

Integratie van GIS en rekenmodellen

Jandirk Bulens
Arnold Bregt
Kees van Diepen

DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen
Telefoon: 08370-74201, telefax: 08370-24812
E-mail: j.d.bulens@sc.agro.nl, a.k.bregt@sc.agro.nl, c.a.van.diepen@sc.agro.nl

Referaat

Het gebruik van geografische Informatiesystemen (GIS) voor de opslag, beheer, analyse en presentatie van ruimtelijke gegevens is de laatste tien jaar sterk toegenomen. De laatste jaren staat de koppeling tussen GIS en rekenmodellen sterk in de belangstelling, omdat dit nieuwe en betere mogelijkheden biedt voor de analyse van onze omgeving. Ten aanzien van de technische implementatie van de koppeling zijn verschillende vormen te onderkennen, variërend van een niet geïntegreerde koppeling, waarbij GIS en model twee losse entiteiten zijn en het gegevenstransport tussen beide ongeformaliseerd wordt geregeld, tot volledige integratie, waarbij een bepaald rekenmodel wordt geformuleerd in de ontwikkeltaal van een GIS-pakket. Het is te verwachten dat in de toekomst een integratie in de vorm van losse componenten met een gestandaardiseerde interface gebaseerd op de Open Geodata Interoperability Specification (OGIS) het meeste perspectief biedt.

Ter illustratie wordt een bij het SC-DLO gerealiseerde koppeling tussen GIS en een gewasgroeimodel beschreven, waarmee de oogst voor diverse akkerbouwgewassen in de Europese Unie kan worden voorspeld.

Trefwoorden: GIS, rekenmodellen, oogstvoorspelling, Europese Unie

Inleiding

Het gebruik van GIS voor opslag, beheer, analyse en presentatie van ruimtelijke gegevens is de laatste tien jaar sterk toegenomen. GIS-toepassingen zijn gerealiseerd op een groot aantal terreinen, variërend van landgebruiksplanning en leidingenbeheer op lokale schaal tot klimaatverandering en milieustudies op wereldschaal. Bij de meeste huidige GIS-applicaties ligt de nadruk op opslag, beheer en presentatie van ruimtelijke gegevens. De analyse of modellerings-toepassingen zijn tot nu toe beperkt in aantal en complexiteit, hetgeen gedeeltelijk een gevolg is van de beperkte functionaliteit op dit vlak van de commerciële GIS-software.

Parallel aan de ontwikkelingen in GIS zijn er door onderzoekers en organisaties in de wereld modellen ontwikkeld, zoals bijvoorbeeld modellen voor de hydrologie, gewasgroei en erosie, die processen simuleren in onze omgeving. In de praktijk spreken we veelal van computermodellen, simulatiemodellen, procesmodellen of rekenmodellen, waarbij in zijn algemeenheid geldt dat in algoritmen die met de computer verwerkt kunnen worden met rekenregels zo goed mogelijk de processen zijn beschreven zoals die in de werkelijkheid plaats vinden. In het vervolg van dit artikel zullen we term rekenmodellen of modellen aanhouden. De meeste van de huidige rekenmodellen zijn goed in het beschrijven van het desbetreffende proces, maar ontberen goede voorzieningen voor de invoer en beheer van ruimtelijke gegevens en hebben beperkte mogelijkheden voor het ruimtelijk weergeven van resulta-

ten. Alle aspecten waarin op dit moment de kracht van GIS ligt. Een koppeling tussen GIS en rekenmodellen is zowel vanuit het oogpunt van GIS (analyse) als vanuit het rekenmodel (beheer en presentatie) aantrekkelijk.

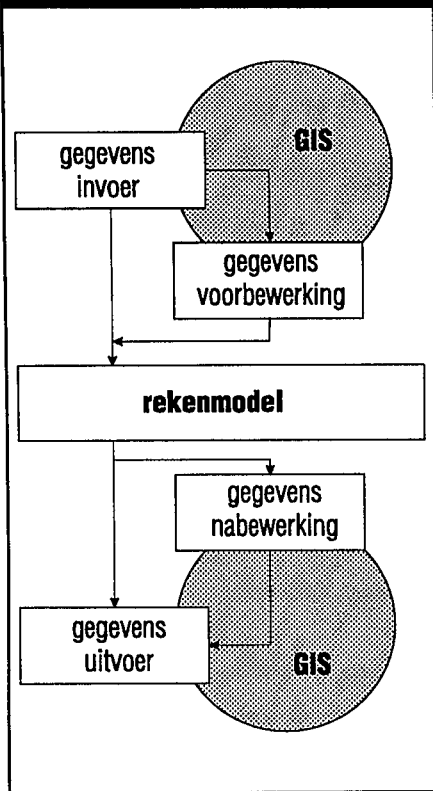
In dit artikel worden de mogelijkheden en beperkingen voor de integratie van GIS met rekenmodellen beschreven, waarbij vooral aandacht zal worden geschonken aan de technische implementatie van de integratie. Ter illustratie wordt een gerealiseerde koppeling tussen GIS en het gewasgroeimodel WOFOST behandeld voor het voorspellen van de oogst voor verschillende akkerbouwgewassen in de Europese Unie.

Aspecten van integratie

Een rekenmodel kent in de meest elementaire vorm invoer, verwerking en uitvoer van gegevens. Bij ruimtelijke gegevens speelt GIS een rol als intermediair tussen invoer en verwerking enerzijds en tussen verwerking en uitvoer anderzijds. Dit is schematisch weergegeven in figuur 1.

Aan de invoerkant onderscheiden we de gegevens en de gegevensvoorbewerking. GIS speelt een rol als het gaat om de opslag van ruimtelijke gegevens en de ruimtelijke bewerking die deze gegevens ondergaan om ze als invoer voor het model geschikt te maken. Aan de uitvoerkant kan aan de presentatie van de resultaten een verwerkingsslag vooraf gaan die noodzakelijk is om de gegevens in de gewenste vorm te kunnen presenteren. Grafische

**Figuur 1 - Schematische weergave
het gegevensverwerkingsproces**



agro informatica 8(3) / juni 1995

representatie is in dit proces een sterk punt van het GIS. De kracht van GIS ligt evenwel in de opslag van ruimtelijke gegevens en bovenal in de ruimtelijke analyse-mogelijkheden die geboden worden. Bij dit laatste moet gedacht worden aan overlay-technieken, interpolatie, aggregatie, transformatie, enz. Op deze punten raken modellen en GIS elkaar en zal er een vorm van symbiose optreden die wezenlijk is voor de interactie die plaatsvindt.

De bovengenoemde symbiose tussen GIS en modellen kent verschillende vormen, waarbij de mate van integratie bepalend is. In de literatuur worden indelingen gepresenteerd die weliswaar in naam verschil-

len, maar waarmee een indeling op verschillende niveaus wordt gehanteerd die vrijwel overeenkomt en zeer werkbaar is. Tabel 1 geeft een overzicht van verschillende benamingen.

Niet geïntegreerd

Bij een niet geïntegreerde koppeling worden geen aanpassingen in de software gemaakt aan de modelkant noch aan de GIS-kant. Uitwisseling van gegevens tussen GIS en rekenmodel gebeurt door middel van losse bestanden en komt ongeformaliseerd tot stand. De gebruiker speelt hierin een belangrijke rol. Deze voert de handelingen uit met de gegevens die noodzakelijk zijn en zorgt ervoor dat de procesvoortgang plaatsvindt. Voordeel van deze wijze van werken is de grote mate van flexibiliteit die hierbij mogelijk is met daarbij het feit dat geen software hoeft te worden aangepast of geschreven. Het nadeel is dat de procedures uitsluitend handmatig kunnen worden uitgevoerd en dat bij het gegeven model en het GIS de aansluiting op elkaar in het meest gunstige geval niet meer dan redelijk zal zijn.

Samengevoegd

Bij samenvoeging worden model en GIS zodanig softwarematig aangepast dat gegevensuitwisseling volledig geformaliseerd en geautomatiseerd plaats kan vinden. De kern van de modelprogramma-tuur blijft ongewijzigd, maar in de gegevensuitwisselingsfeer vinden de aanpassingen plaats. Zo kan bijvoorbeeld het model direct gegevens opvragen uit de ruimtelijke gegevensbank en in het GIS kunnen ruimtelijke analyses voorgeprogrammeerd zijn om de gevraagde gegevens in

het gewenste formaat om te zetten. Een toolbox kan de gebruiker in staat stellen om tussenresultaten op te vragen en ruimtelijke analyses op ad hoc basis op gegevens uit te laten voeren. Op deze wijze kan flexibiliteit ingebracht worden. Veelal wordt een interface ontwikkeld die de besturing van de processen regelt en afhankelijk van de gewenste flexibiliteit de gebruiker mogelijkheden geeft het proces te beïnvloeden. Voordeel bij deze vorm van integratie is dat de voor- en nabewerking van de gegevens op een geformaliseerde en gestructureerde wijze plaatsvindt, waarmee ook een mogelijkheid geschapen wordt een zekere kwaliteit van het resultaat te kunnen garanderen. Nadeel is dat het programmeren van de interface en de toolbox veel tijd vergt en dat de mate waarin dit gebeurt de flexibiliteit van het geheel bepaalt.

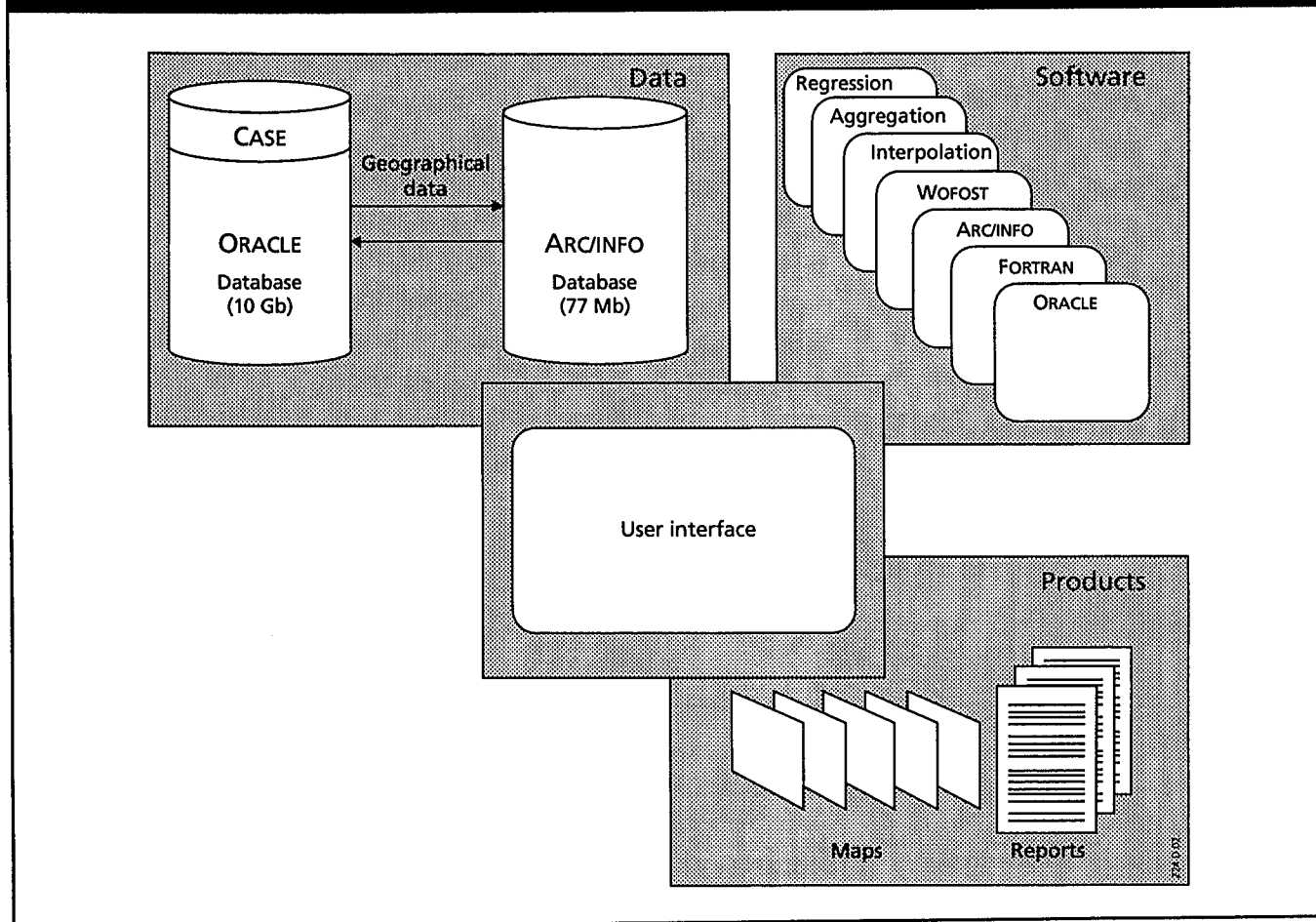
Volledig geïntegreerd

Van volledige integratie is sprake als het model in de software van het GIS is geschreven of GIS-software aan de modelsoftware is toegevoegd. In het eerste geval wordt gebruik gemaakt van het model door middel van commando's die in het GIS worden uitgevoerd. Ze worden door de GIS-producent met het GIS-pakket meegeleverd. Het voordeel hiervan is dat het model gedocumenteerd en ondersteund wordt door de GIS-producent, en dat het beschikbaar is voor alle gebruikers van deze GIS-software. In de praktijk zal dit echter niet vaak voorkomen omdat de grote verscheidenheid en variatie in modellen het haast onmogelijk maakt voor een GIS-producent om hier op een verantwoorde wijze mee om te gaan. Toepassing

Tabel 1

niveau	publicaties			
	Bulens et al (1990)	Goodchild et al (1992)	Van Deursen (1995)	dit artikel
niveau 1	ad hoc	loose coupling	low level	niet geïntegreerd
niveau 2	partial	close coupling	medium level	samengevoegd
niveau 3	full integration	full integration	high level integration	volledig geïntegreerd

Figuur 2 - Systemcomponenten van het Crop Growth Monitoring System (CGMS)



zal beperkt blijven tot een aantal meer algemene modellen waar op de markt vraag naar is.

De huidige praktijk

In het recente verleden heeft al veel onderzoek naar de integratie tussen GIS en procesmodellen plaatsgevonden (Bregt, 1993). Met name in de hydrologie is veel vooruitgang geboekt. Verschillende publicaties zijn verschenen over de integratie van GIS met een bepaald hydrologisch model (bijvoorbeeld Connors en Gardner 1991, Vieux 1991, Bonvoisin en Moore 1993, De Lange en Van der Meij 1993, Kienzle 1993). Een overzicht is gegeven door Zhang et al (1990). Een volledige integratie is beschreven bijvoorbeeld door Stuebe en Johnston (1990) voor een runoff-model in raster-GIS (GRASS) en door Van Deursen en Kwadijk (1993) voor een model dat de waterbalans berekent in het Rijnbassin (PC Raster Package). De laatste is tevens een voorbeeld van een GIS waarbij de dimensie tijd een plaats heeft gekregen. Weisman et al (1993) ont-

wikkelde een toolbox voor de integratie van GIS en hydrologische modellen.

Ook op andere terreinen zijn voorbeelden te noemen. Een voorbeeld van integratie bij DLO-Staring Centrum is het Crop Growth Monitoring System (CGMS), waarbij GIS met het gewasgroeimodel WOFOST samengevoegd zijn. Hier wordt nu meer uitvoerig op ingegaan.

CGMS, Crop Growth Monitoring System

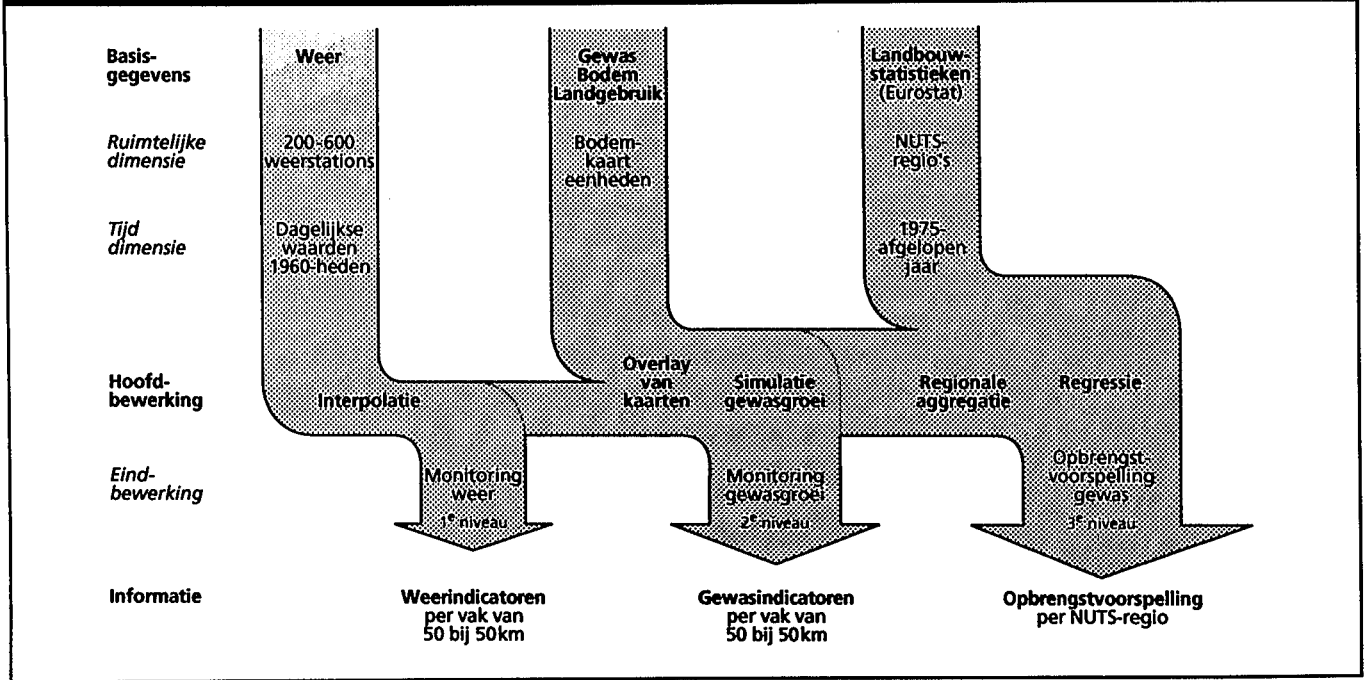
Bij deze toepassing van het gewasgroeimodel WOFOST (Van Diepen et al, 1989) met GIS is sprake van samenvoeging van rekenmodel en GIS. Het rekenmodel is in Fortran geschreven en in de kern niet aangepast. De gegevensuitwisseling is volledig gestroomlijnd in aan het systeem toegevoegde programmatuur. Een schil die rond het systeem gebouwd is zorgt voor de aansturing. In figuur 2 is de systeemarchitectuur weergegeven.

Voor opslag van modelgegevens wordt een Oracle-database gebruikt en de ruimtelijke basisgegevens worden opgeslagen in de Arc/Info-database. Voor de datamanipulaties, inclusief regionale aggregaties, worden standaard Oracle-onderhoud routines, PL/SQL-routines en embedded-SQL gebruikt. Oracle*CASE is gebruikt voor de gegevensstructurering. De simulatie-routines zijn ontdaan van de datamanipulatiefuncties, waardoor het ook goed mogelijk bleek een scheiding aan te brengen tussen de diverse systeemfuncties. De interface is gemaakt met Oracle*forms als het modelgegevens betreft en voor ruimtelijke gegevens is gebruik gemaakt van de Arc/Info Macro Language (AML). De uitvoer in de vorm van rapporten wordt deels door Oracle en deels Arc/Info gegenereerd en de kaarten worden door Arc/Info tot stand gebracht.

Aanleiding

Om het landbouwbeleid uit te kunnen voeren, heeft de Europese Commissie actuele informatie nodig over de te ver-

Figuur 3 - Interpolatie, combinatie en aggregatie van diverse ruimtelijke en temporele gegevens geven na diverse bewerkingen uiteindelijk informatie op drie niveaus: weerindicatoren, gewasindicatoren en opbrengstvoorspellingen



agro informatica 8(3) / juni 1995

wachten landbouwkundige opbrengsten in het lopende seizoen. Per lidstaat en per deelregio moeten hiervoor schattingen worden opgesteld. Deze schattingen moeten betrouwbaar zijn, vergelijkbaar zijn tussen regio's en consistent zijn over een reeks van jaren. Verder moeten ze volledig gebiedsdekkend zijn en snel beschikbaar zijn tegen zo laag mogelijke kosten. Het Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek (JRC) van de Europese Unie heeft de taak om gangbare methoden van gegevensverzameling te verbeteren. DLO-Staring Centrum heeft voor het JRC een informatiesysteem waarmee de oogst voor diverse akkerbouwgewassen kan worden voorspeld gemaakt. Bij het ontwikkelde systeem wordt met agrometeorologische modellen het verloop van het groeiseizoen gevolgd en de gewasopbrengst geschat. Vaak worden satellietbeelden gebruikt om landbouwarealen en opbrengsten te schatten. Een probleem hierbij is dat het moeilijk is met satellietbeelden de biomassa op het veld nauwkeurig genoeg te schatten, terwijl simulatiemodellen voor gewasgroei die met weersgegevens worden gevoed waarschijnlijk wel een goede indicatie daarvoor kunnen leveren. DLO-Staring Centrum heeft samen met het DLO-Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek en Q-Ray Agri-mathica (Troquay en Van Diepen, 1993)

het CGMS, een agrometeorologisch informatiesysteem ontwikkeld.

Informatiesysteem

Het CGMS geeft vanaf het begin van het groeiseizoen informatie over de aard en het verloop van het seizoen en de invloed ervan op gewasgroei en gewasontwikkeling. Het gaat hierbij om de gewassen wintertarwe, korrelmais, zomergerst, rijst, suikerbieten, aardappelen, veldboenen, sojabonen, winter-raapoliezaad, en zonnebloem. Weersgegevens worden via een model vertaald in groeiseizoenindicatoren en oogstramingen, uitgesplitst naar gewas en regio. Behalve met het weer houdt het systeem ook rekening met de bodemgesteldheid en de teeltkalender. CGMS levert drie typen informatie volgens toenemende complexiteit (fig. 3):

- weerindicatoren, die aangeven of het lopende seizoen warmer, kouder, nat-ter of droger is dan gemiddeld, ongeacht type gewas (1e niveau),
- gewasindicatoren, die aangeven of voor een bepaald gewas de gesimuleerde groei en ontwikkeling afwijken van het normale patroon qua vroegheid en biomassa (2e niveau: fig. 4, de groei is in lichte gebieden meer dan normaal vanwege vrij koel en vochtig weer. In de donkere gebieden is de

groei minder dan normaal. In de noordelijkste gebieden van de Europese Unie is dit het gevolg van een koud en nat, en daardoor laat voorjaar; in Zuid-Spanje komt dit door een droog voorjaar);

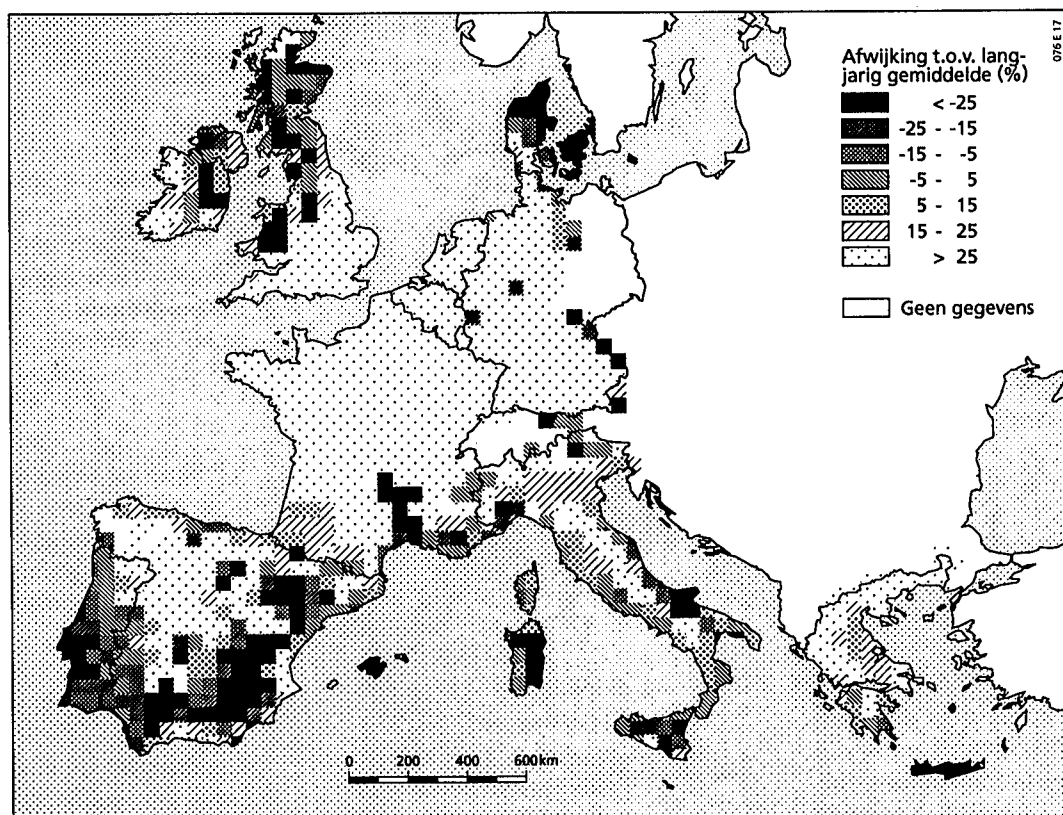
- opbrengstverwachting die verkregen wordt door de gesimuleerde gewasindicatoren te vertalen naar werkelijke opbrengst in kilo per hectare, rekening houdend met regionale gewasopbrengsten uit voorgaande jaren (3e niveau: fig. 5).

Voor het hele grondgebied van de Europese Unie (EU) worden de weer- en gewasindicatoren om de tien dagen opnieuw gegenereerd. Dit noemen we het *monitoren* van het landbouwseizoen. Dit is kwalitatief van aard. Het berekenen van de te verwachten opbrengstniveaus voor diverse akkerbouwgewassen noemen we *voorspellen*. Dit is kwantitatief van aard.

Basisgegevens

CGMS bevat basisgegevens in de vorm van digitale kaarten en tabellen. De kaarten zijn opgeslagen in een geografisch informatiesysteem (GIS). Dit zijn een bodemkaart van de EU op schaal 1:1 miljoen en een kaart van de administratieve regio's (NUTS-regio's = Nomenclature des Uni-

Figuur 4 - Gewasindicatoren: de korrelgroei van wintertarwe op 20 juni 1994.



tés Territoriales Statistiques). Ook is een hoogtekkaart van de US Navy gebruikt. Voor landgebruik is de geschiktheid afgeleid van de bodemkaart. Ten slotte hebben we de gehele EU ingedeeld in vakken van 50 bij 50 km die moeten dienen als weerszones.

De omvangrijkste groep gegevens bestaat uit dagelijkse weersgegevens van 360 weerstations over een periode van 15 tot 30 jaar. Dit gegevensbestand wordt sinds 1992 continu aangevuld met binnenkomende weersgegevens afkomstig van zo'n 600 weerstations. Daarnaast zijn er de landbouwstatistieken, afkomstig van Eurostat met opbrengsten en betaalde arealen per gewas per NUTS-regio voor een reeks van jaren. Verder zijn gewasfysiologische gegevens gebruikt met regio-specifieke informatie over zaaidatum en variëteitskeuze.

Verwerken

Interpolatie weersgegevens

Binnen de vakken van 50 bij 50 km hebben we het weer homogeen verondersteld. Dit

weer is afgeleid van de stationsgegevens. Een interpolatiealgoritme zoekt voor ieder vak naar zes naburige stations die qua hoogteligging, afstand tot de kust, en positie ten opzichte van bergruggen (GIS-functionaliteit) op dit vak lijken. Hieruit wordt een selectie gemaakt van één tot maximaal vier stations, die samen een optimale set vormen om het weer in het vak te berekenen. Het dagelijks weer voor het vak berekenen we vervolgens als het gemiddelde van de stations uit de optimale set, met correctie in temperatuur en luchtvochtigheid vanwege hoogteverschillen. Voor neerslag is een uitzondering gemaakt, omdat de middeling het weerpatroon zou veranderen. Daarom gebruiken we voor de neerslag van het vak de cijfers van het meest gelijkende station in de buurt.

Simulatie gewasgroei

Voor het monitoren en voorspellen van de gewasgroei hebben we het simulatiemodel WOFOST Versie 6.0 gebruikt (Supit et al, 1994; Hijmans et al, 1994). WOFOST berekent gewasgroei als accumulatie van biomassa in combinatie met fenologische gewasontwikkeling, en volgt daarbij de le-

venscyclus van het gewas vanaf zaaien of opkomstdatum tot aan rijpheid of oogst.

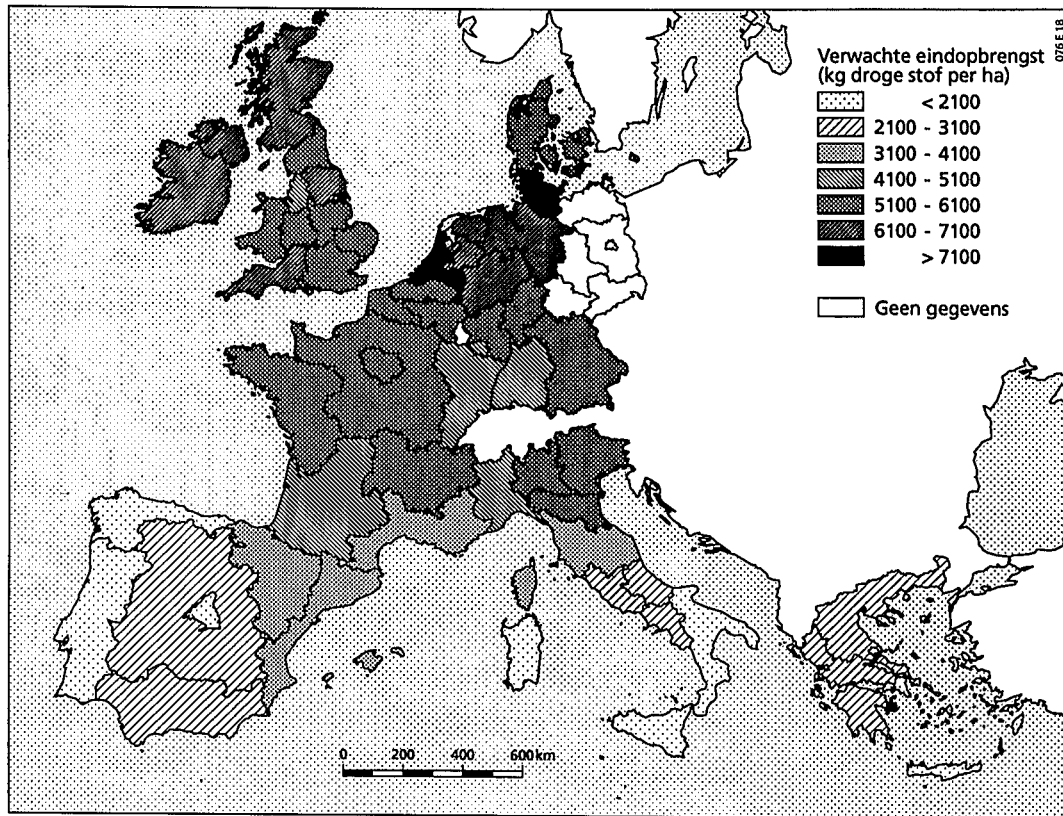
Regionale aggregatie

Een simulatie van de gewasgroei heeft betrekking op slechts één eenheidsgebied, één gewas en één seizoen. Het resultaat moet ook beschikbaar zijn per vak van 50 bij 50 km of per NUTS-regio. Door de kaarten van bodems, weerszones en NUTS-regio's over elkaar te leggen (GIS-bewerking), kunnen alle unieke bodem/klimaat/NUTS-combinaties vastgesteld worden en kunnen bijvoorbeeld gegevens per bodem/klimaatzones worden geaggregeerd over NUTS-regio's. Om voor een bepaald jaar regionale opbrengsten te berekenen, worden de simulatieresultaten van alle eenheidsgebieden per regio geaggregeerd.

Opbrengstvoorspelling

De opbrengstcijfers uit de landbouwstatistieken van Eurostat vertonen een trend, met variaties rondom die trend. Een eenvoudige voorspellingsmethode is het door trekken van deze trend naar de toekomst. CGMS doet net iets meer dan dat. De hypo-

Figuur 5 - Opbrengstverwachting. Voorbeeld van de verwachte opbrengst van wintertarwe in een willekeurige decade en jaar



agro informatica 8(3) / juni 1995

these in CGMS is dat de jaarlijkse afwijkingen ten opzichte van de trend worden veroorzaakt door de weersomstandigheden en kunnen worden gerelateerd aan de jaarlijkse schommelingen in gesimuleerde gewasindicatoren. Deze relatie wordt bepaald met een regressieanalyse. CGMS geeft om de tien dagen een voorspelling van de hectare-opbrengst per gewas en per NUTS-regio.

Perspectieven

De informatie die CGMS geeft, is bedoeld als aanvulling op gegevens uit bijvoorbeeld landbouwstellingen en satellietbeelden. Sinds 1994 wordt CGMS beproefd bij JRC. Het schatten van bodemeigenschappen zou verbeterd kunnen worden, en WOFOST zou effecten van ziekten, plagen, en overstroming in rekening moeten kunnen brengen. De koppeling van CGMS met remote-sensinggegevens kan verder de nauwkeurigheid vergroten.

Omdat CGMS vroegtijdig informatie geeft over abnormale weersomstandigheden en opbrengstverwachtingen is het huidige

systeem ook geschikt om bijvoorbeeld te gebruiken bij alarmmeldingen en bij het beslissen over noodmaatregelen of hulpacties. Verder zijn onderdelen van CGMS te gebruiken bij met name regionale studies als het gaat om gegevens over weer, bodems en groei en waterverbruik van gewassen. CGMS kan ook behulpzaam zijn om de gevolgen van klimaatverandering op de groei en produktie van gewassen te evalueren, of om de relatieve biofysische geschiktheid van de regio's binnen de EU voor de teelt van diverse gewassen aan te geven. Behalve de landbouwkundige toepassingen zullen ook studies naar regionale potenties voor natuurontwikkeling of voor bosbouw onderdelen van CGMS kunnen gebruiken.

Sinds 1994 is CGMS operationeel en het levert bemoedigende resultaten. De integratie van rekenmodel en GIS door middel van samenvoeging heeft een hoge investering in ontwikkeltijd gevraagd, maar daardoor is de flexibiliteit nu groot genoeg om in te spelen op de zich wijzigende omstandigheden en aanvullende vragen om informatie.

Toekomstige ontwikkelingen

Voor de toekomst zal in de praktijk het samenvoegen van GIS en modellen het meest worden toegepast. Dit zal zeker het geval zijn als de samenvoeging zich niet beperkt tot één model, maar tot een veelheid van modellen die via één en dezelfde interface bediend kunnen worden. Veelbelovend zijn de inspanningen die worden verricht om op het gebied van de gegevens te komen tot een vergaande standaardisatie van gegevens, zodat uitwisseling steeds eenvoudiger tot stand zal komen. Het bouwen van meta-informatiesystemen, zoals dat bij DLO-Staring Centrum, RIVM en andere instituten opgepakt is en wordt, is hier een direkt gevolg van. Daarnaast biedt ook de ontwikkeling bij GIS-producenten om te komen tot meer open GIS-software goede perspectieven voor de toekomst. Steeds meer GIS-producenten treden toe tot het Open GIS Consortium (OGS) waarin afgesproken is te werken aan de ontwikkeling van een Open Geodata Interoperability Specification (OGIS). Het gaat hierbij niet om het definiëren van nieuwe data-

structuren maar om het ontwikkelen van een Application Programming Interface (API) die zorg moet dragen voor uitwisseling van ruimtelijke gegevens.

Literatuur

- BONVOISIN, N.J., and R. V. MOORE (1993)
The use GIS techniques to assess discharge contents and abstraction licences. In HydroGIS 93, Application of geographic information systems in hydrology and water resources, IAHS Publ. no. 211. pp. 345-354.
- BREGT, A.K. (1993)
Integrating GIS and process models for global environmental assessment. In Proceedings of the international workshop on global GIS held in Tokyo in August 1993. (Tokyo: ISPRS), pp. 77-84.
- BULENS, J.D., A.K. BREGT, G.H.J. DE KONING, G.J. REINDS, C.A. VAN DIEPEN, and H.A.J. VAN LANEN (1990)
GIS supporting crop production potential research for the European Communities. In EGIS'90 Proceedings of the First European Conference on GIS (Utrecht: EGIS Foundation), pp. 117-125.
- CONNORS, K.F. and T.W. GARDNER (1991)
Watershed configuration and geographic information system parameterization for SPUR model hydrologic simulations. *Water Resources Bulletin*, 27, 7-18.
- DEURSEN, W.P.A. VAN, and J.C.J. KWADIJK (1993)
RHINEFLOW: an integrated GIS water balance model for the river Rhine. In: HydroGIS 93, Application of geographic information systems in hydrology and water resources, IAHS Publ. no. 211. p. 507-518.
- DEURSEN W.P.A. VAN. (1995)
Geographical Information Systems and dynamic models. PhD Thesis, Faculty of Spatial Science, University of Utrecht, Utrecht.
- DIEPEN, C.A. VAN, J. WOLF, H. VAN KEULEN, and C. RAPPOLDT (1989)
WOFOST: a simulation model for crop production. *Soil Use and Management*, 5, 16-24.
- GOODCHILD, M. F., ET AL. (1992)
Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6, 407-423.
- HIJMANS, R.J., I.M. GUIKING-LENS, and C.A. VAN DIEPEN (1994)
WOFOST 6.0; User's guide for the WOFOST 6.0 crop growth simulation model, SC-DLO Technical document 12, DLO-Winand Staring Centre, Wageningen.
- KIENZLE, S.W. (1993)
Application of a GIS for simulating hydrological responses in developing regions In: HydroGIS 93, Application of geographic information systems in hydrology and water resources, IAHS Publ. no. 211. p. 309-318.
- LANGE, W.J. DE, and J.L. VAN DER MEIJ (1993)
A national groundwater model combined with a GIS for water management in The Netherlands. In: HydroGIS 93, Application of geographic information systems in hydrology and water resources, IAHS Publ. no. 211. p. 333-343.
- STUEBE, M.M., and D.M. JOHNSTON (1990)
Runoff volume estimation using GIS techniques. *Water Resources Bulletin*, 26, 611-620.
- 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. Vol. I: Theory and algorithms, EUR 15956 EN, European Commission Agricultural series, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- TROQUAY, T.P.M., and C.A. VAN DIEPEN (1993)
Reverse engineering in de praktijk: van P+R+O+D+U+C+T naar productquality. *Agro-informatica*, 6(5), p. 32-35.
- VIEUX, B.E. (1991)
Geographic information systems and non-point source water quality and quantity modelling. *Hydrological Processes*, 5, 101-113.
- WIESMANN, K., A. WYTZIK, K. BÜSCHER, and U. STREIT (1993)
Integration of GIS and modelation software in a "GIS-supported hydrologic work bench" In EGIS '93, Proceedings of the Fourth European Conference on GIS (Utrecht: EGIS Foundation), pp. 1633-1634.
- ZHANG, H., C.T. HAAN, and D.L. NOFZIGER (1990)
Hydrologic modeling with GIS: An overview. *Applied Engineering in Agriculture*, 6, 453-458.