

U vraagt en wij draaien

Ruimtelijk optimaal verdelen van kwaliteitswensen

Zestien miljoen Nederlanders hebben elk hun eigen wensen met betrekking tot de beleving en waardering van hun omgeving (ruimtelijke kwaliteit). Dat maakt het streven naar de optimale ruimtelijke inrichting tot een complexe opgave. Klassieke optimaliseringsmethoden als Lineair Programmeren zijn slechts beperkt bruikbaar. Heuristische methoden kunnen beter overweg met veel variabelen, randvoorwaarden en verschillende criteria. Het Genetisch Algoritme is zo'n methode. Aan de hand van drie casestudies wordt beschreven hoe er in de praktijk mee gewerkt wordt.

In Nederland, met een oppervlak van slechts 33.873 km², wonen ruim zestien miljoen mensen. Daarmee is het een van de meest drukbevolkte landen in de wereld. Deze zestien miljoen mensen hebben ieder hun persoonlijke wensen op het gebied van hun woonwijk, werkplek, infrastructuur en recreatiemogelijkheden (ruimtelijke functies) en op het gebied van de beleving en waardering van hun omgeving (ruimtelijke kwaliteit). Om een zo groot mogelijk deel van deze wensen in te kunnen willigen zijn we voortdurend bezig met het opnieuw inrichten van ons land door het realiseren van ruimtelijke functies en richtlijnen voor de onderlinge ruimtelijke ligging van deze functies. In dit proces van inrichting moet rekening gehouden worden met een aantal randvoorwaarden.

Allereerst zijn dat randvoorwaarden wat betreft de ruimtelijke omvang:

- De beschikbare ruimte in een bepaald gebied (regio, provincie, Nederland) is beperkt. Het benodigde oppervlak voor de realisatie van de gewenste functies kan de beschikbare oppervlakte natuurlijk niet overschrijden;
- Daarnaast is voor de realisatie van bepaalde kwaliteiten veelal een minimale omvang nodig. Om bepaalde ecosystemen in stand te houden is er een oppervlakte eis aan natuurgebieden; als de gebieden te klein worden sterven populaties uit. Ook is het gewenst dat de snelweg van Utrecht naar Amsterdam inderdaad lang ge-

noeg is en niet eindigt bij Breukelen.

Ten tweede zijn er randvoorwaarden t.a.v. de ruimtelijke ligging of locatie:

- Bepaalde functies stellen eisen aan de plek. Voor de realisatie van een haven is oppervlakte nodig in of langs het water, duinecosystemen passen het best in de duinen, en rivierkleilandschappen horen bij de Betuwe;
- Daarnaast is er sprake van onderlinge ruimtelijke beïnvloeding van functies waardoor bepaalde kwaliteiten niet of nauwelijks behaald kunnen worden. Zo zal een stiltegebied een zekere afstand moeten hebben tot geluidsbronnen, en zullen schrale ecosystemen niet te dicht bij ammoniakuitstotende boerderijen moeten liggen.

In het beleid is het uiteraard van groot belang zoveel mogelijk met al deze randvoorwaarden rekening te houden. In veel gevallen zijn er echter zóveel wensen en zóveel randvoorwaarden, dat dit voor de mens te complex wordt. Dientengevolge liggen functies niet altijd op de meest geschikte plek en worden in veel gevallen functies in de buurt van andere functies geplaatst, terwijl zij elkaar negatief beïnvloeden.

Daardoor komen de beoogde en gewenste ruimtelijke kwaliteiten niet optimaal tot hun recht. Dit is een groot probleem en in deze bijdrage wordt een methode gedemonstreerd om hiermee om te kunnen gaan.

PAUL SCHOT, WILLEM
LOONEN & KEES VINK

Dr. P.P. Schot. Universiteit
Utrecht, Faculteit
Geowetenschappen
Postbus 80.115
3508TC Utrecht
p.schot@geog.uu.nl
Ir. W. Loonen. RIVM
Postbus 1
3720 BA Bilthoven
C. Vink MSc. Elementair
Molenstraat 19
4061 AA Ophemert

Foto: Barend Hazeleger



Ruimtelijke Optimalisatie

Een methode die gebruikt kan worden voor het oplossen van dergelijke complexe ruimtelijke inrichtingsvraagstukken is Ruimtelijke Optimalisatie. We zullen dat illustreren aan de hand van drie casestudies. Met de methode kan in een gebied met begrensde oppervlakte de locatie van een aantal functies zo berekend worden dat ze volgens het optimum ruimtelijk verdeeld worden over het gebied.

Veel klassieke optimalisatiemethoden hebben een aantal nadelen voor de complexe ruimtelijke inrichtingsvraagstukken die we willen behandelen. Bij Lineair Programmeren moeten de relaties en randvoorwaarden lineair geformuleerd worden. Indien de relaties en randvoorwaarden geen lineair verband vertonen, is de techniek niet bruikbaar. Bij Niet-Lineair Programmeren is een bepaalde 'smoothness' van het functieverloop gewenst, bijvoorbeeld in het EHS-verhaal (case 1) verandert de doelfunctie met stappen van 100 meter (de zijden van één natuurgebied van 1 hectare) en is er geen 'smoothness' in het functieverloop. Bij een dergelijk getrappt functieverloop is het aantal variabelen dat bij niet-lineair programmeren gebruikt kan worden relatief beperkt tot rond de vijfhonderd. Aangezien we grote hoeveelheden variabelen, meer criteria in verschillende opmaak en meerdere randvoorwaarden willen opnemen, zoeken we een methode die dit wel kan. Een mogelijkheid is om alle potentiële oplossingen na te lopen. Maar we zijn al snel duizend jaar verder, gelet op de omvang van de behandelde casestudies en de huidige generatie computers, voordat we met dat zoekproces halverwege zouden zijn. Er is een groep optimalisatiealgoritmen, die in plaats van alle mogelijkheden te proberen, goede eigenschappen van de geëvalueerde potentiële oplossingen onthoudt en meeneemt in de zoektocht naar het optimum. Deze zogenaamde heuristische methoden starten met een willekeurig gegenereerde beginoplossing, welke vervolgens met behulp van een vooraf gedefinieerd

proces kan veranderen, en stoppen indien er geen verbeteringen meer optreden. In deze casestudies hebben wij ons gericht op de heuristische methode genaamd Genetisch Algoritme. De bruikbaarheid van deze methode heeft zich meerdere malen bewezen in grootschalige ruimtelijke optimalisaties, zie bijvoorbeeld Vink & Schot (2002).

Om het gevolgde traject en de daarbij genomen keuzes transparant te houden hebben we voor de hieronder besproken cases het aantal randvoorwaarden en criteria beperkt gehouden.

Case 1: Ecologische Hoofdstructuur

Al in 1990 is een besluit genomen over de realisatie van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS), maar over de exacte ruimtelijke ligging is anno 2004 nog steeds geen consensus bereikt.

Een van de oplossingsrichtingen is bijvoorbeeld de EHS zo te situeren dat:

- de ecosystemen optimaal functioneren (het hoofddoel van de EHS);
 - andere functies zo weinig mogelijk geschaad worden.
- Deze opgave kan vertaald worden in een doelfunctie en in een aantal randvoorwaarden.

In dit geval moet de doelfunctie dus een maat geven voor het functioneren van ecosystemen. In operationele zin moet zij vertaald worden naar een criterium, want wat is 'optimaal functioneren'? Voor de eenvoud maken we in ons voorbeeld gebruik van het criterium dat de uiteindelijke EHS, bij een gegeven oppervlakte, een zo klein mogelijk omtrek moet hebben. Het idee hierachter is dat bij de geringste omtrek, de natuur het minst versnipperd is en de beïnvloeding en verstoring van buitenaf het geringst (bijvoorbeeld door geluid of luchtverontreiniging).

De randvoorwaarden in deze opgave kunnen zijn:

- 100.000 hectare nieuwe natuur moet worden bijgeplaatst in heel Nederland;

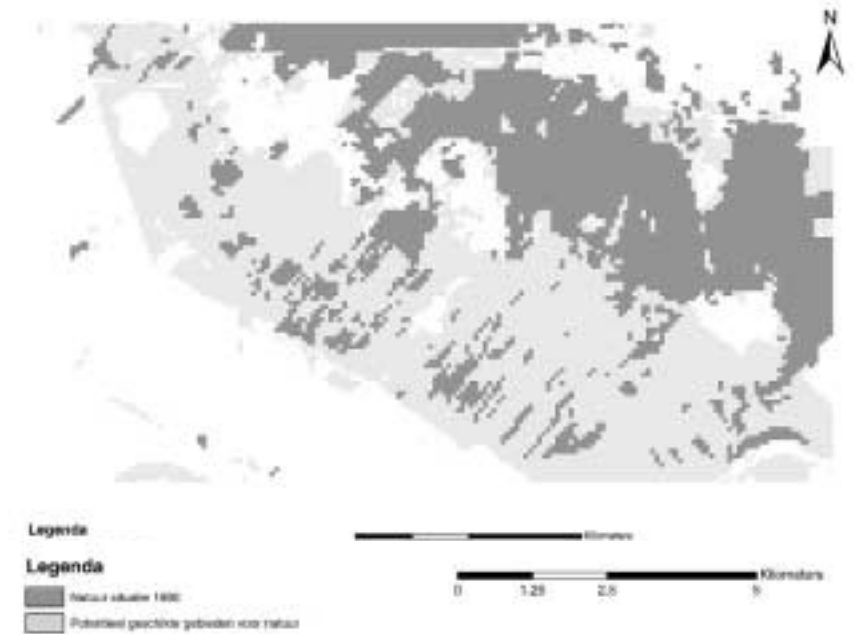
- de nieuwe natuur mag alleen op de plek van huidige landbouwpercelen komen (het uitgangspunt daarbij is dat de landbouw de komende decennia zal krimpen);
- bestaande wegen, woonwijken en industriegebieden behoeven niet te wijken voor nieuwe natuur.

Nu is er al een zogenaamde Bruto-EHS op kaart vastgelegd. Dit is een zoekruimte waarbinnen de uiteindelijke Netto-EHS moet komen te liggen. De Netto-EHS is de bestaande natuur inclusief de nog te realiseren natuur.

Het aantal mogelijkheden om de Netto-EHS te plaatsen, binnen de Bruto-EHS, is zeer groot en loopt al snel op naar een getal met meer dan honderd nullen. Het is ondoenlijk om alle mogelijke configuraties met de hand door te rekenen. Zelfs met de huidige generatie computers zou de rekentijd nog oplopen tot enkele tientallen jaren. Zo lang kan Den Haag onmogelijk wachten. Tegen die tijd is de kans erg klein dat op de beste plekken nog ruimte is voor natuur.

Om dit probleem te kunnen oplossen is er dus een (computer)methode nodig die op een 'slimme' manier de optimale plaatsing van de Netto-EHS berekent. Lineair Programmeren voldoet niet als methode omdat we te maken hebben met 'niet-lineariteit in de variabelen'. Een gebied is geclassificeerd óf als natuur óf als niet-natuur; dit is niet iets dat in een schaal van nul tot honderd kan worden uitgedrukt. Wij maken daarom gebruik van een Genetisch Algoritme. Deze methode kan ook niet-lineariteit aan en is relatief snel. In deze bijdrage wordt verder niet ingegaan op de methode, daar deze in dit artikel ondergeschikt is aan de toepassing. Voor de methode zie eventueel Holland (1975), Beasley (2002), Vink & Schot (2002), Loonen et al. (2004).

Als voorbeeld van de werking van ruimtelijke optimalisatie is in figuur 1 een kaartje van een deel van de Utrechtse



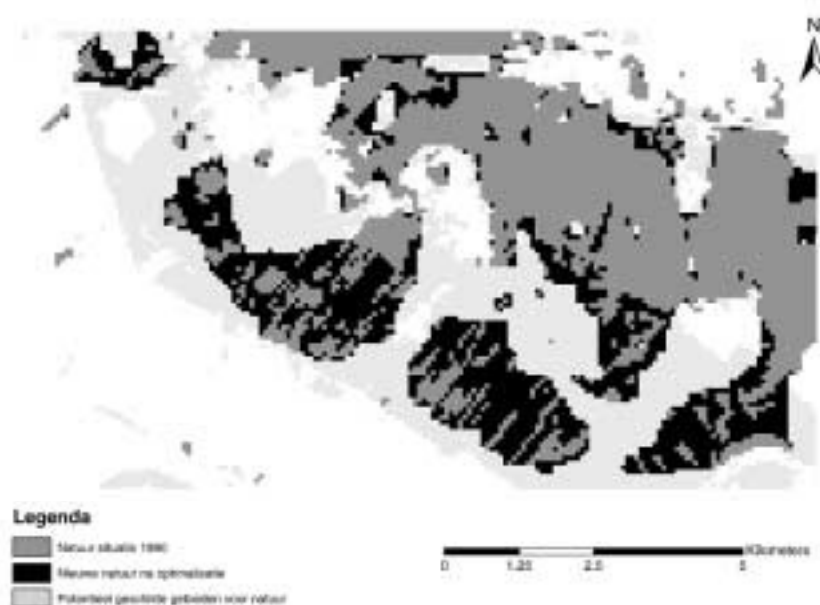
Heuvelrug te zien. De bestaande natuurgebieden zijn in donkergrijs aangegeven en in lichtgrijs zien we de Bruto-EHS, waarbinnen nu de Netto-EHS (dus de nieuwe natuur) moet worden geplaatst.

In de berekeningen wordt het criterium aangehouden dat de omtrek van alle natuurgebieden binnen de EHS zo klein mogelijk moet zijn, teneinde maximale samenhang van de natuur te waarborgen.

De methode start door cellen met nieuwe natuur willekeurig over landbouwgebieden binnen de Bruto-EHS te plaatsen. Deze plaatsing gebeurt zodanig, dat het totale oppervlak van de EHS (in dit voorbeeld 100.000 hectare nieuwe natuur) wordt bereikt. Hierna worden één voor één cellen op een andere locatie gelegd en wordt gekeken of de omtrek van de nieuwe situatie kleiner is dan die van de vorige. De configuratie met de kleinste omtrek wordt steeds bewaard en die met de grootste weggegooid. Aldus

Figuur 1 Situatie natuurgebieden in een deel van de Utrechtse Heuvelrug in 1990.

Figure 1 Location of actual (1990) and potential nature areas for part of the Utrechtse Heuvelrug.



Figuur 2 De situatie ná optimalisatie van 100.000 hectare nieuwe natuur binnen de Bruto-EHS.

Figure 2 Location of 100.000 ha of new nature areas after spatial optimisation

worden miljoenen configuraties doorgerekend en rolt uiteindelijk de optimale configuratie uit de computer.

In figuur 2 is het resultaat van de berekeningen te zien. In zwart is te zien waar volgens de opgegeven criteria de nieuwe natuur het best geplaatst kan worden. Donkergrijze en zwarte gebieden samen geven nu de totale oppervlakte natuur binnen de EHS aan, na optimalisatie, dus met een minimale omtrek, zo samenhangend mogelijk, zo min mogelijk versnipperd en met zo weinig mogelijk randinvloeden.

Case 2: Drinkwateronttrekking

De eerste case was in feite een enkelvoudige optimalisatie of enkelvoudige doelprogrammering. Hier werd geoptimaliseerd op basis van slechts één criterium namelijk de kleinste omtrek van alle natuurgebieden binnen de EHS. In de realiteit spelen vrijwel altijd meerdere belangen te-

gelijktijd en zijn we genoodzaakt meerdere doelen tegelijktijd te optimaliseren. Dit optimaliseren met meer dan één doel wordt meervoudige doelprogrammering genoemd.

Als voorbeeld van meervoudige doelprogrammering wordt hier de onttrekking van drinkwater beschouwd. In een gebied moet een bepaalde hoeveelheid grondwater onttrokken worden om de bevolking van drinkwater te voorzien. Tegelijkertijd moet ook de schade aan de natuur door verdroging beperkt blijven en het energieverbruik voor watertransport minimaal zijn. (Dit laatste kan ook gezien worden als kosten van een betreffende oplossing).

Om het probleem en de potentiële oplossingen te verkennen wordt eerst een enkelvoudige optimalisatie uitgevoerd. Er wordt in dit geval enkel gekeken naar de schade aan natuurgebieden. Als randvoorwaarde wordt gehandhaafd dat een vaste hoeveelheid drinkwater onttrokken moet worden. De natuurgebieden kunnen in principe schade ondervinden van de grondwateronttrekkingen, doordat zij mogelijk te lijden krijgen onder watertekort waardoor verdroging op kan treden. De grootte van de schade hangt af van:

- de hoeveelheid drinkwater die per onttrekkingslocatie opgepompt wordt;
- de afstand van het natuurgebied tot de onttrekking.

Grofweg geldt: hoe groter de onttrekking op een locatie, en hoe dichterbij het natuurgebied, des te groter de schade aan het natuurgebied.

Er is dus een ruimtelijke relatie tussen de locatie waar het water onttrokken wordt en de schade aan de natuur.

In het staafdiagram (figuur 3) worden drie verschillende onttrekkingsscenario's vergeleken met hun effect op de natuur. Het linkerstaafdiagram geeft de verdeling van de hoeveelheid onttrokken water over de zes winlocaties weer. De hoeveelheid onttrokken water is voor ieder scenario gelijk. Het rechterstaafdiagram geeft voor ieder sce-

nario de schade aan de natuur aan. Dus wanneer enkel de schade aan natuur beperkt zou moeten worden, is duidelijk dat scenario B het beste is.

De overheid heeft echter meer doelen dan enkel de schade aan natuurgebieden te beperken. Zo is bijvoorbeeld ook van belang dat:

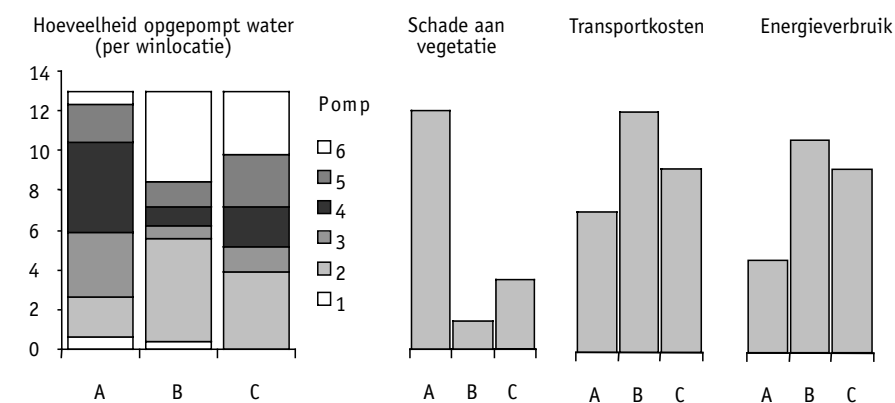
- de transportkosten, om het water naar de huizen te pompen, laag zijn;
- het energieverbruik acceptabel is.

In figuur 3 zijn voor de verschillende onttrekkingsscenario's A, B en C ook de effecten te zien op deze twee doelen. Voor transport en energie scoort scenario B het slechtst. Het genetisch algoritme wordt weer ingezet om een optimale oplossing te berekenen. Omdat het beleid hier meerdere doelen tegelijkertijd wil realiseren, betreft het dit keer een 'multi-objective' optimalisatie of meervoudige doelprogrammering. Deze kan in principe op twee manieren plaatsvinden, afhankelijk van het gegeven of de randvoorwaarden wel of niet bekend zijn.

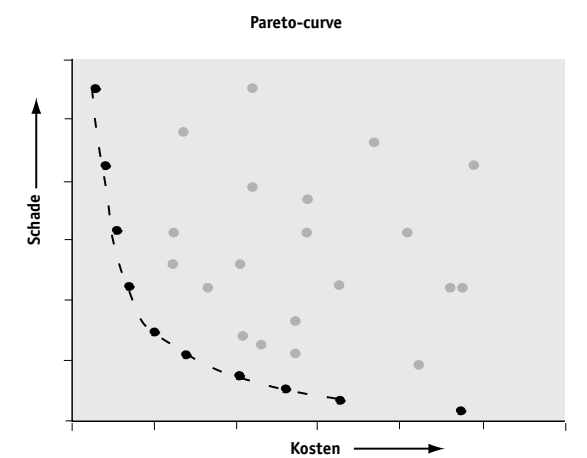
- Randvoorwaarden bekend

Bij deze eerste manier wordt verondersteld dat de beleidsmaker precies weet wat hij wil. Hij stelt bijvoorbeeld als hoofddoel dat er zo weinig mogelijk schade in de natuur optreedt. Zijn randvoorwaarde zou kunnen zijn dat de kosten niet hoger mogen uitvallen dan een bepaald bedrag.

Met behulp van het optimalisatieprogramma kunnen nu curves als in figuur 4 uitgerekend worden die het verband aangeven tussen de kosten van verschillende onttrekkingsverdelingen en de hoeveelheid schade die daarbij optreedt in de verschillende natuurgebieden. Horizontaal staan de kosten van onttrekkingsscenario's en verticaal de schade aan de natuur. De punten geven een aantal mogelijke oplossingen weer. De zwarte punten zijn oplossingen die het meest gunstig zijn ('optimaal') gegeven ge-



wenste kosten of schade aan de natuur. De witte oplossingen zijn inferieur aan de oplossingen op de zwarte lijn. Voor elke witte oplossing is er een oplossing op de zwarte lijn die minder kost of minder schade aan de natuur berekent. De beleidsmaker kan nu van de lijn aflezen hoeveel natuurschade op zal treden bij een bepaald beschikbaar budget. Of omgekeerd, hoeveel geld hij moet uitrekken als hij een minimale natuurschade wil realiseren. De methode weerhoudt ons er dus van 'dom' beleid te



Figuur 3 Staafdiagram met hoeveelheden onttrokken water per winlocatie, schade aan natuur, transportkosten en energieverbruik voor scenario's A, B en C.

Figure 3 Bar chart with the amount of water extracted per well, damage to natural areas, transport costs and energy use for scenarios A, B and C.

Figuur 4 Pareto-curve met in zwart de optimale oplossingen en in grijs de niet-optimale oplossingen.

Figure 4 Pareto curve with optimal solutions in black and inferior solutions in grey.

gaan voeren; we moeten alleen oplossingen kiezen die óp de lijn liggen, alle andere zijn namelijk inferieur. Tevens biedt ze de beleidsmaker de mogelijkheid te bepalen hoeveel geld hij overheeft voor (het voorkomen van) een bepaalde aantasting van de natuur.

Bovenstaand voorbeeld met slechts twee criteria of doelen (natuurschade en kosten) is overigens uitgewerkt ter illustratie. Het programma kan in principe zeer veel doelen tegelijk uitrekenen. Dit is echter grafisch niet gemakkelijk weer te geven.

- Randvoorwaarden niet bekend

Als de beleidsmaker niet alle geldende randvoorwaarden expliciet kan maken, wordt de ruimtelijke optimalisatie op een tweede manier toegepast. In dat geval worden eerst een aantal mogelijke uitkomsten bestudeerd en wordt bekeken welke wel en welke niet bevallen. De methode rekent een aantal randvoorwaarden en criteria in verschil-

lende verhoudingen door. Aan de hand van deze uitkomsten worden de verhoudingen vervolgens opnieuw vastgesteld en doorgerekend. Deze meer iteratieve of interactieve manier van werken wordt hierna aan de hand van een derde voorbeeld geïllustreerd.

Case 3: Ammoniakuitstoot en -depositie in natuurgebieden in Noord-Brabant

Figuur 5 toont de uitkomst van een optimalisatie waarbij intensieve veehouderijbedrijven worden verplaatst om de depositie van ammoniak op nabijgelegen natuurgebieden te verminderen.

In figuur 5 is te zien wat de computer berekent, als de hoeveelheid emissie gelijk mag blijven, geen restricties aan de verplaatsing worden gesteld en het doel is om zo min mogelijk depositie van ammoniak te krijgen in de natuur. Wat opvalt is dat de intensieve veehouderijen voornamelijk naar de grens van de regio zijn verplaatst. Dit is uiteraard gunstig voor de natuurgebieden in de regio, want door de overheersende zuidwestelijke windrichting wordt een groot deel van de ammoniak nu verplaatst naar de naastgelegen regio's. Daar zal men echter minder tevreden zijn over deze uitkomst.

Geen beleidsmaker zal dit soort problemen met omliggende regio's op zijn geweten willen hebben. Door het zien van de situatie na de voorlopige berekeningen wordt hij gedwongen na te denken over welke criteria hij eigenlijk nog meer wil hanteren om tot zijn uiteindelijke besluit te komen.

Een nieuwe randvoorwaarde is bijvoorbeeld dat de ammoniak niet naar de omliggende regio's geëxporteerd mag worden. In dit geval kan hij in de optimalisatie verwerken dat de boerderijen maar een beperkt aantal kilometer verplaatst mogen worden.

Figuur 6 laat zien dat er nu een genuanceerder beeld ontstaat. Allereerst valt op dat de ergste emissie niet langer

naar de provinciegrens wordt verplaatst. De figuur laat ook zien dat het witte gebied waarin zich de natuurgebieden bevinden, overwegend grenst aan gebieden met relatief lage ammoniakemissies. Tenslotte is te zien dat hoge ammoniakemissies slechts worden toegestaan in een relatief klein gebied; er ontstaan dus concentratiegebieden van hoge ammoniakemissies. De beleidsmaker kan dit nieuwe emissiepatroon accepteren of besluiten opnieuw een criterium toe te voegen.

Door in een iteratief proces de tussenresultaten te bekijken en op voor- en nadelen te beoordelen worden besluiten beter overwogen. De besluitvorming wint aan duidelijkheid, transparantie en reproduceerbaarheid.

Conclusies

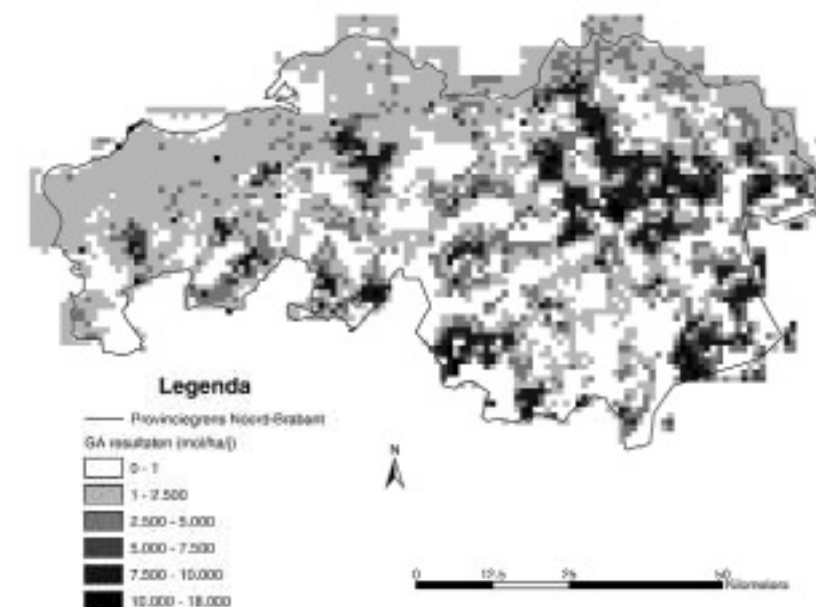
De strekking van dit verhaal is dat het gebruik van technieken zoals hier besproken de ruimtelijke kwaliteit ten goede kan komen. Dit gebeurt enerzijds door een ruimtelijk optimaal patroon van gewenste kwaliteiten te realiseren, waarbij rekening gehouden kan worden met een enorm scala aan eisen en randvoorwaarden tegelijkertijd. Anderzijds vermindert de methode de kans op negatieve ruimtelijke beïnvloeding van naastgelegen functies.

Ruimtelijke optimalisatie kan op twee manieren worden ingezet als beleidsondersteunend instrument:

1. Als het beleid duidelijke middelen inzet om bepaalde doelen te bereiken (bijvoorbeeld een hoeveelheid geld voor het beschermen van natuur) kan met deze techniek optimaal rendement van de ingezette middelen worden bereikt;
2. Als beleidsmakers nog niet volledig helder voor ogen hebben welke criteria getoetst en welke doelen bereikt moeten worden, kan door het iteratief toevoegen van randvoorwaarden, stapsgewijs toegewerkt worden naar een resultaat dat het best voldoet aan de gestelde eisen. De methode bevordert transparante en geïntegreerde be-

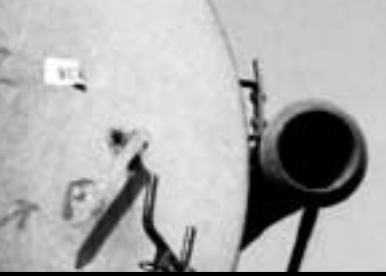
Figuur 5 Optimalisatie van de ammoniakemissies, zonder restricties op het gebiedsniveau.

Figure 5 Optimisation of ammonia emissions, without restrictions as to area of deposition.



Figuur 6 Optimalisatie van de ammoniakemissie met als extra voorwaarde dat de depositie niet uit het gebied mag verschuiven.

Figure 6 Optimisation of ammonia emissions, with the restriction that deposition must remain in the area.



ren in termen van overlap. Wanneer de overlap van een aantal modelruns groot is en de doelfunctiewaarden van afzonderlijke runs vrijwel gelijk zijn, is de kans klein dat de afzonderlijke runs in een suboptimum zijn blijven steken.

In principe kan het Genetisch Algoritme voor ieder optimalisatieprobleem worden toegepast. Het is echter wel van belang dat de gebruiker weet wat hij wil. Hoe meer (conflicterende) doelen nagestreefd worden en hoe groter de omvang van het probleem (aantal variabelen), hoe moeilijker het is om het overzicht te behouden. Het voor-

bewerken van de data en het opstellen van de doelfunctie zijn bij de hier besproken cases dan ook tijdrovende processen. Daar staan genoemde voordelen echter tegenover.

Wij hopen van harte dat beleidsmakers hun drempelvrees voor dit soort methoden zullen overwinnen, en ze zullen gaan toepassen voor het vergroten van ruimtelijke kwaliteit.

Summary

Spatial optimisation of land-use functions and qualities

Paul Schot, Willem Loonen & Kees Vink

spatial optimisation, genetic algorithm, land-use functions, spatial planning, environment

Land-use planning is constantly trying to re-arrange functions in order to optimise their performance, while minimising the negative effects on adjacent functions. In densely populated countries like The Netherlands this may become a tedious task given the intensity of land-use. The number of functions in an area may be so large

that it becomes practically impossible for planners to determine the optimum spatial configuration of land-use functions.

In this paper a computer-based method is presented for Spatial Optimisation using a Genetic Algorithm which may help planners. The method may be used either in a straightforward way to determine optimum land-use configuration given a set of a priori determined goals, or in a more interactive way in which goals and boundary conditions are iteratively adapted based on intermediate calculated results until an optimal land-use configuration has been found.

Three case studies are presented to illustrate the method.

Literatuur

Beasley, J.E., 2002. Population heuristics. In: P.M. Pardalos & M.G.C. Resende (red.). Handbook of Applied Optimization. Oxford. Oxford University Press:138-157.

Holland, J.H., 1975. Adaptations in natural and artificial systems. Ann Arbor. University of Michigan Press.

Loonen, W., P.S.C.A. Heuberger, H. Bakema & P.P. Schot, 2004. Application of a Genetic Algorithm to minimize agricultural nitrogen deposition in nature reserves. Agricultural Systems (submitted).

Vink, K. & P.P. Schot, 2002. Multiple-objective optimization of drinking water production strategies using a genetic algorithm. Water Resources Research, Vol. 38, No. 9, doi:10.1029/2000WR000034.