



Joost Heijkers, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden  
Geert-Jan Nijsten, Provincie Utrecht

# Een statistisch gefundeerde en dus pragmatische aanpak voor monitoring verdrogingsbestrijding

**Bij tal van beleidsthema's is het noodzakelijk om te toetsen of aan de doelstellingen is voldaan. Deze toetsen zijn gebaseerd op monitoringsgegevens. In 2014 dienen de waterschappen en provincies onder andere aan het Rijk te rapporteren in hoeverre de beleidsdoelstellingen voor de TOP-gebieden zijn gehaald. TOP-gebieden zijn verdroogde gebieden met de hoogste prioriteit bij de aanpak van verdroging<sup>1)</sup>. De Provincie Utrecht heeft samen met de waterschappen en terreinbeherende instanties een monitoringsontwerpsysteem ontwikkeld. Dit artikel beschrijft de ontwikkeling van deze monitoringsaanpak waarmee de gegevens kunnen worden verzameld die nodig zijn voor een objectieve en betrouwbare toets van beleidsdoelstellingen. Niet zelden wordt statistisch gefundeerde monitoring als theoretisch en niet pragmatisch bestempeld. Zonder een statistisch gefundeerde aanpak blijkt het echter moeilijk of zelfs onmogelijk te zijn om een betrouwbare en objectieve toets te kunnen uitvoeren. We hopen met dit artikel duidelijk te maken dat statistisch onderbouwde monitoring niet alleen meer oplevert in termen van objectiviteit en betrouwbaarheid, maar ook heel pragmatisch en kosteneffectief kan zijn.**

Een belangrijke vraag waarop monitoring van verdrogingsbestrijding antwoord moet geven, is of de gewenste grondwatersituatie is bereikt. Natuurlijk zijn naast grondwaterstanden ook oppervlaktewaterpeilen en de (grond)waterkwaliteit van belang. Deze factoren zijn ook meegenomen in het monitoringsontwerp. Bij wijze van voorbeeld beperken we ons in dit artikel tot freatische grondwaterstanden. De grondwatersituatie wordt gekarakteriseerd met de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG). De GLG is gedefinieerd als de statistische verwachtingswaarde van de LG3's gegeven het grondwaterregime en het klimaat (Aquo-standaard, 2010). De LG3 is het gemiddelde van de drie laagste grondwaterstanden in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart), gemeten bij een halfmaandelijke frequentie. De gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) is analoog gedefinieerd. De GVG is gedefinieerd als het langjarig gemiddelde van de grondwaterstand op 14 maart, 28 maart en 14 april (Aquo-standaard, 2010). GHG, GLG en GVG worden ook wel samengevat tot GxG.

## Aanpak in hoofdlijnen

### Ontwerpfilosofie

Vanaf circa 2002 monitort Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden de grondwaterkwantiteit en -kwaliteit in het kader van de verdrogingsbestrijding. Toen al besloten de betrokken ambtenaren een statistisch gefundeerde aanpak te gebruiken om betrouwbaar en objectief iets te kunnen concluderen over de effecten van verdrogingsbestrijding. Geïnspireerd door een presentatie van Jaap de Gruijter (voorheen werkzaam bij Alterra, thans gepensioneerd) en een mede door hem geschreven rapport<sup>2)</sup> is toen voor drie verdroogde natuurgebieden waar het waterschap anti-verdrogingsmaatregelen heeft uitgevoerd, een monitoringsontwerp gemaakt. Het primaire monitoringsdoel was het toetsen van beleidsdoelstellingen ('is de verdroging bestreden?'). Omdat objectiviteit en validiteit van de toets belangrijk zijn, is gekozen voor een aanpak waarbij het resultaat van de toets niet afhangt van de kwaliteit van modelveronderstellingen ('aannames van hoe het gebied in elkaar steekt'). Gekozen is voor een modelvrije aanpak, gebaseerd op een kanssteekproef. Een gestratificeerde,

a-selecte steekproef bleek geschikt voor toepassing in de gebieden. Stratificatie vond plaats op basis van bodem- en geohydrologische kenmerken. In elk stratum werden vijf meetlocaties geloot, waar automatische drukopnemers werden geplaatst. Na enkele jaren konden met behulp van een tijdreeksmodel klimaatrepresentatieve GxG's worden bepaald<sup>3)</sup>. Vervolgens kon met de formules voor een gestratificeerde a-selecte steekproef<sup>4)</sup> de gebiedsdekkend gemiddelde GVG en GLG worden berekend en bovendien de nauwkeurigheid van dit geschatte gemiddelde worden aangegeven. Dit laatste is noodzakelijk om een uitspraak te kunnen doen over de significantie van de uitkomst van de toets. Deze aanpak werkte goed, maar is niet optimaal: vijf monitoringspunten per stratum is erg veel, gegeven de geringe variatie van GxG-waarden binnen de strata. Bovendien is de aanpak niet optimaal om de GxG- en kwelwaarden ook vlakdekkend in kaart te brengen, zoals bijvoorbeeld bij een GD-kartering<sup>5)</sup>. Toen begin 2010 behoefte bleek te bestaan aan een uniforme aanpak voor de Utrechtse TOP-gebieden is na grondige bestudering van De Gruijter e.a.<sup>6)</sup> door de hoofdauteur gewerkt aan een

benadering die wél voldeed aan de wens om zowel een ruimtelijk gemiddelde te toetsen als een kaart te maken.

De ontwerpfilosofie die De Gruijter e.a.<sup>6)</sup> beschrijven, komt erop neer dat je eerst de informatiebehoefte bepaalt ('Wat wil je weten?') en daar vervolgens de steekproef-opzet op baseert ('Wat moet je daarvoor waar meten?'). Bij deze benadering worden dus in het begin van het ontwerpproces de methoden van dataverzameling en -verwerking afgestemd op de vereiste informatie. Daarmee wordt voorkomen dat na een monitoringsinspanning wordt geconcludeerd dat de verzamelde data niet bruikbaar zijn om de gewenste informatie te genereren.

**Primaire informatiebehoeften**

De eerste stap in het ontwerp van het monitoringssysteem is het bepalen van de informatiebehoefte(n). Monitoring in de Utrechtse TOP-gebieden moet in ieder geval beantwoorden aan twee verschillende informatiedoelen:

**Toetsing aan beleid**

Op basis van de monitoringsdata moet kunnen worden getoetst of aan de beleidsdoelstellingen is voldaan. Daarvoor is het noodzakelijk om per deelgebied binnen een TOP-gebied met een uniforme definitie qua abiotische randvoorwaarden (de 'Utrechtse natuurdoeltypen') te kunnen toetsen of de optimale waarden voor de GVG en GLG (en in sommige gevallen kwel, grondwaterkwaliteit en oppervlaktewaterkwaliteit) stroken met de deelgebiedsgemiddelde waarden voor GVG, GLG, etc. op basis van metingen. Voor een dergelijk toetsingsvraagstuk ligt een ontwerpgebaseerde aanpak het meest voor de hand, omdat via deze weg bijvoorbeeld een gebiedsgemiddelde kan worden geschat en de nauwkeurigheid van die schatting kan worden aangegeven, zonder dat daarvoor bepaalde modelveronderstellingen nodig zijn die moeilijk zijn te verifiëren.

**Genereren van een kaartbeeld**

Per TOP-gebied is daarnaast ook behoefte aan een vlakdekkende kaart met het verloop van de GxG en vaak van de kwelflux. Een modelgebaseerde aanpak leent zich bij uitstek voor het maken van een kaart. Hierbij worden, met behulp van een model voor de ruimtelijke samenhang, beschikbare puntgegevens geïnterpoleerd. Deze interpolatie kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd met geostatistische methoden zoals kriging<sup>6)</sup>, waarbij ook de nauwkeurigheid van de geïnterpoleerde waarden kan worden aangegeven. Hierbij is echter wel een zogeheten variogram nodig, een model dat de ruimtelijke autocorrelatiestructuur van de meetpunten beschrijft<sup>6)</sup>. De constructie van een dergelijk variogram behoeft vaak meer dan 100 meetpunten<sup>6)</sup> en die zijn er meestal niet. Voor de meeste doelvariabelen waar we in het kader van de verdrogingsbestrijding in geïnteresseerd waren, zijn gelukkig al variogrammen afgeleid tijdens andere studies. Ook zijn vlakdekkende GxG-kaarten beschikbaar (hoewel vaak verouderd) voor gebieden met gelijke geohydrologische en

Een ontwerpgebaseerde aanpak wordt gekozen wanneer men geïnteresseerd is in statistieken van een bepaalde doelvariabele van een bepaald gebied of deelgebied, bijvoorbeeld de gemiddelde grondwaterstand in een natuurgebied óf wanneer getoetst moet worden aan normen, en wanneer er dus een modelonafhankelijke, zuivere schatting van een bepaalde statistiek dient te worden bepaald. Een harde randvoorwaarde is het gebruik van een a-selecte steekproef.

Een modelgebaseerde aanpak wordt gekozen wanneer een kaart dient te worden vervaardigd van een bepaalde doelvariabele, bijvoorbeeld een kaartbeeld met per 25x25 gridcel een waarde voor GVG óf wanneer we een gebied willen bestuderen in termen van bijvoorbeeld zijn ruimtelijke structuren en samenhang. Bij deze aanpak worden geen formele eisen gesteld aan de wijze van aanwijzen van meetlocaties, hoewel een gelijkmatige verspreiding van meetpunten wel aanbevelingswaardig is.

Naast inzicht in de GxG is vaak ook inzicht in de regionale grondwaterstroming nodig voor het maken van een kwelkaart. Die kan bijvoorbeeld worden verkregen door de stijghoogten die zijn waargenomen in het eerste watervoerende pakket met kriging vlakdekkend te interpoleren. Zodoende hoeven geen extra monitoringspunten te worden geïnstalleerd en onderhouden, wat scheelt in de kosten. Probleem is wel het schatten van de weerstand van de (Holoceen) deklaag. Informatie van drinkwaterleidingmaatschappijen (bijvoorbeeld uit pompproeven of andere vormen van lokaal geohydrologisch onderzoek), REGIS-II, GeoTOP of een gekalibreerde c-waarde uit een grondwatermodel zijn mogelijkheden om deze waarde te schatten. Vooral voor TOP-gebieden in Holoceen gebied is het ook van belang om inzicht te hebben in de (oppervlakte)water- en stoffenbalans. In dergelijke gebieden zullen ook metingen aan de aan- en afvoer van oppervlaktewater (moeten) worden uitgevoerd. Deze metingen kunnen overigens ook worden gebruikt om de kwelhoeveelheid in te schatten als de restterm van de waterbalans, waarna vervolgens ook de deklaagweerstand beter kan worden ingeschat en daarmee de vlakdekkende kwel<sup>8)</sup>.

bodemkundige opbouw. Ook deze kaarten zijn te gebruiken om een variogram af te leiden. Indien gewenst/beschikbaar kan ook informatie uit bijvoorbeeld grondwatermodellen (zoals het hydrologische modelinstrumentarium van De Stichtse Rijnlanden, Provincie Utrecht en Viten<sup>15)</sup>) benut worden, zodat bij de interpolatie rekening wordt gehouden met verschil in gradiënten tussen beschikbare meetpunten.

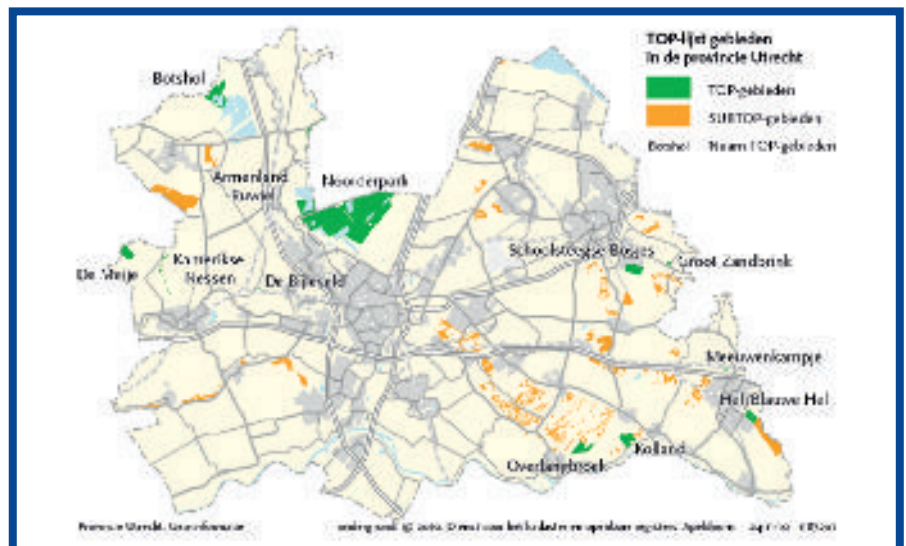
Zie voor meer informatie over het verschil tussen de ontwerpgebaseerde en de modelgebaseerde methode het bovenste kader. Zie voor de overige informatiedoelen en mogelijkheden om daar statistisch gefundeerd mee aan de slag te gaan, het onderste kader.

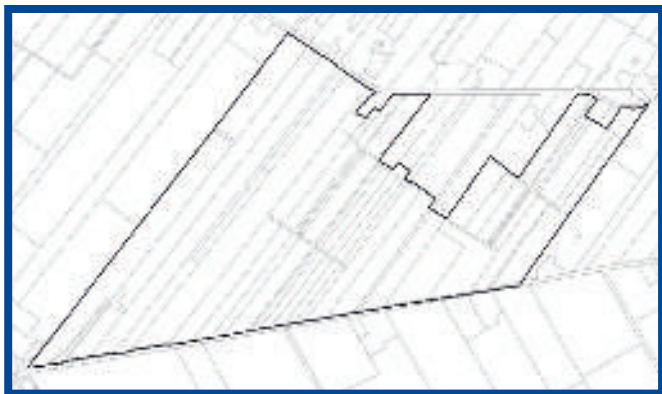
waarbij aan beide informatiebehoeften voldaan wordt. Een ontwerpgebaseerde aanpak vraagt om een kanssteekproef. Een modelgebaseerde aanpak vraagt om min of meer gelijkmatig verdeelde meetpunten in de ruimte. We zijn op zoek gegaan naar een mogelijkheid om middels een kanssteekproef toch zoveel mogelijk spreiding te verkrijgen over de ruimte. Optimaliteit voor interpolatie wordt niet gegarandeerd, maar wel benaderd. Daar staat tegenover dat een toets betrouwbaar en objectief kan worden uitgevoerd, omdat de gegevens middels een kanssteekproef zijn verzameld. Ruimtelijke spreiding van meetpunten kan worden bereikt middels stratificatie. Bij stratificatie verdelen we het gebied (in ons geval een TOP-gebied of een gebied met een specifiek natuurdoeltype) in min of meer homogene deelgebieden,

**Steekproefontwerp**

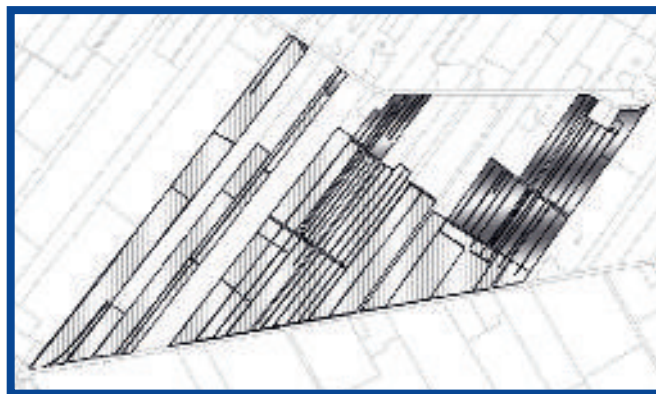
We zochten naar een steekproefopzet

**Afb. 1: De TOP-gebieden in de provincie Utrecht.**

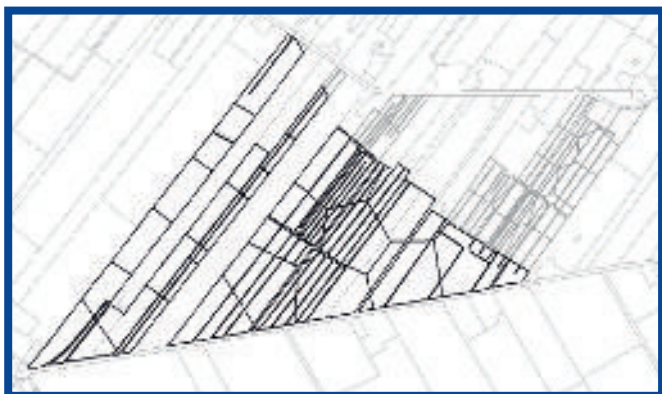




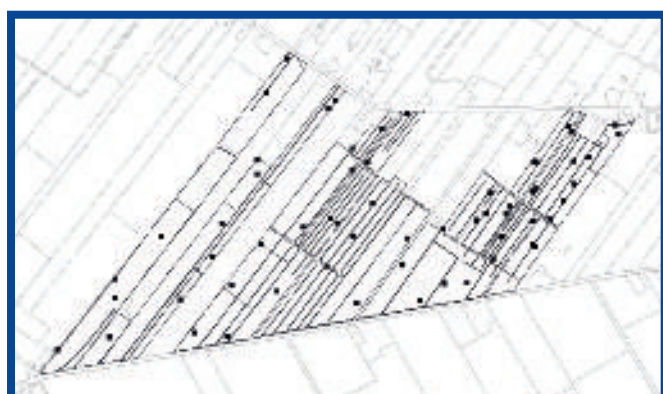
Afb. 2: Grens Overlangbroek.



Afb. 3: Hoofdstrata (2). NB: Het open water is uit de strata gefilterd, om te voorkomen dat daar meetpunten voor grondwaterstanden worden geloot.



Afb. 4: Substrata.



Afb. 5: Gelote punten waar gerichte opnames worden uitgevoerd.

waarbinnen locaties worden geloot. Op deze wijze kan de nauwkeurigheid van bijvoorbeeld het geschatte gebiedsgemiddelde worden verhoogd ten opzichte van een volledig a-selecte steekproef. Met stratificatie wordt dus ook de beschikbare ecohydrologische gebiedskennis benut in het ontwerp van de steekproef, waardoor nauwkeurigere schattingen worden verkregen. Omdat we in het geval van verdrogingsbestrijding geïnteresseerd zijn in onder andere de gemiddelde GLG en GVG per deel van een TOP-gebied, waar uniforme abiotische randvoorwaarden zijn gedefinieerd, zijn deze als hoofdstrata gedefinieerd. Ter illustratie toont afbeelding 2 voor het TOP-gebied Overlangbroek de gebiedsgrenzen en afbeelding 3 de hoofdstrata.

De hoofdstrata zijn vervolgens ingedeeld in substrata (zie afbeelding 4). Deze verdere indeling draagt bij aan een grotere nauwkeurigheid en een betere ruimtelijke spreiding van de monitoringlocaties. Hierbij is gebruik gemaakt van *Spatial Coverage Sampling*<sup>14)</sup>. Dit is een techniek waarmee 2D-objecten, met een willekeurige vorm, kunnen worden ingedeeld in deelgebieden met gelijke oppervlakte. Vervolgens worden binnen deze deelstrata monitoringlocaties geloot (zie afbeelding 5).

Afbeelding 5 toont de relatief gelijkmatige verdeling van monitoringlocaties over het gebied. Een mogelijkheid om de punten gelijkmatiger te verdelen (zonder dat dit extra kosten met zich meebrengt) is om het aantal substrata te verhogen met een factor 2, en vervolgens per substratum maar een

punt a-select te loten. Het wordt dan wel lastiger om de nauwkeurigheid te bepalen (dit kan wel, maar de nauwkeurigheid wordt dan onderschat), maar het levert wel een betere ruimtelijke spreiding op. Omdat we veel waarde hechten aan een zuivere schatting van het gemiddelde met een zo groot mogelijke nauwkeurigheid, hebben we echter voor een andere optie gekozen: De monitoringsperiode bedraagt minimaal drie jaar. Elk jaar worden de twee punten per substratum opnieuw geloot. Dat betekent dus dat de gerichte opnames telkens op andere punten worden uitgevoerd (hetgeen kostentechnisch niets uitmaakt). Zodoende verkrijgen we op meer locaties schattingen van de GVG en GLG, en dit zorgt impliciet ook voor een betere spreiding. Tevens zorgt het ervoor dat de nauwkeurigheid wordt vergroot.

#### Combinatie monitoring en gerichte opnames

Om kostenefficiënt in de informatiebehoefte te kunnen voorzien, combineren we monitoring en gerichte opnames. Dit betekent dat we per hoofdstratum één monitoringpunt met automatische drukopnemer plaatsen, al dan niet in bestaande peilbuizen. Daarmee bepalen we de dynamiek van het freatische vlak in de tijd. Binnen de deelstrata, waar we de meetlocaties loten, meten we op gerichte (GVG- en GLG-)momenten in de tijd, in twee boorgaten per stratum de freatische grondwaterstand. Deze gerichte opnames worden middels stambuisregressie<sup>9)</sup> omgevormd tot een GVG- en GLG-schatting. Deze aanpak levert natuurlijk een gigantische kostenbesparing op ten opzichte van een conventionele monitoringaanpak.

#### Vooroordelen ontkracht

- 'Moeilijk'  
We hopen met dit artikel het tegendeel te hebben bewezen.
- 'Duur'  
Vaak wordt gedacht dat een statistisch gefundeerd monitoringsontwerp zowel qua ontwerp als qua uitvoering veel duurder is dan een 'conventionele' aanpak. Juist door de gecombineerde inzet van bestaande en nieuwe monitoringpunten, gerichte opnames en statistische methoden voor en na uitvoering kan de gewenste informatie echter op een kosten-effectieve wijze worden geleverd. Bij het ontwerp kan eenvoudig gestuurd worden tussen het aantal meetpunten (kosten) en nauwkeurigheid van de resultaten. Een positief neveneffect is de objectiviteit van de toets;
- 'Je weet nooit waar je monitoringpunten terecht gaan komen, waardoor de uitvoering in het veld lastig wordt'  
Door slim te stratificeren en gebruik te maken van bestaande monitoringpunten, heb je dat juist goed in de hand. Tevens kunnen vooraf delen van het gebied, zoals waterpartijen en/of bebouwing, buiten het doelgebied worden gehouden, zodat punten daar nooit worden geloot;
- 'Statistisch verantwoord ontwerpen is niet geschikt voor heterogene en/of Pleistocene gebieden'  
Onze ervaring in TOP-gebieden in Pleistoceen Nederland laat zien dat onze aanpak ook daar zeer geschikt is, maar buiten dat is er geen enkel fundament voor deze bewering. Sterker nog, eerder zou kunnen worden gesteld dat de aanpak juist geschikt is voor heterogene gebieden,

omdat optimaal gebruik wordt gemaakt van bestaande en nieuwe data, alsmede - indien gewenst - de inzet van ruimte-tijd inter- en extrapolatietechnieken;

- 'Bestaande meetpunten kunnen niet worden gebruikt'

Zuivere schattingen van gemiddelden kunnen inderdaad uitsluitend worden geschat op basis van een kanssteekproef. Er zijn echter diverse methoden waarmee je beschikbare metingen toch kunt inzetten<sup>7)</sup>. Bij het schatten van een variogram en het toepassen van (co-)kriging worden verder (nagenoeg) geen beperkingen opgelegd aan de wijze waarop de locaties van monitoringspunten worden bepaald.

## Conclusies

- In dit artikel is de ontwerp-aanpak voor monitoring van verdrogingsbestrijding in de Utrechtse TOP-gebieden gepresenteerd, welke uitgaat van de ontwerpprincipes van zowel ontwerpgebaseerde als modelgebaseerde monitoring;
- Deze aanpak laat zien dat de combinatie van ontwerpgebaseerde en modelgebaseerde monitoring goed voorziet in de vereiste informatie. Het levert zowel nauwkeurige en objectieve schattingen van het gemiddelde (voor de toetsing aan beleid) als kaartbeelden. Het steekproefontwerp kan worden gegenereerd met standaard software. Dit geldt ook voor de verwerking van de data tot informatie;
- De kosten zijn eenvoudig te bepalen en stuurbaar. Indien te hoge kosten worden bepaald, kan bijvoorbeeld het aantal strata of monitoringspunten per stratum worden beperkt;
- Onze benadering stelt waterbeheerders in staat om vooraf de nauwkeurigheid van

de uiteindelijke informatie te schatten<sup>2)</sup>.

Zodoende zijn kosten en informatiekwaliteit vooraf te optimaliseren;

- Waterbeheerders kunnen de delen van het ontwerpproces zelf uitvoeren (monitorsdoel bepalen, stratificeren, monitoringslocaties plotten, kosten inschatten), wat scheelt qua inhuur, zorgt voor kortere doorlooptijden en kostenreductie;
- De gegevens die deze aanpak oplevert, zijn ook uitstekend geschikt voor model (her-)kalibratie en -validatie. Niet alleen de monitoringsdata maar ook de afgeleide statistieken kunnen daarbij worden gebruikt.

De gepresenteerde aanpak is zowel statistisch gefundeerd als uitermate pragmatisch. De benadering is ook toe te passen bij de monitoring voor andere waterbeleidsthema's, zoals GGOR<sup>2)</sup> en de KRW<sup>10) v/m 13)</sup>.

## LITERATUUR

- 1) Pleijte M., J. Vreke, F. van den Bosch, A. Gerritsen, R. Kranendonk en P. Kersten (2009). Verdrogingsbestrijding in het tijdperk van het Investeringsbudget Landelijk Gebied. Tussen government en governance. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur en Milieu. WOT-rapport 93.
- 2) Bierkens M., J. de Grijter en T. Hoogland (2002). Ontwerp van een hydrologisch monitorsysteem voor de Langbroekerwetering. Alterra-rapport 496.
- 3) Knotters M. (2001). Regionalised time series models for water table depths. PhD Thesis Wageningen University/Alterra Scientific Contributions 3.
- 4) Cochran W. (1977). Sampling Techniques, 3d edn. New York: Wiley.
- 5) Finke P., D. Brus, M. Bierkens, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries (2004). Mapping groundwater dynamics using multiple sources of
- 6) Grijter J., D. Brus, M. Bierkens en M. Knotters (2006). Sampling for Natural Resource Monitoring.
- 7) Brus D. en J. de Grijter (2003). A method to combine non-probability sample data with probability sample data in estimating spatial means of environmental variables. In: Environmental Monitoring and Assessment.
- 8) Bierkens M. (1996). Foutenanalyse in waterbalansstudies. SC-DLO. Rapport 460.
- 9) Te Riele W. en D. Brus (1991). Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG. Staring Centrum. Rapport 158.
- 10) Knotters M. en D. Brus (2010). Estimating space-time mean concentrations of nutrients in surface waters of variable depth; In: Water Resour. Res. 46.
- 11) Brus D. en M. Knotters (2008). Sampling design for compliance monitoring of surface water quality: A case study in a polder area. In: Water Resources Research 44.
- 12) De Vos J., M. Knotters, I. Hoving en J. van Kleef (2008). Monitoring van de grond- en oppervlaktewaterkwaliteit op het melkveebedrijf Spruit 2004-2006. Alterra. Rapport 1603.
- 13) Knotters M. en J. de Vos (2007). Monitoring van nutriënten in het oppervlaktewater van de noordelijke Friese wouden. Alterra. Rapport 1456.
- 14) Walvoort D., D. Brus en J. de Grijter (2010). An R package for spatial coverage sampling and random sampling from compact geographical strata by k-means. In: Source Computers & Geosciences, jaargang 36, nr. 10.
- 15) Heijkers W., A. Veldhuizen, W. Borren en G. Nijsten (2010). Het gebruik van gekarteerde GxG-schattingen voor de kalibratie van een hydrologisch model. Stromingen nr. 1.

## Het TOP-gebied Overlangbroek.

