

**METEN, MEETNETTEN EN OPTIMALE MEETNETONTWERPEN
TEN DIENSTE VAN HET WATERBEHEER**



COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO
RAPPORTEN EN NOTA'S No. 14

METEN, MEETNETTEN EN OPTIMALE MEETNETONTWERPEN TEN DIENSTE VAN HET WATERBEHEER

**COPYRIGHT © Nederlandse organisatie voor
toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek
TNO, 1986**

CIP GEGEVENS

METEN

Meten, meetnetten en optimale meetnetontwerpen ten dienste van het waterbeheer/(redactie: P. v.d. Kloet en J. C. Hooghart) met bijdragen van H. W. M. Bots ... et al. – 's-Gravenhage: TNO – III. – (Rapporten en Nota's/Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO; no. 14).

ISBN 90-6743-080-3

SISO 568 UDC 556.08

Trefw.: meettechniek in de hydrologie

**METEN, MEETNETTEN EN OPTIMALE MEETNETONTWERPEN
TEN DIENSTE VAN HET WATERBEHEER**



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

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO – 's Gravenhage – 1986

RAPPORTEN EN NOTA'S No. 14

INHOUD

WOORD VOORAF	i
J.C. van Dam en P. van der Kloet	
AUTEURS	iii
I MEETNETONTWERP EN -OPTIMALISATIE	1
1. ENKELE ALGEMENE ASPEKTEN VAN MEETNETTEN	3
T. Schilperoort	
Samenvatting	3
1 Inleiding	3
2 Het principe van meetnet optimalisatie	5
3 Plaats en samenhang van de bijdragen	10
Literatuur	10
2. HET ONTWERP VAN EEN MEETNET: DOELSTELLINGEN, CRITERIA EN KEUZE, TOEGELICHT MET HET ONTWERP VOOR EEN PROVINCIAAL GRONDWATERSTANDSMEETNET VOOR GELDERLAND	11
E. Romijn	
Samenvatting	11
1 Inleiding	11
2 Het Gelderse waterbeheersysteem (kwantitatief)	12
3 Het meetsysteem	13
4 Het Gelderse provinciale grondwaterstandsmeetnet als voorbeeld	14
5 Terugblik en kritiek	23
Literatuur	25
3. METHODEN VOOR RUIMTELIJKE INTERPOLATIE VANUIT MEETNETTEN	27
P.A. Burrough	
Samenvatting	27
1 Inleiding	27
2 Interpolatiemethoden	28
3 Aanpassing van het meetnet	40
Literatuur	40

4. OPTIMALISATIE VAN EEN BESTAAND MEETNET MET BEHULP VAN KRIGING	43
P.R. Defize	
Samenvatting	43
1 Inleiding	44
2 Notatie en formules	45
3 Schatten van de covariantiefunctie	46
4 De gestandaardiseerde fout	48
5 Uitdunning en verdichting van een bestaand meetnet	52
6 Conclusies	54
7 Aanbeveling	57
Literatuur	58
5. GEBRUIK VAN REGRESSIEMETHODEN VOOR HET BEPALEN VAN DE NAUWKEURIGHEID IN HET OPPERVLAKTEWATER MEETNET	59
J.W. van der Made	
1 Wat is nauwkeurigheid?	59
2 Waarvan willen we de nauwkeurigheid weten?	60
3 Waarom willen we de nauwkeurigheid weten?	64
4 Wat beïnvloedt de meetnauwkeurigheid?	65
5 Hoe bepalen we de meetnauwkeurigheid?	66
6 Hoe bepalen we de optimale stationsafstand?	72
6. OPTIMALISATIE VAN BEMONSTERINGSFREKWENTIES BIJ WATER-KWALITEITS ONDERZOEK	79
T. Schilperoort	
Samenvatting	79
1 Inleiding	79
2 Statistische aspecten	80
3 Effektiviteit versus meetfrequentie	82
4 Voorkennis van de kovariantie structuur	90
5 Twee voorbeelden	94
Literatuur	97
7. NEERSLAGCORRELATIE-ANALYSE BIJ MEETNETSTUDIES	99
Ph.Th. Stol	
1 Inleiding	99

2	Basisbegrippen	101
3	Voorbeelden van buimodellen	106
4	Correlatiepatronen	111
5	Conclusies	120
6	Slotopmerkingen	125
	Literatuur	126
II	METEN VOOR WATERBEHEER	129
1.	GEGEENSVERZAMELING TEN BEHOEVE VAN PLANVORMING; ERVARINGEN UIT PAWN	131
	J.W. Pulles	
	Samenvatting	131
1	Inleiding	131
2	Modellen voor de waterhuishoudkundige plannen	132
3	Verschillen en overeenkomsten van fysische en sectorale modellen	135
4	Verificatie van een van de fysische modellen aan de hand van meetgegevens	140
5	Resumé	143
	Literatuur	144
2.	KWANTITEITSMETINGEN OP VASTE MEETOPSTELLINGEN IN RIJKSWATEREN	145
	H.W.M. Bots	
1	Inleiding	145
2	Waterstanden	146
3	Geleidendheids- en temperatuurmetingen	150
4	Afvoermetingen	151
5	Informatiesysteem	151
6	Kosten	154
3.	WATER QUALITY MONITORING IN THE NETHERLANDS	155
	B.G.M. van de Wetering	
1	Introduction	155
2	Routine waterquality monitoring	157
3	The automatic monitoring network in The Netherlands	166

4 Project research	167
Bibliography	167
4. GRONDWATERSTANDSMETINGEN	169
F.C. van Geer	
1 Inleiding	169
2 Meten	171
3 Berekenen	174
4 Meetnet - meetnet optimalisatie	176
5 Mathematiek	180
6 Conclusies	185
Literatuur	186
5. METEN IN HET WATERBEHEER	187
F.C. Hamster	
1 Inleiding	187
2 Beknopte omschrijving van de ontwikkeling van het veenkoloniale gebied binnen het waterschap De Veen- marken	187
3 Waterbeheersing	188
4 Slotopmerkingen en toekomstverwachtingen	192
Literatuur	192
6. METEN BIJ HET HOOGHEEMRAADSCHAP VAN RIJNLAND	193
J.H. Riemens	
1 Inleiding	193
2 Waterkwantiteitsmetingen	195
3 Waterkwaliteitsmetingen	199
4 Ontwikkeling	201
5 Relatie kwaliteit - kwantiteit	202
6 Conclusie	203

WOORD VOORAF

Dit rapport bevat voordrachten van een tweetal lezingendagen.

In chronologische volgorde zijn dit.

- . Meten voor waterbeheer, Voorjaarsbijeenkomst van de KIVl Sectie Waterbeheer op 9 mei 1984 in Amersfoort.
- . Meetnetontwerp en -optimalisatie, Colloquium van de CHO-TNO Studiegroep Statistiek in de hydrologie op 21 november 1984 te Delft.

De reden om de voordrachten in één bundel samen te nemen is gelegen in de thematische samenhang van beide bijeenkomsten. Vanuit de Sectie Waterbeheer van het KIVl was er het verzoek aan de CHO-TNO om bijdragen van de voordrachtencyclus "Meten voor waterbeheer" op te nemen in de uitgave van de voordrachtencyclus "Meetnetontwerp en -optimalisatie". Daaronder waren juist die bijdragen welke zeer goed in het thema over meetnetontwerp zouden passen.

Naast het positieve effect dat een meer volledig beeld inzake de problematiek van het ontwerp wordt gegeven, rijzen dan enkele aansluitproblemen. Getracht is deze zo goed mogelijk te ondervangen door de bundel met betrekking tot meetnetontwerp in zijn oorspronkelijke vorm te laten en de bijdragen over het meten voor waterbeheer daaraan toe te voegen.

Ten gevolge hiervan en lettende op de reeds bestaande inleiding over meetnetontwerp- en optimalisatie behoeft hier slechts een korte plaatsbepaling van de bijdragen over het meten voor waterbeheer te worden gegeven.

Allereerst betreft dit de bijdragen van Pulles over de wenselijkheid van het verzamelen van gegevens. Aanvullend hierop is bij meetnetontwerp de bijdrage van Romijn welke onder andere de financiële consequenties ten gevolge van metingen aanreikt. De bijdrage van Van Geer over grondwaterstandsmetingen sluit goed aan bij de bijdragen van Burrough, Defize en Schilperoort met betrekking tot het meetnetontwerp.

De bijdragen van Bots en Van de Wetering zijn op te vatten als complementaire delen bij de bijdragen van Van der Made respectievelijk Schilperoort. Bots en Van de Wetering gaan in op kwantiteitsmetingen respectievelijk kwaliteitsmetingen, terwijl de bijbehorende meetnetproblematiek behandeld wordt door Van der Made respectievelijk Schilperoort.

De bijdragen van Riemens en Hamster gaan nader in op het meten door waterschappen. Daarbij geeft Riemens een meer algemeen beeld, terwijl Hamster het accent legt bij het meten ten behoeve van een specifieke probleemstelling.

De bijdrage van Stol richt zich vooral op het gebruik van correlatiemodellen voor neerslagnetwerken.

Met het uitbrengen van dit rapport wordt hopelijk gehoor gegeven aan een veelvuldig geuite wens. Tenslotte willen ondergetekenden de auteurs bedanken voor hun spontane bereidheid hun lezing om te werken tot een schriftelijke bijdrage.

J.C. van Dam, dagleider Meten voor waterbeheer

P. van der Kloet, dagleider Meetnetontwerp en -optimalisatie

AUTEURS

H.W.M. Bots	Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, 's-Gravenhage
P.A. Burrough	Rijksuniversiteit van Utrecht
P.R. Defize	Instituut TNO voor Wiskunde, Informatieverwerking en Statistiek, Delft
F.C. van Geer	Dienst Grondwaterverkenning TNO, Delft
F.C. Hamster	Waterschap De Veenmarken, Valthermond
J.W. van der Made	Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, 's-Gravenhage
J.W. Pulles	Hoofddirectie van de Waterstaat, 's-Gravenhage
J.H. Riemens	Hoogheemraadschap van Rijnland, Leiden
E. Romijn	Dienst Waterbeheer, Provincie Gelderland, Arnhem
T. Schilperoort	Waterloopkundig Laboratorium, Delft
Ph. Th. Stol	Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen
B.G.M. van de Wetering	Rijkswaterstaat, Dienst Binnenwateren/RIZA, Lelystad

I MEETNETONTWERP EN -OPTIMALISATIE

Colloquium van de CHO-TNO Studiegroep Statistiek in de
hydrologie

21 november 1984 te Delft

ENKELE ALGEMENE ASPEKTEN VAN MEETNETTEN

T. Schilperoort

Waterloopkundig Laboratorium

SAMENVATTING

Enkele algemene aspecten van meetnetten zullen worden besproken met als doel het scheppen van een algemeen kader, waarin de hoofdlijnen van meetnet ontwerp en optimalisatie zullen worden aangegeven, en waardoor de plaats en de onderlinge samenhang van de diverse bijdragen aan dit rapport worden verduidelijkt.

1 INLEIDING

In het algemeen kan worden gesteld dat meetgegevens voor drie doeleinden worden gebruikt, te weten planning, beheer en onderzoek.

Ten behoeve van planning zijn vaak uitgebreide data-sets vereist, welke een lange periode beslaan, en waarbij het vaak gaat om het ruwweg vaststellen van de natuurlijke variabiliteit van de voor de planning relevante processen.

Ten behoeve van beheer zijn in het algemeen minder uitgebreide data sets vereist, maar de benodigde data moeten dikwijls in "real time" beschikbaar zijn t.b.v. het dagelijkse operationele beheer en het leveren van voorspellingen.

Om aan de doelstellingen van zowel planning als beheer te kunnen voldoen zijn routinematige meetnetten vereist, welke vrij globale informatie leveren, en welke meestal over een lange periode operationeel zijn.

Onderzoek vereist, in tegenstelling tot het voorgaande, meestal zeer gedetailleerde meetinformatie met een zeer hoge nauwkeurigheid. Deze meetinformatie kan nodig zijn ter verdieping van het inzicht in fysische processen, of ten

behoefte van de ontwikkeling, ijking en verifikatie van wiskundige modellen. Dit vraagt dikwijls om specifieke meetkampagnes, welke erg intensief zijn maar meestal relatief kort duren.

Door de groeiende belangstelling voor de kwantitatieve planning en beheer van watersystemen worden meetnetten steeds belangrijker als informatiebron voor de verantwoordelijke instanties. Dit groeiende belang is de laatste jaren echter steeds gepaard gegaan met beperkingen van financiële middelen. Er is dan ook een toenemende behoefte aan praktisch toepasbare technieken waarmee het ontwerp en gebruik van meetnetten geoptimaliseerd kan worden.

Het fundamentele probleem dat hierbij moet worden opgelost is het vaststellen van het meetnet dat *voldoende* informatie levert tegen *minimale* kosten.

Wat "voldoende" is hangt uiteraard van de doelstelling van de meetnetgebruiker af. Iedere procedure voor meetnet ontwerp en optimalisatie zal dan ook expliciet rekening moeten houden met de gestelde meetdoelstellingen.

Bij het ontwerp en de optimalisatie van meetnetten zijn de volgende aspecten van primair belang

- a) het ontwerp en de optimalisatie van de meetnet layout; dit omvat de keus van
 - . meetvariabelen (wat wordt gemeten?)
 - . meetlokaties (waar wordt gemeten?)
 - . meetfrequenties (hoe vaak wordt gemeten?)
 - . meetduur (hoe lang wordt gemeten?)
- b) de inrichting van het meetnet; dit omvat
 - . de keus van meetmethoden
 - . het ontwerp, calibratie en installatie van meetinstrumenten
 - . de keus en installatie van data transmissie systemen
- c) de implementatie van een data verwerkend systeem; dit omvat de keus van
 - . een geschikte data base structuur
 - . voor- en nabewerkings methoden
 - . analyse methoden
 - . geschikte hardware configuratie
- d) de organisatie van een meetdienst; dit omvat alle logistieke aspecten.

De onderwerpen, welke in dit rapport worden behandeld, hebben voornamelijk

betrekking op het eerste genoemde aspekt. Dit moet echter niet gezien worden als een pleidooi voor het afzonderlijk beschouwen van de genoemde aspekten. Een echte meetnet optimalisatie wordt pas bereikt als alle aspekten in hun onderlinge samenhang zijn geanalyseerd en op elkaar zijn afgestemd.

2 HET PRINCIPE VAN MEETNET OPTIMALISATIE

In dit hoofdstuk zal in grote lijnen het principe van meetnet optimalisatie worden aangegeven, zoals beschreven in Schilperoord en Groot (1983). Dit principe, schematisch weergegeven in figuur 1, kan worden beschouwd als een algemeen kader, waarin de diverse in dit rapport beschreven technieken geplaatst kunnen worden.

Ieder meetnet wordt in sterke mate door twee randvoorwaarden bepaald: de meetdoelstellingen enerzijds en de fysika van de te meten variabelen anderzijds. Bij meetnet ontwerp en optimalisatie spelen deze randvoorwaarden dan ook een essentiële rol.

Identifikatie van meetdoelstellingen is wellicht de belangrijkste stap bij het ontwerp en optimaliseren van een meetnet. Het is tevens één van de moeilijkste.

Doelstellingen kunnen vrij eenvoudig in algemene termen worden geformuleerd. Echter, het eerste probleem ontstaat bij het vertalen van deze algemeenheden in kwantitatieve wiskundige begrippen waarmee *de effectiviteit* van een meetnet kan worden gemeten. Hierbij wordt onder effectiviteit verstaan de mate waarin de door het meetnet geleverde informatie is afgestemd op de gespecificeerde meetdoelstelling.

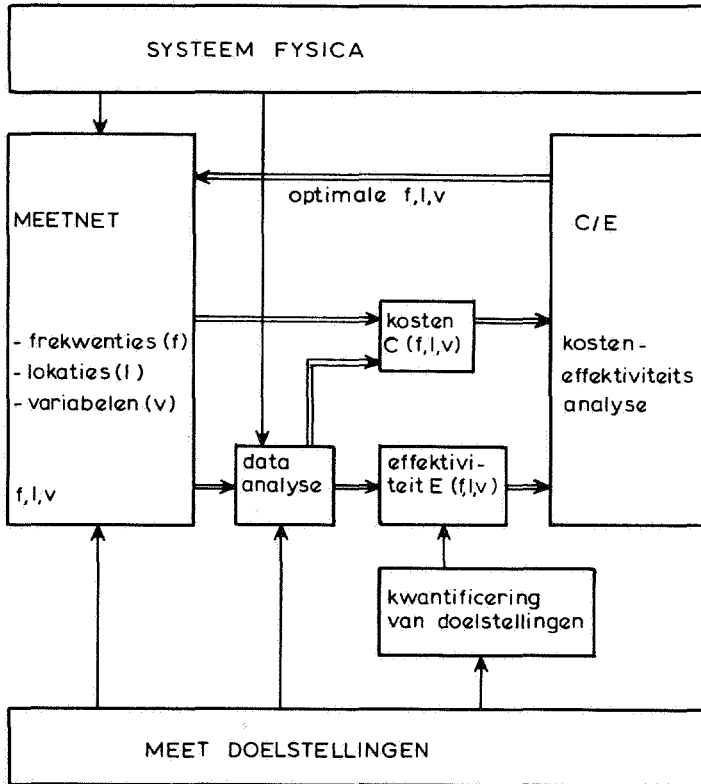
Voorbeeld

De algemeen geformuleerde meetdoelstelling "het volgen van de meerjarige waterkwaliteits ontwikkeling" moet worden vertaald in de konkrete eis "het kunnen detekteren van gespecificeerde trends over een gespecificeerde tijdsperiode met een gespecificeerde detektiekans". Als maat voor de meetnet effectiviteit is dan de detektiekans voor trends gekozen.

Een tweede probleem ontstaat bij het *kwantificeren* van de doelstelling, dus

het kwantificeren van een minimaal vereist effectiviteitsniveau.

Een derde probleem is dat het vaststellen en kwantificeren van geschikte effectiviteitsmaten wordt bemoeilijkt door het feit dat voor een meetnet vaak meerdere doelstellingen gelden.



Figuur 1 Schematische weergave van het optimalisatie proces voor meetnetten: doelstellingen en fysica bepalen samen de optimale meetfrequenties (f), lokaties (l) en variabelen (v)

Doestelling identifikatie is ook van belang voor het kiezen van de juiste *analyse methode* voor de meetdata. De doelstellingen bepalen immers in sterke mate de schalen waarop veranderingen in de data moeten worden gedetekteerd, en dus het soort informatie dat uit de data *moet* worden verkregen. Aan de andere kant bepaalt de fysika van de te meten processen in sterke mate de informatie

die uit de data *kan* worden verkregen, aangezien dit afhangt van de procesdynamica (variabiliteit, tijd- en afstandschalen). *Proceskennis* is dan ook uitermate belangrijk bij meetnet optimalisatie, en vooral bij meetnetontwerp indien men geen historische gegevens beschikbaar heeft om dominante tijd- en afstandschalen te schatten.

De diverse schalen waarop de processen zich afspelen worden weerspiegeld in de *kovariantiestruktuur* van de verkregen meetgegevens. Het is dan ook niet verwonderlijk dat bijna elke optimalisatie- of ontwerptechniek gebaseerd is op het analyseren en verwerken van temporele en ruimtelijke kovariantie functies en/of variogrammen. Het gebruik van de kovariantiestruktuur van de data is essentieel, omdat hierdoor een relatie kan worden gelegd tussen enerzijds de hoeveelheid *data* en anderzijds de hoeveelheid *informatie* die deze data bevat. Het vinden van deze relatie is belangrijk omdat dan de meetnet effectiviteit (bepaald door hoeveelheid informatie) gekoppeld kan worden aan meetnetkosten (bepaald door hoeveelheid data).

Op grond van het voorgaande zal het duidelijk zijn dat de meetnet effectiviteit slechts dan hoog kan zijn, indien zowel de inwinning als de analyse van de data is afgestemd op de meetdoelstellingen. Maar zelfs bij een optimale afstemming zal de effectiviteit laag zijn indien de meetdata van slechte *kwaliteit* zijn, bijvoorbeeld ten gevolge van meetfouten, slecht instrumentarium, onbetrouwbare aflezing e.d. In het vervolg zal echter steeds worden aangenomen dat het verlies van effectiviteit t.g.v. slechte datakwaliteit veel kleiner is dan het effectiviteitsverlies t.g.v. een niet optimale meetnet-layout en/of slechte data-analyse.

Het begrip "effectiviteit" speelt bij meetnetoptimalisatie een belangrijke rol. Er zal dan ook een *effectiviteitsmaat*, E , moeten worden gedefinieerd waarmee de meetnet effectiviteit gemeten kan worden.

Vaak kunnen voor deze maat *statistische* grootheden worden gebruikt, zoals interpolatiefout, trenddetekteerbaarheid, detekteerbaarheid van normoverschrijdingen, enz. Is eenmaal een zinvolle maat gedefinieerd, dan moet een relatie worden gevonden tussen E en de te optimaliseren meetinspanning (frequenties(f), lokaties(l), variabelen (v)): $E = E(f, l, v)$. Met deze relatie kan dan worden onderzocht wat een verandering van meetinspanning betekent voor de effectiviteit van het meetnet.

Er bestaan vele technieken om de gewenste relatie $E = E(f, l, v)$ te bepalen voor verschillende effectiviteitsmaten. In de volgende hoofdstukken zullen een aantal worden besproken (kriging, korrelatie-analyse, Kalmanfiltering).

In veel gevallen is het mogelijk deze relatie te bepalen zonder gebruik te maken van actuele meetdata. Dit maakt het mogelijk de effectiviteit van verschillende meetnetten van te voren te analyseren. Hiervoor is echter wel kennis vereist over de schalen en de variabiliteit van de te meten processen. In de praktijk kan deze kennis worden verkregen op basis van historische gegevens en/of fysisch inzicht.

Behalve de effectiviteit E bepaalt de meetinspanning (f, l, v) ook de *meetkosten* C . Ook deze kosten kunnen dus expliciet worden beschouwd als functie van de meetinspanning: $C = C(f, l, v)$. Belangrijke aspecten hierbij zijn de kosten van

- personele en materiële voorzieningen
- installatie en onderhoud
- gegevens inwinning
- analyse van monsters (bijv. chemische analyses)
- opslag en verwerking van data

Het vinden van deze relatie is relatief simpel, hoewel vaak erg tijdrovend.

Bij bekende relaties $E = E(f, l, v)$ en $C = C(f, l, v)$ kan het optimale meetnet in principe worden gevonden door het uitvoeren van een *kosten effectiviteits analyse*. Hierbij is het echter noodzakelijk om te berekenen wat de gekapitaliseerde konsekwenties zijn van een tekort aan meetnet effectiviteit (bijvoorbeeld de financiële gevolgen van verkeerde beslissingen op grond van te weinig informatie over de kwaliteit van het grondwater).

Dit maakt een dergelijke analyse niet alleen zeer moeilijk maar vaak ook zeer subjectief. In de praktijk wordt een totale kosten- effectiviteitsbeschouwing dan ook meestal niet uitgevoerd, maar wordt op min of meer willekeurige wijze een *minimaal effectiviteitsniveau* gespecificeerd waaraan het meetnet moet voldoen. Hierbij spelen vaak politieke en subjectieve overwegingen een rol.

Samenvattend kunnen dus zes stappen worden onderscheiden bij het proces van meetnetoptimalisatie (zie ook figuur 1):

- identifikatie en kwantificering van de meetdoelstellingen en definiëring van een geschikte effectiviteitsmaat;
- bestudering van de fysika en identifikatie van relevante tijd- en afstand

schalen;

- keuze van geschikte data-analyse technieken;
- afleiden van de relatie $E = E(f, l, v)$ voor de geïdentificeerde doelstelling (en) en vaststellen van de meetnet effectiviteit;
- opstellen van de relatie $C = C(f, l, v)$ en vaststellen van de meetkosten;
- uitvoeren van een kosten-effectiviteitsanalyse en vaststellen van de optimale meetinspanning (f_0, l_0, v_0) .

Indien geen kosten-effectiviteitsanalyse wordt uitgevoerd wordt het vinden van de relatie $E = E(f, l, v)$ de belangrijkste stap in het optimalisatieproces. Vandaar dat hieraan in de literatuur steeds meer aandacht wordt geschonken.

Figuur 1 laat zien dat meetnet optimalisatie een *iteratief proces* is: het optimale toekomstige meetnet is gebaseerd op informatie verkregen uit het huidige meetnet. Bij ontwerp van een nieuw meetnet is deze iteratie niet mogelijk, en moet gebruik worden gemaakt van fysisch inzicht in de procesdynamica.

In het algemeen zal, zelfs bij gelijkblijvende doelstellingen, het iteratieproces een aantal malen doorlopen moeten worden voordat het meetnet zijn optimale vorm heeft verkregen. Dit impliceert dat een werkelijke optimalisatie alleen mogelijk is voor langdurige meetnetten zoals gebruikt t.b.v. planning en beheer. De tijdsduur van onderzoeksgerichte meetkampagnes staat dit dikwijls niet toe.

De diverse tijdschalen en doelstellingen van planning, beheer en onderzoek leiden in de praktijk vaak tot meerdere meetnet niveau's (primaire, secundaire en tertiaire meetnetten). Hierbij kan vaak de informatie verkregen uit secundaire en tertiaire meetnetten worden gebruikt om het primaire meetnet te optimaliseren.

Tot slot is het belangrijk zich te realiseren dat het ontwerpen en optimaliseren van meetnetten vaak wordt beperkt door randvoorwaarden welke zijn opgelegd door politieke overwegingen, wetgeving en/of (inter)nationale verplichtingen. Hierdoor kunnen meetlokaties, frekwenties en variabelen, hoewel niet optimaal, zijn gefixeerd. In dat geval dient het voorgeschreven meetnet het uitgangspunt te zijn vanwaar uit het resterende meetnet wordt geoptimaliseerd.

3 PLAATS EN SAMENHANG VAN DE BIJDRAGEN

De diverse in het voorgaande hoofdstuk besproken aspecten van meetnetontwerp en optimalisatie komen nagenoeg alle aan de orde in de bijdrage van Romijn. Centraal staat vooral de relatie tussen *meetdoelstelling* en het uiteindelijk te realiseren meetnet, waarbij *fysisch inzicht* in de te meten variabelen een belangrijke rol speelt. Als effectiviteitsmaat voor het door hem besproken primaire grondwaterstandsmeetnet voor Gelderland wordt de ruimtelijke interpolatie fout gebruikt.

De technieken waarmee de relatie tussen deze maat en de meetdichtheid worden bepaald worden genoemd, doch niet uitvoerig besproken.

In tegenstelling tot hierboven, staan in de bijdragen van Burrough, Defize en van der Made juist de *technieken* centraal waarmee de relatie kan worden gekwantificeerd tussen enerzijds de *ruimtelijke meetdichtheid* en anderzijds de als effectiviteitsmaat te hanteren ruimtelijke interpolatie fout. Door Burrough en Defize wordt de Kriging techniek besproken, terwijl van der Made enkele regressie-methoden behandelt.

Ook in de bijdrage van Schilperoort staan centraal technieken ter bepaling van de relatie meetinspanning versus effectiviteit. Ging het bij de voorgaande bijdragen om het vaststellen van de ruimtelijke meetdichtheid, hier worden vooral *technieken* besproken waarmee de relaties tussen *meetfrequentie* en diverse effectiviteits maten (ten behoeve van meerdere doelstellingen) kunnen worden gekwantificeerd. Eveneens wordt kort het principe besproken van een op Kalman-filtering gebaseerde techniek waarmee meetfrequenties, lokaties en variabelen *integraal* kunnen worden geoptimaliseerd.

De bijdrage van Stol is vooral van belang in het kader van *meetnet ontwerp*. Hierin wordt aangetoond op welke wijze, uitgaande van fysische kennis, correlatie structuren van data kunnen worden bepaald zonder dat metingen beschikbaar zijn. Centraal staat het gebruik van een buimodel bij het vaststellen van de correlatie tussen regenmeters.

LITERATUUR

SCHILPEROORT, T. en GROOT, S., 1983. Design and optimization of waterquality monitoring networks. Proc. Int. Symp. on Methods and Instrumentation for the Investigation of Groundwater Systems (MIIGS), Noordwijkerhout, The Netherlands

HET ONTWERP VAN EEN MEETNET: DOELSTELLINGEN, CRITERIA EN KEUZE, TOEGELICHT MET HET ONTWERP VOOR EEN PROVINCIAAL GRONDWATERSTANDSMEETNET VOOR GELDERLAND.

Drs. E. Romijn

SAMENVATTING

Hydrologische meetnetten zijn in de regel historisch gegroeid. Ze ontstaan als verzameling van deelmeetnetten die voor speciale doeleinden in het leven zijn geroepen. Toen voor de provincie Gelderland een primair grondwaterstandsmeetnet moest worden opgesteld in het kader van de nieuwe Grondwaterwet, werd gepoogd tot een logische oplossing te komen. Met dit voorbeeld op de achtergrond worden doelstellingen, criteria en keuzeprocedures behandeld bij het ontwerpen van meetnetten.

1 INLEIDING

De hydrologische meetnetten in Nederland zijn veelal historisch gegroeid, hetgeen meestal inhoudt dat ze niet strikt logisch zijn opgebouwd. Toen in opdracht van de dienst Waterbeheer Gelderland (WB) en Rijkswaterstaat (RW) door dienst Grondwaterverkenning TNO (DGV-TNO) en WB zelf een studie werd verricht naar opzet en inrichting van een provinciaal (primair) grondwaterstandsmeetnet, werd de kans gegrepen om ditmaal wel een meetnet zo logisch mogelijk te ontwerpen, dat wil zeggen met duidelijke formulering van doelstellingen, criteria en keuzeprocedure.

De gedetailleerde studie werd beschreven in het rapport "Ontwerp primair grondwaterstandsmmeetnet Gelderland" (DGV-TNO, RW, WB, maart 1985).

Het onderhavige artikel beoogt de doelstellingen, criteria en het keuze-probleem systematisch te behandelen. Uiteraard draagt de auteur zelf de verantwoordelijkheid voor de in dit artikel geponeerde stellingen en zienswijzen.

2 HET GELDERSE WATERBEHEERSYSTEEM (KWANTITATIEF)

2.1 Doelstelling

De algemene doelstelling van een waterbeheersysteem is het voeren van een zodanig beheer dat alle bij het water betrokken belangen zo goed mogelijk worden gediend. Onmiddellijk rijst de vraag: welke zijn die belangen en wat is zo goed mogelijk? De nota "Waterhuishouding van Nederland (1983)" geeft een goed overzicht van deze belangen, genoemd worden:

- a de veiligheid;
- b de primair op het menselijk gebruik gerichte belangen (agrarische sector, elektriciteitsproductie, huishoudens, industrie- en dienstverlenende sector, scheepvaart, visserij, waterrecreatie);
- c natuur en landschap (aquatische- en terrestrische levensgemeenschappen).

Het kwantitatieve waterbeheersysteem kan worden verdeeld in een drainage/irrigatiesysteem, waarbij regeling via het oppervlaktewater geschiedt (inlaten, lozen, stuwen) en het grondwateronttrekkings/infiltratiesysteem waarbij via het grondwater wordt geregeld (onttrekkingsputten, kunstmatige infiltratie). Beide systemen beïnvloeden elk voor zich - wegens de hydrologische samenhang van grond- en oppervlaktewater - zo-

wel de oppervlaktewater- als de grondwaterstand en beweging. Het vergelijken van het waterbeheersysteem met een regeltechnisch systeem werkt erg verhelderend. Er zijn echter twee complicaties. Het historisch gegroeide waterbeheersysteem is niet van meet af aan logisch ingericht, de regelbare delen kunnen vaak nauwelijks als één geheel functioneren. Ten tweede is het regelbare deel in Gelderland relatief gering van omvang ten opzichte van het niet regelbare (neerslag, afvoer en stand van de grote rivieren) zodat deze "storingen" de toestand van het systeem grotendeels bepalen.

2.2 Criteria en keuze

Het begrip "zo goed mogelijk" beheren hangt af van de geselecteerde criteria waarop de keuze van de optimale toestand wordt gebaseerd. In wezen gaat het hierbij om de kosten en de baten die gekoppeld zijn aan die toestand. De eerste zijn meestal redelijk te ramen, de baten zijn echter moeilijker onder één noemer te brengen. De baten zijn - voor zover ze bekend zijn - vaak in verschillende eenheden uitgedrukt. Afhankelijk van het betreffende belang zijn ze uitgedrukt in natuurwaarde; hooiopbrengst; $l \cdot h^{-1} \cdot d^{-1}$ huishoudelijke drinkwaterbeschaving, etc. Verschillende multicriteria afwegingsmethoden bieden hiervoor uitkomst. Door het geven van (politieke) gewichten aan de verschillende criteria komt men tot de gewenste oplossing (de keuzeprocedure).

3 HET MEETSYSTEEM

3.1 Doelstelling

Het meetsysteem dat gerelateerd is aan het waterbeheersysteem heeft als doelstelling het volgen - in ruimte en tijd - van de natuurlijke invloeden (regeltechnisch de "storingen") en het meten van de doelmatigheid en de (ongewenste) nevengevolgen van het regelbare deelsysteem.

Uitgaande van de twee regelbare deelsystemen kunnen we spreken van een oppervlaktewatermeetnet (klepstand, debiet, waterstand) en een grondwaterstandsmeetnet. Wederom moet worden opgemerkt dat beide meetnetten elk voor zich van belang zijn voor beter begrip van zowel grond- als oppervlaktewaterstand en beweging.

3.2 Criteria en keuze

Zodra de belangen die bij het waterbeheer zijn betrokken, zijn geïnventariseerd, moet worden vastgesteld met welke nauwkeurigheid de informatie over waterstand en beweging bekend dient te zijn. Daar het meetnet niet onbeperkt kan worden uitgebreid moet door interpolatie kennis van niet bemeten gebieden worden verkregen. De toegestane interpolatiefout wordt nu één der meetnetcriteria, naast de kosten. Deze interpolatiefout hangt weer af van het gewicht van het betrokken belang. Uiteindelijk komt men tot keuze van het gewenste meetsysteem. Dit zal thans worden geïllustreerd met het ontworpen Gelderse grondwaterstandsmeetnet.

4 HET GELDERSE PROVINCIALE GRONDWATERSTANDSMEETNET ALS VOORBEELD

4.1 Doelstelling

De doelstelling van het provinciale of primaire grondwaterstandsmeetnet is het geven van "een goed beeld in grote lijnen van de grondwatersituatie voor het beheersgebied in zijn totaliteit en van de grootschalige variaties die daarin ten gevolge van natuurlijke oorzaken over langere duur optreden" (HNA, 1981).

De nadruk ligt hier dus op het niet regelbare deel van het grondwatersysteem. Ter verduidelijking nog het volgende.

Een meetnet kan lokaal of regionaal zijn opgezet en voor lange of voor korte duur worden waargenomen. De in de nota van HNA (1981) gebruikte terminologie is in tabel 1 weergegeven.

Tabel 1 Terminologie meetnetten

	regionaal	lokaal
lange duur	primair	secondair
korte duur	(meet campagne)	tertiair

Bij lange duur kan men denken aan een periode van 10 à 20 jaar, bij korte duur hooguit 1 à 2 jaar of nog veel korter. Voorbeelden van secondaire meetnetten zijn de in het kader van de Grondwaterwet rond blijvende waterwinningen voorgeschreven peilbuizen. Tertiaire meetnetten kunnen rond tijdelijke bronbemalingen zijn geplaatst. Meetcampagnes op regionale schaal worden bijvoorbeeld door Stiboka uitgevoerd voor de bepaling van grondwatertrappen of door andere instituten voor de bepaling van de randvoorwaarden van een gebied waarvoor modelberekeningen moeten worden gemaakt. De doelstelling voor het primaire grondwaterstandsmeetnet is nu zo vertaald dat een meetnet ontstaat dat ook als kapstok kan dienen voor lokale problemen. Deze meetnetten kunnen dan ruimtelijk en in de tijd worden opgehangen aan het primaire.

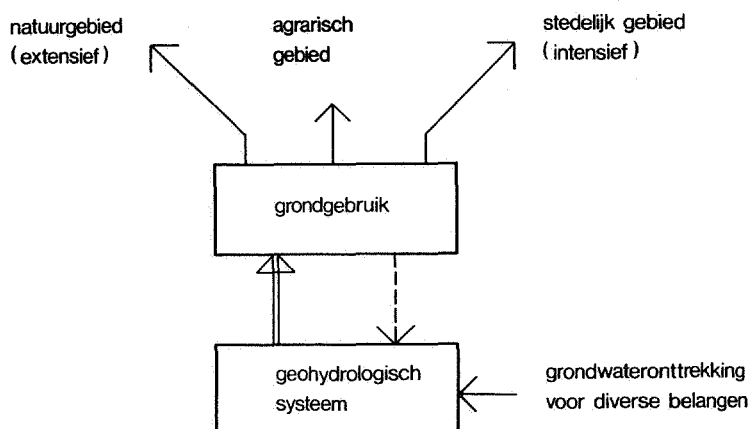
4.2 Criteria

Naar aanleiding van wat in paragraaf 2.2 is gezegd, dienen bij het bepalen van het optimale grondwaterbeheer criteria te worden geselecteerd. Vervolgens moet het meetnet op dit beheer worden afgestemd.

Er zijn vele belangen betrokken bij het grondwater. Ten eerste zijn dat de belangen die grondwater als grondstof gebruiken (drink- en industrie-watervoorziening, beregening, kuuroorden) terwijl ook het onttrekken van

warmte aan grondwater hierbij kan worden ingedeeld. Ten tweede zijn dat de belangen die gerelateerd zijn aan een bepaald watergehalte (of een bepaalde waterdruk) in de bovengrond (vochtvoorziening van gewassen, vochtige natuurgebieden, begaanbaarheid en bewerkbaarheid van de grond, warmteregime van de grond) of in de diepere ondergrond (bodemdaling door zetting). Ten derde zijn het de belangen die te maken hebben met de grondwaterbeweging (transport van voedingsstoffen van en naar gewassen of vegetaties, warmtetransport) en het voeden van beken en sprengen.

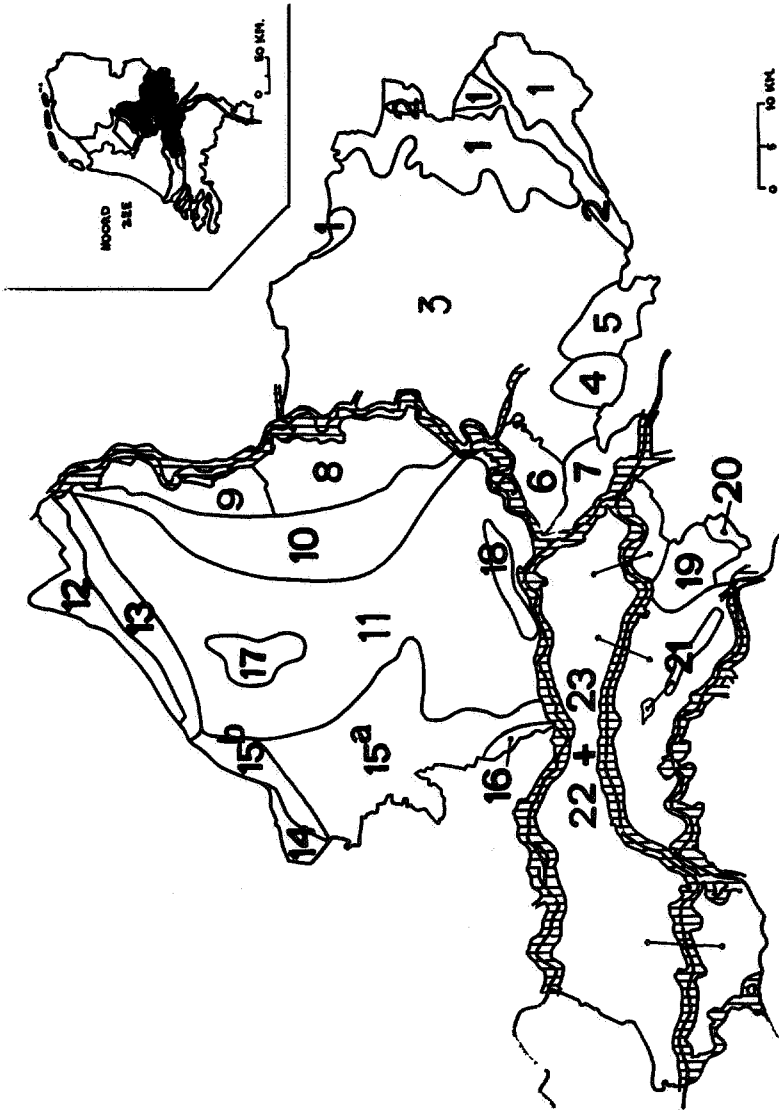
Om één en ander te vereenvoudigen werd het volgende planologische denk-schema gebruikt (fig.1)



Figuur 1 Schema van bij grondwater betrokken belangen op regionale schaal

De werkvolgorde was daarbij als volgt:

- a het geohydrologische systeem van Gelderland, zoals beschreven door Grootjans (1984), werd in 23 zo homogeen mogelijke subsystemen ingedeeld (fig. 2). Gebieden waar de natuurlijke situatie sterk is verstoord (bijv. rondom winningsputten) werden aangegeven;



Figuur 2 Gebiedsindeling bovenste watervoerend pakket
i.v.m. statistische bewerking grondwaterstanden

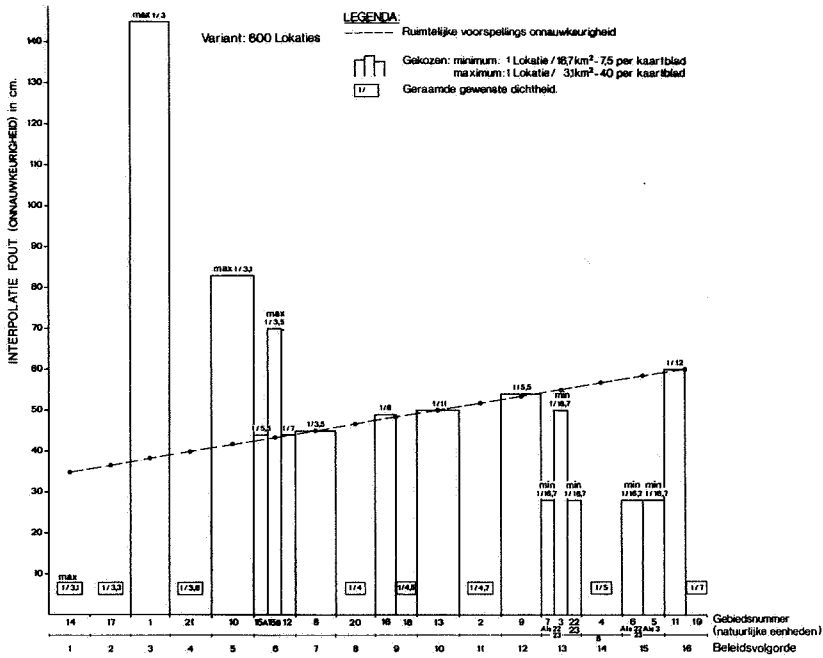
- b om het geohydrologische systeem nader te kunnen karakteriseren werd per deelgebied de correlatiestructuur in ruimte en tijd van de grondwaterstanden bepaald;
- c de invloed van de plaatselijke grondwaterstand op het grondgebruik werd geschat. Het grondgebruik loopt van extensief (natuur) via agrarisch gebruik naar intensief (stedelijk gebied). De natuurwaarde werd ontleend aan streekplanwerk; de gevoeligheid van agrarisch gebied aan kaarten, vervaardigd door Stiboka (Bouma, 1979). De gevoeligheid van het stedelijk gebied kon moeilijk worden geschat, maar dat telde niet zwaar omdat het stedelijk gebied geen groot gewicht kreeg;
- d het aantal en de aard van de te verwachten adviezen, uit te brengen door dienst Waterbeheer Gelderland over de komende 10 jaar werd per geohydrologisch deelgebied geraamd.

Met behulp van een multicriteria afwegingsmethode (GELPAM) kon een relatieve volgorde van de geohydrologische gebieden (onder punt a) aan de hand van criteria en subcriteria onder punten c en d worden opgesteld. Deze volgorde, gekoppeld aan de correlatiestructuur (onder punt b) leverde een relatieve verdeling der waarnemingsbuizen op over geheel Gelderland. Bij het vaststellen van de absolute (totale) hoeveelheid waarnemingsbuizen speelden ten slotte de kosten een hoofdrol.

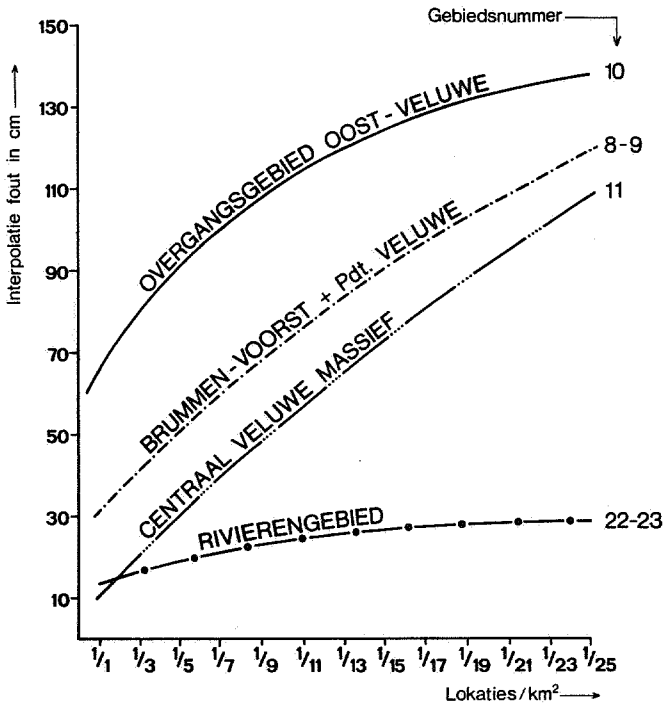
De werkwijze is omschreven in het rapport Ontwerp Primair Grondwaterstandsmeetnet Gelderland (1985).

Opm.

In fig. 1 is weergegeven dat het grondgebruik ook invloed heeft op het geohydrologische systeem. Dit betreft niet alleen de netto infiltratie van neerslag naar het grondwater, maar ook de beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit. Het laatste is echter buiten beschouwing gebleven, omdat hier alleen van een grondwaterstandsmeetnet sprake is.



Figuur 3 Interpolatiefout bij verschillende meetpuntsdichtheid (lokaties/km²) voor verschillende gebieden



Figuur 4 Beleidsvolgorde gebieden en gekozen interpolatiefout (variant 600 lokaties)

4.3 Keuze van het Gelderse Provinciale (primaire) Grondwaterstandsmeetnet, voorbeeld van een keuzeprocedure.

4.3.1 De relatieve dichtheidsverdeling

De keuzeprocedure, gevolgd bij het provinciale grondwaterstandsmeetnet, was als volgt. Eerst werden enkele alternatieven met betrekking tot het totale aantal waarnemingslokaties in Gelderland vastgesteld. Het betrof hier "450", "600", "800" en "1300" lokaties.

Gevoelsmatig was 450 te weinig en 1300 te veel, en dit bleek ook later zo te zijn. Aan de hand van de in par. 4.2 genoemde criteria werden voor ieder alternatief de lokaties over de 23 onderscheiden geohydrologische deelgebieden verdeeld. Dit ging als volgt.

- a Voor ieder deelgebied werd m.b.v. de kriging methode (Defize, 1984; Defize, 1985) de ruimtelijke correlatiestructuur voor de grondwaterstand op een kenmerkend tijdstip, namelijk 28 april 1980, vastgesteld. Uit deze correlatiestructuur volgt een interpolatiefout voor een willekeurige lokatie waarvoor men de grondwaterstand wil voorspellen (en waar dus geen meetbuis staat). Deze fout is weergegeven in fig. 3.
- b De 23 deelgebieden werden beleidsmatig, dat wil zeggen naar gesommeerd gewogen belang, op volgorde gezet (in fig. 4 van links naar rechts) met de bedoeling om later het beleidsmatig zwaarstwegende gebied de kleinste interpolatiefout te geven. In het Gelderse voorbeeld werd de gevoeligheid van het gebied voor grondwaterstandsval (hoofdcriterium I) zwaarder gewogen dan het aantal te verwachten adviezen (hoofdcriterium II) per deelgebied.

Hoofdcriterium I werd opgebouwd uit de subcriteria natuurgebied (N), agrarisch gebied (A) en stedelijk gebied (S) waarbij N veel zwaarder werd gewogen dan A, terwijl A zwaarder woog dan S. In fig. 4 is tevens weergegeven hoe de gewenste interpolatiefout met de beleidsmatige volgorde der gebieden zou moeten samenhangen. Deze lijn kwam probenderwijze tot stand, uitgaande van het totaal aantal toegestane lokaties.

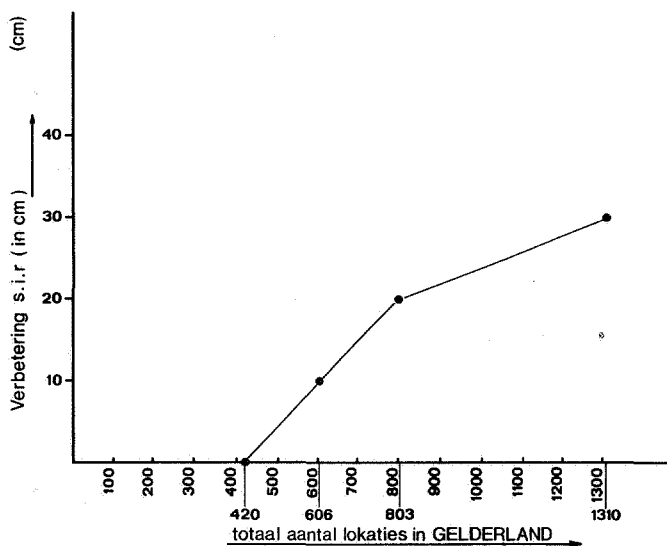
c Ten slotte werd, wederom gebaseerd op praktijkervaring, een plafond en een vloer aangebracht in de meetnetdichtheid (aantal lokaties per km^2). Hierdoor ligt de uiteindelijk gekozen dichtheid soms boven (indien de correlatie uitstekend is, bijv. rivierengebied nr. 22/23; de interpolatiefout is dan kleiner dan noodzakelijk) en soms beneden de gewenste dichtheid (indien de correlatie erg slecht is, bijvoorbeeld het Winterswijkse plateau nr. 1; de interpolatiefout blijft te hoog). Voor het "800" alternatief was bijvoorbeeld de maximale dichtheid gesteld op 50 meetpunten per kaartblad (125 km^2) en de minimale op 10 meetlokaties.

Nadat de ruimtelijke verdeling bekend was, kon - gebruikmakend van een nauwgezet onderzoek naar de waarde van het huidige waarnemingsbuisenbestand - een kostenraming worden gemaakt voor het uiteindelijke meetnet per alternatief van "450", "600", "800" en "1300" lokaties over Gelderland. Hierbij werd natuurlijk zoveel mogelijk gebruik gemaakt van reeds aanwezige meetpunten.

Opgemerkt moet worden dat bovengenoemde methode gold voor het bovenste watervoerend pakket, voor de diepere lagen werd een eenvoudiger procedure gevolgd.

4.3.2 Het absolute aantal en de waarnemingsfrequentie.

Het gaat nu om afweging van kosten en baten. In fig. 5 valt onmiddellijk de verminderde mééropbrengst op bij een lokatie-aantal boven ca. 800, op zich een belangrijk gegeven. Zoals reeds eerder is gezegd ligt het waterbeheersprobleem vrijwel altijd in de vaststelling der baten en dit geldt evenzeer voor het meetnet. Gebaseerd op ruime praktijkervaring werd gesteld dat m.b.v. het "800" alternatief de doelstelling zou kunnen worden gehaald, dat wil zeggen dat het gekozen meetnet zou kunnen functioneren als kapstok (in ruimte en tijd) voor eventueel meer gedetailleerd onderzoek, terwijl ook een goed regionaal beeld werd verkregen. Hierbij werd



Figuur 5 Vermindering interpolatiefout (s.i.r.) bij toenemend aantal meetlokaties

als waarnemingsfrequentie eenmaal per 2 weken gekozen naar aanleiding van bestaande studies hierover (Kooijman, 1980). De slotvraag was echter: kan het nog goedkoper?

Tabel 2 Kosten van de alternatieve Gelderse grondwaterstandsmeetnetten

Alternatief code	Waarnemingspunten		Gebiedsafhankelijke interpolatiefout			Kosten in Dfl.x1000	
	exact aantal lokaties	bestaand	nieuw	min.	max.	inrichting (eenmalig)	beheer en onderhoud (jaarlijks)
"450"	420	356	64	45 cm	70 cm	392	418/j
"600"	606	503	103	35 cm	60 cm	581	579/j
"800"	803	635	166	25 cm	50 cm	738	754/j
"1300"	1310	-	-	15 cm	40 cm	-	-
"600+" tijdelijk	606+15	503	103+15 tijdelijk	-	-	581	617/j

Zoals uit tabel 2 blijkt zijn de kosten van het provinciale meetnet aanzienlijk. Van de beheers- en onderhoudskosten is ca. de helft nodig voor betaalde waarnemers. Nu blijkt in de praktijk dat er meestal geruime tijd beschikbaar is voor het uitbrengen van een advies, ruim genoeg om op de betreffende lokatie een grondwaterstandsreeks van een half tot een heel jaar op te kunnen bouwen. Uit correlatieberekeningen (lineaire regressie) bleek dat bij een dichtheid overeenkomend met 600 lokaties, reeds bij een half jaar waarneming van een tijdelijke buis, een voldoende nauwkeurige tijdreeks van deze buis kon worden voorspeld, vooral als het grondwater ondiep is en dit is juist het geval bij schadekwesties. Daar het "600" alternatief ook een goed regionaal beeld geeft viel tenslotte de keuze op een "600+" alternatief, hetgeen wil zeggen 606 vaste lokaties en 10 à 20 jaarlijks aanwezige tijdelijke waarnemingsbuizen daar waar op korte termijn lokaal moet worden geadviseerd. (bij een langdurige studie komt daar vervolgens een tertiair net).

5 TERUGBLIK EN KRITIEK

De gevolgde werkwijze brengt de twee aspecten van een waterbeheersmeetnet, namelijk de (geo)hydrologische en de beleidsmatige, goed tot uiting. Bij de keuze is gezocht naar het meest economische alternatief om de gewenste doelstelling te bereiken. Ook dit is een gezonde aanpak. Bij de nadere specificatie der criteria is echter kritiek te leveren.

5.1 Geohydrologie

De toegepaste kriging methode lijkt iets te simpel of te ruw om de geohydrologie te karakteriseren. Veeleer zou men een gedetailleerd beeld van alle grondwaterstromingssystemen willen gebruiken zoals bijvoorbeeld door Engelen (1984) wordt voorgesteld. Indien een hydrologisch (gedeeltelijk) deterministisch model gebruikt zou kunnen worden, zou men met veel minder waarnemingslokaties toe kunnen om toch dezelfde interpolatie nauwkeurigheid te bereiken als met een puur stochastische kriging methode. Hier staat tegenover dat thans noch een gedetailleerde kartering van stro-

gingsstelsels, noch een deterministisch model voor heel Gelderland aanwezig zijn. Er moest geroeid worden met aanwezige riemen. Uit bovenstaande volgt echter wel dat de in tabel 2 genoemde interpolatiefout veel geringer kan worden indien de geohydrologie meer deterministisch kan worden aangepakt (hetgeen bij een detailstudie meestal gebeurt).

Een ander punt is dat bij de constructie van het provinciale grondwaterstandsmeetnet van een groot aantal gegevens gebruik kon worden gemaakt (in 1983 waren in Gelderland bij DGV-TNO 1329 landbouwbuizen en 1609 diepere buizen geregistreerd) voor het opstellen van variogrammen. Indien een meetnet moet worden ontworpen in een onbemeten gebied, vervalt de mogelijkheid van bepalen van correlatiestructuren.

5.2 Beleidsgewicht per deelgebied

Uit het voorbeeld bleek dat niet alle belangen gedetailleerd zijn meegenomen (bijvoorbeeld de zettings- en ontwateringsproblemen in stedelijke gebieden). Ook hierbij wordt men toch weer historisch vastgelegd, die belangen waarover veel kennis is opgebouwd komen het beste tot hun recht.

5.3 Baten meetnet

Bij de bepaling van de "baten" van het meetnet, dat wil zeggen het vaststellen of de doelstelling van het net wordt bereikt, moest - bij gebrek aan beter - worden uitgegaan van praktijkervaring. Een gesloten redenering dat een bepaalde van te voren vastgestelde interpolatiefout moest worden bereikt, was niet mogelijk. Maar dat is een probleem dat bij veel andere normstellingen (bijvoorbeeld met betrekking tot de oppervlaktewaterkwaliteit!) ook voorkomt en wellicht wel onvermijdelijk is. Ook hier weer een historisch groeien, dus door schade en schande wijs worden.

LITERATUUR

- BOUMA, J. (ed), 1979. Overzichtskaarten met betrekking tot een aantal aspecten van de waterhuishouding in Gelderland. Stiboka, Wageningen
- DEFIZE, P.R., 1984. Optimalisatie landelijk waarnemingsnet voor grondwatergegevens. Deel 5: Meetnetherzieningstechnieken. DGV-TNO, Delft
- DEFIZE, P.R., 1985. Optimalisatie van een bestaand meetnet met behulp van kriging. CHO-TNO, 's-Gravenhage (blz. 43 in dit rapport)
- ENGELEN, B.G., 1984. Hydrological systems analysis. A regional case study. DGV-TNO, Delft
- GROOTJANS, P., 1984. De geohydrologische beschrijving van de provincie Gelderland. WB Gelderland, Arnhem
- HNA (werkgroep grondwaterbeheer), 1981. Grondwatermeetnet, noodzaak en gevolgen. P.W. Noord-Holland, Haarlem
- KOOIJMAN, J., 1980. Optimalisatie landelijk waarnemingsnet voor grondwaterstandsgegevens. Deel 4. Frequentie van waarnemen. DGV-TNO, Delft
- Ontwerp primair grondwaterstandsmeetnet Gelderland, 1985. DGV-TNO, RW en WB Gelderland, Arnhem
- Waterhuishouding van Nederland. Concept, 1983. RW. 's-Gravenhage

METHODEN VOOR RUIMTELIJKE INTERPOLATIE VANUIT MEETNETTEN

P.A. Burrough,

Vakgroep Fysische Geografie, Rijksuniversiteit Utrecht

SAMENVATTING

Interpolatie vanuit puntwaarnemingen naar vlakken is een belangrijk onderdeel van het gebruik van data uit meetnetten.

Interpolatiemethoden kunnen in twee groepen gesplitst worden : a) globale of lange afstandsmethoden die een of ander globaal model gebruiken, b) lokale methoden die gebruik maken van informatie zo dicht mogelijk bij de te interpoleren lokaties. Choroplethkaarten en regressievlakken zijn voorbeelden van globale methoden. Thiessen polygonen, splines en gewogen gemiddelden zijn voorbeelden van lokale methoden. Methoden zoals kriging maken gebruik van kennis van de ruimtelijke correlatiestructuur van een attribuut om gewogen gemiddelden optimaal te kunnen schatten.

Kriging levert ook een schatting van de interpolatiefout en is dus toepasbaar voor het aanpassen van een meetnet als een bepaald niveau van betrouwbaarheid wordt gewenst.

1 INLEIDING

Voor vele ruimtelijke verspreide attributen van het aardoppervlak, zoals bijvoorbeeld het grondwaterpeil, is het niet mogelijk het gehele ruimtelijke patroon van buiten af te zien. Om een zo goed mogelijk inzicht in de verspreiding van het verschijnsel te krijgen worden puntenwaarnemingen, bijvoorbeeld in peilbuizen, gedaan. De vanuit deze puntlokatie waargenomen gegevens worden gebruikt voor het voorspellen of modelleren van het gedrag van het verschijnsel in de ruimte. Technieken die worden

gebruikt om de waarde van een ruimtelijke verbonden eigenschap op onbezochte plaatsen te kunnen schatten of voorspellen heten "interpolatietechnieken". Met andere woorden, interpolatie is het proces van het overbrengen van informatie van een puntwaarnemingsnet naar de ruimte.

Er zijn twee belangrijke aspecten bij interpolatie. In de eerste plaats de mogelijkheden van de verschillende methoden.

In de tweede plaats de hoeveelheid informatie die nodig is om een goede interpolatie uit te voeren, en die bij meetnetstudies bepalend is voor de effectiviteit van dit meetnet. Dit artikel geeft een overzicht van een aantal veel gebruikte interpolatietechnieken en geeft tevens middelen voor het optimaliseren van een meetnet.

2 INTERPOLATIEMETHODEN

Men dient zich te realiseren dat alle interpolatiemethoden veronderstellingen maken omtrent het mogelijke gedrag van de desbetreffende fenomeen. Twee klassen van interpolatiemethoden worden onderscheiden : GLOBALE en LOKALE methoden.

2.1 Globale methoden

Globale methoden proberen een algemeen ruimtelijk model op te stellen waarin alle waarnemingen kunnen passen. Ze houden voornamelijk rekening met de lange- en middenafstands aspecten van de ruimtelijke verschillen. Dit in tegenstelling met lokale methoden die gebruik maken van hoofdzakelijk plaatselijke informatie om waarden op onbezochte plaatsen te kunnen schatten.

2.1.1 Choropleth kartering

In choropleth kartering, wordt het landschap opgedeeld in zogenaamde "homogene" gebieden of eenheden. De begrenzing en herkenning van deze eenheden worden hoofdzakelijk met informatie uit luchtfoto's en externe verschijnselen van het landschap vastgesteld. In statistische termen, de waarde van een attribuut Z , op een plaats x , wordt gegeven door

$$Z(x) = \mu + \alpha_j + \varepsilon \quad (1)$$

met μ het algemeen gebiedsgemiddelde, α_j het verschil tussen het gemiddelde van eenheid j en μ en ε is een Gaussische ruis term met een gemiddelde $m = 0$, en variantie σ^2 .

In het choropleth model vinden alle ruimtelijke verschillen van belang langs de GRENZEN plaats. Het wordt verondersteld dat alle plekken binnen de grenzen ruimtelijk onafhankelijk van elkaar zijn. Volgens deze veronderstelling is het mogelijk het aantal waarnemingen, die nodig zijn om de gemiddelde waarde m van een eenheid j te schatten binnen een betrouwbaarheidsinterval van lengte $2g$ vast te leggen met de bekende formule:

$$n = t_{\alpha}^2 \cdot s^2 / (g - m)^2 \quad (2)$$

waarbij s^2 de variantie is, en t_{α} is Student's t -waarde met waarschijnlijkheid α . Op deze manier is het mogelijk te zien of de steekproef voldoet aan de doelen van de studie.

2.2 Regressievlakken

Een beperking van choropleth kartering is de reeds genoemde verwaarlozing van geleidelijk ruimtelijke verschillen binnen de afgegrensde eenheden. Het choropleth model suggereert een trapsgewijze ruimtelijk verloop van het attribuut.

Het is echter de vraag of de ruimtelijke verspreiding van alle eigenschappen van het landschap, en in het bijzonder grondwatereigenschappen, door zo'n trapmodel volledig wordt beschreven. Geleidelijke verschillen kunnen op verschillende manieren behandeld worden, o.a. door het gebruik van globale polynomen of regressievlakken (trend surfaces).

Bij regressievlak-analyse wordt, de waarde van een eigenschap Z in een ruimte door multiële regressie vastgelegd in de vorm van een polynoom met nader te bepalen graad p . In twee dimensies wordt het polynoom beschreven door

$$f\{ (X_1, X_2) \} = \sum_{r+s \leq p} (b_{rs} X_1^r X_2^s) \quad (3)$$

gegeven. De coëfficiënten b_{rs} van het polynoom worden geschat met behulp van de kleinste kwadraten-methoden gefit.

De eerste drie functies van (3) zijn:

$$Z(x) = b_0 \quad \text{vlak}$$

$$Z(x) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad \text{lineair}$$

$$Z(x) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1^2 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_2^2 \quad \text{kwadratisch}$$

De orde van het regressievlak is gegeven door p . Er zijn $P = (p+1) \cdot (p+2)/2$ coëfficiënten b_j te bepalen door het minimaliseren van

$$\sum_{i=1}^n \{ Z(x_i) - f(x_i) \}^2$$

Het probleem van het vinden van de coëfficiënten is een standaardprobleem bij multiële regressie. Ripley (1981) waarschuwt echter "polynomial regression is an ill-conditioned least squares problem that needs careful analysis".

De berekende regressievlakken kunnen worden gebruikt om de waarden van het attribuut Z op onbemonsterde punten te interpoleren. Regressievlakken worden in het algemeen niet als goede interpolatiemethoden beschouwd, wegens de gevoeligheid voor uitschieters (bijzondere hoge of lage waarden op enkele meetpunten). Ook is het koppelen van een regressievlak van een bepaalde orde aan een fysisch model vaak moeilijk te realiseren. Hogere

orde regressievlakken zijn vaak erg gevoelig voor randeffecten, vooral wanneer uitschieters voorkomen aan de rand van het gebied. Een ander probleem bij regressievlakanalyses is dat de methode veronderstelt dat alle verschillen die niet voor de trend te verklaren of beschrijven zijn, het gevolg zijn van willekeurige variabiliteit of ruis. Dat dit vaak niet het geval is, kan worden gezien door de residuen van de regressie op de kaart te tekenen. In vele gevallen vertonen deze residuen hun eigen ruimtelijke patroon. Niettemin, is regressievlakanalyse een veel gebruikte techniek in de geologie, de geografie en in andere ruimtelijke studies (zie b.v. Agterberg 1984, Davis 1973).

2.2 Lokale methoden

Lokale interpolatiemethoden gaan uit van het principe, dat de beste schatting van een waarde op een onbemonsterd punt kan worden verkregen met behulp van de nabij gelegen meetpunten.

2.2.1 Thiessen polygonen

Bij Thiessen polygonen (ook Dirichlet tegels of Voronoi polygonen genoemd) is de veronderstelling gemaakt dat voor elk bemonsterde plek x , de beste schatting voor attribuut Z de meest nabij gelegen meetwaarde is. Het studiegebied wordt dus in polygonen (ook cellen of tegels genoemd) verdeeld met een waarnemingspunt per cel. De grenzen van de polygonen liggen halverwege de meetpunten.

Thiessen polygonen zijn een eenvoudige oplossing tot het interpolatieprobleem, maar net als met choropleth kaarten, wordt in hun basisvorm wederom verondersteld dat alle ruimtelijke verschillen op grenzen plaatsvinden. De waarde van elke cel is dus met een steekproef ter grootte 1 geschat.

De vormen van de Thiessen polygonen, en de ligging van de grenzen heeft geen verband met het actuele ruimtelijke patroon van het attribuut Z . Ze zijn direct uit de verspreiding van de meetpunten verkregen. In hun eenvoudigste vorm zijn Thiessen polygonen voor interpolatie van hydrologische gegevens niet geschikt. Ripley (1981) behandelt een aantal

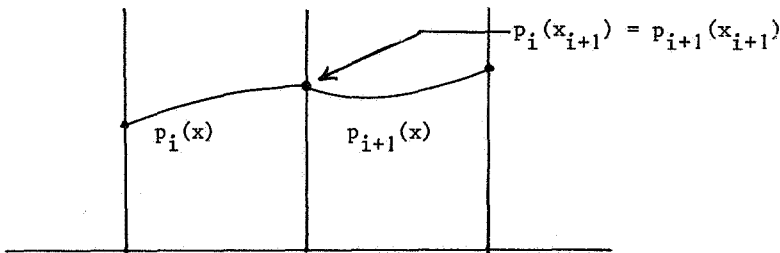
extensies van de Thiessen polygoon-techniek die gebruik maken van schattingen door kleinste kwadraten en het fitten van polynomen om betere resultaten te verkrijgen.

2.2.2 Spline funkties

Een 'spline' is de Engelse naam voor een flexibele lineaal die door tekenaars wordt gebruikt om een vloeiende lijn door een aantal punten te kunnen tekenen. Spline funkties zijn aan elkaar gekoppelde polynomen van dezelfde orde om een vloeiende lijn of vlak door een aantal punten te trekken. In de Engelse literatuur heten ze 'spiece-wise polynomials'. De spline polynoom $p(x)$ wordt gedefinieerd door

$$p(x) = p_i(x), \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad i=0, 1, \dots, k-1$$

$$p_i(j)(x_i) = p_{i+1}(j)(x_i) \quad \begin{matrix} j=0, 1, \dots, r-1 \\ i=1, 2, \dots, k-1 \end{matrix} \quad (4)$$



met $p_i(x)$ polynomen van de graad m of minder

De meetpunten $x_1, \dots, x_{k-1}$ binnen een interval x_0, x_k

heten 'breukpunten', en de punten op de spline met deze waarden van x heten 'knopen'. De grootte r beschrijft de orde van de spline. Met $r=0$ zijn er geen beperkingen; met $r=1$ is de functie continu maar zonder beperkingen op de afgeleiden. Als $r=m+1$ er is maar een polynoom over het interval (a, b) , zodat $r=m$ is het maximum aantal beperkingen dat opgelegd kan worden die tot een niet triviaal oplossing kan leiden. De meest voorkomende waarde van m is 3. Dit geeft de "cubic piece-wise" polynomen of "cubic splines" (Ahlberg et al 1967).

Splines kunnen gebruikt worden om een exacte fit aan de data te maken, zoals gebruikelijk in computer graphics en in computer aided design (zie Pavlidis 1982). "Smoothing splines" worden gebruikt voor het interpoleren van complexe vlakken om snel een overzicht van de ruimtelijke patroon van een attribuut te kunnen krijgen (Dubrule 1984). Als de data van de meetpunten niet exact zijn ten gevolge van een meetfout,

$$Y(x_i) = Z(x_i) + \varepsilon(x_i) \quad (5)$$

kan een "smoothing spline" functie worden gebruikt om het effect van de meetfouten te minimaliseren. De "smoothing spline" zoekt de minimum waarde van

$$A(f) + \sum_{i=1}^n w_i^2 \{ f(x_i) - Y(x_i) \}^2 \quad (6)$$

De gewichten w_i^2 worden in inverse relatie tot de

error variantie gekozen:

$$w_i^2 = \frac{\phi}{\text{Var} \{ \varepsilon(x_i) \}} = \frac{\phi}{\sigma_i^2} \quad (7)$$

De term $A(f)$ beschrijft de "smoothness" van de spline-functie; de tweede term in (6) is vergelijkbaar met de residuen van een regressievlak omdat deze aangeeft hoe groot de verschillen tussen de smoothing spline en de data zijn. De waarde van ϕ houdt rekening, met de door de gebruiker gekozen gewichten om de karakteristieken van de smoothing spline vast te leggen.

2.2.3 Eenvoudige gewogen gemiddelden

De eenvoudigste manier om de waarde van een attribuut op een niet bemeeten punt x_0 te kunnen schatten, is het berekenen van een gewogen gemiddelde gebaseerd op waarden gemeten op een aantal meetpunten binnen een bepaalde afstand.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i), \quad \sum w_i = 1 \quad (8)$$

n is het aantal meetpunten, en de gewichten w_i hangen af van een afstandsfunctie $\phi(d(x, x_i))$. Omdat $\phi(d) = 0$ als $d = \infty$, wordt voor $\phi(d)$ vaak een inverse of exponentiële afstandsfunctie gekozen. De meest gebruikte vorm van $\phi(d)$ is d^{-r} , zo

$$Z(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r}} \quad (9)$$

Deze methode is de basis van het bekende SYMAP algoritme (Shepard 1984).

Eenvoudige gewogen gemiddelden zijn snel en makkelijk te berekenen. De resultaten zijn echter afhankelijk van de vorm van $\phi(d)$, van de waarde van r , en van het aantal punten die worden gebruikt.

2.2.4 Interpolatie met gewichten bepaalt door de ruimtelijke correlatiestructuur.

Alle tot nu toe behandelde interpolatiemethoden maken geen of weinig gebruik van enige kennis over het ruimtelijke verloop van het attribuut. De enige veronderstelling is dat het ruimtelijke patroon van een attribuut gesplitst kan worden in twee delen: een structurele component, beschreven door een zekere gemiddelde waarde of een trend in de vorm van een polynoom, en een component die de verschillen vertegenwoordigt tussen deze structurele component en de gemeten data op de meetpunten. Er wordt verondersteld dat deze tweede component bestaat uit willekeurige verschillen die Gaussisch verdeeld zijn.

Het komt vaak voor dat, afgezien van een algemene gemiddelde waarde of globale trend, twee dicht bij elkaar gelegen meetpunten meer gelijke waarden van een attribuut hebben dan twee punten die ver van elkaar af liggen. Dit fenomeen heet "ruimtelijke afhankelijkheid". Dit wil zeggen dat de waarden van het attribuut op twee dicht bij elkaar liggende punten hoger gecorreleerd zijn dan op twee punten die ver van elkaar af liggen. In vele gevallen kan deze ruimtelijke afhankelijkheid niet echt beschreven worden in de vorm van een zekere gemiddelde waarde of een globale trend. Op de schaal waarop de metingen zijn verricht zijn deze verschillen als 'random' te beschouwen, maar ze zijn ook ruimtelijk gecorreleerd. Naast deze ruimtelijke gecorreleerde verschillen zijn er ook vaak ongecorreleerde verschillen, die het gevolg zijn van meetfouten of verschillen op heel korte afstanden.

Volgens deze veronderstelling is de waarde van een attribuut Z op punt x gegeven door

$$Z(x) = m + \epsilon'(x) + \epsilon'' \quad (10)$$

waarbij m de trendcomponent is,

$\epsilon'(x)$ een stochastische term met gemiddelde nul en met ruimtelijke correlatie en ϵ'' is een Gaussische ruis term met gemiddelde waarde 0 en variantie σ^2 . Attributen die zo'n ruimtelijke variabiliteit hebben heten 'geregionaliseerde variabelen' (regionalised variables in de Engelse literatuur). De theorie van deze methode (die 'kriging' heet naar de

Zuid-Afrikaanse mijnbouwingenieur D.G. Krige) is door de Franse Geostatisticus G. Matheron en zijn medewerkers in L'Ecole des Mines, Fontainebleau, Frankrijk, ontwikkeld (Matheron 1971). Deze onderzoekers realiseerden zich dat de correlatiestructuur van een attribuut een belangrijk hulpmiddel is voor het schatten van de w_i gewichten in gewogen gemiddelde interpolatie. Kriging is een optimale schattingsmethode, in die zin dat afhankelijk van de ruimtelijke correlatiestructuur de gewichten w_i zodanig gekozen worden dat de variantie van de voorspellingsfout minimaal is.

Evenals alle andere interpolatiemethoden, worden bij kriging bepaalde veronderstellingen gedaan. Met deze methode is het noodzakelijk aan te nemen dat de statistische eigenschappen van de geregionaliseerde variabele gelijk zijn binnen het te interpoleren gebied. Voldoende is de zo genoemde intrinsieke hypothese die veronderstelt dat binnen het gebied geldt:

$$1) \quad E \{ Z(x) - Z(x+h) \} = 0 \quad (11)$$

voor elke x en h

en

$$2) \quad E \{ (Z(x) - Z(x+h))^2 \} = E \{ (\varepsilon'(x) - \varepsilon'(x+h))^2 \} = 2(h)$$

$$\text{onafhankelijk van } x \quad (12)$$

Hierin is h de afstand tussen twee meetpunten (ook wel LAG genoemd). De grootheid (h) is een tweede orde moment die wordt de semivariantie genoemd. De essentie van deze veronderstelling is dat de variantie van de verschillen in de waarde van Z tussen twee meetpunten x , $x+h$ slechts afhankelijk van de afstand h tussen de waarneming is.

Voor en regelmatig bemonsterde transect in een dimensie, de semivariantie wordt geschat door

$$\hat{2}(h) = \frac{1}{(N-h)} \sum_{i=1}^{N-h} (Z(x) - Z(x+h))^2 \quad (12)$$

Voor andere schatters van (h) , zie Cressie and Hawkins (1980). Een grafiek van (h) tegen h heet het experimentele semivariogram.

Bij kriging, is de eerste stap het bepalen van een experimentele semivariogram. Dit wordt gedaan vanuit transecten of twee-dimensionale meetnetten (zie Journel en Huijbregts 1978). Een experimenteel semivariogram kan vele soorten verlopen vertonen en is niet altijd een vloeiende, geleidelijk oplopende lijn. Daarom wordt een curve aan de experimentele waarden gefit. Semivariogram modellen hebben vele vormen (zie Journel en Huijbregts 1978), maar twee veel gebruikte modellen zijn a) het lineaire model

$$(h) = c_0 + bh \quad (13)$$

waar b de helling van de lijn is,
of b) het sferische model

$$(h) = c_0 + c_1 \left(\frac{3h}{2a} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \quad \text{voor } 0 < h < a \quad (14)$$

$$\text{en } (h) = c_0 + c_1 \quad \text{voor } h \geq a.$$

Het teken ' a ' heet de 'range'. Het is de afstand waarop de meetpunten geen ruimtelijke afhankelijkheid met elkaar meer vertonen. In theorie, voor lags groter dan de 'range', het semivariogram stijgt niet meer en blijft op een constant niveau met een toenemende lag. Dit variantieplateau heet de 'sill'. Semivariogram-modellen met een sill heten 'transition models' (Journel en Huijbregts 1978). Een ander veel gebruikt model is het exponentieel model

$$(h) = c_0 + c_1 \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-h}{a} \right) \right\} \quad (15)$$

In alle vorengenoemde modellen is de term c_0 de "nugget" variantie. Dit is de variantie van de term ε in (10) en vertegenwoordigt de onverklaarbare ruimtelijke onafhankelijke verschillen die een gevolg zijn van meetfouten en van ruimtelijke verschillen op afstanden korter dan de minimum lag.

Semivariogrammodellen worden geschat uit de experimentele data door maximum likelihood-methoden of door de kleinste kwadraten-methode. Volgens Cressie (1985) is de methode van weighted least squares de juiste methode omdat deze methode rekening houdt met het aantal beschikbare verschillen

$$(Z(x) - Z(x+h)).$$

Het semivariogram is de basis voor het bepalen van de gewichten w_i bij het interpoleren. De gewichten in (8) worden in een zodanige manier gekozen dat de schatting van $Z(x_0)$ zuiver is, en de variantie σ_e^2 van de schattingsfout minimaal is.

De minimum variantie van $Z(x_0) - \hat{Z}(x_0)$ wordt verkregen wanneer

$$\sum_{j=1}^n w_j \cdot K(x_i, x_j) + \phi = K(x_i, x_0) \quad (16)$$

voor alle meetpunten i , en is gelijk aan

$$\sigma_e^2 = \sum_{j=1}^n w_j \cdot K(x_j, x_0) + \phi \quad (17)$$

De term $K(x_i, x_j)$ is de semivariantie over de afstand tussen meetpunten x_i en x_j ; $K(x_i, x_0)$ is de semivariantie tussen meetpunt x_i en het punt waarop de schatting wordt gemaakt, x_0 . De grootte van deze waarden volgen uit het semivariogram model. De term ϕ is een 'Lagrange multiplier', nodig voor de minimalisatie.

Kriging levert twee schattingen op. In de eerste plaats een zuivere schatting van de waarde van het attribuut op een niet bemeten punt; in de tweede plaats een schatting van de variantie van deze schatting. Beide schattingen kunnen op kaart gezet worden. De tweede kaart laat zien waar meer meetpunten nodig zijn om de schattingsvariantie omlaag te brengen.

Evenzo kunnen de consequenties voor de variantie worden geëvalueerd indien een aantal meetpunten wordt weggelaten c.q. toegevoegd (Defize 1985).

De interpolatieformules (16) - (17) zijn geldig voor het schatten van de waarde van een attribuut op puntlokaties. In vele gevallen is het wenselijk om een gemiddelde waarde voor een gebied of blok B te schatten. De gemiddelde waarde van Z binnen gebied B is

$$Z(x_B) = \int_B \frac{Z(x) \, dx}{\text{oppervlak B}}$$

en wordt geschat door

$$Z(x_B) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot Z(x_i) \quad (18)$$

met $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

De minimum variantie is

$$\sigma_B^2 = \sum_{j=1}^n w_j K_j(x_j, x_B) + \phi_B - K(x_B, x_B) \quad (19)$$

De gewichten volgen uit

$$\sum_{j=1}^n w_j (x_i, x_j) + \phi_B = K(x_i, x_B) \text{ voor alle } i.$$

(Webster en Burgess 1983).

3 AANPASSING VAN HET MEETNET

Zoals reeds vermeld, is kriging een techniek die van nut kan zijn bij het aanpassen van een meetnet voor interpolatie.

Een ander veel voorkomend probleem is het schatten van het aantal monsters dat nodig is om een gemiddelde waarde van een gebied binnen bepaalde betrouwbaarheidsgrenzen te kunnen schatten. Vergelijking (2) geeft de klassieke formule. Duidelijk is dat wanneer de s^2 term lager wordt, het aantal benodigde monsters ook kleiner wordt.

Webster en Burgess (1984) hebben aangetoond dat wanneer het semivariogram bekend is, en de kriging-variantie voor een block B lager dan de klassieke variantie s^2 is, het aantal benodigde monsters nodig voor het schatten van de gemiddelde waarde sterk verminderd kan worden.

LITERATUUR

- AGTERBERG, F. 1984. Trend Surface Analysis, in G. Gaile en C. WILMOTT (eds), Spatial Statistics and Models, D. REIDEL, Dordrecht.
- AHLBERG, J.H., NILSON, E.W. and WALSH, J.L. 1967. The theory of splines and its applications. Academic Press, New York.
- CRESSIE, N. 1985. Fitting variogram models by weighted least squares. J. Math. Geology. (in druk).
- CRESSIE, N. and HAWKINS, D.M., 1980. Robust estimation of the variogram. J. Math. Geology 12 : 115-125.
- DAVIS, J. 1973. Statistical methods in Geology. Wiley, New York.
- DENT, B.D. 1985. Principles of thematic map design. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- DEFIZE, P.R. 1985. Optimalisatie van een bestaand meetnet met behulp van Kriging (deze publicatie: 43).
- DUBRULE, O. 1984. Comparing splines and kriging. Computers and Geosciences 10 : 327-338.
- JOURNAL, A.G. en HUIJBREGTS, Ch. J., 1978. Mining Geostatistics. Academic Press, London.
- MATHERON, G. 1971. The theory of regionalised variables and its applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau No. 5.
- PAVLIDIS, T. 1982. Algorithms for graphics and image processing. Springer-Verlag, Berlin.

- RIPLEY, B. 1981. Spatial statistics. Wiley, Chichester.
- SHEPHARD, D. 1984. Computer mapping: The SYMAP Interpolation algorithm.
in, G. GAILE and C. WILMOTT (eds), Spatial Statistics and Models,
D. REIDEL, Dordrecht.
- WEBSTER, R. en BURGESS, T.M. 1983. Spatial variation in soil and the role
of kriging. Agricultural Water Management 6 : 111-122.
- WEBSTER, R. en BURGESS, T.M. 1984. Sampling and bulking strategies for
estimating soil properties in small regions. J. Soil Science 35 :
127-140.

OPTIMALISATIE VAN EEN BESTAAND MEETNET MET BEHULP VAN KRIGING

P.R. Defize, IWIS-DGV-TNO

SAMENVATTING

Een belangrijk criterium waaraan de effectiviteit van een meetnet kan worden beoordeeld is de interpolatienauwkeurigheid. Ruimtelijk kan deze worden bepaald met behulp van kriging. Bij optimalisatiestudies aan het landelijk meetnet der grondwaterstanden, zoals deze worden uitgevoerd bij de Dienst Grondwaterverkenning TNO (DGV-TNO) speelt kriging dan ook een centrale rol.

Een knelpunt bij het toepassen van kriging in deze studies is de complexe geohydrologische opbouw van de bodem. Teneinde te voldoen aan de modelveronderstellingen van kriging is een opsplitsing per watervoerend pakket in een groot aantal deelgebieden dan ook absoluut noodzakelijk. De kans bestaat echter dat te weinig waarnemingen resteren om parameters van de gegeneraliseerde covariantie nog verantwoord te kunnen schatten. Deze schatting geschiedt met behulp van de maximum likelihood methode.

Voor het controleren van de modelveronderstellingen en het opsporen van afwijkende waarnemingen (bijvoorbeeld bij onttrekkingen of ten gevolge van invoerfouten) is een ruimtelijke analyse van de zgn. gestandaardiseerde fout zeer zinvol.

Een aantrekkelijke eigenschap van kriging voor meetnetoptimalisatie is dat de theoretische standaardafwijking van de interpolatiefout kan worden bepaald voor fictieve meetnetten. Dit geeft de mogelijkheid om de informatie-inhoud van eventuele toekomstige meetnetten nader te analyseren.

Aan de hand van een aantal voorbeelden uit de praktijk wordt de geschetste problematiek nader toegelicht.

1 INLEIDING

Op een groot aantal lokaties in Nederland wordt regelmatig de grondwaterstand waargenomen. De gegevens worden opgeslagen in het Archief van Grondwaterstanden van de DGV-TNO. Doel van dit grondwatermeetnet, is het verkrijgen van een zo nauwkeurig mogelijk beeld van het verloop in ruimte en tijd van het grondwaterstandsoppervlak (onderscheiden naar watervoerende pakketten). Aangezien het meetnet op een tamelijk willekeurige wijze tot stand is gekomen, is de huidige inrichting niet optimaal met betrekking tot genoemde doelstelling.

Bij de DGV-TNO wordt thans provinciegewijs een optimalisatiestudie verricht. Een belangrijke rol bij deze studies speelt de ruimtelijke interpolatietechniek kriging. Deze techniek is geschikt voor het analyseren van een bestaand meetnet. Beoordeeld kan worden hoe nauwkeurig men kan interpoleren op lokaties waar geen waarnemingen beschikbaar zijn. Van het feit dat op een meetlokatie tijdreeksen in plaats van puntwaarnemingen beschikbaar zijn, wordt echter geen gebruik gemaakt. De interpolatienauwkeurigheid zou in theorie kunnen worden verhoogd door van het tijdsaspect gebruik te maken. Hiertoe komen technieken als Kalman-filtering en co-kriging in aanmerking.

Naast het feit dat een gecombineerde tijd/ruimte-analyse zeer complex is, is er nog een andere reden waarom bij netwerkoptimalisatie veelal kan worden volstaan met een puur ruimtelijke analyse. Een relatieve afweging van nauwkeurigheden speelt een minstens zo belangrijke rol als een zuiver absolute benadering. De inrichting/optimalisatie van een meetnet is namelijk gebonden aan financiële beperkingen. Wil men binnen deze beperkingen eisen stellen aan een meetnet dan zijn formuleringen als "de interpolatienauwkeurigheid in gebied A moet $2 \times$ zo groot zijn als die in gebied B" werkbaarder dan een absolute eis aan de interpolatienauwkeurigheid van ieder te onderscheiden deelgebied.

Bij een dergelijke benadering speelt het tijdsaspect nauwelijks een rol van betekenis.

In dit artikel wordt de theorie van kriging slechts summier beschreven en ligt de nadruk op een aantal praktische zaken waar men mee te maken krijgt bij het daadwerkelijk analyseren van waarnemingen. De theorie van kriging is zeer fraai, maar steunt op een aantal vrij zware veronderstellingen. In de praktijk zal men dus moeten nagaan of hier redelijk aan wordt voldaan en maatregelen moeten nemen als dit niet het geval blijkt te zijn. Geohydrologische inzichten spelen hierbij een belangrijke rol.

Aan de hand van voorbeelden zal een en ander nader worden toegelicht.

2 NOTATIE EN FORMULES

Gegeven in het platte vlak op de lokaties $x_1 \dots x_n$, waarnemingen $z(x_1), \dots, z(x_n)$. Gevraagd wordt een (optimale) voorspeller van z op de lokatie x_0 .

De kriging-interpolator is een lineaire functie van de waarnemingen:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

waarbij de gewichten λ_i zodanig gekozen worden dat deze voorspelling

- a) zuiver is
- b) een minimale variantie heeft.

Aan deze eisen kan worden voldaan, indien een statistisch model kan worden opgesteld dat de ruimtelijke correlatie tussen de z -waarden beschrijft. De theorie van "intrinsic random functions" (Gel'fand en Vilenkin, 1967, Matheron, 1973) definieert hiertoe een brede klasse modellen. Een centrale rol in deze modellen speelt de zogenaamde gegeneraliseerde covariantiefunctie $K(h)$ (h is een vector). Deze functie is een polynoom in de oneven machten van de norm van h , zie tabel 1. Ook het "nugget-effect" is in deze functie opgenomen terwijl tevens met een eventuele trend, in de vorm van een polynoom, rekening wordt gehouden.

Tabel 1 Gegeneraliseerde covariantiefuncties

Trend	k	Functie
Constant	0	$K(h) = c\delta(h) + a_1 h $
Lineair	1	$K(h) = c\delta(h) + a_1 h + a_3 h ^3$
Kwadratisch	2	$K(h) = c\delta(h) + a_1 h + a_3 h ^3 + a_5 h ^5$

Met $\delta(h)=1$ voor $|h|=0$ en $\delta(h)=0$ voor $|h|\neq 0$, $c>0$, $a_1<0$, $a_5<0$, $a_3>-\frac{10}{3} \sqrt{a_1 a_5}$.

Naast een voorspelling van z op lokatie x_0 kan ook de variantie van de voorspellingsfout worden berekend:

$$\text{Var}(\hat{z}(x_0) - z(x_0)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j K(x_i, x_j) \quad (2)$$

($K(x_i, x_j) = K(h_{ij})$ waarbij h_{ij} de richtingsvector van lokatie x_i naar lokatie x_j is).

3 SCHATTEN VAN DE COVARIANTIEFUNCTIE

Alvorens te kunnen krijgen dienen een aantal keuzes te worden gedaan:

- de graad van de trend
- de vorm van $K(h)$
- de schattingen voor de parameters van $K(h)$.

In de literatuur wordt aan bovengenoemde zaken vrij weinig aandacht besteed, tenzij kan worden uitgegaan van afwezigheid van trend. In dat geval kan door middel van een semi-variogram informatie worden verkregen over de onderliggende covariantiestructuur (Witter, 1984).

Delfiner (1975), Hughes en Lettenmaier (1981), Kafritsas en Bras (1981) en Kitanidis (1984) behandelen het schattingsprobleem in geval van trend.

Bij IWIS-TNO heeft Barendregt (1984) een fundamentele bijdrage geleverd door een schattingsmethode uit te werken die gebaseerd is op het principe van maximum likelihood. Een alternatief is de methode Delfiner, die gebruik maakt van (gewogen) lineaire regressie. Aangezien aan met name één essentiële veronderstelling die ten grondslag ligt aan de theorie van lineaire regressie (onafhankelijke storingstermen) beslist niet wordt voldaan, kunnen geen uitspraken worden gedaan over de statistische eigenschappen van de schatters die de methode Delfiner oplevert. Voor maximum likelihood-schatters kan dit wel.

Uit ervaringen met de programma's BLUEPACK en AKRIP waarin deze methode is geïmplementeerd, blijkt echter dat deze schatters zeer variabel zijn. Bijvoorbeeld het weglaten van één waarnemingslokatie kan de schattingsresultaten aanzienlijk beïnvloeden.

Op de details van de methode Delfiner zal hier niet verder worden ingegaan.

Van de maximum likelihood aanpak volgt nu een summiere beschrijving.

De formules worden afgeleid voor het geval $k = 1$ en $K(h) = C \delta(h) + a_1 |h|$.

Analoog kunnen formules worden afgeleid voor andere gevallen.

Definieer een $n \times 3$ matrix F met als i^e rij:

$$\begin{pmatrix} 1 & x_{i1} & x_{i2} \end{pmatrix}$$

en kies een $(n-3) \times n$ matrix G (deze is altijd te vinden) zodanig dat:

$$\begin{aligned} GF &= 0 \\ GG' &= I \end{aligned} \quad (3)$$

Hierin is G' de getransponeerde van G .

Definieer kolomvectoren z en θ als volgt:

$$z = \begin{pmatrix} z(x_1) \\ z(x_2) \\ \vdots \\ z(x_n) \end{pmatrix} \quad \text{en} \quad \theta = \begin{pmatrix} C \\ a_1 \end{pmatrix}$$

dan geldt volgens de intrinsieke hypothese:

$$E(Gz) = 0$$

(4)

$$\text{Var}(Gz) = G K(\theta) G'$$

waarbij $K(\theta)$ een $n \times n$ matrix is met als i, j^{e} element $K(x_i, x_j; \theta)$.

Uitgaande van multivariate normaliteit van de waarnemingen is de log-likelihood van de waarnemingen nu te schrijven als:

$$\log(\theta|Gz) = \frac{1}{2} (n-3) \log(2\pi) - \frac{1}{2} \log \det(GK(\theta)G') - \frac{1}{2} z'G'(GK(\theta)G')^{-1} Gz.$$

Maximaliseren van deze functie levert de maximum-likelihood schatter voor θ op. De verdienste van Barendregt nu is dat hij $\log(\theta|Gz)$ zodanig weet te herparameteriseren dat het maximaliseren zeer efficiënt kan plaatsvinden.

Ook Kitanidis (1983) geeft een aantal methoden voor het maximaliseren van de log-likelihood, maar elk ervan vergt veel meer rekentijd dan de methode Barendregt.

De methode Barendregt is dan ook geprogrammeerd bij het IWIS en vervolgens geïmplementeerd in het programma AKRIP van Kafritsas en Bras.

Bij de DGV is AKRIP verder verbeterd en uitgebreid met een groot aantal in- en uitvoermogelijkheden. Bovendien zijn interfaces geconstrueerd met plotprogrammatuur voor grafische weergave van de resultaten.

Van het nieuwe programma zijn een interactieve en een batch versie, alsmede een handleiding gereed.

4 DE GESTANDAARDISEERDE FOUT

Een belangrijke rol bij het controleren van modelveronderstellingen en het opsporen van afwijkende waarnemingen speelt de zogenaamde gestandaardiseerde fout. Gegeven een bepaalde covariantiefunctie kan de grondwaterstand op lokatie i worden voorspeld uit omliggende waarnemingen. De gestandaardiseerde fout f_i is nu gelijk aan:

$$f_i = \frac{z(x_i) - \hat{z}(x_i)}{s_i}$$

met $\hat{z}(x_i)$ en s_i respectievelijk gelijk aan de voorspelling en de theoretische standaardafwijking van de voorspellingsfout. Indien het model juist is heeft f_i verwachting 0 en variantie 1.

Grafische weergave van f_i via een histogram en/of een ruimtelijk plaatje zal het inzicht in de waarnemingsstructuur aanzienlijk verbeteren. Tevens kan worden vastgesteld of het "gekrigde" gebied beschouwd kan worden als statistisch homogeen.

Een tweetal voorbeelden wordt gegeven in de figuren 1 en 2. In figuur 1 zijn alle gemeten grondwaterstanden in het freatisch pakket van de provincie Drente op 28 april 1981 gebruikt. Met behulp van de "automatic structure recognition" procedure van het kriging-pakket BLUEPACK zijn de parameters van de "best" passende covariantiefunctie geschat. De ruimtelijke verdeling van de gestandaardiseerde fout maakt overduidelijk dat van een statistisch homogeen gebied geen sprake is. Een dergelijke constatering kan trouwens ook op geohydrologische gronden worden gemaakt. De opvallendste aspecten van figuur 1 zijn dan ook uit de geohydrologie te verklaren.

- Het noordelijk gebied heeft een complexe geohydrologische opbouw met beekdalen en keileem.
- De waarnemingsputten rondom Emmen zijn geplaatst ter plaatse van grote onttrekkingen.
- In het Zuid-Westen is de gestandaardiseerde fout vrijwel overal kleiner dan 1 ten teken dat in dit gebied de hoogste interpolatienauwkeurigheid kan worden bereikt.

Ook fouten kunnen met behulp van figuur 1 worden opgespoord. Een voorbeeld hiervan is de waarnemingsput, in het noord-oosten met een gestandaardiseerde fout tussen 4 en 4.5.

Figuur 2 is een voorbeeld van een statistisch (en ook geohydrologisch) homogeen gebied. Het betreft hier het 2e watervoerend pakket van het Drents plateau. De f_i 's zijn homogeen over het gebied verdeeld en er zijn geen duidelijke uitschieters te constateren.

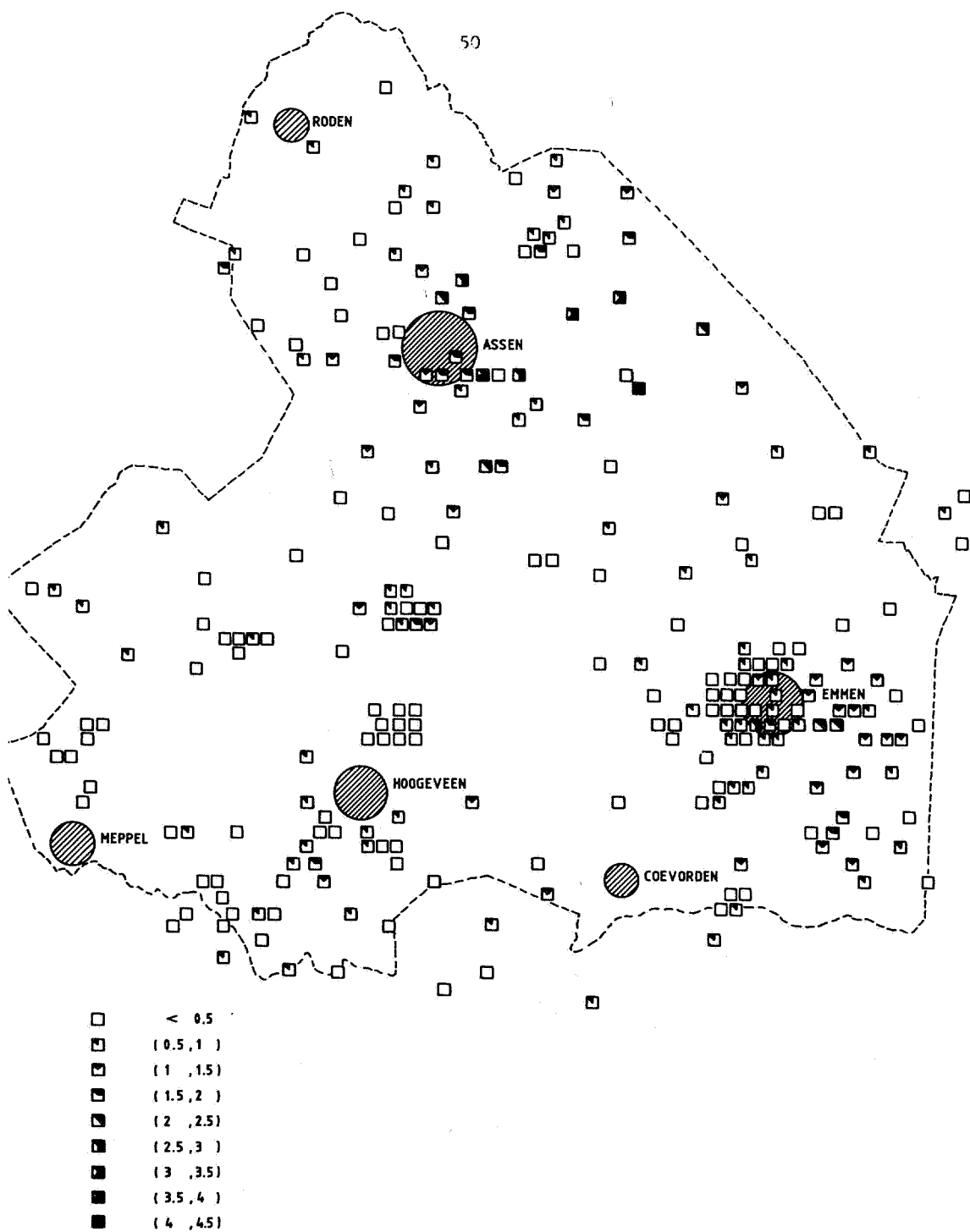


FIG.1: Gestandaardiseerde fout, freatisch pakket, Drenthe. 28-4-1981.

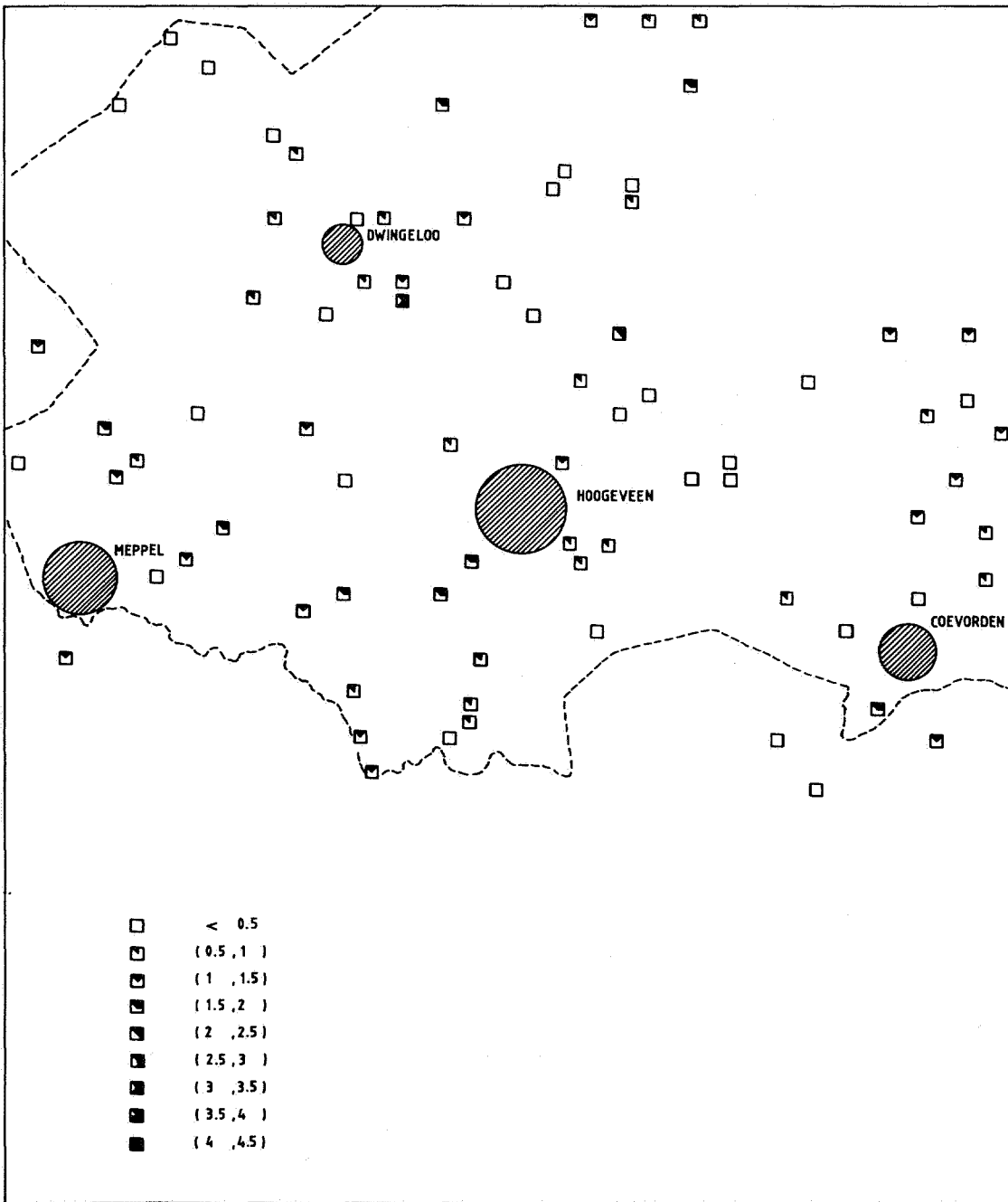


FIG. 2 : Gestandaardiseerde fout, tweede watervoerend pakket, Drents Plateau, 28-4-1981.

5 UITDUNNING EN VERDICHTING VAN EEN BESTAAND MEETNET

Formule (2) voor de standaardafwijking van de interpolatiefout geeft aan dat deze slechts afhangt van

- a) de coördinaten van de meetlokaties
- b) de coördinaten van de te interpoleren lokatie(s)
- c) de functie K

en niet van de waarnemingen zelf.

Deze specifieke eigenschap van kriging is een handzaam middel voor het optimaal inrichten van een meetnet. Immers bij gegeven covariantiefunctie K , kan voor iedere willekeurige configuratie van meetpunten de standaardafwijking van de interpolatiefout worden berekend. We geven een tweetal toepassingen.

Toepassing 1

Uitgangspunt is een theoretisch netwerk van 16 meetlokaties op een vierkant rooster. De standaardafwijking van de interpolatiefout (s_1) in het midden van dit rooster hangt af van de roosterafstand en de functie $K(h)$. Voor een aantal gebieden in het 1e watervoerend pakket van Drente is met behulp van de beschikbare waarnemingen op 28 april 1981 deze functie bepaald en zijn zogenaamde meetnet-dichtheidskarakteristieken getekend (figuur 3).

Er zijn opmerkelijke verschillen tussen het verloop van de krommes. Voor sommige gebieden neemt bij afnemende dichtheid de interpolatienauwkeurigheid snel af (potkleigebied, zuid-oost Drente en de Hondsrug) terwijl voor andere gebieden de afname veel geleidelijker verloopt (veenkoloniën, hogere delen midden en zuid Drente, beekdalen Meppel en Reestdal).

Met behulp van deze figuren en op grond van beleidsmatige overwegingen (belang van grondwater voor het betreffende gebied, financiën) kan zo tot een verantwoorde keuze van de gewenste meetnetdichtheid worden gekomen (Romijn, b.f.z. 11)

Toepassing 2

Bovengenoemde exercitie is ook toegepast op het tweede watervoerend pakket van

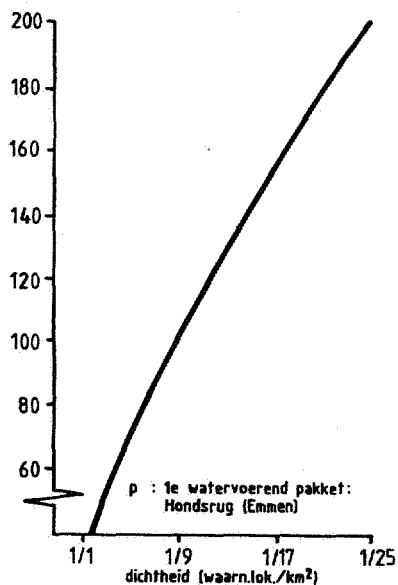
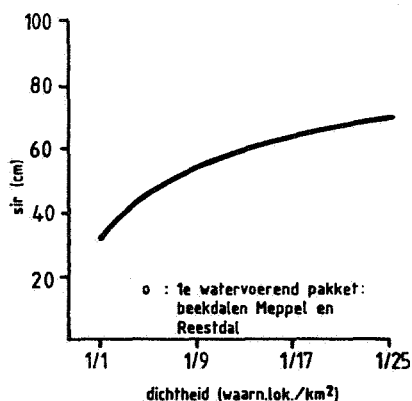
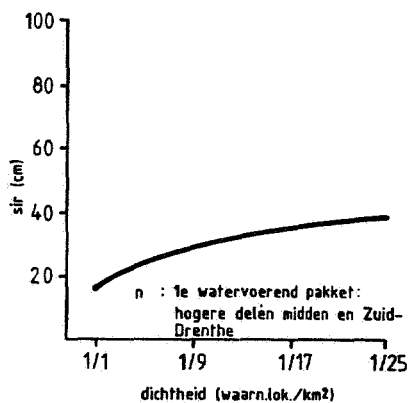
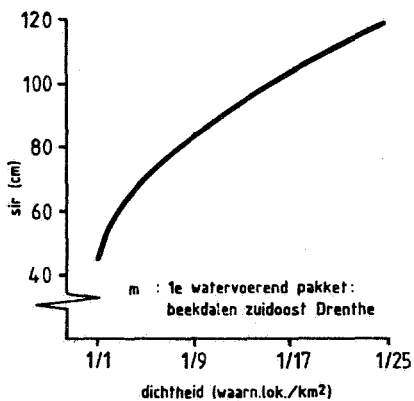
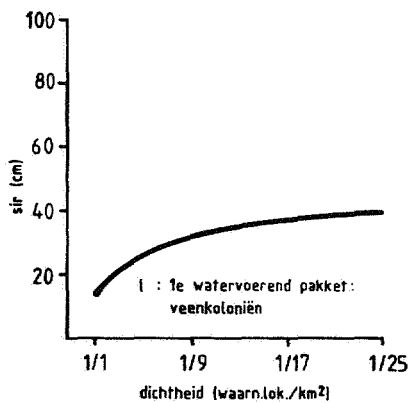
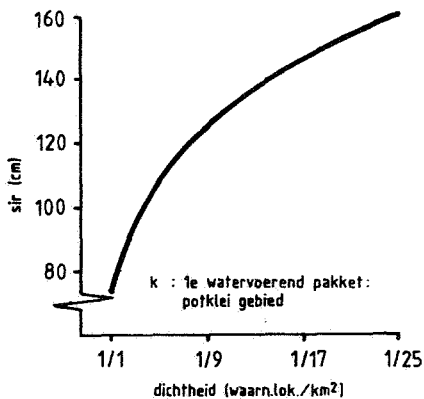


FIG. 3: Meetnetdichtheidskarakteristieken eerste watervoerend pakket Drenthe.

de provincie Drente, hetgeen heeft geresulteerd in een nieuw inrichtingsplan. In figuur 4 is de huidige meetnetconfiguratie aangegeven alsmede contourlijnen van de standaardafwijking (in de gearceerde gebieden was het, wegens de complexe geohydrologische structuur niet mogelijk kriging-interpolatie toe te passen).

De hoogste standaardafwijkingen komen voor in Noord-Drenthe (> 60 cm).

De hoge concentraties van meetpunten in het overige deel van de provincie resulteren in standaardafwijkingen beneden 20 cm.

Het nieuwe inrichtingsplan, gepresenteerd in figuur 5, laat zien dat een standaardafwijking groter dan 60 cm praktisch niet meer voorkomt. De uitdunning van het meetnet in het zuiden heeft nauwelijks enig gevolg voor de interpolatiefout.

6 CONCLUSIES

Er is een drietal redenen aan te geven waarom kriging zo'n populaire interpolatiemethode is:

- gegeven de juistheid van het model is de interpolatie optimaal in de zin van zuiverheid en minimale variantie,
- naast een geïnterpoleerde waarde kan ook een indicatie van de interpolatiefout worden aangegeven,
- fictieve meetnetten kunnen worden doorgerekend.

Wil men van deze eigenschappen gebruik maken dan dient men echter te beschikken over methoden en bijbehorende programmatuur die het mogelijk maken om

- a) het goede model te kiezen
- b) goede parameterschattingen te verkrijgen.

Deze programmatuur is slechts gedeeltelijk op de commerciële markt verkrijgbaar (o.a. BLUEPACK) zodat binnen TNO aanvullende programmatuur is geschreven. Met name op het gebied van parameterschattingen is een belangrijke stap vooruit gezet.

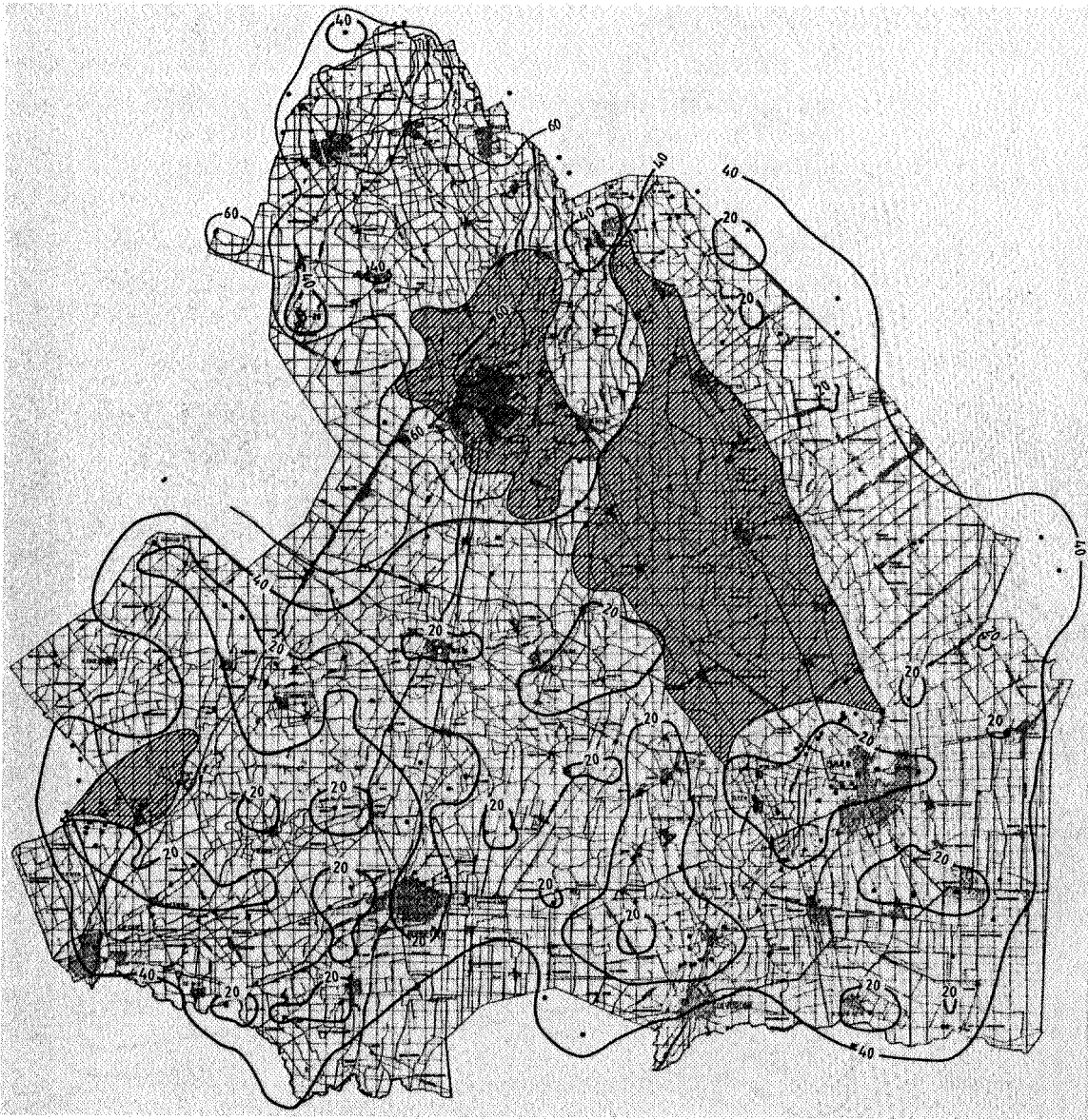


FIG. 4 : CONTOURLIJNKAART SIR VOOR HET TOTALE HUIDIGE MEETNET VAN HET TWEEDE WATERVOEREND PAKKET.
[SCHAAL 1 : 200 000]

- = Grondwatermeetlocatie
- 20— = sir = 20 cm
- ▨ = Gebied waarvoor geen ruimtelijke correlatiestructuur is berekend

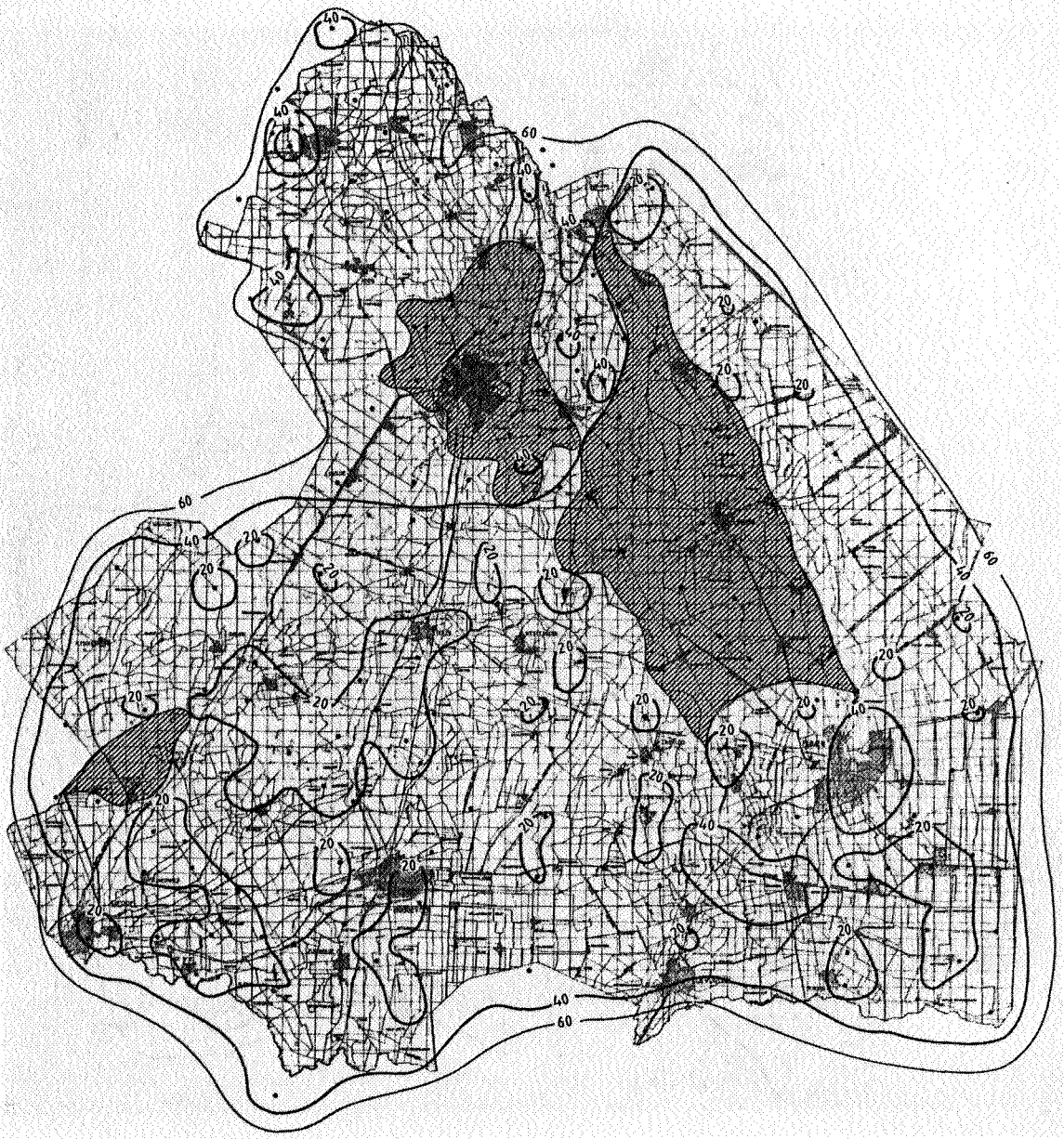


FIG. 5: CONTOURLIJNENKAART SIR VOOR HET ONTWERPEN MEETNET VAN HET TWEEDE WATERVOEREND PAKKET.
[SCHAAL 1 : 200 000]

- ▪ Geselecteerde grondwatermeetlocatie
- 20— ▪ sir = 20 cm
- ▨ ▪ Gebied waarvoor geen ruimtelijke correlatiestructuur is berekend

De keuze van het uiteindelijke model geschiedt op basis van een vergelijking tussen de theoretische fout en de werkelijke fout in bestaande meetpunten en een ruimtelijke analyse (visueel) van de gestandaardiseerde fout.

De resultaten van zo'n ruimtelijke analyse sluiten veelal zeer wel aan bij de aanwezige geohydrologische kennis (opbouw van de bodem, onttrekkingen) zoals bijvoorbeeld blijkt uit figuur 1.

Beschikt men eenmaal over een model voor de covariantiestructuur van het stochastische model dan kan via het doorrekenen van het bestaande meetnet en eventueel nieuw op te zetten meetnetten een vrij objectief beeld worden verkregen van de informatie die uit grondwaterstandsmetingen in de toekomst kan worden verkregen.

7 AANBEVELING

De orde van grootte van de interpolatiefout die men verkrijgt bij het interpoleren van grondwaterstanden in de ruimte met behulp van kriging varieert in Nederland tussen de 30 cm en 2 m, afhankelijk van de geohydrologische opbouw van de bodem. Het verdient aanbeveling om na te gaan in hoeverre de interpolatienauwkeurigheid kan worden verhoogd. Daartoe zijn 2 mogelijkheden:

- gebruik een methode die meer geënt is op de geohydrologie
(bijvoorbeeld het Kalmanfilter of deterministische modellen)
- blijf puur statistisch en maak gebruik van informatie in de tijd
(bijvoorbeeld via co-kriging).

Vanuit wetenschappelijk oogpunt bezien, verdient de eerste mogelijkheid de voorkeur. Een puur statistische methode heeft echter als belangrijk voordeel dat bewerkingen op waarnemingen min of meer routinematig kunnen worden uitgevoerd mits goede programmatuur voorhanden is.

Tevens kan de interpolatiefout worden gekwantificeerd door middel van een standaardafwijking, hetgeen bij de eerste methode lang niet altijd mogelijk is.

LITERATUUR

- BARENDREGT, L.G., 1983. Maximum-likelihood schatting van de gegeneraliseerde covariantie, in: Enkele kanttekeningen bij de stochastische interpolatiemethode "Kriging". IWIS-rapport nr. A 83 ST 72 42.
- DELFINER, P., 1975. Linear estimation of non-stationary data, in Advanced Geostatistics in the Mining Industry, edited by M. Guarascio: 49-68. D. Reidel, Dordrecht.
- GEL'FAND, M. and VILENKIN, N.Y., 1967. Les Distributions, Vol. 4, Dunod, Paris.
- HUGHES, J.P. and LETTENMAIER, D.P., 1981. Data requirements for kriging: estimation and network design. Water Resour. Res. (17) 6: 1641-1650.
- KAFRITSAS, J. and BRAS, R.L., 1981. The practice of kriging, Tech. Rep. 263, Ralph M. Parsons Lab., Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- KITANIDIS, P.K., 1983. Statistical estimation of polynomial generalized covariance functions and hydrologic applications. Water Resour. Res., (19), 4: 909-921.
- MATHERON, G., 1973. The intrinsic random functions and its applications, Advan. Appl. Probab., 5: 439-468.
- WITTER, J.V., 1984. Heterogeneity of Dutch rainfall. Proefschrift van de Landbouwhogeschool Wageningen.

GEBRUIK VAN REGRESSIEMETHODEN VOOR HET BEPALEN VAN DE NAUWKEURIGHEID IN HET OPPERVLAKTEWATER MEETNET

ir. J.W. van der Made

1 Wat is nauwkeurigheid?

De waterstandscijfers, die door een stelsel van peilmeetstations (meetnet) worden geproduceerd, worden geacht een zo goed mogelijke weergave van de opgetreden waterstanden te geven. Een exacte weergave is echter onmogelijk. Zelfs al zouden alle oorzaken, die de waterstand beïnvloeden gelijk blijven, dan nog zullen de uitkomsten een zekere spreiding vertonen. De nauwkeurigheid is beter naarmate de spreiding kleiner is en daarmee het informatiegehalte groter. Men stelt het informatiegehalte vaak voor als een grootte, omgekeerd evenredig met de variantie in de mogelijke uitkomsten.

De wortel uit de gemiddelde kwadratische fout (rmse) *) is een belangrijk gegeven voor de waardering der uitkomsten. In feite is het logischer te spreken van de onnauwkeurigheid dan van de nauwkeurigheid, omdat de onnauwkeurigheid toeneemt met de standaardafwijking. Men kan zelfs de onnauwkeurigheid definiëren als de rmse zelf. De rmse is opgebouwd uit de standaardafwijking en de gemiddelde (stelselmatige) afwijking. De standaardafwijking zou men kunnen verkleinen door het aantal metingen op te voeren, aannemende dat de uitwendige omstandigheden gelijk blijven.

Een andere zaak vormt de betrouwbaarheid van de meetuitkomsten. Deze hangt samen met stelselmatige afwijkingen, in tegenstelling tot de toevallige afwijkingen, die de nauwkeurigheid beïnvloeden. Stelselmatige afwijkingen kan men niet terugdringen door het aantal metingen op te voeren. Alleen door het betrachten van een grote zorgvuldigheid bij het doen van de waarnemingen en het uitwerken daarvan kan men de stelselmatige afwijkingen bestrijden.

In fig. 1 is de invloed van toevallige (stochastische) en stelselmatige afwijkingen gedemonstreerd.

*) rmse = root mean squared error

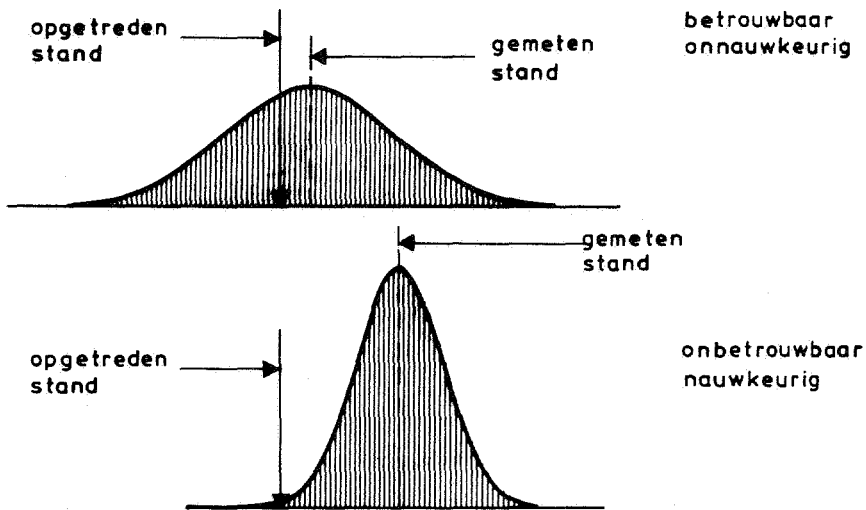


Fig.1 Toevallige en stelselmatige afwijkingen

2 Waarvan willen we de nauwkeurigheid weten?

Om de waterstaatkundige toestand te kunnen beoordelen is het nodig een inzicht te hebben hoe "juist" de door het meetnet geleverde cijfers zijn. Dit heeft betrekking op:

- de standen ter plaatse van de peilmeetstations.
- de standen op niet bemeten plaatsen.

De juistheid van de cijfers van de standen aan de peilmeetstations wordt alleen beïnvloed door de metingen en de daarop volgende bewerkingen. Hierop wordt later teruggekomen.

Op niet bemeten plaatsen, dat wil zeggen in beginsel overal langs de trajecten tussen de meetstations, kunnen de waterstanden worden afgeleid door interpolatie. Hiervoor kunnen allerlei methoden worden gebruikt, eenvoudige en ingewikkelde. Genoemd worden:

- rechtlijnige interpolatie
- hogere graads interpolatie
- deelpolynomen

- optimale interpolatie
- kriging
- fysische methoden

Al deze methoden zijn gebaseerd op bepaalde aannamen. Op grond hiervan wordt voor een tussen de stations liggend punt een stand afgeleid. Het is wenselijk de uitkomsten op een bepaald aantal punten te toetsen aan aanvullende metingen. Dit heeft er toe geleid dat er in het meetnet van de Rijkswaterstaat naast het stelsel van kernmeetstations een stelsel van aanvullende stations is ingericht, c.q. ontworpen. Door de meetuitkomsten van een aanvullend station te vergelijken met uit een interpolatie verkregen waarden kan men een indruk krijgen van de nauwkeurigheid daarvan. De verschillen tussen de gemeten berekende waarden worden beïnvloed door 3 soorten fouten:

- 1) de fouten veroorzaakt door afwijkingen van het interpolatiemodel ten opzichte van de werkelijkheid (modelfouten).
- 2) de voortgeplante meetfouten in de standen aan de kernmeetstations.
- 3) de meetfouten in de standen aan het aanvullende station.

Voorbeeld

Tussen twee stations wordt geïnterpoleerd. Als verloop van de correlatiecoëfficiënt is een Gauss kromme aangenomen, volgens fig. 2.

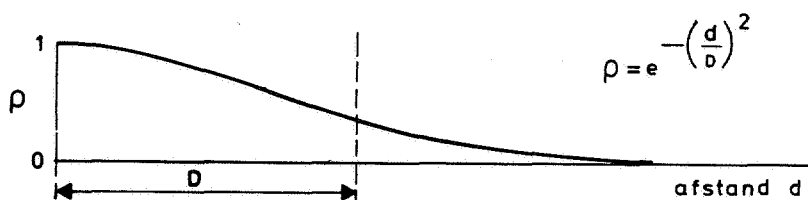


Fig. 2 Toegepast verloop correlatie coefficient ρ

In fig. 3 ziet men achtereenvolgens het verloop van de voortgeplante meetfouten (kromme 1), van deze fouten, vermeerderd met de modelfouten (kromme 2) en tenslotte van de totale verschilfouten indien ter plaatse metingen zouden zijn uitgevoerd (kromme 3). Kromme 2 geeft in feite de standaardafwijking van de geïnterpoleerde waarden $\sigma(y)$, kromme 3 die van de verschillen tussen de geïnterpoleerde en de gemeten waarden $\sigma(\Delta y)$.

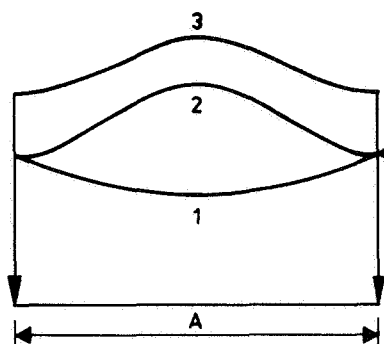


Fig. 3

standaard
meetafwijking
 ϵ

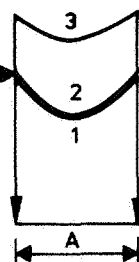


Fig. 4

Verloop van de standaardafwijking bij verschillende stationsafstanden

- 1 voortgeplante standaardafwijking meetpunten
- 2 standaardafwijking berekende waarde $\sigma(y)$
- 3 standaardafwijking gemeten-berekende waarde $\sigma(\Delta y)$

Wanneer de afstand A afneemt daalt de waarde, gegeven door kromme 2, vanwege de sterkere correlatie, en daarmee ook de waarde voorgesteld door kromme 3. Bij een bepaalde afstand A is de topwaarde van kromme 2 halverwege het traject gelijk aan de waarde aan de uiteinden bij de meetstations. Deze oplossing is in veel gevallen aan te bevelen omdat dan nergens de standaard meetafwijking overschreden wordt, terwijl op de plaatsen waar de standaardafwijking kleiner is, deze verschillen zo klein mogelijk zijn (fig. 5).

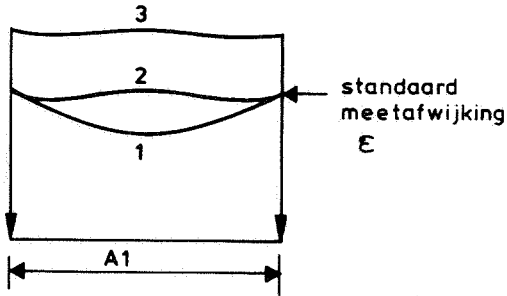


Fig. 5 Gelijkmatig verloop standaardafwijking

In fig. 6 is de standaardafwijking halverwege het traject A, volgende uit de voortgeplante meetfouten en de modelfouten uitgezet tegen de afstand.

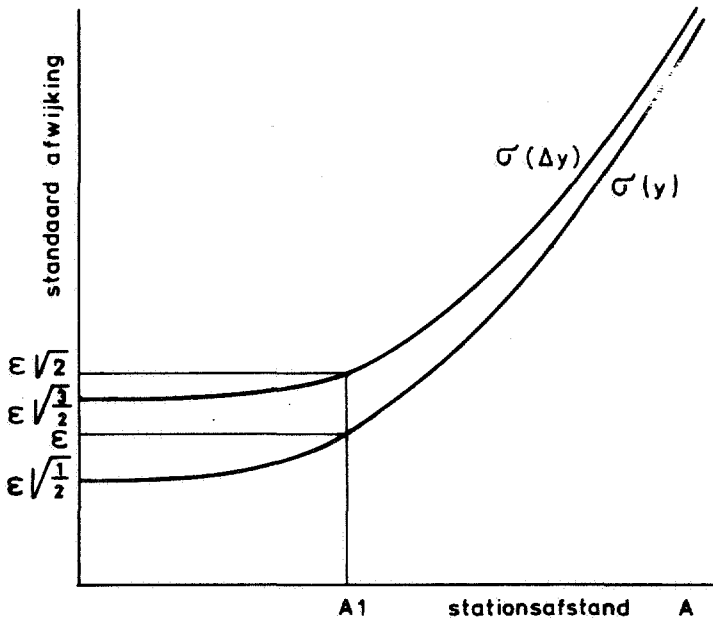


Fig. 6 Verband tussen standaardafwijking halverwege en stationsafstand

Ook de standaardafwijking van de verschillen is in fig. 6 gegeven.

Uit de fig. volgt de afstand waarbij $\sigma(y) = \epsilon$. Dit is dezelfde afstand waarbij $\sigma(\Delta y) = \epsilon/\sqrt{2}$.

3 Waarom willen we de nauwkeurigheid weten?

Wat betreft de meetnauwkeurigheid gaat het uiteraard in eerste instantie om de beoordeling van de kwaliteit van de metingen.

Daarnaast kan de meetnauwkeurigheid, of beter, de standaard meetafwijking dienen als ontwerpcriterium voor een meetnet. Zoals in het voorgaande is besproken is het mogelijk een meetnet zodanig te dimensioneren dat de standaard meetafwijking overal zo goed mogelijk benaderd wordt. In dat geval is een grote efficiency van het meetnet bereikt.

Voor de tussenliggende punten geeft de grootte van de standaardafwijking ook een waardeschatting van de geleverde gegevens. Een ideale toestand zou bestaan als het mogelijk zou zijn de grootte van de standaardafwijking uit te drukken in geld. In feite vormt de grootte van de standaardafwijking een economische verliespost. Dit kan bijv. een rol spelen bij het afladen van schepen.

Daartegen moet men dan stellen de stationsafstand. Hoe groter deze is, hoe minder stations, dus hoe goedkoper het meetnet, maar ook, hoe groter de standaardafwijking, dus, hoe groter het informatieverlies.

Indien voor alle factoren een waardering in geld mogelijk zou zijn zou men op grond hiervan een economische optimale stationsafstand kunnen bepalen (zie fig. 7). Voor de kosten van het meetnet is dit nog wel enigszins mogelijk, voor de kosten van het informatieverlies nauwelijks.

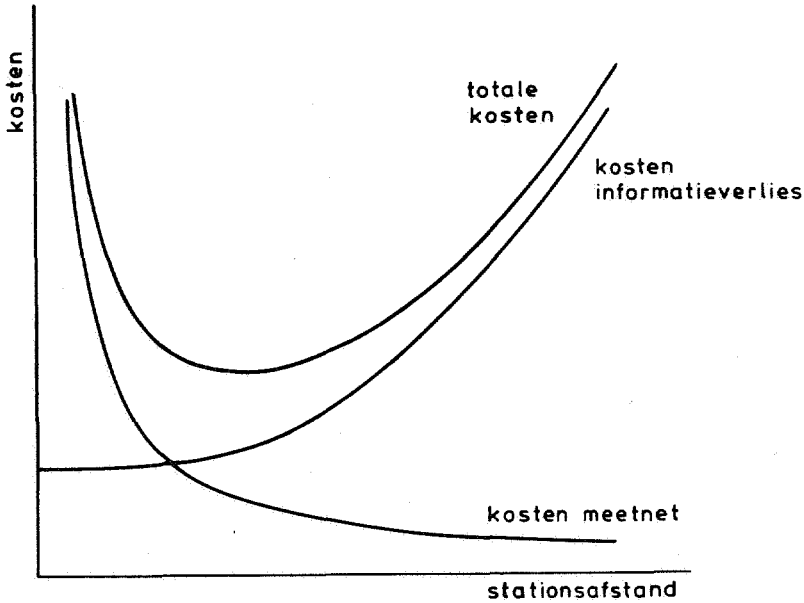


Fig. 7 Kostenelementen als functie van de stationsafstand

Daarom behelpt men zich vaak met het gebruik van een bepaalde waarde van de standaardafwijking als ontwerpcriterium. In de meetnetliteratuur duidt men dit vaak aan als surrogaat criterium.

4 Wat beïnvloedt de meetnauwkeurigheid?

Onder de standaard meetafwijking kan men verstaan de standaardafwijking van de geproduceerde meetuitkomsten ten opzichte van de "werkelijke" stand, aannemende dat er geen systematische fout optreedt. Maar wat is de werkelijke stand? Het water, zoals dit in de natuur optreedt vertoont een zeer ingewikkeld patroon dat ons maar ten dele interesseert. Iedere storing die optreedt, zoals windgolven, voorbijvarende schepen, zelfs regenval of een in het water gegooid steen beïnvloeden de werkelijke stand. In feite is de werkelijke stand voortdurend zowel naar tijd als naar plaats aan verandering onderhevig.

Wat men wil weten is een stand die representatief is voor een zeker tijdsinterval Δt en een gebiedsinterval ΔF . Men zal er naar streven de niet ter zake doende storingen er uit weg te werken (filteren).

Alvorens dit te kunnen doen zal men de optredende waterstanden op een of ander medium hebben vastgelegd. In deze fase vinden er al verschillende veranderingen plaats, die deels zelf uit filteringen bestaan, waardoor een aantal niet interessante storingen reeds is verdwenen. Aan de andere kant kunnen er verschillende fouten insluipen die de afwijkingen kunnen vergroten. Te denken valt aan:

- fouten ten gevolge van de hydraulische omstandigheden rondom het station (opstuwingen, neren, dwarsstromingen)
- fouten ten gevolge van de constructie van het bouwwerk (inlaat, toevoerbuis, peilkelder)
- fouten veroorzaakt door het instrument
- invloed van dichtheidsverschillen tussen het water in de peilkelder en buiten
- nulpuntsfouten
- fouten ingeslopen bij het waarnemen.

Daarna komt de bewerkingsfase. Wat er nog aan oninteressante verschijnselen aanwezig is, zal men verwijderen. Ook dit kan men bijv. bereiken door filteren, visueel of door berekening, al dan niet automatisch. Bewegingen met een korte periode verwijdt men, die met een lange periode handhaaft men juist. Bij welke periode of frequentie men de grens legt, is afhankelijk van het doel. Ook hierbij is dus geen ondubbelzinnigheid.

Wat uiteindelijk als waterstand wordt vastgesteld verschilt dus (deels gewild, deels ongewild) in belangrijke mate van de oorspronkelijke waterstanden.

De meetafwijking zou gedefinieerd kunnen worden als het verschil tussen de uiteindelijk vastgestelde waarde en de volgens bepaalde maatstaven representatief gestelde waarde voor een bepaald tijdsinterval en een bepaald gebied.

5 Hoe bepalen we de meetnauwkeurigheid?

In beginsel kunnen we de meetnauwkeurigheid op drie manieren benaderen. Zuiver bepalen is niet mogelijk, omdat de hiervoor genoemde representatieve stand in werkelijkheid niet bekend is en zelfs niet bestaat.

De drie genoemde manieren zijn:

- 1) door vergelijking van metingen aan één station op verschillende tijden. Men maakt hierbij gebruik van autocorrelatie.
- 2) door vergelijking van metingen aan twee zeer nabij elkaar gelegen stations en wel zodanig nabij, dat het ene stati-

on binnen het representatieve gebied van het andere valt.

- 3) door vergelijking van metingen aan één station met metingen aan een reeks andere stations, gelegen op verschillende afstanden.

Geval 1

Hierbij speelt het correlogram, dat wil zeggen het verloop van de autocorrelatie-coëfficiënt een rol. Voorbeelden hiervan vindt men in fig. 8 (Lobith) en fig. 9 (Huibergat).

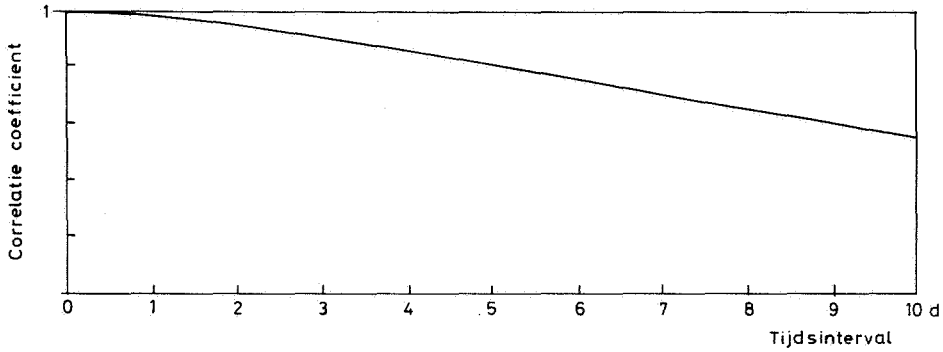


Fig. 8 Correlogram waterstanden Rijn te Lobith

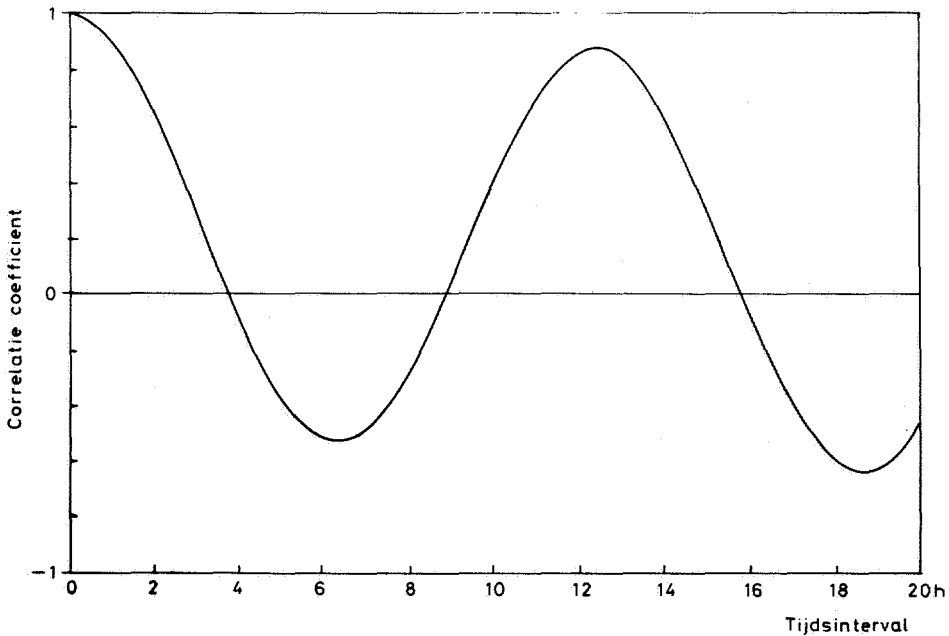


Fig. 9 Correlogram waterstanden Huibergat

Het gaat nu om een benadering van de correlatie-coëfficiënt ρ bij $t = 0$ waaruit, zoals zal worden aangetoond de standaard meetafwijking ε_y kan worden afgeleid. Om deze ρ_0 te bepalen is een detailfiguur nodig. Voor Lobith is deze gegeven in fig. 10.

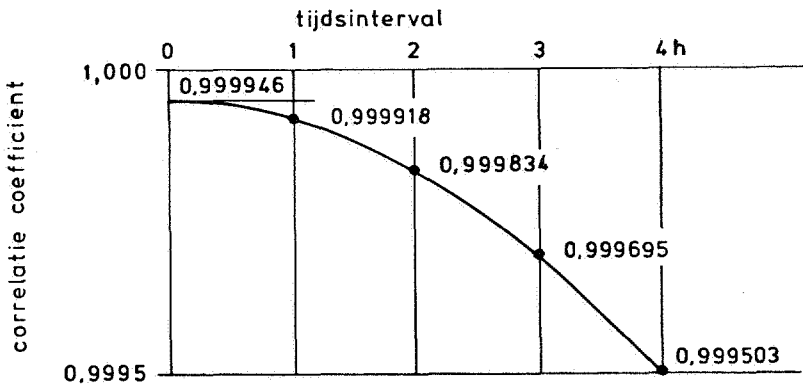


Fig. 10 Detail correlogram fig. 8

De correlatie coëfficiënt ρ_0 voor een gemeten gegeven "met zichzelf" volgt als men de varianties van de gemeten stand Vary van de representatieve stand $\text{Var } y$ beschouwt. Onder aanname dat de meetfout onafhankelijk is van de hoogte, geldt:

$$\text{Var } \underline{y} = \text{Var } y + \varepsilon_y^2 \quad (1)$$

waarin:

ε_y = de standaardmeetafwijking.

Verder wordt aangenomen dat de representatieve stand ondubbelzinnig vastligt. Dan geldt voor twee waarnemingen op hetzelfde tijdstip $\rho = 1$. De covariantie voor deze standen is:

$$\begin{aligned} \text{Cov } y &= \rho \sqrt{\text{Var } y \text{ Var } y} \\ &= \text{Var } y \end{aligned} \quad (2)$$

Voor de gemeten standen geldt daarentegen:

$$\text{Cov } \underline{y} = \rho_0 \text{ Var } \underline{y} \quad (3)$$

Als de metingen, die de waarden $\underline{y}$ opleveren onderling onafhankelijk zijn blijft de covariantie onveranderd, zodat:

$$\text{Cov } y = \text{Cov } \underline{y} \quad (4)$$

Uit (1), (2), (3) en (4) volgt:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_y^2 &= \text{Var } \underline{y} - \text{Var } y \\
 &= \text{Var } \underline{y} - \text{Cov } y \\
 &= \text{Var } \underline{y} - \text{Cov } \underline{y} \\
 &= \text{Var } \underline{y} - \rho_0 \text{Var } \underline{y} \\
 &= \text{Var } \underline{y} (1 - \rho_0).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Voor het voorbeeld van Lobith wordt dit:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_y^2 &= (155)^2 (1 - 0,99946) = 1,297 \text{ cm}^2 \\
 \text{of } \epsilon_y &= 1,139 \text{ cm}.
 \end{aligned}$$

Als de meetfouten echter niet onafhankelijk zijn maar er blijkt een correlatiecoëfficiënt ρ_Δ tussen hen te bestaan dan geldt (4) niet langer, maar is de volgende betrekking van kracht:

$$\text{Cov } y + \rho_\Delta \epsilon_y^2 = \text{Cov } \underline{y} \tag{6}$$

In dat geval kan worden afgeleid:

$$\epsilon_y^2 = \frac{\text{Var } y}{1 - \rho_\Delta} (1 - \rho_0) \tag{7}$$

Voor bijv. $\rho_\Delta = 0,6$ volgt dan voor bovenstaand voorbeeld:

$$\epsilon_y^2 = \frac{(155)^2}{1 - 0,6} (1 - 0,99946) = 3,243 \text{ cm}^2$$

$$\text{of } \epsilon_y = 1,801 \text{ cm}.$$

Onderlinge correlatie tussen de meetfouten kan bijv. optreden als er een systematische afwijking aanwezig is. Vergelijking van de laatst gevonden standaard meetafwijking met die waarde die eerder gevonden is kan tot de gevolgtrekking leiden dat er een systematische afwijking ϵ_s is, die volgt uit:

$$(1,801)^2 = (1,139)^2 + \epsilon_s^2$$

zodat:

$$\epsilon_s = 1,395 \text{ cm}.$$

Genoemde afleiding van de standaard meetafwijking kan echter alleen worden toegepast als hetzij de correlatie coëfficiënt ρ_Δ of de systematische afwijking ϵ_s bekend is. Meestal is dit niet het geval. Men zal dan moeten proberen andere informatie te hulp te roepen.

Geval 2

Twee zeer nabij gelegen stations zal men slechts zeer zelden

vinden. Toch doen zich soms zulke gevallen voor, bijv. als een station vervangen moet worden, zoals bijv. in Lobith in 1983. Hier was een overlappingsperiode van 1 jaar aangehouden, waarbij beide stations in bedrijf bleven (15 augustus 1982...14 augustus 1983).

Beschouwt men de verschillen Δy tussen de aan beide stations gemeten standen dan kan men de volgende afleiding geven. Veronderstel dat de standaardmeetafwijking aan beide stations gelijk is en wel ϵ . Tussen de metingen geldt een correlatiecoëfficiënt R_{Δ} .

Nu volgt:

$$\Delta y = y_1 - y_2.$$

Dan is:

$$\begin{aligned} \text{Var } y &= \text{Var } y_1 + \text{Var } y_2 - 2 \text{Cov } y_1 y_2 \\ &= \text{Var } y_1 + \epsilon^2 + \text{Var } y_2 + \epsilon^2 - 2\{\text{Cov } y_1 y_2 + R_{\Delta} \epsilon^2\} \quad (8) \end{aligned}$$

Men mag veronderstellen:

$$\begin{aligned} \text{Var } y_1 &= \text{Var } y_2 = \text{Var } y & (9) \\ \text{en Cov } y_1 y_2 &= \rho \sqrt{\text{Var } y_1, \text{Var } y_2} = \rho \text{Var } y & (10) \end{aligned}$$

waarbij $\rho = 1$, zodat:

$$\text{Cov } y_1 y_2 = \text{Var } y \quad (11)$$

Ingevuld in (8) levert dit:

$$\text{Var } \Delta y = 2(1 - R_{\Delta}) \epsilon^2$$

of:

$$\epsilon^2 = \frac{\text{Var } \Delta y}{2(1 - R_{\Delta})} \quad (12)$$

Zijn de meetafwijkingen onafhankelijk van elkaar dan is $R_{\Delta} = 0$, zodat dan:

$$\epsilon^2 = \frac{1}{2} \text{Var } y \quad (13)$$

$$\text{of: } \epsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma(\Delta y) \quad (14)$$

Van genoemd jaar werd gevonden

$$\sigma(\Delta y) = 0,989 \text{ cm}$$

zodat, bij onafhankelijke meetafwijkingen:

$$\epsilon = 0,699 \text{ cm.}$$

Zijn de meetafwijkingen onderling afhankelijk, wat eigenlijk ook geldt als de gemiddelde waarde van $\Delta y \neq 0$ is, dan ontstaan grotere waarden voor ε . De waarden van ε genoemd in geval 1 bijv. komen overeen met de volgende correlatiecoëfficiënten R_{Δ} :

ε	R_{Δ}
1,139 cm	0,623
1,801 cm	0,849

Verder werd in genoemd jaar gevonden als gemiddeld verschil:

$$\overline{\Delta y} = 0,978 \text{ cm.}$$

Dit manifesteert zich als een correlatiecoëfficiënt

$$R_{\Delta} = 0,703$$

Hetgeen overeenkomt met:

$$\varepsilon = 1,269 \text{ cm.}$$

Geval 3

Men beschouwt nu het te onderzoeken station te midden van een reeks andere stations $A_1 \dots A_n$ langs een rivier en berekent de standaardafwijking $\sigma(\Delta y)$ indien de standen achtereenvolgens te $A_1 \dots A_n$ gegeven zijn. Voor Lobith is het verloop van de standaardafwijking weergegeven (zie fig. 11).

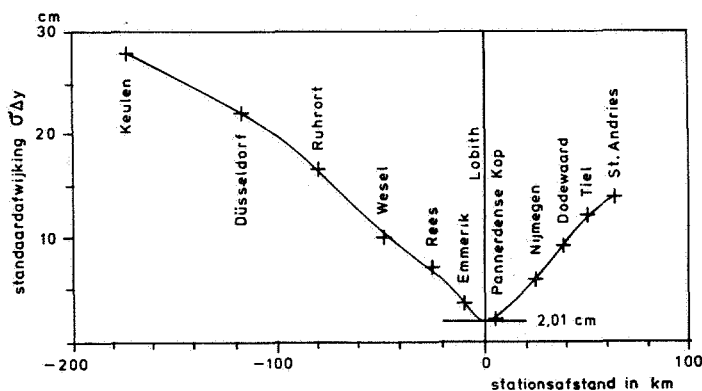


Fig. 11 Verloop standaardafwijking $\sigma(\Delta y)$ tussen Lobith en de aangegeven peilmeetstations.

Door de aldus gevonden punten construeert men een interpolatie kromme, zodanig dat deze ter plaatse van het onderzochte station een minimum vertoont. Daar ter plaatse komt de waar-

de overeen met die, welke gevonden zou worden bij twee nabij gelegen stations. Bij afwezigheid van correlatie tussen de meetfouten kan hier weer formule (14) geacht worden van toepassing te zijn, d.w.z.:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \sigma(y) \cdot \sqrt{2}.$$

Voor bovenstaand voorbeeld van Lobith werd gevonden:

$$\sigma(\Delta y) = 2,01 \text{ cm}$$

zodat: $\epsilon = 1,42 \text{ cm}.$

Indien deze waarde wordt aangehouden dan komt dit neer op de volgende waarden van de in het voorgaande genoemde correlatiecoëfficiënten:

$$\begin{aligned} \rho_{\Delta} &= 0,357 \\ R_{\Delta} &= 0,758. \end{aligned}$$

Zelfs als er volgens de nu toegepaste methode geen correlatie wordt verondersteld dan is er toch correlatie in tijd en ruimte aanwezig, waarschijnlijk deels een schijnrelatie ten gevolge van nulpuntsfouten.

Het verdient aanbeveling de bepaling van de standaardmeetafwijking langs verschillende wegen te benaderen.

Tenslotte volgt een overzicht van standaardmeetafwijkingen, gevonden aan verschillende stations

Olst	1,57 cm
Deventer	2,04 cm
Zutphen	2,41 cm
Dieren	1,79 cm
Düsseldorf	1,03 cm
Andernach	3,08 cm
Worms	3,5 cm
Breskens	2,0 cm
Vlissingen	2,5 cm
Terneuzen	2,5 cm
Hansweert	3,5 cm

Als werkwaarde is uiteindelijk gekozen: $\epsilon = 2,5 \text{ cm}.$

6 Hoe bepalen we de optimale stationsafstand?

Uit het voorgaande volgt (zie bijv. fig. 6), dat de stan-

daardafwijking van de geïnterpoleerde standen kan worden gegeven als een functie van de stationsafstand. Wanneer nu geëist wordt dat deze standaardafwijking niet groter mag worden dan een bepaalde, te voren vast te stellen waarde S , dan kan hieruit de toe te passen stationsafstand D worden afgeleid (fig. 12).

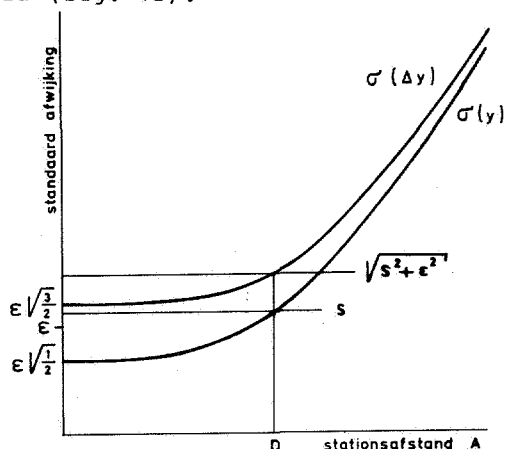


Fig. 12 Bepaling stationsafstand A voor nauwkeurigheidscriterium S

Hetzelfde resultaat vindt men als men niet met de standaardafwijking van de geïnterpoleerde standen werkt maar met die van de verschillen tussen (denkbeeldig) gemeten en geïnterpoleerde standen. Hiervoor geldt nl.:

$$\sigma^2(\Delta y) = \sigma^2(y) + \epsilon^2 \quad (15)$$

Het verloop is eveneens gegeven in fig. 12. De waarde ervan mag niet groter worden dan $\sqrt{(S^2 + \epsilon^2)}$.

De vraag is op welke waarde het criterium S gesteld moet worden. Het op grond van globale overwegingen vaststellen ervan leidt in feite tot een surrogaat criterium, hoewel men vaak niet anders kan. Voor het peilmeetnet in Nederland is de waarde van S op ϵ gesteld, dat wil zeggen gelijk aan de standaardmeetafwijking. Dit is gebeurd op grond van de overweging dat men tot dusver, indien ergens waterstandgegevens nodig waren, men aldaar metingen ging uitvoeren en men genoeg nam, en wel moest nemen, met de nauwkeurigheid van de metingen. Overigens leidt dit wel tot een efficiënt meetnet, zoals aangetoond in par. II.

Stelt men $\epsilon = 2,5$ cm en $S = \epsilon$, dan volgt uit (15) de eis:

$$\sigma(\Delta y) \leq \sqrt{\epsilon^2 + \epsilon^2} = \sqrt{2} \epsilon = 3,5 \text{ cm} \quad (16)$$

Een betere benadering zou men krijgen door een kosten-baten

analyse, resulterend in een resultaat als gegeven in fig. 7. De afstand die de kleinste kosten met zich brengt volgt hieruit gemakkelijk.

Ter toelichting volgt hieronder als voorbeeld de situatie van het peilmeetnet langs de Westerschelde, dat momenteel bestaat uit de stations Cadzand, Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath (fig. 13).

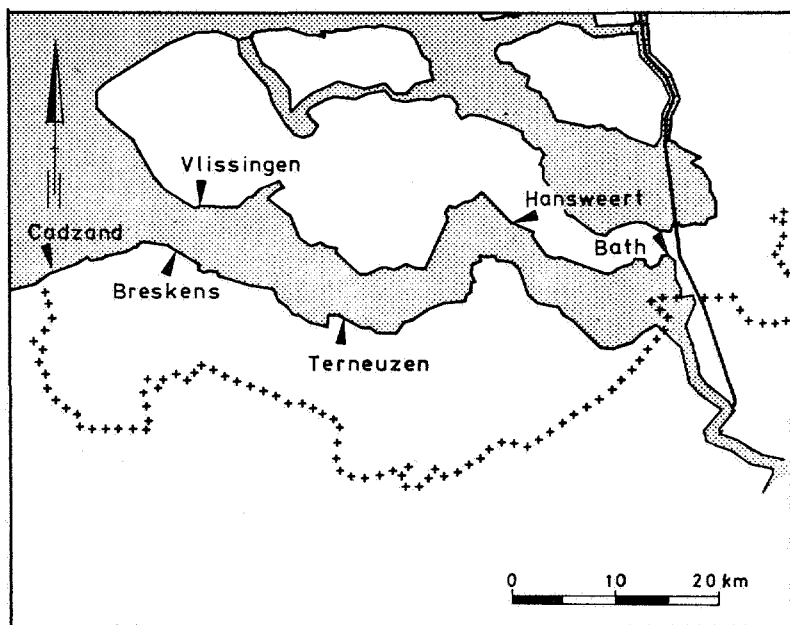


Fig. 13 peilmeetstations Westerschelde

Voor het station Terneuzen is de standaard afwijking $\sigma(\Delta y)$ berekend uit metingen te respectievelijk:

1. Vlissingen en Hansweert
2. Cadzand en Bath.

Behalve de simultaan met Terneuzen gemeten standen zijn ook standen in rekening gebracht, gemeten aan de zeewaartse stations, een interval Δt eerder en aan de landwaartse stations eenzelfde interval later. De betrekking, waaruit de stand Terneuzen wordt afgeleid, luidt dan bijv.:

$$y(t)_{\text{Terneuzen}} = A_1 y(t - \Delta t)_{\text{Vlissingen}} + A_2 y(t)_{\text{Vlissingen}} + B_2 y(t)_{\text{Hansweert}} + B_1 y(t + \Delta t)_{\text{Hansweert}} + \text{constante.} \quad (17)$$

De variantie van $(\Delta y)_{\text{Terneuzen}}$ volgt dan uit:

$$\text{Var}(\Delta y)_T = (1 - r^2) \text{Var } y_T \quad (18)$$

waarbij r = de meervoudige correlatiecoëfficiënt tussen de serie meetstations. Deze volgt uit:

$$r^2 = 1 - \frac{|R \text{ alle stations}|}{|R \text{ toetsingsstation}|} \quad (19)$$

De uitdrukkingen $|R...|$ zijn de determinanten van de correlatiematrices tussen de standen aan de meetstations. In de noemer betreft dat de standen op de genoemde tijdstippen aan één zeewaarts en één landwaarts gelegen station, in totaal 4 gegevens. Van de teller wordt hier nog de stand van het station Terneuzen aan toegevoegd. De tellerdeterminant is dus van de orde 5×5 , de noemerdeterminant van de orde 4×4 . Duiden we de peilmeetstations aan met hun beginletters, terwijl de index aangeeft of het een waarneming eerder, gelijktijdig of later dan die te Terneuzen aangeeft dan luidt de tellerdeterminant:

$$\begin{vmatrix} 1 & \rho(V-V_0) & \rho(V-H_0) & \rho(V-H_+) & \rho(V-T_0) \\ \rho(V_0V_-) & 1 & \rho(V_0H_0) & \rho(V_0H_+) & \rho(V_0T_0) \\ \rho(H_0V_-) & \rho(H_0V_0) & 1 & \rho(H_0H_+) & \rho(H_0T_0) \\ \rho(H_+V_-) & \rho(H_+V_0) & \rho(H_+H_0) & 1 & \rho(H_+T_0) \\ \rho(T_0V_-) & \rho(T_0V_0) & \rho(T_0H_0) & \rho(T_0H_+) & 1 \end{vmatrix} \quad (20)$$

De noemerdeterminant volgt hieruit door de rij en de kolom met de elementen met T_0 weg te laten.

Voor het invullen van de matrices moeten dus de afzonderlijke correlatiecoëfficiënten worden gebruikt. Deze werden afgeleid uit een correlatiestructuur, samengesteld uit de harmonische getijcomponenten, een met afstand en tijd toenemende algemene ruis en de voortplantingssnelheid van het getij. De hiervoor toegepaste formule luidt:

$$\begin{aligned} \rho(y; z, \Delta t) = & \frac{1}{\text{Vary}} \left(\text{Vary} - \epsilon^2 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n H_i^2 \right) \cdot e^{-\left\{ \frac{\Delta t - \frac{z}{c}}{o} \right\} + \left(\frac{z}{D} \right)^2} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n H_i^2 \cos \frac{2\pi \left(\Delta t - \frac{z}{c} \right)}{T_i} \end{aligned} \quad (21)$$

waarin:

$\rho(y; z, \Delta t)$ = de correlatie coefficient tussen gemeten waterstanden op twee plaatsen op een onderlinige afstand z en met een tijdsinterval Δt .

Vary = de variantie van de waterstanden aan het te onderzoeken punt, indien aldaar metingen verricht zouden worden. Deze waarden wordt verkregen door interpolatie van de overekomstige varianties aan de meetstations.

ϵ	=	de standaard meetafwijking
H_i	=	de amplitude van de i^e getij component.
n	=	het aantal beschouwde getijcomponenten
c	=	de voortplantingssnelheid van de getijgolf
T_0	=	een empirisch vastgestelde basistijd die de betrekking bepaalt tussen de grootte van de stochastische ruis en het tijdsinterval e.e.a.a. volgens een gaussische functie
D	=	een empirische vastgestelde basisafstand die de betrekking bepaalt tussen de grootte van de stochastische ruis en de afstand, eveneens volgens een gaussische functie
T_i	=	de periode van de i^e getij component.

De waarden T_0 en D werken aangepast aan over het jaar 1983 berekende standaardafwijkingen, die voor de verschillende gevallen zijn samengevat in de volgende tabel.

riviervak	afstand km	standaardafwijking $\sigma(\Delta y)$ (cm)				h
		alleen op tijd t	$\Delta t = 1 \text{ h}$	$\Delta t = 2 \text{ h}$	$\Delta t = 3$	
Cadzand-Bath*)	78,4	15,95	5,24	15,93	14,19	
Vliss.-Hansweert**)	42,0	5,70	5,60	4,53	5,45	

*) afstand Cadzand-Terneuzen = 37,1 km

**) afstand Vlissingen-Terneuzen = 20,5 km.

De parameters, voorkomende in de formule voor de correlatiestructuur werden hieraan aangepast zodanig dat de kwadraat-

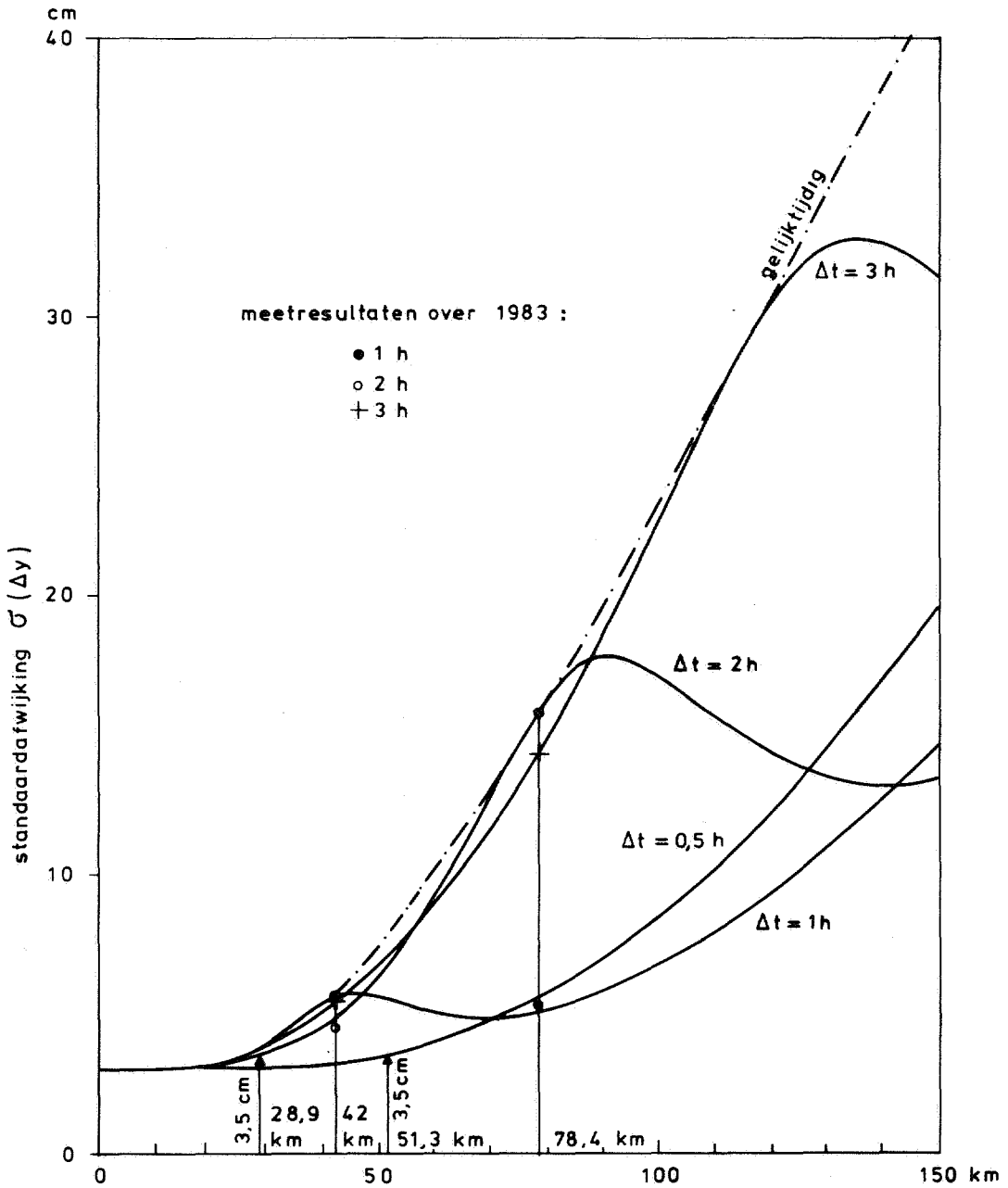


Fig. 14 Verloop standaardafwijking $\sigma \Delta y$ langs de Westerschelde bij tijdsintervallen van 0,5 uur

1 "

2 "

3 "

som van de verschillen tussen deze uitkomsten en de uit de formule volgende waarden minimaal was.

Het resultaat ziet men in fig. 14. Hierin is tevens de kromme voor $\sigma(\Delta y)$ aangegeven voor $\Delta t = 1/2$ uur. De krommen vertonen ieder een maximum, dat valt op een afstand waarbij de getijgolf het vak doorloopt. De correlatie tussen de standen aan de vakuiteinden is dan maximaal, hetgeen een ongunstig effect heeft op de nauwkeurigheid van de interpolatiestand halverwege. Bij een (ongeveer) dubbele vaklengte daarentegen is de correlatie tussen de eindpunten en het punt halverwege maximaal, maar tussen de eindpunten onderling kleiner. In feite wordt er dan een maximum aan informatie gewonnen, hetgeen de standaardafwijking zo klein mogelijk maakt.

Hieruit volgt dat het voordelig is een juiste combinatie van vaklengte en tijdsinterval te kiezen. Men ziet bijv. dat, onder inachtneming van de eis, geformuleerd in (16), bij de volgende vaklengten hieraan voldaan kan worden:

Δt	D
0,5 h	51,3 km
1 h	25 km
2 h	28,9 km
geen t	25 km

Het toepassen van een tijdsinterval van 1 h geeft dus geen beter resultaat dan het alleen gebruiken van gelijktijdige waarnemingen. Indien $\Delta t = 2$ h is het resultaat zelfs nog iets beter dan bij $\Delta t = 1$ h. Een duidelijk effect heeft men echter pas indien $\Delta t = 1/2$ h wordt toegepast.

Hieruit blijkt dat men bij het bepalen van de optimale stationsafstand ook het toe te passen tijdsinterval in acht moet nemen.

OPTIMALISATIE VAN BEMONSTERINGSFREKVENTIES BIJ WATERKWALITEITS ONDERZOEK

T. Schilperoort

Waterloopkundig Laboratorium

SAMENVATTING

Voor het optimaliseren van bemonsteringsfrekventies dienen relaties bekend te zijn tussen enerzijds de bemonsteringsfrekventie f en anderzijds een grootheid E , waarmee de effectiviteit van het meetnet in relatie tot de gedefinieerde meetdoelstelling gemeten kan worden.

Gesteld kan worden dat voor alle praktisch relevante meetdoelstellingen de relatie $E(f)$ wordt bepaald door drie parameters: de variabiliteit van het gemeten proces, uitgedrukt in de standaardafwijking σ , de tijdschaal T van het proces, en de meetduur T . In deze bijdrage zullen een aantal relaties $E(f)$ worden besproken, en het gebruik ervan in waterkwaliteits onderzoek worden geïllustreerd.

Tevens zal worden ingegaan op de mogelijkheid de meetnet effectiviteit bij gelijkblijvende meetinspanning te verhogen door bij de analyse van de meetgegevens gebruik te maken van in wiskundige modellen vastgelegde fysische kennis van het gemeten proces. Door op deze wijze modellen en metingen te combineren is het in principe mogelijk het optimalisatieprobleem integraal op te lossen: een simultane optimalisatie van meetlokaties, meetfrequenties en te meten variabelen.

1 INLEIDING

Evenals bij het vaststellen van een optimale ruimtelijke meetdichtheid speelt ook bij het optimaliseren van de temporele meetdichtheid (meetfrequentie) de

kovariantie-struktuur van het bemeten proces een essentiële rol. Dit is begrijpelijk want zowel in het plaats- als het tijddomein bepaalt deze kovariantie struktuur de hoeveelheid informatie welke in de verkregen meetdata is bevat.

Bij het kwantificeren van de relatie tussen "data" en "informatie" zijn een aantal statistische aspecten van belang. Deze worden in paragraaf 2 besproken. In paragraaf 3 komt aan de orde hoe deze aspecten tot uiting komen in verschillende optimalisatietechnieken, waarmee voor verschillende doelstellingen relaties kunnen worden gevonden tussen meetneteffektiviteit en bemonsteringsfrequentie.

Inzicht in de kovariantie struktuur is essentieel voor het optimaliseren van een meetnet. Dit inzicht kan worden verkregen op basis van fysische kennis en/of historische gegevens. Hierop wordt in paragraaf 4 nader ingegaan.

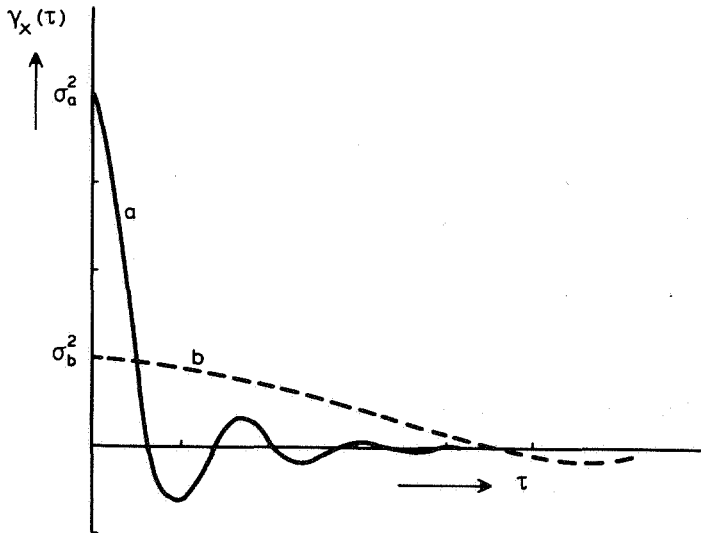
In paragraaf 5 tenslotte worden een tweetal voorbeelden behandeld waarin een aantal van de besproken aspecten aan de orde komt. Deze voorbeelden zijn ontleend aan de adviespraktijk van het Waterloopkundig Laboratorium met betrekking tot ontwerp en optimalisatie van meetnetten.

2 STATISTISCHE ASPEKTEN

Volgens het bemonsteringstheorema van Shannon is het mogelijk om een kontinu signaal te rekonstrueren uit diskrete signaal samples indien de bemonsterings afstand aan bepaalde eisen voldoet. Het komt er op neer dat geen informatie verlies t.g.v. het bemonsteren zal optreden indien het bemonsterings interval kleiner is dan de helft van de kleinste tijd- of afstandschalen van het bemonsterde proces. In de praktijk zijn zulke kleine intervallen echter niet haalbaar door de hiermee gepaard gaande hoge meetkosten. Men zal dan ook altijd te maken hebben met een zeker informatie verlies. Voor vele meetdoelstellingen is dit evenwel geen bezwaar omdat men zelden is geïnteresseerd in een zeer gedetailleerde rekonstruktie. De vraag is dan ook niet hoe informatieverlies voorkomen kan worden, maar hoeveel informatieverlies bij een zekere meetdoelstelling nog acceptabel is.

De hoeveelheid informatieverlies ten gevolge van bemonstering hangt in sterke mate af van de **tijd- en afstand schalen** van het proces. Deze schalen worden bepaald door variaties in randvoorwaarden van het bemeten systeem, en door variaties in de fysische karakteristieken van het systeem zelf. Deze fysisch bepaalde schalen worden wel de **intrinsieke schalen** van het systeem (van de processen) genoemd. De intrinsieke schalen worden weerspiegeld in de **korrelatie structuur** van de waarnemingen. Hieronder wordt verstaan de verzameling van alle mogelijke ruimtelijke en temporele auto- en kruiskorrelatiefuncties van de bemeten processen.

Een korrelatiefunctie $\rho_{xy}(\tau)$ geeft de korrelatie tussen twee variabelen x and y als functie van hun onderlinge tijd- of plaatsafstand τ . De korrelatiestructuur geeft dus inzicht in de tijd- en afstandsschalen waarover een proces een koherente samenhang met zichzelf en met andere processen vertoont. Hoe groter deze schalen, hoe groter de afstanden waarover significante korrelatie bestaat.



Figuur 1 Voorbeeld van een kovariantiefunctie van een proces met grote variabiliteit en een kleine korrelatieschaal (a), en van een proces met kleine variabiliteit en een grote korrelatieschaal (b)

Behalve de intrinsieke schalen heeft ook de **intrinsieke variabiliteit** van een

proces op een gefixeerde plaats of tijdstip belangrijke konsekwenties voor een meetnetontwerp. Deze variabiliteit wordt weerspiegeld in de **variantie** σ^2 van de waarnemingen.

De varianties en de korrelatie structuur bepalen samen de **kovariantie structuur** van de waarnemingen. Als voorbeeld geeft figuur 1 twee kovariantie functies waarvan de eerste (1^a) een grillig variërend proces karakteriseert met sterke fluktuaties over korte intervallen, en waarvan de tweede (1^b) korrespondeert met een glad verlopend proces met kleine fluktuaties en grote schalen.

In het algemeen kan gesteld worden dat de hoeveelheid informatie, bevat in één waarneming, wordt bepaald door **proceskarakteristieken** (kovariantie structuur) enerzijds en **meetkarakteristieken** (meetintervallen en meetduur) anderzijds. In het bijzonder geldt dat de informatie inhoud

- afneemt bij toenemende variabiliteit σ ;
- afneemt bij toenemende verhouding Γ/Δ van de dominante processchaal Γ en het meetinterval Δ ;
- toeneemt bij toenemende verhouding T/Γ van de meetduur T en Γ .

Het zal blijken dat voor veel meetdoelstellingen de meetnet effectiviteit E inderdaad wordt bepaald door de drie parameters σ , Γ/Δ en T/Γ . Dit betekent dat voor een gegeven proces (vaste σ en Γ) en vaste meetduur T de effectiviteit wordt bepaald door het meetinterval Δ , of meetfrequentie f . In de volgende paragraaf zullen enkele technieken worden besproken waarmee de relatie $E(f)$ (of $E(\Delta)$) is te bepalen.

3 EFFEKTIVITEIT VERSUS MEETFREKWENTIE

3.1 Doelstelling "gemiddelde bepaling"

Veronderstel dat een bemonsteringsfrequentie moet worden gekozen zodat de gemiddelde concentratie van een of andere waterkwaliteits variabele x op een zekere lokatie met een gespecificeerde nauwkeurigheid bepaald kan worden. Veronderstel verder dat de variantie σ_x^2 en de autokorrelatiefunctie $\rho_x(\tau)$ van deze variabele bekend zijn, en dat bij het meten geen meetfouten worden gemaakt (op deze aannamen wordt in paragraaf 4 teruggekomen).

Stel dat gedurende een periode T met een interval Δ monsters worden genomen. Dit resulteert in $N(\Delta, T)$ monsters $x(t_k)$ op tijdstippen $t_k = k \cdot \Delta$, $k = 1, \dots$

$N(\Delta, T)$, met $N(\Delta, T) = T/\Delta$.

Op basis van deze monsters kan een gemiddelde waarde worden berekend volgens

$$m_x(\Delta, T) = \frac{1}{N(\Delta, T)} \sum_{k=1}^{N(\Delta, T)} x(k\Delta) \quad (1)$$

Gezien de veronderstelde doelstelling is een geëigende effectiviteitsmaat de reciproke standaard afwijking van dit gemiddelde, σ_m . Dan geldt

$$E(\Delta, T) = \frac{1}{\sigma_m(\Delta, T)} = \frac{1}{\sigma_x} \sqrt{N^*(\Delta, T)} \quad (2)$$

Hierin geeft $N^*(\Delta, T)$ het **effectief aantal onafhankelijke waarnemingen** aan dat bevat is in N waarnemingen van een gekorreleerde tijdreeks. N^* kan beschouwd worden als het aantal vrijheidsgraden waarmee m_x is geschat.

Deze N^* hangt af van Δ en T, en van de autokorrelatiefunctie van het bemeten proces $x(t)$. Hiervoor geldt (Bayley en Hammersley, 1946)

$$N^*(\Delta, T) = N(\Delta, T) \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{N(\Delta, T)} \left(1 - \frac{i}{N(\Delta, T)} \right) \rho_x(i\Delta) \right\}^{-1} \quad (3)$$

Bij ongekorreleerde waarnemingen is $\rho_x(i\Delta) = 0$ voor $i \neq 0$, zodat dan $N^* = N$. Dit impliceert dat iedere waarneming een maximale hoeveelheid onafhankelijke informatie bevat. Dit treedt alleen op indien het bemonsteringsinterval

Δ veel groter is dan de dominante tijdschaal van het proces, dus als

$\Gamma/\Delta \ll 1$. Bij gekorreleerde waarnemingen kan N^* aanzienlijk afwijken van N. Bij normale fysische processen zal in het algemeen gelden $N^* < N$; opeenvolgende waarnemingen bevatten dan een zekere hoeveelheid **redundante** informatie. In het extreme geval van volledig gekorreleerde data is $\rho_x(i\Delta) = 1$ voor alle i, en wordt $N^* = 1$.

Het bovenstaande is geïllustreerd in figuur 2 waarin N^* wordt gegeven als functie van N in het geval de korrelatie functie $\rho_x(\tau)$ voldoet aan

$$\rho_x(\tau) = \exp(-\tau/\Gamma)$$

Dit impliceert dat

$$\rho_x(i\Delta) = (\rho_1^m)^i \quad (4)$$

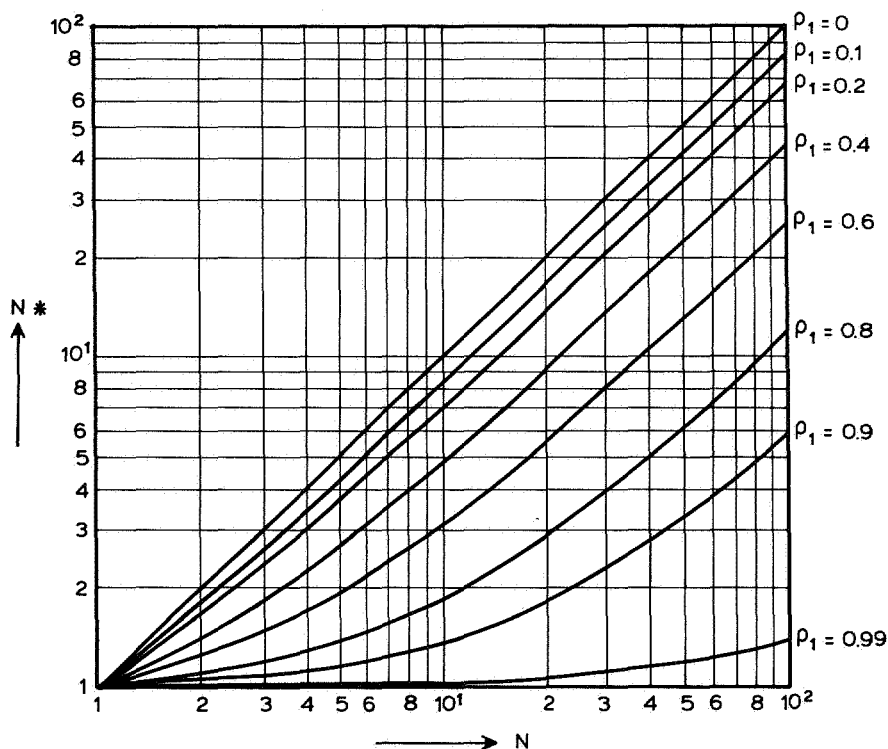
met

$$\rho_1 = \exp(-\Delta_1/\Gamma) \quad (5)$$

Hierin stelt ρ_1 de korrelatiecoëfficiënt voor tussen twee opeenvolgende waarnemingen met een onderling tijdsverschil van één tijdseenheid Δ_1 , en is

$$\Delta = m \cdot \Delta_1.$$

Duidelijk is te konstaten dat N^* afneemt naarmate Γ , en dus ρ_1 , toeneemt.



Figuur 2 Het effectief aantal onafhankelijke waarnemingen N^* in een exponentieel gekorreleerde tijdreeks als functie van het aantal waarnemingen N voor verschillende korrelatiecoëfficiënten ρ_1

De uitdrukking tussen accoladen in formule (3) is vergelijkbaar met de **integraalschaal** zoals gebruikt wordt ter karakterisering van de grootschalige wervels in een turbulente stroming. Hieruit blijkt dat het aantal **vrijheidsgraden** waarmee $m_x(\Delta, T)$ wordt geschat niet afhangt van het aantal data dat in de meetduur T wordt verkregen, maar van het **aantal dominante processschalen dat in de meetduur "past"**.

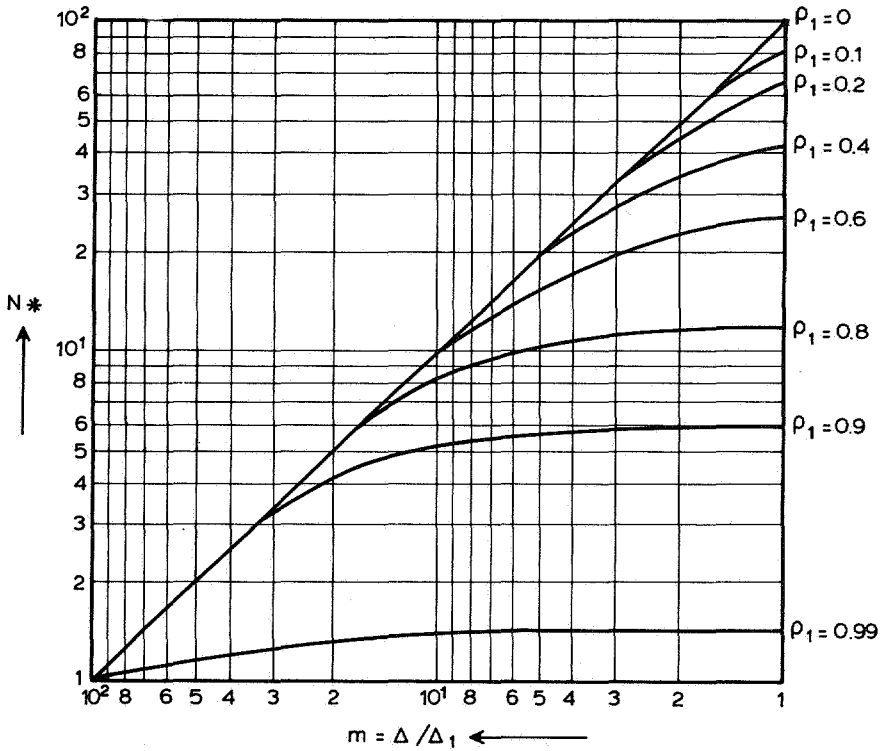
Bij gegeven T heeft $N^*(\Delta, T)$ dan ook een **boven grens** $N_{\max}^*(T)$ die wordt bepaald door de verhouding T/Γ . Deze bovengrens is **onafhankelijk** van Δ , wat als volgt verklaard kan worden. Bij een gefixeerde meetduur zal een verkleining van het meetinterval Δ (kleinere m) resulteren in meer metingen (grotere N), maar tevens in een grotere onderlinge korrelatie van deze metingen (grotere ρ_1^m). Dit resulteert dus in zowel een verhogend (via N) als een verlagend (via ρ_1^m) effect op N^* , welke elkaar uiteindelijk compenseren. Dit is geïllustreerd in figuur 3 waarin N^* is uitgezet als functie van $m = \Delta/\Delta_1$ voor een gefixeerde meetduur $T = 100 \Delta_1$ en voor verschillende ρ_1 .

Deze curves kunnen eenvoudig worden gekonstrueerd op basis van figuur 2.

Neem als voorbeeld $\rho_1 = 0.9$. Dan geldt voor $\Delta = \Delta_1$ ($m = 1$) dat we 100 waarnemingen hebben met een onderlinge korrelatie van 0.9. Volgens figuur 2 is dan $N^* = 5.8$. Bij verdubbeling van Δ hebben we 50 waarnemingen, maar nu met een onderlinge korrelatie van $\rho_1^2 = 0.81$, zodat dan $N^* = 5.7$, enz.

Uit figuur 3 blijkt dus dat bij verkleining van Δ een verzadigend effect op $N^*(\Delta)$ optreedt, hetgeen aangeeft dat voorbij een zekere drempelwaarde Δ_c een verdere verkleining van Δ resulteert in een marginale toename van N^* , en dus in verspilling van geld. Daar deze drempelwaarde groter wordt voor processen met grotere tijdschaal kan voor die processen het bemonsteringsinterval vaak worden vergroot **zonder verlies van effectiviteit**.

Tevens geldt echter dat de bovengrens $N_{\max}^*(T)$ afneemt naarmate de tijdschaal Γ toeneemt. De hierdoor bepaalde **maximaal haalbare effectiviteit** $E_{\max}(T)$ kan dan ook, vooral bij processen met grote tijdschaal welke over relatief korte perioden worden bemonsterd, lager zijn dan de meetdoelstelling vereist. Op grond van het voorgaande zal duidelijk zijn dat de doelstelling dan niet gerealiseerd kan worden door frekwenter te gaan meten; zelfs **kontinu meten** heeft dan geen zin! In dat geval zullen de metingen over een langere periode moeten worden uitgevoerd.



Figuur 3 Het effectief aantal onafhankelijke waarnemingen N^* in een exponentieel gekorreleerde tijdreeks als functie van het genormaliseerde bemonsteringsinterval m voor verschillende correlatiecoëfficiënten ρ_1 bij vaste meetduur T

Indien het niet mogelijk lijkt om met een geoptimaliseerd meetprogramma de gewenste effectiviteit te halen is men vaak geneigd om dan de meetdoelstellingen maar te herzien en genoeg te nemen met het bereikte effectiviteitsniveau. In een aantal situaties is het echter mogelijk om bij gelijkblijvende meetinspanning de meetnet effectiviteit te verhogen door bij de verwerking van de meetgegevens (dus de vertaling van data tot informatie) gebruik te maken van fysische kennis omtrent het gemeten verschijnsel. Hierop wordt in paragraaf 4 teruggekomen.

Samenvattend kan worden gesteld dat voor de meetdoelstelling "gemiddelde bepaling" de uitdrukking (2) een relatie geeft tussen effectiviteitsniveau E en bemonsteringsinterval Δ , indien meetduur T en proceseigenschappen $(\sigma_x, \gamma_x(\tau))$ gegeven zijn. Gebleken is dat een sterke korrelatie tussen waarnemingen enerzijds lage bemonsteringsfrequenties toestaat, maar anderzijds het maximaal haalbare effectiviteitsniveau beperkt.

3.2 Doelstelling "trenddetektie"

Aangezien een trend in een proces in feite een (langzame) variatie van het proces gemiddelde is, komt trenddetektie neer op het testen van verschillen in gemiddelde waarden. Hierbij speelt de verhouding tussen de **systematische** verandering (Tr) en de **toevallige** verandering (σ_m) van de gemiddelde waarde een belangrijke rol.

Door Lettenmaier is aangetoond (Lettenmaier, 1976) dat, bij een meetduur T en meetinterval Δ , de **kans** dat een trend met grootte Tr wordt gedetekteerd in waarnemingen van een proces met spreiding σ_x , wordt bepaald door de grootte

$$Q(\Delta, T, Tr) = \frac{1}{c} \frac{Tr}{\sigma_x} \sqrt{N^*(\Delta, T)} \quad (6)$$

Hierin is c een van de trendvorm afhankelijke konstante. Vergelijking met formule (2) laat zien dat Q inderdaad evenredig is met Tr/σ_m .

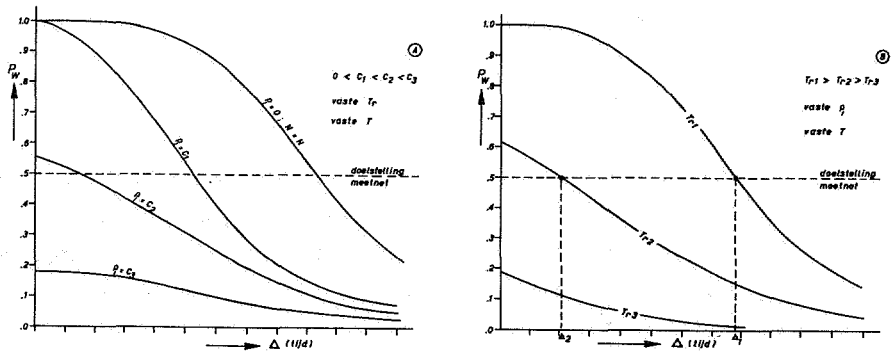
Gezien de doelstelling is de **detektietskans** p_w een zeer geschikte effectiviteitsmaat E . De relatie tussen E en Δ wordt dan gegeven door

$$E(\Delta; T, Tr) = p_w(\Delta; T, Tr) = \Phi \left\{ Q(\Delta, T, Tr) - \xi \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right\} \quad (7)$$

waarbij Φ de standaard normale verdeling weergeeft, en $\xi \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ het percentiel-punt, behorend bij een $\frac{\alpha}{2}$ - overschrijdingskans.

In figuur 4 is de detektietskans p_w (dus de effectiviteit) kwalitatief geschetst als functie van ρ_1 en Tr voor vaste T , waarbij ρ_1 weer direkt wordt bepaald door de korrelatieschaal van het bemeeten proces (zie uitdrukking (5)). Duidelijk is te zien dat een (hier willekeurig) gespecificeerde meetdoelstelling, uitgedrukt in een zekere detektietskans, moeilijker te

realiseren is en kleinere bemonsteringsintervallen vraagt naarmate de processchaal (ρ_1) toeneemt en/of de te detekteren trend (Tr) afneemt.



Figuur 4 De detektiekans voor trends bij vaste meetduur T als (kwalitatieve) functie van
a de korrelatiecoëfficiënt ρ_1 bij vaste trendgrootte Tr ;
b de trendgrootte Tr bij vaste korrelatiecoëfficiënt ρ_1

3.3 Doelstelling "detektie van normoverschrijding"

Het detekteren van normoverschrijdingen kan, vooral bij waterkwaliteitsmetnetten, een belangrijke doelstelling zijn. Als geschikte effectiviteitsmaat hiervoor kan worden gedefinieerd

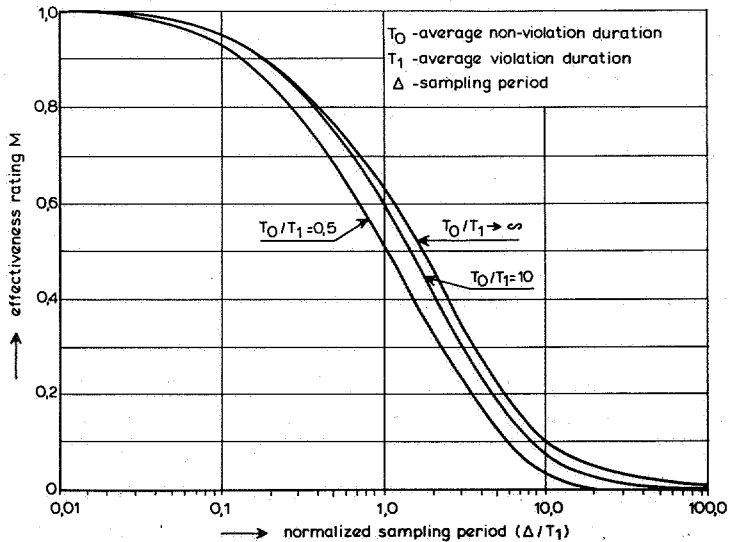
$$E(\Delta) = \frac{\text{verwacht aantal gedetekteerde overschrijdingen}}{\text{verwacht aantal opgetreden overschrijdingen}}$$

Dikwijls kunnen normoverschrijdingen worden beschouwd als over- of onderschrijdingen van een gespecificeerd concentratie niveau. In dat geval kan $E(\Delta)$ worden benaderd door (Beckers et al, 1972)

$$E(\Delta) \approx \frac{T_0}{\Delta} \left\{ \frac{\exp(-\Delta/T_0) - \exp(-\Delta/T_1)}{(T_0/T_1 - 1)} \right\} \quad (8)$$

Hierin stellen T_0 en T_1 de gemiddelde periode voor waarin de norm niet resp. wel wordt overschreden.

De tijdschalen T_0 en T_1 hangen, behalve van de korrelatieschalen van het bemeten proces, uiteraard ook af van de hoogte van de norm t.o.v. het gemiddelde procesniveau. Deze T_0 en T_1 worden in de praktijk veelal afgeschat op basis van historisch gegevensmateriaal. In een aantal gevallen kunnen T_0 en T_1 ook worden berekend indien de proceskorrelatiestructuur en de norm bekend zijn. In figuur 5 is $E(\Delta)$ geschetst als functie van Δ voor verschillende waarden van T_0/T_1 .



Figuur 5 De detektiekans voor normoverschrijdingen als functie van de tijdschalen T_0 en T_1 en het bemonsteringsinterval Δ (overgenomen uit Beckers et al, 1972)

3.4 Doelstelling "toestandsrekonstruktie"

Indien de doelstelling is gespecificeerd als het rekonstrueren van de waterkwaliteitstoestand over een continue tijd op basis van diskrete, met meetruis behepte waarnemingen, is een goede effectiviteitsmaat de gemiddelde kwadratische fout van de gerekonstrueerde (geïnterpoleerde) gegevens. In feite is dit vergelijkbaar met een ruimtelijke interpolatie in één dimensie. De te

hanteren techniek is dan ook nagenoeg gelijk aan de Kriging interpolatietechniek, welke veel wordt gebruikt bij de optimalisatie van bemonsteringslocaties. Aangezien deze techniek elders in dit rapport uitvoerig besproken wordt, zal er hier niet verder op worden ingegaan.

Eén opmerking dient echter gemaakt te worden. In de paragrafen 3.1. en 3.2 zijn doelstellingen besproken waarbij het schatten van gemiddelde waarden centraal staat. Zo'n gemiddelde waarde is een karakteristiek van een stochastisch **proces**, en is dus een **deterministische** grootheid.

Daar maar één realisatie van het proces wordt waargenomen, wordt bij vaste meetduur T de meetnet effectiviteit lager naarmate de korrelatieschaal r groter wordt. Bij de doelstelling "toestandsrekonstruktie" daarentegen gaat het niet om een karakteristiek van het stochastisch proces, maar om de interpolatie van één **specifieke realisatie** van dat proces. In dat geval zal de meetnet effectiviteit juist groter worden naarmate de korrelatieschaal r toeneemt.

4 VOORKENNIS VAN DE KOVARIANTIE STRUKTUUR

Elke techniek voor meetnetontwerp of optimalisatie maakt op een of andere manier gebruik van de kovariantiestruktuur van de te meten processen. In het voorgaande is steeds aangenomen dat deze structuur bekend is.

In de praktijk is dit echter niet het geval, en moet deze kennis worden verkregen op basis van historisch gegevensmateriaal en/of fysisch inzicht.

4.1 Structuur bepaling op basis van historische gegevens

Indien kovariantiefuncties uit meetdata geschat worden, dient men met de volgende aspecten rekening te houden:

- meetfouten

Door instrumentatie- en waarnemingsfouten ontstaan meetfouten welke tot uiting komen in een extra variabiliteit van de meetdata (**extrinsieke** variabiliteit). De kovariantiestruktuur van de meetdata wordt dan ook door meetfouten beïnvloed.

In het algemeen kunnen meetfouten beschouwd worden als onderling onafhankelijke foutbronnen, zodat de korrelatieschalen niet worden aangetast.

Veronderstel dat de waarnemingen $y(k\Delta)$ van het proces x zijn verstoord door meetruis $v(k\Delta)$, dus

$$y(k\Delta) = x(k\Delta) + v(k\Delta) \quad (9)$$

Indien de meetfouten onafhankelijk zijn van het proces x , dan geldt voor de kovariantiefunctie van de waarnemingen

$$\gamma_y(k\Delta) = \begin{cases} \sigma_x^2 + \sigma_v^2 & k = 0 \\ \sigma_x^2 \rho_x(k\Delta) & k \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

en voor de korrelatiefunctie

$$\rho_y(k\Delta) = \frac{\gamma_y(k\Delta)}{\sigma_x^2 + \sigma_v^2} \quad (11)$$

Hierin stellen σ_x^2 en σ_v^2 de intrinsieke resp. de extrinsieke variantie voor. Door nu formules (10) en (11) te gebruiken i.p.v. de intrinsieke functies kan bij het meetnetontwerp expliciet rekening gehouden worden met optredende meetfouten.

- schattingsfouten

Iedere geschatte kovariantie functie is behept met schattingsfouten. Deze fouten mogen niet te groot worden, aangezien de resulterende meetnet effectiviteit hier sterk door beïnvloed kan worden. Om deze fouten klein te houden zijn echter vaak lange meetreeksen nodig, ter lengte van meerdere korrelatieschalen. Verder geldt dat bij schatting op basis van diskrete waarnemingen ook de geschatte kovariantiefunctie slechts op diskrete tijdstippen berekend kan worden, hetgeen de evaluatie van de meetnet effectiviteit voor verschillende bemonsteringsintervallen kan belemmeren.

Deze problemen kunnen gereduceerd worden door van te voren een model voor de kovariantiestructuur te veronderstellen, waarvan dan alleen de parameters geschat hoeven te worden. Dit stelt niet alleen lagere eisen aan de meetduur, maar maakt ook de evaluatie van het meetnet voor alle mogelijke meetintervallen mogelijk.

Echter, de keuze van het model kan erg kritisch zijn, en kan resulteren in

signifikante systematische fouten in de gevonden kovariantie structuur.

De modellen, die in dit kader worden gebruikt, zijn vaak black-box parametrisaties of empirische modellen. Bekend zijn hierbij de tijdreeksmodellen (AR, ARMA, enz). Deze modellen **karacteriseren** de kovariantiestructuur, maar verklaren haar niet. Dit impliceert dat de gegevens worden beschouwd als volledig te zijn gegenereerd door een **stochastisch** proces.

Dikwijls echter kunnen **deterministische** componenten in de data worden gesignaleerd, die op fysische gronden verklaard kunnen worden. In dat geval dient deze kennis zoveel mogelijk bij het meetnetontwerp betrokken te worden.

4.2 Het gebruik van a priori fysische kennis

Indien van gekonstateerde deterministische componenten kwantitatieve modellen beschikbaar zijn, kunnen ze worden verwijderd uit de oorspronkelijke meetdata. Dit resulteert in nieuwe gegevens (residuen), die in het algemeen een **kleinere variabiliteit** en een **kleinere korrelatieschaal** hebben. Aangezien het meetnet nu alleen informatie over deze residuen hoeft te verschaffen kan de meetinspanning worden verlaagd zonder dat de effectiviteit wordt gereduceerd. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in paragraaf 5.

De mate van meetnet reductie wordt bepaald door de hoeveelheid informatie welke deterministisch beschreven, en dus verwijderd, kan worden. Dit kan variëren van een simpele trend eliminatie tot aan het bepalen van residuen met behulp van complexe numerieke modellen. In alle gevallen geldt echter dat de overgebleven residuen op een "klassieke" manier verder worden geanalyseerd, resulterend in per gemeten variabele **aparte** optimalisaties van bemonsteringsfrequenties en lokaties.

Men kan echter nog een stap verder gaan. Juist als een numeriek model beschikbaar is dat de samenhang van de bemeten processen beschrijft als functie van plaats en tijd, moet expliciet berekend kunnen worden in welke mate de informatie, verkregen uit metingen van variabele v_1 op lokatie l_1 op tijd t_1 , informatie oplevert over dezelfde en andere variabelen op andere lokaties en andere tijdstippen. In dat geval is een **integrale optimalisatie** van lokaties, frequenties en variabelen mogelijk. De hierbij benodigde technieken zijn gebaseerd op Kalmanfiltering. Hierop wordt in paragraaf 4.3. kort ingegaan.

Het gebruik van deterministische modellen bij het **ontwerp** van een meetnet impliceert tevens het gebruik ervan bij de verwerking van de meetgegevens wanneer het ontworpen meetnet **operationeel** is. Dit betekent dat de op deze wijze gerealiseerde lagere meetkosten gepaard zullen gaan met **hogere verwerkingskosten**.

Verder zullen de gehanteerde modellen met een zekere regelmaat **geverifieerd** moeten worden aangezien ieder fysisch systeem in de loop der tijd zal veranderen. Om de hiervoor benodigde meetinformatie te verkrijgen zijn meestal tijdelijke aanvullende **meetkampagnes** vereist, hetgeen uiteraard ook kosten met zich meebrengt.

Desalniettemin zullen in het algemeen de met deze ontwerptechnieken haalbare besparingen de extra uitgaven overtreffen.

4.3 Kalmanfiltering

Een Kalmanfilter is gebaseerd op twee vergelijkingen:

- de **toestandsvergelijking**, waarmee de fysische kennis van het systeem wordt gemodelleerd;
- de **meetvergelijking**, die aangeeft op welke wijze de metingen samenhangen met de gemodelleerde variabelen.

Het filter werkt in principe volgens een predictor-corrector schema: met behulp van de toestands- en meetvergelijking wordt voorspeld hoe, uitgaande van de geschatte toestand op tijdstip t , de waarnemingen op tijdstip $(t+1)$ zullen zijn. De echte waarnemingen die op $(t+1)$ worden verkregen worden vergeleken met deze voorspellingen. Gekonstateerde verschillen resulteren dan in een bijstelling van de voorspelde waarden, waarmee op $(t+1)$ een optimale schatting van de toestand is verkregen. Uitgaande hiervan worden de metingen op $(t+2)$ voorspeld, enzovoort.

De mate waarin voorspelde waarden worden bijgesteld wordt door het filter bepaald, waarbij rekening wordt gehouden met de gespecificeerde betrouwbaarheid van metingen (meetruis) en model (systeemruis). In verband met meetnet-ontwerp zijn vooral de volgende aspecten van het Kalmanfilter van belang:

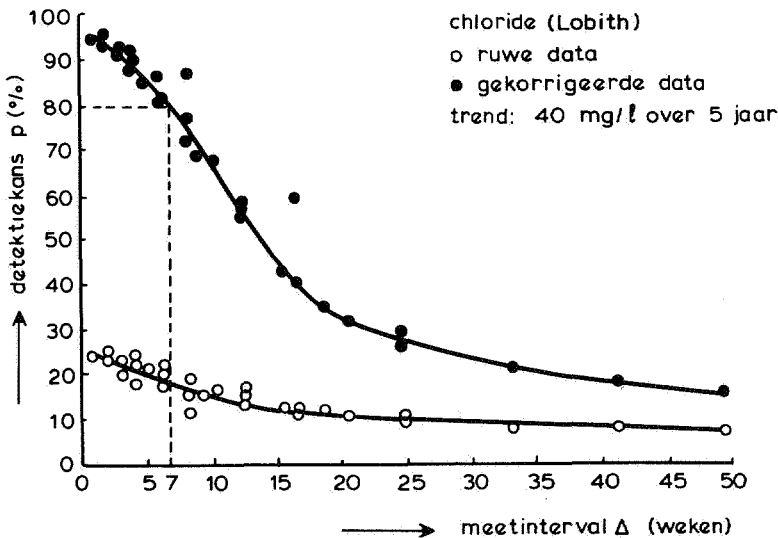
- niet alleen gemeten, maar **ook niet gemeten** variabelen worden bijgesteld, aangezien de variabelen via de toestandsvergelijking zijn gekoppeld
- naast de verkregen optimale schatting van alle gemodelleerde toestandvariabelen wordt ook de **betrouwbaarheid** van deze schattingen berekend. Deze

betrouwbaarheid wordt in sterke mate bepaald door de meetmatrix, die aan-
geeft wat, waar en wanneer gemeten is.

Door te onderzoeken wat het effect is van verschillende meetmatrices (dus
verschillende meetnetten!) op de resulterende betrouwbaarheid (meetnet effek-
tiviteit) kan een integrale optimalisatie van variabelen, lokaties en frekwen-
ties worden gerealiseerd.

5 TWEE VOORBEELDEN

In deze paragraaf zullen twee voorbeelden worden besproken welke zijn ontleend
aan de adviespraktijk van het Waterloopkundig Laboratorium met betrekking tot
het ontwerp en de optimalisatie van meetnetten. Hiervan worden alleen die
aspecten behandeld die zijn gerelateerd aan de vaststelling van meetfrekwen-
ties.

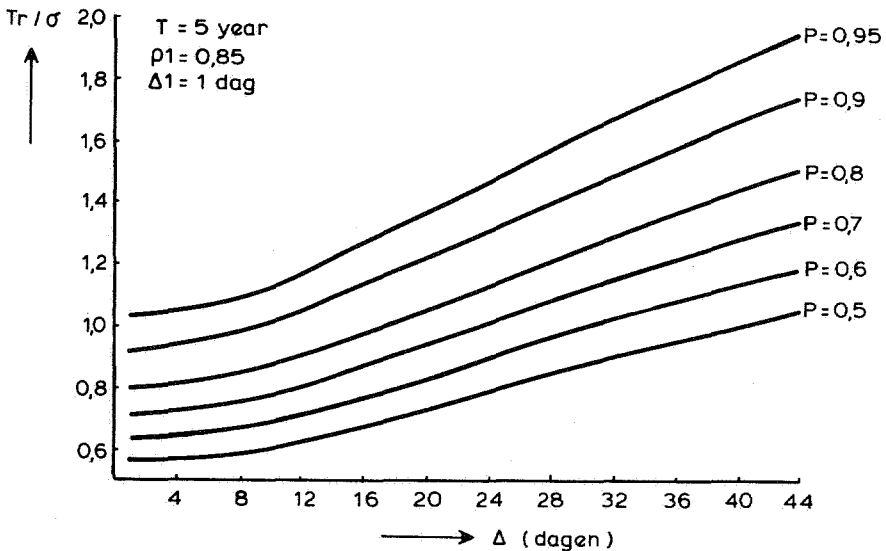


Figuur 6 De trenddetekteerbaarheid voor Chloride bij Lobith als functie van
het bemonsteringsinterval Δ op basis van ruwe, en op basis van voor
de afvoer gekorrigeerde meetgegevens

Het eerste voorbeeld is ontleend aan de optimalisatie studie voor het waterkwaliteitsmeetnet van de belangrijkste oppervlakte wateren in Nederland (Schilperoort et al, 1982). Dit meetnet bevat ongeveer 400 meetlokaties met bemonsteringsintervallen variërend tussen één en vier weken. Het aantal per meetlokatie gemeten variabelen varieert tussen de 15 en 100. In eerste instantie zijn voor een beperkt aantal variabelen (18) de meetfrequenties geoptimaliseerd.

Als belangrijkste doelstelling werd gedefinieerd het detecteren van trendmatige ontwikkelingen in de waterkwaliteit. Gekwantificeerd betekende dit dat met een kans van 80% trends gedetecteerd moesten kunnen worden met een grootte van 20% van de gemiddelde waarde over een periode van vijf jaar. Om te onderzoeken bij welk bemonsteringsinterval deze doelstelling gerealiseerd kon worden is gebruik gemaakt van de in paragraaf 3.2 behandelde techniek. Zoals eerder gesteld, is voor het toepassen van deze techniek kennis omtrent de temporele korrelatiestructuur van de te meten processen vereist. Bij de schatting hiervan op basis van historische gegevens bleek echter duidelijk dat deze korrelatiestructuur aanzienlijk werd beïnvloed door afvoer variaties, met als gevolg een te hoge schatting van de intrinsieke proces variabiliteit en korrelatieschaal. Dit blijkt duidelijk uit figuur 6. In deze figuur is uitgezet de trenddetecteerbaarheid (de meetnet effectiviteit) voor chloride bij Lobith als functie van het bemonsteringsinterval Δ , berekend op basis van de ruwe originele meetgegevens, en op basis van gegevens welke zijn gekorrigeerd voor afvoervariaties (eliminatie van deterministische componenten!). De originele data suggereren dat de gespecificeerde doelstelling nooit gerealiseerd kan worden, terwijl na correctie blijkt dat dit zelfs bij een bemonsteringsinterval van zeven weken nog kan. Hieruit blijkt eens te meer dat een goede data-voorbewerking met behulp van fysisch inzicht de vereiste meetinspanning aanzienlijk kan reduceren.

Het tweede voorbeeld is afkomstig uit een studie (Waterloopkundig Laboratorium, 1983) waarin diverse meetnetten zijn ontworpen ten behoeve van het kustbeheer in Emilia Romagna (Italië). Met betrekking tot de waterkwaliteit zijn zowel bemonsterings frequenties als lokaties vastgesteld ten behoeve van een kustmeetnet en diverse riviermeetnetten. Ten aanzien van de optimale meetfrequentie werd trenddetectie als belangrijkste doelstelling geïdentificeerd.



Figuur 7 Ontwerpkurven voor de bemonsteringsfrequentie van het kustmeetnet in Emilia Romagna (Italië)

In tegenstelling tot het voorgaande voorbeeld kon deze doelstelling niet door de kustbeheerder gekwantificeerd worden. Tevens waren geen historische gegevens voorhanden op basis waarvan korrelatie schalen konden worden bepaald. In dit geval is dan ook op basis van een **fysische analyse** van het betrokken watersysteem een schatting van de belangrijkste processchalen gemaakt. De in paragraaf 3.2 behandelde techniek is vervolgens gebruikt om, gegeven deze schatting, een aantal **ontwerpkurven** te konstrueren, waaruit kan worden afgelezen welk meetinterval vereist is om een gespecificeerde trend, met grootte Tr/σ maal de procesvariabiliteit σ over een periode van vijf jaar, met een gespecificeerde detekti kans te kunnen detekteren. In figuur 7 zijn ter illustratie de voor het kustmeetnet geldende kurven weergegeven.

LITERATUUR

- BAYLEY, G.V. and HAMMERSLEY, J.M., 1946. The effective number of independent observations in an auto-correlated time series. J. Royal Stat. Soc., vol.8, no. I-B, pp.184-197.
- BECKERS, C.V., CHAMBERLAIN, S.G. and GRIMSRUD, G.P., 1972. Quantitative methods for preliminary design of water quality surveillance systems. U.S. Environmental Protection Agency, Report EPA-R5-72-001, Washington.
- LETTENMAIER, D.P., 1976. Detection of trends in water quality data from records with dependent observations. Water Resources Research, vol. 12, no.5, pp. 1037-1045.
- SCHILPEROORT, T., GROOT, S., Van de WETERING, B.G.M. and DIJKMAN, F., 1982. Optimization of the sampling frequency of water quality monitoring networks. Waterloopkundig Laboratorium, publikatie 261, Delft.
- WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM, 1983. Coastal zone management in Emilia-Romagna: Monitoring networks and measurement campaigns. Rapport R1794-vol.2, Delft.

NEERSLAGCORRELATIE-ANALYSE BIJ MEETNETSTUDIES

Ph.Th. Stol *)

1 INLEIDING

Eén van de steeds weerkerende problemen die zich voordoen bij het uitvoeren van meetnetstudies en bij het toepassen van interpolatietechnieken is het vaststellen van het verband tussen de correlatie ρ van twee meetreeksen en de onderlinge afstand D tussen de stations waar de reeksen werden gemeten. Hoge ruimtelijke correlaties zouden betekenen dat een meetnet minder dicht gekozen behoeft te worden dan wanneer deze correlaties laag zijn.

In het nu volgende zal worden ingegaan op de eigenschappen van correlatiefuncties voor het geval deze uit neerslaggegevens zijn afgeleid. Het theoretisch verband $\rho = \rho(D)$ kan men met drie onderzoekmethoden trachten op het spoor te komen.

Grafische analyse

De grafische analyse houdt in dat berekende correlatiecoëfficiënten r uitgezet worden tegen de stationsafstand D . Al naar de vorm waarin de stippenzwerm (D, r) zich voordoet worden in een dergelijke empirische werkwijze conclusies getrokken over de eigenschappen van de correlatiefunctie.

Deze zijn bijvoorbeeld: het verband is rechtlijnig; de curve nadert tot een asymptoot, de curve heeft een tweede maximum.

Er worden geen parameters geschat wat maakt dat een vergelijking met resultaten uit andere gebieden slechts op kwalitatieve wijze mogelijk is.

Curve-fitting

Onder curve-fitting wordt verstaan het aanpassen van een wiskundige functie $r = r(D)$ aan stippendiagrammen van puntenparen $(x, y) = (D, r)$. Bij een

*) Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

dergelijke werkwijze wordt vergelijking van uitkomsten mogelijk op grond van parameterschattingen. Zou men de functie $r = r(D; \alpha, \beta)$ willen aanpassen aan uit steekproeven berekende correlatiecoëfficiënten r , dan kunnen de parameters α en β geschat worden wat, symbolisch met a en b als schattingen voor respectievelijk α en β , leidt tot de correlatiefunctie $\hat{r} = r(D; a, b)$.

(In de schrijfwijze komt tot uiting dat het in beide gevallen gaat om de functie $r(\cdot)$ met in het argument de variabele D en de parameters α en β die numerieke waarden aannemen ter grootte van a en b . De functiewaarden $\hat{r}$ berekend met $r(D; a, b)$ vallen in de regel niet samen met gemeten waarden r , maar wel zijn α en β door de waarden a en b zo geschat dat dit volgens een voorafgesteld criterium 'zo goed mogelijk' gebeurt.)

Vaak wordt de functie $r(\cdot)$ het (correlatie-)model genoemd aangezien hierin overwegingen omtrent de mogelijke vorm van de correlatiefunctie tot uitdrukking kunnen worden gebracht. Zo zouden voorwaarden kunnen zijn:

- De correlatiecurve gaat door $(D, r) = (0, 1)$, respectievelijk de correlatiecurve bereikt dit punt mogelijk niet en gaat door het intercept $(D, r) = (0, r_0)$ met $0 < r_0 \leq 1$;
- De correlatiefunctie is een steeds dalende functie dus met $dr(D)/dD < 0$ voor alle waarden van D ;
- De correlatiefunctie kan geen negatieve waarden aannemen dus $0 < r \leq 1$;
- De correlatiefunctie nadert voor $D \rightarrow \infty$ asymptotisch vanuit de positieve waarden tot een grenswaarde waarvoor veelal $r \neq 0$ gekozen wordt.

Een bekend model met parameters α en r_0 dat aan al deze voorwaarden beantwoordt is $r = r_0 e^{-\alpha D}$ (zie bijvoorbeeld Rodriguez-Iturbe and Mejia, 1974). Het moet echter gezien worden als een rekenmodel met parameters die slechts 'statistische' waarde hebben om berekeningen en het onderling vergelijken van uitkomsten mogelijk te maken. De parameters staan in geen enkele relatie tot fysische grootheden die op een of andere manier het te onderzoeken systeem beschrijven.

Verder moet worden opgemerkt dat de genoemde voorwaarden weliswaar 'logisch' lijken maar zonder meer geen fysische basis hebben en voor een deel op intuïtie berusten (Jones et al. 1979) die naderhand moet worden getoetst, zie bijvoorbeeld Mooley and Ismail (1982). Het woord 'model' zal

in deze bijdrage dan ook niet voor de correlatiefunctie worden gebruikt maar zal betrekking hebben op de neerslagproducerende onderdelen van het systeem.

Theoretische analyse

Getracht kan worden correlatiefuncties $\rho(D)$ theoretisch af te leiden aan de hand van een conceptuele beschrijving van het te onderzoeken systeem van het overtrekken van een bui over een gebied.

Het hier beschreven onderzoek verloopt langs wegen waarbij uitgaande van een gestyleerde beschrijving van het systeem van neerslagproductie en neerslagmeting parameters worden ingevoerd die een maat zijn voor specifieke onderdelen ervan. Schattingen van deze parameters met behulp van empirische (D, r) -stippen diagrammen leveren dan waarden op die het systeem van onderzoek op kwantitatieve manier beschrijven.

2 BASISBESGRIPPEN

Buimodellen

In het nu volgende zal gebruik gemaakt worden van conceptuele modellen die beschrijven waar en in welke omvang een raai regenmeters met neerslag wordt belast. In figuur 1 wordt van de gevolgde gedachtengang een schematisch overzicht gegeven.

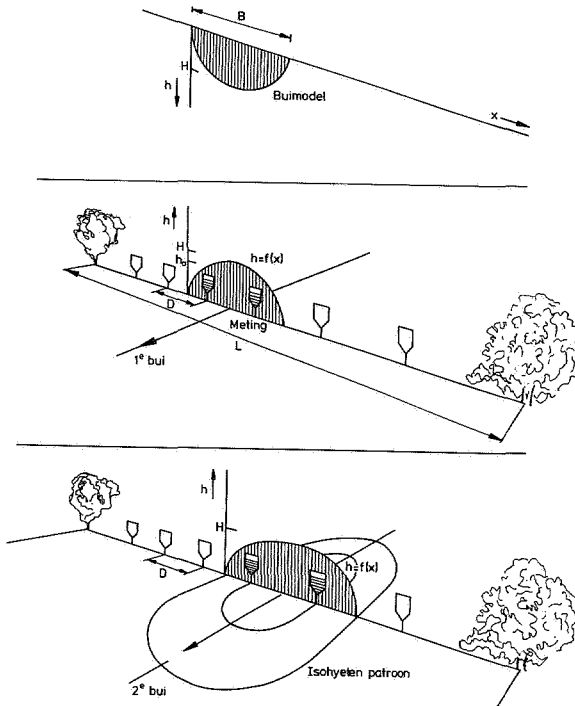


Fig.1

Schematische voorstelling van de conceptuele benadering van het overtrekken van een bui over een raai met regenstations. De centra van de buien zijn uniform verdeeld gedacht over het gebied (raai) van onderzoek.

Aangenomen wordt dat buien met een doorsnede (breedte) B , in loodrechte richting een raai regenmeters passeren en daar aanleiding zijn tot het optreden van neerslag. De plaats waar de bui passeert wordt uniform verdeeld beschouwd over de raai die een lengte L heeft terwijl, om het systeem eenvoudig te houden, overige grootheden constant worden verondersteld zoals de afmetingen van de bui en de op gegeven punten x in de bui te produceren hoeveelheden neerslag $h = f(x)$. Het gebied van onderzoek wordt zo gedefinieerd dat neerslagkansen, gemiddelde hoeveelheid neerslag en spreiding in alle meetpunten gelijk zijn: het gebied van onderzoek wordt verondersteld homogeen te zijn. Meetpunten hebben een onderlinge afstand D die kan variëren van $D = 0$ tot $D = L$.

Eenvoudigheidshalve wordt het neerslagpatroon dat na passeren van een enkele bui in de raai gemeten wordt ook 'de bui' genoemd met een vorm zoals door een (oneindig) dicht meetnet zonder meetfouten zou worden vastgesteld. Dit is dan in feite een doorsnede van het isohyeten-patroon. Dit taalgebruik leidt verder niet tot complicaties. Verder wordt onderscheid gemaakt tussen de te produceren neerslaghoeveelheid h in de bui en de op aarde in meetpunt G te meten tijdreeks g . Deze zal uit wisselende realisaties van de toevalsvariabele h bestaan, verspreid aangevuld met waarden $h = 0$, wanneer de bui het gebied zodanig passeert dat G niet wordt getroffen.

De mathematische uitwerking: het hanteren van de kansen waarmee delen van een gebied 'getroffen' worden door een bui, het vaststellen van welke meetpunten dan neerslag ontvangen, het vaststellen van hoeveel neerslag elk meetpunt ontvangt en, nadat een groot aantal buien is gepasseerd het afleiden van de statistische karakteristieken zoals verwachtingswaarde, spreiding en correlatie tussen paren neerslagreeksen met toenemende afstand tussen de plaatsen van meting, is dermate complex dat alleen eenvoudige buimodellen een analytisch resultaat opleveren. Voorbeelden zullen worden gegeven voor de volgende typen buimodellen: rechthoekig, trapeziumvormig, driehoekig en exponentieel. Ook worden enkele resultaten verkregen met een tri- rectangulair (histogramvormig) buimodel besproken. Met dit model waarin de neerslag in het centrum tot nul gereduceerd kan worden, kan de correlatiestructuur voor gezamenlijk optredende 'losse' neerslagcellen worden bestudeerd.

Correlatiecoëfficiënten

Hoewel correlatiecoëfficiënten vaak geassocieerd worden met het bepalen van lineaire regressie-modellen, eventueel aangevuld met de voorwaarde van normaal verdeeld zijn van de storingstermen, wordt hier gebruik gemaakt van de definitie van de correlatiecoëfficiënt als verhouding tussen twee verwachtingswaarden. Voor twee reeksen gemeten neerslaghoeveelheden g_1 en g_2 in respectievelijk de meetpunten G_1 en G_2 op afstand D geldt dan, ongeacht de onderliggende kansverdeling:

stochastische variabelen: g_1 en g_2 (1)

verwachtingswaarden: $E(g_1) = E(g_2) = \mu$ (2)

variantie: $E(g_1 - \mu)^2 = E(g_2 - \mu)^2 = \sigma^2$ (3)

covariantie: $\text{Cov}(g_1, g_2) = E(g_1 - \mu)(g_2 - \mu)$ (4)

correlatie: $\rho_{g_1 g_2} = \frac{\text{Cov}(g_1, g_2)}{\sigma^2}$ (5)

Tengevolge van de homogeniteitsvoorwaarde zijn verwachtingswaarde en variantie voor beide stochastische variabelen gelijk. Tevens blijkt dat het de covariantie is die van de afstand D afhankelijk is aangezien hierin beide variabelen g_1 en g_2 gecombineerd voorkomen. Met $D = 0$ ontstaat de situatie dat $g_1 = g_2$ zodat volgens (4) en (3) de covariantie dan overgaat in de variantie. Als functie van de onderlinge stationsafstand D kan dan geschreven worden:

$$\rho(D) = \frac{\text{Cov}(D)}{\text{Cov}(0)} \quad (6)$$

Om de berekeningen te kunnen uitvoeren moet men beschikken over de kansverdelingen waarmee waarden (waardepalen) als grenswaarden optreden. De basisgedachte waarmee de afleiding van $\rho(D)$ plaats vindt berust op een aantal overwegingen.

Wanneer de op aarde te meten neerslaghoeveelheid h gegeven is in afhankelijkheid van de plaats in de bui x , dan is $h = f(x)$. Wordt nu gevraagd naar de kans P dat de stochastische variabele $\underline{h}$ waarden aanneemt kleiner dan een gegeven drempelwaarde h_0 , dan schrijven we hiervoor $P(\underline{h} < h_0)$.

In het gestyleerde buimodel is deze kans evenredig met al die waarden van locaties x in de bui waarvoor geldt dat $f(x) < h_0$ (zie figuur 1). Dit principe kan men verder uitwerken door te schrijven dat de inverse functie $f^{-1}(h)|_{h < h_0}$ die waarden voor x geeft in het interval liggen waarvoor aan de voorwaarde $h < h_0$ wordt voldaan. Hiermede is de transformatie van $h_0 \rightarrow x_0$ bewerkstelligd zodat kansen die betrekking hebben op neerslaghoeveelheden nu uitgedrukt kunnen worden in plaatscoördinaten. De kansverdeling van de neerslag gaat over in die van locaties en wel zodanig dat de gemeten neerslaghoeveelheden daar de grenswaarde h_0 niet overschrijden.

In Stol (1982 d, e) is deze procedure meer formeel beschreven. Bijzondere aandacht verdient hierbij de berekening van de covariantie. Hiervoor moeten producten van neerslaghoeveelheden worden vastgesteld op de punten x_1 en x_2 in de bui bij gegeven onderlinge afstand D , zodat $x_2 - x_1 = D$. Het product van twee neerslaghoeveelheden h_1, h_2 op afstand D volgt dan uit de locaties x_1 en x_2 via de gelijkheden $h_1 \cdot h_2 = f(x_1) \cdot f(x_2) = f(x_1) \cdot f\{f^{-1}(h_1) + D\}$.

Conclusies met betrekking tot de correlatie tussen twee tijdreeksen zijn gemakkelijk te herleiden tot conclusies voor het semivariogram aangezien hiervoor geldt:

Structuurfunctie of variogram:

$$E\{ \frac{f(x+D) - f(x)}{2}^2 \} = E\{ \frac{g_1 - g_2}{2}^2 \} = E\{ (g_1 - \mu) - (g_2 - \mu) \}^2 = 2\sigma^2 - 2 \text{Cov}(g_1, g_2)$$

waaruit volgt voor het semi-variogram met (6):

$$\gamma(D) = \text{Cov}(0) \{ 1 - \gamma(D) \} \quad (7)$$

(Zie bijvoorbeeld Czelina et al., 1963 en Journel and Huijbregts, 1978.)

Variabele en constante neerslaghoogte

Beschouwt men een buimodel waarvoor de te meten neerslaghoogte constant is en gelijk is aan H , dan heeft deze functie $f(x) = H$ geen inverse in de in het voorgaande gebruikte betekenis. In dit geval levert de inverse het interval van waarden van x waarvoor geldt dat $h=H$. Men kan aantonen dat een consistente behandeling van dit geval kan plaatsvinden door invoering van Stieltjes-integralen waarmee voor zowel variabele, als voor constante neerslaghoogten de uitgangsformules waarmee de oplossing kan worden bereikt op eenzelfde wijze kunnen worden opgebouwd. Dit geldt ook voor modellen waarin beide soorten functies voorkomen (bijvoorbeeld zoals in trapezium-vormige buimodellen; zie Stol, 1984).

In principe zou men elk isohyetenpatroon met combinaties van functies die variabele en constante neerslaghoogte beschrijven kunnen benaderen en hiervoor de correlatiefunctie berekenen. Hierbij moet worden opgemerkt dat wanneer een buimodel uit m partiële functies bestaat de correlatiefunctie uit (maximaal) $M = \binom{m+1}{2} + 1$ partiële functies kan bestaan. Dit is voor $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ respectievelijk $M = 2, 4, 7, 11, \dots$ wat inhoudt dat slechts eenvoudige buimodellen opgebouwd uit een beperkt aantal partiële functies zinvol te analyseren zijn. Het lijkt niet aannemelijk dat men uit een empirisch (D, r) diagram zulke grote aantallen partiële functies eenduidig kan terugvinden.

3 VOORBEELDEN VAN BUIMODELLEN

Resultaten van het voorgaande zullen besproken worden aan de hand van theoretisch afgeleide correlatiefuncties voor verschillende buimodellen. Hiertoe zijn verspreid gepubliceerde grafische afbeeldingen van dergelijke functies bijeengebracht. Deze grafieken zullen dienen voor het maken van algemene opmerkingen. De structuur van de formules die aan de grafieken ten grondslag ligt is zo weinig overzichtelijk dat de algebraïsche representatie zonder meer zich niet goed leent voor een dergelijke onderlinge vergelijking.

Eerst volgt een korte beschrijving van elk van de buimodellen die zijn gebruikt en hun onderlinge relatie. Vervolgens zal op de eigenschappen van de bijbehorende correlatiefuncties worden ingegaan. De k de partiële buifunctie zal worden aangegeven met $k f(x)$.

Het rechthoekige buimodel

Het rechthoekige buimodel (figuur 2) is het meest eenvoudige model. Het heeft één (partiële) buifunctie ($m = 1$) en constante neerslaghoogte H . De formele definitie is:

$$h(x) = \begin{cases} {}^0f(x) = 0, & x < 0 \\ {}^1f(x) = H, & 0 \leq x < B \\ {}^0f(x) = 0, & B < x \end{cases}$$

Dit model wordt als grensgeval uit de andere te bespreken buimodellen verkregen. De correlatiefunctie bestaat uit maximaal $M = 2$ partiële correlatiefuncties (Stol, 1981 b).

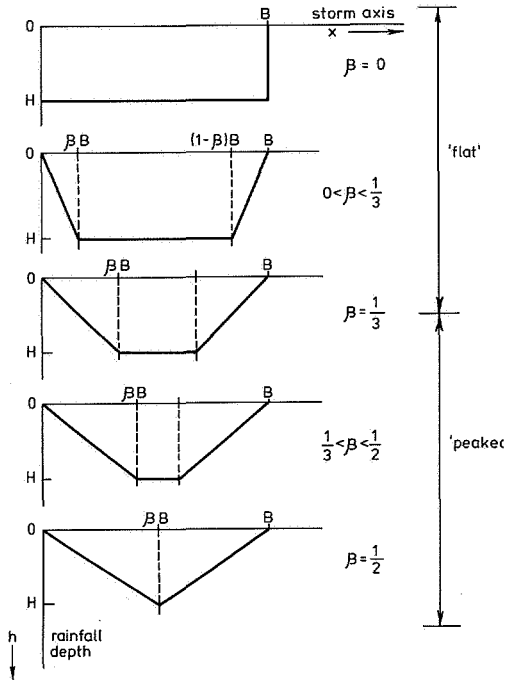


Fig. 2

Het trapeziumvormig symmetrische buimodel. De buiparameter β bepaalt het type van het model. Met $\beta = 0$ gaat dit model over in het rechthoekige model, met $\beta = \frac{1}{2}$ in het driehoekige model (Stol, 1983 a).

Het driehoekige buimodel

Het driehoekige symmetrische buimodel (figuur 2) bestaat uit twee partiële buifuncties ($m = 2$). Behalve de maximale neerslaghoogte H komt ook de buibreedte B in de formule voor. De formele definitie is:

$$h(x) = \begin{cases} 0 & f(x) = 0, & x < 0 \\ 1 & f(x) = \frac{2H}{B} x, & 0 \leq x \leq \frac{1}{2}B \\ 2 & f(x) = 2H - \frac{2H}{B} x, & \frac{1}{2}B < x \leq B \\ 0 & f(x) = 0, & B < x \end{cases}$$

Het driehoekige buimodel kan ook als grensgeval van het trapeziumvormige model worden verkregen. Door de symmetrie is het maximale aantal partiële functies waaruit de correlatiefunctie kan bestaan niet gelijk aan $M = 4$ doch blijft beperkt tot 3 (Stol, 1981 a).

Het trapeziumvormige buimodel

Het trapeziumvormige model (figuur 2) is gedefinieerd met een buiparameter β die de grootte van de partiële buibreedten bepaalt.

In formule:

$$h(x) = \begin{cases} {}^0f(x) = 0, & x < 0 \\ {}^1f(x) = \frac{H}{\beta B}x, & 0 \leq x < \beta B, \quad (0 < \beta < \frac{1}{2}) \\ {}^2f(x) = H, & \beta B \leq x \leq (1 - \beta)B \\ {}^3f(x) = (1 - \frac{x}{B}) \frac{H}{\beta}, & (1 - \beta)B < x \leq B \\ {}^0f(x) = 0, & B < x \end{cases}$$

Dit model bestaat uit $m = 3$ partiële buifuncties. Met $\beta = 0$ gaat het over in het rechthoekige model en met $\beta = \frac{1}{2}$ in het driehoekige model. Het model is symmetrisch (gelijkzijdig trapezium). De correlatiefunctie bestaat daardoor niet uit maximaal $M = 7$ partiële functies maar uit maximaal 5 (Stol, 1983 a).

Het exponentiële buimodel

Ook het symmetrische exponentiële buimodel (figuur 3) kent een buiparameter (b) welke de steilheid van het model vastlegt. Het model heeft $m = 2$ partiële buifuncties. In formule:

$$h(x) = \begin{cases} {}^0f(x) = 0, & x < 0 \\ {}^1f(x) = H e^{2b(x - \frac{1}{2}B)}, & 0 \leq x < \frac{1}{2}B \quad (0 < b < \infty) \\ {}^2f(x) = H e^{2b(\frac{1}{2}B - x)}, & \frac{1}{2}B < x \leq B \\ {}^0f(x) = 0, & B < x \end{cases}$$

Voor $b = 0$ gaat dit model over in het rechthoekige buimodel. Evenals het symmetrische driehoekige model geeft dit buimodel aanleiding tot een correlatiefunctie met maximaal 3 partiële functies (Stol, 1982 c).

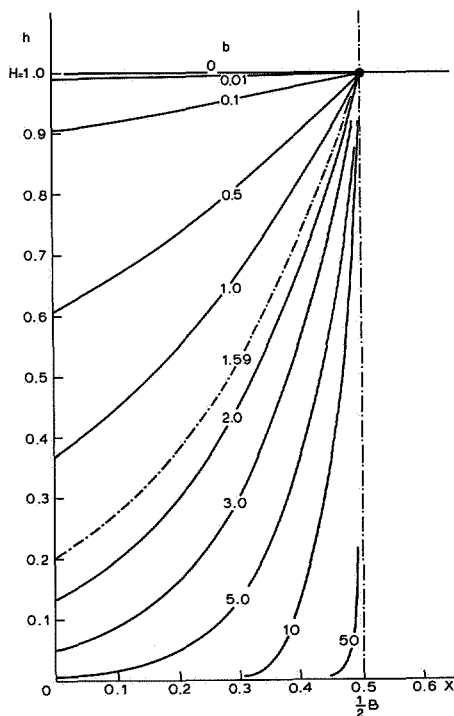


Fig. 3

Het exponentiële buimodel. De figuur geeft de linkerhelft van dergelijke (symmetrische) modellen. De buiparameter b bepaalt de steilheid van het buiprofiel resp. isohyetenprofiel. Voor $b = 0$ gaat het model over in het rechthoekige model (Stol, 1982 c).

Het tri-rectangulaire buimodel

Het tri-rectangulaire buimodel (figuur 4) heeft de vorm van een histogram in dit geval een met drie rechthoeken zodat ook $m = 3$. Een algemene definitie luidt:

$$h(x) = \begin{cases} 0 & f(x) = 0, & x < b_0 & (b_0 = 0) \\ i & f(x) = H_i, & b_{i-1} < x \leq b_i & (i = 1, 2, 3), (B_i = b_i - b_{i-1}) \\ 0 & f(x) = 0, & b_3 < x & (b_3 = B) \end{cases}$$

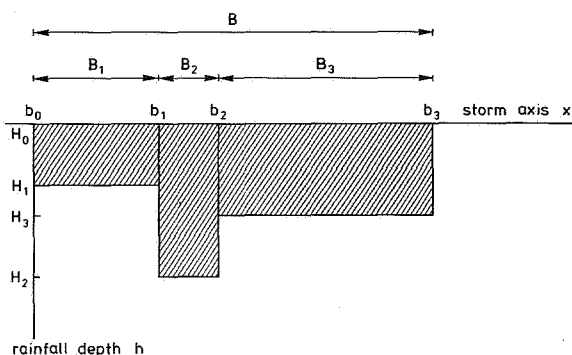


Fig. 4

Het algemene, niet-symmetrische tri-rectangulaire buimodel. Met $H_1 = H_2 = H_3$ of met $B_1 = B_3 = 0$ gaat het model over in het rechthoekig buimodel. Het centrale deel mag neerslagloos gedacht worden met $H_2 = 0$. Het model beschrijft dan het optreden van 'losse' cellen. De correlatiefunctie voor dit algemeen model kan uit $M = 7$ partiële functies bestaan nl. wanneer $B < L$, zie figuur 5 (Stol, 1983 b).

Veelal zal een dergelijk model toegepast worden met enkele vereenvoudigingen met name $H_1 = H_3$ en $B_1 = B_3$ onder gebruikmaking van de parameters q en β en wel als volgt:

$$h(x) = \begin{cases} {}^0 f(x) = 0, & x < 0 \\ {}^1 f(x) = H, & 0 \leq x < \beta B \quad (0 < \beta < \frac{1}{2}) \\ {}^2 f(x) = qH, & \beta B \leq x \leq (1-\beta)B \quad (q \geq 0) \\ {}^3 f(x) = H, & (1-\beta)B < x \leq B \\ {}^0 f(x) = 0, & B < x \end{cases}$$

Overgangen naar het rechthoekige buimodel worden verkregen met $\beta = 0$ respectievelijk met $q = 1$. In het algemene, niet symmetrische, geval bestaat de correlatiefunctie uit maximaal $M = 7$ partiële functies (zie figuur 5; Stol, 1983 c).

4 CORRELATIEPATRONEN

Met de hierboven besproken buimodellen zijn correlatiepatronen berekend waarbij de verschillende buiparameters het onderscheid tussen de curven kwantificeren.

De (maximale) neerslaghoogte H blijkt geen parameter in de correlatiefuncties te zijn. Dit betekent dat deze grootte zonder verlies van algemeenheid gelijk aan de eenheid kan worden gesteld ($H = 1$). Verder blijkt het mogelijk teller en noemer van de correlatiecoëfficiënt door een dusdanige macht van L te delen dat alle grootteheden die de eenheid van lengte hebben dimensieloos kunnen worden weergegeven. Met andere woorden ze kunnen in eenheden van de gebiedslengte L worden uitgedrukt. Het betreft de buibreedte B en de stationsafstand D waarvoor in de figuur geldt $0 \leq D \leq 1$.

In de nu volgende beschrijvingen zal hieraan herinnerd worden door te spreken van een buibreedte gelijk aan B maal de gebiedslengte L en een stationsafstand gelijk aan D maal de gebiedslengte L .

In figuur 5 zijn voor een rechthoekig, een exponentieel, een driehoekig en een tri-rectangulair buimodel de correlatiefuncties ingetekend. Steeds werd de gemiddeld door een bui te produceren puntneerslaghoeveelheid gelijk aan $\mu = \frac{1}{2}$ gesteld waarbij de modellen naar opklimmende variantie σ^2 werden gerangschikt. De linker kolom figuren bevat curven voor geringe buibreedten ($B < 1,5$ maal de gebiedslengte L), de rechterkolom de curven voor grote buibreedten ($B > 1,5$ maal de gebiedslengte L).

Bij eenzelfde verwachtingswaarde μ in de bui blijken de correlatiepatronen weinig door de vorm van het buimodel te worden beïnvloed. Een uitzondering vormt het rechthoekige buimodel waarvoor met grote waarden van de bui-afmeting B , bij $D = 1$ (maal de gebiedslengte L) geen positieve correlatiecoëfficiënten kunnen optreden.

Voor het exponentiële buimodel geldt dat de waarde $\mu = \frac{1}{2}$ verkregen wordt wanneer tussen de parameters b en B de betrekking bestaat $bB = 1.5936$. Naarmate de variantie toeneemt vertonen de bundels curven (correlatiepatronen) neiging tot een zekere contractie hetgeen betekent een verlies aan gevoeligheid voor de buibreedte B .

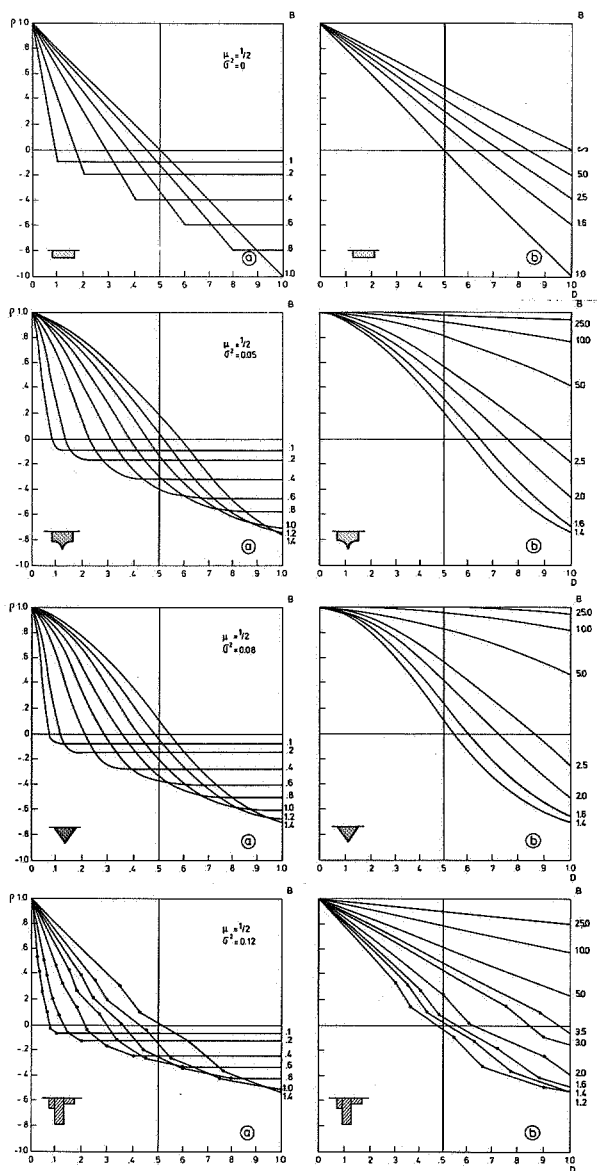


Fig. 5

Uit verschillende buimodellen met $\mu = \frac{1}{2} H$ afgeleide correlatiefuncties en wel voor 1: het rechthoekige, 2: het exponentiële, 3: het driehoekige en 4: het niet-symmetrische tri-rectangulaire model. In het laatste geval geven stippen de 'breekpunten' aan waar de partiële correlatiefuncties in elkaar overgaan. De ligging van de stippen wordt bepaald door de grootte van de voortschrijdende sommen van aan elkaar grenzende partiële buibreedten B_1 , B_2 en B_3 (Stol, 1983 b).

In figuur 6 worden voor het rechthoekige, het exponentiële en het driehoekige buimodel de correlatiefuncties gegeven voor vier waarden van de buibreedte, nl. $B = 0.5, 1, 5$ en 10 maal de gebiedslengte L , terwijl tevens een nieuwe parameter in het model is opgenomen namelijk de fractie (p) aan droge dagen, namelijk die situaties waarin in geen van de meetpunten neerslag werd opgevangen. In de conceptuele benadering zijn dit de gevallen waarin wel geconstateerd wordt dat een bui passeert maar waarin geen enkel punt van het gebied er door getroffen wordt.

Door het in rekening brengen van de fractie aan droge dagen vindt een verhoging van de correlatie plaats. Deze is van een dusdanige aard dat nu ook het rechthoekige buimodel bij grote buibreedten en voor $D = 1$ (maal de gebiedslengte L) positieve correlaties vertoont. Door droge dagen (alle meetpunten hebben geen neerslag ontvangen) niet te schrappen wordt het onderscheid tussen de buimodellen in de correlatiefunctie verder vervaagd.

Een verdere uitwerking van de eigenschappen van het exponentiële buimodel wordt gegeven in figuur 7a met percentage droge dagen p gelijk aan 0% , figuur 7b met $p = 20\%$ en figuur 7c met $p = 40\%$. Er zijn diagrammen getekend voor vier waarden van de buibreedte B , te weten $B = 0.5, 1, 5$ en respectievelijk 25 maal de gebiedslengte L . Aangezien voor de verwachtingswaarde van neerslaghoeveelheden in de bui geldt:

$$\mu = \frac{H}{bB} (1 - e^{-bB}) \quad (8)$$

is het product bB maatgevend voor de waarde van μ bij constant gehouden maximum H . Wordt het produkt bB groot, dan wordt μ klein en is het buimodel relatief steil. Voor $b > 5$ (steile buiprofielen) vervaagt het verschil dat veroorzaakt wordt door de bui-afmetingen vooral wanneer deze groter zijn dan bijvoorbeeld 5 maal de gebiedslengte L . Ook mag men zeggen dat dit het geval is wanneer de gebiedslengte L gelijk aan een waarde minder dan $1/5$ maal de buidoorsnede B wordt gekozen.

Ook nu blijkt het opnemen van neerslagloze dagen in de berekening de correlatie te verhogen en tevens vindt voor kleine waarden van B een contractie van de bundel curven plaats.

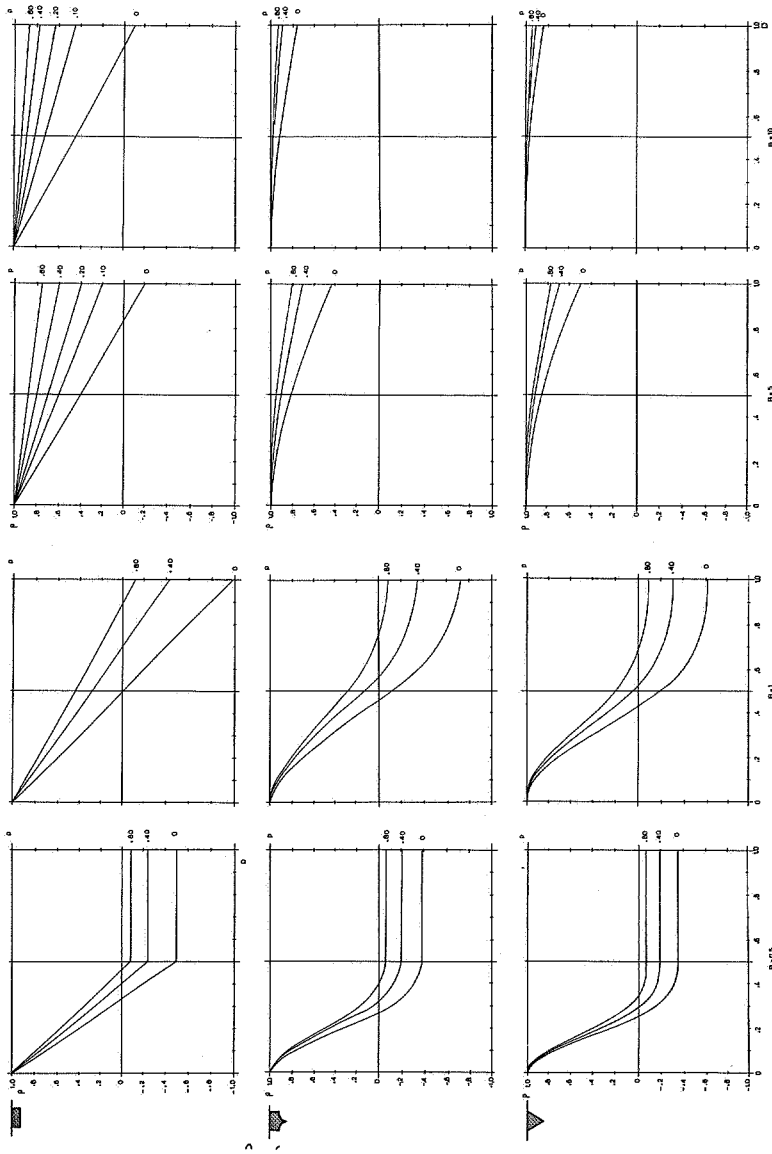


Fig. 6.

De invloed van het percentage droge dagen (p) op het correlatiepatroon voor het rechthoekige, het exponentiële en het driehoekige buimodel met $\mu = \frac{1}{2} H$ (Stol, 1981 b).

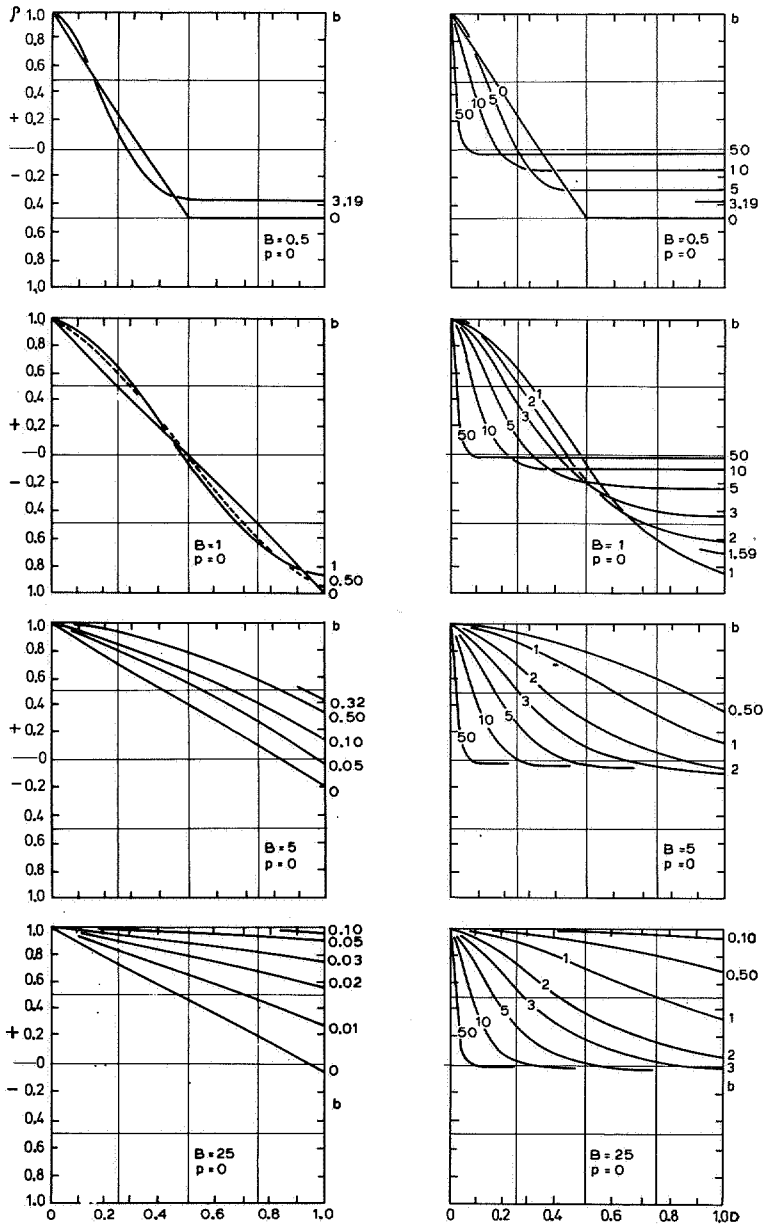


Fig. 7a

Correlatiecurven voor het exponentiële buimodel voor verschillende waarden van de buiparameter b . Met $b = 0$ wordt het rechthoekig model verkregen, met $b = 50$ heeft het isohyetenpatroon een extreem grote neerslaghoeveelheid in het centrum van de bui (Stol, 1982c). Het percentage aan neerslagloze dagen is hier $p = 0\%$.

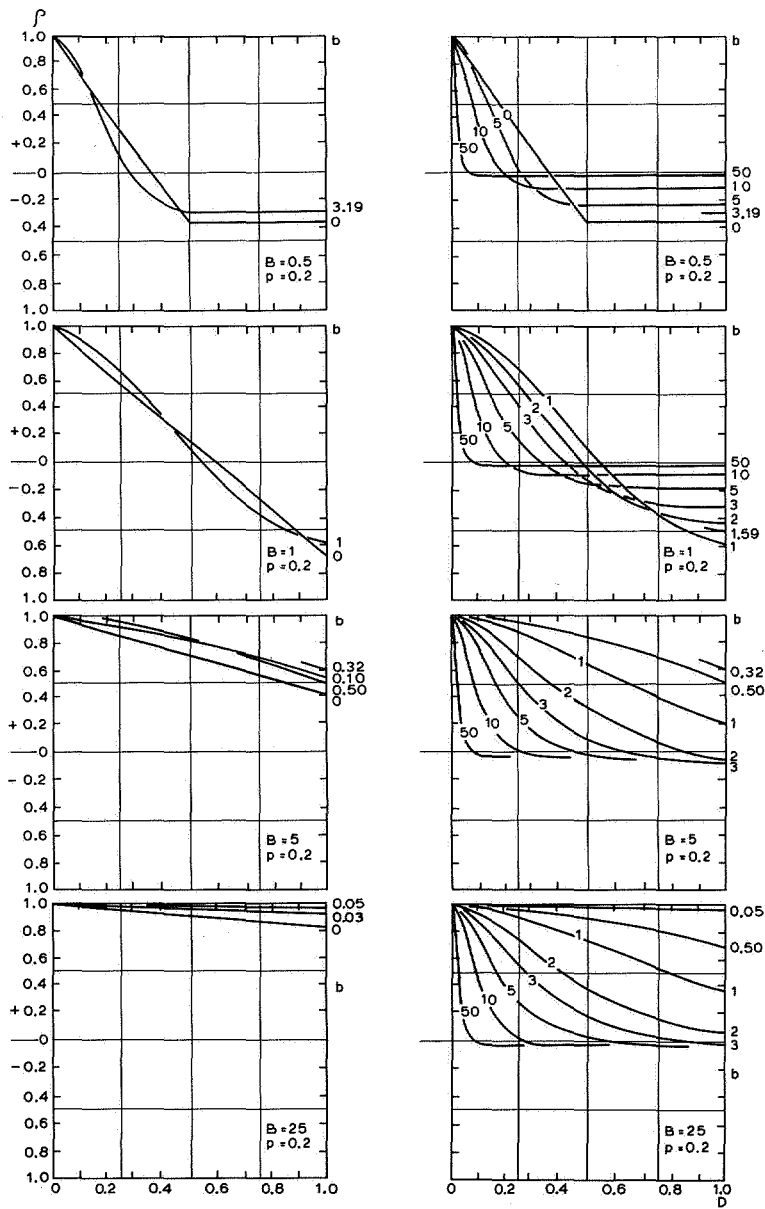


Fig. 7b

Als figuur 7a nu met het percentage aan neerslagloze dagen $p = 20\%$.

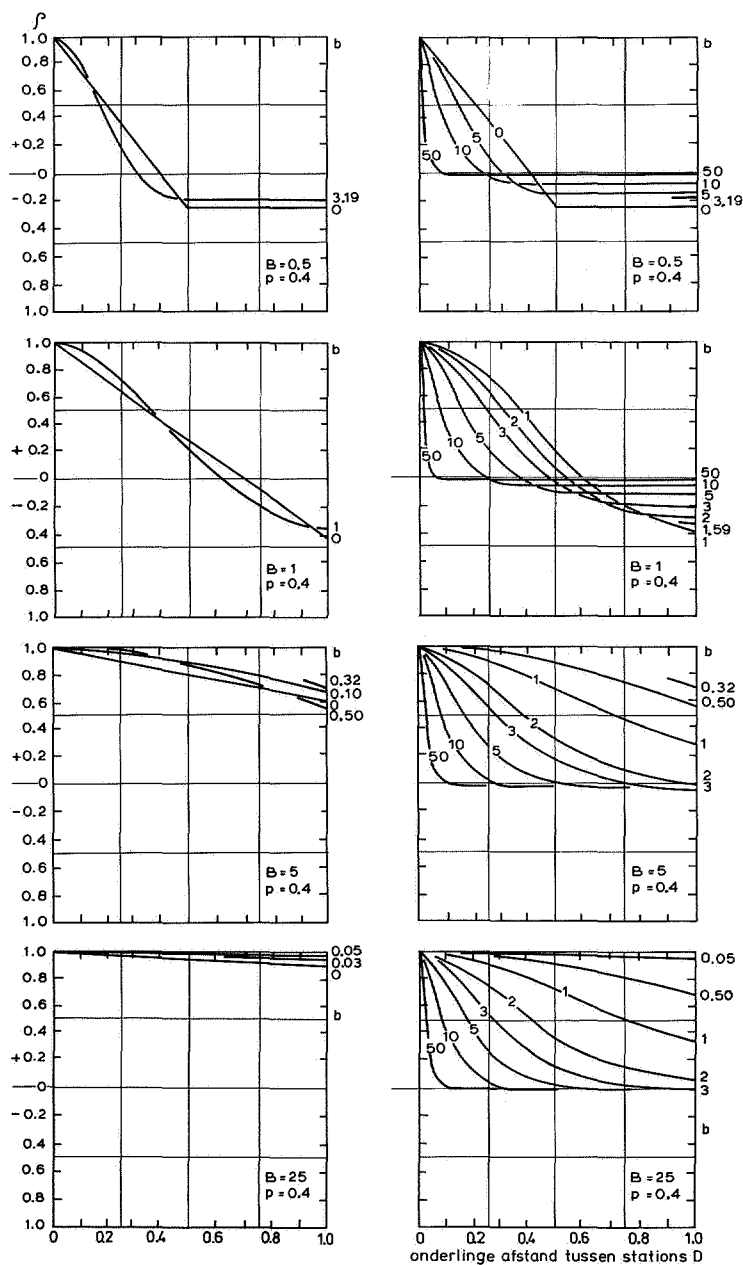


Fig. 7c

Als figuur 7b nu met het percentage aan neerslagloze dagen $p = 40\%$.

Voor het trapeziumvormige buimodel zijn correlatiepatronen getekend voor twee typen modellen namelijk met $\beta = 4/24$ en $\beta = 10/24$ met zeven verschillende waarden voor de buibreedte B (figuur 8). Tenslotte geeft figuur 9 voor dit buimodel ($\beta = 4/24$) een drietal correlatiepatronen voor buibreedten $B = 0.5, 1$ en 5 maal de gebiedslengte L met drie verschillende waarden voor de fractie neerslagloze dagen (p).

Het effect van de neerslaghoeveelheid in het centrum van een bui kan worden bestudeerd met een tri-rectangulair buimodel (zie figuur 4) door de hoogte van de middelste rechthoek te variëren (figuur 10). Wanneer het buiprofiel een uitgesproken piek in het centrum van de bui vertoont ($H_2 > 50$) krijgt de correlatiefunctie een gedaante die overeenkomsten vertoont van die van het exponentiële buimodel met $b > 5$. Wanneer H_2 gelijk gekozen wordt aan H_1 en H_3 ontstaat het rechthoekige buimodel. Wordt de neerslaghoeveelheid in het centrum van de bui verder verlaagd dan krijgt het correlatiepatroon de gedaante van een tweetoppige curve vanaf het moment dat $H_2 < \frac{1}{2}H_1 = \frac{1}{2}H_3$ (Stol, 1983 d). Dit model kan dienen om correlatiepatronen te bestuderen die ontstaan bij het gezamenlijk overtrekken van paren buien (cellen). Kwalitatieve uitspraken over de eigenschappen van deze patronen zijn gedaan door Sharon (1972) aan de hand van empirische resultaten.

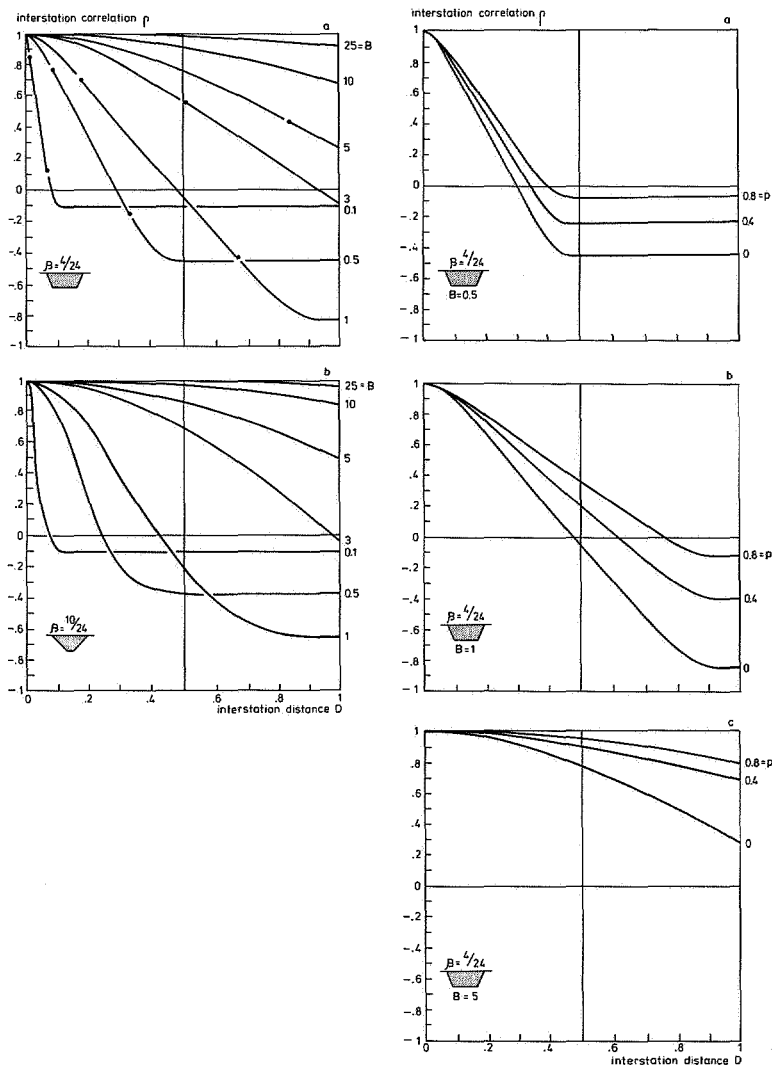


Fig. 8

Correlatiecurven voor het trapeziumvormig buimodel wanneer de buiparameter resp. is $\beta = 4/24$ en $\beta = 10/24$ bij verschillende waarden voor de buibreedte B . De stippen in het bovenste diagram geven de overgangen tussen de partiële correlatiefuncties die, tussen de stippen, uit een rechte lijn bestaat. De overgangen zijn vloeiend (hebben ter plaatse gelijke waarden voor de eerste afgeleide). Het onderste diagram bestaat uit partiële correlatiefuncties van de derde graad. De overgangen zijn hier niet nader aangegeven.

Fig. 9

Correlatiecurven voor het trapeziumvormig buimodel met buiparameter $\beta = 4/24$ voor drie waarden van het percentage aan neerslagloze dagen p (Stol, 1984).

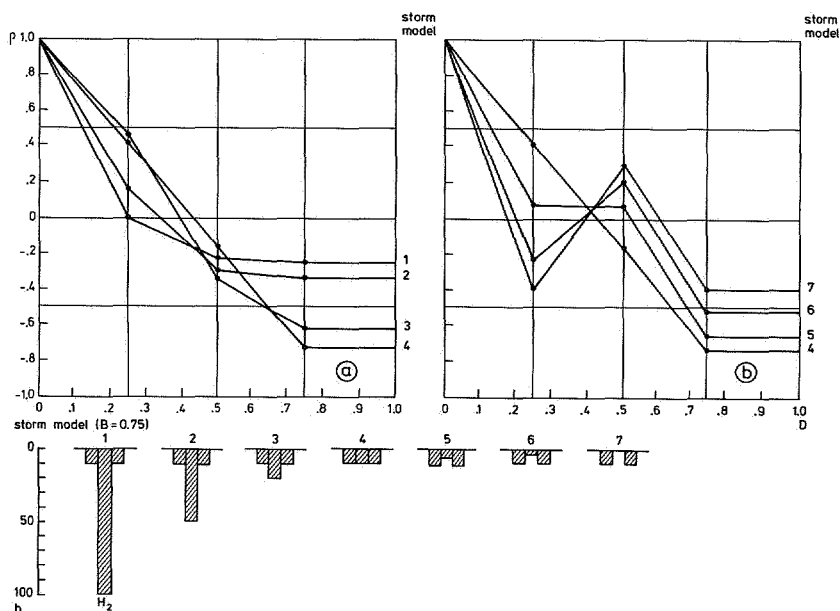


Fig. 10

Correlatiecurven voor het symmetrische tri-rectangulaire buimodel met afnemende neerslaghoeveelheid H_2 in het centrum van de bui. Vanaf het moment dat $H_2 < \frac{1}{2}H_1 = \frac{1}{2}H_3$ begint het correlatiepatroon een tweede maximum te vertonen (Stol, 1983b).

De 'breekpunten' bij $D = 0.25, 0.50$ en 0.75 maal de gebiedslengte L worden in ligging bepaald door de voortschrijdende sommen van partiële buibreedten namelijk $B_1 = B_2 = B_3 = 0.25 L$ vervolgens $B_1 + B_2 = B_2 + B_3 = 0.50 L$ en tenslotte $B_1 + B_2 + B_3 = B = 0.75 L$. In principe zou men deze 'breekpunten' uit een empirisch vervaardigd correlatiediagram moeten kunnen terugvinden (Sharon, 1974).

5 CONCLUSIES

Inleiding

Het is bekend dat correlatiecoëfficiënten niet afhangen van:

- het niveau waarop gemeten wordt (gemiddelde waarde);
- de schaal waarin gemeten wordt (eenheden).

Daarnaast blijkt dat voor neerslagcorrelatiefuncties het correlatiepatroon ook niet van enkele andere, nog te bespreken, buikarakteristieken afhangt respectievelijk dat ze daar weinig gevoelig voor zijn. Genoemd kan worden dat neerslagcorrelatiecoëfficiënten ρ niet afhangen van:

- de maximale neerslaggrootte in het centrum van de bui (wanneer deze ééntoppig is);

bij asymmetrische buimodellen evenmin van:

- de links - rechtsspiegeling van de bui.

Aangezien zowel de buibreedte B als de stationsafstand D ten opzichte van de gebiedslengte L genormaliseerd kunnen worden kan er geen onderscheid gemaakt worden tussen resultaten waarvoor de verhouding $\frac{B}{L}$ dezelfde waarde aanneemt, m.a.w.:

- het correlatiepatroon voor een buimodel met breedte $B' = aB$ onderzocht in een gebied met lengte L is identiek aan het patroon voor eenzelfde buimodel met breedte B , onderzocht in een gebied met lengte $L' = L/a$ ($a > 0$).

Ook blijkt dat verschillende karakteristieken vervagen en daardoor uit empirische correlatiefiguren, die bovendien met waarnemingsstoringen vervuld zijn, niet meer te onderscheiden zijn.

Zo blijkt te vervagen:

- het effect van het buimodel wanneer buien met gelijke gemiddelde neerslaghoeveelheid μ werden vergeleken;
- het effect van de buibreedte B buimodellen met een zeer grote neerslaghoogte H in het centrum van de bui werden vergeleken.

Correlatie kleiner dan nul

Hoewel in de literatuur regelmatig weerkerend de vraag wordt opgeworpen of neerslagcorrelaties inderdaad negatieve waarden kunnen opleveren die in statistische zin significant zijn (Yevjevich and Karplus, 1973), blijkt uit de conceptuele benadering dat negatieve correlaties op een logische wijze uit het systeem voortvloeien.

Er zijn echter een aantal situaties aan te wijzen die veroorzaken dat het optreden van negatieve correlaties minder aannemelijk wordt en in steekproeven bewerkstelligen dat correlaties de neiging hebben alleen positief uit te vallen, en wel onder andere:

- Wanneer de gebiedslengte L klein genomen wordt, respectievelijk wanneer slechts buien van grote afmeting B in het systeem voorkomen. Een vuistregel is dat met $B > 3L$ er geen negatieve correlaties meer gevonden kunnen worden;
- Wanneer neerslagloze dagen in de berekening van de correlatiecoëfficiënt worden meegenomen. Dit verhoogt de waarde die de correlatiecoëfficiënt aanneemt;
- Wanneer de spreiding (variantie) van de neerslaghoeveelheden in de bui groot is. Uit onderlinge vergelijking van resultaten blijkt dit de correlatie juist bij buien van niet te grote afmeting ($B < 3L$) te vergroten.

In praktische termen gesteld blijkt het vinden van alleen positieve correlatie samen te hangen met de correlatiepatronen voor relatief grote buien met een grillig isohyetenpatroon waarbij dagen zonder neerslag niet uit de tijdreeksen worden geschrapt (wintersituaties). Een overzicht over die onderzoeken waarin wél negatieve waarden werden berekend wordt gegeven door Stol (1982a, b).

Asymptoten

De gebruikte buimodellen geven geen aanleiding tot de veronderstelling dat $\rho = 0$ een asymptoot van de correlatiefunctie zal zijn. Dit gedrag wordt echter gesuggereerd wanneer aan een aantal voorwaarden is voldaan (Stol, 1984). Deze zijn:

- wanneer het percentage p aan volledig droge dagen groot is;
- wanneer de gebiedslengte L groot is ten opzichte van de bui-afmetingen B ($B \ll L$);
- wanneer de variatiecoëfficiënt groot is dat wil zeggen de verhouding σ/μ is groot.

In praktische termen betekent het bovenstaande dat correlatiecurven de suggestie wekken asymptotisch tot $\rho = 0$ te naderen wanneer buien van relatief kleine afmeting met een grote variatie aan neerslag ten opzichte van de gemiddeld te verwachten hoeveelheid, worden geanalyseerd waarbij dagen zonder neerslag niet uit de tijdreeksen worden geschrapt (zomersituaties). Voor een praktijkvoorbeeld zie o.a. Stol (1972) en Osborne et al. (1979).

Buigrootte

De grootte van de bui, voorgesteld door de parameter B , blijkt een duidelijke invloed op de ligging van de correlatiecurven te hebben. Dit zou betekenen dat uit empirisch gevonden correlatiecurven een schatting van B kan worden gemaakt. Het probleem doet zich hierbij voor dat puntenparen (D, r) met weinig spreiding, slechts verkregen worden wanneer gegevens worden gebruikt van buien met ongeveer dezelfde afmetingen. Met andere woorden: B zou vooraf bekend moeten zijn. Een oplossing is dan buien uit eenzelfde meteorologische situatie te selecteren door bijvoorbeeld een analyse per maand uit te voeren (Stol, 1972). Een eerste poging om op grond hiervan met de besproken theorie tot callibratie van een correlatiepatroon te komen werd gewaagd door Prak (1980).

In de literatuur (Imai et al, 1974; Felgate and Read, 1975; Shaw, 1983) wordt vaak gesuggereerd de afstand D gegeven door $\rho(D) = 0.5$ als objectieve maat voor de gemiddelde buidiameter (cell size) te gebruiken. Men kan echter aantonen dat slechts onder de voorwaarde dat het buimodel rechthoekig is een eenvoudige schattingswijze voor de buibreedte mogelijk is en wel met $B = -L \cdot \rho(L)$ wanneer $B < L$ en met $B = -L / \rho(L)$ wanneer $B > L$ (Stol, 1984).

Meetnetdichtheid

De kwalitatieve vaststelling dat meteorologische situaties met hoge neerslagcorrelaties minder dichte netwerken behoeven dan situaties met lage correlaties heeft in de hydrologische literatuur tot vuistregels geleid.

Hershfield (1965) deed de suggestie neerslagnetwerkdichtheden te dimensioneren op een wijze dat $\rho = 0.90$ bereikt kan worden. Een dichter netwerk zou leiden tot correlaties tussen naburige meetstations van $\rho > 0.90$ wat overbodig en dus minder efficient wordt geacht. Een wijder netwerk kan aanleiding zijn tot $\rho \ll 0.90$ waardoor informatie verloren gaat. Deze maat werd eveneens door Hutchinson (1969) en door Hendrick and Comer (1970) in hun meetnetstudies gehanteerd.

Het is interessant hier op te merken dat Fisher and Mackenzie in 1922 schreven na, zover bekend, het eerste (D, ρ) -diagram gepubliceerd te hebben:

'It is not improbable that simple laws may connect these quantities (viz. interstation correlation and distance, S) over considerable areas, which will afford sufficiently exact knowledge of the accuracy of meteorological estimates, based on a limited number of stations.'

Vanaf deze tijd volgen in de hydrologische literatuur veel onderzoeken met neerslagcorrelatiediagrammen. Conclusies worden meestal op basis van empirisch onderzoek getrokken en soms langs intuïtieve weg. Meer en minder geslaagde opmerkingen over de eigenschappen van correlatiefuncties zijn in onderlinge samenhang geciteerd door Stol (1982d).

Rumyantsev and Shanochkin (1973) merkten op:

'Having the correlation function, the representativeness of the precipitation network with respect to the problem of spatial correlation can be evaluated purely theoretically without any computation from available data.'

Het zal wel duidelijk zijn dat de gegeven voorbeelden van neerslagcorrelatiepatronen de mogelijkheid bieden inderdaad 'zonder gegevens' een relatie te leggen tussen de gekozen kritieke grootte van de correlatie (ρ_c) en de grootste afstand (D_m) tussen de meetstations waarmee deze waarde nog geconstateerd kan worden. Bovendien kan men de betrekking $\rho_c = \rho(D_m)$ van in het buimodel aanwezige buiparameters laten afhangen en daarmee de meetnetdichtheid zo kiezen dat deze het beste past bij de gekozen parameterwaarden (dat wil dan zeggen het gekozen buitype). Veel buikarakteristieken blijken in het theoretisch model geen invloed op ρ te hebben. Ook zijn er eigenschappen die dreigen te vervagen zodat de kans om deze in empirische situaties uit een correlatiediagram af te lezen zal afnemen wanneer de waarnemingsfouten in grootte toenemen.

Met dit artikel wil de auteur bijdragen aan het verwerven van inzicht in hoe men zich de onderlinge samenhang tussen verschillende buikarakteristieken en de eigenschappen van neerslagcorrelatiepatronen moet voorstellen. Hierbij kan men tevens conclusies trekken omtrent wat men kan verwachten van het toepassen van neerslagcorrelatiegegevens bij meetnetstudies.

6 SLOTOPMERKINGEN

De literatuurverwijzingen ondersteunen de gedachtengang bij het afleiden van de correlatiefuncties en bij het trekken van enige conclusies. Aangezien de hier uiteengezette werkwijze nieuw is, ontbreekt in de literatuur een duidelijk voorschrift omtrent de wijze hoe steekproeven (tijdreeksen) moeten worden gekozen voor het onderzoeken van relevante eigenschappen van correlatiepatronen wanneer deze gerelateerd worden aan meteorologische, resp. hydrologische situaties. De in de literatuurverwijzingen aangehaalde voorbeelden zijn dan ook onderling slecht vergelijkbaar aangezien deze betrekking hebben op een verscheidenheid aan gebeurtenissen zoals minuten-neerslag, storm-neerslag, dagelijkse neerslaghoeveelheden, wekelijkse en maandtotalen en zelfs jaarsommen.

De hier besproken conceptuele benadering 'werkt' met buien, maar mogelijk is de opvatting dat daghoeveelheden tot grondslag dienden eveneens te verdedigen.

LITERATUUR

CZELNAI, R., F. DESI and F. RÁKÓCZI, 1963.

On determining the rational density of precipitation measuring networks. *Időjárás*, 67(5): 257-267

FELGATE, D.G. and D.G. READ, 1975.

Correlation analysis of the cellular structure of storms observed by raingauges, *J. Hydrol.*, 24: 191-200

FISHER, R.A. and W.A. MACKENZIE, 1922.

The correlation of weekly rainfall. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol 48: 234-215

HENDRICK, R.L. and G.H. COMER, 1970

Space variations of precipitation and implications for raingage network design. *J. Hydrol.*, 10: 151-163

HERSHFIELD, D.M., 1965.

On the spacing of raingages. *Symp. on Design of Hydrological Networks*, I. Quebec, Que., WMO-IASH, Publ. No. 67: 72-81

HUTCHINSON, P., 1969.

Estimation of rainfall in sparsely gauged areas. *Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 14(1): 101-119

IMAI, I., E. SUZUKI, T. IZAWA, K. KURASHIGE, J. AOYAGI, T. YANASE and K. HAYASHI, 1964.

Statistical properties of rainfall and the radiowave attenuation due to rain (Translated by D. Jackson) Tokyo, Japanese Meteorological Agency, *J. Meteorological Research*, Vol 16: 137-166

JONES, D.A., R.J. GURNEY and P.E. O'CONNELL, 1979.

Network design using optimal estimation procedures. *Water Recour. Res.*, 15(6): 1801-1812

JOURNEL, A.G. and CH.J. HUIJBREGTS, 1978.

Mining Geostatistics. Academic Press, London, 600 pp

MOOLEY, D.A. and P.M. MOHAMED ISMAIL, 1982

Correlation functions of rainfall field and their application in network design in the tropics, *PAGEOPH*, 120: 249-260

OSBORN, H.B., K.G. RENARD and J.R. SIMANTON, 1979.

Dense networks to measure convective rainfall in the southwestern United States. *Water Resour. Res.*, 15(6): 1701-1711

PRAK, H., 1980.

Nadere uitwerking van een analytische correlatiefunctie tussen neerslag en afstand. Doctoraal scriptie Afd. Cultuurtechniek, LH-Wageningen, 57 pp

RODRÍGUEZ-ITURBE, I. and J.M. MEJÍA, 1974.

The design of rainfall networks in time and space. Water Resour. Res., 10(4): 713-728

RUMYANTSEV, V.A. and S.V. SHANOCHKIN, 1973.

Evaluation of the representativeness of the precipitation network in relation to the spatial interpolation of precipitation. Soviet Hydrology: Selected Papers, No. 3: 199-206

SHARON, D., 1972.

Spatial analysis of rainfall data from dense networks. Bull. IAHS, 17(3): 291-300

SHARON, D., 1974.

On the modelling of correlation functions for rainfall studies. J. Hydrol., 22: 219-224

SHAW, S.R., 1983.

An investigation of the cellular structure of storms using correlation techniques. J. Hydrol., 62: 63-79

STOL, PH.TH., 1972.

The relative efficiency of the density of raingage networks. J. Hydrol., 15: 193-208

STOL, PH.TH., 1981a.

Rainfall interstation correlation functions I. An analytic approach. J. Hydrol., 50: 45-71

STOL, PH.TH., 1981b.

Rainfall interstation correlation functions II. Application to three storm models with the percentage of dry days as a new parameter. J. Hydrol., 50: 73-104

STOL, PH.TH., 1982a.

Zero and less than zero response and some other topics in rainfall interstation correlation analysis - A review. Reports ICW, No. 1: 70 pp

STOL, PH.TH., 1982b.

Rainfall interstation correlation functions IV. On the occurrence of zero and less-than-zero response. J. Hydrol., 57: 1-21

STOL, PH.TH., 1982c.

The exponential storm model and its interstation correlation function.
Hydrol. Sci. J., 27 1, 3: 35-52

STOL, PH.TH., 1982d.

Een analytisch model voor het bepalen van de correlatiefunctie tussen neerslagstations op onderling toenemende afstand I. Het probleem en de hulpmiddelen ter oplossing. Cultuurtechn. Tijdschr. 21 nr. 3: 159-171

STOL, PH.TH., 1982e.

Een analytisch model voor het bepalen van de correlatiefunctie tussen neerslagstations op onderling toenemende afstand II. Toepassing op buimodellen. Cultuurtechn. Tijdschr. 21 nr 5: 287-299

STOL, PH.TH., 1983a.

Rainfall interstation correlation functions derived for a class of generalized storm models. Reports ICW, No. 7: 47 pp

STOL, PH.TH., 1983b.

Rainfall interstation correlation functions V. Analysis of m-rectangulair storm models. J. Hydrol., 62: 1-26

STOL, PH.TH., 1983c.

Rainfall interstation correlation functions VI. Application to the tri-rectangulair storm model. J. Hydrol., 62: 27-51

STOL, PH.TH., 1983d.

Rainfall interstation correlation functions VII. On non-monotonousness. J. Hydrol., 64: 69-92

STOL, PH.TH., 1984.

Conceptual rainfall interstation correlation research (concept)

YEVJEVICH, V. and A.K. KARPLUS, 1973.

Area-time structure of the monthly precipitation process. Colo. State Univ., Fort Collins, Colo., Hydrol. Pap. No. 64, 45 pp

II METEN VOOR WATERBEHEER

Voorjaarsbijeenkomst van de KIVI Sectie Waterbeheer

9 mei 1984 te Amersfoort

GEGEVENSVERZAMELING TEN BEHOEVE VAN PLANVORMING; ERVARINGEN UIT PAWN

ir. J.W. Pulles

SAMENVATTING

Voor het opstellen van de waterhuishoudkundige plannen dient men over een inzicht te beschikken in de fysische componenten van het systeem en de gevolgen van het te voeren beleid voor de bij de waterhuishouding betrokken belangen. Veelal wordt dit inzicht verkregen door gebruik te maken van allerlei min of meer ingewikkelde modellen. De analyse van de gevolgen voor de belangen stelt vaak geheel andere eisen aan de modellen en ook aan de invoergegevens dan die, welke voor de fysische componenten gebruikt worden.

Aandacht zal gegeven worden aan de verschillen en de overeenkomsten tussen beide soorten modellen en het type gegevens, dat men hiervoor nodig heeft. Meer in detail zal ingegaan worden op de ervaringen die er bij de PAWN-studie opgedaan zijn met het ijken van modellen voor fysische componenten van het waterhuishoudkundige systeem en de problemen die zich daarbij hebben voorgedaan.

Aan de hand van deze conclusie zullen enkele opmerkingen ten aanzien van de gegevensverzameling gemaakt worden.

1 INLEIDING

Onder het thema: "Meten in het waterbeheer" zijn op 9 mei 1984, in Amersfoort een zevental inleidingen gehouden. Hierbij werd ingegaan op een aantal zeer uiteenlopende onderwerpen.

In deze inleiding wordt ingegaan op het gebruik van de gegevens bij het beleidsvoorbereidende onderzoek. In dit artikel zullen, gebruik makend van de ervaringen bij de PAWN*-studie opgedaan, een aantal aspecten van dit type onderzoek met hun relaties tot de gegevensverzameling aan de orde komen. Hierbij zal ik me niet beperken tot de gebruikelijke modellering van het hydrologische systeem. Ook de zogenaamde sectorale modellen met hun eigen karakteristieke problemen, type invoergegevens en verificatiemethoden zullen hier aan de orde komen.

2 MODELLEN VOOR DE WATERHUISHOUDKUNDIGE PLANNEN

In de Ontwerp-wet op de Waterhuishouding en de nota: "De waterhuishouding van Nederland" is het begrip waterhuishouding gedefinieerd als: "de zorg voor het op en in de bodem vrij aanwezige water, zulks met het oog op de vele belangen die daarbij in het geding zijn". Hierbij dient onder het begrip zorg te worden verstaan, al dat handelen dat door een goede waterhuishouding noodzakelijk is. Het omvat het nemen van technische en beheerstechnische maatregelen, maar ook het uitvoeren van wettelijke maatregelen, zoals het afgeven van vergunningen en het opleggen van heffingen, valt hieronder.

Als gevolg van de Wet op de Waterhuishouding dient de overheid de wijze waarop zij van plan is om met het water om te gaan en de wijze waarop zij wenst dat anderen dat doen vast te leggen in een aantal plannen. Een goed plan dient in ieder geval twee elementen te bevatten. Enerzijds dient er een beschrijving van het waterhuishoudkundige systeem is opgenomen te worden. Dit omvat niet alleen een beschrijving van het fysieke systeem, maar ook de wijze waarop er met dit systeem onder normale en in extreme omstandigheden wordt omgegaan. Anderzijds moet in het plan ook duidelijk gemaakt worden welke gevolgen deze wijze van handelen voor de verschillende belangengroepen met zich meebrengt. Dit opdat het voor een ieder duidelijk wordt waarop hij in welke omstandigheden kan rekenen.

* PAWN: Policy-analysis for the watermanagement of the Netherlands. Dit onderzoek werd door de Rijkswaterstaat in samenwerking met de Rand Corporation en het Waterloopkundig Laboratorium in de periode 1976-1983 uitgevoerd.

De beschrijving van het functioneren van het waterhuishoudkundige systeem in de huidige situatie en onder normale omstandigheden is veelal bekend. Ervaring heeft geleerd hoe het beste met de bestaande middelen gehandeld kan worden. Complexe mathematische modellen zijn meestal voor het dagelijkse beheer niet nodig. Anders wordt het als er uitspraken gedaan moeten worden over toekomstige, dan wel buitengewone omstandigheden. Dan zal de hulp van het model vrijwel altijd noodzakelijk blijken.

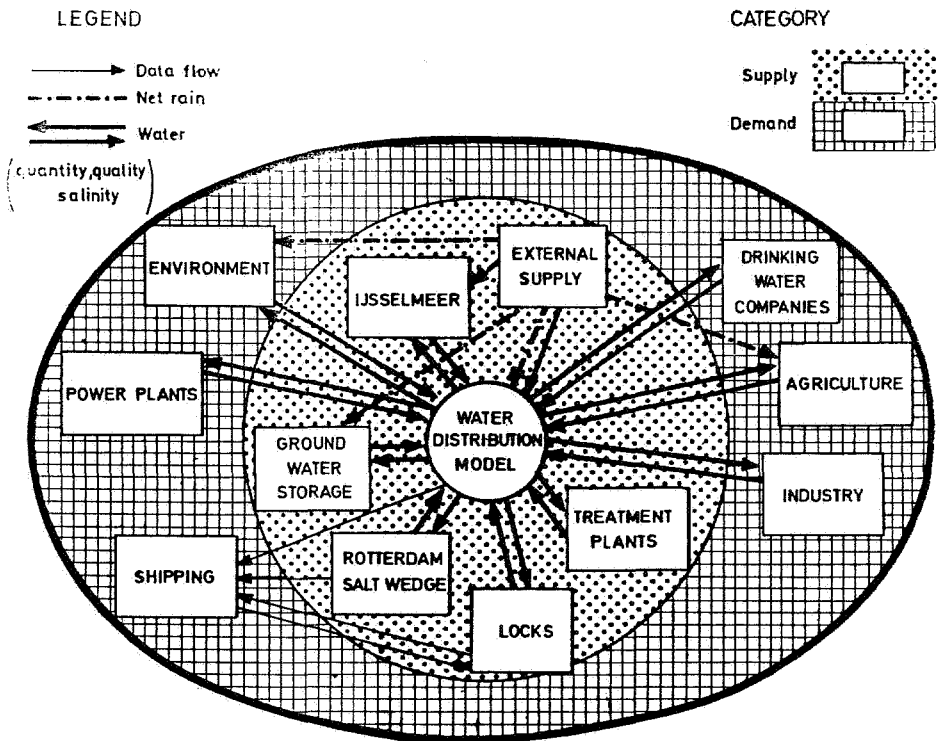
Ook het analyseren van de gevolgen voor de verschillende belangengroepen zal vaak met behulp van modellen moeten geschieden. De hieraan ten grondslag liggende redenen zijn:

- het inzicht in de gevolgen van een bepaald waterhuishoudkundig beleid voor de betrokken belangengroepen (sectoren) is vaak niet of slechts ten dele bij de waterbeheerder bekend;
- dit inzicht is vaak ook niet op een objectieve wijze bij de betrokken sector te verkrijgen. Veelal zijn ook hier de gevolgen niet of niet precies bekend en op grond hiervan zal men geneigd zijn de negatieve gevolgen te majoreren dan wel de positieve effecten te bagatelliseren.

Benadrukt moet worden, dat hier niet gepleit wordt om bij het opstellen van de waterhuishoudkundige plannen voor alle aspecten, maar rücksichtlos modellen toe te passen. Indien een beheerder van mening is dat hij een goed plan kan opstellen zonder hierbij maar één model te gebruiken, dan moet hij dat zeker doen. De ervaring leert echter dat een zekere modelmatige analyse, voorafgaand aan het opstellen van het plan, onvermijdelijk is. Welk deel van een plan op een modelmatige analyse gebaseerd zal zijn, zal van geval tot geval verschillen.

Ter verduidelijking van wat er hier onder modellen van het fysische systeem en wat er onder sectorale modellen verstaan wordt is in figuur 1 van het PAWN-systeem-diagram opgenomen. Hierin worden globaal de modelgroepen met hun onderlinge relaties aangegeven zoals die bij dit onderzoek zijn toegepast. In de buitenste elips zijn de modellen voor de beschouwde sectoren opgenomen. In de cirkel zijn de modellen voor de verschillende componenten van het fysische systeem aangegeven.

Bij het opstellen van de regionale plannen voor het waterbeheer zullen veel van de hier opgenomen componenten niet van belang zijn (model zouttong



Figuur 1

PAWN SYSTEM DIAGRAM

rijkswaterstaat

dir. waterhuishouding en waterbeweging

hoofdafdeling waterhuishouding

afdeling voorbereiding waterbeleid

get: mrt. '80
h.h. cohen

gez. 

gec. 

opdr. 

Fig. 1

A 4

Nr. 80.020

Nieuwe Waterweg). Twee onderdelen zullen echter altijd van belang zijn namelijk het waterverdelingsmodel voor de "lage" gronden en het grondwatermodel (voor de hoge gronden).

3 VERSCHILLEN EN OVEREENKOMSTEN VAN FYSISCHE EN SECTORALE MODELLEN

In tabel 1 zijn de belangrijkste karakteristieken van de modeltypen samengevat. Kenmerkend voor de sectorale modellen is hierbij dat het onderzoek is dat en gegevens bevat die niet tot het gebruikelijke ervaringsgebied van de waterbeheerder behoren. Om een inzicht te krijgen in de gevolgen voor de betrokken sectoren zal de waterbeheerder zich moeten verdiepen in de bedrijfsprocessen van deze sectoren. Hij dient zich daarbij te begeven op een terrein waar hij doorgaans geen expertise in huis heeft. Daarnaast blijkt dat de benodigde gegevens vaak moeilijk te verkrijgen zijn. Veelal stuit men op argwaan en vaak worden gegevens uit concurrentie-overwegingen niet of slechts indirect verstrekt. Soms zijn de benodigde gegevens geheel niet aanwezig, of zijn ze met de nodige onzekerheden behebt.

TABEL 1 OVEREENKOMSTEN EN VERSCHILLEN VAN

FYSISCHE MODELLEN	SECTORALE MODELLEN
1. Beschrijft het systeem - oppervlaktewater - kwantiteit - kwaliteit	1. Beschrijft het gedrag van of de gevolgen voor de sector
2. Bevat gegevens die tot de gangbare meetpraktijk van de beheerder behoren - grondwaterstanden - waterkwaliteitsgegevens - afvoeren - dwarsprofielen - capaciteiten	2. Bevat gegevens die <u>niet</u> tot de gangbare meetpraktijk van de beheerder behoren - bedrijfstechnische gegevens . opwekkingseenheden . soort schepen - economische gegevens
3. In Nederland vaak veel gegevens voorhanden	3. Benodigde gegevens vaak moeilijk te krijgen. Moeten uit statistieken komen, vaak geheim. Soms grove schattingen noodzakelijk
4. Gegevens redelijk betrouwbaar (?)	4. Veel onzekerheden omtrent de gegevens
5. Model geeft als uitvoer verdeling invoergegevens over tijd en plaats	5. Kosten spelen vrijwel altijd een grote rol en is één van de belangrijkste uitvoer componenten van het model
6. Toekomstige situaties zijn over het algemeen redelijk in te passen	6. Bepaling van effecten voor toekomstige situaties sterk afhankelijk prognoses
7. Weinig gevoelig voor veroudering	7. Als gevolg van de gele economische gegevens verouderen deze modellen snel
8. Voor ijking redelijk aantal gegevens voorhanden; geen problemen (?)	8. IJking aan de werkelijkheid soms onmogelijk geen gegevens

Bij de sectorale modellering spelen kosten vrijwel altijd (in ieder geval voor de harde sectoren, zoals drinkwatervoorziening, landbouw, scheepvaart en industrie) een belangrijke rol. Als gevolg van de vele economische parameters, die de sectorale modellen bevatten hebben ze de neiging veel sneller te veranderen dan de modellen die bij de beschrijving van het fysische systeem gebruikt worden. Veel werk zal dan ook nodig zijn om de sectorale modellen, als ze eenmaal gemaakt zijn, up-to-date te houden.

In de tabel is een scherp onderscheid tussen beide typen modellen gemaakt. In de praktijk is de scheiding niet zo duidelijk. Bij de bepaling van de landbouw waterbehoeften en de schade die de landbouw ondervindt, is bij de PAWN-studie een model gebouwd dat een sterk fysisch karakter had.

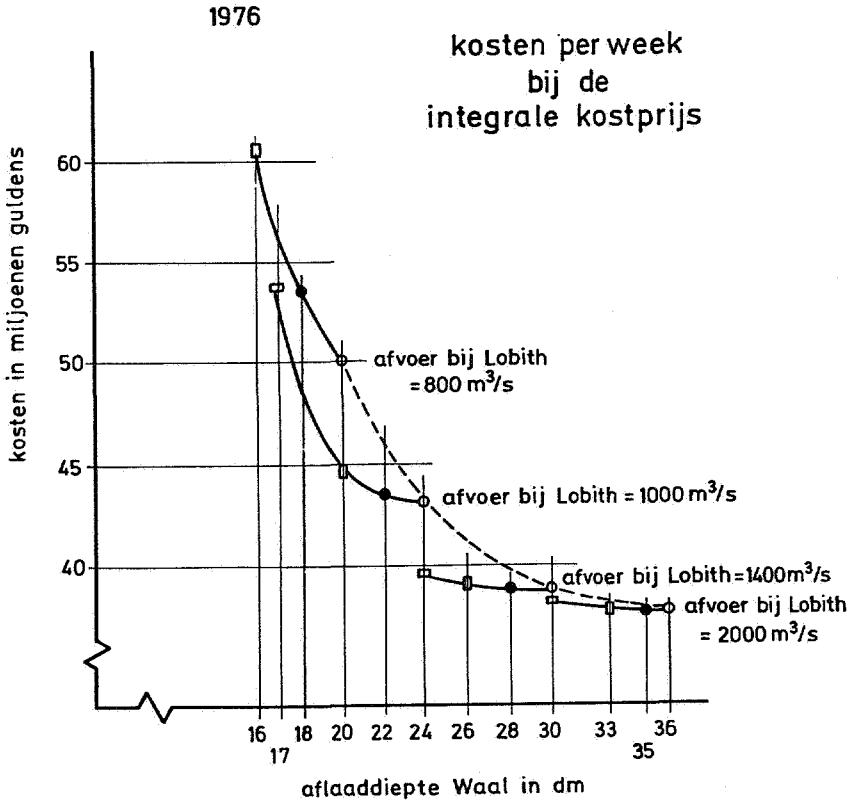
Het bovenstaande kan geïllustreerd worden aan de hand van een voorbeeld uit de PAWN-studie. Hiervoor zal de modellering van een deel van de scheepvaart problematiek worden gebruikt.

In de waterhuishouding bestaat een aantal afwegingsproblemen. Eén ervan ontstaat bij het onttrekken van water aan de grote rivieren. Door deze onttrekking neemt de voor de scheepvaart beschikbare waterdiepte af. Enerzijds daalt de waterspiegel als gevolg van de vermindering van de afvoer. Anderzijds ontstaat er bij een voortgezette onttrekking aanzanding in de rivier.

Om de schade te bepalen, die hierdoor bij de scheepvaart te weeg gebracht wordt, zijn de volgende analyses verricht:

- aan de hand van de scheepvaarttellingen die het CBS jaarlijks verricht is de structuur van het vervoer bepaald. Hierbij ging het om wat wordt er met welke schepen van waar naar waar vervoerd;
- met dezelfde gegevens en het Rijnschepenregister is het beschikbare aantal schepen, hun omvang (tonnage/klasse), type en diepgang bepaald. Vervolgens is met de gegevens van de scheepsmetingendienst in Rotterdam een relatie tussen de diepgang en de beladingsgraad ontwikkeld;
- aan de hand van een enquête en enkele boekhoudingen van rederijen zijn de kosten per tijdseenheid afgeleid. Deze gegevens waren confidentieel en werden slechts aan het onderzoeksinstituut afgestaan (Economisch Bureau voor het Weg- en Watervervoer);

- met de hierboven verzamelde resultaten zijn modelberekeningen opgezet. Het model berekende voor verschillende afvoer- en onttrekkingssituaties onder andere de goedkoopste route, de duur van de reizen, het aantal reizen en de kosten. Een voorbeeld van deze reiskosten zijn is in figuur 2 opgenomen.



Figuur 2

dit voorbeeld illustreert dat, wil de waterbeheerder een evenwichtige belangenafweging maken, hij onherroepelijk het gebied, waarop hij kennis vergaard en (meet)gegevens verzamelt dient te verbreden.

Dan een enkele opmerking ten aanzien van de ijking dan wel verificatie van de sectorale modellen. In tabel 1 is gesteld dat dit vaak onmogelijk is. Bij de bepaling van de scheepvaartkosten als gevolg van onttrekkingen aan de grote rivieren heeft wel, zij het een indirecte, verificatie van de betrouwbaarheid van de resultaten plaatsgevonden.

Uitgaande van de vervoersomstandigheden in een situatie met voldoende diepgang is met het model het aantal schepen dat er in de laagwater situatie van 1976 zou hebben moeten varen bepaald. Deze resultaten zijn op een aantal plaatsen vergeleken met het werkelijk aantal schepen dat toen deze punten passeerden. Zoals uit tabel 2 blijkt komen deze resultaten bij Lobith redelijk met de werkelijkheid overeen.

TABEL 2 VERGELIJKING TUSSEN HET BEREKENDE AANTAL EN DE WAARGENOMEN SCHEPEN IN DE GEMIDDELDE WEEK VAN JULI 1976 TE LOBITH

Laadvermogen in ton Klasse	Aantal schepen		Afwijking
	Waargenomen	Berekend	
50 - 200	221	227	+ 2.7
201 - 450	1 494	1 487	- 0.4
451 - 750	1 290	1 289	- 0.1
751 - 1 150	1 241	1 209	- 2.6
1 151 - 1 550	749	735	- 1.9
1 551 - 2 250	637	641	- 0.6
> 2 251	216	271	+ 25.5

Een uitzondering wordt hierbij gevormd door de duwbakken. Hier komt een praktisch "meet"-technisch probleem naar voren. Daar de in- en uitklaringsdocumenten voor deze schepen tegenwoordig in de haven van vertrek in orde worden gemaakt, is de grenscontrôle vervallen. Hierdoor blijft de registratie bij Lobith vaak ook achterwege en verliezen de basisgegevens hun betrouwbaarheid.

Ongelukkiger wijze bepalen deze diepstekende schepen wel een belangrijk deel van de extra scheepvaartkosten. Zij worden het eerst door de lage

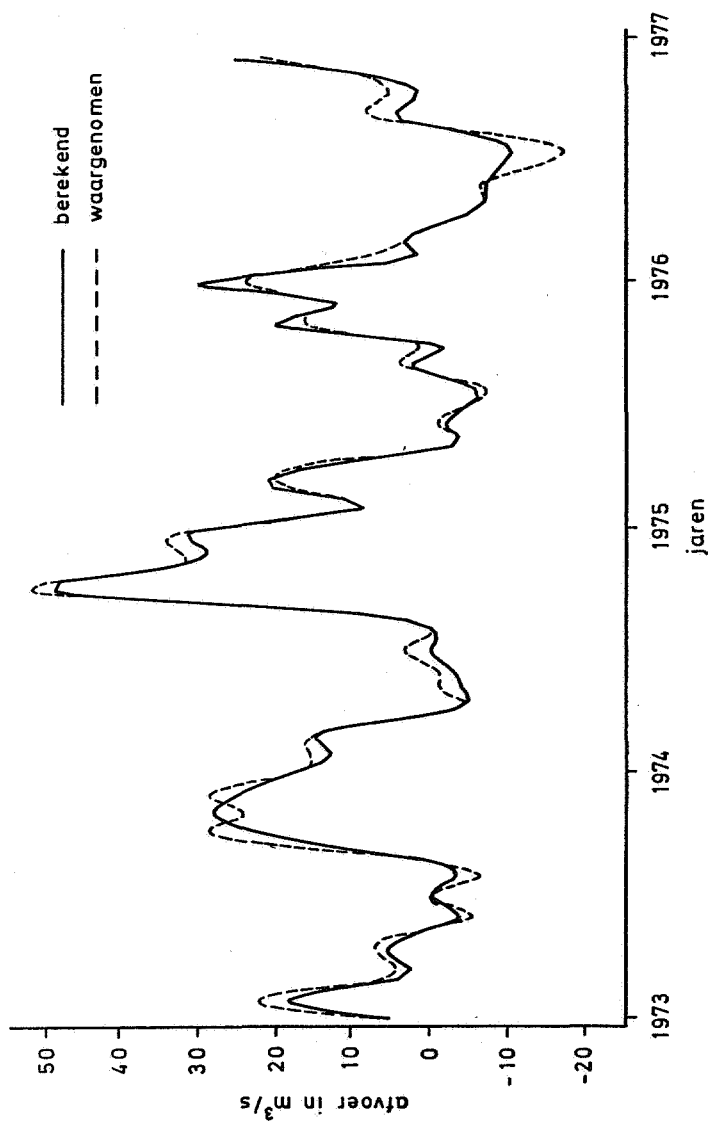
waterstanden getroffen en zij verzorgen een belangrijk deel van het totale transport. Hierdoor blijft de waarde van deze enig mogelijke verificatie van de modelresultaten maar beperkt.

Dit soort problemen is er vaak de oorzaak van dat de waarde van deze sectorale modellen voor de beleidsvoorbereiding vaak betwist wordt. Toch is dit onterecht en hier ligt dan ook het grote verschil tussen het beleidsanalytische en het meer wetenschappelijke onderzoek. In de praktijk worden er beslissingen genomen ook al is er onvoldoende informatie beschikbaar. In 1976 werd naar beste weten het toen beschikbare water over Nederland verdeeld, vaak zonder dat de gevolgen voor de belanghebbenden konden worden overzien. De sectorale modellen bundelen alle beschikbare informatie en rangschikken deze op een zodanige wijze dat de beslissingen gestructureerder genomen kunnen worden. Men weet waar de zwakke plekken zich bevinden. Gevoeligheidsanalyses kunnen het effect hiervan op de beslissing aangeven. Soms blijkt uit het onderzoek dat de betreffende onzekerheden niet van invloed op de te nemen beschikking zijn. Verdere studie, hoewel dit wetenschappelijk gezien nog zo relevant kan zijn, is hier dan overbodig.

In die gevallen waar de betreffende onzekerheid wel relevant voor de te nemen beslissing blijkt, weet men door de toepassing van de sectorale modellen, waarover men in feite beslist en kan men afschatten wat de gevolgen van de betreffende onzekerheden zijn. De goede gok uit het verleden is omgezet in een meer afgewogen beslissing.

4 VERIFICATIE VAN EEN VAN DE FYSISCHЕ MODELLEN AAN DE HAND VAN MEETGEGEVENS

In tabel 1 is gesteld dat de basisgegevens voor de fysische modellen in Nederland redelijk betrouwbaar zijn. Dit is over het algemeen juist. Maar dat de weg ook hier niet over rozen gaat moge uit het volgende voorbeeld blijken.



Figuur 3 Vergelijking berekende en waargenomen lozingen en onttrekkingen van het district Rijnland

Voor de bepaling van de landelijke waterbehoeften is bij de PAWN-studie het model Distag* ontwikkeld. Dit model bepaald onder andere aan de hand van een waterbalans per tiendaagse periode de waterbehoeften danwel de waterafvoer voor 78 waterhuishoudkundige eenheden (districten). De uitkomsten van het model zijn geverifieerd aan de hand van waarnemingen.

Voor de lagere gebieden van Nederland waren hiervoor voldoende gegevens voorhanden en het model representeerde de werkelijkheid redelijk (zie figuur 3). Bij de gebieden op de hogere gronden ontstonden ten aanzien van de afvoeren een discrepantie tussen de berekende en waargenomen afvoeren. Door enkele kleinere wijzigingen in het model aan te brengen kon een redelijke representatie van de werkelijkheid worden verkregen. In dit artikel zal hier niet op ingegaan worden. Hiervoor wordt verwezen naar de documentatie van de PAWN-studie*. Hier zal aandacht gegeven worden aan enkele problemen, die zich bij de verstrekte basisgegevens voordeden.

Het Distagmodel bepaalt de waterbalans voor een district. Dit is een gebied ter grootte van een wat groter waterschap (Berkel, Rijnland etc.). Bij het verzamelen van de gegevens voor de hoge gronden bleek het voor wat de afvoeren betrof, vrijwel onmogelijk om voldoende gegevens voor een sluitende waterbalans bijeen te krijgen. Steeds bleek er op deze schaal wel één of ander beekje, afleidingskanaal of sluisje met een toch vrij substantiële afvoer niet gemeten te worden. Ook noodoverlaten zoals bij het Twenthe-kanaal en automatisch werkende inlaatmogelijkheden werden zelden gemeten.

Naast deze problemen met betrekking tot de beschikbaarheid van de gegevens bestonden er ook veelal problemen ten aanzien van de betrouwbaarheid. Veelal werd er bij het verstrekken van het materiaal een begeleidend commentaar geleverd.

* Voor een uitgebreide beschrijving van dit model wordt verwezen naar Volume XII: "Model for regional hydrology, Agricultural water demands and damages from drought and salinity". (Rand N 1500-12).

Zo werd onder andere het volgende naar voren gebracht:

- sommige reeksen waren niet homogeen omdat er ruilverkavelingen en beekverbeteringen hadden plaatsgevonden.
- sommige reeksen waren niet betrouwbaar omdat het meetpunt bij nader inzien niet zo gelukkig gekozen bleek. Als gevolg van opstuwning door een lager gelegen waterlichaam was de Q/h-relatie in feite niet betrouwbaar.
- andere reeksen waren niet betrouwbaar meer, doordat er als gevolg van uitvoering van de zuiveringstechnische werken thans weer begroeiing in de rivier aanwezig was. Hierdoor was 's zomers de Q/h-relatie niet juist meer en werden te grote afvoeren gemeten.

Door deze problemen werd het verifiëren van de modelresultaten op deze schaal bijzonder moeilijk. Slechts in enkele gebieden was voldoende betrouwbare informatie voorhanden om een redelijke controle te kunnen uitvoeren. Met deze gegevens en met enkele grove controles, zoals het verschil in afvoer tussen Borgharen en Lith bij de Maas moest worden volstaan. Aan de hand hiervan is besloten om op enkele plaatsen op de hoge gronden enkele kleine aanpassingen te doen.

5 RESUME

De knelpunten van dit artikel kunnen in de volgende stellingen samengevat worden:

1. In de praktijk zullen er altijd bepaalde beslissingen genomen worden. Dit soms ondanks een beperkt inzicht in de gevolgen van deze beslissing. Modellen, hoe grof ook en hoe onzeker de basisgegevens, kunnen desondanks bij deze beslissingen een hulpmiddel zijn, mits men de onzekerheden maar in beschouwingen betreft.
2. Meetgegevens (afvoeren) die het niet mogelijk maken om een sluitende waterbalans van een afwateringseenheid te maken, hebben meestal voor een beleidsonderbouwende analyse weinig waarde.
3. Meetgegevens waarvan bekend is dat zij onbetrouwbaar zijn, hebben voor de planvorming en het waterbeheer nauwelijks enige waarde. Men kan zich afvragen wat de zin van het voortzetten van dergelijke reeksen is.

Literatuur.

1. The RAND-corporation (1981-1983) Policy Analyses of the Watermanagement for the Netherlands.

Volumes I-XV. The RAND-corporation - Santa Monica, California, U.S.A.

2. ir. J.W. Pulles.

Een beleidsanalyse voor de waterhuishouding van Nederland, (verschijnt 1985). Rijkswaterstaat/Staatsuitgeverij 's-Gravenhage.

KWANTITEITSMETINGEN OP VASTE MEETOPSTELLINGEN IN RIJKSWATEREN.

Ir. H.W.M. Bots

1. INLEIDING

Water speelt van oudsher een belangrijke rol in de Nederlandse samenleving. Vormde in vroeger jaren de strijd tegen het water de voornaamste zorg, in de laatste decennia is het waterbeheer zich steeds meer gaan richten op het voorzien in de behoefte aan water.

Voor beide soorten waterbeheer bestaat er bij de gebruikers van de meetgegevens de behoefte aan voldoende en vaak snel ingewonnen informatie. Deze behoefte aan informatie kan worden onderscheiden in een drietal aspecten.

Op de eerste plaats is dat het operationeel waterbeheer. Met snel ter beschikking staande informatie moet niet alleen door middel van de in het waterhuishoudkundige stelsel aanwezige regelmogelijkheden de actuele situatie worden beheerd. Ook dient adequaat te worden gereageerd onder bijzondere omstandigheden. Bij stormvloeden of hoge oppervlatafvoeren ontstaat er een geweldige informatiebehoefte omdat er onder zulke omstandigheden veiligheid en economische belangen afhangen van de beheersmaatregelen die er genomen worden.

Het algemene kenmerk van het operationeel waterbeheer is dat de gegevens snel tot vrij snel ter beschikking dienen te staan en dat er geen of slechts globale aandacht kan worden geschonken aan de controle op juistheid van het meetgegeven. Hoge eisen worden daarom gesteld aan de te gebruiken meetapparatuur.

Het tweede aspect dat bij de informatiebehoefte kan worden onderscheiden is het onderzoek. Een groot aantal gegevens afkomstig van veel meetpunten en zich uitstrekkend over lange tijd is nodig voor beleidsanalytische, hydrologische en waterloopkundige studies.

De informatiebehoefte voor het onderzoek kenmerkt zich door het feit dat de gegevens niet direct beschikbaar behoeven te zijn en door het feit dat er grote waarde gehecht wordt aan de juistheid van het gegeven. Dit betekent dat over het algemeen het meetgegeven wordt gecontroleerd voordat het voor gebruik ter beschikking gesteld wordt.

Het derde aspect tenslotte dat bij de informatiebehoefte onderscheiden kan worden is de waterstaatkundige beschrijving. In het Koninklijk Besluit uit 1971 aangaande de uitvoering van de Waterstaatswet 1900, het zogenaamde Organiek Besluit Rijkswaterstaat, staat onder andere als een van de taken van de Rijkswaterstaat genoemd: het verzamelen van gegevens voor de kennis van de waterstaatkundige toestand van het land. Het

gaat bij het verzamelen van deze gegevens met name om het opbouwen van éénduidige en betrouwbare gegevensreeksen over lange perioden, die het historisch basismateriaal vormen voor vele onderzoekingen zoals genoemd onder het vorige aspect. De gegevensbehoefte voor de waterstaatkundige beschrijving kenmerkt zich door het feit dat deze gegevens niet direct beschikbaar behoeven te zijn, maar dat ze wel éénduidig dienen te zijn.

Voor het beheer dat door de Rijkswaterstaat wordt gevoerd worden metingen verricht. Hierbij wordt gebruik gemaakt zowel van schepen, vliegtuigen als van vaste meetopstellingen. Ook worden er veel soorten metingen uitgevoerd, golfmetingen, peilingen, dichtheidsmetingen etc.

In dit artikel zal aandacht worden besteed aan een aantal waterkwantiteitsmetingen vanaf vaste meetopstellingen in de wateren behorende tot de landelijke hoofdinfrastructuur.

Hieronder wordt verstaan: de grote rivieren: de Rijn en haar zijtakken en de Maas
het IJsselmeer
het noordelijk en zuidelijke deltabekken
de Westerschelde
de kust en de Waddenzee.

2. WATERSTANDEN

Als eerste en meest omvangrijke meetinspanning zal hieronder nader worden ingegaan op de waterstandsmetingen. Voor het beheer ten behoeve van de 3 eerder genoemde aspecten wordt op ca. 140 punten de waterstand gemeten. Een toenemende gegevensbehoefte die algemeen aanwezig is deed in de loop der jaren het aantal meetpunten steeds meer toenemen. Een verschuiving is hierbij opgetreden van aflezing van peilschalen, via continue registratie op papier op de meetplaats naar digitale of analoge real-time presentatie van het meetgegeven bij de gebruiker.

De exploitatie- en investeringskosten van het waterstandsmeetnet namen in de loop der jaren zodanig toe, dat er behoefte ontstond aan een theorie ter bepaling van een optimaal peilmeetnet. Eind van de zeventiger jaren is er door ir. J.W. van der Made een dergelijke theorie ontwikkeld op basis waarvan het peilmeetnet in de genoemde gebieden wordt bekeken. Aan deze optimalisatietheorie liggen een aantal uitgangspunten ten grondslag:

- er kan alleen worden geoptimaliseerd aan de hand van beschikbare gegevens. De methode is dus niet geschikt voor het ontwerpen van een peilmeetnet in een gebied waarvan gelijktijdig gemeten gegevens niet voor handen zijn. Het peilmeetnet in het toekomstige Zoommeer zal daarom voorlopig bestaan uit tijdelijke opstellingen en nadat circa 1 jaar waarnemingen voor handen zijn zal dit tijdelijke net geoptimaliseerd worden;
- de standaardmeetafwijking van een peilmeetopstelling.
Door de Rijkswaterstaat zijn de eisen waaraan een peilmeet-

opstelling moet voldoen vertaald in ontwerpcriteria. Uit onderzoekingen van het peilmeetnet langs de IJssel is gebleken dat de standaardmeetafwijking varieert tussen 1,14 en 2,41 cm. Op basis van dit onderzoek is de maatgevende waarde voor de standaardmeetafwijking van rivierpeilmeetstations vastgesteld op 2,5 cm, een waarde die ook voor getijmeetstations als criterium gehanteerd kan worden, zoals uit nader onderzoek bleek.

In de ontwikkelde theorie wordt nu gekeken of de gemeten waarde in een bepaald peilmeetstation ook met een vastgestelde nauwkeurigheid kan worden berekend uit de omliggende peilmeetstations. Als maat voor de nauwkeurigheid van de berekening wordt de standaardafwijking genomen tussen de berekening wordt de standaardafwijking genomen tussen de berekende waterstand en de ter plaatse gemeten waterstand. Als gesteld wordt dat de geïnterpoleerde, dat is de berekende waterstand, een nauwkeurigheid dient te hebben van een standaardafwijking van 2,5 cm, dan kan worden afgeleid dat de standaardafwijking tussen de geïnterpoleerde waterstand en de gemeten waterstand gelijk is aan $\sqrt{2,5^2 + 2,5^2} = 3,5$ cm.

Deze maat van 3,5 cm is de basis geworden voor de optimalisatie. Bekeken wordt van ieder bestaand peilmeetpunt of het berekend kan worden uit de omliggende punten met een standaardafwijking die kleiner is dan 3,5 cm. Zo ja, dan kan dat peilmeetstation opgeheven worden. In het andere geval moet het station gehandhaafd blijven. Bij het optimaliseren moet bovendien nog rekening gehouden worden met het gegeven dat op splitsingspunten van een waterloop altijd een peilmeetpunt moet komen, evenals aan het begin en het eind van een waterloop.

Het resultaat van deze optimalisatie berekeningen wordt de toetsing van het meetnet genoemd en wordt voorgelegd aan de regionale directies in het betreffende gebied. Vanwege belangen voor het operationeel beheer hebben zij soms voorkeur voor het handhaven van bepaalde peilmeetpunten, die volgens de optimalisatieberekeningen opgeheven kunnen worden.

Theoretisch gezien is dit net voldoende. Immers we zijn hiermee in staat de waterstand in ieder punt van een waterloop te berekenen met een standaardafwijking kleiner dan 3,5 cm. De beperking hierbij is wel dat in zo'n punt eerst gedurende één jaar de waterstand gemeten moet zijn om de coëfficiënten te bepalen, die de relatie vastleggen met de omliggende waterstandsmeetpunten.

In de praktijk wordt niet volstaan met alleen een net van kernmeetstations. De volgende redenen zijn aan te geven waarom tussen kernmeetstations extra meetpunten nodig zijn:

- om bij eventueel uitvallen van een kernmeetstation achteraf de waterstand te kunnen bijgissen. Een kernmeetstation heeft een grote bedrijfszekerheid, maar als zo'n station uitvalt, is de waterstand uit alleen de omliggende kernmeetstations, niet nauwkeurig genoeg bij te gissen om een continue reeks met dezelfde nauwkeurigheid te kunnen waarborgen;
- om onder uitzonderlijke omstandigheden de situatie langs de rivieren of de kust met voldoende nauwkeurigheid te kunnen

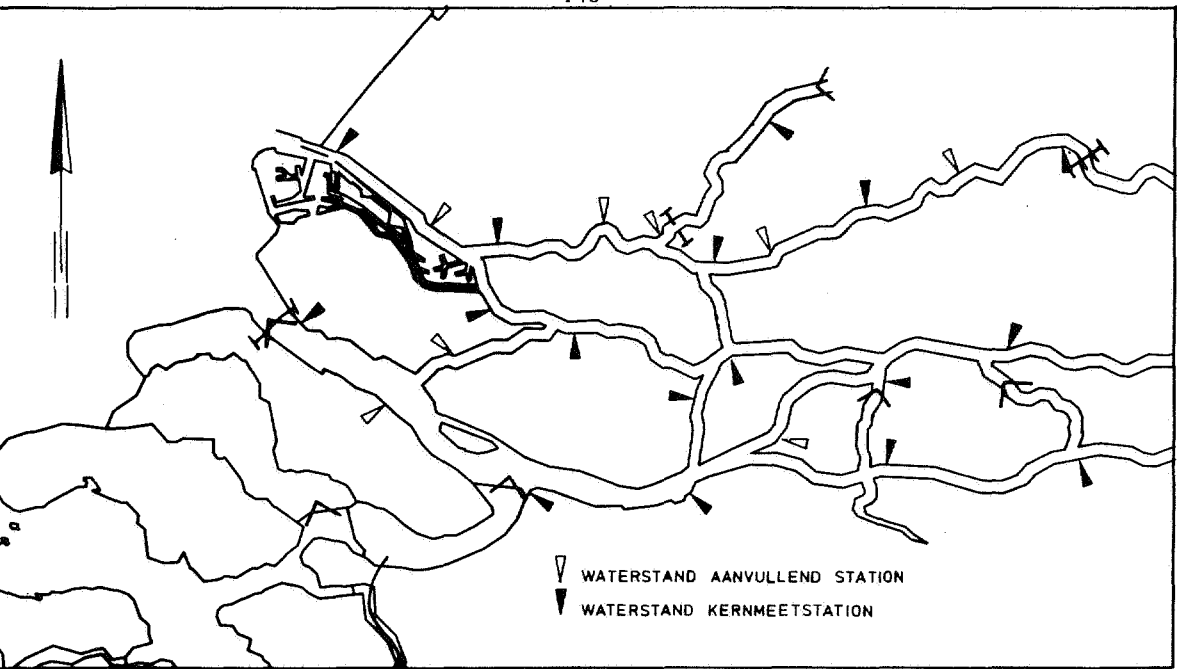


FIG. 1 VASTGESTELD PEILMEETNET IN HET NOORDELIJK DELTABEKKEN

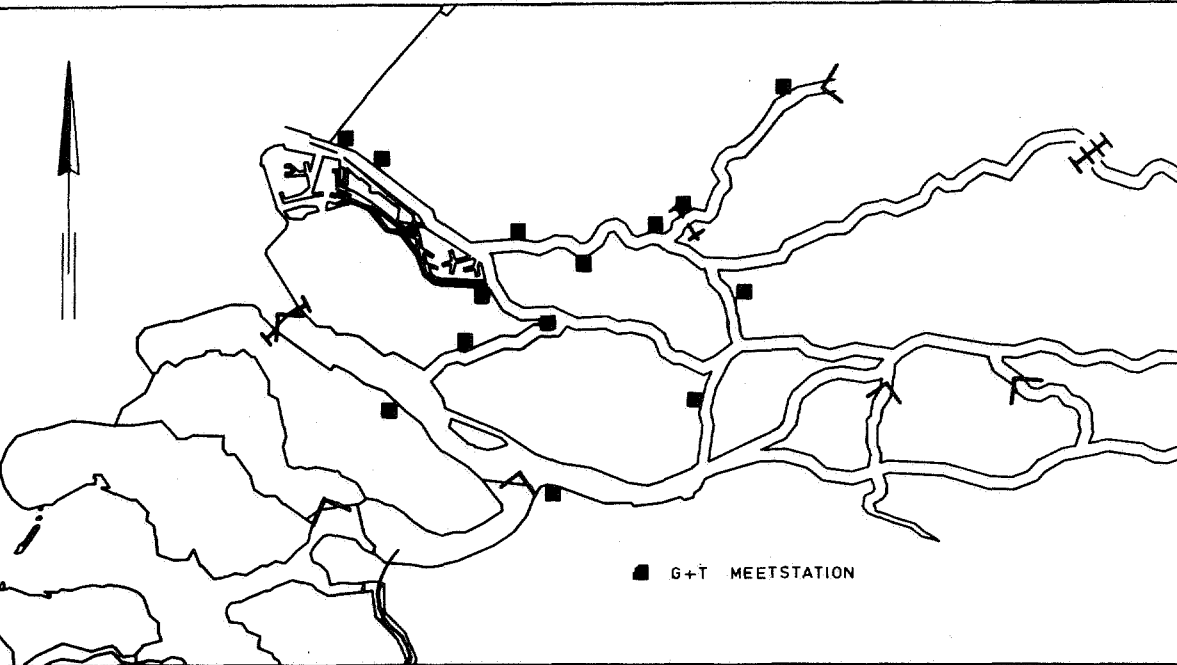


FIG. 2 ZOUTMEETNET IN HET NOORDELIJK DELTABEKKEN

vastleggen. Met alleen kernmeetstations is de bestaande interpolatietechniek voor deze omstandigheden niet voldoende, en

- om de meetgegevens van kernmeetstations te kunnen controleren. Met alleen kernmeetstation is het niet mogelijk om te kunnen controleren of een kernmeetstation de veronderstelde nauwkeurigheid van 2,5 cm standaardmeetafwijking haalt.

De hierboven opgesomde redenen maken het duidelijk dat niet volstaan kan worden met incidentele metingen in tussen kernmeetstations gelegen punten, maar dat daar continu gemeten moet worden. Deze tussenliggende stations worden aangeduid met de naam aanvullende stations.

Aan kernmeetstations worden hoge eisen gesteld wat betreft de beschikbaarheid voor het operationeel waterbeheer en wat betreft de nauwkeurigheid voor de waterstaatkundige beschrijving en voor onderzoek. De standaard kernmeetstations hebben de volgende kernmerken:

- het is een walstations dat i.v.m. vorstbestendigheid rondom aangeaard is
- het heeft een peilkelder van 2m x 2m met horizontale toevoerleiding,
- een meetkamer boven de peilkelder van 3,5 m x 3,5 m,
- een nulpaal die op het pleistoceen is gefundeerd voor een goede nulpuntshandhaving en
- een peilmeetinstrument van het vlotter-type met continue registratie.

Uit hetgeen over aanvullende stations is gezegd kan worden afgeleid, dat de beschikbaarheid geringer mag zijn, en dat ook de meetfrequentie aanzienlijk lager kan liggen. In het riviereengebied en merengebied bestaat een aanvullend station dan ook uit een peilschaal, die éénmaal per dag om 8 uur 's morgens wordt afgelezen. In het getijdegebied daarentegen zullen de aanvullende stations uitgerust moeten zijn met registratie-apparatuur, zodat deze stations dezelfde meetfrequentie hebben als kernmeetstations. Dit leidt tot in het water geplaatste stalen meetpalen met een walpost als registratieruimte en een meetinstrument van het vlottertype. Als voorbeeld wordt in figuur 1 het vastgestelde meetnet in het noordelijk deltabekken gegeven.

In het hiervoor gaande is aangegeven hoe voldaan kan worden aan de eis van hoge beschikbaarheid en hoge nauwkeurigheid van het kernmeetnet. Nog niet is aangegeven hoe de snelle gegevensverschaffing voor het operationeel waterbeheer gerealiseerd wordt. Gedacht moet worden aan een presentatiesnelheid, dat is de tijd tussen inwinning en presentatie bij de gebruiker, in de orde van minuten. Om hieraan te voldoen beschikt de Rijkswaterstaat over het zogenaamde T.H.W.-net. De waterstand wordt via telefoonhuurlijnen als analoog signaal gepresenteerd bij de gebruiker. Van circa 50 meetpunten worden de gegevens ter beschikking gesteld. Het is een zeer bedrijfszeker on-line informatiesysteem, maar het signaal is niet om te zetten in een digitaal signaal voor verdere verwerking in de computer.

De operationele gegevensbehoefte is over het algemeen slechts

gedurende een beperkte tijd per jaar aanwezig, doch de gehele tijd wordt de waterstand via een dure PTT-telefoonlijn gepresenteerd bij de gebruiker. Het waterstandssignaal wordt ook ter beschikking gesteld aan niet-rijkswaterstaatsdiensten. Tot 1 januari 1984 gebeurde dit voor niets. De hoge exploitatiekosten en de kortingen op het budget noopte de Rijkswaterstaat om vanaf genoemde datum de exploitatiekosten in rekening te brengen.

Het bestaande T.H.W.-net wordt niet verder uitgebreid, daar op korte termijn overgestapt zal worden van de huidige mechanisch peilmeetapparatuur naar digitale peilmeetapparatuur, die eveneens van het vlotter type is. Het grote voordeel van dit apparaat is dat er minder bewegende onderdelen zijn en dat er een digitaal signaal afgegeven wordt.

3. GELEIDENDHEIDS- EN TEMPERATUURMETINGEN

Het tweede type metingen dat in genoemde wateren vanaf vaste meetpunten wordt verricht zijn de geleidendheids- en temperatuurmetingen. De combinatie van deze twee parameters levert de zoutconcentratie. In tegenstelling tot het peilmeetnet is het nog niet mogelijk met statistische berekeningsmethoden de optimalisatie van het zoutmeetnet uit te voeren. De kennis van het gebied en het type probleem waarvoor men gesteld is, bepaalt de plaats van de meetpunten. In twee gebieden op dit moment speelt het zout een belangrijke rol in het waterbeheer, te weten het Noordzeekanaal en het noordelijk deltabekken. In een later stadium komt daar nog bij het zoutmeetnet in het Zoommeer. Het zoutmeetnet Noordzeekanaal is op de eerste plaats nodig voor het operationeel waterbeheer en bestaat uit 5 meetpunten langs het kanaal.

Dit net wordt op het moment gebouwd, met als kenmerk operationele digitale presentatie van de gegevens op het gemaal in IJmuiden en bij de inhoudelijke beheerder van het meetnet in Lelystad.

Het zoutmeetnet noordelijk deltabekken bestaat al langer, maar de gegevens zijn op een paar punten na niet operationeel beschikbaar, terwijl voor het leveren van randvoorwaarden voor operationele modellen deze gegevens in digitale vorm real-time nodig zijn. Ook voor bijzondere omstandigheden, d.w.z. lage oppervlaktewaterafvoer is operationele informatie i.v.m. het verziltingsgevaar noodzakelijk. Machtiging is ontvangen om ook dit zoutmeetnet, dat met enige meetpunten wordt uitgebreid voor operationeel gebruik, geschikt te maken.

In figuur 2 is het locatieplan van het Zoutmeetnet Zuidwest gegeven. Doordat er in verband met gelaagdheidsverschijnselen in de meeste punten op meerdere hoogten in de vertikaal gemeten moet worden is het aantal zoutconcentraties dat uiteindelijk bepaald wordt ca. 30.

Op de meetplaats zal de geleidendheid en de temperatuur in digitale vorm worden vastgelegd. De vaststelling van het zoutgehalte vindt niet op de meetplaats plaats, omdat er geen eenduidige relatie is tussen geleidendheid en temperatuur. Per meetpunt of groep van meetpunten gelden verschillende be-
trekkingslijnen die ook in de tijd kunnen veranderen.

4. AFVOERMETINGEN

Het derde type metingen zijn de afvoermetingen. Op diverse plaatsen wil men de afvoeren kennen zoals aan de grenzen van het land om te weten wat er binnenkomt, op de splitsingspunten, op de plaatsen waar het water overgaat naar een ander waterhuishoudkundig systeem, daar waar het water het land verlaat en op de plaatsen waar kwaliteitsmeetstations staan, voor de bepaling van vrachten.

Vanouds gebeurt de bepaling van de afvoeren in rivieren door middel van de Q-h-relatie. Voor sluizen en stuwen wordt de afvoer vanouds bepaald via vervalmetingen, klepstanden en afvoercoëfficiënten. Nadeel is de onnauwkeurigheid van dit soort metingen.

Sinds het midden van de zeventiger jaren is gewerkt aan een manier om het debiet op een directe wijze te meten. De oplossing is gevonden in een akoestisch debietmeetsysteem. Bij dit systeem wordt het debiet bepaald uit vermenigvuldiging van de akoestisch gemeten watersnelheid en het doorstromingsoppervlak. Het grote voordeel van deze methode is dat de methode nauwkeurig is, geschikt is voor de debieten van 10 tot 30.000 m³/s en dat op de meetplaats zelf direct beschikt wordt over een nauwkeurig debietgegeven, dat ook voor operationeel gebruik via telemetrielijnen overal gepresenteerd kan worden.

De beperkingen van het systeem zijn dat:

- er geen luchtbellen ingesloten mogen zijn, waardoor het meten bij overlaten en spuirollen vaak niet mogelijk zal zijn.
- de waterbreedte is beperkt van 0 tot 500 m.

Sinds 1980 is de door hoofdafdeling Hydro-Instrumentatie van de directie Waterhuishouding en Waterbeweging gestimuleerde ontwikkeling van dit systeem operationeel en sinds 1982 in produktie bij Stork. Op 7 plaatsen is een dergelijke systeem nu geïnstalleerd.

5. INFORMATIESYSTEEM

Ten behoeve van het beheer bestaat er bij de beheerders een grote informatiebehoefte, die zowel langzaam als snel kan zijn. We zien hier wel dat er een steeds toenemende behoefte ontstaat om van steeds meer punten voor het operationele waterbeheer snelle informatie te verkrijgen. Via meetsystemen voor de afzonderlijke parameters wordt daar tot nu toe zoveel mogelijk in voorzien, ik noem hierbij het T.H.W.-net. Voor een integraal waterbeheer is het noodzakelijk dat de beheerder de kwaliteit en kwantiteitsgegevens op dezelfde wijze ter beschikking krijgt en dat de gegevens voor verdere bewerking op elkaar afgestemd zijn. In 1973 is daarom besloten te komen tot een landelijk waterkundig informatiesysteem, het z.g. LAWIS. Voordat er een dergelijk systeem gebouwd kan worden, waarop ca. 200 meetpunten en een groot aantal gebruikers aangesloten dienen te worden is besloten eerst een proefmeetnet te realiseren, met als doel:

- ervaring op te doen met de opzet en het gebruik van geavanceerde meetsysteemvoorzieningen

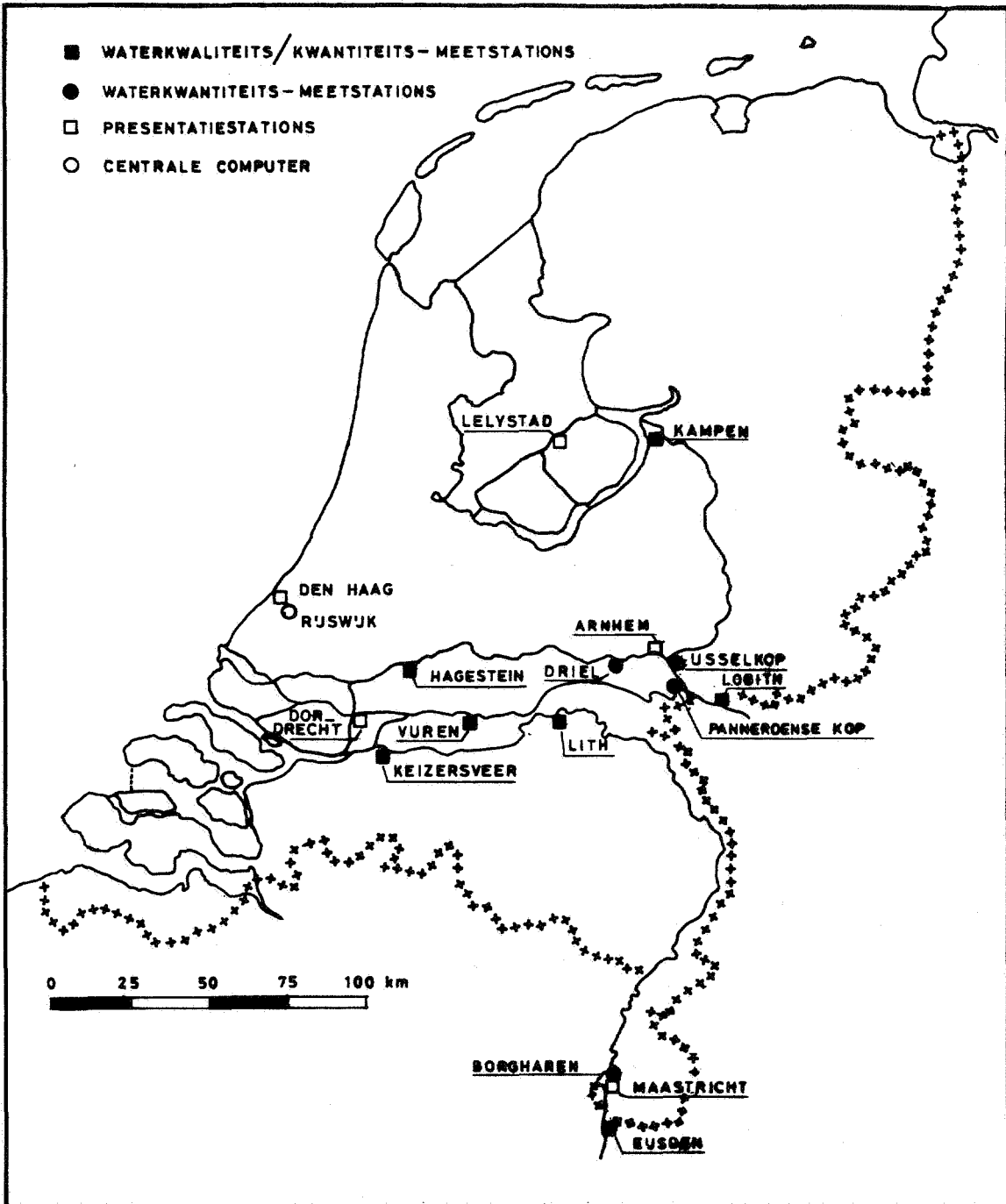


FIG. 3 HET PROEFMEETNET GROTE RIVIEREN

- de gebruikersmogelijkheden te leren kennen voor het operationeel waterbeheer en ten behoeve van opslag in bestanden
- inzicht te verwerven in de technische aspecten verbonden aan het gekoppeld inwinnen, verwerken en presenteren van gegevens
- na te gaan welke financiële, personele en organisatorische aspecten aan een dergelijk systeem verbonden zijn.

Het hierbij gebouwde Proefmeetnet Grote Rivieren bestaat uit 10 peilmeetstations, en 7 waterkwaliteitsstations, en kwam in 1976 gereed en zal kunnen functioneren tot 1987. Rond die tijd zal een nieuw informatiesysteem in gebruik genomen moeten kunnen worden.

Vanwege de beperkte mankracht en de jaarlijks ter beschikking staande financiële middelen is het onmogelijk dit nieuwe informatiesysteem voor zowel de waterkwantiteit als waterkwaliteit in een keer te realiseren. Een prioriteitstelling en fasering is dan ook aangebracht. Alle vaste kwaliteitsmeetstations zijn op het huidige Proefmeetnet aangesloten en uitbreiding van het aantal stations wordt op korte termijn niet verwacht. Daarnaast is Nederland via internationale verdragen in het kader van de Rijn verplicht op de stations Kampen, Vuren en Hagenstein continu een aantal parameters te meten. Op grond hiervan heeft het kwaliteits-deel van het nieuwe informatiesysteem de eerste prioriteit gekregen met 1987 als realisatiedatum.

Voor het kwantiteits-deel is gekozen voor een fasering in de tijd. Als eerste zal het kwantiteits-deel in het noordelijk deltabekken en het Zoommeer aan de orde komen, vanwege de grote operationele gegevensbehoefte die er in dat gebied is en de gebrekkige manier waarop nu in deze operationele gegevensbehoefte voorzien wordt. In 1987 komt het Zoommeer gereed. Eind 1987 dient daarom het kwantiteits-deel in deze regio gereed te zijn. De andere regio's komen aan de orde in de periode 1988-1990.

Wat hebben we zoal geleerd van het Proefmeetnet Grote Rivieren, dat als uitgangspunt voor het nieuwe informatiesysteem meegenomen moet worden. Zonder uitputtend en volledig te zijn volgen hieronder enige punten:

- het systeem moet flexibel zijn. Bij het kwantiteits-deel moet ruimte aanwezig zijn voor het uitbreiden van het aantal meetpunten
- aan de presentatiekant moet de mogelijkheid bestaan om het aantal gebruikers uit te breiden
- de vorm waarin de gegevens gepresenteerd worden bij de gebruiker moet aangepast kunnen worden aan de wensen van de gebruiker
- de gebruiker moet zelf kunnen bepalen op welk moment van welk punt hij gegevens wil hebben
- de exploitatiekosten moeten zo gering mogelijk zijn
- de integratie tussen het kwaliteits-deel en het kwantiteits-deel wordt gevonden in de uitwisselbaarheid van de gegevens uit beide delen.

6. KOSTEN

Over de exploitatiekosten als laatste punt nog een opmerking. De huidige systemen zijn gebaseerd op een continue verbinding tussen meetpunt en presentatiepunt.

Bekend is echter dat slechts gedurende een korte tijd per jaar of per dag de behoefte aan operationele gegevens aanwezig is. Op basis van vaste telefoonlijnen moet per verbinding gerekend worden op een bedrag van + 7.000,-- gulden per jaar. Door de Dienst Informatieverwerking van de Rijkswaterstaat is daarom een datalogger ontwikkeld, dat oproepbaar is. Via het openbare telefoonnet maakt de gebruiker van het meetgegeven zelf contact met de zgn. semi-online logger. De mogelijkheid bestaat om het actuele meetgegeven of een tijdreeks van het meetgegeven op te vragen.

De telefoonkosten voor het verkrijgen van de meetgegevens komen deze manier rechtstreeks in rekening voor de gebruiker. Van meetpunten waarvan veel gebruikers informatie nodig hebben zullen echter wel extra voorzieningen getroffen moeten worden, om te zorgen dat de bereikbaarheid van de semi-online logger, juist onder bijzondere omstandigheden, wanneer de informatiebehoefte het grootst is, gegarandeerd blijft.

WATER QUALITY MONITORING IN THE NETHERLANDS

Ir. B.G.M. van de Wetering

1. INTRODUCTION

Surface water quality research in Dutch national waters can be divided into two categories: - routine research

- problem oriented or project research.

Routine surface water research is carried out via a manual monitoring network as well as an automatic monitoring network.

The manual monitoring network comprises approximately 250 sampling locations, distributed over Dutch national waters, at which the water-quality is sampled manually at regular intervals. The objective of routine manual research is two-fold: firstly to provide information about the present state of the aquatic system (partly with the aim of testing for compliance with standards) and secondly to indicate long term trends in waterquality variations (trend analysis).

The automatic monitoring network includes seven permanent stations at which the waterquality is measured automatically and virtually continuously. Following a trial period lasting a number of years the network is currently being renewed, placing particular emphasis on the alarm function of the system.

Unlike routine research, project research in Dutch surface waters is generally temporary in character and is usually carried out at a single locality. Project research is to some extent complementary to routine research.

In addition to the above-mentioned research in national waters, research into surface waterquality is also carried out in the remaining, regional waters. Furthermore waste water research is carried out. This article, however, is mainly concerned with routine surface water research in national waters. Particular attention is paid to the choice of sampling location, the choice of waterquality parameters to be analysed and the choice of sampling frequency.

Only brief consideration is given to the automatic monitoring network and to project research as it relates to routine research.



Figure 1. Routine water quality monitoring network in the Dutch Governmental Waters.
 • = sampling location ● = category 1 sampling location.

2. ROUTINE WATERQUALITY MONITORING

2.1 History

In 1950 a start was made on the systematic investigation of the water-quality of Dutch national surface waters. A limited number of water-quality variables were investigated at four locations in the river Meuse.

Since then, routine monitoring has developed enormously.

In 1981, 400 locations were sampled and approximately 200,000 water-quality data were analysed. Because of cost-efficiency considerations, in 1982 the routine research programme was radically revised. Emphasis was placed on limiting the number of monitoring points, which was eventually reduced to about 250. Figure 1 shows the locations of the manual sampling points.

Recent years have also seen a shift in the interest of the waterquality management from classical variables such as nutrients, BOD and COD towards organic and inorganic micropollutants, not only for the waterphase, but also for sediments and organism. Partly as a result of this the routine programme was again revised for 1985, placing emphasis on a critical examination of the waterquality variables to be included in the programme.

2.2 Objectives of routine waterquality monitoring

The main objectives of routine waterquality monitoring are testing for compliance with standards and trend analysis.

- Testing for compliance with standards

Testing for compliance with standards is done on the basis of lists of standards associated with different waterquality objectives. The following waterquality objectives are distinguished in the Netherlands:

Standard		
Biochemical		
Oxygen demand	7 mg O ₂ /l	a
Oxygen content	5 mg/l	a
Chlorophyll a ^{xx}	100 µg/l Chl	m
Ammonium N	1.2 mg/l	a
Nitrate N	10 mg/l	a
Tot.phosphate	0.2 mg/l	m
Chloride	200 mg/l	a
Oil	0.2 mg/l	a
Cadmium	1.5 µg/l	a
Mercury	0.3 µg/l	a
Lead	30 µg/l	a
Copper	50 µg/l	a
Zinc	200 µg/l	a
Chromium	50 µg/l	a
Aldrin, dieldrin, endrin,		
DDT and metabolites heptachlor,		
heptachlor-epoxide,		
endosulfan	0.05 µg/l	a
Hexachlorobenzene	0.05 µg/l	a
-Hexachlorocyclohexane	0.05 µg/l	a
Polycyclic aromatic hydrocarbons	200 µg/l	a
Phenols	10 µg/l	a
Cholinesterase inhibitors	1 µg/l	a
Extractable organic chlorine	10 µg/l-cl	a
Volatile organic chlorine	10 µg/l-cl	a
Fecal colis	100/ml	a
Total colis	300/ml	a
Fecal streptococci	50/ml	a

Table 1. Standard for surface water intended for the preparation of drinking water, in accordance with the General Administrative Order on "Water Quality Objectives".

a = absolute standard

m = mean standard

^{xx}= mean between April and September

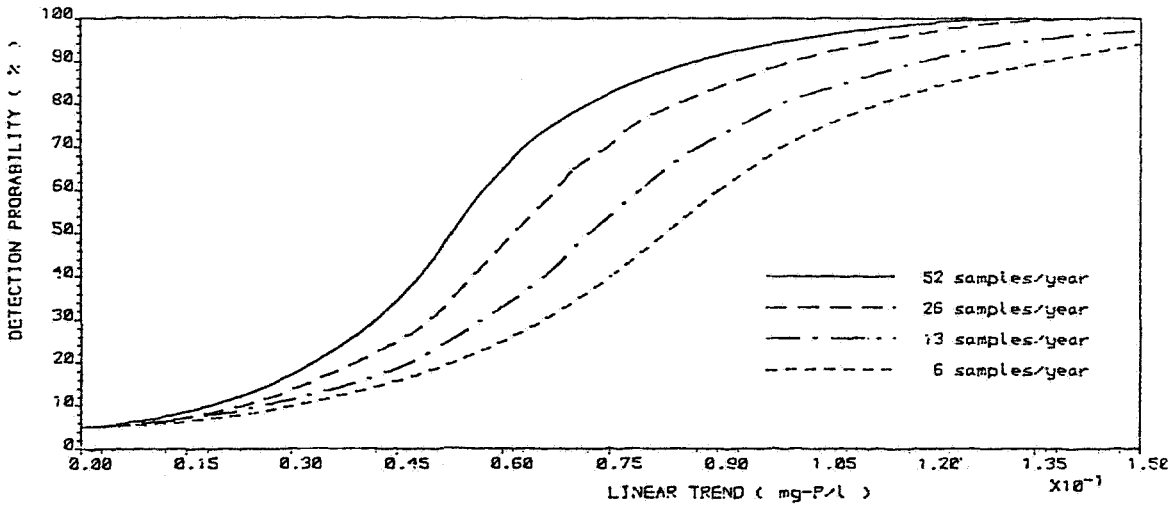


Figure 2. Detection probability as a function of the linear trend.
Total phosphate at Lobith, period 1977 - 1981.

* basic quality.

The basic quality objective is intended to set a minimum within the overall complex of waterquality objectives which in principle apply to all surface waters in the Netherlands and should be attained in the near future (ref.1).

The basic quality not only protects human interests, but it also offers good prospects of survival to aquatic communities.

* human directed objectives.

Human directed objectives go beyond the mere basic quality and are geared to the specific functions of the surface water for man, for instance swimming water or surface water intended for the preparation of drinking water.

The standards for the Netherlands are legally laid down in a General Administrative Order based on directives from the European Economic Community (EEC). The drinking water objective is taken as an example in table 1.

* ecological objectives.

Unlike the basic quality, which is applicable to all types of water, ecological objectives are geared to the specific type of aquatic system. At the moment not for all types of watersystems standards are available.

- Trend analysis.

The other main objective of waterquality monitoring is the establishing of structural changes, shortly trend analysis.

Trend analysis is usually performed by statistical techniques, such as linear regression.

For a survey of the results of a trend analysis study in Dutch national waters the reader is referred to the literature (ref.2). Depending on the type of waterquality variable and the river flow, any given sampling frequency is associated with a minimum trend which can be established with a specific certainty. Figure 2 shows a typical example of the relationship between trend and detection probability, depending on the sampling frequency.

2.3 Structure and set up of the routine monitoring network

Testing for compliance with standards and trend analysis are the main objectives of the routine research programme. Therefore these are important criteria for the structure and set up of the monitoring network.

Sampling frequencies, sampling locations and the package of waterquality variables to be investigated completely characterize the monitoring programme. The following discussion considers the selection of these within the objectives of the programme and other prerequisites.

Choice of the sampling locations

A characteristic of the routine programme is that the sampling locations are divided into three different categories, each of which has its own sampling frequency and its own package of waterquality variable to be investigated.

- Category 1 sampling locations.

Category 1 sampling locations are selected on the basis of their trans-boundary character and thus on account of the importance of these points in international negotiations. Important transitions from inland water to the North Sea also belong to this category (see Fig.1), which contains only a limited number of points and serves to provide insight into the main inflows and outflows of the country. The programme at these sampling points is very comprehensive.

- Category 2 sampling locations.

Category 2 sampling locations are selected on the basis of international agreements or are situated in waters for which standards have been established under the above mentioned General Administrative Order. The representativity for a large area with the same hydrological characteristics plays an important part in definitive selection of the location.

The monitoring programme at category 2 points is permanent, i.e. research is carried out at a predetermined frequency every year.

- Category 3 sampling locations.

Category 3 locations are situated in waters for which no specific waterquality objectives have been established. The waters still have to satisfy the basic quality. The locations are chosen so that the main gradients can be established. The programme at category 3 points can be regarded as periodic listing.

Choice of the waterquality variables to be investigated and the frequency of investigation

The package of waterquality variables to be investigated and the frequency of investigation are established for each category separately. In principle the package should be such that compliance with the relevant standards (basic quality, human directed and/or ecological standards) can be tested. It is possible to deviate from this principle, however, e.g. if previous research has shown that the standards for a particular waterquality variable has never been exceeded and there are no indications that the standard is likely to be exceeded.

The degree of pollution of the water therefore plays a part in the selection of the waterquality variables and sampling frequency. The scope of the investigations for each category is as follows:

- Category 1.

In principle the programme includes all waterquality variables from the lists of standards. For the trans-boundary sampling points Lobith (Rhine) and Eijsden (Meuse) the package also includes the so-called blacklist substances selected by the EEC and IRC (International Rhine Committee).

The frequency of testing for compliance with standards as specified in the basic quality and the General Administrative Order is 12 times a year. It is possible to deviate from this, depending on the degree of pollution.

For trend detection this frequency is sometimes too low. Partly for this reason and also owing to the importance of category 1 points, the frequency in the large rivers is mainly 26 or even 52 times a year.

Lobith		Y5 (Lake IJssel)	
Variables	Frequency(times/year)	Variables	Frequency(times/year)
Suspended matter, Flow rate, T-water, Transparency pH, O ₂ , O-P, SiO ₂ -Si Cl, Chlorophyll-a, Tot-P, NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ -N and Kj-d-N Biochemical Oxygen Demand Dissolved Organic Carbon Total Organic Carbon	26	T-water, Transparency pH, O ₂ , O-P, SiO ₂ -Si Cl, NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ -N	13
Zn, Hg, As, Cd, Cu, Pb, Cr, Ni, Fe, Mn, Ca	13	Kj-d-N, tot-P, chlorophyll-a Suspended matter	6
tot-Na, tot-K, SO ₄ , F, oil	13		
polychlorinated biphenyls (six specific congeners) Aldrin, Dieldrin, Endrin, DDT and metabolites Heptachlor, Heptachlorepoxyde, Endosulfan HCH-a, HCH-b, HCH-c, HCB, syndets	13		
Volatile organic chlorine Extractable organic chlorine phenol, pentach- and trichlorophenol Cholinesterase inhibitors Polycyclicaromatic hydrocarbons (six of Borneff plus sum)	13		
Bacteria of the coli group Fecal Streptococci Salmonella	13 6	Bacteria of the coli group Fecal streptococci	6
-activity (³² P and total) -activity (⁴⁰ K, ⁸⁰ Sr, ³ H, total)	26		

Table 2. Routine monitoring programmes at Lobith and Y5 (Lake IJssel)

- Category 2.

In principle the package includes the variables of the basic quality and the relevant waterquality objectives in accordance with the General Administrative Order. For heavy metals and organic micro-pollutants it is possible to deviate from this principle, depending on the degree of pollution.

The sampling frequency is in principle 12 times per year, which means that only relatively coarse changes in waterquality can be reliably determined.

- Category 3.

At category 3 sampling points usually the entire package in accordance with the basic quality is investigated. The tendency is to carry out a one-year period of research into the current quality of the water, these research periods being separated by intervals of several years. Here too the degree of pollution is a criterion in establishing efficiently the package of variables to be investigated.

By way of illustration, table 2 gives the complete programme for the routine monitoring points Lobith (Rhine; category 1) and Y5 Lake IJssel (category 3).

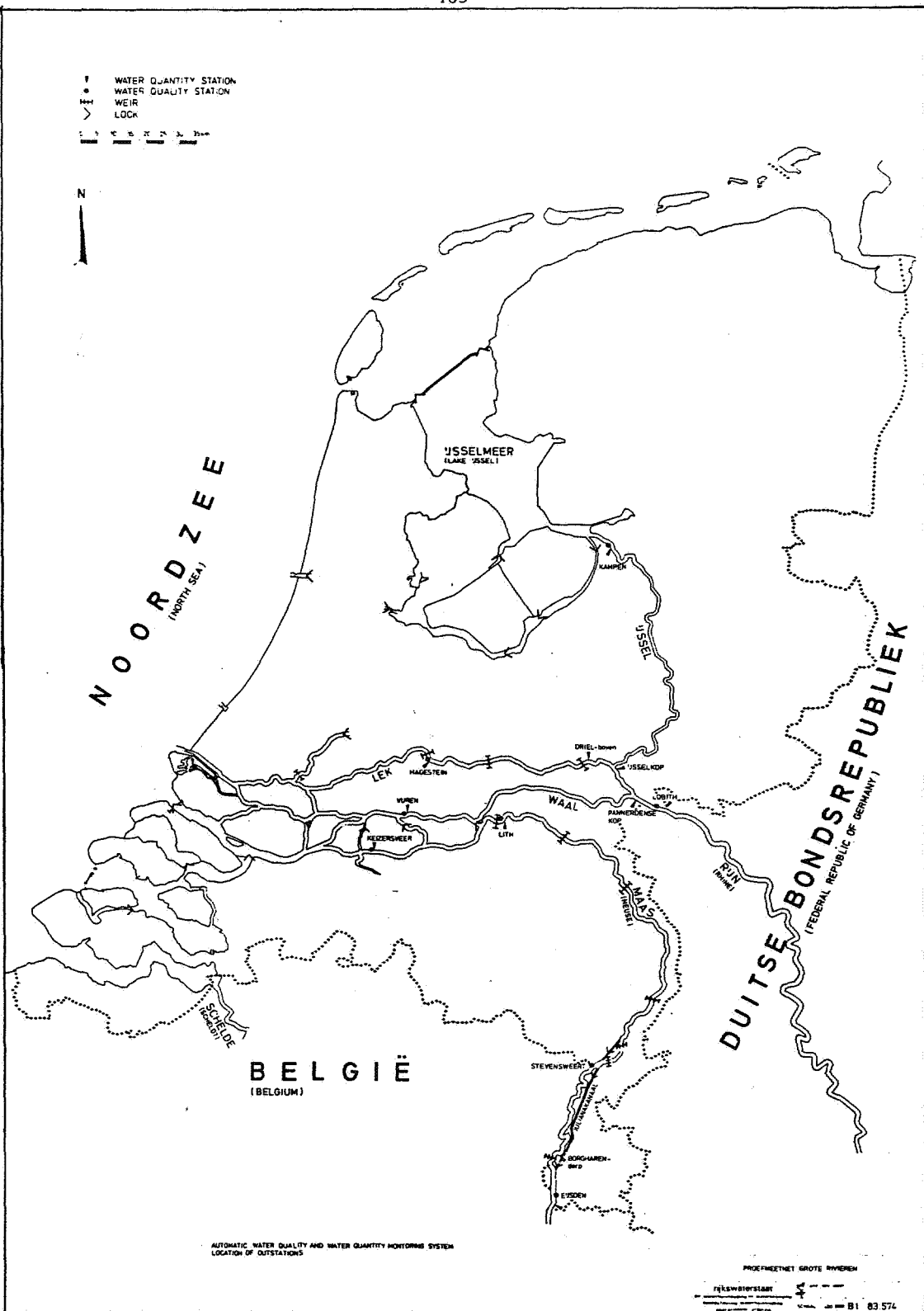


Figure 3. Automatic monitoring network.

3. THE AUTOMATIC MONITORING NETWORK IN THE NETHERLANDS

Description

The national automatic monitoring network for the automatic gathering and presentation of waterquality data began operation in 1978. One of the objectives of the first set up was to provide experience and insight into various aspects such as technical possibilities, operational feasibility and costs.

The network includes seven permanent monitoring stations. The stations are situated along the river Rhine and tributaries and the river Meuse (figure 3). Seven waterquality variables are measured continuously: oxygen, turbidity, pH, ammonium, temperature, nitrate and chloride.

The data are sent via telephonedlines to a central data processing unit consisting of two mini-computers. From there the data are transmitted to five different presentation units distributed across the Netherlands.

Development

Recently the future of the automatic monitoring network has been widely discussed. Great importance is attached to the function of the automatic network for the signalling of micropollutants and for giving an alarm in the event of accidental pollution. In 1984 a start has been made on the signalling of organic micropollutants (using macroreticular resin and subsequent analysis of pollutants by gaschromatography) at Lobith and the continuous measurement of heavy metals at Lobith, Eijsden and Keizersveer.

Experience with the automatic monitoring network has shown that great attention must be paid to flexibility: important changes required by the user should be made easy to implement.

4. PROJECT RESEARCH

In principle, routine waterquality monitoring has a permanent structure with regard to sampling locations, frequency of research and research package. A programme of this nature provides information on the current quality of the water and in structural changes. There may be a requirement for supplementary information, e.g. to provide insight into the representativity of the sampling locations of the routine programme.

Research of this type is carried out on a project basis.

Examples are gradient research, transverse profile research and high-frequency measurements for load determinations.

Part of the research into micropollutants also takes the form of projects in which sediments and organisms are also included in the research programme. The results are used in establishing and reviewing the scope of routine research and for establishing standards.

Bibliography

1. Water Action Programme: 1980-1984. The Netherlands.
Ministry of Transport and Public Works.
2. Optimization of the sampling frequency of waterquality monitoring networks.
T. Schilperoort, S. Groot, B.G.M. v.d. Wetering and F. Dijkman.
Publication No. 261, Jan. 1982.
Delft Hydraulic Laboratory.

GRONDWATERSTANDSMETINGEN

Ir. F.C. van Geer

1. INLEIDING

De aanwezigheid en het gedrag van grondwater spelen in onze maatschappij een belangrijke rol, bijvoorbeeld bij:

- het verbouwen van gewassen
- het bemalen van een bouwput
- het winnen van drinkwater
- het ontwateren van stedelijke gebieden
- het storten van giftig afval
- de stabiliteit van oevers.

Vaak is men geïnteresseerd in de natuurlijke fluctuaties van de grondwaterstand, in veranderingen in de grondwaterstand en -stroming ten gevolge van menselijk ingrepen of in de te verwachten veranderingen ten gevolge van een voorgenomen ingreep.

Voor alle problemen waarbij grondwater een rol speelt is kennis van de grondwaterstand en/of -stroming noodzakelijk. De grondwaterstand is in principe op elk willekeurig punt meetbaar. Hiertoe kunnen stijgbuizen met meetfilters worden geïnstalleerd. De stroomsnelheden van het grondwater zijn echter niet of nauwelijks meetbaar en zullen daarom op één of andere wijze geschat moeten worden. Om toch voldoende inzicht te krijgen in het gedrag van het grondwater, moet een beroep gedaan worden op fysische wetten en/of empirische relaties.

Met behulp daarvan kunnen niet alleen de stroomsnelheden van het grondwater worden bepaald, maar tevens is het mogelijk uitspraken te doen over het gedrag van het grondwater tussen de punten waar de grondwaterstand wordt gemeten. Pas wanneer de meetpunten en de wetten en/of relaties gecombineerd worden om tot een schatting te komen van het gedrag van het grondwater in het beschouwde gebied, is er sprake van een meetnet van grondwaterstanden. Zonder deze integratie blijven de grondwaterstandsmetingen een losse verzameling waarnemingen.

Beschikt men eenmaal over een meetnet dan is een voor de hand liggende vraag of dit meetnet wel optimaal is. In 1980 is aan de TH-Delft (in samenwerking met de Dienst Grondwaterverkenning TNO) een onderzoek naar de optimalisatie van het landelijk meetnet van grondwaterstanden gestart. De hier gepresenteerde resultaten zijn

gebaseerd op dit onderzoek.

In deze bijdrage wordt uitsluitend aandacht besteed aan metingen van grondwaterstanden en niet aan een meetnet van grondwaterkwaliteit.

In paragraaf 2 wordt aandacht besteed aan het meten van de grondwaterstanden. De vraag wat wel en wat niet meetbaar is komt daarbij aan de orde. Vervolgens wordt in paragraaf 3 kort uiteengezet wat de mogelijkheden zijn om het gedrag van het grondwater te berekenen. In paragraaf 4 staat het meetnet als combinatie van metingen en berekeningen centraal. Hierbij wordt ook het begrip meetnet optimalisatie geïntroduceerd.

In paragraaf 5 wordt het principe van een geavanceerde berekeningsmethode (Kalmanfilter) behandeld.

Tenslotte zullen er in paragraaf 6 enige conclusies worden getrokken. De hele gedachtengang van meten, berekenen naar meetnet zal worden geïllustreerd met een eenvoudig voorbeeld.

2. METEN

Voordat een grondwaterstand zinvol gemeten kan worden dient eerst te worden onderzocht wat er eigenlijk gemeten wordt. Daartoe is enige kennis van de geohydrologische opbouw van de ondergrond een noodzaak. De ondergrond wordt vaak schematisch beschreven als een opeenvolging van lagen die afwisselend een hoge of een lage weerstand hebben tegen waterbeweging. In figuur 1 is een schematische doorsnede gegeven van twee watervoerende lagen (met een lage waterstand) gescheiden door een semi permeabele laag (met een hoge waterstand). De onderste watervoerende laag wordt aan de onderkant begrensd door een ondoorlatende laag.

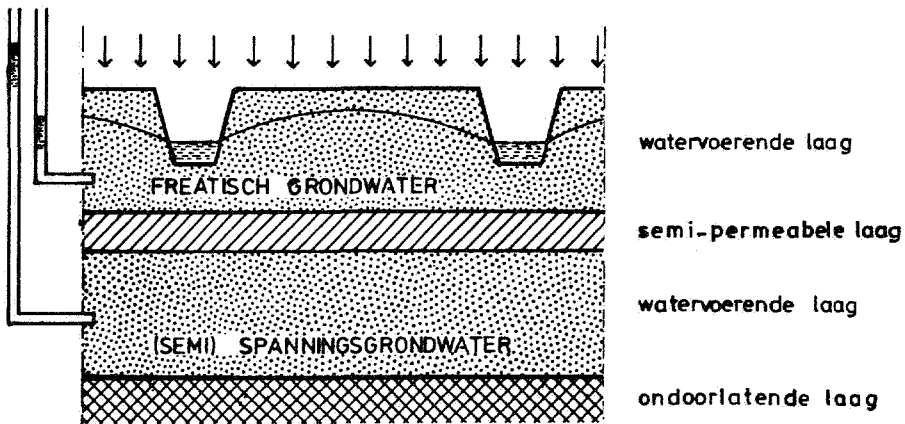


Fig. 1. Schematische doorsnede.

In de bovenste watervoerende laag kan de grondwaterspiegel worden gedefinieerd als het oppervlak waar de waterdruk overal gelijk is aan de atmosferische druk. Indien er in de bovenste watervoerende laag een stijgbuis met een meetfilter wordt geïnstalleerd zal het water in de buis stijgen tot aan het niveau van de grondwaterspiegel ter plaatse. Het water in een laag met een vrije grondwaterspiegel wordt freatisch water genoemd, in tegenstelling tot water wat zich in een laag bevindt die aan de bovenzijde wordt begrensd door een semi permeabele laag. Het grondwater in een dergelijk laag wordt spanningswater genoemd. Ook in een laag met spanningswater kan een stijghoogte worden gemeten. Deze stijghoogte heeft geen relatie met de grondwaterstand ter plaatse van de stijgbuis, maar is uitsluitend gerelateerd aan de waterdruk ter plaatse van de meetfilters. Om inzicht te krijgen in het gedrag

van het grondwater kunnen een aantal meetfilters worden geïnstalleerd en met een bepaalde frequentie worden gepeild. Zonder verdere kennis van de grondwaterbeweging en de ondergrond zijn echter de mogelijkheden voor de interpretatie van de meetresultaten beperkt. Met waarschijnlijkheids rekening kunnen nog wel grootheden zoals het gemiddelde van, en de trend in de stijghoogte ter plaatse van de meetpunten worden bepaald, maar over de stijghoogten op punten waar niet wordt gemeten kan niets zinnigs worden gezegd. Ook over de stroomsnelheden en de debieten van het grondwater is geen uitspraak te doen zonder verdere kennis. Uitspraken over het gedrag van grondwater uitsluitend op basis van waarnemingen van stijghoogten eisen dan ook een zeer korte afstand tussen de meetfilters en een zeer hoge waarnemingsfrequentie. Maar zelfs als aan die voorwaarden is voldaan kunnen de stijghoogten niet worden geïnterpoleerd en kan de grondwaterbeweging niet worden gesimuleerd.

Voorbeeld

Beschouw de situatie dat er sprake is van één watervoerende laag met freatisch water boven een ondoorlatende laag. Uit de watervoerende laag wordt een hoeveelheid water gewonnen ($Q(t)$). Deze onttrokken hoeveelheid is een bekende functie van de tijd. Onder invloed van de grondwateronttrekking zal de grondwaterspiegel in de omgeving van de pompput dalen. In figuur 2 is een doorsnede gegeven van de beschreven situatie. Gevraagd wordt het verloop van de grondwaterspiegel ($h(x,t)$) als functie van de tijd en de plaats. Indien het antwoord op deze vraag uitsluitend met metingen verkregen moet worden, kan een raai meetfilters worden geïnstalleerd, die met een - al dan niet variabel - tijdsinterval worden afgelezen. Figuur 3 geeft een doorsnede over de pompput met vier meetfilters. Het meetresultaat van deze filters is gegeven in figuur 4. De waarnemingen dienen geïnterpreteerd te worden, b.v. door per filter met een kleinste kwadraten criterium een kromme door de waarnemingen te bepalen. In dit voorbeeld ligt het voor de hand om de grondwaterspiegel op het tijdstip t te construeren door een vloeiende lijn te trekken door de waarnemingen op dat tijdstip. Men bedenke zich echter dat daarbij impliciet wordt aangenomen dat de watervoerende laag homogeen is. In een gecompliceerde situatie zal het niet altijd mogelijk zijn de grondwaterspiegel tussen de peilfilters eenduidig te construeren.

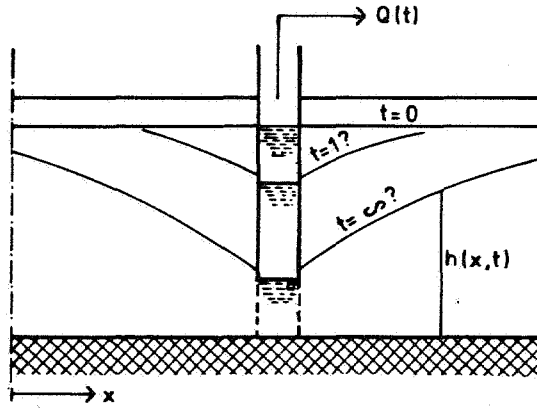


Fig. 2 Doorsnede over de pompput (voorbeeld)

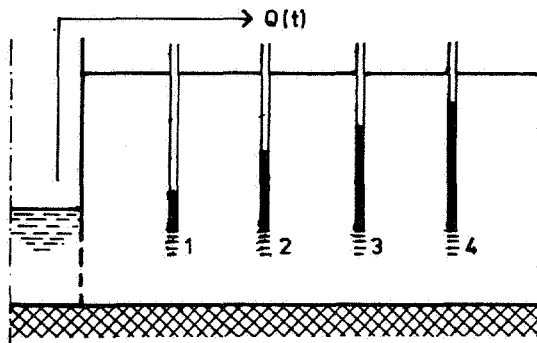


Fig. 3 Raai met peilfilters

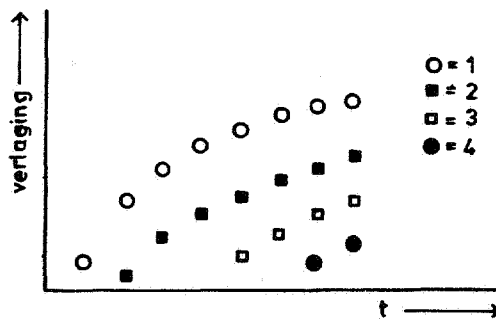


Fig. 4 Meetresultaat

3. BEREKENEN

Als de stijghoogte in een bepaald gebied gereconstrueerd moet worden met uitsluitend gebruikmaking van waarnemingen, doen zich een aantal problemen voor. Zonder theoretische kennis en aannamen kan de stijghoogte niet tussen de meetpunten geïnterpoleerd worden en ook simulatie en voorspelling van de stijghoogten zijn onmogelijk. Bovendien zijn er nog problemen van meettechnische aard in verband met de hoge meetnetdichtheid, de hoge meetfrequentie en het optreden van meetfouten en storingen. Om deze problemen te overwinnen kan de stijghoogte worden berekend op basis van theoretische kennis. Bij grondwaterstroming is deze kennis in hoofdzaak vervat in twee wetten:

1. De wet van Darcy, waarin gesteld wordt dat de stroomsnelheid evenredig is met de gradiënt van de stijghoogte.
2. De wet van behoud van volume.

Afhankelijk van het probleem wordt de grond geschematiseerd tot een stelsel van watervoerende en waterscheidende lagen. Voor zo'n schematisatie is kennis noodzakelijk van de geohydrologische opbouw van de ondergrond. Combinatie van de wet van Darcy en de wet van behoud van volume levert een tweede orde partiële differentiaal vergelijking, waarvan de oplossing de stijghoogte in het lagenstelsel is. De differentiaal vergelijking, vaak het mathematische model genoemd, is oplosbaar indien er voldoende begin en randvoorwaarden gegeven zijn (zie fig. 5). Als de stijghoogten eenmaal bekend zijn, kunnen met de wet van Darcy de stroomsnelheden en de debieten worden berekend.

Met de hedendaagse computers is het geen groot probleem om met grote mathematische modellen de stijghoogte te berekenen. Echter ook de berekeningsresultaten moeten geïnterpreteerd worden. Immers het stijghoogteverloop is berekend voor een schematisatie van de werkelijkheid. Bovendien zijn meestal vereenvoudigingen in de formules aangebracht. Het resultaat van de berekeningen zal daarom altijd getoetst moeten worden aan waarnemingen van de stijghoogte.

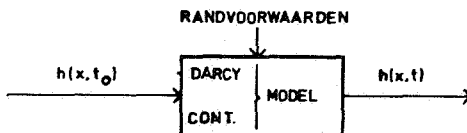


Fig. 5. Schematische voorstelling van een model.

Voorbeeld

Beschouwd wordt weer de situatie van figuur 2. Nu is de geohydrologische gesteldheid van de ondergrond bekend. Met het mathematische model is het verloop van de grondwaterspiegel te berekenen indien:

- De beginvoorwaarde bekend is; dat is in dit geval de grondwaterspiegel op $t=t_0$.
- Voldoende randvoorwaarden gegeven zijn.

In dit geval: - De (grond)waterstand in de pompput $h(0,t)$
 - De grondwaterstand in het oneindige $h(\infty,t)$
 - De aanvulling van het grondwater door nuttige neerslag.

De theoretische randvoorwaarde op $x = \infty$ wordt doorgaans vervangen door een grondwaterstand op een plaats waar de onttrekking geen merkbare invloed meer heeft. In figuur 6 is een berekende grondwaterspiegel gegeven.

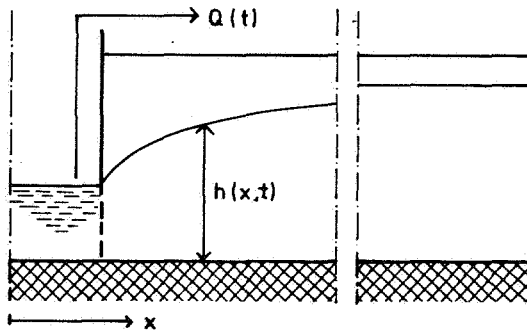


Fig. 6. Berekende grondwaterspiegel.

4. MEETNET - MEETNET OPTIMALISATIE

In het voorgaande is gesteld dat waarnemingen van stijghoogten alleen met behulp van theoretische kennis - bijvoorbeeld een mathematisch model - zinvol geïnterpreteerd kunnen worden. Omgekeerd zijn waarnemingen onontbeerlijk bij de interpretatie van berekeningsresultaten van een mathematisch model. Het ligt dan ook voor de hand om een aantal meetputten alleen dan een meetnet van grondwaterstanden te noemen, wanneer de waarnemingsreeksen van de meetputten geïntegreerd zijn in een (mathematisch) grondwaterstromingsmodel van het gebied waarin de putten liggen.

In Nederland bevindt zich een groot aantal meetputten die, afhankelijk van de doelstelling, ingedeeld worden bij:

- a) het landelijk meetnet
- b) een lokaal meetnet
- c) een tijdelijk meetnet

ad. a. Het landelijke meetnet is voor "algemeen gebruik" en wordt beheerd door Dienst Grondwaterverkenning TNO. Het grootste deel van de meetputten wordt 24 maal per jaar of 4 maal per jaar gepeild. In uitzonderingsgevallen worden ook andere meetfrequenties gebruikt.

ad. b. en ad. c. Lokale en tijdelijke meetnetten worden ingesteld met een specifiek doel. De meetfrequentie is afhankelijk van dat doel. Deze meetnetten worden beheerd door (semi-)overheidsorganen en particulieren.

Uiteraard kan een put deel uitmaken van twee of meer van de genoemde meetnetten.

Uit de waarnemingen kan met behulp van een model een schatting van het verloop van de stijghoogte worden berekend. Die schatting zal afwijken van het werkelijke verloop van de stijghoogte. Er zijn twee oorzaken die de fout in de schatting bepalen:

- a) de modelfout
- b) de fout als gevolg van het waarnemingsproces

ad a. De modelfout is de afwijking van de berekeningsresultaten ten opzichte van de werkelijkheid. De modelfout is te beïnvloeden door de keuze van het model: Hoe beter het model de werkelijkheid beschrijft, hoe kleiner de modelfout zou zijn.

ad. b. De fout als gevolg van het waarnemingsproces is te splitsen in drie onderdelen:

- 1° De meetnetdichtheid. Een groter aantal meetputten per km^2 zal een kleinere fout geven.
- 2° De meetfrequentie. Een hogere meetfrequentie zal leiden tot een kleinere schattingsfout.
- 3° De meetfout. Deze fout wordt veroorzaakt door afwijkingen van de meetapparatuur en afleesfouten. Ten opzichte van de overige foutenbronnen is de meetfout doorgaans verwaarloosbaar.

De fout in de schatting van de stijghoogte wordt bepaald door de modelfout, de meetnetdichtheid en de meetfrequentie. Aangezien de werkelijke stijghoogten niet meetbaar zijn, is die fout niet exact te bepalen. Echter met statistische technieken kan een schatting worden gemaakt zodanig dat die fout gemiddeld nul is en dat de standaardafwijking in de schattingsfout minimaal is. Een schatting waarbij dat het geval is, wordt een optimale schatting genoemd.

Uiteraard is de standaardafwijking van de schattingsfout kleiner dan de standaardafwijking van de modelfout. De standaardafwijking van de schattingsfout wordt veelal als toetsingscriterium genomen voor het beoordelen van een meetnet. Met behulp van die standaardafwijking kan een betrouwbaarheidsinterval bij de schatting van de stijghoogte worden geconstrueerd.

Voorbeeld

Bij de grondwateronttrekking van figuur 2 is een meetnet van twee meetputten geïnstalleerd. Deze situatie is geschetst in figuur 7.

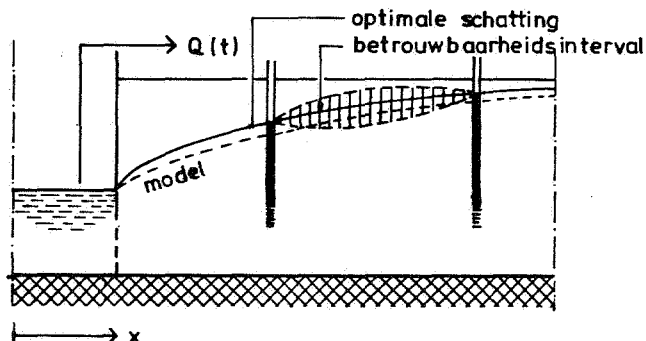


Fig. 7. Meetnet met twee meetpunten.

De stippellijn geeft het modelresultaat weer in het geval dat de waarnemingen van de twee putten niet worden gebruikt. De getrokken

lijn is de optimale schatting op basis van het model én de waarnemingen. Tussen de twee meetputten is een betrouwbaarheidsinterval gegeven. Duidelijk is hierbij dat de betrouwbaarheid van de schatting in de omgeving van de meetpunten veel groter is dan midden tussen de meetpunten in.

Met behulp van wiskundige technieken kan overal in een gebied de standaardafwijking van de schattingsfout van de stijghoogte berekend worden bij een gegeven meetnet en een gegeven model. Een voorbeeld van een ruimtelijke verdeling van standaardafwijkingen in een freatische laag is gegeven in figuur 8. In deze figuur staat m voor meetpunt.

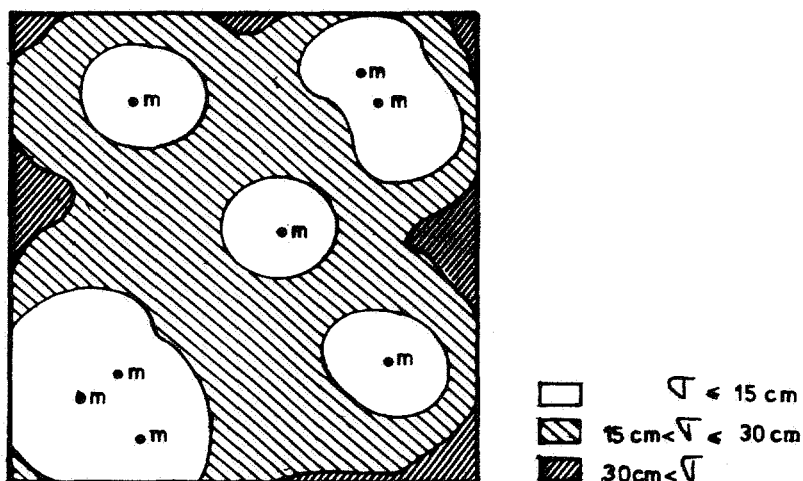


Fig. 8. Ruimtelijke verdeling van standaardafwijkingen voor een freatische laag.

Indien voor de standaardafwijking van de schattingsfout een drempelwaarde is vastgelegd die nergens in het gebied mag worden overschreden, kan een optimaal meetnet worden bepaald door het geschikt kiezen van het model, de meetlokatie en de meetfrequentie. Doordat het model, de meetlokatie en meetfrequentie onafhankelijk van elkaar gekozen kunnen worden, zijn er verschillende combinaties

denkbaar die tot het gewenste resultaat leiden. In een samenwerkingsverband tussen de TH-Delft en Dienst Grondwaterverkenning TNO is een studie uitgevoerd naar de optimale meetnetdichtheid bij een gegeven model en een gegeven meetfrequentie (24 maal per jaar). Daarbij is een Kalmanfilter algorithm gebruikt om de standaardafwijkingen te berekenen.

Een drempelwaarde voor de standaardafwijking van de schattingsfout dient te worden vastgesteld op basis van economische en politieke overwegingen. Voor lokale en tijdelijke meetnetten is dat meestal wel realiseerbaar, omdat deze meetnetten met een specifiek doel zijn opgezet, waarbij de schade als gevolg van een fout in de schatting van de stijghoogte kan worden gekwantificeerd. Voor het landelijk meetnet is de vaststelling van een drempelwaarde echter veel gecompliceerder, omdat het voor veel verschillende doeleinden wordt gebruikt. Dit kan leiden tot een drempelwaarde die van plaats tot plaats verschilt. Bovendien zullen de waarnemingen van het landelijk meetnet gebruikt worden voor nog onbekende toekomstige projecten. Bij het landelijk meetnet is de drempelwaarde voor de standaardafwijking van de schattingsfout in principe dan ook een functie van de plaats en de tijd.

5. MATHEMATIEK

Bij de hiervoor genoemde studie naar meetnetoptimalisatie is gebruik gemaakt van een Kalmanfilter algorithm. Daarbij worden de waarnemingen en het deterministische model gecombineerd om tot een optimale schatting te komen. Grofweg kan worden gesteld dat het Kalmanfilter algorithm de optimale schatting van de stijghoogten geeft als gewogen gemiddelde van het model en de waarnemingen. De wegingsfactor (matrix) wordt bepaald uit statistische grootheden van de modelfout en het meetproces.

In deze paragraaf wordt eerst de mathematische formulering van de modellering van de grondwaterbeweging en van het meetproces besproken, daarna wordt het principe van het Kalmanfilter gegeven. Daarbij wordt niet ingegaan op de afleiding van de formules. Tenslotte wordt een eenvoudig voorbeeld gegeven van de invulling van de matrices van het algorithm.

Model

De grondwaterstroming kan worden beschreven met de wet van Darcy en de wet van behoud van volume [1]. Gecombineerd en gediscrètiseerd geven deze twee wetten een vergelijking van de vorm:

$$\vec{h}_k = A\vec{h}_{k-1} + B\vec{u}_k \quad (1)$$

hierin is:

$\vec{h}_k$ de toestandsvector, waarvan de elementen de stijghoogten zijn op de roosterpunten van het discretisatie rooster op het tijdstip k.

$\vec{u}_k$ is de input vector, waarvan de elementen de randvoorwaarden van de differentiaal vergelijking zijn op het tijdstip k.

A en B coëfficiënten matrices die afhankelijk zijn van de geohydrologische condities en de gekozen discretisatie in ruimte en tijd.

Ten gevolge van schematisaties en vereenvoudigingen beschrijft (1) niet volledig de werkelijkheid. Het verschil tussen het model en de werkelijkheid is de systeemruis vector $\vec{w}_k$. Door het toevoegen van de systeemruis vector aan het model, wordt het werkelijke verloop van de stijghoogte geformuleerd.

$$\vec{h}_k = A\vec{h}_{k-1} + B\vec{u}_k + \vec{w}_k \quad (2)$$

Opm.: Omdat de waarde van de systeemruis vector onbekend is, kan met (2) de werkelijke toestand niet worden berekend.

Waarnemingen

De stijghoogte wordt op een aantal locaties met een bepaalde frequentie gemeten. De waarnemingen op het tijdstip k vormen de meetvector $\vec{y}_k$. De relaties tussen de waarnemingen en de stijghoogten in de toestands vector op tijdstip k zijn bepaald door de locatie van de meetpunten. Deze relaties zijn vastgelegd in de elementen van de meetmatrix C_k . Bij elke waarneming wordt een meetfout gemaakt, die samen de meetfout vector $\vec{v}_k$ vormen. Het waarnemingsproces kan worden geformuleerd als:

$$\vec{y}_k = C_k \vec{h}_k + \vec{v}_k \quad (3)$$

Kalmanfiltering

Stel dat op het tijdstip $(k-1)$ de optimale schatting van de toestandsvector (genoteerd als $\hat{\vec{h}}_{k-1}$) bekend is. Als het model goed geijkt is, is het gemiddelde van de systeemruis vector nul. Op basis van (2) kan een predictie van de toestandsvector op tijdstip k (genoteerd als $\vec{h}_k^*$) worden gedaan.

$$\vec{h}_k^* = A\hat{\vec{h}}_{k-1} + B\vec{u}_k \quad (4)$$

Het verschil tussen (2) en (4) geeft de predictie fout:

$$\vec{h}_k - \vec{h}_k^* = A(\vec{h}_{k-1} - \hat{\vec{h}}_{k-1}) + \vec{w}_k \quad (5)$$

Onder een aantal aannamen [2] kan de covariantie matrix van de predictiefout (P_k^*) worden uitgedrukt in de covariantie matrix van de fout in de optimale schattingsfout ($\hat{P}_{k-1}$) en de covariantie matrix van de systeemruis (Q).

$$P_k^* = A\hat{P}_{k-1}A^T + Q \quad (6)$$

Op het tijdstip k worden waarnemingen gedaan. De predictie wordt nu gecorrigeerd volgens:

$$\hat{\vec{h}}_k = \vec{h}_k^* + K_k \{ \vec{y}_k - C_k \vec{h}_k^* \} \quad (7)$$

waarin:

$$K_k = P_k^* C_k^T \{ C_k P_k^* C_k^T + R \}^{-1} \quad (8)$$

en R is de covariantie matrix van de meetfouten.

Onder een aantal condities [2] kan voor de covariantie matrix van de fout in de optimale schatting worden afgeleid:

$$\hat{P}_k = (I - K_k C_k) P_k^* \quad (9)$$

waarbij: I in de eenheidsmatrix.

De vergelijkingen (4), (6), (7), (8) en (9) vormen het kalmanfilter algorithm (10) dat kan worden uitgerekend als:

- de beginvoorwaarden $\hat{\vec{h}}_0$ en $\hat{P}_0$ bekend (of geschat) zijn,
- de covariantie matrix van de meetfouten bekend is,
- de meetmatrix bekend is op elk tijdstip.
- de matrix A, B en Q gelijk zijn.

$$\begin{array}{c}
 \hat{\vec{h}}_0 \quad \quad \quad \hat{P}_0 \\
 \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\
 \vec{u}_k \rightarrow \vec{h}_k^* = A \hat{\vec{h}}_{k-1} + B \vec{u}_k \quad \quad \quad P_k^* = A \hat{P}_{k-1} A^T + Q \\
 \downarrow \quad \quad \quad \swarrow \quad \quad \quad \downarrow \\
 \vec{y}_k \rightarrow \hat{\vec{h}}_k = \vec{h}_k^* + K_k \{ \vec{y}_k - C_k \vec{h}_k^* \} \quad \quad \quad K_k = P_k^* C_k^T \{ C_k P_k^* C_k^T + R \}^{-1} \quad (10) \\
 \downarrow \quad \quad \quad \searrow \quad \quad \quad \downarrow \\
 \quad \quad \quad \hat{P}_k = (I - K_k C_k) P_k^*
 \end{array}$$

Opmerkingen:

- i Voor een onveranderlijk meetnet ($C_k = C$) gaan de covariantie matrices P_k^* en $\hat{P}_k$ naar een limietwaarde voor $k \rightarrow \infty$.
- ii De hoofddiagonaal van $\hat{P}_k$ bevat de varianties van de fouten in de optimale schatting voor alle roosterpunten. Voor meetnetoptimalisatie zijn deze varianties de belangrijkste berekeningsresultaten.

Voorbeeld

Beschouwd wordt weer de situatie van figuur 2. Er wordt verondersteld dat de gegeven doorsnede niet verandert in de richting loodrecht op het vlak van tekening. De doorsnede wordt verdeeld in equidistante delen (zie figuur 9). Daarbij wordt verondersteld dat in roosterpunt 10 de grondwaterstand constant (h_∞) is, onafhankelijk van de waterstand in roosterpunt 0.

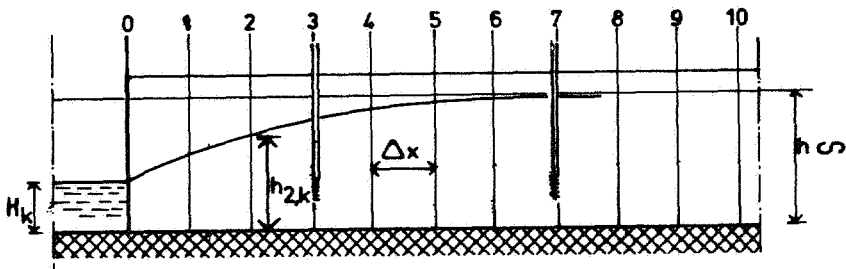


Fig. 9. Discretisatie.

De grondwaterbeweging wordt met een simpel expliciet differentie schema [1] gemodelleerd, zonder aanvulling door nuttige neerslag. Vergelijking (1) kan worden uitgeschreven als:

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1-2\alpha & \alpha & & & \\ \alpha & 1-2\alpha & \alpha & & 0 \\ & \alpha & 1-2\alpha & \alpha & \\ & & \alpha & 1-2\alpha & \alpha \\ 0 & & & \alpha & 1-2\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} \alpha & 0 & & & \\ 0 & \vdots & & & \\ & \vdots & 0 & & \\ & \vdots & \vdots & 0 & \\ & 0 & \alpha & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_k \\ h_\infty \end{bmatrix} \quad (1^a)$$

$$\text{met } \alpha = \frac{KD}{\mu} \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$$

KD is de transmissiviteit

μ is de bergingscoëfficiënt

Δt is de tijdstap

Δx is de afstand tussen de roosterpunten.

Op de roosterpunten 3 en 7 zijn meetpunten aanwezig zodat vergelijking (3) wordt:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 001000000 \\ 000000100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_9 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}_k \quad (3a)$$

Omdat de meetfouten onafhankelijk zijn, is de covariantie matrix van de meetfout vector een diagonaal matrix:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix}$$

De beginvoorwaarden zijn min of meer willekeurig te kiezen omdat na verloop van tijd het effect ervan uitdempt. Op de bepaling van de matrix Q wordt hier niet ingegaan (zie [3]).

Het schema (10) is uitgewerkt met de volgende gegevens.

KD	μ	Δt	Δx	σ_v
1500 m ² /dag	0,03	7 dagen	1300 m	1 cm

De elementen van Q zijn berekend volgens:

$$q_{i,j} = 0,005 * 0,8^{|i-j|}$$

In figuur 10 is de limiet variantie van de optimale schatting gegeven als functie van de afstand. Daarbij is aangenomen dat de variantie van de randvoorwaarden nul is.

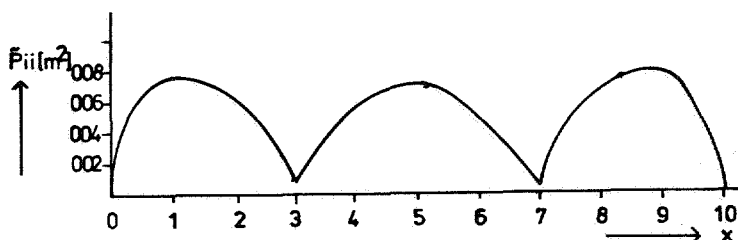


Fig. 10. Limiet variantie als functie van de afstand.

6. CONCLUSIES

Zoals gesteld in paragraaf 4 kan het optimale meetnet niet eenduidig worden vastgelegd, omdat de elementen ervan (model, dichtheid en frequentie) onderling tot op zekere hoogte uitwisselbaar zijn. Zo kan een eenvoudig model met veel meetpunten aan dezelfde drempelwaarde voor de standaardafwijking van de schattingsfout voldoen als een geavanceerd model met weinig meetpunten. Ook de meetnetdichtheid en de meetfrequentie zijn binnen zekere grenzen uitwisselbaar. Bovendien is het niet altijd wenselijk of mogelijk om de meetpunten daar te installeren waar het uit rekentechnisch oogpunt optimaal zou zijn. Dit nog afgezien van het feit dat er in Nederland een uitgebreid meetnet aanwezig is waarvan sommige putten reeds vele tientallen jaren worden gepeild. Het zou onverstandig zijn al deze jarenlange meetreeksen te onderbreken. Een optimaal meetnet van grondwaterstanden dient te worden bepaald op basis van kennis van optimalisatietechnieken én op basis van praktisch (geohydrologisch) inzicht. Het optimale meetnet zal daarom altijd min of meer subjectief zijn.

De optimalisatie van een meetnet geschiedt altijd aan de hand van een criterium. In het geval van de grondwatermeetnetten wordt meestal een drempelwaarde voor de standaardafwijking van de schattingsfout gekozen. Echter, met name voor het landelijk meetnet, is zo'n drempelwaarde nauwelijks eenduidig te bepalen. Op de Veluwe bijvoorbeeld mag op sommige plaatsen de standaardafwijking meer dan één meter zijn, terwijl in andere natuurgebieden tien centimeter al niet meer acceptabel kan zijn. Ook de relatie tussen schade en de standaardafwijking van de schattingsfout is in vele gevallen niet duidelijk. Dat er echter wel een landelijk meetnet van grondwaterstanden moet zijn, staat als een paal boven water. Om tot een gefundeerde optimalisatie van het meetnet te komen, is een bezinning omtrent de drempelwaarde, aan de zijde van de gebruikers van het meetnet, een noodzaak.

Wanneer eenmaal een keuze is gemaakt voor een geoptimaliseerd meetnet van grondwaterstanden dient deze keuze regelmatig getoetst te worden. Zo kan de drempelwaarde voor de standaardafwijking van de schattingsfout veranderen door een ander grondgebruik of een veranderd economisch inzicht. Daarnaast staan de technologische

ontwikkelingen niet stil. Het is te verwachten dat in de toekomst grotere en meer geavanceerde modellen goedkoper en eenvoudiger met computer verwerkt kunnen worden. Verder zou het op grote schaal invoeren van automatische peilschrijvers een verschuiving teweeg kunnen brengen van een hoge meetnetdichtheid met een lage meetfrequentie naar een lage meetnetdichtheid met een hoge meetfrequentie. De optimalisatie van een meetnet is dan ook geen eenmalige zaak, maar een proces dat voortdurend in beweging is.

LITERATUUR

- 1 Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*, Mc. Graw-Hill.
- 2 Sage, A.P. and Melsa Y.L. (1979), *Estimation Theory with applications to Communication and Control*, Mc. Graw-Hill.
- 3 Geer, F.C. van (1984), *Kalmanfilter Calibration of Error covariance Matrix of a Groundwater Model*, Symposium proceedings on Stochastic Hydraulics, IAHR, Urbana.

METEN IN HET WATERBEHEER

Ing. F.C. Hamster, technische dienst waterschap De Veenmarken

1. Inleiding.

In het waterschap De Veenmarken worden open waterpeilen en grondwaterpeilen ten behoeve van het actuele waterbeheer gemeten. Aan de hand van wekelijkse waarnemingen van de grondwaterstanden wordt beoordeeld of het waterniveau in de watergangen moet worden bijgesteld. Het doel van deze waterbeheersing is een waterpeil aan te bieden, waarbij zich een optimale grondwaterstand kan instellen.

In het waterschap De Veenmarken betekent dit een hoofdzakelijke afstemming op agrarische doeleinden, omdat het een nogal eenzijdig agrarisch gebied is.

In meer gevarieerde waterschappen zal afstemming op meerdere doeleinden noodzakelijk zijn.

Het idee om het beheer van het waterbeheersingssysteem aan de hand van concrete gegevens, nl. de actuele hydrologische situatie, uit te voeren, komt voort uit de aard van het gebied waarin het waterschap is gelegen. Het waterschap De Veenmarken bestaat namelijk bijna geheel uit een veenkoloniaal gebied met grote uniformiteit in bodensoort, detailontwatering, perceelsvorm en -grootte en gewassenteelt.

2. Beknopte omschrijving van de ontwikkeling van het veenkoloniale gebied binnen het waterschap De Veenmarken.

Het waterschap De Veenmarken ligt in het zuid-oosten van de provincie Drenthe. Oorspronkelijk was het een hoogveengebied.

In de loop van 100 á 200 jaar is het hoogveen afgegraven en is er een landbouwgebied ontstaan. Voor deze activiteit is een stelsel van kanalen, monden en wijken aangelegd, aanvankelijk voor transport voor landbouwprodukten, alsmede ten behoeve van de afwatering van het gebied.

De tussen de percelen gegraven "kanalen" heten wijken, de afstand tussen de wijken is ca. 190 m.

Tijdens de ontginning is dus het in de veenkoloniën bijna uniform voorkomende systeem van rechthoekige kavels begrensd door wijken aangelegd.

Het bodemprofiel na de ontginning bestond uit 0,10 m zandige bovengrond, 0,80 m bolster (teruggeplaatst bovenveen), ± 0,15 m gliede (slecht doorlatende veenresten) en vervolgens de zandondergrond.

In de loop der jaren is de bolster door grondbewerking en oxidatie grotendeels verdwenen, waardoor het maaiveld zakt en de ontwateringsdiepte steeds geringer werd.

Ter verbetering van deze te geringe drooglegging werden in de zestiger en zeventiger jaren uitgebreide afwateringswerken uitgevoerd. Het bij de ontginning aangelegde systeem van kanalen etc. werd grotendeels gewijzigd en werden wegen aangelegd en vaartransport was niet meer mogelijk.

De wijken tussen de percelen bleven evenwel gehandhaafd.

Door de diepere ontwatering was het voor de landbouw mogelijk een zeer gewenste profielverbetering toe te passen.

In de tweede helft van de zeventiger jaren kwam er behoefte aan het aanvullen van het gemaakte afwateringssysteem, nl. aan het bouwen van stuwen en inlaten etc., kortom tot het uitbouwen tot een compleet waterbeheersingssysteem.

Het grootste gedeelte van het waterschap is inmiddels ingericht voor waterafvoer, -conservering en -aanvoer.

Voor de beheersing van de waterpeilen zijn veelal automatische stuwen gebouwd.

3. Waterbeheersing.

Aan het einde van de zeventiger jaren ontstond de behoefte aan een beter gefundeerde waterbeheersingsstrategie. Verwacht werd dat de reeds genoemde uniformiteit in bodemsoort, detailontwatering etc. hiervoor een goede basis vormden.

Onderstaand zullen een tweetal aspecten in het kort worden aangegeven.

3.1. Onderzoek naar de effecten van waterbeheersing en de te voeren strategie.

Het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te Wageningen en de Landinrichtingsdienst zijn gezamenlijk met het waterschap een onderzoek gestart om de basis voor het waterbeheer aan te dragen. De vraag is, hoe het waterschap met de waterpeilen in de watergangen moet handelen, om de belangen binnen het waterschap het beste te dienen.

Het onderzoek is afgestemd op agrarisch belang omdat nagenoeg het gehele waterschap een akkerbouwgebied is.

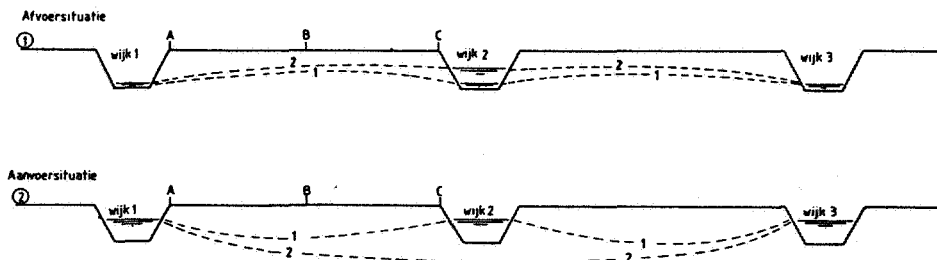
Het onderzoek strekt zich uit van het waterbeheer door het waterschap in de watergangen tot het waterbeheer van de ingelanden in hun wijken en percelen (drainage).

Ten behoeve van het genoemde I.C.W.-onderzoek is het waterschap waterpeilen, grondwaterstanden, aanvoer-afvoer van water, neerslag etc. gaan meten.

Het I.C.W. heeft gerekend met het SWATRE-model, een model voor de onverzadigde zone.

De eindrapportage van het onderzoek (ir. P.J.T. van Bakel, I.C.W.) is binnenkort beschikbaar.

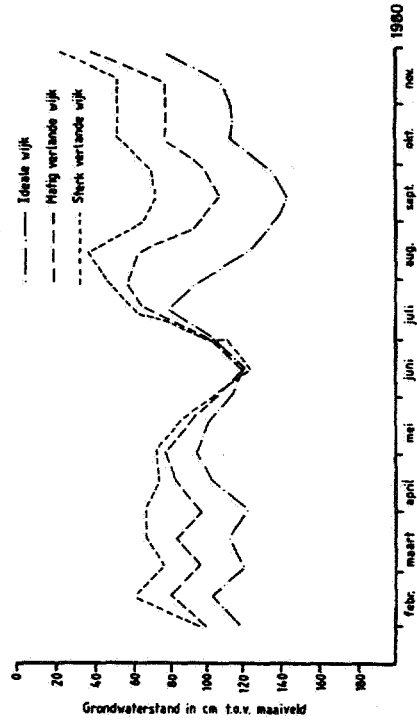
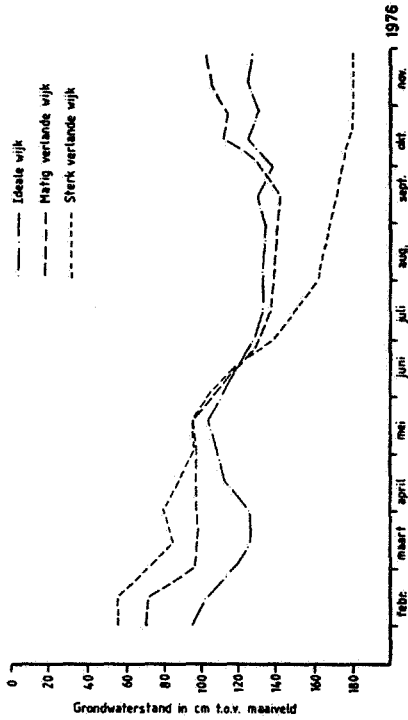
Uit het onderzoek blijkt hoe belangrijk het is om de detailontwatering voor zowel waterafvoer, als -aanvoer goed in orde te hebben. Een en ander is ook vermeld in het rapport "Opschonen wijken", verslag van een proef in de drentse veenkoloniën, waaruit de volgende figuren zijn overgenomen.



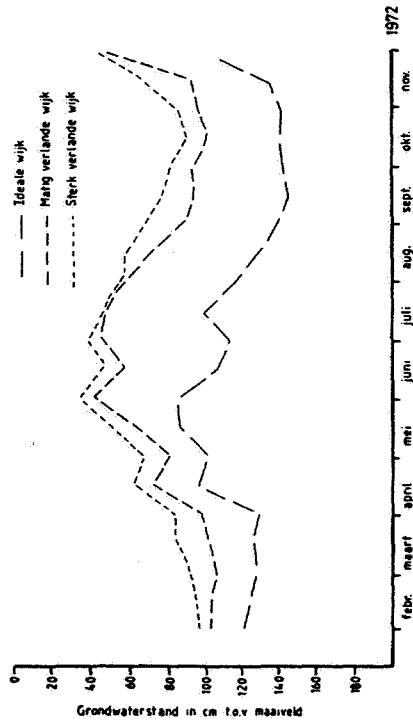
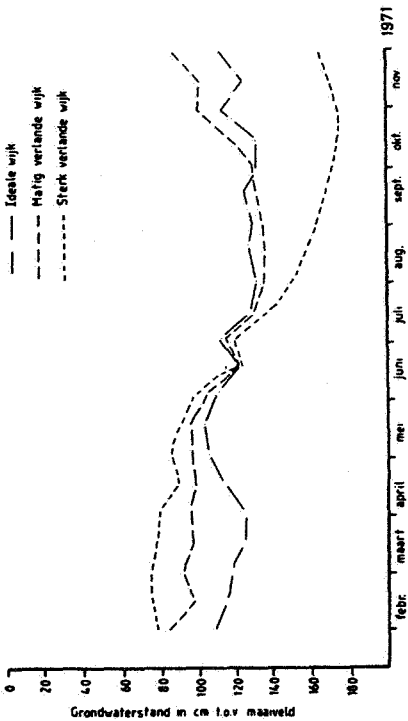
- ① Verloop bij alle wijken opgeschoond
② Verloop indien wijk 2 sterk is verland

fig 8

Het schematisch verloop van de grondwaterstand in een raai over 3 wijken, bij verschillende onderhoudstoestand van de middelste wijk.



1976, zeer droog jaar;
1980, jaar met zeer droog voorjaar gevolgd door een extreem natte periode van 16 juni tot 20 juli.



Het verloop van de berekende grondwaterstand bij 3 verschillende onderhouden van de wijk. In een viertal geselecteerde jaren:
1971, tamelijk droog jaar;
1972, jaar met (zeer) natte maanden april t/m juli;

Uit de figuren blijkt duidelijk hoe belangrijk de onderhoudstoestand van de wijken is in zowel natte als droge situaties. Het onderzoek geeft verder inzicht in de te volgen waterbeheersingsstrategie en de mogelijk te behalen rendementen.

3.2. Huidige waterbeheersingsstrategie en de resultaten.

Op dit moment wordt het peilbeheer gevoerd aan de hand van periodieke metingen van grondwaterstanden en waterpeilen; factoren als bodemvocht, invloeden van weersomstandigheden en het tijdstip in het groeiseizoen kunnen daarbij nog niet cijfermatig worden beoordeeld, maar er wordt in de praktijk wel rekening mee gehouden.

Het huidige systeem bestaat er uit, dat er wekelijks per stuwgebied het volgende wordt gemeten:

- waterpeil in de watergang;
- grondwaterpeil in het bijbehorende gebied;
- afvoer over de stuw.

Deze gegevens worden met behulp van een micro-processor in een waterweekrapport vertaald, waarin per week de volgende relaties zijn af te lezen:

- grondwaterstand ten opzichte van gemiddeld maaiveld in het stuwgebied;
- verschil tussen waterpeil in de watergang en de grondwaterstand in het stuwpeilgebied;
- positieve of negatieve verandering van dit verschil ten opzichte van de vorige week.
- verandering van de afvoer ten opzichte van de vorige week.

Uit dit waterweekrapport is de waterbeweging in het gebied wekelijks te volgen.

Het beheer is er in grote lijnen op gericht om - ervan uitgaande dat de perceelsomstandigheden en de detailontwatering bij de ingelanden goed zijn - de ontwateringsdiepte in de herfst, winter en vroege voorjaar zo optimaal mogelijk te laten zijn.

Indien in het voorjaar en zomer de grondwaterstanden dalen en de natuurlijke afvoer uit het gebied afneemt, worden de waterpeilen in de watergangen verhoogd en wordt er water geconserveerd of zonodig aangevoerd.

In natte zomerperiodes, bij stijgende grondwaterstanden, wordt het waterpeil in de watergangen verlaagd.

Uit het genoemd I.C.W.-onderzoek zijn richtlijnen gekomen om bovengenoemde algemene strategie in cijfers te vertalen.

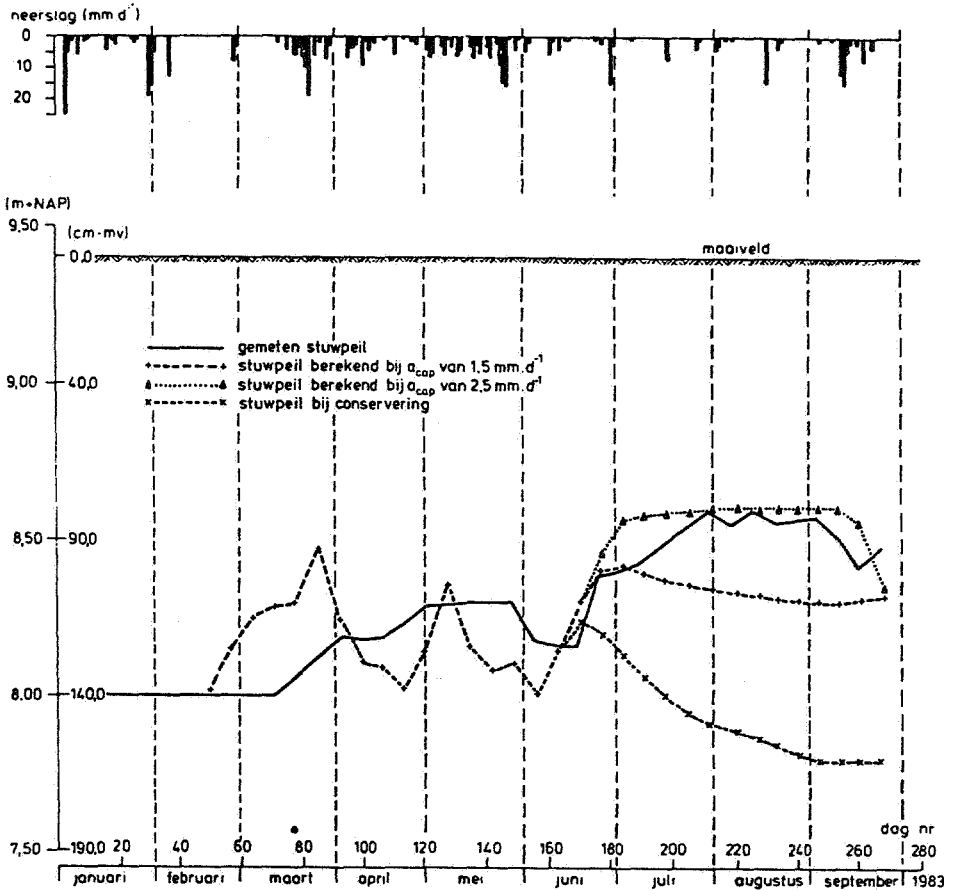
Een nadrukkelijke zorg is steeds een zodanig waterpeil in de watergangen in te stellen, dat de grondwaterstanden in de percelen niet te hoog kunnen oplopen en schade veroorzaken.

Het in 1983 uitgeoefende waterbeheer in een deel van het waterschap is in het kader van het genoemde I.C.W.-onderzoek getoetst aan de onderzoeksresultaten en doorgerekend met modellen voor de onverzadigde zone.

De resultaten zijn vermeld in de interne I.C.W.-nota 1485.

"Analyse van het stuwpeilbeheer in 1983 zoals uitgevoerd door het waterschap De Veenmarken" (ir. P.J.T. van Bakel) januari 1984.

Onderstaande is de vergelijking van gemeten en een aantal gesimuleerde stuwpeilverlopen gedurende de eerste negen maanden van 1983 weergegeven.



(profieltype : iWp gemengwoeld)

Door middel van wateraanvoer kon gedurende de tweede helft van het groeiseizoen het stuwpeil op voldoende hoogte worden gehouden.

De conclusie is, dat er in 1983 door het gevoerde peilbeheer en de wateraanvoer, afhankelijk van de bodemsoort, een verhoging van de gewasverdamming is bereikt van 23 resp. 40 mm, hetgeen neerkomt op ca. f 400,-, resp. f 750,- per ha cultuurgrond.

Daarbij is er vanuitgegaan, dat er sprake is van een optimale waterconservering en een goed onderhouden wikenstelsel. De waterconservering heeft 6 à 11 mm bedragen.

De effecten van het uitgevoerde stuwpeilbeheer door het waterschap benaderen voor 80 à 90% het beheer, dat op basis van de onderzoeksresultaten zou zijn gevoerd.

De analyse geeft inzicht hoe op de extreme weerssituatie in 1983 (van zeer nat tot zeer droog) is ingespeeld.

Ook de berekende resultaten over een reeks van jaren zijn zeer de moeite waard, nl. f 100 à f 200/ha afhankelijk van de grondsoort.

4. Slotopmerkingen en toekomstverwachtingen.

Bovengenoemde beheersstrategie laat geen ruimte voor "psychologisch waterbeheer", op klachten wordt niet spontaan gereageerd door waterpeilen te verhogen of te verlagen.

Op voorlichtingsvergaderingen wordt het systeem herhaaldelijk uitgelegd, hetgeen een positieve respons oplevert. De discussies worden fundamenteeler.

Aan de volgende stap wordt gewerkt, nl. niet alleen de grondwaterstanden temeten voor het waterbeheer, maar deze tezamen met de parameters van neerslag, verdamping, bodemvocht etc. wekelijks door te rekenen in een computermodel ter advisering van het peilbeheer.

Het genoemde I.C.W.-onderzoek heeft de wetenschappelijke onderbouwing daarvoor aangedragen.

Naast het sturen van het waterbeheer, kunnen dan ook periodieke analyses van het gevoerde beheer worden gemaakt.

In het bovenstaande heb ik trachtten duidelijk te maken, hoe binnen het waterschap wordt gemeten ten behoeve van het waterbeheer en er onderzoek wordt verricht ten behoeve van de wetenschappelijke basis voor het waterbeheer.

Het waterschap is gezien de boven behandelde materie veel dank verschuldigd aan zowel het I.C.W. te Wageningen alsmede de Landinrichtingsdienst, niet alleen vanwege het vele werk, maar met name ook voor de zeer enthousiaste aanpak van het probleem.

Literatuur.

1. Opschonenwijken. Verslag van een proef in de Drentse Veenkoloniën.
2. Analyse van het stuwpeilbeheer in 1983 zoals uitgevoerd door het waterschap de Veenmarken. I.C.W.-nota 1485 jan. 1984, ir. P.J.T van Bakel.

METEN BIJ HET HOOGHEEMRAADSCHAP VAN RIJNLAND

Ing. J.H. Riemens

1. INLEIDING

Bij het hoogheemraadschap van Rijnland (boezembeherend waterschap en zuiveringsschap gelegen in het westen van ons land tussen Noordzeekanaal en de lijn Gouda - Den Haag) wordt veel en intensief gemeten. Dit geldt al meer dan een eeuw voor metingen in de sfeer van de waterkwantiteit (met name wat de boezem betreft). Het chemisch-fysisch onderzoek van oppervlaktewater (boezem- en polderwater) kwam eerst goed op gang in de jaren zestig. Van 1975 af kan worden gesproken van een uitgebreid waterkwaliteitsonderzoek.

De noodzaak van het meten vloeit eigenlijk voort uit de op het waterkwantiteitsbeheer betrekking hebbende reglementaire taak dan wel uit de taak met betrekking tot het waterkwaliteitsbeheer zoals omschreven in de Verordening Waterkwaliteitsbeheer Rijnland, uitvloeisel van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren. Als zodanig kan meten als een wettelijke verplichting worden gezien. Het waterschap heeft als overheidslichaam ook een maatschappelijke verantwoordelijkheid, die soms uitstijgt boven wat strikt verplicht is. Het onderbreken van een historische reeks van metingen is vaak even moeilijk als het verbreken van een kettingbrief.

Actueel echter blijft de vraag: "Meten we niet te veel en meten we de juiste dingen?"

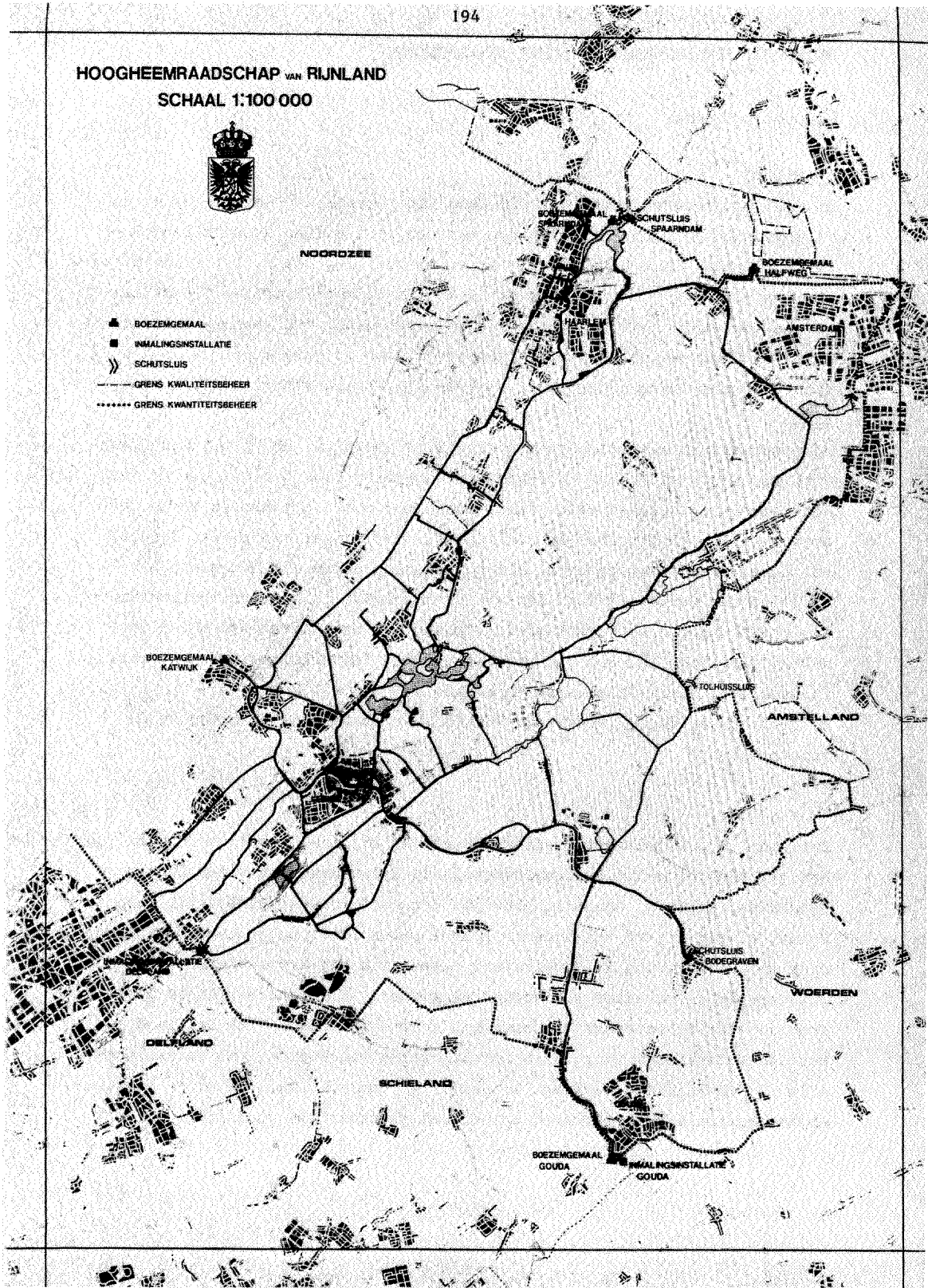
Het ruim 100.000 ha grote beheersgebied van Rijnland wordt doorsneden door een ca. 4300 ha groot boezemwaterstelsel. Boezembemaling vindt plaats te Spaarndam, Halfweg, Gouda en Katwijk. Het hoofdinlaatpunt bevindt zich te Gouda, alwaar uit de Hollandsche IJssel water wordt ingelaten. Een belangrijk neveninlaatpunt is Bodegraven, alwaar via het Grootwaterschap van Woerden nog extra water kan worden aangevoerd. Rijnland heeft een doorvoerfunctie voor de wateraanvoer naar het Hoogheemraadschap van Delfland en voor de waterafvoer voor het Grootwaterschap van Woerden. De waterbehoefte alleen voor Rijnland bedraagt in een droge zomer 24 m³/s (2 milj. m³/etm.). De boezembemaling is berekend op een waterbezwaar van 15,6 milj. m³/etm.

HOOGHEEMRAADSCHAP VAN RIJNLAND
SCHAAL 1:100 000



NOORDZEE

- ▲ BOEZEMGEMAAL
- INMALINGSINSTALLATIE
- >> SCHUTSLUIS
- GREN. KWALITEITSBEHEER
- GREN. KWANTITEITSBEHEER



Naast taken met betrekking tot zeewering en boezem heeft Rijnland als kwantiteitsbeheerder de directe zorg voor de polderwaterstelsels c.a. in 40 polders, gegroepeerd in twee Rijnlandse polderafdelingen genaamd Middengeest en Zuidgeest. De andere binnen het beheersgebied gelegen polders (ca. 120) zijn enkele jaren geleden bestuurlijk samengevoegd tot zes inliggende, zelfstandige waterschappen, met een eigen kwantiteitsbeheer over het polderwater. Uiteraard wordt ook door de Rijnlandse polderafdelingen en de inliggende waterschappen veel meetwerk verricht. Rijnlands kwaliteitstaak strekt zich echter uit over al het oppervlaktewater. Daarom kan men zeggen dat de kwaliteitsmetingen op globaal 10.000 ha oppervlaktewater betrekking hebben.

De reeks "wat - waarom - waar en wanneer" is leidraad voor deze beschouwing over meten, waarbij eerst de kwantiteitsmetingen aan de orde komen. De vraag naar het waarom lijkt het belangrijkste. Als daar geen bevredigend antwoord op komt, kan het meten beter worden vergeten en behoeven andere vragen niet meer te worden gesteld.

Bij "wat" kan aan inventarisatie worden gedacht; het "waarom" slaat op de noodzakelijke bezinning of analyse; het "waar" kan worden vertaald in dichtheid van het meetnet en "wanneer" slaat op de meetfrequentie.

2. WATERKWANTITEITSMETINGEN

Wat?

Boezemstanden en buitenwaterstanden moeten als eerste belangrijke groep van waterstanden worden genoemd als onderwerp van kwantiteitsmetingen. Door Rijnland worden metingen verricht in het water aan de rand van het gebied (Noordzeekanaalboezem, Woerdens boezem, Hollandsche IJssel en niet te vergeten de Noordzee). (Voor Rijnland als buitenwater te beschouwen). Regenval, windsnelheid en -richting, barometerstand en temperatuur van lucht en van water vormen als weerkundige waarnemingen een tweede groep van te meten grootheden.

Onder debietmetingen vallen stromingsmetingen, metingen van afvoeren van gemalen en metingen van wateraanvoeren. In de praktijk wordt volstaan met periodieke metingen ter toetsing van ijktabellen.

Peilingen zijn een welhaast vanzelfsprekende bezigheid van een waterschap. Rijnland heeft voorts de taak 40 km zeewering instand te houden. Dat daarbij kustmetingen behoren zal duidelijk zijn.

Waarom?

De belangrijkheid van de vraag naar de zin van meten rechtvaardigt een wat uitgebreide beschouwing.

De kwantiteitsmetingen hebben allereerst een grote operationele waarde. Operationeel wil in dit verband zeggen, dat de dagelijkse bepaling van de bemalings- en inlatingsstrategie (in de praktijk boezembeheer genoemd) voor het grootste deel direct uit meetresultaten worden afgeleid. Regenval, waterstanden en kwaliteit (chloride- en zuurstofgehalte vormen de directe basis voor het boezembeheer.

Weersverwachtingen spelen natuurlijk ook een grote rol. Ook zij zijn op meetgegevens gebaseerd, maar de interpretatie daarvan blijkt niet altijd eenvoudig. Er zijn voor de boezembeheerder overigens goede korte termijn-verwachtingen.

Terzijde wordt opgemerkt, dat ook in de praktijk van het boezembeheer het nut van automatisering blijkt bij het kennis nemen van meetgegevens. Als voorbeeld kan worden genoemd de thans betaalbare mogelijkheid om via het openbare telefoonnet waterstandsgegevens en eventueel ook andere gegevens uit een datalogger op te vragen, om deze vervolgens door een personal (portable) computer te laten uitprinten. Het actuele verloop van bijv. de boezemstand - dat op deze wijze bekend wordt - betekent een wezenlijke bijdrage tot onderbouwing van beslissingen met betrekking tot de bemalings- en inlatingsstrategie.

Er zijn ook specifieke operationele waarden te onderscheiden. Het meten van buitenwaterstanden geeft inzicht in de opvoerhoogte van gemalen, met als mogelijk resultaat het moeten beperken van de bemaling. Windgegevens zijn bepalend voor op- en afwaaiingseffecten, waardoor de waterstand gemeten op een centrale plaats naar waarde kan worden geschat. Barometerstand en temperatuur kunnen waardevolle signalen zijn voor de waterbehoefte. En tenslotte kunnen hoeveelheidsmetingen in de aanvoeren naar het boezemsysteem inzicht geven in de te verwachten kwaliteit van het inlaatwater. Een voorbeeld hiervan is de relatie tussen de Rijnaafvoer en het chloridegehalte van de Rijn.

De informatieve waarde van kwantiteitsmetingen moet niet worden onderschat. Daarbij kan ondermeer worden gedacht aan de velen die schriftelijk of telefonisch bepaalde gegevens opvragen: het aan overheid en publiek verstrekken van informatie over regenval, waterstanden en chloridegehalten behoort tot de dagelijkse praktijk van de waterschapsambtenaar.

Onderzoeken zoals

Onderzoeken zoals beoordeling van lozingen, berekeningen van schutzout, opstellen van leggers, kustbeheer enz. zijn even zo vele willekeurig gekozen voorbeelden van deeltaken, die alleen met voldoende meetgegevens kunnen worden uitgeoefend. Studies, onderzoeken, balansen enz. behoeven overigens niet altijd door de eigen dienst te worden opgezet. Talrijke gegevens uit vele jaarverslagen of interne rapporten zijn al door vele afstuderenden of onderzoekers verwerkt. Rijnland zelf stelt water-, chloride-, fosfaat- en stikstofbalansen op. Voor het kunnen opstellen van de chloride-balans wordt reeds sinds eind 30er jaren bij elke bemaling of inlating elk uur een watermonster genomen ter bepaling van het chloridegehalte. Dit geldt in overeenkomstige zin sinds 1981 voor de fosfaat- en stikstofbalans. En berekeningen van boezembemalingscapaciteiten, zouden zonder gedetailleerde meetgegevens over regen, waterstanden en afvoeren van poldergemalen ondenkbaar zijn. Een recent Rijnlands onderzoek naar 30 jaar boezemstanden is de basis voor een (toekomstig) peilbesluit voor de boezem, hetgeen zeker geen alledaagse besluitvorming zal zijn en zonder meten niet mogelijk is.

Als vierde belangrijke groep moet het meten voor modellen en plannen worden genoemd.

Zo is toetsing van modellen een voorbeeld van een nogal veel voorkomende meetactiviteit naast de meer routinematige metingen.

Rijnland beschikt over een rekenmodel van de boezem als kwantiteitsmodel. Dit model bestaat uit 166 takken en 129 knooppunten. Het beslaat de zogenaamde primaire boezemwateren, die een hoofdfunctie in het watertransport vervullen. Daarnaast kan een secundair net met een regionale betekenis en een tertiair net met een plaatselijke betekenis worden onderscheiden.

Het model is in 1964 opgezet. In 1980 werd het model geheel aangepast en vernieuwd.

Aan het model liggen vrij intensieve metingen ten grondslag. Zo werden over een totaal-strekking van 370 km boezemwater, profielmetingen (peilingen) verricht. Een andere groep metingen bestond uit het opmeten van kunstwerken zoals bruggen, teneinde de afzonderlijke invloed daarvan op de weerstand van de tak te leren kennen.

Voorts werd van elke tak door visuele waarneming de weerstandscoefficient van Manning bepaald. De methode die hierbij werd toegepast - en die tot bevredigende resultaten leidde - was die van Woody L. Cowan (Estimating hydraulic roughness coefficient 1956 July Agricultural Engineering).

Daarbij wordt eerst een basiswaarde voor de weerstand bepaald waarna vervolgens correcties worden aangebracht voor begroeiing, bochten in het tracé, profielveranderingen enz. Van elke tak werd aldus de totale weerstand bekend, de zogenaamde Ksi-waarde (eenheid $m^2 s^{-5}$).

Ook moeten in dit verband worden genoemd de ijkingsmetingen in de vorm van stromings- en waterstandsmetingen, waarbij nogal wat moest worden gemeten en gewijzigd, alvorens van een redelijk betrouwbaar model kon worden gesproken. Tot nu toe zijn er met het nieuwe model 26 scenario's of stromingssituaties doorgerekend, die elk in de praktijk hun specifieke waarde hebben bewezen: niet alleen voor het kwantiteitsbeheer, maar evenzeer voor het kwaliteitsbeheer.

Het kwantiteitsmodel vormt ondermeer de hydrologische basis voor het thans afgeronde waterkwaliteitsmodel, waarmee verschillende kwaliteitsaspecten wiskundig kunnen worden beschreven. De operationele waarde van het kwaliteitsmodel, dat ondermeer met rekenresultaten verkregen uit het kwantiteitsmodel moet worden gevoed, ligt in het kunnen doorrekenen van bepaalde scenario's met vragen over verdergaande zuivering van afvalwater en fosfaatverwijdering, om slechts twee voorbeelden in algemene zin aan te geven. Voor wat betreft de planvorming valt te denken aan het meten voor het toekomstige waterkwaliteitsbeheersplan en de zogenaamde waterakkoorden in het kader van de toekomstige wet op de waterhuishouding. Maar planvorming kan nooit doel op zichzelf zijn. De wetgever beoogt een optimaal waterbeheer. En dat zal in eerste instantie richtsnoer bij het opstellen van meetprogramma's moeten zijn en blijven.

Waar en Wanneer?

Nu op de vraag "waarom" een positief antwoord kon worden gegeven is het zinnig de vragen "waar" en "wanneer" te beantwoorden. Bij Rijnland concentreren de kwantiteitsmetingen als boezemstanden en regenval (belangrijke parameters voor de dagelijkse praktijk van het boezembeheer) zich van oudsher te Oude Wetering, centraal gelegen en min of meer ongevoelig voor op- en afwaaiing. Inzicht in de mate van op- en afwaaiing is overigens wel nodig om de aan de randen van het boezemsysteem gemeten waterstanden - afgezien van afmalings- of inlatingseffecten - naar hun waarde te kunnen schatten.

Regenval wordt dagelijks gemeten en daarnaast continu geregistreerd door een zelfregistrerende regenmeter. Continue registratie geldt ook voor de boezemstanden op de 5 vaste meetpunten (Oude Wetering en de vier boezemgemalen).

Er is een telefonische waterstandsmelder in gebruik: Bij telefonisch contact wordt de boezemstand automatische en in code doorgegeven.

Van belang zijn voorts de regencijfers op 16 waarnemingsstations in of nabij het gebied van Rijnland gelegen. Een recente berekening naar het zogenaamde gebiedsgrootte-effect van Oude Wetering geeft bij een regenval aldaar van 40 mm een gebiedsreduktiefactor voor het gehele Rijnlandse beheersgebied van 85%, bij 25 tot 35 mm van 90% en bij regenhoeveelheden tussen 15 en 25 mm van 92%. Inzicht in dergelijke percentages kunnen niet alleen het meetprogramma beperken, maar komen in deze tijd van bezuiniging erg goed van pas bij berekeningen van boezembemalingscapaciteiten en waterbezwaren.

Voorts moeten in het kader van de vragen waar en wanneer worden gememoreerd de dagelijkse weerkundige waarnemingen te Oude Wetering en de dagelijkse meting van buitenwaterstanden met uiteraard een continue getijderegistratie. Debiet- en profielmetingen zijn door hun aard en doel minder routinematig, zodat tijd en plaats nogal wisselen.

3. WATERKWALITEITSMETINGEN

Wat?

De stap naar kwaliteitsmetingen is op papier klein. Maar in werkelijkheid is er sprake van een geheel ander soort metingen, die echter vrijwel alle beginnen met wat "bemonsteren" wordt genoemd.

Het standaard chemisch-fysisch onderzoek betreft in de Rijnlandse situatie een groot aantal parameters, totaal 12.

Het onderzoek op zware metalen is gericht op cadmium, chroom, koper, kwik, lood, nikkel en zink.

Het oppervlaktewater wordt voorts op 17 (meest voorkomende) bestrijdingsmiddelen onderzocht.

Het bacteriologisch onderzoek betreft het onderzoek naar colibacteriën.

Het hydrobiologisch onderzoek richt zich op fyto-plankton (plantaardig)- en op de zogenoemde eutrofiëringstoetsen.

Tenslotte is er het chloride- en zuurstofonderzoek, waarbij ook de temperatuur van het water wordt gemeten om zuurstofverzadigingspercentages te kunnen berekenen.

Op ca. 450 punten worden in het kader van het chemisch-fysisch onderzoek 12 parameters gemeten, waarvan op 40 punten nog eens 9 parameters meer.

De resultaten van de modelberekeningen, nieuwe verplichtingen met betrekking tot de normtoetsingen en de noodzaak van bezuiniging maken het ook voor Rijnland noodzakelijk zich te herbezinnen op het onderzoeksprogramma, waarvan aantal en plaats van de monsterpunten een belangrijk onderdeel is.

5. RELATIE KWALITEIT - KWANTITEIT

Na beschouwing van kwantiteits- en kwaliteitsmetingen afzonderlijk volgt nu logischerwijs de confrontatie van beide metingen, of beter gezegd de relatie tussen beide metingen.

De kwantiteitsbeheerder zal zijn bemalings- en inlatingsstrategie mede moeten laten afhangen van de kwaliteitstaak. Bemalen heeft meestal invloed op de waterkwaliteit, zeker bij een niet overal gelijke waterkwaliteit. Die invloed kan al dan niet positief zijn. Bij Rijnland staat bemaling en inlating als onderdeel van een doorspoelingssysteem in dienst van de bewaking van de waterkwaliteit.

Een aantal kwaliteitswaarnemingen hebben dus directe operationele waarde voor de "peilbeheerder": hij gaat er direct mee aan de slag. Dit zijn zoals eerder opgemerkt ondermeer de weekbemonstering van de boezem op 26 punten. Bemaling en inlating worden mede op die weekresultaten afgestemd. Het bemalings- en inlatingsbeleid zal echter ook op andere kwaliteitsparameters gebaseerd kunnen zijn.

Voorbeelden daarvan zijn: te grote plaatselijke beïnvloeding van effluent maakt geregelde inzet van een bepaald boezemgemaal nodig; bij inlating te Gouda moet rekening worden gehouden met een extra fosfaataanvoer; chloride-metingen in diepe polders geven inzicht in de mate van de invloed van de kwel op het boezemwatersysteem.

Andersom zijn er diverse kwantiteitsmetingen die de kwaliteitsbeheerder nodig heeft om zijn taak te kunnen uitvoeren. Stromings- of debietmetingen kunnen een belangrijk gegeven opleveren bij het zoeken naar een geschikt lozingspunt voor afvalwater, al dan niet gezuiverd; profielmetingen kunnen bepalend zijn voor de toelaatbaarheid van bepaalde lozingen; grote koelwateronttrekkingen of -lozingen kunnen moeilijk worden beoordeeld zonder een gedegen kennis van de waterstaatkundige infrastructuur en diverse stromingsmetingen, eventueel met het oog op modelvorming.

Kortom er is een voortdurende wisselwerking tussen kwantiteit en kwaliteit van het oppervlaktewater.

Treffender dan de volgende

aan de praktijk ontleende uitspraken zijn wellicht niet te vinden, om de relatie uit te drukken tussen de kwantiteitstaak en kwaliteitstaak en dienovereenkomstig tussen de desbetreffende metingen.

In 1938 zei een Rijnlandse ambtenaar tegen zijn dijkgraaf:

"Voor de toekomst kunnen de chloorcijfers van grote betekenis zijn. Voor ons onderzoek is echter het chloridegehalte slechts een hulpmiddel dat ons oneindig veel meer van de waterbeweging op den boezem vermag te vertellen, dan wij langs andere weg te weten zouden kunnen komen". einde citaat

En De Gruyter, destijds hoofd technische dienst, sloot daar op zijn eigen wijze bij aan:

"Zeg mij hoe U den boezem beheert en ik zal U zeggen welke chloridegehalten het boezemwater op verschillende plaatsen heeft". einde citaat

6. CONCLUSIE

Het goede meetprogramma moet tot het goede doel leiden en dat is een goed waterbeheer. En omdat dát ook de doelstelling van de planvorming moet zijn behoeft men die planvorming niet als een dreigende aanslag op tijd, geld en energie te zien. De kwantiteits- en kwaliteitsbeheerder streeft immers naar een goed waterbeheer.

In herinnering wordt gebracht een symposium te Lunteren (1984) over planvorming toen (in een lezing overigens), vier functionarissen ten tonele werden gevoerd, die elk anders tegen planvorming aankeken. Waarom zou dit dan ook niet op meten van toepassing wellicht kunnen zijn en op de volgende wijze:

"Een technisch medewerker, die veel en overal wil meten,

Een onderzoeker die vaak veel op één plaats wil meten,

Een beleidsmedewerker aan wie beheerder en onderzoeker telkens moet leggen waarom ze meten, en

Een bestuurder die het liefst zo weinig mogelijk wil meten om de omslag op heffing beperkt te houden."

Het goede meetprogramma zal dus een resultaat moeten zijn van gezamenlijk overleg en daardoor zeker afhankelijk van omstandigheden.

Wat Rijnland meet blijkt in de praktijk voor Rijnland geen slecht programma te zijn maar de opsomming daarvan heeft - vanzelfsprekend - niet het doel model te zijn voor anderen. Daarvoor is de gecompliceerdheid van de diverse waterstaatkundige systemen te groot en zijn er tussen die systemen te veel specifieke verschillen.

Er zijn minder juiste gemeenplaatsen denkbaar dan de uitdrukking "Meten is Weten". En uit deze beschouwing blijkt toch wel dat de noodzaak van dat meten vaak groter is dan aanvankelijk wordt aangenomen of beseft. Overigens moet niet worden geschroomd een meetprogramma drastisch te wijzigen als een tussentijdse bezinning daartoe toch echt aanleiding geeft. Van belang is ook de constatering dat de relatie tussen waterkwantiteit en waterkwaliteit al begint bij de desbetreffende metingen. De kwantiteits- en kwaliteits-beheerders dienen dan ook voor een optimaal waterbeheer kennis te nemen van elkaars meetresultaten.

Op deze wijze bezien is meten bij een boezembeherend waterschap dat tegelijk een actieve taak heeft op het gebied van de waterkwaliteit een zinvol, noodzakelijk en dankbaar onderdeel van de taakuitoefening.

RAPPORTEN EN NOTA'S VAN DE COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

1. Tweede rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische verwerking van
hydrologische gegevens TNO.
Januari 1977.
2. Verslag en aanbevelingen
van de ad hoc-groep Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur TNO.
Juli 1978.
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.
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.
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.
6. Derde Rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische verwerking van
hydrologische gegevens TNO.
Februari 1981.
7. Overzicht van de wensen van hydrologen en waterbeheerders ten
aanzien van het operationele regenwaarnemingennet van het 'KNMI -
J.C. Hooghart.
Oktober 1981.
- 8a. Verklarende Hydrologische Woordenlijst.
I. Water in de onverzadigde zone
II. Water in de verzadigde zone
van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie.
Januari 1982.

- 8b. Verklarende Hydrologische Woordenlijst
III. Atmosferisch water
van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie.
Juni 1983.
- 8c. Verklarende Hydrologische Woordenlijst
IV. Oppervlaktewater
van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie.
Maart 1985.
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.
10. Rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Grondwatermodellen, CHO-TNO.
April 1982.
11. Inventarisatie Grondwaterkwaliteitsmodellen.
L.J.M. Boumans
Oktober 1982.
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.
- 12a. Voorlopig overzicht van inventarisaties waarin grondwater(kwaliteits)-
modellen voorkomen of hiermee in verband staan.
J.C. Hooghart.
Januari 1984.
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 1985.
14. Meten, meetnetten en optimale meetnetontwerpen ten dienste van het
waterbeheer.
Een verslag van de voorjaarsbijeenkomst van de KIvI Sectie Water-
beheer op 9 mei 1984 en het colloquium van de CHO-TNO Studiegroep Sta-
tistiek in de hydrologie op 21 november 1984 - (P. v.d. Kloet en
J.C. Hooghart).
Januari 1986.

