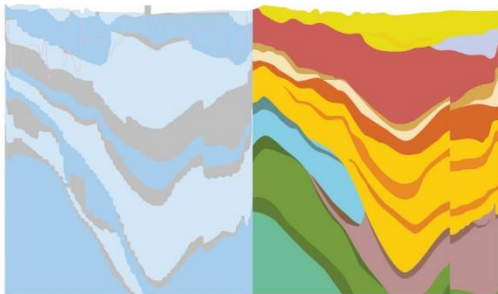


Invloed dynamiek grondwatersysteem op kartering Nationale Grondwater Reserves - Kwantitatieve uitwerking

Deelrapportage 3b van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserve



Invloed dynamiek grondwatersysteem op kartering Nationale Grondwater Reserves - Kwantitatieve uitwerking

Deelrapportage 3b van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserve

Auteur(s)

Gijs Janssen

Rianne Meeusen

Invloed dynamiek grondwatersysteem op kartering Nationale Grondwater Reserves - Kwantitatieve uitwerking

Deelrapportage 3b van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserve

Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Contactpersoon	Reinout Ogilvie
Referenties	Kenmerk: 31174433, Referentie: 4500329490
Trefwoorden	NGR, drinkwatervoorziening, lange termijn, grondwater

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	04-10-2024
Projectnummer	11207846-003
Document ID	11207846-003-BGS-0005
Pagina's	60
Classificatie	
Status	definitief

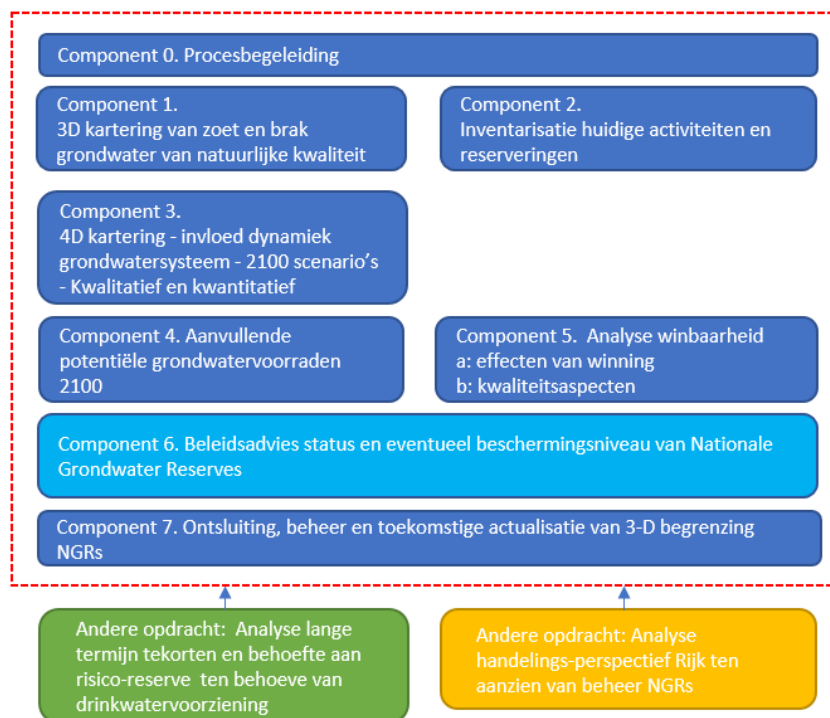
Auteur(s)

	Gijs Janssen	
	Rianne Meeusen	

Samenvatting

In de Beleidsnota Drinkwater (2014) is het concept van Nationale Grondwater Reserves (NGRs) geïntroduceerd met als doel om natuurlijk kapitaal te beschermen ten behoeve van de drinkwatervoorziening in de verre toekomst en in geval van grootschalige en meerjarige crisissituaties. Dit in aanvulling op de Aanvullende Strategische Voorraden (ASVs) waar de provincies verantwoordelijk zijn voor het borgen van de bronnen voor de drinkwatervoorziening op de middellange termijn (2040). Een eerste zeer globale aanzet voor NGR gebieden is opgenomen in de structuurvisie ondergrond (STRONG 2018).

In 2022 heeft het ministerie van Infrastructuur en Water opdracht gegeven aan Deltares en TNO om een gedetailleerd 3D-beeld van de NGRs uit te voeren. Het project is opgedeeld in 7 componenten (zie Figuur 1-1).



Figuur 1-1. Samenvatting van de verschillende componenten van het project en relatie met andere uitgevoerde studies (groen en geel).

Dit document is de rapportage van component 3 (4D-kartering-invloed dynamiek grondwatersysteem - 2100 scenario's) van het project "3D-kartering Nationale Grondwater Reserves". De bouwstenen uit de componenten 1 tot 5 zijn ondersteunend voor het proces dat moet leiden tot een advies voor begrenzing van NGRs met een voorstel voor een gepast beschermingsregime afgestemd op de doelen van de NGR (component 6).

Component 3 heeft als doel om de belangrijkste ontwikkelingen die mogelijk effect hebben op potentiële NGRs in beeld te brengen aan de hand van beschikbare informatie uit bestaande en lopende studies (De Louw et al, 2022) en door middel van kwantitatieve analyses voor een aantal geselecteerde toekomstige ontwikkelingen. Deze ontwikkelingen kunnen invloed

hebben op de boven en ondergrens van een potentiële NGR maar ook de winbaarheid van de NGRs (component 5).

Het doel van deze studie is om op een kwantitatieve wijze inzichtelijk te maken wat het belang is van onderstaande ontwikkelingen voor de kartering van de NGRs;

- Autonome verzilting
- Klimaatverandering
- Zeespiegelstijging
- Bodemdaling
- Verandering grondwateronttrekkingen
- Verandering grondwateraanvulling door veranderend landgebruik en stedelijke ontwikkeling
- Herinrichting watersysteem.

Daarnaast wordt een scenario samengesteld van een combinatie van ontwikkelingen om te onderzoeken welke potentiële NGRs robuust zijn en blijven in de toekomst. In het geval de ontwikkelingen veel invloed hebben op de grenzen en de fluxen van NGRs, dan ligt het namelijk niet voor de hand om deze te selecteren als NGR.

Uit de uitgevoerde berekeningen volgt dat vooral klimaatverandering en de herinrichting van het watersysteem, via respectievelijk een sterke reductie en een sterke toename van de grondwateraanvulling, de grootste impact hebben op het grondwatersysteem. Tevens wordt aangetoond dat de effecten op het zoet-zoutgrensvlak zich vrijwel overal buiten de potentiële NGR-gebieden bevinden (resultaat van “analyse winbaarheid (component 5)”), met uitzondering van enkele zones (voor brakwaterwinning) in Zuid-Holland en de Flevopolders.

Er wordt geconcludeerd dat de beste invulling van de gecombineerde berekeningen bestaat uit twee berekeningen. Deze worden doorgerekend in de component “Analyse winbaarheid” om te komen tot een nadere inperking van de potentiële NGRs:

- A) Een combinatie van de autonome verzilting, zeespiegelstijging en bodemdaling (niet zozeer vanwege hun grote impact maar vooral omdat dit processen zijn die hoe dan ook zullen optreden), gecombineerd met klimaatverandering volgens het Hd2100-scenario (droge variant van het SSP5-8.5 scenario uit KNMI 2023).
- B) Dezelfde combinatie van de autonome verzilting, zeespiegelstijging en bodemdaling, maar dan gecombineerd met het scenario ‘herinrichting watersysteem’.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Context, aanleiding en voorgeschiedenis	8
1.2	Doel	10
1.3	Werkwijze in het kort	10
1.3.1	Methodiek op hoofdlijnen	10
1.3.2	Proces	10
2	Methode	13
2.1	Modelinstrumentarium: LHM-zoet-zout	13
2.2	Beschouwde modeluitvoer	13
2.3	Implementatie van de scenario's	14
2.3.1	Autonome verzilting	14
2.3.2	Klimaatverandering	14
2.3.3	Zeespiegelstijging	17
2.3.4	Bodemdaling	19
2.3.5	Veranderende grondwateronttrekkingen	21
2.3.6	Veranderend landgebruik	22
2.3.6.1	Varianten	22
2.3.6.2	Implementatie	24
3	Resultaten 1: effecten individuele scenario's	28
3.1	Autonome ontwikkeling	28
3.2	Klimaatverandering	29
3.2.1	Klimaatverandering volgens het Hn-scenario	29
3.2.2	Klimaatverandering volgens het Hd2100-scenario	31
3.3	Zeespiegelstijging	32
3.4	Bodemdaling	34
3.5	Veranderende grondwateronttrekkingen	35
3.6	Veranderend landgebruik	36
3.7	Herinrichting watersysteem	38
4	Keuze samengesteld toekomstscenario t.b.v. analyse winbaarheid	41
	<i>Implicaties van veranderend zoet-zout grensvlak</i>	42
	<i>Implicaties van veranderend leeftijdsvlak</i>	42
	<i>Besluit gecombineerde scenario's</i>	43
5	Resultaten 2: effecten samengestelde scenario's	44
5.1	Inleiding	44
5.2	Scenario 'Hd2100'	44

5.3	Herinrichting watersysteem	45
5.4	Discussie t.a.v. winbaarheid	46
6	Conclusies	47
6.1	Conclusies	47
6.2	Aanbevelingen	48
7	Begrippenlijst	50
8	Referenties	51
9	Bijlage 1 Kwalitatieve analyse per ontwikkeling	53

1 Inleiding

1.1 Context, aanleiding en voorgeschiedenis

In de Beleidsnota Drinkwater (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014) is het concept van Nationale Grondwater Reserves (NGRs) geïntroduceerd met als doel om natuurlijk kapitaal te beschermen ten behoeve van de drinkwatervoorziening in de verre toekomst en in geval van grootschalige en meerjarige crisissituaties. Dit in aanvulling op de Aanvullende Strategische Voorraden (ASVs) met als doel om bronnen voor de drinkwatervoorziening op de middellange termijn (2040) te borgen. Provincies zijn verantwoordelijk voor de ASVs.

Een eerste aanzet voor NGR gebieden is opgenomen in de Structuurvisie ondergrond (STRONG 2018). Het ministerie van Infrastructuur en Water (IenW) heeft nu behoefte aan een gedetailleerd 3-dimensionaal beeld van de NGRs, en heeft Deltares en TNO opdracht gegeven voor de werkzaamheden die uitgevoerd moeten worden om te komen tot dit 3D beeld. Deltares en TNO werken hierin nauw samen. Het project is opgedeeld in 8 componenten (zie figuur 1 in de samenvatting). De verschillende componenten / deelprojecten leveren de bouwstenen om uiteindelijk tot een advies over begrenzing en eventuele bijbehorende bescherming van NGRs te komen.

Dit document is de rapportage van de **kwantitatieve uitwerking van Component 3: 4D-kartering - invloed dynamiek grondwatersysteem - 2100 scenario's**.

De relatie tussen de verschillende componenten

In *component 1* wordt een 3D-kartering uitgevoerd van de grondwatervoorraden in de ondergrond van Nederland die in potentie geschikt zijn als NGR. Daarin wordt onder andere de geologische opbouw, de zoet-brak-zout grensvlakken en de ouderdom van het grondwater bekeken, zonder dat op basis van specifieke criteria al harde keuzes gemaakt worden over de begrenzing. Dat gebeurt in een later stadium. In *component 2* wordt een inventarisatie gemaakt van huidig grondwatergebruik en van (mogelijk toekomstige) reserveringen waarmee rekening gehouden moet worden bij de begrenzing van de NGRs en/of de ontwikkeling van eventueel beleid om NGRs te beschermen. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om gebieden die in het kader van de energietransitie mogelijkheden bieden om geothermie te ontwikkelen.

Omdat het grondwatersysteem een dynamisch systeem is, kijken we in *component 3 (dit rapport)* ook naar de invloed van lange termijn-ontwikkelingen op het grondwatersysteem (tijdshorizon 2100). We onderzoeken daarbij in hoeverre die ontwikkelingen van invloed kunnen zijn op de begrenzing en/of kwaliteit van de NGRs.

In *component 4* onderzoeken we mogelijke andere grondwatervoorraden zoals kwelwater uit polders of grondwater onder het IJsselmeergebied. Het is van belang om een beeld te hebben van deze alternatieve bronnen, omdat hiermee de mogelijk toekomstige inzet van NGR beperkt kan worden.

In *component 5* wordt een analyse uitgevoerd naar de winbaarheid van de potentiële NGRs.

De verschillenden onderdelen van dit project moeten eind 2023/begin 2024 leiden tot een advies voor begrenzing van NGRs en een advies ten aanzien van bescherming van die reserves (*component 6*).

Om rekening te kunnen houden met de verschillende belangen is een brede klankbordgroep in het leven geroepen. *Component 0* gaat over het proces met de klankbordgroep (zie paragraaf 1.3.2). *Component 7* gaat over de ontsluiting van de data en bestanden via een

online viewer (zie ook Hoofdstuk 5). Beide onderdelen lopen parallel met de andere componenten en worden niet afzonderlijke gerapporteerd.

Het NGR 3D-kartering project staat niet op zichzelf. Er zijn weliswaar grote volumes aan grondwater van goede kwaliteit aanwezig in de ondergrond, maar eventueel gebruik van deze voorraden heeft consequenties. Zo dragen grondwateronttrekkingen bij aan verdroging van natuur en vanuit die optiek wordt bijvoorbeeld in Noord-Brabant ingezet op een reductie van grondwateronttrekking. Inzet van NGRs voor de structurele drinkwatervoorziening op lange termijn ligt hier dus niet voor de hand. Omdat de druk op ons watersysteem toeneemt, zetten partijen als de drinkwaterbedrijven, provincies en het Rijk ook juist in op waterbesparing om de groei in drinkwatervraag te verminderen. Het is duidelijk dat we dus zuinig en slim met NGR voorraden om moeten gaan om onze omgeving niet onnodig te belasten en dit natuurlijk kapitaal ook voor toekomstige generaties beschikbaar te houden. Parallele initiatieven van het Rijk, provincies en/of drinkwaterbedrijven, gericht op bijvoorbeeld waterbesparing, gebruik van andere bronnen en strategische samenwerking geven hier invulling aan en beleid ten aanzien van eventueel toekomstige benutting van NGRs moet in die context beschouwd worden.

4D-kartering - invloed dynamiek grondwatersysteem - 2100 scenario's (component 3)

Dit component heeft als doel om de belangrijkste ontwikkelingen die mogelijk effect hebben op potentiële NGRs in beeld te brengen aan de hand van beschikbare informatie uit bestaande en lopende studies. Deze ontwikkelingen kunnen invloed hebben op de boven en ondergrens van een potentiële NGR maar ook de winbaarheid van de NGRs (component 5).

In de *kwantitatieve* analyse die binnen component 3 is uitgevoerd (De Louw en Pouwels, 2023) is voor de voorziene en mogelijk relevant geachte ontwikkelingen die in de komende 100 jaar mogelijk gaan plaatsvinden uiteen gezet wat de mogelijke effecten op het grondwatersysteem zijn. De mogelijke effecten op de NGRs zijn in de betreffende rapportage samengevat in de vorm van een tabel. Deze tabel is hier overgenomen in Bijlage 1. In de tabel is beschreven hoe bepaalde veranderingen en ingrepen doorwerken op het grondwatersysteem en daarmee op de grenzen van een NGR. Hierbij kan een onderscheid worden gemaakt in:

- Veranderingen en ingrepen in het freatische systeem die ook effect hebben op het diepere grondwatersysteem.
- Veranderingen en ingrepen in het diepere grondwatersysteem die ook effect hebben op het freatische systeem.

In het freatische systeem kunnen veranderingen in grondwateraanvulling of de ontwatering (bijv. peilveranderingen) plaatsvinden door bijvoorbeeld klimaatverandering, verandering van landgebruik, MAR (Managed Aquifer Recharge, ondergrondse waterberging) of aanpassingen aan het watersysteem. Veranderingen die direct ingrijpen op het diepere grondwatersysteem zijn onder andere grondwateronttrekkingen en zeespiegelstijging.

De beschouwde ontwikkelingen zijn:

- Klimaatverandering
- Zeespiegelstijging
- Bodemdaling
- Autonome verzilting
- Kustverbreding/Landaanwinning voor de kust
- Verandering in het rivieren- en IJsselmeergebied
- Uitbreiding diffuus verontreinigingsfront
- Verandering grondwateronttrekkingen
- Vergroten zoetwaterbeschikbaarheid (ASR (Aquifer Storage and Recovery), MAR (Managed Aquifer Recharge), brakwaterwinning)
- Herinrichting watersysteem

- Verandering landgebruik
- Verstedelijking, afkoppelen bebouwd gebied
- Uitbreiding KWO (Koude-warmte opslag)-systemen en geothermie
- Bruinkoolwinning
- Steenkoolmijnen in Limburg

Op basis van de analytische beschouwingen hebben De Louw en Pouwels (2023) aanbevelingen gedaan voor het kwantificeren van een selectie van bovengenoemde ontwikkelingen. Het beperken van het aantal door te rekenen scenario's is niet alleen logisch omdat van sommige ontwikkelingen op voorhand kan worden verwacht dat de effecten op de NGRs beperkt zullen zijn, maar ook noodzakelijk omdat kwantitatieve doorrekening van een scenario een majeure inspanning is, zowel qua voorbereiding als doorlooptijden van dergelijke langjarige simulaties.

Daarom zijn alleen die ontwikkelingen doorgerekend die op regionale schaal een mogelijk significant effect hebben op de NGRs. Op basis van de analyse in De Louw en Pouwels (2023), zijn de volgende ontwikkelingen geselecteerd voor doorrekening:

- Autonome verzilting
- Klimaatverandering
- Zeespiegelstijging
- Bodemdaling
- Verandering grondwateronttrekkingen
- Verandering grondwateraanvulling door veranderend landgebruik en stedelijke ontwikkeling
- Herinrichting watersysteem.

1.2 Doel

Het doel van de huidige studie is tweeledig:

- Het op een kwantitatieve wijze inzichtelijk maken van het mogelijke belang van de bovengenoemde selectie van ontwikkelingen voor de kartering van de NGRs;
- Het definiëren van in component 5 (winbaarheid) door te rekenen scenario's om te komen tot NGRs die robuust zijn in het licht van toekomstige ontwikkelingen.

1.3 Werkwijze in het kort

1.3.1 Methodiek op hoofdlijnen

De selectie van ontwikkelingen worden individueel doorgerekend met het LHM (Landelijk Hydrologisch Model)-zoet-zout v4.1.2 (America et al., 2020). De berekeningen lopen van het jaar 2000 tot 2100. Steeds wordt de invloed van de ontwikkeling op het zoet-zoutgrensvlak, het leeftijdsvlak (als proxy voor potentieel antropogeen beïnvloed water) en grondwaterstanden/stijghoogten in beeld gebracht. Op basis van o.a. de resultaten van de individuele scenario's wordt een keuze gemaakt voor het uiteindelijk door te rekenen gecombineerde scenario, waarmee de 'meest robuuste' NGRs kunnen worden gekarteerd.

1.3.2 Proces

Het belang van goed drinkwater en de beschikbaarheid van voldoende bronnen van goede kwaliteit is evident groot. Provincies en drinkwaterbedrijven spelen hierin een belangrijke rol. Bescherming van grondwater legt echter ook belemmeringen op aan andere gebruiksfuncties aan maaiveld of in de ondergrond. Daarmee bestaat er bijvoorbeeld een spanningsveld tussen beschermen van grondwatervoorraden en het mogelijk maken van de energietransitie waarbij technieken als geothermie, gesloten- en open bodemenergiesystemen steeds meer toegepast zullen worden.

Deltares en TNO voeren de NGR studies uit in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) en het project wordt begeleid door een Begeleidingsgroep met vertegenwoordigers van IenW, Binnenlandse Zaken, het ministerie van Economische Zaken en Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). Gezien de verantwoordelijkheden en belangen van andere partijen is daarnaast een brede klankbordgroep in het leven geroepen. De klankbordgroep bestaat naast bovengenoemde organisaties uit vertegenwoordigers van elke provincie, elk drinkwaterbedrijf, koepelorganisaties zoals VNG, UvW, IPO en Vewin, de bodemenergie- en geothermiesector en de Inspectie voor Transport en Leefomgeving.

De rol van de klankbordgroep is tweeledig: Enerzijds om optimaal gebruik te kunnen maken van de kennis die beschikbaar is bij partijen in de klankbordgroep. Hiertoe zijn op gezette momenten werksessies georganiseerd met de klankbordgroep. Daarnaast is het zaak om betrokken partijen zorgvuldig te informeren over het NGR traject en om feedback te vragen op de aanpak en (tussen)resultaten, om zodoende tot breed gedragen resultaten te komen. Hiervoor zijn gedurende de looptijd van het project een aantal klankbordgroepoverleggen georganiseerd. In Tabel 1-1 hieronder is een overzicht gegeven van de bijeenkomsten in het eerste en tweede projectjaar. Daarnaast draagt het ministerie van IenW vanaf het tweede projectjaar (2023) ter voorbereiding van de uiteindelijke besluitvorming ook zorg voor informatievoorziening op bestuurlijk niveau via het Bestuurlijk Overleg Water.

Om de informatievoorziening tussen partijen te vergemakkelijken is in het project naast de normale communicatiekanalen ook gebruik gemaakt van een online omgeving (sharepoint) om eenvoudig bestanden uit te wisselen.

Tabel 1-1: Overzicht bijeenkomsten Klankbordgroep en Werksessies in 1^e jaar van het project (periode maart 2022 – Juli 2024)

Maand	Sessie	Doel bijeenkomst
Maart 2022	Klankbordgroep	Startoverleg; bespreken en aanscherpen aanpak
Mei 2022	Werksessie	Component 1: Vaststellen werkwijze 3D kartering, inclusief facultatieve verdiepingsslag voor regio specifieke zaken / differentiatie.
Juni 2022	Werksessie	Component 2: Inventarisatie activiteiten huidig en toekomstig gebruik/ beslag ondergrond.
Juni 2022	Klankbordgroep	Stand van zaken componenten 1, 2 en 3.
September 2022	Werksessie Noord Werksessie Zuid	Component 1: 3-D Kartering zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit - Bespreken conceptresultaten kartering, aanscherpen criteria en verdere aanpak.
November 2022	Klankbordgroep	Bespreken resultaten component 1, 2 en aanpak component 3.
November 2022	Werksessie	Component 3: Bespreken resultaten en inbreng klankbordgroep.
Januari 2023	Klankbordgroep	Bespreken eindresultaten componenten 1, 2 en 3. Vooruitblik naar werkzaamheden in tweede projectjaar.
Maart 2023	Werksessie	Gezamenlijk criteria vaststellen om de analyse winbaarheid uit te kunnen voeren en om tot technische begrenzing van de NGRs te komen, voor de 3 NGR-doelen (Natuurlijk kapitaal, calamiteiten en structurele drinkwaterwinning).
Juni 2023	Klankbordgroep	Bespreken voortgang van componenten 3, 4, 5, 6 en 7. Speciale aandacht voor eerste resultaten van component 4 (potentiële aanvullende voorraden).

Juli 2023	Werksessie	Bespreken aanpak en te gebruiken criteria voor de winbaarheid tav kwantiteit en kwaliteit.
September 2023	Klankbordgroep	Inloop uurtje – vragen over resultaten en status activiteiten.
Oktober 2023	Werksessie	Presenteren tussenresultaten van componenten 3,4 en 5. Vertaling analyse winbaarheid naar begrenzing NGRs en verkenning risico's voor NGRs en beleidsopties ter bescherming van NGRs.
November 2023	Werksessie	Bespreken conceptresultaten begrenzing NGRs en botsproeven.
Januari 2024	Klankbordgroep	Inloop uurtje – vragen over resultaten en status activiteiten
Juni 2024	Werksessie	Bespreken eindresultaten begrenzing NGRs en beschermingsopties.
Juli 2024	Klankbordgroep	Informatiebijeenkomst m.b.t. correctie van een deel van de analyse.

2 Methode

2.1 Modelinstrumentarium: LHM-zoet-zout

De selectie van ontwikkelingen worden individueel doorgerekend met het LHM (Landelijk Hydrologisch Model)-zoet-zout v4.1.2 (America et al., 2020). Het LHM-zoet-zout is een landsdekkend model voor dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming, waarmee tevens het transport van stoffen (bijvoorbeeld zout, wat van invloed is op de dichtheid van het grondwater) kan worden berekend (Delsman et al., 2020). Het LHM-zoet-zout is gebaseerd op het Landelijk Hydrologisch Model, versie 4.1 (Janssen et al., 2021).

Het LHM-zoet-zout gebruikt daarmee de randvoorwaarden zoals deze ook in LHM 4.1 zijn opgenomen. In de verschillende scenario's wordt hiervan afgeweken. In de meeste gevallen is dat mogelijk zonder nieuwe modelberekeningen te doen, omdat gebruik gemaakt kan worden van bestaande informatie of modelresultaten (bijvoorbeeld bodemdaling, zeespiegelstijging) of volstaan wordt met aannames (bv. veranderende drinkwateronttrekkingen). Voor een enkel scenario (t.w. veranderend landgebruik) is het echter noodzakelijk de grondwateraanvulling opnieuw af te leiden met behulp van het LHM. Dit wordt bij de beschrijving van de scenario's meer in detail beschreven.

Alle berekeningen worden uitgevoerd voor de simulatieperiode 2000 – 2100. De periode 2000 t/m 2019 geldt daarbij als inspeelperiode. Deze inspeelperiode is vooral nodig om de chlorideverdeling meer in overeenstemming te brengen met het grondwaterstromingspatroon, waardoor artefacten zoals onrealistische inversies (bv. zoet water onder zout water waar dat niet verwacht wordt) afnemen (Buma et al., 2023).

Alle berekeningen worden uitgevoerd met een constante, langjarig gemiddelde grondwateraanvulling en ook andere randvoorwaarden zijn constant (stationair) in de tijd, tenzij bij de beschrijving van de scenario-implementaties (Sectie 2.3) anders wordt vermeld.

2.2 Beschouwde modeluitvoer

Uit de modelberekeningen worden de volgende resultaten betrokken:

- freatische grondwaterstanden stijghoogte in het 1^e watervoerend pakket. Deze uitvoer helpt bij de controle van de implementatie van het scenario en het systeembegrip van de doorwerking ervan;
- het zoet-zoutgrensvlak in 2100; dit is gedefinieerd als de diepte van de overgang van water met een chlorideconcentratie lager dan 1.5 g/L naar hoger dan 1.5 g/L. Indien deze overgang vaker plaatsvindt wordt hier de bovenste overgang genomen;
- het 50-jarig grondwaterleeftijdsvlak (Het grensvlak van water jonger dan 50 jaar naar ouder dan 50 jaar). De winbaarheidscriteria hebben betrekking op hogere leeftijden, t.w. 150 jaar en voor het stedelijk gebied 250 jaar. Om rekentijden te beperken wordt voor de gevoeligheidsanalyses hier echter gericht op 50 jaar, waarbij in het jaar 2100 wordt bekeken waar dit 50-jaar vlak zich bevindt). Dit leeftijdsvlak wordt later ook wel het Door-Mensen-Beïnvloed-front of 'DMB'-front genoemd; Grondwaterleeftijd wordt berekend door het volgen van een reactieve tracer met een 0^e orde negatieve afbraakterm welke zo is gekozen dat de concentratie van de tracer de grondwaterleeftijd in jaren aangeeft. Alle brontermen in het model (bijvoorbeeld de grondwateraanvulling) hebben een concentratie van nul. In grondwaterzones die, gedurende de simulatie, in het geheel niet bereikt worden door water afkomstig uit de brontermen, neemt de grondwaterleeftijd op die manier elk jaar met 1 jaar toe. In zones die wel bereikt worden door water uit de brontermen is dat minder, doordat 'verversing' plaatsvindt.

- De grondwateraanvulling, indien veranderd ten opzichte van de referentie.

Door deze resultaten te vergelijken met het juiste referentiescenario (welke per ontwikkeling kan verschillen, zie de volgende sectie) wordt het effect van de ontwikkeling in beeld gebracht.

2.3 Implementatie van de scenario's

In deze sectie wordt in detail beschreven hoe de verschillende scenario's in het LHM-zoet-zout zijn geïmplementeerd.

2.3.1 Autonome verzilting

De zoet-zoutverdeling in het grondwater is in beweging; de verdeling is niet in evenwicht met de geomorfologische, landschappelijke, waterstaatkundige en geohydrologische veranderingen die in het verleden hebben plaatsgevonden. Een uitgebreide uiteenzetting van de achterliggende processen is al gegeven in de rapportage van de kwalitatieve uitwerking van de toekomstscenario's (De Louw en Pouwels, 2023).

Als scenario in het LHM-zoet-zout is deze de eenvoudigste; in feite hoeft er niets aan het model veranderd te worden. Het model wordt 100 jaar doorgerekend waarbij het zout in het model 'losgelaten' wordt zodat het meebeweegt met de grondwaterstroming (dit is in tegenstelling tot de grondwaterleeftijdscenariëns zoals uitgevoerd in de vorige fase (Buma et al., 2023); daarbij werd de zoet-zoutverdeling constant verondersteld). Zoals gezegd wordt de eerste 20 jaar hier beschouwd als een inspeelperiode. De referentiesituatie waar de resultaten van dit scenario mee vergeleken worden betreft dan ook het rekenresultaat na 20 jaar.

2.3.2 Klimaatverandering

Voor de implementatie van klimaatverandering is gebruik gemaakt van de recent gepubliceerde KNMI'23 scenario's (KNMI, 2023). De kerncijfers die deze scenario's beschrijven worden getoond in Tabel 2-1.

Het KNMI heeft een hoog- en een laag uitstootscenario, en voor beide bovendien een 'natte' en een 'droge' variant. In het hoge uitstootscenario (aangeduid met hoofdletter 'H') blijft de uitstoot in gelijke mate toenemen tot 2080 om daarna af te vlakken. In het lage uitstootscenario ('L') wordt de uitstoot snel en sterk verminderd om, in lijn met het Klimaatakkoord van Parijs, de mondiale opwarming te beperken tot maximaal 2°C. Het onderscheid tussen een 'natte' ('n') en een 'droge' ('d') variant heeft zijn oorsprong in het feit dat bij dezelfde uitstootscenario's klimaatmodellen verschillende uitkomsten geven voor regionale klimaatveranderingen. Dit heeft te maken met onzekerheid in de ligging van hoge- en lagedrukgebieden in de toekomst. De 'd' scenario's kennen een sterke verdroging in de zomer (gecombineerd met een, t.o.v. de 'n' scenario's, matige vernatting in de winter). De 'n' scenario's kennen een sterke vernatting in de winter (met nog steeds een verdroging in de zomer, zij het aanzienlijk minder dan in de 'd' scenario's).

Tabel 2-1. KNMI'23-scenariotabel landelijk gemiddelden. Bron: KNMI (2023).

Seizoen	Variabele	Indicator	Klimaat 1991-2020 = referentie-periode	2050 (2036-2065)				2100 (2086-2115)				
				Ld	Ln	Hd	Hn	Ld	Ln	Hd	Hn	
	Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1991-2020			+0,8°C	+0,8°C	+1,5°C	+1,5°C	+0,8°C	+0,8°C	+4,0°C	+4,0°C	
	Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1850-1900			+1,7°C	+1,7°C	+2,4°C	+2,4°C	+1,7°C	+1,7°C	+4,9°C	+4,9°C	
Jaar	Zeespiegel bij Nederlandse kust	gemiddelde niveau	0 cm ¹	+24 (16 tot 34) cm	+24 (16 tot 34) cm	+27 (19 tot 38) cm	+27 (19 tot 38) cm	+44 (26 tot 73) cm	+44 (26 tot 73) cm	+82 (59 tot 124) cm	+82 (59 tot 124) cm	
		tempo van verandering	3 mm/jaar ¹	+3 (1 tot 6) mm/jaar	+3 (1 tot 6) mm/jaar	+5 (4 tot 8) mm/jaar	+5 (4 tot 8) mm/jaar	-1 (-4 tot 4) mm/jaar	-1 (-4 tot 4) mm/jaar	+11 (6 tot 23) mm/jaar	+11 (6 tot 23) mm/jaar	
	Temperatuur	gemiddelde	10,5°C	+0,9°C	+0,9°C	+1,6°C	+1,5°C	+0,9°C	+0,9°C	+4,4°C	+4,1°C	
	Neerslag	hoeveelheid	851 mm	0%	+3%	-2%	+3%	0%	+3%	-3%	+8%	
	Zonnestraling	gemiddelde	120 W/m ²	+5,8 W/m ²	+4,8 W/m ²	+5,4 W/m ²	+2,5 W/m ²	+5,8 W/m ²	+4,8 W/m ²	+7,1 W/m ²	+1,3 W/m ²	
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid ²	82%	-1%	-1%	-1%	0%	-1%	-1%	-1%	+1%	
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	603 mm	+7%	+6%	+9%	+6%	+7%	+6%	+17%	+11%	
	Wind	gemiddelde windsnelheid	4,8 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	0,0 m/s	0,0 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	
	Winter	Temperatuur	gemiddelde	3,9°C	+0,7°C	+0,7°C	+1,2°C	+1,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,7°C	+3,9°C
			gemiddelde dagmaximum	6,3°C	+0,7°C	+0,7°C	+1,1°C	+1,2°C	+0,7°C	+0,7°C	+3,5°C	+3,6°C
gemiddelde dagminimum			1,4°C	+0,7°C	+0,7°C	+1,2°C	+1,4°C	+0,7°C	+0,7°C	+4,0°C	+4,2°C	
Neerslag		hoeveelheid	218 mm	+4%	+5%	+4%	+7%	+4%	+5%	+14%	+24%	
		aantal natte dagen (≥ 10 mm)	57 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	+0,6 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	0,0 dagen	+1,1 dagen	
		aantal dagen ≥ 10 mm	5,4 dagen	+0,4 dagen	+0,5 dagen	+0,5 dagen	+0,8 dagen	+0,4 dagen	+0,5 dagen	+1,6 dagen	+2,5 dagen	
		10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	109 mm ³	-2%	+2%	0%	+2%	-2%	+2%	+8%	+15%	
Zonnestraling		gemiddelde	34 W/m ²	+1,2 W/m ²	+1,5 W/m ²	+0,8 W/m ²	+0,4 W/m ²	+1,2 W/m ²	+1,5 W/m ²	-0,7 W/m ²	-1,5 W/m ²	
Vochtigheid		gemiddelde relatieve vochtigheid ²	87%	0%	0%	+1%	+1%	0%	0%	+1%	+2%	
Wind		gemiddelde windsnelheid	5,6 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	0,0 m/s	+0,1 m/s	-0,1 m/s	-0,1 m/s	+0,1 m/s	+0,2 m/s	
	aantal dagen met windrichting tussen noord en west	13 dagen	+0,1 dagen	-0,8 dagen	0,0 dagen	+0,1 dagen	+0,1 dagen	-0,8 dagen	-1,7 dagen	-1,0 dagen		
Zomer	Temperatuur	gemiddelde	17,3°C	+1,2°C	+1,1°C	+2,1°C	+1,7°C	+1,2°C	+1,1°C	+5,1°C	+4,7°C	
		gemiddelde dagmaximum	21,7°C	+1,4°C	+1,2°C	+2,2°C	+1,7°C	+1,4°C	+1,2°C	+5,4°C	+4,7°C	
		gemiddelde dagminimum	12,9°C	+1,0°C	+1,0°C	+1,9°C	+1,8°C	+1,0°C	+1,0°C	+5,0°C	+4,9°C	
	Neerslag	hoeveelheid	235 mm	-8%	-2%	-13%	-5%	-8%	-2%	-29%	-12%	
		1-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden ⁴	63 mm ³	+4 (1 tot 6)%	+5 (2 tot 7)%	+6 (2 tot 9)%	+9 (5 tot 14)%	+4 (1 tot 6)%	+5 (2 tot 7)%	+15 (5 tot 26)%	+26 (12 tot 41)%	
		uurlijkse neerslag die eens per jaar wordt overschreden ⁴	16 mm ³	+4 (2 tot 6)%	+6 (3 tot 8)%	+6 (2 tot 9)%	+11 (6 tot 16)%	+4 (2 tot 6)%	+6 (3 tot 8)%	+15 (5 tot 26)%	+31 (17 tot 46)%	
	Zonnestraling	gemiddelde	206 W/m ²	+12 W/m ²	+9,1 W/m ²	+14 W/m ²	+7,4 W/m ²	+12 W/m ²	+9,1 W/m ²	+24 W/m ²	+11 W/m ²	
	Vochtigheid	gemiddelde relatieve vochtigheid ²	77%	-2%	-1%	-2%	-1%	-2%	-1%	-4%	-1%	
	Verdamping	potentiële verdamping (Makkink)	286 mm	+8%	+6%	+11%	+7%	+8%	+6%	+22%	+14%	
	Droogte	maximaal neerslagtekort april t/m september	160 mm	+22%	+13%	+35%	+15%	+22%	+13%	+79%	+37%	
maximaal neerslagtekort april t/m september dat eens in de 10 jaar wordt overschreden		265 mm	+16%	+9%	+30%	+16%	+16%	+9%	+63%	+30%		

In de huidige studie is ervoor gekozen de scenario's Hd2100 en Hn2100 door te rekenen, oftewel de scenario's die horen bij hoge uitstoot en dan zowel de droge als de natte variant. Gezien het doel van deze studie om tot de meest robuuste afbakening van de NGRs te komen onder mogelijke toekomstige ontwikkelingen, is het niet zinvol om de lage-uitstootscenario's nader onder de loep te nemen.

Op voorhand is te verwachten dat het droge scenario het meest nadelig zal uitpakken voor de winbaarheid van grondwatervoorraden. Er had daarom voor gekozen kunnen worden om alleen dit scenario door te rekenen. Desalniettemin werd het relevant geacht hier de bandbreedte in beeld te brengen.

De klimaatscenario's grijpen in het LHM-zoet-zout aan op de langjarig gemiddelde grondwateraanvulling. Deze is dan ook afgeleid voor het Hd2100- en Hn2100-scenario. Hiervoor lagen twee opties op tafel:

Methode 1: Het implementeren van de klimaatscenario's in het (zoetwater-) LHM, waarbij na doorrekening de grondwateraanvulling afgeleid kan worden uit de resultaten van de onverzadigde zone-module MetaSWAP van het LHM. Een voordeel hiervan is de 'state-of-the-art' bepaling van de actuele verdamping i.c.m. klimaatafhankelijke gewasfactoren (via de gewasgroeimodule WOFOST) van het LHM.

Methode 2: Een op eenvoudigere wijze benaderen van de grondwateraanvulling door deze te berekenen als het langjarige verschil tussen de neerslag en de verdamping.

Mede doordat ten tijde van deze studie de implementatie van de nieuwe klimatologische reeksen van het KNMI in het LHM ten behoeve van de Deltascenario's (Janssen et al. 2024) nog niet was voltooid en dus nog niet beschikbaar was, is voor de tweede optie gekozen. Concreet houdt dit in dat de langjarig gemiddelde grondwateraanvulling als volgt is bepaald:

$$GWA = P - F_R * E_{ref} \quad (1)$$

Waarbij:

GWA = de langjarig gemiddelde grondwateraanvulling (mm/d)

P = de langjarige gemiddelde neerslag (mm/d)

E_{ref} = de langjarig gemiddelde referentiegewasverdamping (mm/d)

F_R = verdampingsreductiefactor (mm/d)

F_R is hierbij ontleend aan een langjarige berekening met LHM 4.3 (Janssen et al., 2023) en wordt berekend als:

$$F_R = ET_{act}/E_{ref} \quad (2)$$

Waarbij:

ET_{act} = de langjarig gemiddelde, daadwerkelijk opgetreden evapotranspiratie (mm/d).

E_{ref} = de langjarig gemiddelde referentiegewasverdamping (mm/d)

F_R is bedoeld om te corrigeren voor:

- Landgebruik: E_{ref} geldt voor een referentiegewas, terwijl het landgebruik uiteraard meestal iets anders is;
- Verdampingsreductie: E_{ref} geldt voor een optimaal van water voorzien referentiegewas, dat niet lijdt onder droogte- of zuurstofstress. Dat zijn condities die vanzelfsprekend niet altijd gelden.

Het LHM berekent ET_{act} door rekening te houden met de gewasgroei en vochtcondities. Omdat er ten tijde van de huidige studie nog geen LHM-berekeningen met de KNMI'23 klimaatscenario's uitgevoerd konden worden¹, kon de verdampingsreductie factor F_R alleen voor het huidige klimaat berekend worden. F_R is echter wel degelijk klimaatafhankelijk, door verminderde waterbeschikbaarheid (water dat niet valt kan ook niet verdampen), toenemende droogtestress en de invloed van toenemende CO₂-concentraties op de gewasgroei. Wij verwachten daarom dat de resultaten voor dit scenario een overschatting geven van het klimaateffect op de grondwateraanvulling.

¹ De achtergrond hiervan is dat de opzet van de KNMI'23 klimaatscenario's het nodig maakt dat zeer lange perioden (orde 100 jaar) doorgerekend moeten worden om het klimaateffect (ten opzichte van de referentie) goed in beeld te krijgen.

Een tweede reden waarom de modelresultaten een overschatting van het klimaateffect zullen geven is dat als aanname in het buitenland² een ratio F_R van 1.0 gehanteerd is (eveneens resulterend in een onderschatting van de grondwateraanvulling). Dit is het gevolg van geconstateerde onjuistheden in weggeschreven verdampingswaarden door het LHM in het buitenland. Het betreft hier een door te voeren verbetering welke in komende LHM-releases zal worden opgepakt. De impact van beide verbeteringen van het model zouden in een vervolgstudie aangetoond kunnen worden.

Voor de berekening van de gehele periode 2000 t/m 2100 is de opbouw van klimaatverandering in acht genomen. Er is dus niet voor 100 jaar de langjarige grondwateraanvulling van de Hd2100- en Hn2100-scenario's toegepast maar een opbouw vanaf het huidige klimaat. Voor de periode 2000-2020 is het door het KNMI t.b.v. de nieuwe Deltascenario's (Janssen et al., 2024) aangemaakte referentiescenario gebruikt, representatief voor de periode 1991-2020. Het langjarige gemiddelde hiervan is berekend volgens bovenstaande methode. Voor de zichtjaren 2050 en 2100 van de klimaatscenario's Hd2100 en Hn2100 zijn de langjarige gemiddelden berekend en toegepast in respectievelijk 2050 en 2100. Tussen 2020 en 2050, en tussen 2050 en 2100 is lineaire interpolatie toegepast om tot een volledige tijdreeks van 100 jaar te komen.

LHM-zoet-zout v4.1.2 kent als langjarig gemiddelde grondwateraanvulling een van LHM 4.1 afgeleide aanvulling. Die grondwateraanvulling is afgeleid via Methode 1, en dat maakt dat een modelrun met die grondwateraanvulling niet geschikt is als referentie voor de klimaatruns. Daarom is tevens een nieuwe referentierun aangemaakt, waarbij Methode 2 is toegepast voor het huidige klimaat. Hiertoe is hetzelfde referentiescenario (door het KNMI t.b.v. de nieuwe Deltascenario's (Janssen et al., 2024) aangemaakt) gebruikt dat in de klimaatruns ook voor 2000-2020 is toegepast, dit scenario is representatief voor de periode 1991-2020. In het volgende hoofdstuk zullen de effecten van de klimaatscenario's dus afgezet worden tegen deze referentierun.

2.3.3 Zeespiegelstijging

Naast klimatologische scenario's heeft het KNMI in 2023 tevens nieuwe zeespiegelstijgingsscenario's uitgebracht (zie ook Tabel 2-1). Om dezelfde als hierboven genoemde redenen is het weinig zinvol de 'lage' scenario's (met relatief weinig zeespiegelstijging) hier verder onder de loep te nemen. Het doorgerekende scenario is dat van de bovengrens van de hoge scenario's, oftewel 124 cm zeespiegelstijging in 2100.

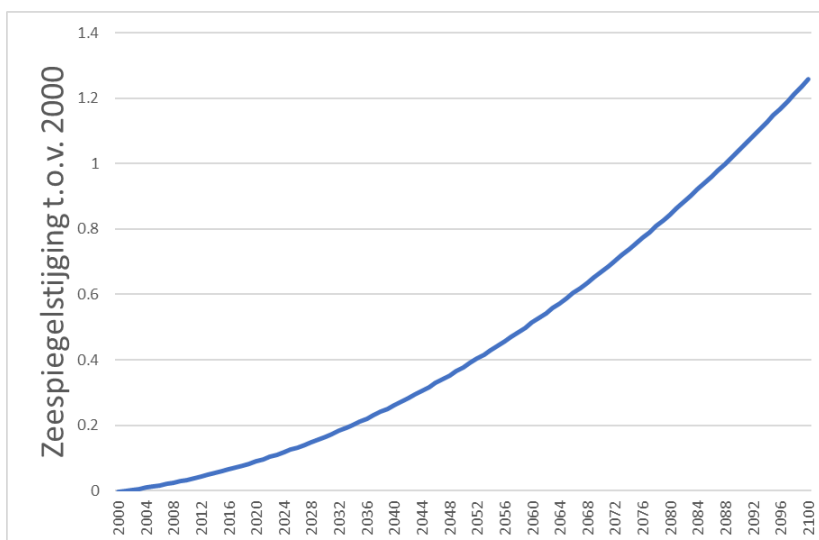
De implementatie van deze zeespiegelstijging volgt die van de studie naar de effecten van extreme zeespiegelstijging op grondwaterverziltiging en watervraag (Delsman et al., 2022), welke in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KPZSS) is uitgevoerd. In het kort houdt dit in:

- De zeespiegelstijgingscurve die is gehanteerd is afkomstig van Vos (2021). Ten tijde van de huidige studie was de exacte curve, behorende bij de 1.24m zeespiegelstijging in 2100, nog niet openbaar gemaakt. De curve van Vos (2021) is gebaseerd op het door het KNMI uitgebrachte Klimaatsignaal '21 (KNMI, 2021), waarin voor het meest extreme scenario een nagenoeg identieke zeespiegelstijging voor 2100 wordt voorspeld als in de KNMI '23 scenario's. De gehanteerde zeespiegelstijgingscurve wordt getoond in Figuur 2-1. De curve is in het model geïmplementeerd in vijfjaarlijkse stappen;

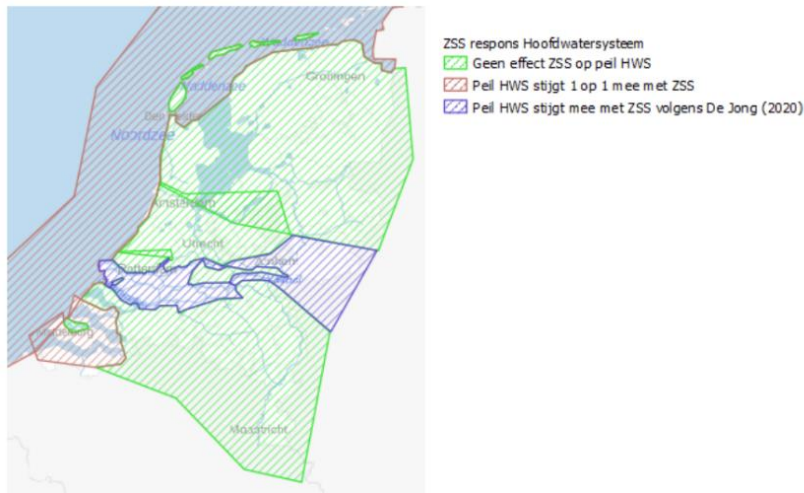
² Specifiek gaat het hier om in het LHM meegemodelleerde delen van België en Duitsland langs de grenzen met Brabant en Limburg. In andere provincies speelt het niet omdat daar een constante-flux randvoorwaarde gehanteerd wordt in het LHM.

- Rivier- en zeearmen die nu open zijn, blijven open. Het peil stijgt hier dus 1-op-1 mee met de zeespiegelstijging (Figuur 2-2);
- Waar een fysieke afscheiding is tussen de zee en het binnenwater, stijgt het landinwaartse peil niet mee (Figuur 2-2);
- De doorwerking van de zeespiegelstijging op rivierwaterstanden wordt meegenomen voor het hoofdwatersysteem (Figuur 2-2 en Figuur 2-3). De mate van 'meestijgen' is mede afhankelijk van de rivierafvoer: hoe lager de rivierafvoer, hoe sterker het relatieve effect van de zeespiegel op rivierwaterstanden landinwaarts. De Jong (2020) heeft met modelsimulaties de stijging van rivierwaterstanden landinwaarts als gevolg van zeespiegelstijging bij een ZSS van 1, 2 en 3 m bij verschillende afvoeren doorgerekend (De Jong, 2020). Voor de huidige studie zijn de resultaten van deze simulaties bij een mediane afvoer genomen, waarbij lineair geïnterpoleerd is tussen de resultaten voor een zeespiegelstijging van 1m en 2m om tot een bruikbare waarde voor de zeespiegelstijging van 1.24m te komen.
- Veranderende, van zeespiegelstijging afhankelijke chlorideconcentraties in de Rijn-Maasmonding zijn gebaseerd op berekeningen uit Haasnoot et al., 2018. Voor het overige oppervlaktewater wordt chlorideconcentratie niet aangepast aan de zeespiegelstijging.

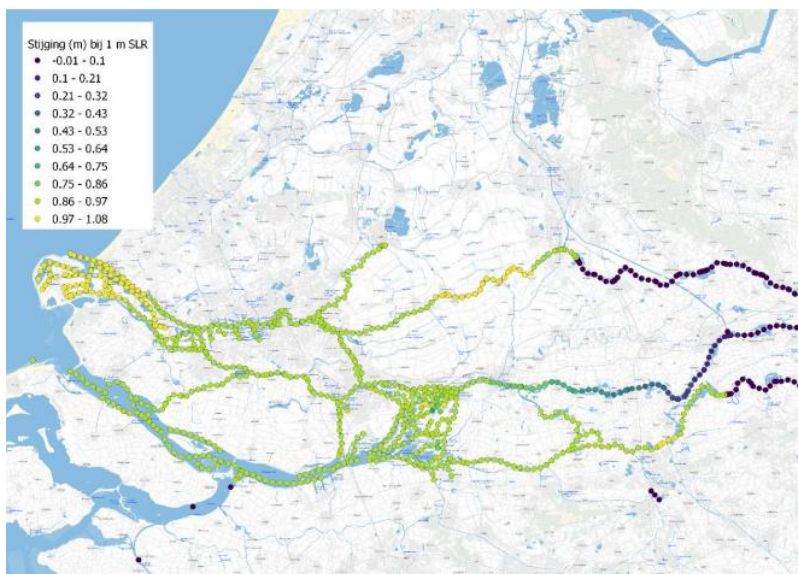
Voor meer details en achtergrond aangaande de implementatie van de zeespiegelstijging in het LHM zoet-zout wordt verder verwezen naar Delsman et al. (2022).



Figuur 2-1 De gehanteerde zeespiegelstijgingscurve.



Figuur 2-2 Indeling hoofdwatersysteem in type respons op zeespiegelstijging. Het blauwe gebied volgt de berekende doorwerking zeespiegelstijging volgens De Jong (2020).



Figuur 2-3 Doorwerking van 1 meter zeespiegelstijging op de rivierwaterstanden bij mediane afvoer (1961 m^3/s bij Lobith). De doorwerking wordt scherp begrensd door de stuwen bij Hagenstein en Lith, en de Volkeraksluizen (gebaseerd op De Jong, 2020).

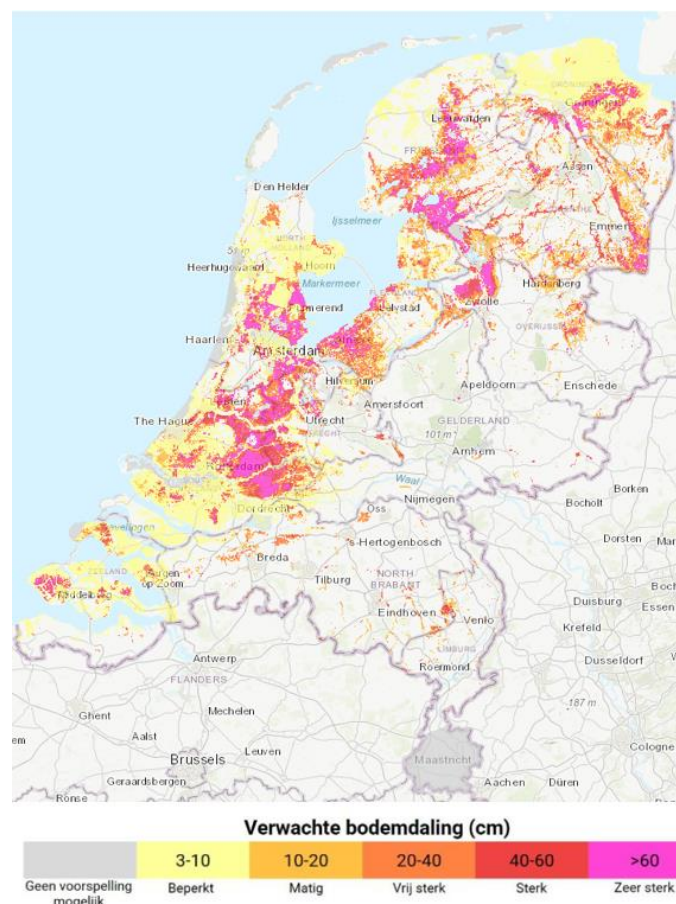
2.3.4 Bodemdaling

Net als de zeespiegelstijging volgt ook de bodemdaling de implementatie volgens de KPZSS studie van Delsman et al. (2022). In het kort betekent dit het volgende (tekst voor een groot deel afkomstig uit Delsman et al (2022)):

- Het verloop van de bodemdaling in het model is conform de prognoses in de Klimateffectatlas (<https://www.klimateffectatlas.nl/nl/bodemdalingsvoorspellingskaarten>) (Erkens et al., 2021). Deze prognoses zijn gemaakt voor twee scenario's: Business-as-Usual, met voortgaande peilindexatie en sterke klimaatverandering, en een 'Parijs-akkoord-scenario', met gematigde klimaatverandering en peilfixatie. Bij peilindexatie worden de oppervlaktewaterpeilen regulier aangepast aan de opgetreden bodemdaling, bij peilfixatie wordt het oppervlaktewaterpeil niet aangepast zodat vernatting optreedt en bodemdaling wordt geremd. In het scenario gaan we uit van de Business-as-Usual bodemdalingsprognose (Figuur 2-4), omdat dit scenario

de grootste implicaties heeft voor het grondwatersysteem en daarmee naar verwachting het grootste negatieve effect (t.w. een ondieper zoet-zout-grensvlak onder bodemdalingsgebieden, zie De Louw en Pouwels, 2023 en de tabel in Bijlage A) sorteert op de NGRs.

- Bodemdaling wordt op de peilindexatiemomenten (10-jaarlijks van 2005 tot en met 2095) geïnterpoleerd tussen het huidige maaiveld en de bodemdalingsresultaten uit de Klimateffectatlas voor 2050 en 2100. Er is geen bodemdaling verondersteld tot 2020 (hier starten de onderliggende bodemdalingsberekeningen).
- Op de peilindexatiemomenten worden de regionale waterlopen (primair, secundair en tertiair systeem) en de verschillende drainagesystemen (buisdrainage, maaiveldgreppels en oppervlakteafoer) geïndexeerd. Om pragmatische redenen worden ook de aan maaiveld 'hangende' drainagesystemen tienjaarlijks geïndexeerd. Met het peil zakt ook de bodemligging van de waterlopen.
- Het peil in het hoofdwatersysteem wordt niet geïndexeerd.
- Na het laatste indexatiemoment (2095) worden peilen, drainagesystemen en het maaiveld tot het einde van de modelberekening niet meer geïndexeerd.



Figuur 2-4 De verwachte bodemdaling voor de periode 2020-2100 voor “scenario hoog” (peilindexatie en sterke klimaatverandering) als gevolg van ontwatering (veenweidegebied) en gas- en zoutwinning, berekend door Deltares, TNO en WeNR (uit Klimateffectatlas, 2022).

2.3.5 Veranderende grondwateronttrekkingen

Zoals ook opgemerkt door De Louw en Pouwels (2023) is het onzeker hoe de grondwateronttrekkingen zich de komende eeuw zullen ontwikkelen. Aan de ene kant zijn er ontwikkelingen (bevolkingsgroei, economische groei) die de watervraag en daarmee in principe ook de behoefte aan grondwater zullen stuwen. Aan de andere kant gaan er de laatste tijd steeds meer geluiden op om juist minder grondwater te gaan onttrekken om de druk op het grondwatersysteem te verlichten. In dat geval zullen alternatieve bronnen ingezet moeten worden om toch aan de vraag te voldoen.

In deze studie worden wat betreft de grondwateronttrekkingen daarom twee scenario's uitgewerkt. Het eerste scenario gaat uit van een (landelijk gezien) toenemend gebruik van grondwater voor de drinkwatervoorziening, waarbij aangesloten wordt bij de Deltascenario's 2024 (Janssen et al., 2024). Opgemerkt wordt dat hiermee gekozen wordt voor recentere inschattingen van de ontwikkeling van de drinkwatervraag dan de eerder in het kader van de NGR-studies gehanteerde scenario's (Nijsten et al., 2022).

Het tweede scenario gaat uit van een afnemend gebruik van grondwater voor de drinkwatervoorziening, uitgaande van beleid dat gericht is op vernatting. Dit tweede scenario is onderdeel van het Water Bodem Sturend scenario, dat verder wordt toegelicht in sectie 2.3.7. Het eerste scenario wordt hieronder nader uitgelegd.

Ten behoeve van de Deltascenario's is de ontwikkeling van de drinkwatervraag afgeleid aan de hand van inschattingen van de bevolkingsgroei en de verwachte waterbesparing. Deze afleiding is uitgevoerd per drinkwaterbedrijf. Aangenomen daarbij is dat de verhouding tussen huishoudelijke en niet-huishoudelijke drinkwaterlevering in de toekomst gelijk blijft. Tabel 2-2 geeft de berekende veranderingsfactoren voor de verschillende Deltascenario's³. Te zien is dat de verandering van drinkwatervraag alleen afhangt van het socio-economische scenario en niet van het klimaatscenario, aangezien de factoren voor Ruim & Warm en voor Vlug & Stoom gelijk zijn. Een klimaateffect op de drinkwatervraag is wel te verwachten, maar jaargemiddeld wordt het effect als klein ingeschat: volgens Baggelaar et al. (2022) zou het meest extreme KNMI'14 klimaatscenario een toename van de drinkwatervraag van 0.7% betekenen.

Tabel 2-2 Groei- en krimpfactoren in de Deltascenario's 2024 van de drinkwaterlevering uitgesplitst naar drinkwaterbedrijf

Drinkwaterbedrijf	Groei of krimpfactoren van drinkwater per drinkwaterbedrijf			
	Ruim '24	Warm'24	Vlug '24	Stoom '24
Brabant Water	1.00	1.00	1.13	1.13
Dunea	1.08	1.08	1.32	1.32
Evides Waterbedrijf	1.01	1.01	1.12	1.12
Oasen	0.95	0.95	1.29	1.29
PWN	1.05	1.05	1.27	1.27
Vitens	0.99	0.99	1.13	1.13
Waternet	1.02	1.02	1.25	1.25
Waterbedrijf Groningen	0.91	0.91	1.02	1.02
WMD Drinkwater	0.93	0.93	1.04	1.04
WML	0.93	0.93	1.05	1.05

In de huidige studie gaan we voor het toekomstscenario uit van de in Tabel 2-2 genoemde factoren voor de varianten Vlug / Stoom, oftewel de varianten met de grootste groei van de

³ Kortgezegd houden de verschillende Deltascenario's het volgende in: Warm en Stoom kennen sterke klimaatverandering, Ruim en Vlug beperkte klimaatverandering. Vlug en Stoom kennen sterke socio-economische ontwikkeling, Rust en Warm kennen beperkte socio-economische ontwikkeling.

drinkwatervraag. De bestaande drinkwateronttrekkingen in het LHM-zoet-zout worden met een gewogen gemiddelde van deze factoren aangepast, die op een factor van 1.16 uitkomt. Er wordt ook een gemiddelde factor toegepast omdat verdere toepassing van deze factoren mogelijk niet evenredig verdeeld zal worden vanwege de druk op bepaalde grondwatersystemen zoals Brabant en het dus niet geheel duidelijk is waar de groei uiteindelijk precies zal plaatsvinden.

Daarbij wordt aangetekend dat deze aanpak eigenlijk inconsistent is met de aanwijzing van ASV's. Juist de ASV's zijn bedoeld om de extra drinkwatervraag op te vangen. Bestaande winlocaties zitten vaak al tegen of aan de vergunde debieten, of verdere toename van de onttrekkingshoeveelheden is anderszins onwenselijk. Omdat (op landelijke schaal) echter nog niet bekend is welke grondwatervoorraden als ASV's zullen worden aangemerkt, is een ruimtelijke inrichting van dit scenario hiermee niet mogelijk. Daarom wordt de toename van de drinkwatervraag toch aan de bestaande winlocaties toegekend. Omdat dit niet realistisch is, kunnen de resultaten van dit scenario niet gebruikt worden om de NGRs nader te definiëren. Het scenario dient dan ook vooral als een gevoeligheidsanalyse naar de mogelijke invloed van veranderende grondwateronttrekkingen op de winbaarheid van de grondwatervoorraden volgens een realistisch groeipatroon.

2.3.6 Veranderend landgebruik

2.3.6.1 Varianten

De Louw en Pouwels (2023) lichten uitgebreid toe dat het landgebruik in deze eeuw waarschijnlijk drastisch zal veranderen, onder invloed van onder andere de landbouwtransitie en verstedelijking. Zij noemen een aantal eerder uitgewerkte toekomstbeelden (Toekomstbeeld – Nederland 2120 (Baptist et al., 2019); Nederland Later (PBL, 2023), Deltascenario's 2017 (Hunink et al., 2018, Mens et al., 2019).

Voor de kwantitatieve uitwerking van het effect van mogelijke ontwikkelingen van veranderend landgebruik op de NGR-kartering wordt hier gebruik gemaakt van de landgebruiksscenario's zoals die tevens in de nieuwe Deltascenario's 2024 (Janssen en al., 2024) worden toegepast.

Voor deze ruimtelijke uitwerking is net als bij de eerdere Deltascenario's gebruik gemaakt van landgebruikssimulatie. Daarbij is gebruik gemaakt van de nieuwste versie van het model Ruimtescanner (Rijken et al., 2023). Deze simulaties zijn gestuurd met scenario's op basis van de kenmerken zoals geschetst in het plan van aanpak Deltascenario's 2023 (van de Brugge & de Winter, 2022). Voor deze uitwerking is aangesloten bij de Planmonitor NOVI 2023 met daarin de WLO-scenario's (o.a. update verstedelijking) en de Natuurverkenning (NVK) 2050 (Breman et al., 2022).

Ten behoeve van de Deltascenario's zijn twee combinaties van de WLO-scenario's met de NVK-scenario's ontwikkeld. Daarbij wordt het WLO-scenario 'Hoog' gecombineerd met het NVK-scenario 'BAU' ('business-as-usual'), en het WLO-scenario 'Laag' met het NVK-scenario 'HDB' ('hoger doelbereik'):

- WLO-scenario Hoog combineert een hoge economische groei van 2 procent per jaar met een relatief sterke bevolkingsaanwas (CPB/PBL, 2015). Dit wordt gecombineerd met het NVK-BAU-scenario welke een beperkte toename van natuur in 2050 beoogt. Door de hoge groei is er veel druk op de ruimte, en daardoor minder nadruk op natuurontwikkeling (Claassens et al., 2023).
- WLO-scenario Laag combineert een gematigde economische groei van 1 procent per jaar met een beperkte demografische ontwikkeling (CPB/PBL, 2015). Dit wordt

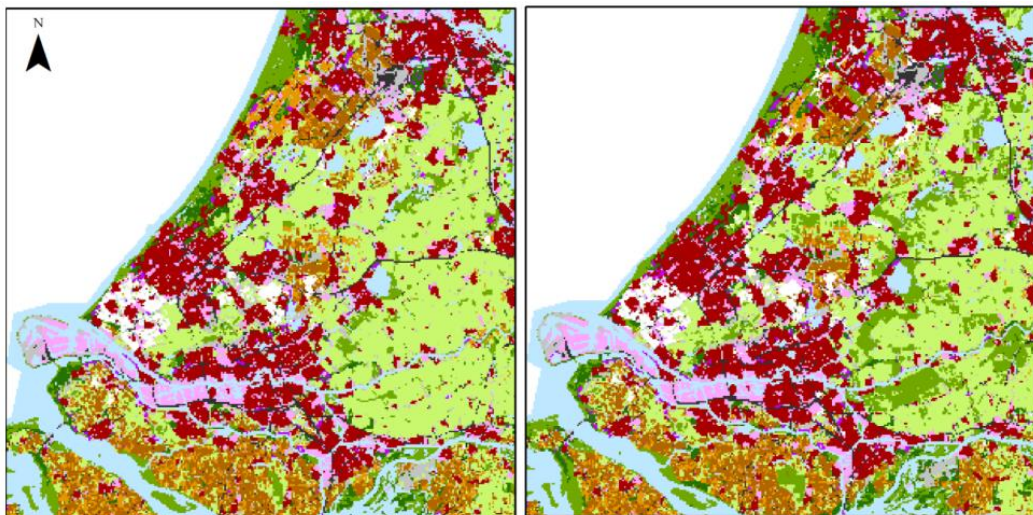
gecombineerd met het NVK-HDB-scenario welke veel natuurontwikkeling beoogt, waarvoor meer ruimte beschikbaar is vanwege de lagere groei.

In de Deltascenario's wordt de combinatie WLO-Hoog / NVK-BAU toegepast in de scenario's Vlug en Stoom. De combinatie WLO-Laag / NVK-HDB wordt toegepast in de scenario's Ruim en Warm. De landgebruiksveranderingen ten opzichte van de gehanteerde Basiskaart (referentie 2017) wordt gegeven in Tabel 2-3.

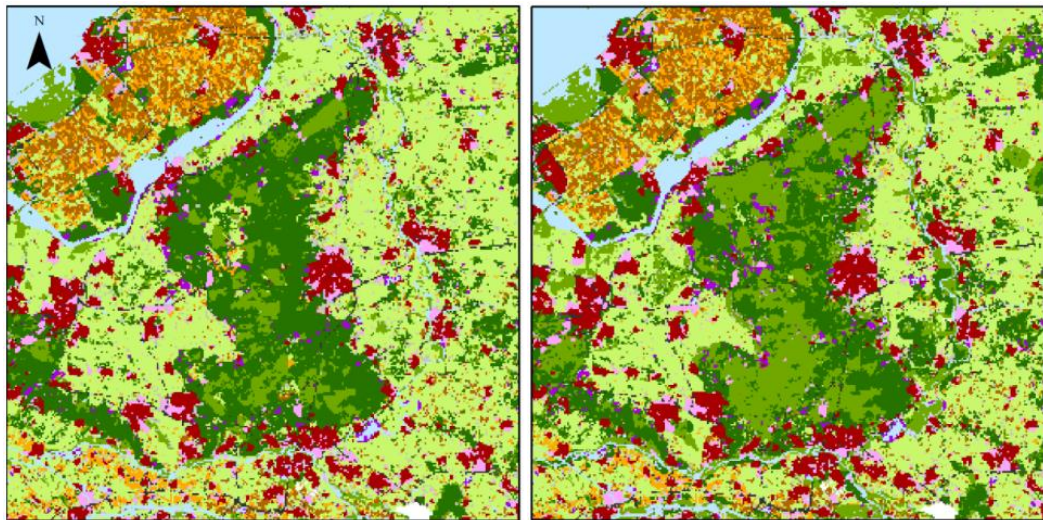
Tabel 2-3 Overzicht huidig grondgebruik en gesimuleerd areaal per scenario voor 2050 voor de belangrijkste groepen van landgebruik. Bron: Claassens et al. (2023). Note: deze tabel volgt nog een oude naamgeving van de scenario's. Druk-Parijs is uiteindelijk in de Deltascenario's 2024 'Vlug' gaan heten en Rust-Parijs 'Ruim'.

	2017	Druk-Parijs/Stoom	Rust-Parijs/Warm
Infrastructuur ⁸	83,281	83,281	83,281
Woongebied	335,967	399,301	376,269
Werkgebied ⁹	123,343	161,298	159,037
Recreatie ¹⁰	35,976	42,649	42,627
Overig landgebruik ¹¹	149,894	121,894	122,941
Glastuinbouw	15,955	15,317	15,350
Overige landbouw ¹²	210,817	201,655	184,669
Akkerbouw ¹³	647,560	632,421	565,772
Grondgebonden veeteelt ¹⁴	1,331,753	1,284,502	1,116,227
Natuur - bos	379,201	380,268	406,991
Natuur - overig	284,593	276,312	496,895
Water	137,193	129,204	126,858

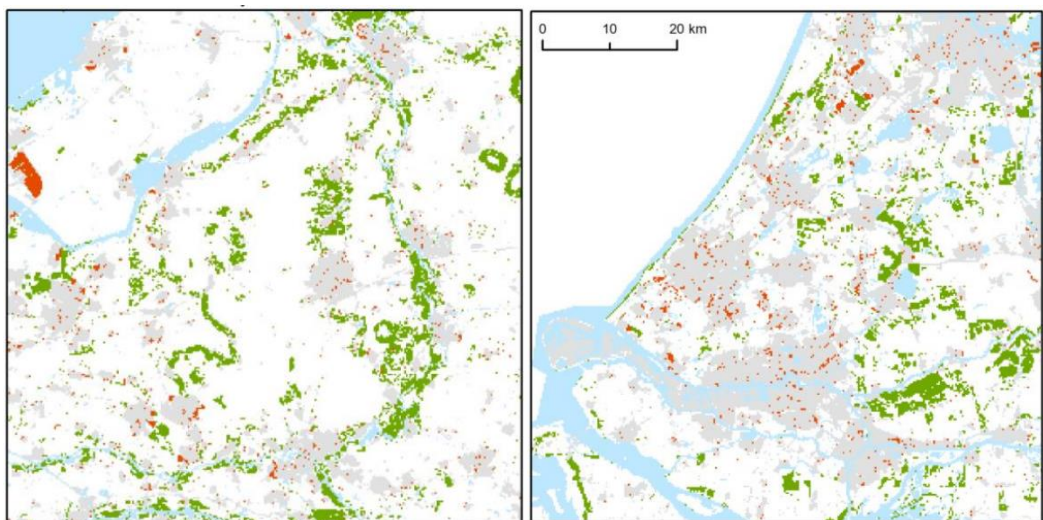
Voor de huidige studie wordt het landgebruik behorend bij de Deltascenario's Ruim en Warm doorgerekend, oftewel de beperktere economische ontwikkeling in combinatie met een hoger doelbereik voor natuur. Hier is voor gekozen omdat de landelijke programma's (NPLG etc.) hiermee in lijn liggen. De landgebruiksveranderingen zijn in dit scenario ook het grootst, met als belangrijkste ontwikkeling de conversie van landbouwgrond naar natuur. Bij wijze van voorbeeld worden in Figuur 2-5 t/m Figuur 2-7 voor twee uitsneden de landgebruiksveranderingen in beeld gebracht middels een visuele vergelijking tussen het basisjaar en de toekomstbeelden.



Figuur 2-5 Uitsneden van de landgebruikskaarten in het basisjaar en de toekomstbeelden. Uitsneden van de westelijke Randstad. Bron: Claassens et al. (2023).



Figuur 2-6. Uitsneden van de landgebruikskaarten in het basisjaar en de toekomstbeelden. Uitsneden van de Utrechtse Heuvelrug en Veluwe. Bron: Claassens et al. (2023).



Figuur 2-7 Nieuw woongebied (rood) en nieuwe natuur (groen) voor twee uitsneden (links: Utrechtse Heuvelrug/Veluwe, rechts: westelijke Randstad). Bron: Claassens et al. (2023).

2.3.6.2 Implementatie

Het veranderde landgebruik heeft voor het model als consequentie dat de grondwateraanvulling en de ontwatering verandert. De grondwateraanvulling is een bovenrandvoorwaarde voor LHM-zoet-zout en dient 'buitenlangs' afgeleid te worden. De grondwateraanvulling is afgeleid volgens methode 1 uit paragraaf 2.3.2 aan de hand van een nieuwe run met LHM 4.3, waarin de onverzadigde-zonemodule MetaSWAP de uitvoervariabelen levert aan de hand waarvan de grondwateraanvulling kan worden berekend. In de LHM 4.3-run zijn de landgebruiksveranderingen doorgevoerd in de MetaSWAP-parameterisatie en -schematisering. De landgebruiksveranderingen hebben tevens invloed op de grondwatermodule MODFLOW-schematisering; daar waar natuur ontwikkeld wordt, is buisdrainage verwijderd en de ligging van de buisdrainage is aangepast aan de veranderingen van landgebruik die hebben plaatsgevonden. De doorvoering van de landgebruiksveranderingen in LHM 4.3 volgt de werkwijze zoals gevolgd bij de totstandkoming van de modelinvoer van de Deltascenario's; een meer gedetailleerde

beschrijving van deze implementatie kan daarom gevonden worden in de betreffende rapportage (Janssen et al., 2024).

In LHM-zoet-zout v4.1, welke het referentiemodel is voor de scenario's in deze studie⁴, is de grondwateraanvulling afgeleid van LHM 4.1 (Janssen et al, 2021). Deze grondwateraanvulling is voor het landgebruiksscenario aangepast met het verschil tussen de grondwateraanvulling uit LHM 4.3 *met* en *zonder* de landgebruiksverandering, oftewel met het effect van de landgebruiksveranderingen op de grondwateraanvulling. Er is niet direct gerekend met de grondwateraanvulling zoals volgt uit LHM 4.3 + landgebruiksveranderingen, omdat in dat geval verschillen met de referentie ook het gevolg zijn van andere modelwijzigingen in het LHM sinds LHM 4.1.

In formulevorm (waarbij LGV staat voor landgebruiksveranderingen en GWA voor grondwateraanvulling):

$$GWA_{LHM_zz \text{ met LGV}} = GWA_{LHM_4.1} + (GWA_{LHM4.3 \text{ met LGV}} - GWA_{LHM4.3}) \quad (3)$$

In LHM-zoet-zout zijn tevens dezelfde MODFLOW-aanpassingen doorgevoerd als in LHM 4.3 is gedaan t.b.v. dit landgebruiksscenario.

2.3.7 Herinrichting watersysteem

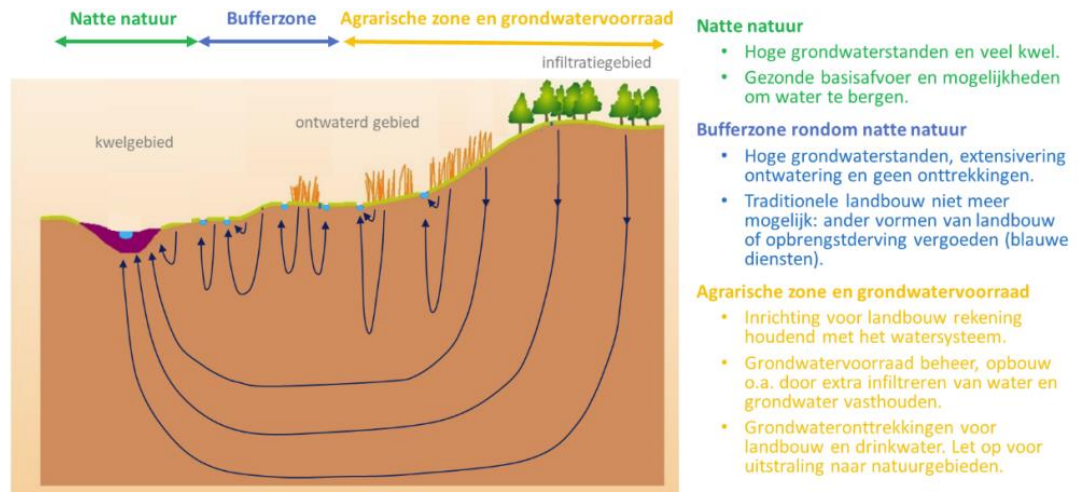
De Louw en Pouwels (2023) bespreken hoe het watersysteem in de toekomst anders ingericht zou kunnen worden om aan de wateropgaven te voldoen, voor de vier landschapstypen waarin Nederland grofweg kan worden ingedeeld (zandgebied, kleigebied, veenweidegebied en het Limburgse kalklandschap). Hieronder worden per landschapstype kort de belangrijkste bevindingen herhaald en wordt uitgelegd hoe de veranderingen in het watersysteem in LHM-zoet-zout zijn geïmplementeerd om invulling te geven aan het scenario 'herinrichting watersysteem'. Het kalklandschap is daarbij buiten beschouwing gebleven, omdat De Louw en Pouwels aangaven dat de watersysteemveranderingen die zij voor ogen hadden (i.e. bergen van afstromend regenwater in retentiebossen, maatregelen die de infiltratie van water in de bodem bevorderen) een geringe impact hebben op het gemiddelde grondwatersysteem.

2.3.7.1 Zandgebied (Hoge Zandgronden)

Door de structurele verdroging als gevolg van met name intensieve ontwatering en drinkwateronttrekkingen worden natuurdoelen niet gehaald en dreigen zelfs de Europese doelen voor de habitatrichtlijn (NATURA2000-gebieden) en KRW (Kaderrichtlijn Water) niet gehaald te worden. Het extensiveren van het ontwateringsysteem is essentieel in een watertransitie richting een klimaat-robust of toekomst-bestendig watersysteem. Dit kan door het verhogen van slootbodems en waterpeilen, het verwijderen of regelbaar maken van buisdrainage en het dempen van sloten.

De Louw et al. (2022) stelden onderstaande herinrichting van het zandlandschap en watersysteem voor waarbij wordt gestreefd naar optimaal natuurherstel en waarbij invulling wordt gegeven aan het principe van water- en bodemsysteem sturend bij de ruimtelijke ordening (Figuur 2-8). Een belangrijke rol is hierin weggelegd voor bufferzones rondom natuurgebieden vanwege de modelmatig aangetoonde hoge effectiviteit (Meeusen et al., 2023).

⁴ Met uitzondering van de klimaatscenario's, voor wat betreft de grondwateraanvulling (zie paragraaf 2.3.2).



Figuur 2-8 Het indelen van het landschap in zones kan een goede aanpak zijn om te komen tot een klimaatbestendig watersysteem waarbij het water sturend is (uit De Louw et al., 2022).

De in LHM-zoet-zout doorgevoerde herinrichting van het watersysteem in het zandgebied volgt grotendeels de aanpak uit bovengenoemde studie (Meeusen et al., 2023). Concreet houdt dit in:

- 1) In een bufferzone van 500m rondom grondwaterafhankelijke natuurgebieden:
 - a. Buisdrainage verwijderd
 - b. Ontwateringsdiepte verhoogd tot 0.3m-mv voor de primaire, secundaire en tertiaire watersystemen.
- 2) In een bufferzone van 1000m rondom grondwaterafhankelijke natuurgebieden:
 - a. Onttrekkingen (niet-landbouw) gehalveerd
- 3) Buiten de bufferzones: Ophoging van slootbodems en peilen en drainage tot 0.5m-mv als deze een ontwateringsdiepte van minder is dan 0.75m hebben. Bij ontwateringsdiepte groter dan 0.75m is de ontwateringsdiepte opgehoogd met 0.25m.

Bij 2) wordt nog opgemerkt dat met deze reductie van de onttrekkingen een debietsreductie van 26% gerealiseerd wordt, waarmee voldaan wordt aan de aanbeveling in de recente brief "Water en bodem sturend" van de minister van IenW aan de Tweede Kamer (d.d. 25 november 2022) waarin staat: "We werken toe naar een drinkwatergebruik per hoofd van de bevolking van 100 liter in 2035 (thans 125 liter) en beperken laagwaardig gebruik van drinkwater. Grootverbruikers vragen we het drinkwatergebruik ook met 20% te reduceren. Zo beperken we het effect van toename van de watervraag in relatie tot de schaarsere beschikbaarheid van water."

Niet alle maatregelen zijn overgenomen uit Meeusen et al. (2023). Er is niet gewerkt met een reductie van grondwateronttrekkingen voor beregening. De reden hiervoor is tweeledig:

- 1) Inhoudelijk: de onttrekkingen voor beregening zijn kortstondig van aard en daarmee van geringe invloed op de langjarige gemiddelde grondwataanvulling.
- 2) Praktisch: het implementeren van een reductie van de grondwateronttrekkingen voor beregening is lastig praktisch uitvoerbaar; in LHM-zoet-zout zijn deze onttrekkingen niet expliciet aanwezig. In de grondwataanvulling, die als bovenrandvoorwaarde op LHM-zoet-zout zit, zit wel een effect van de beregening verwerkt zoals berekend door LHM 4.1; echter de onttrekkingen zelf zitten niet in LHM-zoet-zout.

2.3.7.2 Kleigebied

In het kleigebied, en dan specifiek de zeeleipolders, speelt de problematiek van interne verzilting van het oppervlaktewater. Herinrichting van het watersysteem in de zeeleipolders kan er dus op gericht zijn om de zoute kweldruk te verminderen. Dit kan middels peilopzet. Het is hierbij wel van belang dat het stijghoogteverschil tussen het eerste watervoerend pakket waar de kwel uit afkomstig is en het freatische peil significant wordt verlaagd.

Aan een dergelijk scenario is als volgt invulling gegeven:

- In polders (afgebakend met winterpeil lager dan $-3\text{m}+\text{NAP}$) is een peilverhoging tot de gemiddelde drooglegging van 80 cm-mv toegepast op zowel het polderpeil als het boezempeil. Het doel van deze verhoging is om een zo groot mogelijke reductie van de kwelflux te verkrijgen en daarbij tegelijkertijd het de polder nog steeds toepasbaar voor verschillende landgebruiken te behouden door de ontwateringsdiepte niet te laag te maken.
- Deze verhoging tot 80 cm-mv is berekend ten opzichte van het gemiddelde peil per Local Surface Water (LSW⁵). In polders wordt vaak één peil gehandhaafd zelfs als er fluctuaties in maaiveld plaatsvinden. Er is ervan uitgegaan dat met een per LSW gemiddelde verhoging hier recht aan gedaan wordt.
- Polders zijn aangegeven als locaties waar het winterpeil lager ligt dan -3m tot NAP.

2.3.7.3 Veenweidegebied

In het veenweidegebied speelt vooral de bodemdalingsproblematiek door veenoxidatie en de daaraan gerelateerde uitstoot van broeikasgassen. Het ligt voor de hand dat in de toekomst het beleid er meer en meer op gericht zal zijn de bodemdaling af te remmen. Ook hier ligt de sleutel in peilopzet.

Dit is in het LHM-zoet-zout als volgt geïmplementeerd:

- De oppervlaktewaterpeilen van het primaire, secundaire en tertiaire systeem in het veenweidegebied worden verhoogd tot 20cm-mv. Dit niveau is de bovengrens (hoogste ambitieniveau) van de range van 20-40cm-mv zoals genoemd als streven in de brief "Water en bodem sturend" aan de Tweede Kamer (d.d. 25 november 2022).
- In plaats van de bodemdalingskaart behorende bij het Business-as-Usual scenario zoals gebruikt in het *stand-alone* Bodemdalingsscenario (sectie 2.3.4), wordt de kaart uit de Klimaateffectatlas behorende bij het 'Parijs-akkoord-scenario' toegepast. Deze kaart impliceert peilfixatie i.p.v. peilindexatie en is daarom beter in lijn met de gehanteerde peilopzet. De bodemdalingskaarten worden weer voor de zichtjaren 2050 en 2100 gehanteerd, waarbij de maaiveldhoogte in de tijd lineair tussen beide wordt geïnterpoleerd in 10-jarige tijdsvakken.

De combinatie van peilverhoging en bodemdaling i.c.m. met peilfixatie is als volgt uitgevoerd: eerst zijn de peilen verhoogd t.o.v. het maaiveld zoals beschreven in de eerste bullet hierboven. Daarna zijn de peilen verlaagd met de bodemdaling. Op deze manier wordt voorkomen dat peilen boven het (verlaagde) maaiveld terecht komen.

⁵ Een LSW is een schematiseringseenheid in het Landelijk Hydrologisch Model. Een LSW kan gezien worden als een deelstroomgebied. In het LHM liggen ongeveer 8000 LSW's.

3 Resultaten 1: effecten individuele scenario's

Dit hoofdstuk toont en bespreekt in het kort de rekenresultaten voor de verschillende, in het vorige hoofdstuk uiteengezette scenario's. Steeds worden, indien relevant, de volgende resultaten getoond:

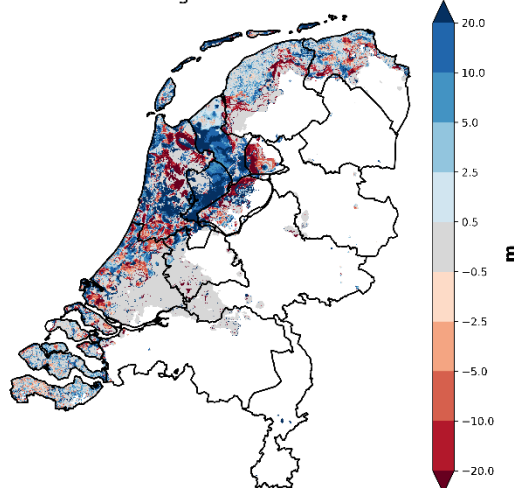
- Effect op freatische grondwaterstand;
- Effect op stijghoogte in het eerste watervoerend pakket;
- Effect op de verplaatsing van het zoet-zoutgrensvlak. De gehanteerde chlorideconcentratie daarbij is 1.5g/L (i.e. het zoet-zoutgrensvlak ligt op de diepte waar deze concentratie voor het eerst wordt overschreden);
- Effect op het grondwaterleeftijdsvlak. Hier wordt gekeken naar het 50-jaars vlak, dus het grensvlak waar van water jonger of ouder dan 50 jaar. Dit is een lagere leeftijd dan gehanteerd in de afbakening van de NGRs; het gaat hier echter slechts om een gevoeligheidsanalyse. Er is voor een lagere leeftijd gekozen om de rekentijden te beperken.
- De grondwateraanvulling, indien veranderd ten opzichte van de referentie.

De legenda's van de effecten op de grensvlakken (zoet-zout en leeftijd) zijn zodanig gekozen dat de rode kleuren duiden op een ontwikkeling die in principe ongunstig is voor de robuustheid van de NGRs. Dus: in het geval van het zoet-zoutgrensvlak duiden rode kleuren op een grensvlak dat ondieper komt te liggen in het scenario t.o.v. de referentie. In het geval van het leeftijdsvlak duiden rode kleuren juist op het dieper komen te liggen van dit grensvlak.

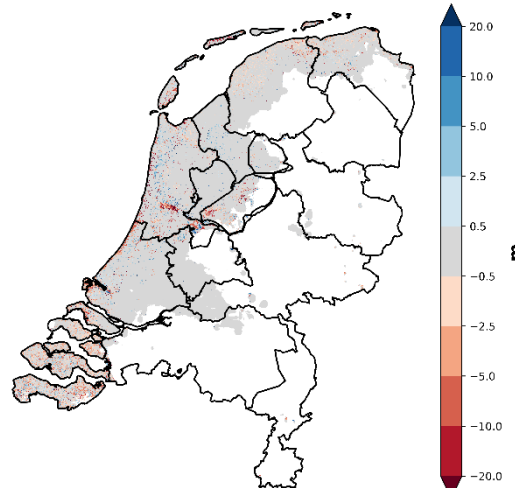
3.1 Autonome ontwikkeling

Figuur 3-1 toont de autonome verplaatsing van het zoet-zoutgrensvlak (gedefinieerd op 1.5 g/L chloride). Het betreft de verplaatsing tussen 2020 (na 20 jaar inspelen van het model na 2000) tot 2100. Er zijn grote verschuivingen zichtbaar, welke eerder (deels) zijn besproken door Delsman et al. (2020). De verschuivingen zijn voor een groot deel te verklaren uit bekende autonome processen, zoals de voortgaande verzoeting van het IJsselmeer na de voltooiing van de Afsluitdijk, en de doorgaande verzilting van de diepe zeeleipolders. Deels zullen de verschuivingen echter ook het gevolg zijn van modelartefacten/onzekerheden/onnauwkeurigheden, waarvan de invloed ook na 20 jaar inspelen nog niet is uitgewerkt. Daadwerkelijke autonome ontwikkeling en verschuivingen als gevolg van modelartefacten zijn onmogelijk volledig uit elkaar te trekken. Bij de kartering van de NGRs dient er rekening mee gehouden te worden dat gemodelleerde verzilting conform de werkelijkheid *zou kunnen zijn*.

Δ ZZ-Grensvlak 1.5g-L AUTcorr 2100 - 2020



Δ ZZ-Grensvlak Hd2100-AUTcorr



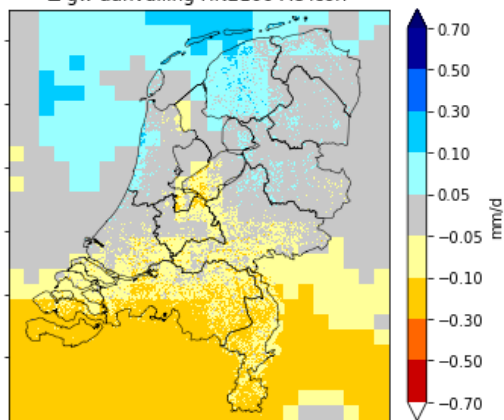
Figuur 3-1 De autonome ontwikkeling van de diepte van het zoet-zoutgrensvlak tussen 2020 en 2100. Rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen. Blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen. In de witte delen bevindt zich geen zoet-zoutgrensvlak (de grens van 1.5 g/L wordt nergens in het profiel bereikt).

3.2 Klimaatverandering

3.2.1 Klimaatverandering volgens het Hn-scenario

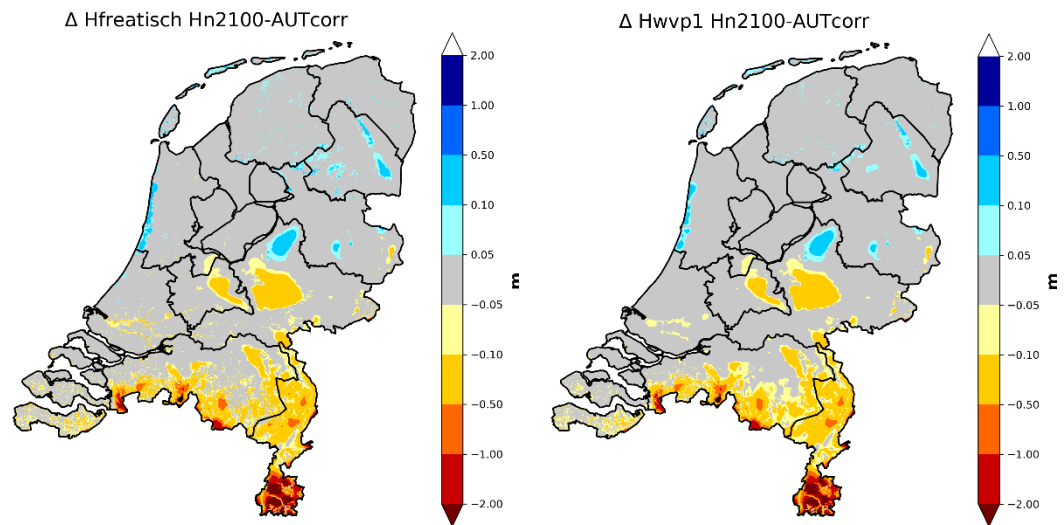
Figuur 3-2 toont de berekende verandering van de langjarig gemiddelde grondwateraanvulling bij klimaatverandering volgens het Hn-scenario t.o.v. de referentie. Er is een gradiënt zichtbaar van een langjarig gemiddelde verdroging in het zuiden en vernatting in het noorden. Deze gradiënt is afkomstig van de door het KNMI aangeleverde neerslagoverschot voor dit scenario. De verandering in de grondwateraanvulling is in algemene zin nog vrij beperkt, zeker in vergelijking met de veranderingen onder het Hd2100-scenario (volgende paragraaf).

Δ gw-aanvulling HN2100-AUTcorr



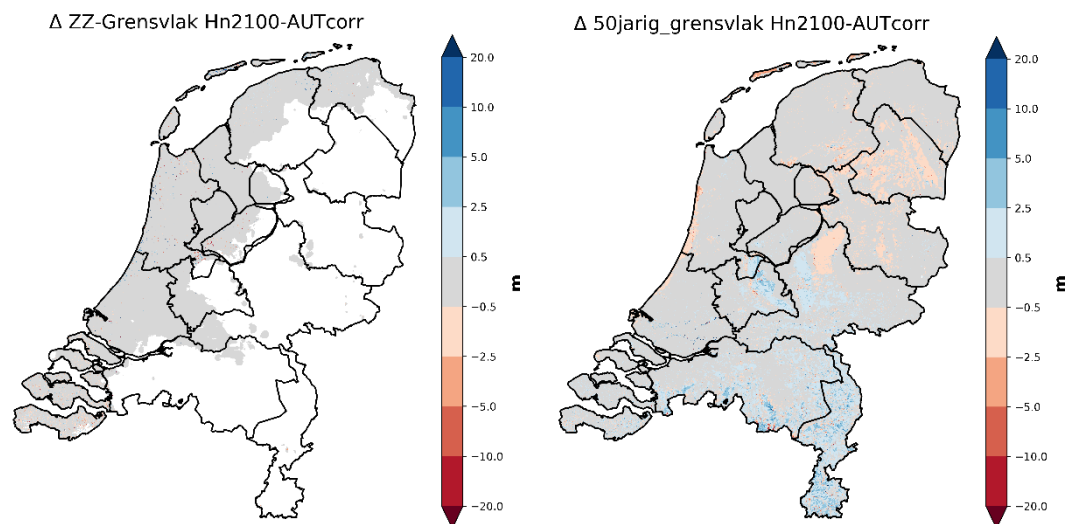
Figuur 3-2 Verandering van de grondwateraanvulling in het Hn-scenario in 2100 ten opzichte van de referentie. Het vooral buiten het landoppervlak van Nederland zichtbare 'blokkenpatroon' is afkomstig van de 12x12km resolutie van de meteorodata van het KNMI. Binnen het landoppervlak van Nederland vervalt dit blokkenpatroon grotendeels als gevolg van de verwerking van de verdampingsreductiefactor F_R in de grondwateraanvulling (zie Verg. 1 in paragraaf 2.3.2). Deze factor wordt berekend met het LHM en kent daardoor een veel hogere resolutie. De factor is alleen ruimtelijk variabel binnen het landoppervlak van Nederland.

In het effect van dit scenario op de grondwaterstanden en stijghoogten komt het patroon in de veranderende grondwateraanvulling duidelijk terug (Figuur 3-3). Vooral in het zuiden is een verdroging zichtbaar. In het overgrote deel van het land vallen de veranderingen onder de grenzen van wat in de geohydrologie over het algemeen als significant effect wordt beschouwd (< 5cm).



Figuur 3-3 Het stationaire effect van klimaatverandering volgens het Hn-scenario op de freatische grondwaterstand (links) en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (rechts) in 2100.

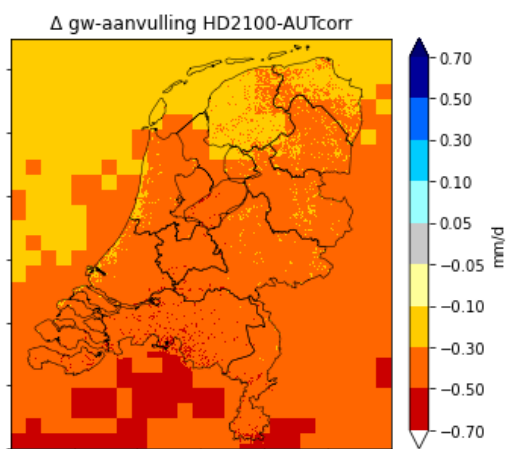
De vrij beperkte invloed van dit klimaatscenario op het grondwatersysteem komt tevens tot uiting in de verschuivingen van de grensvlakken (Figuur 3-4). Er zijn nagenoeg geen effecten op het zoet-zoutgrensvlak. De veranderingen in het leeftijdsvlak volgen het noord-zuid patroon in de gewijzigde grondwateraanvulling; in het zuiden een lichte verondieping, in het noorden een lichte verdieping. Dit laat zien dat extra grondwateraanvulling voor een verdieping van het leeftijdsgrensvlak zorgt.



Figuur 3-4 Links: het stationaire effect van klimaatverandering volgens het Hn-scenario op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak in 2100 (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van klimaatverandering volgens het Hn-scenario op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak in 2100 (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen).

3.2.2 Klimaatverandering volgens het Hd2100-scenario

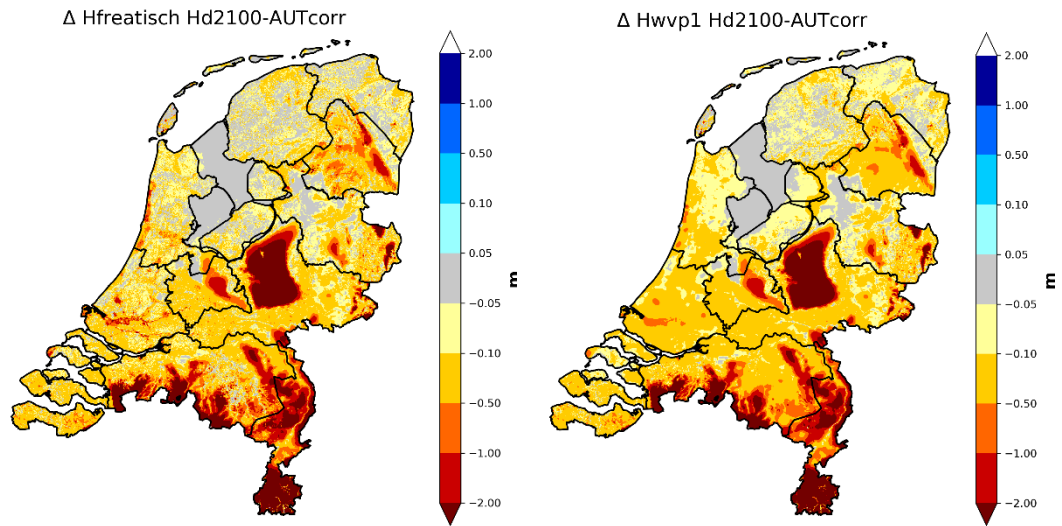
De veranderingen zijn een stuk heftiger in het Hd2100-scenario. Figuur 3-5 toont weer de verandering van de grondwateraanvulling ten opzichte van de referentie. De langjarige grondwateraanvulling gaat in het hele land fors achteruit met verlagingen van 0.3-0.5 mm/d. Wel is er weer een noord-zuid trend zichtbaar, met in het zuiden weer de sterkste verdroging.



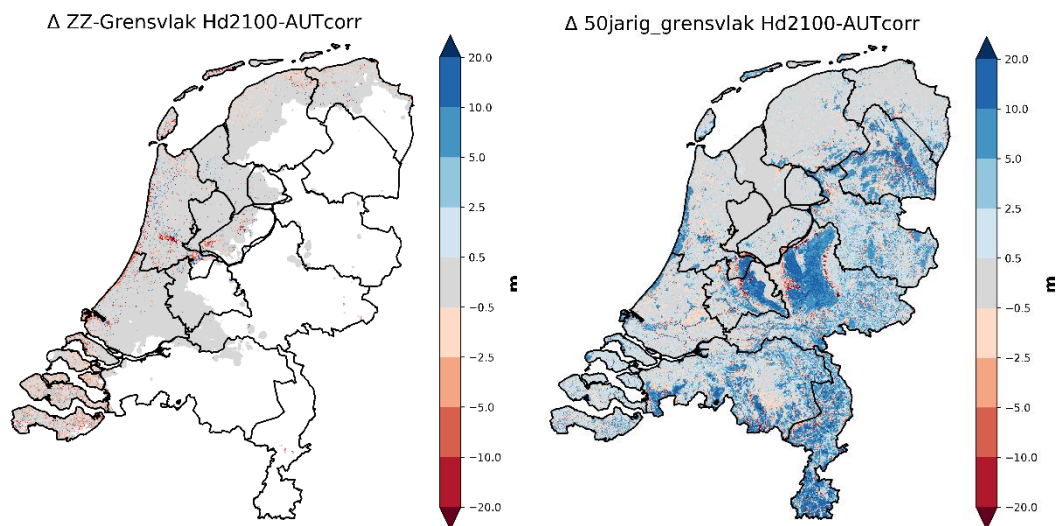
Figuur 3-5 Verandering van de grondwateraanvulling in het Hd2100-scenario in 2100 ten opzichte van de referentie.

Dit resulteert in grote, verdrogende effecten op de grondwaterstanden en stijghoogten in het eerste watervoerend pakket (Figuur 3-6). In paragraaf 2.3.2 is benoemd dat het klimaateffect als gevolg van de wijze van implementatie van dit scenario wordt overschat. De overschatting is waarschijnlijk het grootst in het zuiden, waar naar verwachting de (niet meegenomen) toename van de verdampingsreductie het grootst zal zijn en waar, tegen de grenzen tussen Brabant en Limburg met België en Duitsland, bovendien sprake is van een doorwerking van te laag berekende stijghoogten aldaar (zie ook paragraaf 2.3.2).

Wat betreft het zoet-zoutgrensvlak (Figuur 3-7) is het effect erg beperkt; voor zover er effecten zijn is overwegend een verondieping zichtbaar. Dit zijn deels gebieden (op land, bijvoorbeeld duingebieden) waar in de autonome ontwikkeling (Figuur 3-1) verzoeting plaatsvindt; deze verzoeting verloopt minder snel als de grondwateraanvulling kleiner is. Deels kunnen het ook kwelgebieden betreffen waar juist verzilting optreedt in de autonome ontwikkeling. De lagere grondwateraanvulling resulteert hier in minder tegendruk voor de kwel, waardoor deze toe kan nemen. Er zijn, hoewel qua areaal een stuk beperkter, tevens pixels waarneembaar waar het zoet-zoutgrensvlak juist dieper komt te liggen. Dit kan gebeuren in kwelgebieden naast infiltratiegebieden, waar de kwel door de lagere grondwateraanvulling in de infiltratiegebieden juist minder 'aangejaagd' wordt omdat de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket afneemt. Dit kan resulteren in een tragere verzilting en dus een dieper zoet-zoutgrensvlak dan in de autonome ontwikkeling. Het leeftijdsvlak komt overwegend ondieper te liggen in de infiltratiegebieden, wat een logisch gevolg is van de kleinere infiltratiefluxen door een afname in grondwateraanvulling. De verschuivingen zijn het grootst op gestuwde, hoge zandgronden, waar de grondwaterstroming over een groot profiel verticaal gericht is en waar veranderingen in de infiltratiesnelheid/grondwateraanvulling dus het grootste effect zullen sorteren op de verticale verplaatsing van het leeftijdsvlak. In kwelzones naast de grote infiltratiegebieden (bijvoorbeeld de Veluwe, Utrechts en Sallandse Heuvelrug, de duinen) zijn tevens duidelijk gebieden zichtbaar waar het leeftijdsvlak dieper komt te liggen door de afgenomen kweldruk (als gevolg van de afgenomen infiltratie in de infiltratiegebieden).



Figuur 3-6 Het stationaire effect van klimaatverandering volgens het Hd2100-scenario op de freatische grondwaterstand in 2100 (links) en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in 2100 (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

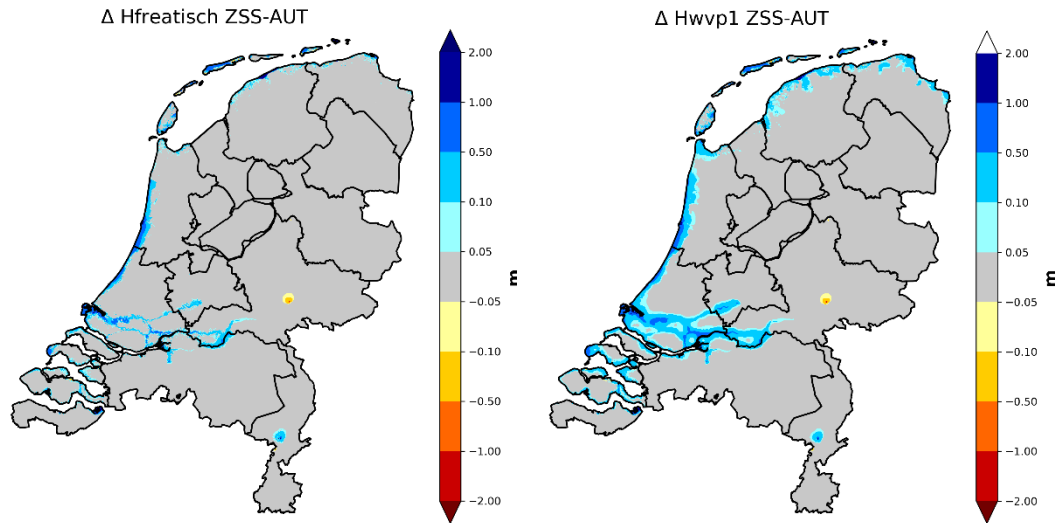


Figuur 3-7 Links: het stationaire effect van klimaatverandering volgens het Hd2100-scenario op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak in 2100 (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van klimaatverandering volgens het Hd2100-scenario op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak in 2100 (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

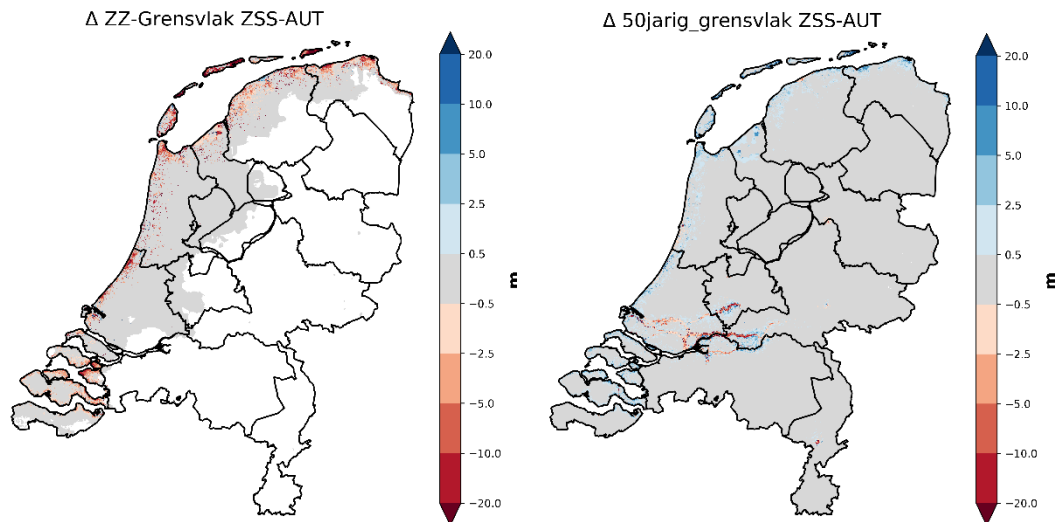
3.3 Zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging resulteert in een toename van de stijghoogte in een smalle strook langs de kust en het deel van het hoofdwatersysteem waarin de zeespiegelstijging via opstuwing doorwerkt (Figuur 3-8). Freatisch gaat dit effect minder ver landinwaarts dan in het eerste watervoerend pakket, vanwege de dempende werking van het oppervlaktewater- en drainagesysteem.

De relatieve toename van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket ten opzichte van het freatisch systeem resulteert langs de kust in kleinere infiltratiefluxen en hogere kwelfluxen, wat een ondieper zoet-zoutgrensvlak tot gevolg heeft (Figuur 3-9). Ook toegenomen directe zoutwaterintrusie kan hierin een rol spelen. Onder het hoofdwatersysteem waar de zeespiegelstijging doorwerkt is een verdieping zichtbaar van het leeftijdsvlak, doordat de hogere oppervlaktewaterpeilen leiden tot hogere infiltratiefluxen vanuit de waterlopen. Landinwaarts van het hoofdwatersysteem is dan weer een verondieping van het leeftijdsvlak zichtbaar, volgens hetzelfde principe als langs de kust, namelijk dat de relatieve toename van de stijghoogte zorgt voor kleinere wegzijgingsfluxen.



Figuur 3-8 Het stationaire effect van de opgelegde zeespiegelstijging op de freatische grondwaterstand in 2100 (links) en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in 2100 (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.



Figuur 3-9 Links: het stationaire effect van de opgelegde zeespiegelstijging op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak in 2100 (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van de opgelegde zeespiegelstijging op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak in 2100 (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

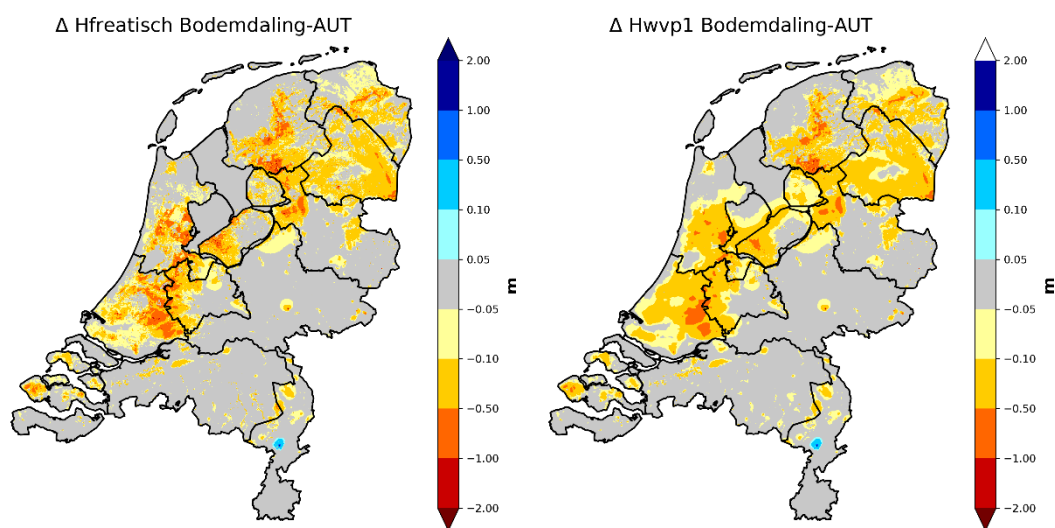
3.4 Bodemdaling

De gevoeligheidsanalyse m.b.t. bodemdaling is uitgevoerd met de 'scenario hoog' variant (zie paragraaf 2.3.4). De bodemdaling resulteert in verlaging van grondwaterstanden en stijghoogten als gevolg van de peilindexatie (Figuur 3-10). De verlaging in het opgelegde scenario bedraagt overwegend tussen de 10 en 50 cm, maar loopt sporadisch op tot meer dan 1 meter. De verlaging van de freatische grondwaterstanden in de bodemdalingsgebieden is sterker dan die van de stijghoogten in het eerste watervoerend pakket, maar werkt over het algemeen wel sterk door naar het (in ieder geval) dit eerste watervoerend pakket. Buiten de bodemdalingsgebieden kan de daling van de diepere stijghoogten groter zijn dan de freatische effecten, omdat er freatisch niks verandert aan de peilen en de diepere stijghoogten dalen als gevolg van uitstraling van de effecten in de bodemdalingsgebieden.

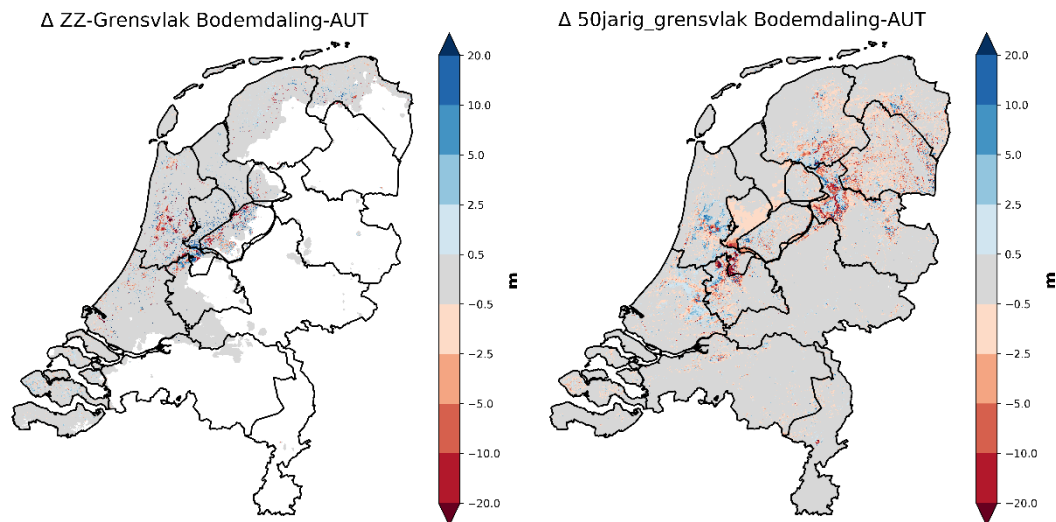
De verandering van de positie van het zoet-zoutgrensvlak toont een wisselend beeld van verdieping en verondieping. Dit laat zich als volgt verklaren. In de bodemdalingsgebieden neemt de kwelflux toe (of infiltratieflux af) als gevolg van de relatieve afname van de freatische grondwaterstanden opzichte van de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Dit heeft een verondiepende uitwerking op het zoet-zoutgrensvlak. Enkele sterkere bodemdalingsgebieden, namelijk xxx, lichten in Figuur 3-11 (links) dan ook rood op. Lang niet alle (sterke) bodemdalingsgebieden zijn duidelijk terug te zien in deze figuur; dit komt doordat in veel bodemdalingsgebieden, welke vaak ook kwelgebieden zijn, het grensvlak ook in het autonome scenario al zeer ondiep is, zoals bij xxx.

Buiten de bodemdalingsgebieden neemt juist de kwel af (of infiltratie toe) omdat daar de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket juist afneemt ten opzichte van het freatisch systeem. Dit resulteert in een dieper zoet-zoutgrensvlak.

De bodemdaling heeft op het leeftijdsvlak qua richting een vergelijkbare uitwerking als op het zoet-zoutgrensvlak (Figuur 3-11, rechts). Waar die richting voor het zoet-zoutgrensvlak positief is (uit oogpunt van robuustheid van NGRs), is die voor het leeftijdsvlak negatief.



Figuur 3-10 Het stationaire effect van de bodemdaling op de freatische grondwaterstand in 2100 (links) en op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in 2100 (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.



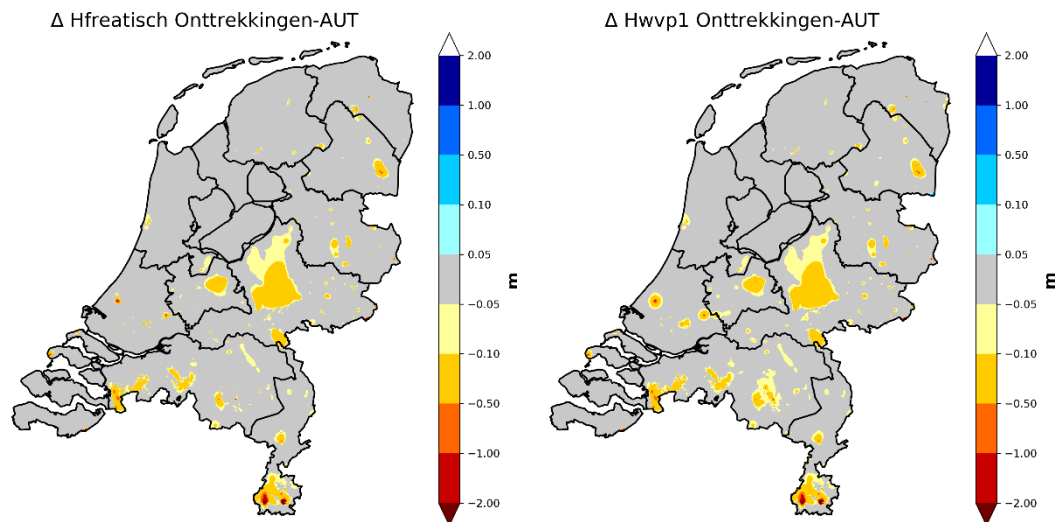
Figuur 3-11 Links: het stationaire effect van de bodemdaling op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak in 2100 (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van de bodemdaling op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak in 2100 (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

3.5 Veranderende grondwateronttrekkingen

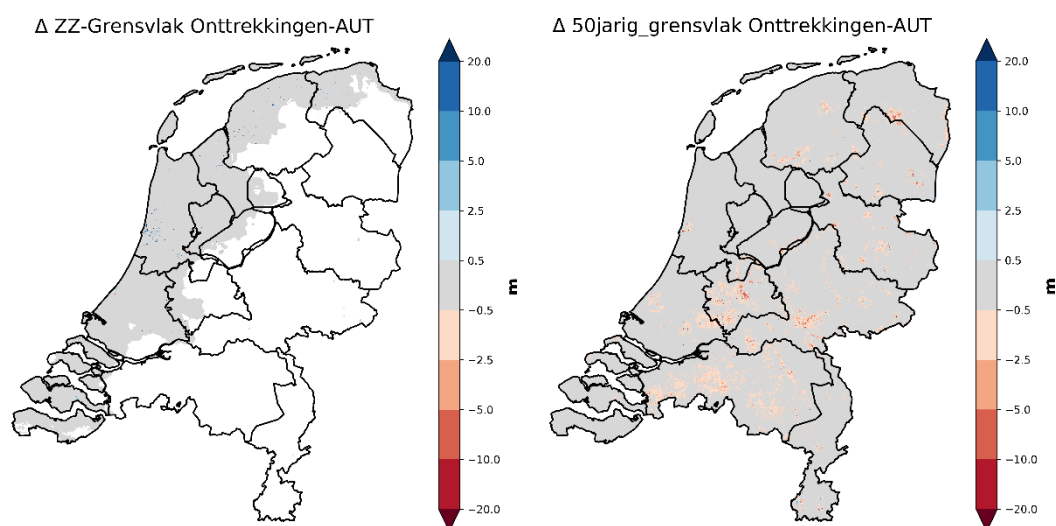
Figuur 3-12 toont het effect van de toename van de grondwateronttrekkingsdebieten op grondwaterstanden en stijghoogten. Vanzelfsprekend resulteren de toegenomen debieten in verlagingen, tot maximaal ongeveer 0.5m. Deze verlagingen zijn vaak groter in het diepere grondwatersysteem dan freatisch, omdat de onttrekkingen overwegend niet-freatisch zijn en de verlaging in het freatische systeem gedempt kan worden door compenserende, toenemende infiltratiefluxen vanuit het oppervlaktewatersysteem.

De effecten op het zoet-zoutgrensvlak zijn zeer beperkt, mede doordat in het relevante gebied zich weinig grondwateronttrekkingen bevinden. Het leeftijdsvlak komt vanwege de vanaf het maaiveld gezien grotere neerwaartse (namelijk: richting de onttrekkingen) fluxen dieper te liggen, maar de effecten zijn ook hier erg beperkt.

Naast de beperkte effecten speelt het geringe realiteitsgehalte van dit scenario (zie discussie hierover in Hoofdstuk 2). De betreffende berekeningen geven inzicht in de gevoeligheden van de grensvlakken voor veranderende (toenemende) onttrekkingsdebieten, maar het scenario is vanwege de zwakke ruimtelijke onderbouwing niet mee te nemen bij verdere afbakening van de NGRs.



Figuur 3-12 Het stationaire effect van de veranderde grondwateronttrekkingsdebieten op de freatische grondwaterstand in 2100 (links) en op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in 2100 (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

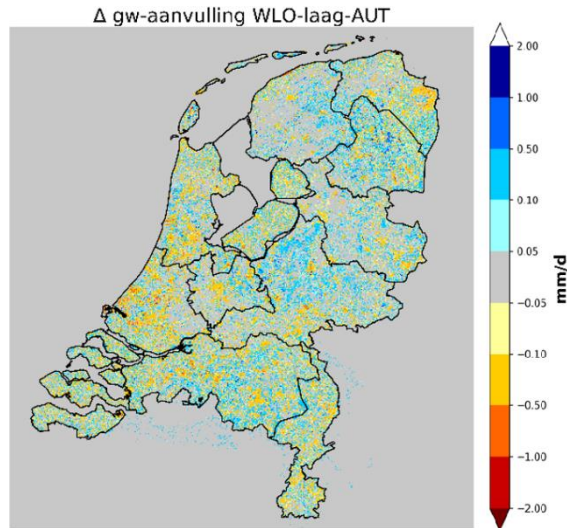


Figuur 3-13 Links: het stationaire effect van de veranderde onttrekkingsdebieten op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak in 2100 (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van de veranderde onttrekkingsdebieten op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak in 2100 (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

3.6 Veranderend landgebruik

Het veranderde landgebruik volgens het WLO-Laag / NVK-HDB scenario resulteert in een wisselend effect op de grondwateraanvulling, met zowel gebieden waar de grondwateraanvulling toeneemt als gebieden waar deze afneemt (Figuur 3-14). De afname van de langjarig gemiddelde grondwateraanvulling is hoofdzakelijk toe te schrijven aan de toename van de verstedelijking en de daarmee samenhangende toename van het verharde oppervlak, waar geen of minder grondwateraanvulling plaats kan vinden. De toename van de grondwateraanvulling is vaak het gevolg van de conversie van landbouw naar natuur, of conversie van natuur naar een natuurtype met een kleinere watervraag (bijvoorbeeld

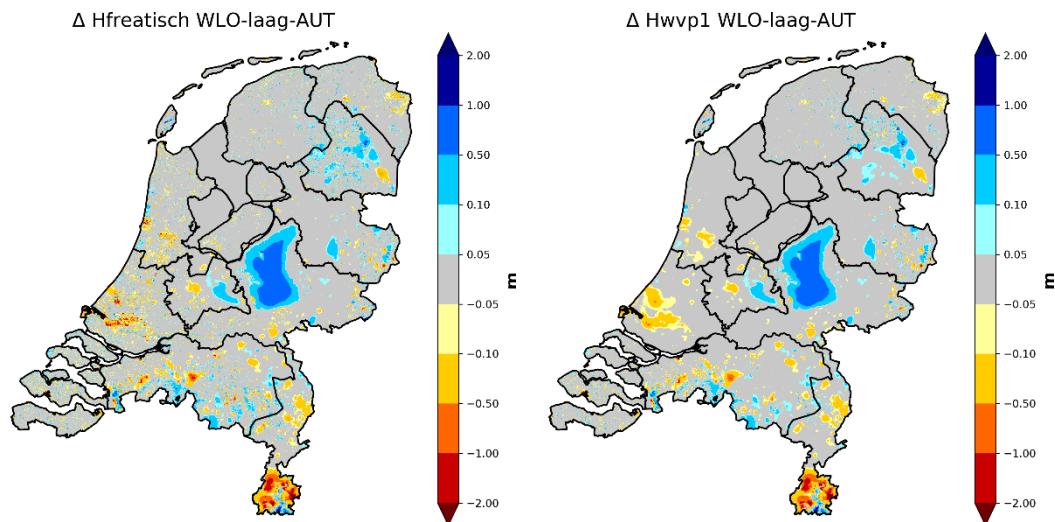
naaldbossen naar loofbossen). Duidelijke voorbeelden zijn regio Rotterdam en de Veluwe. In Rotterdam is de graad aan stedelijk gebied duidelijk verhoogd (Figuur 2-5) ten opzichte van de referentie in LHM4.3. Dit resulteert in minder grondwateraanvulling. Op de Veluwe zit in de WLO-Laag landgebruikskaart juist meer natuur dan in de referentie (Figuur 2-6) en daar is duidelijk een grotere grondwateraanvulling zichtbaar die correleert met een vergroting van de hoeveelheid heide ten opzichte van bos, en een vermindering van aan landbouw en verhard oppervlak.



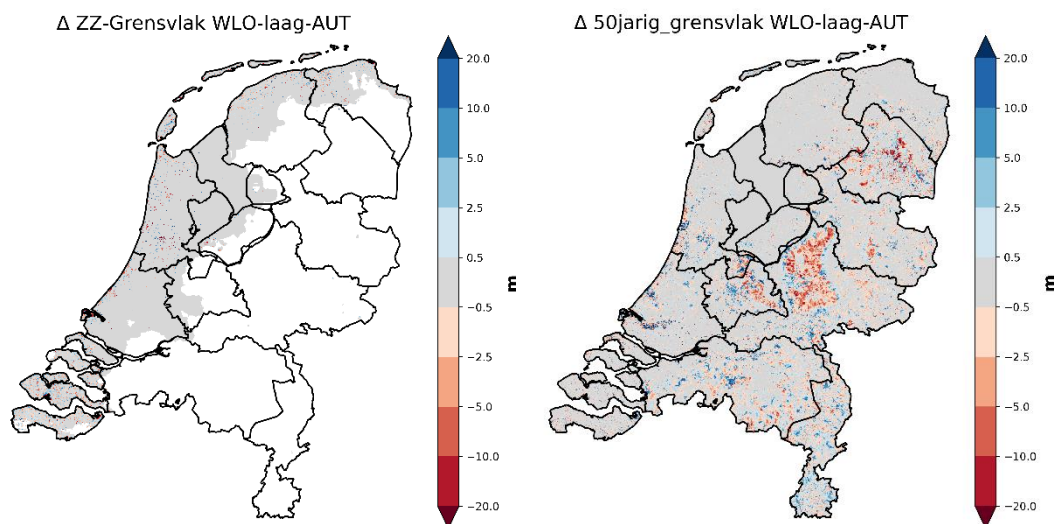
Figuur 3-14 Verandering van de grondwateraanvulling in het WLO-Laag scenario ten opzichte van de referentie.

De veranderingen in de grondwateraanvulling werken in logische richting door in de stijghoogtes (Figuur 3-15). Enkele in het oog springende gebieden zijn verlagingen als gevolg van voortschrijdende verstedelijking in Zuid-Holland en Noord-Brabant, en vernatting als gevolg van nieuwe natuur en de daarmee samenhangende verwijderde drainage of als gevolg van conversie naar een natuurtype met minder watervraag op de Veluwe, in Drenthe en het zuiden van Noord-Brabant. De effecten in Zuid-Limburg dienen met een korrel zout genomen te worden; de kalksteengebieden hier worden conceptueel niet goed in het LHM gemodelleerd en reageren altijd heftig op wijzigingen in de invoer.

De effecten op het zoet-zoutgrensvlak zijn erg beperkt. Opvallend is de verondieping van het zoet-zoutgrensvlak onder Amsterdam; de verminderde grondwateraanvulling als gevolg van de toegenomen verharding sorteert hier een relatief groot effect. Deze regio valt echter buiten de potentiële NGR-gebieden. Effecten op het leeftijdsvlak zijn meer uitgesproken; met name onder de Veluwe en Utrechtse Heuvelrug en enkele kleinere gebieden komt het leeftijdsvlak dieper te liggen.



Figuur 3-15 Het stationaire effect van het WLO-Laal scenario op de freatische grondwaterstand (links) en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.



Figuur 3-16 Links: het stationaire effect van het WLO-Laal scenario op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van het WLO-Laal scenario op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

3.7 Herinrichting watersysteem

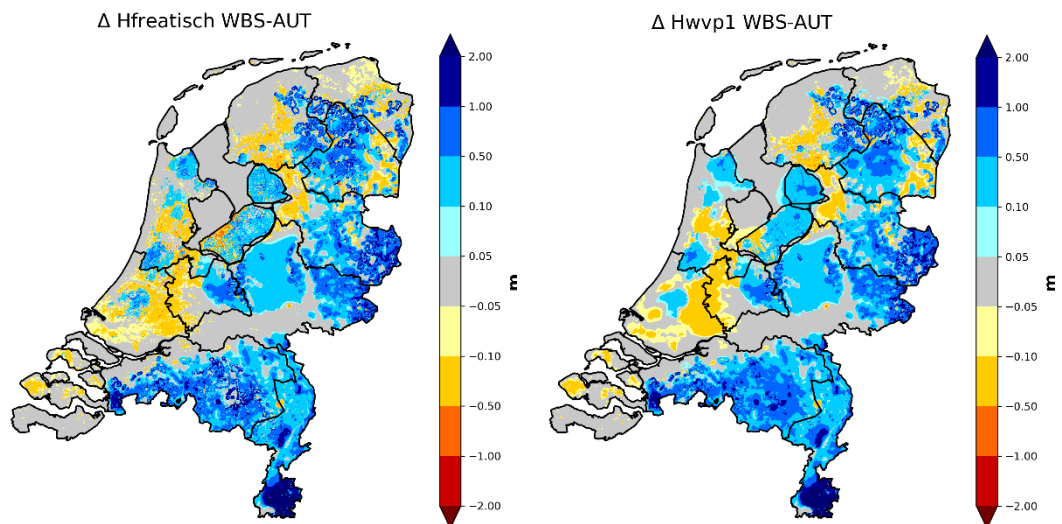
Figuur 3-17 toont de effecten van het herinrichting-watersysteem scenario op de stijghoogten ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Omdat een deel van de herinrichtingsmaatregelen gericht zijn op het tegengaan van bodemdaling, en deze bodemdaling daarom ook onderdeel is van dit scenario, wordt ook vergeleken met het bodemdalingsscenario, in Figuur 3-18.

De herinrichting resulteert ten opzichte van autonoom in een aanzienlijke vernatting, van vaak meer dan 0.5m, met name in de zandgebieden. In de diepe kleipolders compenseert dit vaak ruimschoots de verlagingen als gevolg van bodemdaling. De enige uitzonderingen op

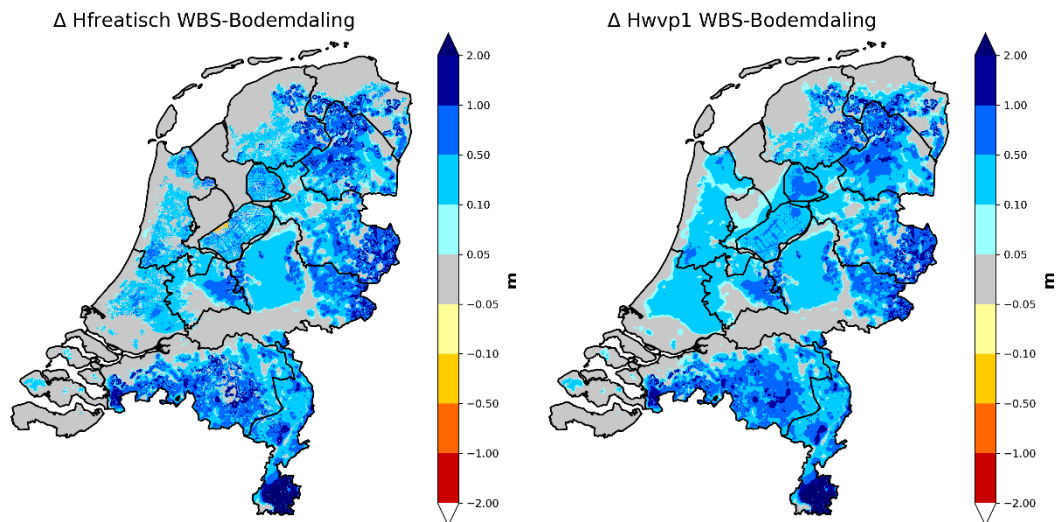
de vernatting zijn een groot deel van de veenweidegebieden (waar de maatregelen niet voldoende zijn om de verlagingen volledig te compenseren) en de aan bodemdaling onderhevige kleigebieden waar in dit scenario geen herinrichting plaatsvindt. Ten opzichte van het bodemdalingsscenario vindt zoals verwacht overal vernatting plaats (Figuur 3-18); daar is de herinrichting immers op gericht.

De veranderingen in de posities van het zoet-zoutgrensvlak en het leeftijdsvlak worden hier alleen gegeven ten opzichte van het bodemdalingsscenario (Figuur 3-19). De effecten in de veengebieden op het zoet-zoutgrensvlak zijn erg beperkt. Wel zijn wat significantere verdiepingen van het grensvlak zichtbaar in enkele diepte kleipolders, t.w. in de kop van Noord-Holland en het westen van Noordoostpolder. De hogere grondwaterstanden en dientengevolge de gereduceerde kweldruk resulteren hier in een dikkere zoetwaterlens. Buiten deze gebieden, waar de kwel juist toeneemt, is vaak een verondieping van het zoet-zoutgrensvlak zichtbaar. Opgemerkt wordt dat geen van deze gebieden zich bevindt binnen de voorlopige contouren van de NGR-kartering. Binnen die contouren zijn de effecten op het zoet-zoutgrensvlak overal erg beperkt.

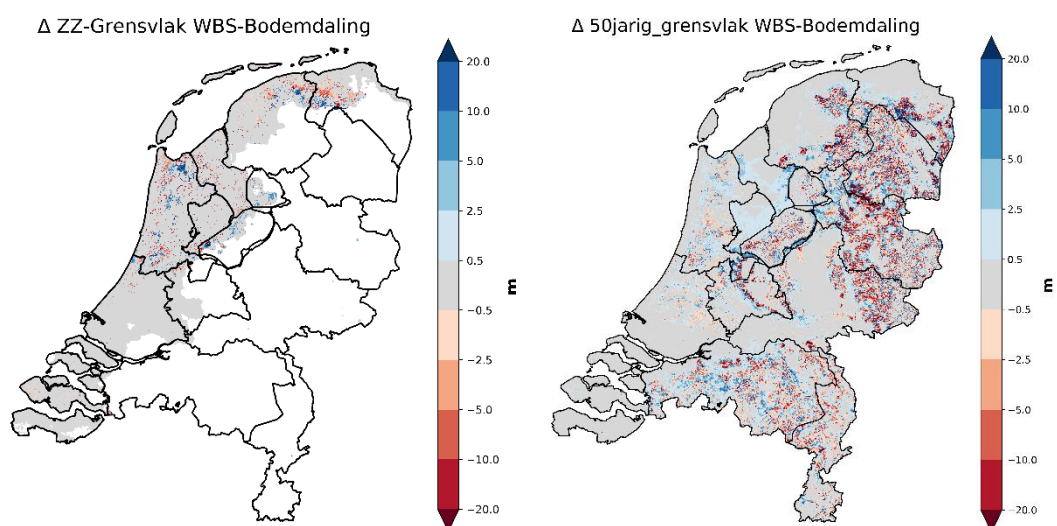
De herinrichting heeft overwegend een 'negatief' effect op het leeftijdsvlak; de hogere grondwaterstanden resulteren in grotere infiltratiefluxen waardoor het jonge grondwater zich sneller naar beneden voortbeweegt.



Figuur 3-17 Het stationaire effect van het herinrichting-watersysteem scenario op de freatische grondwaterstand (links) en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.



Figuur 3-18 Het stationaire effect van het herinrichting-watersysteem scenario op de freatische grondwaterstand (links) en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van het bodemdalingsscenario.



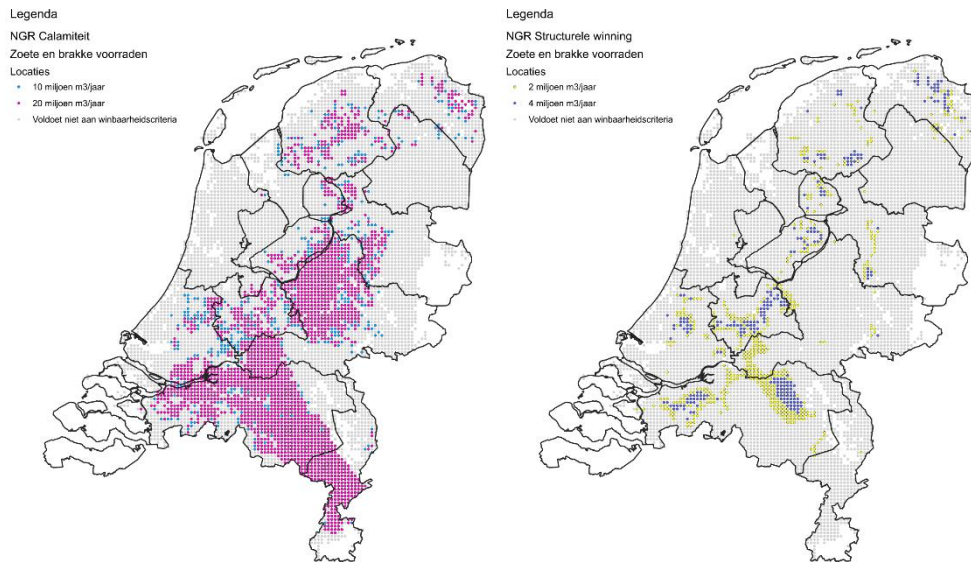
Figuur 3-19 Links: het stationaire effect van het herinrichting-watersysteem scenario op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van het herinrichting-watersysteem op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van het bodemdalingsscenario.

4 Keuze samengesteld toekomstscenario t.b.v. analyse winbaarheid

Het vorige hoofdstuk beschreef de grondwatereffecten van een aantal voor de komende eeuw relevant geachte scenario's. De vraag is uiteindelijk in hoeverre deze ontwikkelingen van invloed kunnen zijn op de kartering van de NGRs, om te komen tot (een) geschikt(e) scenario('s) voor doorrekening op winbaarheid (in Component 5).

Allereerst wordt vanuit de resultaten in het vorige hoofdstuk geconstateerd dat van de onderzochte lange-termijn ontwikkelingen het veranderend landgebruik en veranderende drinkwateronttrekkingen (debiëten) als minst belangrijk kunnen worden beoordeeld. Een bijkomende complexiteit bij deze ontwikkelingen is de grote mate van 'geografische' onzekerheid in de implementatie van deze scenario's; het landgebruik zou zich de komende eeuw ook geheel anders kunnen ontwikkelen. En wat betreft de drinkwateronttrekkingen is het eigenlijk wel zeker dat de geïmplementeerde verhoging van de onttrekkingsdebiëten niet op de in deze studie geïmplementeerde wijze zal voltrekken, gegeven de draagkracht van de grondwatersystemen en reeds gebruikte vergunningsruimten.

Om tot een verdere scenariodefinitie t.b.v. Component 5 te kunnen komen is het belangrijk te weten waar de NGRs zich mogelijk bevinden zónder rekening te houden met deze ontwikkelingen. In Component 5 is gewerkt aan de NGR-kartering voor de referentiesituatie (Delsman en Van Dam, 2024). Figuur 4-1 toont resultaten uit deze studie, bestaande uit een kaart van de potentiële NGR-gebieden voor calamiteiten (voor een onttrekkingsdebiet van 10 en 20 miljoen m³/jaar) en de NGR-gebieden voor structurele onttrekkingen (uitgaande van 2 en 4 miljoen m³/jaar). Deze kaarten bevatten samen dus alle mogelijke NGR-gebieden, zonder rekening te houden met de toekomstige ontwikkelingen volgens de op moment van dit schrijven laatste berekeningen. Omdat het uitgangspunt is dat het verdisconteren van de lange-termijn ontwikkelingsscenario's moet leiden tot de afbakening van de meest robuuste NGRs, kunnen de scenario's niet leiden tot het aanwijzen van andere gebieden dan getoond in Figuur 4-1. De analyse van de implicaties van de scenario's voor de NGR-kartering kan zich daarom toespitsen op de gebieden in Figuur 4-1. Effecten buiten die gebieden zijn in principe niet relevant, afgezien van het feit dat, indien onder invloed van de lange-termijnontwikkelingen de voor NGR geschikte gebieden juist zouden 'groeien', dit aantoont dat de robuustheid van de referentie-NGRs dan dus toeneemt in de toekomst.



Figuur 4-1 Links: Potentiële geschikte locaties voor NGR Calamiteit voor een onttrekkingsdebiet van 10 en 20 miljoen m³/jaar, zonder rekening te houden met toekomstontwikkelingen. Rechts: potentiële geschikte locaties voor NGR Structurele winning voor een onttrekkingsdebiet van 2 en 4 miljoen m³/jaar, zonder rekening te houden met toekomstontwikkelingen. Bron: Delsman en Van Dam. (2024).

Implicaties van veranderend zoet-zout grensvlak

Met dat in het achterhoofd is het duidelijk dat de meeste ontwikkelingen van het zoet-zoutgrensvlak in de scenario's er niet veel toe doen; verreweg het grootste deel van laag-Nederland, waar het zoet-zoutgrensvlak een rol speelt, behoort niet tot het domein van potentiële NGRs. De enige uitzonderingen zijn Flevoland en het oosten van Zuid-Holland. Het betreft hier alle potentiële gebieden voor brakwaterwinning, niet voor zoetwaterwinning (Delsman en Van Dam, 2024). In het oosten van Zuid-Holland worden in geen van de onderzochte scenario's belangrijke effecten berekend op het zoet-zoutgrensvlak, met uitzondering van de autonome ontwikkeling van de chlorideverdeling. In Flevoland hebben meerdere scenario's een effect: naast autonome ontwikkeling ook klimaatverandering, bodemdaling, landgebruiksverandering (zeer beperkt) en herinrichting watersysteem.

Implicaties van veranderend leeftijdsvlak

Het leeftijdsvlak binnen de potentiële NGRs wordt in alle scenario's beïnvloed, vooral bij klimaatverandering (Hd2100-scenario), herinrichting watersysteem en in mindere mate landgebruiksveranderingen, alle via wijzigingen in de grondwateraanvulling. Er is in het algemeen ook grote overlap van de effecten met potentiële NGRs in Figuur 4-1. In het geval van de klimaatverandering (Hd2100-scenario) is het effect overwegend positief. Het 'door mensen beïnvloed front' (DMB-front) beweegt zich trager naar beneden. Desondanks is te verwachten dat dit scenario negatief uitpakt voor de winbaarheid; de geringere grondwateraanvulling en het droogvallen van ontwateringsmiddelen zullen zorgen voor grotere intrekgebieden, waardoor onttrekkingen sneller niet aan gestelde winbaarsheidscriteria zullen voldoen, met name omtrent grondwaterstandsverlagingen in grondwaterafhankelijke natuur. In het geval van het scenario herinrichting watersysteem is het juist andersom. Het effect op het leeftijdsvlak is in principe negatief (sneller bewegend DMB-front), maar andere winbaarsheidscriteria kunnen minder beperkend worden door de grotere infiltratiefluxen. Tegelijkertijd kan het wegnemen van buisdrainage in dit scenario ertoe leiden dat nieuwe onttrekkingen een groter effect sorteren ten opzichte van de Ausgangssituatie, waardoor juist eerder niet aan gestelde criteria m.b.t. grondwaterstands daling (i.e. minder dan 2cm

grondwaterstandsdeling in Natura2000-gebieden (Delsman en Van Dam, 2024)) wordt voldaan.

Besluit gecombineerde scenario's

Uit bovenstaande volgt dat de effecten van de lange termijn-ontwikkelingen op de NGR-kartering voornamelijk zullen voortvloeien uit veranderde grondwateraanvulling en grondwaterstanden, grotendeels (zij het niet volledig) los van de effecten op de grensvlakken. Met dit in het achterhoofd wordt geconcludeerd dat de beste invulling van het samengestelde scenario, welke in Component 5 doorgerekend wordt om te komen tot een nadere inperking van de NGRs, als volgt is:

- Allereerst wordt ervoor gekozen om in dit scenario de autonome ontwikkeling van de chlorideverdeling, zeespiegelstijging en bodemdaling mee te nemen. De autonome ontwikkeling van de chlorideverdeling wordt automatisch meegenomen als chloridetransport wordt berekend, en dat is noodzakelijk om überhaupt effecten op het zoet-zoutgrensvlak te kunnen berekenen. Zeespiegelstijging en bodemdaling worden meegenomen, niet zozeer omdat de verwachte effecten groot zijn, maar meer voor de volledigheid; dit zijn eveneens min of meer autonome processen die sowieso door zullen zetten in de komende eeuw, al is nog onzeker in welke mate.
- Daarnaast wordt ervoor gekozen om twee varianten te onderzoeken: klimaatverandering volgens het Hd2100-scenario, vanwege de sterke reductie van de grondwateraanvulling en verlaging van de grondwaterstanden, en het herinrichting-watersysteem-scenario, vanwege de juist sterk toenemende grondwateraanvulling (infiltratie) en hogere grondwaterstanden. De effecten van de overige scenario's worden secundair beoordeeld ten opzichte van deze twee scenario's met sterk gereduceerde en sterk toegenomen grondwateraanvulling. Verwacht wordt dat met deze twee scenario's, gecombineerd met de processen in de eerste bullet, de bandbreedte grotendeels gepakt wordt met betrekking tot hoe de winbaarheid van de NGRs zich komende eeuw kan ontwikkelen.

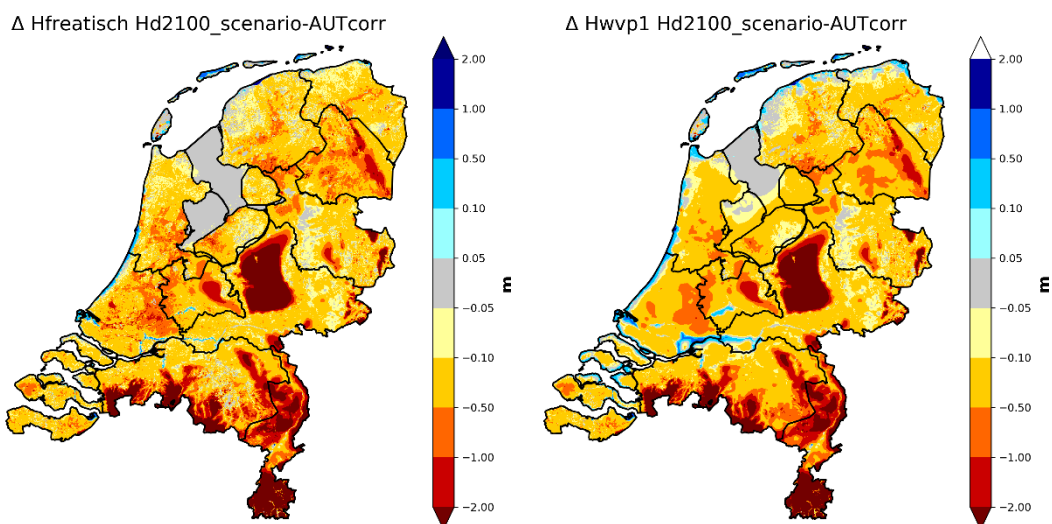
5 Resultaten 2: effecten samengestelde scenario's

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de in het vorige hoofdstuk gekozen samengestelde scenario's 'Hd2100' (sterke klimaatverandering in verdrogende richting) en 'Herinrichting Watersysteem'.

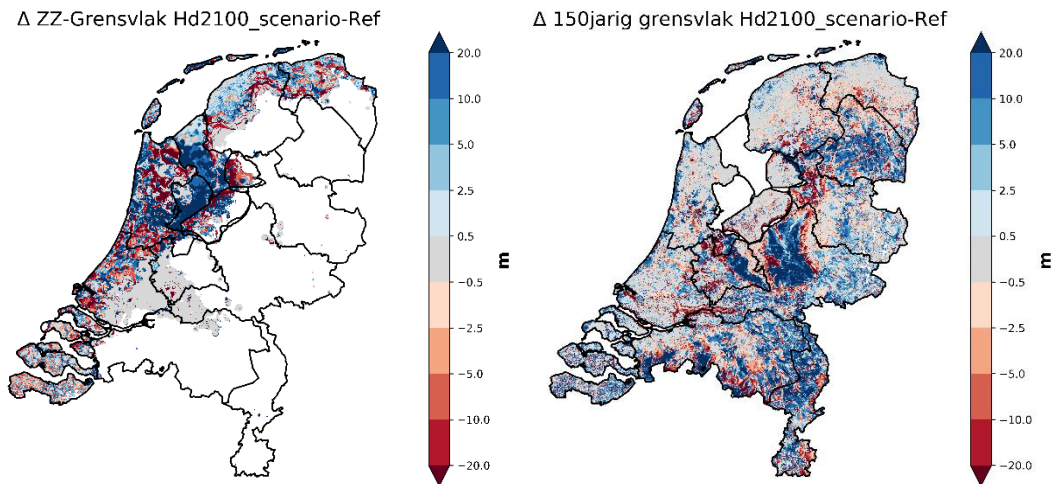
5.2 Scenario 'Hd2100'

Figuur 5-1 toont het effect van het gecombineerde 'Hd2100'-scenario (dus het Hd2100-klimaat gecombineerd met zeespiegelstijging, bodemdaling met peilindexatie en autonome ontwikkeling van de chlorideverdeling in het grondwater) op de grondwaterstanden en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. Het klimaateffect domineert, getuige de gelijkens van de figuren met Figuur 3-6. Een extra 'verdrogend' effect treedt op door de bodemdaling met peilindexatie. Het effect van de zeespiegelstijging is te zien langs de kust en het benedenstroomse deel van de grote rivieren, met name in het eerste watervoerende pakket.



Figuur 5-1 Het stationaire effect van het gecombineerde scenario 'Hd2100' op de freatische grondwaterstand in 2100 (links) en op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in 2100 (rechts).

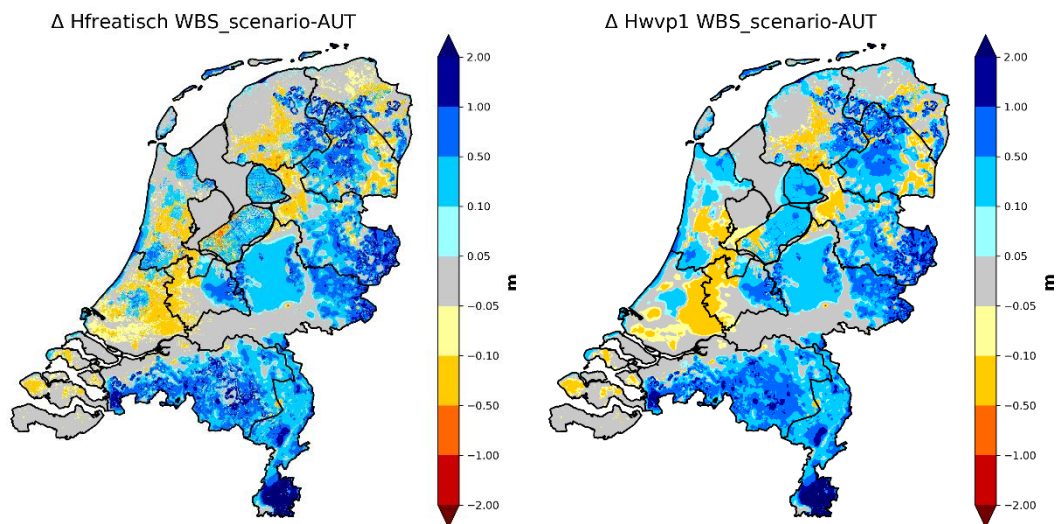
Figuur 5-2 toont het effect van het scenario op respectievelijk het zoet-zoutgrensvlak en het leeftijdsvlak. In de effecten op het zoet-zoutgrensvlak domineert de autonome ontwikkeling, blijkens de grote overeenkomst tussen Figuur 5-2 en Figuur 3-1. In de figuur van het effect op het leeftijdsvlak domineert de invloed van het verdroogde klimaat (zie ook Figuur 3-6 en bijbehorende beschrijving) maar is ook het effect van bodemdaling (Figuur 3-11) daarbovenop goed zichtbaar.



Figuur 5-2 Links: het stationaire effect van het gecombineerde scenario 'Hd2100' op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak in 2100 (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect het gecombineerde scenario 'Hd2100' op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak in 2100 (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

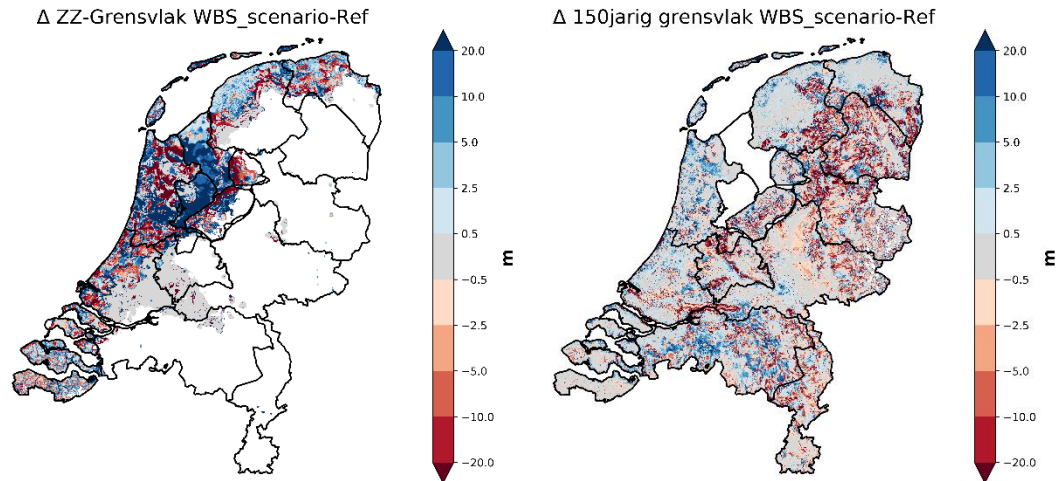
5.3 Herinrichting watersysteem

Figuur 5-3 toont het effect van de gecombineerde 'Herinrichting watersysteem'-scenario (dus het heringerichte watersysteem gecombineerd met zeespiegelstijging, bodemdaling (met peilfixatie) en autonome ontwikkeling van de chlorideverdeling in het grondwater) op de grondwaterstanden en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket. De effecten van de herinrichting domineren over die van de andere processen, getuige de gelijkenis van de figuren met Figuur 3-17.



Figuur 5-3 Het stationaire effect van het gecombineerde scenario 'Herinrichting watersysteem' op de freatische grondwaterstand in 2100 (links) en op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket in 2100 (rechts). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

Figuur 5-4 toont het effect van het scenario op respectievelijk het zoet-zoutgrensvlak en het leeftijdsvlak. In de effecten op het zoet-zoutgrensvlak domineert weer de autonome ontwikkeling, blijktens de grote overeenkomst tussen Figuur 5-4 en Figuur 3-1. In de figuur van het effect op het leeftijdsvlak domineert de invloed van het verdroogde klimaat (zie ook Figuur 3-6) maar is ook het effect van bodemdaling (Figuur 3-11) daarbovenop wederom goed zichtbaar.



Figuur 5-4 Links: het stationaire effect van het gecombineerde scenario 'Herinrichting watersysteem' op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak in 2100 (rood: het zoet-zoutgrensvlak komt ondieper te liggen; blauw: het zoet-zoutgrensvlak komt dieper te liggen). Rechts: het stationaire effect van het gecombineerde scenario 'Herinrichting watersysteem' op de diepte van het 50-jarig leeftijdsvlak in 2100 (rood: het leeftijdsvlak komt dieper te liggen; blauw: het leeftijdsvlak komt ondieper te liggen). Veranderingen zijn ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

5.4 Discussie t.a.v. winbaarheid

Uiteindelijk is de vraag wat deze scenario's betekenen voor de winbaarheid van drinkwatervoorraden. Zoals eerder beschreven is het beantwoorden van die vraag geen onderdeel van de voorliggende studie, maar is deze opgepakt in component 5 van het project (Delsman en Van Dam, 2024). In die component worden de twee gecombineerde scenario's geïmplementeerd, worden de leeftijds- en chlorideverdeling uit de referentie (zoals gehanteerd in de vorige fase (Delsman et al., 2023) vervangen door de in voorliggende studie voor de gecombineerde scenario's berekende verdelingen en wordt berekend welke invloed dat heeft op het voldoen aan de vastgestelde winbaarheidscriteria.

Uit ervaringen opgedaan in het onderzoek van Component 5 (Delsman en Van Dam, 2024) is inmiddels duidelijk geworden dat de verandering van de positie van het leeftijdsvlak en de chloride-grensvlakken niet zo'n grote rol spelen in de afbakening van de NGRs. Wat speelt is namelijk dat een onttrekking in hetzelfde watervoerend pakket als het leeftijdsvlak/chloridegrensvlak bijna altijd leidt tot het aantrekken van te jong/zout water. Dat heeft dus tot gevolg dat het pakket waarin het grensvlak zich bevindt altijd afvalt voor de kartering, en de verandering van de positie van het leeftijdsvlak onder invloed van de scenario's alleen van invloed is op de kartering als deze in een dieper of ondieper pakket komt te liggen. De verwachting is dat dit niet vaak het geval zijn.

6 Conclusies

6.1 Conclusies

In dit rapport is een aantal lange-termijnontwikkelingen verkend die van invloed zijn op het grondwatersysteem en daarmee mogelijk op de afbakening van NGRs die ook onder invloed van deze ontwikkelingen nog robuust zijn. De selectie van deze ontwikkelingen is eerder gemaakt aan de hand van een kwalitatieve analyse van mogelijk relevante lange-termijn processen (De Louw en Pouwels, 2023).

Op basis van kwantitatieve doorrekening van effecten van deze geselecteerde ontwikkelingen op grondwaterstand, stijghoogte 1^e watervoerend pakket, diepte van het zoet-zout en zout-brak grensvlak en de diepte van het 'Door Mensen Beïnvloed' (DMB) front (met grondwaterleeftijd als proxy daarvoor) is het relatieve belang van deze ontwikkelingen op de robuustheid van de NGRs ingeschat en zijn twee gecombineerde scenario's ontwikkeld welke in Component 5 gebruikt worden om de NGRs aan een 'lange-termijn robuustheidstest' te onderwerpen.

Terugkomend op de in paragraaf 1.2 geformuleerde doelen worden hieronder per doel de resultaten samengevat

Doel 1: Het op een kwantitatieve wijze inzichtelijk maken van het mogelijke belang van de [in paragraaf 1.1] gegeven selectie van ontwikkelingen voor de kartering van de NGRs

Tabel 6-1 vat de bevindingen met betrekking tot de relevantie van de onderzochte lange-termijn ontwikkelingen op de NGR-kartering samen.

Tabel 6-1 Samenvatting van mogelijk belang voor NGR-kartering per lange-termijn ontwikkeling

<u>Ontwikkeling</u>	<u>Effect op grondwaterstanden</u>	<u>Effect op chloride-grensvlakken</u>	<u>Effect op leeftijdsvlakken</u>	<u>Conclusie m.b.t. meenemen voor analyse winbaarheid</u>
<u>Autonome verzilting</u>	Zeer beperkt	Zeer groot, zowel verzoetingen als verziltingen treden op	Zeer beperkt	Meenemen vanwege het autonome karakter en de grote invloed op de zoet-zoutverdeling
<u>Klimaatverandering volgens Hn 2100</u>	Vrij beperkt. Alleen in het zuiden nog een significante verdroging	Vrijwel nihil	Vrij beperkt	Niet meenemen vanwege het beperkte effect. De verdroging in het zuiden zit ook in het Hd 2100 scenario, en dan sterker.
<u>Klimaatverandering volgens Hd 2100</u>	Zeer groot	Beperkt	Groot, overwegend ondieper DMB front	Meenemen vanwege groot effect op grondwatersysteem
<u>Zeespiegelstijging</u>	Beperkt, alleen langs kust en Rijn-Maasmonding, waar geen potentiële NGRs gedefinieerd zijn	Beperkt, alleen langs kust en Rijn-Maasmonding, waar geen potentiële NGRs gedefinieerd zijn	Zeer beperkt	Meenemen, vanwege het autonome karakter

<u>Bodemdaling</u>	Groot in betreffende gebieden	Beperkt in potentiële NGR-gebieden, maar kan lokaal relevant zijn	Beperkt in potentiële NGR-gebieden, maar kan lokaal relevant zijn	Meenemen, vanwege het autonome karakter
<u>Veranderende grondwater-onttrekkingen</u>	Beperkt, lokaal	Zeer beperkt	Zeer beperkt	Niet meenemen vanwege beperkte effecten en onzekere geografische implementatie
<u>Veranderend landgebruik</u>	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Niet meenemen vanwege beperkte effecten en onzekere geografische implementatie
<u>Herinrichting watersysteem</u>	Zeer groot	Significant, zij het beperkt in potentiële NGR-gebieden	Groot, overwegend dieper DMB front	Meenemen vanwege groot effect op grondwatersysteem

Doel 2: Het definiëren van in component C5 (winbaarheid) door te rekenen scenario's om te komen tot NGRs die robuust zijn in het licht van toekomstige ontwikkelingen.

Zoals ook blijkt uit de rechterkolom van Tabel 6-1 is erop uitgekomen dat verwacht wordt dat met de volgende twee scenario's de bandbreedte grotendeels gepakt wordt met betrekking tot hoe de winbaarheid van de NGRs zich komende eeuw kan ontwikkelen.

- Scenario 'Hd2100': het Hd2100 klimaat gecombineerd met autonome verzilting, zeespiegelstijging en bodemdaling;
- Scenario 'Herinrichting Watersysteem': Herinrichting Watersysteem gecombineerd met autonome verzilting, zeespiegelstijging en bodemdaling.

Deze scenario's zijn geïmplementeerd in LHM-zoet-zout en resultaten ervan m.b.t. grondwaterstanden, stijghoogten 1^e watervoerend pakket, chloridegrensvlakken en leeftijdsvlakken worden gepresenteerd in Hoofdstuk 5 en liggen in lijn met de individuele effecten per lange-termijn ontwikkeling zoals beschreven in Hoofdstuk 3. Het daadwerkelijk kwantificeren van de impact van de lange-termijn ontwikkelingen op de winbaarheid en daarmee op de NGR-kartering is geen onderdeel van deze studie maar wordt uitgevoerd in Component 5 (Delsman en Van Dam, 2024).

6.2 Aanbevelingen

Aanscherping klimaatscenario

Zoals beschreven in paragraaf 2.3.2 geeft de implementatie van het Hd2100-scenario zoals gevolgd in deze studie een overschatting van het klimaateffect, omdat toenemende verdampingsreductie (welke niet is meegenomen) remmend zal werken op de reductie van de grondwateraanvulling. Aanbevolen wordt om de analyse te zijner tijd te verbeteren met nieuwe verdampingsgegevens.

Bepaling niet-stationaire effecten voor afgebakende NGRs

In deze studie, en ook in Component 5, wordt gebruik gemaakt van 'stationaire'⁶, landsdekkende berekeningen. Dat is met name een pragmatische keuze; vooral de analyse

⁶ Met 'stationair' wordt hier bedoeld: gebruik makend van langjarig constante/gemiddelde randvoorwaarden, zonder dynamiek op kortere tijdschalen waarop bergingsveranderingen een rol spelen. Randvoorwaarden kunnen,

op winbaarheid (Component 5) zou ondoenlijk zijn op landelijke schaal indien niet-stationair (dynamisch) gerekend zou worden. Voor de ontwikkeling van de grensvlakken van chloride en leeftijd wordt de stationaire aanpak goed verdedigbaar geacht; deze langzame bewegingen kunnen goed gemodelleerd worden onder aanname van stationariteit. In de effecten op grondwaterstanden, stijghoogten en ook kwel is dynamiek echter wel belangrijk. Het Hd2100-klimaatscenario, bijvoorbeeld, behelst gemiddeld genomen iets nattere winters en (veel) drogere zomers. Het effect in de zomer op verlagingen als gevolg van nieuwe onttrekkingen is daarmee in de zomer veel sterker dan in de winter (overigens geldt dit ook al voor de referentiesituatie). Met stationaire berekeningen worden de effecten langjarig gemiddeld en de effecten die in de zomer optreden dus onderschat. Hieruit volgt de aanbeveling om, na aanwijzing van de NGRs, de scenario's ook niet-stationair te definiëren en met regionale (i.t.t. landsdekkende) modelberekeningen op winbaarheid te toetsen.

afhankelijk van het scenario, wel in 5-jarige blokken variëren en ook de chlorideverdeling varieert in de tijd (met een beperkt effect op stijghoogte), maar dat maakt het nog geen werkelijk dynamisch model.

7 Begrippenlijst

ASR	Aquifer Storage Recovery
ASV	Aanvullende Strategische Voorraden; waar de provincies verantwoordelijk zijn voor het borgen van de bronnen voor de drinkwatervoorziening op de middellange termijn (2040)
DMB-front	Het front van door de mens beïnvloed grondwater
Hn2100	Scenario van de KNMI'23 klimaatscenario's; natte variant voor het jaar 2100 met sterke klimaatverandering.
Hd2100	Scenario van de KNMI'23 klimaatscenario's; droge variant voor het jaar 2100 met sterke klimaatverandering.
IPO	Interprovinciaal Overleg
KRW	Kaderrichtlijn Water
LHM	Landelijk Hydrologische Model. De landelijke toepassingen van het NHI (Nederlands Hydrologisch Instrumentarium)
MAR	Managed Aquifer Recharge
NGR	Nationale Grondwater Reserves; Zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit
STRONG	Strukturvisie Ondergrond
UvW	Unie van Waterschappen
VEWIN	Vereniging van drinkwaterbedrijven in Nederland
VNG	Vereniging van Nederlandse Gemeenten
ZZ-grensvlak	zoet-zout of zoet-brak grensvlak

8 Referenties

Baggelaar, P., Kuin, P., Geudens, P. 2022. Prognoses drinkwatergebruik in Nederland t/m 2040.

Baptist, M., van Hattum, T., Reinhard, S., van Buuren, M., de Rooij, B., Hu, X., Rooij, S., Polman, N., Van der Burg, S., Piet, G. Ysebaert, T., Walles, B., Veraart, J., Wamelink, W., Bregman, B., Bos, B. en Selnes, T. (2019). Een natuurlijkere toekomst voor Nederland in 2120.

Breman, B., Nieuwenhuizen, W., Dirx, J., Pouwels, R., de Knecht, B., de Wit, E., . . . Maas, G. (2022). Natuurverkenning 2050–Scenario Natuurinclusief: Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

Claassens, J., E. Koomen en B. Rijken. 2023. Actualisering landgebruik Deltascenario's 2023. Spinlab Research Memorandum SL-23

CPB/PBL. (2015). Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Nederland in 2030 en 2050: twee referentiescenario's, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Centraal Planbureau.

Buma, J., J. Delsman, T. Davids-op den Kelder en G. Janssen. 2023. 3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit Deelrapportage 1 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves. Deltares rapport 11207846-002.

De Jong, J. 2020. Effect zeespiegelstijging op rivierwaterstanden. Deltares memo.

De Louw, P.G.B., Witte, J. P., van den Eertwegh, G. A. P. H., Bartholomeus, R. P., Pouwels, J., & Hunink, J. 2022. Beter bestand tegen droogte: oplossingsrichtingen voor een hydrologisch goed functionerend grondwatersysteem in de zandgebieden van Nederland. Stromingen: vakblad voor hydrologen, 28(1), 3-21.

De Louw, P., en J. Pouwels. 2023. 4D-kartering - invloed dynamiek grondwatersysteem - 2100 scenario's: Deelrapportage 3 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserve. Deltares rapport 11207846-002-BGS-0006.

Delsman, J., G. Oude Essink, S. Huizer, H. Bootsma, T. Mulder, P. Zitman, B. Romero Verastegui en G. Janssen. 2020. Actualisatie zout in het NHI: Toolbox NHI zoet-zout modellering en landelijk model. Deltares rapport 11205261-003-BGS-0001.

Delsman, J., I. America en T. Mulder. 2022. Grondwaterverziltiging en watervraag bij een stijgende zeespiegel. Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II. Deltares rapport 11208039-009-BGS-0001

Delsman, J., R. van Dam. 2024. Analyse winbaarheid – Kwantiteit: deelrapportage 5a van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves. Deltares rapport 11207846-002-BGS-0009.

Buma, J., Delsman, J., Davids – op den Kelder, T., Janssen, G. 2024. 3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit. Deltares rapport 11207846-002-BGS-0004

Erkens, G., Kooi, H., Melman, R. 2021. Actualisatie bodemdalingsvoorspellingskaarten, Deltares rapport 11206724- 002-BGS-0001. Utrecht.

Haasnoot, M., Bouwer, L.M., Diermanse, F., Kwadijk, J.C.J., Van der Spek, A., Oude Essink, G., Delsman, J.R., Weiler, O., Mens, M., Ter Maat, J., Huismans, Y., Sloff, K., Mosselman, E. 2018. Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning, Deltares rapport 11202230-005- 0002. Delft

Janssen, G.M.C.M., P.E.V. van Walsum, I. America, J.R. Pouwels, J.C. Hunink, P.T.M. Vermeulen, A. Meshgi, G.F. Prinsen, N. Mulder, M. Visser en T. Kroon. 2020. Veranderingsrapportage LHM 4.1; Actualisatie van het lagenmodel, het topsysteem en de bodemplant relaties. Deltares rapport 11205261-000-BGS-0001, 2020

Janssen, G.M.C.M., P.E.V. van Walsum, P.T.M. Vermeulen, R. Meeusen, J.R. Pouwels, G. Prinsen, I. America – van den Heuvel, E. Mes, J. Delsman, H. Kok en T. Kroon. 2023. Veranderingsrapportage LHM 4.3; Actualisatie van het Landelijk Hydrologisch Model in 2022 en 2023. Deltares rapport 11209235-000-BGS-0001

Janssen, G.M.C.M., America - Van den Heuvel, I., Meeusen, R., Van Strien, C., Prinsen, G., Mes, E., Marth, I., Weiler, O., Bijlsma, A. 2024. Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model. Deltares rapport 11209219-018-ZKS-0001.

KNMI/ 2021. KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt, 72 pp

KNMI. 2023. KNMI'23-klimaatscenario's voor Nederland. KNMI-Publicatie 23-03.

Meeusen, R., P. de Louw, R. Boelens en M. Mens. 2023. Effectiviteit van bufferzones voor grondwaterstandsverhoging in grondwaterafhankelijke natuurgebieden op de zandgronden Een modelverkenning op landelijke schaal. Deltares rapport 11209259-000-ZWS-0001.

Mens, M., Hunink, J., Delsman, J., Pouwels, J., Schasfoort, F. 2019. Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater, fase II: Voorlopige rapportage. Deltares, Delft.

Nijsten, G.-J., N. Mulder, T. Davids, S. Vermooten, R. van der Brugge en R. van Leerdam. 2022. Nationale Grondwater Reserves (NGR): Onderbouwing van noodzaak voor aanwijzing en mogelijke omvang. Deltares rapport 11207416-002-BGS-0007.

PBL. 2023. Vier scenario's voor de inrichting van Nederland in 2050. Ruimtelijke Verkenning 2023, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Rijken, B., Claassens, J., Hilferink, M., & Koomen, E. (2023). Systeembeschrijving Ruimtescanner. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving

Van de Brugge, R., & de Winter, R. (2022). Deltascenario's 2023: Plan van Aanpak Fase 2-herziene versie. Utrecht: Deltares.

Vos, R. 2021. Zeespiegelstijging na 2200 ten behoeve van zoetwaterbeheer en zandige kust. RWS WVl memo d.d. 17-06-2021.

9 Bijlage 1 Kwalitatieve analyse per ontwikkeling

Deze tabel is het resultaat van de *kwalitatieve* analyse die binnen component 3 is uitgevoerd (De Louw en Pouwels, 2023), waarin de mogelijke effecten op het grondwatersysteem voor de voorziene en mogelijk relevant geachte ontwikkelingen die in de komende 100 jaar mogelijk gaan plaatsvinden op de NGRs zijn samengevat in de vorm van een tabel.

Verandering en ontwikkeling 2100	Belangrijkste processen	Impact op grondwatersysteem	Impact op NGR bovengrens (front van door mens beïnvloed grondwater, i.e. DMB-front)	Impact op NGR ondergrens (zoet-zout grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
Klimaatverandering	De verwachting is dat winters natter worden (meer grondwateraanvulling) en zomers droger (minder grondwateraanvulling)	Gemiddeld lagere grondwaterstanden in het ontwaterde gebied van Nederland (grootste deel van Nederland) en daarmee kleinere fluxen naar het diepere systeem en lagere stijghoogtes. Gemiddeld hogere grondwaterstanden in de kerninfiltratiegebieden en daarmee grotere fluxen naar het diepere systeem en hogere stijghoogtes.	Ontwaterd gebied: iets minder snelle verplaatsing van het DMB-front. Kerninfiltratiegebied en: iets snellere verplaatsing van het DMB-front.	Ontwaterd gebied: lokaal of regionaal mogelijk ondieper ZZ-grensvlak, bijvoorbeeld in het riviergebied. Kerninfiltratiegebieden: iets dieper ZZ-grensvlak indien aanwezig.
Zeespiegelstijging	Verwachte stijging van de zeespiegel van 1 m rond het jaar 2130	Langs de kust (< 10 km) en de grote rivieren neemt de stijghoogte in de diepere watervoerende pakketten toe. Dit leidt tot grotere kwelfluxen in de diepere polders en daarmee tot hogere zoutvrachten en mogelijk dunnere zoetwaterlenzen in duinen.	Verwaarloosbare impact.	Versnelde opwaartse verplaatsing van het ZZ-grensvlak in het beïnvloede deel.

Verandering en ontwikkeling 2100	Belangrijkste processen	Impact op grondwatersysteem	Impact op NGR bovengrens (front van door mens beïnvloed grondwater, i.e. DMB-front)	Impact op NGR ondergrens (zoet-zout grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
Bodemdaling	Verwachte bodemdaling met name door oxidatie van veenbodems. Zelfs bij peilfixatie kan een bodemdaling van 20 tot 60 cm worden verwacht in 2100.	Gemiddeld lagere grondwaterstanden ten opzichte van NAP en daardoor een daling van de stijghoogte in de onderliggende pakketten voor een groot gebied in en rondom de bodemdalingsgebieden. Voor de dalende gebieden leidt dit tot kleinere neerwaartse fluxen in de infiltratiegebieden en hogere kwelfluxen in de kwelgebieden. Voor de niet of nauwelijks dalende gebieden zoals de diepe droogmakerijen leidt dit tot minder kwel.	In de dalende infiltratiegebieden leidt dit tot een iets minder snel verplaatsend DMB-front.	Onder bodemdalingsgebieden kan een iets ondieper ZZ-grensvlak worden verwacht. In de diepe droogmakerijen zal de omhoog verplaatsing van het ZZ-grensvlak (autonome verzilting) iets minder snel gaan.
Autonome verzilting	Het verplaatsen van het zoet-zoutgrensvlak a.g.v. veranderende geohydrologische situatie door ontstaan van de polders en diepe droogmakerijen in laag-Nederland. De zoet-zout-verdeling is hiermee nog niet in evenwicht.	Het langzaam omhoog kruipen van het zoet-zout grensvlak onder de kwel-polders. Aan de randen van deze polders en onder het omringende hoger gelegen infiltratiegebied treedt hier en daar verzoeting op.	Niet van toepassing.	Het ZZ-grensvlak verplaatst zich langzaam omhoog onder de kwel-polders. Dit is met name in Noord en Zuid-Holland het geval maar ook in het rivierengebied. Ook in Noord-Nederland lijkt de zoutwaterintrusie zich autonoom verder landinwaarts te verplaatsen. Bepaalde processen versterken dit autonome proces zoals

Verandering en ontwikkeling 2100	Belangrijkste processen	Impact op grondwatersysteem	Impact op NGR bovengrens (front van door mens beïnvloed grondwater, i.e. DMB-front)	Impact op NGR ondergrens (zoet-zout grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
				zeespiegelstijging en bodemdaling. Wanneer het effect van zoute wellen niet wordt meegenomen in de grondwatermodellen, dan treedt er mogelijk een overschatting van het autonome proces op.
Kustverbreding/ Land-aanwinning voor de kust	Landaanwinning wordt uitgevoerd als kustverdedigingsmaatregel, zoals bijvoorbeeld de zandmotor.	Op het nieuw stuk land kunnen zich zoetwaterlenzen ontwikkelen. Lokaal kan het effect hebben op de geohydrologische situatie waardoor er bijv. meer zoute kwel optreedt (toename van de diepere stijghoogte) of lokale stromingspatronen kunnen veranderen.	Niet van toepassing.	Op kleine schaal kunnen zoetwaterbellen onder de duinen negatief worden beïnvloed.
Verandering rivieren- en IJsselmeergebied	Rivierafvoeren en peilen zullen veranderen als gevolg van klimaatverandering en erosie. Dit leidt in het algemeen tot lagere rivierafvoeren en -peilen tijdens de zomer en minder waterbeschikbaarheid vanuit het IJsselmeer tijdens de zomer.	Langs de grote rivieren kunnen lagere grondwaterstanden tijdens de zomer worden verwacht. Voor het wateraanvoergebied vanuit het IJsselmeer zal er minder water kunnen worden aangevoerd tijdens de zomerperiode met hogere zoutgehaltes en lagere zomergrondwaterstanden tot gevolg.	Verwaarloosbare impact.	In het riviergebied kunnen gemiddeld lagere grondwaterstanden en rivierpeilen leiden tot het omhoogkomen van het ZZ-grensvlak.

Verandering en ontwikkeling 2100	Belangrijkste processen	Impact op grondwatersysteem	Impact op NGR bovengrens (front van door mens beïnvloed grondwater, i.e. DMB-front)	Impact op NGR ondergrens (zoet-zout grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
Uitbreiding diffuus verontreinigingsfront	Dit is de continue neerwaartse verplaatsing van in het verleden verontreinigd grondwater. Geochemische processen in de ondergrond kunnen dit autonome proces vertragen, bijv. door denitrificatie door pyriet-oxidatie.	Dit proces speelt zich af in de infiltratiegebieden waar grondwater neerwaarts stroomt naar diepere watervoerende pakketten. De snelheid waarmee dit verontreinigd front zich verplaatst is afhankelijk van de grondwateraanvulling, doorlatendheid ondergrond en de mate van ontwatering in de omgeving. De mate van verontreiniging is direct gerelateerd met het (historisch) landgebruik waar het water is geïnfilteerd.	Dit autonome proces is direct gerelateerd aan de verplaatsing van de bovengrens van de NGR (DMB-front). Hogere grondwaterstanden, extra grondwateraanvulling en diepe grondwateronttrekkingen kunnen dit proces versnellen.	Niet van toepassing.
Verandering grondwater-onttrekkingen	Door toenemende watervraag of veranderend beleid (bijv. restricties rondom grondwateronttrekkingen) zullen grondwater-onttrekkingen voor drinkwater, industrie of beregening in de toekomst veranderen.	Het onttrekken van grondwater heeft het grootste effect in het watervoerende pakket waarin onttrokken wordt. Het effect (de onttrekkingskegel) straalt verder uit bij een hoge weerstand van bovenliggende kleilagen. De stijghoogteverlaging (of verhoging bij minder onttrekken) heeft zijn directe invloed op het ondiepe watersysteem: grondwaterstanden dalen, de grondwaterafvoer (en	In de onttrekkingskegel zal het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten.	Bij aanwezigheid van het zoet-zout grensvlak in het watervoerend pakket waaruit onttrokken wordt, is de kans op saltwater upconing (zoutwater opkegeling) groot. Het ZZ-grensvlak kan zich dus lokaal richting het oppervlak verplaatsten.

Verandering en ontwikkeling 2100	Belangrijkste processen	Impact op grondwatersysteem	Impact op NGR bovengrens (front van door mens beïnvloed grondwater, i.e. DMB-front)	Impact op NGR ondergrens (zoet-zout grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
		daarmee de beekafvoer) neemt af en kwelstromen worden zwakker of verdwijnen.		
Vergroten zoetwaterbeschikbaarheid (ASR, MAR, brakwaterwinning)	Met ASR en MAR wordt het extra aanvullen van het grondwatersysteem bedoeld met bijv. oppervlaktewater. Dit kan via infiltratie aan het oppervlak of via injectieputten in diepere pakketten. Het onttrekken van brakwater en dan ontzilten is een bron voor sproeiwater (tuinders) en drinkwater.	Bij extra infiltratie van water wordt het grondwater aangevuld en zal het grondwater stijgen. Hierdoor stijgt ook de stijghoogte in onderliggende pakketten en de infiltratiesnelheid neemt toe. Bij de injectie van grondwater in diepere watervoerende pakketten neemt de stijghoogte toe en daarmee ook de grondwaterstand. Dit leidt tot extra kwel in de omgeving of minder infiltratie. Voor effecten van brakwaterwinning, zie grondwateronttrekkingen.	Bij infiltratie van extra water zal het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten maar bij injectie in diepere pakketten juist minder snel. Bij brakwaterwinning zal in de onttrekkingskegel het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten.	Bij zowel extra infiltratie als injectie zal het ZZ-grensvlak mogelijk iets dieper komen te liggen. Bij onttrekken van brakwater zal het ZZ-grensvlak zich lokaal richting het oppervlak verplaatsten (zoutwater opkegeling).
Herinrichting watersysteem	De verwachting is dat het oppervlaktewaterstelsel zo wordt ingericht dat er langer grondwater wordt vastgehouden en grondwaterstanden gaan stijgen.	De grondwaterstand stijgt over een significant groot gebied. Hierdoor zal de stijghoogte in onderliggende pakketten ook stijgen. Waarschijnlijk neemt de infiltratie naar diepere lagen en kwelstromen toe.	Door hogere grondwaterstanden zal het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten.	Door hogere grondwaterstanden zal het ZZ-grensvlak mogelijk iets dieper komen te liggen in infiltratiegebieden en ondieper in kwelgebieden.

Verandering en ontwikkeling 2100	Belangrijkste processen	Impact op grondwatersysteem	Impact op NGR bovengrens (front van door mens beïnvloed grondwater, i.e. DMB-front)	Impact op NGR ondergrens (zoet-zout grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
Verandering landgebruik	Verandering van landgebruik leidt tot verandering van de grondwateraanvulling . Er wordt ervan uitgegaan dat de verandering leidt tot meer grondwateraanvulling .	Door meer grondwateraanvulling stijgt de grondwaterstand, waardoor de stijghoogte in onderliggende pakketten ook stijgen. Extra grondwateraanvulling leidt tot het aanjakkere van het grondwatersysteem waardoor de infiltratie en kwelstromen toenemen.	Door extra grondwateraanvulling zal het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten.	Door extra grondwateraanvulling zal het ZZ-grensvlak mogelijk iets dieper komen te liggen in infiltratiegebieden en ondieper in kwelgebieden als kwelfluxen toenemen.
Verstedelijking, afkoppelen bebouwd gebied	Verstedelijking leidt tot minder grondwateraanvulling en afkoppeling tot meer grondwateraanvulling .	De grondwateraanvulling neemt af bij verstedelijking en daarmee daalt de grondwaterstand en de infiltratie naar diepere pakketten. Bij afkoppeling gebeurt het tegenovergestelde.	Bij verstedelijking zal het DMB-front zich trager neerwaarts verplaatsten en bij afkoppeling juist sneller.	Een iets grotere grondwateraanvulling bij afkoppeling heeft mogelijk een iets dieper ZZ-grensvlak tot gevolg. Bij verstedelijking kan mogelijk het ZZ-grensvlak ondieper komen te liggen.
Uitbreiding KWO-systemen en geothermie	Koude-warmte opslag en gesloten bodemenergiesystemen worden toegepast op dieptes variërend van 10 tot 200 meter. Geothermie vindt plaats op dieptes > 500 m en bevindt zich meestal buiten de NGR-begrenzing.	Er is lokaal een risico op het lekken langs doorboorde kleilagen waardoor verontreinigingen zich makkelijker tussen pakketten kunnen verspreiden. Bij open systemen wordt er water geïnjecteerd en onttrokken, meestal in dezelfde hoeveelheden waarbij het netto effect gelijk blijft. Lokale	Lokale verontreiniging is een risico maar er is geen effect op het DMB-front.	Bij open systemen waarbij grondwater wordt onttrokken is er risico op zoutwateropkegeling, dus lokaal het omhoog komen van het ZZ-front.

Verandering en ontwikkeling 2100	Belangrijkste processen	Impact op grondwatersysteem	Impact op NGR bovengrens (front van door mens beïnvloed grondwater, i.e. DMB-front)	Impact op NGR ondergrens (zoet-zout grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
		veranderingen van de chemische toestand van het grondwater kunnen een rol spelen.		
Bruinkoolwinning	De tot meer dan 400 m diepe bruinkoolgroeves in Duitsland worden drooggemalen waarbij meer dan 1 miljard m ³ grondwater wordt weggepompt.	De grondwateronttrekkingen ten behoeve van de bruinkoolwinning hebben effect tot aan de grens van N-Brabant en Gelderland in de diepere Neogene en Paleogene watervoerende pakketten met flinke stijghoogteverlagingen tot gevolg. Effecten in het freatisch systeem zijn alleen merkbaar in Limburg aan de grens met Duitsland. Het stoppen van de bruinkoolwinning zal leiden tot herstel van de stijghoogte.	Geen effect op het DMB-front.	Mogelijk leiden de stijghoogteverlagingen tot een ondieper ZZ-front.
Steenkoolmijnen in Limburg	Jarenlang werd grondwater opgepompt om de steenkoolmijnen droog te houden. Sinds het sluiten van de mijnen zijn de onttrekkingen gestopt en herstelt de grondwaterstand zich langzaam weer.	De grondwaterstand rond de oude steenkoolmijnen stijgt nog steeds gestaag als gevolg van het stoppen met onttrekken. Hierdoor stijgt de bodem met ongeveer 3 tot 6 mm per jaar.	Geen effect op het DMB-front.	Waarschijnlijk geen effect op het ZZ-front.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl