

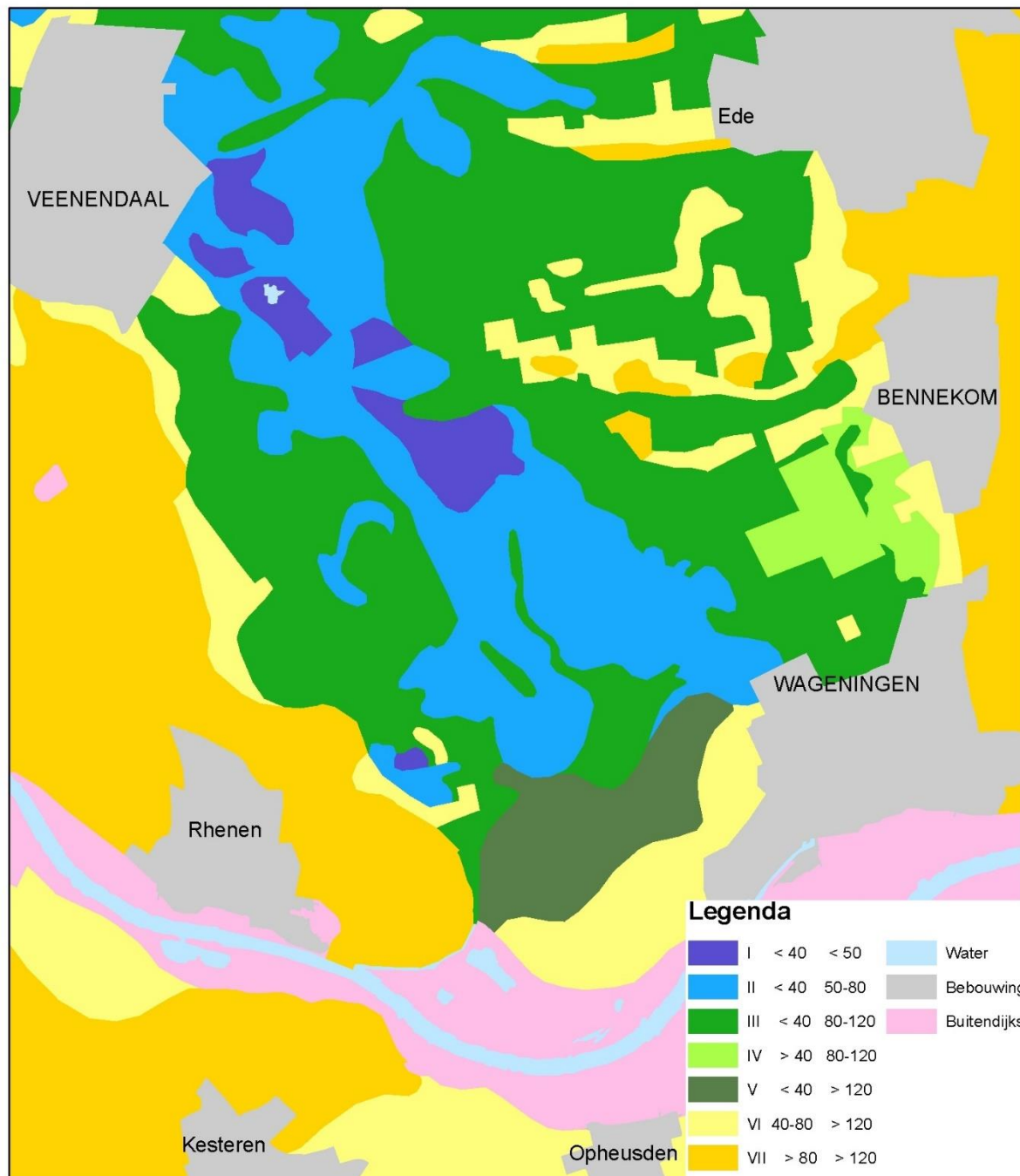
Landsdekkende, actuele informatie over grondwatertrappen digitaal beschikbaar

Martin Knotters, Dennis Walvoort, Fokke Brouwer, Lodewijk Stuyt, Joop Okx (Wageningen Environmental Research)

De grondwatertrappen op de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000, geven niet overal de actuele situatie weer, omdat de grondwaterdiepte sinds de veldopnames door allerlei oorzaken veranderde. Van hoog Nederland is daarom de grondwaterdynamiek (Gd) tussen 1997 en 2005 in kaart gebracht. Deze Gd-kaart geeft meer informatie dan alleen grondwatertrappen. De komende jaren zal ook de grondwaterdynamiek van laag Nederland worden gekarteerd. In afwachting van de afronding hiervan is een actuele, landsdekkende grondwatertrappenkaart afgeleid van twee inventarisaties van grondwaterstanden: de karteringen van de grondwaterdynamiek in hoog Nederland en de update van de grondwatertrappenkaart van laag Nederland tussen 2011 en 2014.

De grondwaterstand is een belangrijke factor in onder meer ecologie, landbouw, milieu en bij stadsplanning en de uitvoering van infrastructurele projecten. De grondwaterstand fluctueert in grote delen van Nederland op geringe diepte (0-200 cm beneden maaiveld), met ondiepe standen in de winter en diepe in de zomer. Betrouwbare, actuele informatie over de diepte waarop de grondwaterstand fluctueert is daarom onontbeerlijk om beslissingen op de genoemde gebieden te kunnen nemen.

De jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand is landsdekkend met zogeheten grondwatertrappen in kaart gebracht op de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000. Grondwatertrappen (Gt's) zijn klassen van de niveaus waartussen de jaarlijkse fluctuatie van de grondwaterstand zich gemiddeld genomen afspeelt. Gt's worden al ongeveer 50 jaar gebruikt [1] en zijn inmiddels ingeburgerd. In afbeelding 1 een voorbeeld van een fragment van de Bodemkaart, met daarop aangegeven de ruimtelijke verdeling van grondwatertrappen.



Afbeelding 1. Grondwatertrappen (I tm VII) op een fragment van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000, opnamejaar 1964. Kolom 1: Gt, kolom 2: GHG (cm), kolom 3: GLG (cm)

In de loop van de tijd is de Gt-indeling verfijnd. Tabel 1 geeft de meest actuele, verfijnde indeling in Gt's. Deze is gebaseerd op gemiddeld hoogste en laagste grondwaterstanden: GHG's en GLG's, samengevat als GxG's. Over de definities van GxG's is veel gediscussieerd, onder meer omdat de verschillende schatters voor de GxG werden aangezien voor de definitie. Om enige helderheid te scheppen zijn de volgende definities geformuleerd [2]:

Gemiddeld Hoogste (Laagste) Grondwaterstand: Gemiddelde van de HG3 (LG3) over een periode van 30 jaar onder gegeven klimatologische en waterhuishoudkundige omstandigheden.

HG3 (LG3) is hier het gemiddelde van de drie hoogste (laagste) grondwaterstanden in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) bij een meetfrequentie van tweemaal per maand.

De GxG voor een bepaalde locatie is alleen exact uit te rekenen als er een tijdreeks van 30 jaar beschikbaar is van grondwaterstanden, met een halfmaandelijke meetfrequentie en zonder effecten van ingrepen in de waterhuishouding. Voor overige locaties zijn GxG's op allerlei manieren te schatten: uit bodemkundige profielkenmerken, uit tijdreeksen van grondwaterstanden korter dan 30 jaar, met of zonder gebruikmaking van tijdreeksmodellen, uit gerichte momentopnames van de grondwaterstand en uit combinaties van deze methoden. Zie [2] voor een overzicht en indicaties van de nauwkeurigheid.

Een terugkerend onderwerp van discussie tijdens de laatste decennia was of de GHG (GLG) betrekking heeft op het winterhalfjaar (zomerhalfjaar) of op het hele hydrologische jaar. In het eerste geval kon het gebeuren dat de GHG dieper was dan de GLG. Tabel 1 vertoont enkele sporen van deze discussie, omdat bij sommige Gt-klassen de GHG dieper kan zijn dan de GLG (IIc, IVc, VII... en VIII...).

Tabel 1. Indeling in grondwatertrappen

Grondwatertrap (Gt)	Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (GHG) in cm-mv	Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (GLG) in cm-mv
Ia	< 25	< 50
Ic	> 25	< 50
IIa	< 25	50 - 80
IIb	25 - 40	50 - 80
IIc	> 40	50 - 80
IIIa	< 25	80 - 120
IIIb	25 - 40	80 - 120
IVu	40 - 80	80 - 120
IVc	> 80	80 - 120
Va	< 25	> 120
Vao	< 25	120 - 180
Vad	< 25	> 180
Vb	25 - 40	> 120
Vbo	25 - 40	120 - 180
Vbd	25 - 40	> 180
VI	40 - 80	> 120
Vio	40 - 80	120 - 180
VId	40 - 80	> 180
VII	80 - 140	> 120
VIIo	80 - 140	120 - 180
VIIId	80 - 140	> 180
VIII	> 140	> 120
VIIIo	> 140	120 - 180
VIIIId	> 140	> 180

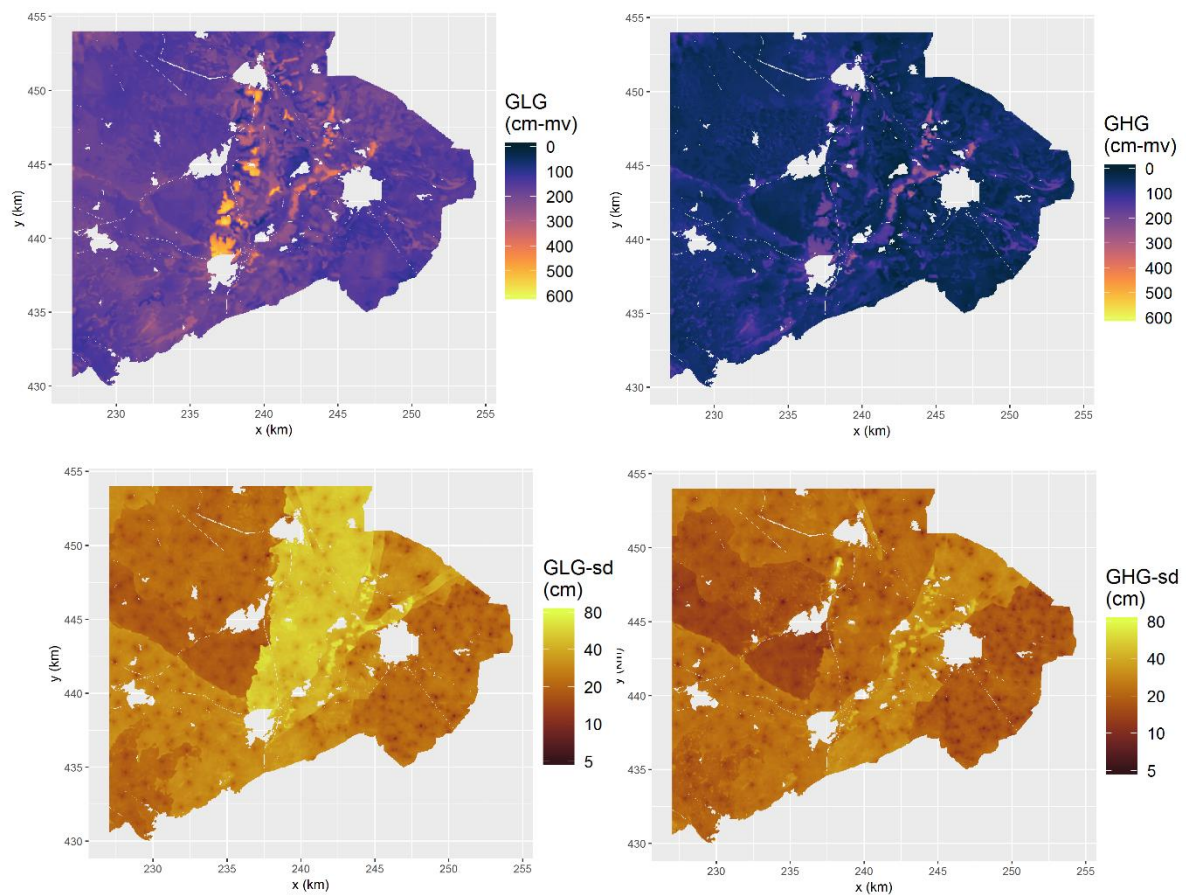
Actuele grondwatertrappen voor hoog Nederland

Tussen 1997 en 2005 vond een kartering plaats van de grondwaterdynamiek (Gd) in het hoge deel van Nederland, met overwegend pleistocene afzettingen aan de oppervlakte en vrije afwatering [3]. Anders dan bij de kartering van grondwatertrappen, werden bij de Gd-kartering GHG's en GLG's in kaart gebracht voor gridcellen van 25x25 meter. Hiertoe werden onder meer gerichte opnames verricht van grondwaterstanden rond GHG- en GLG-niveau in boorgaten op 14.572 locaties, met een gemiddelde dichtheid van één gerichte-opnamelocatie per 114 hectare. Daarnaast werden de tijdreeksen gebruikt van grondwaterstanden van 528 peilbuislocaties.

Met behulp van fysisch gebaseerde tijdreeksmodellen [4] en regressieanalyse (stambuisregressie; [5]) werden GHG's en GLG's geschat voor de locaties van de peilbuizen en de gerichte opnames. Deze GHG's en GLG's werden vervolgens geïnterpoleerd naar een 25x25m-grid, met de geostatistische interpolatiemethode *universal co-kriging*. Deze methode houdt rekening met de samenhang tussen GHG en GLG en gebiedsdekkend beschikbare hulpvariabelen, zoals de maaiveldshoogte van een punt

ten opzichte van de gemiddelde maaiveldhoogte van de cirkelvormige omgeving rond dat punt (relatieve maaiveldhoogte), afstand tot sloten, et cetera.

Geostatistische interpolatie levert naast ruimtelijke voorspellingen van GHG's en GLG's ook een indicatie van de nauwkeurigheid van deze voorspellingen op, namelijk de standaardafwijking van de voorspelfout. Er werden 300 verschillende realisaties van de GHG- en GLG-kaart gesimuleerd, wat voor elke gridcel een verdeling van 300 GHG's en GLG's oplevert. Deze verdeling weerspiegelt de onzekerheid over de 'echte' GHG (GLG) en maakt toepassingen van GHG- en GLG-kaarten in onzekerheidsanalyses mogelijk, zoals bijvoorbeeld bij de classificatie van percelen naar de gevoeligheid voor uitspoeling van nitraat [6]. Afbeelding 2 geeft een fragment van de GHG- en GLG-kaart en de bijbehorende kaarten met de standaardafwijking van de voorspelfout.



Afbeelding 2. De GLG (linksboven) en de GHG (rechtsboven) in de Achterhoek rond Aalten en Winterswijk, en de standaardafwijking van de voorspelfout in GLG (linksonder) en GHG (rechtsonder)

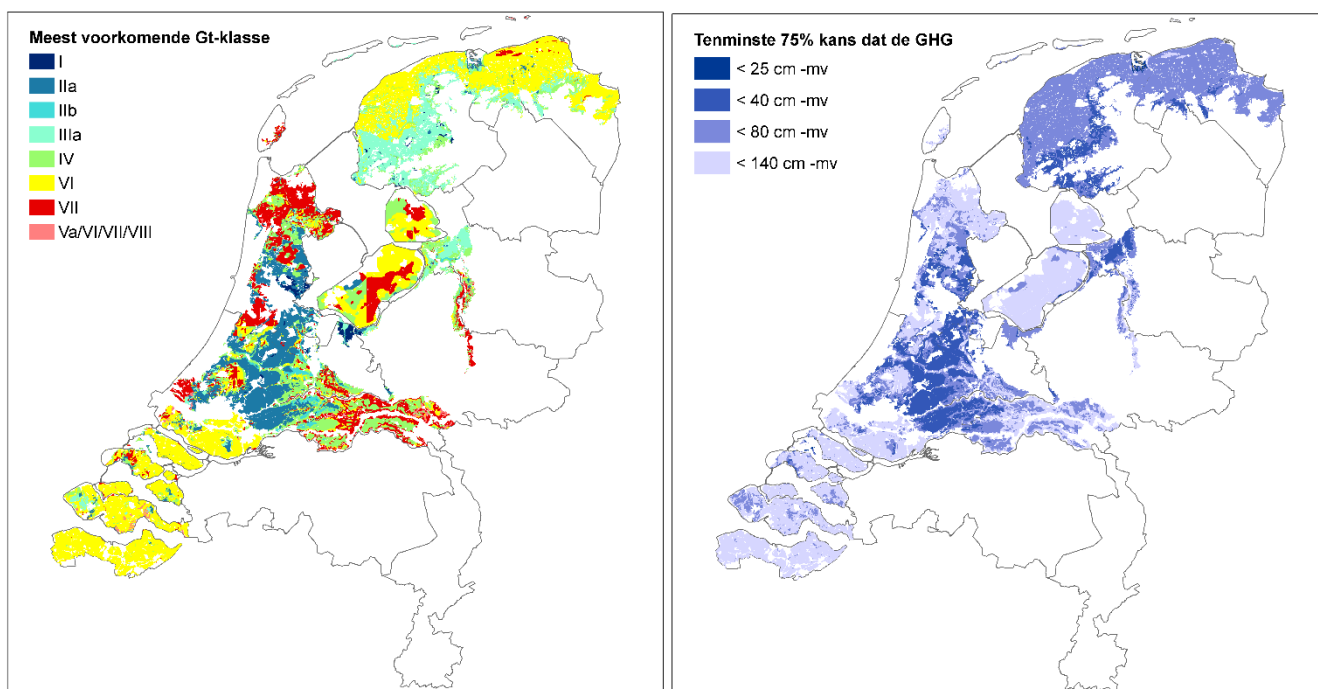
Uit de GHG- en GLG-kaarten kunnen Gt-kaarten worden afgeleid met een resolutie van 25x25 meter [7]. Voor elke gridcel van 25x25 meter zijn 300 realisaties van GHG's en GLG's beschikbaar, waaruit de gemiddelde GHG en GLG zijn berekend. Deze gemiddelden zijn, na aggregatie tot gridcellen van 50x50 meter, geassocieerd tot Gt's. Dit resulteerde in de actuele Gt-kaart (2018) voor hoog Nederland.

Actuele grondwatertrappen voor laag Nederland

Het streven is om één landelijke kaart van de grondwaterdynamiek te maken, die digitaal beschikbaar is en regelmatig wordt geactualiseerd. Voor het hoge deel van Nederland is deze Gd-kaart er al. Voor laag Nederland is in 2017 een begin gemaakt [7]. Anders dan in hoog Nederland komen in laag Nederland aan de oppervlakte vooral holocene afzettingen voor en worden de peilen beheerst. Daardoor zullen in laag Nederland de grondwaterstanden, en daarmee de GHG's en GLG's, minder sterk samenhangen met de maaiveldhoogte en zal ook de samenhang met de afstand tot sloten anders verlopen. Veel van de ruimtelijke variatie in GHG's en GLG's zal zich in laag Nederland binnen percelen afspelen, doordat het freatisch vlak tussen de sloten in perioden met een aanhoudend neerslagoverschot 'bol' staat en in perioden met een aanhoudend neerslagtekort 'hol' [8], [9].

Zolang de Gd-kartering van laag Nederland niet is afgerond geeft de actualisatie van de grondwatertrappenkaart uit 2014 [10] de meest actuele informatie. Omdat deze actualisatie in een kort tijdsbestek moest worden uitgevoerd is niet gekozen voor een Gd-kartering, maar voor een steekproef die de actuele verdeling gaf van de GHG's, GLG's en Gt's in de Gt-kaartenheden van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000.

Het aantal Gt-kaartenheden op de kaartbladen van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000, is 7, 11 of 13 Gt-klassen, afhankelijk van de ouderdom van het kaartblad. Om meer ruimtelijk detail te bewerkstelligen zijn de Gt-kaartenheden verder onderverdeeld naar bodemtype, regio en ligging in of buiten landinrichtingsprojecten waar ingrepen in de waterhuishouding hebben plaatsgevonden. Met deze onderverdeling bedroeg het aantal kaartenheden 59. In elk van deze kaartenheden werden, met een kanssteekproef, locaties voor gerichte opnames voor GHG en GLG geselecteerd. Het totaal aantal gerichte-opnamelocaties bedroeg 1237. Daarnaast werden uit tijdreeksen van 114 peilbuizen de GHG en GLG geschat. Deze werden gebruikt om met regressieanalyse GHG's en GLG's voor de locaties van de gerichte-opnames te schatten [5]. Vervolgens werd de actuele verdeling van GHG's, GLG's en Gt's voor elk van de 59 kaartenheden geschat. Hieruit kunnen allerlei kaarten worden afgeleid. Afbeelding 3 geeft twee voorbeelden.



Afbeelding 3. De vaakst aangetroffen grondwatertrap (modus) in de 59 kaartenheden van de Gt-actualisatie in laag Nederland (links) en gebieden waar de kans dat een GHG ondieper is dan 25, 40, 80 of 140 cm ten minste 75 % is (rechts [10])

Om meer ruimtelijk detail aan te brengen dan in bijvoorbeeld afbeelding 3a zichtbaar is, vond een geostatistische nabewerking van de verzamelde gegevens plaats: *simple kriging with varying local means* [11] (zie kader). Om ‘dieper-dan’-waarnemingen te kunnen benutten zijn niet-parametrische regressiemodellen en medianen gebruikt [12]. ‘Dieper-dan’-waarnemingen komen geregeld voor doordat het grondwater dieper dan de onderkant van het boorgat of een peilbuisfilter kan zitten.

De actuele Gt-kaart van Nederland

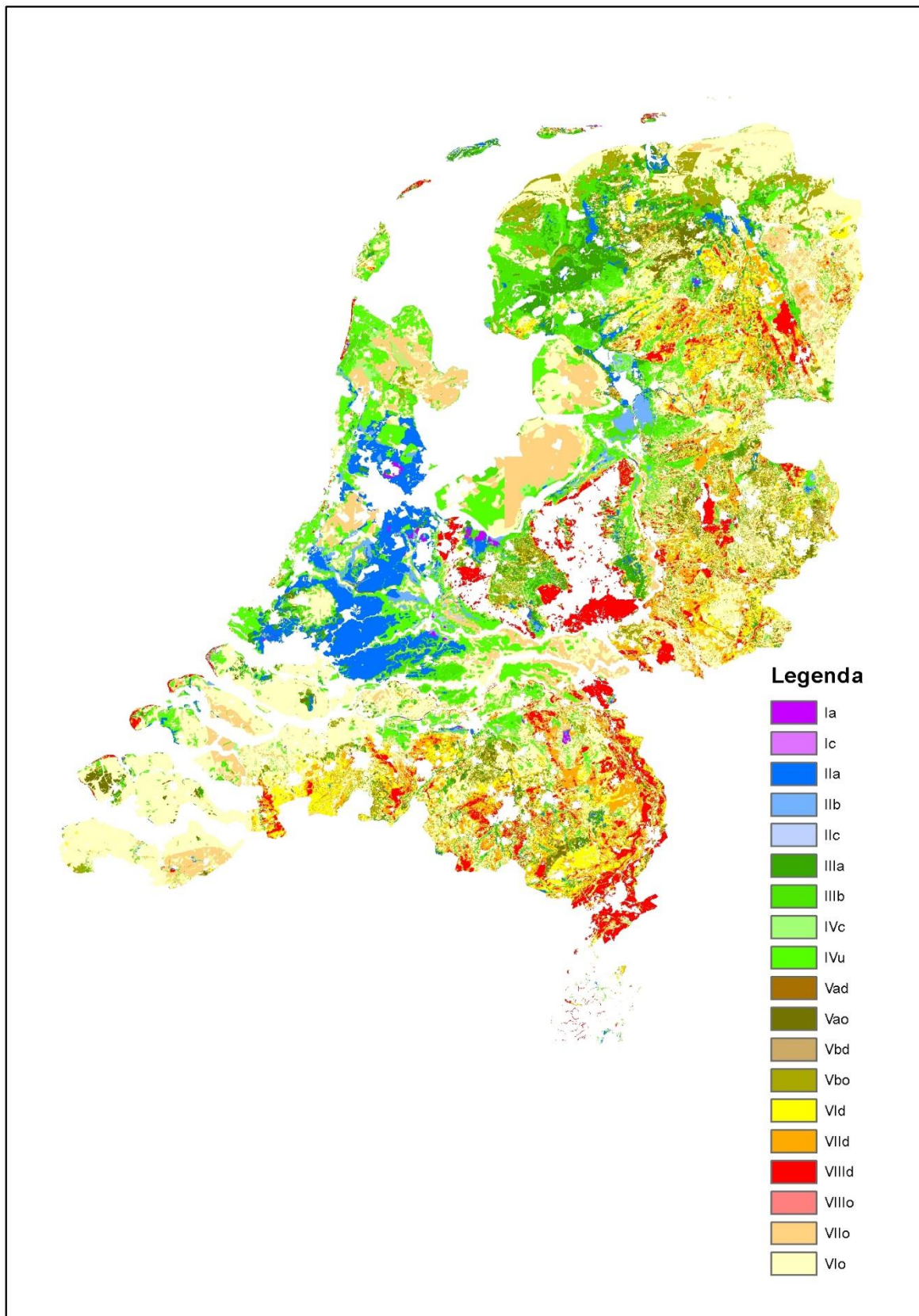
De actuele Gt-kaarten van hoog en laag Nederland zijn samengevoegd tot een landelijke, actuele Gt-kaart. Bij overlap prevaleert de meest actuele informatie. Enkele gebieden vielen buiten de actualisaties van hoog en laag Nederland. Bos- en natuurgebieden maakten bijvoorbeeld geen deel uit van de Gd-kartering voor de classificatie van uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat [13]. Tot nieuwe actualisaties zijn uitgevoerd geldt hier de meest actuele informatie uit de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000, of uit digitaal beschikbare detailkarteringen. Afbeelding 4 toont de actuele Gt-kaart van Nederland.

Combineren van laag en hoog

De Gd-kaart van hoog Nederland [3], [6] is een rasterkaart met een (geaggregeerde) resolutie van 50×50 m². De Gd-kaart van laag Nederland is een vectorkaart bestaande uit polygoon [10]. Het verschil in representatie (raster of vector) is terug te voeren op de wijze waarop deze kaarten zijn berekend. De kaart van hoog Nederland is berekend op basis van geostatistische interpolatie en simulatie. De kaart van laag Nederland is gebaseerd op een kanssteekproef: elke polygoon geeft de mediane waarde voor de GHG (GLG) .

Om tot één kaart van heel Nederland te komen zijn de polygoon op de kaart van laag Nederland verrasterd naar een rasterkaart die aansluit op de kaart van hoog Nederland. Binnen een polygoon hebben de rastercellen allemaal dezelfde waarde. Om ook variatie binnen polygoon te krijgen is gebruik gemaakt van een geostatistische interpolatiemethode, die bekend staat als *simple kriging with varying local means* [11]. De *varying local means* zijn de waarden van de rastercellen binnen de polygoon. Deze worden verfijnd met *simple kriging* door op alle gerichte-opnamelocaties het verschil te berekenen tussen de GHG (GLG) op die locatie en de GHG (GLG) volgens de daarmee samenvallende rastercel. Vervolgens worden deze verschillen geïnterpoleerd naar de middens van alle rastercellen en worden deze opgeteld bij de GHG (GLG) daarvan. Bij de interpolatie wordt rekening gehouden met verschillen in nauwkeurigheid tussen de GHG (GLG) op gerichte-opnamelocaties. Hierdoor krijgen nauwkeuriger waarden meer invloed op de uiteindelijke kaart.

De kwaliteit van de interpolatie wordt beoordeeld met kruisvalidatie (*leave-one-out cross-validation*). Daarmee wordt de GHG (GLG) op elke gerichte-opnamelocatie voorspeld, zonder de waarde op die locatie zelf te gebruiken. Dat geeft voor de GHG een gemiddelde fout van 0,2 cm en voor de GLG van 0,3 cm. De kaarten zijn daarom zuiver (geen systematische fout). De totale fout, uitgedrukt als de vierkantswortel van de gemiddelde gekwadrateerde fout (RMSE), bedraagt 24 cm voor de GHG en 30 cm voor de GLG. Ook worden de ruimtelijke patronen goed gereproduceerd, zoals blijkt uit de correlatiecoëfficiënt. Die bedraagt voor zowel de GHG als de GLG 0,95. Zie [14] voor meer informatie over validatiematen.



Afbeelding 4. Gt-kaart van Nederland, status 2018. Toelichting legenda: zie tabel 1

Wat moet er nog gebeuren?

De grondwaterstand is één van de meest dynamische variabelen waar de Basisregistratie Ondergrond (BRO) informatie over biedt. Informatie over grondwaterregimes, zoals de Gt- en Gd-kaart, kan verouderen door ingrepen in de waterhuishouding en door klimaatverandering. Ook wordt de aangeboden informatie regelmatig aangepast aan nieuwe behoeften: de Gt-indeling werd steeds verfijnder en de Gd-methodiek werd ontwikkeld, waarmee kaarten kunnen worden gemaakt van onder meer GHG's, GLG's en Gt's, maar ook van andere parameters, zoals bijvoorbeeld percentielwaarden: niveaus die met een bepaalde frequentie worden overschreden. Om informatie over de grondwaterstand uniform te maken en actueel te houden zijn de volgende acties nodig:

1. Gd-kartering uitbreiden naar heel Nederland. Hiermee is in 2017 een begin gemaakt. 'Erfenissen' van de Bodemkaart, schaal 1:50.000, zoals kaartbladgrenzen in afbeelding 4 in Zuidelijk Flevoland, zullen daarbij teniet worden gedaan.
2. Monitoring van de kwaliteit, en daarmee de actualiteit, van Gd-informatie. Hiertoe zou een landelijk validatiemetnet moeten worden ingericht (aanbeveling in [2]; [15], [16]).
3. Regelmatige herhaling van gerichte opnames van GHG en GLG en aanpassing van de Gd-informatie in de BRO.

Ad 3. Er bestaan toch modellen waarmee de nieuwe Gt-, GHG- en GLG-kaarten kunnen worden geproduceerd als er iets verandert aan de waterhuishouding of het klimaat? Dat klopt, en strikt genomen zijn de Gt-, GHG- en GLG-kaarten in de BRO ook modellen. Maar het zijn wel modellen die sterk zijn gebaseerd op veldwaarnemingen en daardoor minder gevoelig zijn voor de validiteit van modelveronderstellingen. Dit maakt de informatie over Gt, GHG en GLG in de BRO heel geschikt voor onder andere het verifiëren van hydrologische modellen, het berekenen van schades, et cetera. Regelmatige veldmetingen blijven nodig.

De grondwatertrappenkaart die op basis van de in dit artikel beschreven procedure tot stand is gekomen, is digitaal beschikbaar op www.pdok.nl.

Referenties

1. Heesen, H.C. van (1970). Presentation of the seasonal fluctuation of the water table on soil maps. *Geoderma* 4, 257-278.
2. Ritzema, H.P. et al. (2012). *Metten en interpreteren van grondwaterstanden. Analyse van methodieken en nauwkeurigheid*. Wageningen, Alterra, rapport 2345.
3. Finke, P.A. et al. (2005). Kartering van de grondwaterdynamiek met behulp van geo-informatie van hoge resolutie. *Stromingen* 11(1), 27-41.
4. Knotters, M., & Bierkens, M.F.P. (2000). Tijdreeksmodellen voor de grondwaterstand: een kijkje in de black box. *Stromingen* 5(30), 35-49.
5. Riele, W.J.M. te, & Brus, D.J. (1991). *Methoden van gerichte grondwaterstandmetingen voor het schatten van de GHG*. Wageningen, DLO-Staring Centrum, rapport 158.
6. Gruijter, J.J. de, Horst, J.B.F. van der, Heuvelink, G.B.M., Knotters, M., & Hoogland, T. (2004). *Grondwater opnieuw op de kaart. Methodiek voor de actualisering van grondwaterstands-informatie en perceelsclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat*. Wageningen, Alterra, rapport 915.

7. Stuyt, L.C.P.M. et al. (2016). *BasisRegistratie Ondergrond (BRO) Actualisatie Gt/Gd; Beschrijving grondwaterkarakteristieken per Gt-klasse voor hoog Nederland*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, rapport 2797.
8. Knotters, M., Hoogland, T., & Gaast, J. van der (2003). *Nieuwe informatie over de grondwaterdynamiek: wensen en mogelijkheden*. Wageningen, Alterra, rapport 548.
9. Hoogland, T., Visschers, R., Gaast, J.W.J. van der, & Knotters, M. (2005). *Karteren van de grondwaterdynamiek in gebieden met een kleideklaag; parameters voor grondwaterafhankelijk peilbeheer*. Wageningen, Alterra, rapport 1127.
10. Hoogland, T., Knotters, M., Pleijter, M., & Walvoort, D.J.J. (2014). *Actualisatie van de grondwatertrappenkaart van holoceen Nederland; resultaten van het veldonderzoek*. Wageningen, Alterra, rapport 2612.
11. Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, Applied Geostatistics Series.
12. Helsel, D.R. (2012). *Statistics for censored environmental data using Minitab® and R. Second edition*. Hoboken, New Jersey, Wiley & Sons.
13. Kekem, A.J. van, Hoogland, T., & Horst, J.B.F. van der (2005). *Uitspoelingsgevoelige gronden op de kaart; werkwijze en resultaten*. Wageningen, Alterra, rapport 1080.
14. Walvoort, D.J.J., Roelsma, J., Löschner-Wolleswinkel, R.J., & Tol-Leenders, T.P. van (2009). *Validatie van modelsystemen voor het voorspellen van de oppervlaktewaterkwaliteit en -kwantiteit in het stroomgebied 'de Schuitenbeek'*. Wageningen, Alterra, rapport 1952, Reeks Monitoring Stroomgebieden nr. 18-II (<http://edepot.wur.nl/138248>).
15. Knotters, M. en Heijkers, J. (2013). Hoog tijd voor onafhankelijke en objectieve beoordeling van grondwaterinformatie. *Stromingen* 19(3, 4), 135-140.
16. Knotters, M., & Hoogland, T. (2015). *Validatiemeetnet voor grondwaterstands-informatie over verdroging; Fase 1: probleemverkenning en inventarisatie*. Wageningen, Alterra, rapport 2660.