

Een statistische toetsing van de grondwaterdynamiek aan de abiotische randvoorwaarden voor ‘van grondwater afhankelijke’ terrestrische ecosystemen in Westduinen

Arnaut van Loon (KWR Watercycle Research Institute), Jan Meijles (provincie Zuid-Holland), Willem Jan Zaadnoordijk (TNO Geologische Dienst Nederland)

De Kaderrichtlijn Water verplicht provincies inzicht te geven in de mate waarin de grondwaterhuishouding bijdraagt aan de instandhoudingsdoelen in Natura 2000-gebieden. Dit vraagt om een beoordelingsmethode die gedragen wordt door medewerkers, managers en bestuurders in de beleidsvelden van de KRW en Natura 2000. Dit artikel introduceert een dergelijke beoordelingsmethode op basis van een gebiedsindicator die gedefinieerd is als: de areaalfractie van habitattypen waarvoor aan de abiotische randvoorwaarden wordt voldaan. De beschreven aanpak is toegepast op het Natura 2000-gebied Westduinen (ZH) en is toepasbaar voor een breed spectrum aan gebiedstypen.

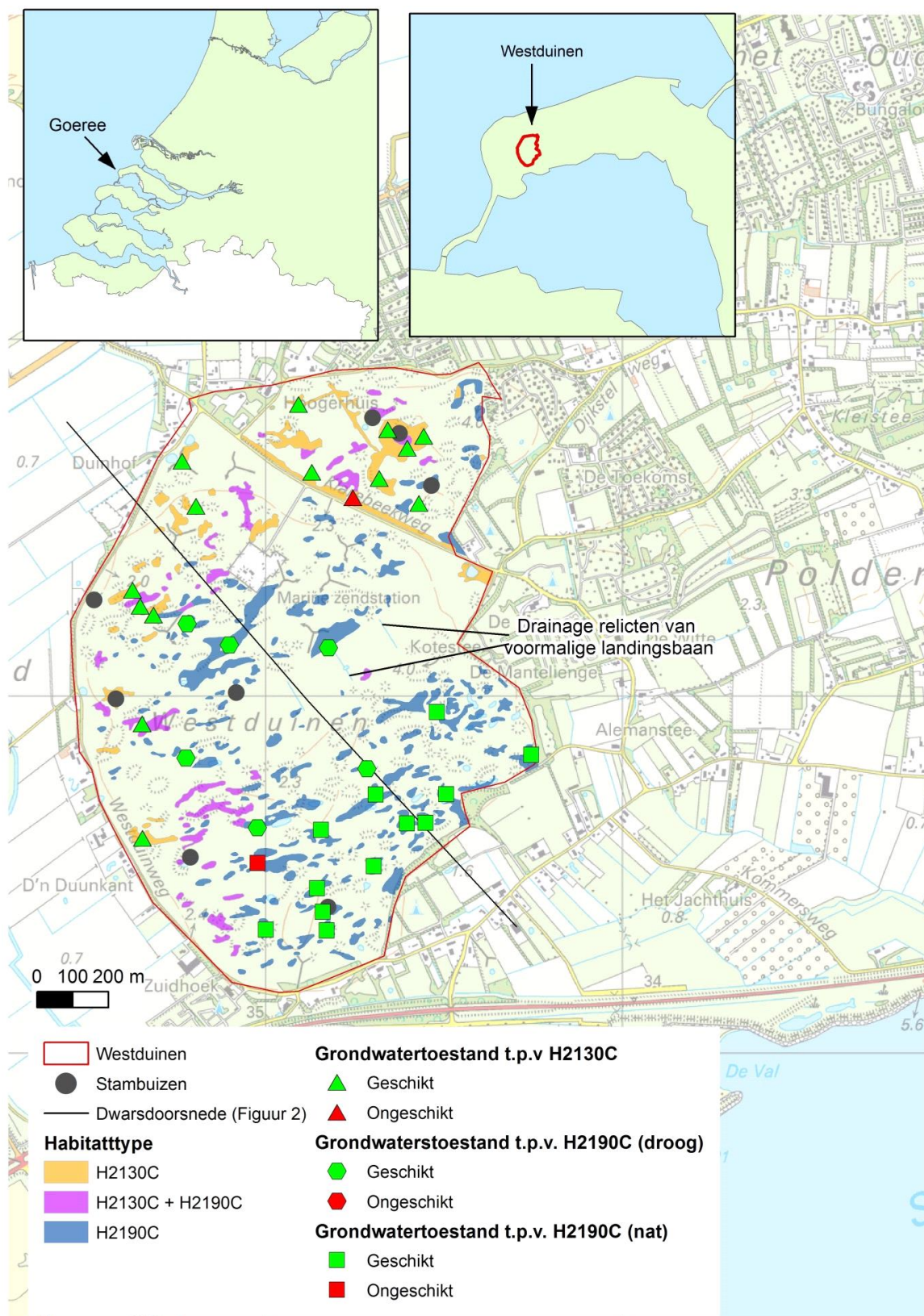
Provincies hebben vanuit de Kaderrichtlijn Water (KRW) een beoordelingsverplichting over “de invloed van grondwater op van grondwater afhankelijke terrestrische ecosystemen” [1]. Deze is vooral van belang in de Natura 2000-gebieden (N2000-gebieden). Onderdeel van de beoordeling is toetsing van de heersende grondwaterdynamiek aan de abiotische randvoorwaarden voor grondwaterafhankelijke natuur. In dit artikel presenteren we een robuuste aanpak voor deze beoordeling, aan de hand van ervaringen in Westduinen (Zuid-Holland). Hiervoor harmoniseren we de terminologie van de KRW met die van N2000 door ‘van grondwaterafhankelijke terrestrische ecosystemen’ te definiëren als: ‘habitattypen die voor hun instandhouding of ontwikkeling afhankelijk zijn van de grondwaterdynamiek’.

De kern van de aanpak bestaat uit het verkrijgen van grondwaterstandgegevens uit een ruimtelijk gestratificeerde, aselechte steekproef. Deze methode is theoretisch onderbouwd door De Grijter et al. [2] en toepasbaar gemaakt voor grondwatermonitoring door Heijkers en Nijsten [3]. Daarbij wordt het interessegebied opgedeeld in deelgebieden met gelijke oppervlakte. Daarna worden binnen deze deelgebieden meetpunten geloot. Vanwege de aselechte grondslag van dit meetnetontwerp zijn de resultaten bruikbaar voor het statistisch verantwoord schatten van statistische kenmerken, zoals gemiddelden en de variantie, voor het interessegebied als geheel.

In dit artikel wordt beschreven hoe de aanpak van Heijkers en Nijsten [3] is uitgebreid tot een beoordelingsmethode op basis van één gebiedsindicator. Deze indicator is uitgedrukt als: de areaalfractie van habitattypen waarvoor aan de abiotische randvoorwaarden voor de grondwaterdynamiek wordt voldaan.

Westduinen

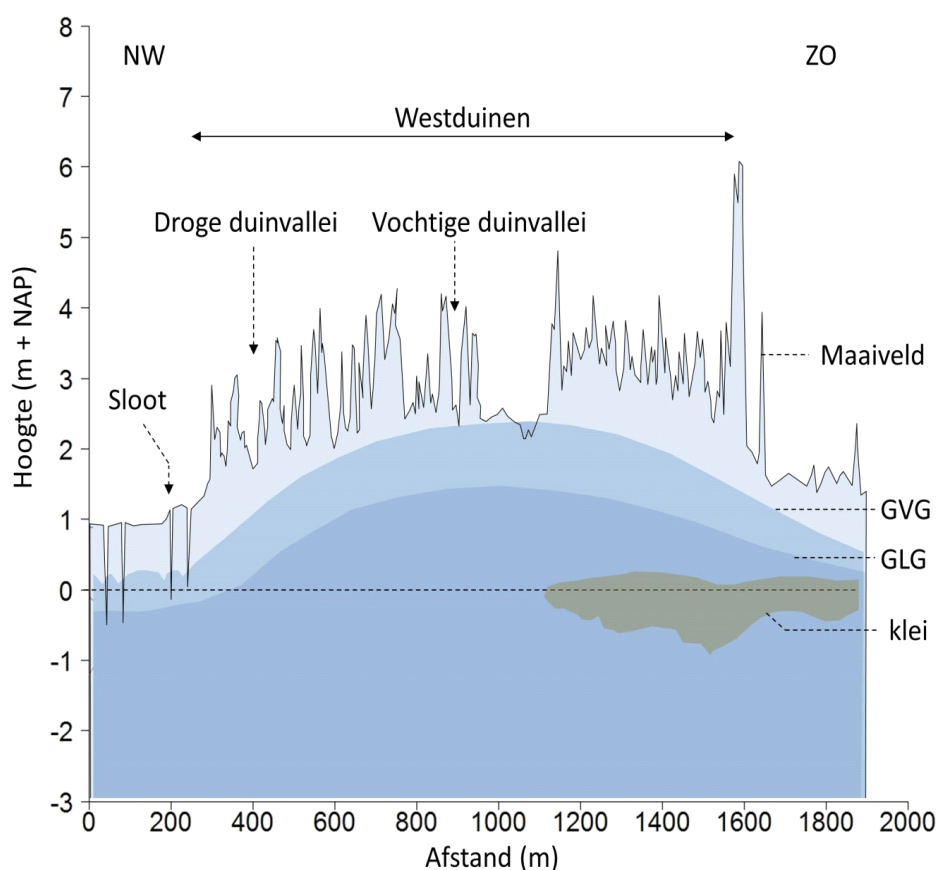
Westduinen is onderdeel van een N2000-duingebied op het westelijk deel van Goeree (zie afbeelding 1). De maaiveldhoogte in Westduinen varieert van 0,5 tot 5,0 m +NAP. De topografie wordt gekenmerkt door langgerekte, kleinschalige natte en vochtige duinvalleien, van elkaar gescheiden door droge duinen. De duinvalleien liggen tot ongeveer 2 meter hoger dan de aangrenzende polders. Ze voeren geen water af, maar zorgen bij inundatie wel voor interne herverdeling van grondwater. Een ondiepe kleilaag (rond NAP) van 1,5 m dik zorgt in het zuidoostelijk deel van Westduinen voor nattere omstandigheden (zie afbeelding 2). Het zoet-zoutgrensvlak ligt op 30 tot 60 m - NAP.



Afbeelding 1. Stambuizen en kwalificatie van de grondwaterdynamiek op gelote locaties, weergegeven op de habitattypenkaart van Westduinen

In Westduinen komen twee grondwaterafhankelijke habitattypen voor, namelijk (1) H2130C: Grijze duinen (heischraal) en (2) H2190C: Vochtige duinvalleien (ontkalkt) (zie afbeelding 1). Voor beide

habitattypen zijn de N2000-instandhoudingsdoelen hetzelfde: behoud van oppervlakte en verbetering van kwaliteit. Volgens Runhaar et al. [4] komt H2130C voor op locaties waar de Gemiddelde Voorjaarsgrondwaterstand (GVG) lager is dan 25 cm boven maaiveld (+mv) en de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) hoger dan 150 cm –mv. H2190C komt voor bij een GVG lager dan 20 cm +mv en een GLG hoger dan 150 cm –mv (zie tabel 1). Doordat deze habitattypen niet altijd goed van elkaar te onderscheiden zijn, staan ze soms als samengestelde eenheid op de habitattypenkaart vermeld.



Afbeelding 2. Geohydrologische dwarsdoorsnede (zuidoost-noordwest) van Westduinen

Tabel 1. Abiotische randvoorwaarden voor grondwaterafhankelijke habitattypen in Westduinen volgens Runhaar et al. [4]

Habitattype	Code	GVG (cm +mv)	GLG (cm +mv)
Grijze duinen (heischraal)	H2130C	< - 25	> - 150
Vochtige duinvalleien (ontkalkt)	H2190C	< + 20	> - 150

Methode

Overzicht

De gebiedsindicator voor de kwalificatie van de grondwaterdynamiek in Westduinen is berekend door:

- het opstellen van een aselekt steekproefontwerp voor grondwatermeetpunten;
- het uitvoeren van grondwaterstand- en maaiveldhoogtemetingen ter plaatse van de aselekt gekozen meetpunten én de stambuizen in het reguliere grondwatermeetnet;
- omrekening van grondwaterstanden naar GVG- en GLG-waarden;
- vergelijking van de GVG- en GLG-waarden ter plaatse van de aselekt gekozen meetpunten met de abiotische randvoorwaarden per habitattypen;
- berekening van de areaalfractie per grondwaterafhankelijk habitattypen, waarvoor aan de abiotische randvoorwaarden wordt voldaan.

Deze vijf stappen worden hieronder kort toegelicht.

Aselekt steekproefontwerp

Gegevens over grondwaterstanden zijn verzameld met een ruimtelijk gestratificeerde steekproef. Hiertoe is het studiegebied op basis van habitat- en vegetatiekenmerken opgedeeld in 3 deelgebieden (hoofdstrata) met een min of meer homogene grondwaterstand (zie tabel 2 **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Dit resulteerde in één hoofdstratum voor H2130C (stratum 1) en twee hoofdstrata voor H2190C: één voor het drogere vegetatiespectrum (stratum 2) en één voor het nattere (stratum 3). De hoofdstrata zijn met de R-package SPCOSA [5] opgedeeld in substrata van gelijke oppervlakte en binnen elk substratum zijn twee meetpunten geloot.

Om meetinspanning en informatiebehoefte goed op elkaar af te stemmen is de gewenste steekproefomvang *a priori* geschat, uitgaande van gewenste 70%-betrouwbaarheidsintervallen voor de gemiddelde (\bar{x}) en de variantie (\bar{s}^2) van de GVG. Bij een voldoende grote steekproef zijn de schatters voor deze statistieken normaal verdeeld [6], zodat voor de steekproefomvang bij een gewenste nauwkeurigheid van het populatiegemiddelde geldt:

$$n = \left(\frac{2|z|\sigma}{b} \right)^2 \quad (1)$$

Bij een gewenste nauwkeurigheid van de variantie geldt:

$$n = 1 + \left(\frac{2,83 \cdot |z| \sigma^2}{b} \right)^2 \quad (2)$$

Hierin is z de (bekende) waarde van de standaardnormale verdeling voor een gegeven α %-betrouwbaarheidsinterval (b), en σ^2 de populatievariantie van de GVG. Deze populatievariantie is voor elk hoofdstratum geschat uit GVG-kaarten, die op basis van beschikbare grondwaterstandreeksen met vlakdekkende tijdreeksanalyse zijn [7]. De berekende en gerealiseerde steekproefomvang is in tabel 2 weergegeven.

Tabel 2. Gewenste en gerealiseerde steekproefomvang per hoofdstratum

Habitatype/ hoofdstratum	Variantie GVG volgens Van Loon en Zaadnoordijk [7] (m ²)	Steekproefomvang voor een 70%- betrouwbaar- heidsinterval van 10 cm voor de <i>gemiddelde</i> GVG	Steekproefomvang voor een 70%- betrouwbaar- heidsinterval van 20 cm voor de <i>variantie van</i> de GVG	Gerealiseerde steekproef
H2130C	0,18	20	13	15
H2190C (droog)	0,13	14	7	6
H2190C (nat)	0,28	30	30	14
Totaal		64	50	35

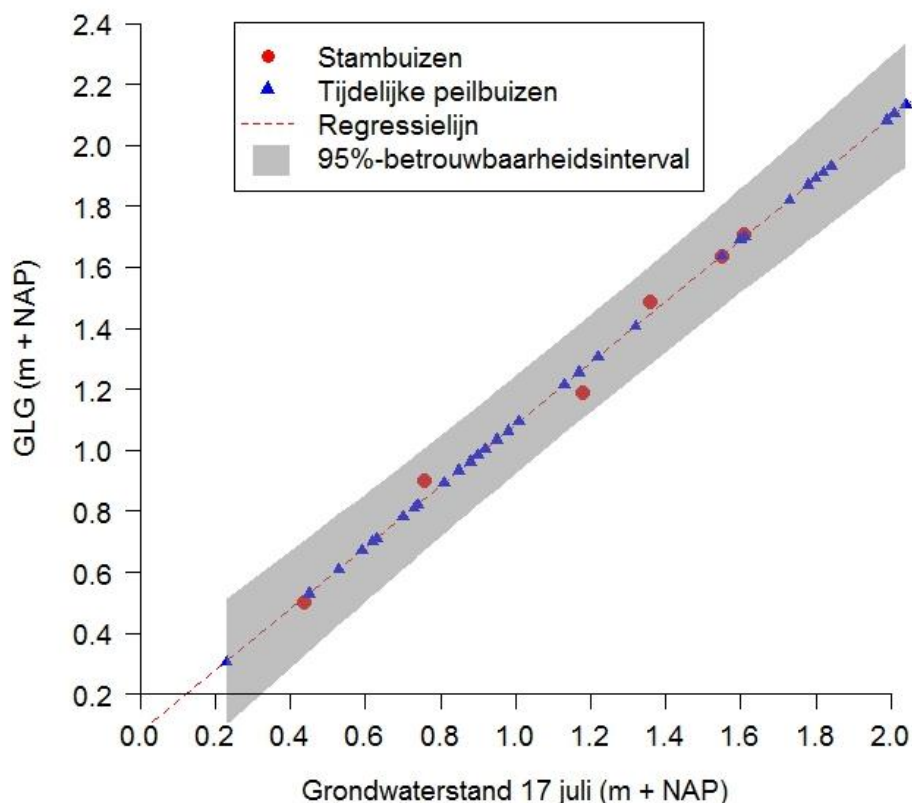
Grondwaterstanden en maaiveldhoogten

Op een deel van de gelote meetlocaties zijn tijdelijke peilbuizen geplaatst (zie afbeelding 1). Deze tijdelijke peilbuizen zijn met een zeer nauwkeurig GPS-systeem (RTK-GPS) op 2 centimeter nauwkeurig ingemeten ten opzichte van NAP. Vervolgens is tweemaal (in het voorjaar en de zomer van 2015) de grondwaterstand gemeten ten opzichte van NAP. Op dezelfde dag zijn de grondwaterstanden in het reguliere grondwatermeetnet opgenomen ten opzichte van NAP.

Rond de peilbuizen zijn lokale variaties van de grondwaterstand als gevolg van microtopografie vastgesteld op basis van maaiveldhoogteverschillen ten opzichte van de peilbuislocatie. Hiervoor zijn maaiveldhoogten ingemeten ter plaatse van de peilbuizen én op 5 tot 7 locaties op 1,5 tot 2 meter afstand van elke peilbuis. Verschillen in maaiveldhoogten zijn verrekend met de waargenomen grondwaterstanden in de peilbuizen, zodat voor elke grondwaterstandwaarneming 6 tot 8 replica's zijn verkregen.

Bepalen grondwaterkarakteristieken

Waargenomen grondwaterstanden zijn omgerekend naar GVG- en GLG-waarden. Hiertoe zijn eerst voor de stambuizen uit het reguliere grondwatermeetnet GVG- en GLG-waarden bepaald met stochastische tijdreeksmodellering [8]. Vervolgens is een lineair regressiemodel afgeleid voor de waargenomen grondwaterstanden en de berekende GVG's en GLG's ter plaatse van de stambuizen. Met dit regressiemodel zijn verwachtingswaarden van de GVG en GLG berekend ter plaatse van de replica's voor de gelote meetpunten (zie afbeelding 3). Met het regressiemodel konden GVG's met een nauwkeurigheid van 5 cm worden berekend en GVG's met een nauwkeurigheid van 10 cm (beide binnen 95%-betrouwbaarheidsintervallen).



Afbeelding 3. Lineair regressiemodel met verwachtingswaarde en 95%-betrouwbaarheidsinterval van de relatie tussen waargenomen grondwaterstanden en de GLG op basis van stambuismetingen op 17 juli 2015

Karakteristieken in relatie tot abiotische randvoorwaarden

De berekende GVG- en GLG-waarden zijn vergeleken met de abiotische randvoorwaarden voor de drie habitattypen [4]. Hiertoe is eerst voor elke replica vastgesteld of de GVG én de GLG binnen het 'kernbereik' van het lokaal aanwezige habitatype vallen. Het kernbereik is gedefinieerd als de range aan grondwaterstanden waarbinnen de meest kenmerkende vegetatietypen zich optimaal kunnen ontwikkelen. Als dit zo is, wordt aan de ecologische grondwatervereisten voldaan. Vervolgens is de grondwatertoestand op de aselekt gelote meetpunten vastgesteld volgens het 'one out, all out'-principe. Dit betekent dat de grondwaterdynamiek op een geloot meetpunt kwalificeert als 'ongeschikt', als op één of meerdere replica's *niet* is voldaan aan de ecologische grondwatervereisten.

Berekenen van de gebiedsindicator

Voor de kwalificatie van de grondwaterdynamiek in relatie tot de instandhoudingsdoelen is een gebiedsindicator berekend. Daarbij geldt als uitgangspunt dat een waargenomen geschikte grondwaterdynamiek binomiaal verdeeld is. Dit wil zeggen dat op elk willekeurig punt de geschatte GVG én GLG binnen het kernbereik van de abiotische randvoorwaarden valt, of juist niet. Volgens de steekproeftheorie [6] voldoet de schatter van het aantal successen dan aan een normale verdeling, met een verwachtingswaarde

$$E(k) = n * p \tag{3}$$

en een variantie

$$var(k) = n * p * (1 - p) \tag{4}$$

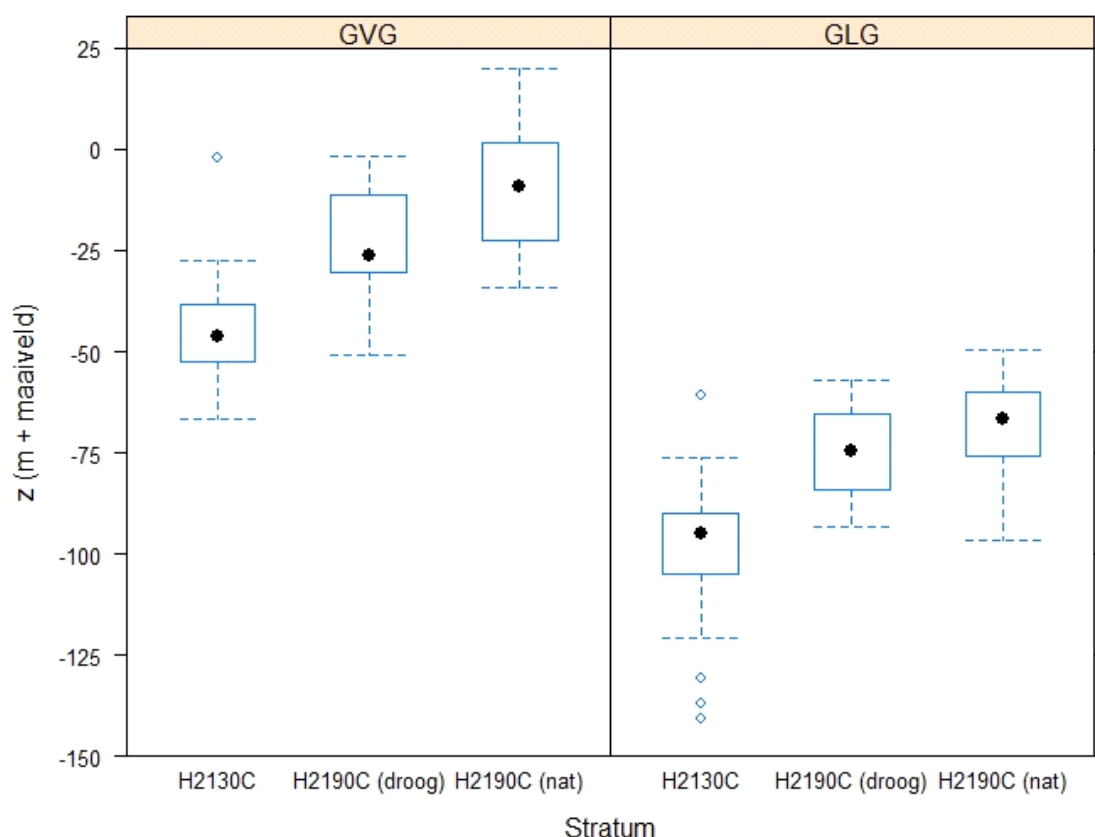
Hierin is k het aantal meetpunten waar aan de ecologische grondwatervereisten wordt voldaan, n de steekproefomvang, en p de binomiale kans dat de GVG en GLG beiden binnen het kernbereik vallen. Dat wil zeggen de areaalfraction van grondwaterafhankelijke habitattypen waarvoor aan de abiotische randvoorwaarden voor de grondwaterdynamiek wordt voldaan. Uit deze vergelijkingen volgt dat het α %-betrouwbaarheidsinterval voor p voldoet aan:

$$\frac{k}{n} - z \cdot \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)} \leq p \leq \frac{k}{n} + z \cdot \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)} \quad (5),$$

Resultaten

Variatie in GVG- en GLG-waarden

Afbeelding 4 geeft de variatie van de GVG en GLG binnen de drie onderscheiden hoofdstrata met boxplots weer.



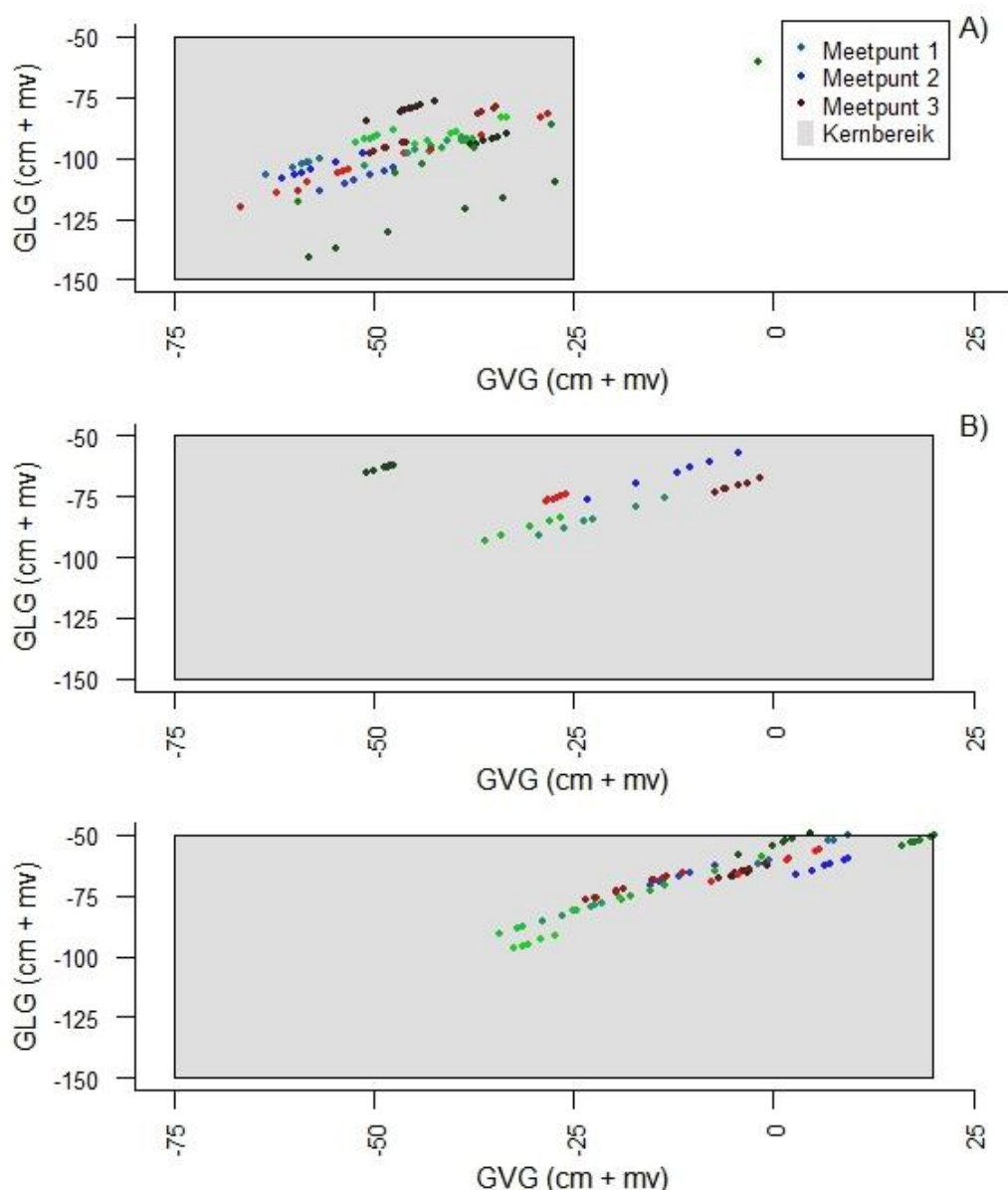
Afbeelding 4. Boxplots van de waargenomen GVG en GLG binnen de drie hoofdstrata

Uit deze figuur blijkt dat de onderscheiden hoofdstrata onderling verschillen in vochtigheid, waarbij zowel in het voorjaar, als in de zomer het hoofstratum voor H2130C het droogst is en het hoofstratum voor het natte spectrum van H2190C het natst. De gemiddelde GVG en GLG zijn voor de drie hoofdstrata significant verschillend ($\alpha < 0.01$).

De spreiding van de GVG binnen elk stratum bedraagt - outliers daargelaten - 40 cm voor H2130C, 50 cm voor het droge spectrum van H2190C en 55 cm voor het natte spectrum van H2190C. De variatie van de GLG binnen de hoofdstrata bedraagt zo'n 40 cm voor H2130C, 35 cm voor H2190C (droog) en 45 cm voor H2190C (nat).

Het grondwaterregime op puntniveau

In afbeelding 5 staan voor elk hoofdstratum de GVG-waarden ter plaatse van de replicapunten uitgezet tegen de GLG. Tevens is voor elk hoofdstratum het 'kernbereik' van het habitatype weergegeven.



Afbeelding 5. Berekende GLG voor replica's rond elk tijdelijk meetpunt uitgezet tegen de GVG

Uit de grafiek blijkt dat binnen het hoofdstratum voor H2130C de GVG ter plaatse van 1 replica niet voldoet aan de abiotische randvoorwaarden. De GVG was daar ruim 20 centimeter hoger dan de natte GVG-grens van het kernbereik (te nat). Dit meetpunt is gelegen in het noorden van Westduinen. De grondwaterdynamiek ter plaatse van de overige replicapunten ligt vaak ruim binnen het kernbereik van het aanwezige habitatype.

Binnen het hoofdstratum voor het droge spectrum van H2190C vielen de GVG en GLG ter plaatse van alle replicapunten binnen het kernbereik van het habitatype.

Binnen het hoofdstratum voor het natte spectrum van H2190C voldoet de GLG ter plaatse van 1 replica niet aan de abiotische randvoorwaarden. De GLG was daar net hoger dan de natte GLG-grens van het kernbereik (te nat). Dit meetpunt ligt in het zuidwesten van Westduinen (zie afbeelding 1). Ter plaatse van 2 andere replicapunten lag de GLG op de natte GLG-grens van het kernbereik.

Kwalificatie van de grondwaterdynamiek op gebiedsniveau

In tabel 3 staan de berekende 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor de areaalfracties van het lokale habitatype waar aan de lokale ecologische grondwatervereisten wordt voldaan.

Tabel 3. (Succesvolle) steekproefomvang en areaalfracties met waarbinnen het grondwaterregime met 95%-betrouwbaarheid voldoet aan de abiotische randvoorwaarden voor het aanwezige habitatype.

Meetpunten	Steekproefomvang	Aantal successen	Areaalfractie (%)	
			Ondergrens (=2,5)	Bovengrens (=2,5)
Geloot	35	33	92,2	100
Geloot en replica's	213	211	98,6	100

Hierbij zijn de betrouwbaarheidsintervallen berekend zowel op basis van de gelote meetpunten (n=35), als op basis van de gelote meetpunten én de replica's (n=213).

Op 2 van de 35 gelote meetpunten paste het grondwaterregime niet bij de abiotische randvoorwaarden van het lokale habitatype. Volgens deze uitkomst bedraagt de areaalfractie met een passend grondwaterregime met 95% zekerheid minimaal 92,2% en maximaal 100%.

Door de beperkte steekproefomvang was de schatter van de areaalfractie echter niet helemaal normaal verdeeld. Wordt deze berekening gebaseerd op de 213 replica's van de 35 aselekt gekozen meetpunten, dan bedraagt het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de areaalfractie 98,6 tot 100% én is de schatter van de areaalfractie beter normaal verdeeld.

Discussie

Bijdrage aan methode ontwikkeling

Dit artikel beschrijft een uitbreiding van de eerder toepasbaar gemaakte methode voor grondwatermonitoring op basis van een aselekt steekproef van grondwaterstanden door Heijkers en Nijsten [3]. Deze uitbreiding betreft:

A) een onderbouwing van de steekproefomvang op basis van de variantie van de grondwaterstand binnen de hoofdstrata. Hiervoor is gebruik gemaakt van grondwaterkaarten die met vlakdekkende tijdreeksanalyse [7] zijn vervaardigd uit beperkt beschikbare grondwaterreeksen. Met deze toevoeging kunnen meetinspanning en informatiebehoefte in balans worden gebracht, vóóordat de noodzakelijke meetinspanning wordt verricht. In deze casus werd de gewenste steekproefomvang om praktische redenen niet volledig gerealiseerd. Hierdoor zijn de onzekerheidsmarges iets groter dan vooraf gewenst.

B) de ecohydrologische interpretatie van de vastgestelde grondwaterkarakteristieken op aselekt gekozen meetpunten. Hiervoor worden de berekende GVG's en GLG's vergeleken met de abiotische randvoorwaarden voor de habitatypen en daarna met een binomiale verdelingsfunctie verwerkt tot een *gebiedsindicator* voor de mate waarin de grondwaterdynamiek past bij de abiotische randvoorwaarden. Uit een foutenanalyse (niet gepresenteerd) blijkt dat deze aanpak legitiem is, zolang de waargenomen grondwaterstanden goed correleren met GVG- en GLG-waarden. Wel dient de steekproefomvang van voldoende omvang te zijn om een normaal verdeelde schatter van de areaalfractie voldoende goed te benaderen.

Bruikbaarheid voor KRW-beoordeling

Provincies hebben vanuit de KRW een beoordelingsverplichting over 'de invloed van grondwater op van grondwater afhankelijke terrestrische ecosystemen' [1]. Daarmee wordt beoogd inzicht te geven in de mate waarin de grondwaterdynamiek in natuurgebieden voldoet om de aanwezige natuurwaarden in stand te kunnen houden of te ontwikkelen. Dit vereist een beoordelingscriterium dat zowel eenvoudig te begrijpen is, als vergelijking van gebieden mogelijk maakt. De hier voorgestelde gebiedsindicator voor de grondwaterdynamiek voldoet aan deze criteria, omdat (1) het met één getal weergeeft in hoeverre de grondwaterhuishouding binnen een natuurgebied op orde is, en (2) statistische betrouwbaarheidsintervallen van de gebiedsindicator zijn vast te stellen, zodat

gebieden onderling objectief vergelijkbaar zijn, ongeacht de omvang van het reguliere grondwatermeetnet.

Conclusies

Grondwaterstandgegevens verkregen uit een ruimtelijk gestratificeerde steekproef maken het mogelijk om op basis van een beperkt vast peilbuizenmeetnet een beeld te krijgen van de grondwaterdynamiek (GVG en GLG) in relatie tot de abiotische randvoorwaarden van aanwezige terrestrische ecosystemen. Hierbij wordt informatie over het temporeel gedrag van grondwaterstanden ontleend aan data uit reguliere grondwatermeetnetten en gecombineerd met tweemaal opgenomen grondwaterstanden op gelote locaties. De aanpak is toepasbaar gebleken voor een breed spectrum aan gebiedstypen, onder de voorwaarde dat de twee grondwaterstandsmetingen goed zijn te correleren aan de GVG en de GLG.

Deze aanpak is geschikt om de areaalfactie waarin de grondwaterdynamiek past bij aanwezige of te ontwikkelen habitattypen statistisch verantwoord te berekenen, evenals de betrouwbaarheid van deze areaalfactie. De robuustheid van deze methode, gecombineerd met de eenvoud van de gebiedsindicator als een in één cijfer uitgedrukt totaalresultaat, maakt de aanpak bruikbaar voor toepassing bij de beoordelingsverplichting uit de KRW over de invloed van de grondwaterdynamiek op grondwaterafhankelijke terrestrische ecosystemen.

Dankwoord

De auteurs danken Nicko Straathof (Natuurmonumenten), Joost Heijkers (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden) en Camiel Aggenbach en Han Runhaar (KWR) voor hun bijdrage aan de methodeontwikkeling.

Referenties

1. Europese Unie, 2006. Richtlijn 2006/118/EG van het Europees parlement en de raad van 12 december 2006 betreffende de bescherming van het grondwater tegen verontreiniging en achteruitgang van de toestand.
2. Gruijter, J.J. de, Brus, D.J., Bierkens, M.F.P. en Knotters, M. (2006). *Sampling for Natural Resource Monitoring*. ISBN 978-3-540-22486-0.
3. Heijkers, J. en Nijsten, G. (2011). *Een statistisch gefundeerde en dus pragmatische aanpak voor monitoring verdrogingsbestrijding*. H2O (7), 36-39, 2011
4. Runhaar, H., Jalink, M., Hunneman, H., Witte, F., en Hennekens, S, (2009). *Ecologische vereisten habitattypen*. KWR, Nieuwegein, KWR 09.018.
5. Walvoort, D.J.J., Brus, D.J., en Gruijter, J.J. de (2010). *An R package for spatial coverage sampling and random sampling from compact geographical strata by k-means*. *Computers & Geosciences* 36, p 1261-1267.
6. Kuipers, F.F. (1996). *Voor de variatie: inleiding statistiek*. Wageningen Pers, Wageningen. ISBN 90-74134-41-6.
7. Loon, A.H. van en Zaadnoordijk, W.J. (2015). *Vlakdekkende tijdreeksmodellering: een datagedreven methode voor het projecteren van grondwaterstandreeksen*. *Stromingen* 23 (3), p37-51.
8. Asmuth, J.R. von (2012). *Groundwater system identification through time series analysis*. Proefschrift, Technische Universiteit Delft. ISBN 978-90-5155-079-5.