

816c62

INTERNE MEDEDELING NR: 342
maart 1995

STARING CENTRUM
Wageningen

BIBLIOTHEEK DE HAAFF
Droevendaalsesteeg 3a
6708 PB Wageningen

**HUIDIG EN TOEKOMSTIG ONDERZOEK NAAR DE
RUIMTELIJKE EN TEMPORELE VARIABILITEIT VAN HET
FREATISCH GRONDWATERNIVEAU**

**INVENTARISATIE VAN HET VERRICHTE ONDERZOEK 1991-1994 EN
VOORSTELLEN VOOR TOEKOMSTIG ONDERZOEK TOT EN MET HET
JAAR 2000**

M.F.P. BIERKENS
Afdeling Landinventarisatiemethoden

1787247



Inhoud

Voorwoord	1
1. Inleiding	3
2. Bezwaren tegen de huidige Gt-methodiek	4
3. Eisen aan een alternatieve methodiek	5
4. Methode van beschrijving	6
4.1 Grootheden	6
4.2 Beschrijvingswijze	7
5. Onderzoek naar het freatisch vlak zoals verricht/te verrichten bij SC-DLO	9
5.1 Korte termijn-onderzoek	9
5.2 Lange termijn-onderzoek	10
6. Afweging van de beschreven onderzoeksrichtingen	16
6.1 Een eerste evaluatie	16
6.2 Hoe verder?	16
7. Literatuur	17
Bijlagen	
A: Beschrijving onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek"	19
B: Beschrijving onderzoekslijn "Geostatistische interpolatie van grondwaterstanden met gebruikmaking van metingen en geografisch-hydrologische modelresultaten" door W.J.M. te Riele	26
C: Beschrijving onderzoekslijn "Geregionaliseerde MISO-modellen voor de beschrijving van de freatische grondwaterstand op regionale schaal" door M. Knotters	36
D: Beschrijving onderzoekslijn "Beschrijving van de variatie van het freatisch vlak met behulp van stochastische partiële differentiaalvergelijkingen" door M.F.P. Bierkens	43

Voorwoord

Medio 1990 is bij SC-DLO de werkgroep Gt-onderzoek (Gt = grondwatertrap) ingesteld met als doel de huidige Gt-methodiek voor de beschrijving van het freatisch vlak te beoordelen op zijn geschiktheid als basisinformatie voor toekomstige onderzoeksvragen (Werkgroep Gt-Onderzoek, 1991). Op grond van een inventarisatie van de bezwaren die bestonden tegen de uitgangspunten van de huidige Gt-methodiek, de gebruikte classificatie, de kartering en de toepassing van Gt-kaarten, formuleerde de werkgroep een aantal eisen waaraan een beschrijving van het freatisch vlak zou moeten voldoen. Op grond van deze eisen werden onderzoeksvragen geformuleerd ten aanzien van: 1) De verbetering van de huidige Gt-methodiek (korte termijn doelstelling), 2) De formulering en onderbouwing van alternatieven voor de huidige Gt-methodiek (lange termijn doelstelling).

In de voor u liggende notitie worden allereerst de eisen aan een alternatieve Gt-methodiek opnieuw bekeken en waar nodig uitgebreid. Vervolgens wordt bekeken welke van de onderzoeksvragen ten aanzien van de korte termijn-doelstelling zijn beantwoord. Een inhoudelijke invulling wordt gegeven aan het lange termijn-onderzoek voor zover dit plaatsvindt of zal plaatsvinden binnen de afdeling Landinventarisatiemethoden. Dit voorgestelde lange termijn-onderzoek dient afgestemd te zijn op de gestelde eisen aan een alternatieve Gt-methodiek en het onderzoek naar en met grondwaterstanden dat plaatsvindt bij de andere hoofdafdelingen en dient praktisch uitvoerbaar te zijn. Om voorgestelde onderzoeksrichtingen aan deze eisen te toetsen zijn er een tweetal workshops gehouden waar medewerkers van de hoofdafdeling Landinventarisatie en -Evaluatie, de hoofdafdeling Fysisch bodembeheer en de hoofdafdeling Waterbeheer aan hebben deelgenomen. Bezwaren en conclusies van deze workshops zijn in de voor u liggende notitie meegenomen. De notitie resulteert in een drietal onderzoekslijnen, elk bestaande uit een aantal projecten, welke zijn samengevat in het overkoepelend project (nr. 546) "Herziening Gt-methodiek". De beschrijving van dit overkoepelend project alsmede de beschrijvingen van de drie onderzoekslijnen staan vermeld in een aantal bijlagen bij deze notitie.

maart 1995

Marc Bierkens

1. Inleiding

Traditioneel wordt het ruimtelijk en temporeel gedrag van de grondwaterstand in Nederland beschreven met behulp van de grondwatertrappen-kaarten. Een grondwatertrap (Gt) is een deel van een classificatiesysteem dat tot doel heeft de temporele variatie van het freatisch vlak op één punt te beschrijven. Een Gt wordt gedefinieerd met behulp van twee variabelen: De gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG) en de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG). De GHG en de GLG kunnen worden bepaald uit een tijdreeks van grondwaterstanden van tenminste 8 jaar op de volgende wijze (Van Heesen, 1970):

- 1) Bepaal voor elk hydrologisch jaar (1 April t/m 31 Maart) het gemiddelde van de 3 hoogste en het gemiddelde van de 3 laagste gemeten grondwaterstanden. Dit resulteert in twee afgeleide tijdreeksen: Die van het gemiddelde van de drie hoogste grondwaterstanden per jaar (HW3) en die van het gemiddelde van de drie laagste grondwaterstanden per jaar (LW3) (Van der Sluijs en De Gruijter, 1985).
- 2) De GHG is dan gedefinieerd als het gemiddelde van de HW3 reeks bepaald over een periode van tenminste 8 jaar waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden. De GLG is gedefinieerd als het gemiddelde van de LW3 reeks bepaald over een periode van tenminste 8 jaar waarin geen ingrepen hebben plaatsgevonden.

Aangenomen wordt dan dat de jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand, wanneer gemiddeld over een groot aantal jaren, zich zal bewegen tussen de GHG (in de winter) en de GLG (in de zomer).

Alleen voor de zogenaamde stambuizen worden de GHG en de GLG bepaald aan de hand van langjarige tijdreeksen. Stambuizen zijn grondwaterstandsbuizen waarvan lange meetreeksen bekend zijn. Deze zijn opgeslagen in het bestand van het TNO instituut voor Grondwater en Geo-energie. Een ruimtelijk beeld van de GHG en de GLG kan tijdens een bodemkartering worden verkregen door extrapolatie vanuit een stambuis naar boorgaten aan de hand van hydromorfe bodemkenmerken of via de zogenaamde gerichte opname (Van der Sluijs, 1990; Te Riele en Brus, 1990). Extrapolatie naar grondwaterstandsbuizen met kortere opnameperioden gebeurt veelal via zogenaamde fluctuatiediagrammen (Van Heesen, 1970). Na ruimtelijke interpolatie van de GHG en de GLG volgt uit de combinatie van beiden de classificatie tot een Gt. Het ruimtelijk beeld van de Gt's wordt tenslotte vertaald naar een choropleth kaart: De grondwatertrappenkaart. Bij de meer traditionele karteringen worden de grondwatertrappen veelal rechtstreeks gekarteerd door correlatie met landschappelijke en bodemkundige kenmerken. IJking van de verkregen Gt-kaarten vindt dan plaats met behulp van de gerichte opname.

Tot 1989 is gebruik gemaakt van een indeling in 7 klassen, welke later iets is gedetailleerd door de introductie van drogere subklassen. Bij de opzet van de classificatie hebben vooral landbouwkundige overwegingen een rol gespeeld. Om ook aan andere belangen tegemoet te komen is sinds 1989 een nieuwe indeling in gebruik (De Vries en Van Wallenburg, 1990). Deze onderscheidt 8 hoofdklassen, aangevuld met zogenaamde kwalitatieve en kwantitatieve aanvullingen (i.e. subklassen). Voor een overzicht van de oude en nieuwe klasse-indelingen wordt verwezen naar het interne rapport van de Werkgroep Gt-Onderzoek (1991). Bij de herziening van 1989 is ook overgegaan tot een andere methode voor het bepalen van de HW3 en de LW3 reeksen. De LW3 wordt nu bepaald als het gemiddelde van de 3 laagste grondwaterstanden voor de zomerperiode (1 April t/m 30 September) en de HW3 uit het gemiddelde van de 3 hoogste grondwaterstanden voor de winterperiode (1 Oktober t/m 31 Maart) (Van der Sluijs en Van Heesen, 1989).

Medio 1990 is bij SC-DLO de werkgroep Gt-onderzoek ingesteld met als doel de huidige

Gt-methodiek voor de beschrijving van het freatisch vlak te beoordelen op zijn geschiktheid als basisinformatie voor toekomstige onderzoeksvragen (Werkgroep Gt-Onderzoek, 1991). Op grond van een inventarisatie van de bezwaren die bestonden tegen de uitgangspunten van de Gt-methodiek, de gebruikte classificatie, de kartering en de toepassing van Gt-kaarten, formuleerde de werkgroep onderzoeksvragen ten aanzien van:

- 1) De verbetering van de huidige Gt-methodiek (korte termijn doelstelling).
- 2) De formulering en onderbouwing van alternatieven voor de Gt-methodiek (lange termijn doelstelling).

Deze notitie behandelt met name het onderzoek dat binnen de afdeling Landinventarisatiemethoden (L.I.M.) wordt gedaan of wordt beoogd binnen het kader van de lange termijn doelstelling. Allereerst wordt ingegaan op de belangrijkste bezwaren tegen de huidige Gt-methodiek. Dit betreft zowel de bezwaren als geopperd in het rapport van de werkgroep Gt-onderzoek in 1991, alsmede theoretisch statistische bezwaren tegen de manier waarop de GHG en de GLG zijn gedefinieerd. Vervolgens worden op grond van deze bezwaren een aantal kern-eisen opgesteld waaraan een alternatieve Gt-methodiek voor de beschrijving van de temporele en ruimtelijke variatie van het freatisch vlak moet voldoen. Op grond van deze eisen wordt onderzocht welke parameters de variatie van het freatisch vlak het best karakteriseren, gelet op de eisen voor een alternatieve Gt-methodiek. Tenslotte wordt het huidige en beoogde onderzoek binnen L.I.M. beschreven voor zover dit past binnen de formulering van een alternatieve methodiek voor de beschrijving van het freatisch vlak.

2. Bezwaren tegen de huidige Gt-methodiek

De bezwaren zoals die zijn opgetekend in het interne rapport 142 door de werkgroep Gt-onderzoek (1991):

- 1) Een gedegen hydrologische onderbouwing van de GHG en de GLG ontbreekt. Dit maakt het moeilijk de Gt's eenduidig te interpreteren in termen van hydrologische regimes, zoals dat veelal gebeurt in de hydrologische systeemanalyse.
- 2) De weersinvloeden zijn te bepalend voor de gevonden waarden van de GHG en de GLG. De periode van 8 jaar lijkt te kort of er moet een mogelijkheid zijn om de GHG en GLG te corrigeren voor de weersinvloeden die golden tijdens de periode waarvoor de GHG en de GLG zijn bepaald.
- 3) De ruimtelijke variatie (spreiding) en temporele variatie (in de vorm van durlijnen) van de grondwaterstand is niet eenduidig uit de grondwatertrappenkaart af te leiden.
- 4) De classificatie van vooral het ondiepere GHG traject is te grof voor toepassing in het natuurbeheer.
- 5) De 40 cm grens gebruikt in de GHG voor grondwatertrap I tot en met VI is niet meer geschikt voor de ontwateringscriteria van de moderne landbouw.
- 6) De actualisering van de grondwatertrappen moet efficiënter en eenduidiger kunnen gebeuren.

Bij (regionaal) grondwateronderzoek is één van belangrijkste onbekende parameters de nuttige grondwateraanvulling/capillaire opstijging, de flux die het grondwatersysteem koppelt aan het bodemsysteem. Bodemfysische modellen hebben deze flux veelal als randvoorwaarde. Aangezien deze flux sterk afhangt van het bodemtype en de grondwaterstand is het redelijk te veronderstellen dat informatie over de grootte van deze

flux aanwezig is op een Gt-kaart. Hieruit volgt derhalve een aanvullend bezwaar:

7) De nuttige grondwateraanvulling en/of capillaire opstijging moet uit de grondwatertrap (eventueel uit de combinatie met een bodemkaart) zijn af te leiden.

Naast deze bezwaren bestaan er nog fundamenteel statistische bezwaren tegen de gebruikte definitie van het de GHG en de GLG:

8) De definitie van GHG en GLG zoals die gebruikt wordt is niet correct: *De GHG (resp. GLG) is nu gedefinieerd als de statistische verwachtingswaarde van de HG3's (resp. LG3's) over een periode waarin het grondwaterregime niet door ingrepen is gewijzigd* (Van der Sluijs, 1990). Echter, een statistische verwachting is altijd over een ensemble - i.c. een set van mogelijke uitkomsten van een kansexperiment (realisaties) - en niet over een periode. Men kan zich natuurlijk voorstellen dat een tijdreeks van grondwaterstanden van lengte één jaar precies zo'n realisatie is. In dat geval kan men een statistisch correcte definitie geven als:

De GHG (resp. GLG) is nu gedefinieerd als de statistische verwachtingswaarde van de HG3's (resp. LG3's). Deze kan geschat worden voor een meetreeks van voldoende lengte (meer dan 8 jaar) die zich uitstrekt over een periode waarin het grondwaterregime niet door ingrepen is gewijzigd.

9) Zelfs als de grondwaterstand beschreven kan worden als één of ander stochastisch proces, dan geldt nog dat de GHG en de GLG geen verdelingskenmerken zijn maar steekproefgrootheden, daar zij afhankelijk zijn van de waarnemingsfrequentie. Als meer frequent wordt waargenomen dan twee maal per maand is te verwachten dat de waarde van de GHG kleiner wordt en de GLG groter. Dit is niet erg wenselijk omdat de bedoeling van de GHG en de GLG is om de grondwaterfluctuatie te beschrijven en niet zozeer het meetproces. In de limiet, als de waarnemingsfrequentie oneindig groot wordt dan nadert de GHG (resp. de GLG) tot de werkelijk verwachte hoogste (resp. verwachte laagste) grondwaterstand.

3. Eisen aan een alternatieve methodiek

Als men bovengenoemde bezwaren beschouwt kan men deze vertalen in een aantal zeer algemene eisen met betrekking tot een alternatieve methodiek voor de Gt:

- (1) Een systeem van beschrijving moet in staat zijn in zeer algemene zin de ruimtelijke en temporele variatie van het freatisch vlak te beschrijven, zonder a priori te classificeren. De ruimtelijke variatie dient echter, zonder a priori classificatie, wel karteerbaar te zijn. De temporele variatie dient, zonder a priori classificatie, beschrijfbaar te zijn in de vorm van overschrijdingsduren.
- (2) De beschrijvingsvorm (bijv. bepaalde grootheden) moet gerelateerd kunnen worden aan meteorologische, bodemkundige en hydrologische kenmerken.
- (3) De beschrijvingsvorm dient onafhankelijk te zijn van de waarnemingsfrequentie.
- (4) Wanneer met een alternatief systeem van beschrijving uitspraken worden gedaan over het ruimtelijk en temporeel gedrag van de grondwaterstand dient dit gepaard te gaan met betrouwbaarheidsuitspraken.
- (5) Een alternatieve Gt-methodiek dient, naast de ruimtelijke en temporele variatie van het freatisch vlak, ook het ruimtelijk en temporeel gedrag van gerelateerde grootheden (zoals nuttige grondwateraanvulling) te beschrijven, welke behulpzaam kunnen zijn bij de modellering van verzadigde en onverzadigde stroming (voor bijvoorbeeld landbouwdoeleinden of ecologische studies).

(6) De beschrijvingswijze dient zodanig te zijn dat deze op uiteenlopende ruimtelijke en temporele schaalniveaus informatie kan verschaffen.

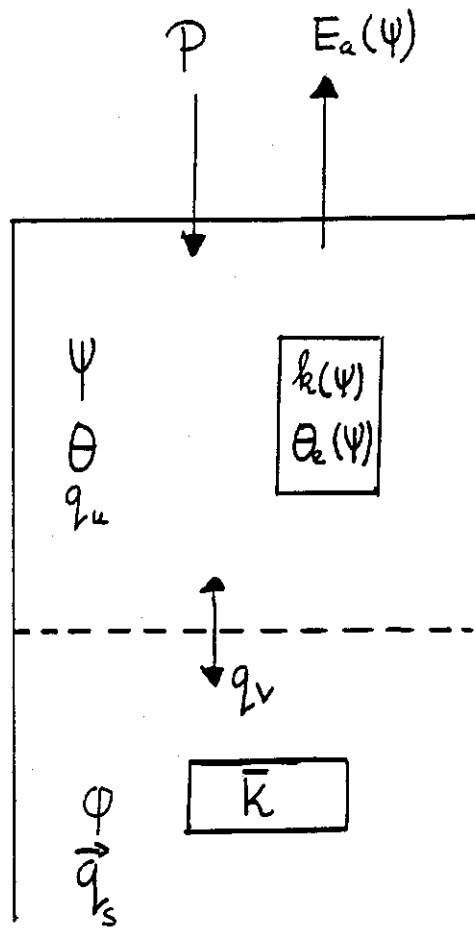
Eis (1) komt tegemoet aan de bezwaren 3), 4) en 5), eis (2) aan bezwaren 1), 2) en 6), eis (3) aan bezwaar 9) en eis (5) aan bezwaar 7). Eis (4) vloeit voort uit het besef dat het gedrag van het freatisch vlak dermate variabel is in tijd en ruimte dat een deterministische beschrijving niet voldoende zal zijn om dit te verklaren. Er zal altijd een gedeelte onverklaarde variabiliteit over blijven die zich vertaalt in een onzekerheid. Deze onzekerheid dient derhalve te worden gekwantificeerd. Eis (6) vloeit voort uit eisen (1) en (5). Als een ruimtelijke en temporele beschrijving van het freatisch vlak en eventueel additionele grootheden als hulp moeten dienen bij de modellering van stroming en transport door bodem en grondwaterzône, volgt hieruit dat de resultaten van een alternatieve beschrijvingswijze op verschillende schaalniveaus toepasbaar moet zijn.

4. Methode van beschrijving

4.1 Grootheden

De eerste vraag is welke grootheden moeten worden beschreven. Natuurlijk is de eerste grootheid de grondwaterstand in ruimte en tijd: $h(x,y,t)$. Deze wordt nu (en dus ook in de volgende hoofdstukken) ten opzichte van NAP beschreven omdat dit vanwege de hydrologische onderbouwing logischer is. De vraag is nu welke additionele grootheden van belang zijn. Figuur 1 toont schematisch het gekoppelde grondwater- en bodemsysteem, waarbij de stroming in de onverzadigde zône verticaal is verondersteld. Te zien is dat een groot aantal toestandsvariabelen, parameters en randvoorwaarden een rol spelen. Een alternatief voor de Gt-methodiek kan echter niet tot doel hebben om al deze grootheden te beschrijven, eenvoudigweg omdat een dergelijk beschrijvingsysteem veel te gecompliceerd zou zijn. Om de ruimtelijke en temporele variabiliteit van al deze grootheden (toestandsvariabelen, parameters en randvoorwaarden) te beschrijven is een zeer gecompliceerd, naar alle waarschijnlijkheid numeriek, dynamisch model nodig. Zoals uit de geformuleerde eisen volgt, heeft een nieuwe Gt-methodiek echter niet tot doel om de dynamische modellering van verzadigde en onverzadigde stroming te vervangen. Eén van zijn doelen is echter wel deze modellering te ondersteunen. Uit figuur 1 blijkt dat de koppeling van het grondwatersysteem en het bodemsysteem plaats vindt door middel van de grondwaterstand $h(x,y,t)$ en de verticale flux $q_v(x,y,t)$ (de nuttige grondwateraanvulling of capillaire opstijging). Uit figuur 1 volgt ook dat kennis van de variatie van $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ veel hulp kan bieden bij zowel grondwatermodellering als bodemfysische modellering. Immers, $q_v(x,y,t)$ kan dienen als bovenrandvoorwaarde voor grondwatermodellen, terwijl zowel $h(x,y,t)$ als $q_v(x,y,t)$ als onderrandvoorwaarden kunnen dienen voor bodemfysische modellen zoals SWACROP (Feddes et al., 1988). Een alternatieve Gt-methodiek dient derhalve tenminste een beschrijving te geven van de temporele en ruimtelijke variabiliteit van het freatisch vlak $h(x,y,t)$ en de nuttige grondwateraanvulling/capillaire opstijging $q_v(x,y,t)$.

Fig. 1



Grondwatersysteem

toestandsvariabele: ϕ

afgeleide variabele: \vec{q}_s

parameters:

randvoorwaarden:

Bodemstelsel

toestandsvariabele: ψ

afgeleide variabelen: θ

randvoorwaarden: q_u

parameters: P

parameters: E_a

parameters: $k(\psi)$

parameters: $\theta_e(\psi)$

$\phi = \phi(x, y, z, t)$

$\vec{q}_s = \vec{q}_s(x, y, z, t)$

$\bar{K} = \bar{K}(x, y, z)$

Neumann en Dirichlet en gemengde randvoorwaarden van het grondwatersysteem

stijghoogte [L]

fluxvector [LT⁻¹]

doorlatendheids tensor [LT⁻¹]

$\psi = \psi(x, y, z, t)$

$\theta = \theta(x, y, z, t)$

$q_u = q_u(x, y, z, t)$

$P = P(x, y, t)$

$E_a = E_a(x, y, t)$

$k(\psi) = k(\psi, x, y, z)$

$\theta_e(\psi) = \theta_e(\psi, x, y, z)$

matrixpotentiaal [L]

volumetrisch vochtgehalte [-]

verticale onverzadigde flux [LT⁻¹]

neerslagintensiteit [LT⁻¹]

voor zouten infiltrerend

actuele evapotranspiratie [LT⁻¹]

onverzadigde (verticale) doorlatendheid [LT⁻¹]

vocht karakteristiek [-]

Koppeling [1] $h = h(x, y, t)$

freatisch vlak of grondwaterspiegel [L]

randvoorwaarde voor bodemstelsel

toestandsvoorwaarde voor grondwatersysteem

[2] $q_v = q_v(x, y, t)$ nulfluxe grondwateraanvulling of capillaire opstijging [LT⁻¹]

randvoorwaarde over grondwatersysteem

outputvariabele of randvoorwaarde voor het bodemstelsel

4.2 Beschrijvingswijze

Alternatieve parameters: HVG en LVG

In paragraaf 2 werd als een belangrijk statistisch bezwaar tegen de huidige Gt-definitie aangedragen dat de GHG en de GLG afhankelijk zijn van de meetfrequentie. Van Heesen (1970, pagina 263, Fig. 5) begint zijn verhaal met een beschrijving van de temporele variatie van de grondwaterstand die wel degelijk onafhankelijk is van de meetfrequentie. We zien hier 10 curves van gemeten grondwaterstanden. Als de grondwaterstand h gezien wordt als een stochastisch proces $h(t)$ dan kan, onder gelijk blijvende klimatologische en hydrologische omstandigheden en aanname dat grondwaterstanden gemeten in verschillende jaren onafhankelijk zijn, elk van de 10 curves gezien worden als een onafhankelijke realisatie van het stochastisch proces $h(t)$. Het gemiddelde van deze realisaties (de vette curve) is dan een benadering (in feite een schatter over het ensemble) $\hat{\mu}(t)$ van de over het jaar veranderende statistische verwachtingswaarde $\mu(t)$ van het stochastisch proces $h(t)$.

De aanname dat grondwaterstanden gemeten in verschillende jaren onafhankelijk zijn is echter niet zo realistisch. Als alternatief kan men zich ook voorstellen dat de curves van alle jaren achter elkaar geplakt één enkele realisatie (één van oneindig vele denkbeeldige onafhankelijke realisaties) van het stochastisch proces $h(t)$ is, waarvan de vette curve $\hat{\mu}(t)$ (op grond van ergodiciteit) een schatter is van de over de periodieke (periode 1 jaar) verwachtingswaarde $\mu(t)$. Dit gaat natuurlijk alleen weer op bij gelijkblijvende klimatologische en hydrologische omstandigheden. Welke van beide beschouwingen ook wordt gehanteerd, het resulteert in dezelfde geschatte $\hat{\mu}(t)$.

Wanneer $h(t)$ gemeten is ten opzichte van NAP geldt dat de maaiveldshoogte minus de maximale waarde van $\hat{\mu}(t)$ een schatter is van de hoogste verwachte grondwaterstand (HVG) en de maaiveldshoogte minus de minimale waarde van $\hat{\mu}(t)$ een schatter is van laagst verwachte grondwaterstand (LVG). Merk op dat "gemiddelde" is vervangen door "verwachte" om aan te geven dat de te schatten grootheden statistische verwachtingswaarden zijn in plaats van gemiddelden over de tijd; de tijdsgemiddelden zijn slechts schatters van deze verwachtingswaarden. De definitie van HVG en LVG luidt nu: *De HVG (resp. LVG) is nu gedefinieerd als de maaiveldshoogte minus de maximale (resp. minimale) jaarlijkse statistische verwachtingswaarde van de grondwaterstand (NAP). Deze kan geschat worden voor een meetreeks van voldoende lengte die zich uitstrekt over een periode met gelijke klimatologische omstandigheden waarin het grondwaterregime niet door ingrepen is gewijzigd.* In tegenstelling tot de GHG en de GLG zijn de HVG en de LVG niet afhankelijk van de meetfrequentie, doch alleen een maat voor de fluctuatie van de gemiddelde grondwaterstand. Natuurlijk kunnen de HVG en de LVG net zo goed direct ten opzichte van maaiveld worden gedefinieerd.

Op deze wijze kunnen ook andere verdelingsparameters worden geschat, zoals de jaarlijkse periodieke variantie $\sigma^2(t)$ van $h(t)$. Ingeval van normaal verdeelde $h(t)$ zou dit al voldoende zijn om voor elk tijdstip kansen van overschrijding te bepalen. Hieruit kunnen dan eenvoudig overschrijdingsduren (dagen per jaar) worden bepaald. Als bovendien ook de autocorrelatiefunctie bekend is kan zelfs bepaald worden wat bijvoorbeeld de kans is dat een bepaalde grondwaterstand gedurende een x -aantal *achtereenvolgende* dagen wordt overschreden, gedurende een bepaalde periode van het jaar, bijvoorbeeld in de maand april. Als met jaarlijkse maximale en minimale grondwaterstanden wordt gewerkt, zoals nu het geval is, kunnen weliswaar overschrijdingskansen worden bepaald, doch er is dan niet

bekend op welke tijdstippen een bepaalde grondwaterstand met een bepaalde kans wordt overschreden.

Een algemene beschrijvingswijze: stochastische functies

Stochastische functies $g(x,y,t)$ zijn functies van ruimtelijke en/of tijds-coördinaten waarvan de functiewaarden onzeker zijn. Op elk punt (x,y,t) kan f een bepaalde waarde aannemen met een bepaalde kans. Op elk punt (x,y,t) waar f is gedefinieerd hebben we dus een aparte stochastische variabele. Verder geldt dat de stochastische variabelen op n willekeurige punten $(x_1,y_1,t_1), \dots, (x_n,y_n,t_n)$ over het algemeen afhankelijk zijn. De term "stochastische functie" is de meest algemene term. Stochastische functies die alleen gedefinieerd zijn voor ruimtelijke coördinaten (i.e. $g(x,y)$) en voor een subdomein van de ruimte *overall* gedefinieerd zijn ($g(x,y)$ heeft overall een waarde) worden veelal aangeduid met de term "stochastisch veld". Stochastische functies die alleen gedefinieerd zijn in de tijd (i.e. $g(t)$) worden veelal een "stochastisch proces" genoemd. Veelal wordt onderscheid gemaakt tussen continue stochastische processen, waarbij $g(t)$ over een bepaald tijdsinterval overall is gedefinieerd, en discrete stochastische processen, waarbij over een bepaald tijdsinterval $g(t)$ op een eindig aantal tijdstippen is gedefinieerd: $g(t_k)$, $k = 1, \dots, n$. Meestal zijn de tijdsintervallen tussen twee opeenvolgende tijdstippen constant. Tijdreeksmodellen (Van Geer en Defize, 1990) gaan uit van een onderliggend discreet stochastisch proces.

Door te werken met de grootheden $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ wordt voldaan aan eisen (1) en (5). Als $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ worden gemodelleerd als stochastische functies dan wordt aan eisen (1) en (4) voldaan. De temporele en ruimtelijke variatie wordt vanzelfsprekend beschreven door het functionele verband met x , y en t . De onzekerheid die voortvloeit uit het onbekende deel van de temporele en ruimtelijke variatie van h en q_v wordt gemodelleerd door de veronderstelde stochasticiteit. De stochastische functies $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ worden ieder volledig gekarakteriseerd door de collectie multivariate kansdichtheidsfuncties $f_h[h(x_1,y_1,t_1), \dots, h(x_n,y_n,t_n); (x,y,t) \in \mathbb{R}^3]$ en $f_{q_v}[q_v(x_1,y_1,t_1), \dots, q_v(x_n,y_n,t_n); (x,y,t) \in \mathbb{R}^3]$ voor elke $n \in \mathbb{N}$, of tezamen volledig door alle mogelijke multivariate kansverdelingen $f_{h,q_v}[\cdot]$. Aan eis (2) wordt dan voldaan als de stochastische functies (en dus de multivariate kansdichtheidsfuncties) zijn gerelateerd aan meteorologische, hydrologische en bodemkundige parameters.

Als de multivariate kansdichtheden bekend zijn kunnen allerlei relevante afgeleide parameters worden afgeleid, zoals de kans dat op een aantal plaatsen en tijdens een bepaald gedeelte van het jaar de grondwaterstand gedurende een x -aantal dagen boven een bepaalde waarde is. Omdat, als de multivariate kansverdelingen bekend zijn, we ook de univariate kansdichtheden kennen, kunnen we de HVG en LVG berekenen via (h t.o.v. NAP)

$$E[h(x,y,t)] = \int_{-\infty}^{\infty} h f_h(x,y,t) dh \quad (1)$$

en

$$HVG(x,y) = \text{maaiveldshoogte} - \underset{t}{\text{MAX}}(E[h(x,y,t)]) \quad (2)$$

$$LVG(x,y) = \text{maaiveldshoogte} - \underset{t}{\text{MIN}}(E[h(x,y,t)]) \quad (3)$$

Omdat de multivariate kansverdelingen, alsmede alle daarvan afgeleide statistieken (zoals HVG, LVG en overschrijdingsduren), eigenschappen zijn van de stochastische functies waarmee h en q_v worden gemodelleerd, zijn deze niet afhankelijk van de meetfrequenties, doch maten van temporele en ruimtelijke variatie van h en q_v zelf (eis (3)). Als de multivariate kansverdelingen van de stochastische functies $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ (=puntschaal) bekend zijn kunnen, door uitmiddeling, vergelijkbare kansverdelingen ook worden afgeleid voor vlakken of langere tijdsperioden. Hierdoor wordt impliciet voldaan aan eis (6).

Bij deze alternatieve beschrijvingswijze blijft classificatie in traditionele grondwatertrappen later nog mogelijk. Als de multivariate kansverdelingen bekend zijn kunnen deze gebruikt worden om via simulatie op elk willekeurig punt (x,y) reeksen van grondwaterstanden te simuleren. Hieruit kan men dan weer de GHG en de GLG schatten en eventueel een grondwatertrap voor positie (x,y) berekenen (Knotters en Van Walsum, 1994).

In conclusie: We zien dus dat, door uit te gaan van de meest algemene beschrijvingsvorm onder onzekerheid, de stochastische functie in ruimte en tijd (gekaracteriseerd door de multivariate kansdichtheidsfunctie) aan alle eisen voor een alternatief Gt-methodiek wordt voldaan, mits deze stochastische functies op één of andere wijze worden gerelateerd aan hydrologische, bodemkundige en meteorologische variabelen. Door deze beschrijvingswijze zijn we in staat om alle vragen met betrekking tot overschrijdingskansen te beantwoorden, terwijl een relatie met een classificatiesysteem van grondwatertrappen blijft bestaan. Het is derhalve wenselijk om vooralsnog uit te gaan van deze meest algemene beschrijvingswijze.

5. Onderzoek naar het freatisch vlak zoals verricht/te verrichten bij SC-DLO.

In Interne Mededeling 142 van de Werkgroep Gt-Onderzoek (1991) wordt onderscheid gemaakt tussen korte termijn- en lange termijn-onderzoek (zie hoofdstuk 1 van deze notitie), zonder overigens aan te geven over welke tijdsperioden met dan praat. Een gedeelte van het korte termijn-onderzoek gebeurt ook binnen L.I.M., hoewel een deel daarvan, naar mijn mening, ook binnen het lange termijn-onderzoek valt. Hieronder volgt eerst een opsomming van het korte termijn-onderzoek en degenen die zich binnen en buiten L.I.M. hiermee bezig houden of zich bezig gehouden hebben. Daarna volgt een beschrijving van het lange termijn-onderzoek, voorzover dit gebeurt bij L.I.M.

5.1 Korte termijn-onderzoek

Als belangrijkste aandachtspunten van korte termijn-onderzoek noemt de Werkgroep Gt-onderzoek (1991):

- (1) Ontwikkeling van een snelle, operationele methode voor de actualisering van Gt-kaarten. Hieraan wordt gewerkt door mensen van de afdeling S.B.I. (Finke et al., 1994).
- (2) Onderzoek naar de periodelengte van de HG3 (LG3)-berekeningen: verschillen tussen langjarig of 8-jarig voortschrijdend gemiddelde. Door Knotters en Van Walsum is een project afgerond waarbij methoden zijn toegepast om de verkregen GHG en GLG waarden te corrigeren voor weersinvloeden. Hierbij is gebruik gemaakt van modelberekeningen met SWACROP en van transfer-ruis-modellering (Knotters en Van Walsum, 1994). Een onderdeel van dit onderzoek behelsde ook

- het bekijken van het effect van de periodelengte op de GHG en GLG.
- (3) Onderzoek naar de spreiding van GHG en GLG binnen een grondwatertrap. Dit wordt onderzocht in het Gt-gedeelte van de Landelijke Steekproef Kaartbladen (rapport in voorbereiding).
 - (4) Onderzoek naar een betere kwantificering/interpretatie van overschrijdingsduur van grondwaterstanden. Hier moet het eigenlijke onderzoek nog van plaatsvinden. Naar mijn mening past deze doelstelling beter bij het lange termijn-onderzoek dan bij het concrete korte termijn-onderzoek.
 - (5) Verdere uitbouw van de methodiek van gerichte opnamen. Dit was ten tijde van de formulering van deze doelstellingen reeds lopend onderzoek, getuige het onderzoek van Te Riele en Brus (1991). In dit kader is later de relatie van de grondwaterstand en de GHG/GLG met verschillende fysisch geografische kenmerken onderzocht door Te Riele en Brus (1992).
 - (6) Onderzoek t.b.v. ruimtelijke inventarisatie- en bemonsteringsmethoden, zoals toepassing van geostatistische methoden, t.a.v. meetnetdichtheid en ruimtelijke interpolatie m.b.v. maaiveldshoogtegegevens. Dit project, uitgevoerd door Te Riele (zie bijlage B voor projectbeschrijving), is in 1992 gestart met het inrichten van een zeer uitgebreid net van grondwaterstandsbuizen in de buurt van Putten (Gld) en is momenteel nog in uitvoering. Het onderzoek naar ruimtelijke interpolatietechnieken om de GHG en de GLG te schatten strekt zich uit over meerdere jaren en past daarom beter in het lange termijn-onderzoek. In paragraaf 5.2 zal derhalve nog eens op dit onderzoek worden teruggekomen.

5.2 Lange termijn-onderzoek

In het rapport van de Werkgroep Gt-onderzoek wordt het lange termijn-onderzoek onderverdeeld in drie verschillende categorieën: 1) Deterministische modellering als alternatief voor de Gt-methodiek; 2) Hydrologische onderbouwing van de grondwatertrappen; 3) Stochastische modellering als alternatief voor de Gt-methodiek. Deze indeling is nogal ongelukkig vanwege drie redenen:

- (1) Het is onwaarschijnlijk dat via deterministische modellering het grondwater-bodem-systeem tegelijkertijd kan worden beschreven op de uiteenlopende schaalniveaus. Er wordt wel gewerkt aan landelijke grondwatermodellering (TNO-GG en RIVM) maar dit gebeurt op een grove schaal. Ad hoc inzoomen voor bepaalde concrete toepassingen blijft noodzakelijk. Voor zover deterministisch modelleren wordt toegepast met regionale grondwaterstromingscomponenten zal dit ook niet worden gedaan door L.I.M., doch door één van de afdelingen binnen de Hoofdafdeling Waterbeheer. Resultaten van deterministische modellen kunnen echter wel als bron van voorinformatie dienen voor bijvoorbeeld geostatistische interpolatie, zoals gebeurt in het onderzoek van Te Riele (bijlage B).
- (2) Bij een hydrologische onderbouwing van de Gt's zal men altijd gebruik maken van dynamische modellen (i.e. partiële differentiaalvergelijkingen) die al of niet een stochastische component bevatten.
- (3) Stochastisch modelleren behelst niet alleen tijdreeksmodellering, transfer-ruismodellering of het expliciet scheiden van deterministische en stochastische componenten. Een op zichzelf deterministisch dynamisch model met stochastisch veronderstelde (d.w.z. onzekere) parameters heeft ook een stochastische output, en het gebruik hiervan kan dus ook als stochastisch modelleren worden beschouwd.

Tenslotte is kriging ook stochastisch modelleren omdat het gebaseerd is op het beschouwen van de onbekende ruimtelijke variatie als een stochastisch veld.

Op grond van Figuur 1 kan het lange termijn onderzoek naar het ruimtelijk en temporeel gedrag van het freatisch vlak (en eventueel de nuttige grondwateraanvulling) opgedeeld worden in twee aandachtsvelden. Het eerste aandachtsveld betreft de dynamische modellering van stroming en transport in het bodem- en grondwatersysteem met veelal numerieke modellen. Dit type onderzoek behelst niet alleen specifieke modelstudies in opdracht, maar ook speurwerk naar modelleringsmethodieken en het karakteriseren en begrijpen van de complexe (niet-lineaire) interacties tussen bodem en grondwater. Op deze wijze kan onder meer het ruimtelijke en temporele gedrag van het freatisch vlak en de daarbij horende Gt's worden verklaard (en eventueel de nuttige grondwateraanvulling of capillaire opstijging). Doel van dit type onderzoek is veeleer het berekenen van de eigenlijke grondwaterstand op een specifieke plaats en op een specifiek tijdstip. Dit type lange termijn Gt-onderzoek vindt typisch plaats bij de verschillende afdelingen van de hoofdafdeling Waterbeheer en de hoofdafdeling Fysisch Bodembeheer, en, voor zover dit betrekking heeft op de actualisering van de oude Gt-methodiek, bij de afdeling S.B.I. Een tweede aandachtsveld betreft sec de beschrijving van de temporele en ruimtelijke variabiliteit van het freatisch vlak (en eventueel de nuttige grondwateraanvulling) en met name de modellering en kwantificering van de onzekerheid die voortvloeit uit onbekende variabiliteit. Dit type onderzoek heeft meer een inventariserend karakter (de kans op een bepaalde grondwaterstand voor langere tijdstippen en grotere oppervlakten) en vindt typisch plaats bij de afdeling L.I.M. Hierbij ligt de nadruk op de ontwikkeling van methoden om met deze onzekerheid om te gaan.

Tussen beide aandachtsvelden bestaan natuurlijk een groot aantal raakvlakken. Een voorbeeld is reeds genoemd: De uitkomsten van deterministische modellen kunnen als hulpinformatie worden gebruikt bij geostatistische interpolatiemethoden (bijlage B). Een ander voorbeeld is een recente samenwerking tussen L.I.M. en Regionaal Waterbeheer waarbij de resultaten van transfer-ruismodellen (bijlage C) zijn vergeleken met simulaties met SWACROP (Knotters en Van Walsum, 1994). De informatie over de variabiliteit van bijvoorbeeld kwel en infiltratie, geohydrologische parameters en drainageweerstanden, welke verstrekt zou kunnen worden door de hoofdafdeling Waterbeheer, kan als invoer gebruikt worden voor vereenvoudigde hydrologische relaties om de multivariate kansverdelingen van de stochastische functies $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ te berekenen (zie bijlage D). De stochastische functies kunnen op deze wijze gekoppeld worden aan geohydrologische en bodemkundige omstandigheden (eis (2)). Andersom geldt dat, als bij L.I.M. de onzekerheid in het ruimtelijk en temporeel gedrag van $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ gekwantificeerd is, de resultaten hiervan gebruikt kunnen worden om de daaruit voortvloeiende onzekerheden in voorspellingen van grondwatermodellen of bodemfysische modellen te achterhalen. Methoden voor deze foutenvoortplanting, zoals Monte Carlo simulatie of kleine verstoringstechnieken (De Marsily, 1990) kunnen ook door L.I.M. worden aangeleverd.

Wat de precieze plannen zijn voor het lange termijn-onderzoek bij de verschillende afdelingen van het SC is bij de auteur op het moment van het schrijven van deze notitie nog niet bekend. Om echter een aangrijpingspunt te hebben voor verdere discussie over en de daaruit te volgen afstemming van het Gt-onderzoek op de langere termijn, volgt hier een overzicht van het (beoogde) lange termijn-onderzoek naar het freatisch grondwater bij L.I.M. Het (beoogde) onderzoek is opgedeeld door te kijken naar de wijze waarop het zeer algemene concept van het beschrijven van de (onzekere) grondwaterstanden met behulp

van stochastische functies en multivariate kansdichtheden wordt geconcretiseerd. Na de beschrijving van de theoretische eigenschappen van iedere techniek volgt een korte beschouwing over de praktische toepasbaarheid. De eerste 5 onderzoekmethoden zijn meer statistisch van aard, terwijl de laatst beschreven onderzoekslijn een combinatie is van dynamische procesmodellering en stochastiek. Verder geldt dat, omdat $q_v(x,y,t)$ niet direct te meten is, deze grootheid niet wordt beschouwd bij de statistische methoden 1) t/m 5).

1) *Geostatistische ruimtelijke interpolatie*

Hierbij wordt alleen de ruimtelijke component van de grondwaterstand bekeken. De grondwaterstand $h(x,y)$ (op een bepaald tijdstip) wordt beschouwd als een stochastisch veld (continu in de ruimte) en de grondwaterstand wordt voorspeld voor (geïnterpoleerd naar) een niet bemeten punt. Kriging technieken beschouwen veelal alleen de uni- en bivariate componenten van de multivariate kansverdeling, respectievelijk $f_{h(1)}[h(x_1,y_1); (x,y) \in \mathbb{R}^2]$ en $f_{h(2)}[h(x_1,y_1), h(x_2,y_2); (x,y) \in \mathbb{R}^2]$, en dan veelal slechts de eerste twee momenten (verwachting en covariantie). Wanneer echter $h(x,y)$ een tweede orde stationair stochastisch veld is geldt dat de kriging voorspelling de conditionele verwachting is en de foutencovariantie de conditionele covariantie. In dat geval is het in principe mogelijk de conditionele multivariate kansdichtheidsfunctie te bepalen (conditioneel betekent: gegeven de metingen $h_k, k=1, \dots, m$, met m het aantal meetpunten): $f_{h|n}[h(x_1,y_2), \dots, h(x_m,y_n); (x,y) \in \mathbb{R}^2, n \in \mathbb{N}, h_k, k=1, \dots, m]$. Binnen geostatistische ruimtelijke interpolatie kan een gedeelte van de variabiliteit van de grondwaterstand worden verklaard door statistische verbanden (correlaties) met hydrologische, meteorologische, bodemkundige of topografische informatie. Dit kan gebeuren via regressie, co-kriging of via externe a priori informatie over de verwachting van het stochastisch veld $E[h(x,y)]$, bijvoorbeeld door voorspellingen van grondwatermodellen. Naast interpolatie van de grondwaterstand zelf kan men ook denken aan het direct interpoleren van de GHG/GLG of HVG/LVG, hetgeen onder normaliteit direct kansverdelingen van deze parameters oplevert.

Bij de afdeling L.I.M. wordt momenteel gewerkt aan geostatistische interpolatie van grondwaterstanden door Te Riele (bijlage B). Ruimtelijke interpolatie via kriging is in de praktijk alleen toepasbaar bij voldoende aantal buizen en afstanden tussen buizen die geringer zijn dan de correlatielengte van $h(t)$ (d.w.z de maximale afstand waarover grondwaterstanden van twee stijghoogtebuizen zijn gecorreleerd). Behalve voor de Veluwe, waar sprake is van een zeer groot freatisch pakket, is het standaard net van buizen van TNO-GG doorgaans niet geschikt voor geostatistische interpolatie. Praktische toepassing ligt meer in de interpolatie tussen gerichte opnamen in boorgaten tijdens een bodemkartering, in combinatie met relatieve maaiveldshoogte als hulpvariabele of regressor. Een andere praktische toepassing is de interpolatie van Gt's zelf met behulp van indicatorkriging (Bierkens en Burrough, 1993).

2) *Geostatistische tijd-ruimte-interpolatie*

In dit geval beschouwt men de grondwaterstand als een 3D-stochastische functie $h(x,y,t)$, $(x,y,t) \in \mathbb{R}^3$, en dus continu zowel in ruimte als in tijd. Men kan derhalve de geostatistische interpolatietechnieken toepassen met tijd als een derde dimensie. Hierbij spelen echter toch een aantal fundamentele problemen een rol:

- a) Veelal kan men de stochastisch functie in de richting van de tijdas niet stationair veronderstellen, dus moet men met incrementen gaan werken.

- b) De stochastische functie heeft een Markov-karakter in de tijdrichting, dat niet eenduidig in de ruimte is terug te vinden. Men kan zich voorstellen dat, als men de kansverdeling van de grondwaterstand op tijdstip t_1 overal kent, dit voldoende is om de kansverdeling op tijdstip t_2 ($> t_1$) eenduidig af te leiden (vroegere tijdstippen dan t_1 zijn hier niet voor nodig: alle informatie zit al in de toestand op tijdstip t_1). Een ruimtelijke pendant van dit verschijnsel is moeilijk voor te stellen. Dit Markov karakter in de tijdrichting zal er dus eerst uitgefilterd moeten worden.

Naast deze bezwaren geldt voor geostatistische tijd-ruimte interpolatie het bezwaar dat langere tijdreeksen alleen beschikbaar zijn voor stambuizen, welke weer een te ijl net vormen om aan ruimtelijke interpolatie te doen. In de internationale literatuur is reeds het een en ander gedaan aan tijd-ruimte interpolatie (Rouhani en Hall, 1989; Rouhani en Myers, 1990; Switser, 1989). In het kader van de departementale doelsubsidie programmalijs "freatische meetnetten" van LNV is door F.C. van Geer werk verricht op dit terrein (Van Geer, 1992).

3) *Univariate tijdreeksmodellering en MISO-modellen*

De tijdreeks van gemeten grondwaterstanden van één buis wordt gezien als een realisatie van een discreet stochastisch proces $h(t_k)$. Via de temporele covariantiestructuur van het stochastisch proces worden de parameters van zogenaamde tijdreeksmodellen geoptimaliseerd. Met deze tijdreeksmodellen kunnen op niet bemeeten tijdstippen grondwaterstanden worden gesimuleerd waarvan de statistieken (verwachting, covariantie) hetzelfde zijn als geschat uit gemeten data. Men kan ook veronderstellen dat het discreet stochastisch proces is gekoppeld aan één of meerdere drijvende krachten die het deterministische gedrag van het proces bepalen. Het stochastisch proces bestaat dan uit een puur deterministische component, gekoppeld aan drijvende termen via een deterministische relatie en daarbij opgeteld een stochastische component (ruis geheten), gemodelleerd door een tijdreeksmodel. Ingeval de deterministische relatie lineair en volledig empirisch is wordt deze combinatie ook wel transfer-ruis-modellering genoemd. Het is met name geschikt om grondwaterstandsreeksen te corrigeren voor veranderingen in nuttige neerslag (Knotters en Van Walsum, 1994) of te achterhalen wat de achterliggende oorzaak is van bijvoorbeeld grondwaterstandsdalingen (Van Geer en Defize, 1987). Hier moet uitdrukkelijk gesteld worden dat de deterministische relatie niet behoeft te bestaan uit een lineaire transferfunctie maar ook kan worden gemodelleerd door eendimensionale dynamische modellen zoals SWATRE (Knotters en Van Walsum, 1994). Als een model de volgende eigenschappen heeft: a) Het bestaat uit een deterministische relatie met daarbij opgetelde ruis, b) Het wordt gedreven door meerdere invoeren en heeft één uitvoervariabele, c) Invoer- en uitvoervariabelen zijn alleen gedefinieerd voor discrete tijdstappen, dan wordt dit model ook wel een Multiple-Input-Single-Output-model genoemd (MISO-model). Wanneer de beschreven variabele normaal verdeeld is kan men met dit type modellen de kans berekenen dat de grondwaterstand gedurende een x-aantal dagen boven of onder bepaalde waarde ligt: De multivariate kans $f_h[h(t_1), \dots, h(t_n); n \in \mathbb{N}]$ is dan in principe bekend. Bij niet-normaal verdeelde grondwaterstanden is het ook mogelijk deze kansen te indirect berekenen via stochastische simulatie.

De praktische toepasbaarheid van tijdreeksmodellen en MISO-modellen is erg groot. Zodra men beschikt over een reeks van een lengte van meer dan drie tot vier maal de temporele correlatielengte kan men deze modellen toepassen. Onderzoek

met behulp van transfer-ruis-modellen wordt bij L.I.M. gedaan door M. Knotters.

4) *Multivariate tijdreeksmodellering en MIMO-modellen*

Dit is een logische uitbreiding van univariate tijdreeksmodellering. De grondwaterstanden in meerdere buizen m worden dan gezien als realisaties van een multivariaat discreet stochastisch proces $\{h_1(t_k), \dots, h_m(t_k)\}$. Dit proces kan dan worden gemodelleerd door een multivariaat tijdreeksmodel of een multivariaat additief deterministisch-stochastisch model (Multiple-Input-Multiple-Output-model of MIMO-model). Naast de temporele autocovariantie van de individuele tijdreeksen wordt dan ook gebruik gemaakt van de temporele crosscovarianties om de parameters van de modellen te schatten. Multivariate tijdreeksmodellen kunnen gebruikt worden om de grondwaterstanden van meerdere buizen tegelijkertijd op niet bemeten tijdstippen te simuleren en MIMO-modellen om deze meerdere grondwaterstanden te simuleren voor veranderende weersomstandigheden of de oorzaak van grondwaterstandsdingingen voor meerdere buizen tegelijkertijd te achterhalen. Multivariate technieken leveren de multivariate kans $f_h[\{h_1(t_{k1}), \dots, h_m(t_{km})\}, \dots, \{h_1(t_{n1}), \dots, h_m(t_{nm})\}; \{k_1, \dots, k_m, n_1, \dots, n_m\} \in \mathbb{N}]$, hetgeen vragen beantwoordt als: "Wat is de kans dat op meerdere plaatsen een bepaalde grondwaterstand gedurende een x -aantal achtereenvolgende dagen wordt overschreden?".

Hoewel multivariate discrete stochastische processen een ruimtelijke component kunnen hebben als de meerdere variabelen dezelfde grootte op meerdere posities in de ruimte voorstellen, verschilt dit model van de tijd-ruimte modellen beschreven onder 2), aangezien daar de tijd-ruimte variatie wordt beschreven door een continue stochastische functie.

De praktische toepassing van multivariate tijdreeksmodellen en MIMO-modellen is geringer dan voor MISO-modellen omdat deze alleen zin heeft als grondwaterstanden in meerdere buizen met elkaar gecorreleerd zijn. Dit is natuurlijk wel te verwachten omdat de fluctuaties in meerdere buizen op niet te grote afstanden worden gedreven door dezelfde seizoensfluctuaties. Van Geer en Defize (1990) ondervonden bij de praktische toepassing van multivariate transfer-ruis-modellen moeilijkheden bij het schatten van alle benodigde parameters. Bij L.I.M. is men nog niet begonnen met het modelleren van multivariate discrete stochastische processen.

5) *Hybride-model: MISO-modellen met continue stochastische parameterelden*

Wanneer de parameters van MISO-modellen worden gezien als een continue stochastische functie in de ruimte, verkrijgt men een stochastisch proces dat discreet is in de tijd en continue in de ruimte. Interpolatie van gefitte parameters voor niet bemeten plaatsen zou dan kunnen gebeuren via kriging of geostatistische simulatie, zodat het in principe mogelijk is om op deze niet bezochte plaatsen tijdreeksen van grondwaterstanden te simuleren. Via een Monte Carlo analyse (simulatie van parameterelden en daaruit volgende simulaties van tijdreeksen) kan men een schatting krijgen van de multivariate kansverdeling $f_h[h(x_1, y_1, t_k), \dots, h(x_n, y_n, t_m); (x, y) \in \mathbb{R}^2, \{k, n, m\} \in \mathbb{N}]$. Hiermee kunnen vragen worden beantwoordt als: "Wat is de kans dat voor een bepaald landoppervlak de grondwaterspiegel gedurende een x -aantal achtereenvolgende dagen hoger is dan een bepaalde waarde?". De kansverdeling kan alleen "geschat" worden omdat de meeste parameters multiplicatief in de modellen aanwezig zijn en dus zelfs bij normaal veronderstelde parameters en ruisprocessen, de resulterende tijdreeksen niet normaal verdeeld zullen zijn en dus

multivariate kansverdelingen slechts door schatting uit Monte Carlo simulaties kunnen worden verkregen. De voordelen van deze hybride modellen ten opzichte van tijd-ruimte geostatistiek is dat door regionalisatie van de parameters (van het transfer-ruis model) i.p.v. het proces zelf (stijghoogten op elk tijdstip) veel minder parameters behoeven te worden geïdentificeerd. Bovendien kan, omdat de parameters van MISO-modellen van grondwaterstand en neerslagoverschot een hydrologische en bodemkundige betekenis hebben, bodemkundige of hydrologische informatie worden gebruikt bij het regionaliseren van deze parameters.

De praktische toepassing van deze hybride technieken hangt af van de mate waarin de parameters van MISO-modellen zich laten regionaliseren, en of uit de TNO buizen hun ruimtelijk verband kan worden gehaald. Bij L.I.M. ligt een voorstel voor onderzoek naar deze techniek, uit te voeren door M. Knotters (zie bijlage C).

6) *Stochastische partiële differentiaalvergelijkingen*

De tot nu toe beschreven methode zijn voornamelijk statistisch van aard. MISO-modellen of kriging met aanvullende informatie leveren weliswaar relaties met hydrologische informatie op, doch deze relaties zijn veelal empirisch: Ze zijn uit metingen geschat. Men kan op deze wijze de temporele of ruimtelijke variatie van grondwaterstanden actualiseren voor veranderende meteorologische of hydrologische omstandigheden, en in beperkte mate voor ingrepen in de waterhuishouding, maar het levert slechts een beperkte fysische/hydrologische onderbouwing van de grondwatertrappen en het grondwaterstandsverloop (bezwaar (1), werkgroep Gt-onderzoek, 1991).

De grondwaterstand wordt beschreven door de wet van behoud van massa en een bewegingsvergelijking gebaseerd op impulsbehoud (de wet van Darcy). Deze vergelijkingen toegepast op bodem en grondwater leiden tot partiële differentiaalvergelijkingen (pdv's) die de stroming van grond- en bodemwater in ruimte en tijd beschrijven. Uit hun oplossingen, voor gegeven randvoorwaarden zoals netto neerslag, volgt dan $h(x,y,t)$. Zowel de parameters van de differentiaalvergelijkingen als hun randvoorwaarden zijn veelal onzeker. Als deze onzekerheid wordt gemodelleerd door parameters en/of randvoorwaarden als stochastische variabelen of stochastische functies te beschrijven spreken we van een stochastische partiële differentiaalvergelijking. Een stochastische partiële differentiaalvergelijking kan ook het gevolg zijn van het additief toevoegen van een witte ruis component aan een deterministische partiële differentiaalvergelijking, bijvoorbeeld om de verschillen met gemeten waarden te modelleren (Gardiner, 1990). De oplossing van een stochastische pdv levert geen eenduidige waarde voor $h(x,y,t)$, maar, in het meest algemene geval, een multivariate kansverdeling $f_h[h(x_1,y_1,t_1), \dots, h(x_n,y_n,t_n); (x,y,t) \in \mathbb{R}^3, n \in \mathbb{N}]$. Het is de bedoeling dat het onderzoek naar de temporele en ruimtelijke variatie van het freatisch vlak, zoals te verrichten door M.F.P. Bierkens bij L.I.M., zal uitgaan van een beschrijving met behulp van stochastische pdv's. Op deze wijze wordt: 1) De temporele en ruimtelijke variatie van het freatisch vlak hydrologisch onderbouwd; 2) de onzekerheid in de hoogte van het freatisch vlak beschreven; 3) een methode geboden om na te gaan wat de grootste bronnen van deze onzekerheid zijn, i.c. welke randvoorwaarden of parameters; 4) een methode aangeleverd die in staat is om in gebieden waar niet of nauwelijks grondwaterstanden zijn gemeten een a priori kansverdelingen voor grondwaterstanden te berekenen; 5) een methode aangeleverd om op grond van die a priori kansverdelingen te bekijken waar extra metingen het meeste effect zullen

hebben om de onzekerheid terug te dringen. In bijlage D volgt een beschrijving van het onderzoek met behulp van stochastische pdv's.

De praktische toepasbaarheid van stochastische pdv's hangt grotendeels af van de aannamen die ten grondslag liggen aan hun formulering en aan de aannamen gebruikt bij het oplossen van de pdv's. Ten eerste moeten deze aannamen realistisch zijn en leiden tot oplossingen die voldoende algemene geldigheid hebben. Zij moeten echter niet zo ruim zijn dat analytische oplossingen niet mogelijk zijn, omdat uitgebreide numerieke oplossingen een snelle praktische toepassing in de weg staan. Tenslotte dienen de parameters en randvoorwaarden (en hun onzekerheden) van de pdv uit eenvoudige veldwaarnemingen geschat te kunnen worden.

6. Afweging van de beschreven onderzoeksrichtingen

6.1 Een eerste evaluatie

In dit hoofdstuk wordt het onderzoek dat bij L.I.M. zou kunnen plaatsvinden geëvalueerd. Bekeken wordt of a) de voorgestelde methode praktisch toepasbaar is, b) of de expertise voor dit onderwerp bij het SC aanwezig is en c) of deze expertise elders in Nederland aanwezig is. Tenslotte wordt een voorlopige beslissing genomen of de voorgestelde methode bij L.I.M. kan worden uitgevoerd en wie zich daar mee zal bezig houden. De resultaten staan in Tabel 1.

6.2 Hoe verder?

Uit tabel 1 volgt dat op grond van de aanwezige kennis en (technische) toepasbaarheid gekozen is voor een drietal onderzoekslijnen: 1) Geostatistische ruimte-interpolatie (projectleider W.J.M. te Riele), 2) Geregionaliseerde MISO-modellen - o.a. tijdreeksanalyse - (projectleider: M. Knotters), 3) Stochastische partiële differentiaalvergelijkingen (projectleider M.F.P Bierkens). Over deze keuzes en de invulling ervan is inmiddels uitgebreid gediscussieerd tijdens een tweetal interne workshops met medewerkers van L.I.M. en van de hoofdafdeling Waterbeheer. Een gedeelte van de toen geopperde kritiek is reeds verwerkt in de voor u liggende notitie. Inmiddels is op grond van deze notitie een overkoepelend onderzoeksthema (projectnr. 546) getiteld "Herziening Gt-methodiek" gedefinieerd waarin de drie onderzoekslijnen worden uitgezet. Bijlage A is een beschrijving van dit overkoepelend onderzoeksthema. Hierin wordt tevens een meer op marktoverwegingen gebaseerde motivatie gegeven voor de keuze van drie onderzoekslijnen. Verder wordt beargumenteerd waarom gekozen is voor een set van methoden in plaats van een enkele alternatieve methode ter vervanging van de oude Gt-methodiek.

In bijlagen B t/m D zijn de drie (beoogde) onderzoekslijnen beschreven. In het kader van deze onderzoekslijnen zullen in de komende jaren projecten worden gedefinieerd binnen de afdeling L.I.M. Deze projecten moeten tenslotte leiden tot een set van methoden die tezamen voor verschillende situaties (afhankelijk van vraagstelling, beschikbare informatie en maximale kosten) beschrijvingen kunnen geven van de temporele en ruimtelijke variatie van het freatisch vlak; beschrijvingen die voldoen aan de algemene eisen geformuleerd in hoofdstuk 3 van deze notitie.

Tabel 1. Evaluatie van mogelijke methoden van onderzoek naar de ruimtelijke en temporele variatie van het freatisch vlak (en nuttige grondwateraanvulling/capillaire opstijging) bij L.I.M.

methode	praktische toepasbaarheid	expertise aanwezig	expertise elders in Nederland	uit te voeren
1) geostatistische ruimte-interpolatie	alleen voor gerichte opnamen	ja	ja	ja, door te Riele
2) geostatistische tijd-ruimte interpolatie	gering vanwege te ijl net van stambuizen	neen	beperkt, Stein (LUW)	neen
3) MISO-tijdreeks-modellering	groot	ja	ja, TNO-GG	ja, door Knotters
4) MIMO-tijdreeks-modellering	geringer, met name vanwege de moeilijkheden bij het identificeren van veel parameters van multivariate tijdreeksmodellen	nog niet	ja, TNO-GG	neen
5) Hybride modellen	groot, mits de parameters van MISO-tijdreeksmodellen zich laten regionaliseren.	nog niet	neen	ja, door Knotters
6) Stochastische p.d.v.'s	groot, mits de p.d.v.'s zijn gebaseerd op realistische aannamen en de (stochastische) parameters uit eenvoudige veldwaarnemingen kunnen worden geschat.	beperkt	ja, Wiskunde in Utrecht en Delft	ja, door Bierkens

7. Literatuur

- BIERKENS, M.F.P. en P.A. BURROUGH, 1993. *The indicator approach to categorical soil data; II. Application to mapping and land use suitability analysis*. Journal of Soil Science 44(2): 369-381.
- DE MARSILY, G., 1986. *Quantitative hydrogeology; Groundwater hydrology for engineers*. Academic Press, Orlando.
- FEDDES, R.A., M. DE GRAAF, J. BOUMA en C.D. VAN LOON, 1988. *Simulation of water use and production of potatoes as affected by soil compaction*. Potato Research 31: 239-255.
- FINKE, P.A., D.J. GROOT OBBINK en A.F. VAN DER HOLST, 1994. *Methode voor de bepaling van de prioriteitsvolgorde van de Gt-actualisatie*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 322.
- GARDINER, C.W., 1990. *Handbook of stochastic methods; for physics, chemistry and the natural sciences*. Berlin, Springer Verlag.
- GEER, F.C. VAN en P.R. DEFIZE, 1987. *Detection of natural and artificial causes of groundwater fluctuations*. In: The influence of climate change and climate variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS Publications 168: 597-606.
- GEER, F.C. VAN en P.R. DEFIZE, 1990. *Simultane tijdreeksmodellering van twee stijghoogtereeksen*. Delft, TNO-IGG, Rapport OS 90-72A.

- GEER, F.C. VAN, 1992. *Ruimtelijke variabiliteit in de grondwaterstand in gebieden met een beheerst peil*. Delft, TNO-IGG, Rapport OS 92-111A.
- HEESEN, H.C. VAN, 1970. *Presentation of the seasonal fluctuation of the water table on soil maps*. Geoderma 4: 257-278.
- KNOTTERS, M. en P.E.V. VAN WALSUM, 1994. *Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisatie van het grondwaterstandsverloop*. Wageningen, Staring Centrum, Rapport 350.
- RIELE, W.J.M. TE en D.J. BRUS, 1991. *Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 158.
- RIELE, W.J.M. TE en D.J. BRUS, 1992. *Het gebruik van fysisch-geografische informatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterstandskarakteristieken (GHG en GLG)*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 209.
- ROUHANI, S. en T.J. HALL, 1989. *Space-time kriging of groundwater data*. In Armstrong, M. (ed.): Geostatistics, Kluwer Academic Publishers, volume 2: 639-650.
- ROUHANI, S. en D.E. MYERS, 1990. *Problems in Space-time kriging of geohydrological data*. Mathematical Geology 22(5): 611-623.
- SLUIJS, P. VAN DER en J.J. DE GRUIJTER, 1985. *Water table classes: a method to describe seasonal fluctuation and duration of water tables on Dutch soil maps*. Agricultural Water Management 10: 109-125.
- SLUIJS, P. VAN DER en H.C. VAN HEESEN, 1989. *Veranderingen in de berekening van de GHG en de GLG*. Landinrichting 29: 18-21.
- SU, N., 1994. *A formula for computation of time-varying recharge of groundwater*. Journal of Hydrology 160:123-135.
- SWITSER, P., 1989. *Non-stationary spatial covariances estimated from monitoring data*. In Armstrong, M. (ed.): Geostatistics, Kluwer Academic Publishers, volume 1: 127-138.
- VRIES, F. DE en C. VAN WALLENBURG, 1990. *Met de nieuwe grondwatertrappenindeling meer zicht op het grondwater*. Landinrichting 30: 31-36.
- WERKGROEP GT-ONDERZOEK, 1991. *Huidig & toekomstig onderzoek naar aspecten van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch grondwaterniveau*. Wageningen, Staring Centrum, Interne Mededeling 142.

Bijlage A: Beschrijving onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek"

Beschrijving onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek"

Projectnummer: 546
Projectleider: M.F.P. Bierkens

1. Achtergrond

Medio 1990 is bij SC-DLO de werkgroep Gt-onderzoek (Gt = grondwatertrap) ingesteld met als doel de huidige Gt-methodiek voor de beschrijving van het freatisch vlak te beoordelen op zijn geschiktheid als basisinformatie voor toekomstige onderzoeksvragen (Werkgroep Gt-Onderzoek, 1991). Op grond van een inventarisatie van de bezwaren die bestonden tegen de uitgangspunten van de huidige Gt-methodiek, de gebruikte classificatie, de kartering en de toepassing van Gt-kaarten, formuleerde de werkgroep onderzoeksvragen ten aanzien van: 1) De verbetering van de huidige Gt-methodiek (korte termijn doelstelling), 2) De formulering en onderbouwing van alternatieven voor de Gt-methodiek (lange termijn doelstelling). In bovenstaande notitie "*Huidig en toekomstig onderzoek naar de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch grondwaterniveau*" is geconstateerd dat de meeste onderzoeksvragen ten aanzien van de korte termijn doelstelling binnen verschillende projecten zijn beantwoord. De notitie behandelt en motiveert vervolgens in detail het onderzoek dat binnen de afdeling Landinventarisatiemethoden (L.I.M.) wordt gedaan of wordt beoogd binnen het kader van de lange termijn doelstelling.

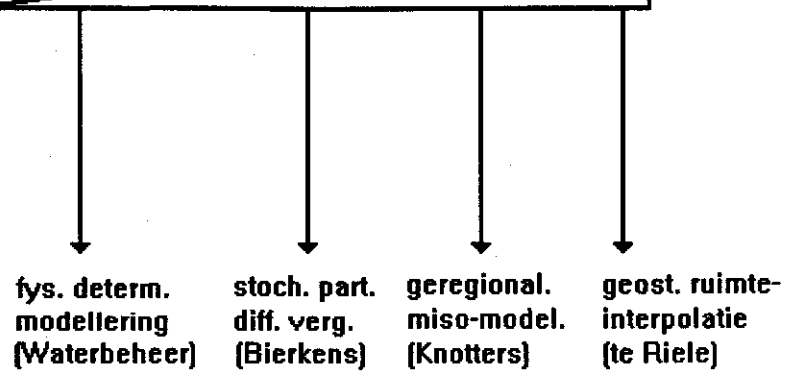
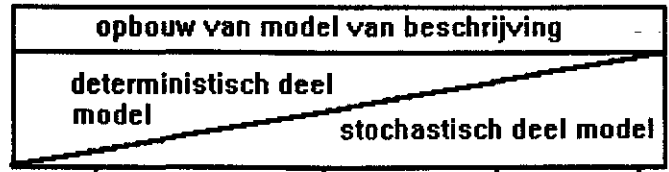
Op grond van inhoudelijke afwegingen komt de notitie met een drietal verweven onderzoekslijnen: 1) Geostatistische ruimte-interpolatie (projectleider W.J.M. te Riele), 2) Geregionaliseerde MISO-modellen - o.a. tijdreeksanalyse - (projectleider: M. Knotters), 3) Stochastische partiële differentiaalvergelijkingen (projectleider M.F.P. Bierkens). Dit onderzoek betreft zowel de ontwikkeling van methoden als ook de operationalisering van bestaande technieken en moet uiteindelijk leiden tot methoden die praktisch toepasbaar (en verkoopbaar) zijn. Elk van de onderzoekslijnen wordt uitgewerkt door de uitvoering van meerdere op elkaar aansluitende projecten. Deze beschrijving betreft het overkoepelend onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek", dat dient om deze drie onderzoekslijnen te coördineren. Onder de vlag van dit thema is ook bovenstaande notitie geschreven.

2. Motivatie

De notitie geeft vooral een inhoudelijke motivatie voor de keuze van de drie onderzoekslijnen. Deze paragraaf beoogt een motivatie op grond van (toekomstige) behoeften uit de markt en toepasbaarheid voor adviserend- en opdrachtenwerk en duidelijk te maken hoe de drie onderzoekslijnen samen een set van complementaire instrumenten dient op te leveren die kunnen worden gebruikt in het toegepast onderzoek naar het gedrag van het freatisch vlak.

Figuur A1 toont de onderlinge relaties van de drie onderzoekslijnen en hun relatie met de fysisch deterministische (numerieke) modellering van het freatisch grondwater zoals dat vooral bij de hoofdafdeling Waterbeheer gebeurt. Bovenaan de figuur is schematisch weergegeven dat bij de modellering van het freatisch vlak in meer of mindere mate het model is samengesteld uit een deterministisch deel en een stochastisch deel. De overgang

Fig. A1



typische vraagstelling	lokatie-specifiek	inventariserend
	actuele grondwaterstand	overschrijdingskansen
eisen aan informatie	veel invoerdata; invoerparameters nauwkeurig bekend	onzekerheid van invoerdata is kwantificeerbaar
	kosten groot	kosten laag
eigenschappen methoden	extrapoleerbaarheid groot (scenario's)	geringe extrapoleerbaarheid (toestandsbeschrijvingen)

van deterministische modellering naar stochastische modellering is derhalve een glijdende schaal. Te zien is dat de gebruikte methode afhangt van de vraagstelling. Verder geldt dat gebruikte methoden verschillende eigenschappen bezitten wat betreft kosten en toepassingsbereik en ook andere eisen stellen aan de beschikbare informatie. Ook voor deze typische vraagstellingen, eisen en eigenschappen geldt dat deze geleidelijk veranderen met de hoeveelheid stochasticiteit in het gebruikte model, hetgeen schematisch is weergegeven door de dunne lijnen.

Uitgangspunt bij figuur A1 is dat onzekerheid een integraal onderdeel van de modellering dient te zijn. Een eerste rede hiervoor is dat het expliciet meemodeleren van onzekerheid in een groot aantal gevallen aantoonbaar betere modelresultaten oplevert. Een tweede rede is dat het niet vermelden van de onzekerheid van modeluitkomsten een vorm van struisvogelpolitiek is, met name naar de opdrachtgever toe. Als derde rede voor het expliciet modelleren van de onzekerheid kan gegeven worden dat het veelal de enige manier is om vanuit een beperkt aantal metingen tot uitkomsten in de vorm van overschrijdingskansen te komen (één van de eisen geformuleerd door de Werkgroep Gt-Onderzoek (1991)). In de stochastische hydrologie wordt de onzekerheid expliciet meegemodelleerd door parameters, invoer- en/of uitvoervariabelen te zien als stochastische variabelen (uitkomsten van een kansexperiment). Voor de Gt-problematiek betekent dit dat het model dat gebruikt wordt om de freatische grondwaterstand te beschrijven bestaat uit een deterministisch deel en een stochastisch deel, waarbij het deterministisch deel in meer of mindere mate kan bestaan uit empirische of fysische relaties.

Dit is ook te zien in figuur A1. We zien de drie L.I.M.-onderzoekslijnen afgebeeld afhankelijk van welk gedeelte van het model als stochastisch wordt gemodelleerd. Elk van de drie lijnen levert methoden van modellering (Beschrijving en voorspelling) van de freatische grondwaterstand op. De herziening van de Gt-methodiek bestaat dan ook niet uit één alternatieve methode (zoals een nieuwe classificatie), doch uit een set van complementaire methoden op het gebied van de stochastische hydrologie die afhankelijk van de situatie kunnen worden toegepast. Zoals ook in de figuur te zien is hangt dit af van de aard en de kwaliteit van de beschikbare informatie, de toelaatbare kosten van het onderzoek, de doelstelling van het onderzoek en of men meer is geïnteresseerd in overschrijdingskansen voor een langere periode of een gebied, dan wel in de actuele waarde op een bepaalde plaats op een bepaald tijdstip. Om hier wat voorbeelden van te geven: Ingeval het doel is om op een relatief goedkope wijze een beeld te verkrijgen van een actuele grondwaterstand (bijvoorbeeld bij een gerichte opname) dan zal men snel kiezen voor geostatistische interpolatie, eventueel aangevuld met hulpinformatie zoals de relatieve hoogteligging. MISO-modellen zijn bij uitstek geschikt om overschrijdingskansen of de GHG/GLG van stambuizen te corrigeren voor een te korte opnameperiode (zie Knotters en van Walsum, 1994). Als het doel is om achteraf een regionaal beeld te verkrijgen van het verschil van overschrijdingsduren van freatische grondwaterstanden voor en na een ingreep is te verwachten dat geregionaliseerde MISO-modellen hiervoor het goedkoopste en snelste alternatief zijn. Voor die situaties waar men nauwelijks beschikt over meerjarige meetreeksen van de grondwaterstand, doch alleen een fysisch-geografische en bodemkundige beschrijving van het gebied heeft en *van te voren* geïnteresseerd is in uitspraken over overschrijdingsduren voor en na een ingreep (bijvoorbeeld om het economisch effect van waterbeheersingswerken te voorspellen) kunnen oplossingen van vereenvoudigde stochastische partiële differentiaalvergelijkingen een uitkomst bieden. Deze zijn dan ook geschikt om vooraf te bekijken waar men het best kan gaan meten om achteraf de effecten van de ingreep het nauwkeurigst te kunnen bepalen. Al deze methoden

hebben gemeen dat ze een min of meer inventariserend karakter hebben: ze geven overschrijdingskansen en -duren voor grotere gebieden en voor langere tijdsperioden. Wil men voor een specifieke plaats en op een specifiek tijdstip nauwkeurig genoeg weten wat de grondwaterstand is dan is zoveel informatie nodig dat het beter is om een fysisch-deterministisch grondwatermodel van het gebied te bouwen, eventueel gepaard gaande met een onzekerheidsanalyse (Monte Carlo simulatie). De bijgevoegde figuur en deze voorbeelden geven aan dat bij het formuleren van het onderzoek naar een alternatieve Gt-methodiek niet uitgegaan is van één methode. Er is een duidelijke keuze gemaakt voor een "toolbox" van verschillende methoden die, afhankelijk van het gevraagde, de beschikbare informatie en de toelaatbare kosten kunnen worden ingezet voor onderzoek naar het ruimtelijk en temporeel gedrag van het freatisch vlak. De keuze is ook ingegeven door de overweging dat een set van methoden beter in staat is om op de mogelijk snel veranderende vraagstellingen uit de praktijk in te spelen. Het onderzoek naar alternatieven voor de Gt-methodiek vraagt aanzienlijke investeringen. De ontwikkeling van een set complementaire methoden in plaats van één methode is dus tevens een vorm van risicospreiding.

3. Projectplan

3.1 *Probleemstelling*

De huidige Gt-methodiek voldoet niet meer aan de eisen die door opdrachtgevers gesteld worden of gesteld zullen worden aan een beschrijving van de temporele en ruimtelijke variabiliteit van het freatisch vlak.

3.2 *Doelstelling*

Een methode (of een set van methoden) van beschrijving van de temporele en ruimtelijke variabiliteit van het freatisch vlak (kort: een alternatieve Gt-methodiek) die voldoet aan de eisen die huidige en toekomstige opdrachtgevers aan een dergelijke beschrijvingswijze stellen.

In het bijzonder is een alternatieve Gt-methodiek nodig die onder meer aan de volgende eisen voldoet (zie hoofdstuk 3 van bovenstaande notitie):

- (1) Een systeem van beschrijving moet in staat zijn in zeer algemene zin de ruimtelijke en temporele variatie van het freatisch vlak te beschrijven, zonder a priori te classificeren. De ruimtelijke variatie dient echter, zonder a priori classificatie, wel karteerbaar te zijn. De temporele variatie dient, zonder a priori classificatie, beschrijfbaar te zijn in de vorm van overschrijdingsduren.
- (2) De beschrijvingsvorm (bijv. bepaalde grootheden) moet gerelateerd kunnen worden aan meteorologische, bodemkundige en hydrologische kenmerken.
- (3) De beschrijvingsvorm dient onafhankelijk te zijn van de waarnemingsfrequentie.
- (4) Wanneer met een alternatief systeem van beschrijving uitspraken worden gedaan over het ruimtelijk en temporeel gedrag van de grondwaterstand dient dit gepaard te gaan met betrouwbaarheidsuitspraken.

- (5) Een alternatieve Gt-methodiek dient, naast de ruimtelijke en temporele variatie van het freatisch vlak, ook het ruimtelijk en temporeel gedrag van gerelateerde grootheden (zoals nuttige grondwateraanvulling) te beschrijven, welke behulpzaam kunnen zijn bij de modellering van verzadigde en onverzadigde stroming (voor bijvoorbeeld landbouwdoeleinden of ecologische studies).
- (6) De beschrijvingswijze dient zodanig te zijn dat deze op uiteenlopende ruimtelijke en temporele schaalniveaus informatie kan verschaffen.

3.3 *Resultaat*

Het onderzoek resulteert in:

- 1) Een set van operationele stochastische methoden waarmee het ruimtelijk en temporeel gedrag van het freatisch vlak kan worden geïnventariseerd (beschreven en voorspeld). De relatie met de oude Gt-classificatie blijft overigens behouden. Onder operationele methoden wordt verstaan: Theorie, uitvoeringsprocedures en eventueel bijbehorende software.
- 2) Inzicht (in de vorm van een set regels) onder welke omstandigheden (afhankelijk van informatie, vraagstelling en kosten) welke van de set methoden het best kan worden toegepast.
- 3) SC-rapporten en wetenschappelijke publikaties in Nederlandse en internationale tijdschriften over eventueel nieuw ontwikkelde methoden, over validatiestudies met bestaande methoden en over de praktische toepasbaarheid (met betrekking tot informatie, vraagstelling en kosten) van deze methoden.

3.4 *Afbakening*

Dit onderzoek resulteert niet in:

- 1) Een enkele methode die één op één de oude Gt-methodiek vervangt.
- 2) Nieuwe landsdekkende kaarten met grondwatertrappen.

3.5 *Maatschappelijk- en kennisbelang*

De beschrijving van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch vlak in het landelijk gebied is een belangrijke taak van het Staring Centrum. Vele landinrichtingsprojecten gaan gepaard met een inventarisatie van de ontwateringstoestand en dus van het gedrag van de grondwaterstand. Dat nieuwe technieken hierbij van pas kunnen komen is recentelijk nog gebleken (Stolp et al., 1994; Knotters en van Walsum, 1994; te Riele en Brus (in voorbereiding)). Verder is een adequate beschrijving van de grondwaterstand (lieftst in de vorm van overschrijdingskansen) een belangrijke factor bij het onderzoek naar uitspoeling van meststoffen, bij ecohydrologisch onderzoek en bij agronomische studies.

3. **Beheersing**

4.1 *Capaciteit en tijd*

Het valt te verwachten dat de uitvoering van de projecten die vallen onder de drie onderzoekslijnen van het thema "Herziening Gt-methodiek" gedurende de komende 5 jaren de volgende capaciteit zullen vergen: Bierkens (ca. 80%), Knotters (ca 80%) en te Riele (ca 50%). Overigens zijn enkele projecten in het kader van de onderzoekslijnen "geostatistische ruimte-interpolatie" en "geregionaliseerde MISO-modellen" reeds uitgevoerd of in uitvoering (Knotters en van Walsum, 1994; te Riele en Brus, 1992; te Riele en Querner (in voorbereiding)).

4.2 *Financiering*

Een groot gedeelte van het onderzoek dat onder de vlag van "Herziening Gt-methodiek" valt zal betaald moeten worden uit de programmafinanciering (DWK programma 127). Echter, waar mogelijk, zal gekeken worden of externe financiering mogelijk is, bijvoorbeeld door gedeelten van het onderzoek (bijv. case studies) uit te voeren in het kader van betaalde opdrachten.

4.3 *Kwaliteitsbewaking*

Voor de kwaliteitsbewaking zijn verantwoordelijk: M.F.P. Bierkens, M. Knotters, W.J.M. te Riele en J.J. de Gruijter (afdeling L.I.M.). Verder zal hiervoor regelmatig overleg plaatsvinden met medewerkers van de hoofdafdeling Waterbeheer en andere instituten (bijv. GG-TNO).

4.4 *Informatie*

Om andere Staring medewerkers, eventuele opdrachtgevers en extern geïnteresseerden te informeren zal elk project worden afgesloten met een SC-rapport en eventueel met een wetenschappelijke publikaties in Nederlandse of internationale tijdschriften.

4.5 *Organisatie*

Hoofdafdelingshoofd (capaciteitsmanager; benodigd: ca 10.5 mensjaren): B. v/d Pouw (SC-DLO).

Programmaleider (DWK programma 127): J.J. de Gruijter (SC-DLO).

Projectleiders en medewerkers: M.F.P. Bierkens (SC-DLO; trekker), M. Knotters (SC-DLO; duwer) W.J.M. te Riele (SC-DLO; duwer), WIO (SC-DLO; redactie).

Opdrachtgevers: DWK-programma 127; nog onbekende externe financiers.

Belangengroepen: Landinrichtingsdienst, waterleidingmaatschappijen, provincies, natuurbeschermingsorganisaties, waterschappen, grondeigenaren/-gebruikers.

4. Literatuur

- KNOTTERS, M. en P.E.V. VAN WALSUM, 1994. *Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisatie van het grondwaterstandsverloop*. Wageningen, Staring Centrum, Rapport 350.
- RIELE, W.J.M. TE en D.J. BRUS, 1991. *Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 158.
- RIELE, W.J.M. TE en D.J. BRUS, 1992. *Het gebruik van fysisch-geografische informatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterstandskarakteristieken (GHG en GLG)*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 209.
- RIELE, W.J.M. TE en D.J. BRUS, (in voorbereiding). *Gt-actualisatie in het Land van Cuijk*. Wageningen, Staring Centrum.
- RIELE, W.J.M. TE en E. QUERNER, (in voorbereiding). *Geostatistische interpolatie van grondwaterstanden met gebruikmaking van fysisch-geografische gegevens en hydrologische modelresultaten*. Wageningen, Staring Centrum.
- STOLP, J., M. KNOTTERS en F. PLEIJTER, 1994. *Geostatistische interpolatie van de gemiddeld laagste grondwaterstand met behulp van hoogtepunten in een deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg*. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 344.
- WERKGROEP GT-ONDERZOEK, 1991. *Huidig & toekomstig onderzoek naar aspecten van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch grondwaterniveau*. Wageningen, Staring Centrum, Interne Mededeling 142.

Bijlage B: Beschrijving onderzoekslijn "Geostatistische interpolatie van grondwaterstanden met gebruikmaking van metingen en geografisch-hydrologische modelresultaten" door W.J.M. te Riele

- n.b. Aangezien deze onderzoekslijn voor een groot gedeelte bestaat uit een enkel project (nr. 493) en aangezien dit project reeds in een vergevorderd stadium is volgt hier, in plaats van een beschrijving van de feitelijke onderzoekslijn, een copy van de oorspronkelijke goedgekeurde beschrijving van dit project. Deze projectbeschrijving geeft een bijna volledig beeld van de (beoogde) onderzoekslijn.

PROJECTBESCHRIJVING

Toelichting

Het projectbeschrijvingsformulier wordt gebruikt voor alle door het Staring Centrum uit te voeren projecten *ongeacht externe financiering*.

Alleen voor betaalde projecten die maximaal 2 dagen duren, wordt geen formulier ingevuld; in deze gevallen wordt wel een projectnummer toegekend door de afdeling FZ/OP.

Invulling van het formulier geschiedt door de projectleider behalve de rubrieken gemerkt met *

@ betekent: invulling facultatief; overige rubrieken moeten altijd worden ingevuld.

Administratieve gegevens

* Projectnummer (in te vullen door afd. FZ/OP) 493 . . .

Projecttitel Geostatistische interpolatie van grondwaterstanden met gebruikmaking van metingen en geografisch-hydrologische modelresultaten

Verkorte projecttitel (max. 30 posities)

Interpolatie grondwaterstanden

@ Engelse projecttitel

Geostatistical interpolation of groundwater levels using measurements and results from geografic-hydrological models

DLO-programma (1) 8: Ontwikkeling landinventarisatie- en landevaluatiemethoden

Financieringswijze (2) Niet betaald onderzoek

(1) *DLO-programma*

1 = bodembioëcologie; 3 = fysisch bodembeheer; 4 = bodemverontreiniging, bodembescherming en bodemsanering; 5 = gedrag en betekenis van bestrijdingsmiddelen in bodem, water en lucht; 6 = waterbeheer; 7 = systematische bodenkundige informatie; 8 = ontwikkeling landinventarisatie- en landevaluatiemethoden; 9 = landinrichting en informatievoorziening; 11 = recreatie en toerisme; 12 = remote sensing; 13 = GIS-onderzoek; 14 = bosontwikkeling en

groeiplaatsontwikkeling; 23 = landschapsontwikkeling; 24 = ecologische processen in versnipperd landschap; 108 = ontwikkelingssamenwerking m.b.t. land en water; 110 = duurzaam landgebruik en voedselproductie in ontwikkelingslanden; 114 = nutriëntenbelasting grond- en oppervlaktewater; 115 = ruimtelijke planvorming; 119 = bosbegrazing; 120 = natuurontwikkeling (in wetlands); 121 = natuurgerichte normstelling; 122 = klimaatverandering, landbouw en natuur; 147 = ecotoxicologische risico's; 153 = toegepaste landinventarisatie- en landevaluatie; 187 = N-bemesting en -dynamiek in bodem/gewas

Inhoud

Probleem en doel

Het grondwater bevindt zich in grote delen van Nederland op geringe diepte beneden het maaiveld. Het heeft daarom grote invloed op het verloop van allerlei processen als gewasgroei, uitspoeling van nutriënten en pesticiden. Een verantwoord gebruik en beheer van het landelijk gebied vereist derhalve gedetailleerde kennis over de diepte van het grondwater. Onder invloed van het weer varieert met name in de zandgebieden grondwaterdiepte in de tijd sterk. Door verschillen in profielopbouw en vooral maaiveldshoogte is er ook sprake van een grote ruimtelijke variabiliteit van de grondwaterdiepte. Om inzicht te krijgen in de hydrologische situatie van een gebied worden op een aantal plaatsen metingen verricht die vervolgens worden geëxtrapoleerd naar andere punten. Bij de grondwatertrappenkartering gebeurt dat vooral op basis van hydromorfe profielkenmerken en zichtbare kenmerken van het landschap.

In de afgelopen decennia zijn echter geavanceerde geostatistische methoden ontwikkeld voor het beschrijven van de ruimtelijke variatie. Hiermee is het mogelijk variabelen, bijv. grondwaterstanden, gemeten op een beperkt aantal observatiepunten te interpoleren naar elk willekeurig niet-bemeten punt.

Daarnaast is veel expertise aanwezig om op basis van proceskennis het grondwaterniveau meer deterministisch te modelleren. Voorts bestaan er veelal empirische relaties tussen de grondwaterstand en bepaalde geografische kenmerken die door middel van regressiemodellen kunnen worden beschreven.

Integratie van de deterministische c.q. regressiemodellen in een geostatistische benadering lijkt perspectiefvol en sluit aan bij de bevindingen van de werkgroep Gt-onderzoek (interne mededeling nr: 142, par. 6.1, 6.2.1 en 6.3.2). De geografisch-hydrologische modelresultaten worden hierbij als hulpvariabelen gebruikt in geostatistische interpolatieprocedures (Ahmed & De Marsily, 1987; Knotters et al, i.v.).

Bij het beschrijven van de ruimtelijke variatie vormen, behalve de nauwkeurigheid, de kosten een belangrijk aspect. Deze worden vooral bepaald door de dichtheid van het meetnet en, zij het minder, ook door de dichtheid van het bij de deterministische modellering gebruikte knooppuntennet.

Doel van dit project is te onderzoeken:

- in hoeverre met geografische-hydrologische modelresultaten de ruimtelijke interpolatie van grondwaterstanden kan worden ondersteund;
- welke geostatistische interpolatiemethode het best gebruikt kan worden bij de interpolatie van grondwaterstanden;
- wat de invloed van de dichtheid van het meetnet resp. knooppuntennet is op de interpolatiefout.

De uitkomsten van interpolatiemethoden worden getoetst met een aselechte steekproef van testpunten.

Motivering/te verwachten effecten

Met het onderzoek wordt een eerste aanzet gedaan tot het ontwikkelen van een werkwijze, waarin proceskennis, correlatieve relaties en metingen worden geïntegreerd in een geostatistische interpolatiemethode.

De resultaten van het onderzoek geven inzicht in de invloed van de gebruikte voorinformatie, de interpolatiemethoden en de dichtheid van het meetnet op de nauwkeurigheid van de geïnterpoleerde waarde. Dit biedt de mogelijkheid bij toekomstige inventarisaties van het grondwaterniveau, een meer op het onderzoeksdoel afgestemde werkwijze te kiezen. Het niveau van het freatisch water is een belangrijke parameter in veel modelstudies. Voor een verantwoorde interpretatie van de modeluitkomsten is inzicht in de nauwkeurigheid van de invoergegevens onontbeerlijk.

De resultaten van dit onderzoek zullen een belangrijke bijdrage leveren in de ontwikkeling van een operationele methodiek voor de Gt-actualisatie op regionale schaal van de Bodemkaart van Nederland. Te verwachten is dat de nauwkeurigheid en wellicht ook de snelheid van de herziening van de Gt-kaart er door vergroot kan worden. Tevens zal het mogelijk zijn de variabiliteit van Gt-klassen en wellicht ook van Gt-vlakken aan te geven

Werkwijze/methoden

Overzicht (zie bijlage)

De werkwijze is globaal als volgt:

In een gebied worden op een bepaald tijdstip op regelmatige afstanden (gridpunten) grondwaterstanden gemeten. Dit meetnet wordt vervolgens aangevuld met punten, waarop met behulp van het model FEMSATS een grondwaterstand is berekend (knooppunten) én met punten waarop de grondwaterstand door middel van lineaire regressie is geschat (punten op de Hoogtepuntenkaart).

Op basis van de gemeten (op gridpunten), berekende (op knooppunten) en geschatte (op hoogtepunten) grondwaterstanden worden met behulp van een geostatistische interpolatiemethode de grondwaterstanden geïnterpoleerd naar testpunten. Uit het verschil tussen de geïnterpoleerde grondwaterstand en de gemeten grondwaterstand op de testpunten volgt de interpolatiefout.

Tenslotte wordt nagegaan in hoeverre, in afhankelijkheid van geostatistische interpolatiemethoden en dichtheid van het meetnet, de interpolatiefouten kunnen worden gereduceerd door aanvulling van de metingen met fysisch-geografische modelresultaten.

Proefgebied

Het onderzoek wordt uitgevoerd in een gebied met een oppervlakte van 900 ha, gelegen ten zuidwesten van Putten. Het is een in bodemkundig en hydrologisch opzicht gevarieerd gebied dat overwegend in gebruik is als grasland. Onder een sterk algemeen verhang van 2 á 2,5 m per kilometer watert het af op de Schuitebeek. Het gebied maakt deel uit van het thans in uitvoering zijnde project Hydrologie en grondwatertrap (nr. 468), zodat gegevens en resultaten hiervan gebruikt kunnen worden ten behoeve van de deterministische modellering. Daarnaast is van het gebied veel informatie aanwezig over de ruimtelijke en temporele variatie van het freatisch water (Te Riele en Brus, i.v.) en de bodemkundige opbouw (Breeuwsma et al., 1989). Voorts wordt het project waar mogelijk afgestemd op het onderzoek dat in het zelfde gebied naar de nutriëntenhuishouding van grond- en oppervlakte water wordt uitgevoerd. Voor een doelmatige verzameling en efficiënt gebruik van veldgegevens zal er regelmatig contact tussen de projectteams zijn.

Bij het IGG/TNO is, zij het op een ander schaalniveau en vanuit een andere doelstelling, veel ervaring met de analyse van grondwaterstandsgegevens. Met name het LNV-doelsubsidieproject "Analyse freatisch meetnet" dat in noord Zuid-Beveland in uitvoering is, vertoont enkele duidelijke raakvlakken met dit projectvoorstel. Voor een optimale uitwisseling van gegevens en expertise (gebruik van ontwikkelde modellen) wordt gedurende het onderzoek

intensief contact onderhouden met Dr.Ir. F.C. van Geer van het IGG/TNO.

Meetnet (zie bijlage)

In het gebied wordt in een (in principe) regelmatig grid een meetnet ingericht, waarvan de onderlinge afstand 250 m bedraagt. De precieze locatiekeuze vindt plaats rekening houdend met de toepasbaarheid van de deterministische en empirische modellering. Naast bovengenoemde gridpunten (169), wordt door middel van een aselechte, gestratificeerde steekproef binnen het onderzoeksgebied een set van 100 meetlocaties aangewezen als testpunten. Deze testpunten worden gebruikt om de uitkomsten van de interpolatiemethoden te vergelijken met de werkelijke waarden. Daarnaast worden ze gebruikt bij het schatten van de variogrammen voor de (co)kriging-methode. Voor dit doel worden twee strata onderscheiden "dichtbij" (<100 m) een gridpunt en "ver van" (>100 m) een gridpunt, waarover de testpunten gelijkelijk worden verdeeld. Van zowel de testpunten als de gridpunten wordt de maaiveldshoogte ingemeten t.o.v. NAP. Uit een oogpunt van doelmatigheid (toekomstige geostatistische ruimte-tijd modellering) worden de metingen op meerdere tijdstippen uitgevoerd in daartoe geplaatste peilbuizen.

Van de grid- en testpunten wordt op basis van de hoogtepuntenkaart de relatieve maaiveldshoogte berekend.

Om inzicht te krijgen in de invloed van de dichtheid van het meetnet op de interpolatiefout, worden de interpolaties uitgevoerd bij 5 dichtheden. De onderlinge afstand van de meetpunten bedraagt resp. 250, 500, 750, 1000 en 1500 m.

De maximale en minimale dichtheden van het meetnet zijn zodanig gekozen, dat enerzijds een adequate toepassing van geostatistische interpolatiemethoden mogelijk is, anderzijds dat het in operationeel opzicht relevant is (bijv. ten behoeve van de Gt-actualisatie van de Bodemkaart 1:50000). Uit vooronderzoek is gebleken dat de grondwaterstanden ten opzichte van NAP tot een onderlinge afstand 800 á 900 m ruimtelijk zijn gecorreleerd, zodat een minimale gridpuntsafstand van 250 m toereikend is.

Doelvariabelen

De te interpoleren variabelen (doelvariabelen) zijn de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld en ten opzichte van NAP.

Veel toepassingen vereisen informatie over de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld. Als gevolg echter van de variatie in maaiveldshoogte, vertoont de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld een grote ruimtelijke variatie. Hierdoor is de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld een relatief moeilijk te interpoleren variabele.

De grondwaterstand ten opzicht van NAP daarentegen is veel meer fysisch bepaald, waardoor het ruimtelijk een veel regelmatigere verloop heeft. Ruimtelijke interpolatie van de grondwaterstand ten opzichte van NAP biedt daardoor veel meer perspectief. Bij bekende maaiveldshoogte is het daarbij alsnog mogelijk de grondwaterstand uit te drukken ten opzichte van maaiveld.

Ruimtelijke interpolatie

Hierbij wordt gebruik gemaakt van een (relatief) ijl net met gemeten grondwaterstanden, aangevuld met een dicht net van geschatte grondwaterstanden.

De geschatte grondwaterstanden worden verkregen door middel van:

- deterministische modellering
- lineaire regressie

Met behulp van deterministische modellen zoals regionale stromingsmodellen is het mogelijk het hydrologisch proces in een gebied te simuleren. Hiervoor is het niet-stationaire model

SIMGRO, (Querner en van Bakel, 1989) uitermate geschikt. Evenwel de complexiteit van dit model houdt in dat het relatief veel CPU-tijd vergt en daarbij veel (veld)gegevens nodig zijn. Een verzadigd stationair grondwatermodel (FEMSATS) is aanzienlijk eenvoudiger toe te passen, maar geeft een veel minder gedetailleerde beschrijving van de regionale waterhuishouding. Mede in het licht van de operationele haalbaarheid, wordt als eerste aanpak in dit project gekozen voor een stationair model FEMSATS (Querner, 1984). In een eventueel vervolgonderzoek kan gedetailleerder te werk worden gegaan met het model SIMGRO.

Hiertoe wordt voor het proefgebied een eindige elementen netwerk van knooppunten opgezet. Om inzicht te krijgen in de invloed van de knooppuntsafstand op de schattingsnauwkeurigheid, wordt met het model FEMSATS de grondwaterstand berekend voor elk knooppunt bij twee dichtheden van het netwerk. Hierbij worden de gemeten grondwaterstanden van een aantal gridpunten als harde randvoorwaarden in het simulatiemodel opgenomen.

Bij lineaire regressie wordt gebruik gemaakt van de samenhang tussen de relatieve maaiveldshoogte, maaiveldshoogte ten opzichte van de directe (250 á 300 m) omgeving, en eventueel andere geografische variabelen (Te Riele en Brus, i.v.). Met deze samenhang en de hoogtegegevens van de Topografische Dienst kan op eenvoudige wijze de grondwaterstand met een dichtheid van ca. 1 punt per hectare worden geschat.

Met behulp van geostatistische interpolatiemethoden is het mogelijk de grondwaterstanden te interpoleren naar elk willekeurig punt. Afhankelijk van de aard en samenstelling van de verzamelde gegevens, wordt beslist welke van de beschikbare geostatistische methoden in dit project zullen worden toegepast.

Testen interpolatie-uitkomsten

Uit de vergelijking van de geïnterpoleerde waarden met de werkelijke waarde op de testpunten volgt de interpolatiefout. De hieruit berekende Root Mean Squared Error (RMSE) wordt gebruikt als maat voor de onnauwkeurigheid van de interpolaties. Deze wordt berekend voor elke interpolatiemethode bij 5 dichtheden van het meetnet (gridpunten) en 2 dichtheden van het knooppuntennet.

Daarnaast worden de volgens de kriging-modellen berekende interpolatiefouten (gemiddelde kriging variantie) en bij regressie-analyse verkregen gemiddelde standaardfouten vergeleken met de experimenteel bepaalde Root Mean Squared Error.

Literatuur en overige documentatie

Werkgroep Gt-onderzoek, 1991. Huidig & toekomstig onderzoek naar aspecten van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch grondwater niveau. SC, Interne Mededeling Nr. 142.

Knotters, M., Brus, D.J. & J.H.Oude Voshaar (i.v.) Cokriging versus kriging with uncertain data in a case study with censored observations and a trend.

Riele, W.J.M. te en D.J.Brus (i.v.) Het gebruik van geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterstandskarakteristieken

Breeuwsma, A., J.G.A. Reijerink, O.F. Schouwman, D.J. Brus en H. van het Loo, 1989.

Fosfaatbelasting van bodem, grond- en oppervlaktewater in het stroomgebied van de Schuitebeek. Rapport 10, Staringcentrum.

Querner, E.P. en P.J.T. van Bakel, 1989. Description of the regional groundwater flow model SIMGRO. Report 7, Staringcentrum

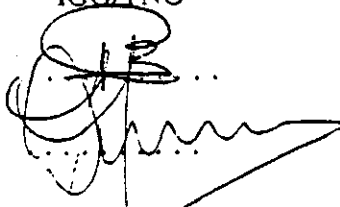
Querner, E.P. 1984a Program FEMSAT, part 1 - Calculation method for steady and unsteady groundwater flow. Nota 1557. ICW, Wageningen

Ahmed, S. & G, De Marsily, 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. Water Resources Research 23(9), 1717-1737

@ Provincie	Gelderland
@ Gemeente(n)	Putten
@ Topografische kaart 1 : 25 000, blad(en)	32E

Projectnummer . .493.

Uitvoering en flattering

Projectleider (invuller formulier)	W.J.M. te Riele
Afdeling (van projectleider)	Landinventarisatiemethoden
@ Coördinator/begeleider	J.J. de Gruijter
@ Externe samenwerking met
@ Overige externe contacten	IGG/TNO
* Akkoord HHA	
* Akkoord Directie
* Verzonden aan (in te vullen door afd. FZ/OP)

Opdrachtgever

@ Naam en adres

Tijdsplan (aanvang en afsluiting: kalenderjaar
voorbereiding t/m afwerking: kalendermaanden)

Aanvang	1-5-1992
@ Voorbereiding	januari t/m maart '92
@ Veldwerk/uitvoering	1992
@ Verwerking: kaarten
rapport	1992/93
@ Afwerking: Kartografie	1992/93
Redactie	1993
(Vermoedelijke) afsluiting	Eind 1993

Rapportage

Vorm van publikatie: rapport/report/artikel(en)/toelichting kaartblad/
overig:

Auteurs (voorlopig) W.J.M. te Riele, J.J. de Gruijter, E.P. Querner, M. Knotters

@ Openbaarheid

* Rapportnummer (in te vullen door afd. WIO)

@ Oplagelijst (aantallen invullen):

<i>Naam</i>	<i>Kaartseries</i>		<i>Rapporten</i>
	<i>kleur</i>	<i>zwart-wit</i>	
Opdrachtgever
Staring Centrum projectteam
bibl. Staringgebouw
bibl. hoofdafdeling
reserve (voor verkoop)
.....

BIJLAGE

A. Schematische weergave van de punten voor een deel van het gebied

O	o	+	o	+	o	O	o	+	o	+	o	O
o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o
		*										
+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+
o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o
							*					
+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+
O	+	o	+	o	+	O	+	o	+	o	+	O
				*								
+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+
o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o
+	o	+	o	+	o	+	*	o	+	o	+	o
						*						
o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o
O	o	+	o	+	o	O	o	+	o	+	o	O

Verklaring

O: Gridpunt; gemeten grondwaterstand (n=169)

+: Hoogtepunt; geschatte grondwaterstand (n=ca. 900)

o: Knooppunt; berekende grondwaterstand (n=onbepaald)

*: Testpunt; gemeten én geïnterpoleerde grondwaterstand (n=100)

B. Schema werkwijze

DATA					
metingen op gridpunten		Invoer		Uitvoer	EVALUATIE
schattingen op hoogtepunten	----->		RUIMTELIJKE	----->	geïnterpoleerde- minus
berekeningen op knooppunten			INTERPOLATIE		gemeten grondwaterstand
			kriging		op testpunten
			cokriging enz.		

Bijlage C: Beschrijving onderzoekslijn "Geregionaliseerde MISO-modellen voor de beschrijving van de freatische grondwaterstand op regionale schaal" door M. Knotters

Beschrijving onderzoekslijn "Geregionaliseerde MISO-modellen voor de beschrijving van de freatische grondwaterstand op regionale schaal" door M. Knotters

Vooraf

Deze beschrijving maakt deel uit van het onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek" (projectnr. 546). De methoden die in deze notitie worden voorgesteld zijn een onderdeel van een onderling afgestemd pakket van methoden die de huidige Gt-methodiek moeten gaan vervangen. Deze beschrijving is bedoeld voor bespreking binnen DLO-Staring Centrum. Aan de hand van deze beschrijving en het overleg kan een definitief onderzoeksvoorstel worden geformuleerd.

Doel

Op het brede terrein van stochastische modellering van de freatische grondwaterstand richt het onderzoek zich op het volgende doel: **het ontwikkelen van methoden voor de beschrijving van de freatische grondwaterstand in termen van overschrijdingskansen, geschikt voor inventarisaties op regionale schaal.**

Afbakening

Sinds de jaren zeventig wordt de fluctuatie van de freatische grondwaterstand beschreven op grondwatertrappen-(Gt-)kaarten. In 1991 formuleerde de Werkgroep Gt-onderzoek van het DLO-Staring Centrum doelstellingen voor het onderzoek naar de verbetering van de Gt-methodiek (korte-termijn-doelstelling) en naar alternatieven voor de Gt-methodiek (lange-termijn-doelstelling). Binnen het kader van deze doelstellingen is het onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek", waar deze beschrijving deel van uitmaakt, geformuleerd. Het onderzoek dat wordt voorgesteld in deze beschrijving bouwt voort op voorstel 3 van de Werkgroep Gt-onderzoek, nl. stochastische modellering. Binnen de stochastische modellering beperkt dit voorstel zich tot de volgende aspecten:

1. **inventarisatiemethoden.** Het accent ligt op de ontwikkeling van steekproefstrategieën voor situaties waarbij een gebrek aan grondwaterstandsdata is.
2. **beschrijving van de grondwaterstand in termen van overschrijdingskansen.** Op grond van de huidige inzichten is dit het beste alternatief voor de huidige Gt-methodiek. Aan de cumulatieve frequentieverdeling van de grondwaterstand op een bepaalde plaats en op een bepaald tijdstip in het jaar kunnen grootheden worden ontleend die voor ecologische, milieukundige, landbouwkundige en andere toepassingen relevant zijn;
3. **regionale schaal.** Het voorstel beperkt zich tot de schaal van regionale studies zoals inventarisaties voor landinrichtingsplannen, verdrogingsstudies, natuurontwikkelingsplannen e.d. (bijvoorbeeld schaal 1 : 10 000 of 1 : 25 000).

Motieven

1. **Behoeftte aan een alternatief voor de Gt-methodiek** (Werkgroep Gt-onderzoek, 1991). De behoefte waarin Gt-kaarten proberen te voorzien kan als volgt worden samengevat: een ruimtelijk beeld van het gedrag van de grondwaterstand in de tijd. De huidige Gt-methodiek is gebaseerd op gemiddelden van extremen van de grondwaterstand (GHG, GLG: gemiddeld hoogste, gemiddeld laagste grondwaterstand). Gt-klassen kunnen met behulp van empirische relaties worden vertaald in overschrijdingsduren (Van der Sluijs en De Gruijter, 1985).
Sinds de ontwikkeling van de Gt-methodiek is het mogelijk geworden om bij de beschrijving van het gedrag van de grondwaterstand in de tijd en in de ruimte gebruik te maken van modellen. Uit simulaties met tijd(-ruimte)-modellen kunnen cumulatieve frequentieverdelingen van de grondwaterstand worden afgeleid, voor een bepaald deel van het jaar of een bepaald tijdstip in het jaar, eventueel conditioneel op een gegeven neerslagoverschot. Uit de cumulatieve frequentieverdelingen kunnen karakteristieken worden afgeleid die als alternatief kunnen dienen voor de huidige Gt-methodiek. Overschrijdingskansen en overschrijdingsduren zijn voor ecologische, milieukundige en agrarische toepassingen belangrijk, omdat zij direct van invloed zijn op de kansen voor de ontwikkeling van bepaalde ecotypen, de kansen op uitspoeling van stoffen naar het grondwater en de kansen dat gewasopbrengstdervingen plaatsvinden.
2. **Gebrek aan grondwaterstandsdata bij inventarisaties op regionale schaal.** Bij studies op regionale schaal is vaak behoefte aan informatie over de grondwaterstand, en juist op deze schaal is er een gebrek aan data. Dit blijkt ook bij de huidige Gt-karteringen. In een gebied liggen meestal slechts enkele buizen van het landelijke meetnet met een tijdreeks van voldoende kwaliteit om het grondwaterstandsverloop te karakteriseren. Data ter ondersteuning van de Gt-kartering worden verzameld in extra buizen die gedurende één seizoen worden opgenomen en tijdens momentopnames in een groot aantal boorgaten. Te Riele en Brus (1991, 1992) hebben onderzoek verricht naar verbetering van de schatting van de GHG en de GLG en het gebruik van hulpinformatie hierbij, zoals de relatieve maaiveldshoogte. Bij de ontwikkeling van een alternatief voor de Gt-methodiek zouden steekproefstrategieën verder moeten worden onderzocht, binnen de financiële en organisatorische grenzen van een regionale studie zoals de kartering van een landinrichtingsgebied. Er zou moeten worden gezocht naar een evenwicht tussen de inspanning voor de steekproef, de complexiteit van het model en de eisen die gesteld zijn aan de beschrijving van de grondwaterstand. Hulpinformatie kan hierbij een belangrijke rol spelen.

Stochastische modellering van grondwaterstandstijdreeksen

Voor een goed begrip van de beoogde aanpak zal in het kort worden ingegaan op stochastische modellering van grondwaterstandstijdreeksen, in het bijzonder MISO-modellering.

MISO-modellen staan in de literatuur voor tijdreeksmodellen met meerdere invoerreeksen - *Multiple Input* - en één uitvoerreeks - *Single Output* - (Hipel en McLeod, 1994). De (deterministische) invoer kan bestaan uit reeksen van het potentiële neerslagoverschot, zoals in de studie naar de uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisering van het grondwaterstandsverloop (Knotters en Van Walsum, 1994). Daarnaast kunnen bijvoorbeeld

rivierwaterstanden en onttrekkingscijfers als invoer dienen (Van Geer en Defize, 1987). In deze gevallen wordt hydrologische systeemkennis uitsluitend aangewend bij de keuze van de invoerreeksen. Het is echter mogelijk om meer gebruik te maken van hydrologische systeemkennis bij de stochastische modellering van de grondwaterstand. In plaats van potentiële neerslagoverschotten kunnen actuele neerslagoverschotten of fluxen op een bepaalde diepte in de onverzadigde zone als invoer van de MISO-modellen dienen (Van Geer, 1991). Een stap verder is dat de deterministische component van een MISO-model wordt gevormd door een fysisch model zoals SWACROP. Deze variant is vergelijkbaar met *transfer-noise*-modellen als de parameters van SWACROP zodanig worden geoptimaliseerd dat het ruisproces ongecorrleerd is met het deel van het grondwaterstandsverloop dat beschreven wordt met het fysische model. Hier liggen mogelijkheden om het Kalman-filter-algoritme toe te passen (Van Geer, 1987; Bierkens, 1990).

Naarmate er meer hydrologische systeemkennis in de modellen wordt aangewend, zal er meer informatie nodig zijn over parameters zoals ontwateringsniveaus en bodemfysische parameters. Daarom zijn er met betrekking tot kosten en kwaliteit zijn optima denkbaar op de glijdende schaal van een puur 'empirisch' *transfer-noise*-model naar een puur 'fysisch' model. Waar in het navolgende sprake is van MISO-modellen worden niet uitsluitend *transfer-noise*-modellen bedoeld, maar ook de hierboven genoemde combinaties met fysische modellen.

Beoogde aanpak

Het onderzoek zal worden uitgevoerd in een aantal deelprojecten, die overeenkomstig de richtlijnen voor 'projectmatig werken' zullen worden beschreven. Hieronder volgt een ruwe schets:

Deelproject 1: Theorie van steekproeven in ruimte en tijd.

Dit deelproject bestaat voor het belangrijkste deel uit literatuurstudie. Vooral in de beginfase zal tijd aan dit deelproject worden besteed, vervolgens zal het parallel lopen aan andere deelprojecten. Aan het einde zal verslaglegging plaatsvinden in de algemene hoofdstukken van het proefschrift. Contacten zullen in het kader van dit deelproject worden gelegd met de Universiteit van Amsterdam (De Gooijer), waar onderzoek plaatsvindt naar steekproeven in ruimte en tijd, met TNO-GG (Van Geer) en met GLW-DLO.

Deelproject 2: Stochastische modellering van grondwaterstandsreeksen.

Met deze modellen kunnen langjarige reeksen worden gesimuleerd, waaruit karakteristieken zoals overschrijdingskansen kunnen worden berekend.

Deelproject 2 sluit aan op project 494: 'Conditionering Gt op klimaat'. Het deelproject sluit aan op het doelsubsidieprogramma van LNV (Van Geer en Lambert, 1990). Het onderzoek kan nog worden uitgebreid naar reeksen uit hydrologische systemen die niet in project 494 voorkwamen. Dit kan gedeeltelijk op basis van literatuuronderzoek en informatie uit het grondwaterarchief van TNO. In deelproject 2 worden de voorwaarden geschapen om deelproject 3 te kunnen uitvoeren. Er wordt een uitgebreide set van MISO-modellen uit verschillende hydrologische systemen aangelegd, die in deelproject 3 verder wordt onderzocht.

Deelproject 2 wordt uitgevoerd in combinatie met het onderzoek dat door Marc Bierkens is voorgenomen naar de beschrijving van de variatie van het freatisch vlak met behulp van

stochastische partiële differentiaalvergelijkingen. Voor de gevoeligheidsanalyse en het onderscheiden van functionele bodemtypen is ook voor dit onderzoek een uitgebreide set tijdreeksen nodig, maar daarnaast zijn er inhoudelijke raakvlakken die ervoor pleiten om beide onderzoeken te combineren, vooral wat betreft de rechtvaardiging van het gebruik van (lineaire) *transfer*-modellen.

Deelproject 3: Keuze voor modellen en regionalisatie van MISO-modellen en -modelparameters.

Bij de keuze voor een model dat de temporele variatie van de grondwaterstand beschrijft is van belang:

- i) hoeveel informatie benodigd is voor modellering;
- ii) in hoeverre de modellen die de temporele variatie beschrijven regionaliseerbaar zijn;
- iii) in hoeverre de modellen in staat zijn effecten van ingrepen te voorspellen.

Bij de regionalisatie van de modelparameters wordt de ruimtelijke variatie van de MISO-modellen en -modelparameters uit deelproject 2 geostatistisch geanalyseerd. Gezien het gebrek aan tijdreeksen op regionale schaal zal een belangrijk deel van het onderzoek betrekking hebben op de correlaties tussen MISO-modelparameters en eenvoudig te verkrijgen en dus goedkope **hulpinformatie**. Hierbij valt onder andere te denken aan maaiveldshoogte, profielkenmerken en bestaande Gt-kaarten. Naarmate de hulpinformatie die nodig is voor de regionalisatie van MISO-modelparameters duurder is (bijv. ontwateringsniveaus, bodemfysische variabelen, *guess fields* op basis van regionale hydrologische stromingsmodellen) ligt het voor de hand om deze informatie te gebruiken in het MISO-model zelf, dus meer hydrologische systeemkennis in de deterministische component aan te wenden, waarna de regionalisatie van de parameters van **deze** MISO-modellen weer zal geschieden met behulp van goedkope hulpinformatie.

Deelproject 3 wordt uitgevoerd in combinatie met het onderzoek naar de toepassing van stochastische partiële differentiaalvergelijkingen (door Marc Bierkens) (Gelhar, 1993), in het bijzonder het onderzoek naar functionele bodemtypen.

Deelproject 4: *Case study* in het kader van een regionale inventarisatie: Simulatie van MISO-modelparameterelden.

Uitgangspunt is een minimale beschikbaarheid van tijdreeksen, zoals vaak het geval is bij regionale inventarisaties. Het gebruik van hulpinformatie wordt geoptimaliseerd.

Nadat parameterelden zijn gesimuleerd kunnen daaruit op niet-bezochte locaties tijdreeksen worden gesimuleerd, waarna schattingen kunnen worden verkregen van de multivariate kansverdeling $f_h[h(x_1, y_1, t_1), \dots, h(x_n, y_n, t_n)]$. Hieruit kunnen allerlei grootheden worden berekend waarmee het grondwaterstandsverloop kan worden gekarakteriseerd (bijv. de kans op overschrijding van een gegeven niveau gedurende een bepaald aantal dagen in het groeiseizoen).

Deelproject 5: Optimalisering van ruimte-tijd-steekproeven voor de beschrijving van de freatische grondwaterstand.

Dit deelproject zal in de loop van de voorgaande deelprojecten gedefinieerd worden. Onderzocht zal worden in hoeverre korte tijdreeksen en resultaten van momentopnames kunnen bijdragen aan de schatting van de multivariate kansverdeling $f_h[h(x_1, y_1, t_1), \dots, h(x_n, y_n, t_n)]$.

Globale tijdsplanning

jaar	'94		'95			'96			'97			'98			'99			
kwartaal	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
voorbereiding	X	X																
deelproject																		
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2			X	X	X	X												
3						X	X	X	X									
4									X	X	X	X	X	X				
5													X	X	X	X	X	X

Kennisbelang

- Het project levert methoden op die het mogelijk maken de freatische grondwaterstand in termen van overschrijdingskansen te beschrijven. Met deze methoden is het mogelijk om antwoord te geven op vragen uit o.a. ecologie, milieubescherming en landbouw over het gedrag in ruimte en tijd van de freatische grondwaterstand.
- De ontwikkelde methoden maken deel uit van het pakket methoden, dat in het kader van het onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek" wordt ontwikkeld. De methoden worden onderling zodanig afgestemd, dat met dit pakket in de toekomst flexibel en doelgericht door DLO-Staring Centrum op vragen met betrekking tot de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de freatische grondwaterstand kan worden geantwoord.
- Er zal inzicht worden verkregen in de vereiste meetinspanningen voor de beschrijving van de freatische grondwaterstand op regionale schaal.
- De kennis over de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de grondwaterstand zal toenemen, wat het inzicht in de achterliggende hydrologische processen ten goede kan komen.
- Strategische expertise-ontwikkeling vindt plaats op het gebied van ruimte-tijd-steekproeven en monitoring-onderzoek. Deze expertise is op een breed terrein van het onderzoek naar het landelijke gebied toepasbaar, bijvoorbeeld in milieubescherming, fysisch bodembeheer, (landschaps-)ecologie en regionaal waterbeheer.

LITERATUUR

Bierkens, M.F.P., 1990. *An alternative filter algorithm for fast reacting groundwater systems*. IGG-TNO Report OS 90-07-A.

Bras, R.F. and I. Rodriguez-Iturbe, 1984. *Random Functions and Hydrology*. Addison-Wesley, Reading Massachusetts.

Christakos, G., 1993. *Random field models in earth sciences*. Academic Press, Inc. New York.

Droesen, W.J. en T.N. Olsthoorn, 1990. Incorporating System Knowledge in kriging of piezometric head. *European Conference on Geographical Information Systems*.

Gelhar, L.W., 1993. *Stochastic subsurface hydrology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Riele, W.J.M. te en D.J. Brus, 1991. *Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 209.

Riele, W.J.M. te en D.J. Brus, 1992. *Het gebruik van fysisch-geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterstandskarakteristieken (GHG en GLG)*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 209.

Rouhani, S. en T.J. Hall, 1989. Space-time kriging of groundwater data. *Geostatistics. Proceedings of the Third International Geostatistics Congress, September 5-9, 1988, Avignon, France*. M. Armstrong (Ed.). Kluwer, Dordrecht. p. 639-650.

Switzer, P., 1989. Non-stationary spatial covariances estimated from monitoring data. *Geostatistics. Proceedings of the Third International Geostatistics Congress, September 5-9, 1988, Avignon, France*. M. Armstrong (Ed.). Kluwer, Dordrecht. p. 639-650.

Van der Sluijs P. en J.J. de Gruijter, 1985. Water table classes: a method to describe seasonal fluctuation and duration of water tables on Dutch soil maps. *Agricultural Water Management* 10, p. 109-125.

Van Geer, F.C., 1987. *Applications of Kalman filtering in the analysis and design of groundwater monitoring networks*. DGV-TNO Rapport PN 87-05 (proefschrift)

Van Geer, F.C. and Defize, P.R., 1987. *Detection of natural and artificial causes of groundwater fluctuations*. The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS Publ., 168: 597-606.

Van Geer, F.C., 1988. *Inventarisatie van reeksenmerken*. DGV-TNO Rapport PN 88-01.

Van Geer, F.C. en J.W.M. Lambert, 1990. *Karakterisering van grondwatertijdreeksen*. DGV-TNO Rapport OS 90-08-A.

Werkgroep Gt-onderzoek, 1991. *Huidig & toekomstig onderzoek naar aspecten van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch grondwaterniveau*. Staring Centrum, Interne mededeling nr. 142.

Yevjevich, V., 1991. Tendencies in hydrology research and its applications for 21st century. *Water Resources Management* 5, p.1-23.

Bijlage D: Beschrijving onderzoekslijn "Beschrijving van de variatie van het freatisch vlak met behulp van stochastische partiële differentiaalvergelijkingen" door M.F.P. Bierkens

Beschrijving onderzoekslijn "Beschrijving van de variatie van het freatisch vlak met behulp van stochastische partiële differentiaalvergelijkingen" door M.F.P. Bierkens

1. Achtergrond

In het kader van het onderzoeksthema "herziening Gt-methodiek" zijn een drietal onderzoekslijnen gedefinieerd. Eén van deze lijnen is de beschrijving van de temporele en ruimtelijke variatie van het freatisch vlak met behulp van stochastische partiële differentiaalvergelijkingen (pdv's). Hiervan volgt nu een beschrijving.

2. Motivatie

Het instrumentarium dat bij de afdeling L.I.M. in het kader van het onderzoeksthema "Herziening Gt-methodiek" wordt ontwikkeld ten behoeve van de beschrijving van de temporele en ruimtelijke variatie van het freatisch vlak heeft met nadruk een inventariserend karakter. Vereenvoudigde analytische oplossingen of modellen op grond van stochastische pdv's zijn met name geschikt om in gebieden zonder langjarige grondwaterstandsmetingen een schatting te geven van de overschrijdingskansen van grondwaterstanden. Zij hebben voor op bijvoorbeeld MISO-modellen dat zij beter in staat zijn de effecten van ingrepen mee te nemen (scenario's) en minder afhankelijk zijn van beschikbare grondwaterstandsbuizen. Deze situatie komt veelvuldig voor bij Gt-herzieningen in het kader van landinrichtingsprojecten. Bovendien geven zij, als laterale en regionale stroming wordt meegenomen, een expliciete relatie tussen de variatie van het freatisch vlak en de hydrologische situatie. Deze relatie speelt een belangrijke rol bij ecohydrologisch onderzoek en hydrologische systeemanalyse welke nu nog gebruik maken van de grondwatertrappen. Het voordeel van analytische oplossingen van stochastische pdv's ten opzichte van het toepassen van volledige numerieke modellen (eventueel in combinatie met Monte Carlo simulatie) is dat toepassing ervan veel goedkoper en sneller kan. Zij kunnen dus eenvoudiger voor grotere gebieden worden toegepast, zeker als het doel van de studie een globaal en inventariserend karakter heeft. Verder geven de oplossingen van stochastische pdv's, omdat deze kansverdelingen zijn, ook a priori betrouwbaarheidsmaten (die kunnen dan bijvoorbeeld ook berekend worden voor en na een ingreep). Deze a priori betrouwbaarheidsmaten kunnen, in combinatie met bijvoorbeeld een Kalman filter algoritme, gebruikt worden om uit te zoeken waar men het best zou kunnen meten om achteraf het effect van de ingreep het nauwkeurigst te bepalen. Het combineren van volledige numerieke modellen met een Kalman filter is praktisch niet mogelijk vanwege problemen met de calibratie (uniekheid), rekentijd en computergeheugen.

3. Projectplan

3.1 Probleemstelling

Gebaseerd op de gestelde eisen in de bijbehorende notitie (hoofdstuk 3): In veel gebieden met weinig tot geen informatie over grondwaterstanden is een methode vereist waarmee op een relatief goedkope wijze iets kan worden gezegd over overschrijdingskansen en -duren. Hierbij dient het effect van ingrepen en klimaatvariatie meegenomen te kunnen worden. Het wordt tevens wenselijk geacht dat deze overschrijdings-kansverdelingen geohydrologisch en bodemkundig onderbouwd zijn.

3.2 Doelstelling

Doelstelling van dit onderzoek is:

Een goedkope methode om het ruimtelijk en temporeel gedrag van het freatisch vlak en het effect van ingrepen en klimaatfluctuaties hierop te beschrijven in de vorm van overschrijdingskansen en -duren. De methode dient kansverdelingen van grondwaterstanden te koppelen aan geohydrologische en bodemkundige informatie.

3.3 Resultaat

Het onderzoek resulteert in:

- 1) Een operationele methode om het temporeel en ruimtelijk gedrag van het freatisch vlak in termen van overschrijdingskansen en -duren te beschrijven. De methode heeft de volgende eigenschappen:
 - a) Zij is inventariserend van aard; doet uitspraken in termen van kansverdelingen. De methode moet dit echter wel voor verschillende schaalniveaus kunnen.
 - b) Zij is in de vorm van (quasi-)analytische oplossingen en derhalve snel en goedkoop toe te passen.
 - c) Zij berekend de overschrijdingskansen op grond van fysische relaties met (onzekerheden in) bodemkundige en hydrologische factoren.
 - d) Zij is in staat om de effecten van klimaatfluctuaties en ingrepen mee te nemen.
 - e) Zij geeft a priori betrouwbaarheidsmaten voor de grondwaterstanden op een bepaalde plaats en op een bepaald tijdstip. Deze betrouwbaarheidsmaten kunnen met behulp van Kalman filter-achtige algoritmen gebruikt worden voor meetnetoptimalisatie, bijvoorbeeld met als doel om met een beperkt aantal stijghoogtemetingen zo nauwkeurig mogelijk de effecten van ingrepen te bepalen.
 - f) Naast grondwaterstand levert zij ook beschrijvingen van de ruimtelijke en temporele variatie van afgeleide grootheden zoals nuttige grondweraanvulling en totaal geborgen bodemvocht.
- 2) Strategische expertise: Inzicht in de relatie tussen het ruimtelijk en temporeel gedrag van het freatisch vlak en bodemkundige en hydrologische factoren, de onzekerheden die hierbij een rol spelen en hoe deze doorwerken.

- 3) Rapporten en publikaties in internationale tijdschriften over de verkregen inzichten en de ontwikkelde methoden en hun toepassingen.

3.4 *Afbakening*

Het onderzoek resulteert niet in

- 1) Specifieke grondwatermodellen die voor een lokale situatie de grondwaterstand op een bepaald tijdstip en op een bepaalde plaats berekenen.
- 2) Nieuwe landsdekkende kaarten met grondwatertrappen.

3.5 *Maatschappelijk- en kennisbelang*

De beschrijving van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van het freatisch vlak in het landelijk gebied is een belangrijke taak van het Staring Centrum. Vele landinrichtingsprojecten gaan gepaard met een inventarisatie van de ontwateringstoestand en dus van het gedrag van de grondwaterstand. Verder is een adequate beschrijving van de grondwaterstand (liefst in de vorm van overschrijdingskansen) een belangrijke factor bij het onderzoek naar uitspoeling van meststoffen, bij ecohydrologisch onderzoek en bij agronomische studies.

4. **Globaal activiteitenplan**

Het onderzoek naar een stochastisch-hydrologische onderbouwing van de variatie van grondwaterstanden zal een looptijd van enige jaren hebben en is onderverdeeld in een aantal stappen. Elke stap vormt op zichzelf een beoogd project waarvoor een eigen projectvoorstel zal worden geschreven en waarvan in de vorm van externe SC-rapporten, publikaties en congressen verslag zal worden gedaan.

4.1 *Stap 1: Gevoeligheidsanalyse (i.s.m. M. Knotters)*

Deze stap heeft tot voornaamste doel om meer inzicht te verkrijgen in de complexe niet lineaire processen die de interactie tussen bodem en grondwater bepalen. Met behulp van SWACROP of een verwant model wordt gekeken hoe de verschillende parameters en randvoorwaarden invloed uitoefenen op de grondwaterstand. Hierbij worden de volgende fasen onderscheiden:

- 1) Selectie van een homogeen bodemprofiel (liefst een zavel met een niet te diepe grondwaterstand) naast een stambuis. Bepaal alle bodemfysische parameters of uit het veld of uit de Staringreeks. Bepaal zoveel mogelijk van de overige parameters en randvoorwaarden. Calibreer SWACROP voor dit bodemprofiel.
- 2) Bepaal reeksstatistieken uit gesimuleerde langjarige reeksen voor o.m.:
 - a) autocorrelatie grondwaterstanden,
 - b) crosscorrelatie grondwaterstanden en neerslagoverschot,
 - c) impulsrespons grondwaterstanden en neerslagoverschot,
 - d) cross-spectrum grondwaterstanden en neerslagoverschot.

Vergelijk deze statistieken met die geschat uit de gemeten reeksen en met die geschat uit transfermodellen.

- 3) Bepaal de pulsresponsie van grondwaterstand t.g.v. een puls neerslag (met en zonder evapotranspiratie). Doe dit bij verschillende initiële grondwaterstanden (hydrostatisch evenwichtsprofiel aangenomen). Bekijk de reactietijden voor $h(t)$ en $q_v(t)$ en de tijd totdat het evenwichtsprofiel zich weer heeft ingesteld ($q_v(t) = 0$) en de grondwaterstand weer op zijn oude niveau is $h(t) = h(t_0)$. Kijk of de pulsresponsie uit de impulsresponsie kan worden berekend. Dit duidt op lineariteit van het systeem en rechtvaardigt het gebruik van transfermodellen.
- 4) Doe een langjarige simulatie (neerslag overschot met tijdreeksmodellen of puntprocesmodellen). Bekijk het verloop van: $h(t)$ en $q_v(t)$, maar ook van het vochtprofiel $\Theta(z,t)$ en de totale berging in de bodem $S(t) = \int \Theta(z,t) dz$. Bepaal hieruit de vorm van de functies ($P_e(t)$ = neerslagoverschot, $\langle \rangle$ = tijd- of ruimtegemiddelde).

$$\langle \Theta(z,t) \rangle = \int_{t_1}^{t_2} \Theta(z,t') dt'$$

$$S(t) = f(h(t), P_e(t))$$

$$q_v(t) = g(P_e(t), S'(t))$$

Deze functies zijn van belang voor de volgende stap: "bepaal een vereenvoudigd analytisch model".

- 5) Herhaal 3) en 4) onder verandering van de volgende parameters:
- hysterese pf-curve
 - pf en $k(\psi)$ relaties (andere texturen) (ψ is de matrixpotentiaal).
 - drainage weerstand
 - veranderende slootpeilen
 - vrije drainage (droogvallende sloten en greppels)
 - diepere kwel/infiltratieflux
 - verdamping (leaf area index).

De effecten en interacties worden geanalyseerd met regressie-analyses of Monte Carlo technieken.

- 6) Herhaal 3) en 4) voor een groot aantal bodemtypen/stambuizen en probeer op grond van de resultaten functionele hydrologische bodemtypen te onderscheiden (zie Finke et al., 1994). Deze stap hangt sterk samen met het beoogde onderzoek van Knotters (bijlage C).

4.2 Stap 2: Definitie van een vereenvoudigd analytisch model.

Uitgaande van de resultaten van stap 1 wordt een vereenvoudigd analytisch model van de bodem en het ondiepe grondwaterstand gedefinieerd. Uitgangspunt is een oplossing van de Boussinesq vergelijking in de vorm als bijvoorbeeld gegeven door Su (1994), waarbij de bodem wordt gemodelleerd door uit te gaan van een bepaald evenwichtsprofiel behorende bij een bepaalde gemiddelde flux, dit om het oplossen van Richard's vergelijking van onverzadigde stroming te omzeilen. De eerste pogingen hiertoe zijn reeds gedaan i.s.m. C.P. Kim van de Vakgroep Waterhuishouding te Wageningen (Kim en Bierkens, 1995). Het analytisch model moet de

belangrijkste hoofdeffecten en interacties zoals berekend met SWACROP kunnen nabootsen. Voor dit doel wordt met het analytisch model de gevoeligheidsanalyse van stap 1 herhaald.

N.B.: Het analytisch model is gedefinieerd voor 2D in de doorsnede en levert grondwaterstanden langs een lijn maar dient uiteindelijk te gaan werken voor het horizontale vlak (door lokaal evenwijdige drainage patronen aan te nemen (evenwijdig aan sloten of drains). Mocht dit niet mogelijk zijn dan moet de oplossing van de Boussinesq vergelijking worden veralgemeniseerd voor twee dimensies.

4.3 *Stap 3: Onzekerheidsbepalingen*

Uit veldgegevens en inverse technieken worden voor alle parameters en randvoorwaarden van het analytisch model de onzekerheden bepaald. Deze onzekerheden worden bepaald in de vorm van simultane-multivariate kansverdelingen. Sommige parameters, zoals doorlatendheden en bodemeigenschappen zullen als stochastische velden worden beschreven.

4.4 *Stap 4: Oplossing stochastische differentiaalvergelijking*

Getracht wordt de differentiaalvergelijking die ten grondslag ligt aan het vereenvoudigde analytische model op te lossen en de a priori simultaan-multivariate kansverdelingen van $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ en $S(x,y,t)$ te berekenen. De kansverdeling van $S(x,y,t)$ kan berekend worden uit die van $h(x,y,t)$.

4.5 *Stap 5: Validaties*

Aan de hand van een aantal case studies zullen de resultaten van stappen 2 t/m 4 worden gevalideerd.

4.6 *Stap 6: Conditionering*

Stap 4 levert de a priori simultaan-multivariate kansverdelingen van $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ en $S(x,y,t)$. Deze a priori verdelingen kunnen gebruikt worden in gebieden waar de grondwaterstand nog niet is bemeaten. Als vervolgens metingen beschikbaar komen door het plaatsen van extra buizen dan kunnen de a priori kansverdelingen worden geconditioneerd om de onzekerheden in $h(x,y,t)$ en $q_v(x,y,t)$ en $S(x,y,t)$ te verminderen. Als a priori verwachtingswaarden en (cross)covarianties bekend zijn kan dit bijvoorbeeld met behulp van een Kalman-filter (Graham en McLaughlin, 1989). Op deze wijze kan ook aan meetnetoptimalisatie worden gedaan, waarbij, hydrologisch onderbouwd, de onzekerheden in geschatte grondwaterstanden of afgeleide grootheden kunnen worden geëvalueerd voor een bepaald meetnetontwerp.

4.7 *Stap 7: Operationalisering en nazorg*

Deze stap zal bestaan uit een samenvattend rapport van alle bovenstaande projecten waarin het uiteindelijk produkt (een operationele methode of set van methoden) wordt beschreven, de prestatie(s) van de methode(n) en de totale ontwikkelingskosten. Eventueel bijbehorende software zal worden gedocumenteerd.

5. Beheersing

5.1 *Capaciteit en tijd*

Het valt te verwachten dat de uitvoering van de projecten die vallen onder de bovenbeschreven onderzoekslijn gedurende de komende 5 jaren Bierkens ca. 60% van zijn capaciteit zullen vergen. Capaciteit van Knotters en te Riele zal incidenteel zijn vereist.

5.2 *Financiering*

Een groot gedeelte van het onderzoek dat onder de vlag van deze onderzoekslijn valt zal betaald moeten worden uit de programmafinanciering (DWK programma 127). Echter, waar mogelijk, zal gekeken worden of externe financiering mogelijk is, bijvoorbeeld door gedeelten van het onderzoek (bijv. case studies) uit te voeren in het kader van betaalde opdrachten.

5.3 *Kwaliteitsbewaking*

Voor de kwaliteitsbewaking zijn verantwoordelijk: M.F.P. Bierkens en J.J. de Gruijter (afdeling L.I.M.). Verder zal hiervoor regelmatig overleg plaatsvinden met medewerkers van L.I.M., de hoofdafdeling Waterbeheer en andere instituten (bijv. GG-TNO).

5.4 *Informatie*

Om andere Staring medewerkers, eventuele opdrachtgevers en extern geïnteresseerden te informeren zal elk project worden afgesloten met een SC-rapport en eventueel met wetenschappelijke publikaties in Nederlandse of internationale tijdschriften.

5.5 *Organisatie*

Hoofdafdelingshoofd (capaciteitsmanager; benodigd: ca 3 mensjaren): B. v/d Pouw (SC-DLO).

Programmaleider (DWK programma 127): J.J. de Gruijter (SC-DLO).

Projectleider: M.F.P. Bierkens (SC-DLO).

Eventuele medewerkers: M. Knotters (SC-DLO) W.J.M. te Riele (SC-DLO), WIO (SC-DLO; redactie).

Opdrachtgevers: DWK-programma 127; nog onbekende externe financiers.

Belangengroepen: Landinrichtingsdienst, waterleidingmaatschappijen, provincies, natuurbeschermingsorganisaties, waterschappen, grondeigenaren/-gebruikers.

6. Literatuur

- FINKE, P.A., J.H.M. WÖSTEN en J.G. KROES, 1994. *Comparison of two approaches to characterize soil mapping unit behavior in solute transport studies*. Submitted to Soil Science Society of America Journal.
- GRAHAM, W. en D. MCLAUGHLIN, 1989. *Stochastic analysis of non-stationary subsurface transport; 2. Conditional moments*. Water Resources Research 25(11): 2331-3355.
- KIM, C.P. en M.F.P. BIERKENS, 1995. *Short Communication: comment on "A formula for computation of time varying recharge of groundwater" by N. SU*. Journal of Hydrology (in press).
- SU, N., 1994. *A formula for computation of time-varying recharge of groundwater*. Journal of Hydrology 160:123, 135.