

Geofysische en ecologische modellen voor diepe meren en bekkens

Verslag van een IIASA werkbijeenkomst

Van 12 tot en met 15 december 1977 hield het 'International Institute for Applied Systems Analysis' (IIASA) in Schloss Laxenburg, ten zuiden van Wenen, een werkbijeenkomst over het modelleren van geofysische en ecologische aspecten van diepe meren en bekkens. Hoewel het aantal diepe plassen, meren, geulen en bekkens in Nederland beperkt is, was in het bijzonder de modellering van ecologische aspecten zo algemeen van opzet, dat deelname ook in het licht van de situatie in Nederland bijzonder zinvol was.



IR. R. KLOMP
Hoofd Afdeling Milieu-
hydrodynamica
Waterloopkundig Laboratorium

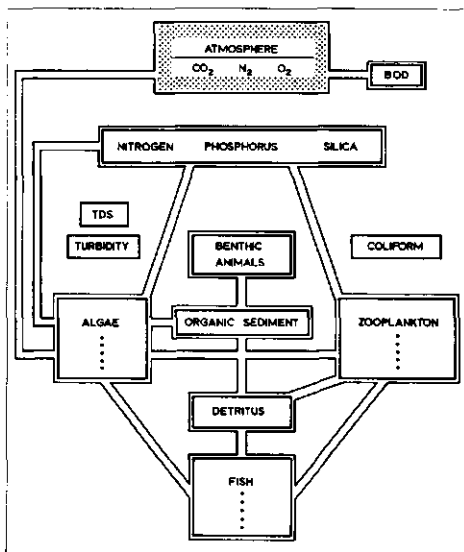


IR. G. VAN STRATEN
Vakgroep Procesbeheersing en
Milieubeheer
Afdeling Chemische Technologie
Technische Hogeschool Twente

De ontwikkeling van modellen voor diepe meren en bekkens

Diepe meren hebben gemeen, dat in de zomerperiode als gevolg van instraling en windinvloeden een thermische gelaagdheid (stratificatie) in meer of mindere mate optreedt. Een zone met een aanzienlijke temperatuurgradiënt (thermocline) vormt de scheiding tussen een warme (lichtere) mengzone (epilimnion) en een koudere (zwaardere) stagnerende zone (hypolimnion) en vormt tevens een effectieve belemmering

Afb. 1 - Relatieschema tussen de belangrijkste componenten van het ecologisch model (1).



IIASA

IIASA werd op 4 oktober 1972, na een voorbereidingstijd van zes jaar, opgericht door twaalf nationale wetenschappelijke organisaties. Het heeft tot doel collectief of individueel onderzoek naar de problemen van de moderne maatschappij, die een gevolg zijn van de wetenschappelijke en technologische ontwikkeling, te initiëren en te stimuleren. Hierbij kunnen drie soorten eigen onderzoek worden onderscheiden:
— studies op wereldschaal (voedsel, energie);
— studies gericht op specifieke problemen in bepaalde landen, waarvan de resultaten ook voor veel andere landen van belang zijn (milieubeheer, studie van grote regionale ontwikkelingsprogramma's);
— algemeen onderzoek, ter voorbereiding en ondersteuning van bovenvermelde activiteiten en ten behoeve van methodologische aspecten.

Bij het onderzoek naar de internationale problemen staat de toepassing van de systeemanalyse centraal. In concreto houdt dit veelal in dat aan de hand van mathematische modellen simulaties worden uitgevoerd, waardoor kan worden nagegaan welke strategieën tot bepaalde doelen leiden en waaruit tenslotte beleidsbeslissingen kunnen volgen. Het onderzoek is in matrix-vorm gestructureerd. Enerzijds worden 'Programs' uitgevoerd, waarbij men zich op één specifiek onderwerp richt (Energie, Food), anderzijds worden binnen een 'Area' verschillende onderwerpen in hun onderlinge samenhang bestudeerd (Resources and Environment, Systems and Decisions). IIASA telt thans ongeveer 70 wetenschappelijke medewerkers, terwijl voorts jaarlijks vele tientallen wetenschappers vanuit de aangesloten landen aan de IIASA projecten deelnemen. Sinds 1 januari 1977 participeert ook Nederland in deze organisatie. Andere aspecten van de activiteiten van IIASA zijn de organisaties van werkbijeenkomsten, seminars, congressen en symposia ter aanvulling of stimulering van hetgeen elders gebeurt. In dat licht moet ook de hier vermelde werkbijeenkomst worden gezien.

Doel van de werkbijeenkomst

In september 1977 vond binnen de area 'Resources and Environment' een bijeenkomst plaats over de rol die IIASA in internationaal verband zou moeten spelen op het gebied van het ontwikkelen en toepassen van modellen ten dienste van het waterkwaliteitsbeheer. Tijdens deze bijeenkomst werd onder meer besloten op korte termijn twee werkbijeenkomsten te beleggen, één op het gebied van diepe meren en bekkens, de andere, te houden in april 1978, op het gebied van ondiepe meren en bekkens.

De werkbijeenkomst over diepe meren en bekkens had een tweeledig doel te weten:

- het uitwisselen van informatie aangaande de stand van zaken van geofysische en ecologische modellen alsmede de toepassingsmogelijkheden van deze modellen in waterkwaliteitsbeheer en -beleid;
 - het op gang brengen van de discussie over de rol van IIASA op onderhavig gebied.
- Aan deze werkbijeenkomst namen, naast een tiental IIASA medewerkers, ca. 25 deskundigen uit de Verenigde Staten, Sowjet Unie, Oostenrijk, Canada, Denemarken, Finland, Frankrijk, West-Duitsland, Zweden, Zwitserland en Nederland deel. Van deze bijeenkomst zal een samenvattend rapport verschijnen.

voor verticaal massatransport. Met name het sterk gereduceerde zuurstoftransport van de atmosfeer naar de diepere lagen is in dit verband van grote betekenis omdat dit, in combinatie met zuurstofverbruik door biochemische oxydatie van organisch materiaal en respiratie, kan leiden tot zuurstofloosheid in het hypolimnion. De gevolgen voor de kwaliteit van het water kunnen aanzienlijk zijn doordat enerzijds mobilisatieprocessen, zoals het vrijkomen van fosfaat en metalen vanuit het sediment en anderzijds mineralisatieprocessen, met als gevolg de vorming van onder meer ammonium en zwavelwaterstof, kunnen plaatsvinden onder zuurstofloze omstandigheden. Het zal daarom dan ook geen verwondering wekken, dat de warmtehuishouding van het meer een belangrijk uitgangspunt vormde bij de discussies, te meer daar de biologische en chemische processen zelf ook een functie van de temperatuur zijn. De modellen, die in dit verband werden gepresenteerd, varieerden van één dimensionale twee lagen modellen tot zeer gecompliceerde drie dimensionale modellen, waarbij ook de horizontale stroming t.g.v. de wind kan worden beschreven.

Op deze modellen kunnen ecologische modellen worden gesuperponeerd, die op hun beurt weer sterk in complexiteit kunnen variëren. Naast relatief eenvoudige fosfaat-kringloop modellen werden ook gecompliceerde modellen, waarin nutriënten, fytoplankton en vis voorkomen, gepresenteerd.

Een voorbeeld van modelstructuur voor zo'n gecompliceerd drie dimensionaal ecologisch model (in dit geval voor de Grote Meren) wordt in afbeelding 1 weergegeven [1].

Bij het behandelen van de verschillende modelbenaderingen voor ecologische processen, waarbij de nadruk viel op eutrofiëringmodellen, bleek eveneens een grote diversiteit in de aanpak aanwezig. Veel discussie werd dan ook gevoerd over vragen als:

- hoeveel componenten zijn nodig (P, N, S; licht e.d.);
- op welke wijze kan nutriënt- en licht-limitering worden beschreven, wat zijn daarbij voor- en nadelen;
- hoe modelleren we respiratie;
- hoe wordt zooplanktongraas beschreven (afb. 2) [2];
- wat voor beschrijvingen kunnen worden toegepast voor de interactie bodem/water;
- is het noodzakelijk meerdere algensoorten in het model op te nemen.

Het is duidelijk dat vele vragen ook voor ondiepe meren kunnen worden gesteld en dat zeer veel afhangt van de doelstellingen, die met het ontwikkelen van het model

Afb. 2 - Illustratie van de verscheidenheid van beschrijvingen van relaties in een aquatisch ecosysteem: de graassnelheid van zooplankton (2).

Onderzoeken/jaar	
Dodson (1975)	$\frac{dPHYT}{dt} = -K \cdot PHYT \cdot ZOO$
Steele (1974)	$GRZ = MYZ \frac{PHYT - KTR}{KZ + PHYT} ZOO$ $MYZ = MYZMAX \cdot f(T)$
Walsh et al. (1971)	$GRZ = (ZOO) (PHYT - KTR)$
O'Brien et al. (1972)	$GRZ = ZOO \cdot MYZ (1 - \exp(-D_p (PHYT - KTR)))$ $MYZ = MYZMAX \cdot f(T)$
Lotka (1924)	$GRZ = MYZ (1 - \frac{ZOO}{CK}) ZOO$
Odum (1972)	$GRZ = MYZ AV (1 - \frac{ZOO}{CK}) ZOO$ $AV = f(PHYT) f(OX) f(T) f(TOX)$
Gargas (1976)	$MYZ \frac{PHYT - KTR}{KZ + PHYT} ZOO \quad PHYT > KTR$ $GRZ = \begin{cases} MYZ \frac{PHYT}{ZOO} & PHYT \leq KTR \\ MYZ = MYZMAX \cdot f(T) \end{cases}$
Notatie	
AV = Availability of food	KZ = Half saturation concentration for grazing g m ⁻³
CK = Carrying capacity g m ⁻³	MYZ = Growth rate, zooplankton
D _p = Constant	OX = Oxygen concentration g m ⁻³
GRZ = Grazing rate g m ⁻³ 24 h ⁻¹	PHYT = Phytoplankton concentration g m ⁻³
K = Constant, unspecific	T = Temperature, °C
KTR = Threshold concentration for grazing g m ⁻³	TOX = Concentration of toxic material g m ⁻³
	ZOO = Concentration of zooplankton g m ⁻³

nagestreefd worden, alsmede van beschikbare gegevens en chemische en biologische kennis.

Leemten in modelonderzoek

Tijdens de workshop kwam duidelijk naar voren, dat de problemen niet op het gebied van wiskundige kennis liggen en feitelijk ook niet op het gebied van de hydrofysica. Als gemeten temperatuurprofielen als invoergegeven worden gebruikt is in het algemeen een goede schatting van het verticale massatransport mogelijk, al is het twijfelachtig of in de buurt van de spronglaag de Reynoldsanalogie (analogie van warmte- en stoftransport) wel geldig is, gezien de soms zeer lage diffusiecoëfficiënten ter plaatse. Ook is het ontbreken van een verticale temperatuurgradiënt niet altijd het bewijs dat de menging volledig is: afkoeling in een rustig najaar kan een uniform temperatuurprofiel veroorzaken, zonder dat daaraan menging door de wind te pas komt.

Wil men het thermisch gedrag van een meer zelf modelleren, dan zijn goede modellen beschikbaar, waarmee het verloop van de spronglaag met de tijd kan worden beschreven, in het bijzonder voor de periode van opwarming. In de afkoelingsperiode geven dergelijke modellen soms een te snelle daling van de spronglaag, omdat een temperatuur inversie in het model in momentane menging resulteert, hetgeen niet geheel met de werkelijkheid strookt. In een enkel geval, bijvoorbeeld bij zeer sterke uitwisseling van nutriënten met de bodem, is dit type tweelagen model een te sterke vereenvoudiging, omdat in het hypolimnion nog significante gradienten kunnen voorkomen.

In het model met continue verdeling over de verticaal (meer-lagen model), dat als alternatief ter beschikking staat, moet dan echter wel het probleem van het verticaal turbulent transport worden opgelost (onder meer het vraagstuk van de al dan niet constante eddy-diffusiecoëfficiënt).

Naast deze problemen in verticale richting treden er vooral in zeer grote meren problemen op bij de behandeling van inhomogeniteiten in het horizontale vlak. Kleine fouten in begincondities en externe randvoorwaarden (voornamelijk meteorologische gegevens) kunnen de temperatuurverdeling in horizontale richting in drie-dimensionale modellen aanzienlijk doen divergeren, alhoewel de verticale profielen aanvaardbaar blijven. Voorgesteld is dan ook, deze drie-dimensionale modellen uitsluitend voor de berekening van de verticale profielen te gebruiken en verder met een één-dimensionaal of twee lagen model te werken. Voorts blijkt het nog bijzonder moeilijk de instroming van rivieren met een andere temperatuur dan die van het meer (hoger in de lente en lager in het najaar) op de juiste wijze in rekening te brengen. Ondanks deze tekortkomingen zijn hydrofysische modellen nog altijd minstens een orde van grootte nauwkeuriger dan de erop gesuperponeerde ecologische modellen, zodat het weinig zinvol lijkt in hydrodynamische modellen veel detail mee te nemen. De feitelijke tekortkomingen in de modelbouw zijn gelegen op het gebied van de biologische en chemische processen. De groeisnelheid van algen kan in kortlopende incubator tests in het algemeen vrij redelijk worden vastgesteld. In eutrofe meren wordt de algendynamica echter vooral bepaald door de negatieve termen in de balans, zoals sedimentatie, respiratie, en zooplanktongraas, die juist bijzonder moeilijk zijn te meten en waarover de kennis nog beperkt is. Illustratief is, dat sedimentatie-experimenten op het laboratorium in het algemeen bezinksnelheden voor algen opleveren van zo'n 10 m/d, hetgeen een factor 10 hoger is dan blijkens simulatie in modellen mag worden toegestaan. Uiteraard speelt in het prototype turbulentie een rol, maar hoe precies is niet duidelijk. Op het gebied van respiratie en sterfte blijkt systematisch onderzoek bijzonder schaars, terwijl het modelleren van zooplankton met zijn verschillende levensstadia in feite nog in de kinderschoenen staat. **Weinig aandacht is ook besteed aan het modelleren van het gedrag van blauwalgen.** Hun groeisnelheid ligt lager, het temperatuuroptimum hoger, hun fosfaatbehoefte hoger, terwijl er nauwelijks graas plaatsvindt. Deze eigenschappen kunnen in model gebracht worden, maar de rol van eigen transport door vacuolen, hun vermogen om stikstof te binden en de rol van bodemsedimenten bij overwintering zijn nog geheel niet op zinvolle wijze te modelleren. Een belangrijke onbekende factor in het waterkwaliteitsonderzoek is het sediment. Algemeen werd onderkend dat de mineralisatie van detritus door bacteriële activiteit

in de toplagen van het sediment een grote rol speelt in de nutriëntencyclus. Ook is het duidelijk dat de zuurstofhuishouding in het sediment een belangrijk gegeven is bij de vraag welke fractie van de nutriënten in het sediment wordt vastgelegd. Maar bruikbare kwantitatieve informatie is nog niet in modellen ingebracht. Door onvoldoende inzicht in de optredende processen tussen bodem en water is extrapolatie naar sterk gewijzigde milieu-omstandigheden (b.v. saneringsmaatregelen) vaak nog speculatief. Omdat de uitwisseling met sedimenten zich in ondiepe meren nog sterker doet gevoelen valt te verwachten dat dit aspect in de volgende workshop, gericht op ondiepe meren, nog meer aandacht zal krijgen.

Uit het bovenstaande is het duidelijk dat de discussies rondom ecologische modelbouw zich vooral richtten op het eutrofiëeringsproces. Er werd weinig aandacht besteed aan andere probleemgebieden waarvoor de modelbouw belangrijke bijdragen, zowel technisch wetenschappelijk als beleidsmatig zou kunnen leveren. In dit verband valt te denken aan het modelleren van toxische stoffen in het aquatisch milieu, dat vooral in de Verenigde Staten sterk in ontwikkeling is.

Uit het hierboven gegeven overzicht moge blijken dat een verdere ontwikkeling van modellen ten dienste van het waterkwaliteitsbeheer de gebundelde inbreng vraagt van biologen, chemici, limnologen en systeem-analytici in nauwe samenspraak met beheerders en beleidsvoorbereiders. Slechts via deze werkwijze kunnen goede beleidsonderbouwende modellen worden ontwikkeld en toegepast. Daarnaast mag gezegd worden dat vele routinematige meetprogramma's nog teveel 'constaterend' en beschrijvend zijn en nog te weinig gericht op het bepalen van relevante processen en relaties en bijbehorende parameters.

Methodologie van de modelbouw

Over de kwestie, welke mate van detail in een model gewenst is, ontspon zich een levendige discussie. Zoals te verwachten is in een nog betrekkelijk jong vakgebied bestaat er nog geen algemeen bruikbare methodologie, al zijn er wel enkele algemene kenmerken. Zeer belangrijk is de vraag voor welk doel het model moet worden gebruikt. Voorspelling van de trofiegraad van een meer bij sanering van nutriëntlozingen op lange termijn is met een betrekkelijk simpel 'model' mogelijk, maar voor de vraag wat dit betekent voor de maximale standing crop per seizoen kan al een aanzienlijk ingewikkelder model nodig zijn. Vaak blijkt dat modelonderzoek ook kan helpen de doelstellingen zelf nauwkeuriger vast te stellen. Naast de doelstelling is ook de beschikbaar-

heid en de kwaliteit van de gegevens een factor van belang bij de opzet van een kwaliteitsmodel. Sommige deelnemers waren van mening dat het weinig zin heeft componenten in het model mee te nemen welke niet gemeten worden (b.v. intracellulair fosfaat). Ook hier kan het modelonderzoek van veel waarde zijn bij het vaststellen van gerichte, voor het beleid relevante, meetprogramma's.

De kwaliteit van een model

Interessant is natuurlijk de vraag hoe goed een éénmaal opgesteld model is. Onderscheid werd gemaakt tussen calibratie en validatie van een model. In de calibratiefase wordt getracht aan de hand van alle beschikbare informatie de modelparameters zo te kiezen, dat een zo goed mogelijke overeenkomst met een meetserie wordt verkregen. In het algemeen neemt bij toenemende complexiteit van het model het aantal niet direct meetbare parameters toe en daarmee ook het aantal graden van vrijheid in de calibratie-fase. Het hoeft dan ook geen verbazing te wekken dat dan meestal betere overeenkomsten kunnen worden verkregen, maar er is ook geen enkel middel om de relevantie hiervan te testen. Opvallend was dat de stochastische aspecten van waterkwaliteitsmodellen nauwelijks ter sprake kwamen, terwijl toch hier mogelijkheden liggen om de modelidentificatie en parameterschatting beter te onderbouwen. Toepassing van de vuistregel dat men voor een verantwoorde identificatie twee maal zo snel moet bemonsteren als de kleinste tijdconstante in het systeem en dat de meetserie tien maal zo lang moet zijn als de grootste tijdconstante, zou hier tot interessante resultaten kunnen leiden. Geeft het model, bij gelijkblijvende parameters, een juiste beschrijving van een tweede, onafhankelijke meetserie, dan zal intuïtief het vertrouwen in het model toenemen (gedeeltelijke validatie). Dit is echter nog geen sluitend bewijs dat het model het effect van saneringsmaatregelen ook correct zal voorspellen, omdat juist als gevolg van de saneringsmaatregelen de milieuomstandigheden meestal wezenlijk worden veranderd, waardoor processen een rol kunnen gaan spelen die daarvoor onbelangrijk waren. Het spreekt vanzelf dat modelonderzoek op dit gebied vorderingen zal maken naarmate modellen meer en meer daadwerkelijk worden toegepast. Hier geldt eens te meer dat 'the proof of the pudding is in the eating'.

Evaluatie

De betekenis van ecologische modellen en de perspectieven kunnen als volgt worden samengevat:

— Modelonderzoek brengt onderzoekers uit verschillende disciplines samen, waardoor gericht technisch-wetenschappelijk onderzoek sterk wordt gestimuleerd. Zonder de integratie van specialistische kennis zijn weinig praktisch bruikbare vorderingen te verwachten.

— Het leerproces dat geassocieerd is aan daadwerkelijke modeltoepassing is van grote betekenis voor de verdere ontwikkeling van het modelonderzoek.

— Modellen kunnen een hulpmiddel zijn bij het concreet maken van beheers- of beleidsdoelstellingen en bij het ontwerpen en optimaliseren van meetnetten en gericht veld- en laboratoriumonderzoek.

— Modellen bieden voortreffelijke mogelijkheden bij het onderbouwen van beleid en beheer in kwantitatieve zin, zowel in de sfeer van de planning (saneringsplannen, infrastructurele werken), als in de sfeer van de dagelijkse operationele praktijk.

Illustratief hiervoor is dat modellen nu reeds centraal staan bij de beleidsvorming t.a.v. een aantal internationale problemen, zoals bijvoorbeeld in het geval van de Grote Meren of in ons eigen land de Eems-Dollard problematiek. Bij de huidige stand van zaken kunnen gevalideerde modellen met een goede kans op succes worden gebruikt bij de keuze uit alternatieven, mits de beoogde maatregelen niet te ingrijpend zijn. Nog weinig ervaring is opgedaan bij de toepassing van modellen voor drastische ingrepen (b.v. in geval van grote infrastructurele werken). Modellen die hiervoor ontwikkeld worden hebben vooralsnog een speculatief karakter.

De slotconclusie is, dat weliswaar nog veel werk moet worden verzet, maar dat waterkwaliteitsmodellen in het waterkwaliteitsbeheer en -beleid voor de toekomst niet meer kunnen worden gemist. Een alternatief, waarbij op dezelfde systematische wijze met alle relevante processen in hun onderlinge samenhang wordt rekening gehouden is immers niet voorhanden.

Literatuur

1. Chen, Carl W.; Smith, Donald J.; *Preliminary insights into a three-dimensional ecological hydrodynamic model*. (Presented at the 20th conference on Great Lakes Research Ann Arbor, Michigan, May 11 - 13, 1977).
2. Jørgensen, S. E.; *Eutrophication models*; (presented at the workshop on Water quality modelling, IIASA Schloss Laxenburg, Austria, September 13 - 16, 1977).

