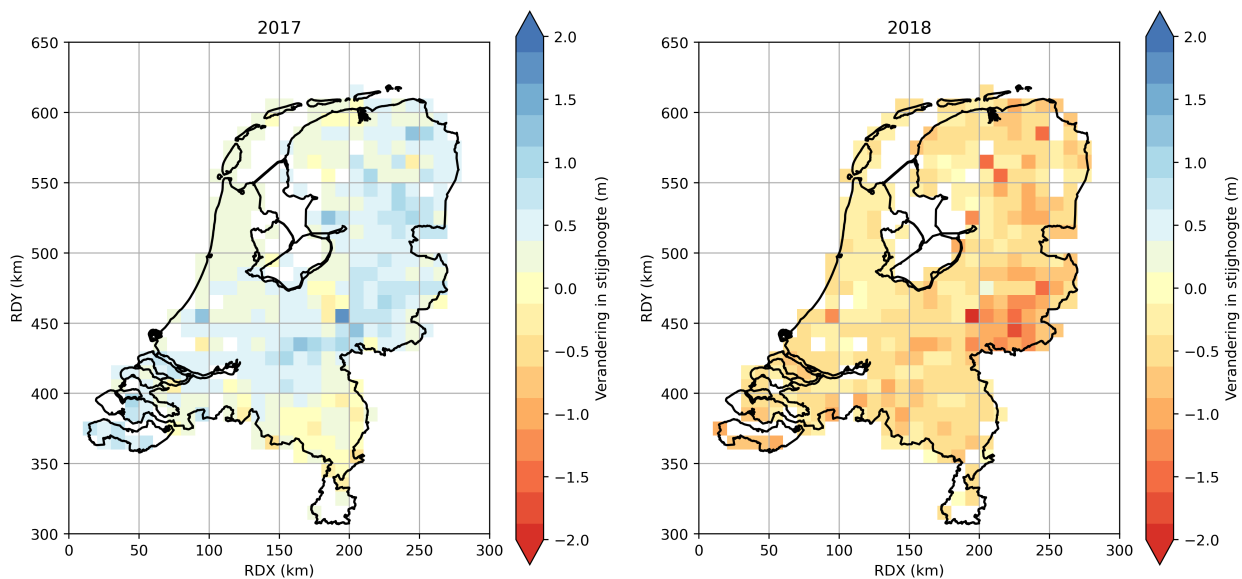


Ontwikkeling werkwijze en toepassing op jaren
2017-2020 met DINO-data

Verandering grondwatervolume per kalenderjaar op basis van stijghoogtemetingen



TNO 2024 R11167 – 17 juni 2024

Verandering grondwatervolume per kalenderjaar op basis van stijghoogtemetingen

Ontwikkeling werkwijze en toepassing op jaren
2017-2020 met DINO-data

Auteur(s)	Dr. Eldert Fokker en Rixt Altenburg MSc.
Rubricering rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	21 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Programmanaam	KarDySaG
Programmanummer	VP 310
Projectnaam	nationale status grondwater
Projectnummer	060.56147/01.03.08

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

©2024 TNO

Samenvatting

Deze studie maakt een inschatting van de fluctuaties in grondwaterstanden en -volumes in de Nederlandse ondergrond voor de kalenderjaren 2017-2020. Door het analyseren van stijghoogtemetingen worden jaarlijkse veranderingen van de grondwaterstand in kaart gebracht en vertaald naar volumeveranderingen van het grondwater. Vanwege onzekerheden in de freatische bergingscoëfficiënt en spatiële verschillen in de grondwaterstand schatten we de nauwkeurigheid in op 25%. Naast de totale volumeverandering worden waardevolle inzichten verkregen over regionale verschillen. De analyse kan gebruikt worden om een representatieve selectie te maken met een beperkt aantal meetpunten, die ingezet kan worden voor het duiden van de actuele grondwatertoestand.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave	4
Lijst van tabellen en figuren	5
1 Inleiding	6
2 Materiaal en methode	7
2.1 Data selectie en curatie	7
2.2 Volumeverandering in grondwatervoorraad	7
3 Resultaten en interpretatie	9
4 Vergelijking met het landelijk hydrologisch model	14
5 Discussie	16
6 Conclusies	19
Referenties	20
Ondertekening	21

Lijst van tabellen en figuren

Tabellen

- 1 Gemiddelde verandering in stijghoogte en totaal volume. Een gemiddelde stijghoogteverandering is berekend per rastercel voor alle beschikbare meetpunten in het 10x10 km² raster, vervolgens is het gemiddelde genomen over alle rastercellen. 11

Figuren

- 1 Histogrammen van gemeten jaarlijkse verandering in stijghoogte voor de jaren 2017 (a), 2018 (b), 2019 (c) en 2020 (d). 9
- 2 Verandering in stijghoogte over het jaar 2018 voor alle monitoringsputten (a) en het gemiddelde berekend per rastercel (b-f). De gebruikte groottes van de rastercellen zijn 100 km (b), 50 km (c), 20 km (d), 10 km (e) en 5 km (f). 10
- 3 Wordt vervolgd op de volgende pagina. 12
- 3 Gemiddelde verandering in de grondwaterstand (linker kolom) en hun standaarddeviaties (rechter kolom) voor rastercellen van 10x10 km² in de jaren 2017 (a,b), 2018 (c,d), 2019 (e,f) en 2020 (g,h). 13
- 4 Jaarlijkse volumeverandering van de Nederlandse grondwatervoorraad, berekend op basis van metingen van de freatische grondwaterstand. De kleuren geven aan met welke rastergrootte (in meters) de gemiddelde stijghoogte is berekend, de zwarte curve toont de volumeverandering op basis van een gemiddelde stijghoogteverandering van alle meetpunten en de bruine curve laat de volumeverandering zien op basis van het landelijk hydrologisch model. 13
- 5 Vergelijking tussen de gemiddeldebepaling van stijghoogteveranderingen zoals beschreven in Sectie 2.2 (linker kolom) en peilveranderingen zoals gemodelleerd in het landelijk hydrologisch model (middelste en rechter kolom). De rechter kolom laat het LHM zien in de oorspronkelijke resolutie van 250x250 m². In de middelste kolom is de resolutie verlaagd tot 10x10 km², voor een nauwkeuriger vergelijking met de stijghoogteveranderingen in de linker kolom. De rijen laten veranderingen zien over de jaren 2017 tot 2020. 15

1 Inleiding

Zoetwatervoorraden staan wereldwijd in de belangstelling (bijv. WMO 2016; Jasechko e.a. 2024). Grondwater vormt daar een belangrijk onderdeel van en veranderingen in grondwater hoeveelheden kunnen worden beoordeeld aan de hand van grondwaterstijghoogtemetingen (Sterckx, Gerges en Lictevout 2023).

Het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) organiseerde op 27 september 2022 de werkbijeenkomst 'Water in de Nederlandse economie', waarbij ook TNO Geologische Dienst Nederland (TNO-GDN) betrokken was (Baas 2022). Het CBS voerde een project voor Eurostat uit waarin een eenvoudige waterbalans van Nederland was opgesteld conform het systeem van Milieurekeningen en Waterrekeningen van het CBS. In de waterbalans werden alle waterstromen per jaar gekwantificeerd en werd de verandering van de hoeveelheid water in Nederland als sluitpost gebruikt. Dit leverde voor het droge jaar 2018 een toename van de Nederlandse watervoorraad op (Berkel e.a. 2022). Deze uitkomst is hydrologisch verbazingwekkend omdat 2018 zo droog was, maar laat zich makkelijk verklaren doordat deze berekend werd als verschil tussen twee veel grotere totalen waarvan sommige posten ruwe schattingen waren.

Een voor de hand liggend verbeterpunt is om ook de verandering van de Nederlandse watervoorraad te kwantificeren en het totaal van de waterbalans te gebruiken om meer inzicht te krijgen in de onzekerheid ervan. Dit sloot aan bij een bestaande wens om in het verlengde van grondwaterstanden-in-beeld (<https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld>) en grondwaterkwaliteit-in-beeld (<https://www.grondwatertools.nl/gwatlas>) jaarlijks een overzicht van de status van het Nederlandse grondwater te publiceren op <https://www.grondwatertools.nl>.

Naar aanleiding van de workshop is een eerste snelle inschatting gemaakt van de volumeveranderingen voor 2017, 2018 en 2019. Hierbij lag de nadruk op volumeveranderingen van het grondwater, aangezien het oppervlak van binnenwater relatief klein is ten opzichte van het landoppervlak. Bovendien wordt in veel gevallen het peil van oppervlaktewater constant gehouden door water weg te pompen of juist te stuwen. Dit geldt onder andere voor polders, het IJsselmeer en de Maas.

Voor de inschatting van volumeveranderingen is gebruik gemaakt van de grondwaterstijghoogtes van grondwaterstanden-in-beeld. De hoeveelheid water die kan worden opgeslagen als de grondwaterstand of de waterdruk wordt verhoogt, wordt beschreven met, respectievelijk, de freatische of elastische bergingscoëfficiënt. Omdat de elastische bergingscoëfficiënt vele malen kleiner is, beschouwen we alleen de freatische bergingscoëfficiënt.

Binnen het vraaggestuurde programma KarDySaG is ruimte gemaakt om een methode te ontwikkelen waarmee deze verandering beter gekwantificeerd kan worden inclusief de bandbreedte. De gedachte hierbij is dat dit ook inzicht biedt om een beperkt aantal peilbuizen aan te wijzen die samen representatief zijn voor de grondwaterkwantiteitssituatie in Nederland en daarmee waterbeheer en waterbeleid beter te ondersteunen.

In dit rapport staan twee vragen centraal:

- Hoe groot was de volumeverandering van grondwater voor de kalenderjaren 2017-2020?
- Hoe kan dat het best bepaald worden uitgaande van de gemeten stijghoogtes?

2 Materiaal en methode

Om te bepalen hoe het grondwatervolume jaarlijks verandert, gebruiken we metingen van de stijghoogte uit de DINO-database die ook worden weergegeven op <https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld>. Door metingen in twee opeenvolgende winters met elkaar te vergelijken, kunnen we een beeld vormen van het jaarlijkse grondwaterverlies of -winst per regio. Deze sectie beschrijft de werkwijze om tot een jaarlijkse volumeverandering te komen, evenals de bijbehorende statistische verdelingen.

2.1 Data selectie en curatie

Omdat niet alle stijghoogtedata de grondwaterstand representeren of bruikbaar zijn voor het berekenen van een jaarlijkse volumeverandering, selecteren we de data op basis van twee criteria: datum en diepte.

De berekening van jaarlijkse volumeveranderingen vereist metingen met een interval van een jaar. Daarom is er gekozen voor metingen die zo dicht mogelijk bij 1 januari liggen, maar niet langer dan een maand eerder of later. Peilbuizen waarvoor tussen 1 december en 31 januari geen metingen beschikbaar zijn, worden niet meegenomen in de analyse.

De filterdiepte van een peilbuis bepaalt of de gemeten stijghoogte representatief is voor de grondwaterstand. Dit is het geval als het filter zich in hetzelfde watervoerend pakket bevindt als de diepte waarop de verzadigde zone overgaat in de onverzadigde zone, de zogenoemde freatische grondwaterstand. Het landelijk hydrologisch model (LHM) geeft informatie over de diepte van verschillende watervoerende pakketten. Op de meeste plaatsen in Nederland bevindt de grondwaterspiegel zich in het eerste watervoerend pakket van het LHM. Daarom selecteren we stijghoogtemetingen van peilbuizen met een filter in deze laag. Data uit het tweede watervoerend pakket kunnen mogelijk de data uit het eerste pakket aanvullen.

Grondwatermonitoringsputten zijn gekoppeld aan een NITG-nummer, de identificatie van een put in de DINO-database. De koppeling tussen deze identificatie en de watervoerende pakketten van het LHM is overgenomen uit grondwaterstanden-in-beeld. Via het NITG-nummer selecteren we alle peilbuizen met filters in het eerste watervoerend pakket van het LHM.

2.2 Volumeverandering in grondwatervoorraad

Deze sectie beschrijft hoe de volumeverandering van grondwater in de Nederlandse ondergrond kan worden bepaald. We beschrijven hoe we komen tot een gewogen gemiddelde verandering in stijghoogte en hoe de stijghoogte de grondwatervoorraad beïnvloedt. Met deze kennis berekenen we de totale volumeverandering van het Nederlandse grondwater.

Voor de geselecteerde metingen berekenen we de verandering in stijghoogte ten opzichte van het vorige jaar. Aangezien de peilbuizen niet evenredig zijn verdeeld over Nederland, geeft een gemiddelde stijghoogteverandering mogelijk een vertekend beeld. Voor een gebalanceerde waarde is het nodig om een gewogen gemiddelde te nemen. We doen dit door eerst Nederland onder te verdelen in een raster. Alle meetpunten worden op basis

van locatie toegekend aan een rastercel en vervolgens wordt per rastercel de gemiddelde stijghoogteverandering berekend inclusief standaarddeviatie. De standaarddeviatie geeft mogelijk inzicht in afwijkende waarden van de gemiddelde stijghoogteverandering. Als laatste stap wordt er een gemiddelde genomen over alle rastercellen die een waarde bevatten. Dit is mogelijk een betere afspiegeling van de gemiddelde stijghoogteverandering in de Nederlandse ondergrond. We variëren de grootte van de rastercellen van zijden van 5 tot 100 km.

De gemiddelde stijghoogteverandering moet nu worden omgezet naar een verandering in grondwatervolume. Grondwater bevindt zich in de poriën tussen het sediment. De freatische bergingscoëfficiënt geeft weer hoeveel volume water kan worden opgenomen in de ondergrond door een stijging of daling van de grondwaterstand. De bergingscoëfficiënt is kleiner dan de porositeit, omdat de niet-verzadigde zone vanwege capillaire krachten ook water bevat. De volumeverandering van de Nederlandse grondwatervoorraad ΔV kan worden berekend met

$$\Delta V = S_y A \Delta h. \quad (2.1)$$

Hier is S_y de freatische bergingscoëfficiënt, A is het landoppervlak van Nederland en Δh is de gemiddelde verandering in stijghoogte. Bij een stijging van de grondwaterstand heeft Δh een positieve waarde. Dit zorgt logischerwijs voor een stijging van het grondwatervolume: ΔV heeft ook een positieve waarde.

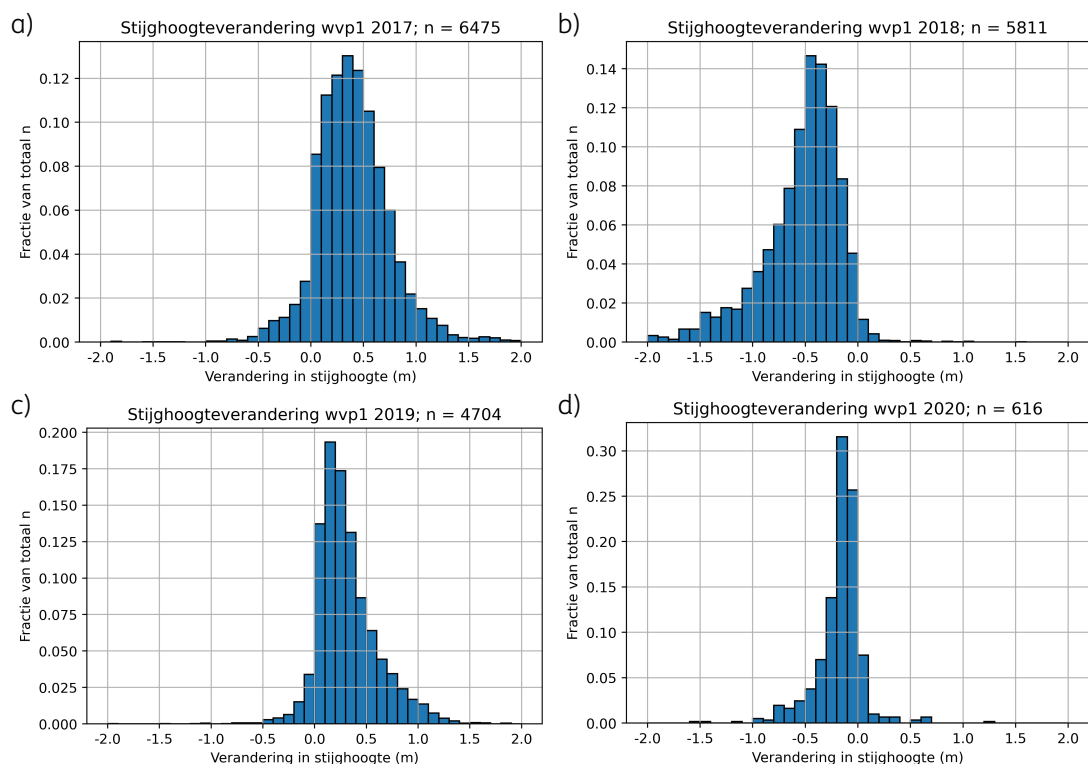
Hoeveel een stijging van het grondwaterniveau bijdraagt aan het grondwatervolume hangt af van het type ondergrond. Typische waarden voor de freatische bergingscoëfficiënt variëren van 0.01 voor klei tot 0.35 voor grind (Fitts 2002). Voor deze studie is gekozen voor een freatische bergingscoëfficiënt van 0.15, hoewel dit lokaal kan verschillen. De totale volumeverandering wordt dus berekend door de gemiddelde verandering in stijghoogte te vermenigvuldigen met een freatische bergingscoëfficiënt van 0.15 en het landoppervlak van Nederland, $A=33893 \text{ km}^2$.

3 Resultaten en interpretatie

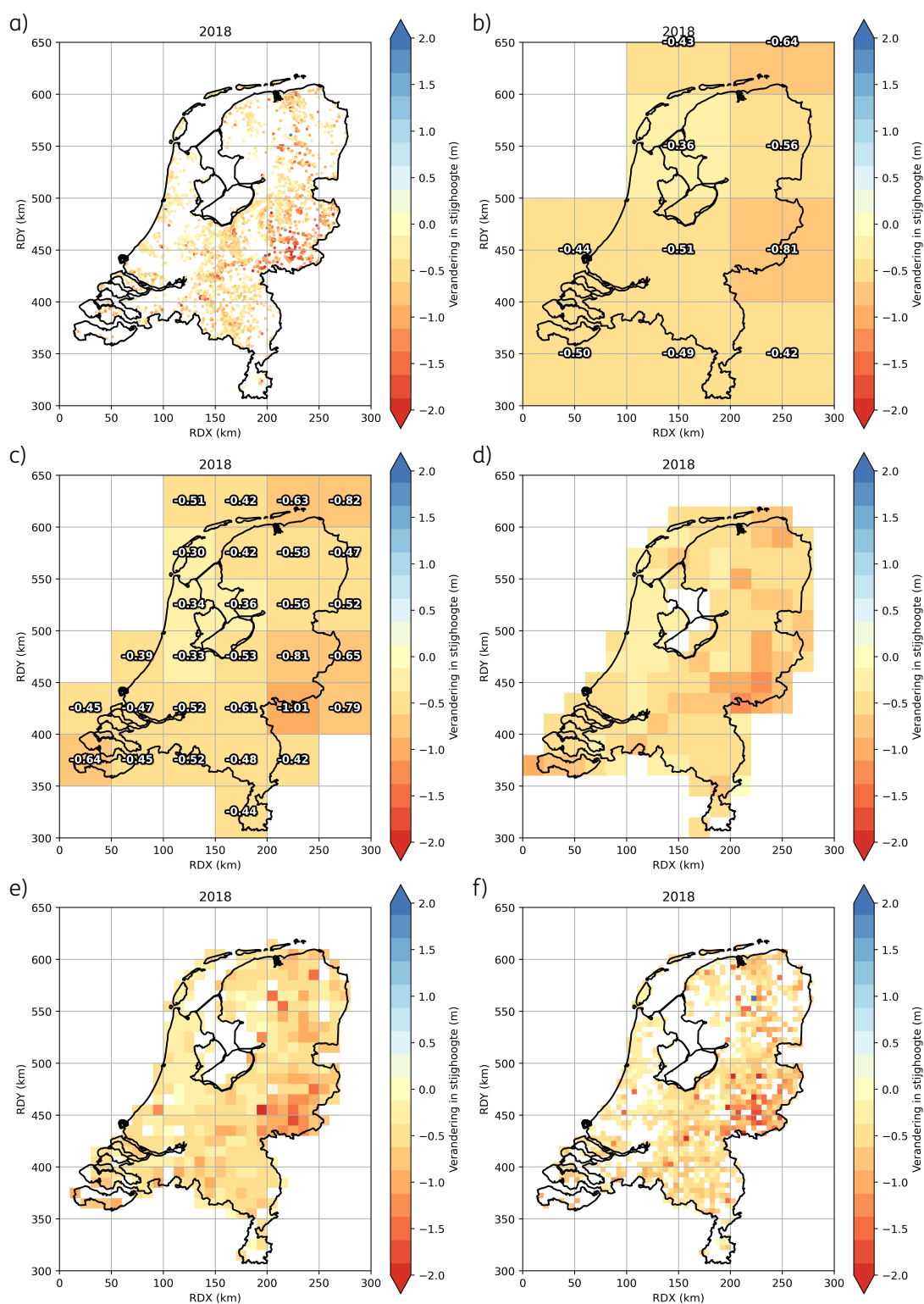
Het volume van grondwater in de Nederlandse bodem verandert door de seizoenen. Door het vergelijken van grondwaterstanden brengen we in kaart hoe het volume van de grondwater-voorraad verandert.

Figuur 1 laat histogrammen zien van jaarlijkse veranderingen in stijghoogte. Elke staaf laat zien hoe groot deel van de peilbuizen een bepaalde verandering heeft in de grondwaterstand. Het histogram laat bijvoorbeeld zien dat de grondwaterstand in 2018 in 15% van de peilbuizen daalde met 0.4 tot 0.5 m. In 2017 steeg de grondwaterstand in de meeste peilbuizen met 0 tot 0.7 m, terwijl het peil in 2018 in vrijwel alle peilbuizen daalde.

De jaarlijkse stijghoogteverandering is gevisualiseerd in Figuur 2 per monitoringsput (a) en als gemiddelde per rastercel (b-f). Hoewel het gemiddelde van de stijghoogteverandering in grotere rastercellen niet veel verschilt van de kleinere rastercellen, laten de kleinere rastercellen veel meer detail zien. Zo wordt in (e) en (f) duidelijk dat de grondwaterstand sterk daalde in De Achterhoek, een gebied dat gevoelig is voor droogte. De rastergrootte van 10x10 km² geeft voldoende detail om zulke verschillen te onderscheiden en heeft relatief weinig rastercellen zonder metingen. Het valt op dat er geen metingen beschikbaar zijn in de provincie Flevoland.



Figuur 1: Histogrammen van gemeten jaarlijkse verandering in stijghoogte voor de jaren 2017 (a), 2018 (b), 2019 (c) en 2020 (d).



Figuur 2: Verandering in stijghoogte over het jaar 2018 voor alle monitoringsputten (a) en het gemiddelde berekend per rastercel (b-f). De gebruikte groottes van de rastercellen zijn 100 km (b), 50 km (c), 20 km (d), 10 km (e) en 5 km (f).

Jaar	Verandering in stijghoogte (m)	Volumeverandering (10^9 m^3)
2017	0.39	2.0
2018	-0.53	-2.7
2019	0.29	1.5
2020	-0.18	-0.9

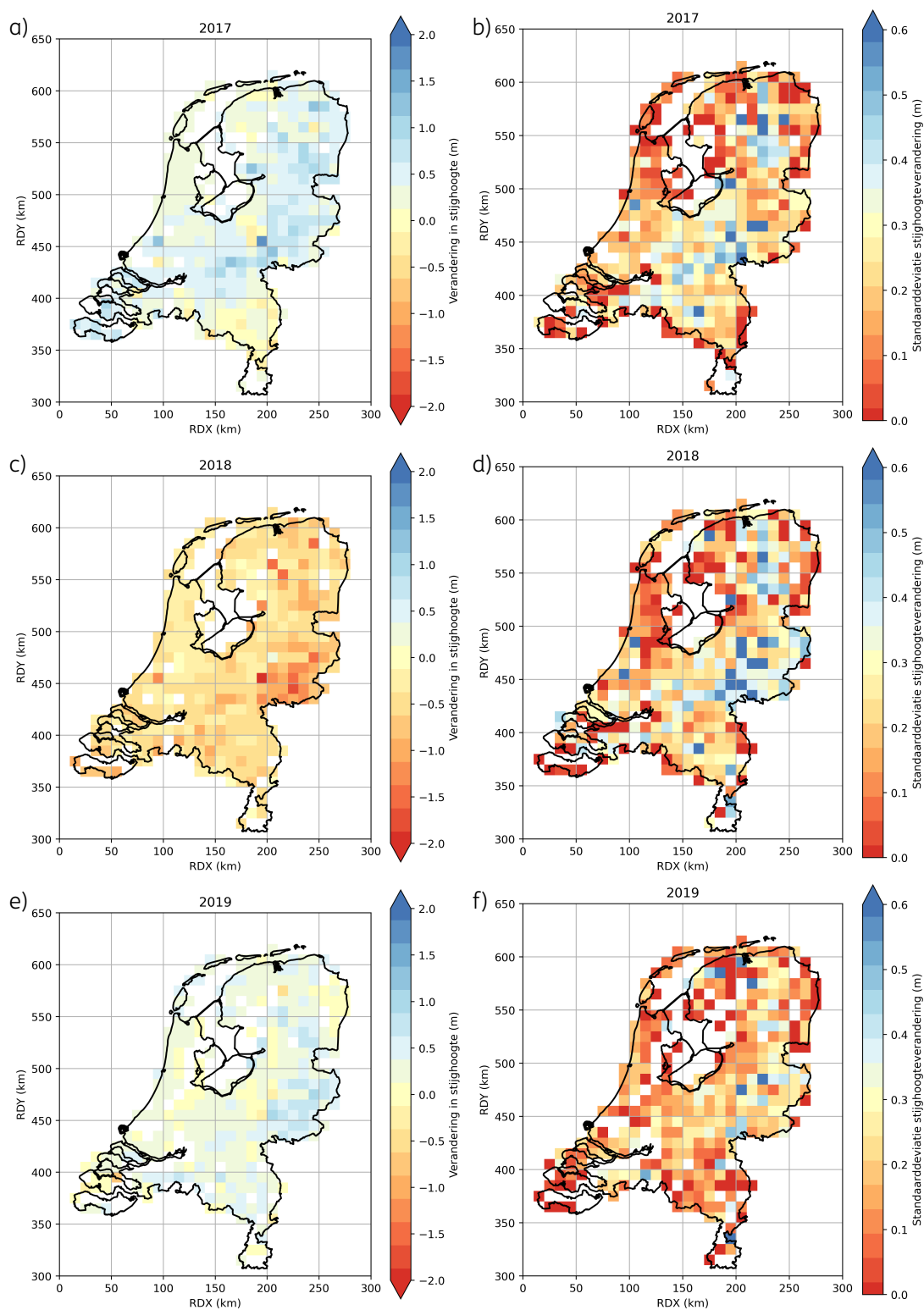
Tabel 1: Gemiddelde verandering in stijghoogte en totaal volume. Een gemiddelde stijghoogteverandering is berekend per rastercel voor alle beschikbare meetpunten in het $10 \times 10 \text{ km}^2$ raster, vervolgens is het gemiddelde genomen over alle rastercellen.

Figuren 3a, c, e, en g tonen de gemiddelde stijghoogteveranderingen voor de jaren 2017-2020 voor een rastergrootte van $10 \times 10 \text{ km}^2$. Hieruit blijkt dat in 2017 de grondwaterstand gemiddeld steeg met 0.39 m. Het gebied rond de Waal springt er hier uit vanwege een hoge rivierstand die het grondwater rond de Waal aanvulde in de winter van 2017-2018. In 2018 daalde de grondwaterstand gemiddeld met 0.53 m, met uitschieters tot 2 m daling in de Achterhoek. 2019 was weer een natter jaar en zorgde voor een gemiddelde stijging van 0.29 m. De verandering berekend voor 2020 is gebaseerd op veel minder metingen (616) dan voor de andere jaren (4704 tot 6475). Uit dit beperkt aantal metingen blijkt een gemiddelde daling van 0.18 m. Tabel 1 laat een overzicht zien van de gemiddelde verandering.

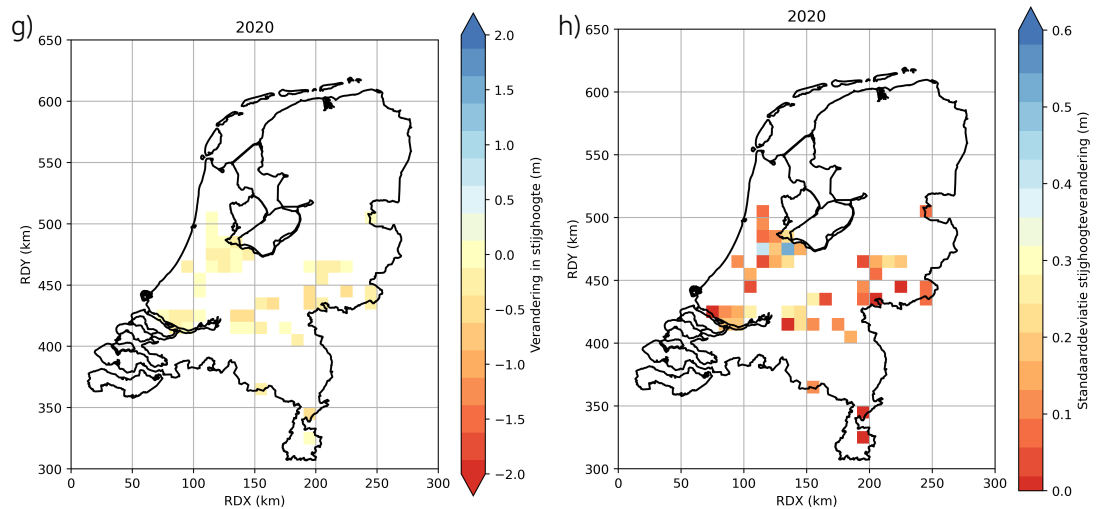
De standaarddeviaties van stijghoogteveranderingen in het $10 \times 10 \text{ km}^2$ raster worden weergegeven in Figuur 3b, d, f en h. De standaarddeviatie laat de spreiding van de verdeling zien van alle meetpunten in een cel. Aan de ene kant is dit een indicatie van de meetonzekerheid van de stijghoogteverandering, aan de andere kant wijst de standaarddeviatie op de spatiële variabiliteit. Een lage standaarddeviatie duidt op een lage onzekerheid en weinig variatie binnen een $10 \times 10 \text{ km}^2$ cel, maar een hoge standaarddeviatie kan beide worden verklaard door een grote meetonzekerheid en een grote spatiële variabiliteit.

Opmerkelijk in Figuur 3 is het gebied rond de Waal, waar relatief hoge standaarddeviaties worden gevonden (blauw). De rivierstand van de Waal is de grootste invloed op grondwaterstand dicht bij de Waal, terwijl de gebieden verder van de Waal het meer worden beïnvloed door plaatselijke neerslag en verdamping. Deze onafhankelijke systemen komen rond de Waal in dezelfde cellen terecht, wat zorgt voor grotere standaarddeviaties. In 2018 zien we in de Achterhoek een sterke daling van de grondwaterstand (Figuur 3c). In het verleden zijn hier veel kanalen en sloten aangelegd voor een efficiënte ontwatering, wat het gebied kwetsbaar maakt voor droogte. De standaarddeviatie (Figuur 3d) is aan de noordelijke en westelijke randen van dit gebied hoger, wat duidt op een grens van twee onafhankelijke hydrologische systemen. Verder valt in Figuur 3 de regio Friesland-Groningen op, waar cellen met hoge standaarddeviaties zijn verspreid over het gebied. Deze regio bevat een grote hydrologische heterogeniteit, waardoor de respons op neerslag en verdamping lokaal kan verschillen. Dit kan zorgen voor grote plaatselijke verschillen in de grondwaterstand, en dus een grotere standaarddeviatie. In Noord Holland vinden we juist lage waarden voor de standaarddeviatie (rood-oranje). In deze regio wordt de grondwaterstand grotendeels kunstmatig constant gehouden, wat zorgt voor een lage spatiële variabiliteit. In combinatie met nauwkeurige metingen zorgt dit voor lage standaarddeviaties.

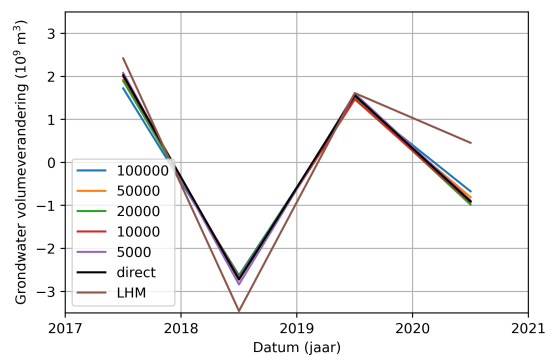
In de laatste stap berekenen we de volumeverandering van het Nederlandse grondwater zoals beschreven in Sectie 2.2. Tabel 1 laat de volumeverandering zien, berekend met een rastergrootte van $10 \times 10 \text{ km}^2$. Figuur 4 vergelijkt de volumeverandering voor de kalenderjaren 2017-2020 (horizontale as), berekend met data uit het eerste watervoerend pakket van het LHM, voor rastergroottes van 5×5 tot $100 \times 100 \text{ km}^2$ (verschillende kleuren, zie legenda) en zonder het gebruik van een raster (zwart, direct gemiddelde). Alle berekeningen laten dezelfde trend zien: grondwaterwinst in de jaren 2017 en 2019, en grondwaterverlies in



Figuur 3: Wordt vervolgd op de volgende pagina.



Figuur 3: Gemiddelde verandering in de grondwaterstand (linker kolom) en hun standaarddeviaties (rechter kolom) voor rastercellen van 10x10 km² in de jaren 2017 (a,b), 2018 (c,d), 2019 (e,f) en 2020 (g,h).



Figuur 4: Jaarlijkse volumeverandering van de Nederlandse grondwatervoorraad, berekend op basis van metingen van de freatische grondwaterstand. De kleuren geven aan met welke rastergrootte (in meters) de gemiddelde stijghoogte is berekend, de zwarte curve toont de volumeverandering op basis van een gemiddelde stijghoogteverandering van alle meetpunten en de bruine curve laat de volumeverandering zien op basis van het landelijk hydrologisch model.

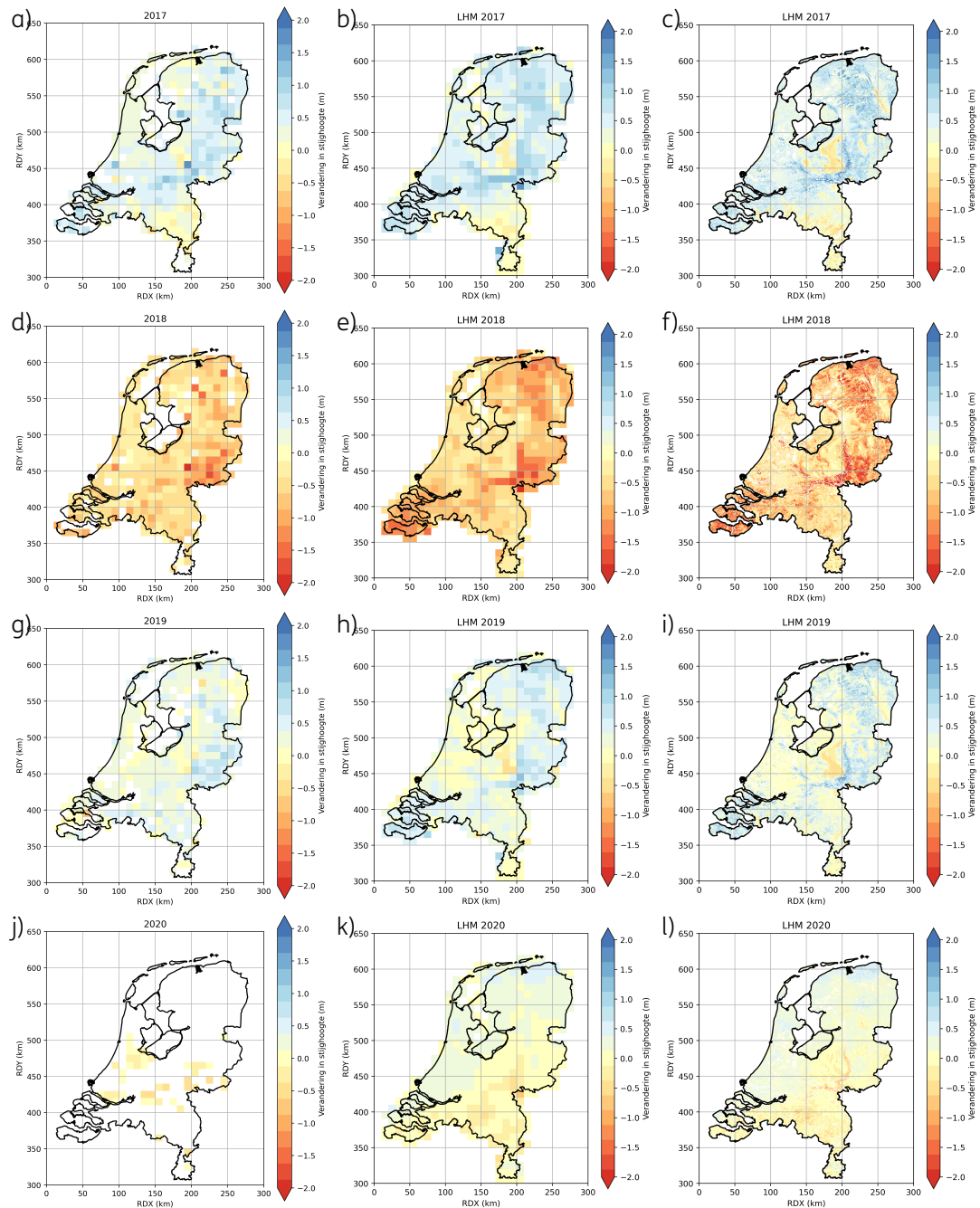
de jaren 2018 en 2020. De spreiding van de verschillende resultaten geeft een indicatie van de nauwkeurigheid. Met name de waardes in 2020 laten een grote spreiding zien. De berekende volumeverandering is voor dit jaar gebaseerd op metingen uit zo'n klein gebied dat deze waarschijnlijk niet representatief is voor heel Nederland. Het is daarom van belang om voor deze periode meer gegevens toe te voegen aan de berekening. Het is opmerkelijk dat er weinig verschil zit tussen de verschillende methoden. Op basis van de berekende volumeveranderingen is geen systematisch verschil af te leiden tussen het directe gemiddelde van alle metingen (zwarte curve) en de aanpak met verschillende grootten rastercel.

4 Vergelijking met het landelijk hydrologisch model

In wetenschappelijk onderzoek is het wenselijk om resultaten te vergelijken met onafhankelijke metingen of modellen. Het landelijk hydrologisch model (LHM) gebruikt data van neerslag, verdamping en rivierpeilen om de grondwaterstanden en -stromingen te berekenen. Figuur 5 vergelijkt de stijghoogteverandering berekend volgens de methode beschreven in Sectie 2.2 (linker kolom) met de grondwaterstanden van LHM4.3 (middelste en rechter kolom). In de rechter kolom wordt het LHM weergegeven in de oorspronkelijke resolutie van 250x250 m². Voor een goede vergelijking met de stijghoogteveranderingen zoals die zijn bepaald in deze studie hebben we in de resolutie van het LHM verlaagt tot 10x10 km² (middelste kolom).

Bij de vergelijking met het landelijk hydrologisch model vallen een aantal dingen op. De kenmerken van verschillende hydrologische systemen worden ook duidelijk zichtbaar in het LHM, bijvoorbeeld de droogtegevoeligheid in de Achterhoek en het door rivierpeilen gedomineerde systeem in het gebied rond de Waal en de IJssel. Ook vallen er verschillen op tussen het LHM en de gebiedsgemiddelde verandering in grondwaterstand. Het is opvallend dat het LHM in het gebied de Veluwe dalingen van de grondwaterstand verwacht in drie opeenvolgende jaren. Wij nemen deze langdurige dalingen niet waar in Figuur 5a,d,g, hoewel de onafhankelijkheid van het Veluwe hydrologische systeem wel zichtbaar wordt in Figuur 2f. Het Veluwe hydrologische systeem gedraagt zich onafhankelijk van het IJsselgebied, wat ook zichtbaar wordt in grote verschillen in responstijd van het grondwater op neerslag en verdamping (zie <https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld/>; Zaadnoordijk en Lourens 2019). Dit kan worden verklaard door verticaal georiënteerde kleilagen tussen de IJssel en de Veluwe, die een natuurlijke grondwater barrière vormen tussen de twee gebieden. In deze regio liggen meetpunten verder uit elkaar, waardoor het mogelijk verstandig is om meetpunten uit het tweede watervoerend pakket toe te voegen. Ook is het opvallend dat de veranderingen in stijghoogte in Noord Nederland en in Zeeland structureel kleiner zijn dan het LHM voorspelt. Dit geldt beide voor stijgingen en dalingen van de grondwaterstand. Het LHM heeft in Zeeland een betere dekking, maar het is verstandig om de verschillen tussen deze modellen in de toekomst te onderzoeken.

Ter vergelijking van het eindresultaat, berekenen we de jaarlijkse volumeverandering op basis van het LHM. Voor elke rastercel van 250x250 m² gebruiken we de jaarlijkse stijghoogteverandering om een volumeverandering te bepalen. De som van alle gerasterde volumeveranderingen geeft vervolgens de totale volumeverandering weer van het Nederlandse grondwater (Figuur 4, bruin). Het LHM geeft in 2017 en 2018 een grotere volumeverandering weer dan de hier ontwikkelde methode. Dit heeft zijn oorsprong in de structureel grotere veranderingen in Zeeland en Noord Nederland voor het LHM. In 2020 valt de volumeverandering veel hoger uit, vanwege het ontbreken van stijghoogtedata in het grootste gedeelte van Nederland (Figuur 5j). Voor een nauwkeurige vergelijking in 2020 is het nodig om meer stijghoogtedata te verzamelen.



Figuur 5: Vergelijking tussen de gemiddeldebepaling van stijghoogteveranderingen zoals beschreven in Sectie 2.2 (linker kolom) en peilveranderingen zoals gemodelleerd in het landelijk hydrologisch model (middelste en rechter kolom). De rechter kolom laat het LHM zien in de oorspronkelijke resolutie van 250x250 m². In de middelste kolom is de resolutie verlaagd tot 10x10 km², voor een nauwkeuriger vergelijking met de stijghoogteveranderingen in de linker kolom. De rijen laten veranderingen zien over de jaren 2017 tot 2020.

5 Discussie

In deze studie zijn de volumeveranderingen van de Nederlandse grondwatervoorraad berekend voor de kalenderjaren 2017-2020. Hiervoor is gebruikgemaakt van stijghoogtemetingen uit de DINO-database van TNO - Geologische Dienst Nederland en een raster waarvan de grootte varieerde van 5x5 tot 100x100 km². Hiervoor zijn de meetpunten uit de DINO-database geselecteerd die in het eerste watervoerend pakket van het landelijk hydrologisch model (LHM) liggen. Eerst is per jaar de gemiddelde verandering in stijghoogte berekend, wat vervolgens is omgezet in een nationale volumeverandering. Hiervoor hebben we een freatische bergingscoëfficiënt aangenomen van 0.15 en rekening gehouden van een landoppervlak van 33893 km². Deze sectie vergelijkt verschillende aanpakken om tot een realistische schatting van de volumeverandering te komen, en overweegt verschillende keuzes.

Het landelijk gemiddelde van de verandering in stijghoogte is berekend in twee stappen. Vanwege de ongelijkmatige verdeling van monitoringsputten geeft een direct gemiddelde over alle monitoringsputten mogelijk een vertekend beeld van de grondwaterstand. Om dit te kwantificeren berekenen we eerst een gemiddelde stijghoogteverandering per rastercel en nemen we vervolgens een gemiddelde over alle rastercellen. Als alternatief zou een gewogen gemiddelde kunnen worden genomen, waarbij de meting van elke peilbuis een weging krijgt op basis van het aantal metingen in de buurt. Een grondwaterstand van een peilbuis in een gebied met veel andere monitoringsputten fungeert in deze aanpak als meting voor een relatief klein oppervlak, terwijl een afgezonderde peilbuis een groter gebied moet vertegenwoordigen. Onze aanpak is een ruwe benadering van zo'n gewogen gemiddelde.

In de analyse is er gevarieerd met de grootte van de rastercellen. Voor het vergelijken van verschillende gebieden van Nederland is het van belang om relatief kleine rastercellen te gebruiken tot 10x10 km (Figuur 2), maar voor de gemiddelde volumeverandering van Nederland is er geen consistent verschil. De berekeningen met alle rastergroottes laten dezelfde trend zien: grondwaterwinst in 2017 en 2019, en grondwaterverlies in 2018 en 2020. Wel is er een spreiding in de orde van 10% voor de volumes bepaald met rastercellen van 5, 10, 20 en 50 km. De volumeverandering uit de directe interpolatie ligt binnen deze spreiding. Op basis van met het LHM gesimuleerde stijghoogten zijn ook nationale volumeveranderingen berekend. Deze wijken ruim 20% af voor 2017 en 2018. Vanwege de onvolledige dekking van de metingen in 2020 wijkt deze waarde veel meer af. De veranderingen voor 2019 liggen maar 6% uit elkaar. Het LHM is niet gekalibreerd op de jaarlijkse volumeverandering, zodat onduidelijk is hoe betrouwbaar de LHM-waarden zijn. Hiervoor is het zinvol om de resultaten te vergelijken met regionale grondwatersimulaties met hogere resolutie. Het grondwatermodel voor de provincie Utrecht (UGM) is daarvoor een goede kandidaat omdat aan een update gewerkt wordt, en deze provincie een verscheidenheid aan grondwatersystemen kent met onder andere diepe polders, de Utrechtse heuvelrug en de Lek.

De berekende nationale volumeveranderingen uit het directe gemiddelde van alle metingen blijken binnen de spreiding te liggen van de verschillende groottes van rastercellen (Figuur 4). Daarom is een verrastering niet nodig voor het berekenen van de nationale volumeverandering van het grondwater, met de huidige nauwkeurigheid van de berekening. Een verrastering is wel nuttig voor het bestuderen van lokale verschillen. Een interessant alternatief voor een verrastering of een gemiddelde over alle meetpunten is het gemiddelde van een beperkt aantal meetpunten. Een dergelijke selectie kan ook voor andere doelen gebruikt worden, zoals het beschrijven van de actuele grondwatersituatie (natheid- of droogtetoestand) en inzicht in

de variatie van de grondwatersystemen. Het bevestigt de representativiteit van de selectie als hieruit ook de jaarlijkse volumeverandering van het grondwater bepaald kan worden.

Veranderingen in stijghoogte zijn door middel van de freatische bergingscoëfficiënt gerelateerd aan volumeveranderingen. In deze studie is gekozen voor een freatische bergingscoëfficiënt van 0.15. De bergingscoëfficiënt hangt af van het type ondergrond en varieert van 0.01 voor klei tot 0.35 voor grind (Fitts 2002). Voor een nauwkeuriger resultaat kan men per gebied de bergingscoëfficiënt bepalen op basis van lithologie en hiermee de volumeveranderingen per gebied berekenen, voordat een landsgemiddelde wordt bepaald.

De berekening van grondwatervolumeverandering is uitgevoerd met metingen gebruikt uit het eerste watervoerend pakket van het LHM. Voor gebieden met een lage datadichtheid, zoals de Veluwe, kan het goed zijn om de bestaande data uit het eerste watervoerend pakket aan te vullen met data uit het tweede watervoerend pakket. De stijghoogte in het tweede watervoerend pakket wordt alleen indirect wordt beïnvloed door de grondwaterstand. Omdat de stijghoogte in de tweede watervoerende laag langzamer verandert, zijn de jaarlijkse veranderingen kleiner. Het gebruik van data uit alleen deze laag leidt tot een onderschatting van gemiddeld 5 tot 10%. In gebieden waar geen weerstand is tussen het eerste en tweede watervoerend pakket geldt dit niet en kan het toch waardevol zijn om deze data toe te voegen.

Diverse factoren beïnvloeden de grondwaterstand. Menselijke interventie, zoals het reguleren van de grondwaterspiegel en wateronttrekkingen, speelt hierbij een rol. Echter, natuurlijke elementen, zoals neerslag en verdamping, hebben een grotere impact op de grondwaterstand. Uit de metingen en modellen van het KNMI blijkt dat het jaar 2018 in De Bilt bijzonder droog was; ten opzichte van andere jaren viel er 400 mm minder neerslag, terwijl de verdamping nagenoeg constant bleef. De toevoer van grondwater was dus ongeveer 400 mm lager dan in andere jaren. Als de toevoer de enige verandering is voor het jaar 2018, zou dit met een freatische bergingscoëfficiënt van 0.15 zorgen voor een daling van 2.7 m in De Bilt. Zulke waardes vinden we in Figuur 4 wel in De Achterhoek, maar niet in De Bilt. Dit is daarom een indicatie dat ook de grondwaterafvoer kleiner was in 2018. Deze observaties bevestigen dat de toename van het watervolume in Nederland die het CBS berekende als sluitpost van alle waterstromen per jaar (Berkel e.a. 2022) niet plausibel is.

Uit Figuren 2 en 3 blijkt dat niet alleen de nationale verandering in grondwatervoorraad kan worden berekend, ook voor kleinere gebieden kunnen veranderingen in de grondwaterstand worden berekend. Details worden duidelijk weergegeven: De grote daling van de grondwaterstand in de Achterhoek in 2018, en de afwijkende veranderingen in de trage grondwatersystemen van de Veluwe en Zuid-Limburg. Bij het onderzoeken van regionale ontwikkelingen in de grondwatervoorraad zullen de onzekerheden groter zijn dan voor het nationale volume. De systematische afwijking van de gehanteerde uniforme bergingscoëfficiënt kan groter zijn en de ruimtelijke variatie in relatie tot de ligging van de meetpunten kan meer invloed hebben. De standaarddeviatie van de stijghoogteverandering binnen een rastercel geeft van dit laatste een indicatie.

De berekende volumeveranderingen zijn bepaald door verschillen in grondwaterstanden te berekenen tussen het begin van twee opeenvolgende jaren. Dit geeft de verandering weer die in een bepaald jaar optrad. Deze aanpak geeft dan ook niet direct de staat van de Nederlandse grondwatervoorraad weer. Daarvoor is het nodig om cumulatieve veranderingen van meerdere jaren te beschouwen. Om een betere intuïtie te krijgen voor de betekenis van deze veranderingen zou de normale seizoensfluctuatie kunnen dienen als referentie. De dynamiek, gedefinieerd als het verschil tussen de 10- en 90-percentiel is een indicatie van de seizoensgebonden veranderingen. Het gemiddelde verloop binnen een jaar wordt weer-

gegeven in een regimecurve. Op de website grondwaterstanden-in-beeld (TNO-GDN 2024) wordt voor Nederlandse meetpunten met voldoende data de dynamiek en de regimecurve beschikbaar gemaakt (zie ook Zaadnoordijk, Bus e.a. 2019). De verandering over een lange periode kan zo in het perspectief geplaatst worden van de naar verwachting veel grotere seizoensveranderingen.

In dit rapport zijn de ontwikkelingen onderzocht van het grondwatervolume in de periode tussen 2017 en 2020. Tot de winter van 2020 zijn er metingen beschikbaar voor veel meetpunten. Voor eind 2020 waren veel minder data beschikbaar, wat resulteerde in een slechtere spreiding over het land. Dit heeft te maken met de overstap van de registratie van meetreeksen in de DINO-database naar Basisregistratie Ondergrond (BRO). Als deze overstap compleet is, kan de hier beschreven aanpak worden toegepast op data uit recentere jaren.

In Sectie 4 hebben we een aantal overeenkomsten en verschillen geïdentificeerd tussen het landelijk hydrologisch model en de gemeten en vlakdekkend gemaakte stijghoogteveranderingen. Hoewel dit interessante inzichten oplevert, blijft het een vergelijking tussen twee modellen. Het is dus wenselijk om de berekende volumeveranderingen te kunnen vergelijken met onafhankelijke data. Verschillende mogelijkheden zijn onderzocht.

Naast peilbuismetingen zijn voor het bepalen van veranderingen in grondwaterreserves een aantal indirecte technieken beschikbaar op basis van zwaartekracht, elektrische conductiviteit of seismische snelheden (bijv. Adams e.a. 2022; Carpentier e.a. 2024; Castellazzi e.a. 2016; Fokker e.a. 2023; Frappart en Ramillien 2018; Loon, Kumar en Mishra 2017). Vanwege beperkte resolutie en hogere kosten zijn zulke aanpakken met name relevant in gebieden met weinig directe metingen van grondwaterstanden (bijv. Mao e.a. 2022; Springer e.a. 2023).

Dit rapport laat zien dat de jaarlijkse volumeverandering van het Nederlands grondwater op basis van metingen van de grondwaterstand berekend kan worden met een relatief kleine inspanning. Uit een vergelijking met resultaten van het LHM en de onzekerheid in de freatische bergingscoëfficiënt is het realistisch om uit te gaan van een onzekerheid van 25%. Dit is veel nauwkeuriger dan het berekenen van de volumeverandering als sluitpost op de nationale waterbalans. Zodoende zou het resultaat zelfs gebruikt kunnen worden om zo'n waterbalans te verbeteren.

De bepaling van de veranderingen in grondwaterstanden en -volumes in de Nederlandse ondergrond is relevant in verschillende contexten. In de eerste plaats biedt het algemene informatie voor waterbeheer. In de tweede plaats geven langjarige trends inzicht in de duurzaamheid van het grondwatergebruik. Ook kan op een verfijnde tijdschaal de actuele toestand van het grondwater worden geduid, mogelijk door een droogte-indicator. Hiervoor is het nodig om voor elk gebied een lage grondwaterstand te identificeren die samenhangt met droogte. Mogelijk kan in de toekomst een selectie worden gemaakt van meetpunten die representatief zijn voor de dynamische grondwaterstanden in de Nederlandse ondergrond.

6 Conclusies

Deze studie heeft de jaarlijkse volumeveranderingen van de Nederlandse grondwatervoorraad gekwantificeerd voor de jaren 2017-2020. Een nationaal gemiddelde verandering in de grondwaterstand is bepaald uit stijghoogtemetingen van opeenvolgende jaren, om vervolgens de verandering in grondwatervolume vast te stellen. De berekende volumeveranderingen zijn positief in jaren met relatief veel neerslag ($2.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ in 2017 en $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ in 2019), en negatief in het drogere jaar 2018 ($-2.7 \times 10^9 \text{ m}^3$). De nauwkeurigheid van de berekende veranderingen wordt geschat op 25%. Voor het jaar 2020 zijn niet genoeg metingen beschikbaar voor een representatieve bepaling van de volumeverandering van het grondwater. Het verdient aanbeveling om de nauwkeurigheid nader te onderzoeken en verkleinen.

De gemiddelde verandering van de grondwaterstand is op diverse manieren bepaald. In eerste instantie is een direct gemiddelde genomen van alle stijghoogteveranderingen in peilbuizen met een filter in het eerste watervoerend pakket van het landelijk hydrologisch model. In tweede instantie is gebruik gemaakt van rasters van 5 tot 100 km, waarbij per rastercel een gemiddelde wordt berekend over een kleiner gebied. Het gemiddelde over alle rastercellen dient vervolgens als landelijk gemiddelde. De verschillen tussen de rasters en het directe gemiddelde van alle metingen zijn klein met uitzondering van het raster van 100 km dat ook visueel duidelijk te grof is.

De gepresenteerde methode maakt het mogelijk om met een geringe inspanning een goed beeld te krijgen van de verandering van het grondwatervolume in een jaar. De aanpak is een verbetering ten opzichte van de berekening als sluitpost van een waterbalans met alle jaarlijkse waterstromen. De analyse geeft aanknopingspunten voor het maken van een representatieve selectie met een beperkt aantal representatieve meetpunten, die ook kan worden gebruikt voor het duiden van de actuele grondwatersituatie zodra landelijk telemetrische grondwaterstanden beschikbaar komen via de Basisregistratie Ondergrond.

Referenties

- Adams, Kyra H, John T Reager, Paul Rosen, David N Wiese, Tom G Farr, Shanti Rao e.a. (2022). „Remote sensing of groundwater: current capabilities and future directions”. In: *Water Resources Research* 58.10, e2022WR032219.
- Baas, K. (2022). „Verslag van de workshow Water in de Nederlandse economie”. CBS, Den Haag.
- Berkel, J. van, K. Baas, P. Bogaart, L. Egelmeers, R. Delahaye en S. Schenau (2022). „Water Accounts for the Netherlands”. CBS Statistics Netherlands, Den Haag.
- Carpentier, Stefan, Sijf Meekes, Arnoud Frumau, Manon Verberne, Thibault Candela en Kay Koster (2024). „A Novel Geophysical Method to Monitor Ultra-Shallow Reservoirs: Mapping of Soil Moisture Content in Subsiding Peatlands to Forecast Drought Effects and CO₂ Emissions”. In: *First Break* 42.3, p. 85–91.
- Castellazzi, Pascal, Richard Martel, Devin L Galloway, Laurent Longuevergne en Alfonso Rivera (2016). „Assessing groundwater depletion and dynamics using GRACE and InSAR: Potential and limitations”. In: *Groundwater* 54.6, p. 768–780.
- Fitts, Charles R (2002). *Groundwater science*. Elsevier.
- Fokker, Eldert, Elmer Ruigrok, Rhys Hawkins en Jeannot Trampert (2023). „4D Physics-Based Pore Pressure Monitoring Using Passive Image Interferometry”. In: *Geophysical Research Letters* 50.5, e2022GL101254.
- Frappart, Frédéric en Guillaume Ramillien (2018). „Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review”. In: *Remote Sensing* 10.6, p. 829.
- Jasechko, Scott, Hansjörg Seybold, Debra Perrone, Ying Fan, Mohammad Shamsudduha, Richard G Taylor e.a. (2024). „Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally”. In: *Nature* 625.7996, p. 715–721.
- Loon, Anne F van, Rohini Kumar en Vimal Mishra (2017). „Testing the use of standardised indices and GRACE satellite data to estimate the European 2015 groundwater drought in near-real time”. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 21.4, p. 1947–1971.
- Mao, Shujuan, Albanne Lecointre, Robert D van der Hilst en Michel Campillo (2022). „Space-time monitoring of groundwater fluctuations with passive seismic interferometry”. In: *Nature Communications* 13.1, p. 4643.
- Springer, Anne, Teodolina Lopez, Michael Owor, Frédéric Frappart en Thomas Stieglitz (2023). „The role of space-based observations for groundwater resource monitoring over Africa”. In: *Surveys in Geophysics* 44.1, p. 123–172.
- Sterckx, A., E. Gerges en E. Lictevout (2023). „State of Global Water Resources Report – Quantitative status of groundwater”. IGRAC, Delft.
- TNO-GDN (2024). „Grondwaterstanden-in-beeld. TNO - Geologische Dienst Nederland, <https://www.grondwatertools.nl/gwsinbeeld/>”. bezocht op 13-06-2024.
- WMO (2016). „State of Global Water Resources”. Report WMP-No. 1333, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Zaadnoordijk, Willem Jan, Stefanie AR Bus, Aris Lourens en Wilbert L Berendrecht (2019). „Automated time series modeling for piezometers in the national database of the Netherlands”. In: *Groundwater* 57.6, p. 834–843.
- Zaadnoordijk, Willem Jan en Aris Lourens (2019). „Groundwater dynamics in the aquifers of the Netherlands”. TNO report, 2019 R12031.

Ondertekening

Dr. Eldert Fokker
Auteur

Rixt Altenburg MSc.
Auteur

Dr. ir. Willem Jan Zaadnoordijk
Tweede lezer

Yvonne Schavemaker MSc.
Afdelingshoofd

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl