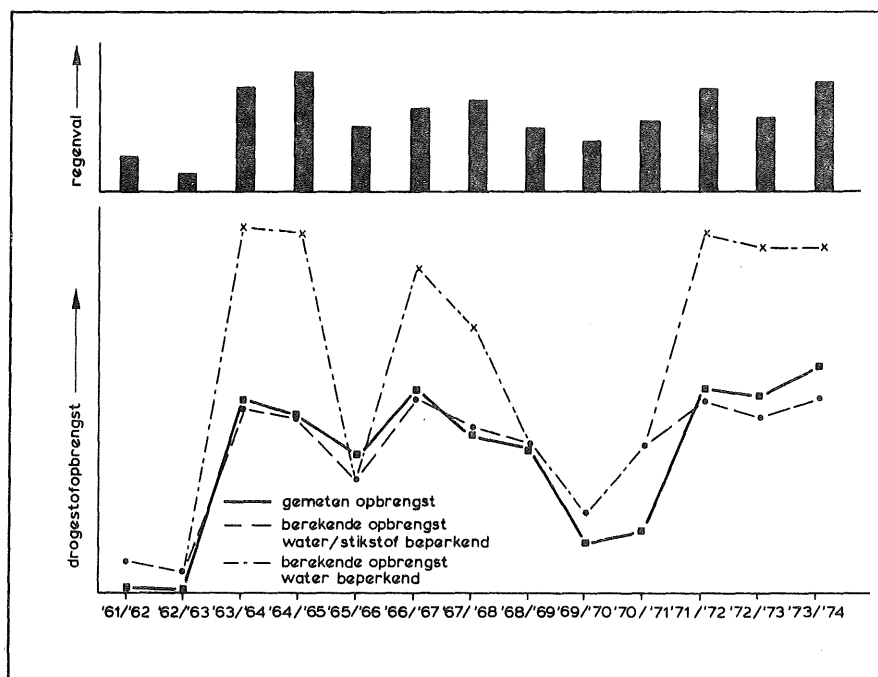
Het model dat uitgebreid beschreven is door Harpaz (10), berekent de jaarlijkse balans van organisch en anorganisch stikstof van beweide vegetatie. De totale hoeveelheid in het systeem aanwezige stikstof is verdeeld in vier compartimenten:

- a. stikstof in stabiel organisch materiaal;
- b. stikstof in 'vers' organisch materiaal waarin de plantenresten en de faeces van het vorig seizoen zijn opgenomen;
- c. anorganische stikstof in de grond;
- d. stikstof in het gewas te velde.

De bijdrage van elk van de processen die stikstof aan het systeem toevoegen of stikstof aan het systeem onttrekken,

wordt geschat op jaarbasis, waaruit als resultante de in dat jaar voor de planten beschikbare hoeveelheid stikstof volgt. Hieruit wordt dan de drogestofopbrengst bepaald, door de totale hoeveelheid N te delen door het stikstofgehalte in het gewas bij de oogst.

14.6 De gemeten en berekende drogestofproducties voor stikstof en/of water-limiterende omstandigheden.



resultaten van het model

Om te testen hoe betrouwbaar het model was voor opbrengstvoorspellingen onder semi-aride omstandigheden, werd het gedraaid met gegevens die in de afgelopen jaren in de Negev zijn verza-

meld. In dit gebied werden de maximale drogestofproducties van de natuurlijke vegetatie bepaald als onderdeel van een langlopende beweidingproef op de belangrijkste vegetatietypen (Tadmor e.a. (11)).

In figuur 14.6 zijn de met het model berekende drogestofproducties voor de verschillende jaren uitgezet, in vergelijking met de gemeten waarden en de berekende opbrengsten, als alleen water limiterend zou zijn. De in het model gebruikte regenvalcijfers zijn ook in deze figuur aangegeven. Opvallend is, dat in slechts vijf van de dertien gesimuleerde jaren de water-beperkte opbrengst samenvalt met die waarin ook stikstof als beperkende factor is opgenomen, terwijl een zesde ('68/'69) een grensgeval is. In de overige zeven seizoenen kwam de produktie, beperkt door de beschikbaarheid van stikstof, nauwelijks boven de helft van de water-beperkte opbrengst.

Over het algemeen is er een redelijke overeenstemming tussen de gemeten en de berekende waarden. Relatief de grootste afwijkingen komen voor in de droge jaren, wat gedeeltelijk verklaard kan worden uit het feit dat in die seizoenen de invloed van de beweiding op de hoeveelheid te velde staand gewas niet verwaarloosbaar is. Deze resultaten zijn hoopgevend voor wat betreft de mogelijkheid om opbrengsten in dergelijke systemen te voorspellen in stikstof-limiterende omstandigheden. Er moet echter wel op gewezen worden, dat er in het model nogal wat parameters ingeschat zijn, omdat nauwkeurige metingen niet voorhanden waren.

Tijdens dit inschatten heeft toch een zekere 'tuning' van de waarden plaatsgevonden, en om een beter beeld te krijgen van de opbrengstvoorspellende waarde van het model zou het onder andere omstandigheden ook toegepast moeten worden. Uit de door Harpaz(10) uitgevoerde gevoeligheidsanalyse kan men al wel een goede indruk krijgen van het relatieve belang van de verschillende parameters, waaruit dan weer de onderzoeksprioriteiten kunnen worden bepaald.

conclusies

Uit het in deze bijdrage beschreven onderzoek mag men de conclusie trekken, dat het gebruik van simulatiemodellen goede mogelijkheden biedt voor het zich vormen van een beeld van de mogelijkheden en moeilijkheden van de landbouwkundige ontwikkeling van nieuw te onderzoeken gebieden. Ze verschaffen in het algemeen meer inzicht in de causale verbanden tussen de verschillende deelprocessen dan bijvoorbeeld regressiemodellen.

Uit het onderzoek blijkt tevens dat de (semi-) aride gebieden in de wereld nog een belangrijke bijdrage zouden kunnen leveren tot een verhoging van de voedselproductie, mits een adequate voorziening met mineralen kan worden gegarandeerd, en er oplossingen kunnen worden gevonden voor de beheersproblemen die samenhangen met het wisselvallige karakter van de produktie.

literatuur

1. Buringh, P., van Heemst, H.D.J. and Staring, G.J.: Computation of the absolute maximum food production of the world. Publ. no. 598. Afd. Bodemkunde en Geologie, Landbouwhogeschool, Wageningen, 1975.
2. Tadmor, N. H., Evenari, M. and Shanani,

L.: Primary production of pasture plants as function of water use. Intern. Symp. Ecophysiological foundation of ecosystems productivity in arid zones. Publ. house NAUKA, Leningrad, 1972.

3. Keulen, H. van: Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 1975.

4. Keulen, H. van and van Beek, C.G.E.M.: Water movement in layered soils - A simulation model. *Neth. J. agric. Sci.* 19 (1971): 138-153.

5. Janssen, J. G. M.: Simulation of germination of winter annuals in relation to microclimate and microdistribution. *Oecologia (Berlin)* 14 (1974): 197-228.

6. Wit, C. T. de: Transpiration and crop yields. Versl. Landbouwk. Onderz. (Agric. Res. Rep.) 64.6, Pudoc, Wageningen, 1958.

7. Penning de Vries, F. W. T.: Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants. *Neth. J. agric. Sci.* 22 (1974): 40-44.

8. Keulen, H. van: Evaluation of models. Proc. First Intern. Congress of Ecology, Den Haag, Pudoc, Wageningen, 1974.

9. Penning de Vries, F. W. T. and van Heemst, H. D. J.: Potential primary production of unirrigated land in the Sahel. Proc. ILCA Seminar on evaluation and mapping of African rangelands, Bamako, 3-8 March 1975.

10. Harpaz, Y.: Simulation of the nitrogen balance in semi-arid regions. Ph. D. thesis Hebrew University, Jerusalem, 1975.

11. Tadmor, N. H., Eyal, E. and Benjamin, R. W.: Plant and sheep production on semi-arid grassland in Israel. *J. Range Manag.* 27 (1974): 427-432.

12. Wit, C. T. de et al., BACROS, a basic crop growth simulator. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen (in prep.).