

Bedrijfstakonderzoek

BTO 2023.058 | September 2023

**Karakterisering van
het grondwaterregime
voor ecohydrologische
toepassingen – een
verkenning**

Bedrijfstakonderzoek

KWR

Bridging Science to Practice

 **FWE**

Rapport

Karakterisering van het grondwaterregime voor ecohydrologische toepassingen – een verkenning

BTO 2023.058 | September 2023

Dit onderzoek is onderdeel van het collectieve Bedrijfstakonderzoek van KWR, de waterbedrijven en Vewin.

Opdrachtnummer

402045-330

Projectmanager

Edu Dorland

Opdrachtgever

BTO - Verkennend onderzoek

Auteurs

Jelmer Nijp (KWR), Janine de Wit (KWR), Jan-Philip M. Witte (FWE)

Kwaliteitsborger

Ruud Bartholomeus

Verzonden naar

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten.

Een jaar na publicatie is het openbaar.

Keywords

ecohydrologie, grondwaterregime, bodemvocht, GxG, zuurstofstress, transpiratiestress

Jaar van publicatie
2023

Meer informatie
dr. Jelmer Nijp
T +31 6 15 11 07 75
E jelmer.nijp@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

September 2023 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

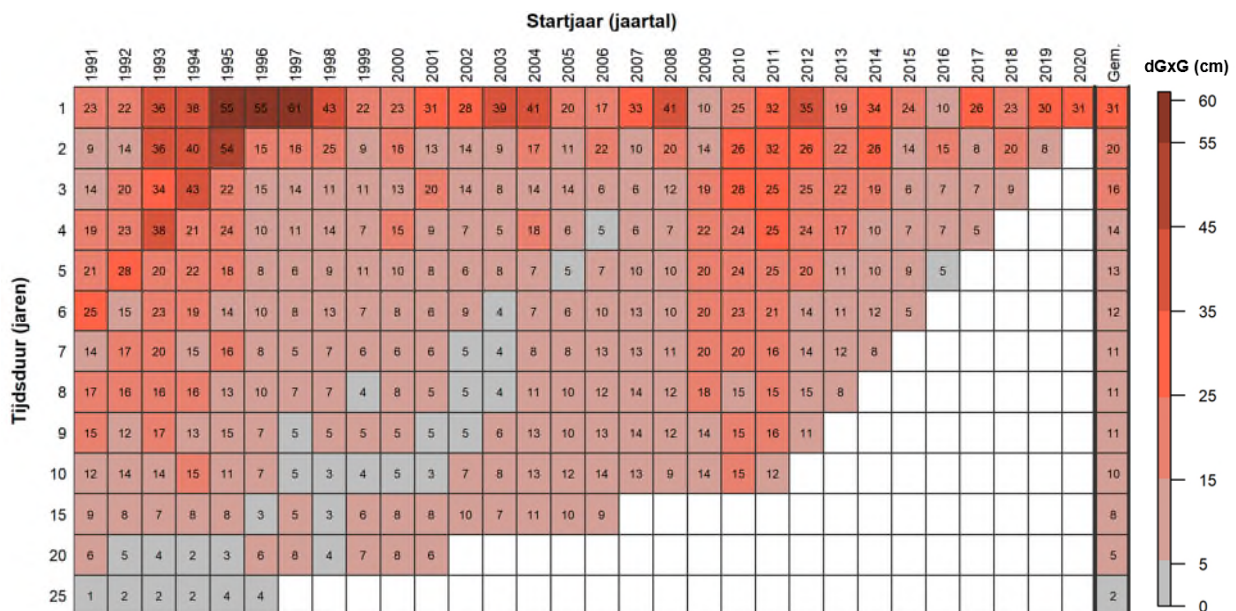
Managementsamenvatting

GxG, wat kan je er (niet) mee?

Auteurs: Jelmer Nijp, Janine de Wit, Jan-Philip Witte

Het grondwaterregime is van cruciaal belang voor talloze hydrologische toepassingen. Traditioneel wordt de grondwaterdynamiek gekarakteriseerd door de Gemiddeld Laagste-, Hoogste- en Voorjaarsgrondwaterstand (GLG, GHG en GVG, gezamenlijk GxG) over een periode van 30 jaar. Vanwege tijds- en kostenbesparing wordt in de praktijk vaak afgeweken van deze definitie en wordt de GxG berekend over een kortere periode. Maar wat zijn de gevolgen hiervan en hoe beïnvloeden deze de conclusies? Dit onderzoek biedt daartoe een verkenning voor ecohydrologische toepassingen met (1) richtlijnen voor het selecteren van jaren om een representatieve GxG voor het klimaat te benaderen, en (2) inzicht in de representativiteit van de gebruikte tijdsperiodes in eerdere analyses.

Met recente tijdreeksen met een veelal hogere meetfrequentie zijn er talloze andere methoden dan GxG om het grondwaterregime te karakteriseren. Daarom is in dit onderzoek ook verkend of andere grondwaterkarakteristieken kunnen worden gebruikt om standplaatsfactoren voor de vegetatie (in het bijzonder het vochtregime in de wortelzone) af te leiden. De resultaten geven aanwijzingen dat GxG's ongeschikt zijn om transpiratiestress te voorspellen. Deze voorspelling kan worden verbeterd met de responstijd van de grondwaterstand als voorspeller.



Figuur A. Gevolgen van een specifiek tijdvak (gekenmerkt door een tijdsduur en het jaar waarop het tijdvak start) voor de maximale absolute afwijking (cm) van de over dat tijdvak berekende GVG ten opzichte van een klimaatrepresentatieve GVG (gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand over de periode 1991 – 2020). De maximale afwijking is gekwantificeerd als de 90% percentielwaarde van 1000 modelsimulaties.

Belang: hoe werken keuzes in methodiek GxG-berekening door op de waarde ervan?

Deze vraag vormt de kern van dit verkennend onderzoek. Het grondwaterregime staat centraal in

talloze agro- en ecohydrologische toepassingen. Traditioneel wordt de grondwaterdynamiek gekarakteriseerd met de Gemiddeld Laagste-, Hoogste-, en Voorjaars-grondwaterstand (GLG, GHG,

en GVG, tezamen GxG), berekend over een periode van 30 jaar. In de praktijk wordt nogal eens afgeweken van de traditionele definitie, waarbij de GxG berekend wordt over een kortere periode die een subset van de 30 jaar bestrijkt (doorgaans 8 jaar). Maar wat zijn hier eigenlijk de gevolgen van en hoe werken die door in de conclusies? Dit onderzoek biedt inzicht in de representativiteit van tijdvakken waarover de GxG berekend wordt. De uitkomst (zie onder andere Figuur A hierboven) biedt daarmee (1) een richtlijn voor de selectie van jaren voor een klimaatrepresentatieve GxG en (2) inzicht in de representativiteit van bestaande analyses waarin de GxG een rol speelt.

Aanpak: Modelsimulaties, statistische analyse, validatie met observaties

Met behulp van een model voor de onverzadigde zone (SWAP) werden voor de periode 1991 t/m 2020 1000 hypothetische puntlocaties doorgerekend, ieder verschillend in bodemfysische eenheid (10 werden er onderscheiden) en landschappelijke ligging. Uit de resultaten werd de GxG afgeleid voor verschillende tijdvakken, waarbij ieder tijdvak werd gekenmerkt door een startjaar en een duur (aantal jaar). Vervolgens werd bepaald hoe de keuze van het tijdvak doorwerkt op de berekende GxG, en of die doorwerking van ecohydrologisch belang is.

Daarnaast zijn 21 aanvullende grondwaterkarakteristieken (GWK's) afgeleid uit de gesimuleerde grondwaterstandsreeksen, en is met een statistische procedure gekwantificeerd hoe goed met combinaties van GWK's het vochtregime van eerder nauwkeurig onderzochte meetplots in natuurgebieden kan worden voorspeld. Het vochtregime is in deze studie uitgedrukt als de standplaatsfactoren zuurstofstress en transpiratiestress. De opgenomen GWK's beschrijven verscheidene eigenschappen van grondwaterdynamiek, o.a. extremen, verwachtingswaarde, timing van gebeurtenissen en de stabiliteit ervan.

Resultaten: De keuze van het tijdvak kan grote gevolgen hebben voor de berekende GxG

Uit het onderzoek komt naar voren dat de GxG flink kan variëren tussen de gekozen tijdvakken (zie Figuur A als voorbeeld). Met name de gesimuleerde GVG en GHG lijken hiervoor gevoelig. De resultaten bevestigen dat een simulatieperiode van ten minste 30 jaar nodig is voor een goede beschrijving van een klimaatrepresentatief grondwaterregime. Ook specifieke kortere perioden kunnen echter representatief zijn voor de GxG van een 30-jarige periode.

In de verkenning van de relatie tussen grondwaterkarakteristieken en het vochtregime komt naar voren dat het met GxGs goed mogelijk is om zuurstofstress te voorspellen. Transpiratiestress kon echter slechts matig met GxG worden voorspeld, wat mogelijk te maken heeft met een gebrekkige representativiteit van droge locaties in de gebruikte meetgegevens.

Uit het onderzoek komt naar voren dat de koppeling tussen grondwater- en vochtregime verbeterd kan worden door andere GWK's te gebruiken om het vochtregime te schatten. Hierbij kan informatie van tijdreeksen op hogere tijdresolutie benut worden om eigenschappen die de responstijd van de grondwaterstand beschrijven te bepalen.

Toepassing: Richtlijn voor representativiteit GxG

Dit onderzoek biedt met een praktische tabel (zie Figuur A als voorbeeld) inzicht in de representativiteit van tijdvakken waarover de GxG berekend wordt. De uitkomst biedt daarmee ondersteuning voor een modelleur als (1) richtlijn voor de selectie van jaren om klimaatrepresentatieve GxGs te berekenen en (2) inzicht in de representativiteit van reeds uitgevoerde analyses waarin de GxG een rol speelt.

Duidelijk komt in deze verkenning naar voren dat het bodemvochtregime beter kan worden voorspeld met andere karakteristieken dan de GxG. Dit geldt met name voor transpiratiestress. Komt er daarmee een einde aan het tijdperk van de GxG?

Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport *Karakterisering van het grondwaterregime voor ecohydrologische toepassingen – een verkenning* (BTO-2022.071).

Dankwoord

Dit onderzoek is gefinancierd door het Bedrijfstakonderzoek (BTO) van de waterbedrijven. Wij danken Jelle van Sijl, Martin de Haan en Tom van Steijn voor hun constructieve suggesties, die de inhoud van dit rapport en relevantie voor de dagelijkse hydrologische praktijk in Nederland in belangrijke mate hebben verbeterd.

Inhoud

<i>Managementsamenvatting</i>	3
<i>Dankwoord</i>	5
Inhoud	6
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doelen	9
2 Methoden	10
2.1 Algemene aanpak	10
2.2 Modelopzet	11
2.3 Afleiden grondwaterkarakteristieken (GWKs)	12
2.3.1 Traditioneel recept berekenen GxG	12
2.3.2 Alternatieve grondwaterkarakteristieken	12
2.4 Bepalen effect keuze tijdsduur en tijdvak op GxG	15
2.5 Verkennen alternatieven voor GxG	15
2.5.1 Validatie	15
3 Resultaten	17
3.1 Effect keuze tijdvak op GxG	17
3.2 Verschil in GxG tussen normaalperioden	21
3.3 Alternatieven voor GxG	23
4 Discussie	26
4.1 Effect keuze periode en duur op GxG	26
4.2 Beschrijving van vochtregime met GxG en alternatieven	26
4.3 Heeft een hogere (meet)frequentie toegevoegde waarde?	27
4.4 Gevolgen voor de praktijk en kennisleemten	28
5 Conclusies	30
6 Literatuur	31
I Bodemfysische eenheden	33
II Correlaties tussen grondwaterkarakteristieken	34
III Afleiden van alternatieven voor GxG	35
IV Eigenschappen meetlocaties	38

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De grondwaterstand en de variatie daarin door de tijd (het grondwaterregime) spelen een prominente rol in waterbeheer, natuur en landbouw. Momenteel wordt het grondwaterregime doorgaans gekarakteriseerd met de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG), de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en de voorjaarsgrondwaterstand (GVG). De GLG, VVG en GHG (gezamenlijk GxG) zijn wijdverbreide begrippen in de hydrologie. De GxG heeft als doel om zo eenvoudig mogelijk het grondwaterregime op een gegeven locatie te beschrijven. De rekenmethodiek stamt uit de jaren 1960; een tijdperk waarin automatische drukopnemers nog niet bestonden en eens in de 14 dagen een handmeting in peilbuizen werd verricht (Knibbe en Marsman, 1961; Heesen van, 1971). Op basis van deze 14-daagse gegevens werden, en worden nog steeds, de GLG, GHG en VVG berekend.

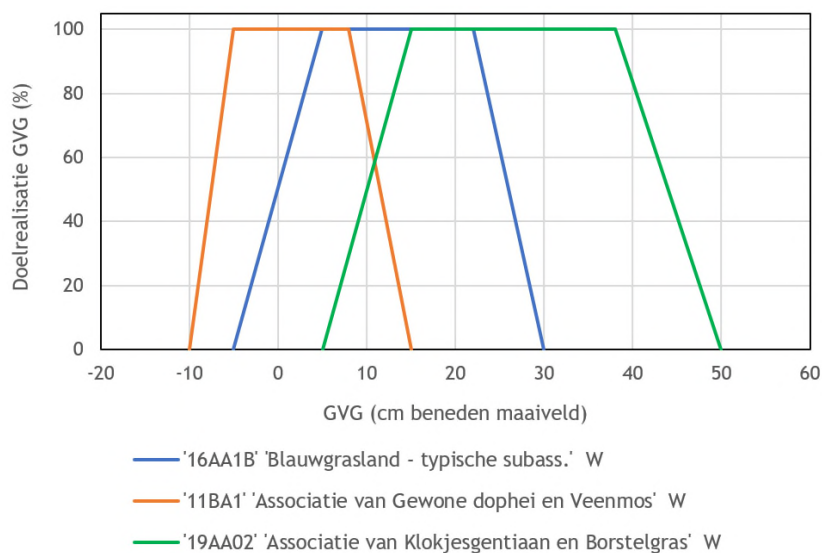
De rekenmethodiek en benodigde lengte van de meetreeks voor bepaling van GxG's is niet eenduidig vastgesteld en in de loop der jaren zijn verschillende aangepaste vormen verschenen. Verschillende methoden leiden tot verschillende schattingen van GxG's, die verder doorwerken op resultaten en conclusies die daaruit getrokken worden. Al sinds de definitie wordt 8 jaar aangehouden voor de minimumperiode van de meetreeksen (Heesen van, 1971; van der Gaast en Massop, 2003) of worden kortere reeksen tot deze periode verlengd via tijdreeksanalyse (Von Asmuth e.a., 2012). Bovendien wordt geadviseerd ten minste een periode van dertig jaar te hanteren, omdat dit overeenkomt met de periode waarover klimaatnormalen berekend worden en variatie verder uitgemiddeld wordt (Bartholomeus e.a., 2008b; Ritzema e.a., 2018).

Regelmatig wordt in de praktijk wegens beperkte doorlooptijd, inzetbaarheid en/of financiële middelen pragmatisch met de GxG omgegaan en gebruik gemaakt van de modeluitvoer (GxG) die beschikbaar is. Deze modeluitvoer beschrijft vaak een pragmatisch gekozen simulatieperiode van kortere duur dan dertig jaar. Momenteel is grotendeels onbekend hoe keuzes in de berekening van GxG's doorwerken in resultaten en daaraan verbonden conclusies (maar zie o.a. Massop (2001), Van der Gaast & Massop (2003) en Knotters & van Walsum (1998)). Het is dus wenselijk om inzicht te verkrijgen in de afwijking van een gemodelleerde GxG berekend over een andere periode dan 30 of 8 jaar.

De soortensamenstelling van het spontane plantendek hangt af bodemfactoren die direct van invloed zijn op het wortelmilieu. Denk daarbij aan de beschikbaarheid van (of het tekort aan) water en zuurstof (tezamen aangeduid als 'het vochtregime') en van nutriënten. Dit zijn zogenaamde operationele standplaatsfactoren die worden bepaald door conditionerende factoren, zoals de grondwaterstand. In de ecohydrologie worden de GxG's gebruikt als conditionerende standplaatsfactoren om een relatie te leggen met de vegetatie. Deze relatie kan direct zijn, waarbij de kansrijkdom van de vegetatie direct wordt afgeleid uit GxG's. Maar de relatie kan ook indirect zijn, waarbij het vochtregime in de wortelzone wordt afgeleid van GxG's waarna de kansrijkdom van de vegetatie volgt uit dit vochtregime. Deze laatste aanpak is ingebouwd in het voorspellingsmodel PROBE (Witte e.a., 2015), dat onderdeel is van de Waterwijzer Natuur (Witte e.a., 2018; Nijp e.a., 2022).

Een voorbeeld van een toepassing waar een directe relatie tussen grondwaterstand en vegetatie wordt gebruikt is het programma Waterlood (Runhaar en Hennekens, 2015), dat ook is ingebouwd in de Waterwijzer Natuur. In Waterlood zijn op basis van literatuur, metingen, indicatiewaarden van plantensoorten en expertkennis, doelrealisatiefuncties voor de kansrijkdom van terrestrische vegetatietypen van Nederland bepaald. Deze doelrealisatiefuncties geven de bandbreedte van o.a. de VVG en GLG waarbij een vegetatietype voorkomt. Figuur 1

geeft daarvan een voorbeeld voor een drietal grondwaterafhankelijke plantengemeenschappen ⁽¹⁾. Het laat zien dat al een kleine verandering van GVG (circa 10 cm) de kansrijkdom van een vegetatietype van 0% naar 100% kan doen veranderen, waardoor een vegetatietype niet meer kan voorkomen. Dit geeft aan dat sommige grondwaterafhankelijke plantengemeenschappen uiterst gevoelig zijn voor de grondwaterstand. Het betekent echter ook dat de benodigde GxG in dergelijke toepassingen voor deze gevoelige plantengemeenschappen heel nauwkeurig geschat moet worden. Afwijken van de standaarddefinitie van GxG, bijvoorbeeld door deze te baseren op een relatief droge periode, kan anders tot een systematisch andere kansrijkdom leiden.



Figuur 1. Voorbeeldtoepassing van GxG in ecohydrologische voorspelling met behulp van Waternood. In dit voorbeeld wordt de kansrijkdom van vegetatietypen (doelrealisatie) als functie van gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand gedemonstreerd voor drie grondwaterafhankelijke vegetatietypen. Het GVG-bereik waarbij de kansrijkdom maximaal is en het maximale bereik waarbij het vegetatietype nog kan voorkomen, wordt gedefinieerd door voor ieder vegetatietype vastgestelde knikpunten.

Handmetingen van grondwaterstanden waren in het verleden noodgedwongen infrequent en de schatting van GxG's op basis daarvan hebben toevallige meetfouten. Inmiddels worden grondwaterreeksen doorgaans verzameld met geautomatiseerde meetapparatuur met een meetfrequentie van ten minste eens per dag, en zijn de toevallige meetfouten kleiner. Tijdreeksen verzameld met automatische drukopnemers bieden zelfs de gelegenheid om grondwaterdynamiek op een zeer hoog detailniveau te karakteriseren. Dit type metingen kan echter onderhevig zijn aan systematische fouten, o.a. door sensor drift (zie o.a. Sorensen en Butcher (2011) en Von Asmuth (2010)). Ongeacht de meetfrequentie kunnen er door een korte meetperiode ook systematische fouten ontstaan, in het bijzonder als de meetperiode samenvalt met een reeks droge of juist natte jaren.

De GxG negeert met een 14-daagse resolutie de detailinformatie. Daardoor kunnen karakteristieken van grondwaterdynamiek die belangrijk zijn voor de vegetatie over het hoofd worden gezien. Daarnaast zijn de hoogste, laagste en voorjaarsgrondwaterstand slechts enkele van de talloze manieren waarop een grondwatertijdreeks gekarakteriseerd kan worden. Het is goed mogelijk dat met de fijnere tijdsresolutie en andere grondwaterkarakteristieken een sterkere koppeling tussen grondwaterdynamiek en het bodemvochtregime kan worden gemaakt. Daarmee zouden voorspellingen over hoe bijvoorbeeld verandering in waterbeheer, onttrekkingscapaciteit, en klimaat doorwerken op natuur en landbouw in potentie ook kunnen worden verbeterd.

⁽¹⁾ Hierbij dient te worden opgemerkt dat huidige grondwatermodellen nog niet erg geschikt zijn de waterhuishouding in hoogvenen (en daarmee de potentie van de associatie Gewone dophei en veenmos) te simuleren. De doelrealisatiefunctie illustreert de nauwe bandbreedte van voorjaarsgrondwaterstand waarbij dit type voorkomt.

1.2 Doelen

De doelen van dit verkennende onderzoek zijn:

- 1 Inzichtelijk maken hoe verschillende rekenmethoden leiden tot verschillende schattingen van GxG's, en hoe deze verschillen doorwerken in de voorspelling van natuurpotenties;
- 2 Verkennen welke andere methoden geschikt zijn om de grondwaterstandsdynamiek te beschrijven;
- 3 Grondwaterstandskarakteristieken voor ecohydrologische doeleinden aan te bevelen.

2 Methoden

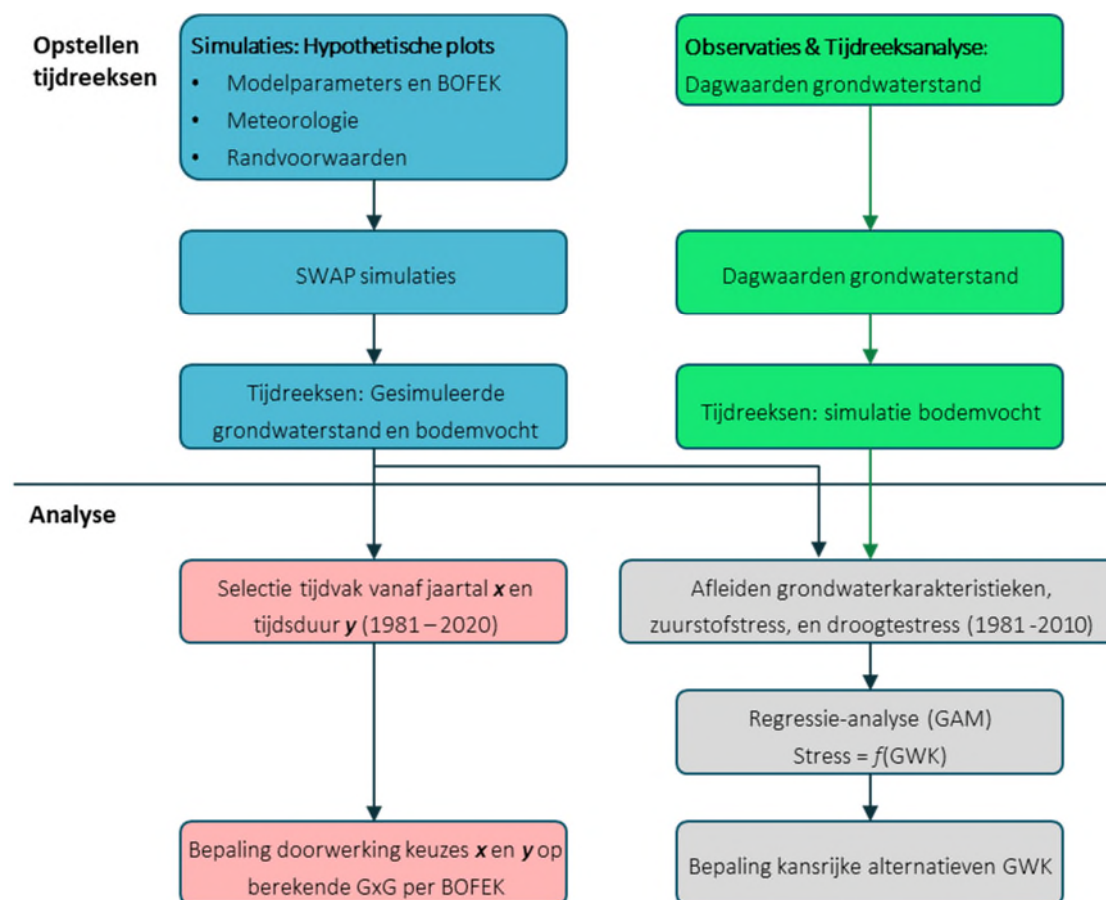
2.1 Algemene aanpak

De aanpak die in dit onderzoek is gehanteerd is samengevat in deze paragraaf en in Figuur 2. In de volgende paragrafen beschrijven we de aanpak in meer detail.

Voor de groei van planten en competitie tussen soorten is niet de grondwaterstand maar het vochtregime in de wortelzone bepalend (Bartholomeus e.a., 2012). Dit vochtregime staat centraal in de ecohydrologie, en wordt naast grondwaterdynamiek ook in sterke mate bepaald door klimaat en bodemeigenschappen. In deze studie wordt het vochtregime beschreven met de standplaatsfactoren transpiratiestress (het tekort aan water voor transpiratie van een referentiegewas), en zuurstofstress (het tekort aan zuurstof voor wortelrespiratie van een referentiegewas). Deze maten kunnen, in tegenstelling tot de grondwaterstand, gebruikt worden in een toekomstig klimaat en houden rekening met verschillen in bodemfysische eigenschappen tussen bodems (zie Bartholomeus e.a. (2012) voor definitie en meer informatie). De procedure wordt onder andere toegepast in voorspelmodellen PROBE (Witte e.a., 2015) van de Waterwijzer Natuur (Witte e.a., 2018) en Waterwijzer Landbouw (Mulder e.a., 2018). Uit eerder onderzoek is gebleken dat een periode van 30 jaar nodig is om het vochtregime in de bodem te koppelen aan eigenschappen van vegetatie (Bartholomeus e.a., 2008a). Daarop voortbordurend worden transpiratie- en zuurstofstress ook in dit onderzoek gedefinieerd over de klimaatperiode 1981 – 2010.

Om te bepalen hoe gevoelig de GxG is voor de duur en startjaar van de gekozen periode, en of deze gevoeligheid varieert per bodemfysische eenheid (BOFEK; (Wösten e.a., 2013)), maken we gebruik van modelsimulaties met het model SWAP (Kroes e.a., 2003) (Figuur 2). Voor hypothetische puntlocaties (plots) die variëren in waterhuishouding, bodem en hydrogeologie wordt een grondwatertijdreeks gesimuleerd waaruit de GxG berekend kan worden voor verschillende tijdvakken. Vervolgens vergelijken we deze GxG's. De meerwaarde van deze modelaanpak ten opzichte van veldmetingen is dat het mogelijk is voor verschillende bodems het grondwaterregime te voorspellen onder identieke omstandigheden (weer, ligging in landschap, oppervlaktewaterpeilen, drainageweerstanden, ondergrond, etc.), wat bij meetreeksen in het veld vrijwel onmogelijk is.

Om vast te stellen hoe goed alternatieven voor GxG's het bodemvochtregime beschrijven, passen we de werkwijze beschreven in Bartholomeus e.a. (2008a) toe om van de SWAP-simulaties ook de zuurstof- en transpiratiestress af te leiden: twee directe (operationele) maten voor het vochtregime. Naast GVG, GLG, GHG en GG worden ook allerlei alternatieve karakteristieken uit de grondwatertijdreeksen afgeleid. Met statistische procedures wordt vervolgens bepaald hoe goed de verschillende grondwaterkarakteristieken het bodemvochtregime (zuurstof- en transpiratiestress) beschrijven. Vervolgens wordt bepaald of er grondwaterkarakteristieken zijn die beter presteren dan de GxG's, dat wil zeggen die beter in staat zijn het vochtregime te beschrijven. Aan de hand van lange grondwatermeetreeksen afkomstig uit relatief onverstoorde natuurgebieden wordt een validatie uitgevoerd om de robuustheid van deze relaties te toetsen.



Figuur 2. Samenvattend overzicht: van hydrologische invoer naar analyse. Het **blauwe** traject is gebaseerd op modelsimulaties, het **groene** op observaties uit natuurgebieden. De modelsimulaties worden gebruikt om zowel de doorwerking van keuzes in de GxG berekening (**rood**) als alternatieven voor GxG te bepalen (**grijs**).

2.2 Modelopzet

De modelsimulaties volgen de procedure zoals beschreven in Bartholomeus en Witte (2013) en Witte e.a. (2018). De modelsimulaties dienen ter vertaling van de uitvoer van grondwatermodellen (grondwaterstanden) naar het vochtregime van de wortelzone (zuurstofstress en transpiratiestress) onder een breed scala aan bodemeigenschappen en geohydrologische settings.

Bodemkolommen van 5 m zijn geparametriseerd op basis van Staring-bouwstenen in de BOFEK-2012 (Wösten e.a., 2013) voor een selectie van relevante en 10 contrasterende bodemfysische eenheden in grondwaterafhankelijke natuur met ten minste één bodem per grondsoort (Bijlage I). Geohydrologische setting en randvoorwaarden zijn gevarieerd door willekeurig 100 combinaties van o.a. slootafstand, slootdiepte, drainageweerstand, maximale plasdiepte, stijghoogte en variatie door de tijd aan de onderrand te genereren per BOFEK. Voor de bovenrandvoorwaarde is de meteorologie van weerstation Twente gebruikt. De simulatieperiode bestrijkt de periode 1971 – 2020, waarbij de eerste 10 jaar dienen ter initialisatie. In totaal zijn dus 1000 SWAP-simulaties uitgevoerd, wat heeft geresulteerd in een flinke bandbreedte aan GxG's (van ca. 3 tot -0,1 m-mv). Voor de berekening van zuurstof- en transpiratiestress is de procedure zoals beschreven in Bartholomeus e.a. (2012) gehanteerd. Zie Bartholomeus en Witte (2013) voor meer informatie.

2.3 Afleiden grondwaterkarakteristieken (GWKs)

2.3.1 Traditioneel recept berekenen GxG

Uit de met SWAP gesimuleerde tijdreeksen van grondwaterstand zijn grondwaterkarakteristieken (GWKs) afgeleid. De GHG, GVG en GLG worden volgens 'traditionele wijze' (Heesen van, 1971) als volgt berekend over een periode van 30 jaar ('klimaatrepresentatieve GxG'), voor alle 10 dertigjarige periodes tussen 1981 en 2020.

- 4 Indien de betreffende tijdreeks een hogere resolutie dan tweemaandelijks heeft, wordt de (gemiddelde) grondwaterstand van de 14^e en 28^e dag van de maand uit de reeks geëxtraheerd.
- 5 Per hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) worden uit deze reeksen de drie hoogste en drie laagste waarden geëxtraheerd. Het gemiddelde is respectievelijk de gemiddeld hoogste (HG3) en gemiddeld laagste (LG3) grondwaterstand per jaar. De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (VG3) per hydrologisch jaar wordt berekend als het gemiddelde van 14 maart, 28 maart, en 14 april. De gemiddelde grondwaterstand (GG) is per jaar berekend als gemiddelde van alle 'waarnemingen' op de 14^e en 28^e dag van de maand.
- 6 Deze procedure wordt herhaald voor alle dertig afzonderlijke hydrologische jaren. Van alle 30 HG3 en LG3 en VG3 waarden wordt het gemiddelde genomen, die respectievelijk de GHG, GLG en GVG voorstellen.

2.3.2 Alternatieve grondwaterkarakteristieken

In aanvulling op de traditionele karakteristieken GHG, GVG, GLG en GG, is in dit onderzoek een flink aantal alternatieven om het grondwaterregime te beschrijven opgenomen. Zie Tabel 1 voor een volledige overzicht en Figuur 3 voor een voorbeeldtoepassing op een tijdreeks. Deze hebben wij ingedeeld in vijf categorieën karakteristieken die de grondwaterdynamiek beschrijven: (1) gemiddelde verwachtingswaarde, (2) variabiliteit, (3) extremen, (4) responstijd en stabiliteit, (5) de timing van gebeurtenissen.

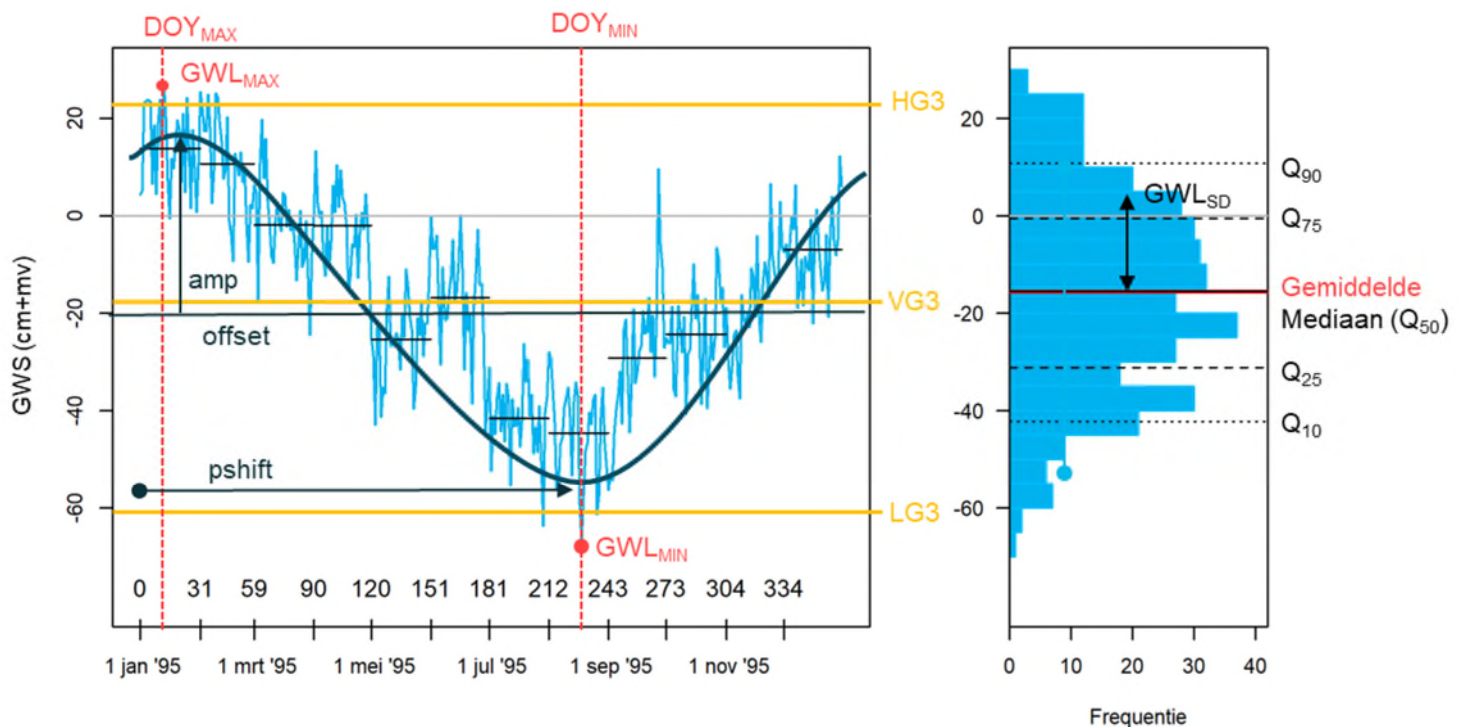
Verskillende typen extra rekenmethoden zijn gebruikt om alternatieve grondwaterkarakteristieken te berekenen. Statistische momenten (gemiddelde, variantie, scheefheid (skewness) en welving (kurtosis)), minima en maxima, en kwantilen bieden voor de hand liggende alternatieven om de gemiddelde verwachtingswaarde, variabiliteit, en extremen uit te drukken. Ook wordt het grondwaterstandsverloop beschreven met een sinusoïde waarvan de amplitude, fase en de gemiddelde grondwaterstand de grondwaterdynamiek kunnen karakteriseren (Zie Bijlage III.I). Deze sinusoïde neemt een symmetrisch verloop van de seizoenale grondwaterdynamiek aan, wat uiteraard een versimpeling is van de werkelijkheid. Daarom is de dag van het jaar waarop de minimale en maximale grondwaterstand optreedt ook bepaald op basis van een 10-daags voortschrijdend gecentreerd gemiddelde van de grondwaterstand.

Naast gemiddelden en extremen kan een vegetatie juist wel/niet gedijen bij stabiele dan wel sterk fluctuerende grondwaterstanden. Hiervoor gebruiken we de stabiliteit en reactietijd van de grondwaterstand. De *stabiliteit* definiëren wij hier als een langdurige periode waarover de grondwaterstand min of meer constant is. De *reactietijd* bepaalt hoe snel de grondwaterstand reageert op gebeurtenissen (neerslag) op korte tijdschaal. Het verschil tussen stabiliteit en reactietijd is dus de tijdschaal waarop ze de dynamiek beschrijven. De standaarddeviatie geeft een beeld van de variatie en stabiliteit, maar houdt geen rekening met de samenhang van het grondwaterstandsverloop door de tijd. De stabiliteit wordt daarom aanvullend beschreven aan de hand van het aantal dagen dat de grondwaterstandsverandering zeer klein is. Om de snelheid te karakteriseren waarmee de grondwaterstand reageert op een natte of een droge periode, zijn de volgende grootheden berekend: de tijdsconstante uit het lineair-reservoirconcept (Buytaert e.a., 2004); de Kraijenhof van de Leur j coëfficiënt (Kraijenhoff Van de Leur, 1958); en parameters die temporele autocorrelatie beschrijven (Nijp e.a., 2019b). Deze grootheden zijn beschreven in Bijlage III.II en bijlage III.III.

Om rekening te houden met de fenologie van de vegetatie, is ook berekend wanneer in het jaar bepaalde grondwaterkarakteristieken optreden. Denk bijvoorbeeld aan de dag in het jaar (day of year; DOY) dat de grondwaterstand het diepst is, het ondiepst is, of optreden, en de grondwaterstanden behorend bij specifieke perioden in het jaar zoals het groeiseizoen (GVG) en de gemiddelde grondwaterstand per maand.

Er hadden nog meer afgeleide karakteristieken meegenomen kunnen worden, zoals allerlei percentielwaarden en minima/maxima per maand. Op die manier kan bijvoorbeeld meer inzicht in de van timing van extremen verkregen worden. Dit zou echter resulteren in een zeer groot aantal mogelijkheden. Om het aantal resultaten enigszins behapbaar te houden, en omdat ingeschat wordt dat deze karakteristieken van weinig meerwaarde zijn, hebben we dergelijke meer gedetailleerde karakteristieken niet opgenomen in deze analyse. Echter, de methodiek geeft de mogelijkheid in een eventuele vervolgfase ook andere karakteristieken te toetsen.

Het grondwaterregime en het bodemvochtregime kunnen gekarakteriseerd worden door (combinaties van) grondwaterkarakteristieken. Alle karakteristieken zijn eerst op jaarbasis bepaald en vervolgens gemiddeld over een langere periode. Sommige karakteristieken zijn al een samenvatting van de jaarreeks (bijvoorbeeld de maximale waarde), voor andere is een mediaanwaarde bepaald over alle dagwaarden in het jaar (bijvoorbeeld j coëfficiënt).



Figuur 3. Voorbeeld van het grondwaterstandsverloop in een bepaald jaar voor een locatie met blauwgrasland en de daaruit afgeleide karakteristieken (links) en het histogram dat de verdeling van de grondwaterstanden weergeeft (rechts). Op de x-as staat naast de datum ook de dag in het jaar (day of year; DOY) vermeld. Gele karakteristieken betreffen de HG3, VG3, en LG3 die worden gebruikt om de GHG, GVG en GLG af te leiden (let op: dit figuur geeft een kalenderjaar en geen hydrologisch jaar weer). De horizontale zwarte lijnen zijn de gemiddelde grondwaterstanden per maand. De minimale en maximale grondwaterstand zijn weergegeven met GWL_{MIN} en GWL_{MAX} , de timing ervan met de dag in het jaar waarop ze optreden (respectievelijk DOY_{MIN} en DOY_{MAX}). De sinusoïde is weergegeven met de vloeiende donkerblauwe lijn en wordt beschreven met de amplitude (amp), gemiddelde waarde (offset) en faseverschuiving (pshift).

Het histogram geeft de frequentieverdeling van de grondwaterstand weer. Hieruit zijn de kwantielen afgeleid, waarbij het 10% (Q_{10}) en 90% (Q_{90}) kwantiel maten zijn voor extreme waarden (diepste en ondiepste grondwaterstand), en de mediaan voor de verwachtingswaarde. Uit deze frequentieverdeling zijn ook de statistische momenten (gemiddelde, standaarddeviatie (GWL_{SD}), skewness en kurtosis) af te leiden. Deze jaarlijkse eigenschappen worden vervolgens gemiddeld over alle jaren dat het tijdvak beslaat (30 jaar).

Tabel 1. Overzicht van de in dit onderzoek gehanteerde grondwaterkarakteristieken .

Afk.	Karakteristiek en beschrijving	Eenheid	Categorie
GHG	Gemiddeld hoogste grondwaterstand, berekend op traditionele wijze op 14 ^e en 28 ^e van de maand (1 april t/m 31 maart)	m-mv	Extremen
GVG	Gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand, berekend op traditionele wijze op 14 ^e en 28 ^e van de maand (1 april t/m 31 maart)	m-mv	Timing
GLG	Gemiddeld laagste grondwaterstand, berekend op traditionele wijze op 14 ^e en 28 ^e van de maand (1 april t/m 31 maart)	m-mv	Extremen
GG	Gemiddelde grondwaterstand, berekend op traditionele wijze op 14 ^e en 28 ^e van de maand in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart)	m-mv	Gemiddelde
GWLsin.shiftmax	Hoogste grondwaterstand bij een 10-daags voortschrijdend gemiddelde	m-mv	Empirische sinus
GWLsin.DOYmax	Dag in het jaar waarop de 10-daags voortschrijdend gemiddelde grondwaterstand maximaal is	Dag	Empirische sinus
GWLsin.shiftmin	Laagste grondwaterstand bij een 10-daags voortschrijdend gemiddelde	m-mv	Empirische sinus
GWLsin.DOYmin	Dag waarop de 10-daags voortschrijdend gemiddelde grondwaterstand minimaal is	Dag	Empirische sinus
GWLfit.DOYmax	Dag in het jaar waarop de geoptimaliseerde sinusoïde de maximale grondwaterstand bereikt	Dag	Timing
GWLfit.DOYmin	Dag in het jaar waarop de geoptimaliseerde sinusoïde de minimale grondwaterstand bereikt	Dag	Timing
GWLfit.pshift	Faseverschuiving (dagen) sinusoïde	Dag	Timing
GWLfit.amp	Amplitude sinusoïde	Meter	Variabiliteit
GWLfit.offset	Geoptimaliseerde gemiddelde grondwaterstand in sinusfunctie	m-mv	Gemiddelde
GWLmean	Gemiddelde grondwaterstand, gebaseerd op dagwaarden	m-mv	Gemiddelde
GWLquant**.hydr	Kwantielwaarden van grondwaterstand, afgeleid uit dagwaarden in een hydrologisch jaar (1 april t/m 30 maart). Het getal op de plek van ** geeft de betreffende kwantielwaarde weer (10, 25, 50, 75, 90).	m-mv	Extremen en gemiddelde
GWLmin	Minimale jaarlijkse dagwaarde van de grondwaterstand	m-mv	Extremen
GWLmax	Maximale jaarlijkse dagwaarde van de grondwaterstand	m-mv	Extremen
GWLvariance	Tweede statistische moment: variantie	m ²	Variabiliteit
GWLskewness	Derde statistische moment: scheefheid, de neiging van grondwaterstand naar diepere of ondiepere waarden	-	Extremen
GWLkurtosis	Vierde statistische moment: 'gewelddheid', de kans op extreme uitschieters (kleinere waarde = 'heavy tails')	-	Extremen
***.GWLmean	Gemiddelde grondwaterstand van maanden, waarbij *** de eerste drie of vier letters van de maand zijn.	m-mv	Timing
nugget	Het aandeel onverklaarde variatie (of variatie optredend op tijdfrequentie < 1 dag), zoals bepaald met het empirisch variogram (Bijlage III.III).		Stabiliteit
Cor_time	De gemiddelde tijdsduur tussen twee grondwaterstanden waarbij ze niet meer met elkaar gecorreleerd zijn (i.e. correlatie kleiner dan 95%), zoals vastgesteld met een empirisch variogram (Bijlage III.III).	d	Responstijd en stabiliteit
Linres_T_days	Tijdsconstante τ van een lineair reservoir (zie bijlage III.II)	d ⁻¹	Responstijd en stabiliteit
T_stable_gwl	Aantal dagen per jaar waarop de grondwaterstandsverandering kleiner is dan 2 mm.	N dagen	Stabiliteit

2.4 Bepalen effect keuze tijdsduur en tijdvak op GxG

De GxG hangt af van zowel de jaren als de lengte van de periode waarover deze grootte wordt berekend. Om te onderzoeken hoe gevoelig de GxG hiervoor is, berekenen we de GxG voor perioden van verschillende lengtes (tijdsduren) en verschillende jaartallen (tijdvakken), te beginnen met een startjaar. Uit de uitkomsten van de 1000 simulaties is voor iedere combinatie van startjaar en tijdsduur de GxG berekend uit de XG3's over die jaren. In deze tekst hanteren we de subscript $GxG_{x,y}$, waarbij x en y respectievelijk het jaartal waarin het tijdvak begint (startjaar) en de tijdsduur (aantal jaren) ervan weergeven. $GHG_{1991,30}$ geeft bijvoorbeeld weer dat de GHG berekend is over een 30 jarige periode, startend in 1991. Per tijdsduur zijn het 5^e, 50^e en 95^e percentiel bepaald. Er is bewust geen standaarddeviatie of variantie berekend omdat deze expliciet afhankelijk zou zijn van het aantal observaties, en het aantal observaties structureel afneemt met toenemende periode. Daarmee zouden verschillen niet alleen veroorzaakt door variatie tussen simulaties maar ook door het aantal herhalingen. Het verschil in GxG tussen het 95^e en 5^e percentiel is gebruikt om de GxG-bandbreedte vast te stellen voor de betreffende simulatie. Verwacht mag worden dat deze bandbreedte afneemt naarmate de duur waarover deze berekend wordt toeneemt: tussen individuele jaren is veel variatie, die wordt weggemiddeld bij langere tijdsduur. Deze analyse is gebaseerd op 40 jaar modelsimulaties, van 1981 tot en met 2020.

Aanvullend is ook bepaald in hoeverre de gemiddelde grondwaterstand gebaseerd op tweewekelijkse waarnemingen afwijkt van een gemiddelde gebaseerd op dagwaarden.

2.5 Verkennen alternatieven voor GxG

Om te bepalen welke alternatieven het grondwaterregime goed kunnen beschrijven, zijn alle grondwaterkarakteristieken in Tabel 1, per bodemfysische eenheid, gerelateerd aan zuurstofstress en transpiratiestress. Naar verwachting kunnen juist combinaties van grondwaterkarakteristieken het vochtregime goed voorspellen (bijvoorbeeld de gemiddelde waarde en een maat voor de variatie). Naast univariate effecten zijn daarom ook tweede- en derde-orde interacties tussen variabelen meegenomen. Dit levert 10660 unieke combinaties.

Omdat de functionele vorm van de relaties tussen (combinaties van) grondwaterkarakteristiek(en) en stressmaat van te voren niet vastligt, zijn deze relaties beschreven met Generalized Additive Models (GAMs *mgcv* package in R; Wood (2004)). Met GAM modellen kan een willekeurige niet-lineaire relatie worden 'gefit' door de gegevens. Hierbij wordt het aantal parameters dat de bochtigheid beschrijft geoptimaliseerd om zowel de bochtigheid als de modelfout zo laag mogelijk te houden. Hiermee wordt het 'overfitten' (te precies nabootsen van ruis in een specifieke dataset) zo veel mogelijk tegengegaan. Ter bevestiging zijn voor iedere bodemfysische eenheid GAM modellen opgesteld op basis van 70 willekeurig gekozen modelsimulaties (kalibratie). Deze modellen werden gevalideerd op de 30 resterende simulaties (ter herinnering: er waren per bodemfysische eenheid 100 geohydrologische plots). Het betreft een statistische verkennende analyse waarbij alle mogelijke combinaties van maximaal drie variabelen worden onderzocht. Een sterke relatie geeft daarbij niet per definitie een oorzakelijk verband weer. Voor deze simulaties is de periode 1981 – 2010 gebruikt, overeenkomend met de periode waarvoor huidige relaties tussen grondwaterregime en respectievelijk zuurstof- en transpiratiestress zijn berekend in de Waterwijzer Natuur.

2.5.1 Validatie

De mate waarin de GAM modellen de met SWAP gesimuleerde zuurstof- en transpiratiestress kunnen voorspellen is gekwantificeerd met het Kling-Gupta Model Efficiency criterium (KGE) (Gupta e.a., 2009; Knoben e.a., 2019). Een KGE waarde van 1 geeft een perfecte overeenkomst met 'metingen' (in ons geval gesimuleerde transpiratie- en zuurstofstress, dus pseudometingen), een waarde van -0.41 een voorspelling die even goed is als het gemiddelde van de metingen, en alle waarden daaronder zijn ondergeschikt. In deze toepassing laat een hoge KGE waarde zien dat de betreffende (combinatie van) variabele(n) een waardevolle voorspeller kan zijn voor zuurstof- of transpiratiestress en geeft aan dat er geen sprake is van 'overfitting'.

Voorgaande blijft echter slechts een toets op modelsimulaties. De prestatie van de grondwaterkarakteristieken is daarom ook getoetst op meetreeksen afkomstig uit natuurgebieden. Hierbij is gebruik gemaakt van een beschikbare set gegevens en procedure zoals beschreven in (Bartholomeus e.a., 2012). Het betreft gegevens afkomstig van grondwaterafhankelijke natuurgebieden met een grote variatie aan vegetatietypen, waarvan bekend is dat er geen/nauwelijks veranderingen in waterbeheer zijn opgetreden en lange meetreeksen van grondwaterstand beschikbaar waren. Het betreft voornamelijk locaties van grondwaterafhankelijke natuur. Voor de in deze studie bestudeerde 10 bodemfysische eenheden waren in totaal 38 locaties beschikbaar (zie Bijlage IV voor eigenschappen). Het aantal herhalingen per BOFEK is beperkt, en voor BOFEK 418 en 507 was geen enkele meetlocatie beschikbaar (Bijlage IV). Voor de 38 peilbuizen geldt dat de grondwatermeetreeksen zijn verlengd en ontbrekende meetgegevens zijn gevuld met dagwaarden voor de periode van 1971 t/m 2000 met tijdreeksanalyse, en dat zuurstofstress (respiratiestress RS) en transpiratiestress (TS) voor elke locatie zijn bepaald (Bartholomeus e.a., 2011; Bartholomeus e.a., 2012).

Voor alle grondwaterkarakteristieken is met deze tijdreeksen uit natuurgebieden bepaald in hoeverre ze gebruikt kunnen worden om het vochtregime in de wortelzone te beschrijven. Dit is gedaan middels de voorspelkwaliteit (KGE-waarde) uit de univariate GAM modellen voor de relaties tussen grondwaterkarakteristiek en zuurstof- en transpiratiestress. Hierbij is de op SWAP simulaties gebaseerde relatie tussen grondwaterkarakteristiek en vochtregime gebruikt om de 'geobserveerde' RS en TS te schatten.

Voor de gecombineerde GAM modellen is de waarde van een grondwaterkarakteristiek berekend als het 95^{ste} percentiel van alle KGE waarden van de GAM modellen waarin deze voorkomt (verschillende bodemfysische eenheden, en verschillende combinaties tussen grondwaterkarakteristieken) ⁽²⁾.

Bodemeigenschappen van de meetlocaties zijn destijds locatiespecifiek op basis van bodemprofielen opgesteld en gebruikt om zuurstof- en transpiratiestress mee te berekenen. In dit onderzoek zijn de relaties tussen grondwater- en bodemvochtregime opgesteld op basis van generieke landelijke bodemfysische eenheden. In de validatie is de bodemfysische eenheid op basis van de bodemfysische-eenhedenkaart bepaald. Daarnaast is de Staringreeks in de tussentijd geactualiseerd, waardoor bodemeigenschappen afwijken. Van tevoren kan dus enige afwijking in zuurstof- en (met name) transpiratiestress worden verwacht.

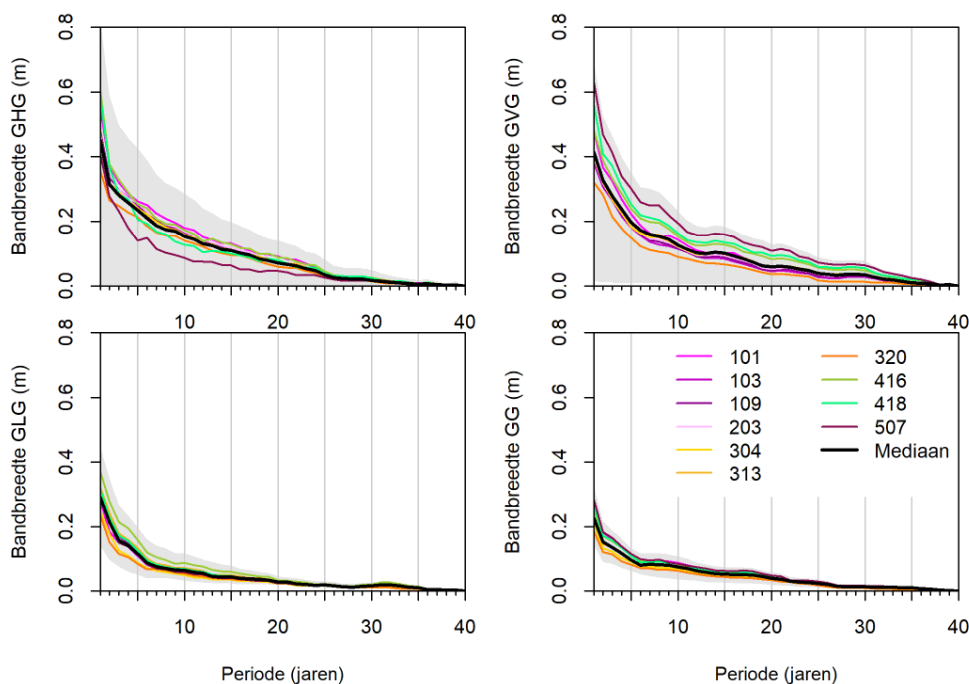
² Een gemiddelde of mediaan waarde zou minder onderscheidend vermogen hebben, omdat er talloze combinaties mogelijk zijn en slechts een aantal daarvan waardevol kan zijn. Daarom is voor het 95^e percentiel gekozen.

3 Resultaten

3.1 Effect keuze tijdvak op GxG

Uit de simulaties blijkt dat naarmate de GxG berekend wordt over een langere periode, de geschatte GxG zoals verwacht stabiel wordt (Figuur 4; de bandbreedte neemt af). Dit geeft aan dat met langere perioden waarvoor de GxG berekend de keuze van het tijdvak minder belangrijk wordt (Figuur 4). De resultaten geven aan dat met name de GHG en GVG behoorlijk worden beïnvloed door het tijdvak waarover GxG berekend wordt. De GVG en GHG voor individuele jaren kan tot zelfs 70 cm variëren. Maar ook bij een duur van de vaak gehanteerde acht jaar hangt de berekende GxG nog sterk af van het tijdvak, i.e. over welke 8 jaar deze wordt berekend. Voor de $GHG_{x,8}$, $GVG_{x,8}$ en $GLG_{x,8}$ is de variatie (95^e – 5^e percentiel) tussen tijdvakken gemiddeld respectievelijk ca 20, 18 en 9 cm, maar deze kan voor specifieke tijdvakken oplopen tot meer dan 30 cm. Ook bij 15 jaar heeft de keuze van het tijdvak een niet te verwaarlozen effect op de GxG en pas rond een duur van dertig jaar is het verschil tussen jaren beperkt (ca 1 cm).

De gevoeligheid voor keuze van het tijdvak hangt af van het bodemtype, met name bij de GHG en GVG. Voor de GVG is deze het hoogst voor siltige leem (BOFEK 507), en het laagst voor grofzandige (podzol)gronden (BOFEK 320). Siltige leem heeft, in tegenstelling tot grof zand, een groot vochthoudend vermogen die ervoor zorgen dat weersvariaties vertraagd worden doorgegeven aan het grondwater. Ook voor de GLG luistert de keuze voor tijdvak minder nauw voor grofzandige (podzol)gronden ten opzichte van de andere bodemfysische eenheden. Dat is te verklaren doordat die de reactie op droge perioden weerspiegelt, waarin de reactiesnelheid op neerslag minder relevant is. Voor alle GxG's geldt dat er specifieke situaties bestaan waarin de GxG ongevoelig is voor de keuze van het tijdvak. Dit betreffen situaties waar bijvoorbeeld het oppervlaktepeil sterk sturend is in het grondwaterregime. Het is dan niet de natuurlijke variatie tussen de jaren die dominant is voor het grondwaterstandsverloop, maar het waterbeheer. Het is goed hierbij te vermelden dat niet alle hypothetische plots even relevant zijn bij alle bodemfysische eenheden. Zo is grof zand met een hoog oppervlaktepeil en een hoge drainageweerstand bijvoorbeeld van weinig praktische relevantie.



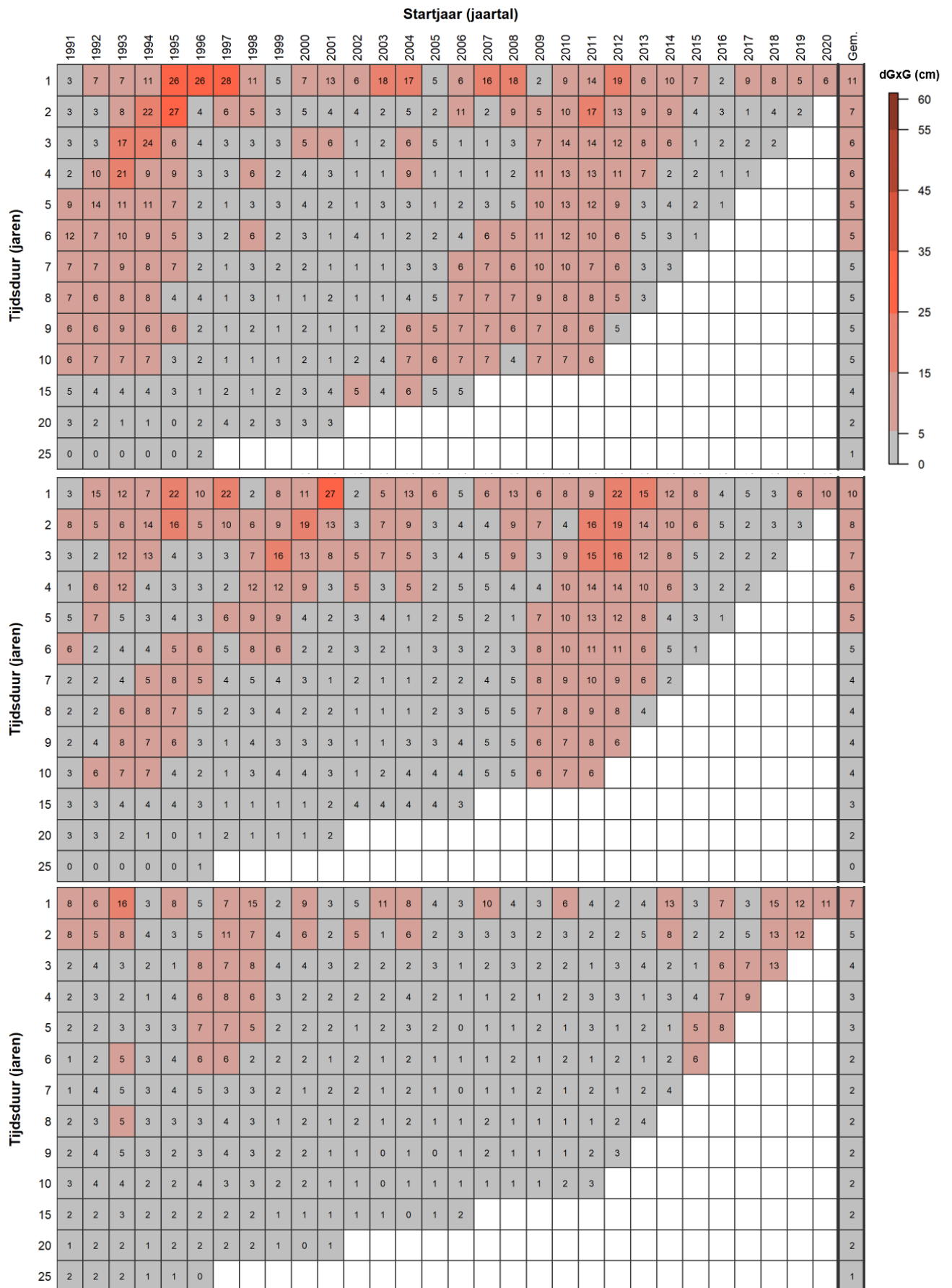
Figuur 4. Variatie in grondwaterkarakteristieken (GxG) tussen tijdvakken (y) als functie van de tijdsduur waarover GxG berekend is (x). De gekleurde lijnen geven de simulaties per bodemfysische eenheid weer, waarbij de getallen naar de (oude, 2014) bodemfysische eenheden verwijzen (startend met 1 = veen, 2 = moerig, 3 = zand, 4 = klei, 5 = leem). De dikke zwarte lijn is de mediaanwaarde van alle simulaties, het grijze vlak de bandbreedte van het 5^e – 95^e percentiel.

Figuur 5 presenteert een overzicht van de mediane absolute afwijking van GHG, GVG en GLG voor alle tijdvak x tijdsduur combinaties ten opzichte van de waarde voor de periode 1991 – 2020. Deze tabel geeft een indicatie van hoe representatief een tijdreeks van een specifieke periode en duur is voor het klimaat van 1991-2020. Hiermee kan bijvoorbeeld snel inzichtelijk gemaakt worden of beschikbare modeluitvoer toevallig erg nat of juist erg droog is ten opzichte van de klimaatperiode. Opvallend is dat met name de GHG bij lange simulatieperiode nog behoorlijk kan afwijken van de klimaatrepresentatieve GHG. Bij een tijdsduur van 8 jaar is dat – gemiddeld over alle modelsimulaties bij verschillende bodems en landschappelijke ligging – vaak nog 7 à 8 cm. Ook bij de GVG is dat het geval. De GLG is daarentegen minder gevoelig voor de gekozen modelperiode: bij een tijdsduur van ca 8 jaar is de afwijking ten opzichte van de klimaatrepresentatieve GLG doorgaans slechts enkele centimeters (gemiddeld ca 2 cm).

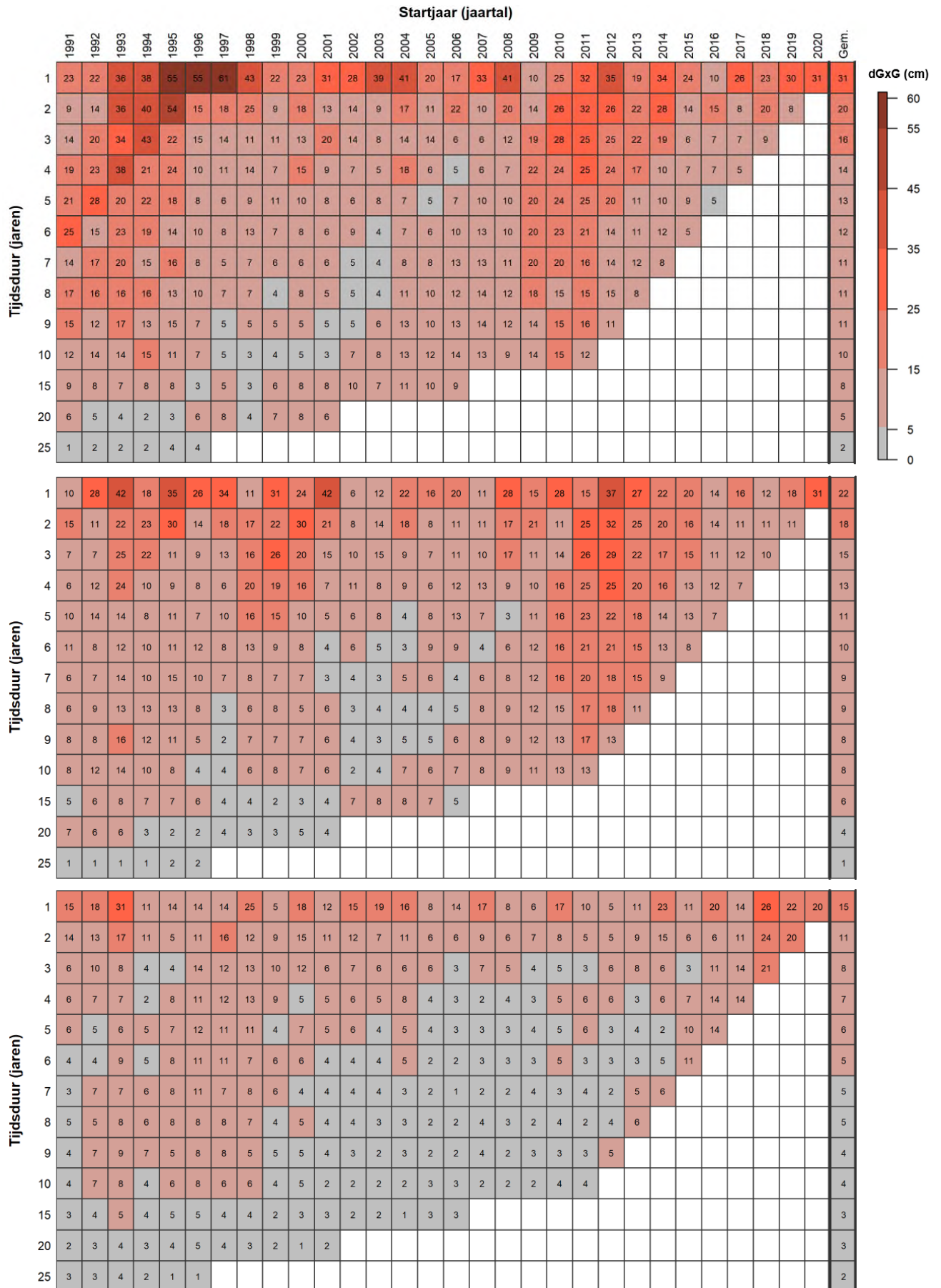
De afwijking van de klimaatrepresentatieve GHG en GVG kan echter voor bepaalde geohydrologische settings en keuzes voor tijdvak en tijdsduur veel groter zijn dan 8 cm (Figuur 6). Bij een tijdsduur van 8 jaar kan deze oplopen tot meer dan 15 cm voor de GVG en GHG, afhankelijk van de precieze periode, bodemtype en landschappelijke ligging / geohydrologische situatie. De maximale (95% percentiel) afwijking tussen klimaatrepresentatieve waarden voor GHG, GVG en GLG zijn voor één jaar 61, 42 en 31 cm.

Ondanks dat een GxG op basis van een tijdsduur van 20 jaar doorgaans de klimaatrepresentatieve GxG goed weet te benaderen, hoeft dat niet altijd het geval te zijn: de afwijking van GHG en GVG kunnen afhankelijk van bodemtype en geohydrologische setting nog circa 7 cm afwijken (Figuur 5).

Duidelijk zichtbaar is nogmaals dat een langere periode logischerwijs meestal tot een representatievere GxG leidt. Dat hoeft niet altijd zo te zijn; zo heeft de $GHG_{2005,5}$ gemiddeld een afwijking van 1 cm terwijl $GHG_{2005,10}$ een afwijking van 6 cm heeft. Op basis van de tabel is een GHG op basis van een de kortere periode dus representatiever dan een langere periode. Zou men de GHG voor 1991 – 2020 met slechts één jaar willen representeren, dan komt uit Figuur 5 het jaar 2009 of 2016 als meest representatief naar voren. Dit is gebaseerd op een gemiddelde van tien bodemtypen en verschillende geohydrologische settings; in hoeverre dit verschilt tussen bodemtypes en geohydrologische situaties is verder niet onderzocht.



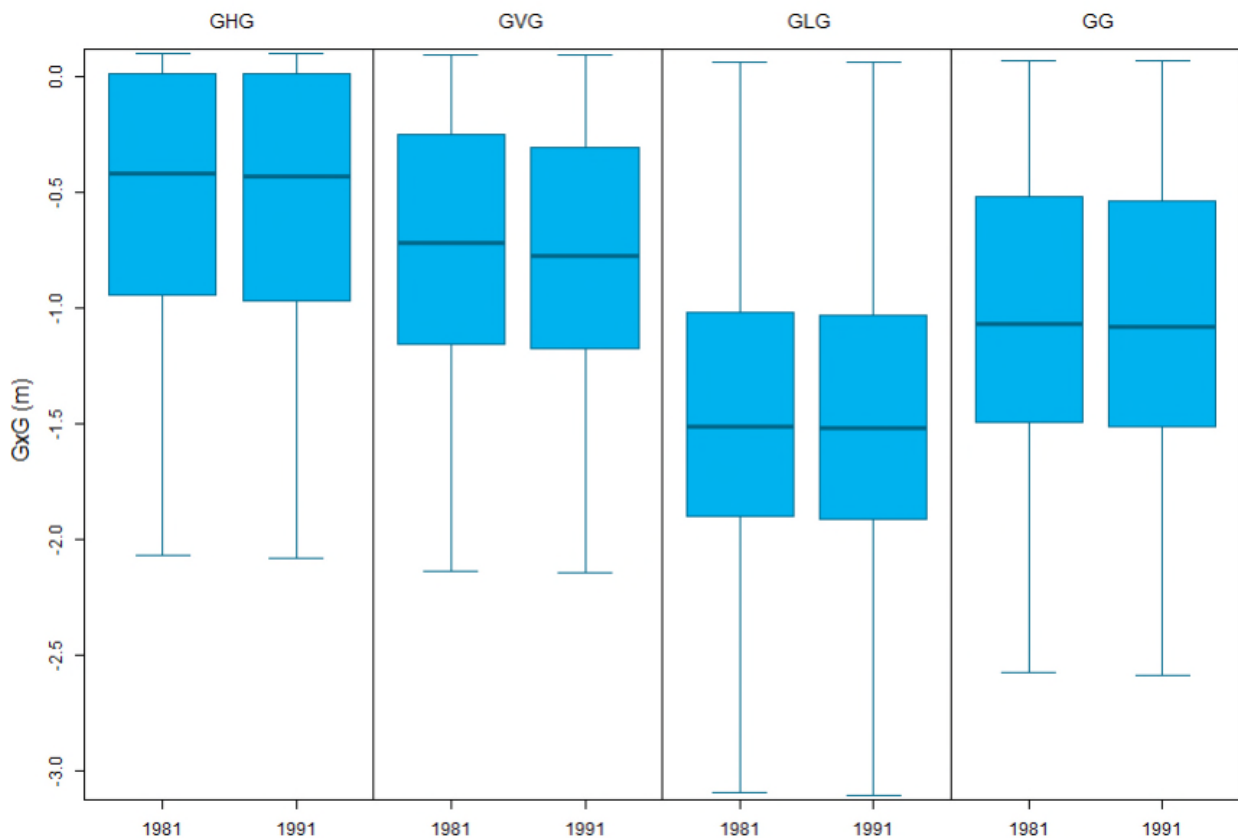
Figuur 5. Mediaan absoluut verschil tussen klimaatrepresentatie (GxG_{1991,30}) en verschillende combinaties van start tijdvak en duur ervan (GxG_{start,duur}) over alle simulaties voor GHG, GVG en GLG (v.b.n.o.). De kolom 'Gem.' geeft de gemiddelde afwijking over alle startjaren per tijdsduur weer. Getallen in de tabel zijn grondwaterstanden afgerond op hele centimeters.



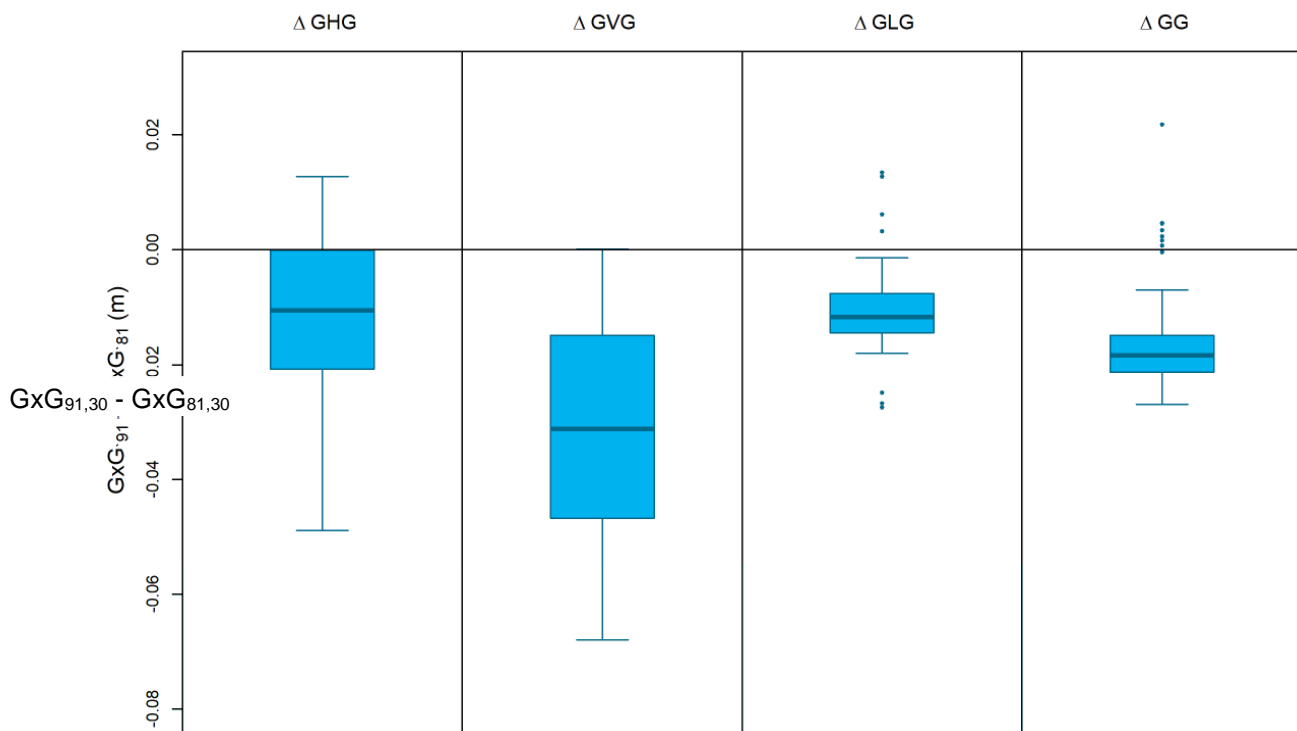
Figuur 6. Als Figuur 5 maar dan het 95% percentiel.

3.2 Verschil in GxG tussen normaalperioden

De vorige paragraaf bevestigt dat een periode van 30 jaar nodig is om het klimaatrepresentatieve grondwaterregime te karakteriseren, i.e. om rekening te houden met variatie in het weer binnen het klimaat. Maar zelfs dan kan de keuze van het specifieke tijdvak nog in belangrijke mate doorwerken op het grondwater- en bodemvochtregime. Alhoewel dat op het eerste gezicht misschien niet zo lijkt (Figuur 7) zijn, als gevolg van veranderingen in meteorologie, in tien jaar tijd alle standen wat dieper geworden (Figuur 8). Met name bij de GVG is dat het geval. Soms is dat zelfs zes centimeter. Zes centimeter lijkt niet veel, maar kan zeker voor grondwaterafhankelijke natuur al behoorlijke gevolgen hebben. Ter illustratie is de kansrijkdom van vegetaties als functie van voorjaarsgrondwaterstand zoals bepaald met de knikpunten in Waterlood weergegeven in Figuur 1. Hieruit is op te maken dat in het bereik van -10 – -5 cm beneden maaiveld een GVG-verandering van 6 cm de kansrijkdom met 100% kan doen veranderen voor hoogveenvegetatie (plantengemeenschap 11Ba1). Ook voor blauwgrasland (16Aa1b) en heischrale graslanden (19Aa2) kan zo'n verandering al enorme gevolgen hebben op de kansrijkdom. Dit betekent dat een verkeerd gekozen modelperiode dus ook tot foutieve resultaten kan leiden.



Figuur 7. GxG ten opzichte van maaiveld bij twee klimaatrepresentatieve perioden (1991 – 2020 versus 1981 – 2010). Negatieve waarden zijn grondwaterstanden onder maaiveld. Berekend uit modeluitkomsten voor 1000 hypothetische plots.



Figuur 8. Verandering in GxG bij ander klimaat (1991 – 2020 versus 1981 – 2010). Negatievere waarden duiden op een diepere grondwaterstand.

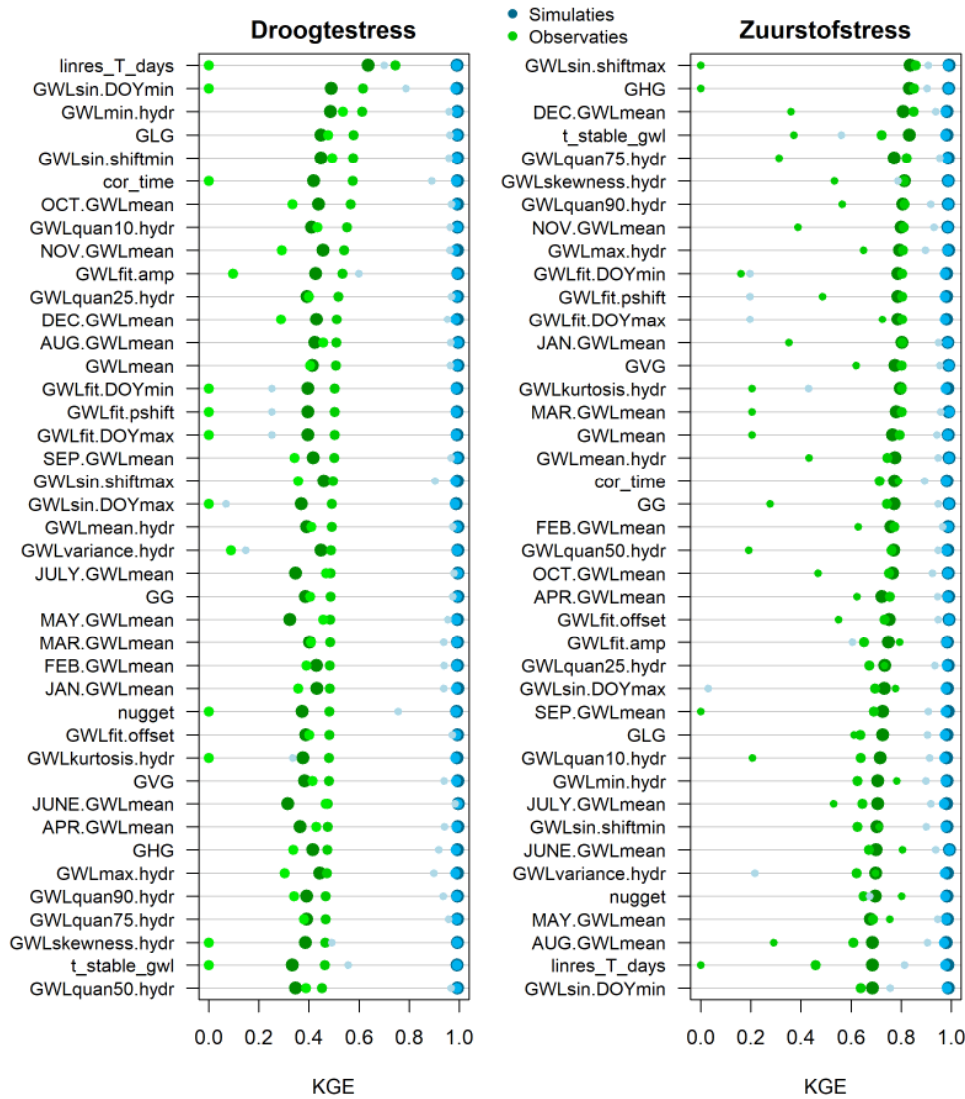
3.3 Alternatieven voor GxG

Uit de modelsimulaties voor de 1000 hypothetische plots blijkt dat er veel alternatieven voor GxG zijn die behoorlijk goed het vochtregime kunnen beschrijven (Figuur 9, blauwe cirkels). Zowel transpiratie- als zuurstofstress zijn zeer sterk gerelateerd aan bijvoorbeeld gemiddelde grondwaterstand (GWLmean; $KGE > 0.9$) of de gemiddelde grondwaterstand in een maand (bijvoorbeeld voor April, APR.GWLmean, Oktober, November). Dit is te verwachten, gezien de zeer sterke correlaties tussen variabelen (Bijlage 2). Het toevoegen van een extra verklarende variabele heeft daarbij veelal een zeer beperkt effect op het voorspellen van het vochtregime (Figuur 9, donkerder blauwe cirkels). De hoge voorspelkwaliteit op de onafhankelijke modelsimulaties demonstreert tegelijkertijd dat de GAM modellen robuust zijn voor 'overfitten': het aantal parameters die de bochtigheid controleren is niet te groot gekozen en is generiek van toepassing op zowel de kalibratie- als validatieset. De specifieke combinatie van GHG, GVG en GLG kan praktisch alle variatie in zuurstofstress en transpiratiestress van de modelsimulaties verklaren (KGE is 0.97 en 0.98).

Als we de transpiratiestress en zuurstofstress op de 38 meetlocaties voorspellen met de op simulaties gebaseerde GAM modellen (groene cirkels), komt een totaal ander beeld naar voren. Zuurstofstress kan behoorlijk goed voorspeld worden op basis van vele GWKs. Dit is met name het geval indien er combinaties van grondwaterkarakteristieken gebruikt worden. De specifieke combinatie van GG, GHG en GVG levert al een goede voorspelkwaliteit ($KGE = 0.78$; Tabel 2). Het beste GAM-drietal om zuurstofstress te voorspellen is de GHG, gemiddelde oktoberstand, en het voorkomen van stabiele grondwaterstanden, die een KGE van 0.95 bereiken voor de meetlocaties (Tabel 2). Dat is beduidend beter dan het gebruik van de GxG. Nogmaals dient hierbij te worden opgemerkt dat door sterke onderlinge correlaties verwacht mag worden dat ook andere karakteristieken een vrijwel gelijke voorspelkwaliteit zullen bieden (Bijlage II). Voor zuurstofstress lijken met name het moment waarop de grondwaterstand het ondiepst is (GWLsin.shiftmax), de GHG, en de gemiddelde stand in December goede voorspellers. Opvallend is daarbij dat ze dit alleen zijn in combinatie met andere variabelen. De univariate GAM's van deze variabelen hebben namelijk een $KGE \leq 0$. Dat is niet het geval voor de validatie op basis van modelsimulaties (blauwe cirkels). GVG alleen heeft reeds een goede voorspelkwaliteit ($KGE = 0.80$) en is zelfs beter dan de combinatie van GHG, GVG en GLG. Dit wordt veroorzaakt door de correlatiestructuur tussen de variabelen die specifiek van toepassing is op de simulaties, die afwijkt van de correlaties in de veldsituatie. Dit effect verklaart ook waarom GAMs met meer verklarende variabelen soms een lagere voorspelkwaliteit hebben (Figuur 9).

Transpiratiestress kan voor de meetlocaties een stuk minder goed worden voorspeld met de op simulaties gebaseerde GAMs (groene cirkels). Specifiek voor de combinatie van GLG, GVG en GHG als voorspellers is deze zelfs zeer matig te noemen ($KGE = 0.37$; Tabel 2). Daarentegen blijkt de responstijd van de grondwaterstand zoals beschreven met de tijdsconstante uit een lineair reservoir (τ), de timing waarop de grondwaterstand het diepst is, de diepste grondwaterstand, en de GLG voorname voorspellers zijn. Deze variabelen leveren een veel hogere voorspelkwaliteit dan GxG (Tabel 2). Tijdsconstante τ blijkt enkel in combinatie met andere variabelen toegevoegde waarde te hebben (vergelijk lichtgroene met donkergroene bolletjes). De beste voorspelkwaliteit wordt gehaald bij de combinatie van dag in het jaar waarop de sinusfunctie het minimum bereikt, tijdsconstante τ , en de gemiddelde Novemberstand ($KGE = 0.87$). Van univariate GAMs van GxGs heeft GLG de hoogste voorspelkwaliteit ($KGE = 0.40$). Opgemerkt moet worden dat verschillen in de bodemfysische eigenschappen die zijn gehanteerd voor de meetlocaties (gebaseerd op locatiespecifieke boorbeschrijvingen) afwijken van die voor de modelsimulaties (gebaseerd op algemene BOFEK-eenheden). Met name voor transpiratiestress werken verschillen in bodemfysische eigenschappen hard door op de berekende stress. Uit Figuur 9 volgt dat verschillen in modelparametrisatie en veldcondities een minder groot effect hebben.

De combinatie van sinusoidenparameters amplitude, faseverschuiving en gemiddelde grondwaterstand kon slechts zeer beperkt de zuurstof- en transpiratiestress op de meetlocaties voorspellen ($KGE = 0.64$ en 0.31). De beste combinatie om transpiratie- en zuurstofstress gezamenlijk met dezelfde karakteristieken te beschrijven is de gemiddelde grondwaterstand in januari en september, samen met tijdsconstante τ (gemiddelde $KGE = 0.72$; Tabel 2).



Figuur 9. Alternatieve grondwaterkarakteristieken en hun voorspelkwaliteit (Kling-Gupta Model Efficiency; KGE) voor transpiratiestress (links) en zuurstofstress (rechts), voor de meetperiode 1981 – 2010. Groene en blauwe cirkels geven respectievelijk de voorspelkwaliteit voor de meetlocaties en de validatieset van 30 plots per bodemfysische eenheid weer. Per variabele zijn drie tinten per kleur aanwezig, waarbij de lichtste tot donkerste respectievelijk GAM modellen met één t/m drie voorspellende variabelen voorstellen. Bij twee of drie verklarende variabelen is de weergegeven KGE waarde het 95^{ste} percentiel van alle combinaties waarin de betreffende variabele voorkomt. Een KGE waarde van 1 geeft een perfecte overeenkomst tussen observaties en simulaties weer, een waarde van -0.41 geeft weer dat evengoed het gemiddelde had kunnen worden gebruikt als voorspeller. De variabelen zijn voor zuurstofstress en transpiratiestress apart geordend van beste (boven) naar slechtste (onder) voorspeller. KGE waarden kleiner dan 0 zijn gelijk gesteld op 0.

Tabel 2. Modellen met hoogste voorspelkwaliteit voor de 38 meetlocaties. Alleen drievoudige GAM modellen zijn hier gepresenteerd. In de kolommen wordt weergegeven wat de bijbehorende voorspelkwaliteit (Kling-Gupta model efficiency) is voor transpiratiestress (TS), zuurstofstress (RS) en het gemiddelde van beide (KGE gem.); om te bepalen met welke set GWK's zowel RS als TS het best gerepresenteerd kan worden), en welke variabelen gebruikt zijn voor de voorspelling. Dikgedrukte getallen geven de hoogste voorspelkwaliteit weer per categorie. Zie Tabel 1 voor verklaring variabelen.

GxG combinaties					
KGE TS	KGE RS	KGE gem.	Variabelen		
0.24	0.78	0.51	GG	GHG	GVG
0.14	0.77	0.46	GG	GHG	GLG
0.30	0.69	0.49	GHG	GLG	GVG
0.37	0.60	0.49	GG	GLG	GVG
Top 5 transpiratiestress (TS)					
KGE TS	KGE RS	KGE gem.	Variabelen		
0.82	0.40	0.61	GWLsin.DOYmin	NOV.GWLmean	τ
0.78	0.39	0.58	FEB.GWLmean	GWLmin.hydr	τ
0.75	0.39	0.57	FEB.GWLmean	GWLsin.shiftmin	τ
0.74	0.36	0.55	FEB.GWLmean	GLG	τ
0.72	0.72	0.72	GWLquan10.hydr	JAN.GWLmean	τ
Top 5 zuurstofstress (RS)					
KGE TS	KGE RS	KGE gem.	Variabelen		
0.17	0.95	0.56	GHG	OCT.GWLmean	t_stable_gwl
0.19	0.95	0.57	GWLsin.shiftmax	OCT.GWLmean	t_stable_gwl
0.27	0.92	0.60	FEB.GWLmean	JAN.GWLmean	MAR.GWLmean
0.34	0.92	0.63	correlatietijd	GHG	NOV.GWLmean
0.30	0.91	0.60	correlatietijd	GWLquan90.hydr	t_stable_gwl
Top 5 TS en RS gemiddeld					
KGE TS	KGE RS	KGE gem.	Variabelen		
0.69	0.76	0.72	JAN.GWLmean	SEP.GWLmean	τ
0.72	0.72	0.72	GWLquan10.hydr	JAN.GWLmean	τ
0.66	0.70	0.68	GWLquan25.hydr	JAN.GWLmean	τ
0.66	0.67	0.66	GWLquan10.hydr	GWLskewness.hydr	τ
0.70	0.62	0.66	GLG	JAN.GWLmean	τ

4 Discussie

4.1 Effect keuze periode en duur op GxG

Het eerste doel van dit onderzoek was om te bepalen hoe keuzes in de GxG berekening doorwerken op de waarde ervan. De analyses ondersteunen nogmaals dat een periode van circa 30 jaar nodig is om een klimaatrepresentatieve GxG te karakteriseren. Een kortere periode kan tot een belangrijke afwijking in berekende grondwaterdynamiek leiden die vanuit zowel ecohydrologisch als landbouwkundig perspectief niet verwaarloosbaar is. Tabel 2 biedt een praktische richtlijn voor de representativiteit van een gegeven meet- of modelperiode. Deze tabel kan modelleurs ondersteunen (1) in de keuze van het al dan niet opnemen van bepaalde jaren in een (gemodelleerde) tijdreeks en (2) de representativiteit van bestaande modeluitvoer. Waar gedetailleerde grondwatermodellen met hoge resolutie of grote modeldomeinen doorgerekend moeten worden (voor een veelheid aan scenario's), kan de rekentijd flink oplopen bij ieder extra te modelleren jaar. De tabellen (Figuur 5 en Figuur 6) geven praktisch inzicht in hoeverre het waardevol is om juist (niet) bepaalde jaren door te rekenen. Uiteraard is dit een indicatieve richtlijn: het betreft modeluitkomsten die zijn gemiddeld over geohydrologische situaties met verschillende bodems, die niet één-op-één overgenomen kunnen worden voor andere situaties. De resultaten van dit onderzoek bevestigen dat bij analyse van meetreeksen een periode van 30 jaar nodig is voor een klimaatrepresentatieve GxG. Bij kortere tijdreeksen wordt aangeraden deze met tijdreeksanalyse te verlengen tot 30 jaar. Ook hier bieden de tabellen handvatten in de representativiteit van kortere meetreeksen.

4.2 Beschrijving van vochtregime met GxG en alternatieven

Daarnaast is in dit onderzoek bepaald of alternatieven voor GxG een betere karakterisering van het vochtregime in de wortelzone bieden. Dit is gedaan door de alternatieve grondwaterkarakteristieken te relateren aan twee maten (standplaatsfactoren) die het vochtregime van de wortelzone in relatie tot eisen van de vegetatie beschrijven: zuurstofstress en transpiratiestress (Bartholomeus e.a., 2012).

Op basis van met modelsimulaties opgestelde relaties tussen grondwaterkarakteristieken en vochtregime kan de transpiratiestress op onafhankelijke meetlocaties slecht voorspeld worden met een GxG (KGE = 0.37). Alternatieve grondwaterkarakteristieken bieden een enorme verbetering, waarbij de voorspelkwaliteit oploopt tot KGE = 0.82. Dat kan zelfs nog beter als de bodemfysica in meer detail bekend is (bijvoorbeeld met metingen). Dit treedt op bij een combinatie van de dag van het jaar waarop de minimale grondwaterstand wordt bereikt, de gemiddelde (November)stand, en de responstijd met tijdsconstante τ . Dit is geen toevallige samenkomst van eigenschappen: ze beschrijven namelijk allemaal een andere eigenschap van de grondwaterdynamiek. Gezamenlijk wordt de timing van het seizoenale verloop, een gemiddelde verwachtingswaarde en de respons van grondwaterstand op kortere tijdschaal beschreven. Deze laatste bepaalt hoe snel de grondwaterstand uitzakt, en daarmee de stabiliteit, amplitude, en het optreden van extremen: een tragere respons zal tot een minder diepe uitzakking van de grondwaterstand leiden. De mindere prestatie van transpiratiestress ten opzichte van zuurstofstress kan worden verklaard doordat in deze studie alleen meetreeksen zijn meegenomen uit natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuur. Hierdoor ontbreekt het bereik met hoge transpiratiestress, wat ook weerspiegeld wordt in de vegetatie met een klein aandeel xerofyten (Bijlage IV). Bovendien wijken de bodemfysische eigenschappen op de meetlocaties af van de in de simulaties gebruikte BOFEK eenheden, waardoor waterretentie en capillaire aanvoer van water (en transpiratiestress) systematisch verkeerd wordt ingeschat.

Voor de modelsimulaties op hypothetische plots kan transpiratiestress heel goed voorspeld worden met GxG's (KGE = 0.98), terwijl dat voor de echte meetlocaties slechts beperkt was (KGE is maximaal 0.37). Dit geeft aan dat de relatie tussen transpiratiestress en GxG op de meetlocaties afwijkt ten opzichte van de simulaties. De oorzaak hiervan

is waarschijnlijk dat de hypothetische plots belangrijke kenmerken gemeen hebben – ze zijn immers allemaal gegenereerd door vaste combinaties van geohydrologische eigenschappen en slootpeilen – zodat de validatie van de GAM modellen neerkomt op een toets of de kalibratieset (700 van de 1000 plots) wel voldoende groot is. Het geeft wél aan dat er geen sprake is van ‘overfitting’ door de GAM modellen. Een andere verklaring is dat de bodemfysische eigenschappen bij de validatie op basis van meetlocaties specifiek voor de locaties zijn aangepast, terwijl de GAM modellen de generieke BOFEK van de betreffende locatie gebruikt. De bodem blijkt, zoals verwacht, een minder grote rol te spelen bij zuurstofstress, waar een veel hogere voorspelkwaliteit wordt behaald.

In tegenstelling tot transpiratiestress is GxG een redelijk goede voorspeller om zuurstofstress te voorspellen op de onafhankelijke meetlocaties (KGE = 0.78). Met andere grondwaterkarakteristieken kan de voorspelkwaliteit echter nog aanzienlijk verhoogd worden (KGE = 0.95). Ook zuurstofstress wordt het best beschreven door een maat die de stabiliteit van grondwaterstanden op kortere tijdschalen beschrijft in combinatie met een representatieve gemiddelde waarde, namelijk het aantal dagen dat de daling kleiner dan 2 mm/d is, GHG en de gemiddelde oktoberstand. Andere GAM modellen die hoge voorspelkwaliteit hebben, bevatten de met temporele autocorrelatie afgeleide karakteristieke tijdschaal als voorname voorspeller voor zuurstofstress. Deze combinaties van variabelen dekken daarmee een groter deel van eigenschappen van grondwaterdynamiek (Figuur 3) af dan wat GxG doet. Behalve de GVG vertegenwoordigt GxG namelijk slechts minima en maxima (en daarmee de temporele variatie). Uit de resultaten volgt dat rekening houden met dynamiek op kortere tijdschalen tot een betere schatting van het vochtregime leidt. Dat is goed verklaarbaar: vegetaties zijn gevoelig voor extremen (Knapp e.a., 2002), en zuurstofstress en transpiratiestress zijn gedefinieerd op basis van jaarlijks optredende extremen. De mate waarin extremen optreden wordt mede gecontroleerd door eigenschappen als de responstijd van grondwaterstanden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de validatieset met slechts 38 meetlocaties een (te) laag aantal heeft voor robuuste uitspraken. Door de procedure uit te breiden naar alle bodemfysische eenheden is het mogelijk veel meer (144) meetlocaties mee te nemen en de bevindingen te generaliseren.

Grondwaterkarakteristieken vertonen zeer sterke onderlinge correlaties (Bijlage II). GxGs, maandelijkse gemiddelden en kwantielen hangen allemaal sterk met elkaar samen. Het maakt daarbij vaak nauwelijks uit welke gebruikt wordt in voorspelling, en zijn eenduidige & eenvoudige interpretatie en gemak waarmee ze berekend worden voorname redenen voor selectie van potentiële voorspellers van vochtregime. Voor alle grondwaterkarakteristieken geldt dat ze niet procesmatig maar slechts correlatief gerelateerd zijn aan het bodemvochtregime. Voor sommige karakteristieken is de fysiologische betekenis voor planten en het vochtregime wat verder te zoeken (responstijd), terwijl een GLG waarschijnlijk beter te begrijpen is, zeker in aansluiting tot de huidige kennis van hydrologie.

4.3 Heeft een hogere (meet)frequentie toegevoegde waarde?

De gemiddelde grondwaterstand is reeds een redelijke voorspeller voor het vochtregime in de bodem op de veldlocaties (KGE voor RS en TS zijn 0.40 en 0.61). Het verschil tussen het gebruik van de gemiddelde grondwaterstand op dagbasis (GWLmean), tweewekelijks (GG), of het gebruik van een hydrologisch of kalenderjaar is verwaarloosbaar. De onderlinge correlatie tussen deze variabelen is dan ook zeer sterk (Pearson correlatie > 0.99, $P < 0.001$). Dit is te verklaren door de karakteristieke tijdschaal waarop grondwaterdynamiek doorgaans plaatsvindt. Gemiddeld over alle meetlocaties zijn grondwaterstanden pas na een periode van 78 dagen (mediaan) niet meer met elkaar gecorreleerd (5^e en 95^e percentiel zijn 60 en 88 dagen). Gebruik makend van de vuistregel dat de tijdschaal van metingen ten minste 4 keer kleiner dient te zijn dan deze karakteristieke tijdschaal (Cirkel e.a., 2014), komt dat neer op een meetfrequentie van $60/4 = 15$ dagen. Voor het berekenen van een gemiddelde grondwaterstand zou een tweewekelijkse meetfrequentie dus inderdaad voldoende zijn.

Uit de voorgaande paragraaf is daarentegen gebleken dat karakteristieken gebaseerd op dagelijkse metingen (tijdsconstante lineair reservoir, stabiliteit grondwaterstanden, dag in het jaar waarop de grondwaterstand het ondiepste is (RS) of de diepste grondwaterstand gebaseerd op 10 daags voortschrijdend gemiddelde) een sterkere

relatie met het vochtregime vertonen dan GxG. Dit betekent dat de extra informatie in tijdreeksen met hogere tijdsresolutie dus wel degelijk van waarde is.

4.4 Gevolgen voor de praktijk en kennisleemten

In dit verkennende onderzoek zijn alternatieven voor GxG opgenomen om het grondwaterregime te karakteriseren. Er zijn echter nog vele andere mogelijkheden denkbaar. Met name karakteristieken die inspelen op fenologie, zoals een variabele start van het groeiseizoen en daaraan gerelateerde zuurstofvraag in de wortelzone, ontbreken nog. De traditionele GVG gaat er van uit dat het groeiseizoen start op 1 april. Door klimaatverandering zal het groeiseizoen steeds eerder starten. Volgens KNMI-2014 scenario's W_H en W_L start het groeiseizoen in 2050 al op 1 maart (KNMI, 2015). Dat betekent dat ook de grondwaterkarakteristieken die relevant zijn voor de start van de plantengroei en voor de competitie ook eerder in het jaar en/of variabel berekend moeten worden. Aan het einde van het groeiseizoen kan er door een eerdere start van het groeiseizoen eerder droogte optreden, terwijl er nog wel voldoende inkomende zonnestraling is. Met dergelijke asynchroniciteit kan rekening worden gehouden worden met grondwaterkarakteristieken die op een variabel moment in de tijd plaatsvinden, bijvoorbeeld het moment waarop een bepaalde temperatuursom wordt overschreden. Wij bevelen aan dergelijke maten op te nemen in een vervolgstudie.

De validatie op basis van meetgegevens beslaat momenteel slechts 38 meetlocaties afkomstig van acht bodemfysische eenheden. Het resultaat van de voorliggende studie zal robuuster worden als de methodiek in toekomstig onderzoek herhaald wordt voor alle bodemfysische eenheden en meer meetlocaties. Daarbij is het tegelijkertijd aan te bevelen te bepalen in hoeverre alle 72 bodemfysische eenheden benodigd zijn of dat enkele redundant blijken. Ook zijn de bodemfysische eenheden gekarakteriseerd op basis van gegevens afkomstig van met name metingen uit landbouwgronden. Natuurbodems kunnen daar in belangrijke mate van afwijken. De afwijking tussen 'geobserveerde' transpiratiestress bij locatiespecifieke bodemfysische parameterisatie en gemodelleerde transpiratiestress voor generieke bodemfysische eenheid geeft aan dat de bodemfysische eigenschappen tussen beide situaties flink verschillen. De gevoeligheid van transpiratiestress en zuurstofstress voor bodemfysische eigenschappen is een belangrijke aanleiding om de parametrisering van natuurbodems te verbeteren. Een bundeling/database van bodemfysische eigenschappen van natuurbodems zou daarmee een waardevolle verrijking zijn voor ecohydrologisch onderzoek in Nederland en gebieden met ongeconsolideerd sediment.

Een ander belangrijk aspect is dat in de werkelijkheid situaties voorkomen met een (zeer) onnatuurlijk peil, terwijl in dit onderzoek de nadruk ligt op natuurlijk peilbeheer (observaties) of constant peil (simulaties). Veenweidegebieden met omgekeerd peil en gebieden onder sterke invloed van grondwateronttrekking of een diep ontwaterde omgeving met diep wegzakkende grondwaterstanden behoren daarmee niet tot deze selectie. Daarentegen zijn dit veelvoorkomende situaties die net als in vele andere studies ook hier onderbelicht gebleven zijn. Ecohydrologisch onderzoek zou meer aan de rafelranden van natuurgebieden moeten plaatsvinden, omdat daar veranderingen in de vegetatie zich het eerst manifesteren.

Naast de huidige grondwaterkarakteristieken zijn er nog een aantal alternatieven denkbaar die niet meegenomen zijn. Uit het onderzoek komt naar voren dat de sinusfunctie van waarde kan zijn. Dit is met name het geval voor het afzonderlijk beschrijven van zuurstof- en transpiratiestress (Tabel 2). Het nadeel van de sinusfunctie is dat deze uitgaat van slechts één bandbreedte waarop dynamiek plaatsvindt en daarvan de amplitude vaststelt. In dit onderzoek is deze op één jaar vastgezet (Bijlage III.I). Ook het temporele variogram gaat uit van slechts één correlatietijd. Met behulp van Fourier-analyse zou inzicht verworven kunnen worden in meerdere karakteristieke tijdschalen. In werkelijkheid varieert de tijdschaal waarop hydrologische processen opereren. Daarmee variëren ook de eigenschappen van grondwaterdynamiek door de tijd. Wavelet analyse, een techniek uit de beeldverwerking (Grinsted e.a., 2004), is aan een opmars begonnen in het vakgebied van de hydrologie. Met (cross-)wavelet analyse is inzicht te verkrijgen in karakteristieke tijdschalen, en hoe deze variëren door de tijd. Dit biedt een geheel nieuwe aanpak voor het analyseren van grondwatertijdreeksen (Nijp, 2022) en heeft daarmee veel potentie.

In dit onderzoek staat een klimaatrobuuste karakterisering van het grondwaterregime centraal. Bij het voorspellen van effecten van verandering in grondwaterwinning of waterbeheer op natuur wordt logischerwijs het effect getoetst over een klimaatrepresentatieve periode. Voor natuurlijke vegetaties is een gemiddelde karakterisering over voor een klimaatrepresentatieve periode daarentegen niet per definitie de periode die relevant is. Met name van bijvoorbeeld pioniersvegetaties met ondiep wortelende planten mag worden verwacht dat het vochtregime in het recente verleden een belangrijkere invloed op soortensamenstelling uitoefent dan het vochtregime van langer geleden. Hier is verkennend onderzoek naar gedaan (Runhaar en Witte, 2015), maar over het effect van extremen is nog veel onbekend, laat staan geoperationaliseerd in de definitie van GxG en ecohydrologische toepassingen. Bij meetreeksen speelt daarnaast dat 30 jaar zonder veranderingen in waterbeheer zeer zelden voorkomt.

Het is momenteel heel gebruikelijk dat GxG's worden berekend, terwijl dat voor een alternatieve GWK, zoals het moment waarop de grondwaterstand het ondiepst is (GWLsin.shiftmax), nog door niemand gebeurt. Indien dus de operationele standplaatsfactoren zuurstofstress en transpiratiestress met andere conditionerende GWK's moet worden geschat, dan zullen die GWK's wel door grondwatermodellen gegenereerd moeten worden, en dat zal nog heel wat voeten in aarde hebben. Een alternatieve oplossing is dat grondwatermodellen zelf als uitvoer zuurstofstress en transpiratiestress genereren. Daarvoor dient dan een procedure in die modellen te worden ingebouwd. Onderzocht zou moeten worden of hoe haalbaar het is zo'n procedure aan bestaande grondwatermodellen toe te voegen.

We zijn in dit onderzoek nog niet stilgestaan bij de bestaande relaties tussen GWK's en vegetatie die worden gebruikt in huidige ecohydrologische modellen. In het voorspellingsgedeelte van de WWN (PROBE) is de relatie tussen vochtregime (zuurstofstress en transpiratiestress) en vochtindicatie van de vegetatie gebaseerd op een simulatie met SWAP over een periode van 30 jaar, dus klimaatrobuust. Maar in het toetsingsgedeelte (Waterlood) is gebruik gemaakt, zie Runhaar e.a. (2002), van schattingen van de GVG uit de vegetatie op basis van een relatie tussen vochtindicatie en GVG die andere jaren en een kortere periode beslaat (Runhaar e.a., 1997), namelijk 1982-1987. Het zou juist zijn de knikpunten van deze trapeziumvormige relaties (zie voorbeeld in Figuur 1) aan te passen aan dezelfde periode waarmee PROBE rekent (1981-2010).

De resultaten in dit onderzoek geven een indicatie voor de representativiteit van tijdvakken waarin de GxG berekend wordt, zodat achteraf de representativiteit van de modelperiode beoordeeld kan worden. Voor toepassing in de praktijk is het waardevol om dit nog een stap verder te brengen: Met een nabewerkingsprogramma kunnen berekende GxG's van een willekeurige periode gecorrigeerd worden naar een klimaatrobuuste GxG voor een 30-jarige periode. Dit zou in potentie veel reken- en doorlooptijd kunnen besparen, of kan rekentijd anders worden ingezet, door bijvoorbeeld met hogere tijdsresolutie te rekenen. Met dezelfde procedure kunnen ook de huidige relaties tussen GxG en de kansrijkdom van vegetatie in ecohydrologische modellen (zie voorgaande paragraaf) klimaatrepresentatief gemaakt worden. Het huidige verkennende onderzoek biedt de handvatten voor de ontwikkeling van een dergelijke procedure in vervolgonderzoek.

5 Conclusies

Dit verkennend onderzoek biedt een aanvullende en verbeterde onderbouwing voor het gebruik van de gemiddeld laagste, hoogste, en voorjaarsgrondwaterstand (GxG) voor ecohydrologische doeleinden. De resultaten demonstreren nogmaals het belang van het afleiden van de GxG over een periode van 30 jaar. Bij kortere perioden speelt de keuze van het precieze tijdvak een grote rol die doorwerkt in vervolganalyses. Bij een kortere periode van beschikbare meetgegevens of simulatiejaren biedt dit artikel een richtlijn voor het bepalen van de representativiteit ervan.

In dit verkennende onderzoek naar de relatie tussen grondwaterkarakteristieken en het vochtregime komt naar voren dat het met GxG's (combinatie GG, GHG, GVG) reeds goed mogelijk is om zuurstofstress te voorspellen. Transpiratiestress kan daarentegen slechts matig met GxG (GG, GLG, GVG) worden voorspeld. Dit onderzoek geeft aan dat de koppeling tussen grondwater- en bodemvochtregime aanzienlijk verbeterd zou kunnen worden door andere variabelen dan GxG te gebruiken. Hierbij kan informatie van tijdreeksen op hogere tijdresolutie benut worden, waarmee eigenschappen die de stabiliteit van de grondwaterstand beschrijven kunnen worden berekend. Voor modelsimulaties is dit vanuit praktisch oogpunt wellicht minder wenselijk, gezien meer informatie moet worden opgeslagen. Meer onderzoek is nodig om de resultaten robuuster te maken en te generaliseren voor andere (minder natuurlijke) situaties en andere bodemtypen.

6 Literatuur

- Bartholomeus, R.P., J.-P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam en R. Aerts (2008a) Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model; in: *Journal of Hydrology*, vol 360, no 1, pag 147-165.
- (2011) Climate change threatens endangered plant species by stronger and interacting water-related stresses; in: *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol 116, no G4, pag.
- Bartholomeus, R.P. en J.P.M. Witte (2013) Ecohydrological Stress - Groundwater To Stress Transfer. Theory and manual version 1.0. KWR Watercycle Research Institute.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom en R. Aerts (2008b) The need of data harmonization to derive robust empirical relationships between soil conditions and vegetation; in: *Journal of Vegetation science*, vol 19, no 6, pag 799-808.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam, P. De Becker en R. Aerts (2012) Process-based proxy of oxygen stress surpasses indirect ones in predicting vegetation characteristics; in: *Ecohydrology*, vol 5, no 6, pag 746-758.
- Buytaert, W., B. De Bièvre, G. Wyseure en J. Deckers (2004) The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 8, no 1, pag 108-114.
- Cirkel, D.G., J.P.M. Witte, J.N. Nijp, P.M. van Bodegom en S.E.A.T.M. Zee (2014) The influence of spatiotemporal variability and adaptations to hypoxia on empirical relationships between soil acidity and vegetation; in: *Ecohydrology*, vol 7, pag 21-23.
- Grinsted, A., J.C. Moore en S. Jevrejeva (2004) Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series; in: *Nonlinear processes in geophysics*, vol 11, no 5/6, pag 561-566.
- Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz en G.F. Martinez (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling; in: *Journal of hydrology*, vol 377, no 1-2, pag 80-91.
- Heesen van, H.C. (1971) De weergave van het grondwaterstandsverloop op bodemkaarten; in: *Boor en Spade*, vol 17, pag 127-149.
- Knapp, A.K., P.A. Fay, J.M. Blair, S.L. Collins, M.D. Smith, J.D. Carlisle, C.W. Harper, B.T. Danner, M.S. Lett en J.K. McCarron (2002) Rainfall Variability, Carbon Cycling, and Plant Species Diversity in a Mesic Grassland; in: *Science*, vol 298, no 5601, pag 2202-2205.
- Knibbe, M. en B. Marsman (1961) Grondwatertrappenindeling in Overijsselse zandgronden. Stichting voor Bodemkartering.
- KNMI (2015) KNMI '14 Klimaatscenario's voor Nederland.
- Knoben, W.J., J.E. Freer en R.A. Woods (2019) Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 23, no 10, pag 4323-4331.
- Kraijenhoff Van de Leur, D. (1958) A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir coefficient; in: *De Ingenieur*, vol no 19, pag B87-B94.
- Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en C.M.J. Jacobs (2003) Reference Manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Green World Research.
- Mulder, M., M. Hack-ten Broeke, R. Bartholomeus, J. van Dam, M. Heinen, J. van Bakel, D. Walvoort, J. Kroes, I. Hoving en G. Holshof (2018) Waterwijzer Landbouw: instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie; Stowa.
- Nijp, J.J. (2022) Trendalert - Wavelet analyse - ontcijferen van verborgen informatie in tijdreeksen BTO 2022.040; in, vol, pag.
- Nijp, J.J., J. de Wit, S. Clevers, E. Dorland, G.-J. Reinds, H. Kros, Y. Fuijta, P. Hoefsloot en J.-P.M. Witte (2022) Waterwijzer Natuur Fase 3 - Klimaatrobuuste modellering van effecten van zuur- en stikstofdepositie op natuur. KWR, WENR, NMI, FWE.
- Nijp, J.J., K. Metselaar, J. Limpens, H.M. Bartholomeus, M.B. Nilsson, F. Berendse en S.E.A.T.M. van der Zee (2019a) High-resolution peat volume change in a northern peatland: Spatial variability, main drivers, and impact on ecohydrology; in: *Ecohydrology*, vol 0, no ja, pag e2114.

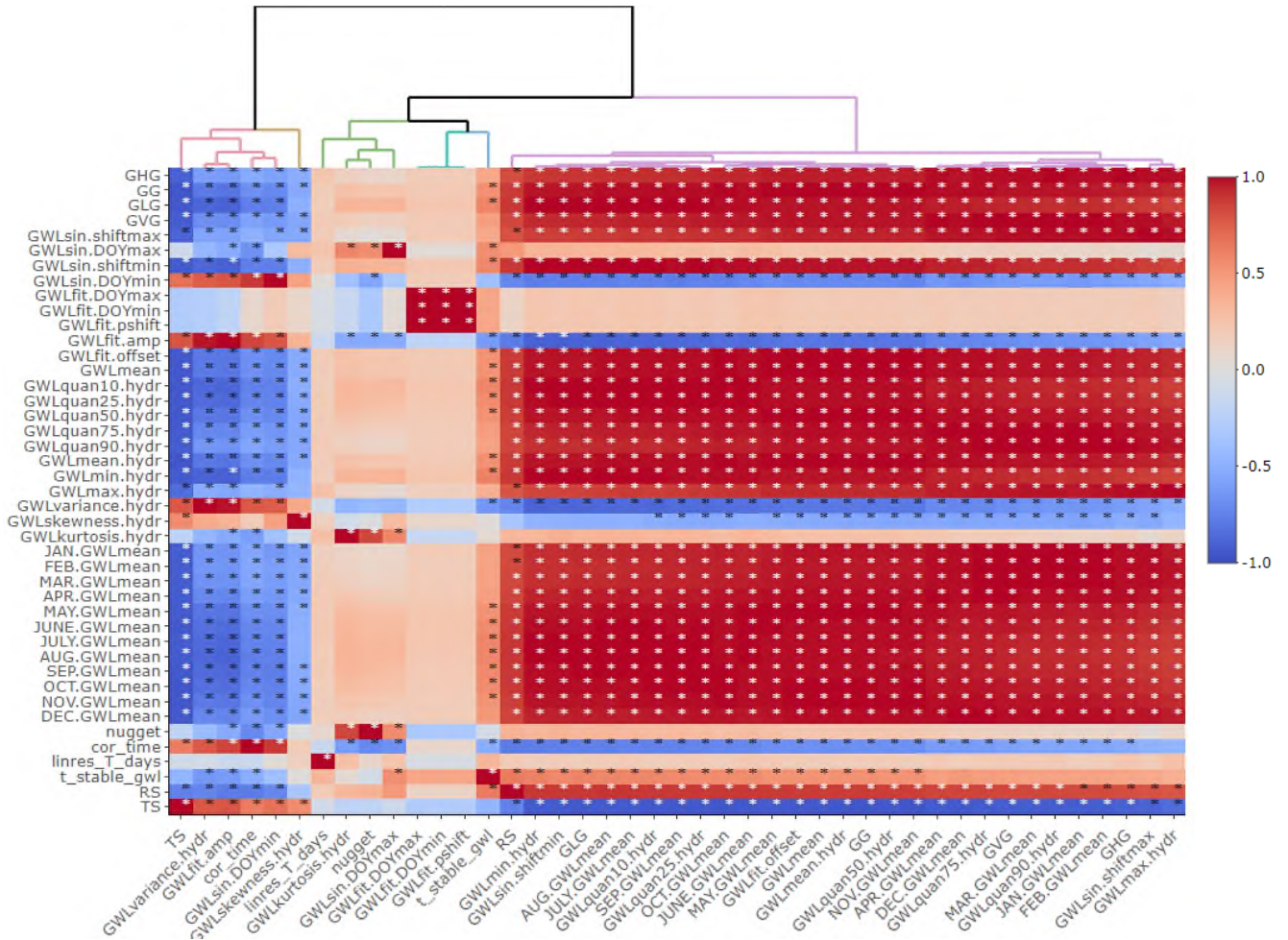
- Nijp, J.J., A.J.A.M. Temme, G.A.K.v. Voorn, L. Kooistra, G.M. Hengeveld, M.B. Soons, A.J. Teuling en J. Wallinga (2019b) Spatial early warning signals for impending regime shifts: A practical framework for application in real-world landscapes; in: *Global Change Biology*, vol 25, no 6, pag 1905–1921.
- Ritzema, H., G. Heuvelink, M. Heinen, P. Bogaart, F. van der Bolt, M. Hack-ten Broeke, T. Hoogland, M. Knotters, H. Massop en H. Vroon (2018) Review of the methodologies used to derive groundwater characteristics for a specific area in The Netherlands; in: *Geoderma regional*, vol 14, pag e00182.
- Runhaar, H. en S. Hennekens (2015) Hydrologische randvoorwaarden natuur: gebruikershandleiding (waterloodapplicatie versie 3). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- Runhaar, H. en J. Witte (2015) Indeling vegetaties naar reactietijd. KWR.
- Runhaar, J., J.C. Gehrels, G. Van der Lee, S.M. Hennekens, G.W.W. Wamelink, W. van der Linden en P.G.B. De Louw (2002) Waterlood deelrapport Doelrealisatie Natuur. STOWA.
- Runhaar, J., J.P.M. Witte en P. Verburg (1997) Ground-water level, moisture supply, and vegetation in the Netherlands; in: *Wetlands*, vol 17, no 4, pag 528-538.
- Sorensen, J.P. en A.S. Butcher (2011) Water level monitoring pressure transducers—A need for industry-wide standards; in: *Groundwater Monitoring & Remediation*, vol 31, no 4, pag 56-62.
- van der Gaast, J. en H.T.L. Massop (2003) Spreidingslengte voor het beheersgebied van waterschap Veluwe; een maat voor het bufferzonebeleid. Alterra.
- Von Asmuth, J. (2010) Over de kwaliteit, frequentie en validatie van druksensorreeksen [On the quality, frequency and validation of pressure sensor series]. Technical report no. KWR 2010.001, KWR Watercycle Research Institute
- Von Asmuth, J.R., K. Maas, M. Knotters, M.F. Bierkens, M. Bakker, T.N. Olsthoorn, D.G. Cirkel, I. Leunk, F. Schaars en D.C. Von Asmuth (2012) Software for hydrogeologic time series analysis, interfacing data with physical insight; in: *Environmental Modelling & Software*, vol 38, pag 178-190.
- Witte, J., J. Runhaar, R. Bartholomeus, Y. Fujita, P. Hoefsloot, J. Kros, J. Mol en W. de Vries (2018) De waterwijzer natuur: Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op terrestrische natuur; Stowa.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, P.M. Van Bodegom, D.G. Cirkel, R. Van Ek, Y. Fujita, G.M. Janssen, T.J. Spek en H. Runhaar (2015) A probabilistic eco-hydrological model to predict the effects of climate change on natural vegetation at a regional scale; in: *Landscape Ecology*, vol 30, pag 835–854.
- Wood, S.N. (2004) Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models; in: *Journal of the American Statistical Association*, vol 99, no 467, pag 673-686.
- Wösten, J., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijkers en A. Bolman (2013) BOFEK2012, de nieuwe bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra.

I Bodemfysische eenheden

Tabel I. Overzicht van bodemfysische eenheden die meegenomen zijn in dit onderzoek met bijbehorende argumentatie.

BOFEK	Beschrijving	Argumentatie keuze
101	kleilig moerige bovengrond of kleidek op eutroof veen tot tenminste 120 cm-mv	101 heeft grootste areaal veen in NL.
109	Oligotroof veen	Groot contrast met 101 + relevant voor natuur
203	Kleiarm veen op zandondergrond	Grootste areaal moerige grond + relevant voor natuur (met name noorden). 1 moerige bodem is voldoende, gezien areaal moerige bodems
304	Zwak lemige podzolgronden	3 hoofdcategorieën zand: leemarm, zwak lemig, lemig. Meest voorkomende zandbodem in NL is 304. Die dus meenemen. Lemige podzolgronden (312) komen daarna veel voor in NL. Lemige beekeerd is relevantere variant voor nattere omstandigheden, daarom die. Grof zandige podzolgronden grondwateronafhankelijk, maar wel groot deel van NL
313	Lemige (beekeerd)gronden	
320	Grofzandige (podzol)gronden	
416	Lichte zavel homogeen profiel	De twee meest wijd verbreide kleibodems. De ene lichte en de andere zware zavel. Daarmee contrast
418	Zware zavel homogeen profiel	
507	Siltige leem	Grootste areaal van leemgronden in NL. Komt veel voor in Limburg
Ook meenemen, maar kan vervallen indien simulatietijd te lang wordt.		
(103)	Kleiarne moerige bovengrond op veen met binnen 120 cm zand	Landelijk areaal beperkter dan b.v. 101, maar ook een zeer goed denkbare situatie voor natte natuur, Ter contrast/aanvulling met 101.

II Correlaties tussen grondwaterkarakteristieken



Correlatiematrix (Pearson) voor alle grondwaterkarakteristieken (GWKs). Kleur geeft richting en sterkte correlatie aan. Correlaties met sterretje geven alle significante correlaties >0.6 weer. GWKs zijn ingedeeld in groepen op basis van hiërarchische clustering, waarvan het dendrogram en kleuren de clusters aangegeven (complete linkage, en Euclidische afstandsfunctie, na normalisatie). Zie Tabel 1 voor beschrijving van de variabelen.

III Afleiden van alternatieven voor GxG

III.I Sinusoïde

De parameters voor de sinusoïde zijn per jaar afgeleid uit de relatie tussen grondwaterstand (GWS; m-mv) en dag in het jaar (dij):

$$GWS = GWS_{amp} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} dij - \phi\right) + \overline{GWS}$$

Waarbij \overline{GWS} de gemiddelde grondwaterstand (m) is en GWS_{amp} de amplitude (m) en ϕ de faseverschuiving (dagen). Omdat we geïnteresseerd zijn naar seizoensdynamiek binnen een jaar, is de periode gelijk gesteld op 365 dagen. Bij traag reagerende systemen kan het dominante grondwaterstandsverloop namelijk ook een meerjaarlijks patroon vertonen als gevolg van een relatief droge of natte perioden gedurende enkele jaren. Bij snel reagerende systemen met sterke oppervlaktewaterinvloed is het daarentegen mogelijk dat het grootste deel van de grondwaterdynamiek beschreven wordt door de respons op neerslag. In dat geval zal de sinusfunctie een veel kleinere periode beschrijven en niet de seizoensdynamiek binnen een jaar. De dag in het jaar waarop de minimum en maximum grondwaterstand optreden (dij_{maxGWS} en dij_{minGWS}) zijn ook meegenomen als verklarende variabelen en afgeleid als:

$$dij_{maxGWS} = \min\left(\phi + \frac{1}{4} \cdot 365, \phi - \frac{3}{4} \cdot 365\right)$$

$$dij_{minGWS} = \min\left(\phi + \frac{3}{4} \cdot 365, \phi - \frac{1}{4} \cdot 365\right)$$

Waarbij alleen dij waarden groter dan 0 dagen meegenomen zijn.

III.II Relatie tussen lineair reservoir en Kraijenhof van de Leur

In hydrologie wordt voor stroomgebieden vaak de afvoer beschreven als een lineair reservoir. In een lineair reservoir is de afvoer (Q) een functie van de opslag van water in het stroomgebied (S), en wordt de afvoersnelheid bepaald door de snelheidsconstante k (T^{-1}), die omgezet kan worden in een buffertijd T als $1/k$ (T).

$$Q = k * S$$

De buffertijd T geeft de tijdsperiode weer waarbij de afvoer afneemt tot de waarde $0.37 \cdot Q_0$, waarbij Q_0 de afvoer aan het begin van een droge periode is. T kan worden afgeleid als

$$T = \frac{dt}{-d \ln(Q)}$$

Ook de grondwatervoorraad kan worden beschouwd als een lineair reservoir, waarbij de uitstroom een functie is van de grondwaterstand. In tegenstelling tot oppervlaktewater kan de afvoer van grondwater slecht gemeten worden. Doorgaans zijn alleen tijdreeksen van de grondwaterstand beschikbaar. Hieruit kan de verandering in grondwaterstand worden afgeleid uit opeenvolgende metingen. Voor een absolute schatting voor grondwaterflux zou een correctie voor porositeit moeten plaatsvinden, maar voor het bepalen van de buffertijd T heeft het negeren daarvan geen consequenties.

Voor alle momenten dat de grondwaterstand afneemt is T berekend. Vervolgens is de mediaan per jaar berekend, die de gemiddelde buffertijd van het systeem reflecteert.

Uiteraard zal in werkelijkheid de grondwaterdynamiek afwijken van een geïdealiseerd lineair reservoir. Versimpelende aannames zijn o.a. de afwezigheid van andere fluxen (kwel, oppervlakkige afvoer) en een homogene bodem (hydrofysische bodemeigenschappen). Deze aannames zijn daarentegen gebruikelijk in bijvoorbeeld tijdreeksmodellen.

Hieruit volgt dat voor de subset dalende grondwaterstanden geldt:

$$\tan(\alpha) = \frac{d \ln(Q)}{dt} = \frac{1}{2.303} j$$

$$j = \frac{1}{2.303 \frac{-d \ln Q}{dt}}$$

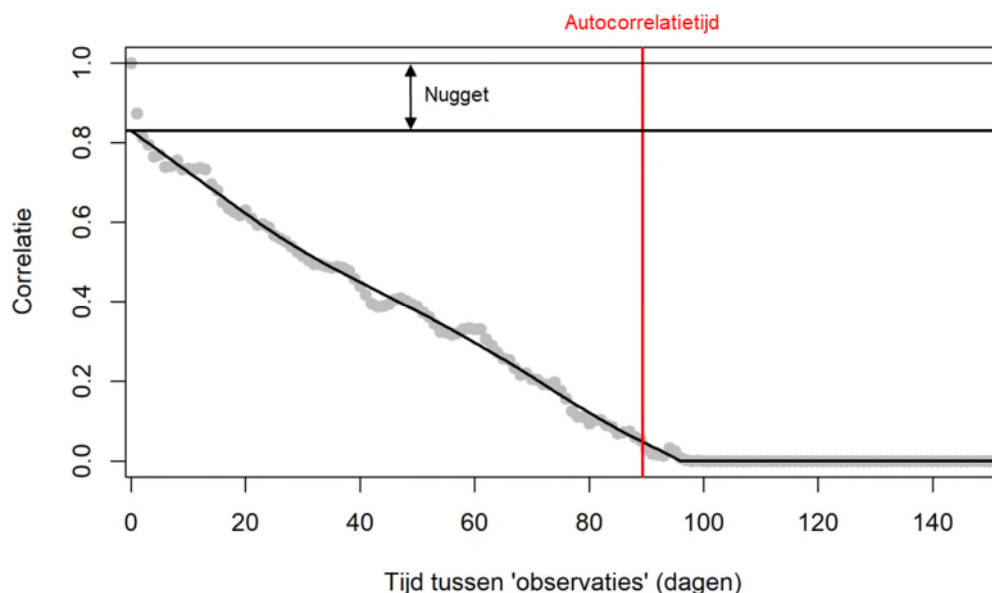
Gelijkstellen aan de bovenstaande vergelijking voor buffertijd T geeft $T = 2.303 j$. Logisch dus dat beide aan elkaar gerelateerd zijn. De reservoir coëfficiënt j heeft het voordeel dat deze een fysische interpretatie heeft (van der Leur 1958) en interpretatie aan het systeem geeft.

$$j = \frac{1}{\pi^2} \frac{\mu L^2}{KD} = \frac{1}{2.303} T$$

III.III Temporeel variogram

Een andere manier om temporele variabiliteit te kwantificeren is met behulp van een variogram. Een variogram gaat uit van het principe dat twee punten in de tijd met een korte periode meer op elkaar lijken dan als ze verder van elkaar af liggen. Met andere woorden: naarmate de periode tussen twee metingen toeneemt, zal de temporele autocorrelatie afnemen. Deze relatie tussen scheidings-tijd tussen waarden en temporele autocorrelatie wordt ook wel een variogram genoemd. Een variogram kan wiskundig worden beschreven met verschillende vergelijkingen. De parameters in deze vergelijkingen geven informatie over temporele patronen in tijdreeksen. De belangrijkste eigenschappen zijn de 'correlatietijd' en de 'nugget'. De correlatietijd is een maat voor de tijdsduur waarbij twee waarnemingen niet of verwaarloosbaar met elkaar gecorreleerd zijn. Grotere waarden van de correlatietijd geven aan dat veranderingen over grotere tijdspanne plaatsvinden. De nugget is een maat voor het aandeel van willekeurigheid in een tijdreeks. Een hoge waarde van de nugget kan aangeven dat (1) er veel willekeurige ruis in de tijdreeks aanwezig is; (2) temporele variabiliteit optreedt op tijdschalen korter dan de kortste meetfrequentie en/of (3) er is een grote meetfout.

Bij voorkeur worden bovenstaande eigenschappen afgeleid met behulp van een vergelijking. Men spreekt dan van een theoretisch variogram. In dit geval is er voor gekozen om de parameters te schatten uit een empirisch variogram (de stippen in onderstaande figuur). Het is onmogelijk om voor het zeer grote aantal analyses een generiek theoretisch variogrammodel te 'fitten'. Er zijn namelijk verschillende typen variogrammodellen die ieder verschillende eigenschappen hebben (Nijp e.a., 2019a). Van te voren is niet vast te stellen welk variogrammodel de data het best beschrijft. Met het empirisch variogram zijn de gemiddelde autocorrelatie voor verschillende 'scheidingsafstanden' bepaald (stippen in Figuur III). Uitschieters in het empirisch variogram zijn verwijderd met een lokale polynomial 'smoother' om zo een theoretisch variogram te benaderen. Negatieve autocorrelatie (die kan optreden bij grotere tijd tussen observaties als gevolg van o.a. seizoensdynamiek) is op de waarde 0 gezet. Uit deze geëgaliseerde relatie is vervolgens de correlatietijd bepaald als de eerste periode waarbij de temporele autocorrelatie kleiner is dan 5%. De nugget is bepaald door te bepalen wat de autocorrelatie is bij scheidings-tijd = 0 dagen, en deze af te trekken van 1.



Figuur III: Voorbeeld van empirisch variogram op basis van de grondwaterreeks van een blauwgrasland in Figuur 10.

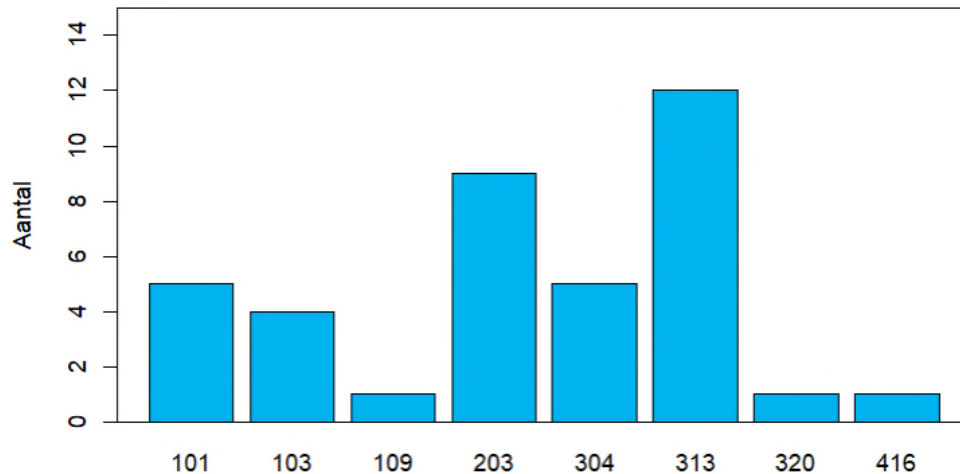
IV Eigenschappen meetlocaties

Op de volgende pagina zijn een aantal karakteristieken van de veldlocaties weergegeven.

- Bodemfysische eenheid naar Wösten e.a. (2013)
- GHG, GVG en GLG in cm onder maaiveld
- RS: zuurstofstress (maximaal cumulatief tekort O₂ in g/m² /10 dagen)
- TS: transpiratiestress (maximaal cumulatief tekort in 10 dagen m H₂O/m²/10dagen)
- Plantengemeenschap, meest waarschijnlijke associatie waaraan de vegetatie is toegekend
- Soortenrijkdom (aantal soorten)
- Indicatiewaarden voor vocht (Fm) en voedselrijkdom (Nm)
- Aandeel xerofyten (%)

Verder zijn de eigenschappen van de gehele dataset samengevat met statistieken als de mediaan en standaard deviatie. Merk op dat een (zeer) groot deel van de locaties geen transpiratiestress ondervindt. Dat komt door de focus op grondwaterafhankelijke natuur in de verzamelde dataset.

In onderstaande grafiek is het aantal meetlocaties per bodemfysische eenheid weergegeven. Merk op dat voor BOFEK 418 en 507 geen meetlocaties zijn. Bovendien is het aantal herhalingen voor veel bodemfysische eenheden zeer beperkt of zelfs slechts één locatie.



Figuur IV. Aantal meetlocaties per bodemfysische eenheid.

Tabel IV. Eigenschappen per meetlocatie.

Locatie	BOFEK	GHG	GVG	GLG	RS	TS	Associatie	N soorten	Fm	Nm	% Xerofyten
RHR_1987_0002_0201	101	-12	-22	-31	0.0326	0	36AA01	53	2.29	2.13	7
RHR_1987_0004_0203	101	-17	-30	-46	0.0261	0	09AA02	38	2.39	2.07	15
RHR_1987_0005_0204	101	-24	-32	-42	0.0277	0.0012	40AA02	49	2.43	1.98	8
RHR_1987_0006_0205	101	-22	-37	-56	0.0256	0.0048	12RG01	27	2.96	3.49	23
RHR_1987_0034_0226	101	-18	-38	-62	0.0164	0	16AA01	53	2.80	1.89	18
SBB_1999_0029_0018	103	11	5	-9	0.0436	0	10RG02	10	1.77	2.05	0
SBB_2002_0056_0119	103	0	-6	-17	0.0394	0	16AB06	46	2.23	2.41	2
SBB_2002_0072_0127	103	2	-5	-16	0.0424	0	Onbekend	Onbekend	2.22	2.49	3
SBB_2002_0073_0128	103	2	-4	-12	0.0459	0	16AB03	41	2.26	2.75	3
SBB_2000_0017_0031	109	-4	-14	-35	0.0324	0	16RG02	47	2.40	2.32	4
RHR_1987_0135_0323	203	-18	-34	-63	0.0191	0	36AA02	48	2.86	2.43	18
RHR_1987_0136_0324	203	-8	-25	-61	0.0267	0	16BC01	50	2.89	2.99	15
RHR_1987_0138_0326	203	-62	-74	-121	0.0037	0.0104	14RG10	40	3.27	1.69	43
RHR_1987_0139_0327	203	-87	-98	-148	0.0008	0.0164	14CB01	59	3.57	1.34	63
RHR_1987_0140_0328	203	-15	-25	-73	0.0189	0.0004	28AA01	44	2.69	2.17	14
RHR_1987_0151_0339	203	-52	-67	-110	0.0072	0.0067	14CA01	34	3.50	1.98	60
SBB_2000_0058_0066	203	3	-3	-17	0.0394	0	11BA01	20	2.04	1.00	0
SBB_2002_0069_0126	203	0	-20	-50	0.0289	0	16AB01	51	2.29	2.33	3
SBB_2002_0102_0147	203	-4	-16	-45	0.0342	0	11AA01	21	2.15	1.28	0
RHR_1987_0097_0288	304	-71	-95	-173	0.002	0.0093	19RG02	26	3.48	1.15	58
RHR_1987_0103_0294	304	-29	-53	-131	0.0119	0.0067	34AA01	46	3.47	1.43	60
RHR_1987_0104_0295	304	3	-16	-82	0.0262	0.0068	19AA02	48	3.03	1.27	37
RHR_1987_0109_0300	304	-47	-60	-121	0.0051	0.004	19AA02	48	3.36	1.20	51
RHR_1987_0133_0321	304	28	15	-89	0.0337	0.0012	28AA01	44	2.48	1.95	22
RHR_1987_0046_0238	313	-93	-110	-177	0.0005	0.0153	14RG06	33	3.42	2.59	50
RHR_1987_0049_0241	313	-57	-75	-153	0.004	0.0111	14BB02	46	3.56	2.68	57
RHR_1987_0050_0242	313	-16	-37	-111	0.0125	0.0023	16BC01	50	2.81	3.11	13
RHR_1987_0051_0243	313	-19	-41	-119	0.0161	0.0036	16RG03	42	3.03	3.27	21
RHR_1987_0075_0267	313	-16	-32	-58	0.0256	0	32AA01	41	2.37	2.76	6
RHR_1987_0123_0311	313	19	-3	-104	0.0248	0.0037	11RG03	20	2.77	1.00	22
RHR_1987_0125_0313	313	-98	-123	-199	0.0005	0.0158	41AA03	34	3.41	1.04	53
RHR_1987_0127_0315	313	-47	-71	-163	0.0064	0.0083	19AA01	36	3.17	1.31	38
RHR_1987_0128_0316	313	-175	-201	-287	0.0002	0.02	19AA01	36	3.31	1.21	48
RHR_1987_0130_0318	313	-96	-116	-153	0.0004	0.0084	42AA01	37	3.23	1.67	41
RHR_1987_0131_0319	313	0	-20	-120	0.0209	0.0045	11AA02	26	2.91	1.08	22
RHR_1987_0132_0320	313	-14	-35	-142	0.0152	0.0057	20AA02	24	3.27	1.03	45
RHR_1987_0168_0356	320	-131	-144	-205	0.0009	0.0258	19RG02	26	3.41	1.08	54
SBB_1999_0041_0024	416	-15	-47	-119	0.0181	0.0043	12BA04	27	2.80	2.78	4
Min		-175	-201	-287	0.0002	0.0000		10	1.77	1.00	0
Q25		-51	-70	-139	0.0054	0.0000		27	2.39	1.27	6
Mediaan		-17	-35	-97	0.0190	0.0037		41	2.87	1.98	21
Q75		-1	-17	-47	0.0286	0.0079		48	3.30	2.48	48
Max		28	15	-9	0.0459	0.0258		59	3.57	3.49	63
St deviatie		44	46	64	0.0141	0.0064		12	0.50	0.73	21