

Geostatistische interpolatie van de gemiddeld laagste grondwaterstand met behulp van hoogtepunten in een deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg



---

Bodem en water, milieu en natuur, landschap en ruimte:

DLO-Staring Centrum heeft een geïntegreerde kijk op de toekomst van het  
landelijk gebied

---

32/406/1994

BIBLIOTHEEK  
STARINGGEBOUW

**Geostatistische interpolatie van de gemiddeld laagste  
grondwaterstand met behulp van hoogtepunten in een deel  
van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg**

**J. Stolp  
M. Knotters  
G. Pleijter**

**Rapport 344**



0000 0635 4761

**DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1994**

**0 3 NOV. 1994**

1511 596732 \*

## REFERAAT

J. Stolp, M. Knotters en G. Pleijter, 1994. *Geostatistische interpolatie van de gemiddeld laagste grondwaterstand met behulp van hoogtepunten in een deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 344: 36 blz.; 3 fig.; 4 tab; 2 kaarten.

Voor een deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg is de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) gekarteerd door geostatistische interpolatie van gemeten grondwaterstanden, met de hoogtecijferkaart als hulpinformatie. Het onderzoek is uitgevoerd met een gering aantal gemeten en een groot aantal 'onzekere' grondwaterstanden, die met een regressiemodel uit hoogtecijfers en relatieve maaiveldhoogten zijn voorspeld. Door kriging gecombineerd met regressie is een kaart gemaakt van de grondwaterstand op 17 juli 1993. De GLG's die voor vier stambuizen zijn berekend, stemden overeen met de grondwaterstanden op 17 juli. Daarom is de grondwaterstandkaart te zien als een GLG-kaart. Bij 70% van de punten was de interpolatiefout kleiner dan 15 cm.

Trefwoorden: grondwaterstand, hoogtecijfer, kriging, maaiveldhoogte, regressie

ISSN 0927-4499

©1994 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)  
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.  
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812.

DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw 'De Dorschkamp' (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van DLO-Staring Centrum.

# Inhoud

	blz.
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Voorbereiding en veldwerkzaamheden	13
2.1 Verzamelen van gebiedsinformatie	13
2.2 Toedeling en loting van punten voor de opname van hoogte en grondwaterstand	14
2.2.1 Gridpunten	14
2.2.2 Variogrampunten	15
2.2.3 Testpunten	15
2.2.4 Registratie op veldkaarten	15
2.3 Veldwerkzaamheden	15
3 Uitwerking van gegevens	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Relatieve hoogteligging	17
3.3 Het verband tussen de grondwaterstand en twee aspecten van de hoogteligging via regressie	17
3.4 Berekening van de grondwaterstanden op de 'hulp'-hoogtepnten	18
3.5 Vaststellen van de ruimtelijke afhankelijkheid van grondwaterstanden	18
3.6 Interpolatie van grondwaterstanden naar een raster van 25 bij 25 meter	19
3.7 Evaluatie van de interpolatie op testpunten	21
3.8 Standaardafwijking van de voorspelfout	21
4 Resultaten	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Kaart met grondwaterstanden op het meettijdstip 17 juli 1993	23
4.3 Evaluatie van de interpolatie	23
5 Bepaling van de gemiddeld laagste grondwaterstand	25
5.1 Inleiding	25
5.2 Materialen	25
5.2.1 Grondwaterstanden	25
5.2.2 Neerslag- en verdampingsgegevens	25
5.3 Methode	26
5.3.1 Modellerings van tijdreeksen van de grondwaterstand met <i>transfer-     noise</i> -modellen	26
5.3.2 Berekening van de GLG	28

5.3.3 Verificatie	28
5.4 Resultaten	29
5.4.1 <i>Transfer-noise</i> -modellen	29
5.4.2 GLG	29
5.5 Conclusie	29
6 Conclusies en aanbevelingen	33
Literatuur	35
<b>Tabellen</b>	
1 Verdeling van de gridpunten over de landschappelijke eenheden	15
2 <i>Transfer-noise</i> -modellen	31
3 Berekening van GLG uit een grondwaterstandsverloop van 30 jaar, gesimuleerd met tijdreeksmodellen	32
4 Verificatie van GLG's, berekend uit grondwaterstandsverlopen die gesimuleerd zijn met behulp van <i>transfer-noise</i> -modellen	32
<b>Figuren</b>	
1 Ligging van het onderzoeksgebied	13
2 Ruimtelijke afhankelijkheid van de grondwaterstand in de vorm van een semivariogram	20
3 Het verloop van gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden in stambuis 54AL0025 in de periode 1990-1993	30
<b>Kaarten</b>	
1 Grondwaterstandskaat, schaal 1 : 10 000	
2 Standaardafwijking van de voorspelfout van de grondwaterstand, schaal 1 : 10 000	

## Woord vooraf

In opdracht van de Landinrichtingsdienst te Utrecht heeft DLO-Staring Centrum een geostatistisch onderzoek uitgevoerd met gemeten en voorspelde grondwaterstanden op hoogtepunten in een deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg. Het doel van het onderzoek was om gebiedsdekkende informatie te verkrijgen over de GLG alsmede een indicatie over de kwaliteit van de verkregen gegevens.

Aan het project hebben meegewerkt:

- geostatistische opzet voor de veldopname, verwerking van de gegevens en rapportage: ir. J. Stolp en ing. M. Knotters;
- voorbereiding en organisatie van de veldopname: G. Pleijter.
- medewerking aan de veldopname: J.M.J. Dekkers, J.R. Mulder, T.C. van Steenbergen en M.M. v.d. Werff.

De organisatorische leiding van het project had het hoofd van de afd. Veldbodemkunde, drs. J.A.M. ten Cate.

DLO-Staring Centrum is dank verschuldigd aan de grondeigenaren en -gebruikers die onze medewerkers toestemming hebben verleend om hun grond te betreden en er onderzoek te verrichten.

## Samenvatting

In opdracht van de Landinrichtingsdienst in Utrecht is een geostatistisch onderzoek uitgevoerd naar de grondwaterstand in het gebied ten zuiden van de lijn Aardenburg-Sint Kruis in het ruilverkavelingsgebied Aardenburg. Het doel van het onderzoek was om een GLG-kaart, schaal 1 : 10 000, te verkrijgen. In tegenstelling tot de conventionele methode van GLG-kartering kan bij een geostatistische benadering een indicatie van de nauwkeurigheid worden gegeven. De toegepaste interpolatiemethode is kriging gecombineerd met regressie, met de grondwaterstand op 17 juli 1993 als doelvariabele en de maaiveldshoogte t.o.v. NAP en de relatieve maaiveldshoogte als hulpvariabelen. Ook uit eerder uitgevoerd onderzoek bleken dit belangrijke hulpvariabelen te zijn bij de voorspelling van grondwaterstanden.

Het studiegebied bleef beperkt tot land; niet-land zoals open water en verharde oppervlakten werden buiten beschouwing gelaten. Ook de smalle kreek en geulen werden vanwege hun afwijkende grondwaterstanden niet tot het studiegebied gerekend. Van het gebied bestaat een kaart met globale landschappelijke eenheden, die zijn afgeleid van de bodemkaart.

De grondwaterstand werd op 17 juli 1993 gemeten op de volgende punten:

- 110 gridpunten in een min of meer vierkant grid van ca. 500 bij 500 m;
- 30 'variogram-'punten, die te zamen met de gridpunten dienen voor de schatting van het model van de ruimtelijke structuur (semivariogram): 15 punten op 50 meter afstand van 15 gelote gridpunten en 15 punten op 200 meter afstand van 15 gelote gridpunten;
- 58 testpunten, door middel van een gestratificeerde aselechte steekproef gekozen. Stratificatie geschiedde op basis van globale landschappelijke eenheden. De testpunten dienden voor de evaluatie van de nauwkeurigheid van de interpolatie.

De hoogtecijferkaart, schaal 1 : 10 000, omvat 7273 punten met een dichtheid van ca. 3 à 4 punten per ha. De hoogte van de 110 gridpunten en de 30 variogrampunten werd door middel van waterpassing ingemeten.

Op de gridpunten en de variogrampunten werd regressie-analyse uitgevoerd om het verband tussen grondwaterstand en maaiveldshoogte te beschrijven. De analyse leverde het volgende model op:

$$h_g = 106,4 + 0,409 \cdot h_m + 0,363 \cdot h_r + \varepsilon$$

waarin  $h_g$  de grondwaterstand op 17 juli 1993 is in cm - mv.,  $h_m$  de maaiveldshoogte in cm t.o.v. NAP is,  $h_r$  de relatieve maaiveldshoogte in cm is voor een omgeving met een straal van 300 m en  $\varepsilon$  de residuele fout is. Het percentage verklaarde variantie is 67%. Met dit model zijn uit hoogtecijfers grondwaterstanden voorspeld.

De ruimtelijke structuur van de grondwaterstand op 17 juli 1993 is geanalyseerd op



basis van de grid- en variogrampunten. Er bleek isotropie te kunnen worden verondersteld. De ruimtelijke structuur bleek te kunnen worden beschreven met een sferisch semivariogram door de oorsprong (dus geen *nugget-term*), een *range* van 239 m en een *sill* van 282 cm<sup>2</sup>.

De gemeten grondwaterstanden op de 140 grid- en variogrampunten en de voorspelde grondwaterstanden op de 7273 hoogtepunten werden geïnterpoleerd naar 46 000 punten in een vierkant raster van 25 bij 25 m en naar de 58 testpunten. De interpolatiemethode is kriging gecombineerd met regressie, ook bekend als '*kriging with uncertain data*': hierbij wordt rekening gehouden met de onzekerheid van de voorspelde grondwaterstanden op de hoogtepunten. De onzekerheid wordt gegeven door de variantie van de voorspelfout. Er werd geïnterpoleerd vanuit de twintig dichtsbijzijnde punten. Om de interpolatie automatisch uit te kunnen voeren is het gebied verdeeld in segmenten van 1000 m breed.

De grondwaterstandskaat bleek duidelijke landschappelijke patronen te bevatten, zoals kreekruigen, geulen en de hoge rug van Aardenburg. Naast een kaart met geïnterpoleerde grondwaterstanden (kaart 1) is een kaart gemaakt van de spreiding van de voorspelfout, afgeleid van de zogenaamde krigingvariantie (kaart 2). Deze kaart geeft een indicatie van de nauwkeurigheid van de voorspellingen. Uit analyse van de interpolatiefouten op de 58 testpunten bleek dat er geen systematische fout is opgetreden (geen *bias*). De *Root Mean Squared Error* is 18 cm en wordt beïnvloed door enkele uitschieters; de mediaan van de absolute fout, die niet gevoelig is voor uitschieters, is 9 cm. Voor 70% van de punten is de interpolatiefout kleiner dan 15 cm.

Om de grondwaterstandskaat om te zetten in een GLG-kaart moest het verschil worden bepaald tussen de grondwaterstand op 17 juli 1993 en de GLG. Dit verschil werd berekend voor vier stambuizen in de omgeving van het studiegebied. Bij de berekening van de GLG werden weersinvloeden uitgeschakeld middels een methode die recent is ontwikkeld door SC-DLO. Bij deze methode wordt naast grondwaterstandsreeksen gebruikt gemaakt van reeksen van het potentiële neerslagoverschot. De samenhang tussen grondwaterstand en potentieel neerslagoverschot werd beschreven met een *transfer-noise*-model. Met dit model werd een reeks van 30 jaar potentieel neerslagoverschot getransformeerd in een reeks van van 30 jaar grondwaterstand. Bij deze reeks werden 100 realisaties van het ruisproces (*noise*) opgeteld. Uit de 100 reeksen werden 100 GLG's berekend, die vervolgens tot een schatting van de model-gemiddelde GLG werden gemiddeld. De berekende GLG's bleken niet veel te verschillen van de grondwaterstand op 17 juli 1993, waardoor de grondwaterstandskaat zonder verdere aanpassing kan worden beschouwd als een GLG-kaart.

Uit het onderzoek kan worden geconcludeerd dat met behulp van veel hoogtecijfers en relatief weinig grondwaterstandsmetingen de grondwaterstand redelijk nauwkeurig in kaart kan worden gebracht. Voor de operationaliteit van de toegepaste methode verdienen de kosten die gemoeid zijn met hoogtemetingen en de toepasbaarheid van de *software* op grote databestanden de aandacht.

## 1 Inleiding

Doel van dit onderzoek is de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) van een deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg in kaart te brengen, schaal 1 : 10 000, met behulp van een geostatistische interpolatiemethode.

Voor de planvorming tijdens de voorbereidingsfase en voor de waardebepaling van de gronden tijdens de uitvoeringsfase van een landinrichtingsgebied heeft de Landinrichtingsdienst te Utrecht o.a. behoefte aan gegevens over de GLG en de fluctuatie van het grondwater. In opdracht van de Landinrichtingsdienst heeft DLO-Staring Centrum een nieuwe methode in praktijk gebracht voor het vaststellen van de GLG in een deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg. In overleg met de Landinrichtingsdienst is dit gebied uitgekozen voor het onderzoek om de gemiddeld laagste grondwaterstand in beeld te brengen met deze methode voor kwantitatieve informatie. Nauwkeurigheid en operationele aspecten komen daarbij aan de orde.

Met de conventionele methode wordt de GLG tijdens de veldopname geschat aan de hand van hydromorfe verschijnselen in de grond in samenhang met omgevingskenmerken. De nauwkeurigheid van de voorspelling is gekoppeld aan de deskundigheid/ervaring van de opnemer en de betrouwbaarheid kan niet worden aangegeven.

Onderzoek naar meer kwantitatieve informatie over het grondwaterstandsverloop in ruimte en tijd (Te Riele en Brus, 1991; Te Riele en Brus, 1992) geeft aan dat met geostatistiek en gebruik van (digitale) gebiedsinformatie de GHG en GLG redelijk nauwkeurig voorspeld kunnen worden met een aanzienlijke reductie van de tijd voor veldopname. Met de voorspelling van de GHG en GLG wordt daarbij de spreiding van de voorspelfout vermeld, m.a.w. een maat voor de nauwkeurigheid opgegeven.

Een belangrijke bron van gebiedsinformatie is hierbij de hoogtecijferkaart. Indien in een gebied de relatie tussen maaiveldshoogte en grondwaterstand is beschreven met een regressiemodel, kan vervolgens een bestand van hoogtepunten worden omgezet in een bestand van voorspelde grondwaterstanden. Omdat voor de meeste landinrichtingsgebieden een hoogtecijferkaart wordt vervaardigd, die in digitale vorm beschikbaar is, leent deze procedure zich voor deze gebieden.

Te Riele en Brus (1992) beschrijven hoe grondwaterstanden uit hoogtecijfers kunnen worden voorspeld. De grondwaterstanden, gemeten of voorspeld, kunnen vervolgens worden geïnterpoleerd naar niet-bezochte locaties door middel van kriging gecombineerd met regressie, een geostatistische interpolatiemethode waarbij rekening wordt gehouden met de onzekerheid van de voorspelde grondwaterstanden (Delhomme, 1978; Ahmed en De Maisily, 1987). Bij de interpolatie wordt gebruik gemaakt van een model van de ruimtelijke structuur (semi-variogram) dat geschat is op basis van de gemeten grondwaterstanden. Vervolgens moeten de geïnterpoleerde grondwaterstanden worden omgezet in GLG's. Dit gebeurt door voor een aantal stambuizen de GLG te berekenen en te vergelijken met de grondwaterstand tijdens een momentopname. Hieruit volgt een verschuiving om de grondwaterstandskaart om te zetten in een GLG-kaart, onder de veronderstelling dat het gebied hydrologisch homogeen

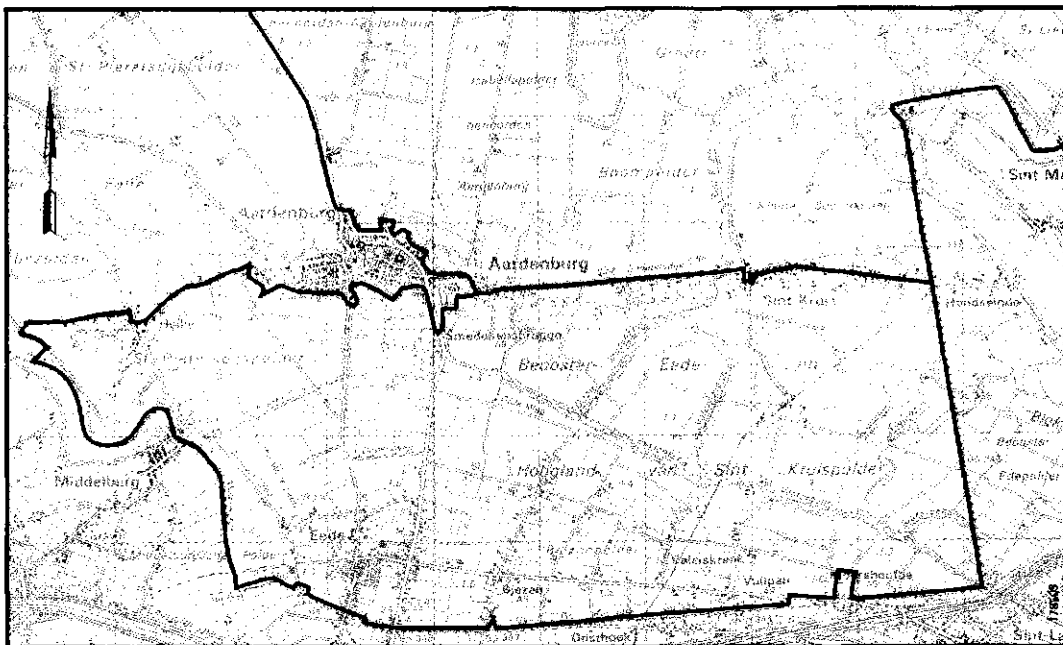
is. In dit onderzoek is de GLG berekend volgens een recent ontwikkelde methode waarbij de invloed van het weer tijdens de periode waarin de grondwaterstand is waargenomen, is geëlimineerd (Knotters en Van Walsum, 1994).

Materialen, methode, resultaten en conclusies van ons onderzoek zijn beschreven of weergegeven in het rapport en twee kaarten. Het rapport heeft de volgende opzet. Hoofdstuk 2 beschrijft de voorbereidende werkzaamheden als inventarisatie van gebiedsinformatie, steekproefopzet en veldwerkzaamheden. Hoofdstuk 3 behandelt de bewerking van de gegevens, de regressieanalyse en de analyse van de ruimtelijke structuur. Hoofdstuk 4 en de 2 kaarten geven de resultaten van het onderzoek. Hoofdstuk 5 beschrijft de toepassing van een nieuwe methode om de GLG van een stambuis te berekenen op basis van gesimuleerde tijdreeksen over een periode van 30 jaar: de GLG conditioneel op een gegeven klimaat, onafhankelijk van het weer in de periode waarin de grondwaterstand is waargenomen.

## 2 Voorbereiding en veldwerkzaamheden

### 2.1 Verzamelen van gebiedsinformatie

Het onderzochte deel van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg wordt in het zuiden begrensd door de grens met België, globaal de lijn Eede, Biezen, Vuilpan en Moershoofde, en strekt zich in noordelijke richting uit tot de Sint Pietersdijk en het verlengde daarvan via Aardenburg richting Heille (fig. 1). Dit gebied is ca. 2100 ha groot.



*Fig. 1 Ligging van het onderzoeksgebied*

Van westelijk Zeeuws-Vlaanderen waarin het ruilverkavelingsgebied Aardenburg ligt, is een bodemkaart, schaal 1 : 10 000, aanwezig (Pleijter, 1989). Deze kaart is een bewerking van de ca. 30 jaar oude bodemkaart, schaal 1 : 16 667, van Ovaal (1957). De gegevens van de bodemkaart, schaal 1 : 10 000, zijn niet digitaal opgeslagen.

Uit de bodemkaart, schaal 1 : 10 000, hebben wij een kaart afgeleid met de volgende globale landschappelijke eenheden:

- dekzandgebied;
- dekzandgebied bedekt met zeeklei;
- zeekleigebied;
- krekken en geulen.

Van deze laatste eenheid, kreken en geulen, zijn de kreekbeddingen vanwege de geringe oppervlakte niet in de bewerking betrokken. Ook deze kaart is niet digitaal opgeslagen.

Een digitaal bestand van hoogtecijfers van dit gebied is beschikbaar (Archief Landinrichtingsdienst, Westraven, Utrecht). De dichtheid van het hoogtepuntennet is 3 à 4 punten per ha. De verdeling van de hoogtepunten over het gebied is niet homogeen; naast gebieden met een dichtheid van 2 punten per ha zijn er ook gebieden met 5 punten per ha. De onderlinge afstanden tussen de hoogtepunten bedraagt 40-100 meter. Het aantal hoogtecijfers is 7273.

Een lijst van grondgebruikers is beschikbaar via de Cultuurtechnische Inventarisatie van het ruilverkavelingsgebied Aardenburg (Schmitz, 1992). De grondgebruikerskaart vormde een hulpmiddel bij het veldwerk.

Verharde oppervlakten zoals wegen en bebouwing, en open water zijn beschouwd als niet-land. De gegevens die in dit onderzoek zijn verzameld en de GLG die uiteindelijk op de kaart is weergegeven, hebben betrekking op het deel van het studiegebied dat voldoet aan de definitie van 'land'.

## **2.2 Toedeling en loting van punten voor de opname van hoogte en grondwaterstand**

We hebben drie categorieën punten onderscheiden:

- gridpunten;
- variogrampunten;
- testpunten.

De eerste twee worden te zamen aangeduid als 'meetpunten'.

### **2.2.1 Gridpunten**

Gridpunten zijn neergelegd in een vierkant raster van 500 bij 500 meter over het gebied. Kleine aanpassingen aan de ligging van de rasterpunten zijn uitgevoerd als gridpunten vielen op verharde oppervlakten zoals wegen en bebouwing, of open water, om alleen meetbare situaties over te houden. Het totale aantal gridpunten bedraagt 110. De verdeling van deze punten over de landschappelijke eenheden staat aangegeven in tabel 1.

Drie punten in de landschappelijke eenheid 'kreken en geulen' zijn verschoven naar de landschappelijke eenheid 'zeekleigebied'.

**Tabel 1** Verdeling van de gridpunten over de landschappelijke eenheden

Eenheid	Code	Aantal	Verhouding*
- dekzandgebied	DR	60	8
- dekzandgebied bedekt met zeeklei	DV	32	4
- zeekleigebied	MD	18	3
- krekken en geulen	KR	0	

\* Verhouding voor de toedeling van variogrampunten en van testpunten (par. 2.2.2 en 2.2.3)

### 2.2.2 Variogrampunten

Als aanvulling op de 110 gridpunten zijn 30 zgn. 'variogrampunten' geloot. Variogrampunten en gridpunten werden te zamen gebruikt voor de analyse van de ruimtelijke variatie. Van de 30 variogrampunten liggen 15 punten op een afstand van 50 meter en 15 punten op een afstand van 200 meter van een gridpunt. Een variogrampunt is door loting aan een gridpunt toegewezen, waarbij rekening is gehouden met de verdeling over de landschappelijke eenheden (tabel 1). De locatie van het variogrampunt ten opzichte van het gridpunt is eveneens door loting van een richting vastgesteld.

### 2.2.3 Testpunten

De ligging van de testpunten (60 stuks) is door een aselechte, gestratificeerde steekproef vastgesteld. Bij een loting op een niet-land locatie is opnieuw geloot. De testpunten zijn in de verhouding van 8 : 4 : 3 over de drie landschappelijke eenheden verdeeld (tabel 1). Bij de verdere uitwerking zijn 2 testpunten vervallen.

### 2.2.4 Registratie op veldkaarten

Voor de beschrijving van de bodemgesteldheid, de metingen van grondwaterstand en hoogte t.o.v. NAP zijn veldkaarten op schaal 1 : 5000 voorbereid, met daarop de positie van de meet- en testpunten, en een afdruk van de hoogtepuntenkaart.

## 2.3 Veldwerkzaamheden

Op ieder meet- en testpunt zijn met een grondboor monsters over het gehele bodemprofiel genomen tot tenminste de gereduceerde zone. Van elk bodemprofielmonster zijn tijdens het veldbodemkundig onderzoek de volgende variabelen geschat of gemeten:

- profielopbouw (met als resultaat van geogenese en pedogenese een indeling in

horizonten):

- dikte van de horizonten;
- textuur van de horizonten;
- organische-stofgehalte van de horizonten;
- kalkrijkdom van de horizonten;
- bewortelbare diepte;
- grondwaterstandsverloop (GLG, GHG en Gt).

De resultaten van het veldonderzoek aan de bodemprofielmonsters zijn in een digitaal bestand vastgelegd.

De hoogte van ieder meet- en testpunt is geschat met behulp van de omliggende hoogtepunten. Nadien is in een volgende veldronde de hoogte van elk punt door waterpassing gemeten. Deze meetactiviteit heeft veel tijd in beslag genomen.

De grondwaterstand in het boorgat is 1 tot 2 dagen na de boring gemeten, op 17 juli, 1993. De indruk op basis van veldervaring was dat de grondwaterstand na de langdurig droge periode op ongeveer het niveau van de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) lag of iets daarboven. Op de dag van de meting sloeg het weertype van langdurig droog om naar langdurig wisselvallig met tamelijk veel neerslag.

## **3 Uitwerking van gegevens**

### **3.1 Inleiding**

De grondwaterstand op een punt hangt samen met twee aspecten van de maaiveldshoogte van dat punt, nl. de hoogte ten opzichte van NAP en de hoogte van het punt ten opzichte van zijn omgeving (de relatieve maaiveldshoogte), zoals is gebleken uit een onderzoek over het gebruik van fysisch-geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en de grondwaterstands-karakteristieken GHG en GLG (Te Riele en Brus, 1992). Hun werkwijze is gevolgd bij dit onderzoek.

### **3.2 Relatieve hoogteligging**

Met relatieve maaiveldshoogte wordt bedoeld het verschil tussen de hoogte op het punt en het gemiddelde van de hoogtes van alle punten binnen een zekere afstand; een positieve waarde voor een hogere ligging, een negatieve waarde voor een lagere ligging ten opzichte van de omgevingspunten. De relatie tussen grondwaterstand en hoogteligging is onderzocht op de grid- en variogrampunten (de meetpunten). Van elk meetpunt is naast de grondwaterstand op 17 juli 1993, ook de hoogte t.o.v. NAP waargenomen, zowel door schatting als door waterpassing. De relatieve hoogte van het punt is berekend met behulp van de hoogtepuntenkaart.

De relatieve hoogte van een punt wordt berekend door het punt in het centrum van een cirkelvormig gebied te plaatsen. Van alle overige punten binnen deze cirkel wordt de gemiddelde hoogte ten opzichte van NAP berekend. Het verschil tussen de hoogte van het punt en dit gemiddelde is de relatieve hoogte. Door een reeks van stralen te nemen, wordt een reeks van relatieve hoogtes berekend. Voor dit gebied is voor een startwaarde van 75 meter gekozen die vervolgens zes keer met 75 meter werd vergroot, tot uiteindelijk een straal van 450 meter. Voor dit gebied blijkt dat de relatieve hoogte weinig meer verandert bij een afstand van gemiddeld 300 meter.

### **3.3 Het verband tussen de grondwaterstand en twee aspecten van de hoogteligging via regressie**

Met de procedure SELECT van het statistische programmapakket Genstat (Genstat 5 Committee, 1987) selecteerden we een regressiemodel. Het geselecteerde model heeft de volgende verklarende variabelen: maaiveldshoogte t.o.v. NAP en relatieve maaiveldshoogte. Stratificatie naar landschappelijke eenheid bleek niet tot een beter regressiemodel te leiden. Bij de selectie droeg de relatieve maaiveldshoogte bij een omgevingsstraal van 300 m het meest aan het model bij. Een straal van 300 meter werd daarom gebruikt in de regressie-analyse.



Na verwijdering van twee punten in grenssituaties is met de overblijvende set van 138 meetpunten een regressie-analyse uitgevoerd. De regressie op basis van punten met gemeten hoogtes gaf het volgende model:

$$h_g = 106,4 + 0,409 \cdot h_m + 0,363 \cdot h_r + \varepsilon \text{ (verklaarde variantie 67\%)}$$

met een spreiding van respectievelijk 5,8 (cm), 0,046 (-) en 0,057 (-) voor de hierboven genoemde variabelen. De restvariantie van het model is 118 cm<sup>2</sup> (restspreiding 11 cm).

De verklaring voor de gebruikte afkortingen is:

$h_g$  = grondwaterstand t.o.v. maaiveld (cm);

$h_m$  = gemeten maaiveldshoogte t.o.v. NAP (cm);

$h_r$  = relatieve maaiveldshoogte (cm) bij een omgevingsstraal van 300 m.

### **3.4 Berekening van de grondwaterstanden op de ‘hulp’-hoogtepunten**

Voor elk van de 7273 hoogtepunten is de relatieve maaiveldshoogte berekend bij een omgeving met straal 300 meter. Daarna is met het in paragraaf 3.3 opgegeven regressiemodel de grondwaterstand voorspeld. In de variantie van de voorspelfout levert de restvariantie bij de regressieberekening (som van kwadraten van de residuen gedeeld door het aantal vrijheidsgraden ervan) meestal de grootste bijdrage. Een verdere (meestal kleine) bijdrage leveren de onzekerheden van de regressie-coëfficiënten. Voor het ruime middentraject van de berekende grondwaterstanden (140-180 cm - mv.) ligt de onzekerheid (variantie) in de orde van 120-130 cm<sup>2</sup>.

### **3.5 Vaststellen van de ruimtelijke afhankelijkheid van grondwaterstanden**

Grondwaterstanden van dichtbij elkaar gelegen punten zullen in het algemeen een zekere mate van afhankelijkheid tonen. Neemt de afstand tussen de punten toe dan wordt deze afhankelijkheid minder. Tenslotte wordt de afstand bereikt waarop de grondwaterstanden onafhankelijk zijn. Deze ruimtelijke afhankelijkheid is uit te drukken met een semivariogram. Dit is een afbeelding waarin het gemiddelde van de gekwadrateerde verschillen van de grondwaterstanden van puntenparen -in afstandsklassen bijeengebracht- uitgezet is tegen het gemiddelde van de afstanden van de puntenparen in de afstandsklasse (semivariantie per afstandsklasse of *lag*).

De grenzen voor de afstandsklassen zijn gekozen op basis van de onderlinge afstand van de grid- en variogrampunten en van het criterium dat de hoogste grens kleiner moet zijn dan de helft van de doorsnede van het gebied (Journel en Huijbregts, 1978, p. 194). Dit leverde de volgende reeks van klassegrenzen:

0 - 100 - 350 - 600 - 850 - 1100 - 1350 - 1600 - 1850 - 2100 meter.

De eerste klasse bevat het resultaat van de paren meetpunten (gridpunt met toegewezen variogrampunt) die op 50 meter afstand van elkaar liggen. Dit zijn 15 paren. De volgende klasse bevat in ieder geval de 15 puntenparen van de grid-variogrampuntafstand van 200 meter.

Een test of de grondwaterstand in een bepaalde richting een grotere ruimtelijke afhankelijkheid vertoont (onderzoek naar richtingsgevoeligheid of anisotropie) leverde geen resultaat. De verdeling van de richtingsassen van de puntenparen over de sectoren 0-60, 60-120 en 120-180 graden met insluiting van de tegenovergestelde sector, gaf geen verschil te zien, zodat isotropie kon worden verondersteld.

Bij een nadere beschouwing van de semivariantie voor de kleinste *lag* bleek dat twee puntenparen een aanwijsbaar grote invloed op het resultaat voor deze *lag* uitoefenden. Deze twee (nr 6 - 506 en 16 - 516) bleken te bestaan uit paren met een aanmerkelijk verschil in ligging van de punten (nabij een kreekbedding en op ruime afstand). Deze puntenparen zijn buiten de berekening gelaten, waardoor de volgende reeks van aantal punten per afstandsklasse, semivariantie van de grondwaterstand en gemiddelde afstand in de klasse ontstaat:

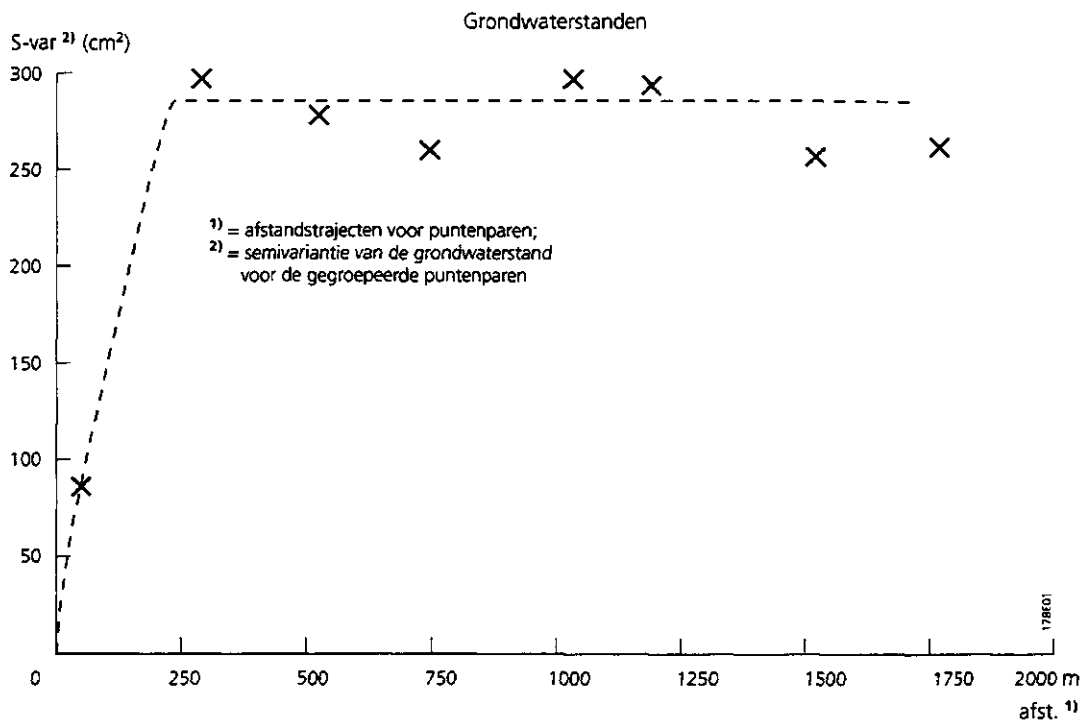
aantal pnt	:	13	37	282	285	376	405	718	457	588
semivar.gws (cm <sup>2</sup> )	:	86	285	274	255	295	295	251	263	312
gem. afstand (m)	:	49	253	494	711	997	1159	1497	1749	2011

Figuur 2 toont het experimentele semivariogram. Hierbij valt op dat de afhankelijkheid beperkt blijft tot over een kleine afstand (de *range*) en dat vervolgens globaal een gelijk niveau voor de variantie (de *sill*) van de grondwaterstanden geldt voor de puntenparen met grotere onderlinge afstand.

Als model voor de ruimtelijke structuur pasten we een sferisch model door de oorsprong aan. Dat wil zeggen dat er geen *zgn. nugget-effect* is: geen variabiliteit op zeer korte afstanden, meetfouten e.d. Het model werd aangepast met de kleinste kwadratenmethode, waarbij het aantal puntenparen per afstandsklasse als gewicht werd gebruikt. De *range* waarbinnen de grondwaterstanden ruimtelijk afhankelijk zijn, is 239 m en de *sill*-waarde is 282 cm<sup>2</sup>.

### 3.6 Interpolatie van grondwaterstanden naar een raster van 25 bij 25 meter

Bij de interpretatie naar niet-bezochte locaties is gebruik gemaakt van kriging gecombineerd met regressie (Delhomme, 1978; Ahmed en De Marsily, 1987), ook bekend als '*kriging with uncertain data*'. Bij deze toepassing van kriging worden de hulpvariabelen, in dit geval maaiveldshoogte t.o.v. NAP en relatieve maaiveldshoogte, met behulp van een regressiemodel getransformeerd in voorspellingen van de doelvariabele, in dit geval de grondwaterstand op 17 juli 1993. In de kriging-



**Fig. 2 Ruimtelijke afhankelijkheid van de grondwaterstand in de vorm van een semivariogram**

vergelijking wordt rekening gehouden met de onzekerheid van de voorspellingen met het regressiemodel. Het gebruikte kriging-programma is geschreven in GENSTAT (Genstat Committee, 1987) en werd gedraaid op een VAX-computer.

Er werd geïnterpoleerd naar ca. 46 000 punten in een vierkant raster van 25 bij 25 m, vanuit de twintig dichtsbijzijnde grondwaterstandsdata, zowel gemeten als voorspeld. Het bleek dat meer dan 20 omgevingspunten niet tot andere voorspellingen leidde. Om de berekening automatisch uit te kunnen voeren werd het gebied verdeeld in segmenten van 1000 m breed, die van noord naar zuid lopen. Geïnterpoleerd werd vanuit punten tot 300 m buiten de genoemde segmenten. Zowel grid-, variogram- als hoogtepunten werden bij de interpolatie gebruikt.

Het resultaat is een voorspelling van de grondwaterstand met de daarbijbehorende variantie van de voorspelfout op de rasterpunten. Door de vrij grote dichtheid van de hoogtepunten (40 tot 100 meter onderlinge afstand) liggen de twintig omgevingspunten binnen een straal van 250 tot 350 meter van het rasterpunt.

### **3.7 Evaluatie van de interpolatie op testpunten**

Voor een toets op de nauwkeurigheid/betrouwbaarheid van de schatting zijn grondwaterstanden op 58 testpunten gebruikt. Van de 60 gelote punten vervielen er twee i.v.m. de tijdsdruk van de momentopname. Het verschil tussen de werkelijke (gemeten) waarde en de voorspelde geïnterpoleerde waarde is de voorspelfout.

Een maat voor de nauwkeurigheid van de voorspellingen is de RMSE (*Root Mean Squared Error*); de wortel uit het gemiddelde van de voorspelfout in het kwadraat. Enkele grote waarden bleken doorslaggevend te zijn voor het resultaat.

De mediaan van de absolute voorspelfout, de MAE (*Mean Absolute Error*), is een benadering voor de gemiddelde fout bij de voorspelling, waarbij uitbijters buiten zicht blijven.

De variantie van de voorspelfout kan bij kriging worden berekend. De wortel uit het gemiddelde van deze krigingvariantie, de RMKV (*Root Mean Kriging Variance*), is voor de 58 testpunten uitgerekend.

### **3.8 Standaardafwijking van de voorspelfout**

Naast een voorspelling van de grondwaterstand berekenden we per rasterpunt de variantie van de voorspelfout. De wortel hieruit is de standaardafwijking of spreiding. Van de spreiding van de voorspelfout, die een verwachtingswaarde 0 heeft, maakten we een kaart (kaart 2). Daarmee geven we een indicatie van de nauwkeurigheid van de voorspellingen.

## **4 Resultaten**

### **4.1 Inleiding**

Het verband tussen grondwaterstand en twee aspecten van de hoogteligging (maaiveldshoogte t.o.v. NAP en relatieve maaiveldshoogte) is via regressie bepaald (3.3). Met het regressiemodel zijn vervolgens alle punten van de hoogtekaart omgezet in een voorspelling van de grondwaterstand met de daarbij behorende onzekerheid van de voorspelling (3.4). De ruimtelijke afhankelijkheid van de grondwaterstanden is met een semivariogram beschreven (3.5). Kriging gecombineerd met regressie toegepast naar alle punten van een raster van 25 bij 25 meter vanuit 20 omgevingspunten uit een bestand van gemeten grondwaterstanden op 140 meetpunten en een bestand van voorspelde grondwaterstanden op 7273 hoogtepunten (3.6). Het resultaat van deze bewerking is een bestand met grondwaterstanden voor het meettijdstip 17 juli 1993. Hiervan is een kaart (kaart 1) gemaakt die in paragraaf 4.2 wordt besproken.

De nauwkeurigheid van de toegepaste methode is te beoordelen door de geïnterpoleerde grondwaterstanden op testpunten te vergelijken met de gemeten grondwaterstanden (4.3).

### **4.2 Kaart met grondwaterstanden op het meettijdstip 17 juli 1993**

De geïnterpoleerde grondwaterstanden op de rasterpunten zijn in klassen ingedeeld. De klassebreedte is 20 cm; de laagste klasse bevat de grondwaterstanden die ondieper dan 100 cm - mv. voorkomen en de hoogste klasse de grondwaterstanden dieper dan 220 cm - mv. De waarde op het rasterpunt werd representatief genomen voor de oppervlakte van de rastercel met het rasterpunt in het centrum. Op deze manier is een volledige bedekking van het gebied bereikt. De toegekende kleuren verlopen in een reeks van blauw voor de klassen met ondiepe grondwaterstanden via groen-geel naar rood voor die met diepe grondwaterstanden. Kaart 1 is de rastercellenkaart die op bovenstaande wijze is vervaardigd.

In de rastercellenkaart komen een aantal elementen van het landschap terug. De kreken en geulen, en de relatief hoge rug van Aardenburg naar Sint Kruis zijn te onderscheiden aan hun resp. ondiepe en diepe grondwaterstanden.

### **4.3 Evaluatie van de interpolatie**

Het histogram van de voorspelfouten bij kriging met 20 omgevingspunten geeft het volgende beeld:

klasse	aantal
< 45	2 **
-45 - -30	1 *
-30 - -15	5 *****
-15 - 0	18 *****
0 - 15	23 *****
15 - 30	8 *****
30 - 45	0
> 45	1 *

Uit het histogram blijkt geen systematische fout (geen *bias*).

De RMSE is 18 cm, de MAE 9 cm en de RMKV 9 cm (de definitie van de afkortingen RMSE, MAE en RMKV staat in paragraaf 3.7). Omdat er geen *bias* is, is de RMSE ongeveer gelijk aan de spreiding van de voorspelfout. De hoge waarde van 18 cm wordt voornamelijk door drie uitschieters in de klassen <45 en >45 m veroorzaakt. 70% van de voorspelfouten ligt binnen 15 cm afwijking van de gemeten standen (zie histogram).

Kaart 2 geeft de standaardafwijkingen (spreiding) van de voorspelfouten, die behoren bij de voorspelde grondwaterstanden op kaart 1. Kaart 2 geeft daarmee een indicatie van de nauwkeurigheid van de voorspellingen. De standaardafwijking van de voorspelfout hangt af van de verspreiding van de punten met zekere en onzekere grondwaterstandsdata en het gebruikte model voor de beschrijving van de ruimtelijke samenhang (semivariogram). Op kaart 2 komt duidelijk het grid van waarnemingen van de grondwaterstand naar voren: de standaardafwijking van de voorspelfout ter plekke van een waarneming is gelijk aan 0. Vergelijking van kaart 2 met de hoogtepuntenkaart voor dit onderzoek geeft dan ook als resultaat dat naarmate de dichtheid van hoogtepunten afneemt, de standaardafwijking van de voorspelfout toeneemt. Vooral in de omgeving van verharde oppervlaktes is de dichtheid van hoogtepunten gering, en dus de standaardafwijking van de voorspelfout groot.

## 5 Bepaling van de gemiddeld laagste grondwaterstand

### 5.1 Inleiding

Voor het gebied wordt een GLG-kaart gevraagd. Deze is af te leiden uit de verkregen grondwaterstandsk kaart door een correctie op de standen. Voor de grootte van deze correctie berekenden we de GLG van 4 stambuizen in de omgeving van het studiegebied. Paragraaf 5.2 vermeldt de beschikbare buizen en de klimaatsgegevens. In paragraaf 5.3 beschrijven we de *transfer-noise*-modellering en de procedure die is gevolgd bij de berekening van GLG's die niet worden beïnvloed door het weer in de periode waarin de grondwaterstanden zijn waargenomen. De resultaten presenteren we in paragraaf 5.4.

### 5.2 Materialen

#### 5.2.1 Grondwaterstanden

In en nabij het studiegebied liggen de volgende grondwaterstandsbuizen met een ondiep filter: 53CL0006, 53FP0034, 54AL0007 en 54AL0025. Voor de berekeningen hebben we de delen van de tijdreeksen geselecteerd met weinig ontbrekende waarden en waarin geen ingrepen in de ontwatering, met effect op de grondwaterstanden, zijn te onderkennen. Dit is voor 53FL0006 de periode 1-1-1984 t/m 15-5-1993, voor buis 53FP0034 1-5-1986 t/m 30-11-1993, voor buis 54AL0007 1-1-1982 t/m 31-12-1989 en voor buis 54AL0025 de periode 1-1-1982 t/m 31-12-1990.

#### 5.2.2 Neerslag- en verdampingsgegevens

Dagneerslagcijfers van 1958 t/m 1993 voor het station Sint Kruis zijn gekocht van het KNMI in De Bilt. De dagcijfers van de referentiegewasverdamping volgens Makkink ( $E_r$ ) zijn berekend uit de volgende data:

- 1 decadedcijfers van  $E_r$  voor Oudenbosch, 1959-1987 (bron: bestand 'Meteo', Landinrichtingsdienst Utrecht);
- 2 decadedcijfers van  $E_r$  voor Vlissingen, 1971-1990 (bron: bestand 'Meteo', Landinrichtingsdienst Utrecht);
- 3 decadedcijfers van  $E_r$  voor Philipine, april 1987 - december 1990 (bron: maandelijks overzicht van het weer in Nederland, KNMI);
- 4 decadedcijfers van  $E_r$  voor Vlissingen, januari 1991 - juni 1991 (bron: maandelijks overzicht van de neerslag en de verdamping in Nederland, KNMI);
- 5 decadedcijfers van  $E_r$  voor Westdorpe, juli 1991 - oktober 1993 (bron: maandelijks overzicht van de neerslag en de verdamping in Nederland, KNMI).

Met een *transfer-noise*-model (Box en Jenkins, 1976), gekalibreerd voor de periode

1971-1987, zijn uit de decadedcijfers voor Oudenbosch voorspellingen gedaan van de decadedcijfers van  $E_r$  voor Vlissingen over de periode 1959-1970. Deze voorspellingen zijn vergeleken met  $E_r$  afgeleid uit de openwaterverdamping volgens Penman, uit de maandtotalen in de gepubliceerde overzichten van het KNMI. Eventuele verschillen zijn proportioneel over de voorspelde decadedcijfers verdeeld. De decadedcijfers zijn vervolgens herleid tot dagcijfers. Het *transfer-noise*-model dat is gebruikt om decadedcijfers voor  $E_r$  van Oudenbosch te transformeren naar decadedcijfers van Vlissingen ziet er als volgt uit:

$$\{E'_{r,V,t} - 0,235\} = 0,1185\{E'_{r,V,t-1} - 0,235\} + 1,345E'_{r,O,t} + n_t$$

$$n_t = 0,4067n_{t-1} + \hat{a}_t, \quad \sigma_{\hat{a}_t}^2 = 1,625 \text{ mm}^2$$

$$E'_{r,V} = \frac{(E_{r,V}^\lambda - 1)}{\lambda}, \quad \lambda = 0,7204$$

$$E'_{r,O} = \frac{(E_{r,O}^\lambda - 1)}{\lambda}, \quad \lambda = 0,5482$$

waarin  $E_{r,V}$  = de referentiegewasverdamping volgens Makkink in Vlissingen ( $\text{mm.decade}^{-1}$ ),  $E_{r,O}$  = de referentiegewasverdamping volgens Makkink in Oudenbosch ( $\text{mm.decade}^{-1}$ ),  $a_t$  een innovatiereeks (witte ruis) en  $\lambda$  een Box-Cox-transformatieparameter.

De verdampingsreeks is dus opgebouwd uit reeksen van verschillende stations en van verschillende frequentie. Gezien de geringe ruimtelijke en temporele variatie van de verdamping lijkt ons dit gerechtvaardigd.

## 5.3 Methode

### 5.3.1 Modelleren van tijdreeksen van de grondwaterstand met *transfer-noise*-modellen

#### *Inleiding*

In dit onderzoek hebben we tijdreeksen gemodelleerd volgens de methode van Box en Jenkins (1976). Knotters en Van Walsum (1994) geven een beschrijving van de toepassing van deze methode bij de berekening van de GHG en de GLG. Het resultaat heeft niet de weerslag van het weer in de periode waarin de grondwaterstand is waargenomen.

*Transfer-noise*-modellen beschrijven de empirische samenhang tussen tijdreeksen. In dit onderzoek zijn dit een reeks van het neerslagoverschot en een grondwaterstandsreeks. Anders dan deterministisch-fysische modellen beschrijven *transfer-noise*-modellen geen fysische processen en gebruiken zij dus niet de daarvoor noodzakelijke informatie zoals bodemfysische eigenschappen, ontwateringsniveaus etc. Alle informa-



tie die nodig is voor de identificatie en kalibratie van een *transfer-noise*-model, komt uit de tijdreeksen. Dit betekent dat de reeksen een goede kwaliteit moeten hebben, niet te veel waarden mogen missen, geen *trends* als gevolg van menselijke ingrepen mogen bevatten en voldoende lang moeten zijn.

Hieronder beschrijven wij hoe de neerslagoverschotreeksen zijn berekend en geven wij de *ARIMA*-modellen van deze reeksen. Vervolgens beschrijven wij de procedure van identificatie, kalibratie en validatie van *transfer-noise*-modellen.

### ***Tijdreeksen van het neerslagoverschot***

Het neerslagoverschot is berekend uit dagcijfers van neerslag en verdamping. De verdamping is de referentiegrasverdamping volgens Makkink,  $E_r$  (CHO-TNO, 1988). Het neerslagoverschot  $P_e$  is

$$P_e = P - E_r$$

waarin  $P$  de neerslag is. Uit de dagcijfers zijn gemiddelden berekend voor perioden van veertien dagen, overeenkomstig de periode tussen de grondwaterstandswaarnemingen.

Bij de identificatie, kalibratie en validatie van *transfer-noise*-modellen speelt het *ARIMA*-model van de invoer - in dit onderzoek het neerslagoverschot - een belangrijke rol. De *ARIMA*-modellen die wij gebruikten hebben de volgende structuur:

$$(P_{e,t} - P_{e,t-24} - c) = \phi_1(P_{e,t-1} - P_{e,t-25} - c) + a_t - \Theta_{24}a_{t-24}$$

waarin  $c$  een constante is,  $\phi_1$  een autoregressieve parameter,  $\Theta_{24}$  een *moving-average*-parameter en  $a$  een witte-ruis-reeks. Dit is een zogenaamd seizoen-gedifferentieerd *ARIMA*-model, waarin 24 de seizoensafstand is, oftewel het aantal tijdstappen waarover een seizoen zich uitstrekt. Het *ARIMA*-model voor het gemiddelde halfmaandelijke neerslagoverschot van 1958 tot en met 1992 in Sint Kruis is:

$$(P_{e,t} - P_{e,t-24} - 0,0038) = 0,107(P_{e,t-1} - P_{e,t-25} - 0,0038) + a_t - 0,9958a_{t-24}$$

$$\text{var}(\hat{a}_t) \doteq 2,732 \text{ mm}^2$$

### ***Identificatie, kalibratie en validatie van transfer-noise-modellen***

Box en Jenkins (1976) hebben een procedure beschreven voor de identificatie, *fitting* (kalibratie) en *diagnostic checking* (validatie) van *transfer-noise*-modellen. In dit onderzoek hebben wij deze procedure zoveel mogelijk gevolgd. De kalibraties van de modelparameters zijn uitgevoerd met het statistische programmapakket GENSTAT (Genstat 5 Committee, 1987). Na de kalibratie volgde de validatie, waarbij gecontroleerd is of het model aan de voorwaarden, omschreven door Box en Jenkins (1976) voldeed. De procedure van identificatie, kalibratie en validatie is herhaald totdat zoveel mogelijk aan de modelveronderstellingen werd voldaan.

### 5.3.2 Berekening van de GLG

#### *Inleiding*

Met een *transfer*-model kan een grondwaterstandsreeks worden gesimuleerd van bijvoorbeeld 30 jaar lang. Als invoer dient een reeks van het neerslagoverschot. Het *transfer*-model beschrijft alleen de component van het grondwaterstandsverloop die uit het neerslagoverschot kan worden verklaard en geeft daarom een ge-*'smoothed'* beeld. Het *transfer*-model beschrijft immers niet het ruisproces, dat het gedeelte van het grondwaterstandsverloop omvat dat niet uit het neerslagoverschot kan worden verklaard.

#### *Gegenereerde ruis*

Omdat de GLG wordt berekend over extreme waarden, zou de gesimuleerde reeks naast een deterministische component ook een ruiscomponent moeten bevatten. De residuen uit de kalibratieperiode geven informatie over het ruisproces. Het ruisproces kan worden beschreven met een *ARIMA*-model, waarvan de invoer een witte-ruisproces is. Met het *ARIMA*-model voor de ruis kunnen gegenereerde witte-ruisreeksen worden getransformeerd in realisaties van het ruisproces. De realisaties van het ruisproces kunnen vervolgens worden opgeteld bij de deterministische component van het grondwaterstandsverloop, zodat het gesimuleerde grondwaterstandsverloop zowel uit een deterministische als uit een stochastische component is opgebouwd. Uit deze verlopen kan de GLG wordt berekend. Voorwaarde is echter wel dat de ruiscomponent en de deterministische component niet met elkaar gecorreleerd zijn. Bij *transfer-noise*-modellering is controle op deze voorwaarde een onderdeel van de procedure van model-identificatie, kalibratie en validatie.

Wij genereerden per kalibratie 100 witte-ruis-reeksen gegenereerd door middel van *resampling* uit de geschatte innovaties voor de kalibratieperiode. De witte-ruis-reeksen zijn getransformeerd in 100 realisaties van het ruisproces, zodat na sommatie met de deterministische component 100 realisaties van het grondwaterstandsverloop ontstonden. Daaruit zijn 100 GLG's berekend, die gemiddeld zijn tot de uiteindelijke schatting voor de GLG. De uiteindelijke schatting van de GLG hebben we genoteerd als  $\hat{m}_T(h_{gl})$ , om aan te geven dat het schattingen (dakje) zijn van modelgemiddelden (streepje), waarbij  $h_{gl}$  de LG3 is en  $T$  de periode van 1962 tot en met 1991 is.

### 5.3.3 Verificatie

In de verificatiefase stelden we de volgende vraag: beschrijft het model het grondwaterstandsverloop goed genoeg om de GLG nauw-keurig te kunnen schatten? Voor de beantwoording kozen we voor een benadering die is gebaseerd op de vergelijking van  $\hat{m}_{cal.}(h_{gl})$  met  $m_{cal.}(h_{gl})$ . Wij toetsten de volgende  $H_0$ -hypothese:

$$\hat{m}_{cal.}(h_{gl}) - m_{cal.}(h_{gl}) = 0$$

waarin

$\hat{m}_{cal.}(h_{gl})$  = GLG voor de kalibratieperiode, berekend met gesimuleerd grondwaterstandsverloop en gegenereerde ruis;  
 $m_{cal.}(h_{gl})$  = GLG voor de kalibratieperiode, berekend uit het waargenomen grondwaterstandsverloop.

Wij bepaalden eerst de cumulatieve frequentieverdeling van de GLG uit honderd modelrealisaties. Vervolgens berekenden we hieruit de interpercentiele *range* van 95% en de overschrijdingskans van  $m_{cal.}(h_{gl})$ . De  $H_0$ -hypothese verwierpen we wanneer  $m_{cal.}(h_{gl})$  buiten de interpercentiele *range* van 95% lag, oftewel wanneer de overschrijdingskans van  $m_{cal.}(h_{gl})$  groter dan 0,975 of kleiner dan 0,025 was.

## 5.4 Resultaten

### 5.4.1 Transfer-noise-modellen

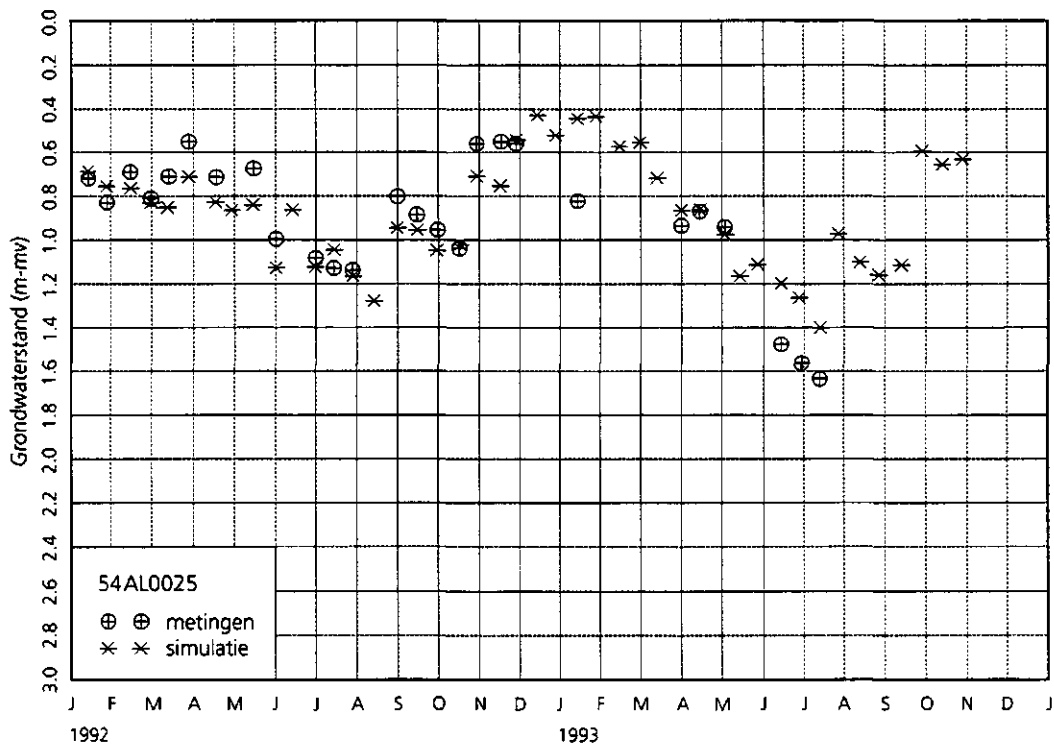
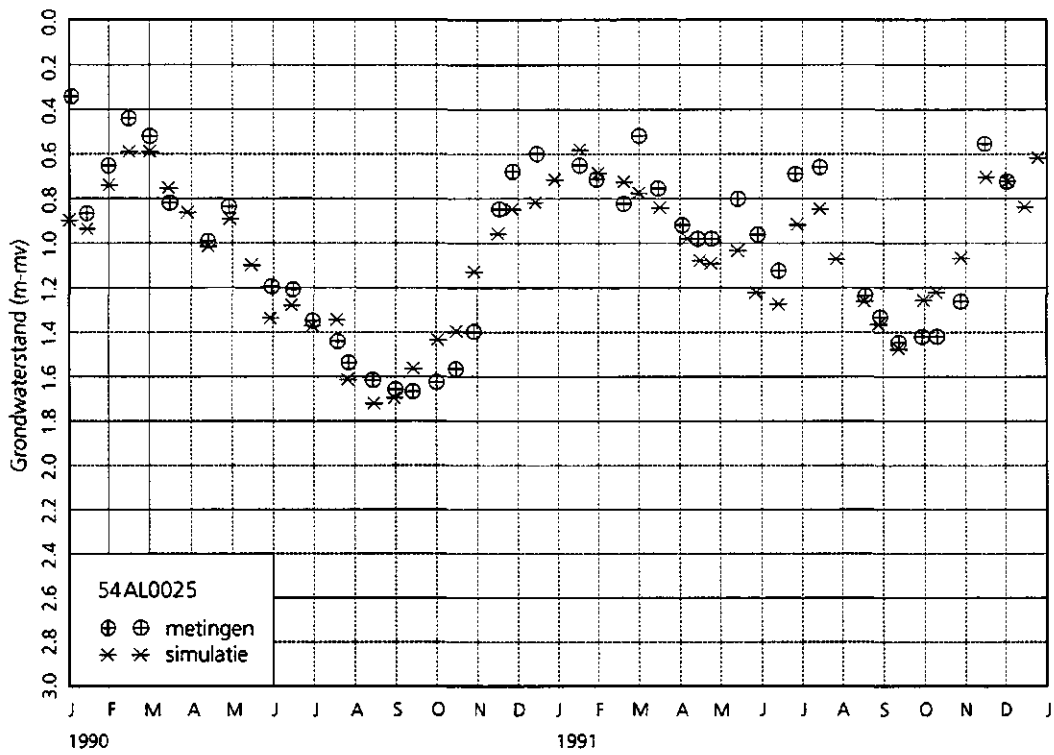
De *transfer-noise*-modellen die voor de vier grondwaterstandsverlopen zijn gebruikt, staan vermeld in tabel 2. Figuur 3 geeft het verloop aan van de gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor stambuis 54AL0025 over de jaren 1990 tot en met 1993.

### 5.4.2 GLG

In tabel 3 staan de berekende GLG's en de grondwaterstanden in de vier buizen op de dag van de gerichte opname. De grondwaterstand in buis 54AL0025 blijkt op die dag aanmerkelijk lager te zijn (29 cm) dan de GLG, in tegenstelling tot de grondwaterstand in de andere drie buizen. Bij het veldbezoek is gebleken dat in de nabije omgeving van buis 54AL0025 recent graafwerkzaamheden hadden plaatsgevonden, waardoor mogelijk het grondwaterstandsverloop is beïnvloed. In tabel 4 staan de resultaten van de verificatie. Bij buis 54AL0007 blijkt de GLG, berekend uit het waargenomen grondwaterstandsverloop, met een kans die groter is dan 0,975 te worden overschreden door de GLG, berekend uit de modelrealisaties. Voor deze buis verwerpen we de hypothese dat het model een goede beschrijving geeft van het grondwaterstandsverloop. Wij baseerden ons verder op buis 53FL0006 en buis 53FP0034.

## 5.5 Conclusie

Gezien het geringe verschil tussen de berekende GLG (over een reeks van 30 jaar) en de grondwaterstand in de stambuizen tijdens de momentopname is aangenomen dat op het opnametijdstip van 17 juli 1993 de grondwaterstanden op het niveau van de gemiddeld laagste grondwaterstanden lagen.



178602

**Fig. 3 Het verloop van gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden in stambuis 54AL0025 in de periode 1990-1993**

**Tabel 2 Transfer-noise-modellen (tussen haakjes: standard errors)**

Buis, kalibratie- periode	$\delta_1$ (-)	$\phi_0$ (-)	$\phi_1$ (-)	c (cm)	$\hat{\phi}_1$ (-)	deviance (cm <sup>2</sup> )	$\sigma_a^2$ (cm <sup>2</sup> )
53FL0006, 1984-1993	0,9006 (0,02)	5,659 (0,40)	2,759 (0,47)	-153,1 (2,1)	0,4655 (0,07)	19198,	104,2
53FP0034, 1986-1993	0,8377 (0,02)	8,140 (0,48)	2,924 (0,62)	-102,6 (2,2)	0,4595 (0,07)	27924,	159,4
54AL0007, 1982-1989	0,8456 (0,03)	4,781 (0,43)		-129,3 (3,3)	0,6404 (0,06)	23799,	154,1
54AL0025, 1982-1990	0,8542 (0,02)	7,697 (0,48)	2,104 (0,60)	-108,1 (2,4)	0,5377 (0,06)	30407,	158,9

**Tabel 3** Berekening van GLG uit een grondwaterstandsverloop van 30 jaar, gesimuleerd met tijdreeksmodellen (Box-Jenkins).

Buis, kalibratie-verloop	Waargenomen verloop kalibratie-periode $m_{cal.}(h_{gl})$	Gesimuleerd verloop kalibratie-periode $\hat{m}_{cal.}(h_{gl})$	Gesimuleerd verloop 1962-1991 (30 jaar) $\hat{m}_T(h_{gl})$	Grondwaterstand op 15 juli 1993 (momentopname)
53FL0006, 1984-1993	167	170	169	158
53FP0034, 1986-1993	131	135	131	135
54AL0007, 1982-1989	141	150	152	150
54AL0025, 1982-1990	135	137	136	165

De modellen zijn gekalibreerd voor verschillende perioden. De GLG is berekend uit 100 realisaties van het *transfer-noise-model*, die zijn gegenereerd door middel van *resampling* uit de geschatte innovaties,  $\hat{a}_t$ . Eenheid cm - mv.

**Tabel 4** Verificatie van GLG's, berekend uit grondwaterstandsverlopen die gesimuleerd zijn met behulp van *transfer-noise-modellen*.

Buis, kalibratieperiode	$\hat{m}_{cal.}(h_{gl})$ 2,5 <sup>e</sup> -97,5 <sup>e</sup> percentiel (cm - mv)	$m_{cal.}(h_{gl})$ (cm - mv)	overschrijdingskans
53FL0006, 1984-1993	165 - 175	167	0,90
53FP0034, 1986-1993	129 - 142	131	0,90
54AL0007, 1982-1989	143 - 156	141	1,00
54AL0025, 1982-1990	133 - 139	135	0,57

Er zijn 100 realisaties van het grondwaterstandsverloop gegenereerd door middel van *resampling* uit de geschatte innovaties,  $\hat{a}_t$ . Uit deze 100 realisaties zijn 100 GLG's berekend. Hiervan zijn cumulatieve frequentieverdelingen voor  $\hat{m}_{cal.}(h_{gl})$  afgeleid. Van deze verdelingen is de *range* tussen het 2,5<sup>e</sup> en het 97,5<sup>e</sup> percentiel bepaald; dit is de *range* waarin 95% van de modelrealisaties vallen. Verder zijn uit de cumulatieve frequentieverdelingen de overschrijdingskansen bepaald van de GLG die uit het waargenomen grondwaterstandsverloop zijn berekend. Als deze overschrijdingskans ligt tussen 0,025 en 0,975 dan accepteren wij de hypothese dat het model bij de waarnemingen past. De verificatie heeft betrekking op de periode waarvoor de modellen zijn gekalibreerd.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

Doel van het onderzoek was de GLG van een deel van het ruilverkavelingsgebied 'Aardenburg' in kaart te brengen met behulp van een geostatistische interpolatiemethode. Door middel van kriging gecombineerd met regressie, waarbij de maaiveldshoogte t.o.v. NAP en de relatieve maaiveldshoogte hulpvariabelen waren, is de GLG in kaart gebracht alsmede de standaardafwijking van de voorspel- of interpolatiefout, als indicatie voor de nauwkeurigheid van de GLG-kaart. Geconcludeerd kan worden dat met behulp van een beperkt aantal grondwaterstandswaarnemingen, een uitgebreide set van hoogtecijfers en een geostatistische interpolatiemethode de GLG met een redelijke nauwkeurigheid in kaart kan worden gebracht. Uit de verschillen tussen de gemeten en de voorspelde grondwaterstanden op 58 testpunten bleek dat geen systematische fout optrad en dat de fouten overwegend gering waren: de absolute fout was gemiddeld ca. 9 cm (mediaan) terwijl 70% van de fouten kleiner dan 15 cm was. Het aantal boringen ten behoeve van grondwaterstandswaarnemingen, ca. 1 per 20 ha, was gering, zeker in vergelijking met de conventionele karteringsmethodiek.

Evenals uit onderzoek van Te Riele en Brus (1992) bleek ook uit dit onderzoek dat de hoogtecijferkaart belangrijke hulpinformatie is bij de interpolatie van grondwaterstanden. We bevelen daarom aan om digitale bestanden van hoogtecijfers aan te leggen en actueel te houden. Verder zal onderzoek moeten worden verricht naar alternatieven voor de tijdrovende waterpassingen, bijvoorbeeld toepassing van GPS (Global Positioning Systems). Ook de geschiktheid van methoden met een geringere nauwkeurigheid dan waterpassing of GPS zou moeten worden onderzocht, evenals het effect van deze geringere nauwkeurigheid op de uiteindelijke voorspelfout van de doelvariabele.

Kriging levert naast een kaart met voorspellingen van de doelvariabele ook een kaart met standaardafwijkingen van de voorspelfout op. Met behulp van deze kaart kan bij een volgende momentopname van de grondwaterstand het meetnet worden verbeterd.

In dit onderzoek is geïnterpoleerd naar ca. 46 000 punten. De gebruikte software dient verder te worden aangepast aan de verwerking van dergelijke grote hoeveelheden data.

De aanbevelingen uit dit onderzoek zijn bij DLO-Staring Centrum inmiddels ter hand genomen.

## Literatuur

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.

Box, G.E.P. en G.M. Jenkins, 1976. *Time series analysis. Forecasting and control*. San Fransisco, Holden Day.

CHO-TNO, 1988. Van Penman naar Makkink; een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen. Eindrapport van de KNMI-Projectgroep en de CHO-Begeleidingsgroep Verdampingsberekeningen. Redactie J.C. Hooghart en W.N. Labians. Rapport nr. 19.

Delhomme, J.P., 1978. Kriging in the hydrosociences. *Advances in Water Resources* 1(5): 251-266.

GENSTAT 5, 1987. *Reference manual. Genstat 5 Committee of the Statistics*. Department Rothamsted Experimental Station, Oxford.

Journel, A.G., Ch.J. Huijbregts, 1978. *Mining geostatistics*. London, Academic press.

Knotters, M. en P.E.V. van Walsum, 1994. *Uitschakeling van weersinvloeden bij de berekening van de GHG en de GLG*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 350.

Pleijter, G., 1989. *De bodemkaart van Westelijk Zeeuws-Vlaanderen, schaal 1 : 10 000*. Wageningen, Stiboka. Rapport 2038.

Ovaa, I. et al, 1957. *De bodemgesteldheid van Westelijk Zeeuws-Vlaanderen*. Wageningen, Stiboka. Rapport 455 I en II.

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 158.

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.

Schmitz, I.M.J., 1992. *Cultuurtechnische Inventarisatie Aardenburg*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 179.