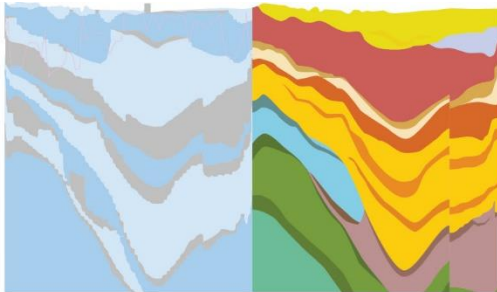


4D-kartering - invloed dynamiek grondwatersysteem - 2100 scenario's

Deelrapportage 3 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves

Kwalitatieve studie



4D-kartering - invloed dynamiek grondwatersysteem - 2100 scenario's
Deelrapportage 3 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves

Auteur(s)

Perry de Louw

Janneke Pouwels

4D-kartering - invloed dynamiek grondwatersysteem - 2100 scenario's

Deelrapportage 3 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves

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

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	27-02-2023
Projectnummer	11207846-002
Document ID	11207846-002-BGS-0006
Pagina's	99
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Perry de Louw	
	Janneke Pouwels	

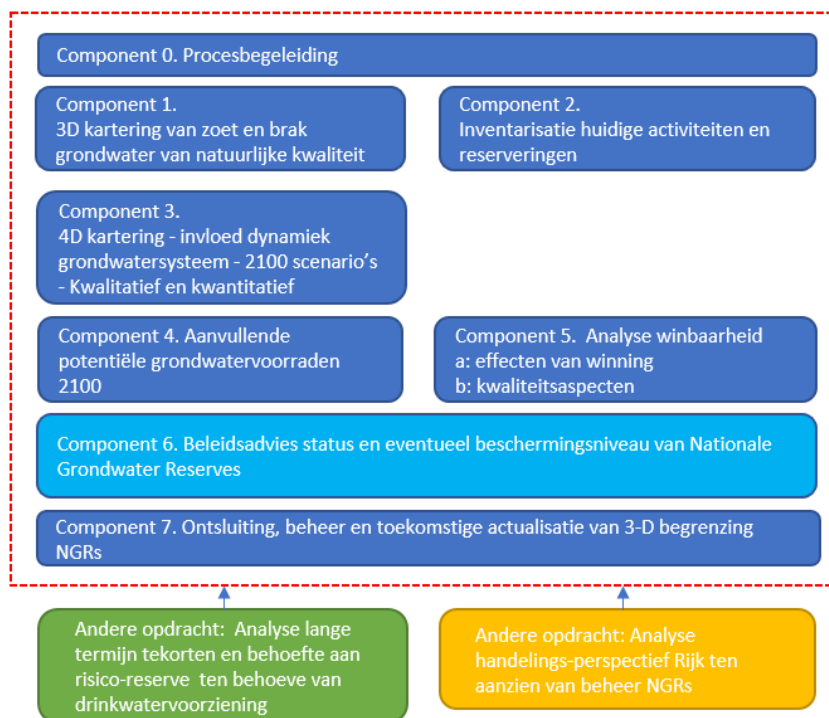
Inhoud

1	Samenvatting	5
2	Inleiding	7
2.1	Aanleiding en context	7
2.2	Werkwijze in het kort	8
2.2.1	Methode	8
2.2.2	Proces	9
3	Klimaatverandering	11
4	Zeespiegelstijging	17
5	Bodemdaling	20
6	Autonome verzilting	27
7	Kustverbreding en landaanwinning voor de kust	36
8	Verandering rivieren- en IJsselmeergebied	39
9	Uitbreiding diffuus verontreinigingsfront	43
10	Verandering grondwateronttrekkingen	48
11	Vergroten zoetwaterbeschikbaarheid (ASR, MAR, brakwaterwinning)	54
12	Herinrichting watersysteem	59
13	Verandering landgebruik	64
14	Verstedelijking en afkoppelen stedelijk gebied	73
15	Uitbreiding KWO-systemen en Geothermie	76
16	Bruinkoolwinning	80
17	Steenkoolmijnen in Limburg	83
18	Effecten van ontwikkelingen op potentiële NGRs samengevat	85
	Referenties	93
	Bijlage 1 Begrippenlijst	98

1 Samenvatting

In de Nota 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).



Figuur 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) 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 het doel 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. Deze ontwikkelingen kunnen invloed hebben op de boven en ondergrens van een potentiële NGR maar ook de winbaarheid van de NGRs (component 5).

Per ontwikkeling, die in de komende 100 jaar mogelijk gaan plaatsvinden, is in dit rapport uiteen gezet wat de mogelijke effecten op het grondwatersysteem zijn. Hoewel de grenzen van de NGRs nog niet vastliggen, zijn de mogelijke effecten op de NGRs samengevat in de vorm van een tabel in Hoofdstuk 18. Daarin 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 effect hebben op het diepere grondwatersysteem.
- Veranderingen en ingrepen in het diepere grondwatersysteem die 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 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 rivieren- en IJsselmeergebied
- Uitbreiding diffuus verontreinigingsfront
- Verandering grondwateronttrekkingen
- Vergroten zoetwaterbeschikbaarheid (ASR, MAR, brakwaterwinning)
- Herinrichting watersysteem
- Verandering landgebruik
- Verstedelijking, afkoppelen bebouwd gebied
- Uitbreiding KWO-systemen en geothermie
- Bruinkoolwinning
- Steenkoolmijnen in Limburg

2 Inleiding

2.1 Aanleiding en context

In de Nota 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.

Voorliggende rapportage beschrijft de resultaten 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 het 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 gebruik en van (mogelijk toekomstig) 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. Voorbeelden zijn:

- uitbreidingen in grondwateronttrekkingen (drinkwatervraag)
- klimaatscenario's, zeespiegelstijging, bodemdaling
- inrichting en landgebruik
- autonome verzilting
- lange termijn effecten van (beëindigen van) bruinkoolwinning

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 verschillende 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 2.2.2). *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.

2.2 Werkwijze in het kort

2.2.1 Methode

Het grondwatersysteem is een dynamisch systeem. Zeker over een termijn van 100 jaar kunnen grenzen die bepaald zijn in de kartering van de Nationale Grondwater Reserves (NGR, Nota Drinkwater, 2014) aan verandering onderhevig zijn als gevolg van toekomstige ontwikkelingen, zoals onder meer:

- Klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling;
- Uitbreidingen in grondwateronttrekkingen (drinkwatervraag);
- Lange termijn effecten van (beëindigen van) bruinkoolwinning in Duitsland;
- Herinrichting watersysteem, verandering landgebruik en verstedelijking;
- Autonome verzilting waarbij de aard en omvang van zoet en brakke grondwaterlichamen veranderen.

In dit deelrapport worden de belangrijkste ontwikkelingen die mogelijk effect hebben op de NGRs besproken op basis 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). Zeer waarschijnlijk zal als ondergrens van een NGR het zoet-zout of zoet-brak grensvlak (verder aangeduid als ZZ-grensvlak) worden genomen, gekarakteriseerd door een nog nader te bepalen chloride concentratie. Het front van door de mens beïnvloed grondwater (verder aangeduid als DMB-front) zal waarschijnlijk als bovengrens van een NGR worden genomen, gekarakteriseerd door een ander te bepalen grondwaterleeftijd ofwel reistijd na infiltratie.

De grenzen van de NGRs en criteria daarvoor zijn op dit moment nog niet vastgesteld en daarom zal de aandacht vooral uitgaan naar de bespreking van de effecten op het gehele grondwatersysteem en in algemene termen wat dit betekent voor de boven- en ondergrens van een NGR. In een latere fase wordt dit dan specifiek gemaakt voor de gekarteerde NGRs.

Bij de bespreking van de effecten van verschillende ontwikkelingen, wordt de periode rond 2100 als zichtjaar gehanteerd. Elk hoofdstuk bespreekt een ontwikkeling en wordt afgesloten met een korte samenvattende opsomming van de belangrijkste processen, effecten op het grondwatersysteem en de effecten op de boven- en ondergrens.

Naast deze kwalitatieve studie worden in 2023 een aantal modelberekeningen uitgevoerd gericht op een aantal belangrijke ontwikkelingen waaronder zeespiegelstijging, klimaatverandering, bodemdaling, autonome verzilting en toe- of afname drinkwaterwinningen en beregning. De resultaten van deze kwantitatieve analyse zullen in aparte rapportage worden beschreven. Deze ontwikkelingen kunnen van invloed zijn op de winbaarheid en zullen ook worden meegenomen bij het bepalen van de winbaarheid van de NGRs (component 5).

2.2.2 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 voert 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 geothermie sector 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 te 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 hieronder is een overzicht gegeven van de bijeenkomsten in het eerst projectjaar.

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: Overzicht bijeenkomsten Klankbordgroep en Werksessies in 1^e jaar van het project (periode maart 2022 – Februari 2023)

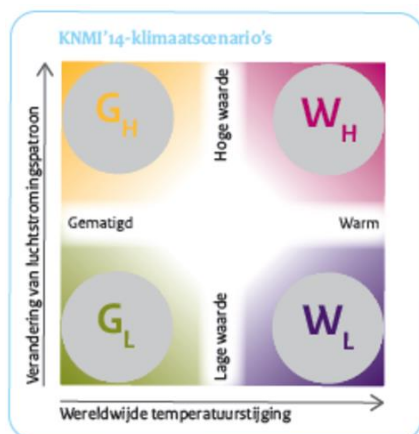
Maand	Sessie	Doel bijeenkomst
Maart 2022	Klankbordgroep	Startoverleg; bespreken en aanscherpen aanpak
Mei 2022	Werksessie	Component 1: Vaststellen werkwijze 3D kartering, inclusief facultatieve verdiepingsslag voor regiospecifieke zaken / differentiatie
Juni 2022	Werksessie	Component 2: Inventarisatie 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

Bovengenoemde werkwijze zal ook bij het uitvoeren van de overige componenten in het tweede projectjaar worden voortgezet. 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 .

3 Klimaatverandering

Veranderingen in meteorologie

Informatie uit deze paragraaf is hoofdzakelijk afkomstig uit KNMI (2015). Hierin beschrijft het KNMI klimaatverandering voor zichtjaar 2050 en 2085 aan de hand van vier klimaatscenario's, G_L, G_H, W_L en W_H (zie Figuur 3.1). Deze vier scenario's verschillen in de mate van wereldwijde temperatuurstijging en de verandering in luchtstroompatronen. Figuur 3.2 laat voor een paar variabelen de verandering bij deze scenario's zien voor zichtjaar 2085.



Figuur 3.1 De vier KNMI '14 klimaatscenario's (Bron: KNMI, 2015).

Kerncijfers KNMI '14-klimaatscenario's, met correctie W _L 2085								
Seizoen ^{A)}	Variabele	Indicator	Klimaat ^{B)} 1951- 1980	Klimaat ^{B)} 1981-2010 = referentie- periode	Scenario veranderingen voor het klimaat rond 2085 ^{C)} (2071-2100)			
					G _L	G _H	W _L	W _H
Wereldwijde temperatuurstijging:					+1,5 °C	+1,5 °C	+3,5 °C	+3,5 °C
Verandering van luchtstromingspatroon:					Lage waarde	Hoge waarde	Lage waarde	Hoge waarde
Jaar	Zeespiegel bij Noordzeekust	absolute niveau ^{E)}	4 cm beneden NAP	3 cm boven NAP	+25 tot +60 cm	+25 tot +60 cm	+45 tot +80 cm	+45 tot +80 cm
		tempo van verandering	1,2 mm/jaar	2,0 mm/jaar	+1 tot +7,5 mm/jaar	+1 tot +7,5 mm/jaar	+4 tot +10,5 mm/jaar	+4 tot +10,5 mm/jaar
	Temperatuur	gemiddelde	9,2 °C	10,1 °C	+1,3 °C	+1,7 °C	+3,3 °C	+3,7 °C
	Neerslag	gemiddelde hoeveelheid	774 mm	851 mm	+5%	+5%	+7%	+7%
	Zonnestraling	zonnestraling	346 kJ/cm ² ^{F)}	354 kJ/cm ²	-0,5%	+1,1%	-0,9%	+1,4%
	Verdamping	potentiele verdamping (Makkink)	534 mm ^{F)}	559 mm	+2,5%	+5,5%	+6%	+10%
	Mist	aantal uren met zicht minder dan 1 km	412 uur	300 uur ^{G)}	-120 uur	-120 uur	-120 uur	-120 uur

Figuur 3.2 De veranderingen in de meteorologie voor zichtjaar 2085 (Bron: KNMI, 2015).

In alle scenario's neemt de neerslag toe, met uitzondering van de zomer (KNMI, 2015). Twee scenario's (G_L en W_L) berekenen een kleine toename van de gemiddelde neerslag in de zomer, de twee andere (G_H en W_H) juist een aanzienlijke afname. De percentuele afname is het grootst in zomers die al droog zijn. Extreme neerslag neemt in alle scenario's en in alle seizoenen toe, weliswaar met een grote onzekerheidsband.

In alle KNMI'14-scenario's zal de luchttemperatuur in Nederland stijgen. Rond 2050 is de toename het grootst in de winter en het kleinst in de lente. De variatie in wintertemperatuur neemt af doordat de kans op koude winters relatief sterk afneemt. Temperatuurverschillen tussen zomers nemen daarentegen toe doordat de temperatuur in warme zomers het sterkst toeneemt.

De verwachte opwarming in Nederland vertoont regionale verschillen. Deze zijn het grootst voor de extremen in het WH-scenario. Op de warmste zomerdagen neemt de temperatuur in dat scenario in het zuidoosten van Nederland ongeveer 1 °C meer toe dan in het noordwesten. Regionale zomertemperatuurverschillen tussen kust en binnenland nemen hierdoor toe. Op koude winterdagen is de opwarming in het oosten groter dan in de kustgebieden, waardoor de bestaande regionale verschillen in wintertemperatuur juist afnemen.

De veranderingen van de windsnelheid zijn klein in de KNMI'14-scenario's. Veranderingen van de gemiddelde windsnelheid door het jaar heen en tijdens stormen in de winter vallen binnen de natuurlijke variabiliteit. De bewolgingsgraad in de zomer neemt af in de G_H- en W_H-scenario's, als gevolg van frequentere oostenwind. In die scenario's neemt de zonnestraling in de zomer daardoor toe.

In alle klimaatscenario's neemt de potentiële verdamping toe. De afgelopen decennia nam de potentiële verdamping ook al toe, tussen 1958 en 2013 was de toename 12%. Deze toename werd veroorzaakt door toenemende temperatuur en zonnestraling.

Sinds 1951 komt droogte iets vaker voor in Nederland. Deze trend zet in de toekomst waarschijnlijk door. Indicatoren voor droogte, bijvoorbeeld het neerslagtekort, nemen in de G_H- en W_H-scenario's meer toe dan in de G_L- en W_L-scenario's. De afgelopen vijf jaar kende 4 extreem droge jaren (2018, 2019, 2020, 2022) die eerder minder dan eens in de 20 jaar voorkwamen. Er wordt verwacht dat dit soort droge jaren steeds vaker zullen voorkomen.

Het KNMI is momenteel bezig met het actualiseren van de klimaatscenario's. In 2021 heeft het KNMI een nieuw klimaatsignaal (KNMI, 2021) afgegeven met actuele informatie over klimaatverandering in Nederland. Deze is onder andere op de volgende punten geactualiseerd:

- Klimaatakkoord Parijs wordt meegenomen;
- De zeespiegelstijging is naar boven bijgesteld;
- De extreme neerslag van zomerbuien is naar beneden bijgesteld.

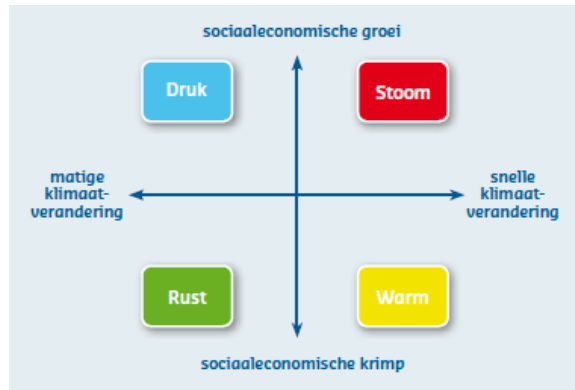
Rond 2023 wordt het klimaatsignaal vertaald naar de KNMI'23 toekomstscenario's.

De impact van klimaatverandering

De impact van klimaatverandering op grondwater is onderzocht in de Knelpuntenanalyse Zoetwater (Mens et al., 2019). Daarin is gewerkt met vier Deltascenario's (Wolters et al., 2018), waarbij naast klimaatverandering ook socio-economische veranderingen zijn meegenomen.

Elk Deltascenario is een combinatie van een klimaatscenario (KNMI'14) en een sociaaleconomisch scenario (onder meer: landgebruik, bodemdaling, doorspoeling, onttrekkingen). Deze twee ontwikkelingen, klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkeling, zijn te beschouwen als autonoom: ze zijn sterk afhankelijk van externe krachten waarop Nederland weinig invloed heeft. De snelheid van deze ontwikkelingen is zeer onzeker, hoewel de richting (zeker voor klimaatverandering) wel bekend is. De Deltascenario's beschrijven zo goed mogelijk de plausibele bandbreedte in deze ontwikkelingen, in hun onderlinge samenhang en met hun mogelijke consequenties voor ruimtegebruik en watervraag. Dit geeft de bandbreedte van de mogelijke toekomstige zoetwaterproblematiek weer.

In de Deltascenario's wordt het KNMI klimaatscenario G_L (matige klimaatverandering) als ondergrens gebruikt en het KNMI klimaatscenario W_H (sterke klimaatverandering) als bovengrens gebruikt (Figuur 3.3).



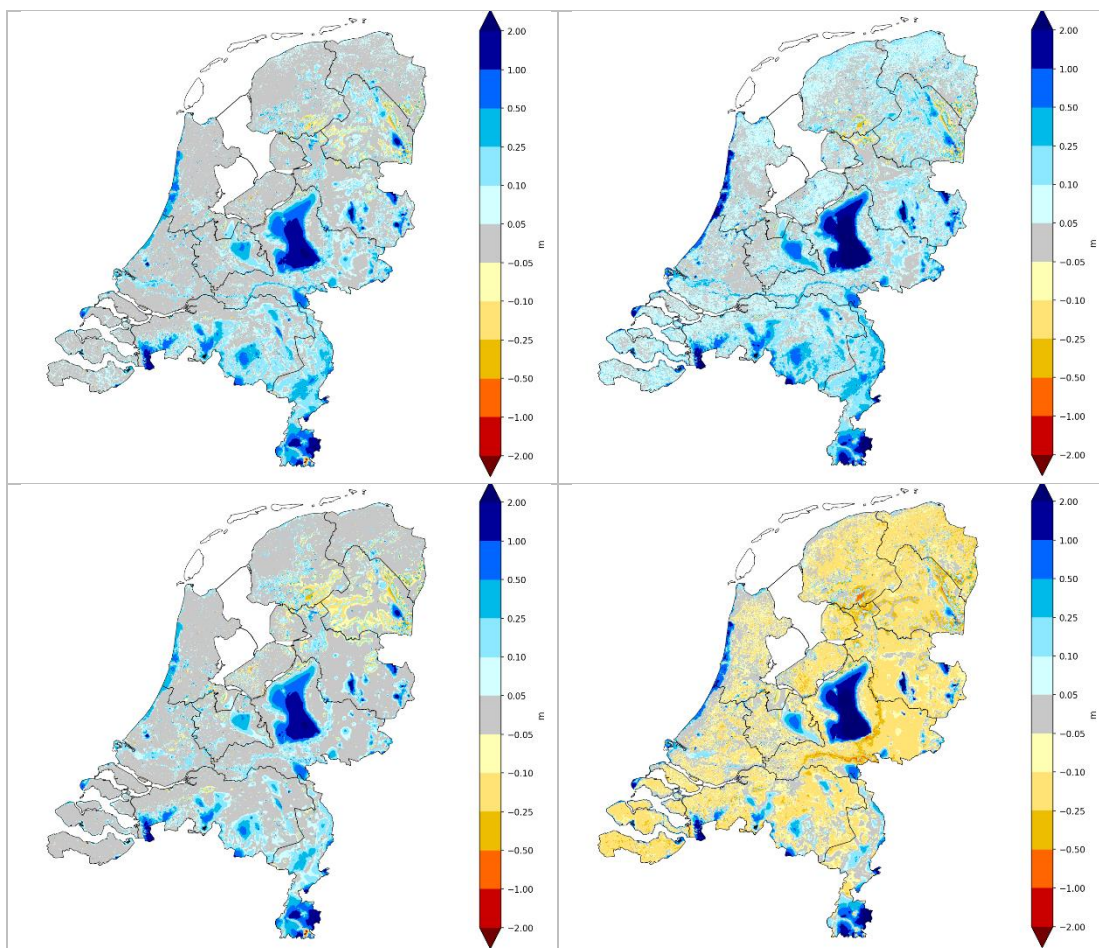
Figuur 3.3 Deltascenario's (Mens et al., 2019)

De Knelpuntenanalyse Zoetwater (Mens et al., 2019) toont het gecombineerde effect van klimaatverandering en andere socio-economische wijzigingen. De twee Deltascenario's met socio-economische krimp hebben relatief geringe wijzigingen in de socio-economie en geven daarom de beste indicatie voor het geïsoleerde effect van klimaatverandering. Dit zijn Deltascenario's Rust (geringe klimaatverandering volgens KNMI-scenario GL) en Warm (forse klimaatverandering volgens KNMI-scenario WH).

Figuur 3.4 toont de verandering in de GHG (Gemiddelde Hoge Grondwaterstand) en GLG (Gemiddelde Lage Grondwaterstand) in zichtjaar 2100 voor Deltascenario's Rust en Warm. De GHG ligt in beide Deltascenario's in de hogere delen van Nederland ongeveer 10 tot 30 cm hoger dan in de huidige situatie. Voor beide klimaatscenario's geldt namelijk een verhoging van de winterneerslag met 4,5% (Rust) en 30% (Warm). Vanwege de forse toename van de winterneerslag in het WH-klimaat (Deltascenario Warm) neemt de GHG ook in de lagere delen van Nederland toe. Echter, deze toename is slechts enkele centimeters omdat deze gebieden goed ontwaterd zijn en een toename in winterneerslag voornamelijk direct wordt afgevoerd.

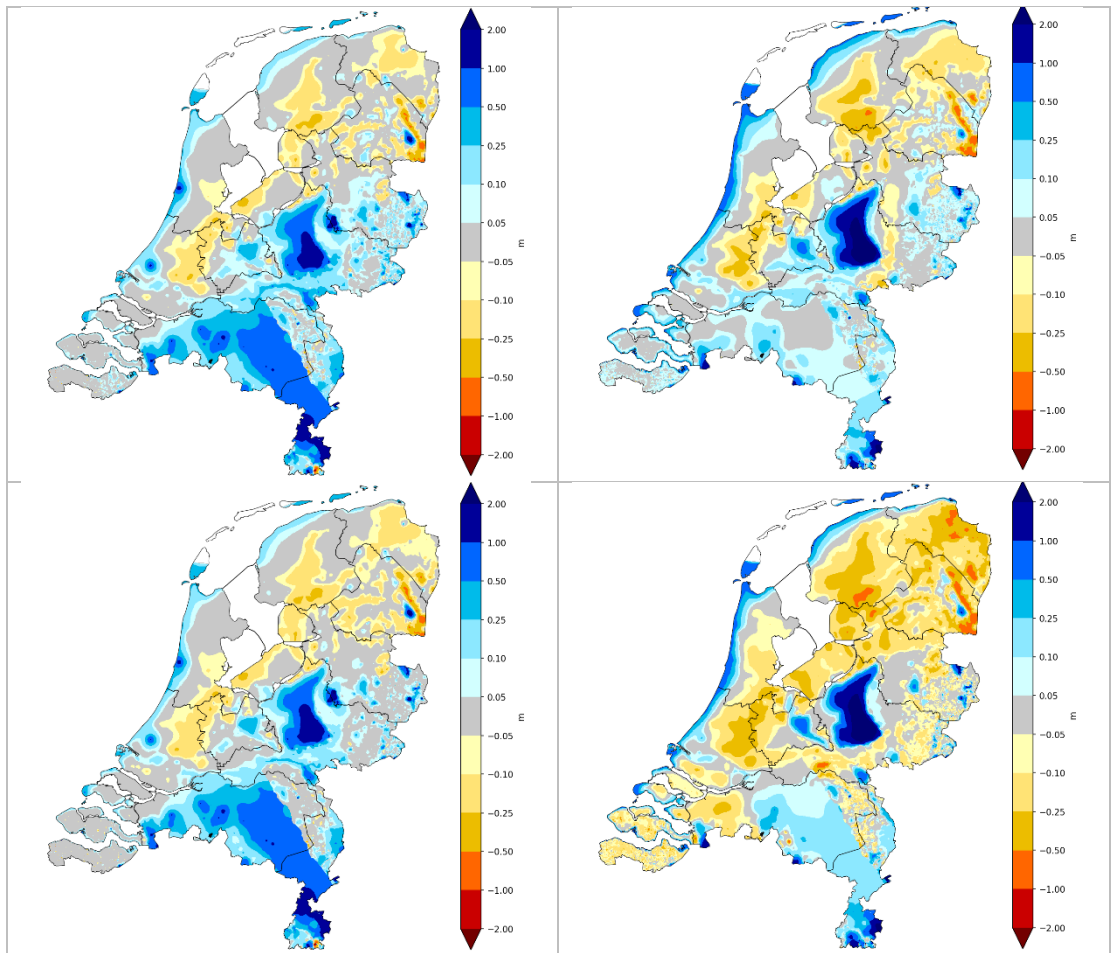
Bij WH klimaat (Deltascenario Warm) daalt de GLG echter met 10-20 cm, vanwege de afname van neerslag (-23%) en toename van de referentieverdamping (+15%) in de zomer. Alleen in de heuvelgebieden (waaronder de Veluwe, Utrechtse Heuvelrug, Sallandse Heuvelrug en Nijmeegse Stuwwal) met een dikke onverzadigde zone en weinig waterlopen stijgt de GLG vanwege de toename van de jaarlijks gemiddelde neerslag. De seizoenseffecten van neerslag en verdamping worden hier namelijk gedempt vanwege de grote vertraging van percolerend neerslagwater en het neerslagoverschot in de winter wordt nauwelijks afgevoerd vanwege het ontbreken van ontwatering in de nabije omgeving. Hierdoor komt vrijwel het gehele neerslagoverschot ten goede aan het stijgen van de grondwaterstand.

Bij GL-klimaat (Deltascenario Rust) daalt de GLG in de meeste gebieden niet omdat de referentieverdamping in de zomer slechts gering toeneemt (+3,5%). Ook de zomerneerslag neemt iets toe (+1%). In de heuvelgebieden stijgt de GLG juist wel door de toename van het jaarlijkse neerslagoverschot, zoals hierboven besproken.

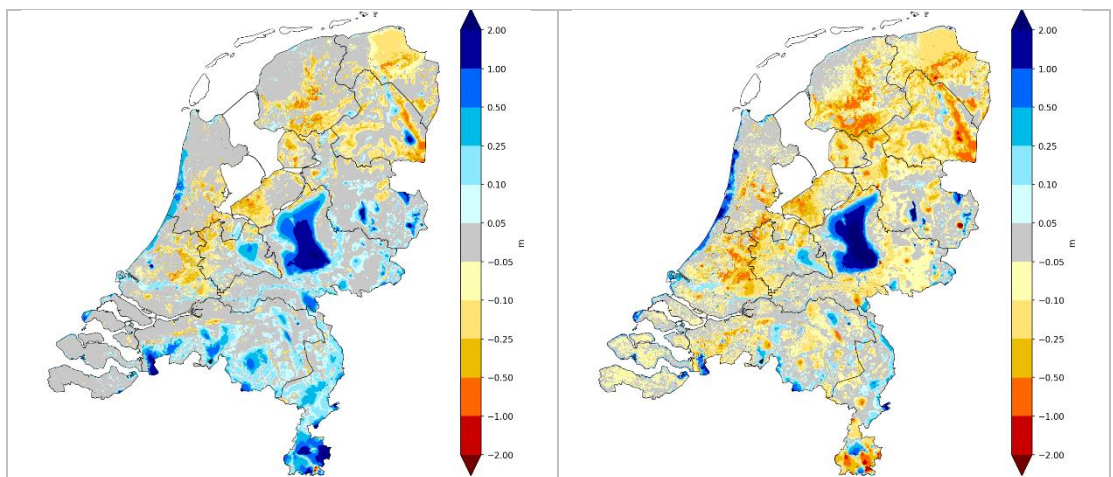


Figuur 3.4 De verandering van de GHG (boven) en GLG (beneden) ten opzichte van maaiveld voor Deltascenario Rust (links) en Warm (rechts) voor zichtjaar 2100. Let op: blauwe kleuren tonen een verhoging van de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld, terwijl de absolute grondwaterstand (uitgedrukt t.o.v. NAP) wel kan dalen, bodemdaling zit namelijk ook verwerkt in deze kaarten.

Figuur 3.5 laat zien dat de stijghoogte (potentieel peil van dieper grondwater) op de heuvelgebieden verhoogt voor beide Deltascenario's Rust en Warm. Dit geldt zowel voor de zomer- als voor de wintersituatie. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de verhoogde grondwaterstand op deze gebieden, in scenario Warm nemen de grondwateronttrekkingen namelijk niet af. Opvallend is dat de verhoogde stijghoogte in de hele Roerdalslenk (zuidoosten van Nederland) zichtbaar is in Deltascenario Rust. De verhoging van de stijghoogte in deltasenario Rust is echter niet alleen het effect van klimaatverandering, maar ook van een reductie in de grondwateronttrekkingen voor drinkwater en industrie. In het noorden en westen van Nederland daalt de stijghoogte in beide Deltascenario's. Ook deze verandering is niet enkel het gevolg van klimaatverandering. De daling van de stijghoogte wordt namelijk grotendeels veroorzaakt door bodemdaling wat leidt tot lagere absolute grondwaterstanden (t.o.v. NAP). Deze absolute daling is echter niet terug te zien in Figuur 3.4 omdat hier de verandering van de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld staat weergegeven en het maaiveld daalt ook door bodemdaling. De absolute grondwaterstand (uitgedrukt t.o.v. NAP) daalt in deze bodemdalingsgebieden dus wel (zie ook Figuur 3.6) terwijl de grondwaterstand ten opzicht van maaiveld (iets) kan stijgen. De absolute daling van de grondwaterstand werkt sterk door in de onderliggende watervoerende pakketten waardoor de stijghoogtes hier ook sterk dalen.



Figuur 3.5 De absolute verandering van de diepe stijghoogte voor Deltascenario Rust (links) en Warm (rechts) in de winterperiode (boven) en de zomerperiode (onder) voor zichtjaar 2100. Blauwe kleuren tonen een verhoging van de stijghoogte ten opzichte van NAP.



Figuur 3.6 De langjarig gemiddelde verandering van de grondwaterstand voor Deltascenario Rust (links) en Warm (rechts) voor zichtjaar 2100, ten opzichte van NAP. Blauwe kleuren tonen een verhoging van de stijghoogte ten opzichte van NAP.

Het blijkt niet goed mogelijk om uit de modelberekeningen van Mens et al. (2019) het geïsoleerde effect van klimaatverandering op de stijghoogte en de NGR te kwantificeren, omdat de modelberekeningen ook andere ontwikkelingen zoals bodemdaling meenemen. Het wordt sterk aanbevolen deze geïsoleerde effecten wel in beeld te brengen zodat duidelijk wordt wat het effect van een veranderend klimaat op het grondwatersysteem is.

Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: De verwachting is dat winters natter worden (meer grondwater-aanvulling) en zomers droger (minder grondwateraanvulling).
- Impact op grondwatersysteem: 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.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): Ontwaterd gebied: iets minder snelle verplaatsing van het DMB-front. Kerninfiltratiegebieden: iets snellere verplaatsing van het DMB-front.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): Ontwaterd gebied: lokaal of regionaal mogelijk ondieper ZZ-grensvlak, bijvoorbeeld in het riviergebied. Kerninfiltratiegebieden: iets dieper ZZ-grensvlak indien aanwezig.

4 Zeespiegelstijging

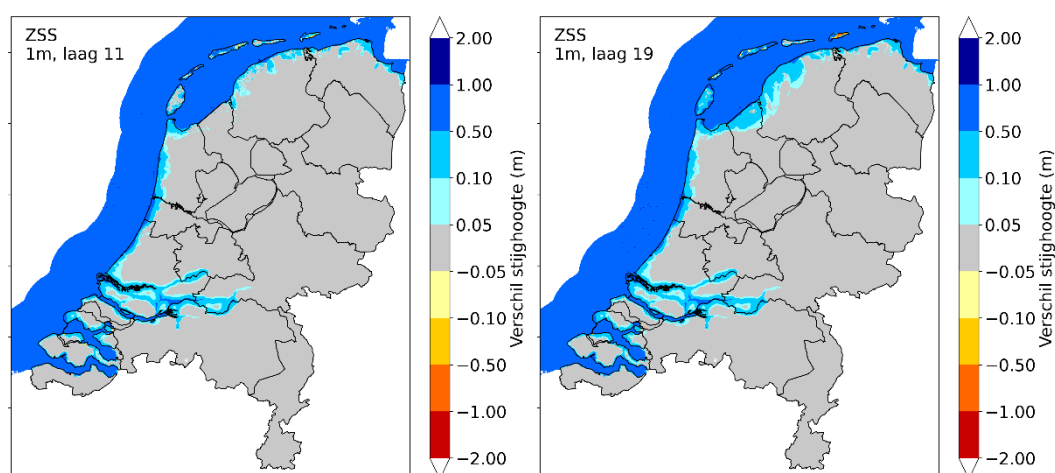
Verwachting zeespiegelstijging

Het KNMI geeft in het Klimaatsignaal'21 (KNMI, 2021) een indicatie voor de zeespiegelstijging in 2050 en 2100 bij drie uittootsscenario's, zie Figuur 4.1. De zeespiegelstijging is weergegeven voor drie verschillende uittootsscenario's. De bandbreedte is groot, zowel binnen de uittootsscenario's als tussen de uittootsscenario's. De verwachte zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust in 2100 varieert tussen de 30 en 121 cm.

Jaar	2050	2050	2050	2100	2100	2100
Uitstoot-scenario	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Zeespiegelstijging in cm	14-38 cm	15-41 cm	16-47 cm	30-81 cm	39-94 cm	54-121 cm
Stijgsnelheid in mm/jaar	2,8-8,7 mm/jaar	5,2-10,6 mm/jaar	5,8-12,1 mm/jaar	2,9-9,1 mm/jaar	4,4-10,5 mm/jaar	7,2-16,9 mm/jaar

Figuur 4.1 Indicatieve zeespiegelscenario's voor de Nederlandse kust onder verschillende emissiescenario's, rond 2050 (2046-2055) en rond 2100 (2096-2105), ten opzichte van 1995-2014, met zeer waarschijnlijke bandbreedte (90%). Hierbij is de bodemdaling inbegrepen. De gebruikte emissiescenario's zijn SSP1-2.6 (consistent met de maximaal 2°C-doelstelling van het Klimaatakkoord van Parijs), 2,7°C (2,1-3,5) voor SSP2-4.5 en 4,4°C (3,3-5,7) voor SSP5-8.5 (als de uitstoot van broeikasgassen wereldwijd niet beperkt wordt). Overgenomen uit KNMI (2021).

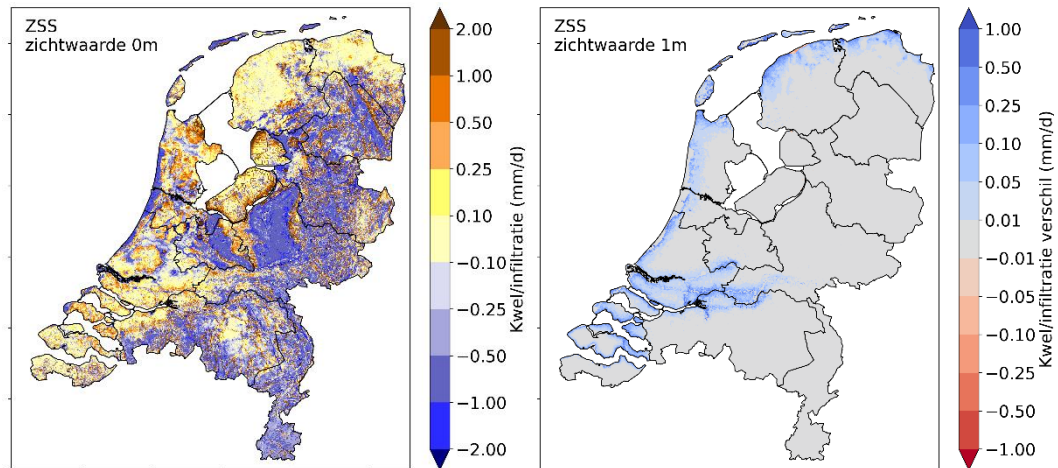
Delsman et al. (2022) berekende recentelijk het effect van verschillende mate van zeespiegelstijging op het grondwatersysteem door. Hierbij gingen ze uit van de volgende zichtjaren bepaald voor het gematigde IPCC scenario RCP4.5: 0.5 m zeespiegelstijging in 2078, 1.0 m in 2129, 2.0 m in 2205 en 3 m zeespiegelstijging in 2277. In Figuur 4.2 staat het effect van 1 meter zeespiegelstijging op de stijghoogte in 2129 van het eerste (Wvp1) en tweede watervoerende pakket (Wvp2) weergegeven. De uitstraling in Wvp2 is groter door de grotere Kd-waarde (conductiviteit) en hogere gesommeerde weerstand boven Wvp2. Het significante effect (> 5 cm) blijft redelijk beperkt tot een relatief smalle zone van enkele kilometers langs de kust (maximaal 10 km). Via de grote rivieren reikt het effect van zeespiegelstijging veel verder landinwaarts tot in de provincie Gelderland en in midden Noord-Brabant.



Figuur 4.2 Het effect van 1 m zeespiegelstijging (zichtjaar 2129) op de stijghoogte in Wvp1 (links, modellaag 11) en Wvp2 (rechts, modellaag 19).

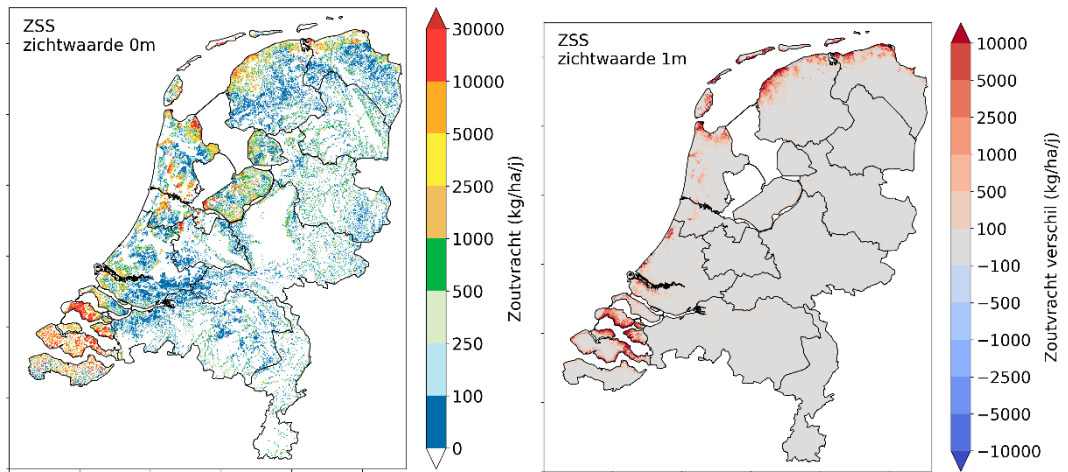
Door de toename van de stijghoogte in Wvp1 stijgt ook de freatische grondwaterstand (niet getoond). In het freatische grondwater is het effect van de zeespiegelstijging met toenemende afstand van de kust snel uitgewerkt, met uitzondering van de duingebieden. In de duingebieden kan de grondwaterstand zich vrijer instellen dan in het sterk ontwaterde binnenlandse gebied. Dit komt doordat de duingebieden niet ontwaterd worden, waardoor de dempende werking van de ontwatering ontbreekt.

Door een toename van de stijghoogte in Wvp1 neemt ook de kwel toe in kwelgebieden en de infiltratieflex af in infiltratiegebieden (zie Figuur 4.3). Hierdoor zal het waterbezwaar in de polders van het kustgebied en langs de grote rivieren iets toenemen (maximaal 1 mm/dag direct langs de kust). De toename van waterbezwaar lijkt daarmee niet te leiden tot een plotselinge toename in benodigde maalcapaciteit, aangezien gemalen zijn gedimensioneerd op het kunnen uitmalen van piekbuien van zo'n 35 mm (Delsman et al., 2022).



Figuur 4.3 (links) De huidige kwel (positief) en infiltratieflex (negatief) en (rechts) de veranderde flux als gevolg van 1 m zeespiegelstijging (zichtjaar 2129). Een blauwe kleur geeft een toename van de kwelflux of een afname van de infiltratieflex weer (Delsman et al., 2022).

De toename de kwel leidt tot een toename van de zoutvracht vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater (zie Figuur 4.4). De zoutvracht is naast de kwelflux sterk afhankelijk van het zoutgehalte van het grondwater. Hoe zouter het kwelwater, hoe groter de zoutvracht als gevolg van een toename in kwelflux. In de gebieden langs de grote rivieren neemt de kwel bijvoorbeeld wel toe, maar is het grondwater zoet. Een grotere zoutvracht leidt tot een hoger zoutgehalte van het polderwater en daarmee tot een toename van de doorspoelbehoefte.



Figuur 4.4 De huidige zoutvracht door kwel (links) en de toename van de zoutvracht als gevolg van 1 m zeespiegelstijging (zichtjaar 2129) (rechts.)

Een toename van de stijghoogte in de watervoerende pakketten langs de kust en daarmee de opwaartse fluxen in de diepe polders en andere kwel-polders, zal ook leiden tot een iets snellere opwaartse verplaatsing van zoet-zout grensvlak, ofwel versnelling van het autonome verziltingsproces (zie hoofdstuk 6).

Mogelijke effecten op de NGR

- **Belangrijkste processen:** Verwachte stijging van de zeespiegel van 1 m rond het jaar 2130.
- **Impact op grondwatersysteem:** 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.
- **Impact op NGR bovengrens (DMB-front):** Verwaarloosbare impact.
- **Impact op NGR ondergrens (Zoet Zout-grensvlak):** Versnelde opwaartse verplaatsing van het ZZ-grensvlak in het beïnvloede deel.

5 Bodemdaling

De processen die bodemdaling veroorzaken

Bodemdaling is het proces waarbij het maaiveld, of een niveau in de ondergrond, zakt ten opzichte van een referentievlak zoals NAP. Bodemdaling wordt voornamelijk veroorzaakt door vervorming van de ondergrond als gevolg van met name compactie, tektoniek en isostasie en biochemische afbraak van organisch materiaal (Van Asselen et al., 2019). De belangrijkste voor NGRs relevante bodemdalingsprocessen de komende eeuw zijn gerelateerd aan compactie en biochemische afbraak van organisch materiaal.

Compactie is de mechanische verdichting van het korrelskelet waarbij de porieruimte afneemt en daardoor de dikte van bodemlagen afneemt. Bodemdaling door compactie speelt vooral een rol bij gaswinning en zoutwinning (noorden van Nederland). Stuurman et al. (2007) beschrijft dat de zoutwinning bij Harlingen een bodemdaling van 25 cm in 2050 kan geven en bij Veendam kan deze daling 65 cm in 2050 bedragen. Soms kan er door zoutwinning ook een acute trechtervormige inzinking van de bodem ontstaan. De winning van aardgas in de provincie Groningen heeft sinds 1964 tot een daling van de bodem van maximaal 24 cm (situatie 2007 uit Stuurman et al., 2007). Dit is het rechtstreekse gevolg van een drukvermindering in de diepe lagen. In 2050 kan de maximale bodemdaling 30 à 40 cm bedragen bij voortzetten van de gaswinning (situatie 2007).

In sommige gevallen kan er bodemdaling plaatsvinden door het onttrekken van grondwater maar ook door extra belasting met gewicht op het maaiveld zoals bijvoorbeeld door aanleg van wegen of huizen (zie Figuur 5.1). Dit speelt alleen bij een venige of kleiige ondergrond want veen en klei zijn makkelijker samendrukbaar dan zand.

Oxidatie van veen speelt een dominante rol bij de bodemdaling in het veenweidegebied. Bij oxidatie wordt organisch materiaal afgebroken en hierbij komt CO₂ vrij. Dit leidt tot een volumevermindering en daling van het oppervlak. In het algemeen en op de lange duur is de afbraak door zuurstof uit de lucht veruit de grootste factor voor bodemdaling door oxidatie (Van Asselen et al., 2019). Dit proces vindt met name plaats in het veen boven de grondwaterstand omdat zuurstof hierdoor makkelijker de bodem indringt. Omdat de grondwaterstand in het veenweidegebied door ontwatering voor het grootste deel van de tijd onder het maaiveld ligt en in de zomer zelfs tot 0.5 en 1.0 m diepte kan wegzakken, vindt bodemdaling continu plaats. Dit proces startte al zo'n 1000 jaar geleden (klimaat-effectenatlas, 2022) met als gevolg dat het veenweidegebied tegenwoordig onder zeeniveau ligt. Actuele bodemdalingsnelheden in het veenweidegebied variëren van 1 tot 10 mm per jaar.

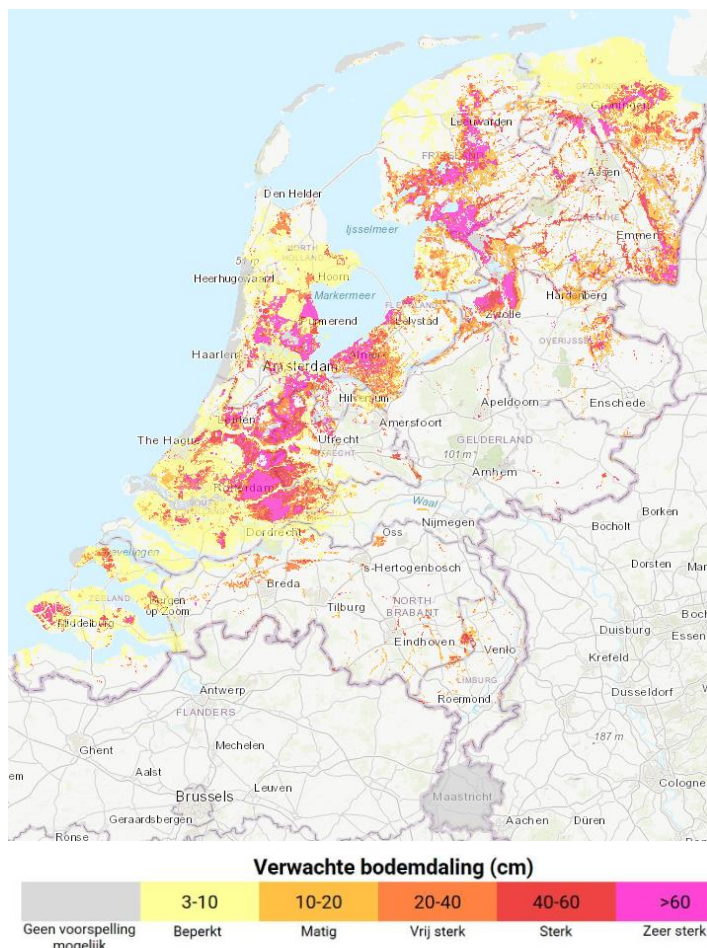
Oorzaken bodemdaling



Figuur 5.1 De belangrijkste oorzaken van de actuele bodemdaling in Nederland (uit Klimaat-effectenatlas, 2022)

Verwachting toekomstige bodemdaling

Deltares, TNO-Geologische Dienst Nederland en Wageningen Environmental Research hebben met het bodemdalingsmodel Atlantis de bodemdaling van slappe gronden op regionale schaal voorspeld voor het jaar 2100 (zie Klimaat-effectatlas, 2022). De bodemdalingskaarten tot 2100 gaan over bodemdaling als gevolg van ontwatering (o.a. door klimaatverandering) en gas- en zoutwinning. Doordat de gaswinning in het Groningen-gasveld sinds kort wordt afgebouwd, zijn de voorspellingen van de bodemdalingsnelheid daar naar beneden bijgesteld. Daarnaast wordt onderscheid gemaakt in de mate van ontwatering en klimaatverandering. Daarbij gaan ze uit van een “scenario laag” dat rekening houdt met peilindexatie en sterke klimaatverandering en “scenario hoog” met peilfixatie en beperkte klimaatverandering. Peilindexatie houdt in dat het oppervlaktewaterpeil steeds evenveel wordt verlaagd als de bodemdaling om dezelfde drooglegging en ontwateringsdiepte te handhaven. Bij peilfixatie wordt dit niet gedaan maar blijft het peil gelijk. Figuur 5.2 laat de verwachte bodemdaling zien voor het jaar 2100 voor “scenario hoog”. De verwachte bodemdaling is met name voor het veenweidegebied hoog door de oxidatie van het veen, met voor veel gebieden een bodemdaling van meer dan 50 cm. Voor deze gebieden is er ook met peilfixatie nog steeds sprake van een vrij sterke bodemdaling in 2100, van ongeveer 20 tot 60 cm. Ook bij een hoog peil zal er nog steeds veenoxidatie optreden, maar wel significant minder dan bij peilindexatie.



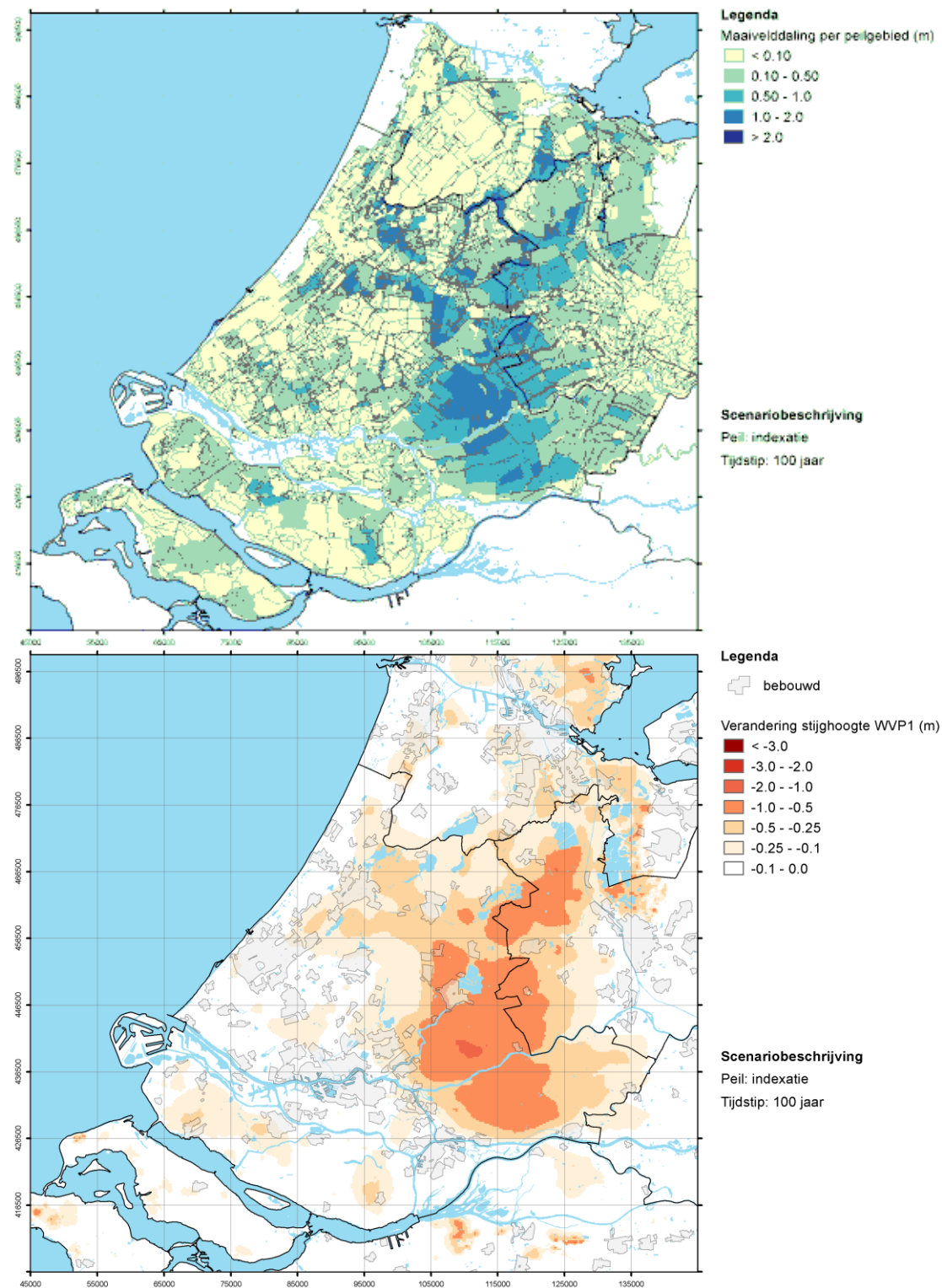
Figuur 5.2 De verwachte bodemdaling voor de periode 2020-2100 voor “scenario hoog” (peilindexatie en sterke klimaatverandering) als gevolg van ontwatering (veenweidegebied) en gas- en zoutwinning, berekend door Deltares, TNO en WeNR (uit Klimaat-effectatlas, 2022)

De laatste jaren staat de CO₂-uitstoot door veenoxidatie sterk in de aandacht. Het recente klimaatbeleid is er op gericht om deze CO₂-uitstoot zoveel mogelijk te beperken en daarmee ook de bodemdaling. De verwachte bodemdaling zal daarmee meer in de richting van het “scenario laag” liggen.

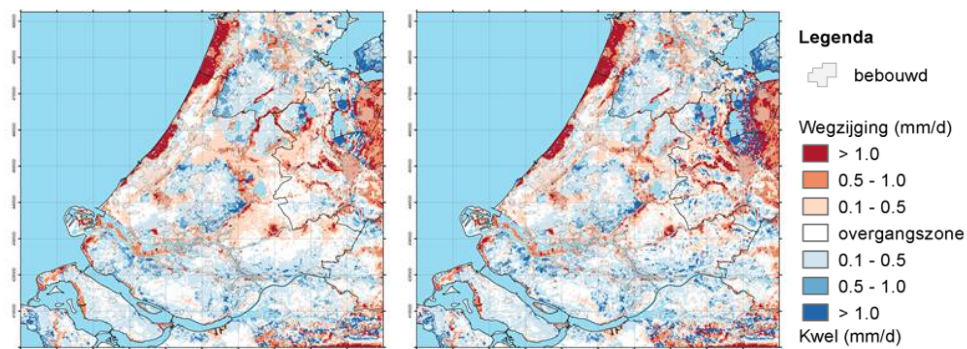
Effecten op het grondwatersysteem

Bodemdaling heeft een significant effect op het grondwatersysteem als dit gepaard gaat met waterhuishoudkundige ingrepen ter compensatie van de bodemdaling zoals peilverlaging. Deze peilverlaging heeft effect op de freatische grondwaterstand en deze effecten werken door op de stijghoogte in onderliggende watervoerende pakketten. Erkens et al. (2018) brachten voor de provincie Zuid-Holland de effecten van toekomstige bodemdaling op het grondwatersysteem in beeld. In Figuur 5.3 staat het effect op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket weergegeven als gevolg van peilaanpassing om gelijke drooglegging te handhaven bij de verwachte bodemdaling (peilindexatie) na 100 jaar (in dezelfde figuur). Het effect op de stijghoogte is groot te noemen met dalingen van 0.5 tot 1.0 m voor de gebieden waar de verwachte bodemdaling tussen 0.5 en 1.5 m is. Peilverlagingen in het ondiepe freatische grondwatersysteem werken dus sterk door naar het diepere grondwatersysteem. De veranderingen van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en onderliggende pakketten beïnvloeden ook de fluxen tussen de watervoerende pakketten, als ook de flux tussen het freatische systeem en het eerste watervoerende pakket. In Figuur 5.4 staat de flux tussen het eerste watervoerende pakket en het freatisch systeem weergegeven, ook wel aangeduid als kwel (opwaartse flux) en infiltratie (neerwaartse flux). Over het algemeen neemt de kwelflux toe in de kwelgebieden die dalen (stijghoogteverschil neemt toe door sterkere daling freatische grondwaterstand dan stijghoogte). Echter, in de diepe droogmakerijen zoals bijvoorbeeld de Zuidplaspolder en Polder Mijdrecht neemt de kwel juist af omdat deze kleipolders nauwelijks dalen maar de stijghoogte juist wel daalt als gevolg van de bodemdaling rondom de droogmakerijen (stijghoogteverschil neemt af door daling stijghoogte). Door de bodemdaling en peilindexatie slaan een groot aantal gebieden om van infiltratie naar kwel (in dalingsgebieden) en een beperkt deel van kwel naar infiltratie (in diepe polders). De verandering van fluxen hebben ook effect op de zoutbelasting van het oppervlaktewater door diffuse zoute kwel (Figuur 5.5). In sommige gebieden zoals de Haarlemmermeerpolder neemt die af door afname kwel en toe in sommige dalingsgebieden. Door de bodemdaling kunnen er nieuwe wellen ontstaan in de dalingsgebieden (door opbarsting als gevolg van lager gewicht deklaag) en kan de zoutbelasting door wellen toenemen (Figuur 5.6). In de diepe polders neemt de bijdrage van wellen aan de zoutbelasting juist iets af omdat de kweldruk afneemt.

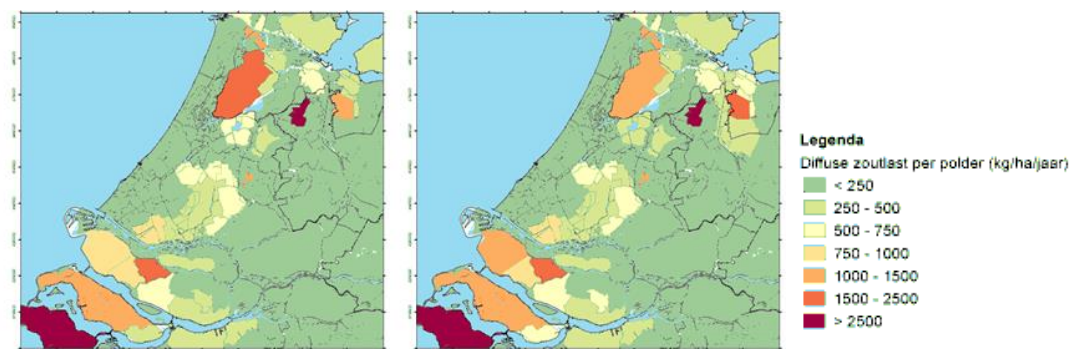
De verandering van fluxen zullen ook enige invloed op de autonome verzilting (het langzaam omhoog verplaatsten van het zoet-zout grensvlak) hebben. Met name in de bodemdalingsgebieden die een opwaartse flux kennen of hebben gekregen, kan er sprake zijn van het stijgen van het grensvlak. Door de afname van de opwaartse flux onder de diepe polders mag worden verwacht dat de autonome verzilting hier juist iets afneemt.



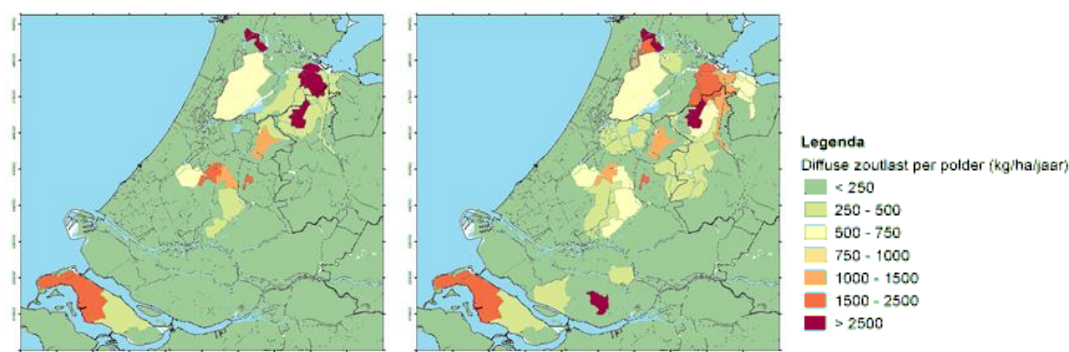
Figuur 5.3 De gemiddelde (cumulatieve) bodemdaling per peilgebied over 100 jaar zoals berekend voor de situatie met peilindexatie (boven) en de daling van de stijghoogte als gevolg van bodemdaling met peilindexatie over 100 jaar (onder). Uit Erkens et al., 2018.



Figuur 5.4 De kwel/infiltratieflux voor de huidige situatie (links) en na 100 jaar bodemdaling met peilindexatie (rechts). Uit Erkens et al., 2018.



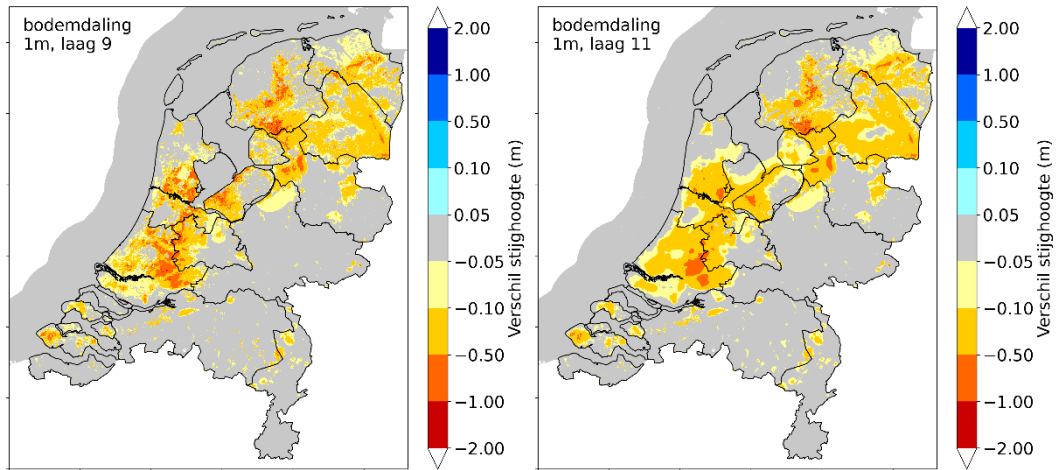
Figuur 5.5 De zoutbelasting via diffuse kwel in de huidige situatie (links) en na 100 jaar bodemdaling met peilindexatie (rechts) Uit Erkens et al., 2018.



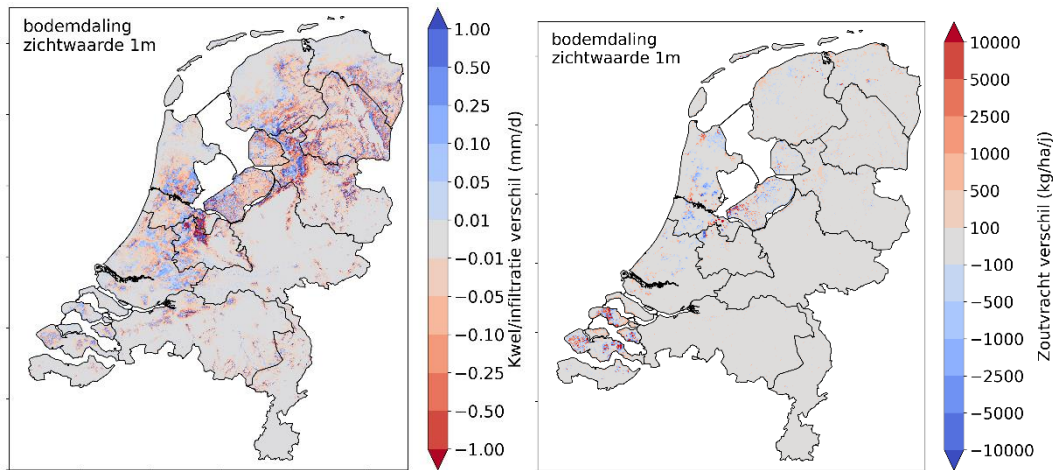
Figuur 5.6 De zoutbelasting via wellen in de huidige situatie (links) en na 100 jaar bodemdaling met peilindexatie (rechts). Uit Erkens et al., 2018.

Recentelijk berekende Delsman et al. (2022) het verwachte bodemdaling “scenario hoog” door (zoals weergegeven in Figuur 5.2) voor heel Nederland. Voor een groot deel van Nederland, met name het veenweidegebied en delen van het kleigebied, zijn de effecten op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket tussen de 10 en 70 centimeter. De processen zijn verder vergelijkbaar als hierboven beschreven voor de Zuid-Holland studie. De neemt de kwel in de diepe droogmakerijen af want de stijghoogte daalt flink onder de droogmakerijen terwijl de bodem (en daarmee de grondwaterstand) hier nauwelijks daalt. De bodemdaling in de veenweidegebieden veroorzaakt dus een regionale daling van de stijghoogte en daarmee een afname van de kwel en ook de zoutbelasting door kwel in de diepe droogmakerijen (zie Figuur 5.8). Tegelijkertijd neemt ook het stijghoogteverschil in de dalingsgebieden af want de daling van de grondwaterstand door peilindexatie is hier groter dan de daling van de stijghoogte. Het verzoetingsproces dat onder de dalende wegzijgingsgebieden aan de gang is, neemt dus iets in snelheid af. De autonome verzilting onder de diepe droogmakerijen neemt ook iets in snelheid af. In de bodemdalingsgebieden

waar kwel optreedt of die omslaan van infiltratie naar kwel, neemt de zoutbelasting juist iets toe.



Figuur 5.7 Effect op de freatische grondwaterstand (links) en op de stijghoogte eerste watervoerende pakket (rechts ten gevolge van de verwachte bodemdaling in 2100 voor het "scenario hoog" (met peilindexatie). Uit Delsman et al. (2022).



Figuur 5.8 Effect op de kwel/infiltratieflux (links) en op de zoutbelasting door kwel (rechts) ten gevolge van de verwachte bodemdaling in 2100 voor het "scenario hoog" (met peilindexatie). Uit Delsman et al. (2022).

Mogelijke effecten op de NGR

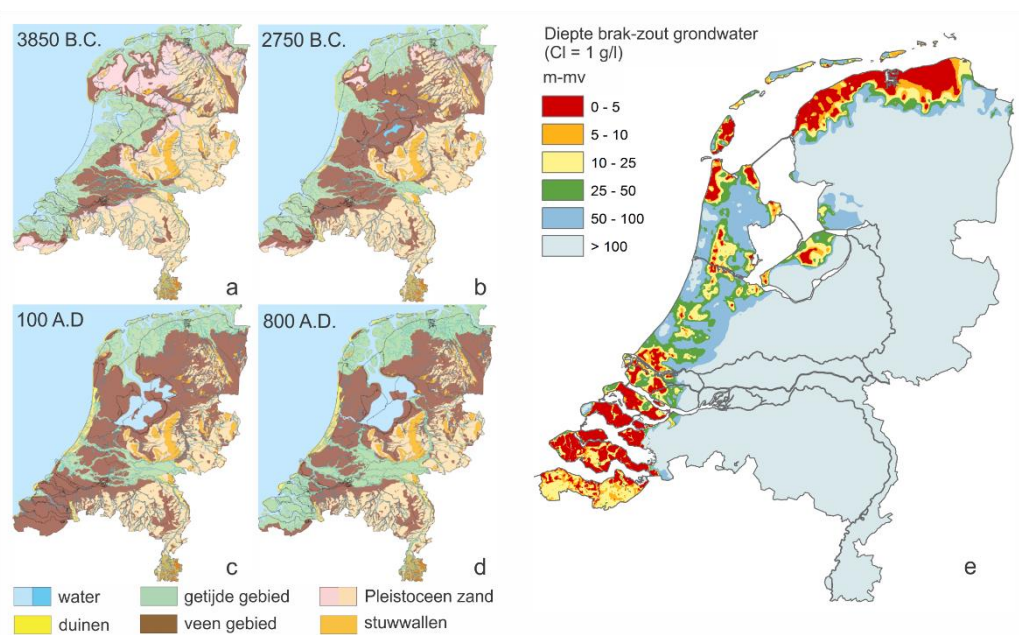
- Belangrijkste processen: Verwachte bodemdaling met name door oxidatie van veenbodems. Zelfs bij peilfixatie kan een bodemdaling van 20 tot 60 cm worden verwacht in 2100.
- Impact op grondwatersysteem: Gemiddeld lagere grondwaterstanden ten opzichte van NAP en daardoor een daling van de stijghoogte 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.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): In de dalende infiltratiegebieden leidt dit tot een iets minder snel verplaatsend DMB-front.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): 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.

6 Autonome verzilting

De zoet-zout verdeling van Nederland

Onderstaande tekst over de zoet-zout verdeling van Nederland en autonome verzilting in laag-Nederland is grotendeels overgenomen uit De Louw et al. (2021).

Figuur 6.1e laat de diepte van het brak-zoute grondwater in Nederland zien. Het zoute grondwater in de ondergrond van het Nederlandse kustgebied is hoofdzakelijk afkomstig van transgressies gedurende het Holoceen (Post, 2004). Dit waren perioden waarin de zee aan invloed won en de kustlijn zich landinwaarts verplaatste. Tijdens deze transgressies kon het zeewater door dichtheidsstroming relatief snel de onderliggende watervoerende pakketten infiltreren. Afbeelding 1a-d toont de paleogeografische ontwikkeling van Nederland in vier fasen (Vos et al., 2011). De maximale transgressie vond omstreeks 6000 jaar geleden plaats. De verbreiding van deze maximale transgressie komt goed overeen met het gebied waar het brak-zoute grondwater binnen 100 m diepte wordt aangetroffen (vergelijk Figuur 6.1a met Figuur 6.1e). Kort daarna ontstonden er strandwallen die het kustgebied van West-Nederland beschermden tegen de zee en waarachter het veen kon groeien onder de invloed van neerslag. Vanaf dat moment hebben in West-Nederland geen transgressies meer plaatsgevonden en kon in dit gebied zoet regen- en rivierwater de bodem infiltreren. Daarom vinden we in West-Nederland het brak-zoute grondwater over het algemeen veel dieper dan in Zeeland en Noord-Nederland (vergelijk Figuur 6.1b met Figuur 6.1e).



Figuur 6.1 De paleogeografische ontwikkeling van Nederland in vier fasen: (a) 3850 B.C.; (b) 2750 B.C.; (c) 100 A.D.; (d) 800 A.D. (Vos e.a., 2011); en (e) de diepte (in meter beneden maaiveld) van het brak-zoute grondwater (grens Cl = 1000 mg/l) afkomstig uit het Holoceen. Figuur overgenomen uit: De Louw et al., (2019).

Deze laatstgenoemde gebieden hebben tot zeer recent, 800 tot 1100 AD, onder invloed gestaan van de zee. Rond het begin van de jaartelling was Zeeland tijdelijk bedekt met veen maar door onder andere het afgraven voor turfwinning en ontwatering door de Romeinen kreeg de zee weer vrij spel tijdens stormvloed. Het veen erodeerde en Zeeland, met uitzondering van het zuidelijke deel van Zeeuws-Vlaanderen, stond weer onder invloed van de zee. Dit duurde meer dan enkele eeuwen waardoor de bovenste watervoerende pakketten weer zout werden. Zeer slecht doorlatende kleilagen, zoals die van de Boomse klei (Rupel Formatie), belemmerden diepere infiltratie van zout water waardoor daaronder vaak pre-Holoceen zoet grondwater wordt aangetroffen. De recente transgressiegebieden (Zeeland, Goeree-Overflakkee en Noord-Nederland) worden gekenmerkt door het zeer ondiep (< 5 - mv) voorkomen van brak-zout grondwater (vergelijk Figuur 6.1d met Figuur 6.1e).

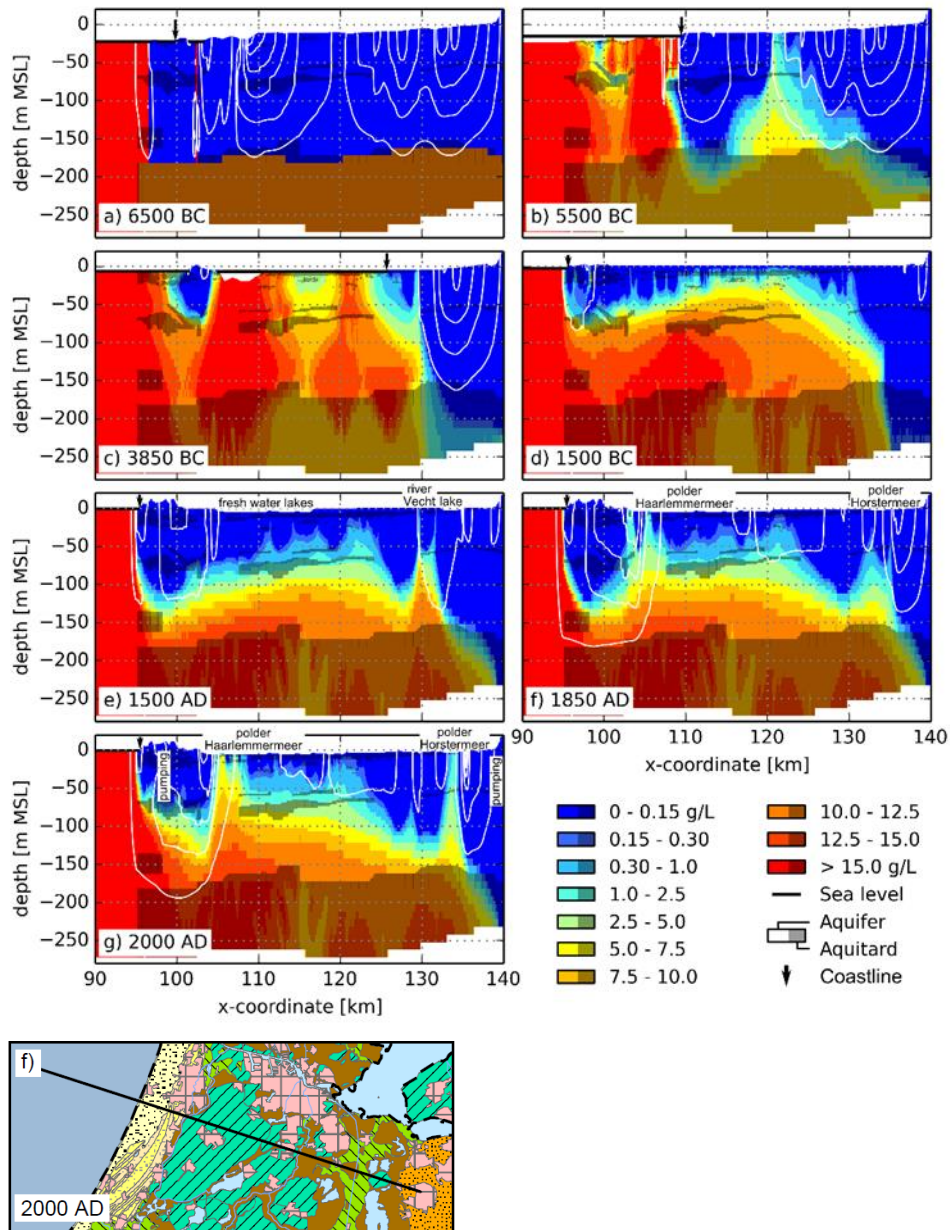
In het oosten van Nederland wordt zout grondwater boven zeeniveau aangetroffen. Dit is echter niet van Holocene oorsprong maar betreft connaat (fossiel) water dat in Tertiaire mariene kleien zit gevangen. Deze Tertiaire kleien zijn tijdens transgressies gedurende interglacialen als marien sediment afgezet en zijn zeer slecht doorlatend. Het mariene sediment en zeewater zijn tegelijkertijd afgezet en door de zeer slechte doorlatendheid van de mariene kleien is het zeewater als het ware opgesloten in het sediment. Tijdens de Saalien-ijstijd werden deze kleilagen met het oude zeewater vanuit de diepte door het ijs omhoog gestuwd (tot boven NAP) en vormden daarmee de kern van de oostelijke stuwwallen van Twente en Achterhoek. Het grondwater in deze Tertiaire kleien is licht brak en bevat veel sulfaat. Aan de bovenkant van deze pakketten vindt er enige uitwisseling plaats van grondwater waardoor de ondiepe pakketten verhoogde concentraties chloride en sulfaat kunnen bevatten. Verzilting vanuit deze Tertiaire kleien is echter zeer minimaal en er wordt verwacht dat dit de komende eeuw niet zal toenemen.

In Noord-Nederland komen zoutdiapieren voor, die gevormd worden door zout afkomstig uit het geologisch tijdvak Zechstein (ongeveer van 270 tot 251 Ma). Een zoutdiapier is een grote (van 100 m tot enkele km brede) paddenstoelvormige structuur in de ondergrond, die hoofdzakelijk uit zout bestaat. Er zijn enkele grondwaterwinningen in Noord-Nederland die verziltten door de nabije en relatief ondiepe ligging van de top van zulke zoutdiapieren. Het is dus zinvol om de locatie van deze zoutdiapieren in beeld te hebben bij het bepalen van de winbaarheid van NGRs.

Laag Nederland (noord, west)

De transgressies tot 3800 BC (infiltratie van zout water) en de veenvorming die daarop volgde (leidend tot infiltratie van zoetwater) hebben de karakteristieke zoet-zoutverdeling van West-Nederland bepaald. Vervolgens drukte de mens vanaf de 15^e eeuw een stempel op de zoet-zoutverdeling. Door de ontwatering van veen- en kleigebieden, veenexploitatie en het droogmaken van meren en plassen zoals Haarlemmermeer, Zuidplas, Beemster, Wormer, Schermer en Purmer (Schultz, 1992), veranderde de grondwaterstroming van zeewaarts naar de richting van de diepe droogmakerijen, die gemiddeld vier tot zes meter onder zeeniveau kwamen te liggen. Het aanwezige zoete grondwater (dat bovenop het zoute water lag) begon langzaam naar het oppervlak te stromen. Delsman e.a. (2014) hebben deze ontwikkeling voor een 2D-doorsnede loodrecht op de kustlijn (door de Haarlemmermeerpolder en Horstermeer), met een dichtheidsafhankelijk grondwatermodel (SEAWAT) nagebootst (Figuur 6.2). Sinds de ontwatering van het veen en zeker sinds het ontstaan van de diepe droogmakerijen stroomt het brak-zoute transgressiewater weer terug omhoog naar het oppervlak, met zoute kwel in de polders tot gevolg. Dit proces gaat zeer langzaam en de zoet-zoutverdeling is nog lang niet in evenwicht met de nieuwe randvoorwaarden in het westen van het land; het grondwatersysteem heeft een duidelijk langetermijngedrag. Met verloop van tijd bereikt steeds ouder, dieper en daardoor zouter grondwater het oppervlaktewater. Dit proces zal de komende eeuwen nog gewoon doorgaan en noemen we 'autonome verzilting'. Het zoet-brak-zout grensvlak komt in dit gebied onder de diepe polders dus steeds ietsjes ondieper te liggen. In de omliggende hoger gelegen veenweidegebieden

kan juist het omgekeerde proces plaatsvinden. Door continue infiltratie van grondwater uit deklaag naar het eerste watervoerende pakket vindt verzoeting van het watervoerende pakket plaats. Voor relatieve kleine diepe polders zoals Polder Mijdrecht vindt er zelfs verzoeting aan de randen plaats en de verwachting is dat na vele eeuwen deze polder geheel is verzoet.

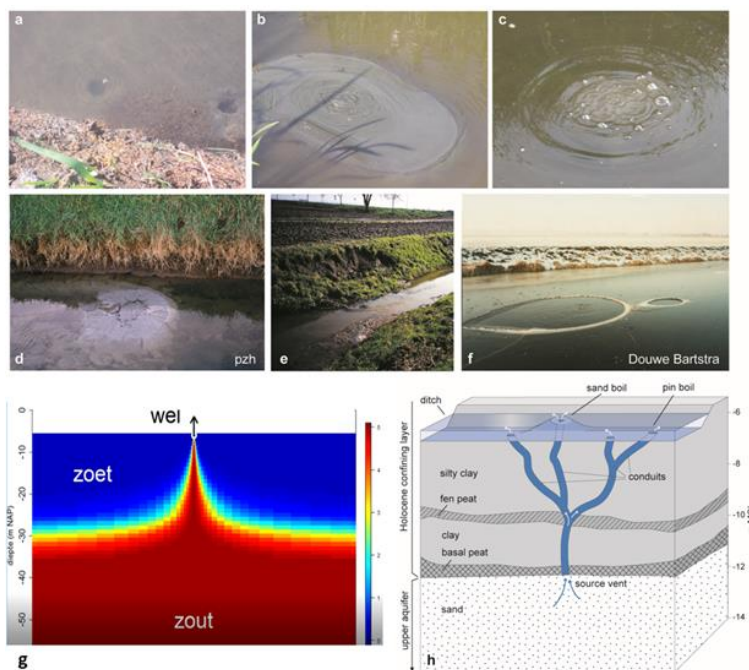


Figuur 6.2 De ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling gedurende het Holoceen voor een dwarsdoorsnede loodrecht op de kust, door de duinen, Haarlemmerpolder, Horstermeerpolder en Utrechtse heuvelrug, gemodelleerd met SEAWAT. Dit transect is weergegeven in de onderste figuur (allen uit Delsman e.a., 2014).

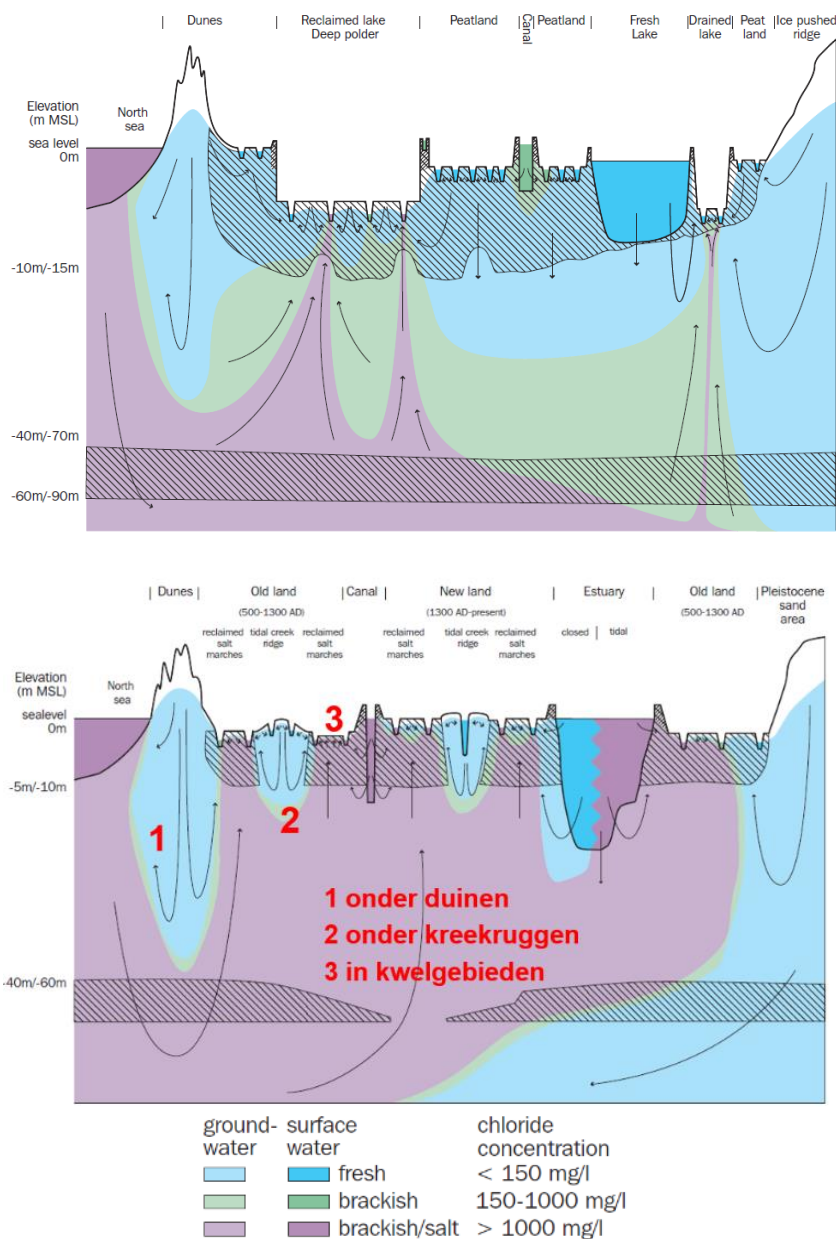
Boukes e.a. (2017) brachten de ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling vanaf 7500 BP voor de provincie Friesland in beeld met behulp van een zoet-zoutmodel voor een 2D-profiel loodrecht op de kust. Ook in dit deel van Nederland is er sprake van autonome verzilting en een langetermijnegeuegen van de zoet-zoutverdeling.

Sinds een aantal jaren weten we dat verzilting van de diepe polders vanuit het grondwater door wellen wordt gedomineerd (De Louw, 2013). Wellen zijn gaten in de deklaag waardoor met hoge snelheid grondwater uit het eerste watervoerend pakket omhoog stroomt (zie Figuur 6.3). Ze ontstaan door opbarsting van de deklaag die optreedt wanneer de waterdruk onder de deklaag groter wordt dan het gewicht van deklaag. Voor Polder de Noordplas vindt meer dan 60% van de zoutbelasting plaats via wellen (De Louw e.a., 2011a) en voor delen van de Haarlemmerpolder zelfs meer dan 80% (Delsman, 2015). De dominante bijdrage van wellen aan de verzilting komt doordat ze veel zouter zijn dan de ondiepe diffuse kwel als gevolg van opkegeling van zout grondwater. Door de zeer lokale, geconcentreerde vorm van kwel met hoge snelheden voeren ze dieper en daardoor zouter grondwater af dan diffuse kwel-systemen (De Louw e.a., 2013). Diffuse kwel-systemen voeren voornamelijk grondwater uit het bovenste deel van het eerste watervoerende pakket af, en dat is in West-Nederland voornamelijk zoet. Wellen doorbreken als het ware de zoet-zout verdeling van West-Nederland (Figuur 6.3 en Figuur 6.4). Wellen kunnen ook zoet zijn, als er in het eerste watervoerende pakket geen brak-zout grondwater aanwezig is, zoals in de polder Nieuwkoop.

Door de snelle grondwaterstroming via wellen bereikt de zoutconcentratie van wellen al veel sneller een quasi-evenwicht. De eerste vijf jaar na het ontstaan van een wel nemen zoutconcentraties flink toe waarna de concentratie stabiliseert, blijkt uit modelberekeningen (De Louw e.a., 2013). Als het zoutgehalte van de dominante verziltingsbron inderdaad niet significant meer toeneemt, is dit goed nieuws voor de autonome verzilting van diepe polders in West-Nederland. Hoe dit proces zich verhoudt tot autonome verzilting op grotere schaal is echter nog onbekend. Daarnaast kan het aantal wellen natuurlijk toenemen als gevolg van onder andere bodemdaling en peilverlagingen waardoor de autonome verzilting alsnog kan toenemen.



Figuur 6.3 Wellen als dominante verziltingsbron in diepe polders: (a) uitstroomopeningen van een wel; (b) een zandwel: door de hoge stroomsnelheid door een wel wordt zand uit het eerste watervoerende pakket naar de oppervlakte getransporteerd; (c) ontgassing van methaan via wellen; (d) zandwel; (e) uitzakken van slootkanten door wellen; (f) door de constante temperatuur van 11 graden van uittredend welwater, vriezen ze niet dicht; (g) zoutwater opkegeling door een wel: door het zeer lokaal, geconcentreerd afvoeren van grondwater, trekt de wel diep en daardoor zout grondwater aan, vergelijkbaar met een grondwaterwinning; (h) diagram dat een wel door de Holocene deklaag met verschillende uitstroomgaten representeert (overgenomen uit De Louw et al., 2010 en De Louw et al., 2019).



Figuur 6.4 Typische zoet-zoutverdeling voor (boven) West-Nederland waar zoet grondwater op brak-zout grondwater wordt aangetroffen en waar wellen via zoutwater opkegeling de verzilting van de diepe polders domineren; (onder) Zeeland waar de recente transgressie (200-1100 AD) de watervoerende pakketten hebben verzilt en sinds inpoldering zoetwaterlenzen konden groeien onder de hoger gelegen delen zoals duinen (type 1) en kreekkruggen (type 2). In de zoute kwelgebieden worden zeer dunne (< 2 m) regenwaterlenzen aangetroffen (type 3). Uit De Louw, 2013.

Zeeland

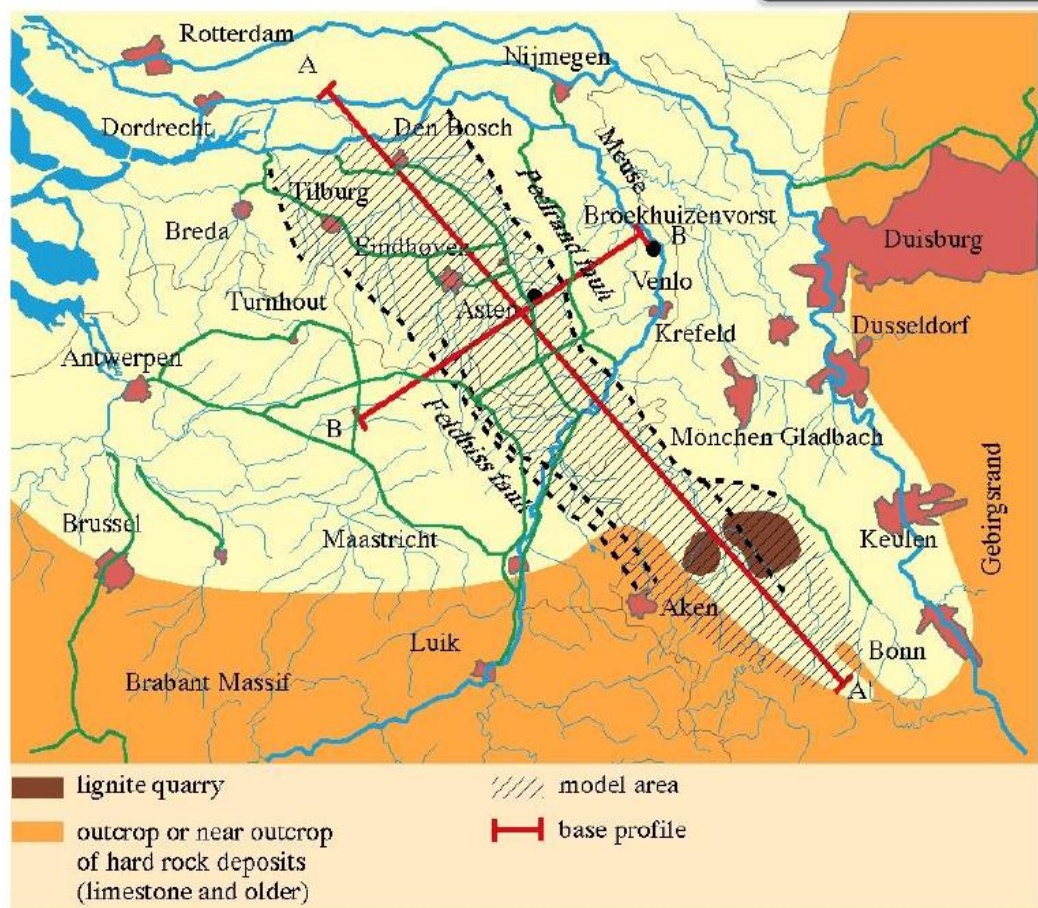
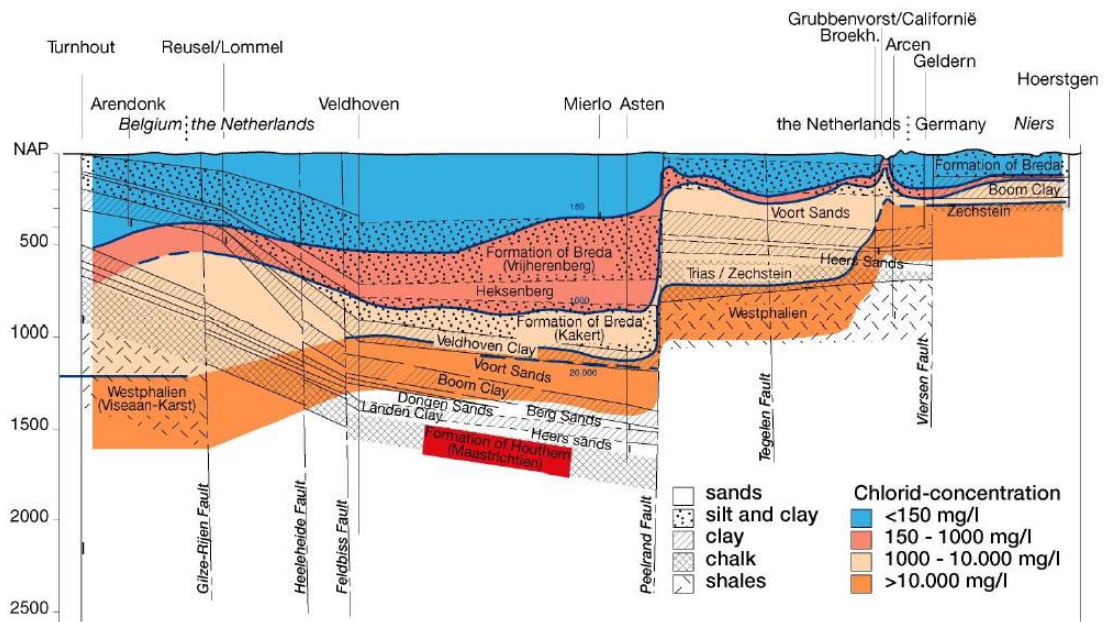
De zoet-zoutverdeling in het recente transgressiegebied Zeeland is minder complex dan die van West-Nederland en is ook min of meer in evenwicht met de heersende randvoorwaarden. Voordat Zeeland werd ingepolderd, vanaf ongeveer 1100-1300 AD, stond het gebied een flink aantal eeuwen onder invloed van de zee. Hierdoor werd, met uitzondering van de boven het zeewater uitstekende duinen, het zoete grondwater in onderliggende watervoerende pakketten vervangen door zout water. Na inpoldering ontstond er ruimte voor neerslagwater om in de bodem te infiltreren waardoor zoetwaterlenzen konden

ontstaan, ingebed in een verder redelijk uniforme ondiepe zoute ondergrond. Hierdoor bestaat er een relatief scherpe overgang van zoet naar zout grondwater. De overgangszone van zoet naar zout is slechts enkele meters dik. De dikste zoetwaterlenzen (30 tot 200 m dik) worden aangetroffen onder duinen (aangeduid met type 1 in Figuur 6.4) en in kreekruigten tot 40 m dik (type 2). In zoute kwelgebieden kan het regenwater niet ver de ondergrond indringen en ontstaan er dunne regenwaterlenzen die vaak niet dikker zijn dan 1 á 2 meter (type 3 in Figuur 6.4).

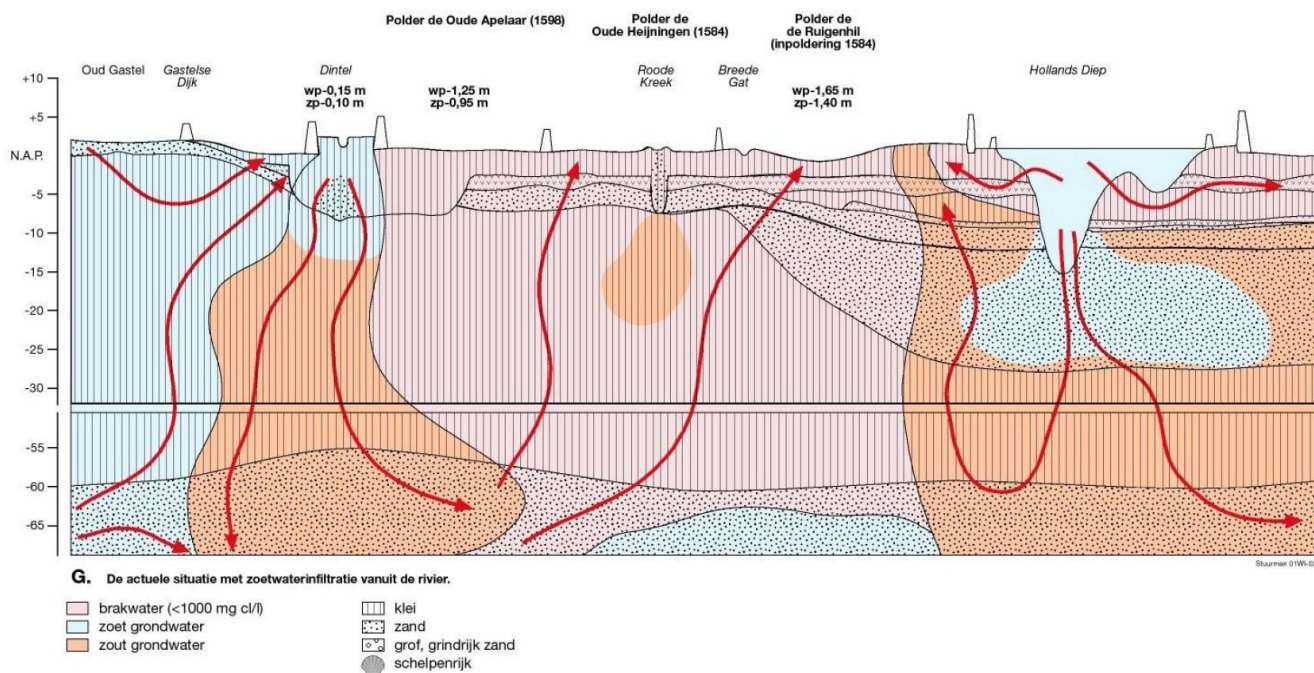
In tegenstelling tot het West-Nederland systeem, is de zoet-zoutverdeling in Zeeland redelijk in evenwicht met de heersende randvoorwaarden en is er van autonome verzilting nauwelijks sprake.

Zuid Nederland

Stuurman e.a. (2007) heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar de diepte van het zoet-zout grensvlak en toekomstige veranderingen daarin voor Noord-Brabant en deel van Limburg op basis van beschikbare literatuur, metingen en systeemanalyse. Beschikbare literatuur omvatte met name studies rond de Brabantse Wal (landschappelijke verhoging in zuidwesten van Nederland) als gevolg van een discussie over winbare hoeveelheden grondwater in relatie tot verzilting. In het proefschrift van Geirneart (1973) wordt getoond dat de zoet-zout overgang in het riviergebied veel ondieper ligt dan in de zandgebieden ten noorden en zuiden hiervan. Door infiltratie op de zandgebieden heeft tot grote diepte verzoeting plaatsgevonden, in tegenstelling tot het riviergebied waar hoofdzakelijk kwel plaatsvindt. In de Centrale Slenk (tussen de Feldbissbreuk en de Peelrandbreuk) wordt tot meer dan 500 m diepte zoet grondwater aangetroffen (zie Figuur 6.5) met een duidelijk veel ondieper voorkomen (<200m) ten oosten van de Peelrandbreuk op de Venlo horst (tussen de Peelrand breuk en de Tegelen breuk). Ter hoogte van de Maas (in Limburg, net ten zuiden van provincie Noord-Brabant, bij Arcen in Figuur 6.5) lijkt het grensvlak nog ondieper te liggen (tot op enkele tientallen meters onder de Maas), door opkegeling als gevolg van het relatief veel lagere peil en sterk drainerende werking van de Maas. Onder de Brabantse Wal (niet meer te zien in Figuur 6.5) dat als een groot regionaal infiltratiegebied kan worden aangemerkt ligt het brak-zoute grensvlak relatief ondiep. Dit heeft vermoedelijk te maken met de ondiepe ligging van de Formatie van Breda en de sterk drainerende werking van het poldergebied. Onder de polders van West-Brabant ligt het zoet-zout grensvlak veel ondieper dan in de rest van Noord-Brabant. Net als de rest van laag-Nederland stamt dit zoute grondwater af van de Holocene Transgressies. Onder oude kreekrestanten die de Brabantse polders doorkruizen zit het brakke grondwater veelal zeer ondiep. Het oude zoute zeewater kwelt hier namelijk op en geeft de karakteristieke brakwater karakter aan deze krekken (Kuijper en De Louw, 2007). Figuur 6.6 toont de complexiteit van (autonome) verziltings- en verzoetingsprocessen op regionale schaal voor een noord-zuid profiel door het west-Brabantse poldergebied.



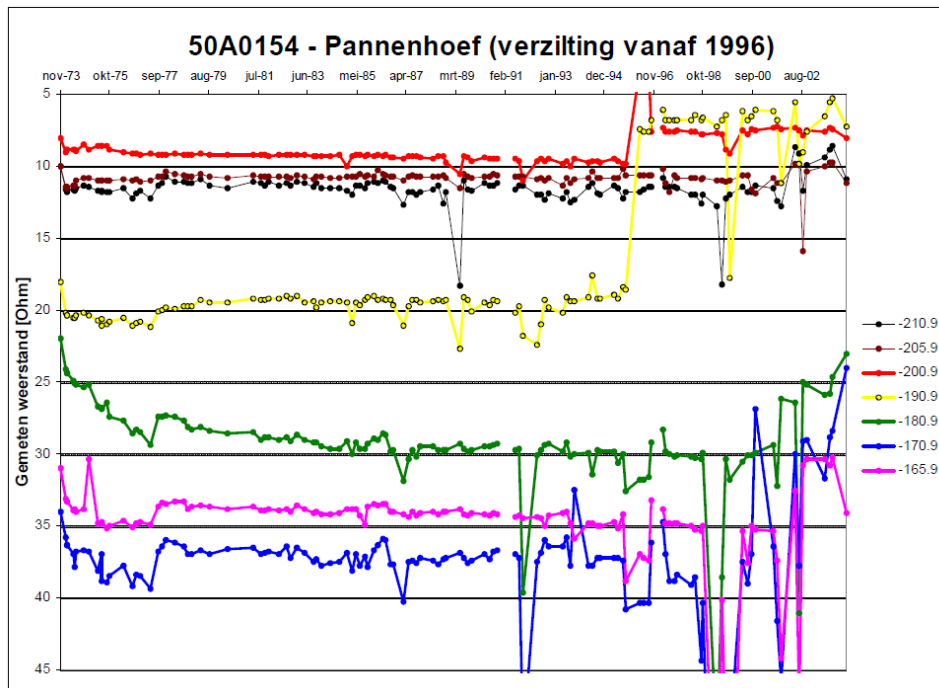
Figuur 6.5 Boven: De zoet-zout verdeling in een Zuidwest-Noordoost profiel over de Centrale Slenk. Hiervoor is het transect B-B' genomen (onder) (Stuurman e.a., 2006).



Figuur 6.6 Schematische weergave van verzoetings- en verziltingsprocessen in een noord-zuid profiel in polder Ruigenhil (het West Brabantse poldergebied, nabij Dinteloord). Rond het Hollands Diep bevindt zich zout water dat voor de afsluiting is geïnfilteerd (Stuurman e.a., 2006).

De regionale grondwaterstands- en stijghoogtedalingen die de afgelopen decennia in Noord-Brabant plaatsvonden hebben geen meetbare invloed op het zoet-zout grensvlak gehad, concludeert Stuurman e.a. (2007). Maar mogelijk is dat in de toekomst wel het geval. Ze vatten de belangrijkste (mogelijk) huidige of toekomstige verziltingsprocessen voor Noord-Brabant en noord-Limburg samen:

- Langs de Peelrandbreuk kan in de Centrale Slenk horizontale intrusie vanuit de Peelhorst plaatsvinden omdat daar de zoet-zout grens ondiep ligt (zie Figuur 6.5) en in de Centrale Slenk een grote stijghoogtedaling heeft plaatsgevonden door de drinkwaterwinningen.
- Het is niet onwaarschijnlijk dat er regionaal autonome verzilting plaats vindt door de aanzienlijke daling van grondwaterstand en stijghoogte in de afgelopen eeuwen. Net als in de diepe polders zoals hierboven besproken, leidt deze verlaging tot het langzaam omhoog kruipen van het dieperliggende brakke, zoute grondwater.
- Rond winningen kan lokaal opkegeling van de zoet-zout grens plaatsvinden als deze winningen in hetzelfde pakket bevinden als de zoet-zout overgang. Met zoutwachters worden veranderingen in het zoet-zout grensvlak gemonitord. Figuur 6.7 geeft een voorbeeld van verzilting door grondwaterwinning gemeten met een zoutwachter.



Figuur 6.7 Gemeten elektrische weerstand met een zoutwachter op verschillende dieptes (NAP) te Pannenkoef. Een weerstandsafname duidt op verziltzing (Stuurman e.a., 2006).

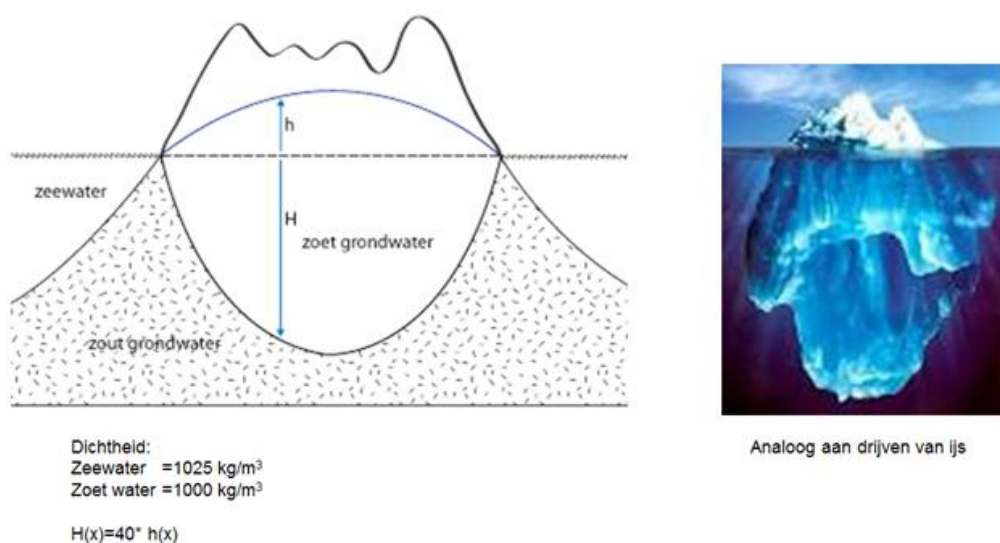
- In kwelgebieden zoals in het rivierengebied ligt de zoet-zout grens van nature relatief ondiep en zijn theoretisch kwetsbaar voor verziltzing, bijvoorbeeld door verdere polderpeilverlaging of grondwaterwinning.

Mogelijke effecten op de NGR

- **Belangrijkste processen:** Het verplaatsen van het zoet-zoutgrensvlak a.g.v. veranderende geohydrologische situatie door ontstaan van de polders en diepe droogmakerijen in laag-Nederland. De zoetzout-verdeling is hiermee nog niet in evenwicht.
- **Impact op grondwatersysteem:** 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.
- **Impact op NGR bovengrens (DMB-front):** Niet van toepassing.
- **Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak):** 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 autonomen proces zoals 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 via zandsuppleties als kustverdedigingsmaatregel wordt uitgevoerd langs de Noordzeekust en de Waddeneilanden. Door de verwachte zeespiegelstijging zullen dit soort projecten steeds vaker nodig zijn en op grotere schaal worden uitgevoerd. De Maasvlakte is een voorbeeld van landaanwinning door zandsuppletie voor uitbreiding van de Rotterdamse haven.

Deze kustverbreding en landaanwinning kunnen lokaal invloed hebben op het grondwatersysteem. Zodra er nieuw land in de zee ontstaat, krijgt regenwater de mogelijkheid om de bodem in te dringen en ontstaat er lokaal een grondwatersysteem waarbij de grondwaterspiegel zich boven zeeniveau bevindt. Door infiltratie van zoet regenwater kunnen er zich zoetwaterbellen onder het nieuwe land ontwikkelen. Door de opwaartse druk van het zwaardere zoute water drijft de lichtere zoetwaterbel als het ware in het zoute grondwater, analoog aan het drijven van het lichtere ijs in water (Figuur 7.1).



Figuur 7.1 Een zoetwaterbel onder een eiland in de zee. Volgens het Badon-Ghyben Herzberg principe is in het gegeven voorbeeld de dikte van de zoetwaterbel gelijk aan 41 keer de opbolling van de freatische grondwaterstand boven de zeewaterspiegel (links). Een zoetwaterbel in zout grondwater is analoog aan het drijven van ijs in water (rechts).

De uiteindelijke dikte van de zoetwaterbel is direct gerelateerd aan de gemiddelde grondwaterstand t.o.v. zeeniveau die zich op het nieuwe land kan ontwikkelen. Hierbij geldt hoe hoger de grondwaterstand boven zeeniveau, hoe dikker de zoetwaterbel. Een breder eiland leidt over het algemeen tot een hogere grondwaterstand (grotere opbolling) en ook een lagere doorlatendheid van het zand leidt tot een hogere grondwaterstand en daarmee een dikkere zoetwaterbel.

Afhankelijk van de dichtheid van het zoete en zoute water is er een evenwicht tussen het zoete water wat boven de zeespiegel uitsteekt (h), aan de bovenkant begrenst door de freatische grondwaterstand, en wat onder de zeespiegel wordt aangetroffen (H). De wet van Archimedes is hierop van toepassing waarbij de opwaartse kracht die de zoetwaterbel in het zoute water ondervindt, even groot is als het gewicht van de verplaatst hoeveelheid zout water. Deze wet toepassend en uitgaande van zoetwater met dichtheid 1000 kg/m³ en zout water met dichtheid 1025 kg/m³, is de dikte van de zoetwaterbel H (vanaf zeeniveau)

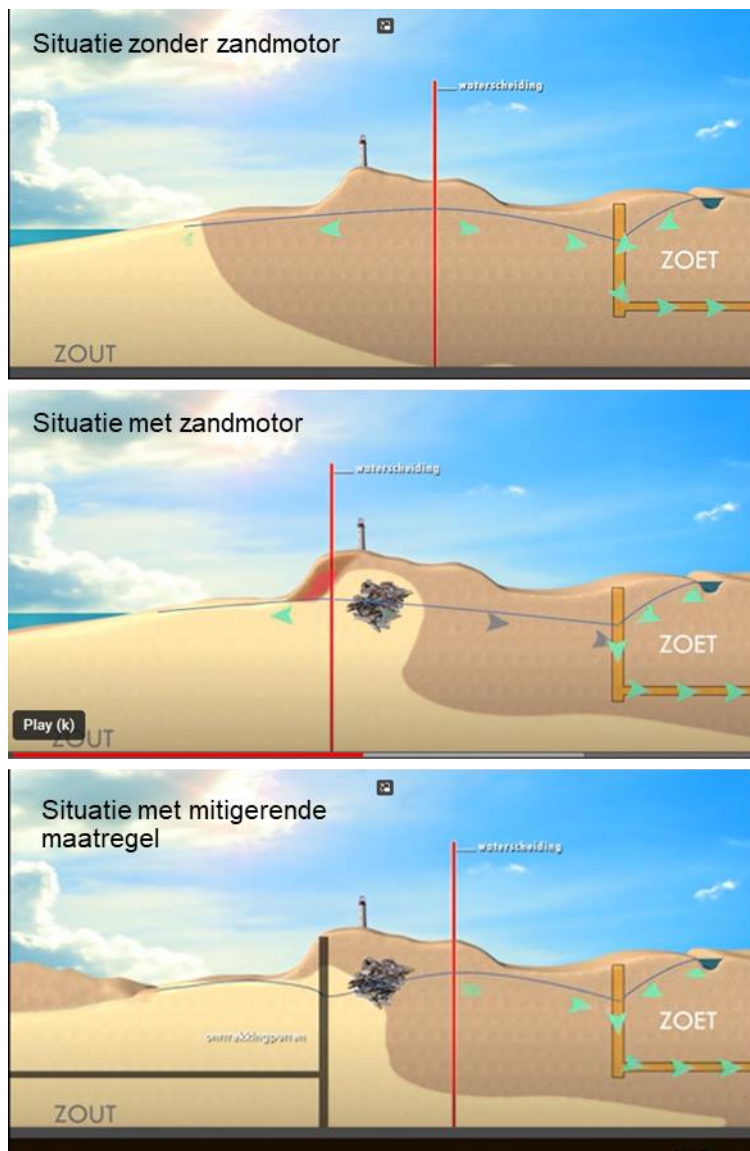
ongeveer 40 keer de opbolling van het freatische grondwater h ten opzichte van zeeniveau ($H = 40 \times h$) (Figuur 7.1). Dit wordt de Badon-Ghyben Herzberg (BGH)-relatie genoemd. Hierbij dient te worden opgemerkt dat wordt uitgegaan van ideale, homogene omstandigheden die in werkelijkheid bijna nooit optreden en dat de werkelijke dikte dus zal afwijken van de theoretische dikte volgens deze BGH-relatie. Het heeft echter tijd nodig voordat de zoetwaterbel zijn maximale dikte heeft bereikt, en groeit afhankelijk van onder andere het neerslagoverschot met ongeveer 0.5 tot 1.0 meter per jaar. Bovendien bevat het opgespoten zand zeewater en dit water dient eerst uitgespoeld te worden.

Bij elke kustuitbreiding, strandverbreding en landaanwinning kan een verhoging van de grondwaterstand en ontwikkeling van een zoetwaterbel verwacht worden. Dit kan lokaal effect hebben op het aangrenzende grondwatersysteem. Soms zit het nog complexer in elkaar zoals het door Artesia berekende effect van de zandmotor op de winning Solleveld van Dunea laat zien. In een filmpje van Dunea (<https://www.youtube.com/watch?v=oEhGzxcz3gk>) worden deze effecten en de mitigerende maatregelen uitgelegd (zie Figuur 7.2).

In de huidige situatie onttrekt Dunea ten oosten van de waterscheiding waardoor het vervuilde grondwater in de zogenaamde puinduinen (puinmateriaal voor bouw verdedigingswerk Atlantikwall in de 2^e Wereldoorlog) niet richting de winning stroomt. Door verbreding van de duinen zou de waterscheiding zich westwaarts verplaatsen waardoor de winning mogelijk vervuild water uit de puinduinen zou kunnen aantrekken. Om dit te voorkomen, heeft Dunea extra onttrekkingsputten in het verbrede duin- en stranddeel geplaatst waaruit zout grondwater wordt onttrokken en de waterscheiding zich weer westwaarts heeft verplaatst. Deze maatregel sluit het risico op deze negatieve lange termijn effecten van de verbreding van de kust en strand op de winning Solleveld uit. Op korte termijn speelde een verziltingsprobleem door uitspoeling van het opgespoten zeezand. Uitspoeling van het zoute zeewater zou richting de winning kunnen stromen. Om dit te voorkomen werd op het strand een tijdelijke brede sloot gegraven om zo het zoute water uit het opgespoten zand te laten uitspoelen. Daarna werd het zand gebruikt om de duinen te verbreden.

Het voorbeeld van Solleveld en de Zandmotor tonen aan dat er lokaal significante effecten zoals verzilting en verandering van stroombanen kunnen optreden op het grondwatersysteem als gevolg van kust-, -strand-, en duinverbreding. Effecten die de winbaarheid lokaal kunnen beïnvloeden maar grote regionale effecten worden echter niet verwacht. Landaanwinning kan juist ook leiden tot groei van zoetwatervoorraden.





Figuur 7.2 De zandmotor met de effecten op het grondwatersysteem en winning Solleveld en de mitigerende maatregel zout grondwater onttrokken (stills uit video van Dunea (<https://www.youtube.com/watch?v=oEhGzxcz3gk>))

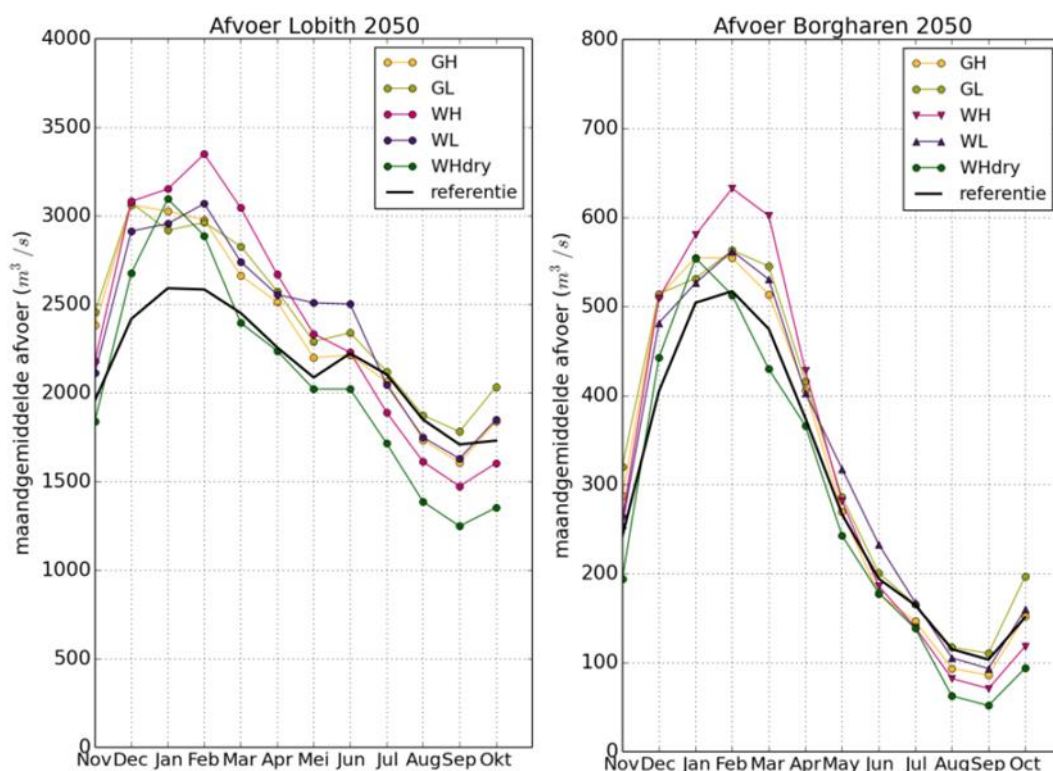
Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: Landaanwinning wordt uitgevoerd als kustverdedigings-maatregel, zoals bijvoorbeeld de zandmotor.
- Impact op grondwatersysteem: 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.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): Niet van toepassing.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): Op kleine schaal kunnen zoetwaterbellen onder de duinen negatief worden beïnvloed.

8 Verandering rivieren- en IJsselmeergebied

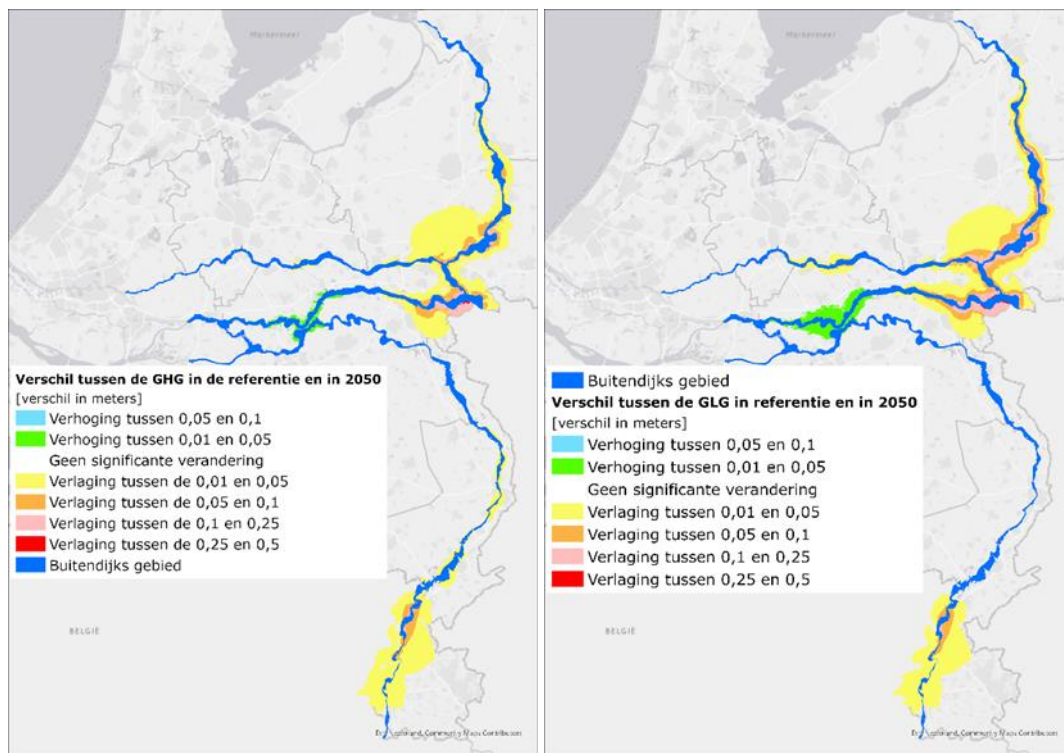
Door klimaatverandering nemen rivierafvoeren in de zomer waarschijnlijk flink af. Figuur 8.1 laat de voorspelling zien van de afvoer van de Rijn en de Maas in 2050 als gevolg van verschillende klimaatscenario's (Klijn et al., 2015). Alleen het klimaat-scenario GL laat een toenemende zomerafvoer zien, maar de kans op het GL-scenario neemt af en de klimaatscenario's met drogere zomers worden steeds waarschijnlijker. Daarnaast leidt voortschrijdende rivierbodemerrosie en sedimentatie tot een andere afvoerverdeling over de Rijntakken met minder afvoer via de IJssel tot gevolg. Samen met de verwachte lagere zomerafvoeren neemt de aanvoer in de zomer naar het IJsselmeer zeer waarschijnlijk sterk af.

Tegelijkertijd neemt de watervraag vanuit het IJsselmeer en rivieren toe door o.a. voorziene benodigde maatregelen om bodemdaling tegen te gaan (onderwaterdrainage en passieve peilstijging), beregning, doorspoeling en peilbeheer in polders en een verwachte grotere doorspoelvraag bij de Afsluitdijk om verzilting van het IJsselmeer tegen te gaan (Pouwels et al., 2021).



Figuur 8.1 Afvoerregime van de Rijn (links) en de Maas (rechts) in de KNMI'14 scenario's in vergelijking met het huidige afvoerregime (in zwart). Bron: Klijn et al. (2015)

Levelt et al. (2022) hebben de effecten berekend van veranderingen van de rivierbodemplugging in 2050 op de grondwaterstand met het LHM (Landelijk Hydrologisch Model) (zie Figuur 8.2). De erosie op de bovenloop van de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de Boven-IJssel leidt tot lagere rivierwaterstanden en daarmee tot een daling van de grondwaterstanden met maximaal ongeveer 20 cm, zie de oranje kleuren. Ook op de Grensmaas leidt rivierbodemerisatie en de daarmee gepaard gaande lagere rivierwaterstand tot een daling van de grondwaterstanden. Een stijging van de grondwaterstanden (van maximaal 5 cm) is te verwachten langs de Midden-Waal. Dit komt doordat sprake is van aanzanding en doordat er bij lage afvoeren verhoudingsgewijs meer water over de Waal wordt afgevoerd. Het effect op de grondwaterstanden is op veel locaties ook (verder) binnendijs merkbaar, zoals in Figuur 8.2 is te zien.



Figuur 8.2 Verandering in grondwaterstand (GHG, GVG en GLG) als gevolg van veranderingen in rivierbodemplugging in 2050 als gevolg van voortschrijdende erosie en sedimentatie (Levelt et al., 2022).

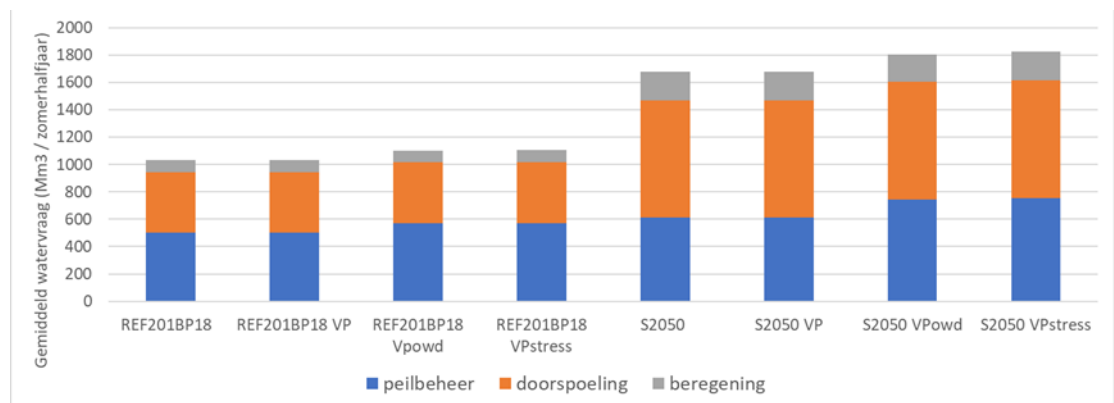
De verwachte lagere zomerafvoeren als gevolg van klimaatverandering hebben ook effect op de rivierpeilen en daarmee op de grondwaterstand in het gebied lang de rivieren. Mens et al. (2020) berekende dat de GLG langs de Rijntakken en de Grensmaas lokaal 25 à 50 cm lager kan zijn. Dit is het gevolg van vaker voorkomende en langdurigere periodes met lage afvoeren. Langs de rivieren wordt een iets hogere GHG berekend (veelal maximaal 10 cm) als gevolg van de toename van de kans op hoogwater in de wintermaanden (Mens et al., 2020).

De toekomstige lagere rivierpeilen zal mogelijk ook kunnen leiden tot meer zoutwater-opkegeling in het rivierengebied. Het riviergebied is van oudsher een kwelgebied en daarom ligt de zoet-zout overgang hier relatief ondiep. De drinkwaterwinningen in het riviergebied worden hierdoor vermoedelijk kwetsbaarder voor verzilting.

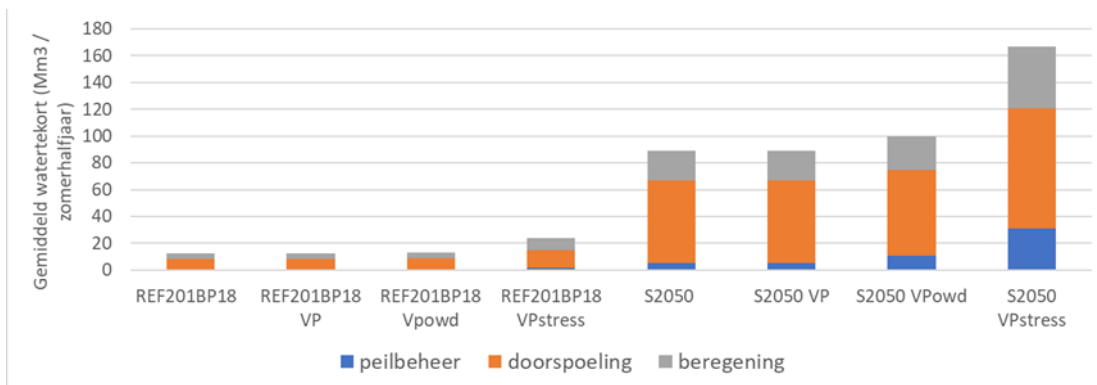
De grote rivieren vormen tijdens droge zomers een belangrijke bron van zoetwater voor een groot deel van Nederland. In Noord-Nederland worden de zoetwaterbuffers Markermeer en IJsselmeer aangevuld door de IJssel. Van daaruit wordt water aangevoerd naar de peilbeheerste gebieden van Noord-Holland, Friesland, Groningen, Drenthe en Flevoland. Dit water is daar vooral nodig voor peilbeheer, doorspoeling en beregening. Ook is een minimum spuidebiet nodig om zoutindringing via de sluizen in de Afsluitdijk tegen te gaan (Pouwels et al., 2021). In West-Nederland zorgt de aanvoer vanuit de rivieren voor een tegendruk om zoutindringing vanuit de Noordzee te beperken. Tijdens langdurig lage afvoer zullen inlaten langs de Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en de Lek gesloten moeten worden in verband met zoutinrusie. Voor de aanvoer naar West-Nederland is dan een alternatieve voorziening ingericht: de Klimaatbestendige Wateraanvoervoorziening West-Nederland (KWA). Het 'zoet houden van de Lek' is een maatregel in het Deltaplan 2021 (Pouwels et al., 2021).

De verwachte afnemende wateraanvoer via de IJssel en de hogere doorspoelvraag over de Afsluitdijk zullen leiden tot een frequentere uitzakking van het IJsselmeerpeil, en daarmee voor een kleinere waterbeschikbaarheid in het voorzieningsgebied IJsselmeer/Markermeer (Pouwels et al., 2021).

Naast de afname van de waterbeschikbaarheid in het gebied dat van water wordt voorzien vanuit het IJsselmeer komt een verwachte toename van de watervraag ten behoeve van peilbeheer, doorspoelen en beregening. In Figuur 8.3 staat deze watervraag voor de referentie en situatie 2050 Deltascenario Stoom weergegeven. Hierdoor ontstaan watertekorten die in Figuur 8.4 staan weergegeven (Pouwels et al., 2021).



Figuur 8.3 Gemiddelde watervraag in miljoen m³/zomerhalfjaar peilbeheer, doorspoeling en beregening voor het voorzieningsgebied IJsselmeer/Markermeer voor de scenario's Ref2017 en Stoom2050 voor de situatie met en zonder zoetwatermaatregelen uit het Voorkeurspakket (VP), gecombineerd met onderwaterdrainage (VPowd) en met tegenvallers voor de zoetwaterbeschikbaarheid (verlaagde afvoeren van de IJssel, grotere watervraag door onderwaterdrainage en hogere doorspoelvraag bij de afsluitdijk (VPstress) (uit Pouwels et al., 2021).



Figuur 8.4 Gemiddeld watertekort in miljoen m³/zomerhalfjaar peilbeheer, doorspoeling en beregening voor het voorzieningsgebied IJsselmeer/Markermeer voor de scenario's Ref2017 en Stoom2050 voor de situatie met en zonder zoetwatermaatregelen uit het Voorkeurspakket (VP), gecombineerd met onderwaterdrainage (VPowd) en met tegenvallers voor de zoetwaterbeschikbaarheid (verlaagde afvoeren van de IJssel, grotere watervraag door onderwaterdrainage en hogere doorspoelvraag bij de afsluitdijk (VPstress) (uit Pouwels et al., 2021).

De verwachte watertekorten door afnemende wateraanvoer en toenemende watervraag zullen ook een merkbaar effect hebben het grondwatersysteem. Dit effect zal zich vooral uiten in lagere grondwaterstanden in de zomer.

Mogelijke effecten op de NGR

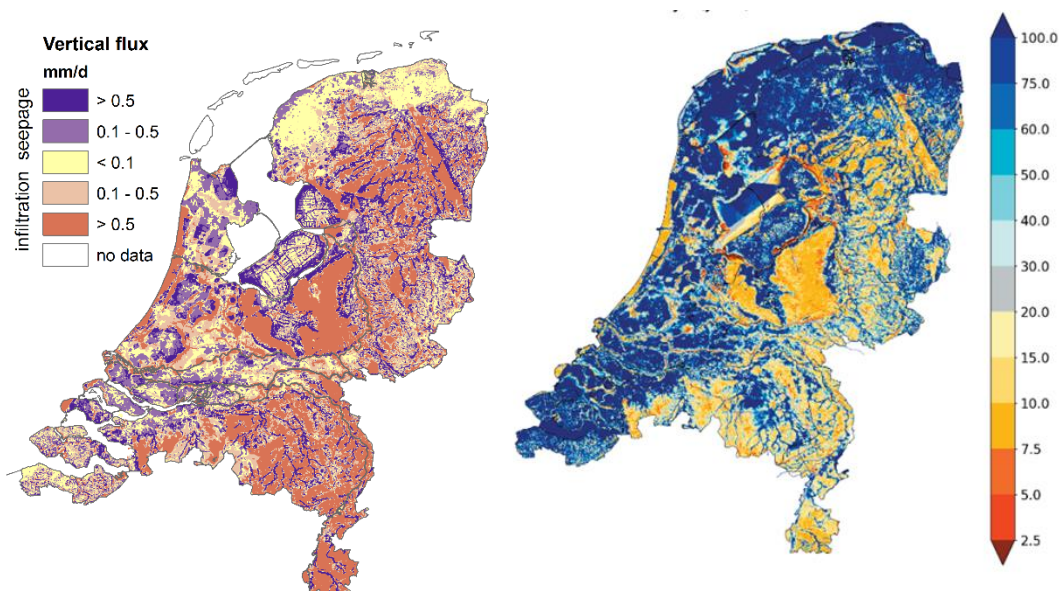
- **Belangrijkste processen:** Rivierafvoeren en peilen zullen veranderen als gevolg van klimaatverandering en erosie. Dit leidt in het algemeen tot lagere rivierafvoeren en -peilen tijdens de zomer en minder waterbeschikbaarheid vanuit het IJsselmeer tijdens de zomer.
- **Impact op grondwatersysteem:** 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.
- **Impact op NGR bovengrens (DMB-front):** Verwaarloosbare impact.
- **Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak):** In het riviergebied kunnen gemiddeld lagere grondwaterstanden en rivierpeilen leiden tot het omhoogkomen van het ZZ-grensvlak.

9 Uitbreiding diffuus verontreinigingsfront

Meststoffen zoals nitraat en fosfaat (maar ook chloride en kalium) en bestrijdingsmiddelen uit de landbouw kunnen na toediening op de landbouwpercelen het grondwater bereiken. Ook onder stedelijk gebied vindt verontreiniging plaats en kunnen ongewenste stoffen het grondwater bereiken. Daarnaast vindt atmosferische depositie van stoffen uit het verkeer, industrie en de landbouw plaats waaronder stikstof-dioxiden en zwavel-dioxiden die via infiltratie van regenwater het grondwater kunnen bereiken. Deze verontreinigingen vinden op grote schaal plaats en worden daarom diffuse verontreinigingen genoemd. Eenmaal in het grondwater breidt dit diffuus verontreinigingsfront zich verder uit met de stroming van het grondwater mee.

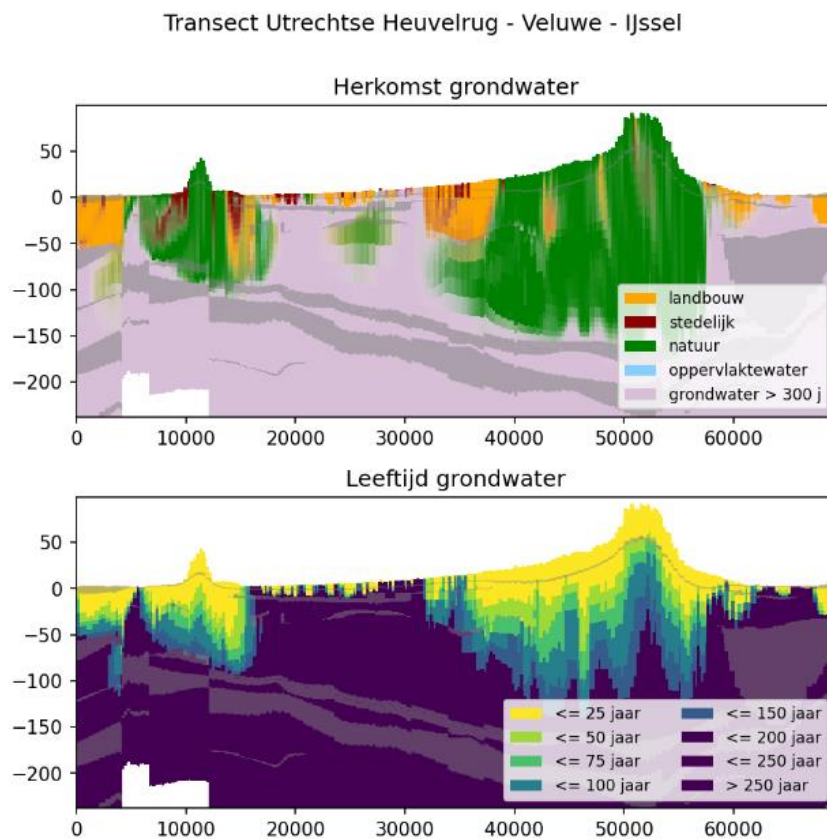
De uitbreiding van het diffuus verontreinigingsfront kan grotendeels als een autonoom proces worden gezien. Het grondwater in de relatief hoger gelegen infiltratiegebieden (de rode gebieden in Figuur 9.1) stroomt gestaag dieper de watervoerende pakketten in met snelheden die doorgaans niet hoger zijn dan 1 m per jaar en vaker nog veel langzamer. Het grondwater dat in het verleden verontreinigd is geraakt, is dus in infiltratiegebieden op een bepaalde diepte terug te vinden. In Figuur 9.1 staat tevens de leeftijd van het grondwater op 10 meter beneden de grondwaterspiegel, sinds het moment dat het geïnfiltreerde regenwater het grondwater heeft bereikt. De regendruppel die door de onverzadigde zone percoleert is ook nog een tijd onderweg en is in deze berekening niet meegenomen.

Met verstrijken van de tijd zal het diffuus verontreinigd grondwater dus steeds dieper infiltreren. Dit proces zal mogelijk iets versneld of vertraagd worden door klimaatverandering of maatregelen (bijv. extra infiltratie) waardoor de grondwateraanvulling of grondwaterstand verandert. Versnelling van de uitbreiding van het diffuus verontreinigingsfront vindt plaats wanneer de gemiddelde grondwateraanvulling toeneemt en wanneer de grondwaterstand stijgt. In beide gevallen neemt de neerwaartse grondwaterflux (infiltratieflux) toe. Grondwateronttrekkingen kunnen ook de uitbreiding van het diffuus verontreinigingsfront versnellen omdat neerwaartse fluxen vanuit het freatisch systeem naar de onttrekking toenemen.

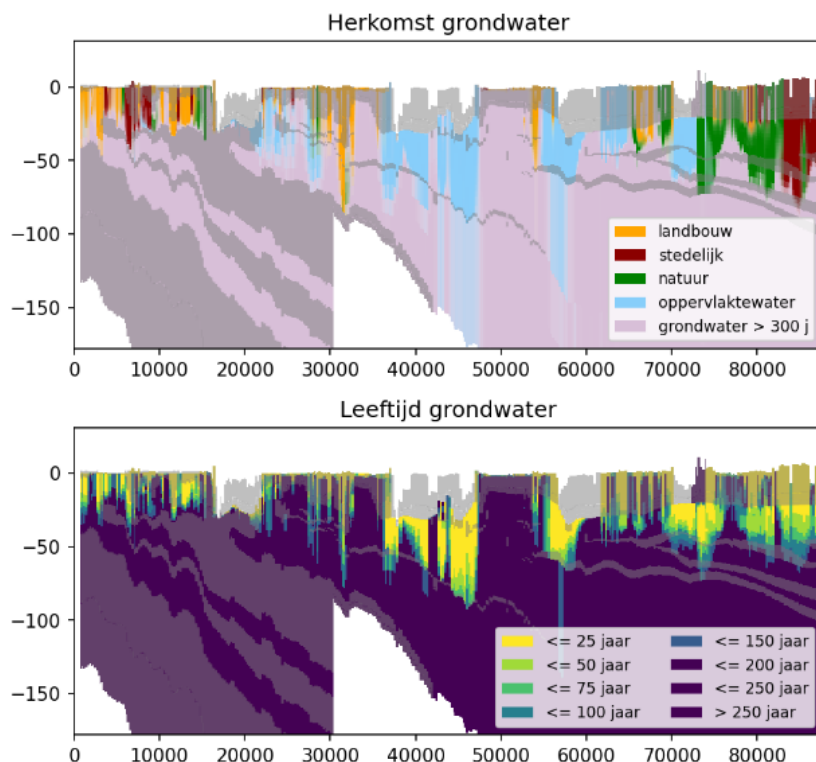


Figuur 9.1 De kwel- en infiltratieflux berekend met het LHM (figuur overgenomen uit De Louw, 2013) en de leeftijd (in jaren) van het grondwater op 10 m onder de grondwaterspiegel (Van der Grift et al., 2022)

Figuur 9.2 laat twee doorsnedes zien met daarin de leeftijd van het grondwater (sinds infiltratie) en de herkomst van het infiltrerende water uitgedrukt in type landgebruik. Het landgebruik in de infiltratiegebieden is namelijk van belang voor de mate en type verontreiniging dat op een bepaalde diepte kan worden aangetroffen. Water dat natuurgebieden is geïnfiltrerd zoals de Veluwe zal nauwelijks verontreinigende stoffen bevatten terwijl onder landbouwgrond en stedelijk gebied de concentratie van ongewenste stoffen groot kan zijn. In de transecten is ook duidelijk te zien dat in de regionaal hoog gelegen infiltratiegebieden (zoals de Veluwe en Utrechtse Heuvelrug) het relatief recent (< 100 jaar) grondwater zich tot een diepte van 50 tot 100 meter onder maaiveld bevindt. In de kwelgebieden zoals locaties in de Gelderse Vallei en in de IJsselvallei wordt eeuwenoud grondwater direct onder het maaiveld aangetroffen. Dit grondwater is al eeuwen tot millennia onderweg en vindt in kwelgebieden uiteindelijk zijn weg naar het oppervlak. Dit is ook het geval in Zeeland waar dit eeuwenoude grondwater (transgressiewater, zie paragraaf 1.5) zout is en leidt tot zoute kwel. In het Zeeland profiel is ook te zien dat er veel oppervlaktewater vanuit de estuaria (Westerschelde, Oosterschelde) en afgesloten zeegaten (Grevelingen) infiltreert.

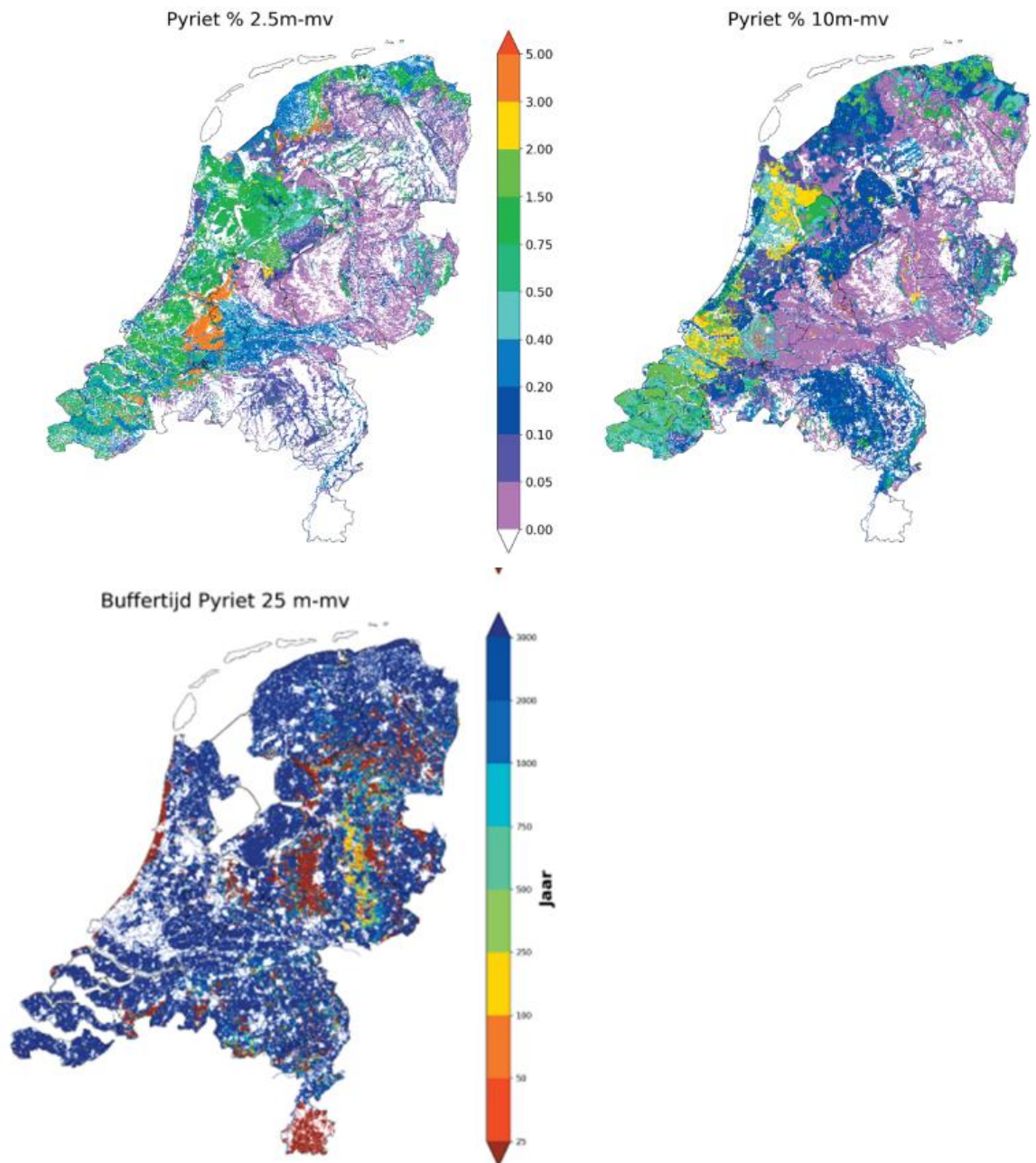


Transect Zeeland Z-N



Figuur 9.2 De herkomst en leeftijd van het grondwater berekend met het LHM in 2 transecten: (bovenste twee) West-Oost door Utrechtse Heuvelrug, Gelderse Vallei, Veluwe en IJssel en (onderste twee) Zuid-Noord door de provincie Zeeland daarbij de verschillende eilanden en estuaria doorkruisend.

Of een recent geïnfiltreerd grondwaterlichaam diffuse verontreinigingen bevat, is dus afhankelijk van de functies aan het maaiveld waar het water is geïnfiltreerd. Echter, de samenstelling van de ondergrond speelt vaak een rol bij het opruimen van de verontreinigingen waardoor de verplaatsing van het verontreinigingsfront wordt gebufferd en vertraagd. Dit is het meest duidelijk bij de pyriet-oxidatie in de ondergrond door nitraat dat aanwezig is in het verontreinigd grondwater. Pyriet (FeS_2) is in veel sedimenten in de ondergrond aanwezig (zie Figuur 9.3) en kan eenvoudig worden geoxideerd door nitraat (NO_3^-) waarbij nitraat verdwijnt en sulfaat (SO_4^{2-}) en stikstofgas (N_2) ontstaat. Door de nitraat-buffercapaciteit van pyriet duurt het dus veel langer voordat een infiltrerend met NO_3^- verontreinigd grondwaterfront een bepaalde diepte bereikt. In Figuur 9.3 staat deze buffercapaciteit op 25 m beneden maaiveld weergegeven, uitgedrukt in jaren voordat de pyriet-buffer is verdwenen. Hierbij dient direct te worden opgemerkt dat dit dan niet voor de andere stoffen in het grondwater geldt en dat door deze pyriet-oxidatie ook andere vaak minder gewenste stoffen in het grondwater terecht komen (zoals zware metalen die zich binden aan pyriet en sulfaat). Maar het blijft belangrijk om de chemische processen en buffercapaciteit in de ondergrond in beschouwing te nemen bij de beoordeling van de effecten van een voortschrijdend diffuus verontreinigingsfront.



Figuur 9.3 Het percentage pyriet in de ondergrond op 2.5 en 10 m-mv (bovenste twee figuren) en de buffertijd van pyriet op 25 m-mv (onderste figuur) (uit Verweij et al., 2022).

Bij de begrenzing van de bovenkant van de NGRs wordt zeer waarschijnlijk de leeftijd van het infiltrerende grondwater meegenomen. Hierbij kan een keuze worden gemaakt waarbij de NGR geen door menselijk beïnvloed grondwater bevat.

Wanneer naar het richtjaar 2100 wordt gekeken, zal het diffuus verontreinigingsfront in de kerninfiltratiegebieden zich weer een flink stuk dieper hebben verplaatst (20 tot 80 meter dieper). Het is wel de verwachting dat door beleid er steeds minder verontreinigde stoffen in het grondwater terecht komen waardoor het bovenste meest recente grondwater steeds schoner wordt en er waarschijnlijk niet meer gesproken kan worden van een diffuus verontreinigingsfront.

Mogelijke effecten op de NGR

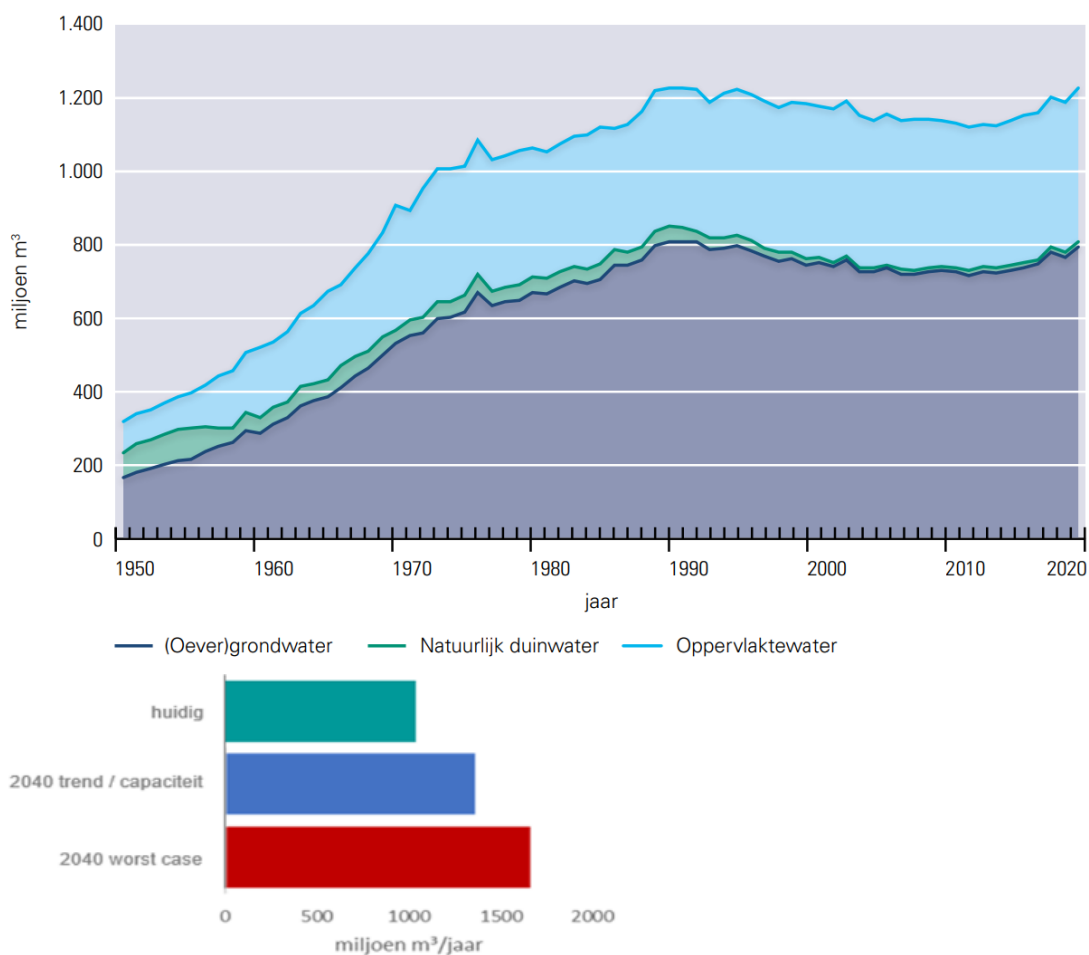
- Belangrijkste processen: Dit is de continue neerwaartse verplaatsing van in het verleden verontreinigd grondwater. Geo-chemische processen in de ondergrond kunnen dit autonome proces vertragen, bijv. door denitrificatie door pyriet-oxidatie.
- Impact op grondwatersysteem: Dit proces speelt zich af 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 geïnfiltrerd.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): 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.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): Niet van toepassing.

10 Verandering grondwateronttrekkingen

Grondwateronttrekkingen voor drinkwater

Er wordt grondwater onttrokken voor drinkwater (zie Figuur 10.1), industrie en beregening en in kleine mate door particulieren voor eigen gebruik. Grondwateronttrekkingen voor drinkwater en industrie zijn meestal permanent en hebben structurele effecten terwijl de effecten door onttrekkingen voor beregening grotendeels tijdelijk zijn. De watervraag voor drinkwater zal in de toekomst flink toenemen door de groei van de bevolking. De VEWIN schat dat de komende 20 jaar (richtjaar 2040) de drinkwatervraag toeneemt met 30 tot 60%, zie Figuur 10.1 (Vewin, 2022). Hierbij is geen rekening gehouden met een lager huishoudelijk en industrieel gebruik door allerlei maatregelen en campagnes.

In de Deltascenario's zijn ook prognoses gemaakt voor de toename van grondwateronttrekkingen. Zo wordt voor het Deltascenario Stoom voor 2050 35% toename van de drinkwateronttrekking gesteld, 15% toename van de grondwateronttrekking voor industrie en 55% toename voor beregenen uit grondwater. Voor het Deltascenario Rust gaat men uit van een 10% afname van de drinkwateronttrekkingen en 40% afname voor industrie.

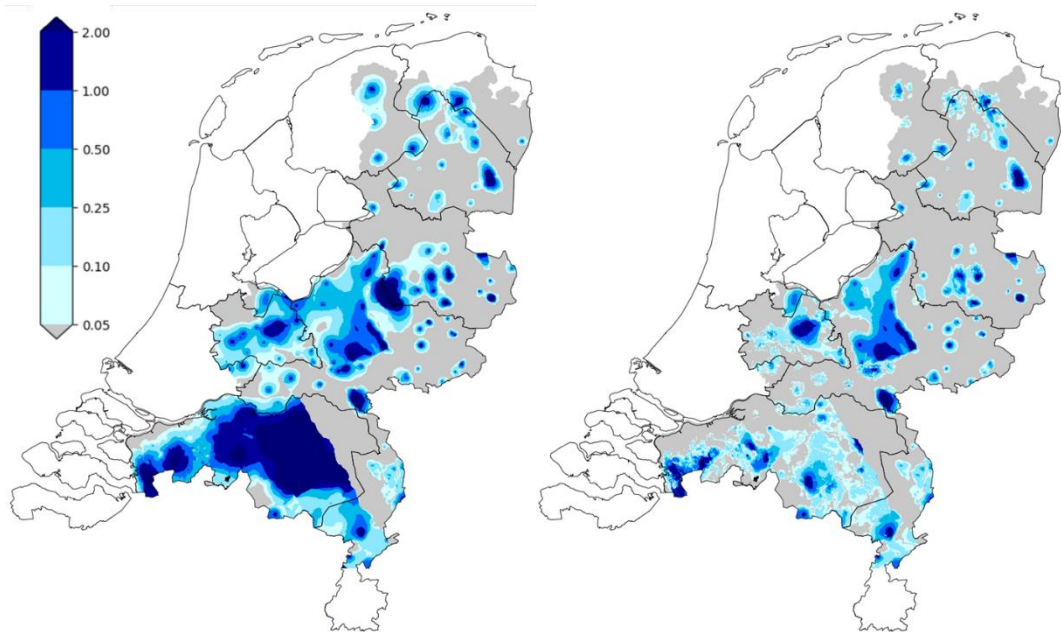


Figuur 10.1 De ontwikkeling van het drinkwater uit verschillende bronnen sinds 1950 (boven) en de verwachte drinkwatervraag in 2040 (onder) (Bron Vewin, 2022).

Echter, ondanks de verwachte toename van de drinkwatervraag gaan er de laatste tijd steeds meer geluiden op om juist minder grondwater te gaan onttrekken om de druk op het grondwatersysteem te verlichten. De droogte van de jaren 2018-19-20-22 hebben duidelijk gemaakt dat het grondwatersysteem niet droogtebestendig is en dat de drinkwateronttrekkingen daarbij een grote impact op het grondwatersysteem hebben (Van den Eertwegh et al., 2021). Veel grondwaterafhankelijke natuur is verdroogd door de grondwateronttrekkingen, Beugelink en Claessen (1995) becijferde dat 30% van de verdroging van natte natuur toe te schrijven is aan de drinkwateronttrekkingen (60% door ontwatering en 10% door andere oorzaken zoals verstedelijking en aangeplante naaldbossen). Recentelijk kwam de Droogtecommissie Noord-Brabant met het advies om ondanks de toename van de drinkwatervraag, in 2040 30 tot 40% minder grondwater te onttrekken ten opzichte van de huidige situatie. Dit kan worden gerealiseerd door het gebruik van andere bronnen (oppervlaktewater, ontzilting van brak grondwater of zeewater), zuiniger omgaan met drinkwater (o.a. door het mogelijk te maken om regenwater te gebruiken voor huishoudelijk gebruik en doorspoelen van toilet) of het compenseren van winningen door extra oppervlaktewater te infiltreren.

Uit de recente brief "Water en bodem sturend" van de minister aan de 2^e kamer (d.d. 25 november 2022) blijkt ook dat er moet worden gewerkt aan een reductie van het drinkwatergebruik. Hierin 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.". Dit is voor het eerst dat er een duidelijk doel wordt geformuleerd richting zuiniger gebruik van drinkwater. Prognoses zoals die in de Deltascenario's zijn opgenomen, zouden op basis van dit voornemen kunnen worden aangepast.

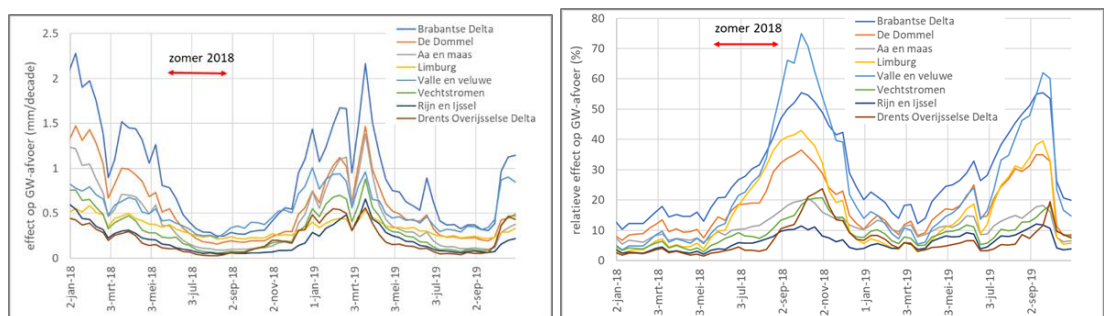
Zoals uit het bovenstaande blijkt, is het ongewis wat er in de komende 80 jaar gaat gebeuren met de grondwateronttrekkingen voor drinkwater. Mochten de winningen toenemen, dan zullen de negatieve effecten op het grondwatersysteem toenemen en in het geval dat er minder onttrokken gaat worden, zal dit positieve effecten op het grondwatersysteem hebben. Om een idee te geven wat effecten van de drinkwateronttrekkingen zijn op het grond- (en oppervlaktewater)systeem wordt gebruikt gemaakt van de landelijke berekeningen die onder andere voor de droogtestudie hoge zandgronden zijn uitgevoerd (Van den Eertwegh et al., 2021). Vrijwel al het drinkwater in het zandgebied is afkomstig van onttrokken grondwater. Effecten van grondwateronttrekkingen strekken zich lateraal uit in het watervoerend pakket waaruit wordt onttrokken en vervolgens verticaal richting het freatische systeem. Dit is zichtbaar in Figuur 10.2 dat de stijging van zowel de stijghoogte in het watervoerend pakket als van de freatische grondwaterstand toont, zo'n 5,5 jaar na het stopzetten van alle drinkwaterwinningen (uit De Louw et al., 2022). De hydraulische weerstand tussen het onttrokken watervoerende pakket en het freatisch systeem bepaalt tot hoever deze effecten zich lateraal uitstralen in het watervoerende pakket en hoe sterk de stijghoogte daalt. Wanneer een onttrekkingskegel in evenwicht is met het grondwatersysteem en niet meer groeit, wordt iedere onttrokken druppel vanuit het freatisch systeem binnen de onttrekkingskegel aangevuld. Hoe groter de hydraulische weerstand, des te sterker de stijghoogte over een groter gebied daalt om de onttrekking vanuit het freatisch systeem aangevuld te krijgen. In een gebied met veel sloten is het effect van onttrekkingen op de freatische grondwaterstand minder groot, omdat effecten op de grondwaterstanden gedempt worden door een verminderde afvoer van grondwater. De afname in ontwatering beperkt de daling van grondwaterstanden en er is daardoor sneller evenwicht met het afvoerproces.



Figuur 10.2 Het berekende effect op de stijghoogte (links) en de freatische grondwaterstand (rechts) voor de zomersituatie (LG3) in 2018, 5,5 jaar na volledig stopzetten van de drinkwaterwinning op 1 januari 2013 (overgenomen uit De Louw et al., 2022a).

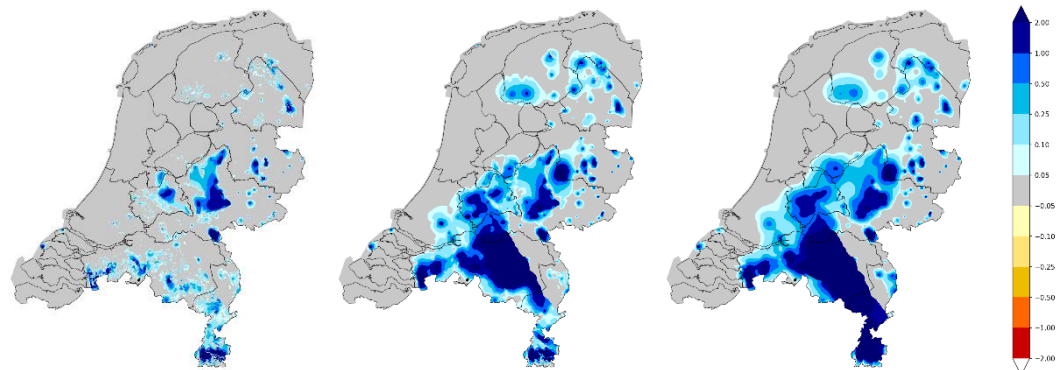
De kwelstromen in de kwelgebied worden flink beïnvloed door de drinkwateronttrekkingen. De Louw et al. (2022) becijferde dat door de onttekkings er gemiddeld 15-20% minder kwel uittreedt en in de waterschappen De Dommel, Limburg en Vallei en Veluwe en in de Brabantse Delta zelfs tot 35-45%.

Naast het effect op de stijghoogte en grondwaterstand wordt ook de grondwaterafvoer uit een gebied sterk beïnvloed door grondwateronttekkings. Bijna iedere druppel water die wordt onttrokken komt namelijk niet tot afvoer (behalve dan, op een andere locatie, via RWZI's), een veel beperkter aandeel komt uit de reductie van de transpiratie (<2.5%). De Louw et al. (2022a) berekende dat het effect van de drinkwateronttekkings op de absolute hoeveelheid afgevoerd oppervlaktewater het grootst is in de winterperiode, maar relatief gezien het grootst tijdens de droge perioden wanneer de afvoer het laagst is. Voor de zomerperiode in 2018 leiden drinkwateronttekkings enkele weken tot een reductie van 40 tot 70% van de gemiddelde gebiedsafvoer op waterschapniveau (Figuur 10.3). Dit geldt voor de vier waterschappen met de grootste drinkwateronttekkings in hun gebied (Brabantse Delta, Vallei en Veluwe, Limburg en De Dommel). Voor stroomgebieden dicht bij de winning zijn de effecten groter, met in sommige situaties volledige droogval.

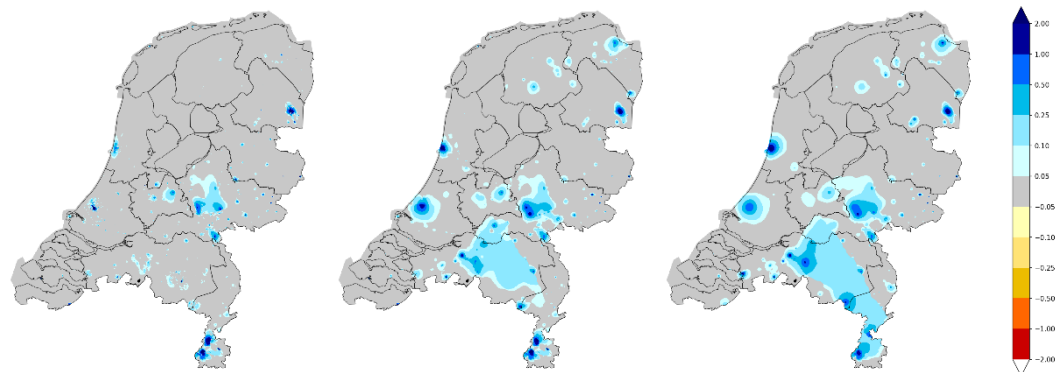


Figuur 10.3 Het berekende effect van de drinkwaterwinning op de grondwaterafvoer (mm/decade) in 2018 en 2019 gemiddeld voor de verschillende waterschappen (links) en als percentage van de grondwaterafvoer (rechts). (overgenomen uit De Louw et al., 2022a)

In onderstaande figuren staat ter vergelijking met elkaar het berekende stationaire effect van het uitzetten van de drinkwateronttrekkingen (Figuur 10.4) en industriële onttrekkingen (Figuur 10.5) op de freatische grondwaterstand en de stijghoogte. Veranderingen in de grondwateronttrekkingen (toename of afname) zullen leiden tot veranderingen van de grondwater, stijghoogte, kwelflux en beekafvoeren. Hierbij geldt uiteraard dat de grootte van het effect sterk afhangt van de verandering van het onttrekkingsdebiet.



Figuur 10.4 Het stationair berekende verlagend effect van drinkwateronttrekkingen op de freatische grondwaterstand (links) de stijghoogte (midden) en de diepe stijghoogte (rechts), berekend met het LHM.



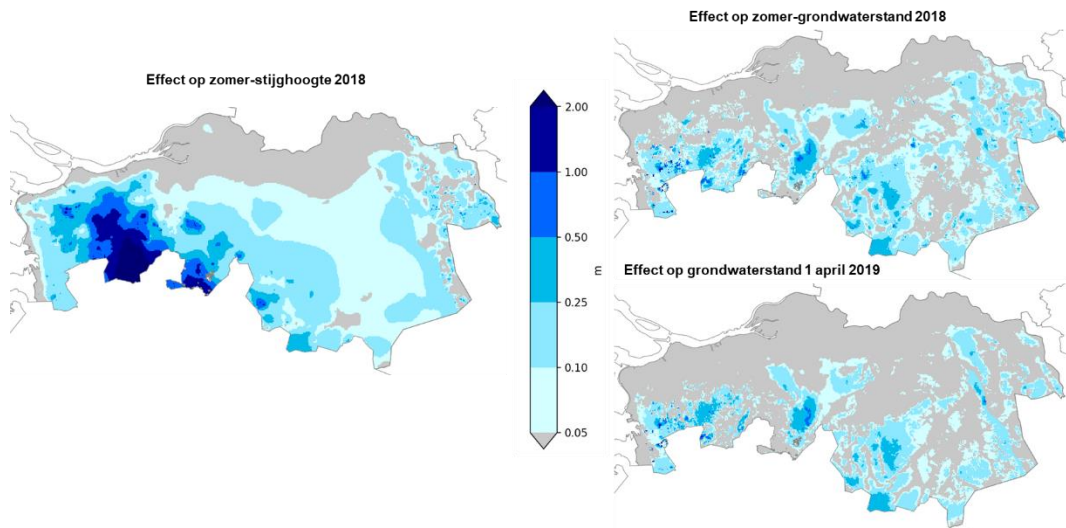
Figuur 10.5 Het stationair berekende verlagend effect van industriële onttrekkingen op de freatische grondwaterstand (links) de stijghoogte (midden) en de diepe stijghoogte (rechts), berekend met het LHM.

Grondwateronttrekkingen voor beregening

Tijdelijke grondwateronttrekkingen voor beregening verschillen sterk van jaar tot jaar, afhankelijk van het neerslagtekort gedurende het groeiseizoen. Het extreem droge jaar 1976 heeft een sterke impuls gegeven voor agrariërs om beregeningsinstallaties aan te schaffen om het risico op droogteschade in de toekomst zoveel mogelijk te beperken. In de jaren daarna groeide de hoeveelheid beregening gestaag. De droge jaren 2018 en 2019 hebben wederom een impuls gegeven waardoor het potentieel beregend areaal flink is gegroeid. Voor het extreem droge jaar 2018 en 2019 werd in Nederland ruim 2,5 keer zoveel beregend uit grondwater dan gemiddeld in 2010-2017 (Van der Meer, 2020; Stokkers e.a., 2022). Door klimaatverandering verwachten we steeds vaker droge zomers zoals 2018 en daarmee de drang tot meer beregenen. Echter, de recente extreem droge jaren hebben ook weer duidelijk gemaakt dat er een grens aan het gebruik van grondwater voor beregening zit, vooral in de buurt van natuurgebieden. Het onttrekken van grondwater voor beregening gebeurt in een periode dat het grondwatersysteem al behoorlijk is uitgeput en de watervraag voor andere gebruikers van het grondwater juist heel hoog is. Er gaan dan ook steeds meer geluiden op om beregening nog meer te beperken in bepaalde periodes en zones om natuur te beschermen. Hoewel dit nog geen huidig beleid is de verwachting dat er in de toekomst

minder uit het grondwater beregend mag worden. De Droogte-commissie Noord-Brabant stelt in hun advies dat er in 2040 tijdens droge jaren tot 40% minder beregend mag worden dan nu het geval is.

De Louw et al., (2022b) demonstreerde via modelberekeningen en metingen wat de effecten van de tijdelijke onttrekkingen voor beregening op het grondwatersysteem zijn voor Noord-Brabant, de provincie waar het grootste aantal kuub uit grondwater wordt beregend. Het effect van beregening uit grondwater op de stijghoogte is het grootst in West-Brabant (Figuur 10.6). Niet omdat daar meer beregend wordt, maar omdat de hydraulische weerstand tussen het freatische systeem en het pakket waaruit wordt onttrokken hier het grootst is. Het effect op de stijghoogte vertaalt zich door naar het freatisch systeem met een daling van de freatische grondwaterstand die over de gehele provincie redelijk uniform is (Figuur 10.6). Voor grote delen van de provincie is het verlagend effect op de zomergrondwaterstand (LG3) tussen de 5 en 25 cm met het grootste effect in de infiltratiegebieden en gebieden met weinig ontwateringsmiddelen. Dat komt doordat het effect van de maatregel daar niet wordt gedempt door een verlaging van de afvoer van oppervlaktewater. Het effect op de freatische grondwaterstand is het grootst gedurende de beregeningsperiode en is maximaal aan het einde van de beregeningsperiode. Ondanks dat begin augustus 2018 de beregeningsperiode eindigde, zijn effecten nog zichtbaar bij de start van het groeiseizoen in 2019 (Figuur 10.6). Effecten op de grondwaterstand zijn dan nog voor zo'n 40 tot 60% aanwezig. Uiteindelijk moet de totale onttrokken hoeveelheid grondwater weer worden aangevuld vanuit het freatisch systeem: met name door verminderde afvoer van oppervlaktewater en in geringe mate transpiratiereductie van niet beregende percelen. Het grootste absolute effect van beregenen uit grondwater op de grondwaterafvoer vindt plaats in de winterperiode als het grondwatersysteem weer gevuld is en afvoer grootschalig op gang komt. Het effect op de gebiedsafvoer is echter procentueel het sterkst gedurende de beregeningsperiode en is maximaal aan het einde daarvan, gemiddeld 25% voor de Brabantse waterschappen. Dan is er al weinig afvoer waardoor het effect op de stroomsnelheid, waterkwaliteit en het aquatisch leven in beken ook groot is.



Figuur 10.6 Het berekende verlagend effect van beregening uit grondwater in 2018 op de zomerstijghoogte en zomergrondwaterstand (LG3) van dat jaar en op de grondwaterstand van 1 april 2019. Uit De Louw et al., (2022b).

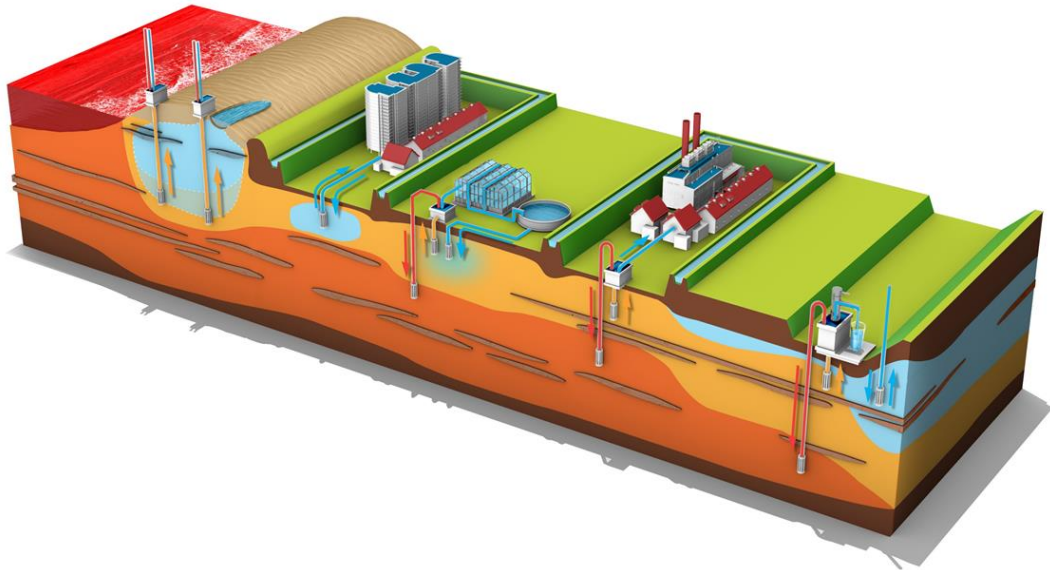
In het algemeen kan gesteld worden dat zowel permanente als tijdelijke grondwateronttrekkingen een grote impact hebben op het gehele grondwatersysteem (inclusief kwelstromen) en het daaraan gerelateerde oppervlaktewatersysteem (bijv. beekafvoeren). De effecten zijn regionaal en beïnvloeden grote gebieden, zowel lateraal als ook in de diepte. Een mogelijk toekomstige afname van de onttrekkingen heeft positief effect op het grondwatersysteem en een toename een negatief effect.

Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: Door toenemende watervraag of veranderend beleid (bijv. restricties rondom grondwateronttrekkingen) zullen grondwateronttrekkingen voor drinkwater, industrie of beregening in de toekomst veranderen.
- Impact op grondwatersysteem: 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 daarmee de beekafvoer) neemt af en kwelstromen worden zwakker of verdwijnen.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): In de onttrekkingskegel zal het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): 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.

11 Vergroten zoetwaterbeschikbaarheid (ASR, MAR, brakwaterwinning)

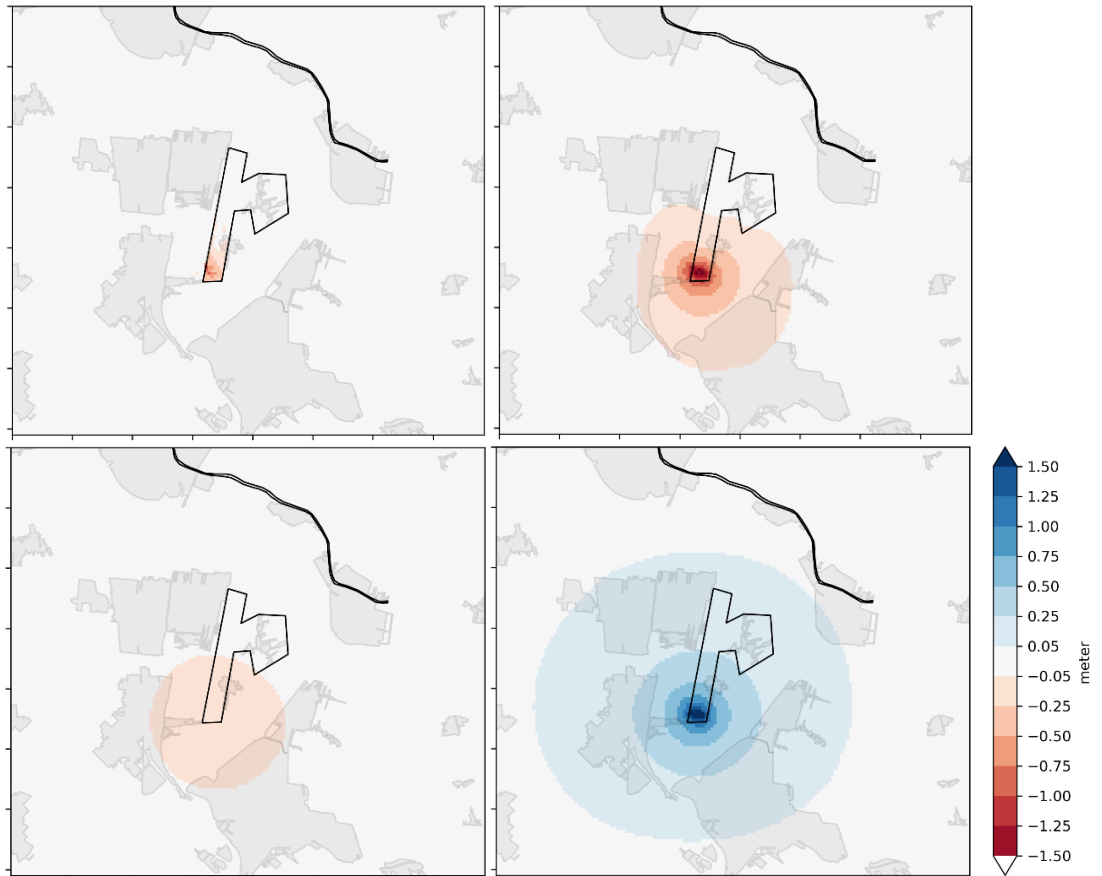
Er vinden steeds meer projecten plaats waarbij de beschikbaarheid van zoet grondwater wordt vergroot. Dit kan door extra infiltratie of injectie van zoetwater in de ondergrond, het onttrekken van brak of zout grondwater door meer ruimte te geven aan zoet grondwater en in ontzilting van brak of zout grondwater. Zowel het aanvullen van zoet grondwater als het onttrekken van brak of zout grondwater heeft gevolgen voor het grondwatersysteem. Het is de verwachting dat in de toekomst dit soort initiatieven toenemen.



Figuur 11.1 COASTAR: grootschalig gebruik van de ondergrond voor een robuuste watervoorziening en waterbeheer door (1) zoetwaterinfiltratie en (2) brakwater onttrekkingen (<https://www.coastar.nl/>).

Het onlangs afgeronde kennisprogramma COASTAR (Arcadis, Deltares, KWR, Allied Waters) richtte zich op grootschalige zoetwatervoorziening door slim gebruik van de ondergrond, door zoet water ondergronds te bergen en brakwater te gebruiken met als doel voldoende zoetwater voor gietwater, industrie en drinkwater, nu en in de toekomst (<https://www.coastar.nl/>), zie ook Figuur 11.1.

In het kader van COASTAR zijn voor de Middelburg-Tempelpolder (MT-polder) de mogelijkheden voor brakwaterwinning verkend (Bootsma et al., 2020). Specifiek werd berekend wat de geohydrologische effecten zullen zijn van een winning van 1-2 miljoen m³/jaar diep brak grondwater onder de MT-polder, met en zonder infiltratie van concentraat (brijn) in de ondergrond. Daarbij is ook gekeken welk watervoerend pakket (WVP) het meest geschikt is voor de winning en infiltratie. In Figuur 11.2 staan de effecten in de verschillende watervoerende pakketten weergegeven voor de situatie met een onttrekking van brak grondwater uit WVP1 en injectie van brijn in WVP3.



Figuur 11.2 Het berekende effect op de gemiddelde freatische grondwaterstand (linksboven), stijghoogte in WVP1 (rechtsboven), WVP2 (linksonder) en WVP3 (rechtsonder), voor het scenario: onttrekking van 2 miljoen m^3 in WVP1 en infiltratie van brijn in WVP3 van 1 miljoen m^3 . Bron: Bootsma et al., 2020

Door de verlaging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en het 'afvangen' van brakwater neemt de zoute kwel (~20%) en daarmee de zoutvracht naar het oppervlaktewater af (reductie van 10%). Door de met brakwaterwinning gepaard gaande verlaging van stijghoogte en freatische grondwaterstand, heeft brakwaterwinning een flinke toename van de bodemdaling tot gevolg, 15 tot 30 cm extra bodemdaling in 50 jaar tijd, in een straal van 250 m rond de onttrekkingslocatie. De berekeningen tonen aan dat een deel (~20%) van het geïnjecteerde concentraat (Cl-conc = 1.1 g/l) weer terugkomt in de brakwateronttrekking, als het concentraat in WVP2 wordt geloosd. Bij injectie in WVP3 i.p.v. in WVP2 is dit nog maar 10%. De studie concludeert dat een onttrekking uit het tweede watervoerend pakket van 2 of 4 miljoen m^3 /jaar met infiltratie van het concentraat in het derde watervoerend pakket (1 of 2 miljoen m^3 /jaar) het meest kansrijk lijkt.

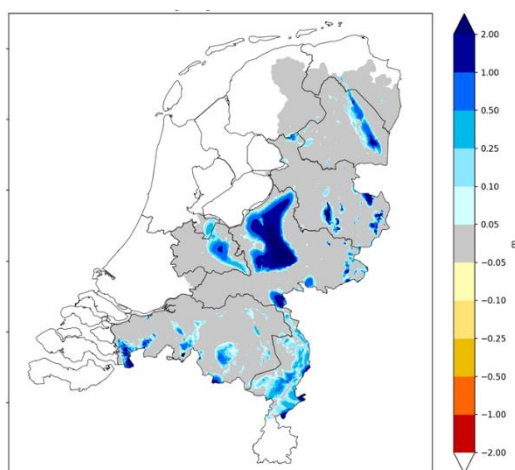
Er zijn meerdere studies uitgevoerd waarin effecten van injectie van zout of zoet water of de onttrekking van brak water met grondwatermodellen zijn berekend. Met brakwater onttrekken kan er extra ruimte worden gecreëerd voor zoet water en met injectie van zoetwater kan water met een bepaalde kwaliteit worden opgeslagen voor later gebruik. De modelstudies tonen allen aan dat zowel injectie van water als onttrekkingen de stijghoogtepatronen en fluxen in vrijwel het gehele grondwatersysteem beïnvloeden. Injectie leidt tot hogere stijghoogtes en onttrekking tot lagere stijghoogtes. En uiteraard, hoe groter het debiet dat hiermee gemoeid gaat, hoe groter het gebied waar het grondwatersysteem wordt beïnvloed.

In Zeeland zijn twee pilots uitgevoerd in het kader van het Go-Fresh project (Oude Essink et al., 2018) om op lokale schaal extra zoetwater in een zoute ondergrond op te slaan.

- Kreekrug Infiltratie Systeem (Serooskerke, Walcheren), richt zich op de toename van de zoetwatervoorraad in een kreekrug door infiltratie van oppervlaktewater waardoor het grondwaterpeil wordt opgezet. Onder een kreekrug worden de drainagepeilen opgezet met behulp van peilgestuurde drainage en wordt zoet oppervlaktewater in tijden van neerslagoverschot geïnfilteerd in het drainagesysteem. De toename van de grondwaterstand leidt tot een uitbreiding van de zoetwaterlens onder de kreekrug volgens het Badon-Ghyben Herzberg principe (zie paragraaf 1.6). Hieruit kan meer grondwater worden onttrokken voor irrigatie van de gewassen.
- Freshmaker (Ovezande, Zuid-Beveland), focust zich op de toename van de zoetwatervoorraad in een kreekrug door injectie van zoet water én onttrekking van zout grondwater om de opkegeling van zout grondwater te beperken. De injectie en winning vindt plaats via horizontaal geboorde putten ('HDDWs'). De zoetwatervoorraad maakt het mogelijk om het risico op droogteschade voor de fruitteelt (appels, peren) te kunnen minimaliseren.

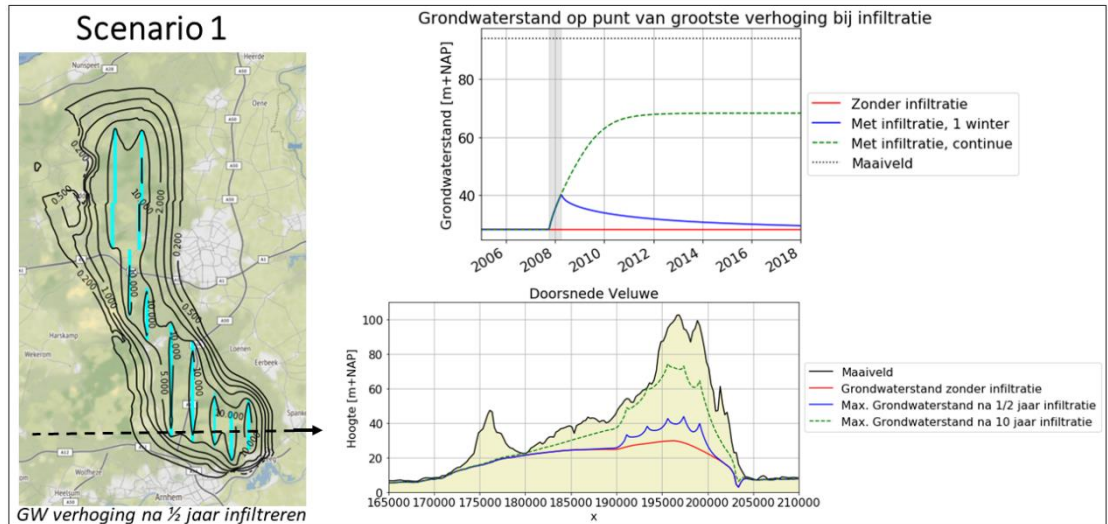
De veld-pilots hebben aangetoond dat er lokaal extra zoetwater kan worden opgeslagen in de ondergrond door het zoute grondwater te vervangen door geïnfilteerd oppervlaktewater gedurende de winter. In tegenstelling tot wat COASTAR beoogt, zijn dit lokale maatregelen en hebben daarom ook maar een zeer lokaal effect op het grondwatersysteem.

In het zandgebied kan er ruimte boven de grondwaterspiegel worden gezocht om extra water in de ondergrond op te slaan. Voor (tijdelijke) opslag van water door extra infiltratie van water zijn de trage gebieden met diepe grondwaterstanden (2,5 tot 70 m beneden maaiveld) erg geschikt. Hoe dieper de grondwaterstand, des te meer ruimte er is om grondwater op te slaan in de ondergrond. Voor de droogtestudie (Van den Eertwegh et al., 2021) is deze oplossingsrichting doorgerekend door 100 mm jaarlijks extra te infiltreren (via infiltratievijvers) voor gebieden met een grondwaterstand dieper dan 2.5 m. De extra grondwateraanvulling leidt dan tot een stijging van de grondwaterstand van enkele meters zoals in Figuur 11.3 is te zien. Een groot voordeel van deze traag reagerende gebieden is dat het geïnfilteerde water er relatief lang wordt vastgehouden door de afwezigheid van ontwatering. Het opgeslagen water kan eventueel worden aangesproken in de zomerperiode voor drinkwater, beregening of dienen als bron van extra kwel en gebiedseigen water ten behoeve van natuur (De Louw et al., 2022). Extra grondwateraanvulling leidt naast een vergroting van de grondwatervoorraad tot extra afvoer en kwel aan de flanken van de hoger gelegen gebieden, dit kan in stedelijk gebied mogelijk tot wateroverlast leiden.



Figuur 11.3 Het berekende effect op de freatische grondwaterstand (LG3) voor 2018 als gevolg van kunstmatige infiltratie van 100 mm per jaar, 6 jaar na uitvoering (uit De Louw et al., 2022a)

De Louw e.a. (2020) berekenden voor de Veluwe met het LHM het effect op de grondwatervoorraad en afvoer van sprengen als gevolg van infiltratie in het winterhalfjaar van 330 miljoen m³ met een infiltratiesnelheid van 100 mm per dag. Ter vergelijking, dit is ruim 180 keer zoveel geïnfiltreerd water als doorgerekend voor de droogtestudie (Figuur 11.3). Dit idee staat bekend als de 'Nationale Gieter' of 'Wateraccu'. De grondwaterstand stijgt ter hoogte van de infiltratie met maximaal 10 m en 5 jaar na infiltratie was 55% van het geïnfiltreerde water nog onder de Veluwe aanwezig (zie De Louw et al., 2020). Daarnaast nam de afvoer van sprengen en bronbeken behoorlijk toe. Dit toont aan dat de zogenaamde trage gebieden met diepe grondwaterstanden en afwezigheid van ontwatering in principe geschikt zijn om extra water tijdelijk op te slaan (tekst overgenomen uit De Louw et al., 2022).



Figuur 11.4 Effect op grondwaterstand als gevolg van de infiltratie van 330 miljoen m³ gedurende het winterhalfjaar op de Veluwe waarbij links het ruimtelijke effect direct na een (half) jaar infiltratie (lichtblauwe lijnen of stippen geven de locaties van infiltratievijvers weer). Rechtsboven staat het verloop van het effect op de grondwaterstand met de tijd en rechtsonder het effect in een doorsnede van de Veluwe, zowel voor eenmalige als continue infiltratie. Bron: De Louw et al., 2020.

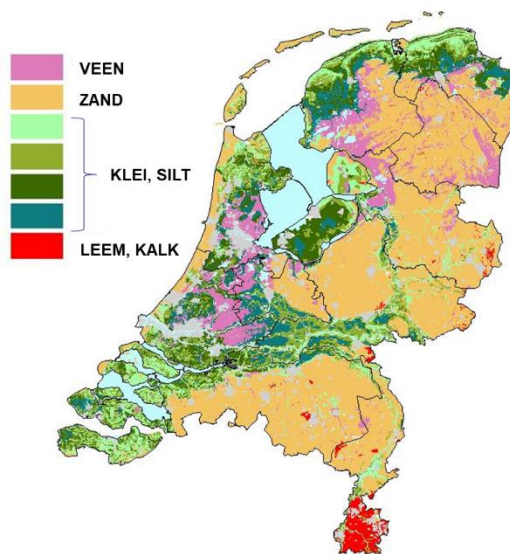
Extra infiltratie van water leidt tot een verhoging van de grondwaterstand en beïnvloedt daarmee ook het diepere grondwatersysteem (stijghoogtes en fluxen) en de afvoer van grondwater. De effecten worden groter en beslaan een groter gebied wanneer de volumes van de infiltratie groter worden. Een extra aandachtspunt is de kwaliteit van het te infiltreren water dat veelal een andere samenstelling heeft dan het ontvangende grondwater. Een ander aandachtspunt is de mogelijke wateroverlast in stedelijk gebied door verhoogde grondwaterstanden. Vergrijzing van het grondwater (de beïnvloeding van de chemische kwaliteit van grondwater, STOWA, 2022) door extra infiltratie van water kan worden voorkomen door voorzuivering of het gebruik van schone bronnen (bijv. opgevangen kwelwater).

Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: 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.
- Impact op grondwatersysteem: 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.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): 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.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): 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).

12 Herinrichting watersysteem

Nederland kan grofweg in vier type landschappen worden verdeeld: (1) zandgebied, (2) kleigebied, (3) veenweidegebied en (4) het Limburgse kalklandschap. De problematiek en toekomstige wateropgave en daarmee de mogelijke herinrichting van het watersysteem verschilt sterk per landschap en worden hieronder daarom apart per landschap besproken. Het is duidelijk dat verandering van het watersysteem hand in hand zal gaan met verandering van het landgebruik. In dit hoofdstuk ligt de nadruk op verandering van het (oppervlakte)watersysteem (met name de ontwateringsfunctie van sloten, waterlopen en beken) en de impact op het grondwatersysteem. Als ook het landgebruik verandert, kan dit consequenties hebben voor de grondwateraanvulling (meer of minder verdamping), dit wordt in hoofdstuk 13 besproken. Ook kan het consequenties hebben voor meer of minder gebruik van grondwater (bijv. voor beregening), dit wordt in hoofdstuk 10 besproken.



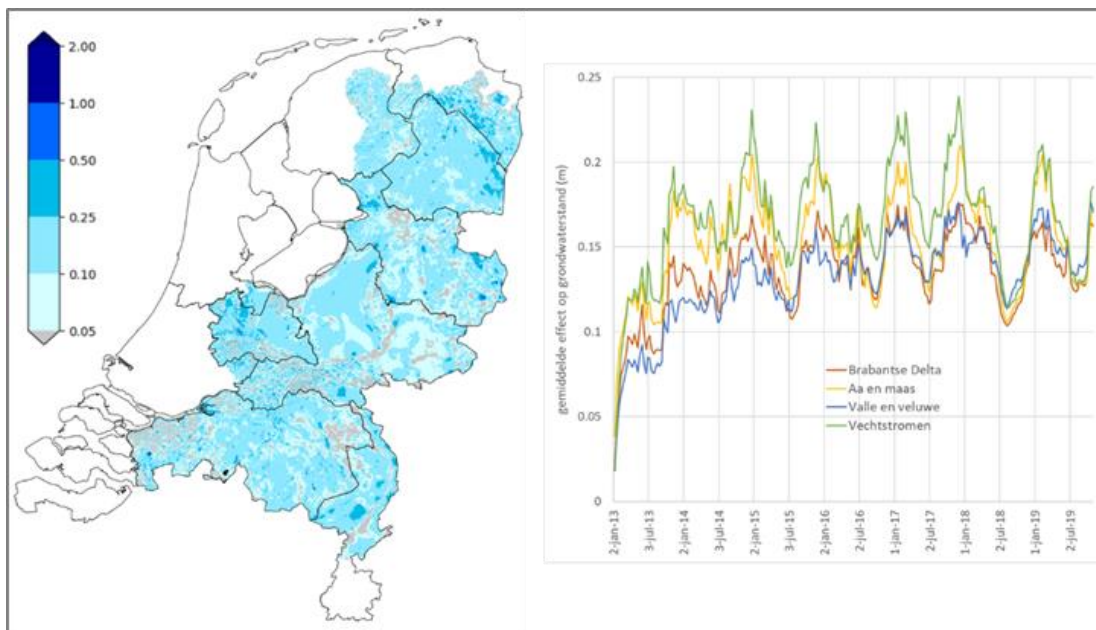
Figuur 12.1 De onderverdeling in hoofdgroepen grondsoorten van de Nederlandse bodem die grofweg de verschillende landschapstypen van Nederland aangeven.

De Hoge zandgronden

De extreem droge jaren 2018, 2019, 2020 en 2022 hebben duidelijk gemaakt dat het watersysteem niet klimaatrobust is en structureel te lage grondwaterstanden kent, vooral in rond en in natuurgebieden. Deze structurele verdroging van natuurgebieden speelt vooral op de hoge zandgronden en wordt al sinds 1985 onderkend maar er is sindsdien nauwelijks iets bereikt. De intensieve ontwatering en de toename van drinkwaterwinningen na de 2^e Wereldoorlog zijn de belangrijkste oorzaken. Beugelink en Claessen (1995) becijferde dat als oorzaak van deze verdroging gemiddeld 60% aan de intensieve ontwatering en 30% aan de drinkwateronttrekkingen is toe te schrijven, en 10% aan andere oorzaken zoals verstedelijking en verandering landgebruik (bijv. beplanten van naaldbossen). Door de structurele verdroging worden natuurdoelen niet gehaald en dreigen we zelfs de Europese doelen voor de habitatrictlijn (NATURA2000-gebieden) en KRW (Kaderrichtlijn Water) doelen niet te halen.

De laatste jaren gaan er op allerlei niveaus en organisaties (rijk, provincies, waterschappen, drinkwaterbedrijven, natuurorganisaties, landbouworganisaties) geluiden op voor een watertransitie richting een klimaat-robust of toekomst-bestendig watersysteem. Dit wordt

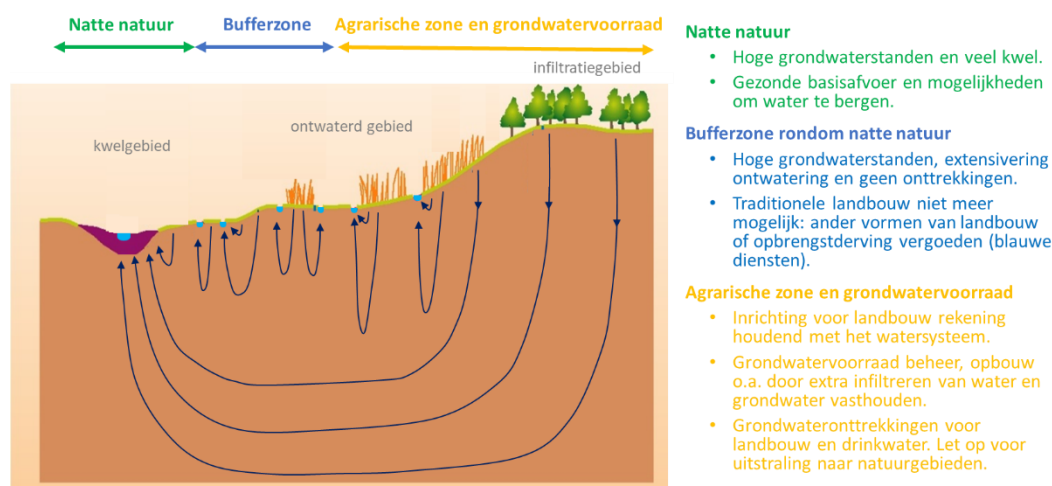
ingebod in lopende (nationale) programma's zoals Nationaal Programma Landelijk Gebied en de uitwerking van het principe dat het water- en bodemsysteem sturend moet zijn in keuzes waar we woningen bouwen, landbouw plaatsvindt en natuur de ruimte geven. Recentelijk (25 november 2022) heeft de minister van I&W een brief 'Water en Bodem sturend' aan de 2^e kamer gestuurd waarin voor zowel de hoge zandgronden als de veenweidegebied hogere grondwaterstanden worden nagestreefd door onder andere flinke aanpassing van het ontwateringsstelsel ([Kamerbrief over rol Water en Bodem bij ruimtelijke ordening | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#)). Het watersysteem van het zandgebied zal daarbij van een op afvoeren gericht naar een op vasthouden gericht systeem veranderen waarbij gemiddeld hogere grondwaterstanden worden gerealiseerd. Het extensiveren van het ontwateringsstelsel kan door het verhogen van slootbodems en waterpeilen, het verwijderen of regelbaar maken van buisdrainage en het dempen van sloten. Voor de droogtestudie (Van den Eertwegh et al., 2021) werd het effect berekend van een verhoging van de ontwateringsbasis met 0.30 m. Deze maatregel leidt tot een significante verhoging van de grondwaterstand (Figuur 12.2). Het effect is het grootst in de winter en neemt af in de zomer. De effectiviteit in de zomer is afhankelijk van de beschikbaarheid van voldoende water om het verhoogde peil te handhaven. Het maximale effect wordt voor de meeste gebieden pas bereikt 1,5 tot 2,5 jaar na invoering van de maatregel, maar voor trage gebieden is het maximale effect na zelfs 6,5 jaar nog niet bereikt (Figuur 12.2). Dit toont aan dat een structurele aanpak van de ontwatering veel effectiever is (30 tot 70%) dan een incidentele peilverhoging (De Louw et al., 2022). Wanneer sloten worden gedempt wordt een groter effect bereikt dan met alleen de verhoging van de ontwateringsbasis.



Figuur 12.2 Het berekende effect van een permanente verhoging van de ontwateringsbasis met 30 cm van het tertiair, secundair en primair ontwateringsstelsel op de freatische grondwaterstand voor de zomersituatie (LG3) in 2018 (links) en het berekende gemiddelde effect op de freatische grondwaterstand per waterschap in de tijd (rechts). Figuur overgenomen uit De Louw et al., (2022).

Omdat de opgave het grootst is voor natuurgebieden (hogere grondwaterstanden en meer kwel) komen bufferzones rondom natte natuurgebieden waar de grondwaterstand sterk wordt verhoogd als effectieve maatregelen naar voren. Verkennende modelberekeningen (Van den Eertwegh e.a., 2021) laten zien dat hydrologische bufferzones effectief kunnen zijn voor hydrologische herstel van de grondwaterafhankelijke natuur. Wanneer bijvoorbeeld de verhoging van de ontwateringsbasis met 30 cm alleen in een bufferzone van 500 meter en het natuurgebied wordt doorgevoerd, dan wordt al 60 tot 75% van het

effect op de grondwaterstand gerealiseerd dat kan worden bereikt bij het overal in de zandgebieden doorvoeren van deze maatregel (uit De Louw et al., 2022). 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. In de bufferzones rondom de natte natuurgebieden dient te ontwatering te worden geëxtensiverend en dienen (permanent of tijdelijke) onttrekkingen te worden beperkt of verboden. Dit zal leiden tot sterk vernatting van dit gebied waardoor traditionele landbouw waarschijnlijk niet meer mogelijk zal zijn. In deze zone geldt het principe 'teelt volgt peil' en er dient naar alternatieve vormen van landbouw te worden gezocht die beter tegen natte voeten kan (bijv. paludicultuur). Paludicultuur is een nieuwe vorm van landbouw die geschikt is om toe te passen in gebieden met een hoge grondwaterstand. Gewassen die verbouwd kunnen worden zijn bijvoorbeeld lisdodde, veenmos, kroosvaren, cranberries, riet, wilgen en wilde rijst.



Figuur 12.3 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).

Het kleigebied

Het kleigebied kan worden onderverdeeld in het rivierengebied en de zeekleipolders. In de zeekleipolders speelt het gevecht tegen verzilting door zoute kwel. De zoute kwel treedt met name op in de diepe droogmakerijen en wellen spelen hier een dominante rol bij de verzilting (De Louw, 2013). Wellen trekken dieper en daarmee zoute grondwater aan; ze werken als een soort onttrekking. Om de bijdrage van zoute kwel te verminderen is het dus logisch om de wellen aan te pakken maar ook de diffuse kwel. Voor beide kan dit worden gedaan door meer tegendruk te geven vanuit het freatisch systeem, dus door peilverhogingen. 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 verlaagt. Voor Polder de Noordplaspolder is dit stijghoogteverschil gemiddeld 1.5 meter en een peilverhoging van slechts 20 cm (de bandbreedte waarin wordt gezocht bij peilbesluiten) draagt dan maar aan 15% reductie van de zoute kwel bij. Hoeveel polderpeilen worden verhoogd in de toekomst en over welk areaal is niet in te schatten. Ook werden er jaren geleden plannen gemaakt om hele polders onder water te zetten om de verzilting en eutrofiëring te verminderen, zoals Polder Mijdrecht. Door het weinige draagvlak zijn deze plannen nooit tot uitvoer gebracht en het is de vraag of dit in de toekomst gaat veranderen. Dit soort extreme ingrepen in het watersysteem zouden een enorme impact op het grondwatersysteem hebben. Kwel in de polder waar maatregelen worden genomen zal afnemen, in de omgeving van de polder zal de infiltratie afnemen (infiltratiegebieden) of juist de kwel toenemen (in kwelgebieden). Afhankelijk hiervan zal ook het zoetzout-grensvlak zich langzamer of sneller verplaatsen.

Het veenweidegebied

In het veenweidegebied speelt vooral de bodemdalingsproblematiek door veenoxidatie en de daaraan gerelateerde uitstoot van broeikasgassen. Onderstaande tekst is overgenomen uit een intern document van Deltares “Bodem en water als basis. Beslisregels, onderbouwing, kartering” (Deltares, 2022).

Veenoxidatie veroorzaakt ca. 3% van de jaarlijkse broeikasgasuitstoot van Nederland (wat overeen komt met 4 tot 7 Mton CO₂-equivalent door de uitstoot van zowel CO₂, methaan en lachgas). In het Nationaal Klimaatakkoord (Klimaatakkoord, 2019) is een reductie van de jaarlijkse emissie van 1,0 Mton CO₂-equivalent in 2030 afgesproken. Voor 2050 geldt de Klimaatwet, volgens welke de broeikasgasuitstoot van Nederland als geheel gelimiteerd is tot 5% van de uitstoot uit 1990. Het is twijfelachtig of er in deze situatie nog ruimte is voor enige netto broeikasgasuitstoot vanuit het veenweidegebied; de verwachting is dat in 2050 het veenweidegebied in Nederland klimaatneutraal moet zijn (geen netto broeikasgasuitstoot) (Rli, 2020).

Door het huidig landgebruik met doorgaande ontwatering en de resulterende veenafbraak zullen veenlagen in Nederland steeds dunner worden en op den duur verdwijnen (met uitzondering van de natuurgebieden). Gezien de uitstoot van broeikasgassen en toename van de ernst van overstromingsrisico's, verzilting en verdroging, kan veenafbraak en bodemdaling maatschappelijk onhoudbaar worden (Rli, 2020). Als Nederland voor 2030 aan het klimaatakkoord wil voldoen, en in 2050 ook aan de Klimaatwet, dan zal het waterbeheer moeten leiden tot een verhoging van de grondwaterstand. Het landgebruik zal zich moeten aanpassen aan nattere omstandigheden en een geringere draagkracht van de bodem in het voorjaar, bijvoorbeeld door aangepaste melkveehouderij met kleinere, lichtere koeienrassen of 'natte teelten'.

Uit onderzoek in het buitenland is bekend dat de optimale grondwaterstand voor vermindering van broeikasgasuitstoot ca. 10-20 cm onder maaiveld bedraagt. Een lagere grondwaterstand leidt tot meer afbraak van veen en hogere uitstoot van CO₂. Een hogere grondwaterstand leidt tot zuurstofloze omstandigheden en vorming van lachgas en methaan (Tiemeyer et al., 2020 & Evans et al., 2021).

Uit de recente brief “Water en bodem sturend” aan de 2^e kamer wordt een verhoging van de grondwaterstand voor het veenweidegebied nagestreefd tot 20-40 cm beneden maaiveld. Een verhoging van de grondwaterstand tot 20-40 cm beneden maaiveld zal ook het diepere grondwatersysteem beïnvloeden. Met een vernat veenweidegebied wordt de bodemdaling sterk beperkt en de broeikasgasuitstoot geminimaliseerd, maar niet nul. Er zal dus bodemdaling blijven optreden en uiteindelijk zullen peilen (t.o.v. NAP) ook weer dalen (zie ook hoofdstuk 5).

Veranderend peilbeheer en bodemdaling hebben een sterk effect op het onderliggende grondwatersysteem zoals uitgebreid in hoofdstuk 5 is besproken.

Het kalklandschap

In het kalklandschap speelt vooral de extreme wateroverlast door overstroming van beken zoals die in juli 2022 in Zuid-Limburg optrad. Om deze wateroverlast in de toekomst enigszins te beperken, wordt gedacht aan het bergen van het afstromende regenwater in retentiebasins en maatregelen die de infiltratie van water in de bodem bevorderen. Eventuele veranderingen in het watersysteem zullen een geringe impact hebben op het gemiddelde grondwatersysteem. Lokaal kunnen vernattingsprojecten voor herstel van natuur wel structureel de grondwaterstand verhogen.

Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: De verwachting is dat het oppervlaktewatersysteem zo wordt ingericht dat er langer grondwater wordt vastgehouden en grondwaterstanden gaan stijgen.
- Impact op grondwatersysteem: 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.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): Door hogere grondwaterstanden zal het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): Door hogere grondwaterstanden zal het ZZ-grensvlak mogelijk iets dieper komen te liggen in infiltratiegebieden en ondieper in kwelgebieden.

13 Verandering landgebruik

Het landgebruik in 2100 ziet er waarschijnlijk niet zo uit als het huidige landgebruik. Door veranderingen in het landgebruik wijzigt de gewas- en grondverdamping en daarmee de grondwateraanvulling. Veranderingen van het landgebruik kunnen gepaard gaan met aanpassingen van het watersysteem of met meer of minder grondwateronttrekkingen (bijv. voor beregening). In dit hoofdstuk wordt de nadruk gelegd op de veranderingen van de grondwateraanvulling door landgebruiksverandering. Veranderingen in grondwateronttrekkingen, het watersysteem en het stedelijk gebied worden in andere hoofdstukken besproken (hoofdstuk 10, 12, 14).

Landbouwtransitie

Onderstaande tekst is grotendeels overgenomen uit Pouwels(2022).

Een van de ontwikkelingen in de ruimtelijke ordening is de landbouwtransitie. Zowel vanuit de nationale overheid als vanuit de Europese Unie wordt ingezet op een transitie van de huidige landbouwpraktijk naar duurzamere vormen van landbouw, zoals kringlooplandbouw en precisielandbouw.

Het is nog niet duidelijk hoe de landbouwtransitie er precies uit gaan zien. Vanuit de nationale overheid zijn er drie visie- en actiedocumenten die schetsen wat de landbouwtransitie inhoudt:

De toekomstvisie landbouw, natuur en voedsel van het ministerie van LNV (min. van LNV, 2018). Hierin wordt ingezet op de kringloopbenadering met minimale emissies van schadelijke stoffen naar de omgeving. Daarbij wordt een verschuiving beoogt van een zo laag mogelijke kostprijs naar een zo laag mogelijk grondstoffengebruik. In de toekomstvisie wordt aangegeven wat er bij de verschillende deelsectoren (veehouderij, plantaardige teelten, landbouw en natuur, glastuinbouw en veehouderij) wordt verstaan onder kringlooplandbouw. Voor het realiseren van de kringlooplandbouw worden drie aanvullende doelen genoemd voor een sterk en duurzaam voedselsysteem:

1. De economische positie van boeren, tuinders en vissers moet goed zijn in de kringlooplandbouw;
2. Onze waardering voor voedsel moet groter worden;
3. Nederland moet een prominente rol houden in de vernieuwing van productiemethoden.

Deze visie richt zich op de periode tussen nu en het jaar 2030.

Het actieprogramma voor klimaatadaptatie van ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (min. van LNV, 2020). Dit actieprogramma is gericht op klimaatadaptatie, en dus niet op het reduceren van broeikasuitstoot. Dit actieprogramma kent 5 pijlers:

1. Watersysteem - tegengaan van droogte, wateroverlast en problemen met waterkwaliteit en verzilting;
2. Bodemsysteem - verbeteren bodemstructuur en bodemmaatregelen;
3. Gewassen en teeltsystemen - klimaatrobuuste gewassen en teeltsystemen;
4. Veehouderij - landbouwhuisdieren krijgen meer te maken met hitte en UV-straling;
5. Ondersteunende instrumenten - dwarsdoorsnijdend op de andere vier pijlers, betreft regionale aanpak, kennis en innovatie en risicomanagement.

Dit actieprogramma betreft een meerjarig programma met een looptijd tot 2030.

Landbouw en landgebruik in het klimaatakkoord (Klimaatakkoord, 2019). Hierin staat de afspraken voor landbouw en landgebruik voor het zichtjaar 2030, en de visie voor het zichtjaar 2050 beschreven. Hierin worden CO₂ vasthoudende technieken in landgebruik genoemd, zoals het gebruik van andere gewassen. Daarnaast wordt ingezet op meer bomen, bos en natuur en op een klimaatgerichte aanpak in het veenweidegebied. Ook worden maatregelen genoemd om de broeikasgasuitstoot door veehouderij te verminderen, zoals extensivering en emissiearme stallen. In de glastuinbouw wordt een duurzamer energiegebruik en hergebruik van CO₂ uit de industrie beoogd.

Daarnaast zijn er vanuit de Europese Unie meerdere documenten die de landbouwtransitie schetsen.

Tabel 2 geeft een samenvatting van de type maatregelen die in bovengenoemde documenten worden genoemd met het effect op de hydrologie.

Tabel 2: De type maatregelen die door het ministerie van LNV en door de Europese Unie worden bedoeld bij de landbouwtransitie. Van deze maatregelen is ook het effect op de hydrologie ingeschat op basis van expert judgement (uit Pouwels, 2022).

Type maatregelen	Voorbeelden	Effect op hydrologie
Bodemstructuur-maatregelen	Minder bemesting, gewasrotatie met rustgewassen, alternatieve grondbewerking, openprikken van bodem	Mogelijk toename watervasthoudend vermogen, maar pilotproeven tonen weinig effecten
Maatregelen in glastuinbouw	Hergebruik van CO ₂ uit kassen, zo min mogelijk watergebruik	Afname watergebruik
Maatregelen op landschapniveau en overige maatregelen	Ruimte voor waterberging en klimaatbuffers, vermindering ontbossing, meer blijvend grasland, natuurinclusieve landbouw	Verandering grondwateraanvulling
Natuurmaatregelen	Versterken Natura2000 maatregelen	Hogere grondwaterstanden en minder ontwatering
Maatregelen open teelten	Precisielandbouw, weerbare teelten tegen droogte en zout, hergebruik water voor beregening, efficiëntere beregening	Mogelijk kleinere beregeningsvraag, verandering grondwateraanvulling
Maatregelen in de veehouderij	Emissiearme stallen, meer grassoorten door elkaar, weidegang	Grotere gewasverdamping grasland.
Maatregelen in het veenweidegebied	Verhoging waterpeil, onderwaterdrainage, drukdrainage, natte teelten	Verhoging grondwaterpeil, verandering gewasverdamping

Ontpoldering

In het kader van herstel van schorren en slikken langs de Westerschelde zijn enkele gebieden in Zeeuws-Vlaanderen zoals Perkpolder, Waterdunen en Hedwigepolder ontpolderd. Hierbij wordt landbouwgebied getransformeerd in een getijdegebied dat in directe verbinding staat met de Westerschelde. In alle gevallen gaat het hierbij om een verhoging van het gemiddeld hoger waterpeil en dit heeft gevolgen voor het aangrenzende grondwatersysteem (De Louw et al., 2020; De Louw en Bootsma, 2020, De Louw en Schoonderwoerd, 2022). De stijghoogte in het eerste watervoerende pakket neemt toe en daardoor de kwel en mogelijk de grondwaterstand en verandering van het zoetzoutgrens. Voor de Perkpolder is een kwelscherm (“SeepCat”) ontwikkeld en geïnstalleerd om de zoetwaterbel in het aangrenzende landbouw te beschermen.

Jaren geleden werden plannen gemaakt om hele polders onder water te zetten om de verzilting en eutrofiëring te verminderen, zoals bijvoorbeeld Polder Mijdrecht. De plannen zijn nooit tot uitvoer gebracht maar het is niet ondenkbaar dat dit in de toekomst wel gaat gebeuren. Dit soort extreme ingrepen zouden een enorme impact op het grondwatersysteem hebben.

Uiterwaarden

Ook langs de rivier kan er sprake zijn van functieverandering van oorspronkelijk landbouwgebied, bijvoorbeeld vanwege Ruimte voor de Rivier. Landbouwgebieden worden hier ingericht als nood-overloopgebied of gebruikt voor het graven van nevengeulen.

Toekomstbeelden

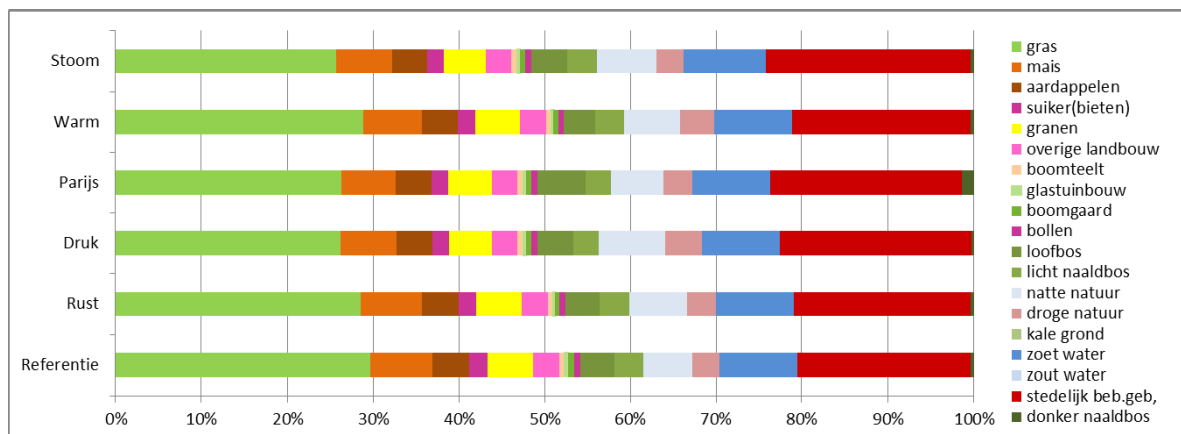
Er zijn binnen een aantal programma's toekomstbeelden geschetst van het landgebruik. Bij de programma's Deltaprogramma Zoetwater (ministerie I&W) en Nederland Later (PBL) zijn deze toekomstbeelden ook hydrologisch doorgerekend, en is daarmee het effect op de NGR in te schatten.

Toekomstbeelden in Deltaprogramma Zoetwater

Deze paragraaf is grotendeels afkomstig van Hunink et al., 2018 en Mens et al., 2019. In het Deltaprogramma Zoetwater zijn met behulp van de Ruimtescanner (VU, 2017) landgebruikskarten gemaakt die passen bij de Deltascenario's voor zichtjaar 2050. In Tabel 3 en Figuur 13.1 is de verdeling van de verschillende landgebruikstypes weergegeven voor de verschillende scenario's. Het areaal landbouw (gras en overige landbouw) neemt in alle scenario's af. De grootste afname is zichtbaar in het Deltascenario Stoom. De afname van het landbouwareaal komt ten goede van de arealen natuur en stedelijk gebied. De grootste toename van het stedelijk gebied is te zien in de Deltascenario's Druk en Stoom. In Figuur 13.1 is te zien dat in de variant Parijs er een significante toename is van het areaal donker naaldbos. In de variant Druk die aansluit op het Parijs-akkoord wordt verondersteld dat bossen worden aangelegd in nieuwe natuurgebieden voor het vastleggen van CO₂.

Tabel 3 Verandering van de arealen van vier hoofdklassen in de verschillende Deltascenario's.

	Ref2017	Rust	Druk	Parijs	Warm	Stoom
gras	1097	-3.8%	-11.5%	-11.2%	-2.6%	-13.3%
overige landbouw	909	-2.5%	-6.4%	-6.7%	-4.7%	-7.1%
natuur en bos	951	5.3%	11.3%	11.2%	5.3%	8.0%
stedelijk gebied	747	2.0%	10.4%	10.5%	2.8%	18.1%



Figuur 13.1 Verdeling van de verschillende landgebruikstypen voor Referentie en de verschillende Deltascenario's.

Toekomstbeelden in Ruimtelijke Verkenning / Nederland Later

In het kader van de Ruimtelijke Verkenning onderzoekt het PBL ruimtelijke issues en mogelijke oplossingen op lange termijn (ook wel Nederland Later genoemd). De centrale vraag daarin is hoe Nederland er na de transitie in 2050 uit kan zien, inclusief paden ernaartoe. Om die vraag te beantwoorden heeft PBL vier toekomstbeelden gemaakt, waarin onder andere een mogelijk beeld van het landgebruik in 2050 wordt beschreven. Het gaat om de volgende vier toekomstbeelden:

Mondiaal Ondernemen

Beschrijving: De samenleving is prestatiegericht en individualistisch. Economie is gericht op groene groei.

Ruimtelijke patronen: Randstad is getransformeerd tot Middenstad. Zij concurreert met Londen en Parijs en contrasteert sterk met Krasland, dat in het noorden, oosten en zuiden van Nederland ligt.

Stad en regio: Sterke concentratie in Middenstad (uitgebreide Randstad); groot contrast met Krasland. Grote sociaaleconomische contrasten; uiteenlopende dichtheden en verschillen in ruimtelijke kwaliteit. Economische efficiëntie door functiemenging of juist hoge specialisatiegraad.

Landelijk gebied: Agrarische hoofdstructuur op vruchtbare gronden is hoogproductief. Greenports en intensieve veehouderij in agro-industriële clusters. Natuur is gescheiden van landbouw m.u.v. bufferstroken (1.000 m) rond verdrogings- en verzuringsgevoelige beschermde natuurgebieden.

Snelle Wereld

Beschrijving: Digitale leefstijlgroepen zijn vluchtig maar ondernemen veel initiatieven. Voorkeur voor planet, people of prosperity verschilt per 'bubbel'. Beleviseconomie, deeleconomie en bezorgdiensten bloeien. Kleine, hightech bedrijven zijn leidend.

Ruimtelijke patronen: Digitale ruimte is belangrijker dan de fysieke ruimte. Locaties doen er minder toe, wat tot spreiding leidt. Dit levert fysiek een lappendeken op. Naast hotspots zijn er coldspots.

Stad en regio: Locaties verliezen betekenis; veel spreiding; voorkeur voor goedkope locaties; snel veranderd ruimtelijk patroon. Herbestemming en transformatie; ook uitbreiding; tijdelijke bestemmingen; centra verliezen betekenis. Meervoudig ruimtegebruik; tijdelijke programmering door virtual reality en augmented reality.

Landelijk gebied: Grondgebonden landbouw is hoogtechnologisch en hoogproductief. Koppeling van glastuinbouw en intensieve veehouderij i.v.m. reststromen. Greenports zijn uitgebreid. Natuur-inclusieve bufferstroken (500 m) rond verdrogings- en verzuringsgevoelige beschermde natuurgebieden.

Groen Land

Beschrijving: Mensen zien zich als onderdeel van natuur en identificeren zich met het collectief (samenleving). Post-groei-economie is gericht op vermindering van materialengebruik.

Ruimtelijke patronen: Er is een sterke nationale hoofdstructuur. Openbaarvervoernetwerken, energienetwerken en netwerken voor lopen en fietsen vormen kralensnoeren van bebouwing en infrastructuur.

Stad en regio: Optimale benutting van bestaande (middelgrote) steden, relatief evenwichtig gespreid over het land. Transit-oriented development: ontwikkelen rond openbaarvervoerknopen; verknoping van rood, groen en blauw. Nabijheid staat centraal; functiemenging op wijk-, buurt- en gebouwniveau.

Landelijk gebied: Grondgebonden landbouw is natuur-inclusief, circulair en biologisch. Intensieve veehouderij is vrijwel verdwenen. Glastuinbouw is kleiner, klimaatneutraal en gemengd met andere bedrijven. Natuur is met 150.000 ha uitgebreid. Natuur-inclusief ruimtegebruik met ecosysteemdiensten.

Regionaal Geworteld

Beschrijving: Gemeenschappen zorgen voor burgers en voor natuur en landschap. Regionale zelfvoorziening en informele economie staan voorop.

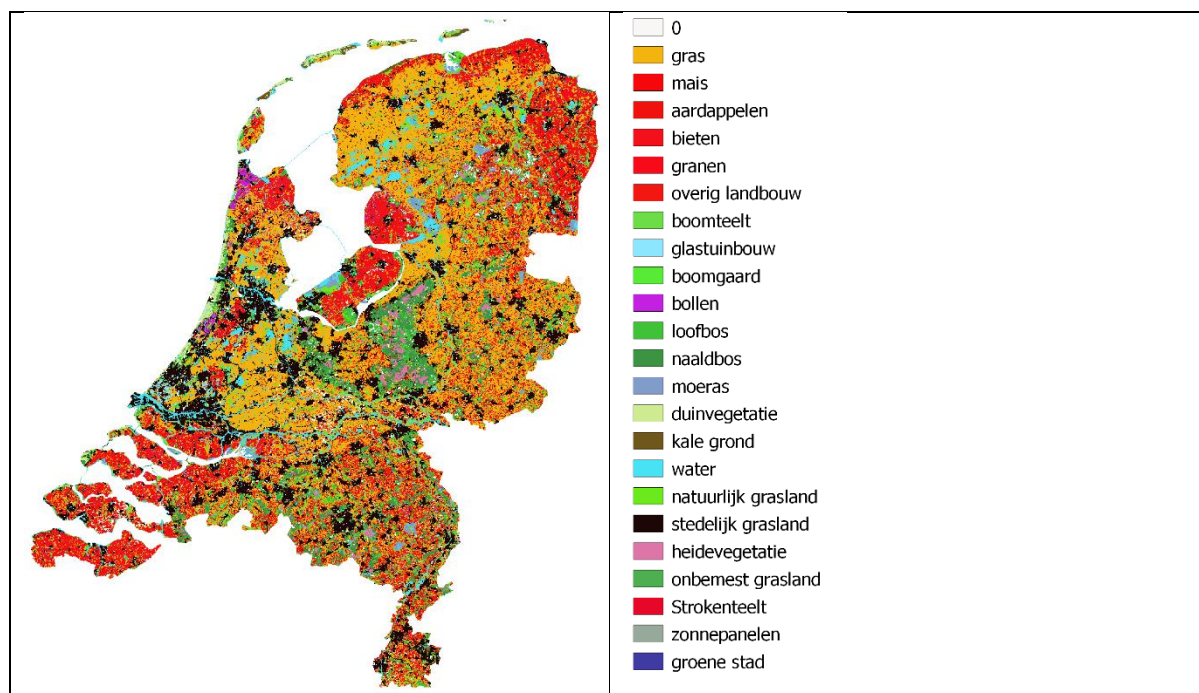
Ruimtelijke patronen: Nederland bestaat uit een mozaïek van regionale landschappen. Er is een gevarieerd patroon van bestaande woonkernen. Regionale identiteiten verschillen duidelijk.

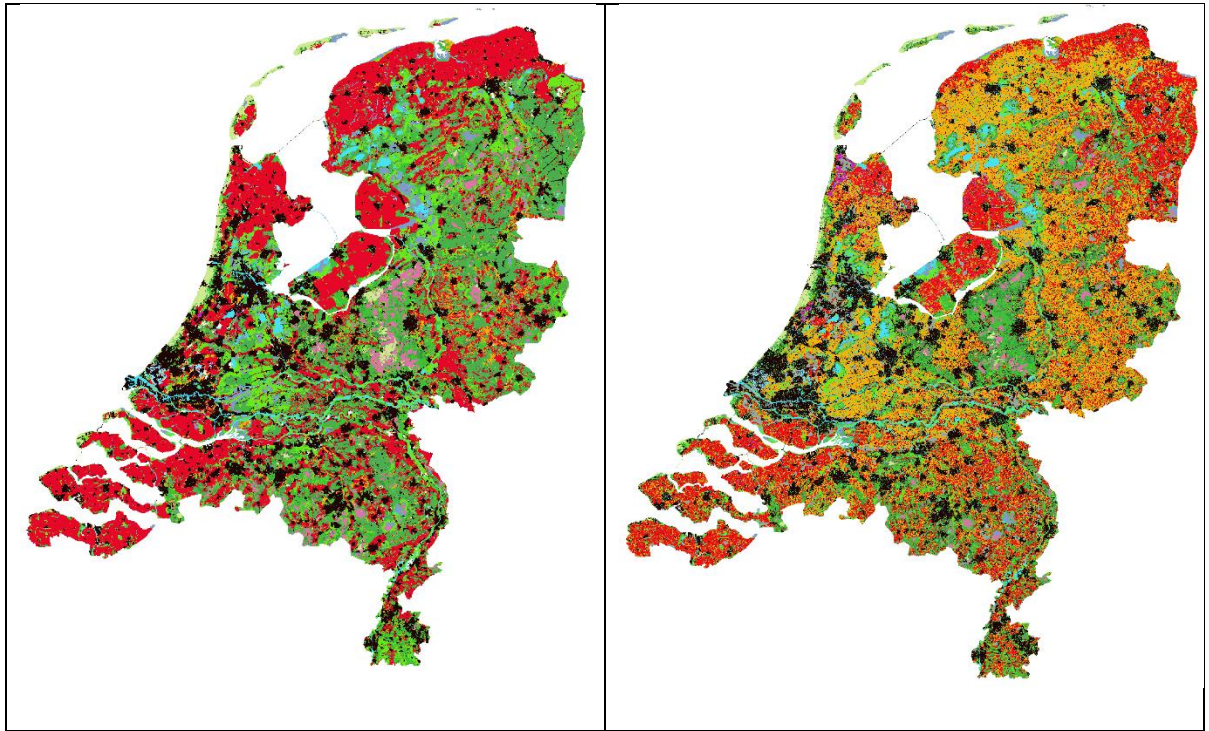
Stad en regio: Regionalisering belangrijker dan agglomeratievorming; verstedelijking is meer gespreid. Geconcentreerde groei in of aan bestaande (kleinere) steden en dorpen; daily urban systems zijn kleiner. Grote diversiteit aan wijktypen, volgens behoeften van lokale bevolking; multifunctionele buurtcentra.

Landelijk gebied: Grondgebonden landbouw is natuur-inclusief, heeft korte ketens en afhankelijk van gemeenschap biologisch. Greenports en intensieve veehouderij zijn gekrompen en 'versmolten' met de stad. Naast beschermde natuurgebieden natuur-inclusief ruimtegebruik met ecosysteemdiensten.

Deltares heeft in 2022 de twee verhaallijnen *Mondiaal Ondernemend* en *Groen Land* hydrologisch doorgerekend (Wolters et al., 2022, in prep.). Daarbij werden conceptversies van de landgebruikskaarten gebruikt die PBL en WUR voor deze scenario's hebben ontwikkeld (zie Figuur 13.2).

In de ruimtelijke kaart van Groen Land is het areaal intensieve landbouw flink verminderd, van ruim 70% (huidig) naar ongeveer 10% (Groen Land). Als extensief beheerde graslanden tot landbouw worden gerekend is de afname nog steeds zeer fors, namelijk van 70% naar 40%. Het landbouwareaal bestaat grotendeels uit strokenteelt.





Figuur 13.2 Vereenvoudigde landgebruikskarten voor Referentie (boven), Groen Land (links onder) en Mondiaal Ondernemend (rechts onder).

Een belangrijk inzicht uit de hydrologische berekeningen van Deltares is dat de gewijzigde verdamping door landgebruiksveranderingen een significant effect kan hebben op de grondwateraanvulling (hoge zandgronden) en verziltingsprocessen in het grondwatersysteem van de kustgebieden.

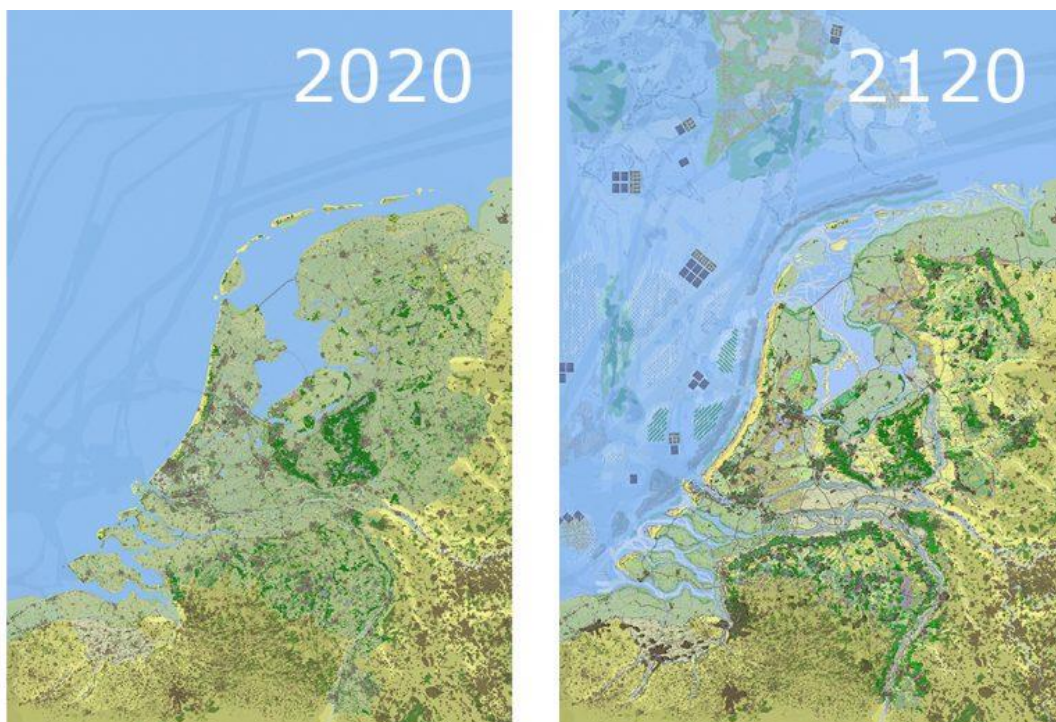
Landgebruik sturen op een gelijkmatiger en lager verdampingspatroon door het jaar heen in plaats van een piek in de zomer kan helpen bij het verhogen van de zomergrondwaterstanden in de hoge zandgronden. Ook kan slimme gewaskeuze helpen om de watervraag in wateraanvoergebieden gelijkmatiger te verdelen over het zomerhalfjaar, waardoor piekvragen worden voorkomen.

Toekomstbeeld - Nederland 2120 (WUR)

Onderstaande tekst is grotendeels overgenomen van Baptist et al.(2019) en NOS(2020). Wageningen University & Research (WUR) heeft met de kaartbeelden 'Nederland in 2120' een toekomstvisie voor de ruimtelijke ordening van Nederland gemaakt (zie Figuur 13.3). De visie is bedoeld om te inspireren. Het schetst een toekomst waarin economische ontwikkeling en een natuur-inclusieve samenleving hand in hand gaan. De toekomstvisie houdt rekening met de bijzondere kenmerken van verschillende deelgebieden in Nederland. Een paar zaken vallen op.

- Om met de natuur te beginnen: het Nederland van 2120 heeft veel meer bos en veel meer water dan het Nederland van nu. De bekkens van rivieren zijn breder om hoogwaterpieken beter op te vangen. Langs de rivieren en rond de steden vinden we groenbuffers. Die zorgen voor een aantrekkelijk landschap, vergroten de biodiversiteit, zorgen voor verkoeling en vergroten de recreatiemogelijkheden.

- De hoeveelheid landbouwgrond is in 2120 gehalveerd tot de helft van wat er nu is. De landbouw concentreert zich op vruchtbare kleigronden, zoals in Groningen, Friesland en de IJsselmeerpolders. De productie in de veehouderij is nog maar een derde van de huidige productie. Door inzet van technologie zijn gewassen beter beschermd tegen ziekten en klimaatverandering. Rond zon- en windparken in zee worden mosselen, oesters en zeewier geproduceerd. Ook staan insecten op het menu.
- De bevolkingsgroei, van bijna 17,5 miljoen nu naar 20 miljoen in 2100, wordt voor een belangrijk deel opgevangen in middelgrote, deels nieuwe steden in Zuid- en Oost-Nederland.
- Als bescherming tegen de stijgende zeespiegel wordt de duinenrij langs de Noordzee verbreed en worden zandsuppleties uitgevoerd. Dat moet volstaan bij stijging van 1,5 meter aan het eind van deze eeuw.



Figuur 13.3 De huidige situatie (2020) en een toekomstbeeld voor Nederland in 2120 (uit: Baptist et al., 2019).

Effect van verandering landgebruik op het grondwatersysteem

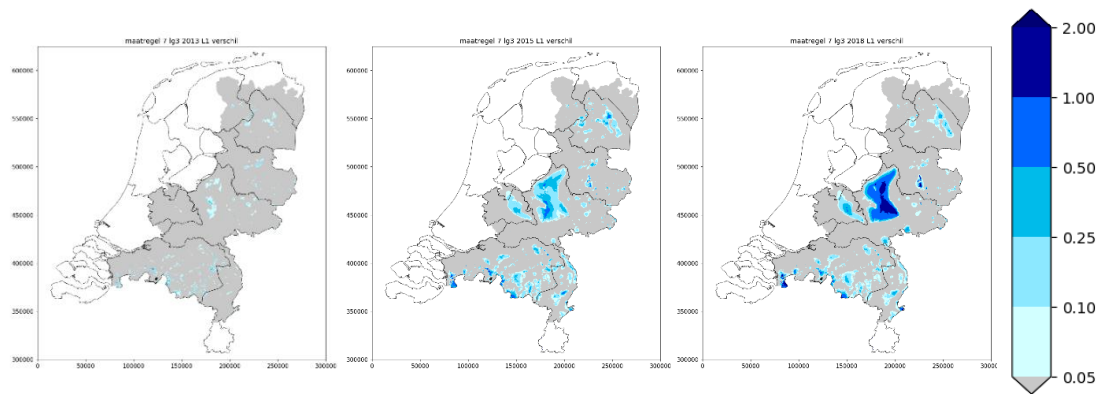
Het wijzigen van het landgebruik beïnvloedt het grondwatersysteem. De verdamping kan veranderen doordat bepaalde gewassen juist meer of minder verdampen, maar ook de seizoenale effecten van verdamping kunnen veranderen, doordat het groeiseizoen bij het ene gewas eerder start dan bij het andere. Daarnaast beïnvloedt het landgebruik de infiltratie van neerslag. Bij een uitbreiding van het stedelijk gebied zal er bijvoorbeeld minder neerslagwater infiltreren, waardoor de grondwateraanvulling afneemt.

Helaas geven de modelberekeningen voor Deltaprogramma Zoetwater en Nederland Later niet direct zicht op deze effecten, omdat ze naast landgebruikswijzigingen ook andere wijzigingen bevatten.

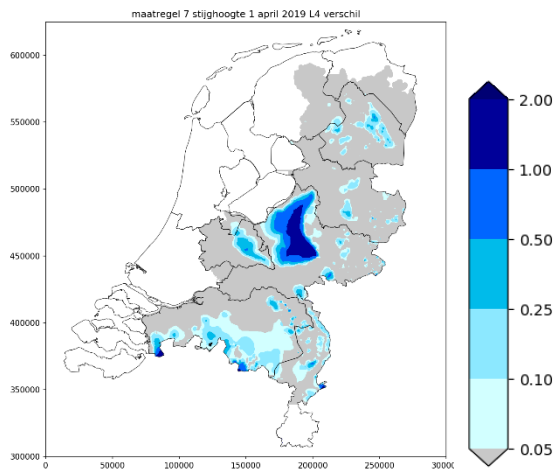
Binnen het project Droogte Hoge Zandgronden (Van den Eertwegh et al., 2021) is wel het individuele effect berekend van landgebruikswijzigingen. Figuur 13.4 laat zien wat het effect is van de verandering van naaldbos naar heide, dat minder water verdampst. Uiteraard zijn er alleen effecten te zien voor de gebieden waar nu naaldbos staat. Effecten van de toename

van de grondwateraanvulling zijn het grootste in de zogenaamde trage gebieden zonder noemenswaardige ontwateringsmiddelen. De grondwaterstand blijft stijgen totdat er weer een evenwicht wordt bereikt tussen de grondwateraanvulling, grondwaterstand (opbolling tussen drainagemiddelen) en afvoer van het neerslagoverschot. Hier geldt bij benadering dat de opbolling die nodig is om het neerslagoverschot af te voeren, kwadratisch toeneemt met de afstand tot de drainagemiddelen.

Als gevolg van een grotere grondwateraanvulling en een hogere grondwaterstand neemt ook de gebiedseigen afvoer toe. Als de (nieuwe) evenwichtssituatie is bereikt en grondwaterstanden stoppen met stijgen, dan zal uiteindelijk de (nieuwe) gebiedseigen afvoer gelijk zijn aan het (nieuwe) neerslagoverschot. Een verhoging van de grondwaterstand leidt ook tot een verhoging van de stijghoogte in de diepere watervoerende pakketten (zie Figuur 13.5) en wanneer kwelgebieden in de invloedssfeer liggen ook tot een toename van de kwelflux naar watersystemen in de omgeving. Zo neemt de afvoer van sprengen en bronbeken op de flanken van de Veluwe significant toe als gevolg van deze maatregel, voor de winterperiode veel meer dan voor de zomerperiode.



Figuur 13.4. Verhoging van de freatische grondwaterstand (LG3) in meter, voor 2013, 2015 en 2018 als gevolg van verandering van naaldbos naar heide vanaf begin 2013.



Figuur 13.5 Effect van omvorming naaldbos naar heide op de stijghoogte (modellaag 4), in meter. Blauwe kleuren tonen een verhoging van de stijghoogte.

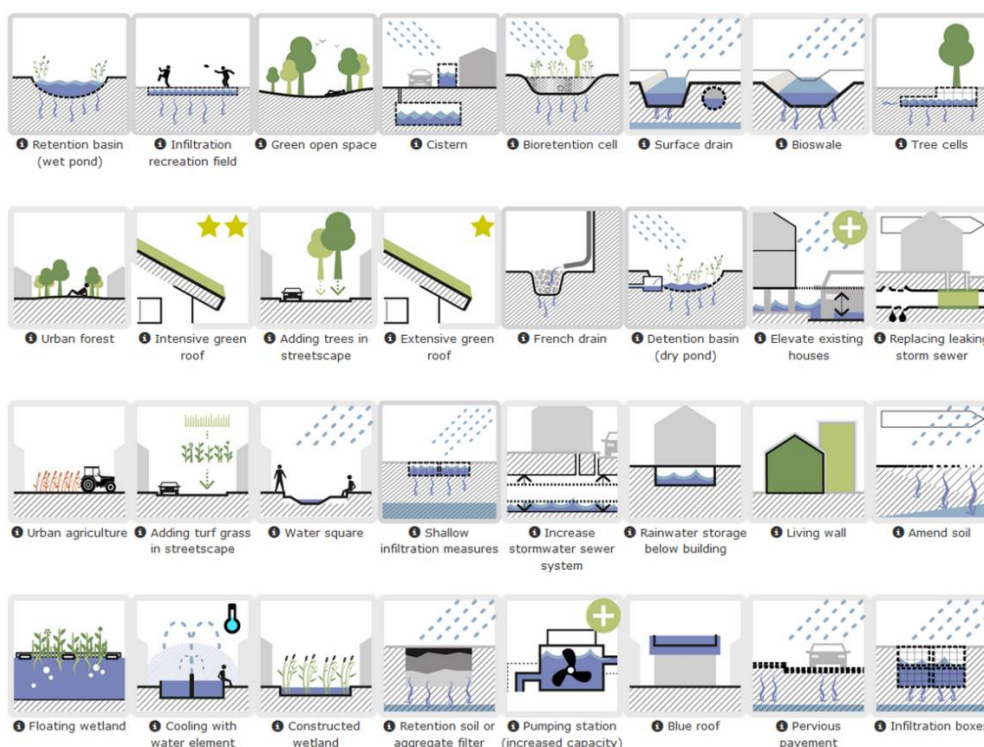
Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: Verandering van landgebruik leidt tot verandering van de grondwateraanvulling. Er wordt ervan uitgegaan dat de verandering leidt tot meer grondwateraanvulling.
- Impact op grondwatersysteem: 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.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): Door extra grondwateraanvulling zal het DMB-front zich sneller neerwaarts verplaatsten.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): Door extra grondwateraanvulling zal het ZZ-grensvlak mogelijk iets dieper komen te liggen in infiltratiegebieden en ondieper in kwelgebieden als kwelfluxen toenemen.

14 Verstedelijking en afkoppelen stedelijk gebied

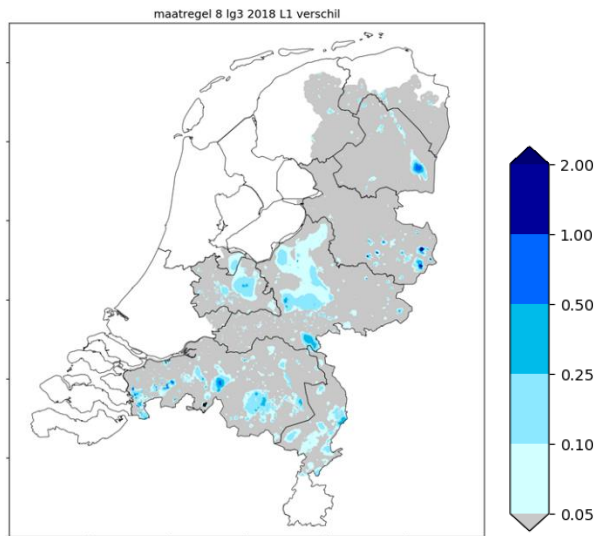
Stedelijk gebied heeft een sterke invloed op het grondwatersysteem omdat bebouwing en infrastructuur de infiltratie van regenwater en verdamping van bodemwater belemmert. Tegelijkertijd stelt het grondwatersysteem belangrijke randvoorwaarden aan bebouwd gebied en kan het grote problemen veroorzaken. Zo kunnen wateroverlast en droogte in bebouwd gebied potentieel leiden tot miljardenschades aan gebouwen en infrastructuur. Klimaatverandering kan de schade door grondwateronderlast (als gevolg van maaiveldddaling en droogstand en daardoor paalrot van houten paalfunderingen) en grondwateroverlast (als gevolg van schimmelvorming, optrekkend vocht) vergroten en vaker doen optreden (Buma et al., 2017). Voor zowel voor bestaand als toekomstig stedelijk gebied zal zeer waarschijnlijk in de toekomst de interactie met het grondwatersysteem veranderen.

Een groot deel van de neerslag dat op gebouwen en wegen valt en normaal gesproken het grondwater aanvult, stroomt direct het oppervlaktewatersysteem of het riool in. Stedelijk gebied heeft daarmee een verdrogend effect op het grondwatersysteem en veroorzaakt piekafvoeren in het oppervlaktewatersysteem stroomafwaarts. Ook leidt het lokaal tot wateroverlast in het stedelijk gebied zelf. Het afkoppelen van dit water van het rioolwatersysteem (en oppervlaktewatersysteem) en het bevorderen van infiltreren in de bodem is een effectieve maatregel om de grondwateraanvulling te bevorderen en wateroverlast tegen te gaan en zal in de toekomst voor bestaand dorpen en steden steeds vaker worden toegepast. Met de Climate Resilient City Toolbox ([Climate Resilient City Toolbox \(crctool.nl\)](https://www.crctool.nl)) kan worden verkend welke adaptatie maatregelen een wijk beter beschermen tegen (toekomstige) overstroming, droogte en hitte (zie Figuur 14.1 voor een opsomming van mogelijke maatregelen).



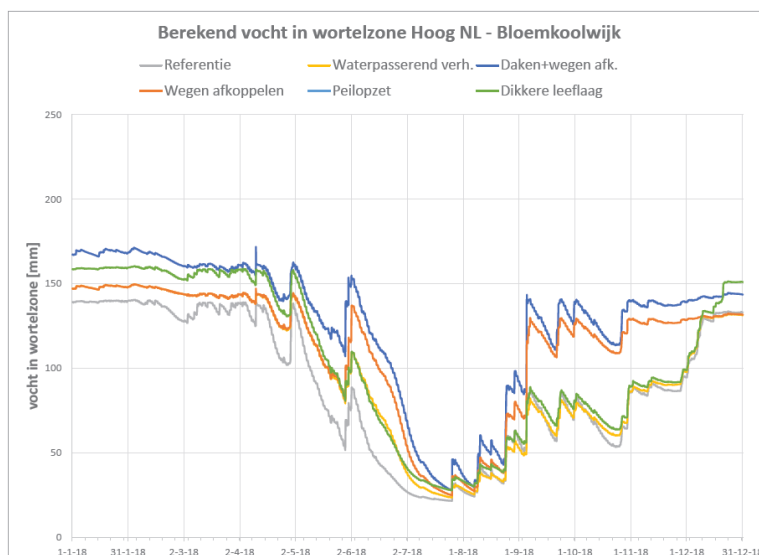
Figuur 14.1 Verschillende mogelijke watermaatregelen in een stad om wijken te beschermen tegen wateroverlast, droogte en extreme hitte. Uit [Climate Resilient City Toolbox \(crctool.nl\)](https://www.crctool.nl)

Voor de droogtestudie is de oplossingsrichting 'afkoppelen stedelijk gebied' doorgerekend waarbij in het winterhalfjaar 100 mm extra water wordt geïnfiltreerd dat anders via het riool het stedelijk gebied verlaat. De effecten op de grondwaterstand kunnen rond het bebouwd gebied waar de maatregel is doorgevoerd, erg groot zijn. De effecten zijn het grootst in de hoger gelegen gebieden zonder ontwatering (zie Figuur 14.2).



Figuur 14.2 Het berekende effect op de freatische grondwaterstand (LG3, in meter) voor 2018 als gevolg van het afkoppelen van bebouwd gebied met extra infiltratie van 100 mm per jaar (uit Van den Eertwegh et al., 2021).

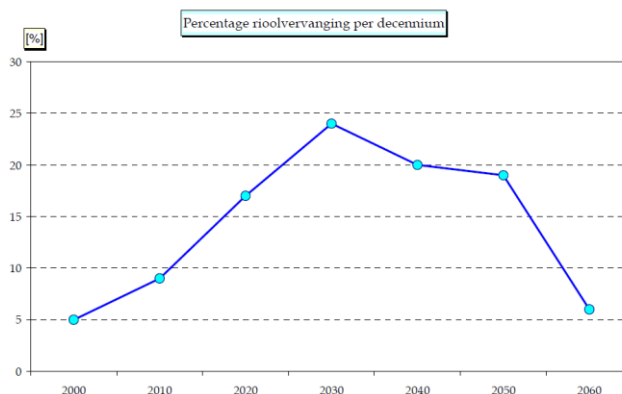
De extreme droogte 2018 had grote impact op het stedelijke groen en bedreigt de waarde die groen levert voor het stedelijk gebied. In het kader van het Nationaal Kennis- en innovatieprogramma Water en Klimaat verkenden Hoogvliet et al. (2022) verschillende maatregelen die de vochtvoorziening voor stedelijk groen bevorderen. Figuur 14.3 toont het berekende verloop van het vochtgehalte in de wortelzone als gevolg verschillende maatregelen. Het afkoppelen van wegen en daken leidt vooral voor de winterperiode tot een hoger vochtgehalte en grondwateraanvulling.



Figuur 14.3 Verloop vochtgehalte in wortelzone bloemkoolwijk hoog Nederland, in 2018, zonder (referentie) en met maatregelen (uit Hoogvliet et al., 2022).

Stedelijke gebieden met slappe bodem zijn kwetsbaar voor de gevolgen van een structureel lage grondwaterstand. Er kan paalrot van houten funderingspalen optreden waardoor huizen verzakken. Ook kan er bodemdaling optreden waardoor tuinen zakken en natter worden en schade aan infrastructuur en niet-gefundeerde huizen kan optreden. Bestaande en toekomstig waterbeheer is er op gericht om deze schade zoveel mogelijk te voorkomen en dit zal gevolgen hebben voor het grondwatersysteem.

Veel riolsystemen in stedelijk gebied zijn door verzakkingen beschadigd en daarbij grondwater gaan draineren. Hierbij is de grondwaterstand geleidelijk gedaald. De technische levensduur van de riolering is ongeveer 50 jaar, maar in de praktijk wordt de riolering vaak na 70 jaar vervangen. Gegeven een gemiddelde levensduur van 60 jaar kunnen de gegevens van Rioned vertaald worden naar de toekomst. Na herstel van het riolsysteem zal de grondwaterstand weer stijgen (voor sommige gebieden zelfs 30-50 cm) (Stuurman et al., 2007). Figuur 14.4 laat het te verwachten percentage rioolvervanging zien voor de komende 30 jaar.



Figuur 14.4 Te verwachten percentage rioolvervanging per decennium (uit Stuurman et al., 2007)

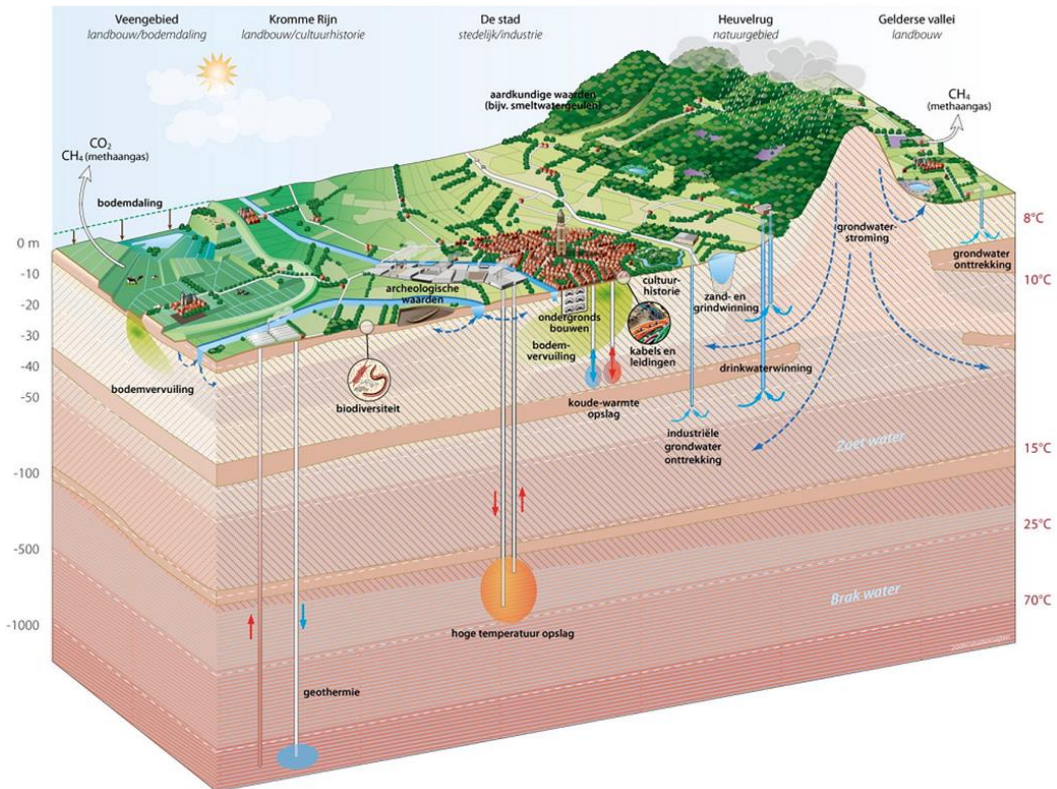
De komende decennia staat er een grote opgave voor de bouw van meer dan een miljoen woningen op stapel. Dit zal ongetwijfeld leiden tot meer bebouwing en bestrating waardoor de grondwateraanvulling in principe af zal nemen. Daarnaast zal de afvoer van het neerslagoverschot versnellen en wateroverlast toenemen door het toenemende oppervlak verstening. Men zal bij de bouw van nieuwe wijken rekening (moeten) houden met meer afkoppeling van het regenwater dat op daken en wegen valt om het risico op wateroverlast te verminderen en de grondwateraanvulling te bevorderen. De bouw van nieuwe wijken zal hoe dan ook impact hebben op het onderliggende grondwatersysteem.

Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: Verstedelijking leidt tot minder grondwateraanvulling en afkoppeling tot meer grondwateraanvulling.
- Impact op grondwatersysteem: De grondwateraanvulling neemt af bij verstedelijking en daarmee daalt de grondwaterstand en de infiltratie naar diepere pakketten. Bij afkoppeling gebeurt het tegenovergestelde.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): Bij verstedelijking zal het DMB-front zich trager neerwaarts verplaatsten en bij afkoppeling juist sneller.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): 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.

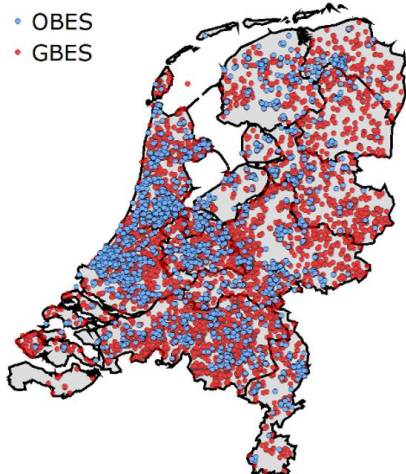
15 Uitbreiding KWO-systemen en Geothermie

Figuur 15.1 geeft een overzicht van de diepteligging van drie verschillende typen bodemenergiesystemen: (1) geothermie waarbij gebruik gemaakt wordt van aardwarmte dieper dan 500 m, (2) hoge temperatuur opslag vaak dieper dan 200 m, (3) koude-warmte opslag (KWO) en gesloten bodemenergiesystemen toegepast op dieptes variërend van 10 tot 200 meter.



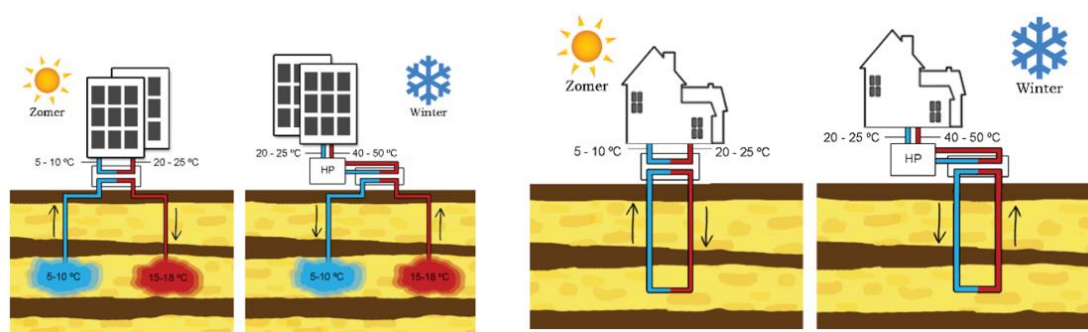
Figuur 15.1 Overzicht van de ligging van de verschillende typen bodemenergiesystemen in de ondergrond: (1) geothermie, (2) hoge temperatuur opslag, (3) koude-warmte opslag.

Delen van onderstaande tekst zijn overgenomen uit Deltafact Bodemenergiesystemen (Schout en Bloemendal, 2022). Bodemenergiesystemen zijn sinds het begin van de 21^e eeuw grootschalig toegepast, resulterend in een geschatte hoeveelheid van zo'n 50.000 gesloten systemen en 3.000 open systemen in 2018 (zie Figuur 15.2). Gezien de ambitieuze doelstellingen voor het verder verduurzamen van de gebouwde omgeving in het in 2019 afgesloten 2^e klimaatakkoord zal de toepassing van zowel open als gesloten bodemenergiesystemen naar verwachting verder doorgroeien. In 2050 heeft naar verwachting 10 tot 30% van de gebouwen in Nederland een bodemenergiesysteem (Naber et al., 2016).



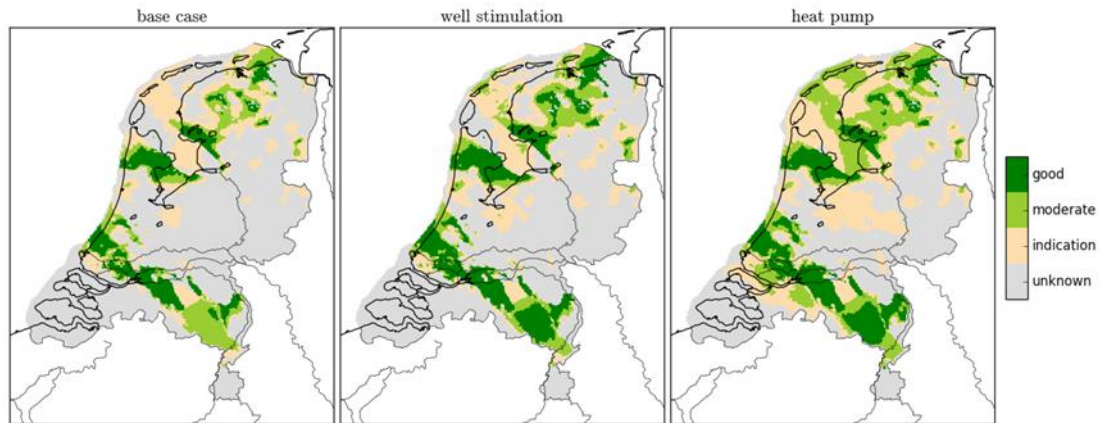
Figuur 15.2 Gemelde gesloten (GBES) en vergunde open (OBES) bodemenergiesystemen in Nederland. Bron: Nationaal Georegister. Figuur overgenomen uit Deltafact Bodemenergiesystemen (Schout en Bloemendal, 2022).

Bij een gesloten bodemenergiesysteem (GBES) wordt een circuliatiemedium rondgepompt door een gesloten leidingsysteem dat in de bodem is geïnstalleerd, in de regel tot maximaal zo'n 200 m diepte (Figuur 15.3). Is het circuliatiemedium kouder dan de omringende bodem dan neemt de vloeistof warmte op, is het medium warmer dan koelt deze juist in de bodem af. In Nederland worden GBES vooral toegepast bij grondgebonden woningen en kleine gebouwen. Een open bodemenergiesysteem (OBES) maakt gebruik van grondwater om thermische energie (warmte of koude) van de ondergrond naar het gebouw te transporteren, en andersom (Figuur 15.3). Deze systemen worden ook wel koude-warmte opslagsystemen genoemd (KWO). De diepte van de bronnen varieert meestal tussen enkele tientallen meters tot maximaal circa 200 meter.



Figuur 15.3 Schematische weergave van een open (links) en gesloten bodemenergiesysteem (rechts) in de winter en zomer. Bron: Bloemendal 2018. Figuur overgenomen uit Deltafact Bodemenergiesystemen (Schout en Bloemendal, 2022).

Geothermie, zoals gedefinieerd in de Mijnbouwwet, is vooralsnog zeer beperkt qua omvang (ca 28 systemen), maar is één van de ondergrondse activiteiten die naar verwachting de komende jaren een sterke groei zal doormaken om bij te dragen aan de gewenste energietransitie. Projecties gaan uit van een groei van 3 PetaJoule in 2018, via 50 PJ in 2030 naar 200 PJ in 2050 wat overeenkomt met ca. 700 doubletten (Masterplan Aardwarmte, 2018) (overgenomen uit Deltafact Geothermie, Cirkel et al., 2022). Een doublet is een geothermisch systeem van twee naast elkaar liggende diepboringen. In Figuur 15.4 staan de potentiegebieden voor geothermie weergegeven waar mogelijk in de toekomst meerdere systemen worden aangelegd.



Figuur 15.4 Potentie voor geothermie standaard (links) met kunstmatige permeabiliteitstimulatie (midden) en met lagere temperatuur waarbij een warmtepomp nodig is (rechts) op basis van ThermoGIS (uit: Vrijlandt e.a. 2019, ThermoGIS update, European Geothermal Congress 2019, Den Haag, 11-14 juni 2019).

De voorziene sterke groei van alle typen bodemenergiesystemen hebben mogelijk effecten op de kwaliteit van het grondwater. Bij de aanleg van bodemenergiesystemen bestaat er het risico op lekkage bij het doorboren van afsluitende kleilagen in de ondergrond wanneer deze niet goed worden afgedicht. Er kan dan kortsluiting van grondwaterstroming tussen verschillende watervoerende pakketten plaatsvinden. Hierdoor kan er menging optreden van schoon met vervuild grondwater en de kwaliteit negatief beïnvloeden. Dit risico is vooral van toepassing in de ondiepe ondergrond waarbij ondiep verontreinigd grondwater naar diepere lagen kan stromen of in het traject waar dieper brak-zout grondwater omhoog richting zoete watervoerende pakketten stroomt. In het onderzoek 'Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen' (KWR, 2013) en 'Kortsluitstroming bij doorboringen' (TNO, 2022, TNO, 2021) is door middel van analytische en numerieke berekeningen in beeld gebracht wat de effecten van kortsluitstroming kunnen zijn. Uit de berekeningen blijkt dat bij een potentiële slechte afdichting waarbij het aanvulmateriaal over de hele dikte van de doorboorde kleilaag een gemiddelde k -waarde van 1 m/dag heeft (10^{-5} m/dag is vereist voor aanvulmateriaal dat wordt toegepast), er een beperkt effect op kortsluiting is (overgenomen uit Deltafact Geothermie, Cirkel et al., 2022). De risico's lijken hiermee dus mee te vallen. Naast het risico op kortsluiting kunnen ondergrondse open energiesystemen interfereren met vervuild grondwater en kan dit risico's opleveren zoals het verspreiden of verergeren van de vervuiling. De redoxcondities die van belang zijn voor potentiële biologische afbraak, kunnen zodanig veranderen dat de condities voor biologische afbraak verbeteren of juist verslechteren.

Verhoging van de temperatuur van het grondwater door bodemenergiesystemen kan de chemische samenstelling van het grondwater beïnvloeden. Bij de relatief lage toegestane temperaturen bij de gangbare bodemenergiesystemen (25-30°C) zullen de effecten klein zijn. Echter, bij open bodemenergiesystemen die werken met hogere temperaturen (hoge-temperatuuropslag HTO) zijn wel geochemische effecten te verwachten. HTO bevindt zich echter nog in een experimentele fase en wordt momenteel nog weinig toegepast maar vindt mogelijk in de toekomst een vlucht.

De invloed van bodemenergiesystemen op het grondwater is praktisch altijd lokaal. Gesloten systemen verpompen geen water terwijl bij open systemen met een doublet de netto onttrekking of -injectie gelijk is aan nul. Kwantitatief zijn er daarom geen grote veranderingen te verwachten. Er bestaat een klein risico op verslechtering van de grondwaterkwaliteit door slechte afdichting van doorboorde kleilagen en vermenging van schoon met vervuild grondwater. Maar ook deze risico's zullen zich op een lokaal niveau afspelen.

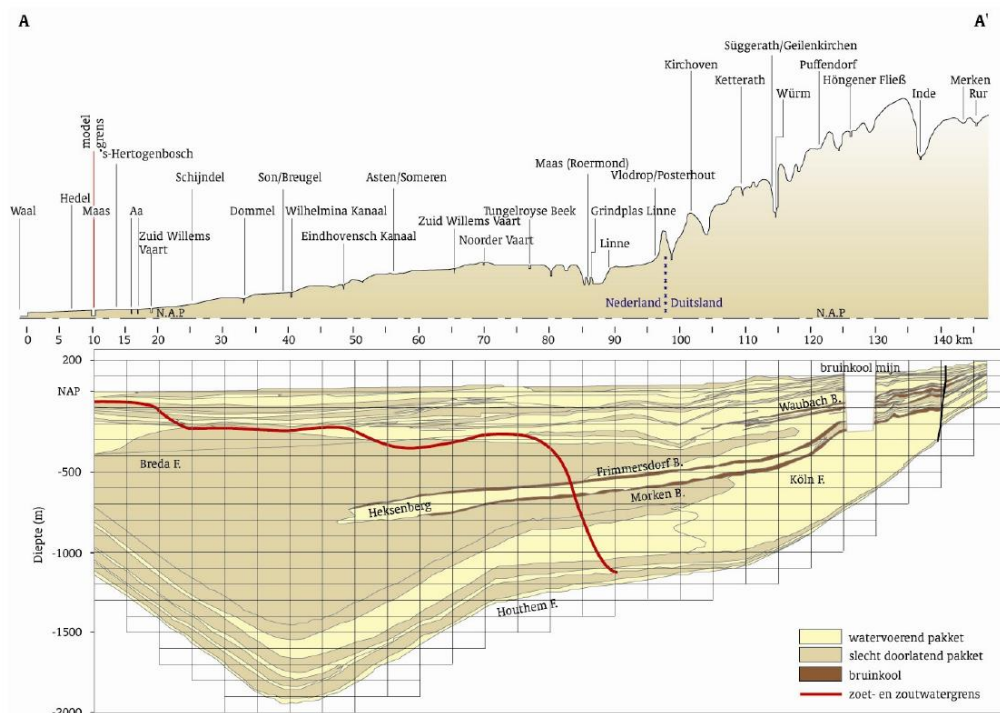
Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: 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.
- Impact op grondwatersysteem: 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 veranderingen van de chemische toestand van het grondwater kunnen een rol spelen.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): Lokale verontreiniging is een risico maar er is geen effect op het DMB-front.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): Bij open systemen waarbij grondwater wordt onttrokken is er risico op zoutwater-opkegeling, dus lokaal het omhoog komen van het ZZ-front.

16 Bruinkoolwinning

Beschrijving processen

In open dagbouw wordt in de zogenaamde Niederrheinische Bucht tussen Keulen, Mönchengladbach en Aken door de Rheinbraun in verschillende groeves bruinkool gewonnen. Hiervoor moet het grondwater plaatselijk honderden meters verlaagd worden (Projectgroep Gevolgen Bruinkoolwinning, 1986). Gemiddeld wordt daarom per jaar 1,2 miljard kubieke meter grondwater onttrokken. De stijghoogteverlagingen die door deze onttrekkingen worden veroorzaakt, planten zich via diepe 'paleogene' spanningswaterpakketten voort tot ver in Limburg en Noord-Brabant. In het dikke pakket van fijne, kleihoudende zanden van de Formatie van Breda komt zo'n aquifer voor, Zanden van Heksenberg genoemd (Figuur 16.1, Stuurman, 2004). Deze "confined" aquifer loopt naar het noorden toe 'dood' maar staat in het zuiden (Duitsland) in open verbinding met ondiepe watervoerende pakketten (o.a. Zanden van Berg) waar de grote grondwateronttrekkingen plaatsvinden om de honderden meters diepe bruinkoolgroeves te bemalen.



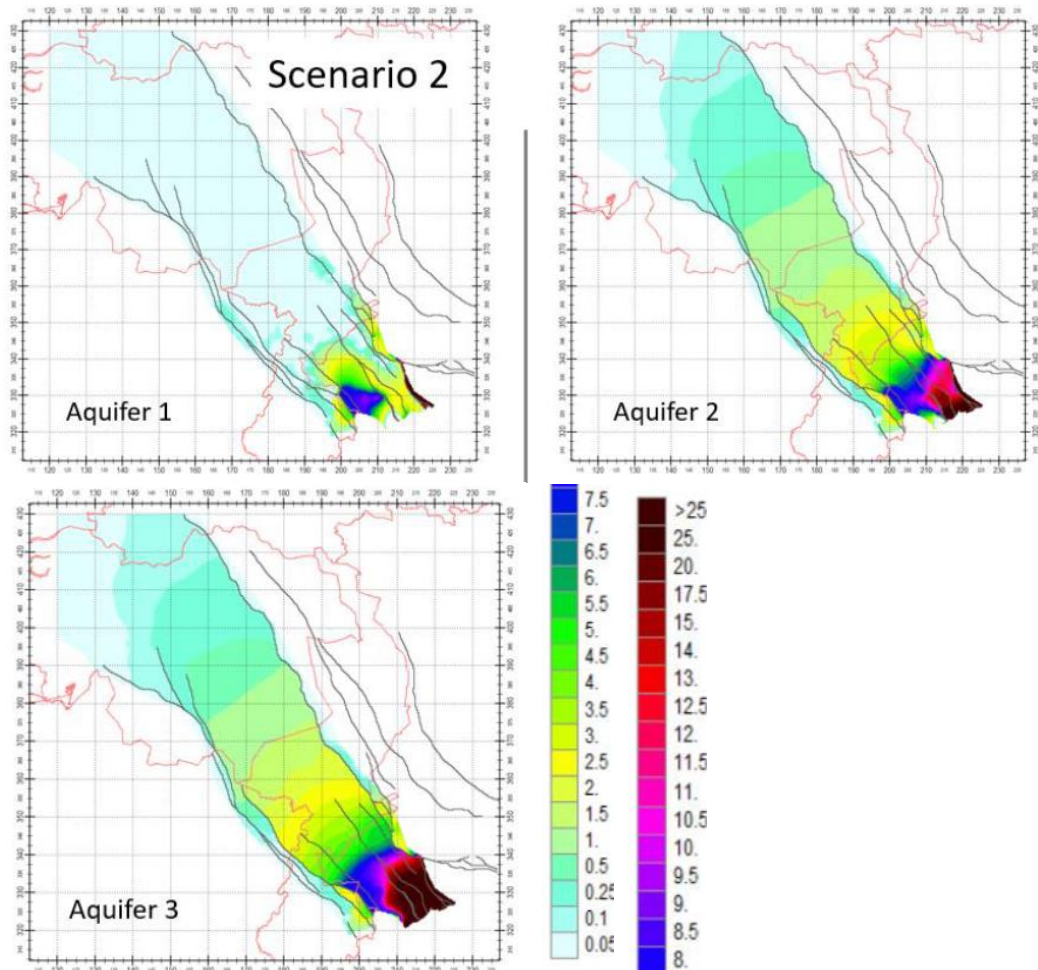
Figuur 16.1 De hydrogeologische schematisatie in een profiel in de lengterichting door de centrale Slenk, tussen Köln en Den Bosch (Stuurman 2004).

In enkele diepe meetpunten in de Zanden van Berg onder de Boomse klei in Noord-Brabant en Limburg zijn vrijwel zeker de effecten van de bruinkoolwinningen terug te zien. Het diepste grondwatermeetpunt van Nederland bevindt zich bij Asten (Noord-Brabant), op ongeveer 1500 m-mv (Stuurman et al., 2004). Ten opzichte van de jaren '80 is de stijghoogte hier met ca 15 meter gedaald. De daling zet zich nu vrij stabiel door met 50-60 cm per jaar. Ook andere diepe meetpunten laten flinke dalingen zien die waarschijnlijk te relateren zijn aan de bruinkoolwinning zoals bij Broekhuizenvorst waar al sinds 1982 de diepe stijghoogten onder de Klei van Boom wordt gemeten. Hier bevindt zich de enige filter in de Venlo Slenk dat zich onder de Klei van Boom, in de Zanden van Berg bevindt. Deze stijghoogte toont sinds de start van de meting een continue daling van ca 50 cm/jaar. Deze daling staat zo goed als

zeker in relatie met de bruinkoolactiviteiten in Duitsland. Omdat de Zanden van Berg onder de Peelhorst ten hoogte van de Peelrandbreuk in horizontaal in contact staan met ondiepe watervoerende pakketten in de Centrale Slenk, is het niet uitgesloten dat deze sterke verlaging de grondwatersituatie in de Centrale Slenk beïnvloedt.

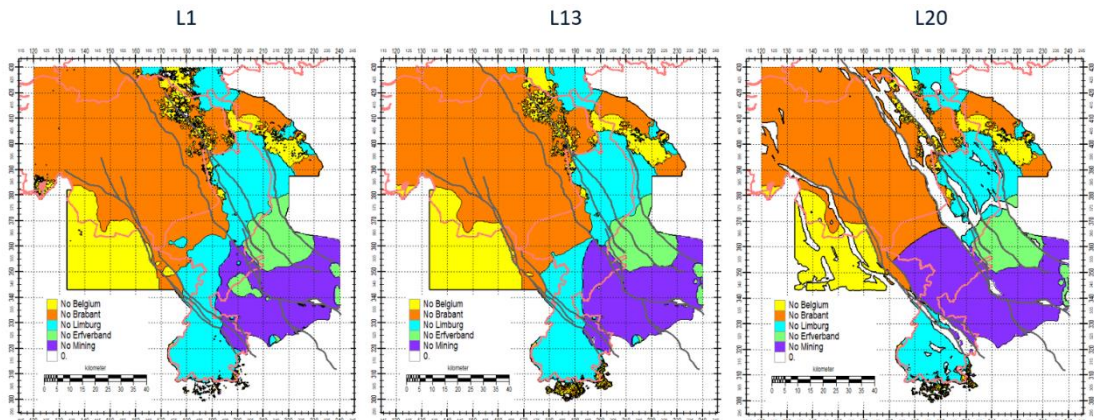
Er zijn verschillende grondwatermodellen opgesteld die de effecten van de bruinkoolwinningen in beeld brengen (NITG-TNO, 1996; NITG-TNO, 2001, Vermeulen en Op den Kelder, 2020). Deze studies tonen aan dat de grondwateronttrekkingen in Duitsland om de diepe open bruinkoolgroeves droog te pompen op zeer grote afstand effect hebben op de diepe stijghoogte in de Paleogene watervoerende pakketten en op de diepe stijghoogte in de Neogene watervoerende pakketten in Noord-Brabant en Limburg.

Figuur 16.2 laat de berekende effecten van de bruinkoolwinning (onttrekkingen) zien voor het freatisch pakket (aquifer 1) en aquifer 2 (zanden van Pey, onder de Waalre Klei) en 3 (Waubach zanden, onder de Brunssum kleien) (Vermeulen en Op den Kelder, 2020). De berekeningen laten zien dat in de Paleogene en Neogene aquifers de effecten van de bruinkoolwinning de gehele Roerdalslenk beslaan, van 4 tot 8 meter in Limburg tot enkele decimeters in de provincie Gelderland in het noorden. De effecten in freatische pakket zijn zeer klein in het Brabantse deel van de Roerdalslenk, in het algemeen minder 1 mm met een maximum van 1.5-2.5 cm in zuidoostelijke deel. In de grensstreek van Limburg worden grote effecten berekend, van rond de 1 meter in de Meinweg tot 2-6 meter in de omgeving van Kerkrade.



Figuur 16.2 Het berekend effect (in m) van de onttrekkingen t.b.v. bruinkoolwinning in aquifer 1 (freatisch), 2 en 3 (Vermeulen en Op den Kelder, 2020).

Figuur 16.3 laat de relatieve bijdrage aan de stijghoogteverlaging zien van de grondwateronttrekkingen van de Bruinkoolwinning, Brabant Water (BW), de Waterleiding Maatschappij Limburg (WML) en Vlaamse onttrekkingen. De figuur laat zien dat de grootste effecten in het freatisch pakket en de aquifer 2 (onder de Waalre klei) door de drinkwaterwinningen (BW en WML) worden veroorzaakt. Alleen dicht bij de grens is de bruinkoolwinning dominant in de stijghoogteverlagingen.



Figuur 16.3 Relatieve bijdrage van verschillende onttrekkingen aan de stijghoogteverlaging in verschillende pakketten, links het freatisch systeem, en midden en rechts diepere watervoerende pakketten. De kaarten tonen de bijdrage van de onttrekkingen van bruinkoolwinningen (paars), Brabant Water (oranje), WML (blauw), Duitse onttrekkingen (groen) en Vlaamse onttrekkingen (geel).

De grondwateronttrekkingen die gepaard gaan met de bruinkoolwinning hebben een significant effect op de diepere watervoerende pakketten waarin de gekarteerde NGRs vallen. Zowel als de onttrekkingen stoppen of doorgaan zullen de NGRs beïnvloed worden. Vanzelfsprekend zullen de stijghoogtes gaan stijgen bij stoppen van de onttrekkingen en bij het continueren van de onttrekkingen verder gestaag dalen met een geschatte snelheid van 0.5 m per jaar. De effecten op het freatische systeem is door de zeer grote weerstand van de bovenliggende kleien klein tot verwaarloosbaar, behalve in de grensstreek in midden- en zuid-Limburg.

Mogelijke effecten op de NGR

- **Belangrijkste processen:** De tot meer dan 400 m diepe bruinkoolgroeves in Duitsland worden drooggemalen waarbij meer dan 1 miljard m³ grondwater wordt weggepompt.
- **Impact op grondwatersysteem:** 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.
- **Impact op NGR bovengrens (DMB-front):** Geen effect op het DMB-front.
- **Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak):** Mogelijk leiden de stijghoogteverlagingen tot een ondieper ZZ-front.

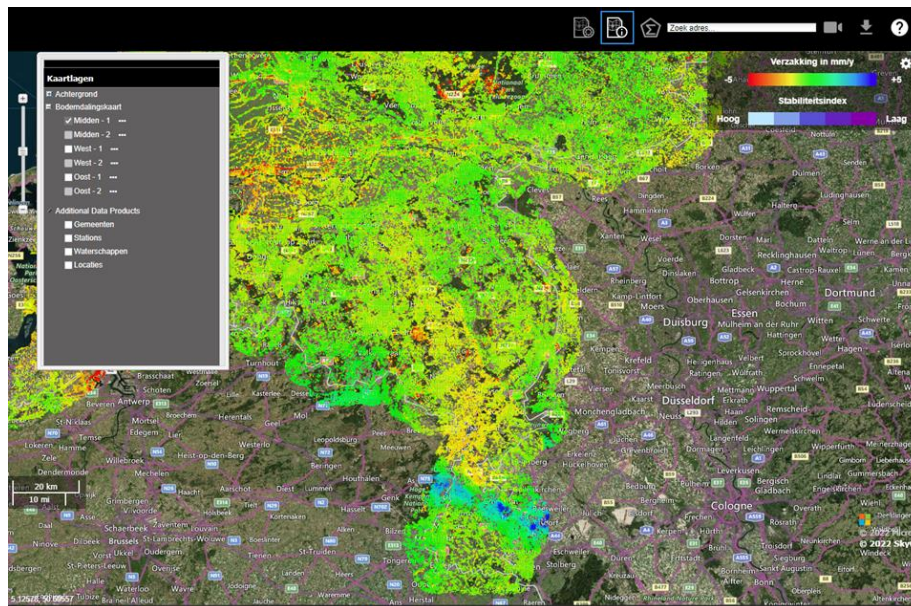
17 Steenkoolmijnen in Limburg

De steenkoolwinning in de provincie Limburg startte in 1900. In vergelijking met buitenlandse koolmijnen waren de Limburgse koolmijnen niet rijk aan water. Om de mijngangen droog te houden werd per jaar gemiddeld 25 miljoen m³ onttrokken. Na het sluiten van mijnen tussen 1967 en 1974 werden mijngangen en schachten deels met o.a. beton afgesloten en werd gestopt met grondwater onttrekken. Hierdoor vulden de mijnschachten weer met grondwater. De mijngangen en schachten bevinden zich op ongeveer 700-800 meter diepte.

Na het sluiten van de mijnen is het maaiveld ter plaatse gemiddeld 25 cm gestegen als gevolg van het herstel van de natuurlijke grondwatersituatie. Het herstel van de grondwatersituatie vindt nog steeds plaats als ook de (lichte) stijging van het maaiveld (Stuurman e.a., 2004). De stijging van het grondwater heeft dus lokaal een grote invloed op het diepe grondwatersysteem.

In Figuur 17.1 staat de actuele bodemdalingsbeweging in mm per jaar weergegeven. Voor het Limburgse mijnengebied kan hieruit worden afgeleid dat momenteel de bodem stijgt met 3 tot 6 mm per jaar.

Het mijnwater is ongeschikt voor drinkwater. Dit wordt mede veroorzaakt door het aanwezige gasen methaan, koolstofdioxide, koolstofmonoxide en waterstofsulfide (Stuurman e.a., 2004).



Figuur 17.1 De bodemdalingssnelheid in mm/jaar o.b.v. meetdata t/m 2020 (blauwe kleuren geven een stijging van de bodem weer). (bron: <https://bodemdalingkaart.nl>)

Mogelijke effecten op de NGR

- Belangrijkste processen: 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.
- Impact op grondwatersysteem: 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.
- Impact op NGR bovengrens (DMB-front): Geen effect op het DMB-front.
- Impact op NGR ondergrens (ZZ-grensvlak): Waarschijnlijk geen effect op het ZZ-front.

18 Effecten van ontwikkelingen op potentiële NGRs samengevat

In voorgaande paragrafen is per ontwikkeling, die in de komende 100 jaar mogelijk gaan plaatsvinden, uiteen gezet wat de mogelijke effecten op het grondwatersysteem zijn. Hoewel de grenzen van de NGRs nog niet vastliggen, zal deze paragraaf kort per ontwikkeling het mogelijke effect op de NGRs samenvatten in Tabel 4.

Allereerst wordt kort 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 effect hebben op het diepere grondwatersysteem.
- Veranderingen en ingrepen in het diepere grondwatersysteem die 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 of aanpassingen aan het watersysteem. Hierbij geldt dat een verhoging van de grondwaterstand (door meer grondwateraanvulling, minder ontwatering, hogere peilen of minder onttrekkingen) leidt tot hogere stijghoogtes in onderliggende pakketten, en vice versa. De doorwerking naar de diepere pakketten is afhankelijk van de hydraulische weerstand tussen het freatische systeem en de onderliggende watervoerende pakketten. In infiltratiegebieden zal een hogere grondwaterstand leiden tot grotere infiltratiefluxen naar de diepere pakketten. Dit zal leiden tot een iets snellere verplaatsing van het door de mens beïnvloed grondwater naar de diepte, en zal daarom de bovengrens van een NGR beïnvloeden. Op dit moment zijn geen berekeningen beschikbaar die inzicht geven in deze versnelling van de verplaatsing van dit front als gevolg van hogere grondwaterstanden. Grotere naar beneden gerichte fluxen kunnen juist ook leiden tot een dieper zoet-zout grensvlak en daarmee tot een vergroting van de NGR. In aangrenzende kwelgebieden waar het grondwater niet wordt verhoogd door de 4D-ontwikkelingen, kunnen omhoog gerichte fluxen worden versterkt, waardoor het zoet-zout grensvlak zich versneld omhoog verplaatst. Dit speelt met name in het laaggelegen kleigebied van Nederland waar diepe droogmakerijen met zoute kwel omringd worden door hoger gelegen infiltratiegebieden. Lagere freatische grondwaterstanden, door bijvoorbeeld bodemdaling, hebben het omgekeerde effect.

Veranderingen die direct ingrijpen op het diepere grondwatersysteem zoals bijvoorbeeld grondwateronttrekkingen of zeespiegelstijging, hebben de neiging een grote invloed te hebben als gevolg van de hydraulische weerstand tussen het freatische en diepere systeem. Hoe groter de weerstand, hoe groter het effect op de stijghoogte in de diepe pakketten en hoe groter de invloed. Daarentegen worden de effecten op het freatische systeem bij een hogere weerstand over een groter gebied uitgespreid en zijn ze op locatie kleiner dan in de situatie wanneer er nauwelijks een weerstand aanwezig is. Onttrekkingen in het diepere grondwatersysteem zullen de stijghoogte verlagen en grondwater van zowel boven als onder aantrekken. De mate waarin is uiteraard afhankelijk van het onttrekkingsdebiet, de geohydrologische opbouw en hydraulische eigenschappen van de ondergrond. Dit betekent dat de bovengrens (front van recent geïnfiltreerd water) van een NGR de neiging heeft zich naar beneden te verplaatsen en de ondergrens (zoet-zout grensvlak) naar boven.

Vervolg fase 2

In de volgende fase worden de geschetste ontwikkelingen nader onder de loep genomen en daar waar mogelijk worden effecten gekwantificeerd met behulp van het Landelijke Hydrologisch Instrumentarium. Hiervoor zullen alleen de ontwikkelingen worden meegenomen die op regionale schaal effect een mogelijk significant effect hebben op de NGR. Op basis van de analyse die in deze rapportage is uitgevoerd, komen de volgende ontwikkelingen in aanmerking.

- Klimaatverandering
- Zeespiegelstijging
- Bodemdaling
- Verandering grondwateronttrekkingen
- Verandering grondwateraanvulling door veranderend landgebruik en stedelijke ontwikkeling (inclusief afkoppelen).
- Herinrichting watersysteem.

Uitbreiding van het diffuus verontreinigingsfront en autonome verzilting zijn direct gerelateerd aan de bovengrens (front door mens beïnvloed grondwater) en de ondergrens (verplaatsing van het zoet-zout grensvlak). Dit zijn autonome processen die afhankelijk van de geschetste ontwikkelingen sneller of minder snel gaan. Bij de kwantificering van de effecten van de ontwikkelingen wordt de verplaatsing van deze bovengrens en ondergrens in beeld gebracht. De geschetste ontwikkelingen kunnen van invloed zijn op de winbaarheid en zullen daarom ook moeten worden meegenomen bij het bepalen van de winbaarheid van de NGRs in component 5.

Tabel 4. Samenvatting van de effecten van de verschillende ingrepen en ontwikkelingen met zichtjaar 2100 op het grondwatersysteem en de boven- en ondergrens van een NGR

---Tabel is te vinden op de volgende pagina's. ---

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-zoet 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. Kerninfiltratiegebieden: 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.
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.

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-zoet grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
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 zoetzout-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 riviereengebied. Ook in Noord-Nederland lijkt de zoutwaterintrusie zich autonoom verder landinwaarts te verplaatsen. Bepaalde processen versterken dit autonomen proces zoals 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/Landaanwinning voor de kust	Landaanwinning wordt uitgevoerd als kustverdedigings-maatregel, 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 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-zoet grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
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.
Uitbreiding diffuus verontreinigingsfront	Dit is de continue neerwaartse verplaatsing van in het verleden verontreinigd grondwater. Geo-chemische 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 geïnfiltrerd.	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	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-zoet grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
		grondwaterafvoer (en daarmee de beekafvoer) neemt af en kwelstromen worden zwakker of verdwijnen.		
Vergroten zoetwater-beschikbaarheid (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 oppervlaktewatersysteem 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 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.

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-zoet grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
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 bodemenergie-systemen 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 veranderingen van de chemische toestand van het grondwater kunnen een rol spelen.	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 zoutwater-opkegeling, dus lokaal het omhoog komen van het ZZ-front.
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.

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-zoet grensvlak, i.e. ZZ-grensvlak)
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.

Referenties

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.

Bootsma, H., Delsman, J., op den Kelder, T., Mulder, N., van der Grift, B., & Ruepert, N. (2020). Brakwaterwinning Middelburg- en Tempelpolder - Technische achtergrondrapport geohydrologische modellering, hydrochemie en schetsontwerp.

Buma, J., M. Kuijper, S. Geurts van Kessel (2017). Grootschalig actief grondwaterpeilbeheer in bebouwd gebied. Deltares-rapport 1230079-001-BGS-0006.

Cirkel, G., J. Dijkstra, M. van Vliet, S. Jansen (2022). Deltafact Mogelijke lange-termijn effecten van grootschalige geothermie op grondwaterkwaliteit. Stowa. [Mogelijke lange-termijneffecten van grootschalige geothermie op grondwaterkwaliteit | STOWA](#)

De Louw, P.G.B. (2013). Saline seepage in deltaic areas. Preferential groundwater discharge through boils and interactions between thin rainwater lenses and upward saline seepage. Vrije Universiteit Amsterdam, Academisch proefschrift, ISBN/EAN 9789461085429.

De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Stuyfzand, P.J., Van der Zee, S.E.A.T.M. (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands. Journal of Hydrology 394, 494-506.

De Louw, P.G.B., Van de Velde, Y., Van der Zee, S.E.A.T.M. (2011a). Quantifying water and salt fluxes in a lowland polder catchment dominated by boil seepage: a probabilistic end-member mixing approach. Hydrology and Earth System Sciences 15, 2101-2117.

De Louw, P.G.B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B.R., Gunnink, J., Van Baaren, S.E., Oude Essink, G.H.P. (2011b). Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. Hydrology and Earth System Sciences 15, 3659-3678.

De Louw, P.G.B., Vandenbohede, A., Werner, A.D., Oude Essink, G.H.P. (2013). Natural saltwater upconing by preferential groundwater discharge through boils, Journal of Hydrology 490, 74-87.

De Louw, P.G.B, Oude Essink, G.H.P., Delsman, J.R., Van Baaren, S.E., America, I. Van Engelen, J. (2019). Het langetermijngeheugen van de zoet-zoutverdeling. In Stromingen 33 (2019), nummer 1.

De Louw, P.G.B. en Bootsma, H. (2020). Nulmeting grondwater Hedwigepolder. Deltares-rapport 1220543-000-BGS-0015.

De Louw, P.G.B., Galvis Rodriguez, S., Visser, M., Doornenbal, P., Pauw, P. (2020). Metingen grondwatersysteem Perkpolder tot december 2018 en werking kwelvoorziening Rapportage meetjaren 2016 – december 2018. Deltares-rapport 1210613-000-BGS-0015.

De Louw, P.G.B., J. Peters, V. Kaandorp & A. Oost (2020). Verkennend rekenen aan grootschalige infiltratie op de Veluwe. H2O – juni 2020.

De Louw, P.G.B. en Schoonderwoerd, E. (2022). Waterdunen monitoring grondwater. Deltares rapport 11203311-001-BGS-0004.

De Louw, P.G.B., Witte, J. P., van den Eertwegh, G. A. P. H., Bartholomeus, R. P., Pouwels, J., & Hunink, J. (2022a). 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. G., Witte, J. P., van den Eertwegh, G. A. P. H. , Pouwels, J. (2022b). Effecten van beregening uit grondwater op het watersysteem tijdens de droogte van 2018. H2O-Online / 3 maart 2022.

Delsman, J.R. (2015). Saline groundwater - surface water interaction in coastal lowlands, PhD thesis VU University Amsterdam, Amsterdam, 194 pp. Academisch proefschrift.

Delsman, J.R., Hu-a-ng, K.R.M., Vos, P.C., de Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Stuyfzand, P.J., Bierkens, M.F.P. (2014). Paleo-modeling of coastal saltwater intrusion during the Holocene: an application to the Netherlands. Hydrology and Earth System Sciences 18, 3891-3905.

Delsman, J., America, I. en Mulder, T. (2022). Grondwaterverziltiging en watervraag bij een stijgende zeespiegel. Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II. Deltares rapport 1120039-009-BGS-0001.

Deltares (2022). Bodem en water als basis. Beslisregels, onderbouwing, kartering. Intern Deltares-rapport 11208014-025-BGS-0001.

Erkens, G., P. de Louw, H. Bootsma, J. Stafleu, J. van den Akker, H. Kooi. (2018). Huidig en toekomstig opbarstrisiko in de provincie Zuid-Holland. Deltares-rapport 11200024-000.

Evans, C.D., Peacock, M., Baird, A.J. et al. (2021). Overriding water Tabel control on managed peatland greenhouse gas emissions. Nature 593, 548–552.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>.

Hoogvliet, M., J. Spijker, W. Noome, E. Slingerland, M. de Groot (2022). Green Paper - Droogte en stedelijk groen.

IenM (Ministerie van Infrastructuur en Milieu), 2014. Beleidsnota Drinkwater. Schoon drinkwater voor nu en later.

Klijn, F., M. Hegnauer, J. Beersma en F. Sperna Weiland (2015). Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren. Rapport van Deltares en KNMI, nummer 1220042-004.

Klimaatakkoord (2019). Klimaatakkoord, Den Haag, 28 juni 2019, 250 pp.
<https://www.klimaatakkoord.nl/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2019/06/28/klimaatakkoord>

Klimaateffectatlas (2022). [Bodemdalingsvoorspellings-kaarten - Klimaateffectatlas](#)

KNMI (2015). KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp.

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

Kuijper, M. and P.G.B. de Louw, Brackish water ecosystem restoration based on integrated water system design. ,Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW / Land Reclamation year: 2007, vol: , number: 38, pages: 115-125.

KWR, IF Technology (2013). Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen. <https://edepot.wur.nl/396258>.

Masterplan Aardwarmte (2018). Masterplan Aardwarmte in Nederland, Een brede basis voor een duurzame warmtevoorziening. Stichting Platform Geothermie, DAGO, Stichting Warmtenetwerk, EBN, <https://geothermie.nl/images/Onderzoeken-en-rapporten/20180529-Masterplan-Aardwarmte-in-Nederland.pdf>

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

Mens, M., Hunink, J.C., Delsman, J.R., Pouwels, J., Schasfoort, F. (2020). Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares rapport 112003734-003, Delft.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2018. Landbouw, natuur en voedsel: waardevol en verbonden – Nederland als koploper in kringlooplandbouw.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2020. Actieprogramma klimaatadaptatie landbouw.

Naber, N., et al. (2016). Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving – update 2016. Delft, CE-Delft. 16.3I28.68.

NOS, 2020. Zo kán Nederland er over 100 jaar uitzien. <https://nos.nl/artikel/2317085-zo-kan-nederland-er-over-100-jaar-uitzien> Geraadpleegd op 14-11-2022.

Oude Essink, G.H.P., Pauw, P.S., Van Baaren, E., Zuurbier, K., De Louw, P., Veraart, J., MacAteer, E., Van Der Schoot, M., Groot, N., Cappon, H., Waterloo, M., Hu-a-ng, K., Groen, M., 2018. GO-FRESH: Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening; Rendabel en duurzaam watergebruik in een zilte omgeving.

Post, V.E.A., (2004). Groundwater Salinization Processes in the Coastal Area of The Netherlands due to Transgressions during the Holocene. PhD thesis, Free University Amsterdam, 138pp.

Pouwels, J. I. America, J. Delsman, M. Mens (2021). Stresstest voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II. Het effect van nieuwe inzichten en onzekerheden op knelpunten in de zoetwatervoorziening. Deltares-rapport 11206829-002-ZWS-0001.

Pouwels, J.R. 2022. Verkenning effecten van twee transitie op landgebruik en hydrologie. Deltares memo.

Projectgroep Gevolgen Bruinkoolwinning, 1986; Modelstudie naar de gevolgen van de bruinkoolwinning in Duitsland voor de grondwaterhuishouding in de Roerdalslenk.

Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (RLI) (2020). Stop bodemdaling in veenweidegebieden: het Groene Hart als voorbeeld. Digitale uitgave. ISBN 978-90-77166-90-1.

Schout, G. M. Bloemendal (2022). Deltafact Effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit. Stowa. [Effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit | STOWA](#)

Stuurman, R.J. & P. Vermeulen, 2000; Cross-border groundwater flow in the Roer Valley Graben. Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO journal InFormation.

Stuurman, R. (2004). Een verkenning naar de interactie tussen diep, paleogeen grondwater en ondiep grondwater in de provincie Noord-Brabant. TNO-rapport NITG 04-222-B0909.

Stuurman, R., B. Goes, P. Stuyfzand (2006). Kartering en meetnetontwerp zoet-brak-zout overgang in het grondwater in Noord-Brabant. TNO-rapport 2006-U-R0074/A.

Stuurman, R., Baggelaar, P., Van Oostrom, N. (2007). Schetsen van het Nederlandse grondwatersysteem in 2050. TNO-rapport 2007-U-R0225/B.

Swartjes, F.A., Hoekstra, N., Verweij, W., Dijkstra, J.J., van Vliet, M.E., van Loon, A.H., Schipper, P., van den Brink, C. (2022). Deltafact Vergrijzing van grondwater. Stowa. [Vergrijzing van grondwater](#)

Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E.A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., ..., & Drösler, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. Ecological Indicators, Volume 109. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>.

TNO (2021). Grondwaterkwaliteitsrisico's van bodemenergiesystemen door doorboren van kleilagen in de Brabantse situatie. TNO rapport 2021 R11454.

TNO (2022). Risicokaart doorboringen, Kennisimpuls water

Van Asselen, S, H. kooi, J.J.H. van den Akker (2019). Deltafact Bodemdaling. Stowa. [Bodemdaling | STOWA](#)

Van der Grift, B., A. Hocking, M. van Vliet, J. Dijkstra, G. Janssen (2022). Geochemisch buffervermogen van de ondergrond. Beschikbare data, 3D modellen en trendanalyse. Kennisimpuls Waterkwaliteit. STOWA-rapportnummer 2022-27, ISBN 978.90.5773.976.7.

Vermeulen, P., T. Op den Kelder (2020). The impact of Groundwater Extractions in the Roer Valley Graben. Deltares-rapport 11204053-002-BGS-0001,

Verweij, W., Passier, H., Hoekstra, N., van den Meiracker, R., Ouwkerk, K., van Loon, A., Swartjes, F., Hartmann, J., van Vliet, M., Dijkstra, J., Bloem, J, Schipper, P., 2022a. Vergrijzing van grondwater: handelingsperspectieven voor de voortschrijdende aantasting van grondwaterkwaliteit door menselijke invloeden – Eindrapport van het KIWK-project grondwater. Kennisimpuls Waterkwaliteit. KIKW 2022-23. STOWA-KIWK 2022-23 eindrapport grondwater.pdf

Vos, P.C., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T., Van der Meulen, M.J. (2011). Atlas van Nederland in het Holoceen. Amsterdam, 93 pp.

VU, 2017, Actualisering landgebruiksimulatie Deltascenario's; Achtergronddocument bij Ruimtescanner inzet. Spinlab Research Memorandum SL-12.

Wolters, H.A., G.J. van den Born, E. Dammers, S. Reinhard, 2018, Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017, Deltares, Utrecht

Bijlage 1 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
GBES	Gesloten bodemenergiesystemen
GL, GH	Klimaatscenario's Gematigd lage waarde en Gematigd hoge waarde
GHG	Gemiddelde Hoge Grondwaterstand
GLG	Gemiddelde Lage Grondwaterstand
GVG	Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand
Go-Fresh	GO-FRESH (Geohydrological Opportunities Fresh Water supply) is een Kennis voor Klimaat (KvK) project in de Zuidwestelijke Delta
HDDW	Horizontal Directional Drilled Wells
HTO	Hoge temperatuuropslag
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWA	Klimaatbestendige Wateraanvoervoorziening West-Nederland
KWO of WKO	Koude-warmteopslag
KRW	Kaderrichtlijn Water
LG3	Laagste eenjarig grondwaterstand in LHM
LHM	Landelijk Hydrologische Model. De landelijke toepassingen van het NHI (Nederlands Hydrologisch Instrumentarium)
MAR	Managed Aquifer Recharge
MT-polder	Middelburg-Tempelpolder
NGR	Nationale Grondwater Reserves; Zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit
OBES	Open Bodemenergiesystemen
RCP	Representative Concentration Pathways: Dit zijn enkele scenario's die de ontwikkeling van broeikasgassen beschrijven
RWZI	Rioolwaterzuiveringen
SEAWAT	Computer programma om drie-dimensionale variabele dichtheidsstroming te berekenen, bijvoorbeeld voor zoet, brak en zout grondwater.
STRONG	Structuurvisie Ondergrond

ThermoGIS	Openbaar, web-based geografisch informatie systeem dat de regionale potentie van geothermie weergeeft in Nederland aan hand van een aantal kaarten van de ondergrond.
VEWIN	Vereniging van drinkwaterbedrijven in Nederland
WVP	Watervoerendpakket
W _L en W _H	Klimaatscenarios Warm lage waarde en Warm hoge waarde
ZZ-grensvlak	zoet-zout of zoet-brak grensvlak