

**RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN BODEM EN WATER**



**COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO**

**RAPPORTEN EN NOTA'S No. 18**

# **RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN BODEM EN WATER**

**COPYRIGHT © Nederlandse organisatie voor  
toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek  
TNO, 1987**

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Variabiliteit

Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water/[J. Bouma ... et al.; samenst. en red. J.C. Hooghart]. – 's-Gravenhage: Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO. – III. – (Rapporten en Nota's/Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO; no. 18)

Verslag van: 6e CHO-studiebijeenkomst gehouden op 22 oktober 1986 in het Cultureel- en Congrescentrum De Reehorst te Ede. – Met lit. opg.; reg.

ISBN 90-6743-104-4

SISO 631.2 UDC 556.3

Trefw.: hydrologie

# **RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN BODEM EN WATER**



**VERSLAG VAN:**

de 6e CHO-studiebijeenkomst gehouden op 22 oktober 1986  
in het Cultureel- en congrescentrum De Reehorst te Ede.

**COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO – 's Gravenhage – 1987**

**RAPPORTEN EN NOTA'S No. 18**



## INHOUD

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| VOORWOORD                                                                                                                                            | 1  |
| AUTEURS                                                                                                                                              | 3  |
| 1. SCOPE VAN DE DAG                                                                                                                                  | 5  |
| J. Bouma                                                                                                                                             |    |
| 1 Introductie                                                                                                                                        | 5  |
| 2 Waarom aandacht voor variabiliteitsstudies                                                                                                         | 5  |
| 3 Het karakter van variabiliteit                                                                                                                     | 7  |
| 4 Toekomstperspectief                                                                                                                                | 8  |
| 5 Doel van het programma                                                                                                                             | 9  |
| 6 Geciteerde publikaties                                                                                                                             | 10 |
| 2. THE 'STATE OF THE ART' OF SPATIAL VARIATION STUDIES IN SOIL AND WATER                                                                             | 11 |
| P.A. Burrough                                                                                                                                        |    |
| Abstract                                                                                                                                             | 11 |
| 1 Methods using predominantly deterministic quantitative physical models based on landform, geomorphology and the physics of soil-water interactions | 14 |
| 1.1 Methods using digital elevation models of catchments                                                                                             | 14 |
| 1.2 Modelling surface runoff                                                                                                                         | 15 |
| 1.3 Groundwater flow models                                                                                                                          | 19 |
| 2 Statistical methods                                                                                                                                | 20 |
| 2.1 Methods using statistical methods for establishing correlations between easy to observe (cheap) aspects of landscape and soil/water variation    | 20 |
| 2.2 Methods using predominantly stochastic methods for mapping and modelling                                                                         | 20 |
| Acknowledgements                                                                                                                                     | 28 |
| References                                                                                                                                           | 28 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. VAN PUNT TOT VLAK;                                                                             | 39  |
| EEN FILOSOFIE OVER DE TRANSFORMATIE VAN VELDGEGEVENS NAAR<br>KAARTWEERGAVE                        |     |
| A.N.M. Obdam                                                                                      |     |
| 1 Inleiding en samenvatting                                                                       | 39  |
| 2 Continuïteit of discontinuïteit van veldparameters                                              | 40  |
| 3 Genese van verschillen in veldeigenschappen                                                     | 42  |
| 4 Enige bemonsteringsdoeleinden                                                                   | 45  |
| 5 Het karteringsdilemma                                                                           | 47  |
| 6 Voorstel tot een stapsgewijze bemonsteringsprocedure                                            | 48  |
| 7 Stellingen                                                                                      | 50  |
| Literatuur                                                                                        | 52  |
| 4. RUIMTELIJKE VARIABILITEIT IN BODEM EN WATER: VOORBEELDEN<br>VAN TOEPASSINGEN                   | 53  |
| J.W. Hopmans                                                                                      |     |
| 1 Inleiding                                                                                       | 53  |
| 2 Inventarisatie cases                                                                            | 54  |
| 2.1 Ruimtelijke variabiliteit in grondwaterverontreiniging                                        | 54  |
| 2.2 Ruimtelijke variabiliteit in bodemverontreiniging                                             | 55  |
| 2.3 Ruimtelijke variabiliteit in bodemkundige, bodemfysische<br>en geohydrologische eigenschappen | 56  |
| 2.4 Selectie meetpunten ten behoeve van variabiliteitson-<br>derzoek                              | 58  |
| 2.5 Voorspellende statistische technieken                                                         | 59  |
| 3 Discussie thema's                                                                               | 60  |
| 5. RESULTATEN VAN DE DISCUSSIE                                                                    | 63  |
| 6. INGEZONDEN ONDERZOEKONDERWERPEN                                                                | 71  |
| 7. LITERATUUR M.B.T. RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN (GEO)HYDRO-<br>LOGISCHE PARAMETERS             | 117 |
| 8. BIJLAGEN                                                                                       |     |
| - Programma studiebijeenkomst                                                                     | 137 |
| - Deelnemerslijst                                                                                 | 139 |

## VOORWOORD

De 6e CHO-studiebijeenkomst is gehouden op 22 oktober 1986 met als thema: "Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water".

De bijeenkomst is voorbereid door een voorbereidingsgroep bestaande uit de volgende leden:

Prof. Dr J. Bouma (LUW), Prof. Dr P.A. Burrough (RUU),  
Ir H.J. Colenbrander (CHO-TNO), Ing. J.C. Hooghart (CHO) (secretaris), Dr Ir J.W. Hopmans (LUW), Dr Ir J.W. de Kwaadsteniet (RIVM) en Ir A. Obdam (RGD).

Het doel van de bijeenkomst was om met een kleine groep personen die vanuit verschillende gezichtspunten bij het onderwerp ruimtelijke variabiliteit van bodem en water betrokken zijn, te discussiëren en van gedachten te wisselen over bestaande vraagpunten en recente onderzoekervaringen. Aan deze personen is tevens gevraagd om op één bladzijde aan te geven met welke onderwerpen op dit gebied zij bezig zijn. Deze bladzijden zijn gebundeld en opgenomen in dit verslag onder de kop "Ingezonden onderzoekonderwerpen".

De bijeenkomst is geopend met een viertal inleidingen, namelijk:

- Scope van de dag door J. Bouma.
- The "state of the art" of spatial variation studies in soil and water door P.A. Burrough.
- Van punt tot vlak; een filosofie over de transformatie van veldgegevens naar kaartweergave door A.N.M. Obdam.
- Ruimtelijke variabiliteit in bodem en water: voorbeelden van toepassingen door J.W. Hopmans.

Deze inleidingen zijn opgenomen in dit verslag, gevolgd door een samenvatting van de tijdens de bijeenkomst gevoerde discussies. Bovendien is toegevoegd een literatuurlijst met betrekking tot ruimtelijke variabiliteit van (geo)hydrologische parameters (d.d. juli - 1986). Aan het eind van het verslag is opgenomen het programma van de studiebijeenkomst en de lijst met deelnemers inclusief adressen.

Hoewel slechts een beperkt aantal genodigden aan de studiebijeenkomsten kan deelnemen worden de resultaten ervan door opname in de serie Rapporten en Nota's van de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO op brede schaal verspreid.

## AUTEURS

|               |                                                                                                               |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| J. Bouma      | Landbouw Universiteit Wageningen,<br>Vakgroep Bodemkunde en Geologie                                          |
| P.A. Burrough | Rijksuniversiteit Utrecht,<br>Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen,<br>Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek |
| J.W. Hopmans  | Landbouw Universiteit Wageningen,<br>Vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie                                  |
| A. Obdam      | Rijks Geologische Dienst                                                                                      |



## SCOPE VAN DE DAG

J. Bouma

### 1 INTRODUKTIE

De studie van de variabiliteit van bodem en water vormt geen nieuw onderwerp. Geologen, bodemkundigen en hydrologen hebben aan dit onderwerp, ieder op hun eigen manier, al vele jaren aandacht besteed bij het karteren en interpreteren van waargenomen verschijnselen in het veld. Met nadruk vermeld ik niet alleen de kartering - het vastleggen van ruimtelijke patronen - maar ook de interpretatie. Karteren is immers een middel, geen doel. Idealiter scheiden lijnen op kaarten eenheden van elkaar, die intern minder variëren dan onderling. Interpretaties van eigenschappen binnen bepaalde kaarteenheden zouden, idealiter, qua gedetailleerdheid moeten overeenstemmen met de optredende interne variabiliteit. Naarmate deze groter is, dient de detaillering van de interpretatie geringer te zijn. Waarom ontstaat er nu de laatste jaren meer aandacht voor het onderwerp variabiliteit in bodem en water, zowel in termen van tijd en plaats? Is dit een luxe modeverschijnsel of zijn er andere redenen? Enkele mogelijke redenen en daaruit te trekken consequenties zullen kort worden besproken. Daarna wordt het begrip variabiliteit zelf kort geanalyseerd en zal de dagindeling nader worden toegelicht.

### 2 WAAROM AANDACHT VOOR VARIABILITEITSSTUDIES

Vier elementen worden onderscheiden die betrekking hebben op de maat-

schappelijke vraagstelling, de toenemende hoeveelheid methoden en de inzetbaarheid daarvan via informaticatechnologie.

1. Actuele vragen op het gebied van het bodem- en waterbeheer in brede zin worden specifiek, ondermeer als gevolg van nieuwe milieuwetten. Globale, kwalitatieve beschrijvingen blijven geschikt voor het karakteriseren van relatief grote gebieden; ze zijn echter ontoereikend om specifieke vragen te beantwoorden die steeds vaker een juridisch karakter krijgen. Een ruimere toepassing van statistiek is een logisch gevolg van de hier gesignaleerde tendens, die vooral voor onderzoekers duidelijk is. Er ligt echter nog een grote taak bij het overtuigen van opdrachtgevers en andere geldschietters.
2. De vrij recente introductie van geostatistiek heeft intuïtief een gevoelige snaar geraakt bij bodemkundigen, geologen en hydrologen. Een methodiek waarbij de afhankelijkheid van waarnemingen als functie van onderlinge afstand centraal staat, sluit goed aan op "veldervaring". Dicht bij elkaar gelegen waarnemingspunten lijken immers vaak meer op elkaar dan verder van elkaar gelegen punten. Dat de technieken bovendien soms kunnen leiden tot een meer efficiënte bemonstering spreekt ook aan in deze tijd van krimpende budgetten. Het wordt steeds belangrijker zoveel mogelijk informatie te putten uit een beperkt aantal waarnemingen. Naast de geostatistiek zijn echter ook veel andere statistische technieken beschikbaar. Er bestaat een gevoel dat deze technieken te weinig bekend zijn binnen het studiegebied van bodem en water.
3. Moderne meet- en waarnemingsmethoden maken het mogelijk relatief veel gegevens te verzamelen in korte tijd. Dit geldt bijv. voor diverse remote-sensing technieken en voor geautomatiseerde meetapparatuur.
4. De snelle ontwikkeling van de informaticatechnologie brengt manipulatie van gegevens binnen bereik van alle onderzoekers, dankzij de steeds grotere beschikbaarheid van (personal) computers en een grote hoeveelheid software. Deze mogelijkheden bieden het perspectief dat grote hoeveelheden gegevens snel en op vele verschillende manieren kunnen worden verwerkt. Gezien de onder punt 1 genoemde maatschappelijke vraagstelling is dit, in principe, een goede zaak. De methodenkeuze vormt echter een ernstig probleem omdat de meeste onderzoekers primair vaktechnisch geschoold zijn en niet statistisch. Het "tove-

naarsleerling"effect dreigt op te treden. Wanneer door goede voorlichting dit gevaar kan worden bezworen, biedt de nieuwe technologie grote voordelen omdat inspelen op maatschappelijke vragen het meest effectief is wanneer het relatief snel en slagvaardig kan plaatsvinden.

Samenvattend wordt dus gesteld: (1) dat er een duidelijke maatschappelijke vraag bestaat naar kwantitatieve, statistische onderbouwde informatie over de variabiliteit van bodem en water; (2) dat er steeds meer nieuwe methoden beschikbaar komen voor het meten en waarnemen en voor de statistische verwerking en (3) dat deze methoden via moderne informatie-technologie snel en efficiënt kunnen worden toegepast.

### 3 HET KARAKTER VAN VARIABILITEIT

Het bestaan van variabiliteit binnen een bepaald gebied (de "ruimtelijke" variabiliteit) wordt afgeleid uit het feit dat identieke metingen of waarnemingen op verschillende punten (op hetzelfde tijdstip) verschillende resultaten geven. Variabiliteit in de tijd (de "temporele" variabiliteit) treedt op wanneer identieke metingen op hetzelfde punt verschillende resultaten geven wanneer ze worden verricht op verschillende tijdstippen. De vele aspecten die hierbij een rol spelen kunnen hier niet uitputtend worden behandeld. Wel twee constatering:

1. Bij variabiliteitsstudies ligt het accent vaak op het verwerken van meetgegevens en veel minder op de wijze waarop deze meetgegevens zijn verkregen. Zijn methoden wel geschikt voor een bepaalde bodemkundige/hydrologische toestand? Kunnen ze gedurende het hele jaar worden toegepast of alleen maar in bepaalde seizoenen?  
Operationele aspecten worden ook zelden in de beschouwing betrokken. Wanneer bijvoorbeeld ongeschoolde arbeiders gebruik moeten maken van complexe, moderne meetmethoden kan een stuk "pseudo" variabiliteit ontstaan, die geen enkele relatie heeft met het te karakteriseren abiotische object (zie o.a. Bouma, 1983).
2. Gegeven een verantwoorde toepassing van een bepaalde methode, blijft de vraag hoe betrouwbaar zij is. Sommige methoden leveren direct bruikbare meetwaarden met een relatief grote betrouwbaarheid. Andere

leveren waarden die via complexe berekeningen moeten worden omgezet in waarden die bruikbaar zijn voor bijvoorbeeld modeltoepassingen. Deze berekeningen zullen over het algemeen het effect hebben dat de betrouwbaarheid lager wordt. Methodenboeken concentreren zich op technische aspecten op het punt van apparatuur en theorie. Betrouwbaarheidsanalyses worden te weinig uitgevoerd.

#### 4 TOEKOMSTPERSPECTIEF

Er betaamt een zeker spanningsveld tussen onderzoekers die met traditionele karteringstechnieken werken en gebruikers van (geo)statistiek. Er is wederzijds kritiek op resp. de veronderstelde sterke subjectiviteit van de traditionele kartering en het mechanistische karakter van een kil-statistische benadering die soms voorbij lijkt te gaan aan genetische wetmatigheden. De voor deze bijeenkomst ingediende cases tonen echter aan dat reeds op ruime schaal sprake is van een zinvolle integratie van beide benaderingen. Daarbij wordt (geo)statistiek soms toegepast binnen aardwetenschappelijke eenheden of geo(hydro)logische afzettingen, die als subsystemen worden beschouwd. Anderzijds kunnen bodemkundige en geologische gegevens zinvol worden gebruikt bij het kiezen van methoden, het bepalen van representatieve elementaire volumes (REV's) van monsters en de lokatie van bemonsteringsplekken (zie o.a. Bouma, 1985). Voor karteringsactiviteiten in de toekomst zal dit ingrijpende gevolgen hebben bijvoorbeeld voor de wijze waarop legenda's van kaarten worden vastgesteld. In plaats van uit te gaan van een op grond van ervaring vastgestelde legenda, zoals nu veelal het geval is, zou deze kunnen worden afgeleid uit een globale analyse van ruimtelijke structuren in een gebied. Deze analyse zou, in principe, kunnen leiden tot het in kwantitatieve zin vaststellen van een legenda met eenheden die een bekende interne variabiliteit bezitten. Daarna zou de algemene kartering plaatsvinden, waarbij het aantal waarnemingen binnen de eerder genoemde subsystemen een functie kan zijn van de eerder vastgestelde ruimtelijke structuur. Bij grootschalige, gedetailleerde karteringen voor kleine gebieden zal een steeds sterkere nadruk komen te liggen op interpolatie van puntwaarnemingen omdat de mogelijkheden van een karteerder beperkt zijn bij het vaststellen van onderlinge verbanden tussen meetwaarnemingen: de land-

schappelijke variatie is meestal gering in een klein gebied. Dit probleem wordt groter naarmate de waar te nemen verschijnselen minder correlatie vertonen met patronen aan het aardoppervlak. Overigens staat ook het begrip legenda ter discussie omdat het afgrenzen van eenheden op kaarten de suggestie oproept van niet bestaande scherpe overgangen in het veld.

Bovenstaande, zeer globale discussie heeft alleen ten doel aan te duiden dat de tijdens deze bijeenkomst te bespreken materie drastische consequenties heeft voor toekomstig aardwetenschappelijk en hydrologisch onderzoek.

## 5 DOEL VAN HET PROGRAMMA

Samenvattend kan het doel van deze bijeenkomst als volgt worden geformuleerd:

- (1) Het uitwisselen van informatie die relevant is bij het vaststellen van de variabiliteit van bodem en water. Dit gebeurt in de vorm van enkele overzichtslezingen en cases met bijbehorende stellingen. De gepresenteerde cases tonen aan dat het zeer brede gebied van bodem en water maar voor een deel aan de orde kan komen.
- (2) Het formuleren van aanbevelingen voor toekomstig onderzoek, zowel in wetenschappelijke als in operationele zin. In een drietal discussiegroepen zal dit nader concreet worden uitgewerkt. Een analyse van de beschikbare cases heeft geresulteerd in een drietal thema's voor de discussiegroepen:
  - a. Aan welke facetten moet aandacht worden besteed bij de integratie van bestaande aardwetenschappelijke kennis en (geo)statistiek?
  - b. Welke statistische methoden worden onvoldoende toegepast in het aardwetenschappelijk onderzoek?
  - c. Hoe kan in het lopende onderzoek een beter evenwicht worden gerealiseerd tussen vraag, gegevens en modellering?

## 6 GECITEERDE PUBLIKATIES

- Bouma, J., 1983. Use of soil survey data to select measurement techniques for hydraulic conductivity. *Agric. Water Managem.* 6 (2/3): 177-190.
- Bouma, J., 1985. Soil variability and soil survey. In: D.R. Nielsen and J. Bouma (Eds.). *Soil Spatial Variability. Proc. of an ISSS-SSSA workshop.* Pudoc, Wageningen, the Netherlands. p. 130-150.

THE 'STATE OF THE ART' OF SPATIAL VARIATION STUDIES IN SOIL  
AND WATER

P.A. Burrough

**ABSTRACT**

Information about the spatial variation of soil and water is sought in many disciplines, from hydrology through soil science to spatial modelling and geostatistics. Previous qualitative field methods have given way to methods using deterministic, geomorphological studies using digital terrain models of catchments in order to quantitatively estimate surface runoff, erosion and other properties in two or more dimensions. Many successful deterministic groundwater models have been programmed for the computer. Statistical methods are used extensively to establish relations between easy to observe field properties and soil physical properties. Many methods are now available for interpolating from point observations to grids; methods of optimal interpolation have been widely developed and used for optimizing sampling besides mapping. Statisticians are beginning to take interest in the problems of extracting 'true' signals from 'dirty' arrays of pixel data. A central problem for interpretation arises from the fact that sampled data may reflect variation at several scales, caused by several interacting processes. Fractals seem attractive models for exploring the problem further, particularly when linked to geostatistical theory.

Knowledge about the spatial variation of soil and groundwater is important for its own sake as a scientific curiosity, but it is also essential for the proper use and management of soil and water resources. Understanding the spatial variation of surface groundwater is essential for managing water budgets in catchments (watersheds), while knowledge about deep groundwater is often needed for adequate supplies for irrigation or for drinking water. Information about the variation of soil is essential for proper soil use and management. For problems such as moisture supplies to crops, soil and groundwater pollution, drainage and irrigation, ecological studies and nature conservation, etc., it is essential to consider the joint variation of soil and the shallow groundwater and surface water together.

Because the true pattern of variation of soil and groundwater cannot be directly observed, it is necessary to obtain information about their spatial variation indirectly. One way by which this can be achieved is by surveying a property of the landscape that can be observed everywhere (such as landform, aerial photo appearance or reflected spectral signature) in the hope that its pattern of variation gives a sensible indication of the variation of the soil or water property desired. The alternative is to sample the desired property at known locations and by means of plausible physical or mathematical models to derive approximations of the true pattern of variation. The first approach relies on the availability of technology for making and processing large numbers of essentially simple, cheap but indirect observations. The second recognises that direct sampling is expensive and, for the case of soil, is also totally destructive! For certain soil moisture measurements, the presence of the measuring device can cause slight perturbations (Youngs 1983) with the result that the true situation can never be exactly known. In all cases, the aim is to obtain a best approximation to the real world situation for a minimum of effort (or cost).

The aim of this review is to consider the very wide range of methods that are available for describing and quantifying the spatial variation of soil and water at what may best be described as 'landscape' rather than microscopic scales, and in particular, to report on the 'state-of-the-art', at least as it is perceived by this author.

Modern developments in the understanding of the spatial variation of soil and water stem from:

- a) dissatisfaction with the limitations of purely qualitative, descriptive methods
- b) the stimulus of new methods for mathematical analysis and information processing
- c) the availability of more quantitative and better data
- d) the availability of powerful tools for computing and graphical display (mathematical models, computers, geographical information systems)

Over the last 15 years these factors have combined to allow progress to be made in all different manner of ways in which spatial variation is tackled.

The approaches to describing spatial variation range from fully deterministic three-dimensional physical models to methods in which the spatial variation is treated as a purely random mathematical function.

# **1 METHODS USING PREDOMINANTLY DETERMINISTIC, QUANTITATIVE PHYSICAL MODELS BASED ON LANDFORM, GEOMORPHOLOGY, AND THE PHYSICS OF SOIL-WATER INTERACTIONS**

## **1.1 Methods using digital elevation models of catchments**

The availability of cheap, powerful computers has enabled great strides to be made in the ways in which large parts of whole landscapes can be quantitatively modelled. These new numerical techniques for modelling physical reality are displacing previous choropleth map models and simple empirical methods.

Common to all these techniques is the way in which all spatial data are related to a regular grid (or sometimes basic physiographic units such as sub-catchments), which forms the basis for determining such features as:

- a) catchment boundaries (Marks et al 1984)
- b) ridges and stream lines (Peucker and Douglas 1975, Mark 1984)
- c) erosion susceptibility or estimated land suitability by map overlay (Burrough 1986)
- d) areas suitable for irrigation (Burrough 1987), or
- e) modelling runoff and infiltration as a consequence of drainage direction, surface slope, horizontal and vertical curvature, the size and average slope above each grid element, and the distance from the water divide and distance from the drainage channel (Bork and Rohdenburg 1986 - modified SHE model; Beasley and Huggins 1981 - ANSWERS model)

The results of interpolations from point observations, simulation models, remotely sensed data and other spatial information can be integrated by using an interactive Geographical Information System (c.f. Loucks 1985).

Current digital techniques allow digital elevation models to be computed directly from aerial photo or even LANDSAT Thematic Mapper data (MacDonald Dettwiler 1986), and the landforms to be displayed as shaded relief maps (Korn 1981) and in perspective view together with relevant thematic information (Burrough 1986). These methods allow realistic three-dimensional views of landform to be produced for display and analysis. Three-dimensional views of the subsoil and water conducting layers do not yet seem to have been studied seriously - unlike the oil industry where three-dimensional analysis of seismic reflection data about sub-surface potential oil-bearing strata is well developed, there seems to be no simple way in which the large amounts of data necessary can be obtained for soil and groundwater.

## **1.2 Modelling surface runoff**

Quimpo (1984) has reviewed some recent approaches to spatial heterogeneity and models of surface runoff. He follows the development of concepts from that of the unit hydrograph to that of the instantaneous unit hydrograph (IUH). He notes that while a complete watershed (catchment) system is highly non-linear, the surface runoff system is only slightly non-linear which accounts for the relatively good techniques that have been obtained using linear unit hydrograph techniques. In common with other spatial studies, Quimpo observes that the most radical assumption in rainfall-runoff modelling has been that of spatial lumping, which is often invoked whenever a distributed formulation becomes unwieldy

or computationally impractical. Unit hydrograph theory assumes a uniform areal distribution of rainfall excess over a catchment. Intuitively, the smaller the catchment, the more likely that the distribution of rainfall can be treated as uniform, so unit hydrograph theory is best limited to small catchments. Unfortunately it appears that non-linear effects decrease as basin size increases (Wang et al 1981) and so the hydrologist is faced with a dilemma. The alternatives seem to be either to use non-linear methods or to attempt to tackle the problem of spatial heterogeneity directly.

The techniques for dealing with spatial variability in surface runoff models include:

- a) distributed models - subdividing the catchment into smaller elements
- b) using surrogate measures such as basin geomorphology
- c) using theoretical or physical models that incorporate information about spatial variation

Among a) Quimpo cites the MIT catchment model (Bravo et al 1970), which uses a distributed kinematic wave approach, the Système Hydrologique Européen (SHE - c.f. Abbot et al. 1981, Beven 1985 modified by Bork and Rohdenburg 1986), the partial area concept of Engman and Rogowski (1974) which has been extended under a stochastic framework by Freeze (1980). Moore and Clarke (1981) represent a basin as being composed of a distribution of storage elements each having capacity  $s$  with a probability density  $f(s)$ .

Runoff from each element occurs under some specified mechanism, such as when the content of each element exceeds its storage capacity. Their approach is an improvement because it allows a distribution of storages instead of just one lumped storage element. The distribution of storages can also take advantage of spatial information on soil and slope properties.

In recent years interdisciplinary cooperation has resulted in the development of combined ecological models using space-time dynamics of physical and chemical processes in a particular catchment. Examples are the Système Hydrologique Européen (SHE - c.f. Abbot et al. 1981, Beven 1985) or the USDA Agricultural Research Service Small Watershed Model (Alonso and De Coursey 1983). The relations between catchment (geo-)morphology and the dynamics of runoff contributing areas have been modelled deterministically using simple assumptions about landform by Beven and Kirkby (1979), Hornberger et al (1985) and Bork and Rohdenburg (1986). Beven and Wood (1983) examined the dynamic nature of runoff-contributing areas and their relationship to the geomorphological structure of catchments and showed that both runoff and flood-frequency predictions may be very sensitive to assumptions about the nature of the contributing area. They proposed an extension of the Beven-Kirkby model to predict variable contributing areas. This model has been adapted for continuous simulation and applied to a small forested catchment in Shenandoah National Park, Virginia (Hornberger et al. 1985).

Many of these deterministic models provide satisfactory results when used for simple one-dimensional studies at point locations, or along specific transects. Application to whole catchments, or to large areas of landscape, faces great problems because for every grid element used to subdivide the area of interest one needs to know:

- a) the initial conditions
- b) the boundary conditions
- c) the model parameters

Collection of sufficient data and the subsequent processing thereof is extremely costly and time consuming. One way currently being explored the use of deterministic models of

soil layers in order to model vertical and lateral soil moisture flow, evaporation, transpiration interception, heat flux in the soil, and other soil physical properties as ways in which basic data can be most usefully extrapolated (Rohdenburg et al 1986).

At catchment scale, the spatial variation of precipitation affects the spatial variation of surfacewater (short-term) and of soil and vegetation (long term). Less attention seems to have been paid to a quantitative study of this problem than to other aspects of soil/water variation. Witter (1984) is a recent study in the Netherlands. Papers by Corradini (1985), Corradini and Singh (1985) have examined the problem for large catchments in which orographic effects are important. Their model is useful for estimating mean areal rainfall, as well as for designing raingauge networks over basins where orographic rainfall is of importance. They suggest, however, that a geomorphological analysis of stream patterns using the Horton-Strahler ordering scheme of idealized drainage networks to estimate direct runoff from large basins is less sensitive to the spatial variation of precipitation input than they had expected.

Hamlin (1983) points out that it is only recently that there has been detailed work on the effect of rainfall distribution for determining catchment response and mentions the work of Rodriguez-Iturbe as being of particular importance (c.f. Rodriguez-Iturbe and Mejia 1974, Bras and Rodriguez-Iturbe 1976). He notes that there are two important aspects to be considered:

- a) the extent to which point measurements adequately reflect the areal distribution, and
- b) the extent to which errors in the assessment of true catchment rainfall affect the outcome of decisions based on hydrological studies either

for analysis of basin processes or for engineering applications.

In a review of three practical studies, Hamlin showed that the simulated estimated responses of modelled run hydrographs could vary from -30 to +100 volume percent as a result of inadequate sampling of the input precipitation in small catchments. The variations he mentions are only a result of inadequate sampling of a known input which led to errors in the output of the model - it was assumed that the hydrological processes were perfectly known. Although these results confirm the work of others, existing evidence seems to indicate that for large catchments ( $>40,000 \text{ km}^2$ ) average data such as monthly mean catchment rainfall may be a perfectly adequate input for the modelling of the catchment output without needing detailed understanding of individual processes within the basin. This is because within large catchments, many processes interact to give a general averaging.

### 1.3 Groundwater flow models

Since 1978, the International Groundwater Modeling Center (IGWMC) at Indianapolis, which now has a branch at Delft (Jousma and van der Keyde 1985), has been documenting developments in groundwater modelling. The IGWMC now has a database of more than 550 software codes. They report that numerical modelling is now a normal research activity in groundwater research. Flow models are almost exclusively deterministic, whether or not they attempt to handle problems in two- or three dimensions. Solute transport models are more complex; they require more complex data inputs than flow models and their predictive capabilities are less good.

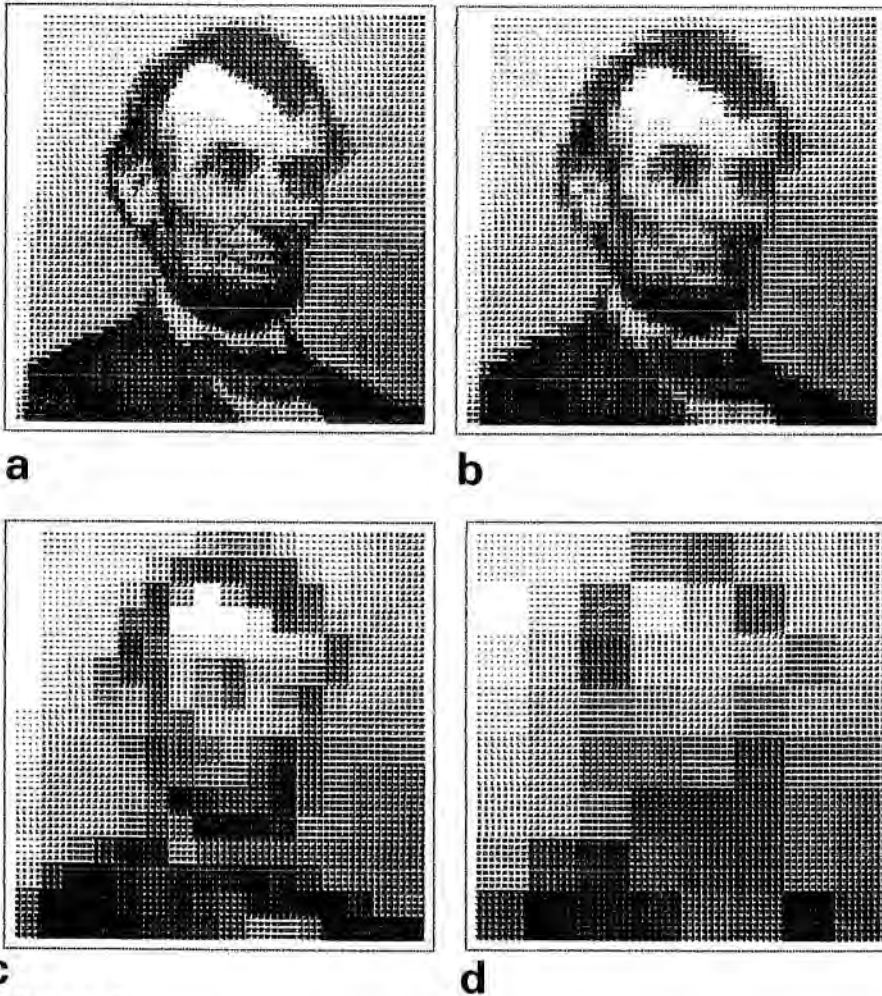
## **2. STATISTICAL METHODS**

### **2.1 Methods using statistical methods for establishing correlations between easy to observe (cheap) aspects of landscape and soil/water variation.**

The use of uni- and multivariate statistical methods to suggest relationships between various sets of variables is still much used; e.g. Cosby et al 1984, though is more commonly used in ecological studies than in pure hydrological work (e.g. Jongmans et al 1987 or Burrough et al 1977, who related the variation of vegetation and soil over 20km-long transects in N.S.W. Australia to trends in precipitation). The same approach is also basically behind the use of remotely-sensed imagery for mapping variations in soil moisture and soil. An ever-present problem with all correlation studies is how a statistically determined (significant) correlation should be interpreted in terms of a direct causal connection. Tsykin (1985) presents a discussion of multiple nonlinear statistical models for runoff simulation and prediction.

### **2.2 Methods using predominantly stochastic methods for mapping and modelling.**

The distinction made earlier between methods using large numbers of cheap, surrogate data (typically pixel-based remotely sensed data) and those based on direct point sampling is crucial. With pixel-based systems, the starting point for a reconstruction of a "true" spatial description of soil moisture is an array of grid cells, each carrying a number representing the intensity levels of one or more bands of reflected radiation. The intensity levels recorded per cell are not only weighted averages of all reflections returned from the ground area represented by the cell surface



**Figure 1**

The loss of detail and overall form as a result of increasing pixel size is clearly shown.

- a) Original image - 64 x 64 pixels
  - b) 32 x 32 pixels where each is a weighted average of 4 from the original scene
  - c) 16 x 16 pixels where each is a weighted average of 16 from the original scene
  - d) 8 x 8 pixels where each is a weighted average of 64 from the original scene
- 16 grey scales used throughout.

itself; up to 50% of recorded reflections may be received from surrounding cells. So the data recorded for any single pixel on the image are a function of cell size (Figure 1a,b,c) and a noise component resulting from the contributions from surrounding pixels, plus of course, variations resulting from atmospheric interference and the like. The first attempts to classify remotely-sensed images from satellites used point-for-point classification algorithms, often relying on simple regression and ignoring information from surrounding pixels. On the other hand, many approaches used by engineers relied on simple, deterministic filters based on smoothing windows of  $3 \times 3$  or  $2 \times 2$  pixels to remove short-range noise or to detect edges (c.f. Rosenberg and Kak 1976). Statisticians have just started to take an interest in the problems of reconstructing patterns from these "dirty pictures", either using global methods (Geman and Geman 1984) or local methods (Besag 1987). Ripley (1986) provides a good introduction to their work.

As noted, many properties of the soil-water complex need to be measured directly. The problem is then one of sampling at point locations from which data set, one attempts to reconstruct the "true" pattern of variation by interpolation (Figure 2a,b,c). The critical aspects are:

- a) the spatial scale of the pattern to be resolved
- b) the sampling density, and
- c) the method of interpolation used

Many methods for interpolating from point data to areas are now commonly available. They include Thiessen polygons, global and local regression surfaces, exact and smoothing splines, inverse distance estimators and optimal interpolation techniques (kriging). Reviews and examples of applications in soil science, ecology, geology and hydrology are given by Agtarberg 1982, Burrough 1986, David 1977, Davis

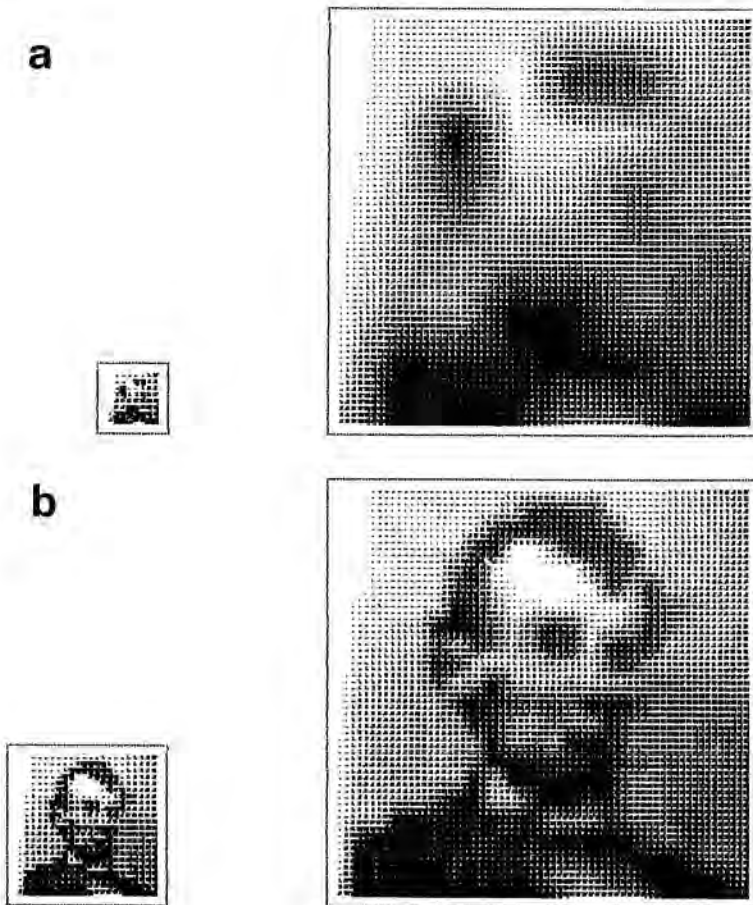


Figure 2. The loss of detail as a result of subsampling an original image followed by interpolation to recreate an image at the same scale.  
Original image as Figure 1a.

- a) Regular sampling on  $16 \times 16$  grid.
- b) Regular sampling on  $8 \times 8$  grid.

1986, Dubrule 1983, 1984, Goodchild and Lam 1980, Green and Sibson 1978, Journel and Huijbregts 1978, Lam 1983, and Ripley 1981. Watson and Philip (1985) present a refinement of inverse distance weighted interpolation that compensates for variable data density, interpolates above and below the range of measurements and mitigates the inherent isotropy of the method.

Geostatistical methods, based on an understanding of spatial autocorrelation, have received much interest in recent years. The methods have two main roles:

- 1) estimation of spatial structure before mapping takes place so that sampling can be adjusted to the dimensions of the spatial patterns being mapped.
- 2) optimal interpolation from point data to map the continuous variation of a property over an area.

#### **2.2.1 Estimating spatial structure before mapping.**

It is axiomatic that if a signal or pattern is undersampled then that signal or pattern may be misread or misinterpreted. Conventional soil survey practice has been to relate sampling density to topographical map scale and the size of external landscape features (c.f. Vink 1963) but this is no guarantee that any particular pattern will be properly sampled. This is especially so when investigations are being planned into the distribution of soil and water properties that either:

- a) have little or no direct correspondence with surface features
- b) where the pattern of variation is obscured by dense vegetation or
- c) where the variation occurs over distances much smaller than those normally used for conventional mapping

In all cases, it is sensible to estimate the spatial dimensions of these patterns in order to estimate optimal sampling densities. The simple technique of nested sampling coupled with a oneway, hierarchical nested analysis of variance analysis relating cumulative variance to sample spacing has been found to be a useful reconnaissance technique that is quick and easy to use (Webster 1977). Moreover, it links neatly with regionalized variable theory (Miesch 1975). The technique has been applied to studies of soil variation on experimental fields (Burrough and Kool 1981), regional soil variation (Nortcliff 1976), acid sulphate soils (Burrough, van Mensfoort and Bos in press) and forest soils (Oliver and Webster 1986). These last authors have extended the technique in ways that make it still more economical to use.

#### **2.2.2 Point, block, universal kriging, intrinsic random functions**

Webster and his co-workers have done much to introduce Matheron's methods of optimal interpolation to soil scientists and to develop them further with respect to block kriging (local weighted average estimates) and for the design of optimal sampling strategies (Burgess and Webster 1980a,b, Burgess et al 1981, McBratney and Webster 1981a, 1983, McBratney et al 1981, Webster 1984, 1985, Webster and Burgess 1980, Webster and Burgess 1984). Much work has also been done by the soil physics community to introduce and stimulate similar work (e.g. Delhomme 1978,1979, Nielsen and Bouma 1985, Russo 1984a,b, Shumway 1985, Vieira et al 1981, Vauclin et al 1983). Current concerns in optimal interpolation focus on:

- a) the methods used to estimate the semivariogram ( Cressie and Hawkins 1980)
- b) the choice and fitting of 'noiseless' semivariogram models (Christakos 1984, Cressie 1985, Dunn 1983)
- c) on using techniques such as Akaike's information criterion to decide between models (Turkman 1985)

- d) the degree of 'error' in the experimentally observed semivariogram and the fitted model (Lebel and Bastin 1985, Shumway 1985, Taylor and Burrough 1986)

The computing load posed by kriging was also a cause for concern but is now becoming less so thanks to improved processing power. Most attention focusses on the use of the semivariogram to model the spatial covariation with few authors making use of Matheron's extended ideas on general intrinsic random functions (Matheron 1973).

Shumway (1985) sees interpolation as a problem of extracting signal from background noise and suggests Kalman filtering (see also Van Geer 1986, in prep.), spectral analysis of variance (c.f. McBratney and Webster 1981, Ripley 1981, Burrough et al 1985) and lagged regression as possible alternatives for the two- or one-dimensional case (see Bram et al 1987 for a case of the use of lagged regression of tree-ring data for dating moisture-triggerred mass-movement). A real problem with signal extraction techniques is that often they require data sampled at regular intervals.

So far, there has been much concern with models and modelling, and with the phenomenon of spatial variation, but there is often less attention for the problem of how measurement errors and differences caused by natural variations affect the reliability of the results of spatial modelling. Sensitivity analyses that indicate the critical parameters of a model and the range of possible outcomes are essential for sensible practical application but may cost large amounts of computer time (Rogers et al 1985). Alternatively, sensitivity analyses can be used to identify which parameters are most critical for determining spatial variation, and at which scales they should be measured, and thereby reduce data collection costs. Studies of the levels of measurement errors are not often published; recent results

from ISRIC (Pleijsier 1985, 1986) suggest that we need to pay as much attention to the variation in the actual measurements as to the sophisticated models used to separate 'signal' from 'noise'.

Combined stochastic-deterministic analysis of unsaturated and saturated groundwater flow using partial differential equations represent the most mathematically complex (and complete?) approaches to the problems of spatial variation under isotropic or anisotropic conditions (Yeh et al 1985 a,b,c; Serrano et al 1985 a,b,c). The authors claim that their methods 'provide a rigorous bridge between the abstract-theoretical analysis of stochastic partial differential equations and computer-oriented numerical techniques'.

A central problem of in all spatial variation is how different scales and weights of variation combine to produce the results seen by the sampling network - how much is signal? how much is noise? How many signals are superimposed? It is not yet clear how this affects the success of modelling or interpolation methods. At present, multiple, nested semivariograms are used in Kriging (McBratney et al 1982) but there seems to be a lack of feedback between the multiscale forms observed in semivariograms and the spatial scales of the physical processes that may have given rise to the patterns sampled. Mandelbrot's fractal ideas (Mandelbrot 1982) are beginning to be examined critically (see Burrough 1981, 1983a,b, 1985, Mark and Aronson 1984 ), not only in soil and hydrology, but also in the sub-microscopic world of micromorphology (Serra 1982). A fusion between these ideas and geostatistics would seem to be a logical way towards furthering understanding of the complex, multiscale real-world spatial variation of soil and water.

## ACKNOWLEDGEMENTS.

Thanks are due to L. Barendregt, U. Witter and R. Webster for assistance in providing material for this review.

## REFERENCES

- ABBOT, M.B., KASTBERG ANDERSEN, J., HAVND, K., HOEGH JENSEN, K., KROSZYNSKI, U.L. and WARREN, I.R., 1981. Research and development for the unsaturated zone component of the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen (SHE). Eng. Applications of Computational Hydrology 1, 40-70.
- AGTERBERG, F.D. 1982. Recent developments in GeoMathematics. Geo-Processing 2, 1-32.
- ALONSO, C.V. and DE COURSEY, D.G., 1983. Small watershed model. U.S.D.A. Agricultural Research Service, Washington, D.C.
- BEASLEY, D.B. and HUGGINS, L.F. 1981. ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation), Users Manual. Purdue University, Indiana, USA.
- BESAG, J. 1987. On the statistical analysis of dirty pictures. J. Royal Statistical Soc. Section B. (in press).
- BEVEN, K., 1985. Distributed models, in: Anderson, M.G. and Burt, T.P. (Eds). Hydrological Forecasting 405-435, Wiley, Chichester.
- BEVEN, K. and WOOD, E.F., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull. 24, 43-69.
- BEVEN, K. and WOOD, E.F., 1983. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. J. Hydrology 65, 139-158.

- BORK, H-R. and ROHDENBURG, H. 1986. Transferable parametrization methods for distributed hydrological and agroecological catchment models. *Catena* 13, 99-117.
- BRAM, R.R., WEISS, E.E.J. and BURROUGH, P.A., 1987. Spatial and temporal analysis of mass movements using dendrochronology. Submitted to *CATENA*.
- BRAS, R.L. and RODRIGUEZ-ITURBE, I., 1976. Rainfall generation: a non-stationary time-varying multidimensional model. *Water Resources Research* 12, 450-456.
- BRAVO, C., HARLEY, B.M., PERKIN, F.E. and EAGLESON, P.S. 1970. A linear distributed model of catchment runoff. Mass. Inst. Technology (M.I.T.), Cambridge, Massachusetts, Hydrodyn. Lab. Rep. No. 123.
- BURGESS, T.M. and WEBSTER, R. 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping I. The semivariogram and punctual kriging. *J. Soil Science* 31: 315-332.
- BURGESS, T.M. and WEBSTER, R. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping II. Block kriging. *J. Soil Science* 31: 333-342.
- BURGESS, T.M., WEBSTER, R. and McBRATNEY, A.B., 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategies. *J. Soil Science* 32:643-659.
- BURROUGH, P.A. 1981 The fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *NATURE*, London, 294: 240-242.
- BURROUGH, P.A.. 1983a,b. Multi-scale sources of spatial variation in soil. I. The application of Fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Science* 34:577-597. II. A non-Brownian Fractal model and its application to soil survey. *J. Soil Science* 34: 599-620.
- BURROUGH, P.A. 1984. The application of Fractal ideas to geophysical phenomena. *Bull. Inst. Mathematics and its Applications*. 20: 36-42.
- BURROUGH, P.A. 1985. Fakes, facsimiles and fractals. *Science and Uncertainty*, ed. S. Nash. Science Reviews Ltd/IBM, Northwood, England. pp 151-170.

- BURROUGH, P.A. 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press.
- BURROUGH, P.A. 1987 Mapping and map analysis: new tools for land evaluation. Soil use and management 1987, Vol 3: - in press.
- BURROUGH, P.A., L. BROWN and E.C. MORRIS. 1977. Variations in vegetation and soil pattern across the Hawkesbury Sandstone Plateau from Barren Grounds to Fitzroy Falls, N.S.W. Australian J. Ecology 2,137-159.
- BURROUGH, P.A. and KOOL, J.B., 1981. A comparison of statistical techniques for estimating the spatial variability of trial fields. Proc. Int. Soil Soc. Working Group on Soil Information Systems, I.N.A., Paris, Dep. des Sols No. 4, 29-38.
- BURROUGH, P.A., A.BREGT, , M.J. DE HEUS, and E.G. KLOOSTERMAN, 1985 Complementary use of thermal imagery and spectral analysis of soil properties and wheat yields to reveal cyclic patterns in the Flevopolders. J. Soil Science 36,141-152.
- BURROUGH, P.A., VAN MENSFOORT, M.E.F. and BOS, J. (in press) Spatial analysis as a reconnaissance survey technique: an example from acid sulphate soil regions of the Mekong Delta, Viet Nam. in H. Dost (ed.) Proc. 3rd. Int. Symp. on Acid Sulphate Soils, Dakar, Senegal, Jan. 1986. ILRI, Wageningen.
- CHRISTAKOS, G., 1984. On the problem of permissible covariance and variogram models. Water Resources Research. 20, 251-265.
- CORRADINI, C., 1985. Analysis of the effects of orography on surface rainfall by a parametrized numerical model. J. Hydrology 77, 19-30.
- CORRADINI, C. and SINGH, U.P., 1985. Effect of spatial variability on effective rainfall on direct runoff by a geomorphological approach. J. Hydrology 81, 27-43.

- COSBY, B.J., HORNBERGER, G.M., CLAPP, R.B. and GINN, T.R., 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20, 682-690.
- CRESSIE, N., 1985. Variogram estimation by weighted least squares. *Math. Geology* 17, 563-586.
- CRESSIE, N. and HAWKINS, D.M. 1980. Robust estimation of the variogram. *Math. Geology* 12, 115-125.
- DAVID, M. 1977. Geostatistical ore reserve estimation. *Developments in Geomathematics* 2. Elsevier.
- DAVIS, J.C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. Wiley (2nd Edn).
- DELHOMME, J.P. 1978. Kriging in the hydrosiences. *Adv. Water Resources*, 1, 251-266.
- DELHOMME, J.P. 1979. Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: a geostatistical approach. *Water Resources Research* 15, 269-280.
- DUBRULE, O. 1983. Two methods with different objectives: Splines and Kriging. *Math. Geology* 15, 245-255.
- DUBRULE, O. 1984. Comparing splines and kriging. *Computers and Geosciences* 10, 327-338.
- DUNN, M.R., 1983. A simple sufficient condition for a variogram model to yield positive definite variances under restrictions. *Mathematical Geology* 15, 553-564.
- ENGMAN, E.T. and ROGOWSKI, A.S., 1974. A partial area model for streamflow synthesis. *Water Resources Research* 10, 464-471.
- FREEZE, R.A., 1980. A stochastic-conceptual analysis of rainfall runoff process on a hillslope. *Water Resources Research* 16, 391-408.
- GEER, F. van, 1986. Grondwaterstandsmetingen. In P. v.d. Kloet and J.C. Hooghart (Eds). *Metten, Meetnetten en optimale meetnetontwerpen ten dienste van het waterbeheer*. 169-186. Rapport No. 14. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek INO, The Hague.

- GEER, F. van, (in prep.) Applications of Kalman Filtering to the Design and Optimisation of Groundwater Monitoring Networks. Ph.D Thesis, Technical University, Delft, The Netherlands.
- GEMAN, S. and GEMAN, D. 1984. Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images. IEEE Trans., PAMI-6, 721-741.
- GOODCHILD, M.F. and LAM, N.S., 1980. Areal interpolation: a variant of the traditional spatial problem. Geoprocessing 1, 297-312.
- GREEN, P.J. and SIBSON, R. 1978. Computing Dirichlet tessellations in the plane. Computing Journal 21, 168-173.
- JOURNEL, A.J. and HUIJBREGIS, Ch. J. 1978. Mining Geostatistics. Academic Press.
- HAMLIN, M.J., 1983. The significance of rainfall in the study of hydrological processes at basin scale. J. Hydrology, 65, 73-94.
- HORNBERGER, G.M., BEVEN, K.J., COSBY, B.J. and SAPPINGTON, D.E. 1985. Shenandoah Watershed Study: Calibration of a topologically-based, variable contributing area Hydrological model to a small forested catchment. Water Resources Research 21, 1841-1850.
- HORN, B.K.P., 1981. Hill shading and the reflectance map. Proc. of the IEEE. 69 (1), 14-47.
- JONGMAN, R., VAN TONGEREN, O. and TER BRAAK, C.J., (eds). 1987 Numerical methods for Ecologists. PUDOC, Wageningen.
- JOUSMA, G. and HEYDE, P. van der., 1985. A review of Numerical Modelling of Groundwater Flow and Pollution. International Groundwater Modeling Center, Delft/Indianapolis.
- LAM, N. S., 1983. Spatial interpolation methods: a review. The American Cartographer 10, 129-149.
- LEBEL, I. and BASTIN, G., 1985. Variogram identification by the mean-squared interpolation error method with application to hydrologic fields. J. Hydrology 77, 31-56.

- LOUCKS, D.P., 1985. Interactive data management for resource planning and analysis. *Water Resources Research* 21, 131-142.
- McBRATNEY, A.B. and WEBSTER, R. 1981a. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables. II. Program and examples. *Comp. Geosci.* 7, 335-365.
- McBRATNEY, A.B. and WEBSTER, R. 1981b Detection of ridge and furrow pattern by spectral analysis of crop yield. *International Statistical Review* 49, 45-52.
- McBRATNEY, A.B., WEBSTER, R. and BURGESS, T.M. 1981. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables, I. Theory and method. *Comp. Geosci.* 7, 331-334.
- McBRATNEY, A.B., WEBSTER, R., McLAREN, R.G. and SPIERS, R.B., 1982. Regional variation of extractable copper and cobalt in the topsoil of south-east Scotland. *Agronomie* 2, 969-982.
- MACDONALD DETTWILER 1986. *Frontiers in digital imaging*. MacDonald Dettwiler and Associates Ltd., Richmond, B.C. Canada.
- MANDELBROT, B.B., 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York.
- MARK, D.M., 1984. Automated detection of drainage networks. *Cartographica* 21, 168-278.
- MARK, D.M. and ARONSON, P.B., 1984. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation with application in geomorphology and computer mapping. *Mathematical Geology*, 16, 671-83.
- MARKS, D., DOZIER, J. and FREW, J., 1984. Automated basin delineation from digital elevation data. *Geoprocessing* 2, 299-311.
- MATHERON, G. 1973. The intrinsic random functions and their applications. *Adv. Appl. Prob.* 5, 439-468.
- MIESCH, A.T., 1975. Variograms and variance components in geochemistry and ore evaluation. *Geol. Soc. Am. Mem.* 142, 332-340.

- MOORE, R.J. and CLARKE, R.T., 1981. A distribution approach to rainfall-runoff modelling. *Water Resources Research*, 17, 1367-1382.
- NIELSEN, D.R. and BOUMA, J., 1985. Spatial analysis of soil data, PUDDC, Wageningen.
- NORTCLIFF, S., 1978. Soil variability and reconnaissance mapping. a statistical study in Norfolk. *J. Soil Sci.* 29, 403-418.
- OLIVER, M.A. and WEBSTER, R., 1986. Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables. *Geographical Analysis* 18, 227-242.
- PEUKER, T.K. and DOUGLAS, D.H., 1975. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer Graphics and Image Processing* 4, 375-387.
- PLEIJSIER, L.K., 1985. The laboratory methods and data exchange programme. Interim report on the exchange round 85-1. Int. Soil Reference and Information Centre, Wageningen. Idem 1986.
- QUIMPO, R.G., 1984. Spatial heterogeneity and models of surface runoff. *J. Hydrology*, 68, 19-28.
- RIPLEY, B. 1981. *Spatial Statistics*, Wiley, New York.
- RIPLEY, B. 1986. Statistics, Images and Pattern Recognition. *Canadian J. Statistics* 14(2), 83-111.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I and MEJIA, J.M., 1974. The design of rainfall networks in time and space. *Water Resources Research* 10, 713-728.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I. and VALDES, J.B. 1979. The geomorphic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*. 15, 1409-1420.
- ROGERS, C.C.M., BEVEN, K.J., MORRIS, E.M. and ANDERSON, M.G., 1985. Sensitivity Analysis, calibration and predictive uncertainty of the Institute of Hydrology Distributed Model. *J. Hydrology* 81, 179-191.
- ROHDENBURG, H., DIEKKRUGER and BORK, H.-R., 1986. Deterministic site and catchment models for the analysis of agroecosystems. *Catena* 13, 119-137.

- ROSENFELD, A. and KAK, A. 1976. Digital Picture Processing. Academic Press, New York.
- RUSSO, D. 1984a. Design of an optimal sampling network for estimating the variogram. Soil Sci. Soc. Am. 48, 708-716.
- RUSSO, D. 1984b. A geostatistical approach to solute transport in Heterogeneous fields and its application to salinity management. Water Resources Research. 20,1260-1270.
- SERRA, J., 1982. Image Analysis and Mathematical Morphology. Academic Press, London.
- SERRANO, S.E., UNNY, T.E. and LENNOX, W.C. 1985a. Analysis of Stochastic Groundwater problems. Part I: Deterministic partial differential equations in groundwater flow. A functional-analytic approach. J. Hydrology 82, 247-263.
- SERRANO, S.E., UNNY, T.E. and LENNOX, W.C. 1985b. Analysis of Stochastic Groundwater problems. Part II: Stochastic partial differential equations in groundwater flow. A functional-analytic approach. J. Hydrology 82, 265-284.
- SERRANO, S.E., UNNY, T.E. and LENNOX, W.C. 1985c. Analysis of Stochastic Groundwater problems. Part III: Approximate solution of stochastic partial differential equations. J. Hydrology 82, 285-306.
- SHUMWAY, R.H., 1985. Time series in the soil sciences: is there life after Kriging? in, Nielsen and Bouma (eds), Soil Spatial Variability. PUDOC, Wageningen. pp35-60.
- TAYLOR, C.C. and BURROUGH, P.A., 1986. Multiscale sources of spatial variation in soil III. Improved methods for fitting the nested model to one-dimensional semivariograms. J. Mathematical Geology 18, 811-821.
- TSYKIN, E.N., 1985. Multiple nonlinear statistical models for runoff simulation and prediction. J. Hydrology, 77, 209-226.
- TURKMAN, K., 1985. The choice of extremal models by Akaike's Information Criterion. J. Hydrology 82, 307-315.
- VAUCLIN, M., VIEIRA, S.R., VACHAUD, G and NIELSEN, D.R. 1983. The use of cokriging with limited field soil observations. Soil Sci. Soc. Am. J. 47, 175-184.

- VIEIRA, S.R., NIELSEN, D.R. and BIGGAR, J.W. 1981. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1040-1048.
- VINK, A.P.A., 1963. Planning of soil surveys in land development. *Pub. Int. Inst. Land Reclam. Improvement No.10*, Wageningen.
- WANG, C.G., GUPTA, V.K and WAYMIRE, E.C., 1981. A geomorphologic synthesis of nonlinearity in surface runoff. *Water Resources Research* 17, 545-554.
- WATSON, D.F. and PHILIP, G.M., 1985. A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-Processing* 2, 315-327.
- WEBSTER, R. 1977. Quantitative and numerical methods in soil classification and survey. Oxford.
- WEBSTER, R. 1984. Elucidation and characterization of spatial variation in soil using regionalized variable theory. in, G. Verly et al (eds.) *Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part 2*, 903-913, Reidel.
- WEBSTER, R. 1985. Quantitative Spatial Analysis of Soil in the field. *Advances in Soil Science Volume 3*, Springer-Verlag New York, 1-70.
- WEBSTER, R. and BURGESS, T.M. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping III. Changing drift and universal kriging. *J. Soil Science* 31, 505-524.
- WEBSTER, R. and BURGESS, T.M. 1984. Sampling and bulking strategies for estimating soil properties of small regions. *J. Soil Sci.* 35, 127-140.
- WITTER, J.U., 1984. Heterogeneity of Dutch Rainfall. Ph.D. thesis, Agricultural University, Wageningen.
- YEH, T-C, J., GELHAR, L.W. and GUTJAR, A.L., 1985a. Stochastic analysis of unsaturated flow in Heterogeneous soils, 1. Statistically Isotropic Media. *Water Resources Research.* 21, 447-456.

- YEH, T-C, J., GELHAR, L.W. and GUTJAR, A.L., 1985b.  
Stochastic analysis of unsaturated flow in Heterogeneous  
soils, 2. Statistically Anisotropic Media with variable  
 $\alpha$ . Water Resources Research, 21, 457-464.
- YEH, T-C, J., GELHAR, L.W. and GUTJAR, A.L., 1985c.  
Stochastic analysis of unsaturated flow in Heterogeneous  
soils, 3. Observations and applications. Water  
Resources Research 21, 465-471.
- YOUNGS, E.G., 1983. Soil Physical Theory and Heterogeneity.  
Agricultural Water Management 6, 145-160.



VAN PUNT TOT VLAK;  
EEN FILOSOFIE OVER DE TRANSFORMATIE VAN VELDGEGEVENS NAAR  
KAARTWEERGAVE

A.N.M. Obdam

1 INLEIDING EN SAMENVATTING

De titel van deze voordracht suggereert de beschrijving van een procesgang, waarbij de transformatie van (relatieve) puntwaarnemingen tot een kaartvlakweergave stap voor stap wordt bewerkstelligd. Deze eerste interpretatie moet echter als te simplistisch worden beschouwd.

Hiervoor is een aantal redenen aan te voeren, die veelal te maken hebben met het feit, dat voor het oplossen van het gestelde probleem een multidisciplinaire aanpak vereist is: aardwetenschappers, landbouwwetenschappers, wiskundigen en hydrologen zullen samen moeten werken voor het zo adequaat mogelijk in kaart brengen van de eigenschappen van de ondergrond, waarop wij leven.

In wat exactere woorden uitgedrukt schuilt het probleem van de punt-tot-vlak transformatie echter in de interpolatie-/extrapolatieprocessen, die hiervoor worden gehanteerd. Deze kunnen van tweërlei karakter zijn:

Allereerst zijn wiskundige methoden beschikbaar, zoals Thiessen polygonen, splines, kriging; ook principal component analysis, variantie-analyse en andere kunnen voor dit doeleind worden toegepast. Verder wordt er traditioneel gezien veel gebruik gemaakt van een fenomenologische (beschrijvende) benadering, waarbij de genese van de bodem of ondergrond een belangrijke rol speelt (N.B. het begrip "bodem" wordt in de tekst in de ruime zin van "ondergrond" gebruikt).

Problemen bij de eerste benadering kunnen zijn, dat met de huidige statistische technieken vaak geen goede beschrijving van de (ruimtelijke) statistische structuur kan worden gegeven; een verdere ontwikkeling van methoden, die hiervoor wel geschikt zijn zou uitkomst kunnen bieden; met name de voorwaarden van doordachte methoden, zoals kriging vormen vaak een struikelblok voor algemene toepassing. De tweede (fenomenologische) benadering draagt als intrinsiek probleem de mogelijke onjuistheid van de genetische interpretatie in zich. Ontwikkelingen op dit vlak zijn dan ook eveneens zeer nuttig. Er kan echter niet worden gewacht op ontwikkelingen in beide karteringsbenaderingen; er bestaat namelijk op dit moment een grote behoefte aan gekarteerde gegevens van de ondergrond; er moet daarom geroeid worden met de riemen, die we hebben.

In het navolgende zullen puntsgewijs de volgende onderwerpen worden behandeld:

Allereerst de vraag of het karakter van veldeigenschappen discontinu of continu is. Antwoord op deze vraag is van groot belang voor de opzet van de veldverkenning.

Verder wordt in het kort beschreven hoe de genese kan samenhangen met veldeigenschappen.

Vervolgens wordt enige aandacht geschonken aan de vraagstelling, waar de veldverkenning antwoord op moet kunnen geven; dit kan leiden tot verschillen bemonsteringsstrategieën.

Hierbij wordt onder meer ingegaan op de rol, die veldwaarnemingen spelen in (numerieke) modellen, waarbij vooral de (ruimtelijke) bemonsteringsintensiteit ter sprake zal komen.

Tot slot wordt gekomen tot het voorstel van een stapsgewijze benadering van het bemonsteringsprobleem, waarbij het toekennen van statistische kenmerken aan genetische eenheden het hoofdthema is.

## 2 CONTINUÏTEIT OF DISCONTINUÏTEIT VAN VELDPARAMETERS

Afhankelijk van de inschatting van de onderzoeker zal de te karteren veldeigenschap continu of discontinu worden beschouwd. Hieraan zal voornamelijk een genetisch beeld ten grondslag liggen, waarbij

abrupte wijzigingen van het ruimtelijk voorkomen van de desbetreffende parameter al of niet als waarschijnlijk worden ingeschat.

In mindere mate speelt de relatieve grootte van de monstername ten opzichte van de geometrie van het parametervoorkomen een rol.

Afhankelijk van bovenbedoelde inschatting kunnen er twee wegen worden bewandeld:

a) een (al of niet gestratificeerde) steekproef uit een oneindig groot verondersteld discontinu (discreet) stochastisch proces;

b) een monstername van een bepaalde grootte uit een continu verondersteld ruimtelijk stochastisch proces.

ad a) Alle beschikbare steekproefmethoden voor het onderzoeken van een discontinue verzameling kunnen hiervoor in principe worden gebruikt; met name de gestratificeerde steekproef wordt hiervoor in de literatuur aanbevolen, in mindere mate schijnt de methodiekkeuze binnen de stratificatie een rol te spelen (zie Oude Voshaar, 1981 en Obdam, 1984). Bij de bemonstering binnen de gestratificeerde elementen moet echter wel rekening worden gehouden met het voorkomen van cycliciteiten in het ruimtelijk gedrag van de te bemeten variabele. De keuze van de grootte van elementen, die deze stratificatie vormen is afhankelijk van het inzicht van de onderzoeker, die ze bij vaste steekproefgrootte kan relateren aan het aantal monsters per element (en dus ook aan de kosten en tevens aan de vraagstelling (zie ook Webster, 1977)). Deze vrijheid in de keuze van de grootte van de elementen kan echter ook worden gebruikt voor het inbrengen van informatie, die reeds over de te onderzoeken verzameling beschikbaar is, zoals een (ingeschatte) autocorrelatie met een bepaalde ruimtelijke invloedsstraal of een ruimtelijke onderverdeling van het onderzoekgebied naar genese.

ad b) Bij bemonstering van een continu ruimtelijk proces spelen twee nauw verbonden begrippen een belangrijke rol:

Het eerste begrip betreft de ruimtelijke autocorrelatie, weergegeven door middel van een autocorrelatie-functie of een semi-variogram; een van de belangrijkste kenmerken van deze functies is de autocorrelatie-afstand of de integraalschaal van de eerstgenoemde functie c.q. de range van de laatste functie.

Het tweede begrip heeft betrekking op de verschillende schalen, waarop het ruimtelijke continue proces kan (heeft kunnen) optreden. Deze schalen kunnen door de verschillende vormen van autocorrelatie-functies worden weergegeven.

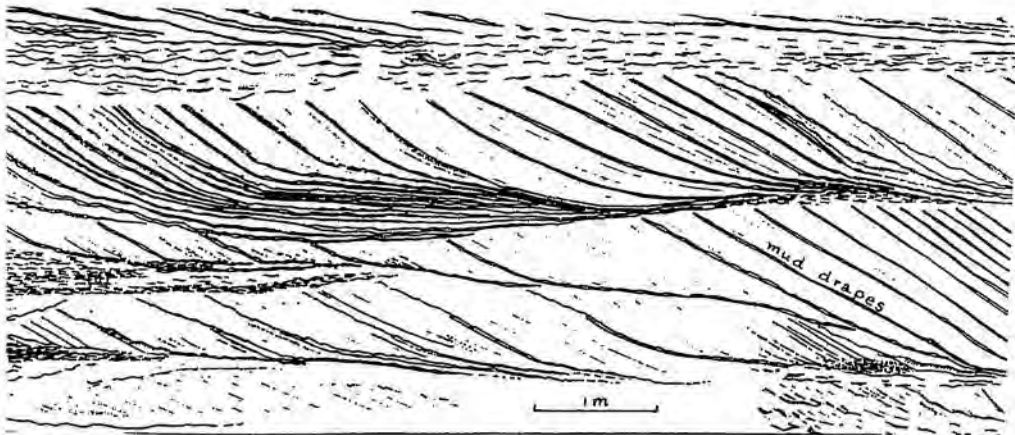
Voor het bemonsteren van een ruimtelijk variabele is het een schrale troost, dat kennis van (het karakter van) een autocorrelatie-functie een sterk hulpmiddel is voor de opzet van een bemonsteringsstrategie; deze functie kan namelijk pas worden afgeleid als er monsternamen heeft plaatsgevonden. Het is echter wel zinnig om bij een eerste monsternamen een inschatting van de autocorrelatie-straal te maken op basis van de genese van (onderdelen van) het onderzoekgebied.

Deze misschien ietwat gekunstelde scheiding tussen de bemonsteringsmethoden van als discontinu en continu beschouwde ruimtelijk variabelen leidt al snel tot de vraag, of beide benaderingswijzen niet zijn te combineren. Deze vraag is (uiteraard) eerder gesteld en de beantwoording ervan heeft reeds geleid tot geïntegreerde benaderingen (zie Bregt et al, 1987). In onderhavige notitie zal met name de genese van de te onderzoeken (bodem)parameter worden benadrukt als verbindend element tussen beide bemonsteringsbenaderingen. Hierbij wordt ervan uitgegaan, dat het ruimtelijke karakter van bodemeigenschappen het resultaat is van een afwisseling van continue en discontinue ontstaansprocessen (ofwel onderbrekingen van het continue proces).

### 3 GENESE VAN VERSCHILLEN IN VELDEIGENSCHAPPEN

Een ieder, die een verse weginsnijding in het terrein of een groeewand bestudeert (al is het maar even) zal vaak een zekere

stratificatie van de ondergrond aantreffen, die (als de insnijding lang genoeg is) geleidelijk of abrupt van karakter zal veranderen (zie Figuur 1). Voor zowel de eigenschappen van de vaste matrix, als van de zich daarin bewegende stoffen is de schaal van voorkomen van deze stratificatie van groot belang.



Figuur 1 Een groeve-wand, die afzettingen toont van estuarine oorsprong

Van welk karakter kan dat belang zijn?

Bij zowel het bemonsteren van de vaste matrix als van de zich daarin bewegende stoffen zal steeds weerkerende vraag van belang zijn voor welk volume van het bemonsterde medium een meting representatief is. Voor beantwoording van deze vraag is het van groot belang een indruk te hebben van het ruimtelijke "gedrag" van de bemeten variabele. Naarmate hier meer kennis voor beschikbaar is, zal er efficiënter kunnen worden bemonsterd en zal de bemonsteringsinspanning beduidend kunnen worden gereduceerd.

Om met vrucht gebruik te kunnen maken van kennis van de ruimtelijke eigenschappen van de te bemeten variabele moet hierover echter wel informatie beschikbaar zijn. Een van de meest veelbelovende wegen hiervoor is kennis van de genese van de ondergrond. Hierin kunnen primaire en secundaire genese worden onderscheiden:

#### Primaire genese:

Het milieu van afzetting van de te bestuderen ondergrond heeft grote invloed op de eigenschappen ervan. Hiervoor hoeft men alleen maar te denken aan het verschil in geometrie van fluviatile en mariene kleilagen (zie Weber, 1980). Binnen een sedimentatie-milieu is het energieniveau van het transporterende medium van groot belang. Hiernaast speelt ook de mate van beschikbaarheid van verschillende lithologie-soorten (deeltjesgrootte, geochemische eigenschappen) een rol van betekenis. Voor het achterhalen van deze beide omstandigheden tijdens de genese van de ondergrond is het aan te bevelen om het desbetreffende paleolandschap te reconstrueren, waarbij ook kennis van het paleoklimaat een sleutelrol kan spelen (zie Van Alphen, 1984).

Paleolandschap en -klimaat leiden tot:

#### De secundaire genese:

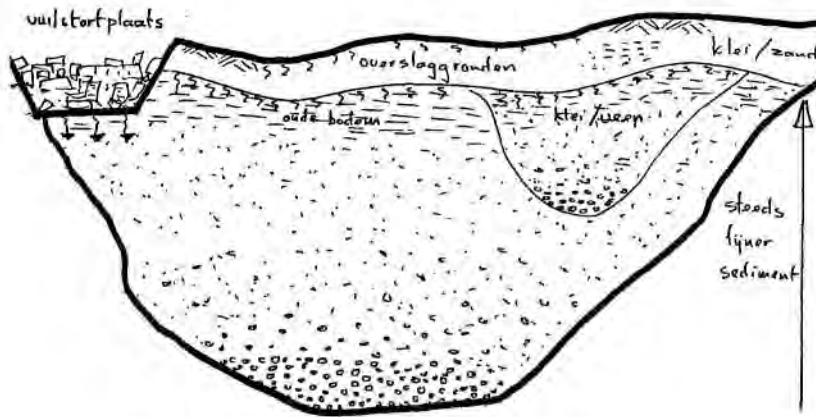
Door processen, die na de vorming van het desbetreffende sediment plaatsvinden kunnen de eigenschappen drastisch worden veranderd; hierbij valt te denken aan consolidatie, al of niet gevolgd door structuurverlies en bijvoorbeeld aan oplossing en transport van stoffen in het sediment, al of niet gevolgd door neerslag elders in het sediment (bodenvorming). De secundaire genese vindt in het algemeen niet onafhankelijk plaats van de structuur, die door de primaire genese is ontstaan; de transporterende (vloeistof)stoffen kunnen bijvoorbeeld voorkeursstroombanen volgen, waarbij chemische neerslag plaatsvindt op de contrastgrenzen van de ruimtelijke permeabiliteitsverdeling of van bijvoorbeeld de ruimtelijke organische stofverdeling.

Ook de mens speelt bij de secundaire genese een rol van betekenis: hij graaft af, legt droog, hoogt op, teelt op, vervuult en hopelijk reinigt hij de ondergrond.

Al deze invloeden kunnen ertoe leiden, dat het initiële karakter van de ondergrond ten dele of geheel is of wordt gewijzigd.

Wellicht is het zinvol om na te gaan of elk of enkele van de secundaire invloeden verantwoordelijk zijn voor een specifieke structuur in de eigenschappen van de ondergrond, die weerspiegeld wordt in de statistische eigenschappen (zie Figuur 2).

Terugkomend op de ter tafel liggende vraag kan worden gesteld, dat voor het begrijpen van de eigenschappen van de ondergrond en zijn ruimtelijke verbreiding elk van de hiervoor genoemde aspecten bestudeerd moeten worden teneinde hieraan de a priori informatie te ontlelen voor de opzet van een bemonsteringsstrategie en de latere verwerking van gegevens tot een karteringsrepresentatie.



Figuur 2 Een riviergeulopvulling; het resultaat van primaire en secundaire genese

#### 4 ENIGE BEMONSTERINGSDOELEINDEN

In het navolgende zullen enige doeleinden voor het bemonsteren van bodem- en grondwaterparameters en hun repercussies voor het uitvoeren van de bemonstering worden besproken.

Mogelijke doeleinden zijn:

- a datavoorziening voor de kartering van een bepaald gebied
- b datavoorziening voor het oplossen van een grondwaterkwaliteitsprobleem

- c datavoorziening voor een bodemsaneringsproject
- d datavoorziening voor de planning van milieubedreigende activiteiten
- e datavoorziening voor inventarisering van de bodem- en grondwaterkwaliteit in Nederland.

ad a)

Bemonstering voor karteringsdoeleinden dient op zijn gunstigst een categorie van doeleinden, zoals de bodemvruchtbaarheid bij bodemkundige kartering of winning van delfstoffen bij geologische kartering.

Veelal lopen de belangen van deze doeleinden echter zodanig uiteen, dat de kartering zich niet op één daarvan kan richten. Met als gevolg, dat veelal op genetische kenmerken wordt gekarteerd, met andere woorden er wordt dan min of meer onafhankelijk van een probleemstelling bemonsterd.

ad b)

Voor datavoorziening voor grondwaterkwaliteitsproblemen kan in de opzet van de veldbemonstering vooraf rekening worden gehouden met de specifieke probleemkenmerken: Bij een concentratie van stroomlijnen zal kennis van de parameterwaarden in het desbetreffende deel van het modelgebied van (groot) belang zijn voor de verspreiding en beïnvloeding van stoffen in en met het grondwater.

Behalve het uitvoeren van veldbemonstering voor de verwerving van waarden van stromingsparameters, onafhankelijk van de specifieke probleemstelling, zal een aanpassing hiervan aan het op te lossen grondwaterkwaliteitsprobleem noodzakelijk zijn.

ad c)

Bij het uitvoeren van bodembemonsteringen voor de voorbereiding van een bodemsaneringsproject kan in grote lijnen het volgende patroon worden geschetst: naast inventarisering van de genetische eenheden, elk met hun eigen gevoeligheid voor verontreinigingen zal getracht moeten worden om de intensiteit van waarneming aan te passen aan de wijze, waaraan de verontreiniging in de bodem is terechtgekomen (zie ook Obdam, 1984).

ad d)

De planning van milieubedreigende activiteiten behoeft allereerst een (modelmatige) beschrijving van de kwetsbaarheid van een gebied; aan de hand hiervan kunnen specifieke bemonsteringscampagnes worden opgezet. Een voorbeeld hiervoor kan zijn het speuren naar gaten of onderbrekingen in kleilagen, die waterwinningspakketten scheiden van erboven liggende vuilstortplaatsen.

ad e)

Voor het inventariseren van de mate van verontreiniging van bodem en grondwater is het van groot belang om aan de relatief weinig bemonsteringslokaties in Nederland een gebied (3D!) te koppelen, waarvoor de waarnemingen representatief geacht mogen worden. Hierbij spelen de eerdergenoemde overwegingen eveneens een rol: de verontreinigingsbelasting van een gebied en de genetische c.q. geohydrologische eenheid waarin wordt gemeten.

## 5 HET KARTERINGSDILEMMA

In bovenstaande is in allerlei varianten het belang betoogd van het onderverdelen van een gebied in genetische eenheden. Hoe echter met een bepaald budget een optimale verdeling van de bemonsteringsinspanning over het veld kan worden gemaakt is in het midden gelaten.

In het algemeen is hierover slechts in globale termen iets te zeggen: De bemonsteringsintensiteit zou evenredig moeten zijn aan de variantie van het waar te nemen veldkenmerk in het desbetreffende gebiedsdeel; verder zou de intensiteit omgekeerd evenredig moeten zijn met de mate van autocorrelatie binnen dit gebiedsdeel.

Aan deze idealistisch gestelde voorwaarden kan in de realiteit zelden of nooit worden voldaan, daar de eigenschappen, waarop de bemonsteringsintensiteit wordt gebaseerd na uitvoering van de bemonstering pas bekend zijn. Dit kan men het karteringsdilemma noemen. Voor het optimaal uitvoeren van een bemonstering zal op een of andere manier een schatting van de variantie en de mate van autocorrelatie kunnen worden gedaan, wellicht aan de hand van beschikbare genetische informatie. Zonder voorinformatie, op basis

waarvan een schatting kan worden gedaan zal een bemonstering op een iteratieve wijze moeten worden uitgevoerd.

Het type informatie, dat hier wordt bedoeld is vaak niet direct af te schatten uit bestaande gegevens. Een van de meest veelbelovende manieren voor het verwerven ervan is het uitvoeren van detailstudies in gebieden met eenzelfde geologische oorsprong, die elk representatief zijn voor een flink deel van Nederland (geologisch gezien is Nederland in elf geologische provincies te verdelen).

Deze detailstudies zouden gericht moeten zijn op het koppelen van statistische karakteristieken van de belangrijkste bodemparameters aan genetische structuren. Het nut van een dergelijke detailstudie is gelegen in de gefundeerde afschatting van het ruimtelijke gedrag van bodemparameters op andere lokaties binnen dezelfde geologische provincie. Dit kan het uitvoeren van een snelle, optimale bemonstering van bodemparameters in probleemsituaties sterk vergemakkelijken.

## 6 VOORSTEL VOOR EEN STAPSGEWIJZE BEMONSTERINGSPROCEDURE

Laten we terugkeren naar de vraagstelling, die in de inleiding is verwoord, namelijk welke winst is er te behalen met het samenvoegen van de "fenomenologische" of traditionele bemonsteringsmethode en de (puur) statistische methode.

Deze vraag is echter niet direct te beantwoorden: hiervoor is het namelijk noodzakelijk, dat de genese van de ondergrond naast de traditionele kwalitatieve beschrijving tevens in statistische termen wordt beschreven; hiernaast is het ook gewenst, dat de voorwaarden voor het correct toepassen van statistische methoden flexibeler worden. Het ontkrachten van het eerstgenoemde voorbehoud zal echter de meeste inspanning vergen (zie ook Obdam, 1983).

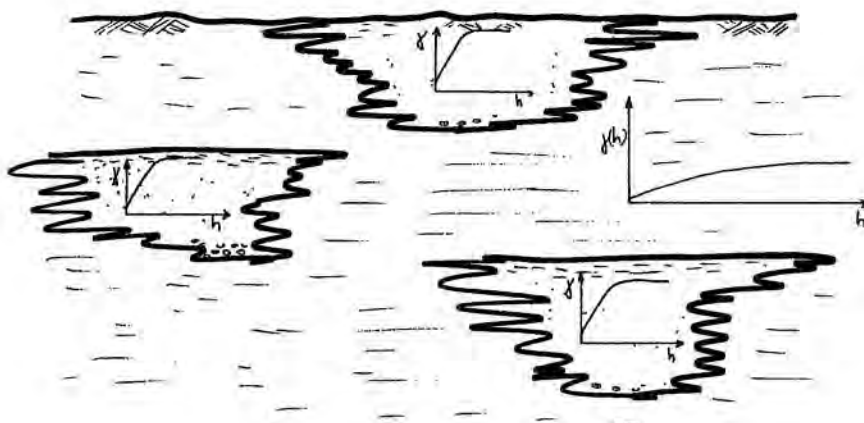
In de ideale vorm zou de synthese van bovengenoemde twee wijzen van karteren er als volgt kunnen uitzien:

- definitie van de probleemstelling, waarvoor veldparameters moeten worden gekarteerd; vaststelling van de schaal (schalen van bemonstering; vaststelling van mogelijke verdunning of verdichting van het bemonsteringsnetwerk, naar aanleiding van gevoeligheidsanalyse van de probleemstelling voor verschillende bemonsterings-

dichtheden;

- eerste verkenning van het probleemgebied voor de onderverdeling in genetische eenheden; al of niet reeds te verwerven uit reeds uitgevoerde geologische of bodemkundige kartering;
- beschrijving van de genetische eenheden in statistische termen of inschatting hiervan (dit kan leiden tot de noodzaak van het uitvoeren van een iteratieve bemonsteringsprocedure; de informatie kan mogelijk betrokken worden van een eerder uitgevoerde studie binnen een genetisch gezien analoog gebied) vooral statistische homogeniteit binnen de genetische eenheden is hierbij van belang;
- vervolgens bemonstering van de veldparameter(s) per genetische eenheid, waarbij rekening wordt gehouden met de specifieke (statistische) eigenschappen per eenheid en de eisen, die de vraagstelling oplegt;
- groepering van genetische eenheden met als criterium gelijkvormigheid van (genetische) processen; dit is vooral van belang voor genetische eenheden, waarvoor relatief weinig waarnemingen beschikbaar zijn;
- extrapolatie naar niet gemeten lokaties op basis van kennis van de genese van het gebied, gecombineerd met de statistische karakteristieken, die hierbij horen.

In tegenstelling tot de wens (en soms zelfs de voorwaarde) van eerdergenoemde statistische methoden om veel waarnemingen gelijktijdig te bewerken en te interpreteren werkt de voorgestelde methode met het idee van een overlay-structuur. Hiermee wordt bedoeld, dat, hoewel er vaak relatief kleine aantallen monsters in een genetische eenheid worden waargenomen deze op grond van genetische verwantschap met andere eenheden voor statistische bewerking kunnen worden samengevoegd (zie Figuur 3 en Gerringa en Obdam, 1984). Hierdoor kan er flexibel worden gereageerd op de soms abrupte wijzigingen van het ruimtelijk karakter van de verkende parameter.



Figuur 3 Doorsnede van een bemonsteringsgebied met relatief kleine eenheden van eenzelfde oorsprong

## 7 STELLINGEN

- 1 De koppeling van statistische homogeniteit aan de genese van de ondergrond is een belangrijke sleutel voor verantwoorde statistisch-geologische interpolatie en extrapolatie.
- 2 Een trend in het ruimtelijk statistisch gedrag van een variabele zou alleen mogen worden gebruikt als basis voor inter- en extrapolatie als hiervoor een reële (genetische) grondslag voor bestaat.
- 3 Het toepassen van co-kriging mag eveneens alleen op voorwaarde van een oorzakelijk verband tussen de statistisch variabelen worden toegepast.
- 4 De koppeling "probleemstelling - voorlopige modellering - bemonstering in het probleemgebied" behoeft meer aandacht dan

tot nu toe gebruikelijk is.

- 5 Veel parameters bezitten een (zeer) complexe statistische structuur, omdat verschillende statistische processen bij de genese simultaan hebben plaatsgevonden, zoals bijvoorbeeld:  
 parameter: grondwaterkwaliteit; processen: infiltratie van al of niet verontreinigd water, ruimtelijke variatie geïnfil-  
 treerd medium;  
 parameter: bodemkwaliteit; processen: processen: initiële bodem-  
 kwaliteit (genese moedermateriaal, bodemvormende pro-  
 cessen), toevoeging van stoffen door infiltrerend water,  
 etc.
- 6 Het vaststellen van de mate van correlatie tussen bodemparameters kan het toepassen van Monte Carlo simulatie op numerieke modellen sterk vergemakkelijken, c.q. binnen bereik brengen.
- 7 Het toepassen van inverse modellering voor het verwerven van geohydrologische parameters behoeft zowel kennis van de statistische structuur van de waargenomen grondwaterstijghoogten als van de statistische structuur van het doorstroomde medium.

## LITERATUUR

- ALPHEN, G. van, 1984. Sedimentologische interpretatie van de afzettingen van de Nuenen-groep, nabij Best. RIVM-rapport nr 840388001, behorend bij het project "Variaties in fysisch-chemische bodemkarakteristieken".
- BREGT, A.K., J. BOUMA and M. JELLENIK, 1987. Comparison of thematic maps derived from a soil map and from kriging of point data. Geoderma (in press).
- GERRINGA, L. en A.N.M. OBDAM, 1984. Variaties in fysisch-chemische bodemkarakteristieken op een proeflokatie nabij Best. RIVM-rapport 840388004 behorend bij het gelijknamige project.
- OBDAM, A.N.M., 1983. Statistical treatment of sedimentary structures and its use for geohydrological sampling procedures. Proceedings of the International Symposium on Methods and Instrumentation for the Investigation of Groundwater Systems, Noordwijkerhout, May, 1983, UNESCO/TNO, p. 55-72.
- OBDAM, A.N.M., 1984. Enige beschouwingen over het bemonsteringsprobleem van een bodemverontreinigingsproject.  $H_2O$  (17), 1984, nr 9, p 175-179.
- OUDE VOSHAAR, J.H., 1981. Steekproefmethoden in het onderzoek naar de verspreiding van perceelsvormen: oppervlakteschatting van mozaïeken via puntsteekproeven. IWIS-TNO, december 1981.
- WEBER, K.J., 1980. Influence on fluid flow of common sedimentary structures in sand bodies. Paper 9247 of the Society of Petroleum Engineers of AIME; Fall Meeting 1980.
- WEBSTER, R., 1977. Quantitative and numerical methods in soil classification and survey. Clarendon press, Oxford.

# RUIMTELIJKE VARIABILITEIT IN BODEM EN WATER: VOORBEELDEN VAN TOEPASSINGEN

J.W. Hopmans

## 1 INLEIDING

Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke variabiliteitsproblemen die Nederlandse onderzoekers bezighouden, alsmede van de door hen toegepaste statistische methoden, hebben we aan eenieder die deze bijeenkomst bijwoont of hun instelling gevraagd een samenvatting van zijn variabiliteitsonderzoek in te sturen. In totaal zijn 23 van dergelijke cases ingezonden.

Een ruwe inventarisatie van de onderwerpen resulteert in een tweedeling van onderzoeksvelden.

- Onderzoek naar de ruimtelijke variabiliteit (r.v.) van bodem- en grondwaterverontreiniging.
- Onderzoek naar statistische technieken ter karakterisering van de r.v. in bodemkundige, bodemfysische en geohydrologische eigenschappen, ten dienste van simulatiemodellen voor water- en stoffentransport.

Beide onderzoeksvelden zijn natuurlijk gekoppeld aan elkaar, maar eerstgenoemde studies leggen met name de nadruk op inventarisatie van de verspreiding van de verontreinigingen.

Allereerst zal ik een gedetailleerd overzicht van de ingezonden studies geven, waarbij de cases ingedeeld zullen worden naar onderwerp. Voor elke studie zal ik ook de toegepaste technieken noemen, alsmede

de ervaringen door de onderzoekers opgedaan. Ook zal aangegeven worden in hoeverre de ingezonden cases een antwoord geven op de drie vragen die prof. Bouma heeft gesteld in zijn scope van de dag.

## 2 INVENTARISATIE CASES

### 2.1 Ruimtelijke variabiliteit in grondwaterverontreiniging

De studie door Schouten (RUU; De kartering van de chemische samenstelling van het freatisch grondwater) heeft tot doel na te gaan in hoeverre het bestaande landelijke meetnet grondwaterkwaliteit uitgebreid moet worden voor de regionalisatie van de provinciale grondwaterkwaliteit. Daartoe zal volgens Schouten allereerst een studie gemaakt moeten worden naar de r.v. van de factoren die grondwaterkwaliteit bepalen, opdat vervolgens een indeling gemaakt kan worden naar min of meer homogene grondwaterregio's. Binnen een regio dient vervolgens naar de aanwezigheid van ruimtelijke structuur gekeken te worden, op basis waarvan gekozen kan worden voor random of gestuurde samplingtechnieken.

Bleuten (RUU; Onderzoek naar de ruimtelijke variabiliteit van het meststoffengehalte van het bovenste grondwater in de provincie Utrecht) vraagt zich af welke relaties er bestaan tussen mestdosering, landgebruikerstype en grondwaterkwaliteit en in hoeverre deze relaties beïnvloed worden door de r.v. in bodemtype. Bleuten concludeert dat r.v. in nitraatgehalte in het grondwater met name beheerst wordt door mestdoseringsverschillen en in mindere mate door bodemverschillen. Een beperking in zijn analyseresultaten echter vormt het ontbreken van perceelsgegevens betreffende de bemestingsgeschiedenis.

Houweling (RIN; Ruimtelijke variabiliteit van het ondiepe grondwater in Nederland) heeft de ionenratio op 10 m - mv in geheel Nederland gekarteerd, met als doel de stabiliteit van overgangszones in natuurgebieden te beschrijven. Hoge IR-waarden wijzen op beïnvloeding van de kwaliteit van het grondwater door de chemische eigenschappen van het

doorstroomde sediment. De gewogen IR-waarden op geïnterpoleerde punten zijn daarbij berekend uit de waarden van bemeten punten met als gewicht de inverse afstand tot die punten.

Evenals Bleuten bepleit Witmer (RUU; Onderzoek naar de relatie bodemgebruik - grondwaterkwaliteit) het opbouwen van een historisch overzicht van potentieel bodembedreigende activiteiten voor de kwaliteit van het grondwater. Een gegevensbestand, opgebouwd uit door verschillende laboratoria verzamelde grondwaterkwaliteitsgegevens kan onbruikbaar zijn voor de analyse van r.v., indien verschillende bemonsteringstechnieken zijn gebruikt. Witmer stelt voor een proefgebied op te zetten, waarbij met name aandacht zal moeten worden besteed aan gegevensverwerkings- en bemonsteringstechnieken en identificatie van subgebieden met verschillende grondwaterkwaliteit.

## 2.2 Ruimtelijke variabiliteit in bodemverontreiniging

De Kwaadsteniet (RIVM; Variantie- en regressieanalyse als hulpmiddel bij een bodemkwaliteitsmeetnet) beschrijft de opzet van een bodemmeetnet, met als doel trends in de gehalten van zware metalen en organische verbindingen in de bodem te kwantificeren in afhankelijkheid van grondsoort, bodemgebruik en belastingsintensiteit. De meetpunten worden daarbij zo gekozen dat zowel de variatie per locatie als de variatie tussen soortgelijke locaties bepaald kan worden.

Rang (RUU; Ruimtelijke variabiliteit van zware metalengehalten in oevergronden) stelt vast dat de r.v. van zware metalengehalten in overgelopen gronden langs rivieren sterk gecorreleerd is met de geomorfologische en bodemkundige karakteristieken van deze oevergronden. Indien na vaststelling van deze correlaties eerstgenoemde eigenschappen in kaart gebracht worden kan de mate van verontreiniging gekarteerd worden uit steekproefgewijze bemonsteringen.

Van der Zee (LUW; Fosfaattransport door heterogene bodemsystemen) tracht het fosfaattransport door de bodem naar het grondwater op veldschaal te kwantificeren met behulp van de frequentieverdelingen van

eenvoudig meetbare bodemeigenschappen. Door heterogeniteit in zowel bodemeigenschappen als mestdosering zijn volgens Van der Zee deterministische modellen onbruikbaar of onpraktisch. Een directe consequentie bij toepassing van stochastische modellen is dat niet het P-transport op een bepaalde plaats, maar het gedrag van het gehele beschouwde systeem gekarakteriseerd wordt. Doel van zijn onderzoek is om, op grond van veronderstellingen betreffende de fosfaatdosering, voorspellingen te kunnen doen over de ontwikkeling van het P-profiel voor een specifiek perceel.

Door stoffentransportmodellen te toetsen aan de hand van laboratorium-experimenten probeert Van Ree (LGM; Het effect van heterogeniteiten in de bodem op de verspreiding van verontreinigingen) inzicht te krijgen in de mate van detaillering van het bodemsysteem, die vereist is om betrouwbare prognoses over verspreiding van verontreinigingen in ruimte en tijd te kunnen maken. Inzicht in het belang van gedetailleerdheid van het bodemsysteem op het stoftransport is noodzakelijk voordat, volgens Van Ree, gekozen kan worden voor het gewenste informatie-niveau.

### 2.3 Ruimtelijke variabiliteit in bodemkundige, bodemfysische en geohydrologische eigenschappen

De Kwaadsteniet (RIVM; Betrouwbaarheid van geohydrologische modellen) geeft aan hoe stijghoogte-informatie en de variantie/covariantie structuur daarin gebruikt kunnen worden om door middel van inverse modellering een ruimtelijk beeld met betrouwbaarheidsmarges te krijgen van de transmissiviteit. Vervolgens kan de via de inverse modellering verkregen betrouwbaarheidsinformatie voor de modelparameters dienen als invoer voor een stochastisch stromingsmodel, zodat voorspellingen gedaan kunnen worden ten aanzien van niet-bemeten situaties.

Een dergelijke aanpak wordt ondersteund door het onderzoek van Witmer (RUU; Onderzoek naar de geohydrologische eigenschappen van het Gooi), waarin op grond van de combinatie van kennis van geologische ontstaansgeschiedenis en lithologie met modelsimulaties inzicht verkregen

wordt in de r.v. van geohydrologische eigenschappen. Aldus werden vier theorieën opgesteld over de mogelijke variatie in geohydrologische gebiedseigenschappen van het Gooi en getest met behulp van modelberekeningen.

Aan de Vrije Universiteit van Amsterdam wordt onderzoek verricht ten behoeve van de regionalisatie van hydrogeologische variabelen. Zo concludeert Seyhan (VUA; Regionalization of hydrogeological subsystems) dat een succesvolle kartering van geohydrologische eenheden bereikt kan worden met multivariate statistische analysemethoden. Dit in tegenstelling tot geostatistische technieken, ofschoon met onderzoek in die richting verder gegaan wordt.

Simmers (VUA; Spatial variability of groundwater recharge: A case study from S.E. Botswana) doorloopt een aantal stappen om de r.v. van grondwateraanvulling te kunnen kwantificeren. Centraal in zijn studie staat de bepaling van de "grid scale", waarvan de grootte gekozen wordt in afhankelijkheid van de r.v. van gewas en/of bodemfactoren die de mate van grondwateraanvulling het sterkst beïnvloeden.

Het gebruik van schaleringstechnieken om de r.v. van bodemfysische eigenschappen te karakteriseren staat centraal in de studies van Ten Berge (LUW; Vocht karakteristieken van bodems op de Minderhoudshoeve) en Stricker (LUW; Ruimtelijke variabiliteit: Onderzoek Hupsel). In beide ingezonden cases dient de frequentieverdeling van schaaufactoren als invoer voor een simulatiemodel, waarmee de invloed van de r.v. in bodemfysische eigenschappen op de verdamping onderzocht wordt. In combinatie met een klasse-indeling naar bodemtype en afvoer-grondwaterstandrelaties streeft het Hupsel onderzoek naar een stochastische analyse van het bodemvocht regime in een stroomgebied. Daarbij wordt gebruik gemaakt van Monte-Carlo simulaties.

Wösten (STIBOKA; Koppeling bodemkaart met bodemfysische gegevens) maakt gebruik van de bodemkaart, als uitgangspunt voor de beschrijving van bodemfysische karakteristieken van de belangrijkste horizonten of bouwstenen. De bodemfysische karakteristieken worden onderling verge-

leken door middel van omzetting van deze karakteristieken naar functionele eigenschappen, zoals verblijftijd en kritieke grondwaterstand. Ten behoeve van de karakterisering van de waterhuishouding in een gebied levert deze aanpak een vermindering van het aantal benodigde kaartvlakken op, doordat verschillende bouwstenen gelijke functionele eigenschappen kunnen bezitten.

Als laatste in deze groep correleert Braam (RUU; Onderzoek naar de ruimtelijke en temporele variabiliteit in de massabewegingen op basis van jaarringgegevens van bomen) de ruimtelijke en temporele variabiliteit van massabewegingen van grond langs hellingen met de veranderingen van excentriciteit in de jaarringgroei van bomen. Massabewegingen veroorzaken scheefstelling van bomen, die daarop vervolgens reageren met verandering van concentrische naar excentrische jaarringgroei. Niveauveranderingen in de excentriciteit worden daarbij gesignaleerd door toepassing van de Split-Moving-Window techniek op een tijdreeks van boomringdata.

#### 2.4 Selectie meetpunten ten behoeve van variabiliteitsonderzoek

De doelstelling van het onderzoek van Van Geer (DGV-TNO; Optimalisatie van het grondwaterstandsmeetnet. Hoe verder?) is het verzamelen van voldoende informatie over een grondwatersysteem ter onderbouwing van het provinciaal grondwaterbeheer. Daartoe wordt een optimaal grondwaterstandsmeetnet opgezet, gebruikmakend van kriginginterpolatie (t.b.v. meetnetdichtheid), Kalman filtering (t.b.v. meetfrequentie) en kwalitatieve informatie over het geohydrologische systeem (t.b.v. keuze deelgebieden). Voor kleinschalige problemen verkiest Van Geer een kwantitatieve fysische beschrijving gekoppeld met statistische technieken.

Witter (LUW; Simulatietechniek gebiedsneerslag) stelt vast dat het huidige regenmeetnet informatie levert omtrent de gemiddelde gebiedsneerslag, maar dat meer specifieke studies kennis vereisen van neerslagvelden. Daartoe zijn neerslaggegevens nodig voor een aantal locaties binnen het gebied en voor opeenvolgende tijdstippen. Hij consta-

teert dat onvoldoende informatie aanwezig is om de afhankelijkheidsstructuur in neerslagvelden te kunnen simuleren. Er is daartoe een dichter regenmeetnet opgezet in het hoogheemraadschap West-Brabant.

Marsman en De Gruyter (STIBOKA; Steekproefmethode voor bemonstering van kaarteenheden op bodemkaarten) introduceren een steekproefmethode om statistische informatie over de bodemeigenschappen van kaarteenheden te verkrijgen. Gemiddelde en standaard deviatie van bodemkundige eigenschappen, zoals horizontdikte en leemgehalte, worden met behulp van deze methode bepaald zonder dat veronderstellingen omtrent de r.v. van die eigenschappen binnen een kaarteenheden behoeven te worden gedaan. De aldus verkregen statistische informatie vergroot de toepassingsmogelijkheden van de bodemkaart.

## 2.5 Voorspellende statistische technieken

Zowel Corsten (LUW; Interpolatie door kriging) als Stein (LUW; Het vervaardigen van een voorspellende single-value kaart in een gebied in Noord-Drente) tonen aan dat (co)-kriging gebruikt kan worden als interpolatietechniek, indien er sprake is van ruimtelijk afhankelijke waarnemingen. Deze ruimtelijke afhankelijkheid wordt gekarakteriseerd door de zgn. gegeneraliseerde covariantiefunctie. Het grootste probleem in de toepassing van kriging ligt besloten in het corrigeren van deze gegeneraliseerde covariantiefunctie voor een mogelijk aanwezige trend. Bij afwezigheid van trend is de gegeneraliseerde covariantiefunctie gelijk aan het semivariogram.

Bregt (STIBOKA; Thematische kaarten, afgeleid van de bodemkaart en verkregen uit interpolatie van boorpunteninformatie) concludeert dat de zuiverheid van thematische kaarten verkregen met kriging uit enkel de boorpunteninformatie gelijk is aan de zuiverheid verkregen uit de door de karteerder gemaakte bodemkaart. Deze conclusie is echter gebaseerd op een vergelijkende studie in Hupsel, een gebied met een beperkt aantal landschappelijk te onderscheiden kenmerken die de karteerder kunnen helpen bij het vervaardigen van de bodemkaart. Toepassing van objectieve interpolatietechnieken biedt volgens Bregt moge-

lijkheden om de subjectieve interpolatie door de karteerder te vervangen of tenminste aan te vullen.

Als laatste biedt Van der Schaaf (LUW; Schatten van waarnemingen in een grondwaterstandsmeeetnet met conventionele technieken) de mogelijkheid om, gebruikmakend van (auto)correlatie structuren en regressie analyse, ontbrekende grondwaterstandsgegevens aan te vullen. Hij vraagt zich af in hoeverre met kriging betere resultaten verkregen kunnen worden.

### 3 DISCUSSIE THEMA'S

Naast een indeling naar onderwerp zouden de ingezonden cases ook onderscheiden kunnen worden op basis van de toegepaste statistische methoden: zoals klassieke of geostatistiek, en deterministische of stochastische modellering. Zo'n indeling is verder niet uitgewerkt, maar wel komt duidelijk naar voren dat bij toepassing van beide vormen van statistiek (klassieke of geo-statistiek) allereerst een deterministische-fysische beschrijving van het onderzoeksgebied noodzakelijk is. Zo kunnen statistisch significante verschillen in bodemverontreiniging per bodemtype alleen aangetoond worden indien de statistische analyse voorafgegaan is door een bodemkartering, en kunnen interpolatietechnieken niet gebruikt worden als niet eerst de grenzen tussen gebieden met verschillende fysische of chemische eigenschappen getrokken zijn.

Het behoeft verder geen betoog dat hetzelfde geldt als water- en/of stoftransport gemodelleerd wordt. De vraag rijst dan echter in welke mate van gedetailleerdheid het beschouwde systeem fysisch beschreven dient te worden. Schaal- en kosten factoren spelen bij de beantwoording van deze vraag een belangrijke rol.

Deze laatste vraag sluit ook aan bij het eerste thema voor de discussiegroepen vanmiddag: Aan welke facetten moet aandacht worden besteed bij de integratie van bestaande aardwetenschappelijke kennis en (geo)-statistiek? Bij een statistische analyse gebaseerd op een gedetail-

leerde fysische beschrijving van een bodem- of watersysteem dient de meetnauwkeurigheid waarmee de betreffende variabele gemeten is in beschouwing genomen te worden. Dergelijke onzekerheden in het waarnemingsmateriaal kan dan doorvertaald worden naar betrouwbaarheidsmarges in de statistische analyse.

Ook zal men zich af moeten vragen welke statistiek gebruikt kan worden. Menige statistische methode vereist onafhankelijkheid, normaliteit, ergodiciteit of homogeniteit van de waarnemingen; aannamen waarop het gegevensbestand allereerst getest dient te worden.

Een ander facet heeft te maken met de relatie doelstelling onderzoek - statistische methode - hoeveelheid gegevens. Is een gegevensbestand voorhanden, dan zal die statistische methode verkozen worden die, gegeven de doelstelling, een optimaal resultaat levert (zoals Bregt een thematische kaart verkrijgt uit kriging).

Wellicht zou ook kunnen blijken dat, om aan de doelstelling te kunnen beantwoorden, meer gegevens noodzakelijk zijn (zoals bij de steekproefmethode, ontwikkeld door Marsman en de Gruyter). Moet een gegevensbestand nog opgebouwd worden, dan is het belangrijk die statistische methode te kiezen zodat met een minimale inspanning aan bemonstering een maximaal resultaat verkregen wordt (zoals het bodemmeetnet van de Kwaadsteniet).

Het tweede thema onderwerp luidt: Welke statistische methoden worden onvoldoende toegepast in het aardwetenschappelijk onderzoek? Ofschoon in één van de cases de indruk gewekt wordt dat klassieke statistische methoden nauwelijks toegepast worden, laat een inventarisatie van het ons toegezonden materiaal zien dat deze bewering niet geheel correct is. Als voorbeeld noem ik de studies door Van der Schaaf, Bleuten, Rang, Houweling, Marsman en De Gruyter en Braam. Zou men oordelen dat statistiek te weinig wordt toegepast, dan zou de oorzaak kunnen liggen in de onzekerheid van de gebruiker. Velen van ons zijn bekend met door anderen toegepaste statistische technieken, maar misschien onzeker omtrent het zelf toepassen, juist omdat theorie en terminologie voor de niet-statisticus vaak ondoorzichtig zijn. Zoals Bouma al heeft gezegd, is daarom een goede voorlichting onontbeerlijk. Als blijkt dat die voorlichting niet voldoende aanwezig is, blijft de vraag echter

hoe zulks een voorlichting verwezenlijkt zou kunnen worden. Wat betreft het doen van voorspellingen met behulp van modellen levert het gebruik van stochastische partiële differentiaalvergelijkingen grote mogelijkheden. Tot op dit ogenblik dient deze benadering nog verder ontwikkeld te worden en kunnen de computer-intensieve Monte-Carlo simulaties uitkomst bieden.

In hoeverre evenwicht gevonden kan worden tussen vraag, gegevens en modellering vormt het derde discussiepunt van deze middag. Uit verschillende cases komt naar voren dat, gegeven de vraagstelling, het aanbod van beschikbare gegevens beperkt is. Zo kan het proces van accumulatie van verontreinigingen in bodem en water sneller achterhaald worden indien de geschiedenis van b.v. mestdosering bekend is. Het antwoord op laatstgenoemde vraag zal o.a. ook afhangen van de nauwkeurigheid waarmee de gegevens verkregen zijn. Het zal b.v. weinig nut hebben om gedetailleerde modellen te gebruiken indien de betrouwbaarheid van de invoergegevens gering is. Een gevoeligheidsanalyse van de gebruikte modellen is daarom een eerste vereiste.

Aansluitend kan geconcludeerd worden dat de steeds specifiekere wordende vraagstelling in ons vakgebied meer gegevens vereist door de inherent aanwezige natuurlijke variabiliteit. Kennis van de omvang en oorzaak van deze variabiliteit kan leiden tot een optimalisatie van het vereiste gegevensbestand en tot betrouwbaarheidsmarges bij modelresultaten.

RESULTATEN VAN DE DISCUSSIE TIJDENS DE 6e CHO-STUDIEBIJEENKOMST  
 "RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN BODEM EN WATER"

---

Discussiegroep 1: (A. Obdam, discussieleider)

Thema: Aan welke facetten moet aandacht worden besteed bij de integratie van bestaande aardwetenschappelijke kennis en (geo)statistiek.

- 1 De koppeling tussen parameters en genese moet gemaakt kunnen worden, inclusief geostatistische kenmerken. Dit geheel dient beschikbaar te zijn als basis voor veldonderzoek.
- 2 Het belang van de schaal van waarneming wordt benadrukt, onder te verdelen in:
  - schaal van waarneming;
  - relatie schaal-probleemstelling;
  - relatie schaal-effecten.

Methodieken zijn veelal gericht op één schaalniveau, hoewel er simulatiemethoden ontwikkeld zijn en worden voor diverse schalen. Dit laatste dient sterk gestimuleerd te worden.

Bij de overgang van deterministisch naar stochastisch modellering, moet aandacht worden geschonken aan een analyse van relaties tussen probleemstelling, effecten en waarnemingen.
- 3 Er is behoefte aan het vooraf koppelen van bodemeigenschappen en genese. Als dit achteraf gedaan wordt, loopt men aan tegen gigantische problemen. Degene die waarneemt dient ook wat te weten van de latere numerieke verwerking van de gegevens. Het is dan ook noodzakelijk om de 'numerieke verwerking' in te brengen in de opleidingen.
- 4 Er zijn vele chemische en fysische bepalingsmethoden met verschillende varianties. Dit dient zoveel mogelijk genormaliseerd te worden.
- 5 Er bestaat grote behoefte aan voorbeelden uit de praktijk op het punt van gebruik van ruimtelijk variabiliteit. Hierbij is het van belang wat het heeft opgeleverd en wat het heeft gekost.

Discussiegroep 2: (P.A. Burrough, discussieleider)

Thema: Welke statistische methoden worden onvoldoende toegepast in het aardwetenschappelijk onderzoek?

Bovenstaand thema is onderverdeeld in drie onderwerpen:

1. onbekendheid met de methoden;  
in hoeverre zijn de methoden niet bekend op plaatsen waar ze eventueel toegepast kunnen worden.
2. kloppen de basisveronderstellingen?
3. zijn er andere technieken beschikbaar?

Stelling: Tijdens deze bijeenkomst wordt een ongewenst onderscheid gesuggereerd tussen de "klassieke" statistiek en de geostatistiek. Het zijn eigenlijk twee handen op één buik. Geostatistiek is niet veel meer dan toepassing van statistische methoden in bodemkunde en geologie.

ad 1: Onbekendheid met methoden bij:

- beheerders;
- gebruikers (onder andere degene die achter de computer zit).

Hier kan wat aan gedaan worden in de vorm van:

- post-academisch onderwijs, voor onder andere beheerders;
- concrete case-studies, praktijkvoorbeelden.

Ook de CHO-TNO zou hier in de vorm van de Technische Bijeenkomsten een rol kunnen spelen en het overdragen van kennis en samenwerking van instanties in SAMWAT-kader.

ad 2: Basisveronderstellingen:

kloppen deze en vormen ze al of niet een belemmering voor geostatistische methoden? Eén van de problemen is de vraag naar het deterministische en het stochastische gedeelte van een modelbenadering. Er zijn technieken die daadwerkelijk een oplossing geven van de problemen. Bijvoorbeeld: als men weet dat er een 2e graads trend is in een probleemveld, dan past men een vorm van kriging toe die daar géén last van heeft, dus waarbij een filtering van die trend plaatsvindt. Zo is bij de STIBOKA kriging vergeleken met andere interpolatietechnieken.

Een andere mogelijkheid is om te kijken naar robuuste technieken en gedeelde schijftechnieken. Vermoedelijk zijn deze technieken niet diepgravend genoeg om de bestaande problemen te kunnen oplossen.

Speelt de onzuiverheid van de gegevens een vervelende rol, zodat de vooronderstellingen eigenlijk niet meer gehaald kunnen worden?

Dit is een belangrijk probleem, hier is wel wat aan te doen.

ad 3: Zijn er ook andere technieken beschikbaar:

Schilperoort gaf een overzicht van mogelijkheden om tijdreeksanalyse-modellen te gebruiken in een bodemkundige/geologische context. Er bestaat mogelijk een gat in de wiskunde, hieraan zou wiskundig onderzoek gedaan moeten worden.

Het betreft het overplaatsen van een Markofmodel met Markof-achtige aannamen naar een tweedimensionale ruimte.

Er wordt gewerkt aan de samenhang tussen tijdreeksanalyse en statistische methoden voor de bodemkunde en geologie op het vlak van de waterhuishouding/hydrologie. In hoeverre zijn deze methoden ook toepasbaar in de bodemkundige context?

Fussy logic en clustering, in hoeverre is dit toepasbaar? Dit onderzoek is nog maar kort geleden van start gegaan bij ITI-TNO. Wellicht komen daaruit nieuwe methoden.

Artificial intelligence lijkt weinig nieuws te bieden. Wellicht geeft dit toch een interface naar de gebruiker toe.

Discussiegroep 3: (J.W. de Kwaadsteniet, discussieleider)

Thema: Hoe kan in het lopend onderzoek beter evenwicht gerealiseerd worden tussen vraag-gegevens-modellen?

Deze vraag is op verschillende manieren scheefgetrokken. Wat gebeurt er als het accent op een van de drie aspecten wordt gelegd?

#### 1. Accent op modelleren

Er worden zeer complexe modellen gemaakt, die helemaal niet gedekt worden door het waarnemingsmateriaal, waar erg veel parameters in

zitten. Deze modellen gaan een eigen leven leiden. Maar wat is de waarde van deze bezigheden? Er is reden tot bezinning, want er wordt veel meer gesuggereerd dan kan worden waargemaakt

2 Accent op gegevensverzameling

Databanken hebben een grotere waarde dan alleen voor de trits modelleren - gegevensverzameling - vraagstelling. Databanken hebben ook een waarde in de toekomst voor algemene vragen, gedetailleerde vragen enz. Ze dienen als referentiekader te kunnen worden opgeroepen en kunnen dus een redelijk losstaand leven leiden.

3 Accent op de vraagkant

Vaak is er gemodelleerd en zijn er gegevens verzameld, maar niet in harmonie met de vraagstelling. Vaak kan men met die modellering meer dan het beantwoorden van de vragen die rechtstreeks worden gesteld. Op zich is dat een goede zaak. Daarmee kan een deel van de vraagstelling worden gestuurd en ook kan worden geanticipeerd op toekomstige vragen.

4 Het verbeteren van het evenwicht tussen modelleren, gegevensverzameling en vraagstelling

Als eerste stap moet worden begonnen met het goed kwantificeren van de variabiliteit van het waarnemingsmateriaal, zodat een maat wordt verkregen voor de modelleringsactiviteiten. Wat een grote, kleine, toelaatbare of niet toelaatbare afwijking is, is informatie die in het waarnemingsmateriaal zelf aanwezig is. Vervolgens moet als tweede stap het waarnemingsmateriaal worden gebruikt om een ontwikkelde modelstructuur op zijn geldigheid te toetsen.

Bijvoorbeeld: Stel dat er een fysisch idee over een verschijnsel bestaat dat is doorvertaald naar een wiskundig model. Met behulp van het waarnemingsmateriaal moet toetsend worden bekeken of het modelconcept klopt. Zo niet, dan moet het model worden verfijnd. Er moet echter niet verder worden verfijnd dan op basis van het aanwezige waarnemingsmateriaal noodzakelijk is.

Op deze manier ontstaat er een inspanning waarbij het eerste stuk van de balans, de balans tussen modellering en waarneming, in evenwicht is.

Als een niet afgetoetste modelstructuur verkregen is, dient vervolgens de variatiemaat die in het waarnemingsmateriaal aanwezig is te worden doorgerekend naar betrouwbaarheidsmarges bij de modelresultaten. Pas in dat geval is ook naar de vraagkant een evenwicht te verkrijgen. De vraagsteller kan dan namelijk nagaan of de betrouwbaarheid van het resultaat hem bevalt of dat hij een nauwkeurigere uitspraak wil. In het laatste geval kan een afweging worden gemaakt tussen gewenste betrouwbaarheid en de daartoe noodzakelijke inspanningen en financiën.

## 5 Slotopmerking

- a Aanbevolen wordt een inventarisatie en evaluatie uit te voeren van ervaringen van onderzoekers in het verlengde van het bovenstaande.
- b Voor het eenduidig kwantificeren van onzekerheden in geologisch onderzoek is in het algemeen het waarnemingsmateriaal waarmee gewerkt wordt niet toereikend. Voor het opvullen van de lacune dient enerzijds meer aandacht geschonken te worden aan fysieke theorievorming, terwijl anderzijds meer aandacht moet worden besteed aan het replicatie-aspect. Wat betreft het laatste: nu wordt in (geo)statistische toepassingen de replicatievraag vaak opgelost met stationariteitshypothesen die niet door het waarnemingsmateriaal worden gedekt. Er dient veel nauwkeuriger te worden nagedacht over de vraag wat men onder een herhaling zal verstaan.

## Algemene discussie:

Doel van de bijeenkomst was een interactie tot stand te brengen tussen mensen die met dit onderwerp bezig zijn. Dit is onder meer in de discussie in de groepen het geval geweest. In de tweede plaats was het doel de communicatie naar buiten toe. Zo is het belang benadrukt om naar de gebruikers toe resultaten te laten zien. Verder verdient het uitwisselen van gegevens tussen onderzoekers aandacht. Elementen van ruimtelijke variabiliteit dienen in dit verband te worden meegenomen bij het plannen van toekomstige CHO-TNO-programma's.

In groep 3 is gesproken over databanken. Naast databanken/informatie-systemen zijn er de expertsystemen en is er toenemende aandacht voor artificial intelligence.

Er zijn nu Geografische Informatie Systemen (GIS) te koop. Dit zijn mooie, maar dure systemen voor het voornamelijk verwerken van kartografische gegevens. Alle gegevens van het veld worden eerst verwerkt in thematische kaarten. Deze kaarten worden in feite vervolgens "bovenop elkaar gelegd". Het is allemaal vrij simpel en statisch. Er zit echter weinig in over dynamische grondwatermodellen, stromingsmodellen, interpolatietechnieken enz. GIS dient verder ontwikkeld te worden voor het beter uitwisselen van met name dit soort dynamische gegevens. GIS is (in het kader van deze dag) zeker géén doel, maar wel een zeer nuttig gereedschap.

In CHO-kader is de verkenningsgroep Samenwerking bij de verstrekking van Aardkundige Gegevens (SAG) actief geweest. In het begin (1984) was er toch een zekere tegenstelling aanwezig tussen aan de ene kant de mensen die met meer kwalitatieve/genetische systemen bezig zijn en aan de andere kant de "technen" die werken met interpolatietechnieken en puntgegevens.

Nu zijn we duidelijk dit station gepasseerd. Van beide kanten wordt ingezien dat het integreren van bestaande aardwetenschappelijke kennis bij het gebruik van statistiek noodzakelijk is. Omgekeerd: als men karteert moet dit niet meer alleen op de klassieke manier gebeuren, waarbij representatieve profielen worden gedefinieerd volgens een vaststaande legenda. Informatiesystemen worden steeds gebruiksvriendelijker. Het gevaar is dat alle gegevens klakkeloos worden ingebracht. Verder speelt bij gegevensbestanden de vraag, hoe toegankelijk ze zijn en hoe uitwisselbaar. Op ad hoc basis is overleg tussen instanties, er vindt een zekere standaardisatie plaats. De vraag is of dat gestructureerd genoeg gebeurt.

Er is uit de 3 groepen naar voren gekomen dat uitwisseling van kennis belangrijk is bijvoorbeeld: op het punt van vergelijking van modellen en nieuwe theorieën van statistische methoden. Dient hier een nieuwe groep voor in het leven geroepen te worden? Of is het zinnig een soort nieuwsbrief uit te geven of aan te sluiten bij de SAMWAT-krant<sup>1)</sup>. In het kader van de Studiegroep Statistiek in de Hydrologie, CHO-TNO<sup>2)</sup> is al een paar jaar een werkgroep actief op het gebied van de ruimtelijke variabiliteit.

Deze groep is echter niet erg bekend. Hier kan bij aangesloten worden.

Inmiddels is ook een initiatief genomen binnen de taakgroep Bodem van de NRL0 voor het organiseren van regelmatige discussiebijeenkomsten op het gebied van de (geo)statistiek. Secretaris van deze groep is Ir A. Stein.

Het verdient aanbeveling om over bijvoorbeeld 1½ jaar een Technische Bijeenkomst te houden over het in deze bijeenkomst behandelde onderwerp. Dat hiervoor belangstelling is, is gebleken tijdens het Colloquium van de SSH op 21 november 1984 "Meetnetonderwerp en -optimalisatie" (zie Rapporten en Nota's van de CHO-TNO, nr. 14). Tijdens zo'n bijeenkomst dienen verschillende toepassingen behandeld te worden variërend van zeer praktisch (met een laag niveau wat betreft statistiek), tot zeer geavanceerd. Behandeling in dit verband van case studies verdient aanbeveling.

1) Adres van de SAMWAT-krant:

Bureau SAMWAT  
Postbus 297  
2501 BD 's-GRAVENHAGE.

2) Adres Studiegroep Statistiek in de Hydrologie, CHO-TNO (SSH):

Info bij: CHO-TNO-bureau of bij  
de voorzitter (SSH)  
Ir J. Kooijman DGV-TNO  
Postbus 285  
2600 AG DELFT



## INGEZONDEN ONDERZOEKONDERWERPEN



## OPTIMALISATIE VAN HET GRONDWATERSTANDSMEETNET. HOE VERDER ?

F.C. van Geer

Dienst Grondwaterverkenning TNO, afdeling Grondwatermeetnet

De afgelopen jaren is door DGV-TNO onderzoek verricht ten behoeve van optimalisatie van provinciale primaire grondwaterstandsmeetnetten (Van Bracht, Defize). De doelstelling van zo'n primair meetnet is het verzamelen van voldoende informatie over het grondwatersysteem ter onderbouwing van het (provinciaal) grondwaterbeheer.

De gevolgde werkwijze daarbij kan in twee fasen worden verdeeld.

- 1 De eerste fase is het bepalen van de meetnetdichtheid op basis van een kriging interpolatie. Het toetsingscriterium is de variantie van de interpolatiefout op elk punt in de ruimte. Daarbij wordt de grondwaterstand op een bepaald tijdstip opgevat als een ruimtelijk verdeelde stochastische variabele.
- 2 De tweede fase is het bepalen van de meetfrequentie met een combinatie van een regressiemodel en een Kalman filter. Daarbij is uitgegaan van de meetlokaties die volgen uit fase 1. Hierbij is deterministische informatie over het geohydrologische systeem in kwalitatieve zin benut, onder meer door het geschikt kiezen van deelgebieden.

Deze werkwijze heeft bewezen goed te voldoen ter bepaling van provinciale primaire meetnetten.

Uit financieel/economisch oogpunt is afgezien van gekwantificeerd deterministische beschrijving van het proces van grondwaterstroming. Het ligt echter voor de hand om voor meer specifieke (klein schaliger) problemen een koppeling tot stand te brengen tussen een deterministisch-fysische beschrijving enerzijds en een statistische techniek anderzijds, ten einde de beschikbare informatie van het meetnet optimaal te gebruiken. Daarbij kan het gedrag van het grondwater in de ruimte (de ruimtelijke variabiliteit) niet los gezien worden van het gedrag in de tijd.

## Referenties

- Defize, P.R. (1983) Optimalisatie landelijk meetnet van grondwaterstanden, deel 5 meetnetherzieningsmethoden  
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft.
- Bracht, M.J. van (1984) Optimalisatie meetnet van grondwaterstanden, deel 8, meetnetoptimalisatie in Friesland,  
Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft.

# THEMATISCHE KAARTEN, AFGELEID VAN DE BODEMKAART EN VERKREGEN UIT INTERPOLATIE VAN BOORPUNTINFORMATIE.

A.K. Bregt

Stichting voor Bodemkartering

Van bodemkaarten worden thematische kaarten afgeleid. Deze kaarten weergeven één of een combinatie van bodemeigenschappen (begindiepte zandondergrond, kleileemdte, enz.). Thematische kaarten verkrijgt men ook door interpolatie van boorpuntinformatie.

In dit onderzoek zijn beide technieken met elkaar vergeleken.

Van het onderzoekgebied 'Hupselse Beek' is een bodemkaart gemaakt. Hiervan is een thematische kaart afgeleid met bodemeigenschappen, die van belang zijn voor het hydrologisch gedrag van deze gronden. De resultaten zijn in de vorm van een choropleth kaart gepresenteerd (Wösten et al, 1985).

Van hetzelfde gebied is ook een thematische kaart gemaakt met kriging interpolatie. De relevante boorpuntgegevens zijn naar een regelmatig grid geïnterpoleerd. De waarden van de gridpunten zijn vervolgens geclassificeerd volgens dezelfde classificatie-criteria als gebruikt bij de, van de bodemkaart afgeleide kaart. De resultaten zijn ook hier in de vorm van een choropleth kaart weergegeven.

Ter vergelijking van de kwaliteit van de twee kaarten zijn zestig testboringen uitgevoerd. Met deze boringen is de zuiverheid van beide kaarten bepaald; onderzocht is in hoeverre de gegevens van de testboringen overeenkomen met de informatie van beide kaarten.

Beide kaarten hebben een zuiverheid van 77 procent, hetgeen erop wijst dat er geen significant verschil bestaat in kwaliteit (in termen van zuiverheid) tussen beide produkten (Bregt en Bouma, 1985).

Het zuiverheidsresultaat van de interpolatiekaart in dit gebied is zodanig dat toepassing van interpolatietechnieken in toekomstig bodemkundig onderzoek aanbeveling verdient, te meer daar boorgegevens in de toekomst volop beschikbaar zijn.

## Referenties

Bregt, A.K. en J. Bouma, 1985. Karteren of interpoleren.

Landbouwkundig Tijdschrift 97(9): 16-21.

Wösten, J.H.M., J. Bouma, en G.H. Stoffelsen, 1985. Toepassing van bodemkaarten bij het gebruik van simulatiemodellen voor waterhuishouding. Cultuurtechnisch Tijdschrift 25: 69-79.

# SCHATTEN VAN WAARNEMINGEN IN EEN GRONDWATERSTANDSMEETNET MET "CONVENTIONELE" TECHNIEKEN

S. v.d. Schaaf

Landbouw Universiteit Wageningen

In 1984/1985 is een programma ontwikkeld voor het schatten van ontbrekende grondwaterstandsgegevens in een meetnet. Daarmee worden van reeksen met "gaten" complete reeksen gemaakt. Die gaten moeten niet een te groot deel van de reeks beslaan en men moet zich realiseren, dat met het opvullen ervan geen informatie wordt toegevoegd. In beginsel is het programma bedoeld voor meetnetten, waarin in de tijd (min of meer) equidistante en synchrone reeksen worden geproduceerd.

Het programma werkt als volgt:

- 1 Niveau, lineaire trend en seizoenfluctuaties (Fouriercomponent met een periode van 1 jaar) worden uit de reeksen verwijderd.
  - 2 Van de residuen wordt een correlatiestructuur bepaald in de vorm van een matrix van lineaire correlatiecoëfficiënten van in de tijd t.o.v. elkaar niet verschoven reeksen. Tevens wordt voor elke reeks de autocorrelatiecoëfficiënt voor 1 tijdstap bepaald, alsmede de correlatiecoëfficiënt van een waarneming met het rekenkundig gemiddelde van zijn beide naaste "buren" in dezelfde tijdreeks.
  - 3 Aan de hand van de bij 2 bepaalde cijfers wordt bepaald, wat voor een bepaalde reeks de best gelijkende andere reeks is. Indien dit een van een andere peilbuis afkomstige reeks is en in die reeks het desbetreffende waarnemingsresidu aanwezig is, wordt een schatting uitgevoerd m.b.v. eenvoudige lineaire regressie. Indien de reeks van de buis zelf afkomstig is, wordt het rekenkundig gemiddelde van de beide "belendende" waarnemingsresiduen als schatter gebruikt, of een van beide indien de andere niet beschikbaar is.
  - 4 De onder 1 verwijderde componenten worden weer bij de residuen opgeteld. Het programma maakt geen gebruik van specifiek op ruimtelijke variabiliteit gerichte technieken; ruimtelijke variabiliteit - en variabiliteit in de tijd - ligt echter grotendeels ten grondslag aan het probleem dat ermee wordt aangepakt. Dezelfde methode wordt gebruikt bij de kwaliteitscontrole vanuit het meetnet verkregen waarnemingen. Het is de vraag, in hoeverre met een ruimtelijke interpolatietechniek als kriging betere resultaten zouden kunnen worden verkregen dan met de boven geschetste methode, die overigens zelf niet ruimtelijk interpoleert. Een vergelijking is tot op heden, voornamelijk als gevolg van tijdgebrek, niet uitgevoerd.
- De verkregen resultaten voor het meetnet van de LH-vakgroep Cultuurtechniek in het zuiden van de Gelderse vallei zijn zonder meer goed te noemen. Voor een 3-jarige periode (1981 - 1983) en 148 peilbuizen, verspreid over ca. 90 km<sup>2</sup> met 9.878 waarnemingen is elke waarneming vergeleken met de volgens de geschetste methode verkregen schatting. Bij een standaardafwijking van de resp. gemiddelden van de reeksen voor het totale meetnet van 0.284 m bedroeg de standaardafwijking van geschatte t.o.v. gemeten waarden 0.060 m, waarbij ruim 75% van de verschillen binnen de 0.05 m lag, in plaats van de op basis van normaliteit te verwachten 59%.
- Hoewel het meetnet betrekkelijk dicht is, lijkt het afstandseffect niet groot: bij een aanvullend criterium van een minimale afstand binnen paren vergeleken peilbuizen van 2.000 m liep de gevonden standaardafwijking met slechts 0,003 m op.

## FOSFAATTRANSPORT DOOR HETEROGENE BODEMSYSTEMEN

S. van der Zee

Bodemhygiëne, LU

In gebieden met intensieve veehouderij kan de (oppervlakte)waterkwaliteit bedreigd worden door overmatige doseringen van fosfaat (P) aanwezig in drijfmest. Om het tijdstip en de omvang van eutrofiëring te schatten dient o.m. P-transport door de bodem naar grondwater gekwantificeerd te worden op veldschaal. Door heterogeniteit zijn deterministische modellen, in ieder geval voor fosfaat, onbruikbaar of onpractisch. Met stochastische theorie (kansberekening) kan het gedrag op deze schaal zichtbaar gemaakt worden. Hierbij wordt informatie verloren t.a.v. transport op een bepaalde plaats, maar kan het gedrag van het hele systeem voor wat betreft P-transport gekarakteriseerd worden.

Doorgaans is de respons van het hele systeem van groter praktisch belang. Op grond van vereenvoudigingen betreffende de complexe P-vastleggingschemie en de interactie tussen vastleggingsprocessen en transport op lokale (kolom) schaal, kan het profiel van P-verzadiging uitgedrukt worden in termen van cumulatieve P-overdosering ( $A_T$ ), reactiviteit ( $F_T$ ) en water percolatie snelheid ( $v$ ). Hierbij kunnen  $A_T$  en  $F_T$  voor een gegeven tijd (moment van monstername) uitgedrukt worden in een eenvoudig meetbare bodemeigenschappen. Deze bodemeigenschappen (en dus  $A_T$  en  $F_T$ ) kunnen met een frequentieverdeling ( $f$ ) gekarakteriseerd worden. Gebruikmakend van kansberekening (veronderstelling stationariteit en ergodiciteit) wordt het gemiddelde profiel van P voor een perceel of stroomgebied gegeven als functie van  $f_{A_T}$  en  $f_{F_T}$ . Numeriek of analytisch kan het gemiddelde profiel berekend worden en waarnemingen blijken hierdoor goed beschreven te worden.

Op grond van veronderstellingen t.a.v. de periode van overdoseringen leidend tot  $A_T$ , de mate van correlatie tussen afzonderlijke overdoseringen, trends in de omvang van overdoseringen in de tijd, etc. kunnen voorspellingen uitgevoerd worden over de ontwikkeling van het P-profiel.

Parameteranalyse geeft aan dat de 'veld'dispersie toeneemt met de variabiliteit van het bodemsysteem en van de P-overdosering. De aanwezigheid van een trend in bijv.  $A_T$  en  $F_T$  dient herkend en in rekening gebracht te worden indien het doel de voorspelling van P-transport is. Dit vanwege de in zo'n geval mogelijke tijdsafhankelijke correlatie, die een groot effect op de vorm van het profiel heeft.

Momenteel worden desorptie, heterogeniteit in de diepte opgenomen in het model. In een later stadium kunnen mogelijk ook geostatistische technieken gebruikt worden, aangezien de positie ten opzichte van oppervlakkige afwatering van belang is in gebieden met significante trends.

## Publicaties:

1. Van der Zee & Van Riemsdijk, 1986. Transport of phosphate in a heterogeneous field. Transport in Porous Media (accepted for publication).
2. Van Riemsdijk, Van der Zee, Lexmond en De Haan, 1985. Fosfaatbelasting van de bodem in het Dommeldal. Bedrijfsontwikkeling 5, p. 175-179.
3. Van der Zee, Van Riemsdijk en De Haan, 1986. Fosfaatuitspoeling naar het grondwater. Meststoffen (1986).

## ONDERZOEK HUPSEL

J.N.M. Stricker

Landbouw Universiteit Wageningen

## Probleemstelling

In modellen van de simulatie van verzadigde en onverzadigde grondwaterstroming dienen te allen tijde numerieke waarden te worden toegekend aan diverse fysische grootheden en parameters.

Hoe kennen we deze waarden zo verantwoordelijk mogelijk toe, indien grootheden en parameters ruimtelijk variëren ? Hoe kunnen we het beste bemonsteren in het veld om de ruimtelijke variabiliteit te karakteriseren ?

## Toelichting keuzetechniek

- veldbodemkundig onderzoek;
- veldbodemfysisch onderzoek op drie verschillende ruimtelijke schalen;
- deterministisch-stochastische modelaanpak.

## Uitwerking van de resultaten

- geostatistische verwerking van het veldbodemkundig onderzoek;
- toepassing van scaling-technieken ter reductie van de variabiliteit;
- simulaties met SWATRE-model; om de invloed van ruimtelijke variabiliteit van parameters op de gesimuleerde waterbalans te evalueren;
- bestudering van de samenhang tussen veldbodemkundige parameters, de pF-curve en de doorlatendheidscurve. Mogelijkheden van toepassing van co-kriging.

## Problemen

- hoe goed zijn onze meettechnieken ?
- hoe brengen we variabiliteit in de modellen ?

## Toekomstperspectief/advies

Eerst maar eens de resultaten van het lopende onderzoek afwachten.

# HET VERVAARDIGEN VAN EEN VOORSPELLENDE SINGLE VALUE KAART IN EEN GEBIED IN NOORD-DRENTHE

A. Stein

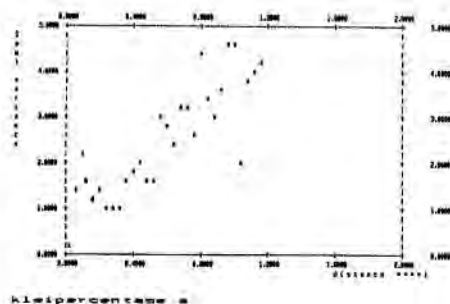
Landbouwwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Bodemkunde en Geologie

## Keuzetechniek

Bij het vervaardigen van een voorspellende bodemkaart voor een variabele is het noodzaak rekening te houden met ruimtelijke afhankelijkheid van de verschillende waarnemingen. Waarnemingen aan de desbetreffende variabele kunnen beschouwd worden als realisaties van een intrinsieke stochastische functie (Corsten, 1985). De ruimtelijke afhankelijkheid van de variabele wordt tot uitdrukking gebracht via een ruimtelijke covariantiefunctie of een gegeneraliseerde covariantiefunctie, horende bij de intrinsieke stochastische functie van een zekere orde (b.v. het semi-variogram). Het uitvoeren van een voorspelling is daarmee een bijzonder geval geworden van het algemene Gauss-Markov model (Searle, 1971). De variantie van de voorspelfout kan nu tevens bepaald worden.

## Resultaten

Uitgegaan is van de diepte tot boorweerstand, een variabele die in het betreffende gebied met de vele kleileemopduikingen met name interessant was. Hierbij werd geen trend verondersteld, d.w.z. de variabele 'diepte tot boorweerstand' kan gezien worden als een intrinsieke stochastische functie van orde 0. Hierbij hoort een gegeneraliseerde covariantiefunctie, nl. het semi-variogram.



Symbol code  
 \* = Number of observations less than 10  
 + = Number of observations greater than 10  
 x = Number of observations greater than 20  
 . = Number of observations greater than 30



Grid dimensions

Minimum X = 226.00  
 Maximum X = 246.00  
 Minimum Y = 344.00  
 Maximum Y = 572.00

| CODE  | LIMIT | CELLS | SUM CELLS |
|-------|-------|-------|-----------|
| 0.00  | 8     | 0     | 0         |
| 2.00  | 562   | 562   |           |
| 4.00  | 1360  | 1360  |           |
| 6.00  | 278   | 278   |           |
| 10.00 | 307   | 307   |           |
| 20.00 | 32    | 32    |           |
| 30.00 | 16    | 16    |           |

Number of missing values = 3261

### Problemen

Het grootste probleem bestaat uit het vinden van een adequate manier om de graad van de trend te bepalen, en de daarbij horende coëfficiënten, terwijl het niet mogelijk is tegelijkertijd de juiste vorm van de gegeneraliseerde covariantiefunctie te hanteren, immers: deze hangt af van de graad van de trend.

### Toekomstperspectief

Een dergelijke aanpak maakt het mogelijk om een aantal problemen te benaderen die op dit moment aan de orde zijn. Zo is het mogelijk om het Co-krigen op gelijke manier te benaderen, en lijkt het mogelijk om met fuzzy data een voorspelling uit te voeren. De modelbenadering biedt bovendien de mogelijkheid op meer terreinen toegepast te worden dan alleen de bodemkunde, namelijk op ieder terrein waar sprake is van afhankelijke waarnemingen.

### Referenties

- Corsten, L.C.A., 1985. Current statistical issues in agricultural research. *Statistica Neerlandica*, vol. 39, pp. 159-168.  
Searle, S.R., 1971. *Linear Models*, Wiley, New York.

## INTERPOLATIE DOOR KRIGING

L.C.A. Corsten

Landbouwuniversiteit Wageningen, Vakgroep Wiskunde

Interpolatie door kriging is niet een schattingsprocedure, maar lever op grond van n metingen onder zekere veronderstellingen optimale lineaire voorspellingen d.w.z. zonder systematische fout en met minimale variantie. Die veronderstellingen zijn in hun meest vergaande vorm:

- 1 de verwachting van een kenmerk in b.v. een twee-dimensionaal gebied is een veelterm in de coördinaten van elk punt, tot een bepaalde graad k;
- 2 de covariantie tussen de waarden in punt A resp. B is slechts afhankelijk van de afstand r tussen A en B volgens een gegeven functie  $c(r)$ , het covariogram.

De voorspelling  $t$  in een willekeurig punt  $P$  is de som van twee termen, namelijk de schatting van de verwachting in  $P$  en een lineaire combinatie van de  $n$  residuen bij het schatten van de verwachtingen  $X\beta$  in de  $n$  waarnemingspunten  $y$ . De verwachting in  $P$  is van de vorm  $x_0'\beta$ , waarin  $x_0$  de waarden van de regressoren t.g.v. het regressiemodel bevat en  $\beta$  uit de waarnemingen geschat wordt volgens "generalised least squares", d.w.z. als  $\beta = (X'C^{-1}X)^{-1}X'C^{-1}y$ . Elk element  $c_{ij}$  van de vierkante matrix  $C$  is gelijk aan de covariantie tussen de  $i$ -de en de  $j$ -de waarneming in  $y$ , af te lezen uit het covariogram. De  $n$  residuen  $r_i$  vormen te zamen  $r = y - X\beta$  en de tweede term is nu  $b'r$  met  $b = C^{-1}c_0$ , waarin  $c_0$  de covarianties tussen  $P$  en de  $n$  waarnemingspunten bevat. Dus  $t = x_0'\beta + b'r$ .

De variantie van  $t$  is  $c(0) - c_0' C^{-1} c_0 + x_0'(X'C^{-1}X)^{-1}x_0$ , waarin  $c(0)$  de variantie in  $P$  voorstelt en  $x_0 = x_0' - b'X$ , de z.g. aangepaste regressoren in  $P$ .

In het algemeen is  $c(r)$  echter niet bekend, evenmin als de graad  $k$ . In plaats van  $c(r)$  gebruikt men dan een gegeneraliseerd covariogram  $g(r)$ , dat geldige varianties levert voor aangroeiingen van orde  $k+1$ , dat zijn lineaire combinaties  $\lambda'y$  met  $\lambda'X = 0$  en dus ook met verwachting nul. De variantie van  $\lambda'y$  is dan  $\lambda'G\lambda$ ; elk element  $g_{ij}$  van  $G$  is nu de gegeneraliseerde covariantie tussen  $y_i$  en  $y_j$ , af te lezen uit  $g(r)$ . In  $g(r)$ , die een veelterm is in oneven machten van  $n$  ten hoogste van graad  $2k+1$ , plus eventueel een discontinuïteit in  $r = 0$ , schat men de  $k + 1$  coëfficiënten met behulp van waarnemingen van de voorspelfouten in een waarnemingspunt door de voorspelling op grond van andere waarnemingen; zulke waargenomen fouten zijn bij elke  $k$  tevens aangroeiingen van orde  $k + 1$ , en de verwachting van het kwadraat ervan is een variantie, lineair in de gezochte parameters. Bij de schatting van de parameters neemt men zekere ongelijkheden in acht, die zullen garanderen dat de variantie van aangroeiingen van orde  $k + 1$  inderdaad niet-negatief is.

Bij gebrek aan beter werkt men bij het bepalen van voorspellingen t.b.v. voorspelfouten eerst met  $g(r)$  en verbetert vervolgens de schatting van  $g(r)$  stapsgewijze. De parameter  $k$  kiest men zo dat bedoelde voorspelfouten in de een of andere zin het kleinst zijn.

Na de definitieve vaststelling van  $k$  en  $g(r)$  onder uitsluiting van de invloed van de verwachting (trend) verloopt de voorspellingswijze als tevoren, mits  $g(r)$  steeds in de plaats treedt van  $c(r)$ . Opgemerkt wordt dat bij  $k = 0$  (geen trend) gewerkt wordt met eerste-orde aangroeiingen (b.v.  $y_1 - y_2$ ) en dat  $-g(r)$  dan op een constante term na gelijk is aan het z.g. semivariogram.

Interpolatie door kriging is geen schattingsmethode, maar een op regressie-analyse berustend voorspellingsproces met behulp van een gegeneraliserende covariantiefunctie, die ongevoelig is voor optredende trend.

Literatuur:

- Corsten, L.C.A. (1985, Current statistical issue in agricultural research, *Statistica Neerlandica* 39 159-168.
- Matheron, G (1981), The theory of regionalized variables and its applications, *Les cahiers du centre de morphologie mathématique*, Fontainebleau, France.
- Matheron, G. (1973), The intrinsic random functions and their applications, *Advances in applied probability* 5 439-468.

## REGIONALISATION OF HYDROGEOLOGICAL SUBSYSTEMS

E. Seyhan

Vrije Universiteit Amsterdam

The increasing need for water, has stimulated the necessity of having an improved insight into the dynamics of catchment storage. In order to identify and trace the origin and age of water bodies, their space and time variability are investigated by a number of methods with a view to regionalising the data and hence defining the hydrogeological environment.

Project responsible authorities and brief projects' description within the department of Hydrogeology and Geographical Hydrology, Institute of Earth Sciences, Free University, Amsterdam:

- 1 Dr Ir E. Seyhan  
Drs M. Hendriks  
Drs P. Nienhuis  
(various student assistants):  
+ Multivariate statistical analyses (Factor, cluster, discriminant, canonical correlation analyses)  
+ Geostatistical techniques (Punctual, block, cokriging, etc.)  
+ Stochastic analysis (Several models)

Applied at: North Italy (Dolomites)  
South Italy (Calabria)  
South Portugal (Algarve)  
Ireland  
South Africa  
Luxembourg  
Loosdrecht Lakes, Holland  
Holland (several)  
Indonesia (Java)  
USA (23 states)  
Germany  
Turkey

Comments: Results of the multivariate statistical and stochastic analyses (using hydrochemical data) and hydromorphometrical classification (using land surface physical and hydrochemical variables) are found to be in close agreement with traditional techniques used to differentiate hydrogeological units. Initial applications of geostatistical techniques (using hydrochemical and soil moisture data) have so far shown that their application in hydrogeological groundwater resources evaluation is limited and care should be taken. Applied research is still continuing.

- 2 Prof Dr G.B. Engelen  
 Dr Ir E Seyhan  
 Dr A.A. van de Griend  
 Drs R. Allewein  
 (15-22 M.Sc. students):

Regionalisation and mapping of hydrogeological units based on short period (6-8 weeks) field reconnaissance surveys with none or limited field hydrological equipment

Applied at: North Italy (Dolomites)

Comments: Results (based on geological, geomorphological, hydrological and hydrochemical surveys) have been most successful and of practical value.

- 3 Prof. Dr I. Simmers  
 Dr Ir E. Seyhan  
 Drs M. Hendriks  
 (2-4 M.Sc. students):

Problem and scale oriented regionalisation of hydrogeological responses using distributed and semi-distributed models

Applied at: Luxembourg

Comments: A scale study of variables for hydrogeological regionalisation is completed. Several methods have been tested and the autocorrelation approach is found to be the most suitable. Several models (Danish, Australian and VU) are being tested (using data on land surface physical and hydrological variables) for regionalisation.

Applied research is still continuing.

- 4 Dr A.A. van de Griend  
 Dr Ir E. Seyhan  
 Prof. Dr G.B. Engelen  
 Drs R. Allewein  
 (1-3 M.Sc. students):

Remote sensing hydrogeological regionalisation of variable source areas and modelling of hydrogeological responses

Applied at: North Italy (Dolomites)

USA

To be applied at: Portugal (Algarve)

Botswana

Indonesia

Comments: The applied research is still continuing. Satellite images are being used to classify the terrain at different wave lengths (thermal infrared, microwave, etc.) in order to outline the variable source areas and estimate the hydrological responses using a distributed parameter model.

- 5 Prof. Dr G.B. Engelen  
Drs G. van der Kolff  
(7-14 M.Sc. students):

Regionalisation of hydrogeological units based on system  
analyses approach

Applied at: Holland

Comments: The applied research is still continuing. Initial work has shown that groundwater hydrochemistry and terrain information are most valuable in defining the hydrogeological behaviour of a region by system analyses.

# ONDERZOEK NAAR DE GEOHYDROLOGISCHE EIGENSCHAPPEN VAN HET GOOI EN NAAR DE RELATIE BODENGEBRUIK-GRONDWATERKWALITEIT

M.C.H. Witmer

Rijks Universiteit Utrecht

## I Geohydrologische eigenschappen

### Probleemstelling

Ten behoeve van een regionale modelstudie van het grondwatersysteem in het Gooi en de Vechtstreek, dienden per km<sup>2</sup>-vak waarden opgegeven te worden van de horizontale doorlatendheid van de watervoerende pakketten en de verticale hydraulische weerstand van eventueel aanwezige scheidende lagen in de stuwwal "het Gooi".

### Methode en resultaten

Beschikbaar waren lithologische beschrijvingen van boringen, literatuur over de stuwingsfasen tijdens de vorming van het Gooi, resultaten van twee pompproeven en met de hand getekende isohypsenkaarten van het eerste watervoerende pakket in diverse perioden waarin de hoeveelheden onttrokken grondwater door o.a. drinkwaterleidingmaatschappijen varieerden. In het diepere watervoerende pakket bestond slechts een tiental waarnemingspunten van de stijghoogte.

Na een analyse van de beschikbare gegevens zijn theorieën opgesteld over de mogelijke variatie in geohydrologische gebiedseigenschappen en deze theorieën zijn getest m.b.v. modelberekeningen. De pompproefresultaten en lithologische boorbeschrijvingen leverden de startwaarden van de horizontale doorlatendheid (formule van Ernst). In een gestuwd pakket mogen kleilagen die zijn aangetroffen in boringen niet zonder meer met elkaar worden verbonden. De lithologische boorbeschrijvingen zijn geturfd op het voorkomen van kleilagen in verschillende diepte-intervallen. Tussen -60 en -70 m NAP werd in het oostelijke deel van de stuwwal in 65% van de boringen een kleilaag aangetroffen, in het westelijke deel slechts 20% van de boringen. Het oostelijke deel van de stuwwal is vermoedelijk pas in een later stadium gevormd dan het westelijke deel. De resultaten van een pompproef in het oostelijke deel deden de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag op ca. -50 m NAP vermoeden, in het westelijke deel toonde een pompproef geen scheidende laag aan. Bij toenemende grondwateronttrekkingen in het midden van het Gooi nam de gradiënt in de stijghoogten in het oostelijke deel toe, maar breidde de onttrekkingskegel zich niet naar het oosten uit.

Op grond van bovenstaande gegevens zijn vier theorieën opgesteld over de ruimtelijke variatie in geohydrologische eigenschappen van het Gooi: het bovenste pakket is geheel isotoop of het bovenste pakket is in het oostelijke deel anisotoop parallel aan de richting van de stuwings, gecombineerd met wel of geen scheidende laag op ca. -60 m NAP in het oostelijke deel. Deze theorieën zijn getest met modelsimulaties. De combinatie anisotropie met een scheidende laag gaf resultaten die het gemeten stijghoogtepatroon het beste benaderden.

### Discussie

De beoordeling of het berekende isohypsenpatroon het gemeten patroon benaderde was subjectief en kon niet worden onderbouwd met betrouwbaarheidsintervallen. Kriging kon niet worden toegepast, omdat de isohypsen sterk waren beïnvloed door de grondwateronttrekkingen. Overeenkomst tussen gemeten en met een model berekende stijghoogten is geen bewijs voor de juistheid van een theorie, alleen een aanwijzing.

Toch lijkt de aanpak perspectieven te bieden, waarbij kennis over geologische ontstaansgeschiedenis en lithologie van het gebied wordt gecombineerd met modelsimulaties en zo mogelijk een statistische analyse van de grondwaterstijghoogten. Het is zinvol om resultaten die met verschillende methoden zijn verkregen te combineren, naast het verder ontwikkelen van afzonderlijke technieken.

Literatuur van deze case-studie is nog in voorbereiding.

## II Grondwaterkwaliteit

### Probleemstelling

Er wordt gewerkt aan een historisch overzicht d.m.v. kaarten van activiteiten in het Gooi, die potentieel bodemreinigend zijn (waren) voor de kwaliteit van het grondwater. Daarnaast is er een bestand gemaakt van alle analysegegevens van grondwatermonsters die ooit in het Gooi genomen zijn. De analyses zijn uitgevoerd door verschillende laboratoria, de monsters zijn genomen op verschillende tijdstippen na verschillende afpompsduur uit buizen met filters op verschillende diepten en met verschillende filterlengten.

Kan dit gegevensbestand inzicht geven in de ruimtelijke variabiliteit van de grondwaterkwaliteit? Is er een koppeling mogelijk met de gegevens van potentieel bedreigende activiteiten?

### Methode

Het gegevensbestand van de grondwaterkwaliteit is gecorrigeerd voor verschillen in analysemethoden (voor zover bekend en mogelijk). Er zijn kaarten getekend van ionenconcentraties in verschillende tijds- en diepteintervallen (voorlopig alleen  $\text{Cl}^-$  en  $\text{NO}_3^-$ ; voor een volledig ionendiagram ontbreken vaak de gegevens). Deze kaarten worden gecombineerd met kaarten van stromingsrichtingen.

De resultaten zijn vooralsnog slecht bruikbaar omdat de gegevens zowel ruimtelijk als in de tijd niet goed verspreid zijn. Een bezinning over de verdere verwerking vindt nu plaats.

### Discussie

Ruimtelijke variabiliteit van grondwaterkwaliteit betreft variaties in het horizontale vlak en diepte. Daarnaast verandert het patroon in de tijd o.i.v. hydrologische en chemische processen. Grenzen tussen waterlichamen met verschillende kwaliteiten zijn vaak scherp. Interpolatietechnieken voldoen niet. Het huidige gegevensbestand dat is samengesteld uit analysegegevens van ad hoc waarnemingen en monsters waarvan de representativiteit niet bekend is, geeft weinig inzicht in de ruimtelijke variabiliteit. Door de monstertechniek (vaak lange filters) wordt eigenlijk een mengmonster genomen; de herkomst en onderlinge verhouding van de bijdragende eenheden variëren en zijn vaak niet bekend.

Moet naast een bezinning over de technieken voor de verwerking van gegevens ook niet worden nagedacht over het opbouwen van een gegevensbestand van de grondwaterkwaliteit, te beginnen in een proefgebied, waarbij aandacht wordt besteed aan variatie over de verticaal en scherpe grenzen tussen eenheden met verschillende kwaliteit?

### Literatuur

- Parker, J.M. et al, 1983. Groundwater quality stratification - its relevance to sampling strategy. Proc. MIIGS Symp. Noordwijkerhout, May 1983, pp. 43-54.
- Parker, J.M. and S.S.D. Foster, 1986. Groundwater monitoring for early warning of diffuse pollution. IAHS Publication no 157, pp. 37-46.

EEN VOORBEELD VAN DE TOEPASBAARHEID VAN KLASSIEKE STATISTISCHE METHODEN BIJ DE  
ANALYSE VAN RUIMTELIJKE VARIATIE:  
VARIANTIE- EN REGRESSIE-ANALYSE ALS HULPMIDDEL BIJ EEN BODEMKWALITEITSMETNET

J.W. de Kwaadsteniet

RIVM, Laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek,

In Nederland bestaat al meerdere jaren een luchtmeetnet, een grondwaterkwali-  
teitsmeetnet en een regenwatermeetnet. Een bodemmeetnet dat de ontbrekende  
schakel vormt in deze reeks is er nog niet. Een dergelijk meetnet zou o.a. tot  
doel moeten hebben de veranderingen in de tijd (trends) van de gehalten  
verontreinigende stoffen in de bodem te kwantificeren in afhankelijkheid van  
grondsoort, bodemgebruik en belastingsintensiteit.

De opzet van een dergelijk bodemmeetnet is jarenlang tegengehouden vanuit de  
mening dat het optredende verontreinigingsniveau bij diffuse verontreiniging  
niet detecteerbaar is tegen de achtergrondruis veroorzaakt door de ruimtelijke  
variabiliteit die in bodemmateriaal aanwezig is. Uiteindelijk werd voorafgaand  
aan een definitieve besluitvorming over een bodemmeetnet tot een "ruisonder-  
zoek" besloten. Achteraf kunnen we stellen dat de oorspronkelijke mening voor  
een belangrijk deel het resultaat was van onbekendheid met het hanteren van  
ruisinformatie. Een onbekendheid die rechtstreeks voortvloeit uit het feit dat  
men in (klassieke) fysica, chemie en techniek in belangrijke mate in deter-  
ministische kwantificering en modelvorming wordt opgevoerd onder voorbijgaan  
van ruisanalyses en de informatierijkdom die daarin over het onderzochte  
verschijnsel nog aanwezig kan zijn.

Het merendeel van de krachtige ruisanalysetechnieken (= statistiek) werd  
ontwikkeld ten behoeve van andere disciplines (met name de biologie, de  
medische wetenschappen en de economie), waar de kwantificering van de grote  
mate van ruis in de verschijnselen een noodzakelijke voorwaarde is voor het  
genereren van kwantitatieve uitspraken over de verschijnselen. Het blijft  
echter verwonderlijk dat de overvloed van de over meer dan een halve eeuw  
ontwikkelde, algemeen bruikbare statistische technieken naar verhouding mond-  
jesmaat in de fysica en het fysisch denken wordt toegepast.

Het hoeft na het voorafgaande weinig verbazing meer te wekken dat de variaties  
in de gehalten van verontreinigde stoffen die in het vooronderzoek in bodem-  
materiaal gevonden werden, gering zijn t.o.v. de variaties die men in bio-  
logische populaties kan tegenkomen. Het ligt dan ook voor de hand dat er reeds  
volop goede statistische methoden voorhanden zijn voor de bewerking en inter-  
pretatie van gegevens uit een bodemmeetnet. Een klassiek, centraal staand  
statistisch analyseapparaat wordt gevormd door de Variantie- en Regressie-  
analyse. Aansluitend bij de mogelijkheden die dit analyseapparaat biedt en de  
resultaten uit het vooronderzoek wordt op korte termijn de opzet van een  
kleinschalig bodemmeetnet nagestreefd bestaande uit een 40-tal meetpunten  
(meetpunt = terrein van  $25 \times 25 \text{ m}^2$ ), waarbij elk meetpunt eens per twee jaar  
op twee dieptes zal worden bemonsterd, met 4 onafhankelijke monsters op elk  
van de twee dieptes. Voor elk van de monsters zullen de gehalten van een  
zestel zware metalen en enige organische verbindingen worden bepaald. De  
waarnemingen aan de verschillende monsters van een proefplek zullen informatie  
geven over de eerste variatiecomponent: de variatie per locatie.

Met het oog op efficiënte statistische analysemogelijkheden en de mogelijkheden tot generaliseren van de conclusies is het essentieel dat het meetnet ook informatie levert over een tweede variatiecomponent: de variatie tussen soortgelijke locaties. Daartoe zullen de 40 meetpunten zo gekozen worden dat telkens 4-tallen meetpunten min of meer overeenkomen wat betreft bodemtype, bodemgebruik en belastingsintensiteit. Er wordt daarbij gewerkt met een indeling van de bodem gebaseerd op 4 bodemtypen, 4 typen bodemgebruik en 2 belastingsintensiteiten. Van de  $4 \times 4 \times 2 = 32$  volgens deze indeling te onderscheiden locatiesoorten kunnen er dus maar 10 in het klein opgezette meetnet voorkomen omdat elke locatiesoort in 4-voud in het meetnet zal worden vertegenwoordigd (i.v.m. info over de variatie tussen soortgelijke locaties). Voorts zullen de 40 meetpunten zo worden gekozen dat zij voor een belangrijk deel gelegen zijn in de onmiddellijke omgeving van de bestaande geïntegreerde meetpunten t.a.v. de kwaliteit van de lucht, regenwater en grondwater teneinde de mogelijkheden te optimaliseren tot het doen van uitspraken omtrent de relaties tussen verontreinigingen in de verschillende milieucompartmenten.

#### Literatuur

- F. Riem Vis, W. van Driel en J. Wolf. "Mogelijkheden voor de meting van accumulatie van zware metalen in de bovengrond door periodieke analyse". Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Haren (Gr.), Rapport 7-84 (1984) 27 pp.
- J.W. de Kwaadsteniet. Enige statistische kanttekeningen bij (1). RIVM, Laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek, LBG-84-84 (1984) 12 pp.
- O.J. Dunn en V.A. Clark. Applied Statistics: Analysis of Variance and Regression. Wiley, New York, 1974, 387 pp.

# ONDERZOEK NAAR DE RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN HET MESTSTOFFEN GEHALTE VAN HET BOVENSTE GRONDWATER IN DE PROVINCIE UTRECHT.

W. Bleuten

Rijksuniversiteit Utrecht

## Probleemstelling

Ten behoeve van de regelgeving binnen de nieuwe wetgeving m.b.t. het mestgebruik en de bodembescherming is inzicht vereist in de ruimtelijke variatie van de gehalten meststoffen in bodem en grondwater. Vraag is daarbij welke relaties er bestaan tussen mestdosering per landgebruikstype en grondwaterkwaliteit en in hoeverre deze relaties beïnvloed worden door de ruimtelijke variaties in bodemsoort over een groot gebied.

## Methode

Van ruim 300 percelen, verspreid over de gehele provincie Utrecht is in voor- en najaar (1985) het bovenste grondwater bemonsterd. De locaties omvatten een naar verwachting representatieve serie (gestratificeerd a-selectie) steekproeven van het totale areaal natuur, gras- en bouwland per bodemsoort, grondwaterdiepte en bemestingsintensiteit (berekende mestoverschotten per gemeente).

## Resultaten

De hoogste gemiddelde nitraatbelasting van het bovenste grondwater wordt aangetroffen onder bouwland en zandgrond (275 mg NO<sub>3</sub>/l), bij weide op zand (105) en bouwland op kleigrond (95). De overige combinaties hebben waarden lager dan 15 mg NO<sub>3</sub>/l. Uit de grote spreiding van de waarden voor de cultuurgronden - overal komen waarden voor van minder dan 5 mg - kan worden afgeleid dat de invloed van de bemesting domineert over die van bodemverschillen. De maximale waarden echter zijn bij de zandgronden 3 x hoger dan van de kleigronden en 30 x hoger dan de veengronden als gevolg van denitrificatieverschillen. De gemiddelde belasting van het grondwater met fosfaat is alleen in de combinatie "veen-natuur" duidelijk verhoogd, waarschijnlijk als gevolg van het "sink"-karakter van de kleine natuurterreinen in het veengebied. In een aantal gevallen zijn in het zand-cultuurgebied verhoogde fosfaatconcentraties aangetroffen (>7 mg o-PO<sub>4</sub>/l), mogelijk als gevolg van de plaatselijk sterk gereduceerde fosfaatsorbtiecapaciteit.

## Problemen

Het ontbreken van perceelgegevens van de bemestingsgeschiedenis bemoeilijkt de verdere gedetailleerde uitwerking die eigenlijk nodig is voor koppeling met bodemeigenschappen. Het aantal bemonsteringen is nog te gering om het effect van lokale grondwaterstroming te elimineren, waardoor soms de gemiddelden te hoog (natuur) of te laag kunnen zijn (cultuur).

# RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN ZWARE METALENGEHALTEN IN OEVERGRONDEN

M.C. Rang

Bureau Bodem en Water  
Provinciale Waterstaat in Limburg

Vakgroep Fysische Geografie  
Rijksuniversiteit Utrecht

Gronden langs de grote rivieren die regelmatig geïnundeerd worden, kunnen in hoge mate verontreinigd zijn met zware metalen en synthetische organische verbindingen. De oorzaak van deze verontreiniging moet hoofdzakelijk gezocht worden in de depositie van verontreinigde sedimenten gedurende overstromingen. Het zware metalengehalte van de bodem vertoont over het algemeen een grote ruimtelijke variabiliteit. Deze ruimtelijke variabiliteit hangt samen met verschillen in moedermateriaal en verschillen in toe- en afvoer van zware metalen. De ruimtelijke variabiliteit van de zware metalengehalten in oevergronden wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door verschillen in toevoer. Zoals gezegd vindt de toevoer van zware metalen naar de bodem plaats door sedimentatie van verontreinigd slib. De ruimtelijke variatie in de mate van sedimentatie en de samenstelling van dit slib bepaald dus in hoofdzaak de ruimtelijke variabiliteit in de mate van verontreiniging van de oevergronden. Eerstgenoemde variabelen zijn door middel van klassieke geomorfologische en bodemkundige veldtechnieken in kaart te brengen. Wanneer nu per gekarteerde, min of meer homogene geomorfologische of bodemkundige eenheid steekproefgewijs het gehalte aan zware metalen bepaald wordt, is op grond van de vervaardigde kaarten een accurate interpolatie van deze puntwaarnemingen naar kaartvlakken mogelijk. Voorwaarde hierbij is wel dat de relatie tussen geomorfologische en bodemkundige karakteristieken inderdaad bestaat. Teneinde het bestaan van bovengenoemde relatie vast te stellen is in een sleutelgebiedje in het Maasdal ten noorden van Maasstricht een case-study verricht. Hierbij is een veld- en literatuuronderzoek verricht naar de overstromingsfrequentie, de mate van sedimentatie sinds de industriële revolutie, het kalkgehalte van de bodem en de mate van bodemontwikkeling. Voor het in kaart brengen van laatstgenoemde variabele is zowel gebruik gemaakt van het Nederlandse, als van het Duitse systeem voor bodemklassificatie. Vervolgens zijn op min of meer systematische wijze circa 150 monsters genomen van de top laag van de bodem. Deze monsters zijn geanalyseerd op hun gehalte aan zink, lood, cadmium, koper, cobalt, nikkel en chroom. Het bleek dat de zware metalen gehalten positief gecorreleerd waren aan de overstromingsfrequentie, het kalkgehalte en de mate van recente sedimentatie (zie tabel 1).

TABEL 1 Correlatie tussen het zware metalengehalte en enkele geomorfologische en bodemkundige karakteristieken

| metal | mean<br>(mg/kg) | s.d. | backgrnd<br>conc. | c.c. with<br>inundation<br>frequency | c.c. with<br>carbonate<br>content | c.c. with<br>thickness<br>of recent<br>deposits |
|-------|-----------------|------|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|
| Zn    | 640             | 530  | 90                | 0.47                                 | 0.62                              | 0.72                                            |
| Cd    | 5.5             | 5.2  | 1                 | 0.61                                 | 0.80                              | 0.89                                            |
| Cu    | 48              | 36   | 15                | 0.58                                 | 0.78                              | 0.84                                            |
| Pb    | 170             | 130  | 34                | 0.62                                 | 0.69                              | 0.77                                            |
| Co    | 18              | 4    | 10                | 0.48                                 | 0.37                              | 0.38                                            |
| Ni    | 33              | 6    | 16                | 0.63                                 | 0.58                              | 0.63                                            |
| Cr    | 46              | 21   | 21                | 0.42                                 | 0.40                              | 0.51                                            |

De correlatie bleek het sterkst voor de metalen waarvan het gehalte het sterkst afweek van de verwachte achtergrondconcentratie, te weten Zn, Cd, Pb en Cu. (N.B. De achtergrondconcentratie is bepaald door een dertigtal monsters te nemen van nabij gelegen, niet alluviale bodems). Omdat bij de overige metalen kennelijk geen sprake is van een beduidende toename in concentratie kunnen deze verder buiten beschouwing blijven. Voorts blijkt dat met name de mate van sedimentatie sinds de industriële revolutie een indicatie geeft van de mate van verontreiniging.

Vervolgens is nagegaan wat het percentage verklaarde variantie is bij de op grond van de verschillende variabelen gegroepeerde data. Voor de berekening hiervan is gebruik gemaakt van een simpele one-way anova. In tabel 2 zijn de resultaten van de berekening weergegeven.

TABEL 2 Verklaarde variantie van de gegroepeerde data

| Metal | German system | Dutch system | Carbonate content | Inundation frequency | Thickness of recent sediment |
|-------|---------------|--------------|-------------------|----------------------|------------------------------|
| Zn    | 0.57          | 0.32         | 0.52              | 0.46                 | 0.54                         |
| Cd    | 0.80          | 0.54         | 0.70              | 0.55                 | 0.79                         |
| Cu    | 0.73          | 0.50         | 0.62              | 0.36                 | 0.70                         |
| Pb    | 0.70          | 0.48         | 0.66              | 0.56                 | 0.71                         |

Uit tabel 2 blijkt dat 80% van de ruimtelijke variatie in het cadmiumgehalte en ruim 70% van de variantie van de lood- en kopergehalten verklaard kan worden op grond van eenvoudig vast te stellen bodemkundige en geomorfologische karakteristieken. Dergelijke percentages verklaarde variantie zijn bijzonder hoog. Beckett and Burrough (1971) hebben aangetoond dat de bodemklassificatie van de Soil Survey van Engeland en Wales 6 tot 80% van de variantie in de chemische en fysische eigenschappen van bodems in de Midlands verklaarden. De mediane waarde van de verklaarde variantie bedroeg slechts 40%. Yost and Fox (1981) publiceerden resultaten die aangaven dat de U.S.D.A. Soil Taxonomy bij vulkanische bodems op Hawaii 50 tot 60% van de variantie in chemische eigenschappen verklaarde.

Bij gebruikmaking van het (aangepaste) Duitse systeem voor bodemklassificatie wordt in het onderzoeksgebied gemiddeld 70% van de variantie in de gehalten aan Zn, Cd, Cu en Pb verklaard.

#### Referenties

- Rang, M.C., C.E. Kleijn en C.J. Schouten, (1985). "Bodemverontreiniging met zware metalen in het winterbed van de Maas". K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift XIX, nr 5.
- Rang, M.C., C.E. Kleijn en C.J. Schouten, (in press). "Mapping of soil pollution by application of geomorphological and pedological field-techniques". Proceedings of the First International Conference on Geomorphology, Manchester, July 1985, John Wiley Press.

# STECKPROEFMETHODE VOOR BEMONSTERING VAN KAARTENHEDEN OP BODEMKAARTEN

B.A. Marsman

J.J. de Gruijter

Stichting voor Bodemkartering, Wageningen

Instituut voor Toegepaste Informatica TNO

## Probleemstelling

Informatie bij bodemkaarten is nog grotendeels gebaseerd op de subjectieve oordelen van veldbodemkundigen. Gegevens over de variabiliteit van de bodemeigenschappen zijn doorgaans zeer summier, terwijl informatie over de betrouwbaarheid ontbreekt. Gebruikers van bodemkaarten zijn meestal aangewezen op de gegevens van standaardprofielen of referentieprofielen.

Er is een toenemende behoefte aan statistisch betrouwbare informatie over de bodemeigenschappen van kaartenheden. Om hieraan te kunnen voldoen is een bemonsteringsmethode ontwikkeld waarbij informatie wordt verzameld via getrapte clustersteekproeven.

## Opzet van de steekproefmethode

1e trap: kaartvlakken behorende tot de te bemonsteren kaartenheid worden geloot met kansen evenredig aan hun oppervlak.

2e trap: in elk van de gelote kaartvlakken worden één of meer clusters van punten geloot met kansen evenredig aan het aantal punten in de clusters.

Deze methode leidt tot eenvoudige B.L.U.E. schatters, zonder te steunen op (vaak discutabele) veronderstellingen omtrent de ruimtelijke variatie.

Resultaten van de steekproefmethode, uitgevoerd als aselechte raaien, voor een kaartenheid van de bodemkaart van Lielvelde (schaal 1 : 10.000)

Kaartenheid Hn53-VI : Veldpodzolgronden in zwak lemig matig fijn zand met grondwatertrap VI.

## a. Algemene informatie voor de kaartenheid als geheel:

|                                               | <u>Gemiddelde</u> | <u>Standaardafwijking</u> |
|-----------------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| GHG (gemiddeld hoogste grondwaterstand in cm) | 50.8 ± 5.6        | 14.2                      |
| GLG (gemiddeld laagste grondwaterstand in cm) | 134.7 ± 15.5      | 24.4                      |
| bewortelbare diepte (cm)                      | 41.0 ± 3.7        | 7.4                       |

## b. Samenstelling van het "modale profiel" met oppervlaktepercentages van de afzonderlijke horizonten

Gemiddelden met 90% betrouwbaarheidsinterval (a) en standaardafwijkingen (b) van de bodemeigenschappen van het "modale profiel" en de mate van voorkomen van de samenstellende horizonten (rel. freq.)

| Horizont | Diepte      | Dikte              |   | Humus           |                  | Leem                |   | M-50 |   | Relat. frequentie |
|----------|-------------|--------------------|---|-----------------|------------------|---------------------|---|------|---|-------------------|
|          |             | a                  | b | a               | b                | a                   | b | a    | b |                   |
| Alp      | 0 - 26.2    | 26.2 ± 3.4 (7.2)   |   | 5.7 ± 0.9 (1.4) | 14.5 ± 2.3 (3.9) | 157.5 ± 2.2 (6.5)   |   | 100  |   |                   |
| B2       | 26.2 - 48.5 | 22.3 ± 1.9 (11.8)  |   | 2.3 ± 0.8 (1.3) | 10.0 ± 1.5 (3.4) | 156.0 ± 2.9 (7.5)   |   | 65 ± |   |                   |
| C1       | 70          | -                  |   | < 1             | 8.4 ± 1.0 (2.4)  | 157.1 ± 4.1 (9.2)   |   | 100  |   |                   |
| C1       | 110         | -                  |   | < 1             | 9.6 ± 0.7 (3.0)  | 157.3 ± 4.6 (12.2)  |   | 95 ± |   |                   |
| CG(G)    | 150         | -                  |   | < 1             | 12.1 ± 1.6 (3.6) | 150.6 ± 10.4 (16.3) |   | 67 ± |   |                   |
| G(CG)    | 160.6 - 200 | 39.5 ± 13.8 (25.5) |   | < 1             | 20.3 ± 0.4 (1.4) | 122.4 ± 0.9 (2.0)   |   | 57 ± |   |                   |

## c. Afwijkende lagen

Samenstelling en oppervlakte van profielen met een grofzandige ondergrond (hor. 1) met een grofzandige tussenlaag (hor. 2).

| Horizont | Diepte        | Dikte             |   | Leem           |   | M-50               |   | Relat. frequentie |
|----------|---------------|-------------------|---|----------------|---|--------------------|---|-------------------|
|          |               | a                 | b | a              | b | a                  | b |                   |
| 1        | 152.6 - 200   | 47.4 ± 2.7(36.3)  |   | 4.1 ± 1.1(2.7) |   | 203.1 ± 21.5(27.8) |   | 19                |
| 2        | 128.3 - 160.7 | 32.3 ± 10.8(11.8) |   | 4.0 ± 2.5(3.1) |   | 210.6 ± 10.5(16.8) |   | 9                 |

## Perspectief

Het verstrekken van statistisch betrouwbare bodemkundige informatie maakt het mogelijk om objectief vast te stellen of, en in welke mate een bodemkaart bruikbaar is voor een bepaalde toepassing.

Door het verzamelen van aanvullende informatie bij bestaande bodemkaarten kunnen de toepassingsmogelijkheden van deze kaarten worden verruimd.

De ontwikkelde steekproefmethode kan tevens een nuttig instrument zijn bij de uitvoering van de in voorbereiding zijnde revisie van de Bodemkaart van Nederland 1 : 50.000.

## Literatuur

- De Gruijter, J.J. and B.A. Marsman 1985. Transect sampling for reliable information on mapping units. Proceedings Workshop ISSS and SSSA. Soil Spatial Variability, Las Vegas, USA; Pudoc, Wageningen.
- Visschers, R. en B.A. Marsman 1985. Aselecte raaienmethode verschaft informatie als aanvulling op bestaande bodemkaarten. Cult. Techn. Tijdschrift aug./sept. 25; 2.
- Visschers, R. en M.H. Bannink 1986. Onderzoek naar de variabiliteit en de bodemfysische karakteristieken van kaarteenheden in het proefgebied "Sleen-Oost". Rapport nr 1758 Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

# ONDERZOEK NAAR DE RUIMTELIJKE EN TEMPORELE VARIABILITEIT IN DE ACTIVITEIT VAN MASSABEWEGINGEN OP BASIS VAN JAARRINGGEGEVENS VAN BOMEN.

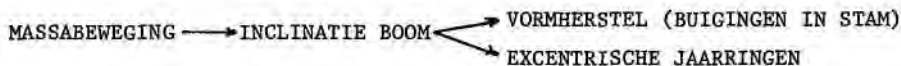
R.R. Braam/P.A. Burrough

Vakgroep Fysische Geografie, RU Utrecht.

Een geautomatiseerde methode

## 1 Uitgangspunten:

Een analyse van de variabiliteit van massabewegingen op basis van jaarringgegevens van bomen is mogelijk doordat de groei van bomen door het optreden van massabewegingen beïnvloed kan worden en doordat deze beïnvloeding in de jaarringen (en ook in de boomvorm) wordt vastgelegd, geregistreerd. Een veel voorkomend verschijnsel in beboste gebieden waar massabewegingen actief zijn is scheefstelling (inclinatie) van bomen. Bomen reageren op scheefstelling op een karakteristieke manier. De jaarringgroei verandert van concentrisch naar excentrisch. Dit is een begeleidend verschijnsel van de vorming van reactiehout welke als gevolg van de veranderde positie in het zwaartekrachtsveld op gang komt (bij naaldbomen aan de 'lage' stamzijde, bij loofbomen aan de 'hoge' stamzijde). De reactiehoutvorming veroorzaakt buigingen in de stam door druk (naaldbomen) of trek (loofbomen) aan één zijde van de stam in de stamas richting, waardoor vormherstel mogelijk is. In het geval van inclinatie wordt de volgende Process-Event-Response keten gehanteerd:



## 2 Methode:

De excentriciteit kan voor elk levensjaar van een boom bepaald worden aan de hand van twee (in haakse richtingen genomen) radiale boomringmonsters. Op basis hiervan kan een tijdserie voor de excentriciteit worden opgesteld:  $E(I)$ , met  $I = 1, N$  ( $E(I)$  : excentriciteit in jaar  $I$ ,  $N$  : aantal opeenvolgende jaren waarvoor  $E$  bekend is). Uit onderzoek is gebleken dat een kleine verandering in de hoek van inclinatie een duidelijke verandering van de excentriciteit teweeg brengt (Alestalo, 1971 en Shroder, 1978), maar ook dat bij onverstoorde bomen (rechte verticale stam en een gelijkmatige kroon) aanzienlijke fluctuaties in de excentriciteit kunnen optreden (Braam, 1985). De eerstgenoemde veranderingen zijn niet in absolute zin gecorreleerd met de inclinatiehoek, alleen relatief is er een verband, de andere veranderingen zijn te beschouwen als ruis, de fluctuaties schommelen rond één waarde (niveau). Veranderingen van de excentriciteit door verandering van de inclinatiehoek hebben een meer blijvend karakter, het gaat om veranderingen naar een ander niveau. Dergelijke niveauveranderingen (sprongen) van de excentriciteit kunnen goed geanalyseerd worden met behulp van de Split-Moving-Window techniek (Webster, 1978) in combinatie met een Student's T-test. Voor elk jaar van de tijdserie van de excentriciteit (behalve de jaren aan de uiteinden) kan de gemiddelde waarde van de excentriciteit voor een aantal jaren vóór het desbetreffende jaar, de linker-window, vergeleken worden met het gemiddelde erna, de rechter-window.

Het verschil tussen de windowgemiddelden kan op significantie getest worden met de T-test. Een significante verandering van de excentriciteit in een bepaald jaar is een indicatie voor een opgetreden inclinatie in dat jaar. Een Event definiëren we nu als "een significante verandering van het voortschrijdend gemiddelde van  $E(I)$ ". Een Event beschouwen we als een indicatie voor een opgetreden massabeweging.

De tijdserie van de excentriciteit kunnen we nu omzetten in een "Event-serie", daar aan alle jaren een 1 (event) of een 0 (geen event) toe te kennen.

Opstellen van een aantal van dergelijke Event-series voor een aantal bomen uit één gebied en dat voor meerdere gebieden (of sub-gebieden) levert een goede basis voor onderzoek naar de ruimtelijke en temporele variabiliteit van massabewegingen en voor onderzoek naar correlatie met (vermoedelijk) massabewegingen veroorzakende factoren

#### Ruimtelijke Analyse

Het in synchrone positie plaatsen en rangschikken naar hoogteligging, of plaats in een transect, van Event-series maakt het mogelijk een verplaatsing van de massabewegingsactiviteit en/of de verdeling van de activiteit over een gebied te bekijken.

#### Temporele Analyse

Voor een (sub-)gebied kan een zg. "PROCESS-EVENT-RESPONSE-INDEX-serie" opgesteld worden door voor elk jaar het aantal responsen (events) te wegen op het aantal geanalyseerde bomen voor dat jaar (Shroder, 1978).

De Index-serie kan onderzocht worden op de aanwezigheid van cycliciteit (autocorrelatie en/of Fourieranalyse), op toename of afname van de activiteit (trendanalyse) of op de aanwezigheid van een verband (correlatie) met een of andere veroorzakende parameter (bijv. neerslag of leeftijd van het bos).

Ook kan gekeken worden of de activiteit over een groter gebied, of in subgebieden, parallel loopt.

### 3 Computerprogramma CATIR:

Voor verwerking van boomringdata en de uitvoering van (een deel) van bovengenoemde analyses is een computerprogramma ontwikkeld met als naam CATIR (Computerprogramma voor de Analyse van Tijdseries van Inclinatie Responsen).

Gebruik is mogelijk door contact op te nemen met Drs E.E.J. Weiss, Vakgroep Fysische Geografie van de RU Utrecht.

Voor informatie is een handleiding samengesteld. Nadere informatie en/of advies is mogelijk bij Drs R.R. Braam (via E.E.J. Weiss).

## Literatuur

- Alestalo, J., 1971. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes, Soc. geogr. Techn., 105, 1-140.
- Shroder, J.F., 1978. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah, Quaternary Research 9, 168-185.
- Giardano, J.R. et al., 1984. Tree-ring analysis of movement of a rock-glacier on Mount Mestas, Colorado USA, Arctic and Alpine Research, Vol. 16, no 3, 1984, 299-309.
- Braam, R.R., 1985, Dendrogeomorfologisch onderzoek Barcelonnette, Zuid-Franse Alpen, doctoraal veldwerkverslag Fysische Geografie RU Utrecht.
- Snedecor, G.W., 1966, Statistical Methods, IOWA Univ. Press, 8e druk.
- Webster, R., 1978, Optimally partitioning soil transects, Journal of Soil Science 29, 388-402.

## SPATIAL VARIABILITY OF GROUNDWATER RECHARGE: A CASE STUDY FROM S.E. BOTSWANA

I. Simmers

Free University, Amsterdam

## Introduction

In view of the rapidly expanding urban, industrial and agricultural water requirements in many semi-arid areas and the normally associated critical unreliability of surface water supplies, groundwater exploration and use is of fundamental importance for logical economic development. Three interrelated facets of such groundwater projects should be evident:

- a determination of location, geometry and hydraulic characteristics of the aquifers concerned - classical techniques are well known;
- b definition of groundwater recharge mechanisms and characteristics for the identified geological formations, in order to determine whether exploitation in the long-term involves "mining" of an essentially "fossil" resource on withdrawal from a dynamic supply. A solution to this aspect is essential for development of a resource management policy;
- c estimation and regionalization of recharge spatial variability, to thus enable determination of total aquifer input and to quantify such practical aspects as "minimum risk" waste disposal locations (hazards mapping) and artificial recharge potential via (e.g.) revegetation or engineering works. A solution to this third facet requires a combination of selective field data collection, thematic map analysis, geostatistics and landscape classification.

## Recharge spatial variability

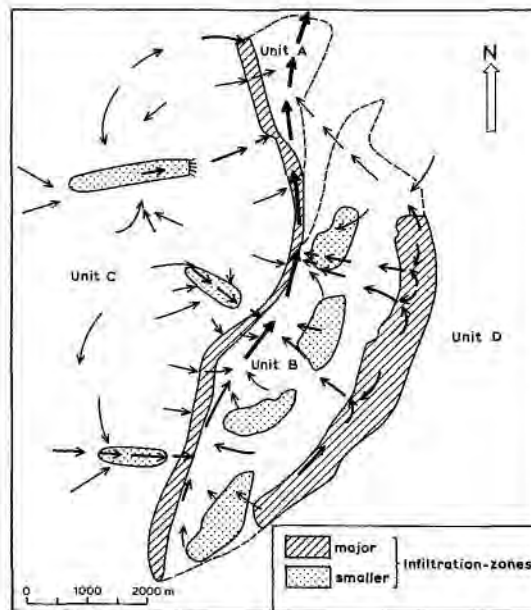
Natural groundwater replenishment in semi-arid regions can occur by (inter alia) diffuse infiltration of excess rainfall and local streambed recharge along ephemeral water courses. In the Botswana area the role of diffuse infiltration by excess rainfall through the Kalahari sand cover as an active recharge mechanism is a matter of continuing debate and appears to be active in some areas but negligible in others. While this controversy continues the at point results can not, therefore, be translated to surrounding areas with any degree of certainty.

However, infiltration due to rainfall depends on several factors such as surface level gradient, sand particle size, soil moisture levels in the unsaturated zone, depth of watertable level from the surface, rainfall intensity, etc. These factors and hence recharge, are thus assumed to vary not only with respect to time but also spatially.

A descriptive insight into recharge spatial variability for the study area is of course obtainable by way of standard hydrogeological mapping techniques. Figure 1 illustrates the results of this exercise and was derived from the compilation of borehole logs and test pumping data, hydrochemical sampling, geophysical survey, aerial photograph and thematic map interpretation. However, to produce such a map is time consuming and the end product can at best only indicate the general pattern of likely infiltration (recharge) areas and groundwater flow lines. The quantitative information ultimately required for resource management is not generated by this approach. Numerical estimation and regionalisation of groundwater recharge spatial variability, as described in the introduction, again require three interdependent sequential stages:

- a determination of significant physiographic and hydrological parameters which may be used as simplifying surrogates to define the dynamics of hydrological system response - that is, what independent variables determine the value/outcome of the dependent variable recharge? For example, preliminary results from a brief study by Bons and Van Loon (1985)

- indicate encouraging similarities between a readily derived map of "dominant vegetation type/soil physical properties" (Fig. 2) and the independently derived infiltration zones in Figure 1;
- b response unit discrimination by way of, for example, the use of geometric grid cells and statistical analyses (Gottschalk and Krasovskaia, 1980; Laut et al, 1982; Hendriks et al, 1985). Grid size is directly related to the purpose ("problem") for which regionalization is to be carried out. Each "problem" has its own set of "problem"-related variables and each variable a specific sampling or grid scale (determined by, for example circular autocorrelation). By weighting the importance of independent variables for a specific "problem" (factor analysis) the overall grid scale to be used for hydrological regionalization can thus be determined;
  - c regionalization of digitised information from step b. by way of hydrologically oriented classification techniques developed from numerical taxonomy (Laut et al, 1982). Grid cells form the basic data units and each may contain "continuous", "disordered multistate" and "non-exclusive ordered multistate" types of attributes. Using these, a numerical classification technique is adopted to compute a data dissimilarity matrix and resultant grid cell classification with larger areas classified according to the contained grid cell composition.



Unit A : Nywane basin (conglomerate, dolomite)  
 B : Pitsanyane basin (dolomite)  
 C : Lobatse volcanics; D : quartzites

Figure 1 : Hydrogeologically derived groundwater flow pattern and potential recharge areas (S.E. Botswana)

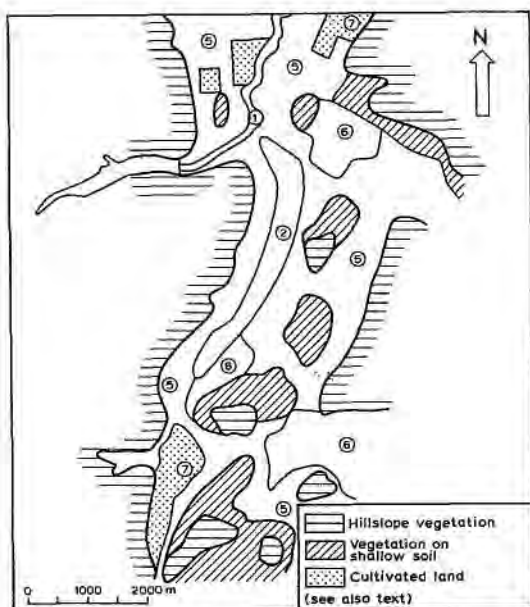


Figure 2 : 'Vegetation' units and potential recharge areas

#### Conclusions

- 1 Spatial translation of hydrological data can not be based on the assumption that geographical proximity equates with uniformity of hydrological response.
- 2 In this ongoing project the spatial limits of response units as defined by surrogate parameters are quantified and finally regionalized. Within unit determination of recharge potential (natural or artificial) will be attempted via physical measurements in the unsaturated zone and aquifer modelling.
- 3 When completed, the numerical procedures outlined above will:
  - allow ready definition of geographical areas with specific data deficiencies;
  - indicate the spatial relevance of results from existing data collecting programmes;
  - illustrate any unnecessary duplication of effort (i.e., minimize instrumental/data collection requirements);
  - provide objective solutions to such practical issues as reduction in water supply project implementation "lead-time", optimum site location for waste disposal and determination of spatial variability in artificial recharge potential.

#### References

- Bons, C.A., J.A.W.M. van Loon, 1985: Water resources evaluation of a dolomitic groundwater basin in S.E. Botswana. Internal report, Inst. of Earth Sciences, Free University, Amsterdam.
- Gottschalk, L., I. Krasovskaia, 1980. Synthesis, processing and display of comprehensive hydrologic information. Sver. Meteorol. Hydrol. Inst. (S.M.H.I.), Norrköping, Rapp. No RH022.

- Hendriks, M.R., E. Seyhan, I. Simmers, 1985. Determination of grid scales of landscape variables for hydrological regionalisation. Proc. 1st Int. Conference on Geomorphology, Manchester, Sept.
- Laut, P., M.P. Austin, D.N. Body, D.P. Faith, M.J. Goodspeed; T. Paine, 1982. Hydrologic classification of sub-basins in the MacLeay valley, New South Wales. SCIRO Div. Water and Land Resources, Canberra, ACT., Tech. Memo. 82/13.

## HET EFFECT VAN HETEROGENITEITEN IN DE BODEM OP DE VERSPREIDING VAN VERONTREINIGINGEN

C.C.D.F. van Ree

Laboratorium voor Grondmechanica

Het transport van verontreinigingen in de bodem wordt in sterke mate beïnvloed door chemische interactie; hetzij door de componenten onderling of met het bodemsysteem. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij het treffen van adequate maatregelen. Om inzicht te verkrijgen in het mogelijke concentratieverloop van een verontreiniging in ruimte en tijd wordt gebruik gemaakt van stoftransportmodellen, waarin de bodem geschematiseerd wordt weergegeven. Voor de betrouwbaarheid van de berekening is adequate informatie over het systeem van groot belang. Bij de beschrijving van het systeem kunnen drie niveaus onderscheiden worden.

- 1 Het laagste niveau, waarbij de ondergrond op basis van de gemiddelde samenstelling beschreven wordt, zonder dat daarbij een ruimtelijke verdeling aangegeven wordt.
- 2 Een tussenniveau, waarbij de algemene opbouw van het systeem in de vorm van zand- en kleilagen bekend is en de gemiddelde eigenschappen hiervan zoals dikte, kleipercantage, organische stofgehalte e.d.
- 3 Het hoogste niveau, waarbij de bodemopbouw in al haar details bekend is. Het benodigde veldonderzoek en de bijbehorende analyse en interpretatie zijn sterk afhankelijk van de probleemstelling en het gewenste informatieniveau. Voor een bewuste keuze is het noodzakelijk de consequenties van een dergelijke keuze aan te geven. Hiertoe ontbreekt in belangrijke mate nog inzicht in het belang van het effect van details binnen een bodemsysteem op het transport. Laboratoriumexperimenten bieden mogelijkheden om onder specifieke randvoorwaarden een en ander te bestuderen.

### Probleemstelling

Kan in geval van een heterogene ondergrond gebruik gemaakt worden van migratiemodellen om het concentratieverloop in ruimte en tijd te voorspellen. Welke mate van detaillering in de veldgegevens is noodzakelijk om tot betrouwbare resultaten te komen.

### Werkwijze

Na een theoretische studie naar effecten van bodemstructuren op macroschaal (kleilagen e.d.) op de verspreiding van verontreinigingen zijn vervolgens in het laboratoriumexperimenten uitgevoerd. Sterk geschematiseerde zand- kleisystemen zijn hierbij in beschouwing genomen. De resultaten van de laboratoriumexperimenten zijn vergeleken met numerieke berekeningen. Gewerkt is o.a. met een homogeen zandsysteem en met zandsystemen met daarin 2, 4 en 8 kleilagen (Zie figuur 1).

### Uitwerking resultaten

Figuur 2 toont twee voorbeelden van gemeten en berekende doorbraakkrommes voor bovengenoemde systemen met chloride als tracer. Experimenten met adsorberende componenten zijn nog in uitvoering. De kleilagen blijken slechts een beperkte invloed op de doorbraak van het chloride ion te hebben.

In figuur 3 is in algemene zin weergegeven hoe de relatie is tussen de systeemopbouw, de doorbraak van een verontreiniging (weergegeven in een retardatiefactor) en het beschikbare informatieniveau. Geconcludeerd kan worden, dat in een heterogene ondergrond ruime aandacht besteed dient te worden aan bodemstructuur en haar relevante eigenschappen. Voor een betrouwbare prognose van de verspreiding geven modellen waarin deze informatie afdoende meegenomen kan worden superieure resultaten boven modellen waarin dit op basis van gemiddelden gebeurt (homogeen).

#### Probleem

Bij het uitvoeren van laboratoriumexperiment doen zich diverse problemen voor, die te ondervangen zijn, door een zorgvuldige evaluatie van de resultaten. Met name het aanbrengen van een homogene zandlaag en een goede aansluiting tussen de kleilagen en het zand behoorden o.a. tot de praktische problemen.

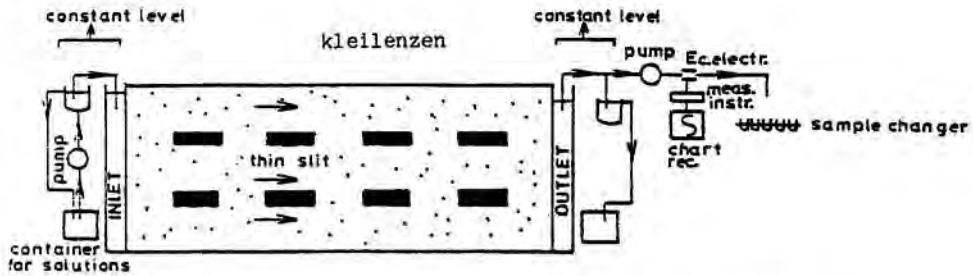
#### Toekomstperspectief

Uitkomsten van experimenten zoals voorafgaand beschreven geven inzicht in de wijze waarop de bodem in subsystemen opgedeeld moet worden om op betrouwbare wijze een prognose over stoftransport in de bodem te kunnen doen. Bij de te onderscheiden subsystemen zal de aard (lithologie e.d.) en de schaal een belangrijke rol spelen. Deze inzichten bieden mogelijkheden tot een meer rationele opzet van bodemonderzoek, afgestemd op de probleemstelling, waarbij meer en beter rekening gehouden wordt met de natuurlijke ruimtelijke variabiliteit van de bodem.

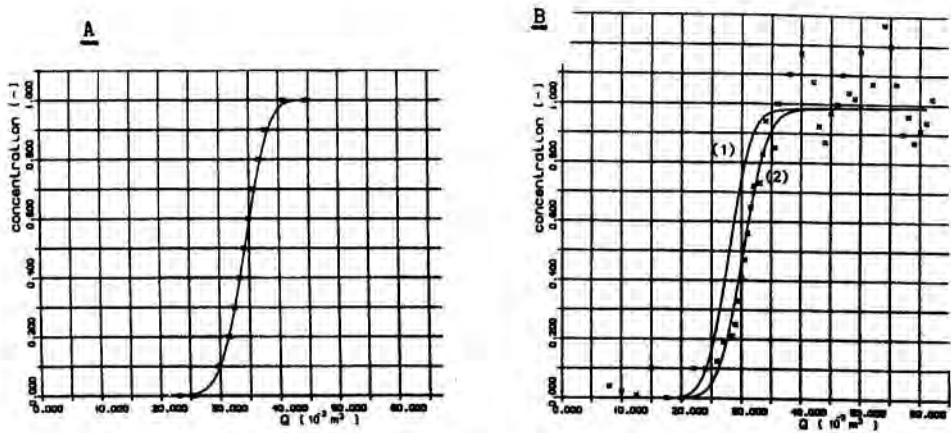
#### Referenties

- LGM, (1986). The influence of ground heterogeneity on the migration of radionuclides in the soil and soilwater system. EEC contract number WAS-330-83-61-NL. Min. van EZ contract number 382/II/1492/EEK.
- Meurs, G.A.M. van, Loxham and F.A. Weststrate, (1985). Soil heterogeneity and its impact on the spread of pollutants. First International TNO-conference on Contaminated Soil, Utrecht, november 1985.

Figuur 1 t/m 3

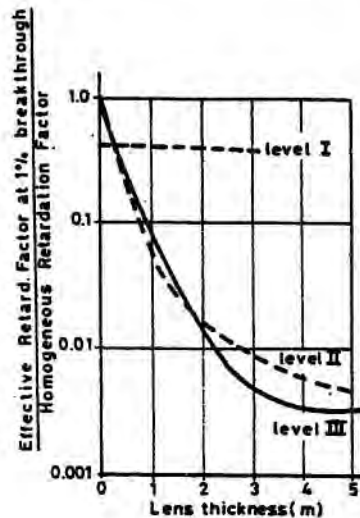


Figuur 1. Schematische weergave van de laboratoriumexperimenten.



Figuur 2. Voorbeelden van gemeten en berekende doorbraakkrommes voor een homogeen (A) en een 8-kleilenzensysteem (B).

Figuur 3. Invloed van het informatieniveau op de prognoses van de effectieve retardatiefactor als functie van de dikte van de kleilenzen.



## DE KARTERING VAN DE CHEMISCHE SAMENSTELLING VAN HET FREATISCHE GRONDWATER

C.J.J.H. Schouten

Geografisch Instituut, R.U. Utrecht.

## Probleemstelling

Op welke wijze kan op basis van bestaande waarnemingspunten (peilputten, pompputten en bronnen) een regionalisatie van de grondwaterkwaliteit uitgevoerd worden ?

In aansluiting op het landelijk meetnet Grondwaterkwaliteit wordt momenteel gestreefd naar het opzetten van provinciale meetnetten. Deze meetnetten zullen een veel grotere dichtheid krijgen dan bij het landelijk meetnet het geval kon zijn.

Bij het opzetten van een grondwaterkwaliteitsmeetnet zal vooral rekening gehouden moeten worden met het freatisch grondwater, omdat de ruimtelijke variabiliteit van het freatische grondwater in het algemeen veel groter is dan die van diepere grondwaterlichamen. De gewenste dichtheid van het meetnet hangt samen met de ruimtelijke variabiliteit van de grondwaterkwaliteit. In gebieden met grote verschillen in grondwaterkwaliteit over korte afstanden, zal het aantal waarnemingen groter moeten zijn dan in gebieden met geringe ruimtelijke verschillen.

Het opzetten van een provinciaal meetnet t.b.v. de monitoring van de grondwaterkwaliteit zal dus voorafgegaan moeten worden door een analyse van de ruimtelijke variabiliteit van de factoren die de grondwaterkwaliteit bepalen. Op grond van deze analyse kan een indeling gemaakt worden in min of meer homogene grondwaterregio's. Per regio worden vervolgens alle bestaande grondwaterkwaliteitsgegevens verzameld. Deze gegevens kunnen afkomstig zijn van de drinkwatermaatschappijen, de Geologische Dienst, het RIVM, particulieren etc. Lokaties die onder invloed staan van puntbronnen (vuilnisstorten, BOSA-lokaties) dienen uit het bestand verwijderd te worden.

Hierna zal onderzocht moeten worden welk ruimtelijke verbanden er bestaan tussen de verschillende waarnemingen binnen een grondwaterregio. Het bestaan van ruimtelijke correlaties en de schaal hiervan kan bestudeerd worden door het vervaardigen van een semi-variogram. De theorie ten aanzien van deze statistische techniek staat beschreven in Burrough (1986).

Wanneer uit het semi-variogram blijkt dat de nugget-variantie gelijk, of vrijwel gelijk is aan de sill (m.a.w. wanneer geen of slechts een zwakke ruimtelijke correlatie aanwezig is) of wanneer de semi-variantie niet meer toeneemt bij intervallen groter dan bijvoorbeeld 1 à 2 km, dan kan de onderzochte grondwaterregio op de onderzoeksschaal (in het geval van provinciale grondwatermeetnetten vermoedelijk 1 : 100.000 of kleiner) als homogeen beschouwd worden. De lokale waterkwaliteitsverschillen veroorzaakt door kleine puntbronnen kunnen bij deze onderzoeksschaal genegeerd worden. Binnen de onderzochte regio kan de waterkwaliteit dan met een centrummaat en een of meer spreidingsmaten beschreven worden.

Het toepassen van "normale" statistiek, waaronder de berekening van het gemiddelde en de verspreiding hierin, moet gezien de vaak sterk scheve verdeling van waterkwaliteitsdata, met de nodige reserve beschouwd worden.

De lokaties van de waarnemingsputten van het provinciale meetnet binnen een dergelijke grondwaterregio kunnen random of systematisch gekozen worden. Het aantal waarnemingsputten hangt af van het ter beschikking staande budget, van de grootte van de variantie in waterkwaliteit en van de gewenste betrouwbaarheid van de uitspraken over de waterkwaliteit binnen de desbetreffende regio.

Wanneer uit het semi-variogram blijkt dat de semi-variantie nog wel toeneemt bij grotere intervallen en bijvoorbeeld pas stationair is bij intervallen groter dan 10 of 15 kilometer, dan zal een nadere analyse van de oorzaak van deze ruimtelijke correlatie uitgevoerd dienen te worden, alvorens tot een selectie van waarnemingslokaties kan worden overgegaan. Mogelijk zal blijken dat het bestudeerde gebied feitelijk uit twee grondwaterregio's is opgebouwd. In dat geval kan het gebied gesplitst worden en dient een nieuw semi-variogram berekend te worden.

Wanneer blijkt dat er een of meerdere puntbronnen aanwezig zijn met een invloed op de regionale grondwaterkwaliteit, of indien door andere oorzaken een sterke ruimtelijke afhankelijkheid bestaat, dan kan de grondwaterkwaliteit binnen de onderscheide regio niet meer eenvoudig gekarakteriseerd worden. Door de doorgaans beperkte dichtheid van een provinciaal meetnet kunnen in dergelijke gevallen de lokaties van de waarnemingsputten niet volgens random of systematische technieken geselecteerd worden. Directed (gestuurde) samplingtechnieken verdienen dan de voorkeur, opdat de ruimtelijke representativiteit van de geselecteerde lokaties zo groot mogelijk is.

Met behulp van bovenstaande methodiek wordt op het ogenblik nagegaan of het mogelijk is te komen tot een verantwoorde indeling van Zuid-Limburg in grondwaterregio's. De resultaten van dit onderzoek zullen binnenkort in een NGS-publicatie (voorlopige titel: "Fysische en chemische degradatie van bodem en grondwater in Zuid-Limburg") gerapporteerd worden.

## SIMULATIETECHNIEK GEBIEDSNEERSLAG

J.V. Witter

Landbouw Universiteit Wageningen

## Probleemstelling

Zij  $x(u,t)$  de neerslag in een punt met plaatscoördinaat  $u$ , en geaccumuleerd over het waarnemingsinterval  $(t - \Delta t, t)$ . De (gemiddelde) gebiedsneerslag over een gebied  $V$  met oppervlakte  $A$  is dan gedefinieerd als  $x_A(V,t) = \frac{1}{A} \int_V x(u,t) du$ . Vanuit hydrologisch oogpunt is men echter vaak niet zozeer geïnteresseerd in de gemiddelde gebiedsneerslag als in kennis van "neerslagvelden" van de puntneerslag  $x(u,t)$  (of eventueel van de gebiedsneerslag  $x_A(v_i,t)$  voor deelgebiedjes  $v_i \subset V$ ) in een aantal lokaties  $u \in V$  en voor opeenvolgende waarden van  $t$  (Witter, 1986).

## Gemiddelde gebiedsneerslag

De grootheden  $x(u,t)$  en  $x_A(V,t)$  kunnen worden opgevat als (bijvoorbeeld gamma-verdeelde) kansvariabelen  $x(u,t)$  en  $x_A(V,t)$ , met verwachting en variantie respectievelijk  $\mu$  en  $\sigma^2$ , en  $\mu_A$  en  $\sigma_A^2$  (Buishand, 1977a). Onder de voorwaarden van stationariteit en isotropie geldt dat  $\sigma_A^2 = \sigma^2 \cdot \bar{r}(V;V)$ , waarbij  $\bar{r}(V;V)$  de gemiddelde correlatiecoëfficiënt van de puntneerslag is op locaties  $u_1$  en  $u_2$ , die elk onafhankelijk  $V$  doorlopen. Voorts verschilt de autocorrelatiefunctie van de gemiddelde gebiedsneerslag van die van puntneerslagen, en is daaruit af te leiden (Buishand, 1977a). Als men een model heeft opgesteld voor reeksen van puntneerslagen (zie Buishand, 1977b) voor een aantal modellen waarvan de parameters uit te drukken zijn in de eerste en tweede orde momenten (verwachting, variantie en autocorrelatie), dan is dit model eenvoudig te modificeren tot een model voor reeksen van gemiddelde gebiedsneerslagen. Dit model kan als simulatiemodel worden gebruikt.

## Neerslagvelden

In tegenstelling tot het hierboven beschreven uni-variate probleem is dit een multi variaat probleem. Een voorbeeld is Bras en Rodriguez-Iturbe (1976). Zij gaan uit van verschillende typen neerslaggebeurtenissen. Voor Nederland zou gedacht kunnen worden aan twee typen, frontale neerslaggebeurtenissen en onweren. De kans op deze typen moet bekend zijn, evenals de marginale verdelingen van  $\tau$ , de tijd tussen gebeurtenissen, en  $t_d$ , de neerslagduur. Ook moet bekend zijn: de verdeling van de neerslaghoeveelheid  $D$  gegeven  $t_d$ , de verdeling van de treksnelheid  $v$  en trekrichting  $\phi$ , de marginale verdeling van de puntneerslag voor de beschouwde typen neerslaggebeurtenissen en voor waarnemingsintervallen gelijk aan de in het simulatiemodel gebruikte tijdstap, en een model voor de tijdruimte correlatie van deze puntneerslag. Merk op dat de hoeveelheid benodigde gegevens veel groter is dan voor het simuleren van de gemiddelde gebiedsneerslag. Hun simulatie-algoritme is hiërarchisch, dat wil zeggen, eerst wordt het neerslagtype gesimuleerd, en de "externe" parameters  $\tau$ ,  $t_d$ ,  $D$ ,  $v$  en  $\phi$ . Vervolgens wordt, gegeven de correlatiefunctie en de waarden van de externe parameters, de neerslag gesimuleerd voor de gewenste locaties en tijdstippen. Deze hiërarchische structuur is zeer gebruikelijk, zie bijvoorbeeld Valdes et al. (1985).

#### Problemen en toekomstig werk

Een belangrijk probleem bij het simuleren van neerslagvelden wordt veroorzaakt doordat de puntneerslag een niet-normaal verdeelde kansvariabele is. Bijvoorbeeld impliceert dit, dat een model berustend op de eerste en tweede orde momenten inadequaet is om de afhankelijkheidsstructuur te modelleren. Onderzoek op dit gebied richt zich vooral op de toepasbaarheid van het NeymanScott model voor de beschrijving van het totale aantal neerslagpulsen in een zeker tijdsinterval (Valdes et al., 1985). Een ander probleem is de gebrekkige kennis van de afhankelijkheidsstructuur van de neerslag en de geringe hoeveelheid waarnemingsmateriaal waarmee simulatiemodellen gecalibreerd kunnen worden. Het werk aan de vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie van de Landbouwniversiteit concentreert zich op het laatste. Hiertoe participeert de vakgroep in een regenmeetnet van het Hoogheemraadschap West-Brabant. Voorlopige analyse van de metingen (Witter, 1986) laat zien dat de neerslagen die vanuit hydrologisch oogpunt van belang zijn, in het algemeen een bandstructuur bezitten, en samenhangen met frontale weersituaties.

#### Referenties

- Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., 1976. Rainfall generation: a nonstationary time-varying multidimensional model. *Water Resources Research* 12 (3): 450-456.
- Buishand, T.A., 1977a. De variantie van de gebiedsneerslag als functie van puntneerslagen en hun onderlinge samenhang. Mededelingen Landbouwhogeschool 77-10, Wageningen.
- Buishand, T.A., 1977b. Stochastic modelling of daily rainfall sequences. Mededelingen Landbouwhogeschool 77-3, Wageningen.
- Valdes, J.B., Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V.K., 1985. Approximations of temporal rainfall from a multidimensional model. *Water Resources Research* 21 (8): 1259-1270.
- Witter, J.V., 1986. Rainfall field modelling to a design problem. Paper, gepresenteerd op de Chapman Conference on rainfall field modelling, 24-27 maart 1986, Caracas.

## BETROUWBAARHEID VAN GEOHYDROLOGISCHE MODELLEN

J.W. de Kwaadsteniet

RIVM, Laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek

Trefwoorden: stochastische modellering, inverse modellering, interpolatie, toets-op-fit, betrouwbaarheidsmarges.

Het is gebruikelijk om het transport van grondwater en verontreinigingen daarin te beschrijven met behulp van mathematisch-fysische modellen waarin rekening wordt gehouden met o.a. continuïteitswetten, de wet van Darcy (= stroomsterkte recht evenredig met potentiaalverschil), dispersie en diffusie. Wiskundig gezien nemen de modellen de vorm aan van (stelsels) partiële differentiaalvergelijkingen, die voor beschrijving van stroming en transport op een regionale schaal met behulp van computerprogramma's (bijvoorbeeld eindige elementenprogramma's), moeten worden opgelost. Een eenvoudige oplossing van een stromings- en transportprobleem wordt verkregen na het vastleggen van invoergrootheden zoals begin- en randvoorwaarden, een ruimtelijk beeld van de grondwateraanvulling en een ruimtelijk beeld van bodemparameters (zoals doorlatendheid, porositeit en pakketdikte).

Nu doen zich bij concrete toepassing van deze modellen vele wrijvingspunten voor waarvan er hier een aantal zullen worden aangestipt. Centraal staat daarin dat het waarnemingsmateriaal, dat deels gebruikt wordt als invoergegevens bij de modellering en deels voor de beoordeling van de modelresultaten, van een veel fragmentarischer karakter is en veel meer onzekerheden kent dan de gehanteerde modellering doet vermoeden. De behoefte doet zich dan ook duidelijk voelen om in de eerste plaats de onzekerheden te kwantificeren en te vertalen naar het waarnemingsmateriaal gebaseerde maten voor het beoordelen van de kwaliteit van de modellering (is de gehanteerde modellering al of niet in strijd met het waarnemingsmateriaal ?; is verdere verfijning al of niet geboden ?). En vervolgens dienen, in het kader van een acceptabel beoordeelde modellering, de gekwantificeerde onzekerheden in het gedrag van de waargenomen variabelen en parameters te worden doorvertaald naar betrouwbaarheidsmarges bij de modelresultaten.

Een voor geohydrologisch onderzoek basaal stelsel waarnemingen wordt gevormd door de periodiek bemeeten grondwaterstijghoogte in de waarnemingspunten van een meetnet. Indien de aandacht gericht wordt op bijvoorbeeld het langjarig gemiddelde stijghoogtebeeld, kunnen voor deze variabele uit de meetnetinformatie de onzekerheden worden gekwantificeerd in de vorm van een variantie/covariantie-matrix op de locaties van de meetpunten. Een volledig ruimtelijk beeld voor de desbetreffende variabele en de onzekerheden daarin kan vervolgens via interpolatie worden verkregen, waarbij ervoor moet worden zorg gedragen dat de interpolatie gebruik maakt van en niet conflicteert met de (inhomogene) structuur van de variantie/covariantie-matrix op de waarnemingspunten. De aldus verkregen informatie kan worden vertaald naar een eerste efficiënte, op het waargenomen stijghoogtebeeld gebaseerde statistische toets-op-fit voor een stationair stromingsmodel (nog te publiceren resultaat).

Binnen het kader van een (na toetsing) acceptabel beoordeelde modelstructuur kan getracht worden de geschetste stijghoogte-informatie (i.e. de informatie over de responsvariabele) en de variantie/covariantiestructuur daarin door te rekenen naar schattingen van modelparameters (i.e. oorspronkelijke invoergrootheden) inclusief betrouwbaarheidsmarges.

Deze problematiek staat bekend als "inverse modellering". Toepassing van het inverse model van Neuman (1979) op een regionale schaal in de Utrechtse Heuvelrug leert dat zo een verrassend gedetailleerd ruimtelijk beeld van de transmissiviteit kan worden verkregen (95% - betrouwbaarheidsintervallen voor transmissiviteitsschattingen met breedtes van 1500 m<sup>2</sup>/d of minder op gebieden van 3 x 3 km<sup>2</sup>; een nog te publiceren resultaat).

Voor het doen van voorspellingen t.a.v. niet-bemeten situaties (bijv. t.a.v. de effecten van overwogen ingrepen) is het van belang om, binnen het kader van een beschikbare modelstructuur, de via inverse modellering verkregen betrouwbaarheidsinformatie voor de modelparameters te kunnen doorvertalen naar betrouwbaarheidsinformatie t.a.v. de responsvariabele in de niet-bemeten situatie. Hier ligt een belangrijk terrein voor vele jaren van onderzoek. Het te exploreren terrein (dat van de stochastische partiële differentiaalvergelijkingen) doet echter geen gemakkelijke weg naar praktische resultaten vermoeden, maar wellicht dat de benadering via stochastische eindige elementen modellen (stelsels van stochastische algebraïsche vergelijkingen) een vruchtbare ingang blijkt. Verder kan de trefzekere mogelijkheid worden genoemd om via computersimulatietechnieken, waarbij met vele mogelijke voorwaardencombinaties voor de invoergrootheden wordt gewerkt, betrouwbaarheidsinformatie over de modelresultaten te verkrijgen. De gebruikswaarde van de simulatiemethode in praktijksituaties lijkt echter, in ieder geval voor de huidige generatie van rekenmachines, nog gering.

#### Literatuur

- S.P. Neuman en S. Yakowitz, 1979. A statistical approach to the inverse problem of of aquifer hydrology, 1, theory. Water Resour. Res., 15, pp. 845-860.
- W.W.G. Yeh, 1986. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem. Water Resour. Res., 22, pp. 95-108.
- J.W. de Kwaadsteniet, 1984. Betrouwbaarheid en representativiteit van geohydrologische modellen. Berichten uit het RIVM, pp. 205-207.

# RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN DE IR-WAARDE VAN HET ONDIEPE GRONDWATER

H. Houweling

Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Arnhem

Waardevolle gebieden voor de natuurbescherming worden veelal gekenmerkt door stabiele meng- of overgangszones in de hydro-geochemische kringloop. In deze kringloop kunnen drie hoofdwatertypen worden onderscheiden; neerslagwater, sterk door het sediment beïnvloed grondwater en zeewater. Het ontstaan en in stand blijven van de genoemde overgangszones hangt samen met de regionale waterhuishouding.

Bij de beschrijving van de waterkwaliteitsverandering in de hydrologische kringloop gebruikt Van Wirdum (1980) twee parameters; de elektrische geleiding bij 25°C (EC25) als kenmerk voor de totale ionenconcentratie en een ionenratio (IR)\* als kenmerk voor de onderlinge verhouding van de ionen in het watermonster. Recent gefiltreerd grondwater vertoont veelal nog sterke gelijkenis met neerslagwater. Langs de stroomlijn vanaf het punt van infiltratie veranderen de fysisch-chemische eigenschappen van het water, mede onder invloed van interactie met de bodemlaag en het doorstroomde sediment. Hierdoor ontstaat, afhankelijk van de samenstelling van het infiltrerende water, de gevolgde stroombaan, en de eigenschappen van bodem en sediment in de stroombaan een regionale variabiliteit in de fysisch-chemische eigenschappen van grondwater. Deze variabiliteit vertoont een samenhang met de (oorspronkelijke) begroeiingstypen.

De samenstelling van het grondwater vormt een randvoorwaarde voor de fysisch-chemische toestand in de wortelzone van de vegetatie. Een andere randvoorwaarde vormt de samenstelling van het neerslagwater. Zij zijn uiteindelijk bepalend voor de extrema die lokaal mogelijk zijn. Door aanvoer van gebiedsvreemd oppervlaktewater kan deze situatie worden beïnvloed.

De fysisch-chemische toestand van het grondwater is gekarteerd op basis van de genoemde kenmerken EC25 en IR. De gegevens zijn ontleend aan het Landelijk Meetnet Grondwaterkwaliteit (RIVM). In de figuur is de IR-waarde van het grondwater op ca. 10 m -mv weergegeven. De gemiddelde dichtheid van de waarnemingen is ca. 0.01/km<sup>2</sup>. Hieruit zijn voorwaarden Y(k) berekend op de hoekpunten van een regelmatig raster, ca. 0.1/km<sup>2</sup>, als gewogen gemiddelde van de waarnemingen Y(i) in de vier meetpunten op de kleine afstand D(i,k) tot het beschouwde knooppunt k van het raster met als gewicht de inverse afstand 1/D(i,k) (Davis 1973).

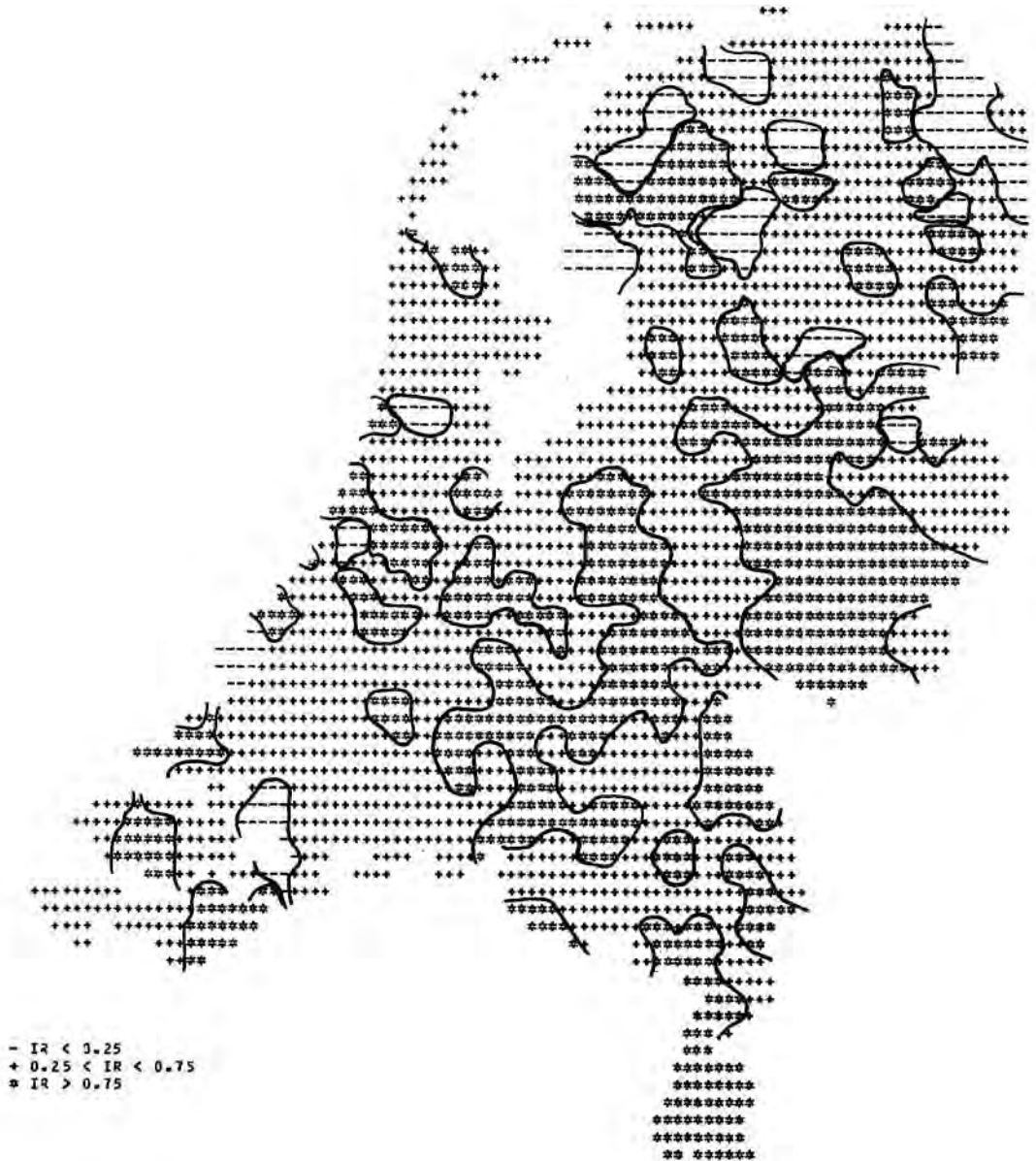
$$Y(k) = \sum (Y(i)/D(i,k)) / \sum (1/D(i,k))$$

Aan de randen van het Drente Plateau, het gebied tussen de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug, het oostelijk dekzandgebied, het rivierengebied en Zuid-Limburg wijst de hoge IR-waarde op beïnvloeding van het grondwater door het sediment. Een lage IR-waarde en een lage EC25-waarde komt voor in Gaasterland en t.p.v. het Drente Plateau. Ook in de Peel en t.p.v. het West-Brabant Plateau komen vrij lage IR-waarden (< 0.35) en lage EC25-waarden voor.

\*)  $IR = [1/2 Ca^{++}] / ([1/2 Ca^{++}] + [Cl^{-}])$  waarin [ ] de SI-eenheid molaire concentratie aanduidt. De uitdrukking bij gebruik van de thans verouderde eenheid eq/l is:  $IR = [Ca^{++}] / ([Ca^{++}] + [Cl^{-}])$ .

## Referenties

- Davis, J.C. 1973. Statistics and Data Analysis in Geology, Wiley, New York.
- RIVM, 1986. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne, Laboratorium voor Bodem- en Grondwateronderzoek, Meetnet Grondwaterkwaliteit. Analyseresultaten van de bemonstering in 1985.
- Wirdum, G. v. 1980. Eenvoudige beschrijving van de waterkwaliteitsverandering gedurende de hydrologische kringloop ten behoeve van de natuurbescherming. In: J.C. Hooghart (red.). Waterkwaliteit in grondwaterstromingsstelsels. CHO-TNO rapporten en nota's 5: 118-143.



IR-waarde van het grondwater op ca. 10m -mv.

## KOPPELING BOMENKAART MET BODEMFYSISCH GEGEVEN

H. Wösten

Stichting voor Bodemkartering

### Probleemstelling

Deterministische simulatiemodellen worden gebruikt voor de berekening van bijvoorbeeld vochttekorten, berijdbaarheid en verblijftijden van bodems in een bepaald gebied. Deze modellen behoeven behalve gegevens over de profielopbouw, bewortelingsdiepte, neerslag, verdamping en grondwaterstand ook bodemfysische karakteristieken voor de afzonderlijke horizonten waaruit het bodemprofiel is opgebouwd. Bodemfysische karakteristieken zijn in dit kader de waterretentie- en de doorlatendheidskarakteristiek.

Omdat de bodemkaart deze waarden niet vermeld is voor de simulatie van een gebied een vertaling nodig van de bodemkundige gegevens op de bodemkaart naar bodemfysische gegevens voor ieder vlak van de simulatiekaart.

### Toelichting keuzetechniek

Het uitgangspunt bij modelberekeningen op regionale schaal is meestal de bodemkaart. De belangrijkste bodemhorizonten, oftewel bouwstenen, die op deze bodemkaart voorkomen zijn gedefinieerd in termen van dikte en van gemakkelijk te bepalen bodemeigenschappen zoals textuur, structuur, organische stof en dichtheid.

Voor de vertaling van bodemkaart naar simulatiekaart worden de bodemfysische karakteristieken van de afzonderlijke bouwstenen gemeten. Vervolgens worden de bodemfysische gekarakteriseerde bouwstenen onderling vergeleken door middel van omzetting van deze karakteristieken in functionele eigenschappen zoals: (i) berekende verblijftijden, (ii) kritieke grondwaterstanden die een bepaalde capillaire stijging toelaten en (iii) neerwaartse fluxdichtheden die overeenkomen met een bepaalde lucht gevulde poriënvolume in de grond. Deze vergelijking op basis van functionele eigenschappen is beter dan een statistische vergelijking.

Een beoordeling op bodemfysisch gekarakteriseerde bouwstenen die al dan niet samengevoegd kunnen worden, gebeurt op basis van de voorspelfout van de drie genoemde functionele eigenschappen van de afzonderlijke bouwstenen. Indien deze voorspelfout voor een combinatie van twee bouwstenen niet groter is dan de voorspelfout voor de afzonderlijke bouwstenen dan kunnen deze bouwstenen worden samengevoegd. Is de voorspelfout voor de combinatie wel groter dan worden de bouwstenen afzonderlijk beschouwd. Deze werkwijze resulteert in een set bouwstenen die in bodemfysisch opzicht duidelijk verschillen. Met behulp van deze set worden representatieve profielen voor de kaarteenheden van de bodemkaart omgezet in profielen voor de kaarteenheden van de simulatiekaart.

### Uitwerking van de resultaten

Door bodemhorizonten te beoordelen op hun praktisch, fysisch gedrag worden onderscheidingen op puur pedologische gronden vermeden. Indien bodemhorizonten zich in bodemfysisch opzicht hetzelfde gedragen worden ze samengevoegd waardoor het aantal kaartvlakken op de simulatiekaart afneemt en de berekeningen eenvoudiger zullen worden.

Doordat de bouwstenen fungeren als dragers van bodemfysische informatie en deze bouwstenen zijn gekoppeld aan de bodemkaart doet de bodemkaart dienst als extrapolatie medium van bodemfysische informatie.

### Problemen

Het meten van de bodemfysische karakteristieken is nog steeds relatief tijdrovend en daardoor duur. Voor de praktijk is het daarom gewenst zoveel mogelijk gebruik te maken van het inmiddels opgebouwde bestand van gemeten bodemfysische karakteristieken.

### Referenties

- Breeuwsma, A., J.H.M. Wösten, J.J. Vleeshouwer, A.M. van Slobbe and J. Bouma, 1986. Derivation of land qualities to assess environmental problems from soil surveys. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50: 186-191.
- Wösten, J.H.M., J. Bouma and G.H. Stoffelsen, 1985. Use of soil survey data for regional soil water simulation models. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49: 1238-1244.
- Wösten, J.H.M., M.H. Bannink, J.J. de Gruijter and J. Bouma, 1986. A procedure to distinguish different classes of hydraulic conductivity curves for soil horizons. *J. Hydrol.* (in press).

## VOCHTKARAKTERISTIEK VAN BODEMS OP DE MINDERHOUDHOEVE, SWIFTERBANT, Z-FLEVOLAND

H.F.M. ten Berge

Landbouw Universiteit, Wageningen.

Beschreven studie maakt deel uit van een veldproef, waarvan uitvoerige details te vinden zijn in de dissertatie "Heat and water transfer at the bare soil surface; Aspects affecting thermal imagery", februari 1986, Vakgroep Bodemkunde en Plantenvoeding, LH Wageningen.

Een perceel ter grootte van 300 x 75 m gelegen op de proefboederij van de LUW, Ir A.P. Minderhoudhoeve te Swifterbant, werd bemonsterd in het voorjaar van 1982.

Aanleiding hiertoe was een jaarlijks terugkerend patroon van het vochtgehalte aan het bodemoppervlak, waarneembaar met het blote oog als kleurverschil, en tevens waarneembaar m.b.v. thermisch infra rood opnamen.

Twee raaien werden in lengterichting over het veld gelegd. Langs elke raai werden 50 punten bemonsterd op onderlinge afstand van 4 m. Totale raailengte dus 2 x 200 m.

Op ieder bemonsteringspunt (locatie) werden twee ringmonsters gestoken (diam. 5 cm, hoogte 5 cm), één voor de laag 0-5 cm, en één voor de laag 5-10 cm diep. Op iedere locatie werd tevens de textuur bepaald (0-10 cm), en werden bovendien andere gegevens verzameld.

Aan alle verzamelde ringmonsters (200) werd de vocht karakteristiek bepaald, i.e. vochtgehalten werden gemeten bij vochtspanningen van 0,25, 1,0, 10, 100 en 1500 kPa.

Voor een beperkt aantal monsters werden aanvullende metingen gedaan bij tussenliggende vochtspanningen, maar deze werden niet in hierna beschreven schalingsprocedures betrokken. Verschillen in vocht karakteristiek tussen de twee bemonsteringsdiepten waren verwaarloosbaar; de monsters werden daarom niet onderscheiden naar diepte.

Allereerst werden volumetrische vochtgehalten per monster geschaald naar relatieve vochtgehalten, gebruikmakend van het verzadigd vochtgehalte van het desbetreffende monster. Bij alle verdere databehandeling werden steeds deze relatieve vochtgehalten gebruikt.

In een eerste poging tot schalen van de vocht karakteristiek werden alle monsters te zamen als een verzameling beschouwd. Op deze verzameling werd een 'gemiddelde' curve gefit m.b.v. het Van Genuchten-Mualem model (SOHYP). De afwijking van de individuele 200 curven t.o.v. de verkregen gemiddelde curve werden geminimaliseerd op basis van de kwadratensom, waarbij de  $\log(p)$  waarden werden gebruikt. De reductie van de variantie bleek niet bevredigend. Vervolgens werd getracht verbetering aan te brengen door monsters te verdelen in twee groepen op basis van textuur: een 'silt loam' groep en een 'loam' groep, afkomstig van resp. 21 en 65 locaties; 14 locaties werden geschrapt wegens twijfelachtige textuur.

De twee opnieuw m.b.v. SOHYP bepaalde 'gemiddelde' pF-curven ( $\log$  schaal) bleken elkaar te kruisen, hetgeen strookt met de slechte schaalbaarheid in geval geen textuuronderscheid werd gemaakt. Schaling voor de twee onderscheiden groepen werd op bovengenoemde wijze opnieuw uitgevoerd en gaf bevredigende resultaten. De schaalfactor  $\alpha$  voor beide groepen bleek  $\log$ -normaal verdeeld. De kwadratensom (nu van de  $p$  in plaats van  $\log(p)$  curven) verminderde met een factor 100 voor de 'silt loam' groep en 1000 voor de 'loam' groep.

De op bovengenoemde wijze bepaalde standaardafwijking in  $\log \alpha$  werd vervolgens gebruikt in modelverificatie (transportmodel) om de variantie in vocht karakteristiek en hydraulische doorlatendheid te kwantificeren. Variantie in de hydraulische schaalfactor bleek overigens een van de sterkste foutenbronnen bij de voorspelling van zowel vocht- als temperatuurverloop in de bovengrond, en van de verdamping (steeds kale grond!).



LITERATUUR M.B.T. RUIMTELIJKE VARIABILITEIT  
VAN (GEO)HYDROLOGISCHE PARAMETERS

versie 6 dd. juli 1986

Samengesteld uit bijdragen van  
M.G.M. den Blanken  
G.K. Brouwer  
H.G. de Jonge  
J.W. Hopmans  
A. Obdam  
S. v.d. Schaaf  
E. Seyhan  
J.V. Witter



Sommige titels zijn achter het jaartal voorzien van een aanduiding tussen haakjes. Als dit een onderstreepte persoonsnaam is, is de betreffende publikatie bij die persoon in te zien, resp. verkrijgbaar. Is de aanduiding er een met twee hoofdletters, dan hebben die de volgende betekenis:

- BA basiswerk (voor beginners)
- CA case study
- PR geostatistische computerprogramma's
- TO toegepast
- TE theoretisch

1. M. Aboitiz, J.W. Labadie, and D.F. Heermann. Stochastic soil moisture estimation and forecasting for irrigated fields. *Water Resour. Res.* 22(2), pp. 180-190, 1986 (TO).
2. F.P. Agterberg; Autocorrelation functions in geology. D.F. Merriam, ed., *Proc. Symp. Geostatistics*, Lawrence, 1970, pp. 113-141. Plenum Press, New York, 1970 (BA).
3. F.P. Agterberg; *Geomathematics*. Elsevier, 1974 (BA).
4. F.P. Agterberg and I. Bauerjee; Stochastic model for the deposition of varves in glacial Lake Barlow-Ojibway, Ontario, Canada. *Can. J. Earth Sc.* 6, 625, 1969 (CA).
5. L.R. Ahuja, J.W. Naney, and D.R. Nielsen. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(4), pp. 699-702, 1984 (TO).
6. L.R. Ahuja, J.W. Naney, and D.R. Nielsen; Scaling soil water properties and infiltration modelling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48(5), pp. 970-973, 1984 (TO).
7. J. Andersson, and A.M. Shapiro. Stochastic Analysis of 1-dimensional steady-state unsaturated flow: A comparison of Monte Carlo and perturbation methods. *Water Resour. Res.* 19(1), pp. 121-133, 1983 (TE).
8. O.A. Alpay; A practical approach to defining reservoir heterogeneity. *J. Petr. Techn.* 20(7), pp. 841-848, 1972.

9. O. Babalola; Spatial variability of soil water properties in tropical soils in Nigeria.  
Soil Sci. 126, pp. 269-279, 1978.
10. F.G. Baker, Variability of hydraulic conductivity within and between nine Wisconsin soil series.  
Water Res. Res. 14(1), pp. 103-108, 1978.
11. A.A. Bakr, L.W. Gelhar, A.L. Gutjahr and J.R. McMillan; Stochastic analysis of spatial variability in subsurface flows.  
I. Comparison of one and three dimensional flows.  
Water Res. Res. 14(2), pp. 263-271, 1978 (TE).  
II. (by A.L. Gutjahr, L.W. Gelhar, A.A. Bakr and J.R. McMillan) Evaluation and application.  
Water Res. Res. 14(5), pp. 953-959, 1978 (TE).
12. C.F. Banfield and C.L. Bascomb; (see Bascomb and Jarvis)
13. M.S. Bartlett; The statistical analysis of pattern.  
Chapman & Hall, London, 1975 (TE).
14. C.L. Bascomb and M.G. Jarvis; Variability in three areas of the Deuchworth soil map unit.  
I. Purity of the map unit and property variability within it.  
J. Soil Sci. 27, pp. 420-437, 1976  
II. (by C.F. Banfield and C.L. Bascomb) Relationships between soil properties and similarities between profiles using laboratory measurements and field observations.  
J. Soil Sci. 27, 438-450, 1976.  
III. (by C. Williams and J.H. Rainer) Soil grouping based on chemical composition.  
J. Soil Sci. 28, pp. 180-190, 1977.
15. P.H.T. Beckett and R. Webster; Soil variability: a review.  
Soils and Fertilizers, 34(1), pp. 1-15, 1971 (BA). / .tp 6
16. R.J. Bennett; Spatial time series.  
Pion Ltd., London, 1979 (TE).
17. D.W. Bennion and J.C. Griffiths; A stochastic model for predicting variations in reservoir rock properties.  
Trans. AIME, 237(2), pp. 9-16, 1966 (BA).
18. D.W. Bennion and C.A. Hope; Mathematical modeling of reservoir rock properties.  
J. of Canadian Petroleum, April/June 1974, pp. 1-10 (BA).
19. J.F. Blyth and D.A. McLeod; The significance of soil variability for forest soil studies in north-east Scotland.  
J. Soil Sci. 29, 420-431, 1978.

20. J. Bouma; Soil morphology and preferential flow along macropores.  
Agric. Water Management 3, pp. 235-250, 1980/81 (BA).
21. R.L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe. Rainfall generation: a nonstationary time-varying multi-dimensional model.  
Water Resour. Res. 12(3), pp. 450-456, 1976.
22. R.L. Bras and I.R. Rodriguez-Iturbe. Random functions and hydrology.  
Addison-Wesley Pu. Co. 1985.
23. A.B. McBratney, R. Webster and T.M. Burgess; The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables.  
I. Theory and method.  
Computers and Geoscience 7(4), pp. 331-334, 1981.  
II. Program and examples.  
Computers and Geoscience 7(4), pp. 335-365, 1981 (PR).
24. E. Bresler, G. Dagan, R.J. Wagenet, and . Laufer. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 48(1), pp. 16-24, 1984 (TO).
25. E. Bresler, and G. Dagan. Unsaturated flow in spatially variable fields.  
ii. Application of water flow models to various fields.  
Water Resour. Res. 19(2), pp 421-428, 1983 (te).  
iii. Solute transport models and their application to two fiels.  
Water Resour. Res. 19(2), pp 429-435, 1983 (te).
26. W.A. van Briemen; Verbreiding van met een persput geïnjecteerd water in een gelaagd watervoerend pakket.  
Afstudeerverslag TH Delft, afd. Civiele Techniek, 1978.
27. M. van den Broek, A. van Amstel, A. Verbakel and B. Redroli; Variability of soil properties in a landscape ecological survey in the Tuscan Apennines, Italy.  
Catena, vol 8, pp. 155-170, Braunschweig, 1981 (CA)
28. T.A. Buishand; De variantie van gebiedsneerslag als functie van de puntneerslagen.  
Mededelingen Landbouwhogeschool 77-10, Wageningen, 1977.
29. P.A. Burrough; Fractal Dimensions of landscapes and other environmental data.  
Nature, 294(5838), pp. 240-242, 1981 (TE).
30. P.A. Burrough and R. Webster; Improving a reconnaissance soil classification by multivariate methods.  
J. Soil Sci. 27, pp. 554-571, 1976.

31. P.A. Burrough, L. Brown and E.C. Morris; Variations in vegetation and soil pattern across the Hawkesbury Sandstone from Barren Grounds to Fitzroy Falls, N.S.W.  
Aust. J. Ecol. 2, pp. 137-159, 1977.
32. T.M. Burgess and R. Webster, Optimal interpolation and isorithmic mapping of soil properties.  
I. the semivariogram and punctual kriging.  
II. Block kriging.  
Soil Sci. 31, pp. 315-342, 1980 (TE).  
III. (by Webster and Burgess) Changing drift and universal kriging.  
J. Soil Sci. 31, pp. 505-520, 1980 (TE).
33. Y.A. Buyevich, A.I. Leonov and V.M. Safrai; Variations in infiltration velocity due to random large-scale fluctuations of porosity.  
J. Fluid Mech., 37(2), pp. 371-378, 1969.
34. E. Byers and D.B. Stephens. Statistical and stochastic analysis of hydraulic conductivity and particle size in a fluvial sand.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 47(6), pp. 1072-1081, 1983 (TO).
35. D.R. Cameron; Variability of soil water retention curves and predicted hydraulic conductivities on a small plot.  
Soil Sci. 126, pp. 364-370, 1978.
36. J. Campbell; Variation of selected properties across a soil boundary.  
J. Soil Sci. Soc. Am. 41, pp. 578-582, 1977.
37. J. Campbell; Locating boundaries between mapping units.  
Math. Geol. 10, pp. 289-299, 1978.
38. J. Campbell; Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units.  
J. Soil Sci. Soc. Am. 42, pp. 460-464, 1978.
39. H.O. Carvallo, D.K. Cassel, J. Hammond and A. Bauer; Spatial variability of in situ unsaturated hydraulic conductivity of Maddock sandy loam.  
Soil Sci. 121, pp. 1-8, 1976.
40. D.K. Cassel and A. Bauer; Spatial variability in soils below depth of tillage: Bulk density and fifteen atmosphere percentage.  
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39, pp. 247-250, 1975.
41. D.K. Cassel and L.A. Nelson; Variability of mechanical impedance in a tilled one-hectare field of Norfolk sandy loam.  
J. Soil Sci Soc. Am. 43, pp.450-455, 1979.

42. C. Chatfield; The analysis of time series: an introduction.  
Chapman Hall, 268 pp., 1984.
43. Chao Lin Chu; Applications of Kalman filters to hydrology,  
hydraulics and water resources.  
Proc. AGU, Chapman Conf.  
Published by Stochastic Hydraulics Program, Dept. of Civil  
Eng., Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh, 1978 (TE).
44. G.R. Chirlin, and E.F. Wood. On the relationship between  
kriging and state estimation.  
Water Resour. Res. 18(2), pp. 432-438, 1982.
45. H.R. Cho. Stochastic dynamics of precipitation: an example.  
Water Resour. Res. 21(8), pp. 1225-1232, 1985.
46. S.H. Chua and R.L. Bras; Estimation of stationary and  
non-stationary random fields: kriging in the analysis of  
orographic precipitation.  
Mass. Inst. Techn., Cambridge, Mass., 1980.
47. J.E. Cipra, O.W. Bidwell, D.A. Whitney and A.M. Feyerhern;  
Variations with distance in selected fertility measurement of  
pedons of Western Kansas Ustoll.  
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36, pp. 110-115, 1972.
48. R.B. Clapp, G.M. Hornberger, and B.J. Cosby. Estimating  
spatial variability in soil moisture with a simplified  
dynamic model.  
Water Resour. Res. 19(3), pp. 739-745, 1983 (CA).
49. I. Clark; Practical Geostatistics.  
Applied Science Publishers Ltd., London, 1979 (BA).
50. Commonwealth Bureau of Soils; Bibliography on variability of  
soil samples taken for chemical analysis (1966-43).  
C.B.S., Harpenden, U.K., 1968.
51. R.L. Cooley; A method of estimating parameters and assessing  
reliability for models of steady state groundwater flow.  
2. Application of statistical analysis.  
Water Res. Res. 15( 3), pp. 603-617, 1979
52. J.R. Cordova, and R.L. Bras. Physically based probabilistic  
models of infiltration, soil moisture, and actual  
evapotranspiration.  
Water Resour. Res. 17(1), pp. 93-106, 1981.
53. R.M. Cormack and J.K. Ord (eds.); Spatial and temporal  
analysis in ecology (10 vols.).  
International Cooperative Publishing House, Fairland,  
Maryland, U.S.A., 1979.

54. N. Cressie and D.M. Hawkins; Robust estimation of the variogram I.  
Math. Geol. 12(2), 1980 (TE).
55. J.D. Creutin and C. Obled; Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields.  
Water Res. Res. 18, pp. 413-431, 1982.
56. G. Dagan. Models of groundwater flow in statistically homogeneous porous formations.  
Water Resour. Res. 15(1), 1979 (TE).
57. G. Dagan. Stochastic modelling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities: the inverse problem.  
Water Resour. Res. 21(1), pp. 65-72, 1982 (TE).
58. G. Dagan, and E. Bresler. Unsaturated flow in spatially variable fields.  
I. Derivation of models of infiltration and redistribution.  
Water Resour. Res. 19(2), pp.413-420, 1983 (te).
59. G. Dagan and E. Bresler. Unsaturated flow in spatially variable fields.  
I. Derivation of models of infiltration and redistribution.  
Water Resour. Res. 19(2), pp. 413-420, 1983 (TE).  
II. Application of water flow models to various fields.  
Water Resour. Res. 19(2), pp. 421-428, 1983 (TO).  
III. Solute transport models and their application to two fields.  
Water Resour. Res. 19(2), pp. 429-435, 1983 (TO).
60. J.H. Dane, R.B. Reed, and J.W. Hopmans. Estimating soil parameters and sample size by bootstrapping.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 50(2), pp.283-287, 1986 (TE).
61. A.C. Das; Two dimensional systematic sampling and the associated stratified random sampling.  
SANKYA, The Indian Journal of Statistics 10(4), pp. 95-108, 1950 (TE).
62. M. David; Geostatistical ore reserve estimation.  
Elsevier, 1978 (BA).
63. B.E. Davies and S.A. Gamm; Trend surface analysis applied to soil relation values from Kent, England.  
Geoderma 3, pp. 223-231, 1970.
64. J.C. Davis; Statistics and data analysis in geology.  
Wiley international, 1973 (BA).

65. J.C. Davis and M.J. McCullagh; Display and analysis of spatial data.  
Wiley, 1975 (BA).
66. P. Delfiner; Linear estimation of non-stationary spatial phenomena.  
In: M. Guarascio et al (eds>); Advanced Geostatistics in the mining industry, pp. 49-68, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, 1976 (TE).
67. J.P. Delhomme; Applications de la theorie des variables regionalisees dans les sciences de l'eau.  
These de docteur-ingenieur presentee a l'universite Pierre et Marie Curie, Paris, 1976 (TE).
68. J.P. Delhomme; Kriging in hydrosociences.  
Advances in Water Resources 1(5), pp. 251-256, 1978 (BA).
69. J.P. Delhomme, Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: a geostatistical approach.  
Water Res. Res. 15(2), pp. 269-280, 1979.
70. J.P. Delhomme; Kriging in the design of streamflow sampling networks.  
Water Res. Res. 15(6), pp. 1833-1840, 1979.
71. M.D. Dettinger, and J.L. Wilson. First order analysis of uncertainty in numerical models of groundwater flow. part 1. Mathematical development.  
Water Resour. Res. 17(1), pp. 149-161, 1981.
72. J.C.I. Dooge, Spatial variation of hydrologic parameters.  
Copleen van overhead sheets van voordracht gehouden aan de L.H. te Wageningen en literatuurlijst, 1981 (G.K. Brouwer)
73. P.A. Dowd and A.G. Royle; Geostatistical applications in the Athabasca tar sands.  
15th APCOM Symp., Brisbane, Australia, 1977, pp. 231-234.  
Austr. Inst. of Mining and Metallurgy, Victoria, Australia, 1977.
74. L.J. Drew; Pattern drilling exploration: optimum pattern types and hole spacing when searching for elliptical shaped targets.  
Math. Geol. 11, pp. 223-254, 1979.
75. R. Eljpe and K.J. Weber; Mini-permeameters for consolidated rock and unconsolidated sand.  
Am. Ass. Petr. Geol. Bull. V.55, no. 2, pp. 307-309, febr. 1971.

76. H. Fluehler, L.H. Stolzy and M.S. Ardakani; A statistical Approach to define soil aeration in respect to denitrification.  
Soil Sci. 122, pp. 115-123, 1976.
77. R.A. Freeze; A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in non-uniform homogeneous media.  
Water Res. Res. 11(5), pp. 725-741, 1975 (BA).
78. Y.M. Gajem, A.W. Warrick, and D.E. Meyers. Spatial dependence of physical properties of a Typic Torrifluvent soil.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 45(5), pp. 709-715, 1981 (TO).
79. G. Gambolati and G. Volpi; Groundwater contour mapping in Venice by stochastic interpolators.  
I. Theory.  
II. Results.  
Water Res. Res. 15(3), pp. 281-297, 1979.
80. G. Gambolati and G. Volpi; A conceptual deterministic analysis of the Kriging technique in Hydrology.  
Water Res. Res. 15(3), pp. 625-629, 1979.
81. L.S. Gandin; Objective analysis of meteorological fields.  
Isr. Prog. for Sc. Transl., 1965.
82. R.G. Garrett and T.I. Goss; The statistical appraisal of survey effectiveness in regional geochemical surveys for Canada's uranium reconnaissance program.  
Math. Geol. 12, pp. 443-458, 1980.
83. L.W. Gelhar; Effects of hydraulic conductivity variations on groundwater flows.  
Proc. 2nd. Int. IAHR Symp. on Stochastic Hydraulics, Sweden, pp. 21/1-21/3, 1971 (BA).
84. L.W. Gelhar; Stochastic analysis of phreatic aquifers.  
Water Res. Res. 10(3), pp. 539-545, 1974.
85. P.J. Greminger, Y.K. Sud, and D.R. Nielsen. Spatial variability of field-measured soil-water characteristics.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 49(5), pp. 1075-1081, 1985 (TO). ex.tp  
6
86. J.J. de Gruyter; Numerical classification of soils and its application in survey.  
PUDOC, Wageningen, 117 pp., 1977.
87. M. Guarascio et al. (ed); Advanced geostatistics in the mining industry.  
Reidel, Dordrecht, 1975 (BA).

88. A.L. Gutjahr, and L.W. Gelhar. Stochastic models of subsurface flow: Infinite versus finite domains and stationarity.  
Water Resour. Res. 17(2), pp.337-350, 1981 (TE).
89. A.L. Gutjahr, L.W. Gelhar, A.A. Bakr and J.R. MacMillan; (see Bakr, Gelhar, Gutjahr and MacMillan)
90. R.J. Hoeksema, and P.K. Kitanidis. Comparison of gaussian conditional mean and kriging estimation in the geostatistical solution of the inverse problem.  
Water Resour. Res. 21(6), pp. 825-836, 1985 (TE).
91. R.J. Hoeksema, and P.K. Kitanidis. Analysis of the spatial structure of properties of selected aquifers.  
Water Resour. Res. 21(4), pp. 563-572, 1985 (TO).
92. R.J. Hoeksema, and P.K. Kitanidis. An application of the geostatistical approach to the inverse problem in two-dimensional groundwater modeling.  
Water Resour. Res. 20(7), pp. 1003-1020, 1984 (PR).
93. P.A. Hsieh, and S.P. Neuman. Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media.  
I. Theory.  
Water Resour. Res. 21(11), pp. 1655-1665, 1985 (TE).
94. R.J. Howarth, G.S. Koch, C.Y. Chork, R.H. Carpenter and J.H. Schuenmeyer; Statistical map analysis techniques applied to regional distribution of uranium in stream sediment samples from the Southeastern United States for the National Uranium Resources Evaluation Program. Math. Geol. 12, pp. 339-367, 1980
95. J.P. Hughes and D.P. Lettenmaier; Data requirements for kriging: estimation and network design.  
Water Res. Res. 17(6), pp. 1641-1650, 1981.
96. C. Huybregts and G. Matheron; Universal kriging (an optimal method for estimating and contouring in trend surface analysis).  
In: Decision making in the mineral industry.  
Can. Inst. Mining Metallurgy, Spec. vol 12, pp. 159-169, 1977 (BA).
97. G.M. Jenkins and D.G. Watts; Spectral Analysis.  
Holden Day, 525 pp., 1968.
98. G.G. Johns; Selection and use of representative sites in a large neutron moisture meter network.  
Austr. J. Soil Res. 17, pp. 249-261, 1979.

99. H.G. de Jonge; Onderzoek naar de invloed van inhomogeniteiten op de verblijftijden van het grondwater.  
KIWA-SWO-326, 191 pp., 1981 (BA).
100. A.G. Journel; Geostatistics for conditional simulation of ore bodies.  
Econ. Geol. 69, pp. 673-687, 1974 (TE).
101. A.G. Journel; The lognormal approach to predicting local distribution of selective mining unit grades.  
Math. Geol. 12, pp. 285-303, 1980.
102. A.G. Journel and Ch.J. Huijbregts; Mining Geostatistics.  
Academic Press, 1978 (BA/TE).
103. W.A. Jury, L.H. Stolzy and P. Shouse; A field test of the transfer function model for predicting solute transport.  
Water Res. Res. 18(2), pp. 369-375, 1982.
104. J. Kafritsas and R.L. Bras; The practice of Kriging  
Mass. Inst. Techn., Cambridge, Mass., 1981 (PR).
105. T.C. Keisling, J.M. Davidson, D.L. Weeks and R.D. Morrison; Precision with which selected soil physical parameters can be estimated.  
Soil Sci. 124, pp. 241-248, 1977.
106. P.K. Kitanidis, and E.G. Vomvoris. A geostatistical approach to the inverse problem in groundwater modeling (steady state) and one-dimensional simulations.  
Water Resour. Res. 19(3), pp. 677-690, 1983 (PR).
107. J.B. Kool; Een vergelijking van methoden voor de bepaling van bodemvariabiliteit. (G.K. Brouwer)
108. J.W. Kwaadsteniet de. Is kriging-techniek geschikt gereedschap voor meetnetoptimalisatie?  
H2O, 19, pp. 22-23, 1986 (TE).  
Comments: H2O 19, 1986, pp. 45 and 71.
109. A. Lallemand and P. Peaudecerf; Recherche des relations entre la valeur de la dispersivité macroscopique d'un milieu aquifère, ses autres caractéristiques et les conditions de mesure.  
Etude bibliographique.  
Bull. du B.R.O.M., Section III(4), pp. 277-284, 1978.
110. W.E. Larimore. Statistical interference on stationary random fields.  
Proc. of the IEEE 65(6), pp. 961-970, 1977.

111. S. Lovejoy, and D. Schertzer. Generalized scale invariance in the atmosphere and fractal models of rain.  
Water Resour. Res. 21(8), pp. 1239-1250, 1985.
112. I. Lundstroem and L. Bjoerk; Evaluation of map precision by means of the area of influence method. Math. Geol. 11, pp. 701-715, 1979.
113. C. Maas; Makrodispersie, resultaten van onderzoeken te Bergambacht en te Remmerden.  
RID-rapport, HYH-80-9, 1980.
114. B.B. Mandelbrot; Fractals, form, chance and dimension.  
Freeman, 1977 (TE).
115. B.B. Mandelbrot; The fractal geometry of nature.  
Freeman, 427 pp., 1982 (TE).
116. B. Matern; Spatial variation.  
Meddelanden fraan statens Skogsforskningsinstitut, band 49, no. 5, 1960 (BA).
117. A. Mantoglou and J.L. Wilson; The turning band method for simulation of random fields, using line generation by a spectral method.  
Water Res. Res. 18(5), pp. 1379-1394, oct. 1982 (TE).
118. G. Matheron; Principles of Geostatistics.  
Economic Geology, 58, pp. 1246-1266, 1963.
119. G. Matheron; Random Functions and their applications in Geology.  
D.F. Merriam, ed., Proc. Symp. Geostatistics, Lawrence, 1970, pp 79-87  
Plenum Press, New York, 1970.
120. G. Matheron, The theory of regionalized variables and its applications.  
Les cahiers du centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleau.  
Published by Ecole nationale Superieure des Mines de Paris, 1971.
121. J.M. Mejia, and I. Rodriguez-Iturbe. On the synthesis of random field sampling from the spectrum: An application to the generation of hydrological spatial processes.  
Water Resour. Res. 10(4), pp. 705-711, 1974.
122. A.T. Miesch; Variograms and variance components in geochemistry and ore evaluation.  
In: Quantitative studies in the geological sciences. Ed.: E.H.T. Whitten, Man. Geol. Soc. Am. 142, pp. 333-340, 1975 (BA).

123. E.E. Miller, and R.D. Miller. Physical theory for capillary flow phenomena.  
J. of Appl. Physiscs, 27(4), pp. 324-332, 1956.
124. R.L. Miller and J.S. Kahn; Statistical analysis in the geological sciences.  
Wiley, 1962.
125. A.W. Moore and S.W. Bie (eds.); Uses of soil information systems.  
Proc. Austr. meeting ISSS Working Group on Soil Information Systems, Canberra, March 2-4. PUDOC, Wageningen, 1966.
126. D.R. Nielsen, and J. Bouma (Eds). Soil Spatial Variability. Proceedings of a workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas, USA, 30 november-1 december, 1984.  
Pudoc, Wageningen, 1985.
127. D.R. Nielsen, J.W. Biggar and K.T. Ehr; Spatial variability of field measured soil-water properties.  
Hilgardia 42, pp. 215-259, 1973.
128. D.R. Nielsen, P.M. Tillostson, and S.R. Viera. analyzing field- measured soil-water properties.  
Agric. Management 6(2/3), pp. 93-109, 1983 (BA).
129. S.P. Neuman; Calibration of distributed parameter groundwater flow models, viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty.  
Water Res. Res. 9(4), pp. 1006-1021, 1973.
130. S.P. Neuman and S. Yakowitz; A statistical approach to the inverse problem of aquifer hydrology.  
I. Theory.  
Water Res. Res. 15(4), pp. 845-860, 1979 (TE).  
II. (by S.P. Neuman, G.E. Fogg and E.A. Jacobson) Case study.  
Water Res. Res. 16(1), pp. 33-58, 1980 (TE).  
III. (by S.P. Neuman) Improved solution method and added perspective.  
Water Res. Res. 16(2), pp. 331-346, 1980 (TE).
131. S. Northcliff; Soil variability and reconnaissance soil mapping: a statistical study in Norfolk.  
J. Soil Sci. 29, pp. 404-419, 1978.
132. R.A. Olea; Optimal contour mapping using universal kriging.  
J. Geophys. Rse. 79(5), pp. 695-702, 1974
133. R.A. Olea; Optimum mapping techniques using regionalized variable theory.  
Diss. Kansas Geol. Survey, Univ. of Kansas, Lawrence, Kansas, USA, 137 pp., 1975 (TE).

134. A.J. Peck, R.J. Luxmoore, and J.C. Stolzy. effects of spatial variability of soil hydraulic properties in water budget modeling.  
Water Resour. Res. 13(2), pp. 348-354, 1977 (TO).
135. A.J. Peck. Field variability of soil physical properties.  
Adv. in Irrigation 2, pp. 189-221, 1983 (BA).
136. J.R. Philip. Field Heterogeneity: Some basic issues.  
Water Resour. Res. 16(2), pp. 443-448 (CA).
137. J.F. Pickens and G.E. Grisak; Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer.  
Water Res. Res. 17(4), pp. 1191-1211, 1981.
138. J.F. Pickens and G.E. Grisak; Modeling of scale-dependent dispersion in hydrogeologic systems.  
Water Res. Res. 17(6), pp 1701-1711, 1981.
139. W.A. Pryor, Permeability-porosity patterns and variations in some holocene sand bodies.  
Bull. Am. Ass. Petr. Geol. 57(1), pp. 162-189, jan. 1973 (CA).
140. W.A. Pryor and K. Fulton; Geometry of reservoir-type sandbodies in the Holocene Rio Grande delta and comparison with ancient reservoir analogs.  
Soc. of Petr. Eng. AIME 7045, 1978.
141. M.H. Quenouille; Problems in plane sampling.  
Ann. Math. Stat. 20, pp. 335-375, 1949 (TE).
142. J.M. Ragg and R. Henderson; A reappraisal of soil mapping in an area of Southern Scotland:  
I. The reliability of four soil mapping units and the morphological variability of their taxa.  
J. Soil Sci. 29, pp. 404-419, 1978.  
II. The usefulness of some morphological properties and of a discriminant analysis in distinguishing between the dominant taxa of 4 mapping units.  
J. Soil Sci. 31, pp. 559-572, 1980.
143. P.V. Rao, P.S.C. Rao, J.M. Davidson and L.C. Hammond; Use of goodness of fit tests for characterizing the spatial variability of soil properties.  
J. Soil Sci. Soc. Am. 43, pp. 274-278, 1979.
144. H.E. Reineck and I.B. Singh; Depositional sedimentary environments.  
Springer Verlag, 1980 (BA).

145. J.M. Rendu. An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation.  
South African Institute of Mining and Metallurgy, 1978.
146. B.D. Ripley; Spatial statistics.  
John Wiley & sons, 1981 (BA).
147. A.G. Royle; Geostatistical recognition of structure in beach sands.  
15th APCOM Symp., Brisbane, Australia, 1977, pp. 231-234.  
Austr. Inst. of Mining and Metallurgy, Victoria, Australia, 1977 (BA).
148. D. Russo. Design of an optimal sampling network for estimating the variogram.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 48(4), pp. 708-716, 1984 (PR).
149. D. Russo, and E. Bresler. Scaling soil hydraulic properties of a heterogeneous field.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 681-685, 1980 (TO).
150. D. Russo, and E. Bresler. Field determination of soil hydraulic properties for statistical analysis.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 44(4), pp. 697-702, 1980 (TO).
151. D. Russo, and E. Bresler. Effect of field variability in soil hydraulic properties on solutions of unsaturated water and salt flows.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 45(4), pp. 675-681, 1981 (TO).
152. D. Russo, and E. Bresler. Soil hydraulic properties as stochastic processes:  
I. An analysis of spatial variability. br; Soil Sci. Soc. Am. J. 45(4), pp. 682-687, 1981 (TO)  
II. Errors of estimates in a heterogeneous field.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 46 (1), pp. 20-26, 1982 (TO).
153. R. Sabourin; Application of two methods for the interpretation of the underlying variogram.  
In: M. Guarascio et al. (eds); Advanced Geostatistics in the Mining Industry, pp.101-109, D. Reidel Publ. C., Dordrecht, 1976 (TE).
154. J. Serra. Image analysis and mathematical morphology.  
Academic Press, London, 1982.
155. S.E. Serrano, T.E. Unny, and W.C. Lennox. Analysis of stochastic groundwater problems.  
i. Deterministic partial differential equations in groundwater flow. A functional-analytic approach.  
ii. Stochastic partial differential equations in groundwater flow. A functional-analytic approach.  
iii. Approximate solutions of stochastic partial differential equations.

- J. of Hydrology 82, pp. 247-306, 1985.
156. E. Seyhan; A statistical analysis of morphometric variables and their correlation with the mean annual flood.  
Geografisch Instituut, Rijksuniversiteit Utrecht, 1975.
  157. E. Seyhan; Quantitative relief classification in the Ardeche river basin, Southern France.  
Serie B, no. 62, Institute of Geography, State University of Utrecht, 1976.
  158. E. Seyhan; Calculation of runoff from basin physiography (CBRP).  
Geographical Studies 2, Institute of Geography, State Univ. of Utrecht, 1976.
  159. E. Seyhan; Mathematical simulation of watershed hydrologic processes.  
Institute of Geography, State Univ. of Utrecht, 1977.
  160. E. Seyhan and B. Keet; Multivariate statistical analysis.  
Part I. Application to hydromorphometrical data (case study: Ahr river basin, Bolzano, Italy).  
Aqua-VU, no. 8, Institute of Earth Sciences, Free University, Amsterdam, 1981
  161. E. Seyhan, Introduction to multivariate statistical analysis in hydrology.  
Institute of Earth Sciences, Free University, Amsterdam, 1981.
  162. M.L. Sharma, G.A. Gander, and C.G. Hunt. Spatial variability of infiltration in a watershed.  
J. of Hydrology 45, pp 101-122, 1980.
  163. R.E. Smith, and R.H.B. Hebbert. A Monte-Carlo analysis of the hydrologic effects of spatial variability of infiltration.  
Water Resour. Res. 15(2), pp. 419-429, 1979.
  164. L. Smith; Spatial variability of flow parameters in a stratified sand.  
Math. Geol. 13(1), pp. 1-21, 1981 (BA).
  165. L. Smith and R.A. Freeze; Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain.  
I. One-dimensional simulations.  
Water Res. Res. 15(3), pp. 521-528, 1979 (BA).  
II. Two-dimensional simulations.  
Water Res. Res. 15(6), pp. 1543-1559, 1979 (BA).

166. C. Simmons, D.R. Nielsen, and J.W. Biggar. Scaling of field-measured soil-water properties.  
Hilgardia 47, pp. 77-173, 1979.
167. J.B. Sisson, and P.J. Wierenga. Spatial variability of steady-state infiltration rates as stochastic processes.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 45(4), pp. 699-704, 1981 (TO).
168. L. Smith, and F.W. Schwartz. Mass transport. iii. Role of hydraulic conductivity data in prediction.  
Water Resour. Res. 17(5), pp. 1463-1479, 1981 (TO).
169. Ph. Th. Stol. Rainfall interstation correlation functions derived for a class of generalized storm models.  
ICW Report 7, Wageningen, 1983.
170. P.M. Tillotson, and D.R. Nielsen. Scale factors in soil science.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 48(5), pp. 953-959, 1984.
171. M. Vauclin, S.R. Viera, G. Vachaud, and D.R. Nielsen. The use of cokriging with limited field soil observations.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 47(2), pp. 175-184, 1983 (re).
172. S.R. Viera, D.R. Nielsen, and J.W. Biggar. Spatial variability of field-measured infiltration rates.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 45(6), pp. 1040-1048, 1981 (TO).
173. T.S. Virdee and N.T. Kottegoda; A brief review of kriging and its application to optimal interpolation and observation well selection.  
Hydrol. sc. j. 29(4):367-387, 1984
174. G. Volpi and G. Gambolati; On the use of a main trend for the kriging technique in technology.  
Advances in Water Resources 1, pp. 345-349, 1978.
175. J.E. Warren and H.S. Price; Flow in heterogeneous porous media.  
J. Soc. Petr. Eng. 1, pp. 153-169, 1961 (BA).
176. A.W. Warrick, G.J. Mullen, and D.R. Nielsen. Scaling field-measured soil hydraulic properties using a similar media concept.  
Water Resour. Res. 13(2), pp. 355-362, 1977 (TE).
177. A.W. Warrick, G.J. Mullen, and D.R. Nielsen. Predictions of the soil water flux based upon field-measured soil-water properties.  
Soil Sci. Soc. Am. J. 41(1), pp. 14-19, 1977 (TO).

178. A.W. Warrick, and A. Amoozegar-Fard. Infiltration and drainage calculations using spatially scaled hydraulic properties.  
Water Resour. Res. 15(5), pp. 1116-1120, 1979 (TO).
179. E. Waymire, and V.K. Gupta. The mathematical structure of rainfall representations.  
Water Resour. Res. 17(5), pp. 1261-1294, 1981.
180. E. Waymire, V.K. Gupta, and I. Rodriguez-Turbe. A spectral theory of rainfall at the meso-b scale.  
Water Resour. Res. 20(10), pp. 1453-1465, 1984.
181. K.J. Weber; Influence on fluid flows of common sedimentary structures in sand bodies.  
Soc. Petr. Eng. of AIME, no. 9247, 1980 (BA).
182. K.J. Weber, R. Eijpe, D. Leijnse and C. Moens; Permeability distribution in a holocene distributary channel-fill near Leerdam (The Netherlands).  
Geologie en Mijnbouw 51(1), pp. 53-62, 1972 (BA).
183. R. Webster; DIVIDE: a FORTRAN IV program for segmenting multivariate one-dimensional spatial series.  
Computer and Geosciences 6, pp. 61-68, 1980 (PR)
184. R Webster, and T.M. Burgess. Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions.  
J. of Soil Sci. 35, pp. 127-140, 1984 (TE).
185. R. Webster and T.M. Burgess; (see Burgess and Webster).
186. P. Whittle. On the variation of yield variance with plot size.  
Biometrika 43, pp.337-343, 1956.
187. P. Whittle. Topographic correlation, power-law covariance functions, and diffusion.  
Biometrika 49, pp.305-314, 1962.
188. L.S. Williardson and R.L. Hurst; Sample size estimation in permeability studies.  
J. Irr. and Drainage Div., 4240, 1965.
189. C. Williams and J.H. Rainer; (see Bascomb and Jarvis)
190. K.J. Wilt and J. Brauns; Durchlaessigkeitsanisotropie von Haufwerken infolge Kornplattigkeit und Kornorientierung.  
Universitaet Fredericiana, Veroeff. Inst. Bodenmech. u. Felsmech. no. 87, pp. 81-113, Karlsruhe, 1981.

191. J.V. Witter. Heterogeneity of dutch rainfall.  
PhD-thesis, Landbouw Universiteit Wageningen, 1984.
192. Yao Huang Wu, V. Yevjevich and D.A. Woolhiser; Effects of surface roughness and its spatial distribution on runoff hydrographs.  
Hydrol. Paper 96, Colo. state Univ., Ft. Collins, Colorado, 1978
193. T.C.J. Yeh, L.W. Gelhar, and A.L. Gutjahr. Stochastic analysis of unsaturated flow in heterogeneous soils.  
I. Statistically isotropic media.  
Water Resour. Res. 21(4), pp. 447-456, 1985 (TE).  
II. Statistically anisotropic media with variable  $\alpha$ .  
Water Resour. Res. 21(4), pp. 457-464, 1985 (TE).  
III. Observations and applications.  
Water Resour. Res. 21(4), pp. 465-471, 1985 (TO).
194. Yao Huang Wu, D.A. Woolhiser and V. Yevjevich; Effects of spatial variability of hydraulic resistance on runoff hydrographs.  
J. Hydrol. 59(3/4), pp. 231-248, 1982
195. V. Yevjevich; Regional analysis of hydrologic data.  
Computer workshop in statistical hydrology, Hydrology and Water Resources Program, Dept. of Civil Eng., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, 1978.
196. I.I. Zawadzki. Statistical properties of precipitation patterns.  
JAM 12, pp. 459-472, 1973.

RUIMTELIJKE VARIABILITEIT VAN BODEM EN WATER  
6e CHO-Studiebijeenkomst

datum: woensdag 22 oktober 1986  
plaats: Cultureel- en Congrescentrum "De Reehorst",  
Bennekomseweg 24, 6717 LM Ede (tel. 08380-33611).

- 09.00 Aanmelden (koffie)
- 09.30 Opening door de voorzitter van de CHO-TNO,  
Prof.Dr Ir J.C. van Dam
- 09.40 Scope van de dag,  
Dr J. Bouma (Stiboka), dagleider
- 10.00 The "state of the art" of spatial variation studies in soil  
and water,  
Prof.Dr P.A. Burrough (RUU)
- 11.00 Koffie
- 11.30 Van punt tot vlak,  
Ir A. Obdam (RGD)
- 12.00 Voorbeelden van toepassingen,  
Ir J. Hopmans (LH)
- 12.30 Lunch
- 13.30 Discussie in groepen aan de hand van een drietal thema's
- 15.00 Thee
- 15.15 Rapportering vanuit de groepen
- 15.45 Discussie,  
Dr J. Bouma, discussieleider
- 16.15 Sluiting door de voorzitter van de CHO-TNO,  
Prof.Dr Ir J.C. van Dam



Deelnemerslijst Studiebijeenkomst 22 oktober 1986

| Naam              | Instelling                                | Adres                                 |
|-------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| J. van Bakel      | ICW                                       | Postbus 35<br>6700 AA WAGENINGEN      |
| L.G. Barendregt   | Instituut voor Toegepaste Informatica TNO | Postbus 214<br>2600 AG DELFT          |
| H.F.M. ten Berge  | LUW, Vakgroep Bodem en Plantenvoeding     | De Dreijen 3<br>6703 BC WAGENINGEN    |
| W. Bleuten        | Rijksuniversiteit Utrecht                 | Postbus 80115<br>3508 TC UTRECHT      |
| A.P. Bot          | IWACO BV                                  | Postbus 174<br>5280 AD BOXTEL         |
| J. Bouma          | LUW, Vakgroep Bodemkunde en Geologie      | Postbus 37<br>6700 AA WAGENINGEN      |
| W. Bouten         | Fysisch Geografisch en Bodemkundig Lab.   | Dapperstraat 115<br>1093 BS AMSTERDAM |
| A.K. Bregt        | Stiboka                                   | Postbus 98<br>6700 AB WAGENINGEN      |
| P.A. Burrough     | Rijksuniversiteit Utrecht                 | Postbus 80115<br>3508 TC UTRECHT      |
| H.J. Colenbrander | CHO-TNO                                   | Postbus 297<br>2501 BD S GRAVENHAGE   |
| L.C.A. Corsten    | LUW, Vakgroep Wiskunde                    | De Dreijen 8<br>6703 BC WAGENINGEN    |
| J.C. van Dam      | TUD, Civiele Techniek                     | Postbus 5048<br>2600 GA DELFT         |
| E.F.M. Elewaut    | Dienst Grondwaterverkenning TNO           | Postbus 285<br>2600 AG DELFT          |
| F. van Geer       | Dienst Grondwaterverkenning TNO           | Postbus 285<br>2600 AG DELFT          |
| J.T. Groennou     | KIWA, Speurwerklaboratorium               | Postbus 1072<br>3430 BB NIEUWEGEIN    |
| J.J. de Gruyter   | Instituut voor Toegepaste Informatica TNO | Postbus 100<br>6700 AC WAGENINGEN     |
| J.C. Herweijer    | Shell Research BV                         | Postbus 60<br>2280 AB RIJSWIJK        |

|                      |                                                                                              |                                        |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| J.C. Hooghart        | CHO-TNO                                                                                      | Postbus 297<br>2501 BD S GRAVENHAGE    |
| J.W. Hopmans         | LUW, Vakgroep Hydraylica<br>en Afvoerhydrologie                                              | Nieuwe Kanaal 11<br>6709 PA WAGENINGEN |
| H. Houweling         | Rijksinstituut voor<br>Natuurbeheer                                                          | Postbus 9201<br>6800 HB ARNHEM         |
| J.W. de Kwaadsteniet | RIVM                                                                                         | Postbus 150<br>2260 AD LEIDSCHENDAM    |
| B.A. Marsman         | Stiboka                                                                                      | Diedenweg 4a<br>6717 KT EDE            |
| A. Obdam             | Rijks Geologische Dienst                                                                     | Postbus 157<br>2000 AD HAARLEM         |
| M.C. Rang            | Vakgroep Fysische Geografie<br>Rijksuniversiteit Utrecht +<br>Provinciale Waterstaat Limburg | Postbus 5700<br>6202 MA MAASTRICHT     |
| C.C.D.F. van Ree     | Laboratorium voor<br>Grondmechanica                                                          | Stieltjesweg 2<br>2628 CK DELFT        |
| S. van der Schaaf    | Landbouwniversiteit                                                                          | Nieuwe Kanaal 11<br>6709 PA WAGENINGEN |
| T. Schilperoort      | Waterloopkundig laboratorium                                                                 | Postbus 152<br>8300 AD EMMELOORD       |
| C.J. Schouten        | Vakgroep Fysische Geografie<br>Geografisch Instituut<br>Rijksuniversiteit Utrecht            | Postbus 80115<br>3508 TC UTRECHT       |
| E. Seyhan            | Vrije Universiteit Amsterdam                                                                 | Postbus 7161<br>1007 MC AMSTERDAM      |
| I. Simmers           | Institute of Earth Sciences<br>Free University                                               | Postbus 7161<br>1007 MC AMSTERDAM      |
| A. Stein             | LUW<br>Vakgroep Bodemkunde & Geologie                                                        | Postbus 37<br>6700 AA WAGENINGEN       |
| H. Stricker          | Landbouwniversiteit<br>Vakgroep Hydraulica en<br>Afvoerhydrologie                            | Nieuwe Kanaal 11<br>6709 PA WAGENINGEN |
| F.H.M. van de Ven    | DBW-RIZA                                                                                     | Postbus 17<br>8200 AA LELYSTAD         |

|                 |                                                                   |                                        |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| C. Volp         | SAMWAT-bureau                                                     | Postbus 297<br>2501 BD 's-GRAVENHAGE   |
| W.E. van Vuuren | DBW-RIZA Vestiging Arnhem                                         | Postbus 9072<br>6800 ED ARNHEM         |
| M. Witmer       | Rijksuniversiteit Utrecht<br>Vakgroep Milieukunde                 | Postbus 80115<br>3508 TC UTRECHT       |
| J.V. Witter     | Landbouwniversiteit<br>Vakgroep Hydraulica en<br>Afvoerhydrologie | Nieuwe Kanaal 11<br>6709 PA WAGENINGEN |
| J.H.M. Wösten   | Stiboka                                                           | Marijkeweg 11<br>6700 AB WAGENINGEN    |
| S. van der Zee  | Landbouwniversiteit,<br>Bodemhygiëne                              | De Dreijen 3<br>6703 BC WAGENINGEN     |

AANTEKENINGEN

AANTEKENINGEN

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

RAPPORTEN EN NOTA'S

- No. 1. Tweede rapport en aanbevelingen  
van de Contactgroep Archivering en Automatische Verwerking van  
hydrologische gegevens TNO.  
Januari 1977.
- No. 2. Verslag en aanbevelingen  
van de ad hoc-Groep Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur  
TNO.  
Juli 1978.
- No. 3. De droogte in 1976.  
Een samenvatting en overzicht van de over de droogte van 1976  
verschenen literatuur - (P.K.M. v.d. Heijde).  
Augustus 1978.
- No. 4. Nederlandse activiteiten in internationaal hydrologisch  
verband.  
Lezingserie, gehouden op 25 april 1978 te Delft, aangevuld met  
(schematische) overzichten van internationale organisaties en  
een overzicht van hun vertegenwoordigers in Nederland.  
Augustus 1978.
- No. 5. Waterkwaliteit in grondwaterstromingsstelsels.  
Een verslag van de Workshop op 1 en 2 april 1980 te Wageningen  
- (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen en een  
inventarisatie van het onderzoek in Nederland.  
Augustus 1980.
- No. 6. Derde Rapport en aanbevelingen  
van de Contactgroep Archivering en Automatische verwerking van  
hydrologische gegevens TNO.  
Februari 1981.
- No. 7. Overzicht van de wensen van hydrologen en waterbeheerders ten  
aanzien van het operationele regenwaarnemingsnet van het KNMI  
- J.C. Hooghart.  
Oktober 1981.
- No. 8.\*) Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep  
Hydrologische Terminologie.
- 8a. I. Water in de onverzadigde zone  
II. Water in de verzadigde zone  
Januari 1982.
- 8b. III. Atmosferisch water  
Juni 1983.
- 8c. IV. Oppervlaktewater  
Maart 1985.

\*) Verouderd, zie nieuwe uitgave R + N no. 16.

- No. 9. Waterkwaliteit en waterkwantiteit in het IJsselmeergebied.  
Een verslag van de 2e CHO-studiebijeenkomst op 2 en 3 november 1981, De Eemhof, Zuidelijk Flevoland - (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen.  
Februari 1982.
- No. 10. Rapport en aanbevelingen  
van de Contactgroep Grondwatermodellen, CHO-TNO.  
April 1982.
- No. 11. Inventarisatie Grondwaterkwaliteitsmodellen. f 30,--.  
L.J.M. Boumans.  
Oktober 1982.
- No. 12. Grondwaterkwaliteit in relatie met onderzoek en beleid.  
Een verslag van de 3e CHO-studiebijeenkomst op 15 maart 1983 te Wageningen - (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen.  
Juni 1983.
- No. 12a. Voorlopig overzicht van inventarisaties waarin grondwater-(kwaliteits)modellen voorkomen of hiermee in verband staan.  
J.C. Hooghart.  
Januari 1984.
- No. 13. Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping.  
Een verslag van de 4e CHO-studiebijeenkomst op 24 oktober 1984 in samenwerking met de Studiegroep Hupselse Beek - (J.C. Hooghart).  
Maart/april 1985.
- No. 14. Meten, meetnetten en optimale meetnetontwerpen ten dienste van het waterbeheer. f 15,--.  
Een verslag van:  
- Voorjaarsbijeenkomst van de KIVI Sectie Waterbeheer: "Meten voor waterbeheer", mei 1984.  
- Colloquium van de Studiegroep Statistiek in de hydrologie CHO-TNO: "Meetnetontwerp en optimalisatie", november 1984.
- No. 15. Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht. f 15,--.  
Le système hydrologique dans la région frontalière Liège-Maasbracht.  
Een verslag van de 5e CHO-studiebijeenkomst op 13 december 1985 in samenwerking met de Nationale IHP-comité's van België en Nederland en de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek uit België - (J.C. Hooghart).  
April 1986.
- No. 16. Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie, waarin opgenomen de hoofdstukken:  
I Algemene termen  
II Atmosferisch Water  
III Water in de onverzadigde zone  
IV Water in de verzadigde zone  
V Oppervlaktewater  
Oktober 1986, hernieuwde uitgave.

- No. 17. Duurzaamheid rioolleidingen; een literatuurstudie naar aantastingsmechanismen. f 15,--.  
R.B. Polder.  
Februari 1987.
- No. 18. Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water. f 15,--.  
Een verslag van de 6e CHO-studiebijeenkomst op 22 oktober 1986 - (J.C. Hooghart)  
Februari 1987.

De Rapporten en Nota's zijn in het Nederlands (no. 15 ook gedeeltelijk Frans).

De prijs van no. 11 bedraagt f 30,-- en van nrs. 14, 15, 17 en no. 18: f 15,--; de overige nummers zijn voorlopig gratis aan te vragen (prijswijzigingen voorbehouden).

De rapporten zijn te verkrijgen bij: CHO-TNO  
Postbus 297  
2501 BD S GRAVENHAGE

