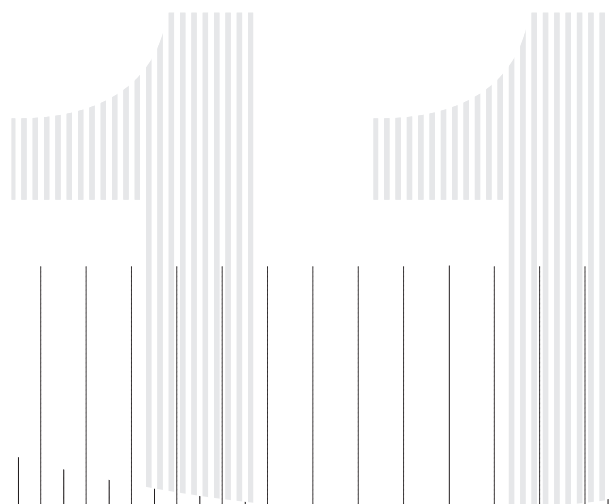


## Meten voor waternood



Richtlijnen voor het opzetten  
van meetsystemen en het  
bewerken van meetgegevens

Colofon:

Uitgave:  
STOWA, Utrecht  
April 2002

Tekst:  
F.C. van Geer (TNO-NITG)  
M.F.P. Bierkens (Alterra)  
E. van Leeuwen (WL)  
H. Hakvoort (WL)  
T. Hoogland (Alterra)  
J. Peeters (TNO-NITG)

Vormgeving:  
Nicoline Caris, grafische vormgeving

Foto omslag:  
Willem Lucassen

Druk:  
Kruyt Grafisch Advies Bureau

STOWA rapportnummer 2002-14  
ISBN nummer 90-5773-166-5

Bestelwijze STOWA publicaties  
Publicaties en publicatieoverzicht van de STOWA is uitsluitend te bestellen bij:  
Hageman Fulfilment, adres: Postbus 1110, 3330 CC Zwijndrecht  
Telefoonnummer 078 629 33 32, faxnummer 078 610 42 87, e-mail [hff@wxs.nl](mailto:hff@wxs.nl).  
O.v.v. ISBN of STOWA rapportnummer en een duidelijk afleveradres.

## Samenvatting

Voor verschillende activiteiten in het kader van de Waternoodprocedure dient informatie over het hydrologische systeem beschikbaar te zijn. Hiertoe dient een meetsysteem te worden opgezet, dat goed aansluit op de informatiebehoefte bij de verschillende stadia van Waternood. Onder meetsysteem wordt verstaan het geheel van te meten variabelen, meetlocaties, meetfrequentie en gegevensbewerking. Om meetsystemen in het kader van Waternood efficiënt, en uniform te kunnen opzetten, is het project "Meetnet Waternood" gestart met de volgende doelstelling:

het ontwikkelen van richtlijnen voor het opzetten van meetsystemen in het kader van Waternood, alsmede het ontwikkelen van richtlijnen voor de bewerking van de meetgegevens.

De te ontwikkelen richtlijnen dienen eenvoudig toepasbaar te zijn met de beschikbare informatie. Dit houdt in dat het niet persé noodzakelijk moet zijn om de richtlijnen door een expert te laten uitvoeren. Wel is verondersteld dat de gebruiker enige basiskennis heeft van (geo)statistiek. De richtlijnen dienen te worden geïmplementeerd in het instrumentarium Waternood. Bij de ontwikkeling van de richtlijnen dient hierop te worden geanticipeerd.

De ontwikkelde systematiek heeft de vorm gekregen van een beslisboom om tot een ontwerpmethode te komen, die toegesneden is op de vraagstelling. De stappen die doorlopen worden in de beslisboom zijn:

- Vaststellen informatiebehoefte en meetdoel. Het belangrijkste bij het systematisch opzetten van een meetsysteem is het vaststellen van de informatiebehoefte en het meetdoel. Er zijn binnen het waterbeheer vier stadia te onderscheiden waar informatie noodzakelijk is. Dit zijn "systeemverkenning", waar het accent ligt op het leren kennen van het hydrologische systeem, "Structurele aanpassingen", ten behoeven van het vaststellen van realiseren van structurele maatregelen voor de realisatie van het GGOR, "Sturing", waarbij informatie nodig is voor het operationeel beheer, en "Evaluatie", ter verificatie of het gewenste effect ook daadwerkelijk is opgetreden.
- Relevantie. Dit is de vraag of het doen van metingen relevant is voor de doelstelling van het waterbeheer en -beleid.
- Te meten variabele.
- Ambitieniveau. Dit zegt iets over de mate van detail waarop de informatie beschikbaar moet zijn.
- Ontwerpmethode. Dit is het voorschrift waarmee de meetconfiguratie wordt ontworpen.
- Alternatief meetconfiguratie. Hierbij wordt binnen de ontwerpmethode gekozen voor een bepaalde variant.

Het was binnen het budget niet mogelijk om voor alle denkbare meetdoelen richtlijnen te ontwikkelen. Er is gekozen voor het ontwikkelen van een beperkt aantal meetdoelen. Deze zijn uitgewerkt in twee voorbeeldgebieden (Baakse Beek en Reeuwijk).

Het resultaat van het project is een structuur (beslisboom) waarmee de stappen in het proces van meetnetopzet kunnen worden doorlopen. Deze structuur wordt opgenomen in het instrumentarium Waterlood. Voorts is er een inventarisatie uitgevoerd naar de meetdoelen tijdens de verschillende stadia in het waterbeheer. Voor een beperkt aantal meetdoelen is de meetnetopzet uitgewerkt. De hierbij gebruikte ontwerpmethoden zijn gegeven in het 'Methodenboek'. In de loop van de tijd kan het Methodenboek worden aangevuld.

## De STOWA in het kort

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. In 2002 waren dat alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen, de provincies en het Rijk (i.c. het Rijksinstituut voor Zoetwaterbeheer en de Dienst Weg- en Waterbouw).

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van behoefte-inventarisaties bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstututen en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld zijn uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n vijf miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 030-2321199.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.

Email: [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website: [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl).



# Inhoud

<b>1. Inleiding .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Het opzetten van een meetsysteem .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Waarom meten?.....</i>	<i>5</i>
2.2 <i>Het ontwerp van een meetsysteem.....</i>	<i>6</i>
2.3 <i>Ontwerpprincipes: een kijkje in de keuken .....</i>	<i>8</i>
<b>3. Meetsystemen voor Waterlood .....</b>	<b>10</b>
3.1 <i>Stadia van informatiebehoefte .....</i>	<i>10</i>
3.2 <i>Informatiebehoefte, meetdoelen en te meten variabelen-----</i>	<i>11</i>
3.3 <i>Illustratie aan de hand van twee voorbeeldgebieden .....</i>	<i>15</i>
3.4 <i>Een ontwerpmethode van meetsystemen voor Waterlood .....</i>	<i>24</i>
<b>4. Praktijkvoorbeelden.....</b>	<b>26</b>
4.1 <i>Systeemverkenning.....</i>	<i>26</i>
4.2 <i>Structurele aanpassing.....</i>	<i>32</i>
4.3 <i>Ontwerp sturingssysteem .....</i>	<i>35</i>
4.4 <i>Evaluatie.....</i>	<i>39</i>
<b>5. Conclusies .....</b>	<b>51</b>





## 1. Inleiding

In 1998 presenteerde de Projectgroep Waternood (1998), een initiatief van de Dienst Landelijk Gebied en STOWA, het rapport “Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater”. In dit rapport wordt een nieuwe aanpak beschreven voor de inrichting en het beheer van oppervlaktewatersystemen. De voorgestelde methodiek is bekend geworden onder de naam “Waternood”. Op gebiedsniveau wordt daarbij gestreefd naar een optimaal grond- en oppervlaktewaterregime dat zo goed mogelijk is afgestemd op de wensen van de verschillende functies binnen het gebied, daarbij rekening houdend met het hydrologisch systeem in het gebied. De methodiek bestaat uit een aantal stappen, zoals het vaststellen van het actuele grond- en oppervlaktewaterregime (AGOR), het optimale grond- en oppervlaktewaterregime voor elk van de aanwezige functies (OGOR), verwachte grond- en oppervlaktewaterregimes (VGOR) voor verschillende scenario’s van waterbeheer, inrichtingsmaatregelen en (eventueel) functietoekenning, het via afweging en overleg vaststellen van het uiteindelijke gewenste grond- en oppervlaktewaterregime (GGOR) en het monitoren of na het nemen van de vereiste waterhuishoudkundige maatregelen en het instellen van het nieuwe beheer het GGOR is gehaald.

Deze stappen worden in het rapport van de werkgroepgroep Waternood (1998) slechts globaal beschreven. Door het ontbreken van operationele instrumenten is het in de praktijk toepassen van de methodiek daarom nog niet mogelijk is. Hier en daar zijn wel pogingen gedaan om gedeelten van de methodiek te operationaliseren (bijv. het rapport “Beter werken met Waternood” van de werkgroep Waternood (2001)), maar een volledig instrumentarium, dat gereed is om gebruikt te worden door uitvoerende instanties zoals de waterschappen ontbreekt nog. Om deze reden is door STOWA het onderzoeksprogramma “Waternood” met als doel een samenhangend geheel van instrumenten en modellen te ontwikkelen waarmee de Waternoodprocedure kan worden doorlopen. Een van de projecten binnen dit programma heet “Meetnet waternood”, waarvan dit rapport het resultaat is.

Voor verschillende activiteiten in het kader van de Waternoodprocedure dient informatie beschikbaar te zijn. Deze informatie is nodig voor het verkennen en karakteriseren van het hydrologische systeem, het ontwikkelen van plannen voor ingrepen, het operationeel uitvoeren van die plannen en het evalueren van het resultaat. Voor het verkrijgen van de informatie dient een meetsysteem te worden opgezet. Onder meetsysteem wordt verstaan het geheel van te meten variabelen, meetlocaties, meetfrequentie en gegevensbewerking. Om meetsystemen in het kader van Waternood efficiënt, en uniform te kunnen opzetten, is het project “Meetnet Waternood” gestart met de volgende doelstelling:

het ontwikkelen van richtlijnen voor het opzetten van meetsystemen in het kader van Waternood, alsmede het ontwikkelen van richtlijnen voor de bewerking van de meetgegevens.

Het uiteindelijke project is opgezet als een Delftcluster-project met TNO-NITG (project-leider), WL en ALTErrA als uitvoerenden en STOWA als stakeholder. Het project is begeleid door een begeleidingscommissie vanuit de STOWA.

Bij de uitvoering gelden een aantal belangrijke randvoorwaarden. De te ontwikkelen richtlijnen dienen eenvoudig toepasbaar te zijn met de beschikbare informatie. Dit houdt in dat het niet persé noodzakelijk moet zijn om de richtlijnen door een expert te laten uitvoeren. Wel is verondersteld dat de gebruiker enige basiskennis heeft van (geo)statistiek. Voorts dienen de richtlijnen te worden geïmplementeerd in het instrumentarium Waterlood. Bij de ontwikkeling van de richtlijnen dient hierop te worden geanticipeerd. Het was binnen het budget niet mogelijk om voor alle denkbare meetdoelen richtlijnen te ontwikkelen. Er is gekozen voor het ontwikkelen van een beperkt aantal meetdoelen. Deze zijn uitgewerkt in voorbeeldgebieden.

Binnen het project is een beslisboom ontwikkeld om tot een ontwerpmethode te komen, die toegesneden is op de vraagstelling. De structuur van deze beslisboom kan in het instrumentarium Waterlood worden opgenomen. Tevens zullen de in het project beschreven ontwerpmethoden in het instrumentarium worden opgenomen. De structuur is modulair opgezet, zodat eenvoudig andere meetdoelen en ontwerpmethoden toegevoegd kunnen worden. Het is dan ook de bedoeling om in de loop van de tijd de beslisboom verder in te vullen, en uit te breiden.

Het rapport bestaat uit twee delen. Deel I, het hoofdrapport, begint met een algemene beschrijving van zaken die komen kijken bij het opzetten van een meetsysteem (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 volgt dan de beschrijving van de opzet van een meetsysteem voor Waterlood. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in vier stadia waarin in het waterbeheer meetinformatie nodig is, met ieder hun eigen informatiebehoefte en meetdoelen. Deze stadia, hun informatiebehoefte en meetdoelen vormen samen een beslisboom die als basis dient voor een methode om meetstrategieën (wat, hoe, waar en wanneer te meten) voor Waterlood te ontwerpen. In hoofdstuk 4 volgt dan voor ieder stadium een uitwerking waarbij voor een voorbeeldgebied een meetstrategie voor één specifiek meetdoel wordt ontworpen. In deel II, het Methodenboek, wordt van een beperkt aantal ontwerpmethoden, waaronder die gebruikt in de praktijkvoorbeelden, een korte beschrijving gegeven. Deze beschrijving kan worden opgenomen in het instrumentarium Waterlood.

## 2. Het opzetten van een meetsysteem

### 2.1 Waarom meten?

Waterlood behelst in principe een systematische methode om waterbeheersing en waterbeheer zo goed mogelijk aan te passen aan de wensen van de functies binnen een gebied, rekening houdend met de randvoorwaarden van het hydrologische systeem. Om dit goed te doen zijn de volgende zaken nodig:

- kennis over de eisen die geplande functies aan bodem en water stellen;
- kennis over het huidige hydrologische systeem en hoe dit reageert op veranderingen in het oppervlaktewatersysteem en het landgebruik.

Ten behoeve van de tweede vorm van kennisbehoefte zullen waarnemingen aan het hydrologische systeem nodig zijn. Het betreft hier waarnemingen van hydrologische variabelen (grondwaterstand, oppervlaktewaterstand, kwelflux, afvoer, grondwaterkwaliteit e.d.) om een bepaalde toestand van het systeem vast te stellen, als ook systeemparameters (bodemtype, textuur, drainageweerstand, peilregime, slootprofielen e.d.) die gebruikt kunnen worden in modellen om de reactie van de toestand van het hydrologische systeem op veranderingen in het oppervlaktewatersysteem en het landgebruik te voorspellen. Het meten van de actuele situatie van het hydrologisch systeem speelt ook bij het operationeel beheer een belangrijke rol. Op basis van deze informatie, vastgelegd in bijvoorbeeld waterstanden, debieten en bedrijfstoestanden van gemalen, moeten immers de ingrepen zoals het schakelen van gemalen of wijzigen van stuwstanden worden bepaald.

Waarnemingen aan het systeem worden nooit zo maar gedaan, maar volgens een systematiek, waarbij volgens een aantal logische stappen keuzes worden gemaakt over de te meten variabelen, meet- en bepalingmethoden, waar en wanneer te meten etc. Het geheel van deze keuzes is het ontwerp van het meetsysteem en wordt in de volgende paragraaf besproken.

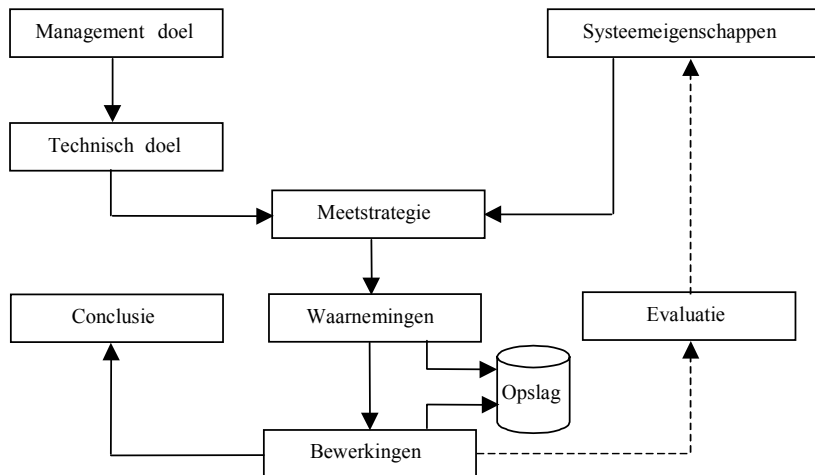
---

<sup>1</sup> In deze beschouwing wordt voor het gemak de bodem ook bij het hydrologisch systeem gerekend, voor zover bodemeigenschappen gerelateerd zijn aan grondwaterstand, bodemvocht en waterkwaliteit.

## 2.2 Het ontwerp van een meetsysteem

Bij het ontwerpen van meetsystemen zijn een aantal elementen te onderscheiden. Deze elementen zijn schematisch weergegeven in figuur 1.

Hier volgt een korte beschrijving van elk van de elementen:



Figuur 1. Elementen bij het ontwerp van een meetsysteem.

### Managementdoel

Het ontwerp van een meetsysteem begint altijd bij een managementdoel. Dit managementdoel is wat er uiteindelijk met de gegevens uit het meetsysteem bereikt moet worden. Vaak zijn managementdoelen in kwalitatieve termen gesteld, of worden doelen geformuleerd die niet direct meetbaar zijn. Een voorbeeld van een kwalitatief gesteld managementdoel is 'signaleren van ontwikkelingen in de waterkwaliteit'. Een niet direct meetbaar doel is bijvoorbeeld de grootte van de kwelflux.

### Technisch doel

Een van de moeilijkste stappen in het ontwerpproces is het vertalen van de managementdoelstelling in een technische doelstelling. Het technische doel is een kwantitatief geformuleerd doel, dat rechtstreeks afhangt van de waarnemingen van het op te zetten meetsysteem. Een voorbeeld hiervan is de stijging van de gemiddelde grondwaterstand in een bepaald gebied. Deze grootte (doelvariabele) kan uit tijdreeksen van waarnemingen worden berekend, waarbij de betrouwbaarheid afhangt van de meetmethode, het aantal locaties en de meetfrequentie. Niet in alle gevallen is het vooraf mogelijk om een gewenst betrouwbaarheidsinterval te geven. Om het technische doel te kunnen vaststellen dient dus bekend te zijn welke bewerkingen er met de te verzamelen gegevens uitgevoerd zullen worden.

### Meetstrategie

Als eenmaal het technische doel is vastgesteld, kan een meetstrategie worden uitgewerkt. Dit omvat:

- de te meten variabelen;
- de meetmethode of bepalingmethode en bijbehorende betrouwbaarheid;
- de waarnemingslocaties;
- de tijdstippen van waarneming;
- de wijze waarop de waarnemingen worden verwerkt. Hieronder vallen verdere berekenin-

gen, zoals het berekenen van afvoer uit de waterhoogte of kwel uit grondwaterstand en stijghoogte, als ook statistische procedures die gebruikt worden om uit de waarnemingen een ruimtelijk gemiddelde te berekenen, een kaart te maken of het overschrijden van een kritische norm te toetsen;

- een protocol wat er moet gebeuren als een bedoelde waarneming niet kan worden gedaan (geen respons), bijv. omdat een bepaalde locatie op een bepaald tijdstip niet kan worden bereikt.

De set van ruimte- en tijdscoördinaten (waar en wanneer wordt gemeten) wordt in het Engels ook sampling design genoemd. In dit rapport zullen wij dit aanduiden met meetconfiguratie. Verder geldt dat als de tijd er bij betrokken is en het de bedoeling is om een variabel van het hydrologisch systeem in de tijd te volgen we ook kunnen spreken van een monitoringstrategie.

#### *Systeemeigenschappen*

Om een goede meetstrategie te kunnen uitwerken is kennis nodig van de systeemeigenschappen. Immers, indien de variabiliteit in ruimte en/of tijd groter is, zullen er meer waarnemingen nodig zijn om dezelfde betrouwbaarheid te halen.

#### *Waarnemingen*

Nadat de meetstrategie is bepaald en eventuele permanente meetlocaties zijn geïnstalleerd kunnen de eigenlijke waarnemingen worden gedaan. Hieronder wordt ook verstaan de chemische analyse van bodem- en watermonsters.

#### *Bewerkingen*

De waarnemingen worden bewerkt op de wijze die bij de meetstrategie is vastgelegd.

#### *Opslag*

Waarnemingen en bewerkingen daarvan moeten worden opgeslagen (Data-base, CD-ROM, ordners ed.), zodat deze later kunnen worden hergebruikt of om de mogelijkheid te hebben conclusies uit de meetresultaten te kunnen controleren.

#### *Conclusie*

De resultaten van de bewerkingen worden vergeleken met het technisch doel waarna een conclusie volgt: “de gemiddelde grondwaterstand is 15 cm gedaald” of “er is een significante toename van de maatgevende afvoer opgetreden”.

#### *Evaluatie*

Tenslotte leveren de bewerkingen weer informatie over de eigenschappen van het systeem. Hiermee kan de meetstrategie na verloop van tijd worden geëvalueerd. Tijdens de evaluatie wordt vastgesteld of de vooronderstellingen van de systeemeigenschappen correct zijn geweest. Is dit niet het geval, dan kan de meetstrategie eventueel worden bijgesteld, en de cyclus worden herhaald.

### 2.3 Ontwerpprincipes: een kijkje in de keuken

Er zijn zeer veel methoden om tot een ontwerp van een meetstrategie te komen. Bij alle methoden wordt op één of andere wijze een relatie gelegd tussen de opbrengst aan informatie en de meetinspanning (meetnetdichtheid, frequentie). Het is niet mogelijk om een volledig overzicht te geven van alle ontwerpmethoden. In deze paragraaf wordt een globale indeling gegeven van de ontwerpmethoden. In Deel II zijn een aantal relevante methoden nader uitgewerkt. De indeling van de methoden is gebaseerd op het rapport "State of the art on monitoring and assessment of groundwaters" (Uil et. al., 1999).

Onderscheid wordt gemaakt tussen de Hydrologische benadering en de Statistische benadering.

#### *Hydrologische benadering*

De hydrologische benadering is gebaseerd op hydrologische kennis, veelal in de vorm van ervaring. Op grond van deze kennis, al dan niet ondersteund met modelsimulaties, wordt beoordeeld op welke locaties en met welke frequentie er gemeten moet worden. De ontwerpmethode is afhankelijk van de bij experts aanwezige kennis, en dus tot op zekere hoogte subjectief.

De algemene gang van zaken bij de hydrologische benadering kan als volgt worden omschreven:

- de expert vormt zich een beeld van de hydrologische processen, met name van de variabiliteit in de ruimte en de tijd. Hierbij kan hij/zij gebruik maken van analytische of numerieke simulaties.
- op grond van het beeld stelt deze vast welke variabelen er gemeten moeten worden, op welke locaties dat moet gebeuren en met welke frequentie gemeten moet worden.

Bij de hydrologische benadering zijn vaak de meetdoelen niet expliciet omschreven, maar meer in termen van "het systeem in de vingers krijgen" en "het volgen van het algemene beeld". Verder levert de hydrologische benadering niet expliciet inzicht in de betrouwbaarheid waarmee de gevraagde informatie kan worden geleverd. Hooguit kan achteraf worden geconstateerd of het meetnet voldaan heeft. Tenslotte geldt dat de hydrologische benadering geen specifieke eisen stelt aan de voorinformatie (kansverdelingen, semivariogrammen e.d.). Dat is een reden waarom deze benadering in een de fase van de systeemverkenning vaak wordt toegepast.

#### *Statistische benadering*

De statistische benadering gaat uit van een kwantificeerbaar meetdoel. Dit kan bijvoorbeeld een gemiddelde stand zijn, een geïnterpoleerd oppervlak, een input-responsfunctie, of een overschrijdingskans. Het meetdoel moet uit de waarnemingen (eventueel na bewerking) geschat worden. Omdat deze schatting gebaseerd is op onvolledige informatie (namelijk alleen de waarnemingen) wijkt die af van de werkelijkheid. Het verschil tussen de werkelijke waarde en de geschatte waarde is de schattingsfout. Het uitgangspunt bij de statistische benadering is dat deze fout kleiner wordt naarmate er een grotere meetinspanning wordt geleverd. Met andere woorden als er meer gemeten wordt, zal de fout in de schatting kleiner worden. Nu is de werkelijke waarde in de praktijk natuurlijk nooit bekend, dus kan de fout ook niet worden bepaald. Wel kan de statistische kansverdeling van de schattingsfout worden bepaald. Deze kansverdeling geeft de breedte (betrouwbaarheidsinterval) van de te verwachten schattingsfout. Op basis van de relatie tussen de kansverdeling van de schattingsfout en de meetinspanning wordt het

meetsysteem ontworpen. De opbrengst (in termen van een kleinere schattingsfout) wordt met de statistische benadering expliciet gekwantificeerd. Overigens kan een statistische benadering goed worden gecombineerd met hydrologische systeemkennis.

Er bestaat een groot aantal verschillende statistische methoden voor het ontwerp van meetsystemen. Het is in het kader van dit onderzoek ondoenlijk om al deze methoden te beschrijven. De te kiezen methode hangt af in belangrijke mate af van de wijze waarop de meetgegevens worden bewerkt om het meetdoel te bereiken. Als het meetdoel een ruimtelijk gemiddelde is, kan bijvoorbeeld worden gekozen voor een aselechte steekproef. Als er de variabele een geïnterpoleerd oppervlak is kan het meetnet op basis van Kriging-interpolatie worden ontworpen.

### 3. Meetsystemen voor Waternood

In dit hoofdstuk wordt een raamwerk gepresenteerd voor het ontwerpen van meetsystemen voor Waternood. Het raamwerk bestaat uit de volgende onderdelen:

1. *Een beslisboom die de gebruiker voor de verschillende stadia in waternood leidt tot een keuze van een geschikte meetstrategie*
2. *Een uitwerking van deze beslisboom in de vorm van tabellen met daarin voor verschillende stadia binnen Waternood, de informatiebehoefte, de meetdoelen, de te meten variabelen en een voorstel voor het ontwerp van een meetconfiguratie.*
3. *Uitgebreide beschrijvingen (recepten) voor het ontwerpen van een beperkt aantal meetconfiguraties (Deel II), waaronder degenen die in hoofdstuk 4 worden gebruikt in praktijkvoorbeelden.*

Eerst worden de verschillende stadia van informatiebehoefte in Waternood besproken. Vervolgens wordt voor elk van deze stadia geïnventariseerd welke informatiebehoefte daarbij hoort, welke meetdoelen hieruit voortvloeien en welke variabelen hiervoor moeten worden gemeten. Een en ander zal worden geïllustreerd aan de hand van twee praktijksituaties. Hierbij wordt reeds voorgesorteerd op Hoofdstuk 4 waar voor dezelfde praktijksituaties een aantal meetstrategieën worden ontworpen. Tenslotte wordt het raamwerk voor het ontwerp van meetsystemen voor waternood gepresenteerd.

#### 3.1 Stadia van informatiebehoefte

Binnen het waterbeheer en dus ook binnen Waternood zijn vier stadia te onderscheiden waarin informatie over grond- en oppervlaktewater nodig is. Hierna worden deze stadia beschreven. De beschrijving is in de terminologie van Waternood, maar geldt in zijn algemeenheid voor elk project dat aanpassingen van het waterhuishoudkundige systeem beoogt. Het is overigens niet zo dat alle stadia netjes achter elkaar voorkomen. Ze kunnen elkaar gedeeltelijk overlappen.

##### *Systeemverkenning*

Aan het begin van Waternood is informatie nodig over het hydrologisch systeem om dit in de vingers te krijgen. In dit stadium richt de meetinspanning zich dus op het verkrijgen van kennis over het hydrologisch systeem. Informatie dient verzameld te worden ten behoeve van het vaststellen van het actuele regiem (AGOR).

##### *Structurele aanpassing*

Ten behoeve van het vaststellen van het GGOR worden een aantal scenario's van mogelijke waterhuishoudkundige maatregelen geëvalueerd en de daarbijbehorende doelrealisaties berekend. Scenario's worden meestal doorgerekend via één of andere modelbeschrijving. Dit kan een eenvoudig verband zijn of een gedetailleerd numeriek model. De informatiebehoefte in dit stadium bestaat dus vaak uit modelparameters. Op



basis van de informatie uit dit en het vorige stadium moet het mogelijk zijn het GGOR vast te stellen en de daarbij behorende structurele aanpassingen ook daadwerkelijk uit te voeren.

#### *Sturing*

Waterhuishoudkundige maatregelen om het GGOR te realiseren kunnen zowel constructieve maatregelen zijn, als maatregelen te verbetering van het operationeel beheer (sturing). De werking van een sturing ligt vast in het zogenaamde sturingsstelsel.

Onder een sturingsstelsel wordt verstaan het geheel van hard- en software waarmee in het watersysteem wordt gemeten, de sturingsacties worden bepaald en de regelkunstwerken zoals stuwen en gemalen worden geregeld. Deze taken gebeuren in een zodanig kort tijdsbestek (ofwel in 'real time') dat nagenoeg direct wordt gereageerd op veranderende omstandigheden.

Het basisprincipe van sturing is als volgt. De actuele situatie in het watersysteem (peilen, debieten, bedrijfstoestanden van gemalen en andere regelkunstwerken) wordt gemeten. Op basis van deze informatie, eventueel aangevuld met voorspellingen over de te verwachten situatie wordt de actuele gewenste systeemtoestand afgeleid. Hierbij is informatie nodig omtrent de operationele doelstelling, de actuele belasting en de technische mogelijkheden van de kunstwerken. Vervolgens wordt met deze informatie de instellingen van de regelkunstwerken (gemalen, stuwen) bepaald en ingesteld. Na zekere tijd wordt weer informatie verzameld en opnieuw de sturingsactie bepaald. De cyclustijd van meten en regelen is bij sturing klein in verhouding tot de tijdsconstanten van het afvoerproces.

#### *Evaluatie*

Een tijd na het gereedkomen van de structurele aanpassingen en het instellen van het nieuwe waterbeheer zal men willen weten of dit alles succesvol is geweest: 'is het GGOR in voldoende mate gerealiseerd?' Ook hiervoor moet informatie worden verzameld, en voor een onafhankelijke toets is het zelfs gewenst dat deze informatie alleen voor dit doel wordt verzameld, en er dus geen direct gebruik gemaakt wordt van informatie uit de vorige stadia.

#### *Conclusie*

Zoals uit het voorgaande blijkt is in elk van de vier stadia is de behoefte aan informatie anders. Het te ontwerpen meetsysteem dient toegesneden te zijn op de informatiebehoefte. Het meetsysteem dat is ontworpen in het ene stadium is dan ook niet zonder meer geschikt in een ander stadium.

### **3.2 Informatiebehoefte, meetdoelen en te meten variabelen**

In deze paragraaf zal de informatiebehoefte in elk van de vier stadia worden gekoppeld aan meetdoelen. Een meetdoel is de concreet en kwantitatief omschreven informatie die nodig is. Hiervan dient afgeleid te worden welke variabelen er gemeten moeten worden. Het meetdoel ligt dicht bij het technisch doel zoals beschreven in hoofdstuk 2, terwijl de informatiebehoefte tussen het managementdoel en het technisch doel inzit.

Bijvoorbeeld, een managementdoel zou kunnen zijn het verminderen van de wateroverlast. Een informatiebehoefte die hieruit voortkomt zou kunnen zijn informatie over het afvoerregime, waaruit weer het volgende meetdoel voortkomt: het vaststellen van de

maatgevende afvoer (herhalingstijd 1 maal per jaar). De te meten variabele is dan de afvoer (of de waterhoogte bovenstrooms van een meetstuw).

De informatiebehoefte, de meetdoelen en de te meten variabelen zijn in de volgende tabellen samengevat. Opgemerkt dient te worden dat de te meten variabelen weliswaar vaak in de drie stadia dezelfde zijn, maar dat de meetinspanning (dichtheid en frequentie) afhangt van de databewerking, en dus van het meetdoel.

#### *Stysteemverkenning*

Overall in Nederland is enige informatie ten aanzien van het watersysteem bekend. Tot op zeker schaalniveau is de geologische opbouw, de ligging van de waterlopen en de uitgemalen of ingelaten debieten bekend. Voor het vaststellen van de benodigde informatie kunnen we hiervan dus uitgaan. Tabel 1 geeft een overzicht van de informatiebehoefte, meetdoelen en te meten variabelen ten behoeve van de systeemverkenning.

*Tabel 1 Informatiebehoeften, meetdoelen en te meten variabelen voor de systeemverkenning*

Informatiebehoefte	Meetdoel	te meten variabele
karakterisatie dynamiek grondwater	Grondwater trappen (GxG) regiem curve extreme waarden temporele samenhang duurlijnen	Grondwaterstand in de tijd Grondwaterstand: gerichte opnamen
Vaststelling referentiesituatie	GVG oorspronkelijke situatie	Bodemtype, maaiveldhoogte
Inventarisatie grondwaterkwaliteit / transport	kwel / infiltratie patroon kwaliteit kwelwater grondwaterfluxen	diepe stijghoogte grondwaterstand verticale weerstand deklaag grondwatersamenstelling
Indeling in representatieve deelgebieden.	Ruimtelijke variabiliteit hydrologie Ruimtelijke variabiliteit bodem / geologie Ruimtelijke variabiliteit landgebruik	Grondwaterstand in de ruimte Geologie, bodem, geomorfologie (DTM)
Stuurbaarheid van het systeem	Response karakteristiek (neerslag/verdamping) neerslagafvoerrelaties invloed peilverandering op verandering grondwaterstand als functie van afstand tot waterloop meerwaarde neerslagvoorspelling voor sturing	Grondwaterstand Openwaterstand Neerslag/verdamping geologie en bodem
Afvoercapaciteit watergangen	maximale afvoer	Wandruwheid
Karakteristiek dynamiek afvoer watergangen	Q-h relaties	Openwaterstand Afvoer Wandruwheid
Karakterisatie kwaliteit van het open water	kwaliteit van het open water	Samenstelling van het open water
Karakterisatie dynamiek openwater	regiem curve, extreme waarden duurlijnen verhangen in kritische situaties	Openwaterstand

### Structurele aanpassing

Zoals gezegd is het ontwerp van structurele werken en sturingssystemen meestal gebaseerd op een of andere vorm van modelbeschrijving. Veel informatiebehoefte komt voort uit het verkrijgen van invoer of parameters voor deze modellen (zie Tabel 2).

Tabel 2 Informatiebehoeften, meetdoelen en te meten variabelen voor structurele aanpassing

informatiebehoefte	Meetdoel	te meten variabele
Voorspellingen alternatieve scenario's (grondwater model, oppervlaktewatermodel)	Modelijking Modelrandvoorwaarden waardebereik van modelinvoer	Parameterwaarde (afhankelijk van het gebruikte model) geometrie waterlopen wandruwheid geologische opbouw variabelen openwaterstand grondwaterstand stijghoogte invoer neerslag/verdamping
Bergingsvermogen	Waterbalans Bergingsvermogen oppervlaktewater Bergingsvermogen grondwater	profielen waterlopen openwaterstand maaiveldhoogte grondwaterstand
Vaststellen reactiesnelheid van het systeem	Modelijking Responsfuncties - Oppervlaktewater/grondwater - Neerslag/afvoer - Uitgemalen debiet/grondwater	Grondwaterstand Openwaterstand Uitgeslagen debiet Neerslag/verdamping

### Sturing

Het ontwikkelingstraject van een sturingssysteem kan in een aantal ontwerpstappen worden opgedeeld die altijd moeten worden doorlopen. De uit te voeren werkzaamheden per stap verschillen daarbij uiteraard per situatie. De stappen zijn:

- stap 1: initiatieffase
- stap 2: haalbaarheidsstudie
- stap 3: programma van eisen
- stap 4: ontwerp
- stap 5: realisatie
- stap 6: gebruik en evaluatie

De stappen worden niet als een lineair proces doorlopen. Het kan nodig zijn tijdens het proces eerdere stappen opnieuw te doorlopen.

Tijdens de eerste stap, de initiatieffase, moet de basis worden gelegd voor het sturingsproject. De eerste ideeën, meestal bij een persoon ontstaan, moeten worden verbreed door andere mogelijkheden te verkennen. In deze fase moet ook het ambitieniveau worden bepaald en de sturingsdoelstelling expliciet worden gemaakt.

Het doel van de tweede stap, de haalbaarheidsstudie, is het kwantificeren van de verwachte 'baten' van de sturing en het schatten van de kosten. Het gaat hierbij vooral om de *verhouding* kosten-baten. Een nauwkeurige raming van de kosten is in deze fase niet nodig en ook niet te geven.

Na uitvoering van de haalbaarheidsstudie wordt besloten over het 'go / no-go' voor de verdere ontwikkeling en realisatie van het sturingsysteem. Wanneer de haalbaarheid positief wordt beoordeeld, worden de verdere stappen doorlopen. Deze stappen zijn het opstellen van een programma van eisen, het ontwerp, de realisatie en het gebruik van het sturingsysteem.

Van al deze verschillende type metingen moet worden bepaald om welke grootheden het gaat, en op welke locaties, hoe lang en hoe frequent ze moeten worden gemeten. Dit rapport beschrijft de fasen waarin deze meetinspanning kan worden bepaald.

Een belangrijk element is dat de informatie beschikbaar moet zijn binnen het tijdbestek waar operationele maatregelen uitgevoerd moeten worden. Zie Tabel 3 voor de informatiebehoefte, meetdoel en te meten variabelen.

*Tabel 3 Informatiebehoeften, meetdoelen en te meten variabelen voor operationele sturing*

Informatiebehoefte	Meetdoel	te meten variabele
Initiatieffase	Vaststellen relevante processen Calibratie model	grondwaterstand openwaterstand neerslag/verdamping draaitijd gemalen stuwstanden
Haalbaarheidsstudie & Ontwerp Sturingsysteem	Ontwikkelen Sturingsmodel Schatten kosten en baten sturing	grondwaterstand openwaterstand neerslag(voorspelling) inzet gemalen stuwstanden
Gebruik sturingsysteem	Vaststellen actuele situatie Vaststellen gewenste situatie Bepalen sturingsacties	openwaterstand neerslag(voorspelling) toestand bedienbare middelen
Evaluatie sturing	Antwoord op vragen: was wateroverlast op plaats x en tijd y te voorkomen geweest door betere sturing? werkt het sturingsysteem? kan het beter?	grondwaterstand openwaterstand neerslag(voorspelling) inzet gemalen stuwstanden

### Evaluatie

Bij de evaluatie kunnen twee type informatiebehoefte worden onderscheiden (zie tabel 4):

1. Verifiëren of een bepaalde verwachte (en gewenste) verandering ook inderdaad optreedt. Bij voorbeeld 'komt de grondwaterstand op een bepaald niveau' of 'overschrijdt het oppervlaktewater niet een maximaal toelaatbaar niveau'. Hierbij is de meetinspanning doelgericht om de verwachte verandering vast te stellen. Periodieke rapportages (RWSR en in de toekomst mogelijk de EU Kaderrichtlijn) vallen strikt genomen buiten het kader van Waterlood. Toch ligt het voor de hand om in de evaluatie fase de meetinspanning van Waterlood te combineren met deze periodieke rapportages.
2. Controleren of er geen onverwachte (en ongewenste) veranderingen optreden. Het meten is hierbij vaak een steekproef.

Tabel 4 Informatiebehoeften, meetdoelen en te meten variabelen voor evaluatie

Informatiebehoefte	meetdoel	te meten variabele
A. Verificatie of het GGOR is gehaald	verandering in: <ul style="list-style-type: none"><li>- Grondwatertrappen (GxG)</li><li>- regiem curve</li><li>- duurlijnen</li><li>- grond- en openwaterkwaliteit</li><li>- openwaterfluxen</li></ul>	Wandruwheid openwaterstand in de tijd Grondwaterstand in de tijd grondwaterstand: gerichte opnamen openwaterstand in de tijd grond- en openwaterkwaliteit neerslag/verdamping
B. Controle ongewenste veranderingen	(uitblijven van) veranderingen in: <ul style="list-style-type: none"><li>- gemiddelde grond- en oppervlaktewaterstand</li><li>- grond- en openwaterkwaliteit</li><li>- extreme waarden in grond- en openwaterstand</li></ul>	Grond- en openwaterstand in de tijd grond- en openwaterkwaliteit neerslag/verdamping

### 3.3 Illustratie aan de hand van twee voorbeeldgebieden

In deze paragraaf illustreren we wat de stadia van informatiebehoefte zijn voor een tweetal gebieden. Hierbij sorteren we al een beetje voor op hoofdstuk 4 waar voor deze gebieden een aantal meetnetstrategieën voor elk van de stadia van informatiebehoefte worden ontworpen. In deze paragraaf volgt dus reeds de beschrijving van beide proefgebieden en welke gegevens daar beschikbaar zijn.

#### Voorbeeldgebied Reeuwijk

##### Gebiedsbeschrijving

Er is recent onderzoek gedaan ten behoeve van de herinrichtingsgebied Reeuwijk. Een uitgebreide beschrijving van het systeem, beschikbare gegevens en doelstellingen is te vinden in Gehrels et. al. (2000). Het herinrichtingsgebied Reeuwijk (zie Figuur 2) is centraal gelegen in de provincie Zuid Holland en bestaat uit drie poldergebieden:

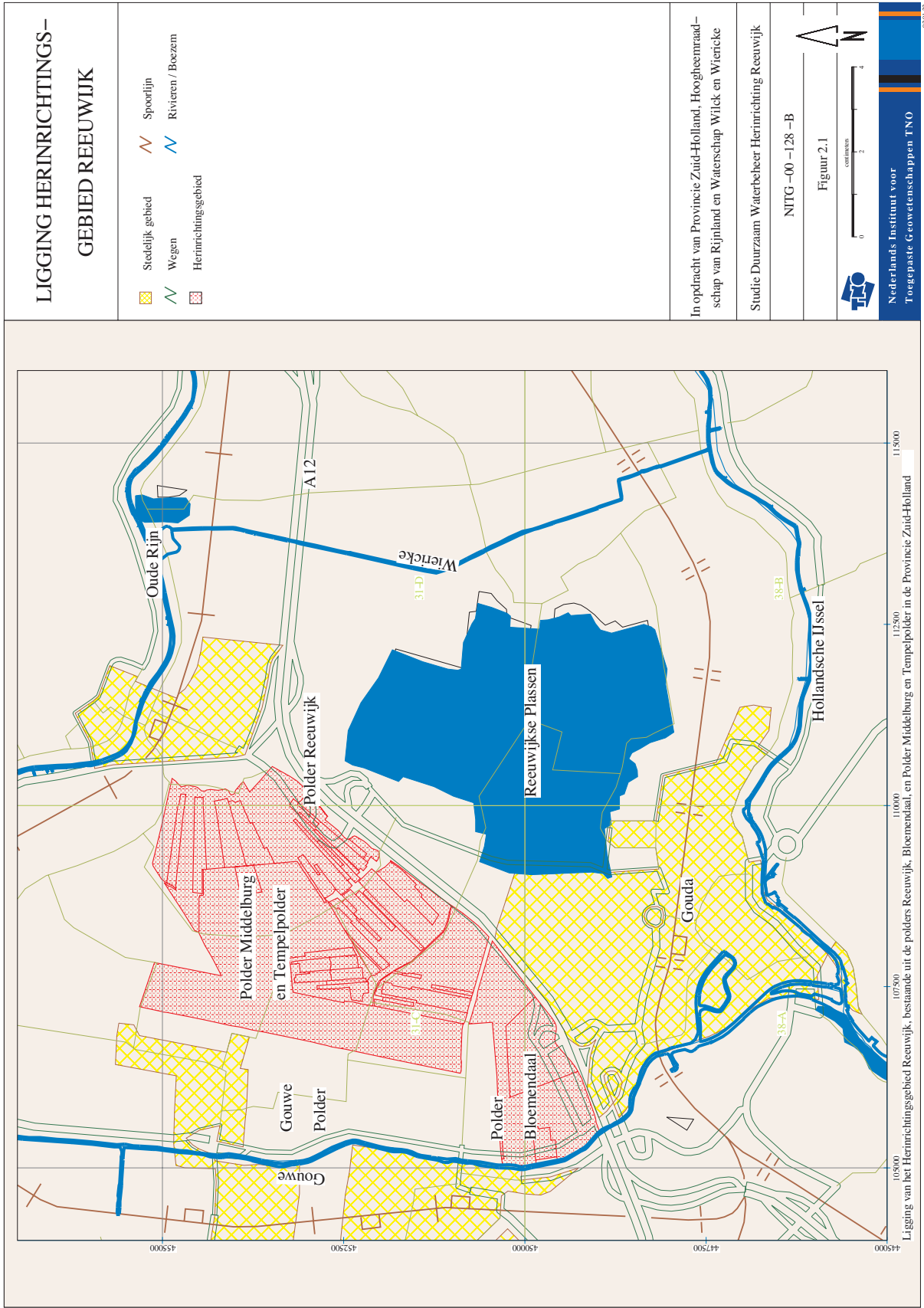
- Polder Middelburg en Tempelpolder; Dit is een laaggelegen droogmakerij van 519 ha. in gebruik als graslandpolder. Het oostelijke gedeelte is voor een groot deel in gebruik voor sierteelt. Het polderpeil wordt gehandhaafd op -5.60 mNAP.
- Polder Reeuwijk. Deze polder is 2900 ha groot, waarvan 1200 ha Reeuwijkse plassen. Het streefpeil bedraagt -2.22 mNAP, de gemiddelde drooglegging 0.40 m.

- Polder Bloemendaal. Dit is een 116 ha. grote polder met een streefpeil van -2.20 mNAP beperken van de inlaat van gebiedsvreemd water;
- tegengaan van versnippering in het waterbeheer
- tegengaan van verzilting
- beperken van bodemdaling
- voor het stedelijk gebied, afwaterend op landelijk gebied met een streefpeil van -2.27 mNAP.

Op dit moment is men in de fase van scenario's doorrekenen en vergelijken. Er zijn nog geen structurele aanpassingen gedaan. Belangrijke uitgangspunten voor het herinrichtingsplan zijn:

Maatregelen die voor het herinrichtingsgebied worden overwogen zijn onder meer:

- aanleg 300 ha waterbekkens;
- vervanging van bestaande waterinlaat door een andere;
- vervanging van huidige vaste zomer- en winterpeil door een bandbreedte. Voor de polders Reeuwijk en Bloemendaal betekent dit dat een bandbreedte van 40 cm toestaan wordt. De peilen worden dus vrijgelaten tussen -2.00 mNAP en -2.40 mNAP. Voor de Reeuwijkse plassen geldt een bandbreedte van 10 cm, dus de peilen worden vrijgelaten tussen -2.15 mNAP en -2.25 mNAP.
- opheffing alle onderbemalingen;
- ophoging van laaggelegen percelen met baggerslib.



Figuur 2 herinrichtingsgebied Reeuwijk (uit: Gehrels et al., 2000)

### *Beschikbare informatie*

In Gehrels et. al. (2000) is een overzicht gegeven van beschikbare informatie. In de uitwerking van hoofdstuk 4 is vooral gebruik gemaakt van topografische kaarten, ligging van waterlopen en plassen en grondwatermeetreeksen. Daarnaast is er veel informatie beschikbaar ten aanzien van de geologische opbouw van de ondergrond, geohydrologische parameters, debieten van oppervlaktewater en chemische samenstelling van grond- en oppervlaktewater.

### *Wat betekenen de vier stadia in het voorbeeldgebied Reeuwijk*

#### *Systeemverkenning*

In de systeemverkenning heeft men vooral behoefte aan inzicht in het huidige waterhuishoudkundige systeem. Dit betreft:

- karakterisering dynamiek grondwater,
- karakterisatie dynamiek openwater,
- bergingsvermogen.

Uit de systeemverkenning is duidelijk geworden dat er in de huidige situatie (te) veel gebiedsvreemd water ingelaten wordt. De karakterisering van de dynamiek van grond- en oppervlaktewater hebben geleid tot het inzicht dat de oppervlaktewaterpeilen wellicht enigszins verhoogd kunnen worden en dat de onderbemalingen opgeheven kunnen worden.

#### *Structurele aanpassing*

De gewenste situatie omvat onder meer het verminderen van inlaat van gebiedsvreemd water, het beperken van verzilting en het beperken van bodemdaling. Om dit te realiseren zijn de volgende constructieve maatregelen voorgesteld:

- de aanleg van waterbekkens
- vervanging van de waterinlaat

#### *Sturing*

Naast constructieve maatregelen is ook het aanpassen van de sturing van het watersysteem aan de orde. Meer specifiek voor het:

- vullen van de waterbekkens;
- aflaten van water uit de bekkens;
- handhaven van waterstanden binnen de vastgestelde bandbreedte (dynamisch peilbeheer);
- openen en sluiten van het waterinlaatpunt;

Of dit al dan niet automatisch (zonder tussenkomst van de waterbeheerder) gebeurt is afhankelijk van de implementatie van de sturingsregels.

#### *Evaluatie*

De operationele sturing heeft ten doel de gewenste situatie zo goed mogelijk te realiseren. Waarschijnlijk zal dat nooit helemaal lukken. Derhalve dient dit stadium, Evaluatie, om vast te stellen in hoeverre de gewenste situatie gerealiseerd is. Ook hiervoor is informatie nodig. In het geval van Reeuwijk dient bijvoorbeeld geëvalueerd te worden of er minder water is ingelaten, in hoeverre het zomer- en winterpeil zich binnen de bandbreedte heeft bewogen, in hoeverre de grondwaterstand binnen de gewenste bandbreedte is gebleven, of de kwel is afgenomen en of de verzilting is verminderd.



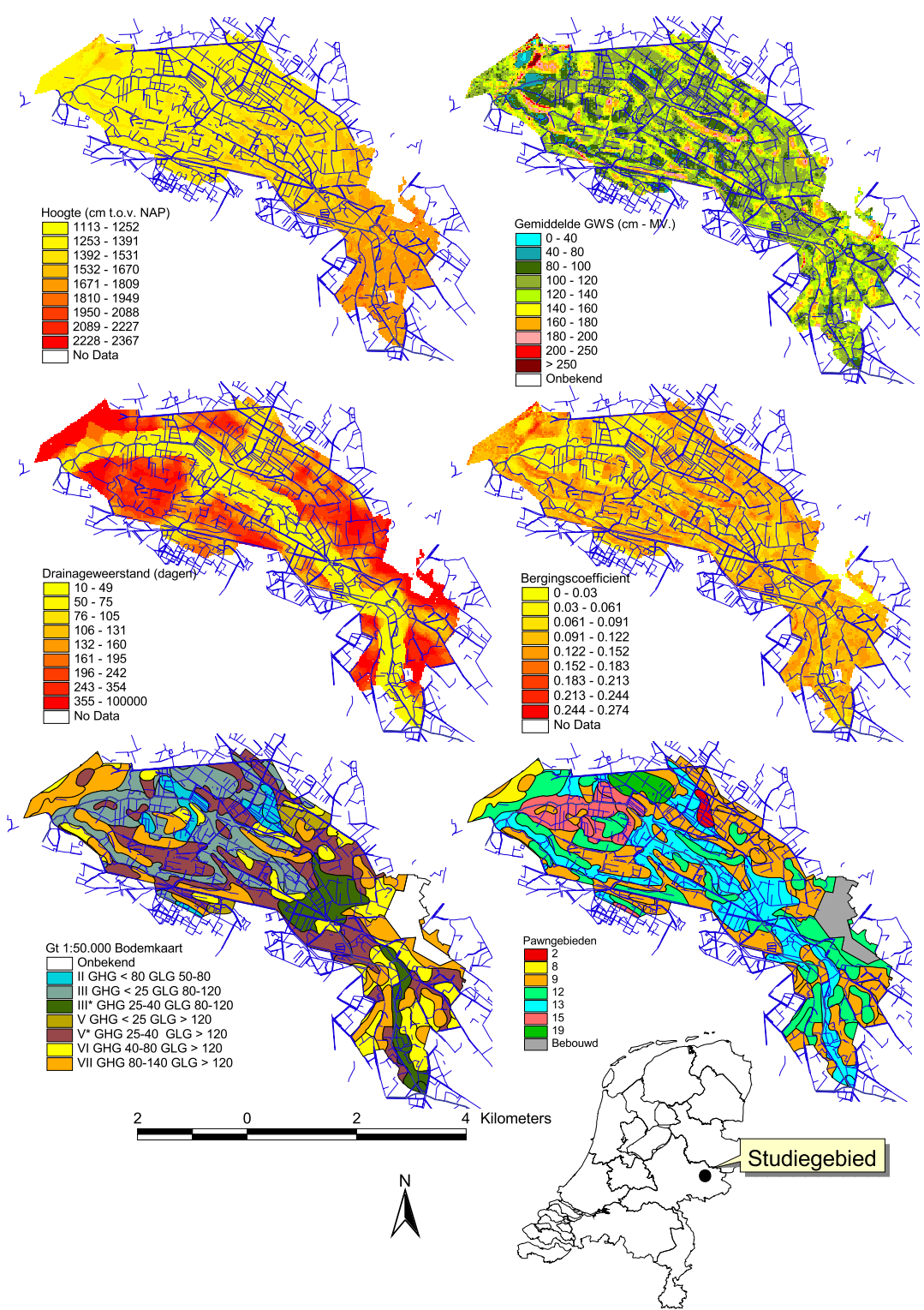
## *Voorbeeldgebied Baakse Beek*

### *Gebiedsbeschrijving*

Het voorbeeldgebied (Figuur 3) omvat de gronden liggend aan de Baakse Beek tussen Ruurlo en Vorden in oost Gelderland en is ca 2000 ha groot. Geologisch bestaat het gebied uit dekzandafzettingen (Formatie van Twente) op een watervoerend pakket dat voornamelijk wordt gevormd door grofzandige en grindige rivierafzettingen van de Formatie van Kreftenheye. De dikte van de dekzandafzettingen varieert tussen de 3,5 m bij Vorden tot 7,5 m bij Ruurlo. De doorlatendheid van deze afzettingen wordt geschat op ca 1,5 m/d. De transmissiviteit van het watervoerend pakket varieert tussen de 1400 m<sup>2</sup>/d bij Vorden tot ca 1000 m<sup>2</sup>/d bij Ruurlo (doorlatendheid afzettingen ca 25 m/d).

Op de 1:50000 bodemkaart is het beekdal niet overal even goed te onderscheiden. Uit recente 1:10000 detailkarteringen (Kleier, 2001) blijkt echter dat de Baakse Beek overal in het beekdal ligt. De bodems in het beekdal bestaan voornamelijk uit rivierkleigronden (soms met minerale eerdlaag), beek- en gooreerdgronden. Aanliggend het beekdal vinden we droge podzolgronden en enkeerdgronden. De gronden in het beekdal zijn op de 1:50000 bodemkaart gekarteerd als Gt II, II en III\*. De drogere zandgronden verder van de beek zijn gekarteerd als Gt V\* tot VII.

Baakse Beek is geen herinrichtingsgebied waar nu reeds een reeks maatregelen zijn gepland. We beschouwen het als een gebied waar uitgaande van de huidige situatie en een gepland kaart van functies de waterhuishouding zal worden aangepast volgens de Waternoodsystematiek.



*Figuur 3. Basisgegevens voor het Baakse Beekgebied en de daaruit afgeleide drainageweerstand en effectieve bergingscoëfficiënten.*

#### *Beschikbare gegevens*

Figuur 3 geeft een overzicht van de basisgegevens die gebruikt zijn. Deze zijn:

- Een digitaal hoogtemodel van 25×25 m resolutie uit het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN);
- Een 25×25 m resolutie kaart met gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG). Figuur 1 toont de gemiddelde grondwaterstand berekend als  $(GHG + GLG)/2$ ;
- Een kaart met daarop de belangrijkste waterlopen ingedeeld naar 4 klassen: watervoevend: breedte > 6 m, 3-6 m, < 3 m en droogvallend (greppels);
- bodemkaart 1:50000 vertaalt naar bodemfysische (PAWN) eenheden (Wösten e.a., 1988);
- grondwatertrappenkaart behorende bij 1:50000 bodemkaart.

Figuur 3 toont ook nog afgeleide kaarten van de effectieve porositeit en de drainageweerstand. Hier komen we op terug in hoofdstuk 4.

#### *Wat betekenen de vier stadia in het voorbeeldgebied Baakse Beek*

##### *Systeemverkenning*

Om een goed inzicht te krijgen in het hydrologisch systeem van de Baakse Beek moeten tenminste de volgende informatiebehoeftes worden voorzien:

- karakterisering dynamiek grondwaterstand;
- karakterisering dynamiek oppervlaktewaterstand;
- karakterisering dynamiek afvoer en vastleggen afvoercapaciteit watergangen;
- karakterisering grondwaterkwaliteit;
- karakterisering oppervlaktewaterkwaliteit.

Op basis van maaiveldhoogten en onderdelen 2 en 3 kan men uitspraken doen over de inundatiefrequentie van lage gronden. Op basis van inundatiefrequentie, onderdelen 1 en 4 in combinatie met de bodemkaart kan iets gezegd worden over de potenties voor natuurontwikkeling, terwijl de inundatiefrequentie in combinatie met onderdeel 1 en de bodemkaart inzicht geven in de potenties voor landbouw en recreatie. Als aanvullende inventarisaties kan men in deze fase nog denken aan een vegetatiekarteringen en het vastleggen van de referentiesituatie natuur.

In termen van te meten variabelen betekenen bovenstaande informatiebehoeften dat grondwaterstandreeksen moeten worden gemeten op selecte locaties en dat op een tweetal tijdstippen in het jaar gerichte opnamen van de grondwaterstand worden genomen. Verder zullen op een beperkt aantal locaties grondwatermonsters worden genomen en chemisch worden geanalyseerd. Op een aantal locaties langs de watergangen (in ieder bij het uitstroompunt van de hoofdwaterloop) worden meetstuwen geplaatst en op deze plekken worden een aantal malen per jaar watermonsters voor chemische analyse genomen. Het ontwerp van Meetconfiguraties (waar en wanneer te meten) wordt beschreven in deel II. In het algemeen zal gelden dat in een systeem zoals de Baakse Beek dat voor het grootste gedeelte snel reageert op het neerslagoverschot en variaties in oppervlaktewaterpeil er minimaal een jaar lang gemeten moet worden voordat de gegevens worden geanalyseerd om aan de informatiebehoeften te kunnen voldoen.

### *Structurele aanpassing*

Na de systeemverkenning (dus na minimaal een jaar meten) zal een belangrijk gedeelte van de Waternoodsystematiek kunnen worden uitgevoerd. Het AGOR zal worden vastgesteld, bijvoorbeeld via een GD-kartering voor het grondwatergedeelte. Op basis van het AGOR, de eisen van landbouw, natuur en recreatie aan het grondwater- en oppervlaktewaterregime en de doeltypenkaart kunnen kaarten worden gemaakt van de doelrealisatie en scenario's worden voorgesteld om de waterhuishouding te verbeteren, d.w.z. de doelrealisatie voor alle functies te verhogen.

Om het effect van elk scenario op de waterhuishouding (het verwachte grond en oppervlaktewaterregime of VGOR) te kunnen analyseren, alsmede de daarbijbehorende doelrealisatie, is het waarschijnlijk dat een (regionaal) grondwatermodel zal worden gebouwd. Een alternatief is dat met eenvoudige rekenregels of ééndimensionale modellen alleen de gebieden waar ingrepen worden gepland verder worden geanalyseerd. De gebruikte modellen zullen in het algemeen eerst op de huidige situatie moeten worden geijkt, alvorens er verder mee gewerkt wordt om voorspellingen te doen van effecten van geplande ingrepen. Vaak zal het voldoende zijn om dit te doen op de analyses die uit de systeemverkenning zijn gerold (bijvoorbeeld ijking op het AGR via de bijbehorende GD-kaart). Het is echter ook denkbaar dat hierin de informatie ontbreekt om bepaald parameters te kunnen vaststellen die van cruciaal belang zijn voor het correct voorspellen van ene scenario. Men kan bijvoorbeeld denken aan een intreeweerstand van een waterloop die nodig is om de drainageweerstand als functie van drainagedichtheid vast te stellen, of het verloop van de wandruwheid door het jaar ten behoeve van analyses van de afvoercapaciteit. In deze gevallen zullen aanvullende metingen of zelfs veldexperimenten nodig zijn om deze parameters te kunnen vaststellen of de modellen hiervoor te kunnen ijken. In geval van intreeweerstand kan men denken aan het meten van afvoeren boven en benedenstreams van een pand en het meten van grondwaterstanden in een raai loodrecht op het pand onder afvoeromstandigheden (drainage) of omstandigheden van opgezet oppervlaktewaterpeil (infiltratie).

### *Sturing*

Bij het bereiken van het gewenste grond- en oppervlaktewaterregime (GGOR) speelt ook sturing een belangrijke rol. De sturing moet immers de gemalen en stuwen zodanig manipuleren dat de gewenste waterstanden worden gerealiseerd. Met sturing kan worden ingespeeld op knelpunten in het watersysteem zoals een te krap gedimensioneerde waterloop. Het is echter ook een middel om in te spelen op de variabiliteit in systeembelasting. Door bijvoorbeeld vroegtijdig een stuw op te zetten kan water vast worden gehouden op plaatsen waar dat nodig is.

In Hoofdstuk 4 worden de eerder genoemde ontwerpstappen doorlopen voor het ontwerp van een sturingssysteem in de case Reeuwijk. Het gaat hier om sturing op openwaterstanden die leiden tot een meer dynamisch peilbeheer.

In een gebied zoals de Baakse Beek is met name de grondwaterstand een belangrijke variabele. Als het gewenste grondwaterregime (GGR) is vlakdekkend is gedefinieerd in termen van een regimecurve met spreiding, dan is het zaak de oppervlaktewaterstand zo te sturen dat de grondwaterstanden zo goed mogelijk binnen de spreidingsgrenzen blijven.

- Er zijn dan twee vragen actueel:
- op welke variabele moet ik sturen?
- wat zijn de sturingsregels: hoe moet ik reageren met mijn stuwen, en gemalen als ik opmerk dat op één of meer locaties de waarde van de stuurvariabele uit de pas begint te lopen?

De tweede vraag is een regeltechnisch probleem. De eerste vraag heeft betrekking op meetnetontwerp en is dus relevant voor deze studie. In deel II is uitgewerkt hoe een meet-configuratie zou kunnen worden ontworpen voor sturing op de grondwaterstand. Voor een toepassing en de motivatie van de gekozen ontwerpmethodiek verwijzen wij naar Bierkens en Massop (1999).

#### *Evaluatie*

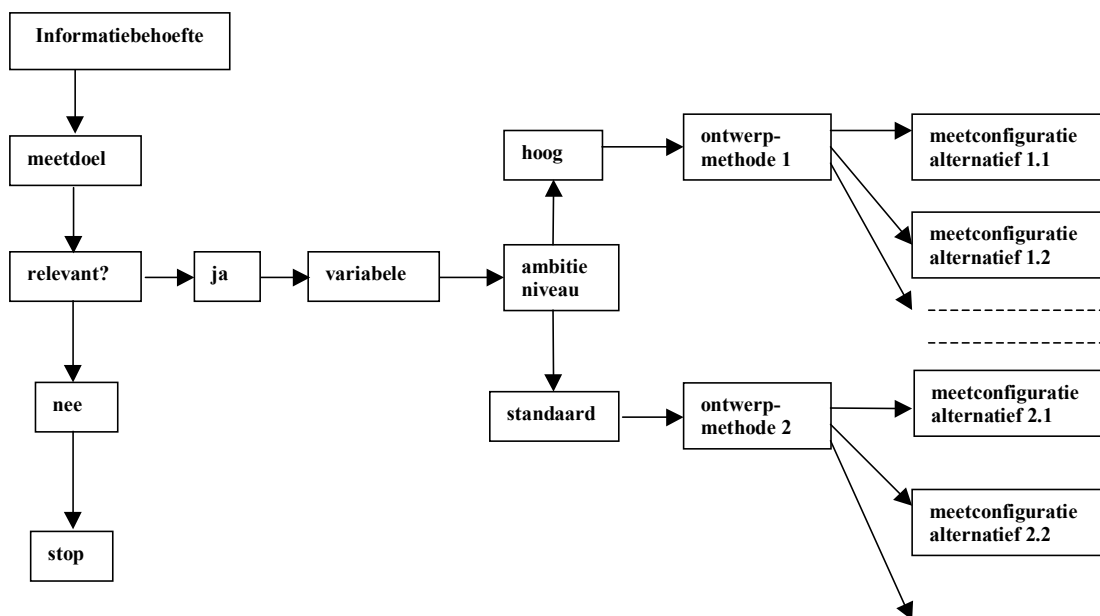
Nadat het waterbeheerssysteem ten behoeve van het handhaven het GGOR een voldoende tijd (tenminste 1 jaar plus de insteltijd) actief is geweest kan geëvalueerd worden of de doelstellingen gehaald zijn. Deze evaluatie is daarna een continue voortgaand proces, waarmee het meetsysteem voor de evaluatie over gaat in een soort monitoring-systeem aan de hand waarvan bij ongewenste veranderingen structurele aanpassingen kunnen worden gedaan.

*Het is van belang om te beseffen dat een meetsysteem ter evaluatie nooit locaties mogen bevatten die zijn gebruikt bij één van de voorgaande stappen (systeemverkenning, structurele aanpassing, operationele sturing). Als dit wel het geval is dan is een eerlijke toetsing niet mogelijk. Men kan dan immers de zaak zo sturen dat het op de punten voor operationele sturing aardig klopt, terwijl er elders in het gebied grote afwijkingen tussen de gewenste en de gerealiseerde situatie optreden. Deze regel moet in ieder geval voor het grondwater worden nageleefd. Voor oppervlaktewater wordt dit praktisch erg moeilijk omdat het veel te duur zou zijn om nieuwe meetinrichtingen in te richten. Men kan in dat geval zwak toetsen op bestaande meetinrichtingen en met zekere frequentie een sterke maar globale toetsing uitvoeren door bijvoorbeeld op aselechte locaties en tijdstippen (zie De Grujter, 2000) debietmetingen (bijv met de Ott-molen) en waterdieptemetingen te verrichten en dit te combineren met het nemen van watermonsters.*

Als we ons hierna beperken tot de grondwaterstand, dan geldt dat om een zuivere schatting te krijgen voor het gebied, deze aanvullend op aselechte (via loting verkregen) locaties moet worden gemeten. Er wordt aangenomen dat het in de meeste gevallen meer dan voldoende is om op deze locaties handmatig op de 14e en de 28e te meten. Als evaluatie uitgroeit tot permanente monitoring dan is het installeren van drukopnemers een optie. In deel II wordt een ontwerpmethodiek beschreven om te kunnen bepalen hoeveel locaties voor een gebied nodig zijn om met voldoende nauwkeurigheid te kunnen toetsen of het GGR is bereikt. Bij deze methodiek is er van uit gegaan dat de locaties aselechte worden gekozen.

### 3.4 Een ontwerpmethode van meetsystemen voor Waternood

De conceptuele basis voor de voorgestelde meetmethode is de beslisboom in Figuur 4. Deze beslisboom wordt, na uitwerking opgenomen in het instrumentarium voor Water-nood. Het is de bedoeling dat voor elk stadium van informatiebehoefte de beslisboom een aantal malen wordt doorlopen.



Figuur 4 Beslisboom voor ontwerp meetsystemen waternood

Het ontwerp van een meetsysteem voor Waternood bestaat dan uit het identificeren van de volgende stappen:

#### *Informatiebehoefte en meetdoel*

Deze volgen uit een analyse van de tabellen uit paragraaf 3.2. In deze paragraaf wordt een dergelijke analyse gegeven voor twee voorbeeldgebieden. Als voorbeeld nemen het “het vaststellen van een verandering in de voorjaarsgrondwaterstand (GVG) in een gebied”, een meetdoel dat hoort bij de informatiebehoefte “verificatie of het GGOR is gehaald” in het stadium evaluatie.

#### *Relevantie*

Voordat er een meetsysteem wordt ontworpen dient de vraag gesteld te worden of het doen van waarnemingen relevant is voor de doelstellingen van het waterbeheer en – beleid. Bijvoorbeeld, het vaststellen van de referentiesituatie natuur in een gebied in de Zuidelijk Flevoland is niet relevant, zodat deze informatiebehoefte en aanverwant meetdoel niet relevant zijn. Het vaststellen van de verandering van GVG is in het algemeen wel een relevant meetdoel.

#### *Te meten variabele*

Voor een bepaald meetdoel kunnen verschillende variabelen nodig zijn, elk op hun eigen manier waargenomen, en elk met een eigen meetsysteem. In ons geval moeten we in ieder geval de grondwaterstand meten, een voldoende tijd voor en een voldoende tijd na de maatregelen.

### *Ambitieniveau*

Het ambitieniveau zegt iets over de mate van detail waarop de informatie beschikbaar moet zijn. In het algemeen zal dit samenhangen met de financiële belangen en budgetten en/of met de risico's die men loopt als gevolg van (te) grove informatie. In deze opzet worden twee niveaus onderscheiden, te weten het standaardniveau en een hoog niveau. In ons voorbeeld zou het standaardniveau bijvoorbeeld kunnen zijn het steekproefsgewijs vaststellen of de GVG is veranderd (dus een ruimtelijk gemiddelde verandering), terwijl het hoge niveau zou kunnen inhouden dat een ruimtelijk gedifferentieerd beeld (een kaart) wordt gemaakt.

Ter illustratie kan een voorbeeld uit de politiek. Bij een standaard ambitieniveau neemt men genoegen met een enquête om de mening van het volk te verkrijgen. Bij een hoog ambitieniveau schrijft men algemene verkiezingen uit.

### *Ontwerpmethode*

Dit is het voorschrift waarmee de meetconfiguratie wordt ontworpen. Het zal duidelijk zijn dat een ontwerpmethode bij een hoog ambitie niveau geavanceerder kan zijn dan bij een standaard ambitie niveau. In ons voorbeeld kan een standaard ambitieniveau het kunnen van een het verzamelen van grondwaterstandreeksen op een beperkt aantal aselekt gekozen locaties, terwijl het hoge ambitieniveau zou kunnen bestaan uit het zowel het verzamelen van een beperkt aantal reeksen als ook het uitvoeren van gerichte opnamen ten behoeve en een nieuwe GVG-kartering.

### *Alternatief meetconfiguratie*

Binnen een ontwerpmethode zijn meestal een aantal keuzen te maken. De keuzen leiden tot verschillende meetnetconfiguraties. Zo kan men op verschillende manieren aselekt locaties uitkiezen en zijn er verschillende manieren om via (geo)statistische methoden met gebruikmaking van hulpinformatie optimale meetlocaties en meettijdstippen te selecteren.

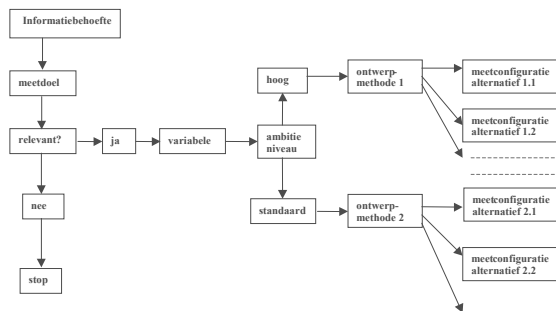
## 4. Praktijkvoorbeelden

De gepresenteerde opzet voor het ontwerpen van meetsystemen voor Waterlood zal in dit hoofdstuk worden geïllustreerd door deze toe te passen in twee voorbeeldgebieden. Deze gebieden, een poldergebied bij Reeuwijk en een dekzandgebied in de Achterhoek, genaamd “Baakse Beek”. Een beschrijving van deze gebieden en de reeds beschikbare informatie die kan worden gebruikt bij het ontwerp van de meetsystemen vindt u in paragraaf 3.3. Voor elk van de fasen van informatiebehoefte zal de beslisboom van Figuur 4 worden doorlopen voor één type van informatiebehoefte en één meetdoel. Voor dit meetdoel zal een meetconfiguratie worden ontworpen. Een uitgebreide beschrijving van de toegepaste ontwerpmethodes is terug te vinden in deel II, het Methodenboek.

### 4.1 Systemverkenning

Voor het stadium “Systemverkenning” wordt een meetdoel uitgewerkt voor het voorbeeldgebied de Baakse beek. We zullen ons hierbij beperken tot het grondwater. Er een hoog en standaard ambitieniveau tot in detail uitgewerkt.

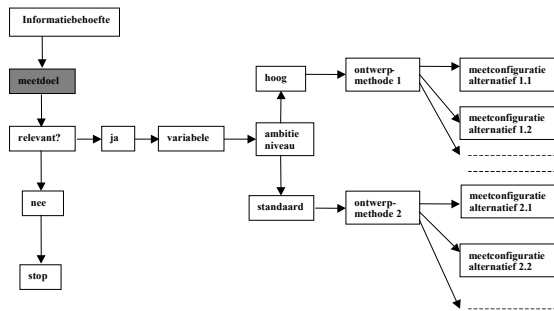
#### 4.1.1 Doorlopen beslisboom



#### *Informatiebehoefte*

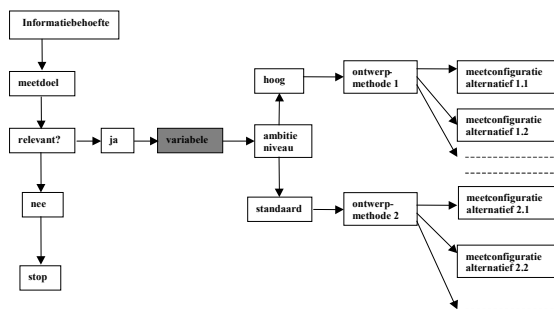
Tijdens de systeemverkenning is er de behoefte om informatie te verzamelen over de hydrologie van het toepassingsgebied. Een onderdeel hiervan is de karakterisering van de dynamiek van het grondwater. Hier concentreren we ons in deze toepassing.





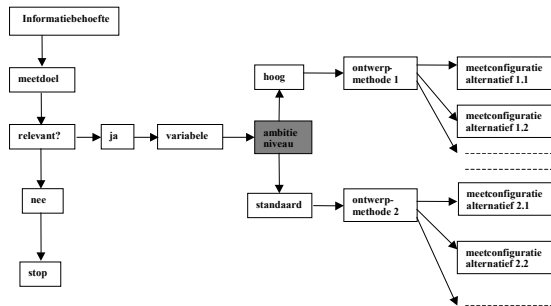
### Meetdoel

Meetdoelen die voortvloeien uit de informatiebehoefte kunnen variëren van het karakteriseren van de grondwaterdynamiek op een aantal representatieve locaties tot en met het karakteriseren van de grondwaterdynamiek via een vlakdekkende GD-kartering/actualisatie waaruit het actueel grondwaterregime volgt (Werkgroep Waterlood, 2001). In feite liggen beiden in elkaars verlengde. Een GD-kartering maakt gebruik van tijdreeksen van de grondwaterstand die minstens een jaar gemeten zijn en een goed overzicht geven van de variatie in grondwaterstand en grondwaterstands-dynamiek in het gebied. Dus door vooraf aan een GD-kartering de grondwaterdynamiek te karakteriseren op representatieve locaties ontstaat een meetnet dat als basis kan dienen voor een GD-kartering. Na een periode meten (tenminste een jaar, of langer als de responstijd langer dan een jaar is) kan een gerichte opname gedaan worden. De tijdreeksen en de gerichte opname vormen samen met het AHN-bestand de basis voor de GD-kartering. In het volgende concentreren we ons op het verzamelen van tijdreeksen van de grondwaterstand op representatieve locaties.



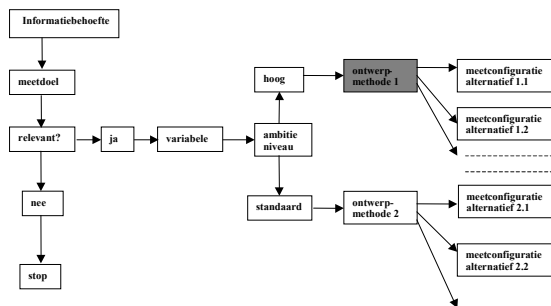
### Te meten variabele

De te meten variabele is dus de grondwaterstand in de tijd op een aantal representatieve locaties. Om iets definitiefs te zeggen over de dynamiek van de grondwaterstand op een representatieve locatie is het van belang dat voldoende lang wordt gemeten. Uitgaande van een frequentie van minimaal twee maal per maand betekent dit langer dan de responsietijd en, als deze korter is dan een jaar, ten minste een jaar (Knotters en Bierkens, 1999). In het Baakse-Beekgebied, zeker in het westen, geldt overigens dat via de doorlatende Kreftenheye formatie er de IJsselstand ook merkbaar kan zijn in de grondwaterstandreeksen. Naast het neerslagoverschot moet dan ook de IJssel als verklarende variabele meegenomen worden. Om dit te kunnen doen moet men tenminste één hoog water hebben gehad gedurende de opname van de tijdreeks.



### Ambitieniveau

In deze studie zullen een meetconfiguratie voor zowel een hoog als een standaard ambitieniveau worden uitgewerkt (zie ook deel II).



### Ontwerpmethode

Voor het hoge ambitieniveau kan als ontwerpmethode methode 1.1 dienen waarbij representatieve locaties worden gekozen op basis van geschatte responstijden. Voor het standaard ambitieniveau (methode 1.2) worden representatieve locaties gekozen op basis van maaiveldhoogte.

## 4.1.2 Toepassing ontwerpmethode op de case Baakse Beek

### Hoog ambitieniveau

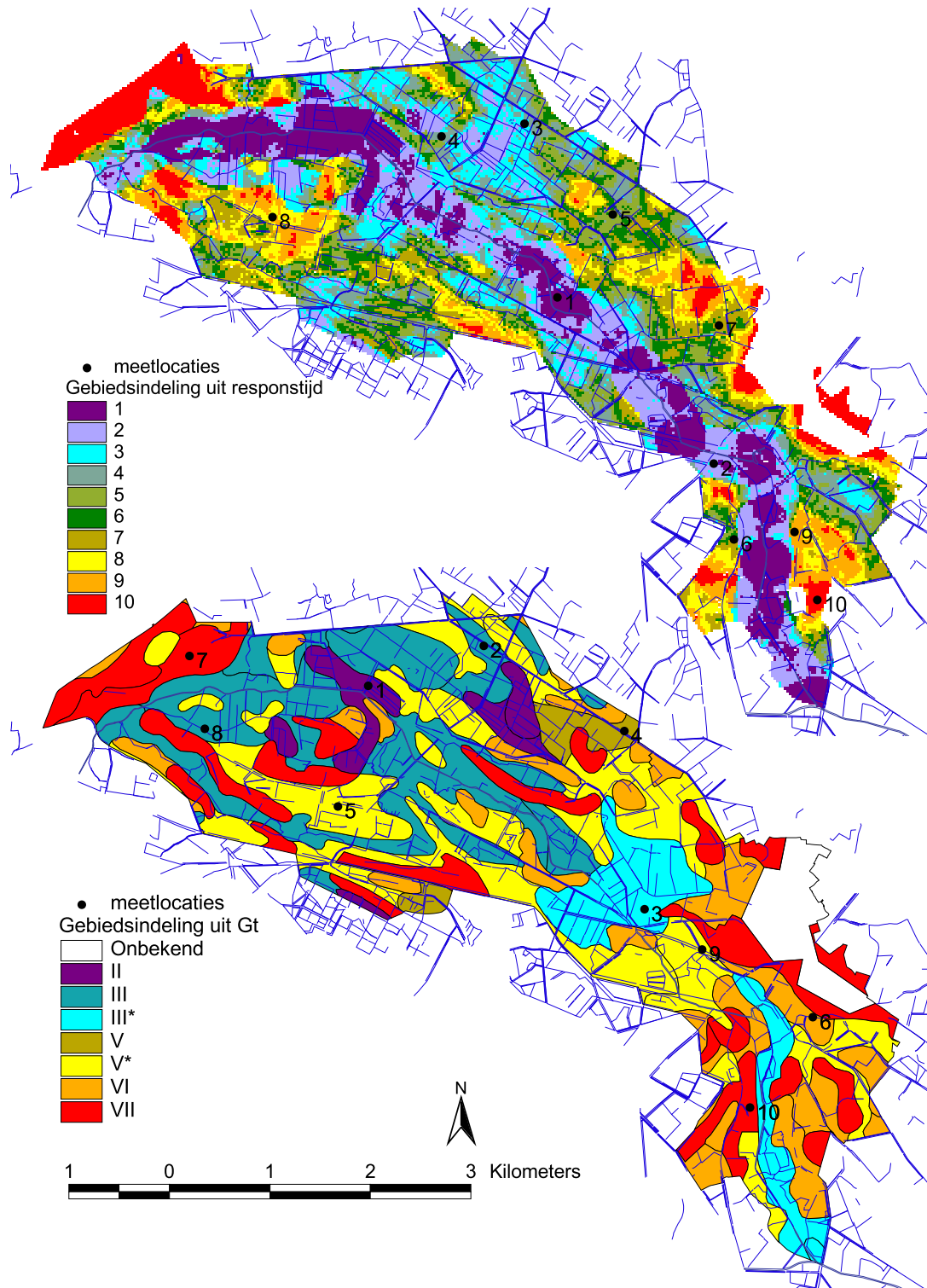
We beginnen met de uitwerking van het hoge ambitieniveau. De toegepaste methode staat uitgebreid beschreven als methode 1.1 in de bijlage van deel II.

Allereerst is een schatting gemaakt van de gemiddelde grondwaterstand  $h_{gem}$ . In de meeste gevallen is er alleen een bestaande Gt-kaart 1:50000 aanwezig (zie Figuur 3 onderaan). In dat geval kan de gemiddelde grondwaterstand worden geschat als een representatieve waarde per GT-klasse. In ons geval was er reeds een recente Gt-actualisatie geweest en is de gemiddelde grondwaterstand berekend als het gemiddelde van de GHG en de GLG op een pixel. Figuur 3 geeft het resultaat.

De drainageweerstand  $\gamma$  is geschat via de formule van Ernst (Ernst, 1983; zie bijv. Van der Gaast en Stuyt, 2000). De benodigde geohydrologische opbouw is ontleend uit de hydrotype-indeling van Nederland (Massop e.a., 1997), waarbij de transmissiviteit van het watervoerend pakket en de dikte van de dekzandafzettingen zijn bepaald via lineaire interpolatie tussen Ruurlo en Vorden. Er is gewerkt met vier typen waterlopen: breedte  $> 6$  m, 3-6 m,  $< 3$  m en droogvallend. De drainageweerstand is berekend onder de veronderstelling dat alle waterlopen water voeren. Per type zijn standaardmaten genomen voor natte omtrek en slootdiepte (Bierkens en Massop, 2000). Voor de intreeweerstand is 1 dag

genomen. De slootafstand is bepaald voor 25x25 m cellen via de slootdichtheid die is bepaald binnen zoekstraal van 250 m met de cel als middelpunt. Figuur 3 geeft de resulterende drainageweerstand in het gebied.

De effectieve porositeit  $\phi$  is geschat als het percentage met lucht gevulde poriën tussen de gemiddelde grondwaterstand en het maaiveld, uitgaande van een evenwichtsvochtprofiel. Dit is berekend met het model CAPSEV (Wesseling, 1991). De bodemfysische opbouw is ontleend aan een vertaling van de 1:50000 bodemkaart naar zogenaamde bodemfysische bodemeenheden (PAWN-eenheden, Wösten e.a., 1988). Deze bestaan uit standaardprofielen die weer zijn opgebouwd uit de bouwstenen van de Staringreeks (Wösten e.a., 1994). De aldus berekende effectieve porositeit wordt getoond in Figuur 3.



*Figuur 5 stratificatie in homogene gebieden en geselecteerde representatieve locaties voor het Baakse Beekgebied onder het hoge ambitieniveau (bovenste figuur) en het standaard ambitieniveau (onderste figuur)*

De parameters om de dynamiek van de grondwaterstand te beschrijven zijn nu bekend: de gemiddelde grondwaterstand  $h_{gem}$ , de stijging per cm/d neerslagoverschot  $b_1 = \gamma$  en de karakteristieke responstijd  $b_2 = 3\phi\gamma$ . De volgende stap is om per stratum de locatie met de mediane waarden van  $h_{gem}$ ,  $b_1$  en  $b_2$  te nemen. Stratificatie gebeurt op basis van geologische en hydrologische eigenschappen. De geologie is geen onderscheidend criterium in dit gebied omdat deze overal gelijk is. Er is daarom gekozen om te stratificeren op basis van de belangrijkste parameter, de responstijd zelf. We hebben besloten om 10 strata van ongeveer gelijke oppervlakte te onderscheiden, hetgeen neerkomt op 1 locatie per 200 ha. De bovenste figuur in Figuur 5 geeft de 10 klassen weer naar toenemende karakteristieke responstijd. De statistieken van de responstijden per stratum staan vermeld in Tabel 5. Bij het kiezen van de representatieve locaties per stratum is naast het kiezen van locaties met waarden van  $h_{gem}$ ,  $b_1$  en  $b_2$  dicht bij de mediane waarden er ook op gelet dat de locatie in een voldoende groot aaneengesloten areaal van het stratum ligt. Daarnaast is rekening gehouden met spreiding van de locaties over de maaiveldhoogten en het waarborgen van een voldoende ruimtelijke spreiding. Figuur 2 geeft ook de gekozen locaties weer. De berekende eigenschappen op deze locaties worden gegeven in Tabel 6.

Tabel 5 Statistieken van responstijden voor 10 strata (hoog ambitieniveau)

Stratum	Min	Max	Gemidd.	St. dev.	Mediaan
1	0	13	8.9	2.83	9
2	14	22	18.0	2.55	18
3	22	31	26.9	2.60	27
4	31	40	35.9	2.58	36
5	40	49	44.9	2.58	45
6	49	61	55.2	3.51	55
7	62	76	68.4	4.22	68
8	77	100	87.5	6.92	87
9	101	148	120.1	13.32	118
10	148	76500	6871.8	12944.3	542

Tabel 6 Eigenschappen van geselecteerde representatieve locaties (hoog ambitieniveau)

Locatiernr	X-coord	Y-coord	Hoogte (cm NAP)	Gem-GWS (cm -mv)	Drainw (dagen)	bergcoef
1	225462.5	456637.5	1441	105	40	0.079
2	227012.5	454987.5	1630	115	58	0.103
3	225137.5	458362.5	1320	113	103	0.087
4	224312.5	458237.5	1294	114	113	0.107
5	226012.5	457462.5	1455	114	141	0.107
6	227212.5	454237.5	1718	126	165	0.112
7	227062.5	456362.5	1563	123	198	0.115
8	222637.5	457437.5	1354	137	243	0.119
9	227812.5	454312.5	1719	132	339	0.116
10	228037.5	453637.5	1768	143	1253	0.123

### Standaard ambitieniveau

Bij het standaard ambitieniveau is gebruik gemaakt van de Gt-klassen van de 1:50000 bodemkaart (zie Figuur 3) om het gebied in te delen in 7 strata. In elk stratum is op basis van het AHN-bestand de mediane hoogte bepaald en een locatie met een maaiveldhoogte dicht daarbij. Daarna zijn drie extra locaties gekozen aan de uiteinden van het totale hoogtebereik in het gebied en in de drie Gt-klassen met het grootste areaal. Hierbij is ook gelet op een goede ruimtelijke verdeling. Het resultaat is te zien in Figuur 5. Tabel 7 geeft de coördinaten en de maaiveldhoogten op de gekozen locaties.

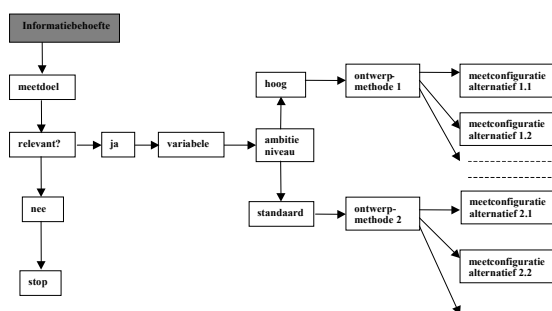
*Tabel 7 Coördinaten en maaiveldhoogten geselecteerde representatieve locaties (standaard ambitieniveau)*

locatienr	X-coord	Y-coord	Hoogte (cm NAP)
1	223587.5	458312.5	1292
2	224737.5	458712.5	1299
3	226337.5	456087.5	1515
4	226137.5	457862.5	1404
5	223287.5	457112.5	1442
6	228012.5	455012.5	1596
7	221812.5	458612.5	1493
8	221962.5	457887.5	1190
9	226912.5	455687.5	1660
10	227387.5	454112.5	1720

## 4.2 Structurele aanpassing

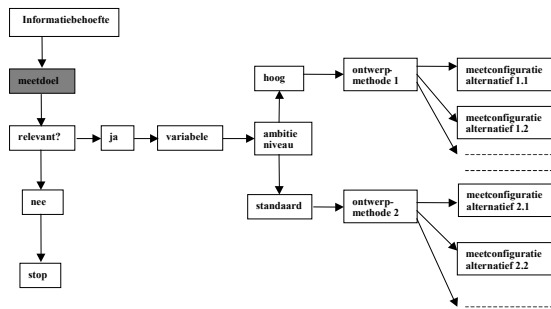
Voor de fase “Structurele aanpassing” beperken wij ons hierbij tot een globale opzet.

### 4.2.1 Doorlopen van de beslisboom



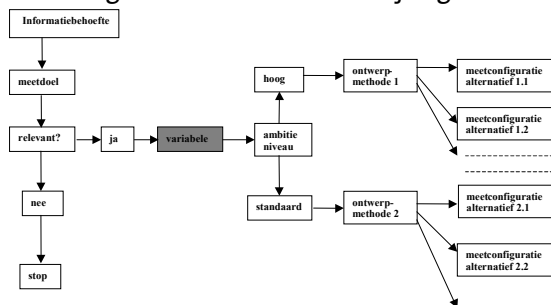
#### *Informatiebehoefte*

De belangrijkste informatiebehoefte binnen Waterlood in deze fase in een gebied als de Baakse Beek komt voort uit de wens om op voldoende nauwkeurig alternatieve waterbeheersingsplannen te analyseren en te kunnen vergelijken. Hierbij wordt meestal gebruik gemaakt van modellen.



### Meetdoel

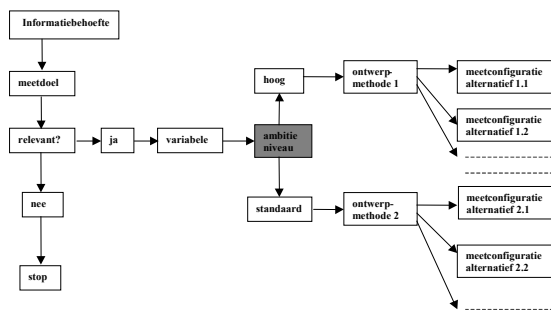
Bij toepassing van een model bij scenarioberekeningen moeten we eerst vertrouwen in het model hebben. We krijgen dit door het model te toetsen aan de huidige werkelijkheid. Als hierbij onacceptabele afwijkingen ontstaan kan dit het gevolg zijn van de modelstructuur of de modelparameters. In het eerste geval moet men het model herzien, in het tweede geval zal men zich concentreren op parameters die niet direct zijn te meten en deze proberen te vinden via zogenaamde inverse modellering of modelijking: het aanpassen van deze parameters binnen redelijke fysische grenzen totdat het model zo goed mogelijk bij de waarnemingen past. Om parameters goed te kunnen ijken moeten deze identificeerbaar (uit metingen van de modeluitvoer herleidbaar) zijn. Dit hangt af van twee eigenschappen: a) het model moet gevoelig zijn voor deze parameters, zowel bij het reconstrueren van de huidige situatie, als onder alle scenario's. Is dit niet het geval, dan is deze parameter niet van belang en kan men deze op elke waarde vastzetten<sup>2</sup>; b) Als het model gevoelig is voor de parameter, moet het meetnet zodanig zijn dat veranderingen in de modeluitvoer ten gevolge van veranderingen in deze parameter worden opgepikt op de locaties en tijdstippen waar waarnemingen worden gedaan. Als we ons beperken tot een grondwatermodel waarvoor we bijvoorbeeld intreeweerstanden van waterlopen moeten hebben, dan moeten er voldoende waarnemingen zijn van de grondwaterstand dicht bij de waterlopen en bij voorkeur ook van de afvoer van de waterloop om deze eenduidig vast te stellen via modelijking.



### Te meten variabele

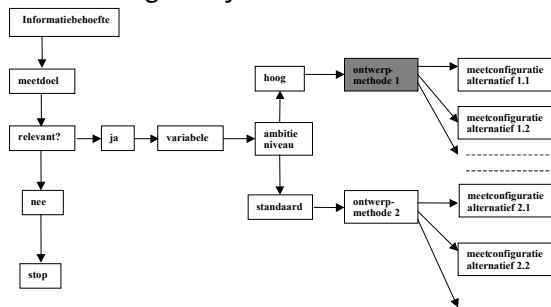
We beperken ons hier tot het grondwater. We willen dus grondwaterstanden meten om een grondwatermodel te ijken.

<sup>2</sup> Een probleem ontstaat wanneer een model ongevoelig is voor een parameter onder de huidige situatie, maar gevoelig in één of meer scenario's. In dat geval zal men het scenario tijdelijk moeten creëren of gedeeltelijk nabootsen: denk bijvoorbeeld aan een pompproef om transmissiviteit te berekenen voor het analyseren van een toekomstige grondwaterwinning.



### Ambitieniveau

Het opzetten van een meetnet voor dit doel is geen triviale zaak. Methoden hiervoor zijn in ontwikkeling op het niveau van fundamenteel onderzoek (bijvoorbeeld Valstar, 2001). Met deze methodieken kunnen de beste locaties worden uitgezocht opdat de parameters het best via ijking kunnen worden achterhaald opdat de modelvoorspellingen op meest nauwkeurig zijn. Deze methoden zijn erg complex en nog in ontwikkeling en het voert dan ook te ver om ze hier als praktisch werkbare methode te presenteren. Een standaard ambitieniveau gebaseerd op het uitbreiden van bestaande meetnetten zal daarom meestal het geval zijn.



### Ontwerpmethode (globaal)

In algemene zin komen we voor het lagere ambitieniveau een heel eind als we het meetnet dat is opgezet tijdens de systeemverkenning uitbreiden met extra waarnemingslocaties die liggen in gebieden waar ingrepen zullen worden genomen en informatief zijn voor de te bepalen parameter.

Voorbeelden van uitbreidingen zijn gecombineerde stijghoogte- en grondwaterstandmetingen in kwelgebieden waar men bijvoorbeeld wil vernatten en de C-waarde (verticale weerstand in dagen) onbekend is of het meten van grondwaterstanden langs waterlopen waar het peil zal gaan veranderen om intreeweerstanden te achterhalen. Als meerdere interacterende parameters moeten worden geijkt, zoals bijvoorbeeld kD-waarden (transmissiviteit) en C-waarden, kD-waarden en intreeweerstanden of kD-waarden en grondwateraanvulling, dan zijn grondwaterstands- en stijghoogtewaarnemingen alleen niet voldoende. In dat geval is het van groot belang om zoveel mogelijk afvoermetingen en oppervlaktewaterpeilen te verzamelen om te komen tot een eenduidige ijking van het grondwatermodel.

Ontwerpmethoden op het gebied van modelijking variëren dus tussen twee uitersten. Aan de ene kant nog sterk verkennend en academische methodieken en aan de andere kant vuistregels. Toepassing van deze vuistregels levert een subjectief, niet eenduidig meetnetontwerp op en is daarom niet verder uitgewerkt.



### 4.3 Ontwerp sturingsysteem

Het opzetten van een meetnetsysteem voor operationele sturing van oppervlaktewater wordt uitgewerkt voor het voorbeeldgebied Reeuwijk.

Bij het ontwerp van sturingsystemen wordt een aantal verschillende aspecten onderscheiden:

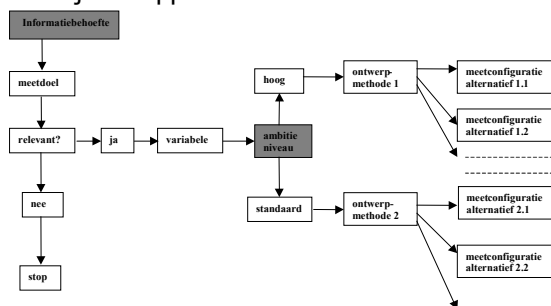
- de vertaling van het beleid naar het gewenst functioneren van het watersysteem (in de tijd en onder verschillende belastingstoestanden);
- de vertaling van het gewenste functioneren van het watersysteem naar een sturingsstrategie (= het verloop van meetbare en beïnvloedbare parameters, zoals waterstanden en debieten);
- de wijze waarop de strategie wordt geïmplementeerd en de processen in het watersysteem worden beïnvloed door regelaars en kunstwerken;
- de inzameling en verwerking van benodigde meetgegevens.

Deze vier aspecten hangen nauw met elkaar samen. Er kan bijvoorbeeld geen sturingsstrategie worden geformuleerd als het gewenst functioneren niet helder is vastgelegd; anderzijds spelen bij de formulering van het gewenst functioneren ook de praktische mogelijkheden en technische randvoorwaarden een rol. Verder kunnen er natuurlijk geen beslissingen worden genomen over de instelling van regelkunstwerken als de sturingsstrategie nog onbekend is; Daarnaast zijn de technische mogelijkheden van regelkunstwerken belangrijke randvoorwaarden bij het afleiden van de sturingsstrategie. De invulling van elk van de vier aspecten heeft dus invloed op de mogelijke invullingen van de andere aspecten.

Bij het vaststellen van de meetinspanning met betrekking tot het ontwerp van sturingsystemen onderscheiden we drie fasen:

- vaststellen ambitieniveau en het formuleren van het managementdoel
- opstellen van een sturingsmodel
- vaststellen van de meetinspanning bij gekozen ambitieniveau en modelgebruik

Hierbij overlappen de elementen van de beslissboom.



#### *Fase 1: Vaststellen van het ambitieniveau en formuleren managementdoel*

Het ambitieniveau zegt iets over het doel dat we nastreven met het sturingsysteem. We onderscheiden hier twee ambitieniveaus: standaard en hoog. In het algemeen geldt dat bij een hoog ambitieniveau doelen worden nagestreefd die dicht liggen bij waar het werkelijk om gaat: het gedrag van het watersysteem daar waar het de ruimtelijke functies ondersteunt. Bij de functie landbouw dus in het bodemvochtgehalte. Bij het hoge ambitieniveau kan worden gedacht aan het formuleren van de doelen volgens de Water-noodmethodiek waarin kortweg de volgende stappen worden doorlopen:

- Op basis van gebruiksfuncties worden de optimale grond- en oppervlaktewaterregiems bepaald.
- Vervolgens wordt onderzocht of en hoe deze in de plaatselijke situatie kunnen worden gerealiseerd. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van metingen eventueel in combinatie met een modelstudie.
- Op basis hiervan wordt een gewenst grond- en oppervlaktewater regiem (GGOR) geformuleerd die het uitgangspunt zijn bij het ontwerp van de sturing.

Veelal zal bij het vaststellen van het GGOR een modelstudie noodzakelijk zijn. De consequenties hiervoor voor de benodigde meetinformatie wordt verder in dit hoofdstuk besproken.

Bij ambitieniveau standaard moet meer worden gedacht aan het verfijnen van het naleven van bestaande peildoelstelling zonder dat daarbij de bovenstaande analyse volledig wordt uitgevoerd. Streefpeilen worden nog eens ‘tegen het licht gehouden’ en zo mogelijk worden marges verruimd. Dit “tegen het licht houden” kan een analyse zijn van beschikbare kennis en ervaring maar ook een (beperkte) modelstudie. Karakteristiek voor het standaardambitieniveau is de directe vertaling van het managementdoel in gewenste openwaterstanden.

Een hoog ambitieniveau betekent niet automatisch een grote meetinspanning. Dat hangt af van de uitgangssituatie. Omgekeerd is het ook niet zo dat het standaard ambitieniveau altijd tegen geringe inspanning en kosten kan worden bereikt. Wanneer weinig systeem-informatie beschikbaar is en de voor sturing noodzakelijke infrastructuur nog niet aanwezig is, zal het realiseren van het standaard ambitieniveau al veel (meet)inspanning vergen. Veel hangt dus af van het watersysteem en van de reeds aanwezige hardware voor monitoring en sturing..

Pas bij het bepalen van de meetinspanning die moet worden gedaan om een bepaald ambitieniveau te halen wordt duidelijk welk meetnet nodig zal zijn. Daarmee ontstaat ook inzicht in de kosten. Op basis hiervan kan het ambitieniveau naar boven of beneden worden bijgesteld.

Veelal worden diverse doelen geformuleerd die onderling strijdig kunnen zijn. In het geval Rieuwijk zijn diverse doelstelling geformuleerd (Gehrels et. al, 2000). Genoemd worden:

- minimaliseren inlaat gebiedsvreemd water door dynamisch peilbeheer
- opheffen ‘versnippering van polderpeilen’
- waterkwaliteit gebiedsvreemd water optimaliseren
- tegengaan verzilting
- opheffen bodemdaling

Een voorbeeld van mogelijk tegenstrijdige doelstellingen zijn het tegengaan van bodemdaling en het laten uitzakken van de waterstanden in de zomerperiode. Het is van belang mogelijke tegenstrijdigheden te onderzoeken en zonodig strijdige doelstellingen onderling te prioriteren.

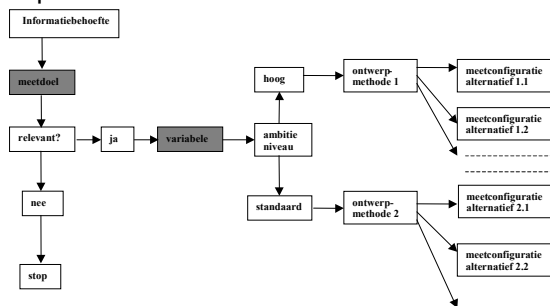
Bij het selecteren en prioriteren en eventueel combineren van de doelen is het van belang zich te krijgen op de haalbaarheid van die doelen. Hiertoe dient de quick scan van kansen en kosten. De quick scan is geen uitgebreide modelstudie, zoals later in de haalbaarheids-

studie wordt gehouden, maar een "analyse op de achterkant van de sigarendoos" om snel na te gaan of doelen überhaupt haalbaar kunnen zijn met sturing.

Tijdens de Quick Scan komen de volgende vragen aan de orde:

- op welke locaties bevinden zich de variabelen waar eisen aan worden gesteld? (waar zijn de doelen ruimtelijk?)
- met welke kunstwerken kan worden ingegrepen? \
- Waar zijn die kunstwerken gesitueerd?
- is er voldoende regelmacht?
- Is er bijvoorbeeld voldoende pompcapaciteit?

De quick scan hoeft zoals gezegd geen modelstudie te zijn. Veelal kan op basis van beschikbare kennis worden afgeschat of sturing kan bijdragen aan het realiseren van een bepaald doel.



#### Fase 2: Opstellen sturingsmodel

Het ontwerp van sturingsystemen bestaat niet alleen uit het bedenken van sturingsregels die aangeven bij welke waterstand welk gemaal in welke stand moet aan- of afslaan. Een belangrijk onderdeel van het ontwerp is ook het vaststellen van de beslisvariabelen. Zo'n beslisvariabele kan zijn een waterstand, een debiet of grondwaterstand. Bepaald moet dan worden waar, en met welke frequentie deze variabele moet worden gemeten. Ofschoon deze vragen ook op basis van louter beschikbare kennis kunnen worden genomen worden bij de keuze van de te meten variabele en bij het bepalen van meetlocatie en -frequentie vaak modellen gebruikt. Veelal leidt dit tot een optimalisering van meetlocatie en frequentie. Bij het standaard ambitieniveau kan wellicht nog worden volstaan met een 'slimme gok'. Bij het hoge niveau is het gebruik van modellen onontbeerlijk. In het onderstaande is aangegeven wat een goed model is en welke rol een model precies speelt.

Een goed model beschrijft adequaat de werking van de onderdelen van het watersysteem en de relevante interacties daartussen. Verder moet het sturingsmodel het gestuurde systeem goed beschrijven. Dat wil zeggen dat de belangrijke regelbare kunstwerken in het model moeten zijn opgenomen en dat de variabelen die een rol spelen in het sturingsdoel ook daadwerkelijk worden gemeten. Verder moeten de beslisvariabelen (zoals oppervlaktewaterstanden) worden uitgerekend en moet het modelleren van on-line sturing mogelijk zijn. Dit laatste betekent dat in het model gestuurd moet kunnen worden op waarden die tijdens de simulatie worden bepaald (uitwisseling van berekende waarden tussen deelmodellen tijdens de simulatie).

Een belangrijk doel van het sturingsmodel is ‘gevoel te krijgen voor het systeem’.

Meer specifiek wordt antwoord gezocht op bijvoorbeeld de volgende vragen:

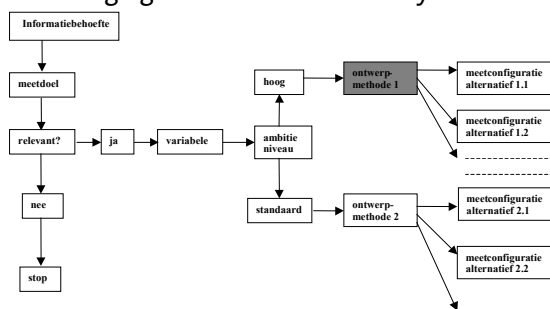
- welke interactie is er tussen grond- en oppervlakte water, beïnvloeden ze elkaar sterk of gering?
- is het grondwaterpeil stuurbaar?
- wat zijn de verhangen in de waterlopen bij kenmerkende situaties?
- wat wordt de schakelfrequentie van een gemaal bij een bepaalde sturing?
- welke sturingsparameters zijn nodig?
- wat is de meerwaarde van een neerslagvoorspelling?

Met betrekking tot het geval Reeuwijk geldt dat, uitgaande van:

- een gegeven marge waarbinnen waterstanden mogen variëren en
- het feit dat een dynamisch peilbeheer gaat worden gevoerd met als doel het minimaliseren van gebiedsvreemd water,

kan worden volstaan met een sturingsmodel dat bestaat uit een 1 D stromingsmodel gekoppeld aan een neerslagafvoermodel. In het stromingsmodel moeten kunstwerken op basis van tijdens de simulatie berekende waarden kunnen worden gestuurd.

Wanneer niet de hoeveelheid ingelaten water centraal staat maar de kwaliteit is het zinvol dit model uit te breiden met een waterkwaliteitsmodule waarmee bijvoorbeeld de doordringing van inlaatwater in het systeem kan worden geanalyseerd.



### Fase 3: Vaststellen meetinspanning

In Fase 3 speelt het model een belangrijke rol. Via modelsimulaties kan namelijk (voor een deel) vooraf worden bepaald waar moet worden gemeten om de actuele en gewenste situatie te bepalen en om de sturingsactie vast te stellen. Een modelstudie levert antwoorden op de volgende vragen:

- welke variabelen moet ik meten voor de sturing?
- hoeveel meetpunten heb ik nodig om de actuele situatie vast te leggen?
- waar moeten die meetpunten worden geplaatst?
- hoe vaak moet worden gemeten?

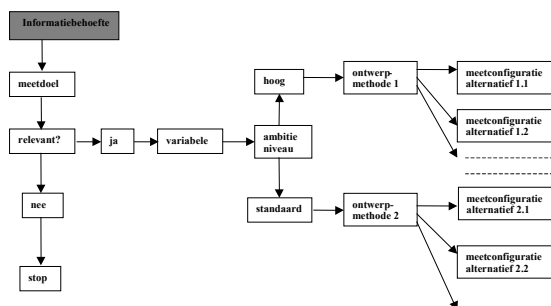
In de modelstudie wordt als het ware de sturing van het systeem nagespeeld om te kijken of de sturingsregels die worden gebruikt het gewenste resultaat opleveren en of de locaties waarop (in het modelsysteem) wordt gemeten bruikbaar zijn als sturingsvariabelen. In het standaardambitie niveau zal bijvoorbeeld vaak worden gewerkt met een representatieve waterstand voor een bepaald gebied. Wanneer deze waterstand het streefpeil overschrijdt zal een gemaal of stuw worden aangestuurd. Deze representatieve waterstand kan een gemiddelde zijn van metingen op meerdere locatie maar kan ook de meting op een locatie zijn. Met het model kan worden nagegaan wat de meerwaarde is van extra meetpunten.

## 4.4 Evaluatie

Metingen nodig voor de evaluatie van de sturing kunnen anders zijn dan die voor het on-line sturen. Vaak zijn het niet alleen andere variabelen maar is ook de meetfrequentie veel lager. De vochttoestand in de bodem zal bijvoorbeeld wel een doelvariabele kunnen zijn terwijl het zelden een stuurvariabele zal zijn (er zal niet op de vochttoestand worden gestuurd).

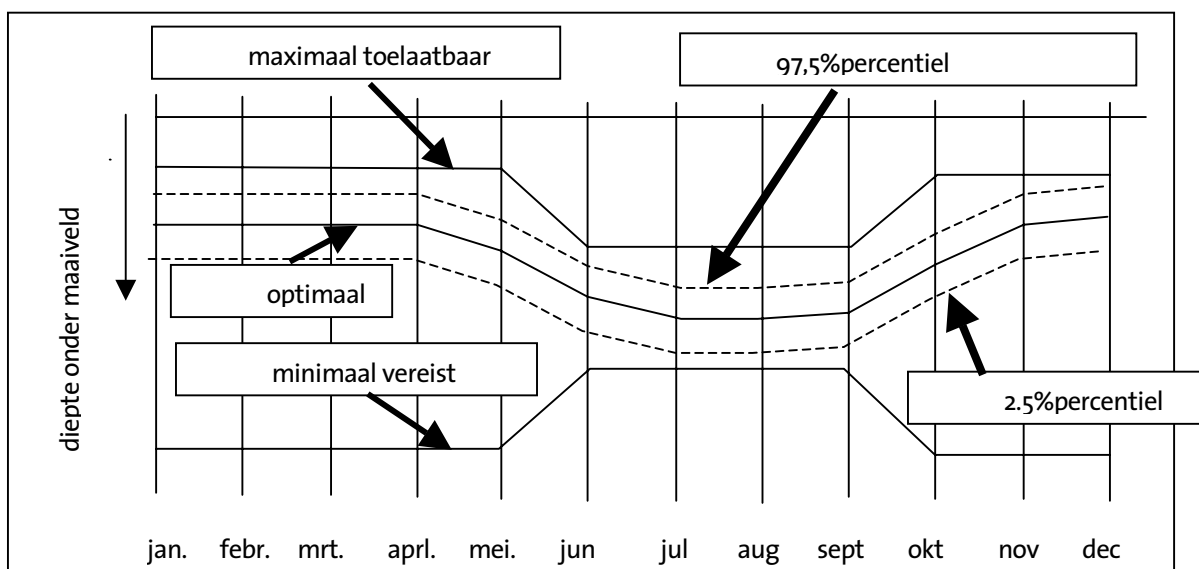
Het opzetten van een meetnetsysteem voor het stadium "Evaluatie" wordt voor grondwater uitgewerkt voor het voorbeeldgebied Reeuwijk.

### 4.4.1 Doorlopen van de beslisboom



#### Informatiebehoefte

Bij de evaluatie zijn het AGOR en het GGOR in een eerdere fase vastgesteld. In deze case gaan wij ervan uit dat het GGOR vlakdekkend is vastgesteld. Voor de grondwaterstand betreft dit het gewenste verloop door het jaar heen. Het gewenste regiem op een bepaalde locatie is geïllustreerd in figuur 6.



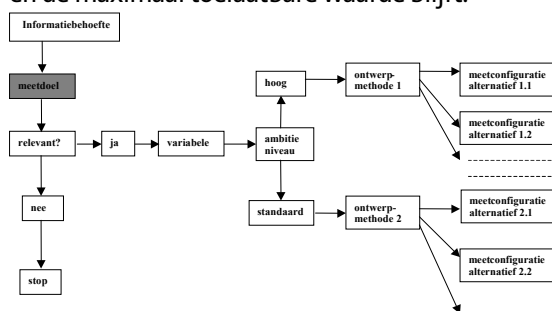
Figuur 6. Gewenst Grondwaterregiem voor een bepaalde locatie.

In figuur 6 staat voor een bepaald meetpunt per datum:

- gewenste regiem (optimale stand, 97,5% percentiel en 2,5% percentiel),
- een het maximaal toelaatbare stand en
- een minimaal vereiste stand.

Deze waarden kunnen tot stand zijn gekomen als gevolg van eisen aan veiligheid, groeicondities, berijdbaarheid, stabiliteit enz. De uitgangssituatie (dus AGOR vóór uitvoering van maatregelen) zal in het algemeen geheel of te dele onder het vereiste niveau liggen. Voor grondwaterkwaliteit kan voor een stof, of een indicator (pH) een soortgelijke curve worden gedefinieerd. In het hierna volgende gaan we alleen in op de grondwaterstanden.

Het meetnet moet de informatie leveren om te controleren in hoeverre het gewenste regiem is gerealiseerd en of in hoeverre de grondwaterstand binnen de minimaal vereiste en de maximaal toelaatbare waarde blijft.



### Meetdoel

Bij de monitoring in de evaluatie fase gaat het om de vraag of het gevoerde waterbeheer het gewenste resultaat heeft gesorteerd. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de evaluatie van het effect als zodanig, en de evaluatie van het effect van de maatregelen die in het kader van Waterlood zijn genomen.

### Effect monitoring.

Het meetdoel is een regiemcurve na uitvoering van maatregelen (al dan niet als functie van de ruimtecoördinaten). De regiemcurve geeft per datum een kansverdeling van de grondwaterstand. Hieruit kan per datum de gemiddelde waarde, het 97,5% percentiel en het 2,5% percentiel worden bepaald. Tevens kunnen de opgetreden maximale en minimale standen worden vastgesteld. Bij de evaluatie wordt de gerealiseerde regiemcurve vergeleken met het gewenste regiem. Concreet kan dit vertaald worden met:

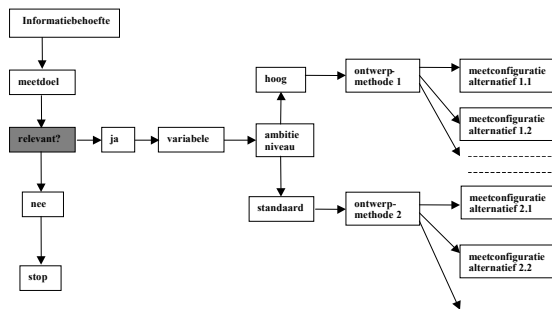
- vaststellen van de temporele gemiddelde grondwaterstand.
- vaststellen van het 97,5% percentiel van de optredende grondwaterstand
- vaststellen van het 2,5% percentiel van de optredende grondwaterstand.

In beginsel zijn bovengenoemde kenmerken functies van de ruimtecoördinaten. Het meetnet dient zodanig te worden ontworpen dat de regiemcurve met voldoende betrouwbaarheid kan worden vastgesteld. Een alternatief meetdoel kan zijn het vaststellen van de Gt (al dan niet als functie van de ruimte coördinaten) na uitvoering van Waterlood.

### Maatregel monitoring.

Voor het monitoren van het effect (zie boven) is alleen de grondwaterstand na uitvoering van Waterlood van belang. Indien ook inzicht gewenst is in hoeverre het waterbeheer heeft bijgedragen aan het bereiken (of benaderen) van de gewenste situatie dient een uitgebreidere monitoringsstrategie gevolgd te worden. Ten eerste dient de uitgangs-

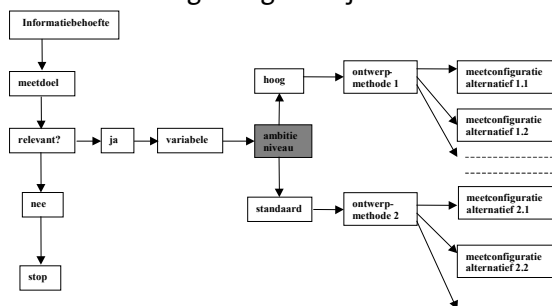
situatie te worden vastgelegd. De grondwaterstand na uitvoering van Waterlood wordt nu niet alleen vergeleken met de gewenste situatie, maar ook met de uitgangssituatie. Het gaat dus ook om de verandering in het grondwaterregiem. Tenslotte wordt de verandering gerelateerd aan het waterbeheer. Hiertoe dienen input respons functies vastgesteld te worden tussen de belangrijkste oorzaken van grondwaterstandsvariatie (oppervlaktewater, diepe stijghoogte, neerslag enz.) en de grondwaterstand. Het zal duidelijk zijn dat de maatregel monitoring meer inspanning vereist dan de effect monitoring. Het is lang niet altijd mogelijk om de uitgangssituatie vast te stellen. In dat geval kan alleen getracht worden de respons functies vast te stellen tijdens en na de uitvoering van Waterlood.



### Relevantie

Voor het eerste meetdoel (effect monitoring) is de relevantie geen punt van discussie. Immers, de inspanningen om Waterlood uit te voeren dienen verantwoord te worden door aan te tonen dat er een gewenste situatie is opgetreden, of in elk geval benaderd. Het meten van het grondwaterregiem is hiertoe het geëigende middel. Voor het tweede meetdoel (maatregel monitoring) ligt het iets gecompliceerder. Het heeft alleen zin om de effecten aan maatregelen te relateren als het mogelijk is om de maatregelen bij te stellen. Indien het om politieke of economische redenen niet mogelijk is om correcties op de maatregelen uit te voeren, draagt het monitoren niet bij aan de besluitvorming. Een voorbeeld hiervan is het geval dat de verdroging wordt bepaald door grondwateronttrekking in het onderliggende watervoerende pakket. Als het niet mogelijk is om de winning (verder) te reduceren, is er vanuit dat oogpunt geen reden om de relatie tussen de grondwaterstand en de winning vast te stellen.

In het hierna volgende gaan wij uit van de effectmonitoring.



### Ambitieniveau

#### Standaard

Bij deze evaluatie wordt het gebied opgedeeld in een aantal sub-gebieden waarvoor een bepaald grondwaterregiem geldt. De sub-gebieden zijn in een eerdere fase (systeemverkenning) vastgesteld op basis van kennis over de bodemopbouw, grondwatersysteem, landgebruik enz. Het grondwaterregiem wordt vastgesteld als gemiddelde van het sub-gebied. Tevens wordt de spreiding van het grondwaterregiem binnen de sub-gebieden

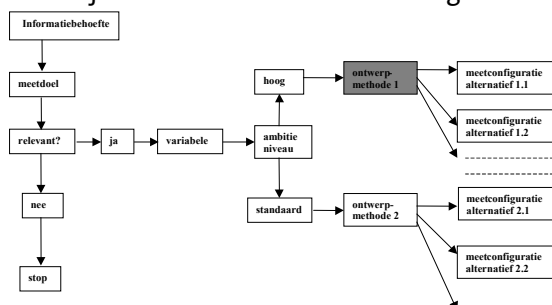
gekaracteriseerd. Het resultaat van de standaard variant is een vlakkenkaart met sub-gebieden waarbinnen is aangegeven hoe groot het verschil is in centimeters (positief of negatief) tussen de 97,5% en 2,5% percentiele waarde van het GGOR en het actuele regiem na uitvoering van waterlood gemiddeld over het sub-gebied.

#### Hoog

De meest ambitieuze evaluatie is die waarbij een het grondwaterregiem na uitvoering van Waterlood als functie van de ruimte wordt vastgesteld. Dit vereist een ruimtelijke interpolatie van het grondwaterregiem.

#### Keuze

In de meeste gevallen is de variant met het hoge ambitieniveau te bewerkelijk en eist bovendien een vrij grote meetinspanning. Voor de maatregelen evaluatie kan het in sommige gevallen lonend zijn om een continu ruimtelijk beeld te hebben. Voor de effect-evaluatie zal vrijwel altijd een Standaardvariant worden gekozen. In het voorbeeldgebied Reeuwijk wordt de Standaardvariant uitgewerkt.



#### Ontwerpmethode

De ontwerpmethode is in paragraaf 4.4.2 gegeven.

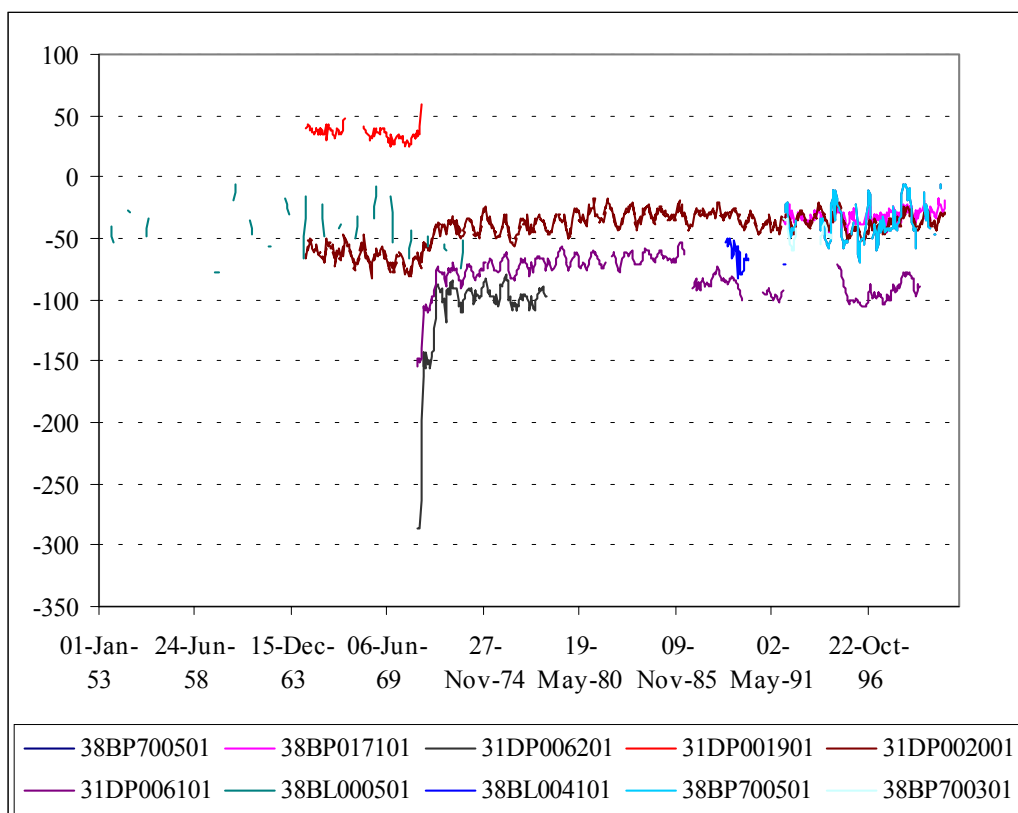
### 4.4.2 Toepassing op voorbeeldgebied Reeuwijk

De ontwerpprocedure is beschreven in deel II. In deze procedure moeten schattingen worden gemaakt van het verschil tussen de actuele AGOR vóór uitvoering van maatregelen en het GGOR ná uitvoering van maatregelen. Bovendien dient is een schatting nodig van de temporele variantie van de grondwaterstand na Waterlood.

Vaststellen van het Actueel Grondwater- en Oppervlaktewater Regiem voor maatregelen Het is vrijwel niet mogelijk om een poldergebied zoals de Reeuwijkse Plassen voor uitvoering van maatregelen een vlakdekkend actueel grondwater regiem vast te stellen uitsluitend op basis van grondwater waarnemingen. Het aantal meetpunten is daarvoor te gering. Echter, het actuele grondwater regiem kan worden bepaald met een model studie. De betrouwbaarheid van de ijking kan dan worden gebruikt als maat voor de betrouwbaarheid van het actuele regiem. De betrouwbaarheid kan gerelateerd worden aan de meetinspanning en kan derhalve dienen als uitgangspunt voor het meetnetontwerp in de systeemverkenning fase (zie Valstar, 2000). In dit voorbeeld was er alleen een model berekening beschikbaar voor de gewenste situatie na uitvoering van maatregelen.

De actuele grondwater situatie is niet vlakdekkende bepaald, maar alleen ter plaatse van de 10 meetlocaties die in het proefgebied liggen. De minimale meetperiode bedraagt iets meer dan twee jaar, de maximale meetperiode bedraagt ruim 36 jaar. In figuur 7 zijn alle grondwater reeksen die gebruikt zijn voor dit voorbeeld te zien.

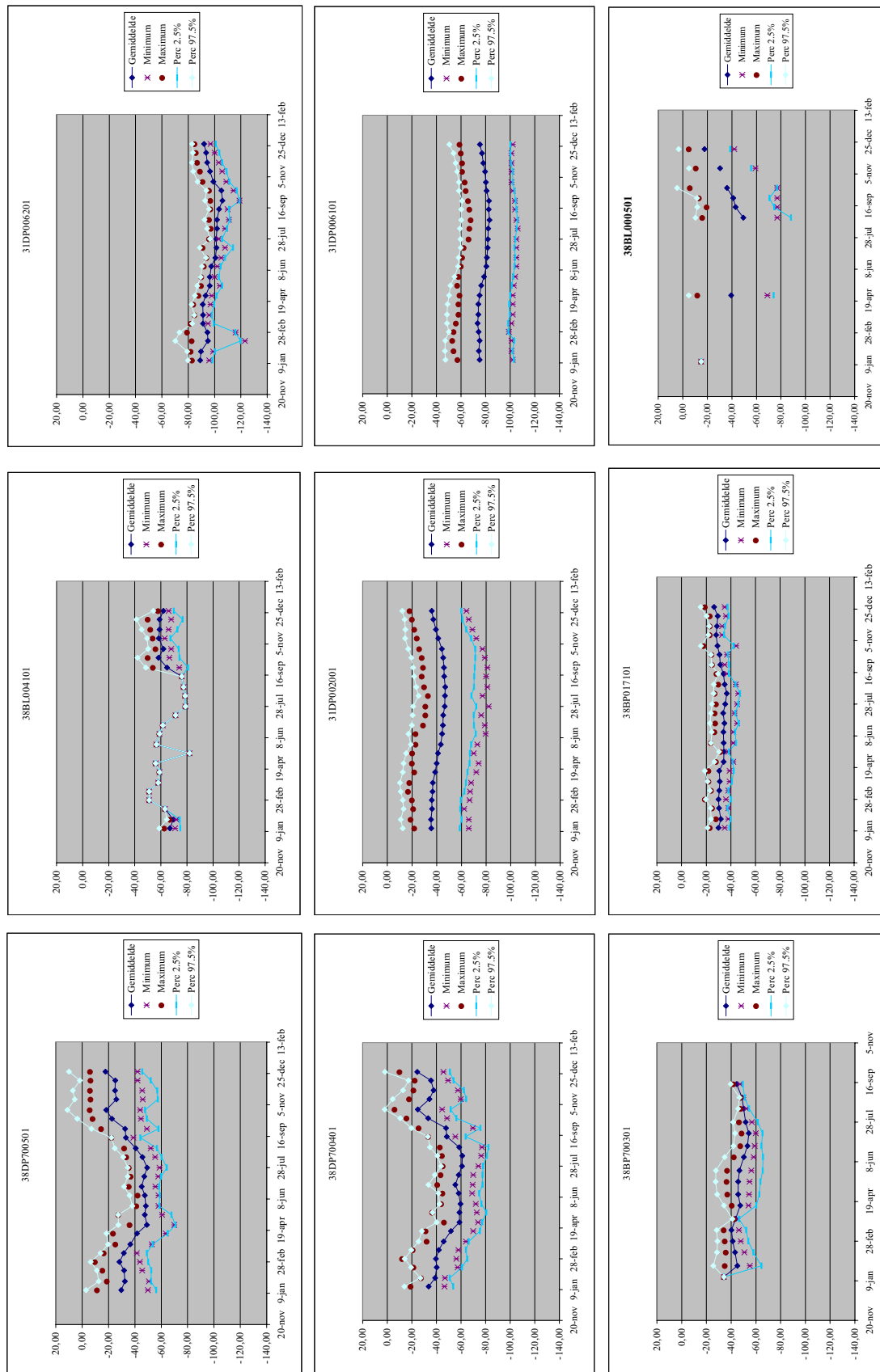




*Figuur 7. Tijdstijghoogtelijnen van de beschikbare meetpunten*

Van al deze reeksen zijn regiems bepaald. Deze zijn gegeven in figuur 8. In deze figuur zijn de gemiddelde grondwater standen per datum per reeks te zien met de bijbehorende 2.5% percentiel en de 97.5% percentiel en de minimale en maxima. Het is opvallend dat voor sommige reeksen de percentielen zeer dicht bij de gemiddelde grondwaterstand liggen. Dit is het geval bij 38BP0171. Bij 38BL0041 is er sprake van een schijnnaauwkeurigheid, voor een aantal data is hier maar één waarneming, waardoor de standaardafwijking 0 wordt. 31DP0061 heeft de grootste gemiddelde standaardafwijking waardoor de percentielen het verst van de gemiddelde grondwaterstand af liggen.

Uit figuur 8 blijkt verder dat de temporele variatie per datum gering is. De temporele standaardafwijking bedraagt tussen de 1.10 en 20.74 cm. Ruimtelijk zijn de verschillen in het grondwaterniveau aanzienlijk groter. Voor de berekeningen zijn standaardafwijkingen per datum gemiddeld. De waarden die in de berekeningen zijn gebruikt zijn gegeven in tabel 8.



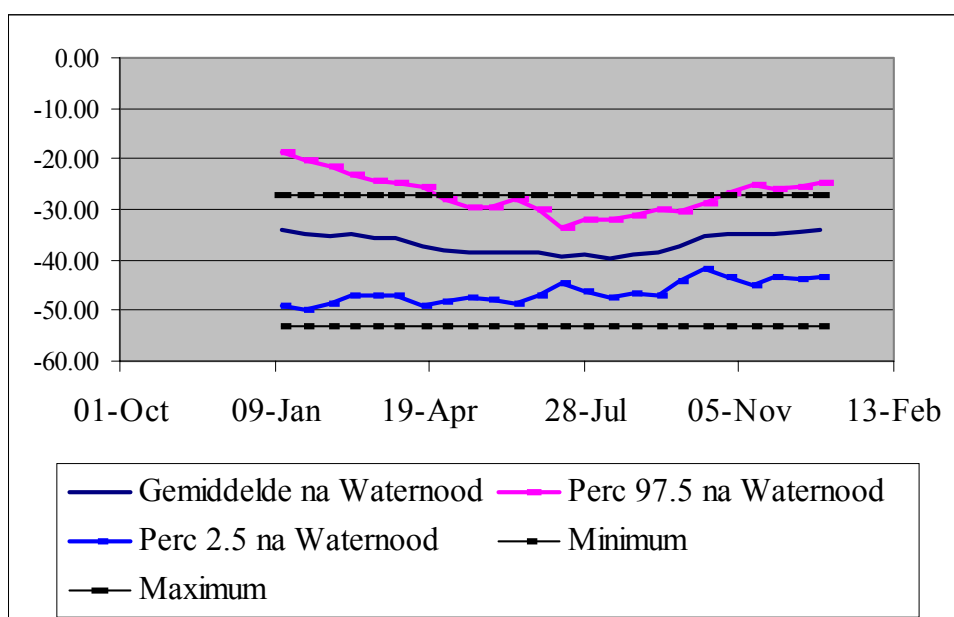
Figuur 8. Actueel regiem ter plaatse van de meetlocaties



Naast de temporele standaarddeviaties per datum per meetpunt zijn in de laatste kolom ook de gemiddelde standaarddeviaties per datum gegeven. Bovendien is ook de gemiddelde standaarddeviatie per meetlocatie gegeven. De gemiddelde standaarddeviaties per datum zijn gebruikt in de berekeningen.

#### Grondwater-en Oppervlaktewater Regiem na uitvoering van maatregelen

Ten tijde van het ontwerp van het meetnet voor evaluatie is het Grondwater-en Oppervlaktewater Regiem na Waterlood uiteraard nog niet opgetreden. Wel is er een prognose beschikbaar op grond van een bestaande modelstudie (Gehrels et. al., 2000). Het ruimtelijk gemiddelde grondwaterregiem dat hier is gebruikt, is gegeven in figuur 9.



*Figuur 9 Gemiddeld grondwaterregiem na aanpassing*

Dit gemiddelde regiem is bepaald met behulp van ongeveer 5000 gridcellen. In deze figuur zijn ook de maximaal toelaatbare en minimaal vereiste grenzen aangegeven. In dit voorbeeld zijn deze grenzen volledig arbitrair getrokken. Per meetlocatie zijn de verschillen tussen de percentielen van de grondwaterstand na waterlood en de actuele grondwaterstand bepaald. De standaarddeviatie van deze verschillen is gebruikt in de berekeningen. Deze is te zien in de tabel 9.

Tabel 9 Ruimtelijke standaardafwijking

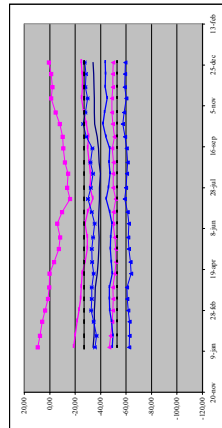
Datum	Stdev ruimtelijk verschil voor en na maatregelen 97.5%	Stdev ruimtelijk verschil voor en na maatregelen 2.5%
14-Jan	42.53	16.48
28-Jan	42.23	16.54
14-Feb	41.05	17.13
28-Feb	39.82	18.05
14-Mar	38.43	18.11
28-Mar	37.56	18.07
14-Apr	38.19	18.80
28-Apr	35.58	18.76
14-May	32.73	18.79
28-May	31.88	18.21
14-Jun	32.62	17.62
28-Jun	29.68	18.68
14-Jul	25.89	19.49
28-Jul	26.33	18.78
14-Aug	25.58	17.83
28-Aug	26.28	17.70
14-Sep	27.79	17.44
28-Sep	28.41	18.68
14-Oct	28.84	18.58
28-Oct	31.45	18.77
14-Nov	34.28	18.41
28-Nov	34.56	19.70
14-Dec	35.99	20.04
28-Dec	37.42	20.89

De standaardafwijking voor het 97.5 percentiel is ongeveer tweemaal zo groot als de standaardafwijking voor het 2.5 percentiel. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de keuze van de gewenste grondwatersituatie.

Met de temporele en ruimtelijke standaardafwijking een per datum is de betrouwbaarheidsband voor een willekeurig aantal meetjaren ( $n$ ) en een willekeurig aantal meetlocaties ( $m$ ) berekend. Met het aantal meetjaren en het aantal meetlocaties kan worden 'gespeeld' met een Excelprogramma dat in het instrumentarium Waterlood beschikbaar komt. Hierbij is aangenomen dat de ruimtelijke correlatie hoog is (0.95). Deze betrouwbaarheidsband is grafisch weergegeven ten opzichte van het ruimtelijk gemiddelde grondwaterregiem na uitvoering van maatregelen. Dit is te zien in figuur 10. In figuur 10 is te zien dat de temporele variatie slechts een beperkte invloed heeft op de betrouwbaarheidsbanden. Het verschil tussen 10 en 20 jaar meten is nauwelijks aanwezig. Het aantal locaties heeft meer invloed. Echter, om de betrouwbaarheidsbanden klein te krijgen ten opzichte van de variatie in het regiem zelf, zijn zeer veel meetpunten nodig.

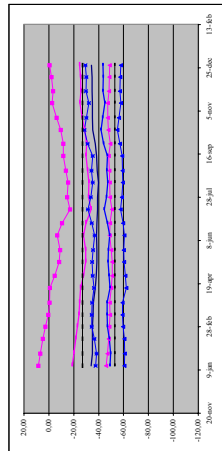
Rho = 1

n = 5

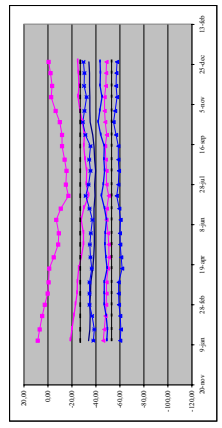


m = 10

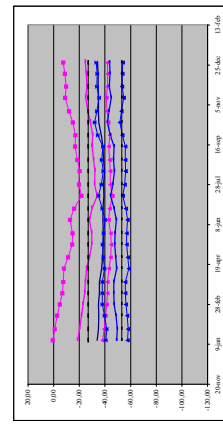
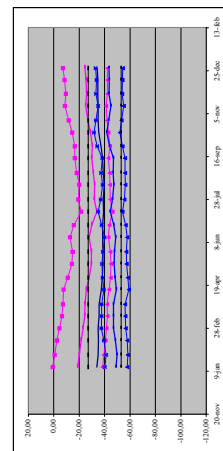
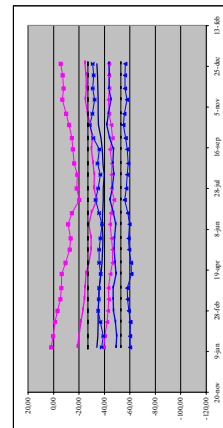
n = 15



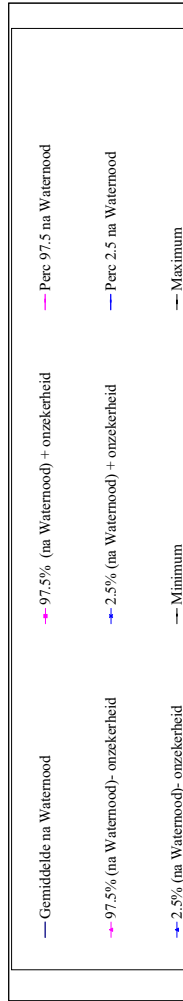
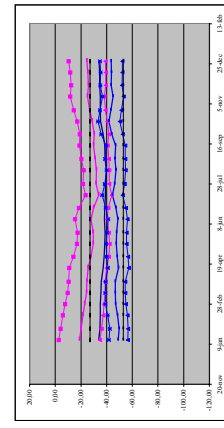
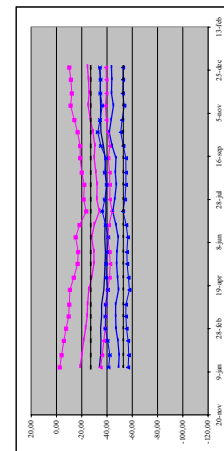
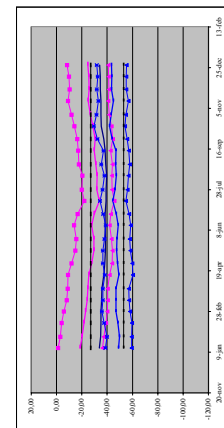
n = 20



m = 20



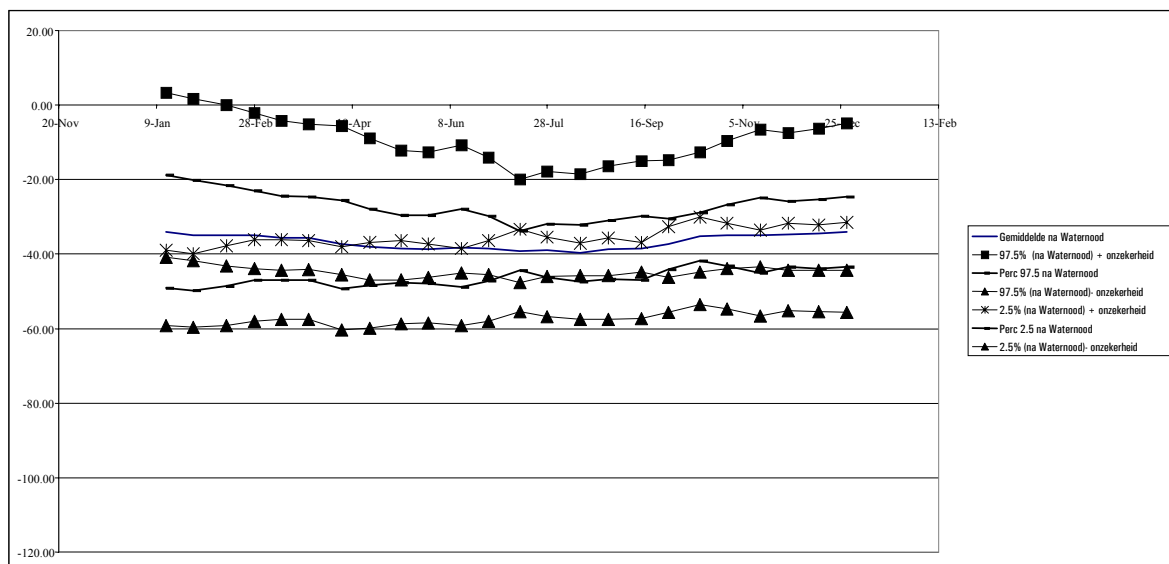
m = 30



Figuur 10 Betrouwbaarheidsbanden als functie van het aantal meetjaren en het aantal meetlocaties.

### Uiteindelijke Meetnet

Nadat er met een aantal verschillende meetjaren (n) en een aantal verschillende meetlocaties (m) geprobeerd was een betrouwbaarheidsband naar tevredenheid te construeren bleek dat 16 meetpunten en 10 meetjaren een adequate oplossing zouden zijn (figuur 11). De corresponderende betrouwbaarheidsbanden zijn dan overal kleiner dan  $\pm 20$  cm. Dit wil zeggen dat de percentiele waarde van het ruimtelijk gemiddelde regiem altijd binnen deze marge kan worden vastgesteld.



Figuur 11 Betrouwbaarheidsbanden bij een meetnet van 16 meetpunten die gedurende 10 jaar worden waargenomen. .



Figuur 12. Mogelijke meetnetontwerpen



## Conclusies

Dit rapport beschrijft welke stappen genomen moeten worden bij het opzetten van een monitoringsysteem. De stappen zijn schematisch gegeven in een beslisboom (figuur 4). Onderscheiden zijn:

- vaststellen informatiebehoefte
- vaststellen meetdoel
- vaststellen relevantie
- vaststellen te meten variabele
- vaststellen ambitieniveau
- keuze ontwerpmethode
- uitwerken alternatieven en keuze meetconfiguratie

De verschillende stappen zullen vaak overlappen of iteratief uitgevoerd worden. In de praktijk komt het nogal eens voor dat stappen worden overgeslagen. Dit kan leiden tot een meetsysteem dat niet beantwoordt aan de vragen die eraan gesteld worden. Ook kan met het doorlopen van alle stappen vroegtijdig worden gesignaleerd of de vragen die er vanuit de informatiebehoefte gesteld worden, binnen het beschikbare tijd en met de beschikbare middelen beantwoord kunnen worden.

In dit rapport is gepoogd een standaardwerkwijze te presenteren, die door een hydrologisch medewerker van een waterschap gevolgd kan worden. Dit bleek niet eenvoudig omdat enerzijds een te grote vereenvoudiging geen verantwoord meetsysteem oplevert, en anderzijds methoden al snel ingewikkeld worden. Voor het verantwoord ontwerpen van meetsystemen zal altijd een zekere basis kennis aanwezig moeten zijn.

Als de belangen groot zijn, kan altijd een monitoringsysteem ontworpen worden dat specifiek op een bepaald gebied en een bepaalde vraagstelling is toegesneden. Dit valt buiten het kader van de hier gepresenteerde standaard werkwijze.

In het kader van deze studie was het niet mogelijk om een compleet overzicht te maken van alle relevante meetnetontwerp methoden. In deel II (Methodenboek) zijn een aantal methoden beschreven, met name de methoden die in de voorbeeldgebieden gebruikt zijn. In de loop van de tijd kan het Methodenboek worden aangevuld.

Informatie is nodig in verschillende stadia van het waterbeheer. Onderscheiden zijn:

- systeemverkenning,
- structurele aanpassing
- sturing
- evaluatie.

Ook al volgen deze stadia elkaar in het waterbeheer min op meer logisch op, het is niet zo dat het monitoring systeem uit het ene stadium zonder meer geschikt is voor het andere stadium. Met name bij de evaluatie is het van belang om een onafhankelijk toets uit te kunnen voeren. Dit is in het algemeen niet mogelijk met meetpunten die ook in de voorafgaande stadia zijn gebruikt

Omdat het gerealiseerde grondwater regiem bij de evaluatie altijd op een relatief korte periode ( $< 10$  jaar) bepaald moet worden, treden onzekerheden op bij het bepalen van het gerealiseerde regiem. Indien de grondwaterstand (na uitvoering van Waterlood) in belangrijke mate wordt bepaald door het weer (neerslag en verdamping), kan in een vrij korte tijd (meestal binnen een paar jaar) een relatie worden gelegd tussen de grondwaterstand en neerslag/verdamping. Door van deze relatie gebruik te maken kan een langjarige grondwaterstandreeks (bijvoorbeeld 30 jaar) worden gesimuleerd. Vervolgens kan het gerealiseerde regiem uit de langjarige reeks worden bepaald. Deze procedure kan onder meer worden uitgevoerd met het programma VIDENTE (Bierkens en Bron, 2000; gratis downloading van software en rapport vanaf [www.alterra.wageningen-ur.nl](http://www.alterra.wageningen-ur.nl)). Indien de meetperiode lang genoeg is (zekerheidshalve enkele malen de responstijd) is de schattingsfout van de regiemcurve die op deze wijze bepaald wordt verwaarloosbaar. Ook de responstijd kan met het programma VIDENTE berekend

## Literatuur

Bierkens, M.F.P. en H.Th.L. Massop, 2000. *Optimalisatie meetlocaties grondwaterstanden De Aa. Representatieve locaties voor grondwaterafhankelijk peilbeheer*. Wageningen, Alterra. Rapport 010.

Bierkens, M.F.P. en W.A. Bron, 2000. *VIDENTE: a graphical user interface and decision support system for stochastic modelling of water table fluctuations at a single location*. Wageningen, Alterra. Rapport 118.

Breur, K-J, P.E.R.M. van Leeuwen, A.J.M. Nelen (1999), Er zit muziek in watersystemen, Verslag van de Technische Commissie Real Time Control van de NVA, Sectie Land en Waterbeheer, TU Delft

Ernst, L.F. 1983. *Wegzijing en kwel. De grondwaterstroming van hogere naar lagere gronden*. Wageningen, ICW. Rapporten nieuwe serie, rapport 7.

Gaast J.W.J. van der, 1999. *Handleiding Water Management Tools; Effect-berekeningen van drainage*. Wageningen, DLO- Staring Centrum. Interne mededeling 572.

Gaast, J.W.J. van der en L.C.P.M. Stuyt, 2000. *Drainagevergunningen. Methodiek voor de beoordeling van aanvragen voor de aanleg van buisdrainage*. Wageningen, Alterra. Rapport 012.

Gehrels, J. C. , A. H. M. Kremers, C. B. M. te Stroet, P.T.M. Vermeulen. G. van Wirdum, J.A.M van der Gun en G. de Lange, 2000. *Uitwerking duurzaam waterbeheer in het Herinrichtingsgebied Reeuwijk. Bruisend water als leidraad voor waterberging en dynamisch peilbeheer*. TNO-NITG rapport: NITG-00-128-B.

Gruijter, J.J. de, 2000. *Sampling for spatial inventory and monitoring of natural resources*. Wageningen, Alterra. Report 070.

Knotters, M. and M.F.P. Bierkens, 1999. Hoe lang moet je meten om iets over de dynamiek te weten. *Stromingen* 5(4), 5-12.

Massop H.Th.L., L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel. J.M.M. Bouwmans en H. Prak, 1997. Invloed van de grondwaterstand op de oppervlaktewaterstand. Leidraad voor kwantificering van de effecten van de veranderingen in de oppervlaktewaterstand op de grondwaterstand. Wageningen, DLO – Staring Centrum. Rapport 527.1.

Ministerie van VROM (1992), Module B1050 (RTC) van de Leidraad Riolerings.

Uil, H., F. C. van Geer, J. C. Gehrels, en F. H. Kloosterman. (1999). *State of the art on monitoring and assessment of groundwaters*. RIZA, Lelystad, ISBN 9036952778.

Valstar, J. R. (2001), *Inverse modeling of groundwater flow and transport*. Proefschrift TUD, ISBN 906460629

Werkgroep Waterlood, 2001. *Beter Werken met "Waterlood". Een proeftoepassing in het herinrichtingsgebied De Leijen*. Wageningen, Alterra/DLG. Rapport 267.

Wesseling, J.G., 1991. *CAPSEV: steady state moisture flow theory. Program description, user manual*. Wageningen, Staring Centre. Report 37.

WL|Delft Hydraulics, Technische Universiteit Delft, Leidraad Sturing op Waterkwaliteit, Thema 6 Integraal Waterbeheer, Delft Cluster, (in voorbereiding)

Wösten J.H.M., F. de Vries en J. Denneboom, 1988. Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1:250000, ten behoeve van de PAWN-studie. Wageningen, Stiboka. Rapport 2055.

Wösten J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte, 1994. *Waterrentie- en doorlatendheids-karakteristieken van boven- en ondergronden van Nederland: de Staringreeks*. Vernieuwde uitgave 1994. Wageningen, DLO – Staring Centrum. Technisch Document 18.

## Deel II Methodenboek



# Inhoud

1.	Inleiding	5
2.	Uitwerking beslisboom	7
3.	Ontwerpmethoden	13
	Methode 1.1	
	Stratificatie en selectie representatieve locaties grondwaterstand	13
	Methode 1.2	
	Stratificatie en selectie locaties grondwaterstand naar maaiveldshoogte	16
	<i>Methode 1.3 Gerichte opnamen 1</i>	17
	<i>Methode 1.4 Gerichte opnamen 2</i>	18
	Methode 1.5 Referentiereconstructie 1	19
	Methode 1.6 Referentiereconstructie 2	20
	Methode 1.7 Geohydrologische systeemanalyse en stijghoogte	21
	Methode 1.8 Stijghoogte op locaties uit 1.2	22
	Methode 1.9 Geohydrologische systeemanalyse en grondwaterstand	23
	Methode 1.10 Stijghoogte op locaties uit 1.2	24
	Methode 1.11 Kartering deklaag en pompproeven	25
	Methode 1.12 Weerstand deklaag uit bestaande data	26
	Methode 1.13 Geohydrologische systeemanalyse + landgebruik voor chemie	27
	Methode 1.14 Grondwaterchemie op locaties uit 1.2	28
	Methode 3.1 Stratificatie en selectie sturingslocaties grondwaterstand	29
	Methode 3.2	
	Stratificatie en selectie sturingslocaties grondwaterstand naar maaiveldshoogte	32
	Methode 4.4 Evaluatie gewenst grondwaterregiem op steekproeflocaties	34





## 1. Inleiding

Het methodenboek bevat een complete uitwerking van de beslisboom in de vorm van tabellen voor ieder stadium van informatiebehoefte. Een combinatie van informatiebehoefte, meetdoel, te meten variabele en ambitieniveau leidt tot een methode voor het ontwerp van een meetconfiguratie (waar en wanneer te meten). Een dergelijke opzet kan gemakkelijk worden geïmplementeerd in het Waternoodinstrumentarium, bijv via een help-achtige benadering met hyperlinks.

Vanwege beperkte middelen zijn niet alle meetdoelen uitgewerkt. Verder is er per uitgewerkte combinatie van te meten variabele en ambitieniveau maar één ontwerp-alternatief gegeven, hoewel meerdere alternatieven mogelijk zijn. In ieder geval zijn de ontwerpmethoden uitgewerkt die zijn gebruikt in de praktijkvoorbeelden in hoofdstuk 4 van de hoofdtekst. Omdat praktijkvoorbeelden zijn uitgewerkt voor alle vier de stadia van informatiebehoefte geven de gepresenteerde ontwerpmethoden reeds een aardig dekking van wat nodig is voor Waternood. De open plekken in de tabel kunnen in de toekomst verder worden ingevuld.

In hoofdstuk 2 volgt de uitwerking van de beslisboom in de vorm van vier tabellen, één voor elk stadium van informatiebehoefte. Hoofdstuk 3 geeft dan de methoden gereferreed in de tabel. Literatuurverwijzingen zijn opgenomen in de literatuurlijst van deel I.



## 2. Uitwerking beslisboom



Tabel 1 Beslisboom voor Systeemverkenning

Informatiebehoefte	Meetdoel	te meten variabele	ambitieniveau	Meetnetontwerp methode (beschreven in bijlage A)	
Karakterisatie dynamiek grondwater	Grondwater trappen (GXG) regiem curve extreme waarden temporele samenhang duurlijnen	Grondwaterstand in de tijd	hoog	1.1 Stratificatie en selectie representatieve locaties	
		Grondwaterstand: gerichte opnamen	standaard	1.2 Stratificatie en selectie locaties naar maaiveldhoogte	
	Vaststelling referentiesituatie	GVG oorspronkelijke situatie	hoog	1.3 Gerichte opnamen 1	1.4 Gerichte opnamen 2
			standaard	1.5 Referentiereconstructie 1	1.6 Referentiereconstructie 2
Inventarisatie grondwaterkwaliteit / transport	kwel / infiltratie patroon kwaliteit kwelwater grondwaterfluxen	diepe stijghoogte	hoog	1.7 Geohydrologische systeemanalyse stijghoogte	
		Grondwaterstand	standaard	1.8 Stijghoogte op locaties uit 1.2	
		verticale weerstand deklaag	hoog	1.9 Geohydrologische systeemanalysegrondwaterstand: op locaties 1.8	
			standaard	1.10 Grondwaterstand op locaties 1.2	
		Grondwatersamenstelling	hoog	1.11 Kartering deklaag en pomproeven	
			standaard	1.12 Weerstand deklaag uit bestaande data	
		Stuurbaarheid van het systeem	response karakteristiek (neerslag/verdamping) neerslagafvoerrelaties invloed peilverandering op verandering grondwaterstand als functie van afstand tot waterloop	hoog	1.13 Geohydrologische systeemanalyse + landgebruik en chemie: op locaties 1.8
				standaard	1.14 Chemie op locaties 1.2
				hoog	
				Standaard	
Afvoercapaciteit watergangen	maximale afvoer	geologie en bodem	Hoog		
		Neerslag/verdamping	Standaard		
		Openwaterstand	Hoog		
		Wandruwheid	Standaard		
Karakteristiek dynamiek afvoer watergangen	Q-h relaties	Openwaterstand	Hoog		
		Afvoer	Standaard		
		Wandruwheid	Hoog		
Karakterisatie kwaliteit van het open water	kwaliteit van het open water	Samenstelling van het open water	Hoog		
		Openwaterstand	Standaard		
Karakterisatie dynamiek openwater	regiem curve, extreme waarden duurlijnen	Openwaterstand	Hoog		
			Standaard		

Tabel 2 Uifwerking besluisboom Structurele Aanpassing

<p>Voorspellingen alternatieve scenario's (grondwater model, oppervlaktewatermodel)</p>	<p>Modelijking Modelrandvoorwaarden Waardebereik van modelinvoer</p>	<p>geologische opbouw  wandruwheid  geometrie waterlopen  openwaterstand grondwaterstand stijghoogte neerslag/verdamping</p>	<p>hoog standaard hoog standaard hoog standaard hoog standaard hoog standaard</p>	
<p>Bergingsvermogen</p>	<p>Waterbalans Bergingsvermogen oppervlaktewater Bergingsvermogen grondwater</p>	<p>profielen waterlopen  openwaterstand  maaiveldhoogte  grondwaterstand</p>	<p>hoog standaard hoog standaard hoog standaard hoog standaard</p>	
<p>Vaststellen reactiesnelheid van het systeem</p>	<p>Modelijking Responsfuncties Oppervlaktewater/grondwater Neerslag/afvoer Uitgemalen debiet/grondwater</p>	<p>Grondwaterstand  openwaterstand  uitgeslagen debiet  neerslag/verdamping</p>	<p>hoog standaard hoog standaard hoog standaard hoog standaard</p>	

Tabel 3 Uitwerking beslisboom Operationele Sturing

Uitvoering besturingsregels	invoer / randvoorwaarde besturingsregel	(gradiënt) grondwaterstand	hoog	3.1 Stratificatie en selectie sturingslocaties
			standaard	3.2 Stratificatie en selectie sturingslocaties naar maaiveldhoogte
			hoog	
			standaard	
			hoog	
			standaard	
		(gradiënt) openwaterstand		
		(voorspelling) neerslag		

Tabel 4 Uitsluiting beslisboom evaluatie

<p>A. Verificatie of de GGOR is gehaald</p>	<p>Verandering in:                  Rondwater trappen (CxG)                  Regiem curve                  Duurlijnen                  Grond- en openwaterkwaliteit                  Openwaterfluxen</p>	<p>Wandruwheid openwaterstand in de tijd                  grondwaterstand in de tijd op steekproef-locaties                  grondwaterstand: gerichte opnamen                  openwaterstand in de tijd                  grondkwaliteit                  openwaterkwaliteit                  neerslag/verdamping</p>	<p>hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard</p>	<p>4.4 Evaluatie GGR op steekproeflocaties</p>
<p>B. Controle ongewenste veranderingen</p>	<p>(uitblijven van) veranderingen in:                  Gemiddelde grond- en oppervlaktewaterstand                  Grond- en openwaterkwaliteit                  Extreme waarden in grond- en openwaterstand</p>	<p>grondwaterstand in de tijd                  openwaterstand in de tijd                  grondkwaliteit                  openwaterkwaliteit                  neerslag/verdamping</p>	<p>hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard                  hoog                  standaard</p>	



### 3. Ontwerpmethoden

#### Methode 1.1

#### Stratificatie en selectie representatieve locaties grondwaterstand

Variabele: grondwaterstand (reeksen)

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: indeling beheersgebied in geohydrologische eenheden en per eenheid tenminste één locatie waar een grondwaterstandreeks wordt verzameld. Per locatie de minimale reekslengte.

#### Methode

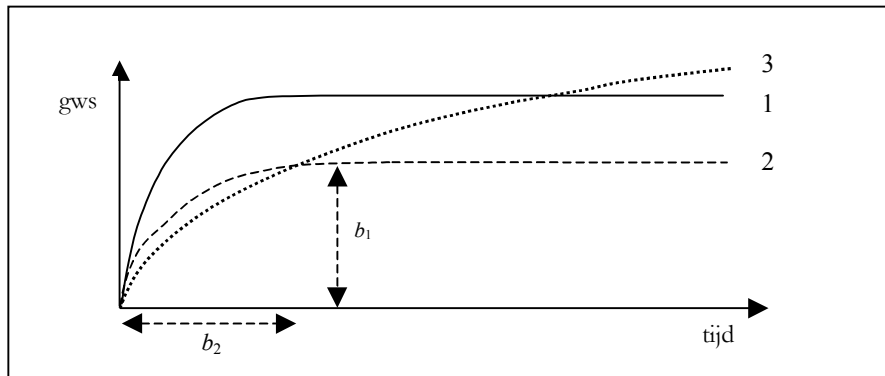
- 1 Stratificatie van het gebied in geohydrologische eenheden op basis van geologische kaart, bodemkaart 1:50000 (bodem en oude GT) en AHN.
- 2 Per stratum de volgende stappen (zie Bierkens en Massop (2000) voor een beschrijving van de achtergronden van deze methode)
  - a Schat gemiddelde grondwaterstand op basis van meest recente GT-kaart:

$$h_{\text{gem}} = -\left(\frac{GHG + GLG}{2}\right)$$

- b Schat op basis van het bodemtype (vertaling 1:50000 in bodemfysische eenheden: Wösten e.a., 1988), de stargreeks (Wösten e.a., 1994), de gemiddelde grondwaterstand  $h_{\text{gem}}$  en het programma CAPSEV (Wesseling, 1991) de effectieve berging  $\phi$  in het bodemprofiel, uitgaande van een evenwichtsvochtprofiel (flux 0 mm/d). Doe dit voor het 25x25 m grid van het AHN.
    - c Schat de drainageweerstand  $\gamma$  voor het 25x25 m grid als volgt: Uit de TOP10 vector worden de waterlopen gehaald. Per klasse van waterlopen (vier klassen van afnemende grootte) wordt de dichtheid aan waterlopen per stratum berekend. Eventueel kan dit binnen een stratum gedifferentieerd gebeuren door het stratum verder op te delen, bijv. in peilvakken, of zelfs per pixel via zoekstralen. Vervolgens wordt per klasse met de drainageformule van Ernst de drainageweerstand berekend (Ernst 1983; van der Gaast, in prep.). De benodigde geohydrologische opbouw wordt genomen uit de hydrotypenindeling (Massop e.a. 1997). Voor de benodigde geometrie van de waterlopen kan per klasse standaardmaten worden genomen. Bij de berekening van de totale drainageweerstand wordt vervolgens die drainageweerstand berekend die zou optreden onder natte omstandigheden, dus als alle vier de klassen van waterlopen watervoeren. Dit betekent dat het harmonisch gemiddelde genomen wordt van de berekende drainageweerstanden van de vier klassen.

---

1 Het harmonisch gemiddelde  $(\gamma_1^{-1} + \gamma_2^{-1} + \gamma_3^{-1} + \gamma_4^{-1})^{-1}$  is in dit geval de effectieve of vervangingsweerstand voor de vier parallel geschakelde drainageweerstanden.



Voorbeeld van responskarakteristieken van de grondwaterstand op een eenheidsinvoer neerslag

- d Op basis van de bergingscoëfficiënt en de drainageweerstand • bereken per 25x25 m pixel de parameters die de respons van het grondwatersysteem op het neerslagoverschot of een peilverandering bepalen (Zie bovenstaande figuur):

$$b_1 = \gamma$$

$$b_2 = 3\phi\gamma$$

- e Op elk pixel zijn nu de gemiddelde grondwaterstand  $h_{\text{gem}}$  en de respons-parameters  $b_1$  en  $b_2$  geschat. Vervolgens wordt per stratum de locatie opgezocht die wat betreft zijn waarden het dichtst ligt bij de gemiddelde waarden van  $h_{\text{gem}}$ ,  $b_1$  en  $b_2$ . Dit gaat als volgt:
- Bepaal de minimale en maximale waarden voor  $h_{\text{gem}}$ ,  $b_1$  en  $b_2$  binnen het stratum.
  - Bepaal voor iedere locatie de relatieve waarde binnen het stratum op een schaal van 0 tot 1:

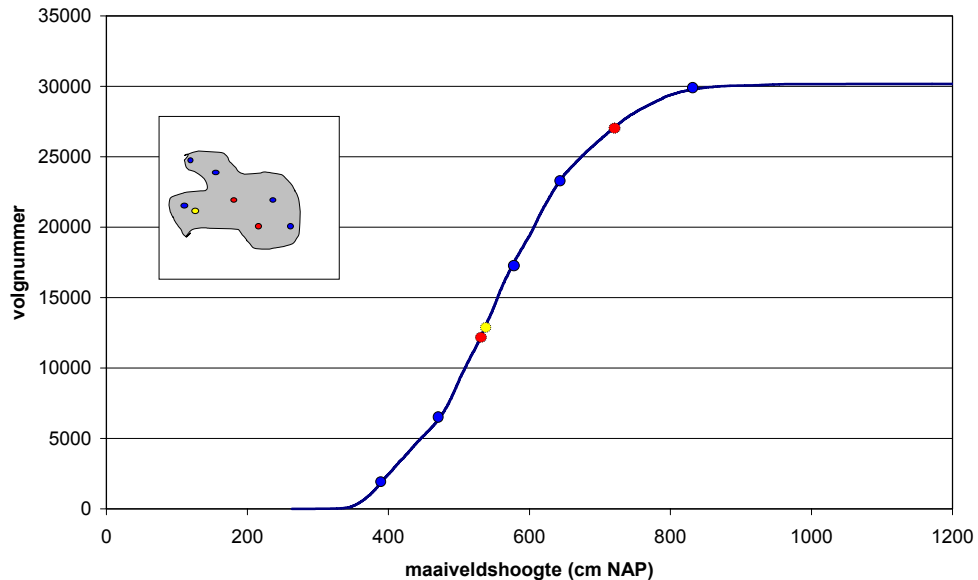
$$h'_{\text{gem}} = \frac{h_{\text{gem}} - h_{\text{gem,min}}}{h_{\text{gem,max}} - h_{\text{gem,min}}} \quad b'_1 = \frac{b_1 - b_{1,\text{min}}}{b_{1,\text{max}} - b_{1,\text{min}}} \quad b'_2 = \frac{b_2 - b_{2,\text{min}}}{b_{2,\text{max}} - b_{2,\text{min}}}$$

- Bepaal de mediane waarden  $h'_{\text{gem},50}$ ,  $b'_{1,50}$  en  $b'_{2,50}$  (50% is groter en 50% is kleiner) van  $h'_{\text{gem}}$ ,  $b'_1$  en  $b'_2$  voor het stratum. Strikt genomen zou men het gemiddelde moeten nemen. Echter, omdat  $h'_{\text{gem}}$ ,  $b'_1$  en  $b'_2$  worden geschat uit nogal onnauwkeurige schattingen van de drainageweerstand en de bergingscoëfficiënt kunnen er gemakkelijk uitschieters optreden. De mediaan is minder gevoelig voor deze uitschieters dan het gemiddelde. Vervolgens is per locatie de afwijking bepaald met de volgende formule:

$$afw = \sqrt{(h'_{\text{gem}} - h'_{\text{gem},50})^2 + (b'_1 - b'_{1,50})^2 + (b'_2 - b'_{2,50})^2}$$

De locatie met de minimale afwijking is de representatieve voor ons stratum. Hierbij moet tenslotte ook nog gekeken worden naar de ligging van deze locatie. Het is onwenselijk dat deze ligt in een klein gebiedje waar ons stratum voorkomt temidden van anders gestratificeerde punten, terwijl elders grotere aaneengesloten oppervlakten voorkomen van ons stratum. In dat geval moet een locatie gekozen worden die wel een kleine afwijking volgens bovenstaande formule heeft (dicht bij de mediaan) en geografisch in een groter aaneengesloten gebied van het stratum ligt.

- 3 Plot de maaiveldhoogten van de gekozen locaties in één figuur met het totale bereik aan maaiveldhoogten in het gebied. Vul de ontbrekende plekken in zodanig dat ook geografisch maximale spreiding wordt bereikt (zie figuur).



*Voorbeeld van toevoegen van aanvullende locaties om het gehele maaiveldhoogtebereik te dekken. Blauwe locaties zijn gekozen op basis van de selectie per stratum. De rode locaties zijn aanvullend om het maaiveldhoogtebereik te dekken. Bij de keuze tussen de rode en de gele verdient de rode de voorkeur omdat deze zorgt voor een betere geografische spreiding.*

- 3 Het resultaat van deze actie is minimaal één locatie per stratum waar een tijdreeks van de grondwaterstanden moeten worden verzameld met eventuele aanvullende locaties om te zorgen dat het gehele maaiveldhoogtebereik wordt bestreken. Op deze locaties kunnen op de 14de en de 28e van de maand grondwaterstanden worden gemeten en kunnen voor de kartering van 1:10000 GD-karakteristieken (GxG, regiemcurve, duurlijnen) e.d. tijdreeksen worden gemodelleerd. Om een tijdreeksmodel te calibreren moet minstens een tijdspanne van  $\text{MAX}(365, b_2)$  dagen worden gemeten. Het resulterende meetnet kan hiermee uitstekend dienst doen als basis voor een GD-kartering.

Aan deze methode kan het volgende nog worden toegevoegd. Stap 1, de stratificatie, is een subjectieve stap gebaseerd op hydrologisch en geologisch inzicht. Als alternatief kan men er ook voor kiezen om stap 2a t/m 2d eerst uit voeren en dan op basis van de responstijd  $b_2 = 3\phi\gamma$  het gebied op te delen in een beperkt aantal klassen van gelijke oppervlakte, waarbij het aantal klassen afhangt van het aantal buizen dat men wil plaatsen. Op deze wijze wordt impliciet rekening gehouden met geologie, bodem en hydrologie, waarbij tegelijkertijd wordt gegarandeerd dat de strata wat betreft dynamiek homogeen zijn. Over de keuze van het aantal buizen is moeilijk een regel te geven. Op basis van ervaringen van bestaande meetnetten van waterschappen varieert deze tussen 1 buis per 100 ha (zeer ambitieus) en 1 buis per 1000 ha (bovengrens).

## Methode 1.2

### Stratificatie en selectie locaties grondwaterstand naar maaiveldhoogte

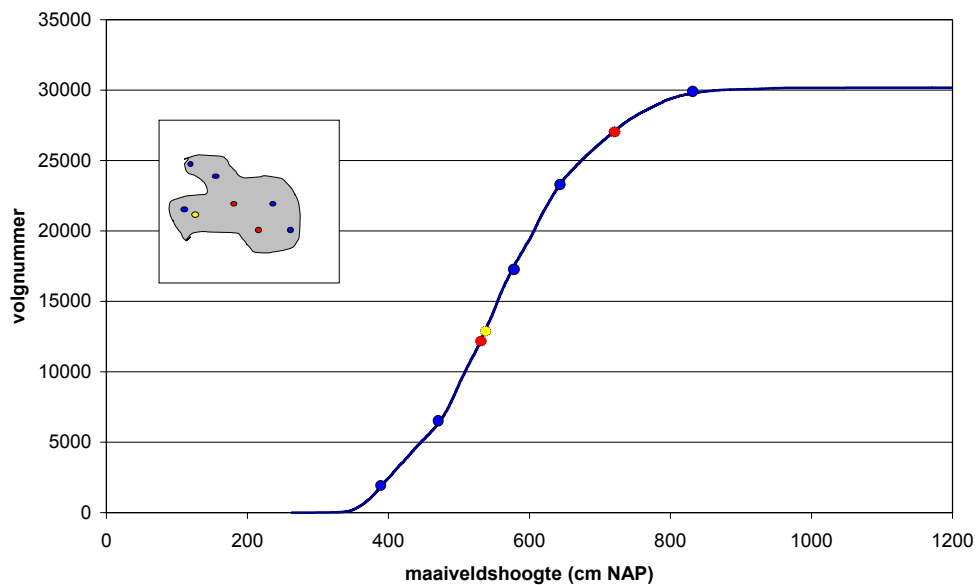
Variabele: grondwaterstand (reeksen)

Ambitieniveau: standaard

Resultaat: indeling beheersgebied in geohydrologische eenheden en per eenheid minstens één locatie waar een grondwaterstandreeksen wordt verzameld.

#### Methode

- 1 Stratificatie van het gebied in geohydrologische eenheden op basis van geologische kaart, bodemkaart 1:50000 (bodem en oude GT) en AHN.
- 2 Kies op basis van de AHN maaiveldhoogten per stratum de locatie met de 50% hoogste maaiveldhoogte als meetlocatie voor grondwaterstandreeksen.
- 3 Plot de maaiveldhoogten van de gekozen locaties in één figuur met het totale bereik aan maaiveldhoogten in het gebied. Vul de ontbrekende plekken in zodanig dat ook geografisch maximale spreiding wordt bereikt (zie figuur).



*Voorbeeld van toevoegen van aanvullende locaties om het gehele maaiveldhoogtebereik te dekken. Blauwe locaties zijn gekozen op basis van de selectie per stratum. De rode locaties zijn aanvullend om het maaiveldhoogtebereik te dekken. Bij de keuze tussen de rode en de gele verdient de rode de voorkeur omdat deze zorgt voor een betere geografische spreiding.*

- 4 Het resultaat is per stratum een meetlocatie en eventuele aanvullende locaties om de spreiding in maaiveldhoogtebereik te krijgen. Op deze locaties kunnen op de 14de en de 28e van de maand grondwaterstanden worden gemeten. Op deze locaties zullen voor de kartering van 1:10000 GD-karakteristieken (GxG, regiemcurve, duurlijnen) e.d. tijdreeksen worden gemodelleerd. Om een tijdreeksmodel te calibreren moet minstens een jaar worden gemeten. Als de responstijd groter is dan een jaar moet de responstijd als minimale reekslengte worden gehanteerd. Als deze niet bekend is kan als richtlijn worden genomen:

Responstijd in dagen = (Gemiddelde afstand watervoerende waterlopen in meters)/4

Het resulterende meetnet kan hiermee dienst doen als basis voor een GD-kartering.

### **Methode 1.3**

#### **Gerichte opnamen 1**

Variabele: grondwaterstand (twee opnamen)

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: indeling beheersgebied in geohydrologische eenheden en per eenheid 30 locaties met gerichte opnamen.

#### Methode

- 1 Stratificatie van het gebied in geohydrologische eenheden op basis van geologische kaart, bodemkaart 1:50000 (bodem en oude GT) , AHN en (eventueel) landgebruik.
- 2 Deel per stratum alle locaties op basis van maaiveldhoogte in 30 klassen in. Kies per klasse één maaiveldhoogte uit (meestal het klassemidden). De locatie behorende bij deze maaiveldhoogte is degene die bezocht gaat worden. In plaats van de maaiveldhoogte kan, als dit kan worden berekend uit stuwpeilen vaak beter de drooglegging worden gehanteerd.
- 3 Op deze wijze worden per stratum 30 locaties geselecteerd waar twee maal een grondwaterstand wordt gemeten. Dit gebeurt één maal wanneer de grondwaterstand dicht bij GHG-niveau is en één maal wanneer deze dicht bij GLG-niveau is. Dit is te controleren door de grondwaterstand in een permanente buis in de buurt van het stratum door het jaar te monitoren. Het is belangrijk de waarnemingen in alle 30 buizen binnen een korte periode (maximaal 3 dagen) te verrichten in een periode die niet valt in of vlak na een periode met veel neerslag. Waarnemen gebeurt als volgt: op 1 dag worden gaten geboord tot onder het grondwatervniveau. Op de volgende dag wordt de grondwaterstand t.o.v. maaiveld in de boorgaten gemeten met een meetklokje.

**Methode 1.4**  
**Gerichte opnamen 2**

Variabele: grondwaterstand (twee opnamen)

Ambitieniveau: standaard

Resultaat: indeling beheersgebied in geohydrologische eenheden en per eenheid 15 locaties met gerichte opnamen.

Methode

Als 1.3 maar nu met 15 locaties per stratum.

## **Methode 1.5**

### **Referentiereconstructie 1**

Variabele: Bodemtype, maaiveldhoogte, boorbeschrijvingen

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: bodemkaart en boorbeschrijvingen en kaart met maaiveldhoogten die gebruikt kunnen worden om de referentiesituatie (Methode Brabant) vast te stellen.

Methode

- 1 Haal maaiveldhoogten uit het AHN bestand
- 2 Neem of maak een 1:10000 tot 1:25000 bodemkaart
- 3 Maak met name op overgangsgebieden van lage naar hoge gronden aanvullende boringen (twee per kaarteenheden) om de relatie diepte hydromorfe kenmerken (en dus GVG) en bodemtype vast te stellen.

## **Methode 1.6**

### **Referentiereconstructie 2**

Variabele: Bodemtype, maaiveldhoogte, boorbeschrijvingen

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: bodemkaart en boorbeschrijvingen en kaart met maaiveldhoogten die gebruikt kunnen worden om de referentiesituatie (Methode Brabant) vast te stellen.

Methode

1. Haal maaiveldhoogten uit het AHN bestand
2. Neem of maak een 1:50000 bodemkaart
3. Maak met name op overgangsgebieden van lage naar hoge gronden aanvullende boringen (twee per kaarteenheden) om de relatie diepte hydromorfe kenmerken (en dus GVG) en bodemtype vast te stellen.



## **Methode 1.7**

### **Geohydrologische systeemanalyse en stijghoogte**

Variabele: Stijghoogte (reeksen)

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: Op voor het grondwatersysteem representatieve locaties waarnemingsreeksen van de stijghoogte.

Methode

- 1 Uit geologische kaart, GD 1:10000 (of anders GxG uit 1:50000 kaart), AHN en grondwaterkaarten onderscheiden van grondwatersystemen op drie niveaus: super-regionaal (bijv dekzandgebied naar rivierengebied), regionaal (dekzandruggen naar beekdalen of hoge naar lage afwateringseenheden) en lokaal (alles kleiner). Voorbeeld van werkwijze:
  - a Indeling op basis van geologie (breuken e.d)
  - b Maken eerste schatting freatisch vlak door *smoothing* van  $AHN - ((GHG + GLG)/2)$ .
  - c Superpositie waterlopen en peilen
  - d Kriging met external drift a.h.v. gemiddelde stijghoogten in buizen en peilen in waterlopen met eerste schatting freatisch vlak als external drift
- 2 Localiseren van stijghoogtebuizen op 5%, 50% en 95% grondwaterstandlocaties (respectievelijk kwel, intermediair en inzijgingsgebied).
- 3 Op deze locaties kunnen op de 14de en de 28e van de maand grondwaterstanden worden gemeten gedurende tenminste één hydrologisch jaar.

**Methode 1.8**  
**Stijghoogte op locaties uit 1.2**

Variabele: Stijghoogte (reeksen)

Ambitieniveau: standaard

Resultaat: Binnen geologisch/bodemkundige strata stijghoogtewaarnemingen op locaties die volgens methode 1.2 zijn vastgesteld.

Methode

Als 1.2, maar nu waarnemingen van de stijghoogte

**Methode 1.9**  
**Geohydrologische systeemanalyse en grondwaterstand**

Variabele: Grondwaterstand (reeksen)

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: Op voor het grondwatersysteem representatieve locaties waarnemingsreeksen van de freatische grondwaterstand.

Methode

Als 1.7 maar nu voor grondwaterstanden

**Methode 1.10**  
**Stijghoogte op locaties uit 1.2**

Variabele: Stijghoogte (reeksen)

Ambitieniveau: standaard

Resultaat: Binnen geologisch/bodemkundige strata stijghoogtewaarnemingen op locaties die volgens methode 1.2 zijn vastgesteld.

Methode

Als 1.2.

## **Methode 1.11**

### **Kartering deklaag en pompproeven**

Variabele: Weerstandswaarde deklaag (dagen)

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: Kaart met weerstandswaarde deklaag

#### Methode

- 1 Kartering deklaag via stratificatie op basis van a-priori geologische kennis
- 2 Per stratum een aselechte steekproef van twee boorlocaties waar beschreven boringen worden gedaan.
- 3 Archetypische opbouw per stratum vaststellen en schatten weerstandswaarde via literatuurwaarden hydraulische doorlatendheid (ter controle)
- 4 Op locaties boringen een pomproef uitvoeren en op basis hiervan een gemiddelde weerstand per stratum vaststellen.

## **Methode 1.12**

### **Weerstand deklaag uit bestaande data**

Variabele: Weerstandswaarde deklaag (dagen)

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: Kaart met weerstandswaarde deklaag

#### Methode

- 1 Kartering deklaag via stratificatie op basis van a-priori geologische kennis
- 2 Per stratum op basis van expertkennis en bestaande boringen op locaties van hetzelfde geotype de archetypische opbouw per stratum vaststellen en schatten weerstandswaarde via literatuurwaarden hydraulische doorlatendheid.

### **Methode 1.13**

#### **Geohydrologische systeemanalyse + landgebruik voor chemie**

Variabele: Chemische samenstelling grondwater

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: Op voor het grondwatersysteem representatieve locaties de gemiddelde chemische samenstelling van het grondwater, eventueel per seizoen.

#### Methode

Als 1.7 maar nu voor chemie. Vanwege de analysekosten is het moeilijk om echte tijdreeksen te verzamelen. Een aselechte selectie van meettijdstippen verdient de voorkeur i.v.m. kwantificeren betrouwbaarheid gemiddelden. Als het jaargemiddelde geschat wordt moet tenminste 1 jaar gemeten worden met tenminste twee meettijdstippen per jaar. Als seizoensgemiddelden geschat worden moet tenminste twee jaar worden gemeten met per jaar tenminste één waarneming per seizoen en de gekozen tijdstippen van hetzelfde seizoen in verschillende jaren onafhankelijk geloot.

## **Methode 1.14**

### **Grondwaterchemie op locaties uit 1.2**

Variabele: Chemische samenstelling grondwater

Ambitieniveau: standaard

Resultaat: Op voor het grondwatersysteem representatieve locaties de gemiddelde chemische samenstelling van het grondwater.

#### Methode

Selectie locaties als onder 1.2. Vanwege de analysekosten is het moeilijk om echte tijdreeksen te verzamelen. Een aselechte selectie van meettijdstippen verdient de voorkeur i.v.m. kwantificeren betrouwbaarheid gemiddelden. Als het jaargemiddelde geschat wordt moet tenminste 1 jaar gemeten worden met tenminste twee meettijdstippen per jaar.



### Methode 3.1

#### Stratificatie en selectie sturingslocaties grondwaterstand

Variabele: grondwaterstand (reeksen)

Ambitieniveau: hoog

Resultaat: indeling beheersgebied in gelijkaardige hydrologische eenheden en per eenheid tenminste twee locaties waar grondwaterstandreeksen worden verzameld.

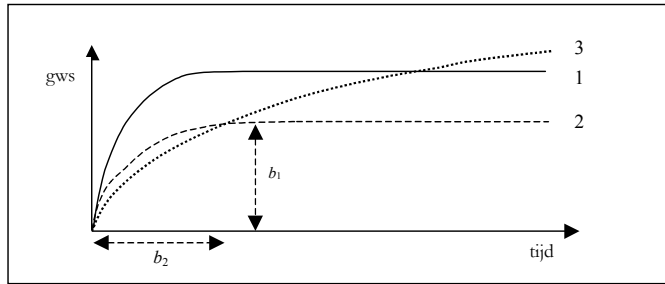
Methode

- 1 Clustering van peilvakken of beheersvakken van het gebied in gelijkaardige geohydrologische eenheden op basis van geologische kaart, bodemkaart 1:50000 (bodem en oude GT) , AHN en (eventueel) landgebruik. Bij het clusteren wordt in eerste instantie alleen gekeken naar punten die in het zogenaamde beheersbare gebied liggen, dwz punten waarvoor geldt dat aanliggende waterlopen bij maximale opstuwung van het peil onder geen verhang (niet-afvoersituatie, in de zomer eventueel met wateraanvoer) nog water voren. Dit zijn de punten waar men onder gewone situaties op zou kunnen sturen, i.c. met als doel waterconservering voor de zomer of het vrijmaken van berging wanneer een grote neerslaggebeurtenis wordt verwacht. Bepalen van het beheersbare gebied gebeurt in twee stappen:
  - i. Bepaal per beheersvak de gemiddelde diepte van de tertiaire waterlopen en trek die af van de maaiveldhoogte.
  - ii. Bepaal de maximale stuwhoogte bij het uitstroompunt van het beheersvak (of de maximaal toelaatbare waterhoogte bij het gemaal) en kijk voor welke delen van het beheersvak deze hoogte groter is dan de maaiveldhoogte minus de gemiddelde diepte van het tertiaire systeem. De locaties die hieraan voldoen vormen het beheersbare gebied;
- 2 Per cluster de volgende stappen (zie Bierkens en Massop (2000) voor een beschrijving van de achtergronden van deze methode)
  - a Schat gemiddelde grondwaterstand op basis van meest recente GT-kaart:
$$h_{\text{gem}} = -\left(\frac{GHG + GLG}{2}\right)$$
  - b Schat op basis van het bodemtype (vertaling 1:50000 in bodemfysische eenheden: Wösten e.a., 1988), de sturingreeks (Wösten e.a., 1994), de gemiddelde grondwaterstand  $h_{\text{gem}}$  en het programma CAPSEV (Wesseling, 1991) de effectieve berging  $\phi$  in het bodemprofiel, uitgaande van een evenwichtsvochtprofiel (flux 0 mm/d). Doe dit voor het 25x25 m grid van het AHN.
  - c Schat de drainageweerstand  $\gamma$  voor het 25x25 m grid als volgt: Uit de TOP10 vector worden de waterlopen gehaald. Per klasse van waterlopen (vier klassen van afnemende grootte) wordt de dichtheid aan waterlopen per cluster berekend. Eventueel kan dit binnen een cluster gedifferentieerd gebeuren door het cluster verder op te delen, bijv. in peilvakken. Vervolgens wordt per klasse met de drainageformule van Ernst de drainageweerstand berekend (Ernst 1983; van der Gaast, in prep.). De benodigde geohydrologische opbouw wordt genomen uit de hydrotypenindeling (Massop e.a. 1997). Voor de benodigde geometrie van de waterlopen kan per klasse standaardmaten worden genomen. Bij de berekening van de totale drainageweerstand wordt vervolgens die drainageweerstand berekend die zou optreden onder natte omstandigheden, dus als alle vier de klassen van waterlopen watervoeren. Dit betekent dat het harmonisch<sup>2</sup> gemiddelde genomen wordt

---

<sup>2</sup> Het harmonisch gemiddelde  $(\gamma_1^{-1} + \gamma_2^{-1} + \gamma_3^{-1} + \gamma_4^{-1})^{-1}$  is in dit geval de effectieve of vervangingsweerstand voor de vier parallel geschakelde drainagewestanden.

van de berekende drainageweerstand van de vier klassen.



- d Voorbeeld van responskarakteristieken van de grondwaterstand op een eenheidsinvoer neerslag

Op basis van de bergingscoëfficiënt en de drainageweerstand  $\gamma$  bereken per 25x25 m pixel de parameters die de respons van het grondwatersysteem op het neerslagoverschot of een peilverandering bepalen (Zie bovenstaande figuur):

$$b_1 = \gamma$$

$$b_2 = 3\phi\gamma$$

- 3 Op elk pixel zijn nu de gemiddelde grondwaterstand  $h_{gem}$  en de respons-parameters  $b_1$  en  $b_2$  geschat. Vervolgens wordt per cluster de locatie opgezocht die wat betreft zijn waarden het dichtst ligt bij de gemiddelde waarden van  $h_{gem}$ ,  $b_1$  en  $b_2$  binnen het beheersbare gebied. Dit gaat als volgt:

- i. Bepaal de minimale en maximale waarden voor  $h_{gem}$ ,  $b_1$  en  $b_2$  van alle locaties binnen het cluster die in het beheersbare gebied vallen..

Bepaal voor iedere locatie de relatieve waarde binnen het cluster op een schaal van 0 tot 1:

$$h'_{gem} = \frac{h_{gem} - h_{gem,min}}{h_{gem,max} - h_{gem,min}} \quad b_1' = \frac{b_1 - b_{1,min}}{b_{1,max} - b_{1,min}} \quad b_2' = \frac{b_2 - b_{2,min}}{b_{2,max} - b_{2,min}}$$

Bepaal de mediane waarden  $h'_{gem,50}$ ,  $b'_{1,50}$  en  $b'_{2,50}$  (50% is groter en 50% is kleiner) van  $h'_{gem}$ ,  $b_1'$  en  $b_2'$  voor het cluster. Strikt genomen zou men het gemiddelde moeten nemen. Echter, omdat  $h'_{gem}$ ,  $b_1'$  en  $b_2'$  worden geschat uit nogal onnauwkeurige schattingen van de drainageweerstand en de bergingscoëfficiënt kunnen er gemakkelijk uitschieters optreden. De mediaan is minder gevoelig voor deze uitschieters dan het gemiddelde. Vervolgens is per locatie de afwijking bepaald met de volgende formule:

$$afw = \sqrt{(h'_{gem} - h'_{gem,50})^2 + (b_1' - b'_{1,50})^2 + (b_2' - b'_{2,50})^2}$$

De locatie met de minimale afwijking is de representatieve voor het cluster.

- 4 Naast de representatieve locatie per cluster wordt ook een locatie gezocht die bij situaties van hoge afvoeren relatief snel grondwaterstanden aan maaiveld oplevert. Deze locatie wordt gekozen uit het gehele gebied, omdat tijdens afvoersituaties ook normaal droogliggende watergangen water kunnen afvoeren. Dit gebeurt als volgt:

- i. Bij elke stuw wordt een schatting gemaakt van de waterhoogte bij maatgevende afvoer. Deze wordt geschat door bij de hoogte van de stuwkruin voor de stand bij een droge winter de overstorthoogte op te tellen. De overstorthoogte wordt bepaald uit de maatgevende afvoer en de stuwformule.

- ii. Het vlak van de hoogwaterlijn binnen het waterschap wordt benaderd door de waterhoogte bij maatgevende afvoer tussen de verschillende stuwen te interpoleren en eventuele depressies in dit vlak te verwijderen.

iii. De relatieve maaiveldhoogte ten opzichte van de hoogwaterlijn wordt berekend door het onder stap 2 geconstrueerde vlak af te trekken van de AHN-maaiveldhoogten. Het resultaat is een soort natte-plekkenkaart.

iv. Het 5% laagste punt van de kaart met relatieve maaiveldhoogten wordt gekozen als tweede locatie waar een tijdreeks van grondwaterstanden moet worden verzameld. Dit is een locatie die ondiepe grondwaterstanden geeft tijdens hoge afvoeren.

- 5 Het resultaat van deze acties zijn twee locaties per cluster waar tijdreeksen van de grondwaterstanden moeten worden verzameld:
- een representatieve locatie (representatieve respons op neerslagoverschot voor het beheersbare gebied) voor het operationeel beheer onder normale omstandigheden;
  - een natte locatie bij hoge afvoeren;

Aan deze methode kan het volgende nog worden toegevoegd. Het aantal te maken clusters hangt af van het aantal buizen dat men wil plaatsen. Over de juiste keuze van het aantal buizen is moeilijk een regel te geven. Op basis van ervaringen van bestaande meetnetten van waterschappen varieert deze tussen 1 buis per 100 ha (zeer ambitieus) en 1 buis per 1000 ha (bovengrens). Men kan bij deze procedure nog op buizen besparen door representatieve buizen te vervangen door nabijgelegen bestaande TNO-buizen met vergelijkbare responseigenschappen en de alarmbuis te vervangen door een representatieve buis in een ander cluster dat wat betreft responseigenschappen lijkt op die van de alarmbuis, waarbij men bij het opstellen van sturingsregels rekening moet houden met verschillen in drooglegging bij maatgevende afvoer tussen de twee locaties.

## Methode 3.2

### Stratificatie en selectie sturingslocaties grondwaterstand naar maaiveldhoogte

Variabele: grondwaterstand (reeksen)

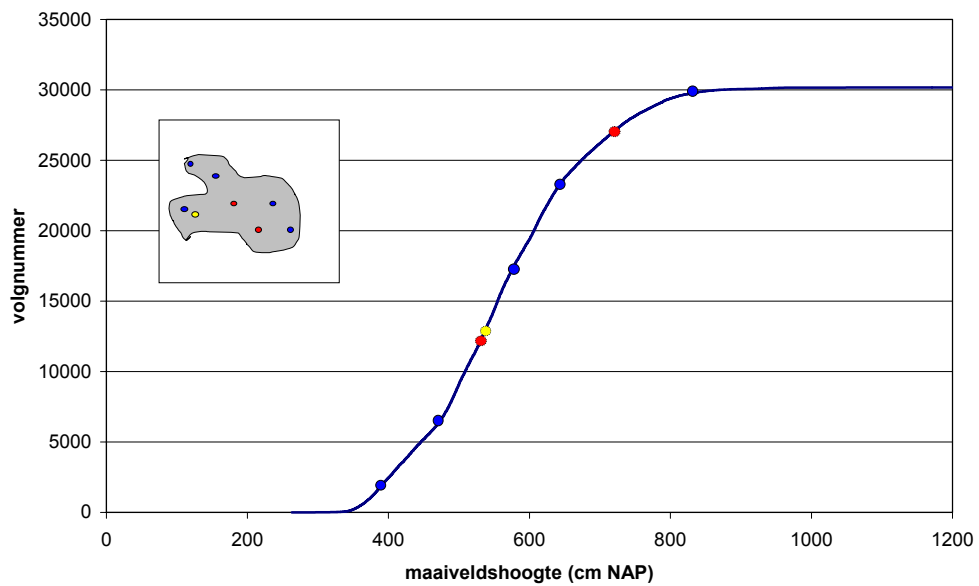
Ambitieniveau: standaard

Resultaat: indeling beheersgebied in gelijkaardige hydrologische eenheden en per eenheid minstens één locatie waar grondwaterstandreeksen worden verzameld.

#### Methode

- 1 Clustering van peilvakken of beheersvakken van het gebied in gelijkaardige geohydrologische eenheden op basis van geologische kaart, bodemkaart 1:50000 (bodem en oude GT) , AHN en (eventueel) landgebruik. Bij het clusteren wordt in eerste instantie alleen gekeken naar punten die in het zogenaamde beheersbare gebied liggen, dwz punten waarvoor geldt dat aanliggende waterlopen bij maximale opstuwning van het peil onder geen verhang (niet-afvoersituatie, in de zomer eventueel met wateraanvoer) nog water voren. Dit zijn de punten waar men onder gewone situaties op zou kunnen sturen, i.c. met als doel waterconservering voor de zomer of het vrijmaken van berging wanneer een grote neerslaggebeurtenis wordt verwacht. Bepalen van het beheersbare gebied gebeurt in twee stappen:
  - i. Bepaal per beheersvak de gemiddelde diepte van de tertiaire waterlopen en trek die af van de maaiveldhoogte.
  - ii. Bepaal de maximale stuwhoogte bij het uitstroompunt van het beheersvak (of de maximaal toelaatbare waterhoogte bij het gemaal) en kijk voor welke delen van het beheersvak deze hoogte groter is dan de maaiveldhoogte minus de gemiddelde diepte van het tertiaire systeem. De locaties die hieraan voldoen vormen het beheersbare gebied;
- 2 Kies op basis van de AHN maaiveldhoogten per cluster de locatie met de 50% hoogste maaiveldhoogte binnen het beheersbare gebied als meetlocatie voor grondwaterstandreeksen.
- 3 Plot de maaiveldhoogten van de gekozen locaties in één figuur met het totale bereik aan maaiveldhoogten in het gebied. Vul de ontbrekende plekken in zodanig dat ook geografisch maximale spreiding wordt bereikt (zie figuur). Op deze wijze zijn er binnen het gebied altijd buizen in het lage bereik om als waarschuwbuis voor hoge afvoeren te fungeren.

Aan deze methode kan het volgende nog worden toegevoegd. Het aantal te maken clusters hangt af van het aantal buizen dat men wil plaatsen. Over de juiste keuze van het aantal buizen is moeilijk een regel te geven. Op basis van ervaringen van bestaande meetnetten van waterschappen varieert deze tussen 1 buis per 100 ha (zeer ambitieus) en 1 buis per 1000 ha (bovengrens).



*Voorbeeld van toevoegen van aanvullende locaties om het gehele maaiveldhoogtebereik te dekken. Blauwe locaties zijn gekozen op basis van de selectie per cluster. De rode locaties zijn aanvullend om het maaiveldhoogtebereik te dekken. Bij de keuze tussen de rode en de gele verdient de rode de voorkeur omdat deze zorgt voor een betere geografische spreiding.*

Het resultaat is per cluster een meetlocatie en eventuele aanvullende locaties om de spreiding in maaiveldhoogtebereik te krijgen.

## Methode 4.4 Evaluatie gewenst grondwaterregiem op steekproeflocaties

Variabele: grondwaterstand (reeksen) op steekproeflocaties

Ambitieniveau: standaard

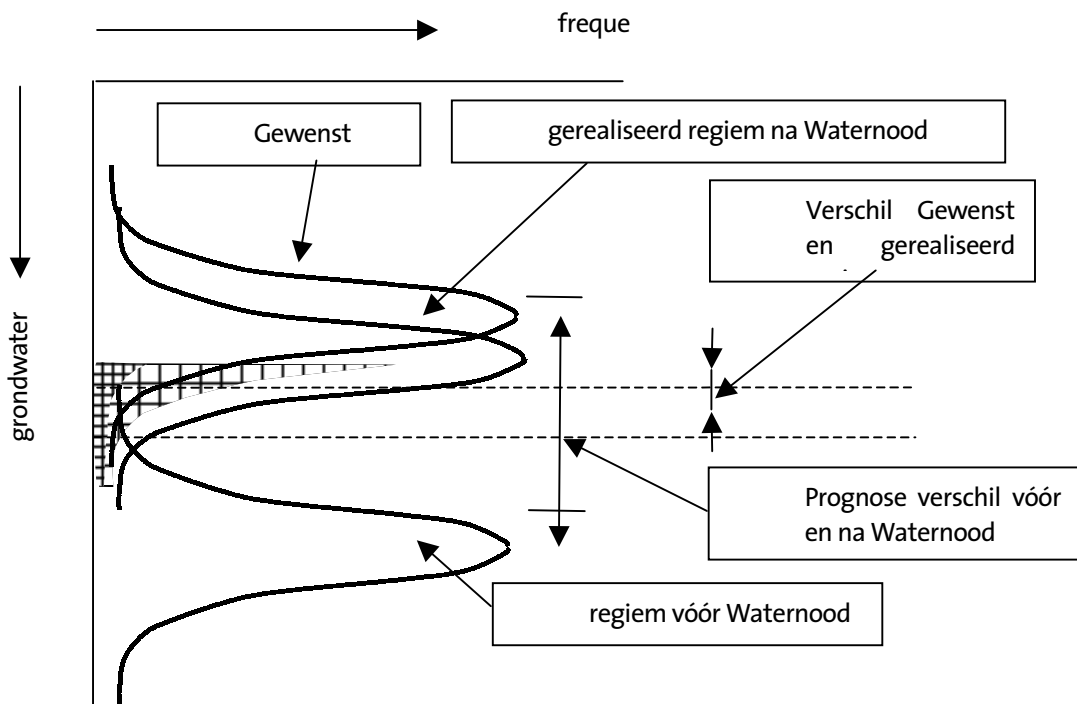
Resultaat: indeling beheersgebied in gelijkaardige hydrologische eenheden en per eenheid het aantal locaties en de meetfrequentie op die locaties waar grondwaterstanden moeten worden gemeten om te evalueren of het gewenste grondwaterregime (gemiddeld voor de hydrologische eenheden) voldoende dicht wordt benaderd.

Methode

Gegevensbewerking

Voordat ingegaan wordt op het ontwerp van het meetnet, wordt eerste vastgesteld wat er bij de evaluatie met de gegevens zal gebeuren. Stel dat het te ontwerpen meetnet uit  $m$  meetlocaties bestaat die gedurende  $n$  jaar met een bepaalde frequentie worden waargenomen.

Op een meetlocatie is er sprake van een regiem vóór Waterlood, een gewenst regiem en een regiem na Waterlood. Dit laatste wordt het gerealiseerde regiem genoemd. Voor één bepaalde datum is deze situatie weergegeven in onderstaande figuur.



Regiem vóór en na Waterlood en het gewenste regiem voor één locatie en één datum.

In het voorbeeld in deze figuur is het grondwaterregiem vóór Waterlood lager dan het gewenste regiem. Door middel van maatregelen wordt getracht het gewenste regiem te bereiken. Het gewenste regiem is dus gelijk aan de prognose. Na uitvoering van Waterlood is het gerealiseerde regiem niet gelijk aan het gewenste regiem, maar iets lager. De bovenste streeplijn geeft het 2,5% percentiel van het gewenste grondwaterregiem weer. De onderste streeplijn geeft het 2,5% percentiel van het gerealiseerde regiem weer. Het gearceerde oppervlak onder het gerealiseerde regiem geeft de frequentie en grootte van

de feitelijke onderschrijding van het 2,5% percentiel van het gewenste regiem. Het donkerder gearceerde oppervlak onder het gewenste regiem geeft de frequentie en grootte van de onderschrijding bij het gewenste regiem. Het verschil tussen beide gearceerde oppervlakken speelt ook een rol in het bepalen van de schade als gevolg van een te lage grondwaterstand. Op analoge wijze kan de 97,5% percentiele waarde aan de bovenkant van het gewenste regiem worden beschouwd.

Gerealiseerd regiem per locatie en per datum.

De evaluatie start na een periode van waarnemingen ná uitvoering van Waterlood. Per meetlocatie en per meetdatum wordt uit de waarnemingen het gerealiseerde regiem bepaald. Het gerealiseerde regiem is de kansverdeling van de grondwaterstand die optreedt op één datum door de jaren heen. Onder de aanname dat deze kansverdeling normaal verdeeld is, kan het gerealiseerde regiem worden gekarakteriseerd door het bepalen van het gemiddelde en standaardafwijking van de waarnemingen op de betreffende datum. Hiermee ligt de hele kansverdeling vast, en dus ook de grondwaterstand behorende bij de 2,5% en 97,5% percentiele waarde. Voor elke meetlocatie kan worden vastgesteld hoe groot het verschil is (in centimeters) tussen de 2,5% en 97,5% percentiele waarden van het gewenste regiem en het gerealiseerde regiem (zie figuur). In het ideale geval zijn deze afwijkingen nul. Als de 2,5% percentiele waarde van het gerealiseerde regiem onder het gewenste regiem ligt, is de doelstelling op de betreffende locatie niet gehaald. Analoog geldt dat de 97,5% percentiele waarden van het gerealiseerde regiem boven die van het gewenste regiem moet liggen. Bij het berekenen van verschillen op locaties worden dus de volgende regels toegepast (in het geval grondwaterstand t.o.v. NAP):

- 2,5% gerealiseerd lager dan 2,5% gewenst: verschil = 2,5% gewenst – 2,5% gerealiseerd;
- 2,5% gerealiseerd hoger dan 2,5% gewenst: verschil = 0 (immers de grens van gerealiseerd ligt binnen de gewenste zone -> geen schade);
- 97,5% gerealiseerd hoger dan 97,5% gewenst: verschil = 97,5% gerealiseerd – 97,5% gewenst;
- 97,5% gerealiseerd lager dan 97,5% gewenst: verschil = 0 (immers de grens van gerealiseerd ligt binnen de gewenste zone -> geen schade)

*Ruimtelijk gemiddeld verschil in percentiele waarden.*

Per datum zijn volgens de hierboven beschreven methode op  $m$  locaties in het gebied de verschillen tussen de 2,5% en 97,5% percentiele waarden van het gerealiseerde regiem en het gewenste regiem vastgesteld. Om een gebiedsuitspraak te doen wordt het ruimtelijk gemiddelde bepaald van de verschillen. Hoe dichter deze getallen bij 0 liggen des te lager de schade, des te beter lijkt de gerealiseerde situatie op de gewenste. Indien er voldoende locaties bemeten zijn ( $m > 5$ ) kan ook de standaardafwijking van de ruimtelijke verschillen worden bepaald. Deze standaardafwijking is een maat voor de ruimtelijke variatie in de verschillen. De standaardafwijking is in het ideale geval gelijk aan nul, maar zal in de praktijk altijd groter zijn.

opm. 1. Het meetnet wordt ontworpen om het ruimtelijk gemiddelde verschil in de percentiele waarden vast te kunnen stellen. Uiteraard kunnen de meetreeksen ook uitgebreider worden geanalyseerd.

opm. 2. Bij de bewerkingen is uitgegaan van een samenhangend grondwatersysteem. Indien het gebied op basis van het grondwaterregiem in verschillende sub-gebieden uit een valt, dient het gebied te worden gestratificeerd. Aan de verschillen worden weegfactoren meegegeven die samenhangen met de grootte van het sub-gebied.

### *Bepaling meetperiode en aantal locaties.*

De onzekerheid in het ruimtelijk gemiddelde verschil (zie boven) is afhankelijk van het aantal meetpunten, de meetfrequentie en de lengte van periode dat gemeten wordt na uitvoering van Waterlood. De ervaring leert dat een meetfrequentie van 24 maal per jaar (in Nederland de standaard meetfrequentie) voldoende is om een goede regiemcurve voor een heel jaar vast te stellen. Bovendien is deze frequentie in veel gevallen ook voldoende om binnen enkele jaren een relatie met het neerslagoverschot vast te stellen. De frequentie van 24 maal per jaar wordt hier verder als uitgangspunt genomen.

### *Stap 1*

Om de invloed van de periodelengte en het aantal locaties op de onzekerheid van het ruimtelijk gemiddelde verschil te bepalen, wordt eerste de onzekerheid in de bepaling van het verschil op één locatie beschouwd. Hiertoe wordt onderscheid gemaakt tussen grondwaterregiems (na uitvoering van Waterlood) die in belangrijke mate wordt bepaald door het weer (neerslag en verdamping) of door oppervlakte water.

Bij neerslaggedreven systemen in een vrij korte tijd (meestal binnen een paar jaar) een relatie worden gelegd tussen de grondwaterstand en neerslag/verdamping en vervolgens een langjarige grondwaterstandreeks (bijvoorbeeld 30 jaar) worden gesimuleerd. De fout in de regiemcurve die uit de gesimuleerde langjarige reeks wordt bepaald, is verwaarloosbaar.

Indien er geen relatie tussen de grondwaterstand en het neerslagoverschot gelegd kan worden, dient de regiemcurve uit de grondwaterstandwaarnemingen zelf worden bepaald. Aangezien dit in de praktijk altijd met relatief korte reeksen (enkele jaren) moet gebeuren, is de schattingsfout in dit geval niet verwaarloosbaar. De variantie van deze fout is:

$$\sigma_{loc}^2 = \frac{\sigma_t^2}{n}$$

Hierin is:

$\sigma_t^2$  de tijdvariantie op de betreffende locatie en datum na uitvoering van Waterlood. Dit is niet de variantie van de tijdreeks door het jaar heen, maar de variantie van alle standen in verschillende jaren op een bepaalde datum;  
 $n$  het aantal jaren waarnemingen.

Opm. De bovengenoemde onzekerheid kan pas berekend worden na uitvoering van Waterlood. In het stadium van meetnetontwerp is dit niet mogelijk, omdat de tijdsvariantie alleen uit de periode vóór Waterlood kan worden bepaald.

Indien er te weinig jaren waarnemingen zijn, of het is te voorzien dat het regiem na uitvoering van Waterlood ingrijpend veranderd is, dienen deze eigenschappen met hydrologisch inzicht te worden geschat. Schattingsprocedure kan zijn:

schat voor de situatie na uitvoering van Waterlood de gemiddelde waarde, reële maximale waarde en reële minimale waarde.

Variantie  $\approx$  kwadraat van fb van het verschil van de maximale en de minimale waarde.



## Stap 2

Van de verschillen in percentiele waarden op de meetlocaties wordt het ruimtelijk gemiddelde genomen. De variantie van dit gemiddelde is:

$$\sigma_{rvgem}^2 = \frac{1}{m^e} \frac{\sigma_t^2}{n} + \frac{\sigma_{rv}^2}{m}$$

met

$$m^e = m \left[ 1 + 2 \sum_{i=1}^m \left( 1 - \frac{i}{m} \right) |\rho_{gem}| \right]^{-1}$$

hierin is:

$\sigma_{rv}^2$	de ruimtelijke variantie van de verschillen in percentiele waarde op de meetlocaties
$\sigma_{rvgem}^2$	de variantie van de ruimtelijk gemiddelde verschillen in percentiele waarde
$m$	het aantal meetlocaties
$n$	het aantal meetjaren
$\rho_{gem}$	de gemiddelde ruimtelijke correlatie in de tijdreeksen
$m^e$	het effectief aantal waarnemingen

Uit de formule blijkt dat :

- de onzekerheid in de bepaling van het ruimtelijk gemiddelde verschil in percentiele waarde afhangt van het aantal meetlocaties en het aantal meetjaren.
- de temporele variantie in de tijdreeksen en de ruimtelijke variantie van de verschillen bekend moet zijn.

De bepaling van de temporele variantie is bij stap 1 beschreven. De ruimtelijke variantie van de verschillen in percentiele waarde op de meetlocaties kan niet uit waarnemingen worden bepaald, maar moet op heuristische wijze te worden ingeschat. Deze schatting dient eenvoudig uit te voeren zijn. Er is gekozen om de variantie van het verschil tussen het GGR en het AGOR vóór Waterlood als maat te nemen. Van het GGR en het AGR vóór Waterlood worden de verschillen in percentiele waarden vlakdekkend bepaald. Van deze verschillen wordt de variantie bepaald. Deze wordt gebruikt als ruimtelijke variantie van de verschillen.

De hierboven bepaalde ruimtelijke variantie geldt in het algemeen als een bovengrens. Naarmate men zekerder is van het effect van de genomen maatregelen zal de ruimtelijke variantie van het verschil na uitvoering van Waterlood kleiner zijn. Dit zal afhangen van de onzekerheid in de beschikbare voorkennis van het gebied, de heterogeniteit en de aard van de maatregelen enz. Immers, als alle maatregelen precies uitwerken zoals is voorzien, is de ruimtelijke variantie van de verschillen in percentiele waarde na Waterlood nul. De ruimtelijke variantie kan worden gecorrigeerd met een factor  $(1 - \alpha)$ , waarbij de waarde van  $\alpha$  varieert van 0 (maximale onzekerheid) tot 1 (geen onzekerheid). Indien er geen informatie over de onzekerheid beschikbaar is, kan veiligheidshalve de waarde 0 worden aangehouden.

Ook de ruimtelijke correlatie van de tijdreeksen kan niet altijd rechtstreeks uit bestaande waarnemingen worden bepaald vóór uitvoering van Waterlood. De ruimtelijke correlatie van de tijdreeksen kan in klassen worden ingedeeld, bijvoorbeeld matig (0,5), sterk (0,75) en zeer sterk (0,95). In de praktijk mag worden aangenomen dat deze correlatie in het algemeen sterk tot zeer sterk is. Als in een bepaald jaar op een datum de grondwaterstand op één locatie lager is dan het gemiddelde, dan is de kans groot dat overal in het

gebied de grondwaterstand lager is dan het gemiddelde. Veiligheidshalve dient een grote waarde van de correlatie te worden aangehouden.

#### Stap 3

Het voorgaande levert een relatie tussen de onzekerheid in de bepaling van het ruimtelijk gemiddelde verschil in de percentiele waarde en de meetinspanning (aantal locaties en aantal jaren). Deze relatie kan per datum verschillen. Om nu een ontwerp te maken kunnen twee criteria worden gehanteerd.

De onzekerheid ten opzichte van de GGOR. Hierbij wordt een betrouwbaarheidsband rond het ruimtelijk gemiddelde verschil in percentiele waarde gedefinieerd. De 95% betrouwbaarheidsband wordt dan:

$$\pm 2 \sqrt{\frac{1}{m^e} \frac{\sigma_t^2}{n} + \frac{\sigma_{rv}^2}{m}}$$

De grootte van de betrouwbaarheidsband wordt door de ontwerper gekozen.

De onzekerheid wordt afgezet tegen het (ruimtelijk gemiddelde) maximaal toelaatbare niveau en het (ruimtelijk gemiddelde) minimaal vereiste niveau. Daarbij kan als eis gesteld worden dat het verschil tussen het 97,5% percentiel van de ruimtelijk gemiddelde GGR en het maximaal toelaatbare niveau groter moet zijn dan de helft van de betrouwbaarheidsband. Analoog geldt dat het verschil tussen het 2,5% percentiel en de minimaal vereiste stand groter moet zijn dan de helft van de betrouwbaarheidsband.

Het effect van het meetnetontwerp (aantal meetpunten en lengte van de meetperiode) op het criterium wordt met het eenvoudig interactief excel sheet visueel gepresenteerd. Ook kan het effect van de verschillende veronderstellingen (variantie, correlatie) kunnen met dit programma worden geanalyseerd. Het resultaat van stap 3 is dus het aantal benodigde meetpunten in het sub-gebied en de minimale lengte van de meetperiode.

#### Stap 4

Uit de vorige stappen is het aantal meetpunten voor het gebied bekend. De hele ontwerpprocedure is gebaseerd op een aselechte steekproef. Dit betekent dat de locaties van de meetpunten ook aselekt bepaald moeten worden, met een *random* generator. Het is voor de evaluatie niet wenselijk om dezelfde locaties te gebruiken als in de eerdere stadia van Waterlood. Ten eerste zijn deze meetpunten doorgaans niet aselekt gekozen, omdat ze geplaatst zijn om bepaalde relaties te onderzoeken. Ten tweede zijn de meetpunten ook al gebruikt om systeem eigenschappen te bepalen, en kunnen daarom niet als onafhankelijk worden gezien.

Opm. Uiteraard dienen de aannames omtrent varianties en correlaties na uitvoering van Waterlood met de meetreeksen worden gecontroleerd.