

OPERATIONELE RESEARCH EN MILIEU:

EEN VRUCHTBARE COMBINATIE

Paul van Beek, Landbouwniversiteit Wageningen
Leonard Fortuin, Nederlandse Philips Bedrijven Eindhoven
Luk Van Wassenhove, Erasmusuniversiteit Rotterdam

Samenvatting

Operationele Research (OR) is een discipline die zich primair richt op het verbeteren van de effectiviteit en de efficiëntie van beslissingsprocessen. Deze beslissingsprocessen spelen zich overal in de maatschappij af: industrie, banken, landbouw, overheid, politiek, Het kenmerkende van OR is dat er dikwijls van wiskundige optimaliseringsmodellen gebruik wordt gemaakt. Deze worden vanaf het begin van de jaren tachtig in toenemende mate 'gebruikersvriendelijk verpakt' in zg. Beslissings Ondersteunende Systemen (BOS). In eerdere publicaties is door de auteurs reeds op het grote potentiële belang van de OR voor de samenleving gewezen (Referenties 2 en 3).

In dit artikel wordt geïllustreerd hoe OR gebruikt kan worden bij het beschrijven en oplossen van milieuvraagstukken. Dit gebeurt aan de hand van de beschrijving van een aantal milieuvraagstukken waarvan bijna dagelijks via de media kond wordt gedaan.

Het doel van deze publicatie is aan te tonen dat OR een belangrijke rol kan gaan spelen in het nieuwe top-prioriteitsgebied 'het milieu'.

1. INLEIDING

Het gaat slecht met het milieu. Deze algemene en misschien ongenueanceerd aandoende uitspraak geldt bij uitstek voor een land als Nederland dat zich gaarne wil profileren als 'Nederland Distributieland', maar tegelijkertijd door de samenleving en de politiek erop wordt aangesproken om toch vooral aan de bescherming van het milieu te denken.

Het spanningsveld tussen profiteren van de economische bedrijvigheid, terugbrengen van het begrotingstekort van de rijksoverheid, groei van de collectieve sector en zorg voor een goed leefklimaat, ook voor onze kinderen en kleinkinderen, wordt steeds krachtiger. De neiging bestaat om aan de economische groei de hoogste prioriteit toe te kennen. Hierdoor wordt het steeds belangrijker om de effectiviteit van milieumaatregelen te vergroten.

De opbouw van dit artikel is als volgt. In paragraaf 2 wordt aandacht besteed aan de verzuringsproblematiek en ook aan het zg. broeikas-effect. Beide problemen zijn internationaal van aard. Één enkele nationale overheid is niet in staat effectieve maatregelen te treffen. Slechts oplossingen in een internationaal kader kunnen effectief zijn. Conform de invalshoek in dit artikel zal vooral de rol, of potentiële rol, van de OR worden besproken.

Na deze twee probleemvelden van internationale aard, zullen in paragraaf 3 een drietal Nederlandse cases worden besproken, ook weer met OR als invalshoek. Het betreft

(i) de Nederlandse mestproblematiek

- (ii) de allocatie van budgetten aan bodemsaneringsprojecten
- (iii) de allocatie van waterzuiveringstrappen.

Het is een willekeurige greep. Andere keuzes waren vanzelfsprekend ook mogelijk geweest.

Tenslotte zal in paragraaf 4 een korte lijst met milieuprobleemvelden worden gepresenteerd waar OR met succes kan worden toegepast c.q. reeds is toegepast.

Zoals eerder gezegd, is de bedoeling van dit artikel om aan te geven hoe belangrijk de rol van OR kan zijn bij het in het kaart brengen en oplossen van milieuproblemen. Deze illustratie is dan ook een impliciete oproep om in de diverse milieustudies de OR-inbreng te vergroten. Daarnaast zou het vak Operationele Research meer aandacht moeten krijgen in de verschillende milieustudierichtingen aan de Nederlandse universiteiten en zouden OR-studenten aangevoerd moeten worden hun expertise op milieuproblemen toe te passen.

2. MILIEUPROBLEMEN OP WERELDSCHAAL

Op donderdag 19 oktober 1989 (in de context van de bijdrage een volstrekt willekeurige datum) lezen wij in NRC Handelsblad (Bijlage Economie) de volgende artikelen:

- 'Bonn financiert milieu-onderzoek uit privatisering'
- 'Notoire milieuvervuiler weg uit Irian'
- 'Vertraging bouw mestfabrieken'.

De verschijningsfrequentie van dergelijke milieu-gerelateerde bijdragen zal in de komende tijd nog wel toenemen.

Een andere publicatie in dezelfde week staat in SAFE nr. 5, oktober 1989 (Referentie 8): 'Hulp vanuit de ruimte moet milieu helpen'. Foto's van NASA-astronauten laten op navrante wijze zien dat het ecologisch evenwicht van onze aarde als gevolg van menselijke activiteiten (overbevolking, milieuverontreiniging, overmatig energiegebruik) in gevaar is. De NASA voteert een bedrag van meer dan \$100 miljoen om het project 'Mission to Planet Earth' van de grond te krijgen. Door middel van waarnemingen tijdens satellietvluchten kan de dynamica van de aarde voldoende worden doorgrond zodat milieurampen voorspeld kunnen worden en er dus tijd is om manieren te vinden om ze te voorkomen.

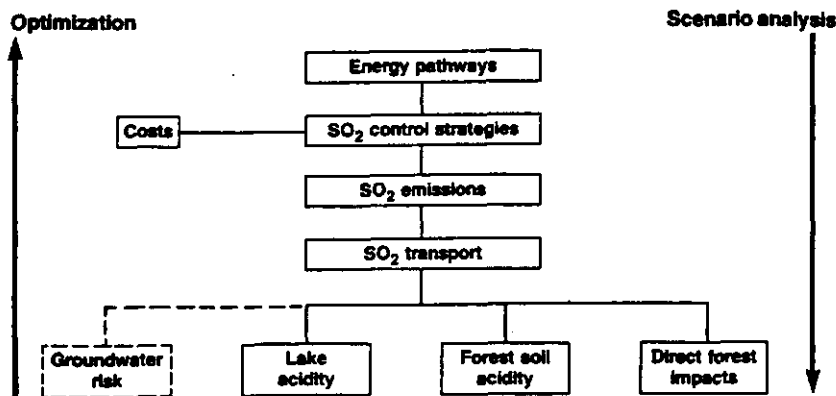
In het volgende worden twee milieuvraagstukken behandeld (uiteraard vanuit de OR invalshoek):

- (i) de verzuringsproblematiek ten gevolge van de uitstoot van SO₂
- (ii) het broeikaseffect ten gevolge van o.a. CO₂ uitstoot.

2.1 De verzuringsproblematiek

In het volgende wordt gebruik gemaakt van een IIASA-studie over het probleem van de verzuring in Europa (Referenties 4 en 11). Specifiek wordt het RAINS, het Regional Acidification INFORMATION and Simulation model als leidraad bij het thema gebruikt. Het model beschrijft de relaties die relevant zijn voor het verzuringsprobleem. RAINS is in staat om op grond van mathematisch-fysische relaties een uitspraak te doen over de SO₂- en NO_x-depositie binnen Europa wanneer de locaties en de omvang van de SO₂- en NO_x-bronnen bekend zijn (zie figuur 1).

Het model vertaalt de berekende depositie waarden in effecten op het milieu. Zo zijn de bodemverzuring en de verzuring van de meren in Scandinavië in deelmodellen opgenomen. Startpunt vormen energiewaarscenario's voor Europa, waaruit emissies van SO₂ en NO_x worden bepaald. RAINS is volledig interactief: de gebruiker kiest een energiewaarscenario als uitgangspunt, bepaalt welke emissies hij/zij wil berekenen, voor welke toekomstige jaren, welke pakketten van maatregelen per land en per jaar worden ingezet en welke output gegenereerd moet worden. De output van RAINS bestaat voor een groot deel uit kaarten van Europa met bijv. depositie-patronen en bodemverzuring.



SOURCE: J. Alcamo, M. Amann, J.-P. Hettelingh, M. Holmberg, L. Hordijk, J. Kämäri, L. Kauppi, P. Kauppi, G. Komai, and A. Mäkelä, "Acidification in Europe: A Simulation Model for Evaluating Control Strategies," *Ambio* 16(1987):232-45.

Figuur 1: Schema van het RAINS model

Vervolgens komt de Operationele Research om de hoek kijken. De vraag is namelijk hoe met beperkte financiële middelen ten behoeve van emissiereducties zo goed mogelijk een te voren overeengekomen milieudoelstelling kan worden bereikt.

De vraag kan ook anders worden gesteld: probeer met de beschikbare budgetten zodanig investeringen in emissiereductie te doen dat het effect op het milieu maximaal is. Voor zwavel kan de milieudoelstelling worden vertaald in grammen S per m² per jaar. Voor het doen van dergelijke optimalisaties beschikt RAINS over een optimaliseringsmodule.

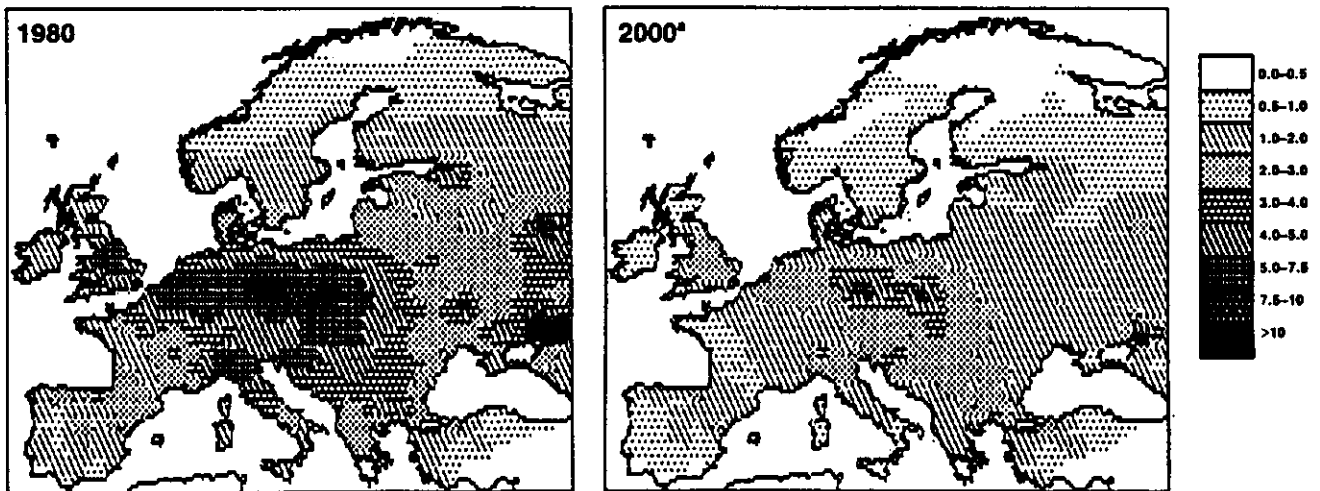
Dit model kan voor verschillende doeleinden worden gebruikt. Allereerst biedt het de mogelijkheid op een landkaart van Europa zichtbaar te maken hoe in het jaar 2000 het depositiepatroon van SO₂ eruit ziet wanneer er geen reducties van SO₂-emissie plaatsvinden. De plaatsen met maximale depositie van zwavel bevinden zich vooral in Centraal- en Oost-Europa. De hoogste pieken zijn het Donetsbekken in het zuidoosten van het Europese deel van de USSR, de streek rond Leipzig en Dresden in de DDR en het gebied Krakow/Katowice in het zuiden van Polen. De piekbelasting ligt hier boven de 10 gram S per m². In West-Europa bevinden zich gebieden met hoge belasting in Noord-Italië, het Roergebied en in Centraal-Engeland. De waarden zijn hier lager dan in Oost-Europa, maar liggen

nog aanzienlijk boven 0,5 à 1 gram per m². Deze laatste waarde wordt in Europa als maximaal toelaatbaar beschouwd voor ecosystemen.

Dezelfde exercitie kan worden gedaan voor het jaar 2000 wanneer rekening wordt gehouden met afspraken met betrekking tot emissiereductie in Europees verband. Voor deze reductie is ongeveer f 12 miljard per jaar gereserveerd, gelijkelijk verdeeld over Oost- en West-Europa. Ook nu zien we een vrij hoge piekbelasting van 7,5-10 gram S per m² per jaar.

ROL VAN DE OR

Nu gaan we daadwerkelijk optimaliseren. Uitgangspunt hierbij is het bedrag van f 12 miljard per jaar voor emissiereductie ongeveer gelijkelijk verdeeld over Oost- en West-Europa. We wensen dat bedrag zodanig te besteden dat de piekbelasting zo klein mogelijk wordt. Analyse met behulp van RAINS toont aan dat met dat bedrag een piekbelasting van 4 à 5 gram S per m² mogelijk is. Echter, om dat minimum te bereiken, dient het geld anders te worden gealloceerd: namelijk f 8,2 miljard in Oost-Europa en f 3,8 miljard in West-Europa. Met andere woorden: uitgaande van de vorige allocatie van gelden ten behoeve van uitstootvermindering van SO₂ (50-50-verdeling) leidt een verschuiving van f 2,2 miljard van West- naar Oost-Europa dus tot een halvering van de piekbelasting! Ter illustratie (figuur 2) is de zwaveldepositie in Europa (anno 1980 en 2000) onder een aantal veronderstellingen berekend.



*Assumes major sulfur controls scenario, resulting in a 58% SO₂ reduction

SOURCE: J. Alcamo et al., "Acidification in Europe: A Simulation Model for Evaluating Control Strategies," *Ambio* 16(1987):232-45.

Figuur 2: Zwavel depositie in Europa

Nog een toepassing van de optimaliseringsmodule in RAINS.

Stel dat de piekbelasting teruggebracht moet worden tot 3.0 gram S per m² per jaar. Hoeveel geld is hiervoor jaarlijks (in 2000) dan nodig bij een optimale allocatie van geld? Het blijkt dat hiervoor f 5,4 miljard in West-Europa en f 9,0 miljard in Oost-Europa nodig is. Interessant is dat dit in totaliteit 'slechts' f 2,4 miljard meer kost dan in de situatie waarin totaal f 12 miljard

is gereserveerd (en waarin een piekbelasting van 7,5-10 gram S per m² per jaar te zien is!) Men kan dus weliswaar veel geld vrijmaken, maar het optimale inzetten van het geld kan ook een probleem zijn. OR kan hierbij helpen!

CONCLUSIES

Beslissingsondersteunende modellen zoals RAINS kunnen worden gebruikt om

- (i) Verschillende scenario's te evalueren en daarbij effecten zoals 'piekbelasting' van de SO₂-depositie geografisch zichtbaar te maken.
- (ii) Effecten van investeringen in SO₂-uitstootvermindering zichtbaar te maken.
- (iii) Investeringsallocaties te optimaliseren waarbij als doelstelling het minimaliseren van de piekbelasting kan worden gehanteerd.
- (iv) Andere depositiepatronen (zoals stikstof) zichtbaar te maken.

2.2 Het broeikaseffect

Binnen het RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne) is momenteel een simulatiemodel in ontwikkeling dat meer inzicht moet geven in de mechanismen achter het broeikaseffect (Referentie 10). Dit simulatiemodel, inmiddels bekend onder de naam IMAGE (Integrated Model for the Assessment of the Greenhouse Effect), beoogt een geïntegreerd overzicht te geven van de broeikasproblematiek alsmede inzicht te verschaffen in de basismechanismen van het probleem.

Het model is gebaseerd op een grote verscheidenheid aan gegevens, verkregen uit de literatuur en door raadpleging van diverse experts. Ook experimenteel onderzoek speelt hierbij een rol. Alle informatie wordt geïntegreerd en op hetzelfde aggregatieniveau gebracht. Vervlechting van kennis uit verschillende wetenschappen staat hierbij centraal. Uit dit alles is het beleidondersteunende simulatiemodel IMAGE ontstaan. De kern van IMAGE bestaat uit: emissiemodules, concentratiemodules, een stralingsabsorptiemodule en een zeespiegelstijgingsmodule. Al deze modules zijn zódanig gekoppeld dat uitkomsten van de ene module dienen als invoer voor de andere. In de broeikasproblematiek spelen vooral de volgende gassen een rol: CO₂, CH₄, N₂O, CFC-11 en CFC-12 (zie figuur 3).

In de emissiemodules zijn de historische emissies voor de periode 1900-1985 ingevoerd; voor de periode 1985-2100 zijn vier emissie-scenario's gekozen: een voortgezette trend, een omgebogen trend, een veranderende trend en tenslotte een gedwongen reductietrend. De verschillende scenario's zijn gebaseerd op een studie van zowel de antropogene bronnen van de emissies van sporegassen (zoals energiegebruik, landbouw en industrie) als van de wereldbevolkingsgroei en de natuurlijke bronnen.

Het eerste scenario (de voortgezette trend) gaat uit van voortzetting van de huidige economische groei zonder milieurestricties.

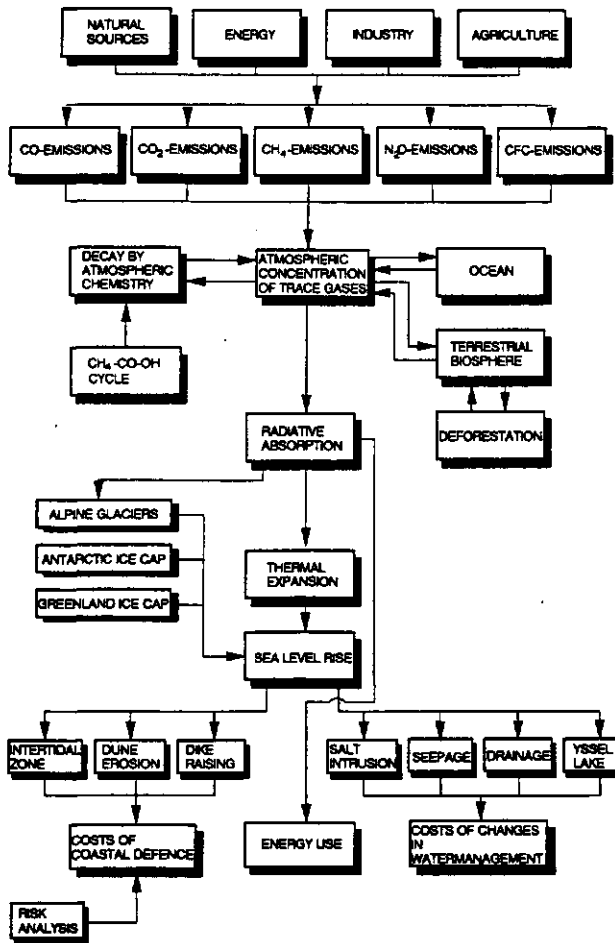
Bij het omgebogen trend scenario wordt verondersteld dat er maatregelen zijn getroffen tegen milieuproblemen zoals verzuring.

Deze maatregelen hebben ook belangrijke gevolgen voor het broeikaseffect.

In het derde scenario (de veranderende trend) zitten veronderstellingen met betrekking tot een strikte naleving van internationale afspraken.

Tenslotte gaat het gedwongen reductietrend scenario uit van een maximale inspanning (op wereldschaal) die zich richt op een leefbare ontwikkeling.

IMAGE toont aan dat het Montreal Protocol (een overeenkomst inzake de beperking van CFK gassen (Referentie 12)) van belang is om de relatieve bijdrage van CFK's aan het broeikaseffect te stabiliseren. Voor verdere normering van de uitstoot kan het model behulpzaam zijn.



Figuur 3: Het IMAGE-model (Bron: R.J. Swart)

ROL VAN DE OR

Nu weer de rol van de Operationele Research. Vanuit het systeem van internationale afspraken (zoals het Montreal Protocol) worden normen voor de uitstoot van CFK's gesteld. Modellen zoals IMAGE kunnen voor een lange periode vooruit de effecten van deze normering bepalen. IMAGE kan dus een belangrijke rol spelen bij het vaststellen van (internationale) normen.

Operationele Research zal in belangrijke mate kunnen helpen bij het vinden van effectieve maatregelen om de gestelde normen zo dicht mogelijk te benaderen en zulks met zo laag mogelijke financiële inspanningen. Een module voor dit soort optimaliseringen zal in de nabije toekomst aan IMAGE worden toegevoegd. Er moet echter in z'n algemeenheid worden gesteld dat invulling van een optimalisatiecriterium een moeilijke zaak kan zijn aangezien het kwantificeren van de kosten gerelateerd aan lange termijn milieu-effecten, soms nauwelijks mogelijk is.

3. DRIE NEDERLANDSE CASES

In deze paragraaf zullen drie Nederlandse toepassingen van Operationele Research op milieuproblemen worden besproken. Het zijn voorbeelden betreffende de Nederlandse mestproblematiek (Referentie 6), de sanering van bodemverontreinigingen (Referentie 5) en de Waterzuivering (Referentie 1). Ook hier zullen we de belangrijke rol van de Operationele Research laten zien.

3.1 Een beslissingsondersteunend systeem voor de optimalisering van afzet en verwerking van mest

Als gevolg van wettelijke maatregelen om overbemesting tegen te gaan zal er in de toekomst, veel meer dan nu, sprake zijn van grootschalig transport, opslag en verwerking van mest. Ook de hiermee gepaard gaande kosten zullen toenemen. Daarom is van belang de transportmiddelen, de opslagplaatsen en de verwerkingsinstallaties zo te kiezen dat de kosten zo laag mogelijk zijn. Om meer inzicht te krijgen in deze logistieke problematiek, wordt er in het kader van een samenwerkingsproject tussen het IMAG (Instituut voor Mechanisatie Arbeid en Gebouwen) en de Landbouwniversiteit (Vakgroep Wiskunde) gewerkt aan een beslissingsondersteunend systeem. De basis van dit systeem is een wiskundig model waarmee in een concrete situatie - mestproductie en mogelijkheden voor afzet, transport, opslag e.d. - een optimale logistieke structuur wordt bepaald. Door de uitgangspunten te wijzigen en vervolgens opnieuw een optimale structuur te bepalen wordt het effect van verschillende uitgangspunten duidelijker.

We beginnen met een korte schets van de mestproblematiek (voor meer informatie zie Referentie 6).

DE MESTPROBLEMATIEK

Door de groei van de intensieve veehouderij is het steeds moeilijker geworden om alle geproduceerde mest een aanvaardbare bestemming te geven. Dit heeft geleid tot overbemesting van landerijen, gevolgd door verontreiniging van het grondwater. Zoals bekend, gebruiken veel drinkwaterbedrijven zulk water als grondstof. Als gevolg van de invoering van wettelijke maatregelen wordt deze mestproblematiek steeds duidelijker en zal het in de praktijk meer moeilijkheden opleveren.

De kern van het probleem is het overschot aan mineralen (fosfaat, nitraat en kalium) en zware metalen (koper, cadmium en zink) in de dierlijke mest. Het evenwicht tussen de toevoer en de afvoer van mineralen in de landbouw is verstoord door het gebruik van voeders van buiten het bedrijf. Met name de import van veevoedergrondstoffen ten behoeve van de intensieve veehouderij speelt hierbij een grote rol. Ten gevolge van het mineralenoverschot kan niet langer alle dierlijke mest binnen de landbouw worden afgezet, althans niet op verantwoorde wijze.

Overdosering van dierlijke mest leidt tot aantasting van de bodemvruchtbaarheid en een achteruitgang van de kwaliteit van de gewassen. Bovendien veroorzaakt de overdosering aantasting van de kwaliteit van het grondwater en draagt het bij aan de eutrofiëring van het oppervlaktewater in voedselarme gebieden. De uitstoot van ammoniak uit mest is één van de oorzaken van de 'zure regen'.

De wettelijke maatregelen bestaan onder andere uit:

- De fosfaatsnormen.

De toediening van fosfaat aan de bodem via dierlijke meststoffen wordt aan een maximum gebonden, afhankelijk van de soort grondgebruik.

- Het uitrijverbod.

Om uitspoeling van mineralen naar het grondwater en afspoeling naar het oppervlaktewater zoveel mogelijk tegen te gaan, wordt het gebruik van dierlijke mest in herfst en winter beperkt.

- De onderwerkverplichting.

Om de ammoniakuitstoot tegen te gaan is de boer vanaf 1 januari 1988 verplicht om de toegediende mest op onbeteeld bouwland of snijmaaisland binnen een dag onder te werken.

MOGELIJKHEDEN VOOR DE AFZET EN VERWERKING

We onderscheiden in grote lijnen twee bestemmingsmogelijkheden voor de dierlijke mest:

- afzet als meststof in de landbouw,
- verwerking tot loosbare of opnieuw bruikbare producten.

De mogelijkheden voor de afzet van dierlijke mest worden beperkt door de fosfaatsnormen. In de praktijk zal er vaak minder dierlijke mest afgezet worden dan wettelijk mogelijk is.

De mest waarvoor geen afzetmogelijkheid gevonden wordt, moet - geheel of gedeeltelijk - uit de markt genomen worden. Dit noemen we verwerking. Daarbij kunnen andere mestproducten ontstaan. Bijvoorbeeld na de zuivering van kalvergier resteert kalvergierslib dat in de landbouw wordt afgezet. De verwerking van varkensmest, zoals Promest in Helmond en MeMon in Deventer van plan zijn, levert een mestproduct op. Dit product, een 'organische korrelmeststof', is vergelijkbaar met kunstmest en moet tegen vergelijkbare prijzen op de markt kunnen worden gebracht.

Bij de afzet en de verwerking zijn verschillende aspecten van belang:

- Transport
Afhankelijk van de mestsoort, de bestemming en de te overbruggen afstand zijn er verschillende mogelijkheden om mest te transporteren, zoals astransport, scheepstransport of pijpleiding (voor locale toepassingen).
- Opslag
De benodigde opslag kan op verschillende manieren worden gerealiseerd:
 - opslag op bedrijfsniveau
 - centrale opslag. Voor de uitvoering kan men denken aan kelders, silo's of foliebassins.
- Bewerking
Om de afzetperspectieven van dierlijke mest te vergroten zijn er bepaalde bewerkingen mogelijk zoals scheiding, vergisting, bezinking of droging. Door de bewerking wordt de mest makkelijker te transporteren (minder volume). De bestemming van bewerkte mest is afzet. Het merendeel van de bewerkingstechnieken wordt ook toegepast bij de verwerking.

De inzet van transportmiddelen, opslagfaciliteiten, verwerkingsinstallaties e.d. is nodig om alle dierlijke mest een bestemming - afzet of verwerking - te geven. We hebben gezien dat er veel mogelijkheden zijn bij deze logistieke invulling. Welke mogelijkheden de voorkeur hebben is niet a priori duidelijk. Om inzicht te krijgen in deze logistieke problematiek wordt er vanaf 1987 door het IMAG en de Landbouwniversiteit - vakgroep Wiskunde, sectie Operationele Analyse - gewerkt aan een computersysteem dat hierbij kan helpen.

Dit beslissingsondersteunende systeem zal in concrete gevallen een optimale logistieke structuur, inclusief transport- en opslagbehoefte, bepalen. Zo'n optimale structuur is afhankelijk van de ingegeven mogelijkheden. Door die stapsgewijs te veranderen en opnieuw de optimale structuur te berekenen, worden de gevolgen van de aanpassingen zichtbaar.

Het systeem beschouwt de problematiek op regionaal niveau: er wordt gewerkt met twee gebieden: een overschotgebied en een tekortgebied. Een voorbeeld van een mogelijke combinatie van een overschot- en een tekortgebied is de combinatie Noord-Brabant en Zeeland.

DE OPZET VAN HET WISKUNDIGE MODEL

We hebben gezien dat de bestemming van mest afzet of verwerking kan zijn. Bij de bepaling van de optimale afzet en verwerking onderscheiden we drie stappen:

1. De afzet op het eigen bedrijf.
2. De afzet op andere bedrijven binnen eenzelfde regio.
3. De afzet in een andere regio en de verwerking.

DE AFZET OP HET EIGEN BEDRIJF

De meeste mest die geproduceerd wordt zal op het eigen bedrijf afgezet kunnen worden. De afzet op het eigen bedrijf wordt berekend door per bedrijf de mestproduktie en de afzetmogelijkheden te beschouwen. Hoe de mogelijkheden worden benut proberen we zo goed mogelijk in te schatten. Omdat iedere boer autonoom is, wordt er bij deze stap niet geoptimaliseerd. In plaats daarvan proberen we een zo goed mogelijke afspiegeling van de werkelijkheid te geven.

DE AFZET OP ANDERE BEDRIJVEN BINNEN EENZELFDE REGIO

Nadat de afzet op het eigen bedrijf is bepaald, wordt per gemeente beoordeeld welke mest er afgezet kan worden op andere bedrijven binnen de regio. Ook deze stap is gebaseerd op een inschatting van het feitelijk mestgebruik.

Als er na de voorgaande stappen nog een overschot is, rijst de vraag of dat overschot kan worden afgezet in een gebied met een tekort aan mest. Als dat niet het geval is, blijft verwerking als enige mogelijkheid over.

DE AFZET IN EEN ANDER GEBIED EN DE VERWERKING

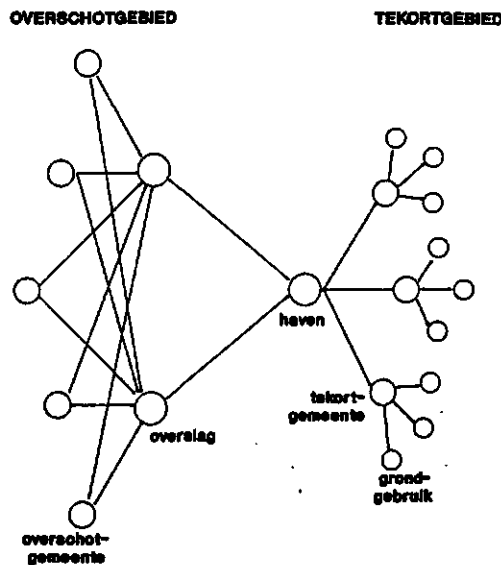
De meststromen die in dit geval optreden worden geoptimaliseerd. De resultaten zijn afhankelijk van de mogelijkheden. Per mestsoort moet aangegeven worden welke bestemmingen mogelijk zijn en hoe die gerealiseerd worden voor wat betreft opslag, transport e.d. Vanzelfsprekend moet ook worden aangegeven welke kosten daaraan zijn verbonden.

De structuur van de meststromen is sterk afhankelijk van de mogelijkheden. Als er sprake is van direct transport van overschotbedrijven in een overschotgebied naar tekortbedrijven in een tekortgebied dan zullen de stromen een eenvoudige structuur hebben. Maar in geval van centrale opslag in een overschotgebied of in een tekortgebied en als bij het transport overslag plaatsvindt (i.v.m. het gebruik van verschillende transportmiddelen) dan is de structuur ingewikkelder. De structuur van de meststromen modelleren we dan als een netwerk, de meststromen gaan via takken tussen verschillende knopen van het net-

werk. Een tak representeert transport van mest. Een knoop is een vertrekpunt en/of een bestemming van een tak. Een knoop kan een opslagmogelijkheid of een verwerkingsmogelijkheid voorstellen.

VOORBEELD

Stel dat mestvarkensmestoverschotten worden afgezet in een tekortgebied. Hierbij wordt gebruik gemaakt van transport per schip (duwbakken). Het gedeelte van het netwerk dat betrekking heeft op mestvarkensmest is afgebeeld in figuur 4.



Figuur 4: Netwerk voor opslag, transport en verwerking van mest

Een knoop in figuur 4 is een overschotgemeente (produktie), een haven in het overschotgebied (overslag), een haven in het tekortgebied (overslag en opslag) of een tekortgemeente (afzet).

Een tak representeert transport: atransport of scheepstransport.

De stromen in het netwerk optimaliseren we binnen de mogelijkheden. Hierbij gebruiken we Lineaire Programmering (LP). Bij het oplossen van dit lineaire programmeringsprobleem gelden de volgende voorwaarden:

- Alle overschotten moeten een bestemming krijgen (afzet of verwerking).
- De stromen naar een verwerkingsinstallatie (of opslag) mogen de capaciteit niet te boven gaan.
- De instroom bij een opslagplaats (of bij overslag) is gelijk aan de uitstroom.
- Als er bij de verwerking mestproducten geproduceerd worden, dan is de omvang van de produktie gerelateerd aan de omvang van de stroom naar de verwerkingsinstallatie.
- De totale afzet mag niet meer zijn dan de plaatsingsruimte voor mest.
- De afzet van een bepaalde mestsoort is beperkt, op dezelfde wijze als bij de afzet op andere bedrijven in eenzelfde gebied.

Alle voorwaarden zijn lineair.

Indien de locaties van bv. opslagfaciliteiten niet vastliggen dan kan deze keuzemogelijkheid bij de optimalisatie worden betrokken. Verder kunnen ook schaafeffecten m.b.t. opslag en verwerking hierbij worden betrokken.

STAND VAN ZAKEN

Het beslissingsondersteunende systeem BOSMest (Beslissings Ondersteunend Systeem voor MESTproblemen) is momenteel gereed. Een gedeelte is in gebruik bij de Landelijke Mestbank. In een concrete situatie kan de optimale logistieke structuur worden bepaald. BOSMest kan verder worden gebruikt bij het bepalen van de juiste normen en de daarbij behorende kosten van de logistieke structuur. Het kan derhalve ook worden gebruikt door de politiek om tot zinvolle normen te komen.

3.2 Budgetallocatie bij bodemsaneringsprojecten

De sanering van de Nederlandse bodem is een maatschappelijk gevoelige zaak waarin sinds het begin van de jaren '80 veel geld en andere middelen omgaan. Bij de aanpak van de schoonmaak van de Nederlandse bodem is middels de Interimwet Bodemsanering voor de provincies een centrale rol weggelegd.

De provincie is belast met: inventarisatie van gevallen van bodemverontreiniging, vaststellen van prioriteiten voor onderzoek en sanering, begeleiding en/of uitvoering en financiële afwikkeling van onderzoeken en saneringen.

De bedragen die de provincies per jaar aan bodemsanering kunnen besteden (enkele tot enkele tientallen miljoenen guldens) zijn te gering om een spoedige afronding van de bodemsaneringsoperatie te bereiken. In het jaarlijks door de provincie op te stellen bodemsaneringsprogramma is aangegeven welke gevallen van bodemverontreiniging het komend jaar voor onderzoek of sanering in aanmerking komen. Hierbij is de urgentie van de projecten aangegeven; de wijze waarop deze urgentie bepaald wordt, binnen het kader van Interimwet Bodemsanering, verschilt per provincie. De urgentiebepalingssystemen verschillen in mate van detaillering, in de criteria die meegenomen worden en de mate waarin het systeem kwantitatief of kwalitatief van aard is.

SANERINGSTECHNIKEN

Voor ieder geval van bodemverontreiniging kent men verschillende mogelijkheden, vertaald in saneringsvarianten, om te komen tot aanpak van het project. De varianten bestaan uit het toepassen van een bodemsaneringstechniek of een combinatie van bodemsaneringstechnieken.

Bij de beschrijving van de technieken kan onderscheid worden gemaakt tussen technieken zonder voorafgaande ontgraving en technieken die na afgraven worden toegepast. Ook onderscheidt men reinigende en niet-reinigende technieken. Met de technieken die na afgraven en transport naar een reinigingsinstallatie toegepast worden is reeds veel ervaring opgedaan. De zonder afgraven toepasbare technieken zijn minder vaak beproefd; ze verkeren zelfs deels nog in het ontwikkelingsstadium. Vanwege de lagere kosten en de vaak minder ingrijpende werkzaamheden die met laatstgenoemde groep bodemsaneringstechnieken gepaard gaan, zullen deze technieken in de toekomst, al dan niet na verdere verfijning, waarschijnlijk meer toepassing vinden. Het probleem van de zonder afgraven toepasbare technieken is dat de bereikte reinigingsgraad van de bodem vaak onvoldoende is of moeilijk te controleren (dit laatste vanwege inhomogene reiniging).

Het door de provincie te voeren beleid inzake de bodemsanering beoogt een zodanige keuze van uit te voeren projecten en saneringsvarianten, dat het voor bodemsanering beschikbare budget zo goed mogelijk wordt benut. Gezien de beperking van het provinciale budget voor bodemsanering, is het niet mogelijk

alle projecten met een zekere urgentie volgens de milieuhygiënisch meest vergaande saneringsvariant uit te voeren.

Het onderzoek richt zich op de mogelijkheid om met behulp van Operationele Research het keuzeprobleem omtrent de toewijzing van gelden aan projecten en saneringsvarianten aan te pakken.

MILIEU-EFFECT

Uitvoering van een project volgens een bepaalde saneringsvariant heeft een zeker positief effect op het milieu en brengt zekere kosten met zich mee.

Het milieu-effect van uitvoering van een project volgens een bepaalde saneringsvariant wordt bepaald door vergelijking van twee grootheden: (a) het risico van de verontreiniging voor de volksgezondheid zowel als het milieu vóór de sanering, en (b) dat risico ná sanering. Bodemgebruik en aard van de gebruikte saneringstechnieken zijn uiteraard belangrijke factoren.

Het risico van de verontreiniging wordt bepaald op grond van criteria die betrekking hebben op de aard en concentratie van de verontreinigende stoffen, de omvang van de verontreiniging, de verspreidingsmogelijkheden van de verontreinigingen en de blootstellingsrisico's. Maatgevend voor bodemgebruik is vooral de aard van de locatie. Bij de keuze van saneringstechnieken spelen uitvoering, effectiviteit en betrouwbaarheid de grootste rol. Deze drie aspecten worden bepaald door middel van een puntensysteem, de waardering van de criteria die hierin zijn opgenomen stelt de gebruiker zelf vast door gewichten aan de diverse criteria toe te kennen.

ROL VAN DE OR

Het doel van bodemsanering kan worden omschreven als het zodanig kiezen van combinaties "project/saneringsvariant", dat de som van de milieu-effecten (totaal milieu-effect) wordt gemaximaliseerd, zonder budgetoverschrijding.

Deze doelstelling is vertaald in een z.g. lineair programmeringsmodel met geheeltallige variabelen.

Het is mogelijk als aanvullende doelstelling op te nemen dat in het komende jaar een bepaald, minimum of maximum, aantal projecten uitgevoerd wordt. Toevoeging van deze doelen aan de eerste doelstelling is vertaald in een z.g. doelprogrammeringsmodel.

De bepaling van de milieu-effecten en kosten per variant en het maximaliseren van het totale milieu-effect vormen samen het allocatiemodel. Het model is toegepast op een achttal projecten en bijbehorende saneringsvarianten uit de provincie Overijssel.

Het zojuist besproken lineaire programmeringsmodel kan als volgt in wiskundige termen worden vertaald:

$\text{Max} \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e_{ij} x_{ij} \right\}$	Hierbij geldt:
Onder de randvoorwaarden:	e_{ij} = het milieu-effect van uitvoering van project i volgens variant j ;
$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \leq B$	x_{ij} = de 0/1-variabele die aangeeft of project i volgens variant j wordt uitgevoerd ($x_{ij}=1$) of niet ($x_{ij}=0$);
$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, \text{ voor } i=1, \dots, m$	c_{ij} = de kosten van uitvoering van project i volgens variant j ;
	B = beschikbare provinciaal budget.

Het probleem is opgelost met behulp van de computerprogramma's LINDO en SCICONIC.

CONCLUSIES

- Het allocatiemodel kan een bruikbaar hulpmiddel vormen bij het voeren van bodemsaneringsbeleid op provinciaal niveau. Op rijksniveau zou het systeem gebruikt kunnen worden voor de bepaling van landelijk uit te voeren projecten en daarmee voor de verdeling van de budgetten over de provincies. Voordeel hierbij is dat op dit niveau de voortgang van de bodemsanering minder beïnvloed wordt door niet voorspelbare factoren dan op provinciaal niveau.
- Het systeem als geheel kan worden geautomatiseerd, zodat op snelle en eenvoudige wijze de gevolgen van verschillende beleidsvisies en gestelde randvoorwaarden kunnen worden doorgerekend.

3.3 Optimaliseringsmodellen in de waterzuiveringstechnologie

GESCHIEDENIS

In de afgelopen 20 jaar is in Nederland hard gewerkt om de gevolgen van lozingen van afvalwater voor de kwaliteit van het ontvangende oppervlaktewater te verminderen. Dit resulteerde in de plaatsing van enkele honderden rioolwaterzuiveringsinstallaties (zogenaamde RWZI's) in ons land. Of men in veel gevallen de optimale keuze van zuiveringstechnologie en ontwerp van die RWZI's heeft kunnen maken is onwaarschijnlijk. De optimale keuze is namelijk afhankelijk van de specifieke randvoorwaarden die elke situatie kenmerken. Deze randvoorwaarden worden onder meer opgelegd door:

- de hoeveelheid en de kwaliteit van het te zuiveren afvalwater;
- toegankelijkheid van (nieuwe) technologieën;
- eisen gesteld aan de kwaliteit van het effluent;
- locatie van de RWZI;
- voordelen en nadelen van de toegepaste technologieën.

Als voorbeeld kan het model worden aangehaald dat in de jaren zeventig werd toegepast in een provincie voor de planning van nieuwe waterzuiveringsinstallaties. De betreffende provinciale waterstaat had in samenwerking met een ingenieursbureau een studie uitgevoerd, waarin werd onderzocht wat, provinciaal gezien, de goedkoopste manier van zuiveren was. Na een verge-

lijking van de kosten en rekening houdende met de potentiële stroom te zuiveren afvalwater, bleek zuivering met behulp van een oxydatiesloot het goedkoopste alternatief. Er werd besloten om in de gehele provincie een aantal oxydatiesloten te plaatsen.

Nadat het plan ten uitvoer was gebracht, bleek echter een aantal jaren geleden dat de uitbreiding van een oxydatiesloot met een tertiaire zuiveringstrap voor de verwijdering van fosfaat problemen zou geven.

De enige methode geschikt voor de verwijdering van fosfaat uit het effluent van een oxydatiesloot, is simultane defosfatering door neerslag via een chemische reactie. De hoeveelheid slib die hierdoor ontstaat is aanzienlijk, terwijl tevens de verwerkingsmogelijkheden van dit slib gering zijn vanwege de zeer hoge gehalten aan zware metalen.

Gezien de inspanningen die de overheid levert om in de komende jaren een reductie van het fosfaatgehalte in het te lozen effluent te bewerkstelligen en gezien bovenstaande problematiek, lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat in deze situatie niet voor de optimale manier van zuiveren is gekozen.

Achteraf gezien, had men beter een zuiveringsmethode kunnen kiezen die wel rekening houdt met de specifieke nadelen van een oxydatiesloot: weinig uitbreidingsmogelijkheden, in capaciteit noch door toepassing van tertiaire zuivering.

OPTIMALE KEUZE VAN TECHNOLOGIE EN LOCATIE

In de toekomst zullen in Nederland waarschijnlijk nog slechts weinig nieuwe zuiveringsinstallaties gebouwd worden. De bestaande RWZI's zullen echter uitgebreid of gerenoveerd moeten worden, bijvoorbeeld vanwege de leeftijd, een te lage capaciteit of negatieve secundaire milieu-effecten (eutrofiëring als gevolg van fosfaatlozingen, hoge slibproductie, stank etc.). Op de meeste zuiveringsinstallaties zijn op dit moment nog geen voorzieningen getroffen om het fosfaat uit het afvalwater te verwijderen. In de komende jaren zal daarom in veel gevallen een tertiaire zuiveringstrap moeten worden geïnstalleerd. Voor de verwijdering van het fosfaat komen vooraan nog vijf varianten in aanmerking:

- chemische precipitatie;
- korrelreactor;
- korrelreactor in combinatie met biologische defosfatering;
- biologische defosfatering;
- magnetische scheiding.

De waterkwaliteitsbeheerders in Nederland zullen, voordat de strenge fosfaattnormen in 1992 van kracht worden, moeten beslissen op welke wijze men aan de strengere normen zal kunnen voldoen.

De financiële gevolgen van de strenge maatregelen van de rijksoverheid ten aanzien van de fosfaatlozingen en de daaruit voortvloeiende eutrofiëring kunnen het beste worden toegelicht met een voorbeeld: alleen al het Hoogheemraadschap Rijnland zal er f 70 miljoen voor op tafel moeten leggen. Voor de andere beheerders gelden vergelijkbare bedragen.

Rijnland zal, evenals de andere waterkwaliteitsbeheerders, in de komende twee jaar de volgende vragen moeten beantwoorden:

- a) Welke momenteel beschikbare methode voor defosfatering is optimaal?
- b) Welke locaties zijn optimaal voor de tertiaire zuiveringstrappen?
- c) Moet hierbij worden gedacht aan enkele grote of vele kleine defosfateringsinstallaties?

De kwalificatie 'optimaal' die in de vragen a) en b) wordt gehanteerd, is afhankelijk van de afweging tussen onder meer de volgende criteria:

1. kosten (investeringskosten en jaarlijkse kosten)
2. primaire milieueffecten (verwijderingsrendement van fosfaat van de verschillende methoden)
3. secundaire milieueffecten (stankoverlast voor directe omwonenden, slib-productie) en eventuele daaruit voortvloeiende overheidsmaatregelen (bijvoorbeeld in het kader van de Hinderwet)
4. ruimtebeslag
5. stabiliteit en betrouwbaarheid
6. uitbreidingsmogelijkheden (flexibiliteit m.b.t. toekomstig beleid)
7. kennis, die door de verschillende technieken van de bouwer, maar vooral aan de operator wordt gevraagd.

Voor de bepaling van de optimale defosfateringsmethode en de optimale locatie(s), kan gebruik worden gemaakt van simulatie- en optimalisatiemodellen. Met deze modellen heeft men getracht de werkelijkheid te beschrijven en het is met sommige modellen gelukt om een beter inzicht te verkrijgen in die werkelijkheid.

EXPERTSYSTEMEN

De laatste jaren is door de informatietechnologen hard gewerkt aan de ontwikkeling van zg. expertsystemen. Met behulp van de in een expertstelsel opgeslagen kennis wordt aan de gebruiker de mogelijkheid verstrekt om 'op de stoel van een menselijke expert te gaan zitten'. Het systeem bevat namelijk de kennis die ook door een menselijk expert wordt toegepast. Dit betreft kennis die via opleiding, vakliteratuur en ervaring is opgedaan. Het grote voordeel van een expertstelsel ten opzichte van een menselijke expert ligt in de grotere hoeveelheid kennis die in het expertstelsel kan worden ondergebracht. Tevens kan een computer geen kennis over het hoofd zien of vergeten, mits die kennis op een juiste manier is ingevoerd. Verder wordt een geïntegreerd gebruik (op meerdere plaatsen) mogelijk van kwantificeerbare (data) en niet-kwantificeerbare kennis.

Gezien de hierboven geschetste, systematische voordelen van een expertstelsel boven een menselijke deskundige, lijkt het ons zinvol om expertsystemen ten behoeve van de waterzuiveringstechnologie te ontwikkelen. Zo'n systeem zal in de praktijk dezelfde uitkomsten geven, omdat een menselijke expert in principe dezelfde data en simulatiemodellen gebruikt.

Verbeteringen en uitbreidingen aan bestaande waterzuiveringsinstallaties is een uiterst moeilijke zaak met grote financiële gevolgen. Gezien de complexiteit daarvan en wegens de grote hoeveelheid kennis die hiervoor wordt gevraagd, is een expertstelsel het aangewezen instrument om het een en ander mogelijk te maken.

Binnen de Landbouwuniversiteit worden momenteel aanzetten gedaan voor de ontwikkeling van expertsystemen ten behoeve van de waterzuiveringstechnologie.

CONCLUSIES

Operationele Research kan bij het ontwerpen van waterzuiveringssystemen een belangrijke rol spelen. Optimaliseringsmodellen wijzen hierbij de weg naar de beste locatie van zuiveringsinstallaties en de gebruikte technologie. Verder gaan OR modellen geïntegreerd in Expertsystemen een steeds belangrijkere rol spelen.

4. VERDERE MILIEUTOEPASSINGEN VAN OR

In het voorgaande is aan de hand van een aantal voorbeelden geïllustreerd hoe en waar OR binnen de milieuwetenschappen kan worden toegepast. Vanzelfsprekend is dit een willekeurige greep geweest. Volledigheid wordt dan ook niet gepretendeerd.

Deze publicatie wordt nu afgesloten met een korte lijst van milieuprobleembieden waar OR toegepast is, c.q. kan worden. Deze voorbeelden zijn afkomstig uit de boeken van Marchuk (Referentie 7) en Pinter (Referentie 9).:

- * ontwerp van milieubewakingssystemen
- * ontwerp van reservoirsystemen en besturing ervan
- * waterkwaliteitsbeheersing
- * locatiebeleid t.b.v. afvalverwijderingsinstallaties
- * bepalen van milieurisico's
- * locatiebeleid t.b.v. milieu-vervuilende industriële installaties
- * optimalisering van emissie van industriële installaties.

Beide boeken bevatten een schat aan verdere voorbeelden waarop wij hier niet verder in kunnen gaan.

5. Verantwoording

Dit artikel had niet tot stand kunnen komen zonder de inbreng en medewerking van diverse collega's. Wij noemen ze in volgorde van inbreng in dit artikel:

- Drs. L. Hordijk (RIVM) heeft de basisinformatie betreffende RAINS aangedragen (Referentie 4 en 11)
- Ir. R.J. Swart (RIVM) voorzag ons van informatie over het IMAGE-model (Referentie 10)
- Ir. R.M. de Mol (IMAG) heeft (in een samenwerkingsverband met de Landbouwniversiteit) het BOSMEST systeem ontwikkeld (Referentie 6)
- Ir. A.J. Jacobse en Ir. P.P.G. Wolbert hebben in hun afstudeerwerk voor de vakgroepen Cultuurtechniek en Wiskunde van de Landbouwniversiteit het onderwerp "Budgetallocatie bij bodemsanering" behandeld. Voor dit werk hebben zij de Unilever Research Prijs 1988 ontvangen (Referentie 5)
- Ir. E.C. Doekemeijer heeft de informatie betreffende de simulatie- en optimaliseringsmodellen t.b.v. het ontwerp van waterzuiveringsinstallaties aangereikt (Referentie 1).

6. Referenties

1. Doekemeijer, E.C.: Rapport Haalbaarheidsstudie Optimalisatiemodel Zuiveringstechnologie. Rapport Vakgroep Waterzuivering Landbouwniversiteit Wageningen, januari 1989.
2. Fortuin, L.; Van Beek, P.; Van Wassenhove, L.: Operationele Research kan meer voor U doen dan U denkt!
De Ingenieur nr. 3, maart 1989, 22-28.
3. Fortuin, L.; Van Beek, P.; Van Wassenhove, L.: Logistiek: Meer dan een mode-woord. Harvard Belgium Review Nr. 20, Derde Trimester 1989, 54-57 Borsen International Publications.

4. Hordijk, L.: A Model Approach to Acid Rain. Environment, Volume 30, No. 2, 17-42 (1988).
5. Jacobse, A.J.; Wolbert, P.P.G.: Saneringsproject en saneringstechniek: een keuzeprobleem. Afstudeerverslag Vakgroepen Cultuurtechniek en Wiskunde, februari 1988.
6. Mol, R.M. de: A Decision Support System to optimize the application and processing of manure. Land and Water Use, Agricultural Engineering, Volume 1, Dodd & Grace (eds.), Balkema, 409-415, 1989.
7. Marchuk, G.I.: Mathematical Models in Environmental Problems. North-Holland Amsterdam, New-York, Oxford, Tokyo 1986.
8. N.N.: Hulp vanuit de ruimte moet milieu helpen. SAFE oktober 1989, 62-67.
9. Pinter, J.: Stochastic Modelling and Optimization with environmental applications. Kultura International Budapest 1990.
10. Rotmans, J.; de Boois, H.; Swart, R.J.: IMAGE: An Integrated Model for the Assessment of the Greenhouse Effect. Rapport Nr. 758471009 RIVM, februari 1989.
11. Shaw, R.W.: Transboundary Acidification in Europe and the Benefits of International Cooperation. Conference "Pollution knows no frontiers: priorities for Pan-European Cooperation", Varna, 16-20 October 1988.
12. United Nations Environment Program: Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer: Final Act, Montreal, 1987.

List of the technical notes of the Department of Mathematics
(Dreijenlaan 4, 6703 HA Wageningen, The Netherlands)

- | | | |
|-------|---|--|
| 87-01 | M. Funk | Calculation of ground water levels with use of the finite element method. |
| 87-02 | M. Funk | Growing, a program package for the calculation of ground water levels in natural geometries. |
| 87-03 | P. van der Laan | Selection from logistic populations. |
| 87-04 | S. Driessen,
P. van der Laan and
B. van Putten | Selection from normal populations with unequal variances and its robustness. |
| 87-05 | S. Driessen | A note on the probability of correct selection. |
| 88-01 | P. van der Laan and
L.R. Verdooren | Selection of populations: An overview and some recent results. |
| 88-02 | H. Almekinders,
P. van Beek and
P. van Schuilenburg | The 1 Machine N Products Problem. |
| 88-03 | M. de Gee | Step-change techniques for extrapolation methods for delay-differential equations. |
| 88-04 | S. Driessen | Evaluation of a multiple comparison technique as a subset selection procedure. |
| 88-05 | J.M. ten Vregelaar | Note on the convergence to normality of quadratic forms in independent variables. |
| 88-06 | M.A.J. van Montfort,
J.V. Witter | Statistische analyse met betrekking tot maxima. |
| 88-07 | L.R. Verdooren | Use of variance components in the analysis of complete block designs. |
| 88-08 | P. van der Laan | Selection from designed experiments. |
| 89-09 | M.A.J. van Montfort | Probability Weighted Moments (met aandacht voor toepassingen in de hydrologie). |
| 89-01 | E. Hendrix | Risk and Uncertainty in OR models which can be used in agriculture. |
| 89-02 | T.A. Buishand,
M.A.J. van Montfort | Changes in the chemical composition of atmospheric precipitation in the Netherlands during the period 1978-1987. |
| 89-03 | J.M. ten Vregelaar | On computing parameter estimates in a dynamic errors - in - variables model. |
| 89-04 | J. Grasman | Estimate of failure time of a nonlinear system with stochastic input. |

- 89-05 M.A.J. van Montfort ML-estimation for EV1 and GEV (point, interval and censored data).
- 89-06 M.A.J. van Montfort Extreme-value distribution of annual maxima: ML estimation of the HGCP-model.
- 89-07 J. Grasman,
O.A. van Herwaarden An Asymptotic Method for Estimating the Rate of Groundwater Pollution.
- 89-08 K. van der Hoek Verontreiniging van een drinkwaterput bij gelijkmatige achtergrondstroming.
- 90-01 R.M de Mol,
P. van Beek An OR-contribution to the solution of the environmental problems.
- 90-02 P. van Beek,
L. Fortuin,
L. V. Wassenhove Operationele Research en Milieu: een vruchtbare combinatie.