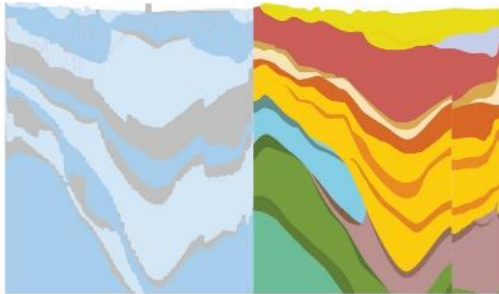


3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit

Deelrapportage 1 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves



3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit
Deelrapportage 1 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves

Auteur(s)

Jelle Buma (TNO)

Joost Delsman (Deltares)

Tess Davids – op den Kelder (Deltares)

Gijs Janssen (Deltares)

Partners

TNO

Deltares

2 van 63	3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit 11207846-002-BGS-0004, 22 februari 2023, definitief TNO 2023 R10885
----------	--



3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit

Deelrapportage 1 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves

Opdrachtgever	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Contactpersoon	Mirjam Post
Referenties	Kenmerk: 31174433, Referentie: 4500329490
Trefwoorden	NGR, drinkwatervoorziening, 3D-kartering

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	12-04-2023
Projectnummer	11207846-002
Document ID	11207846-002-BGS-0004 TNO 2023 R10885
Pagina's	63
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Jelle Buma (TNO)
Joost Delsman (Deltares) Tess Davids – op den Kelder (Deltares) Gijs Janssen (Deltares)

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

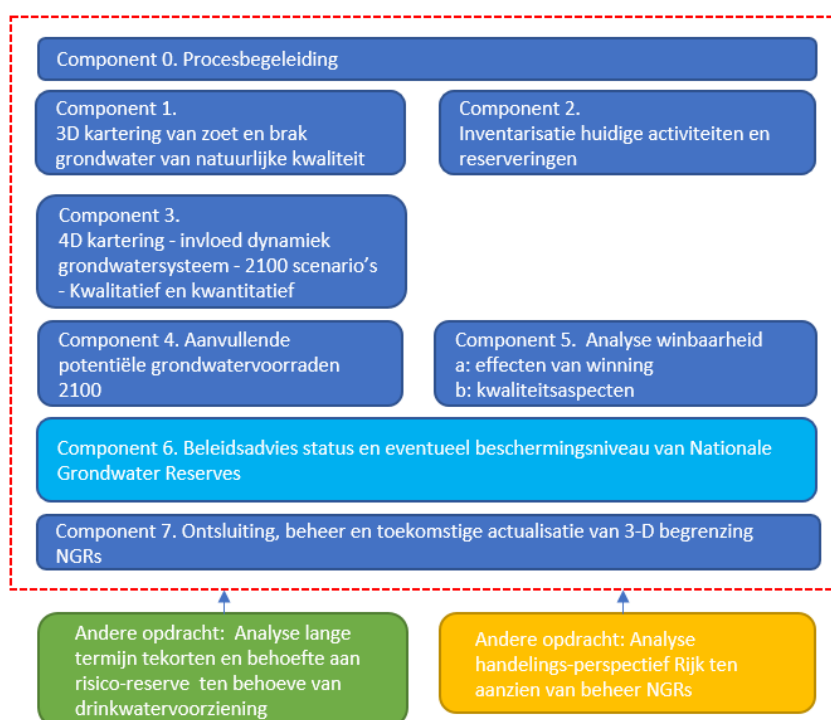
Doc. Versie	Auteur	Review	Akkoord
0.1	Jelle Buma (TNO)	Mariëlle van Vliet (TNO)	Denise Maljers (TNO)
	Joost Delsman (Deltares) Tess Davids – op den Kelder (Deltares) Gijs Janssen (Deltares)		



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 Waterstaat opdracht gegeven aan Deltares en TNO om een gedetailleerd 3D-beeld van de NGRs uit te voeren. Het project is opgedeeld in 8 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 het begeleidende rapport van component 1 van het project “3D-kartering Nationale Grondwater Reserves”. Component 1 heeft als doel een 3D-kartering uit te voeren van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit voor heel Nederland. Deze 3D-kartering levert enkele van de bouwstenen op voor het bestuurlijke proces rondom de eventuele begrenzing van Nationale Grondwater Reserves in Nederland. De bouwstenen zijn 3D-beelden van karakteristieken van de ondergrond die relevant zijn voor het begrenzen van de NGRs, zoals hydrologische karakteristieken, chloride concentraties, ouderdom van het grondwater en fluxen. Ook wordt aandacht besteed aan de grootte van de onzekerheden van de gekarteerde eigenschappen.

De resultaten van de 3D-kartering zijn beschikbaar via een [online viewer](#).¹
Een beknopte handleiding bij de viewer is te vinden in hoofdstuk 5 van dit rapport. 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).

¹ <https://portal.gdngeoservices.nl/arcgis/home/webmap/viewer.html?webmap=084db90960db4b8e871a3159e44ef151>

5 van 63	3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit 11207846-002-BGS-0004, 22 februari 2023, definitief TNO 2023 R10885
----------	--



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding en context	8
1.2	Werkwijze in het kort	9
1.2.1	Methode	9
1.2.2	Proces	10
1.3	Leeswijzer	11
2	Gekarteerd gebied	12
2.1	Laterale begrenzing LHM 4.2	12
2.2	Ondergrens	12
2.2.1	Eenheden aan de basis van het LHM	12
2.2.2	Doorlatendheden onder het LHM	16
2.2.3	Conclusies t.a.v. ondergrens NGR 3D-kartering	18
3	Gekarteerde eigenschappen van de ondergrond	19
3.1	Geometrie van watervoerende en scheidende lagen	19
3.2	Doorlaatvermogen (KD) en verticale weerstand (c-waarde)	19
3.3	Doorlatendheid (K)	20
3.4	Chloridegehalte	20
3.5	Reistijd vanaf maaiveld	21
3.6	Verticale grondwaterfluxen	23
4	Onzekerheden	24
4.1	Inleiding	24
4.2	Onzekerheidsinformatie vanuit de modellen	24
4.2.1	KD en c	24
4.2.2	Chloridegehalte grensvlakken	25
4.2.3	Reistijd vanaf maaiveld	26
4.3	Onzekerheidsinformatie vanuit regionale gegevens	28
4.3.1	Chloridegehalten in de Roerdalslenk	28
4.3.2	Vergelijking berekende reistijden met dateringen bij winlocaties	28
4.4	Onzekerheid aan de ondergrens: invloed breuken op verticale weerstand	32
5	De data viewer: toelichting	33
5.1	Toegang	33
5.2	Kaarten in de viewer	33

6	Gebruik van de resultaten	35
6.1	Van LHM-modellagen naar watervoerende pakketten	35
6.2	Een vingeroefening in het gebruik van de resultaten	35
6.2.1	Doel en werkwijze	35
6.2.2	Voorbeeldresultaten	36
7	Conclusie	42
8	Referenties	43
9	Ondertekening	45
	Bijlage 1 Dwarsprofielen grensvlakken chloride	46
	Bijlage 2 Veranderingsrapportage LHM zoet zout versie 4.1.2	59
	Bijlage 3 Onderbouwing bandbreedten porositeit voor reistijdberekeningen	60
	Bijlage 4 Begrippenlijst	63

1 Inleiding

1.1 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 1: 3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit.**

De relatie tussen de verschillende componenten

De resultaten van de andere componenten van dit project worden in afzonderlijke deelrapporten beschreven.

In *Component 1 (dit rapport)* 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* 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 1.2.2). *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.

1.2 Werkwijze in het kort

1.2.1 Methode

In deze component wordt een 3D-kartering uitgevoerd van 'zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit'. Het gaat hierbij zowel om zoete als brakke voorraden. Momenteel verkennen enkele drinkwaterbedrijven immers al de mogelijkheden om brak water in te zetten als bron voor drinkwater en deze ontwikkeling zal naar verwachting doorzetten.

De 3D-kartering is uitgevoerd volgens een vergelijkbare methodiek zoals gehanteerd in de rapportage 'Een aanzet voor de begrenzing van Nationale Grondwater Reserves' (Broers et al., 2015) en de aanbevelingen die de auteurs in dat rapport doen, en op basis van de huidig (2022) beschikbare kennis en informatie. Het gaat hierbij echter niet om een actualisatie van de NGRs uit 2015, maar om een volledige herkartering, waar in principe dus ook andere gebieden uit naar voren kunnen komen.

Het resultaat van deze 3D-kartering is niet de begrenzing van NGRs: dat is een bestuurlijk proces. De 3D-kartering levert de bouwstenen voor dat bestuurlijke proces, in de vorm van 3D-beelden van karakteristieken van de ondergrond die relevant zijn voor het begrenzen van de NGRs. Deze bouwstenen worden in een online viewer gepresenteerd in een aantal kaartbestanden, zie Hoofdstuk 5 voor de link naar de viewer en een korte uitleg van de bestanden.

De basis voor de 3D-kartering wordt gevormd door de landelijke modellen en datasets LHM versie 4.2, het NHI 3D chloridebestand en een voor dit project aangepaste versie van het LHM zoet-zout model versie 4.1. Deze modellen c.q. datasets bevatten gebiedsdekkende informatie over de te karteren eigenschappen van de ondergrond. Korthedshalve zullen

hiernavolgend de genoemde landelijke modellen c.q. datasets worden aangeduid met de term ' NGR-basismodellen'. Aanvullend daarop zijn regionale gegevens verwerkt in met name, maar niet uitsluitend, ruimtelijke beelden van onzekerheden van die eigenschappen.

Voor LHM 4.2 is het landelijke hydrogeologische model BRO REGIS II v2.2 gebruikt als basisbestand voor de lithostratigrafische en geohydrologische karakterisatie van de ondergrond. Aanvullend daarop is betere of gedetailleerdere informatie uit de destijds actuele versie van BRO GeoTOP (v1.3) en uit regionale modellen opgenomen. De genoemde BRO-modellen fungeren dus impliciet als basis voor de NGR-kartering. Voor aanvullende hydrogeologische analyses ten behoeve van de NGR-kartering is daarnaast informatie uit de landelijke, maar niet in de BRO ondergebrachte modellen DGM-diep versie 5.0, ThermoGIS versie 2.2, en de regionale H3O-modellen Roerdalslenk, De Kempen, Roerdalslenk Noordwest en ROSE gebruikt.

Er is dus gekozen om landelijke modellen in te zetten voor de NGR-kartering. In het voortraject van de NGR kartering, in 2021, is met het Rijk en de regionale partners besproken dat het te arbeidsintensief zou worden om een landelijke kartering te doen op basis van meerdere regionale modellen. Tijdens de uitvoering van de NGR 3D-kartering is wel geïnventariseerd welke regionale informatie aanvullend mee zou moeten worden genomen. Vanwege de wijze en timing van de beschikbaarstelling van deze informatie is deze niet rechtstreeks verwerkt in de NGR-kaartlagen, maar gebruikt in een beschouwing van onzekerheden daarvan (zie hoofdstuk 4)

1.2.2 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 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) ook zorg voor informatievoorziening op bestuurlijk niveau via het Bestuurlijk Overleg Water ter voorbereiding van de uiteindelijke besluitvorming.

1.3 Leeswijzer

De 3D-kartering kent een aantal aspecten die achtereenvolgens worden behandeld in deze rapportage. Keuzes die gaandeweg het project zijn gemaakt, worden toegelicht. Het betreft achtereenvolgens:

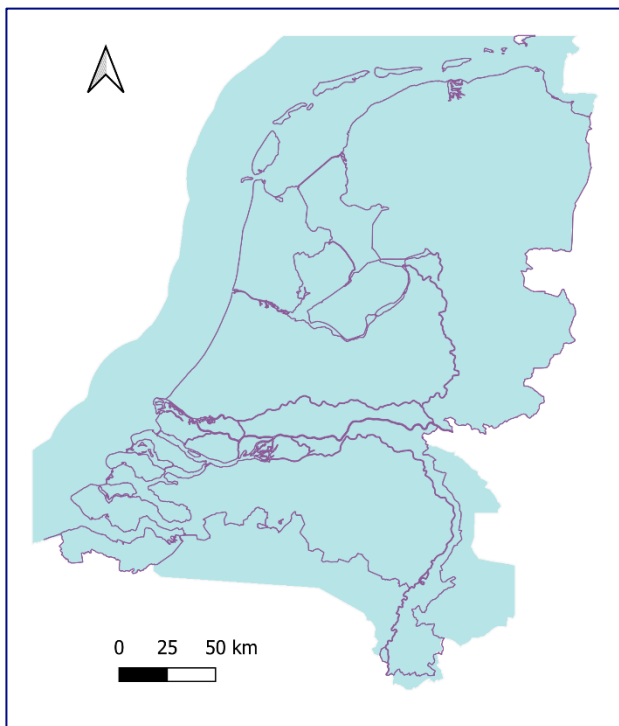
- het gekarteerde gebied (lateraal bereik en diepte) in hoofdstuk 2;
- de gekarteerde eigenschappen van de ondergrond, en welke informatiebronnen daarvoor zijn gebruikt, in hoofdstuk 3;
- kwantificering van onzekerheden rond de gekarteerde eigenschappen, voor zover dit mogelijk was, in hoofdstuk 4.

Het rapport besluit in hoofdstuk 5 met een beknopte handleiding voor toegang tot de online viewer waarin de resultaten van de 3D-kartering zijn opgenomen die mede tot stand zijn gekomen met inbreng uit de werksessies, en een toelichting van de kaarten die in de viewer zijn opgenomen.

2 Gekarteerd gebied

2.1 Laterale begrenzing LHM 4.2

Voor de kartering is gebruik gemaakt van het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) versie 4.2 (Janssen et al., 2022). Dit model is opgebouwd uit acht watervoerende lagen (aquifers) en zeven scheidende lagen (aquitards) boven een geohydrologische basis. De horizontale ruimtelijke resolutie van het LHM is 250 m bij 250 m per modelcel. De laterale begrenzing van LHM 4.2 vormt ook de begrenzing van de NGR kartering. LHM 4.2 omvat geheel Nederland inclusief de Noordzee binnen de 12-mijlszone, en een aantal Duitse en Vlaamse gebiedsdelen die zijn toegevoegd vanuit de projecten H3O-Roerdalslenk, H3O-De Kempen en het IBRAHYM-Roerdalslenk model (zie Figuur 2). Het voordeel van LHM 4.2 is dat het landsdekkend beschikbaar is. Desondanks wordt erkend dat LHM 4.2 waarschijnlijk niet de kwaliteit of het detailniveau kan bereiken van bestaande regionale hydrologische modellen.



Figuur 2. Laterale begrenzing LHM 4.2

2.2 Ondergrens

2.2.1 Eenheden aan de basis van het LHM

Zoals in de vorige paragraaf toegelicht valt het NGR-karteerdomein in laterale zin samen met het LHM versie 4.2. Ter bepaling van een bruikbare ondergrens voor de NGR-kartering, is een analyse uitgevoerd van de ondergrond onder het LHM. Ondergrens is hier gedefinieerd als het niveau waaronder zeker geen Nationale Grondwater Reserves aangewezen zullen worden. Tijdens de werksessie van 10 mei 2022 is door meerdere deelnemers (klankbordgroep) gepleit voor een structurele definitie van de basis, in de vorm van een afsluitende kleilaag. Het idee hierachter is dat een kleilaag statisch is, in tegenstelling tot

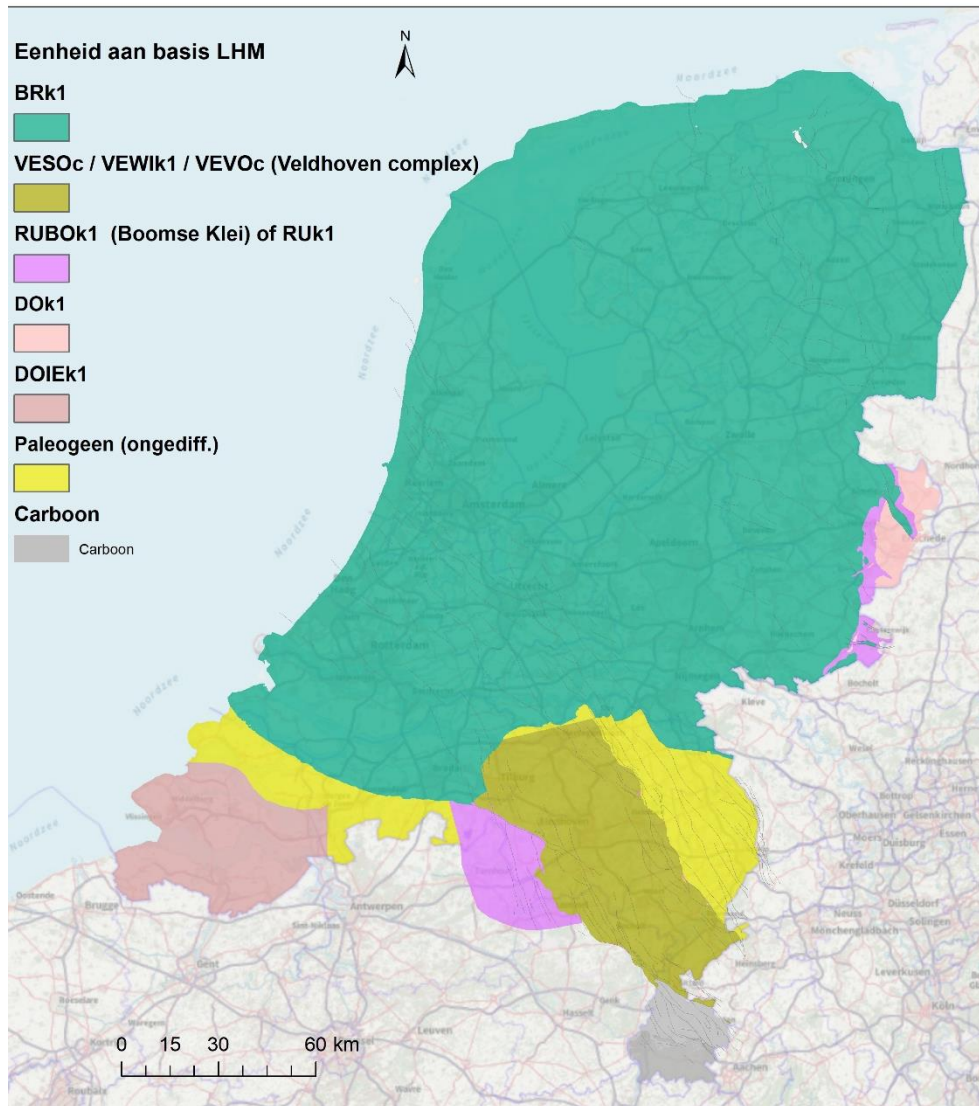
bijvoorbeeld een zoet-zout grens die in de tijd kan opschuiven. Een kleilaag is daarom geschikter om een stuk ondergrond af te bakenen als wel of geen NGR. Daarnaast heeft een afsluitende kleilaag een beschermende functie tegen ongewenste invloeden van onderaf, ten behoeve van NGRs die daar direct boven liggen.

Met behulp van GIS-bestanden, die zijn gebruikt voor de koppeling tussen REGIS II v2.2 eenheden en LHM 4.2 modellen, is nagegaan welke eenheden op het Nederlandse grondgebied aan de basis van het LHM aanwezig zijn. Indien die basis niet uit een kleiige eenheid bestaat, is vastgesteld welke eenheden aan de basis van het LHM aanwezig zijn of daar direct onder. Vervolgens wordt een analyse gemaakt van de doorlatendheid onder die kleiige eenheden.

De eenheden aan de basis van het LHM zijn enerzijds kleiige eenheden die zijn opgenomen als de geohydrologische basis (ondoorlatende onderkant) van het LHM. In delen van Zuid-Nederland zijn geen kleiige eenheden gedefinieerd als de geohydrologische basis; hier wordt de basis van het LHM gevormd door de eerste zandige eenheid van de Formatie van Breda (BRz1). In dit deel van Nederland kon voor de Roerdalslenk en de Kempen met behulp van de resultaten van de H3O-projecten worden bepaald welke kleiige of complexe eenheden direct onder de LHM-basis liggen. In de gebieden daarbuiten is dit bepaald met behulp van DGM-diep versie 5.0, echter niet op het niveau van geologische formaties of laagpakketten, maar op het minder gedetailleerde niveau van geologische groepen.

Het resultaat van de analyse is weergegeven in Figuur 3. In de figuur kunnen verschillende deelgebieden worden onderscheiden op basis van de verbreidingen van kleiige eenheden, de breuken aan weerszijden van de Roerdalslenk, de karteergrenzen van REGIS II v2.2 en de reeds uitgevoerde H3O-projecten (Roerdalslenk, De Kempen, Roerdalslenk Noordwest en ROSE). Deze deelgebieden worden onderstaand beschreven.





Figuur 3. Eenheden aan of direct onder de basis van het LHM (Uitleg van de legenda eenheden wordt in de hoofdttekst gegeven).

- In Noord-, Midden- en West-Nederland vormt de eerste kleiige eenheid van de Formatie van Breda (BRk1) de basis van het LHM. Met uitzondering van de zuidelijke en oostelijke randen van het verbreidingsgebied is deze kleiige eenheid tientallen tot honderden meters dik en heeft ze een weerstand van tienduizenden tot honderdduizenden dagen. Dit is de reden dat deze eenheid ook in andere geohydrologische studies als (model)basis wordt gehanteerd. De Formatie van Breda dateert uit het Mioceen, het oudste tijdvak van het Neogeen.
- In de oostelijke delen van Twente en de Achterhoek is de REGIS II v2.2 kartering uitgevoerd tot en met het Paleogeen, omdat deze lagen hier relatief dicht aan maaiveld liggen. De LHM-basis wordt hier gevormd door de eerste kleiige eenheid van de Rupel Formatie (RUK1) of de eerste kleiige eenheid van de Formatie van Dongen (DOK1), beide van Paleogene ouderdom. Waar deze niet aanwezig zijn, liggen gesteenten van Mesozoïsche ouderdom aan de LHM-basis. Deze zijn niet gekarteerd in BRO REGIS II v2.2, maar vanuit regionale studies is over deze eenheden wel hydrogeologische informatie beschikbaar. Een voorbeeld hiervan zijn de lokale aquifers in de Bentheimer en Gildehauser Zandsteen (Onder-Krijt), in het door breuken en plooiingen hydrogeologisch complexe oosten van Twente.

Plaatselijk ligt keileem (DRG1k1) direct op deze gesteenten en is daar onderdeel van de LHM-basis.

- Op Schouwen, Tholen en in West-Brabant is BRk1 niet meer aanwezig, de basis van het LHM wordt hier gevormd door Paleogene gesteenten. Er is geen nader onderscheid te maken, omdat hier (nog) geen hydrogeologische karterinformatie van eenheden onder de LHM-basis beschikbaar is op het detailniveau van REGIS II v2.2. In deze gebieden is vanuit DGM-diep bekend dat de Paleogene gesteenten uit de Midden- en Onder-Noordzee groepen samen enkele honderden meters dik zijn. Na afronding van het momenteel lopende project H3O-De Voorkempen kan in West-Brabant wel worden vastgesteld welke kleiige eenheden aanwezig zijn aan of direct onder de basis van het LHM.
- Het bovenstaande geldt ook voor de Peelhorst, de Venloschol en een smalle strook langs de noordgrens van Noord-Brabant. Na afronding van het momenteel lopende project H3O-Peelhorst & Venloslenk zal het maken van een nader hydrogeologisch onderscheid daar wel mogelijk zijn.
- Op Walcheren, Beveland en in Zeeuws-Vlaanderen is de REGIS II v2.2 kartering uitgevoerd tot en met het Paleogeen omdat deze lagen hier relatief dicht aan maaiveld liggen. Het Laagpakket van Ieper van de Formatie van Dongen (DOIEk1) vormt hier de LHM-basis. Deze kleiige eenheid van Paleogene ouderdom is hier 100 tot 200 meter dik. Deze kleilaag heeft in het gekarteerde gebied volgens REGIS II v2.2 een weerstand van meer dan een miljoen dagen.
- Op het Kempisch Plateau is in het kader van het project H3O-De Kempen (Vernes et al., 2018) gekarteerd tot de basis van het Paleogeen. De Boomse Klei (RUBOk1) ligt aan de basis van het LHM, met plaatselijk daar bovenop nog dunne, uitwiggende eenheden behorende tot de Formatie van Veldhoven. In het tectonisch blok ten westen van de Veldhovenbreuk, dat ook nog gerekend wordt tot het Kempisch Plateau, is deze formatie enkele honderden meters dik. De Boomse Klei heeft in het Nederlandse deel van het Kempisch Plateau een dikte van meer dan 100 m. De weerstand van de Boomse Klei in de Kempen is niet bekend. In Zeeland is volgens REGIS II v2.2 de weerstand meer dan een miljoen dagen. Op basis van gegevens uit H3O-PLUS (Vernes et al, 2021) is voor het H3O-ROSE gebied een verticale weerstand van circa 0,01 m/d aangehouden (geometrisch gemiddelde op basis van expert range minima en maxima). Er van uitgaande dat deze laag continu voorkomt zou dit bij een dikte van 100 meter een weerstand in de orde van grootte van tienduizend dagen betekenen. Al met al is de indruk dat de Boomse Klei in de Kempen als afsluitend kan worden beschouwd. De weerstand van de Formatie van Veldhoven wordt bij het deelgebied Roerdalslenk besproken.
- Ook in de Roerdalslenk is gekarteerd tot de basis van het Paleogeen, in dit geval in het kader van de projecten H3O-Roerdalslenk en H3O-Roerdalslenk Noordwest (Deckers et al., 2014 en Vernes et al., in voorbereiding). Ook in de Roerdalslenk ligt aan de basis van het LHM een enkele honderden meters dik pakket complexe en kleiige eenheden van de Formatie van Veldhoven, met daaronder de Boomse Klei die hier een gekarteerde dikte heeft van enkele tientallen meters in Limburg tot meer dan 100 m in Noord-Brabant. Het is aannemelijk dat deze laag ruimtelijk continu voorkomt, en dan zou de hiervoor genoemde verticale weerstand afkomstig uit H3O-PLUS (Vernes et al, 2021) in de orde van grootte van enkele duizenden tot meer dan tienduizend dagen zijn. De Formatie van Veldhoven omvat van oud naar jong achtereenvolgens de laagpakketten van Voort (VEVOc), Wintelre (VEWIk1) en Someren (VESOc). VEWIk1 is een kleiige eenheid die in de Roerdalslenk een gekarteerde dikte heeft van enkele tientallen tot enkele honderden meters. In Nederland is voor deze eenheid geen REGIS II v2.2 parametrisatie beschikbaar. Wel zijn vanuit H3O-PLUS 'expert range' waarden voor VEWIk1 beschikbaar, waarvan het geometrische gemiddelde uitkomt op $1,0 \cdot 10^{-3}$ m/d (Vernes et al, 2021). Gezien de gekarteerde dikte is een verticale weerstand van vele duizenden dagen aannemelijk,

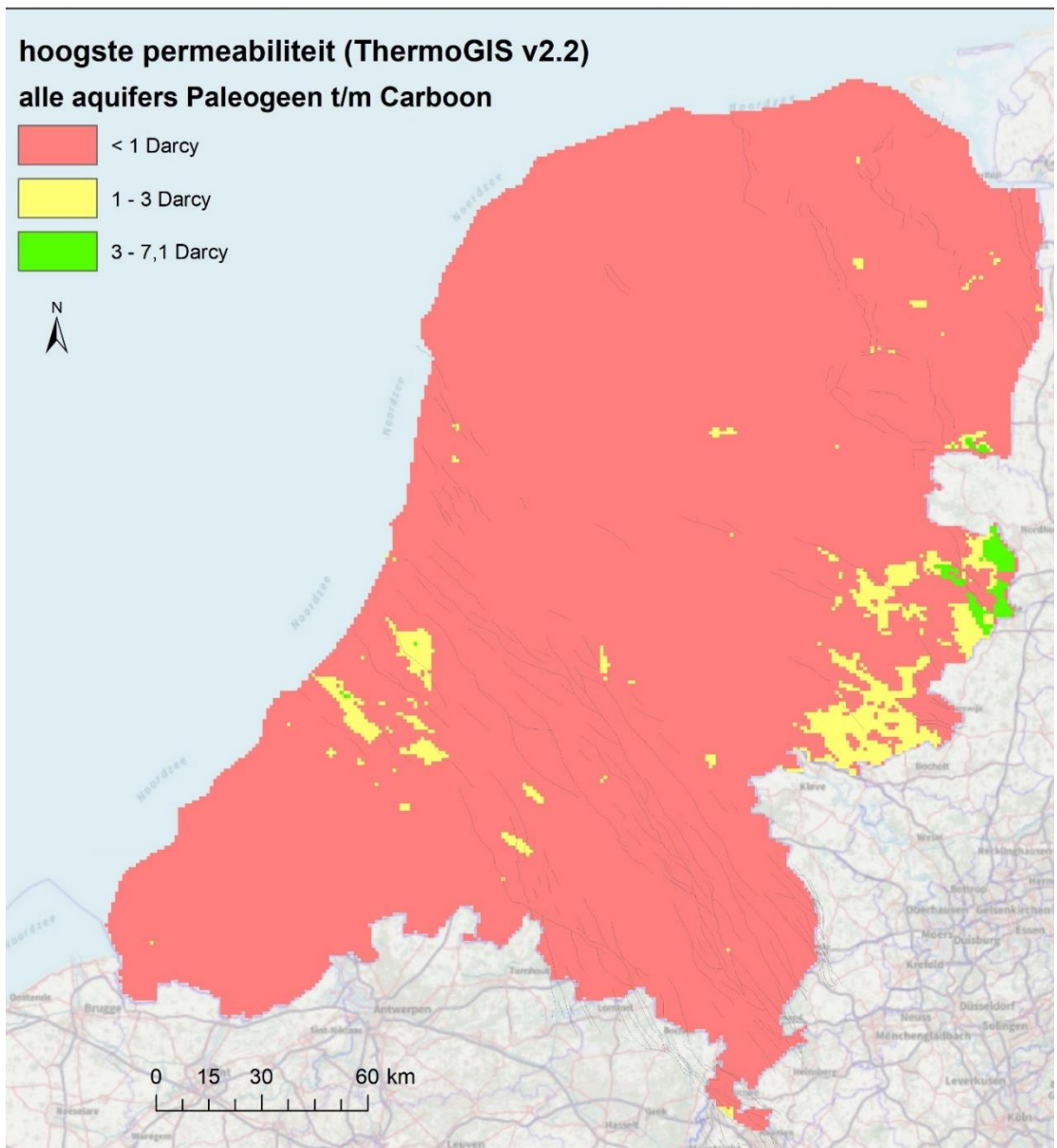
al is niet veel bekend over de continuïteit van de klei. VEVOc en VESOc zijn complexe eenheden waarvoor uit ThermoGIS (www.thermogis.nl, webportaal ter ondersteuning van de ontwikkeling van winning van aardwarmte uit de Nederlandse ondergrond) wel Kh-waarden af te leiden zijn in de orde van grootte van maximaal 1 m/d, maar geen kv waarden. Ten behoeve van de ondergrondschematisatie van IBRAHYMv3 (Zaadnoordijk et al., 2022) is uit pragmatische overwegingen een anisotropiewaarde van 0,1 aangehouden, waarmee de Kv uitkomt op 0,1 m/d.

- In Zuid-Limburg is in het kader van REGIS II v2.2 dieper gekarteerd dan BRK1. Daardoor omvat ook het LHM hier zowel de Paleogene Midden- en Onder-Noordzeegroepen als de daaronder gelegen Krijtkalkgroep. Aan de basis van de Krijtkalkgroep liggen gesteenten uit het Carboon, voornamelijk uit de Limburg Groep maar mogelijk richting de grens met Wallonië ook de Kolenkalk Groep. Dit laatste is niet goed bekend omdat DGM-diep hier niet dieper reikt dan de Krijtkalk Groep. Uit Wallonie is bekend (Ruthy & Dassargues, 2009) dat lokaal wordt onttrokken uit de Kolenkalk Groep, maar zowel de laterale verbreiding als het doorlaatvermogen van deze aquifers lijken beperkt. Voor het overige wordt het Boven-Carboon beschouwd als geohydrologische basis. In het voormalige mijngebied zijn in de top van het Boven-Carboon tal van mijngangen aanwezig, en is het grondwater mogelijk verontreinigd door historische mijnactiviteiten.

2.2.2 Doorlatendheden onder het LHM

Uit het bovenstaande volgt dat de ondergrond aan de basis van het LHM in een groot deel van Nederland bestaat uit kleiige afzettingen met een aanzienlijke dikte en verticale weerstand. Op grotere diepte, en in de Roerdalslenk direct aan de basis van het LHM (VESOc) zijn echter complexe eenheden of aquifers aanwezig waarvoor in ThermoGIS versie 2.2 permeabiliteiten (intrinsieke k-waarden) zijn afgeleid. Om een beeld van deze permeabiliteiten te krijgen is een analyse uitgevoerd van de maximale doorlatendheid die voorkomt onder het LHM in het bereik van VESOc aan de bovenkant tot het Carboon aan de onderkant en ongeacht in welke aquifer deze voorkomt. Uit de analyse blijkt dat nergens een permeabiliteit hoger dan 7,1 Darcy voorkomt (Figuur 4). Onder hydrostatische druk en bij 20°C is dit een doorlatendheid van ruim 6 meter per dag (Duggal & Soni, 1996). Uit de figuur blijkt verder dat ook een permeabiliteit van 3 tot 7,1 Darcy (2,5 m/d bij 20 °C) nergens wordt gehaald met uitzondering van delen van Twente.





Figuur 4. Maximale permeabiliteit die voorkomt onder het LHM (bron: ThermoGIS v2.2). Een Darcy komt overeen met ongeveer 0,8 m/d bij 20 graden Celsius.

Aan de basis van het LHM zijn over het algemeen grote verticale weerstanden aanwezig, en in de daaronder aanwezige aquifers komen te lage doorlatendheden voor om ze geschikt te maken voor drinkwaterwinning. Dit maakt de ondergrens van het LHM ook een geschikte ondergrens voor de NGR 3D-kartering. De volgende kanttekeningen zijn hierbij te maken:

- Als gevolg van een hogere grondwatertemperatuur bij toenemende diepte neemt de doorlatendheid toe met ruwweg een factor 2 per kilometer diepte. Dit verandert bovenstaande conclusie niet.
- De kaarten in ThermoGIS v2.2 zijn gekarteerd en gemodelleerd op regionale schaal. Lokaal kunnen de getoonde waarden daarom afwijken van de werkelijkheid. Dit is bijvoorbeeld het geval in oostelijk Twente, waar de eerder genoemde Benteimer Zandsteen aquifer niet expliciet terugkomt in de kaarten voor de Rijnland Groep. Het is mogelijk dat ook elders in Nederland bepaalde lagen niet in ThermoGIS v2.2 opgenomen zijn, omdat er onvoldoende over bekend is.

- In het algemeen kan gesteld worden dat de kleiige eenheden aan de basis van het LHM door hun hoge weerstanden geschikt zijn als bescherming van eventueel aan te wijzen daarboven gelegen NGRs tegen versturende invloeden van onderaf. Hierbij wordt primair gedacht aan beïnvloeding door geothermische exploitatie. Dit geldt voor het verspreidingsgebied van BRk1, VEWIk1, RUBOk1, DOIEk1 en het Carboon met uitzondering van de mijnstreek in Zuid-Limburg, waar het grondwater mogelijk verontreinigd is. In gebieden waar de opbouw van het Paleogeen alleen op groepsniveau gekarteerd is, is de onzekerheid over de beschermende werking van de kleilagen (vooralsnog) groter. Dit geldt voor Schouwen, Tholen, West-Brabant (tot het gereedkomen van H3O-De Voorkempen, naar verwachting in 2023), en de Peelhorst en Venloslenk (tot het gereedkomen van project H3O-Peelhorst & Venloslenk).
- Langs breuken zijn mogelijk variaties aanwezig in dikte en weerstand die invloed kunnen hebben op de beschermende werking van de kleilagen. Hierop wordt teruggekomen in het hoofdstuk 4 over onzekerheden.

2.2.3 Conclusies t.a.v. ondergrens NGR 3D-kartering

Op basis van de voorgaande analyse zijn de onderstaande conclusies te trekken met betrekking tot de ondergrens van de NGR 3D-kartering:

- Voor een groot deel van Nederland is het mogelijk om de eerste kleiige eenheid van de Formatie van Breda (BRk1), aan de basis van het LHM, als ondergrens voor de NGR 3D-kartering te gebruiken. Voor zuidelijk Nederland is dit niet mogelijk omdat BRk1 daar niet aanwezig is; de ondergrens van het LHM wordt hier gevormd door verschillende eenheden van Paleogene ouderdom, en (in Zuid-Limburg) het Carboon.
- Aan de basis van het LHM zijn over het algemeen grote verticale weerstanden aanwezig, en in de daaronder aanwezige aquifers komen te lage doorlatendheden voor om ze geschikt te maken voor drinkwaterwinning. Dit maakt de ondergrens van het LHM een geschikte ondergrens voor de NGR 3D-kartering.



3 Gekarteerde eigenschappen van de ondergrond

3.1 Geometrie van watervoerende en scheidende lagen

Vanuit LHM versie 4.2 zijn landelijke grids van de top en basis van de watervoerende en scheidende modellagen beschikbaar. Voor het overgrote deel zijn deze tot stand gekomen door samenvoeging van de (destijds) 125 REGIS II v2.2 eenheden tot de 15 LHM-modellagen: 1 freatische deklaag, 7 scheidende lagen en 7 watervoerende pakketten. Aanvullend is in afstemming met de regionale partijen (o.a. via werksessie met partijen uit de klankbordgroep) regionale informatie gebruikt voor nadere detaillering en uitbreiding. Ten eerste betreft dit de schematisatie van de ondergrond in aangrenzende delen van Duitsland en Vlaanderen, met informatie uit de hydrogeologische modellen H3O-Roerdalslenk, H3O-De Kempen, een vooroplevering van H3O-ROSE, het regionale grondwatermodel voor Limburg IBRAHYM v2.0, en het Geologisch model HCOV (Hydrogeologisch Codering van de Ondergrond van Vlaanderen). Ten tweede betreft dit de keileemkartering in Noord-Nederland door het MIPWA-consortium. Voor een gedetailleerde beschrijving van de regionale geohydrologische informatie die is verwerkt in het LHM zie Hunink et al. (2020).

3.2 Doorlaatvermogen (KD) en verticale weerstand (c-waarde)

Vanuit LHM versie 4.2 zijn landelijke grids van het doorlaatvermogen (KD) van watervoerende modellagen en verticale weerstanden (c-waarde) van scheidende modellagen beschikbaar. Het doorlaatvermogen is een veel gebruikte maatstaf voor geschiktheid van een watervoerend pakket voor grondwaterwinning. De verticale weerstand is een maatstaf voor de bescherming van een boven- of onderliggend watervoerend pakket tegen ongewenste invloeden van onder- c.q. bovenaf.

Voor een groot deel van Nederland zijn de landelijke grids van KD en c tot stand gekomen door de doorlatendheden van iedere REGIS II V2.2 eenheid naar rato te verwerken. Aanvullend is regionale informatie gebruikt voor nadere aanpassingen en detailleringen. Dit betreft de holocene deklaag en de Formatie van Boxtel op basis van GeoTOP, de kalksteenformaties in Zuid-Limburg op basis van ervaring met regionale modellering, en de verticale weerstand van de eerste kleiige eenheid van de Formatie van Waalre (WAK1) op basis van ervaring met de kalibratie van het Brabant model. Deze eenheid bestaat uit matig doorlatende zanden en kan een dikte van honderden meters bereiken. Om te voorkomen dat hierdoor gerekend gaat worden met een onrealistisch groot doorlaatvermogen, is de maximale dikte van BRz1 gesteld op 100 meter. De doorlatendheid van deze formatie in de Roerdalslenk bedraagt nu ca. 0.5 m/d (Hunink et al., 2020).

De KD- en c-waarden in LHM 4.2 zijn vervolgens niet-stationair gekalibreerd (Janssen et al., 2022). Uit de kalibratieresultaten bleek dat de KD waarden wat meer zijn aangepast dan de c-waarden. De kalibratie is uitgevoerd in deelmodellen van 10 x 10 km². Aanpassingsfactoren verschillen tussen de deelmodellen, en daarom zijn sprongen in KD en c-waarden zichtbaar tussen verschillende 10 x 10 km vakken.



3.3 Doorlatendheid (K)

Naar aanleiding van een suggestie tijdens de werksessie van 10 mei 2022 is ook de doorlatendheid (K) van watervoerende modellagen als ondergrondkarakteristiek meegenomen in de kartering. Het doel hiervan is om zandige eenheden met een hoge KD-waarde als gevolg van een grote dikte (D), maar beperkte horizontale doorlatendheid (K_h), te kunnen identificeren. Dergelijke zandige eenheden zijn door hun beperkte doorlatendheid minder geschikt voor aanwijzing als NGR, ondanks een hoge KD-waarde. De landelijke grids van de doorlatendheid zijn per LHM-modellaag afgeleid op basis van de KD- of c-waarde, en de top en basis van de modellaag.

3.4 Chloridegehalte

Het chloridegehalte wordt gebruikt ter bepaling of het grondwater zoet, brak of zout is. De basis voor de NGR 3D-kartering van het chloridegehalte wordt gevormd door het landelijke 3D-chloridebestand dat onderdeel is van het NHI (Delsman et al., 2020). Dit bestand is tot stand gekomen door interpolatie van alle destijds beschikbare chloride-analyses, boorgatmetingen, VES-metingen en helikopter-EM surveys. De kansverdeling van de chlorideconcentratie op elke geïnterpoleerde locatie is gekarakteriseerd met de p25 (het 25-percentiel), de p50 (de mediaan) en de p75 (het 75-percentiel).

In de rapportage bij het 3D-chloridebestand geven Delsman et al. (2020) aan dat op verschillende locaties artefacten van de geostatistische interpolatie optreden in de vorm van inversies (zout boven zoet grondwater) die hier in werkelijkheid niet voorkomen. Dit komt doordat zoete metingen op grotere diepte worden geïnterpoleerd tot onder brakke metingen. Het is ongewenst dat deze artefacten in het resultaat van de NGR 3D-kartering terecht komen. Daarom is besloten tot een correctie met behulp van het grondwatermodel LHM zoet-zout, versie 4.1. In eerste instantie is een pragmatische correctie van fysisch onrealistische inversies in de chlorideconcentraties toegepast, die is ontwikkeld voor LHM zoet-zout v4.1 (America et al., 2021). Door LHM zoet-zout v4.1 te laten starten vanuit de gecorrigeerde chlorideconcentraties en vervolgens 20 jaar te laten rekenen, komt de chlorideverdeling meer in overeenstemming met het grondwaterstromingspatroon. De lengte van de inspeelperiode is voldoende om de genoemde artefacten te laten afnemen tot een acceptabel niveau, maar niet om ze volledig te verwijderen. Door de beperkte inspeelduur en de over het algemeen beperkte dichtheidscontrasten blijven namelijk ook de berekende stroomsnelheden en chlorideverplaatsingen over die periode beperkt. Daarbij wordt opgemerkt dat het weinig zinvol is om een langere periode te hanteren. De randvoorwaarden aan het grondwatersysteem veranderen sneller dan grondwater stroomt, er bestaat daarom geen evenwichtssituatie. Gedurende het Holoceen is de chlorideverdeling ook nooit in evenwicht geweest met de geldende randvoorwaarden (Delsman et al., 2014). Uit het rekenresultaat worden vervolgens grensvlakken afgeleid die behoren bij een vooraf gekozen chloridegehalte. Gekozen is om drie grensvlakken af te leiden, namelijk 150, 1000 en 5000 mg per liter chloride (mg/l Cl^-). De waarde van 150 mg/l Cl^- wordt in de drinkwatersector gebruikt als grens tussen zoet en brak water. De waarde van 1000 mg/l Cl^- wordt in het grondwaterbeheer vaak gebruikt als grens tussen brak en zout grondwater, maar deze grens is betrekkelijk. De te hanteren grenswaarde hangt af van de economische winbaarheid van het drinkwater (de kostprijs per liter). Voortschrijdende inzichten en technologische oplossingen zoals osmotische zuivering op grote schaal kunnen tot andere grenswaarden leiden. Tijdens de NGR-werksessie van 10 mei 2022 werd aangegeven dat in het COASTAR-project een grenswaarde van 5000 mg/l Cl^- is aangehouden voor goed bruikbaar brak water.

Met de huidige stand der techniek kan het concentraat na brakwaterwinning tot 5000 mg/l Cl⁻ nog geloosd worden op zee bij een herwinningsrendement van 50%. Daarom is een derde grensvlak van 5000 mg/l Cl⁻ afgeleid.

In gebieden waar inversies voorkomen, dat wil zeggen zoet grondwater onder brak grondwater, zijn meerdere grensvlakken van hetzelfde chloridegehalte mogelijk. In die gevallen wordt bij het afleiden van de grensvlakken de diepste overgang gekozen om grote discontinuïteiten te vermijden. Om de informatie over het voorkomen van inversies niet verloren te laten gaan voor de kartering, zijn aanvullend voor de drie grensvlakken landelijke grids afgeleid die een waarde van 1 aannemen in geval van een inversie, en een 'nodata' waarde als er geen inversie aanwezig is.

3.5 Reistijd vanaf maaiveld

De reistijd van een druppel grondwater vanaf maaiveld is opgenomen in de NGR 3D-kartering vanuit de insteek dat de kartering betrekking heeft op 'zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit'. De gedachte hierbij is dat deze reistijd een representatieve indicator is voor de bescherming van het grondwater tegen antropogene verontreinigingen vanaf maaiveld. Tijdens verschillende werksessies is gebleken dat de meningen over het nut van de bepaling van reistijd vanaf maaiveld verdeeld zijn. Relevante argumenten die hierbij werden aangevoerd zijn:

1. Een grondwatervoorraad heeft een huidige kwaliteitsstatus. Dit kan veranderen in de toekomst, doordat deze voorraad wordt ververs (passief of actief). Mogelijk wordt in de toekomst het water dat vanaf maaiveld infiltreert schoner. De nadruk zou daarom (ook) moeten liggen op de te verwachten verandering in de toekomst. Daarbij werd de vraag gesteld of de modellering van reistijden niet beter niet-stationair uitgevoerd kan worden, gelet op toekomstige ontwikkelingen.
2. Reistijd vanaf maaiveld is een indirecte indicator.
3. Er zijn ook van nature voorkomende stoffen met hoge concentraties, bijvoorbeeld arseen, en daarnaast fossiel zout water, dat wellicht vraagt om een regionale aanpassing van de bovengrens van de voor NGR bruikbare reistijd. Invloeden daarvan worden niet ondervangen met de reistijdmodellering.

Ad.1 Met betrekking tot het eerste argument wordt opgemerkt, dat de NGR 3D-kartering in component 1 betrekking heeft op de huidige situatie. De 'toekomstverkenning' van mogelijke ontwikkelingen in de Nederlandse grondwatervoorraden is voorzien in een ander onderdeel van de opdracht (component 3). De genoemde ontwikkelingen zullen dan ook zeker aandacht krijgen in het project, maar niet-stationaire modelberekeningen om ze te kwantificeren zijn hierin niet voorzien.

Ad. 2. Met betrekking tot het tweede argument wordt opgemerkt, dat de reistijdenmodellering gebiedsdekkend is, in tegenstelling tot analyseresultaten van de grondwaterkwaliteitsmeetnetten, die wellicht geschikter zijn om de menselijke beïnvloeding direct af te leiden. Ter vergelijking, er zijn ook zeer veel grondwaterstandsmetingen, toch is er behoefte aan gebiedsdekkende grondwatermodellen. Wel moet worden opgemerkt dat het een model betreft, waarbij de mate van detail niet overal even groot is vanwege de complexiteit van de modellering.

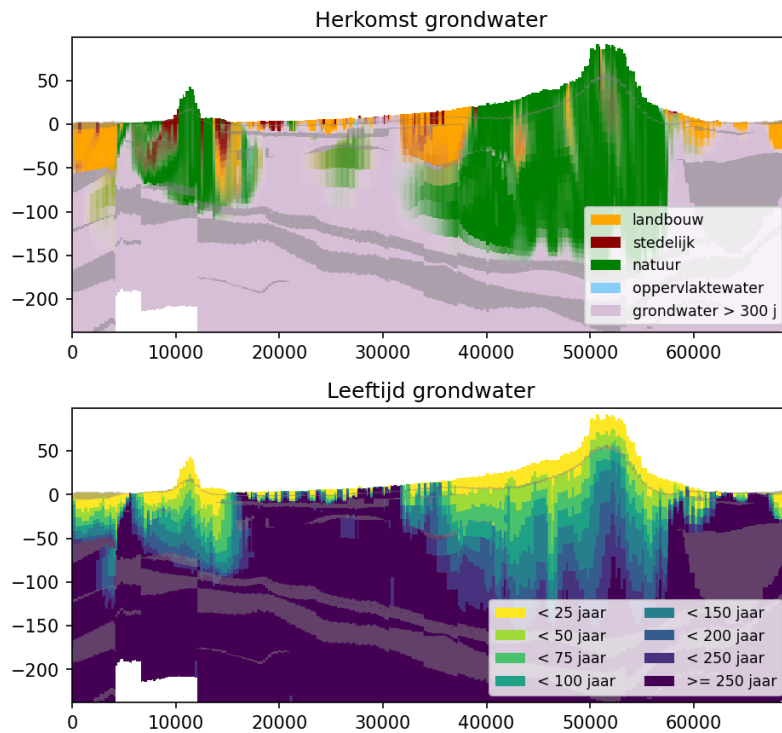
Ad. 3. Met betrekking tot het derde argument wordt opgemerkt, dat het voornemen is om deze aspecten (o.a. opkegeling van zout water) onder te brengen in de analyse van winbaarheid van grondwaterreserves (component 5 in het NGR project).

Alle overwegingen hebben geleid tot de volgende insteek:

- Een stationaire reistijdmodellering wordt uitgevoerd voor de huidige situatie (2020), vervolgens worden reistijdvlakken voor verschillende reistijden vanaf maaiveld (bijvoorbeeld 75, 150, 200 jaar) uit de resultaten afgeleid. De gedachtegang bij deze waarde is dat na de Tweede Wereldoorlog het gebruik van mest en bestrijdingsmiddelen in de landbouw een vlucht nam (start intensieve landbouw), en dat water dat voor die tijd geïnfiltreerd is, in het algemeen vrij is van diffuse verontreinigingen (reistijdsgrens 75 jaar). Kanttekening hierbij is dat notoire vervuulende industriële activiteiten zoals gasfabrieken en chemische wasserijen al eerder opkwamen. Hogere reistijdgrenzen zijn indicatief voor de ligging van grondwater dat is geïnfiltreerd voor de start van de intensivering van de landbouw. Grondwater met ouderdom van 75 jaar zal over 125 jaar op de diepte van de berekende 200 jaar reistijdsgrens liggen (bij gelijkblijvend stromingspatroon).
- Niet-gebiedsdekkende gegevens over de grondwaterkwaliteit en de ouderdom van het grondwater worden wel gebruikt om een indruk te krijgen van de betrouwbaarheid en onzekerheid van de gesimuleerde reistijden. Dit vindt plaats door de gemeten leeftijdsverdeling van grondwater (“tracer” leeftijden) te vergelijken met de gesimuleerde leeftijdsverdeling .
- Additionele informatie over de mogelijke verontreiniging van het grondwater is verkregen door verschillende infiltratiegebieden van grondwater te labelen met de categorieën ‘natuur’, ‘landbouw’, ‘stedelijk’ en ‘groot oppervlaktewater’, aan de hand van de huidige landgebruikskaart (historische landgebruiksveranderingen zijn dus niet beschouwd). Water met een reistijd korter dan 75 jaar, maar met een natuurherkomst, zal waarschijnlijk van betere kwaliteit zijn dan water met een landbouwherkomst, waarbij wel rekening moet worden gehouden met de ouderdom van het natuurgebied.

Ten behoeve van de reistijdmodellering is het model LHM zoet-zout versie 4.1 verbeterd voor het deel van Nederland waar de grens tussen zoet en brak grondwater diep ligt. Meer specifiek gaat het om het geschikt maken van het LHM zoet-zout voor modellering van anisotropie (belangrijk in gestuwde systemen zoals de Veluwe) en breuken (belangrijk rond bijvoorbeeld de Roerdalslenk). De resulterende nieuwe versie van LHM zoet-zout is beperkt getoetst conform eerdere veranderingsrapportages (effect verandering en vergelijking met LHM). De bij deze versie (LHM zoet-zout versie 4.1.2) behorende veranderingsrapportage is opgenomen in Bijlage 2. De reistijdmodellering is uitgevoerd met behulp van modellering van ‘leeftijdstracers’, tegelijkertijd worden met deze tracers ook herkomstgebieden van grondwater gekarteerd. Dit kan in sommige gevallen bruikbaar zijn voor het identificeren van gebieden waar de eerder genoemde industriële activiteiten gesitueerd waren. Opgemerkt wordt dat deze methode alleen ingezet kan worden voor verontreinigingen die goed oplossen in grondwater en zich verspreiden volgens de grondwaterstromingspatronen. Dit is bijvoorbeeld niet het geval voor verontreinigingen die veel zwaarder of veel lichter zijn dan water (bijv. DNAPL’s en LNAPL’s). De reistijdmodellering gaat uit van het huidige landgebruik, en houdt geen rekening met de landschapsontwikkeling in het verleden. Figuur 5 geeft een voorbeeld van de berekende herkomst en reistijden voor een profiel over de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe.





Figuur 5 Voorbeeld resultaat reistijdberekening (reistijd na infiltratie aan maaiveld) (onder) en herkomstberekening (boven) voor een west-oost transect over de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe.

3.6 Verticale grondwaterfluxen

Tijdens de werksessie van 28 juni 2022 is de suggestie naar voren gekomen om ook grondwaterfluxen te beschouwen, omdat veranderingen daarin een goede indicatie kunnen zijn voor beïnvloeding van een grondwatervoorraad in een NGR. Per modellaag zijn daarom de met LHM versie 4.2 berekende stationaire fluxen door de onderliggende scheidende laag opgenomen in de NGR 3D-kartering.

4 Onzekerheden

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op onzekerheden die inherent zijn aan de in het voorgaande hoofdstuk beschreven gekarteerde eigenschappen. De reden om aandacht te besteden aan onzekerheden is, dat informatie over de grootte van de onzekerheid van een bepaalde eigenschap van de ondergrond van belang kan zijn bij het aanwijzen of prioriteren van NGRs.

Een deel van de onzekerheidsinformatie is afkomstig uit de modellen die ook gehanteerd zijn bij de kartering zelf, eventueel na een nabewerking. Dit betreft onzekerheidsanalyses bij de berekening van de chloridegehalte-grensvlakken (de 25-, 50- en 75-percentielwaarden) en reistijden vanaf maaiveld (verschillende waarden voor porositeit aangenomen).

Een ander deel van de onzekerheidsinformatie, met name betreffende KD en c-waarden, is kwalitatiever van aard en is ontleend aan onafhankelijke en/of regionale informatiebronnen. De herkomst en aard van de onzekerheidsinformatie die wordt gepresenteerd in de viewer en/of in dit hoofdstuk is zodoende divers. Het is daarom niet mogelijk om een eenduidig, landsdekkend en kwantitatief beeld van onzekerheid te genereren. De gepresenteerde onzekerheidsinformatie mag alleen worden gebruikt voor relatieve beschouwingen, d.w.z. om na te gaan waar een bepaald aspect van onzekerheid relatief hoog of relatief laag is.

Met de tot nu toe verzamelde onzekerheidsinformatie is het niet mogelijk om eenduidige, kritische grenswaarden af te leiden die zouden leiden tot fundamenteel andere conclusies of inzichten met betrekking tot de aanwijzing van NGR-gebieden. De onzekerheidsinformatie over chloridegehalten is al wel gebruikt bij een eerste vingeroefening in het gebruik van de resultaten van de kartering ter begrenzing van NGRs. Het doel van deze vingeroefening, die wordt beschreven in hoofdstuk 6 van dit rapport, is om gevoel te krijgen voor de bandbreedte in de mogelijke NGR-begrenzingsen.

4.2 Onzekerheidsinformatie vanuit de modellen

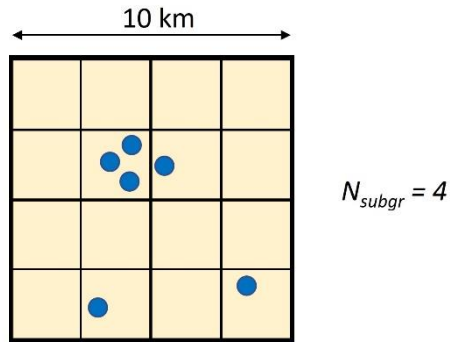
4.2.1 KD en c

Tijdens de kalibratie van LHM4.2 zijn aanpassingsfactoren toegepast op (onder meer) de initiële KD-waarden van de watervoerende lagen en de verticale weerstanden van de scheidende lagen. Deze aanpassingsfactoren in combinatie met de datadichtheid (de ruimtelijke dichtheid van de stijghoogtemeetpunten die per LHM-modellaag voor de ijking zijn gebruikt), zijn verwerkt tot onzekerheidsgrids die gebruikt kunnen worden voor een indruk van de ruimtelijke variatie van de onzekerheid van KD en c. De datadichtheid is daarbij gekwantificeerd door:

- elke LHM-calibratiegridcel van 10 x 10 km onder te verdelen in 16 subgridcellen van 2,5 x 2,5 km, dus in 4 bij 4 subgridcellen;
- per 10 x 10 km gridcel het aantal subgridcellen (N_{subgr}) te tellen waarin een of meer stijghoogtemeetpunten liggen.

Deze werkwijze, uitgebeeld in Figuur 6, is gevolgd om te voorkomen dat een clustering van meetpunten tot een hoge gemiddelde datadichtheid zou leiden.





Figuur 6. Fictief voorbeeld van het uitdrukken van de datadichtheid in N_{subgr} .

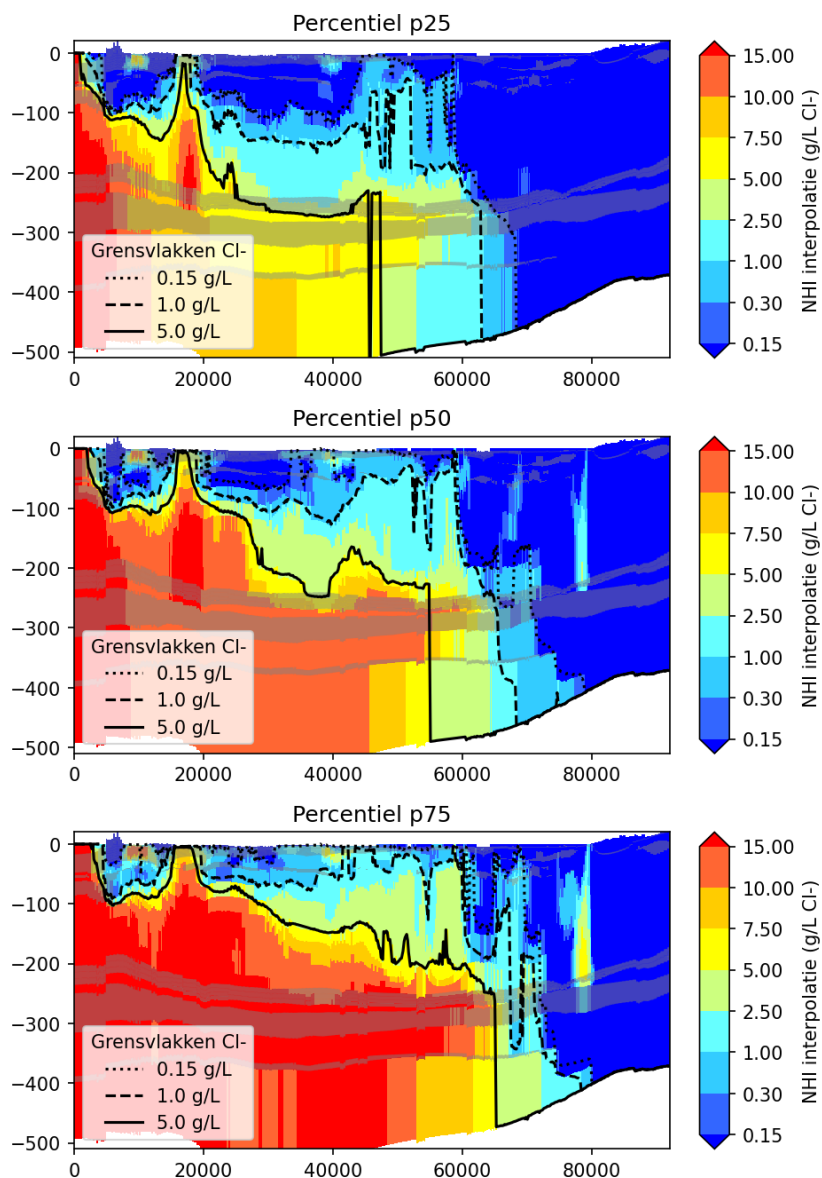
Per gridcel en per LHM-modellaag is op basis van N_{subgr} en de aanpassingsfactor van KD of c een kwalitatieve, globale driedeling gemaakt in onzekerheidsniveaus, zie Tabel 2. Gebieden met weinig data en hoge aanpassingsfactoren worden zodoende als meest onzeker aangeduid, en gebieden met veel data en lage aanpassingsfactoren, waar de initiële waarden blijkbaar al relatief goed waren, als minst onzeker.

Tabel 2. Gehanteerde driedeling in onzekerheidsniveaus op basis van aanpassingsfactoren en datadichtheden bij de kalibratie van LHM 4.2.

Aanpassingsfactor LHM 4.2	Datadichtheid (N_{subgr})	Onzekerheidsniveau
> 0,67 en < 1,5	> 8	1 (laag)
< 0,33 of > 3	< 8	3 (hoog)
overige combinaties		2 (gemiddeld)

4.2.2 Chloridegehalte grensvlakken

Voor het in kaart brengen van de onzekerheid rond het chloridegehalte zijn als eerste stap gebiedsdekkend onzekerheidsgrids gegenereerd. Hiertoe is voor elk van de drie gehanteerde grensvlakken (150, 1000 en 5000 mg/l Cl⁻) het verschil bepaald tussen de p75- en p25-waarde van de kansverdeling van de met LHM zoet-zout gesimuleerde grensvlakdiepte. Hoe groter dit verschil, hoe groter de onzekerheid. In gebieden waar een grensvlak dieper ligt dan de basis van het LHM is dit verschil meestal 0, omdat de p75 en de p25 van het grensvlak beide worden beperkt door de ondergrens van het model. Om onrealistisch kleine onzekerheden te voorkomen, hebben de gridcellen waar dit optreedt, een nodata-waarde gekregen. Dit is het geval in een groot deel van Nederland buiten het holocene kustgebied. Figuur 7 geeft een voorbeeld van het afleiden van de diepten van de verschillende grensvlakken voor een profiel van Alkmaar tot Harderwijk. De overige profielen zijn opgenomen in Bijlage 1.



Figuur 7. Voorbeeld 25-, 50- en 75-percentielwaarde chlorideverdeling en daarin afgeleide diepten van grensvlakken in meters t.o.v. NAP voor een west-oost transect van Alkmaar tot Harderwijk, met op de y-as de diepte en op de x-as de afstand in meters.

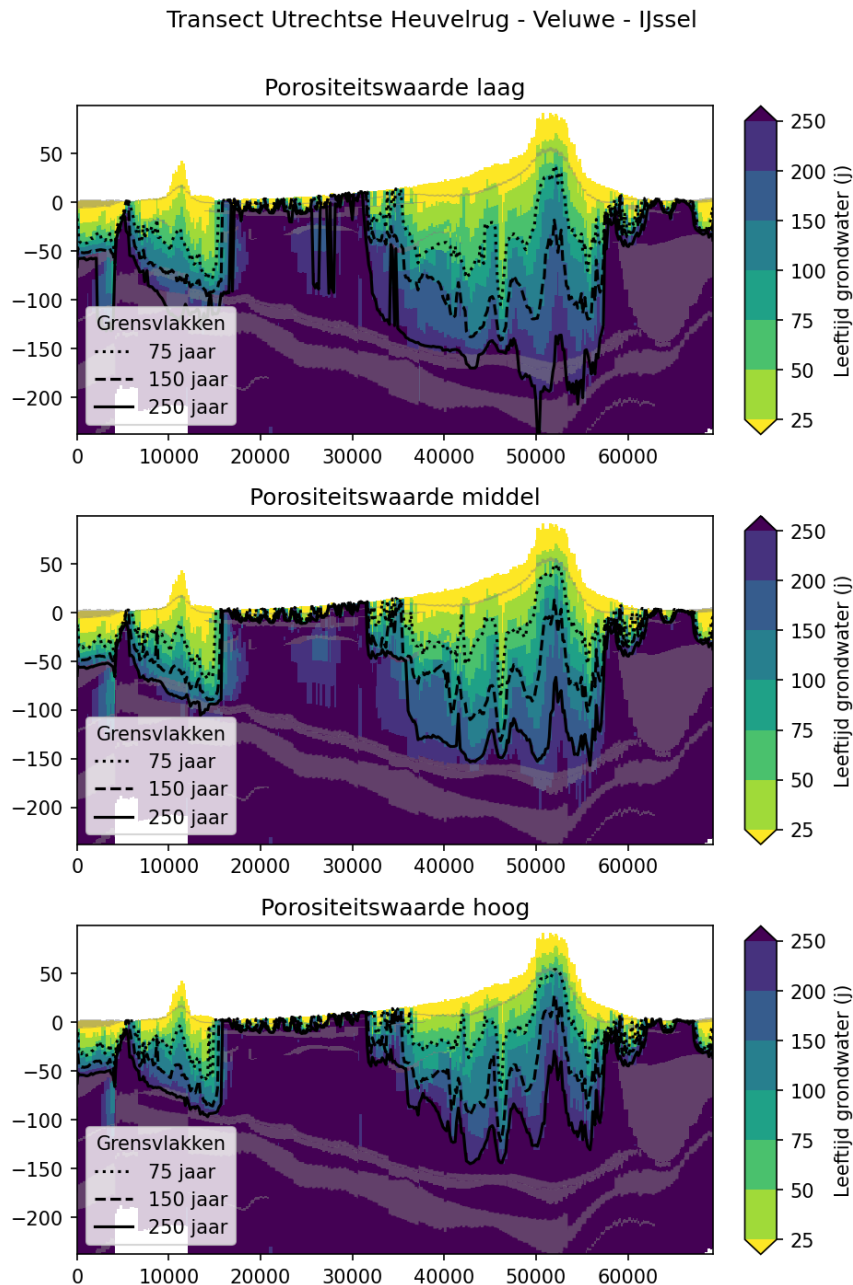
4.2.3 Reistijd vanaf maaiveld

Een belangrijke component in de onzekerheid van de gemodelleerde reistijd vanaf maaiveld is de porositeit, meer specifiek het doorstroomde porievolume van het sediment. Bij een lage porositeitswaarde is de grondwatersnelheid hoger, water moet sneller stromen om door een kleiner poriënvolume een gelijke volumestroom te geven. Om de invloed van de onzekerheid rond deze parameter op de gesimuleerde reistijden te kwantificeren, zijn reistijdberekeningen uitgevoerd voor:

- een beste schatting met porositeitswaarden voor watervoerende modellagen van 38 volume% en voor scheidende modellagen van 40 volume% ('middel' in Figuur 8);
- een ongunstige variant met porositeitswaarden voor watervoerende modellagen van 30 volume% en voor scheidende modellagen van 10 volume% ('laag' in Figuur 8);

- een gunstige variant met porositeitswaarden voor watervoerende modellagen van 46 volume% en voor scheidende modellagen van 50 volume% ('hoog' in Figuur 8). Een toelichting op deze waarden is opgenomen in Bijlage 3.

Vervolgens is de onzekerheid van de reistijd vanaf maaiveld bepaald als de helft van het verschil tussen de ongunstige en de gunstige variant. Het is onwaarschijnlijk dat de gehanteerde hoge en lage porositeitswaarden op grote schaal voorkomen. Daarom is de berekende onzekerheid waarschijnlijk een overschatting. Het resulterende kaartbeeld moet daarom vooral worden gebruikt om gebieden met relatief hoge en lage onzekerheid te kunnen aangeven. Figuur 8 geeft een voorbeeld van de berekende reistijden en reistijdvlakken bij verschillende porositeiten voor een profiel over de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe.



Figuur 8. Voorbeeld resultaat reistijdberekening (reistijd na infiltratie aan maaiveld) voor een west-oost transect over de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe, voor de drie porositeitswaarden.

4.3 Onzekerheidsinformatie vanuit regionale gegevens

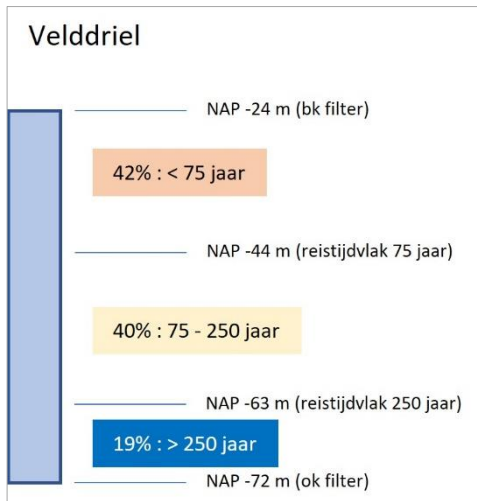
4.3.1 Chloridegehalten in de Roerdalslenk

Door TNO is in 2006 een kartering uitgevoerd van zoet en brak grondwater in Noord-Brabant (Stuurman et al., 2006). In het kader daarvan is ook een GIS-bestand samengesteld van het 1000 mg/l chloridegrensvlak, gebaseerd op een groot aantal geo-elektrische metingen en boorgatmetingen, waaronder ook boorgatmetingen uit diepe olie- en gasboringen. Gelet op het grotere aantal hiervoor gebruikte metingen, bovendien van grotere diepte, wordt in met name het zuidelijk deel van de Roerdalslenk aan deze kaart een grotere betrouwbaarheid toegekend dan aan het interpolatieresultaat vanuit het NHI-chloridebestand. Daarom is deze kaart als alternatieve interpretatie toegevoegd aan de viewer. De kaart is oorspronkelijk voor heel Noord-Brabant samengesteld, maar voor het huidige doel afgesneden op de Feldbiss- en Peelrandbreuken (wel met een ruime marge).

4.3.2 Vergelijking berekende reistijden met dateringen bij winlocaties

Voor een aantal drinkwaterwinningen van Vitens in Gelderland en Utrecht, en voor de winningen van Brabant Water, is een dateringsonderzoek uitgevoerd (Broers & De Weert, 2015; Broers & Kivits, 2022). Bij deze dateringen is gebruik gemaakt van een zogenaamde multi-tracer aanpak. Het onderzoek is uitgevoerd aan de gezamenlijke ruwwaterstrengen bij elk winlocatie. De uit de dateringsmetingen afgeleide leeftijdsopbouw is uitgedrukt in de procentuele bijdrage per winlocatie aan de leeftijdsopbouw in een aantal (van tevoren vastgestelde) leeftijdsklassen. De leeftijdsopbouw op basis van de reistijdberekeningen is bepaald op basis van de verticale posities van de reistijdvlakken ten opzichte van de filterdiepten, zie Figuur 9 als voorbeeld. Zowel in de reistijdberekeningen als in de dateringsmetingen wordt de invloed van het verticaal aantrekken van water van boven en onder de filters weerspiegeld. Hierbij gaat de berekende verdeling er vanuit dat gelijkmatige onttrekking over het filterbereik plaatsvindt, maar dat is in de praktijk niet altijd het geval. Een belangrijk verschil tussen beide methoden is dat de reistijdberekeningen berusten op een stationaire situatie uitgaande van de (onttrekkings)situatie in 2020. De werkelijke onttrekkingshistorie en andere hydrologische randvoorwaarden zullen hier op veel winlocaties van afwijken en worden impliciet weerspiegeld in de dateringsresultaten. Dit kan een mede-oorzaak zijn van de afwijkingen die op enkele winlocaties gevonden worden.





Figuur 9. Voorbeeld bepaling leeftijdsopbouw op basis van reistijdberekening en filterdiepten op winlocatie Velddriel.

Omdat de reistijden vanaf maaiveld maximaal tot 250 jaar zijn berekend, is een vergelijking met dateringen alleen mogelijk waar relatief jong water wordt opgepompt. Wel is voor enkele Vitens-winslocaties met filterdiepten (ver) beneden het 250-jaars reistijdvlak gecontroleerd of hier inderdaad water (veel) ouder dan 250 jaar is gedateerd. Dit bleek het geval (Linschoten, De Meern, Culemborg, Twello). De vergelijking was verder niet uitputtend en had betrekking op 5 winslocaties van Vitens (Velddriel, Zetten, Cothen, Bunnik en Sijmons) en 8 winslocaties van Brabant Water (Macharen, Lith, Vessem, Luyksgestel, Waalwijk, Gilze, Schijf en Seppe). Bij de dateringen voor Brabant Water is, m.u.v. Seppe, een minder gedetailleerde leeftijdsverdeling gehanteerd en daarom is daar alleen het aandeel water jonger en ouder dan 100 jaar vergeleken. Voor de winslocatie Seppe is wel gedetailleerdere dateringinformatie beschikbaar (Broers et al., 2021).

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 10 voor de Vitens-winslocaties en voor Seppe, en in Tabel 3 voor de overige Brabant Water winslocaties. Er is enige vertekening in het beeld doordat het reistijdvlak van 75 jaar is vergeleken met de dateringsleeftijdsgrens van 70 jaar, en voor Seppe ook het reistijdvlak 250 jaar met de dateringsleeftijdsgrens van 300 jaar. Het vergelijkingsresultaat is wisselend: op een deel van de winslocaties komen de berekende reistijden redelijk tot goed overeen (Velddriel, Cothen, Waalwijk, Gilze, Schijf) maar op een deel niet. Afgezien van de eerder genoemde stationaire reistijdmodelbenadering als oorzaak van verschillen, kan dit worden toegeschreven aan mogelijke onder- of overschattingen van KD- of c-waarden in LHM, en aan schaaffecten, die beide invloed hebben op de gesimuleerde aantrekking van water van onder- of bovenaf. In Zetten bijvoorbeeld wordt de sterke onderschatting van het aandeel water >250 jaar door het reistijdmodel mogelijk veroorzaakt door een te hoge verticale weerstand van de onderliggende WAK3. De sterke overschatting van het aandeel water >250 jaar in Bunnik wordt mogelijk verklaard door een te hoge weerstand van de bovenliggende WAK1 in het reistijdmodel. In Sijmons speelt de complexe grondwaterstroming vanaf de Veluwe richting Overbetuwe mogelijk een rol. In Seppe is de weerstand van de eenheid OOK1 (eerste kleiige eenheid in de Formatie van Oosterhout) mogelijk lager dan nu is geparameteriseerd in LHM.

De afwijkingen bij de Brabantse locaties Vessem, Luyksgestel en Lith vergen nadere analyse.

De hier beschreven onzekerheidsanalyse is niet bruikbaar om landsdekkend uitspraken te doen over de onzekerheid in de reistijdmodellering. Wel laat de vergelijking zien dat onzekerheden over bijvoorbeeld verticale weerstanden in de ondergrond invloed kunnen hebben op de gemodelleerde leeftijd en daarmee samenstelling van het water. Dit is des te meer het geval bij grondwateronttrekkingen, waar verticale stijghoogteverschillen veel groter zijn dan elders, en is daardoor relevant voor inschattingen van de winbaarheid van toekomstige NGRs. Een bredere (landsdekkend) en meer uitgebreide analyse zoals hier beschreven is daarom aan te bevelen voor de NGR-component 5 'Analyse Winbaarheid'.





Figuur 10. Vergelijking berekende reistijd vanaf maaiveld (links) met dateringsmetingen (rechts) op 5 winlocaties van Vitens in Gelderland en Utrecht, en Brabant Water winlocatie Seppe. Dateringsmetingen zijn ontleend aan Broers & Kivits (2022) en voor Seppe aan Broers et al (2021).

Tabel 3. Vergelijking berekende reistijd vanaf maaiveld met dateringsmetingen op 7 winlocaties van Brabant Water. Dateringsmetingen zijn ontleend aan Broers & de Weert (2015).

winlocatie	filter bk (mNAP)	filter ok (mNAP)	diepte reistijdvlak 100j (mNAP)	aandeel water <100j (reistijdmodel)	aandeel water <100j (dateringen)
Macharen	-4	-7	-32	100%	100%
Vessem	-4	-30	-28	92%	60%
Luyksgestel	-19	-46	-12	0%	40%
Waalwijk	-19	-40	-35	76%	60%
Gilze	-34	-97	-47	21%	20%
Schijf	-90	-152	-91	2%	5%
Lith	-17	-52	-41	69%	30%

4.4 Onzekerheid aan de ondergrens: invloed breuken op verticale weerstand

Zoals eerder beschreven is aan de ondergrens van het NGR-karteerdomein de mate van bescherming tegen ongewenste invloeden van onderaf van belang. Langs breuken zijn mogelijk variaties aanwezig in dikte en weerstand die invloed kunnen hebben op de beschermende werking van de kleilagen. In theorie is de onzekerheid over die beschermende werking rond breuken daarom groter.

In Nederland zijn breuken tot dusverre relatief onbelangrijk geweest in relatie tot andere aandachtspunten bij geothermische exploitatie, zoals aquiferkwaliteit, putarchitectuur, corrosie en scaling (neerslagproducten). Bij grote breuken is men terughoudend in het aanvragen van vergunningen, echter primair vanwege het risico op breukreactivatie en seismiciteit ten gevolge van afkoeling rondom de injectieput (Baisch et al., 2016). Op basis van consultatiegesprekken met experts zijn breuken niet geïdentificeerd als risico voor vergrijzing van het grondwater (Cirkel et al., 2022). Al met al is de indruk dat interactie via breuken in de praktijk niet waarschijnlijk is, gezien de over het algemeen lage injectiedruk (max 5 -7 MPa op 2.5 km), de diepte van de doubletten ten opzichte van mogelijke NGR-aquifers, en de aanwezigheid van tussenliggende kleirijke lagen. Het is aannemelijk dat ook de breuken kleirijk en relatief impermeabel zullen zijn.

5 De data viewer: toelichting

5.1 Toegang

De voorlopige versie van de NGR-viewer is te benaderen als een ArcGIS online project via deze link:

<https://portal.gdngeoservices.nl/arcgis/home/webmap/viewer.html?webmap=084db90960db4b8e871a3159e44ef151>

De inloggegevens zijn:

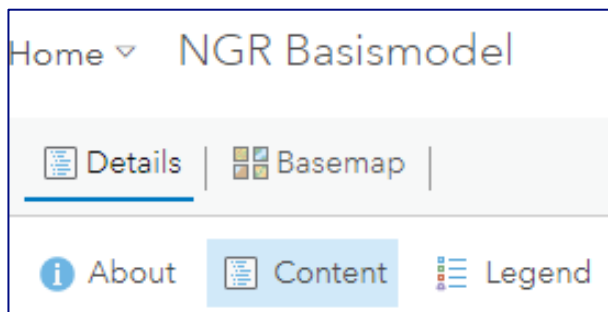
Gebruikersnaam: NGR_Viewer

Wachtwoord: NGR@TNO2022.nl

Deze viewer is in deze eerste fase van het project gericht op de uitwisseling van ruwe data. In de tweede fase van het project wordt de viewer verder ontwikkeld met aandacht voor de 3D visualisatie van de verschillende data bronnen en de doelgroep. Ten tijde van de afronding van dit rapport was de uitvoering van deze tweede fase nog in volle gang.

5.2 Kaarten in de viewer

In de viewer, verschijnt er een basiskaart van Nederland met provinciegrenzen, en linksboven de onderstaande tabbladen. Door op 'Content' te klikken en vervolgens op het zwarte driehoekje bij 'NGR Basismodel' verschijnt de structuur van de viewer met de daarin opgenomen kaarten. De kaarten zijn vanuit de oorspronkelijke grids omgezet naar contourpolygonen, en staan daarom onder een hoofdnoemer 'Contouren'. Door te klikken in de kaart wordt een beter inzicht verkregen in de werkelijke waarde van de variabele.



De legenda van elke kaart kan zichtbaar worden gemaakt door te klikken op dit icoontje, links onder de titel van de kaart:



Van boven naar beneden kunnen de onderstaande kaarten worden gevisualiseerd:

- Reistijdvlakken (diepten in meters t.o.v. NAP) voor 25, 50, 75, 100, 150, 200 en 250 jaar;

- Grensvlakken chloride:
 - P50-waarden van de 150, 1000 en 5000 mg/L chloridegrensvlakken;
 - Gebieden waar inversies boven deze grensvlakken voorkomen;
- Informatie per LHM-modellaag:
 - Top, basis, K-waarde, KD-waarde en c-waarde;
 - Stationaire fluxen door de onderliggende scheidende laag;
- Onzekerheden:
 - Inschatting onzekerheid in KD en c-waarden op basis van aanpassingsfactoren en datadichtheid tijdens de calibratie van LHM 4.2;
 - Inschatting onzekerheid in reistijdvlakken op basis van variatie in gehanteerde porositeitswaarden;
 - Inschatting onzekerheid in grensvlakken chloride op basis van het verschil tussen p75- en p25-waarden
 - Alternatieve kaart van het 1000 mg/L chloridegrensvlak in de Roerdalslenk.



6 Gebruik van de resultaten

6.1 Van LHM-modellagen naar watervoerende pakketten

Zoals beschreven in paragraaf 3.1 zijn de 8 LHM-modellagen tot stand gekomen door samenvoeging van de (destijds) 125 REGIS II v2.2 eenheden. Tijdens de uitvoering van component 1, met name ook tijdens de werksessies, bleek dat de presentatie van resultaten voor LHM-modellagen niet goed aansluit bij de denk- en belevingswereld van de regionale partijen. De wens werd uitgesproken om de resultaten te kunnen visualiseren als regionale watervoerende pakketten en scheidende lagen. Daarvoor is het nodig om een terugvertaling te maken per LHM-modellaag naar de daarin opgenomen REGIS II v2.2 zandige eenheden (voor de watervoerende pakketten) en kleiige eenheden (voor de scheidende lagen). Deze terugvertaling en de visualisatie daarvan zijn binnen het NGR-project ondergebracht in component 7. Ten tijde van de afronding van dit rapport was de uitvoering van deze component nog in volle gang, en was er nog geen terugvertaling van LHM-lagen naar regionale watervoerende en scheidende lagen beschikbaar. Daarom worden in dit rapport de resultaten (nog) voor LHM-modellagen gepresenteerd.

6.2 Een vingeroefening in het gebruik van de resultaten

6.2.1 Doel en werkwijze

Zoals beschreven in hoofdstuk 1 vormen de resultaten van de 3D-kartering enkele van de bouwstenen voor het bestuurlijke proces rondom de eventuele begrenzing van Nationale Grondwater Reserves in Nederland. Het doel van deze paragraaf is het geven van enkele illustratieve, maar fictieve voorbeelden hoe het gebruik van deze resultaten zou kunnen leiden tot NGR-begrenzings. Een belangrijke stap daarin is het formuleren van grenswaarden (criteria) voor de gekarteerde ondergrondkarakteristieken waaraan een grondwatervoorraad moet voldoen om in aanmerking te kunnen komen als NGR. Als vingeroefening zijn daarom twee voorbeelden uitgewerkt met uiteenlopende grenswaarden, en een derde voorbeeld waarin aanvullende beperkingen zijn opgelegd op grond van voorraadgrootte, bestaande grondwaterbeschermingsgebieden en reserveringen. Het doel van de vingeroefening is om gevoel te krijgen voor de bandbreedte in de resulterende mogelijke begrenzingen, zonder daarbij te pretenderen om nu al de te verwachten absolute bandbreedte in kaart gebracht te hebben. Een tweede doel van de vingeroefening is om gevoel te krijgen voor de invloed die verschillende keuzes voor de criteria op de begrenzingen kunnen hebben.

Nadrukkelijk wordt opgemerkt dat de resultaten van deze vingeroefening een illustratief karakter hebben, en op geen enkele wijze een suggestie zijn voor de daadwerkelijke begrenzing van NGRs.

Om de hier gepresenteerde resultaten niet meer gewicht te geven dan passend in de huidige fase van de totstandkoming van de NGR-kartering, zijn er verder geen duidingen, interpretaties of conclusies aan verbonden.

Verder dienen de onderstaande kanttekeningen in acht te worden genomen:

- De voorbeelden zijn uitsluitend gebaseerd op de gekarteerde ondergrondkarakteristieken (en in geval van het derde voorbeeld de

geïnterpreteerde reserveringen). Aspecten als winbaarheid en effecten zijn niet beschouwd.

- De evaluatie van de criteria gebeurt voor elke afzonderlijke LHM-laag. Wanneer echter meerdere LHM-lagen een watervoerend pakket vormen en de gesommeerde KD van beide lagen voldoet aan het criterium, voldoen beide LHM-lagen. Om de KD's aldus te mogen combineren wordt een aanvullend criterium gehanteerd waarbij de weerstand tussen beide lagen niet hoger mag zijn dan 200 dagen.

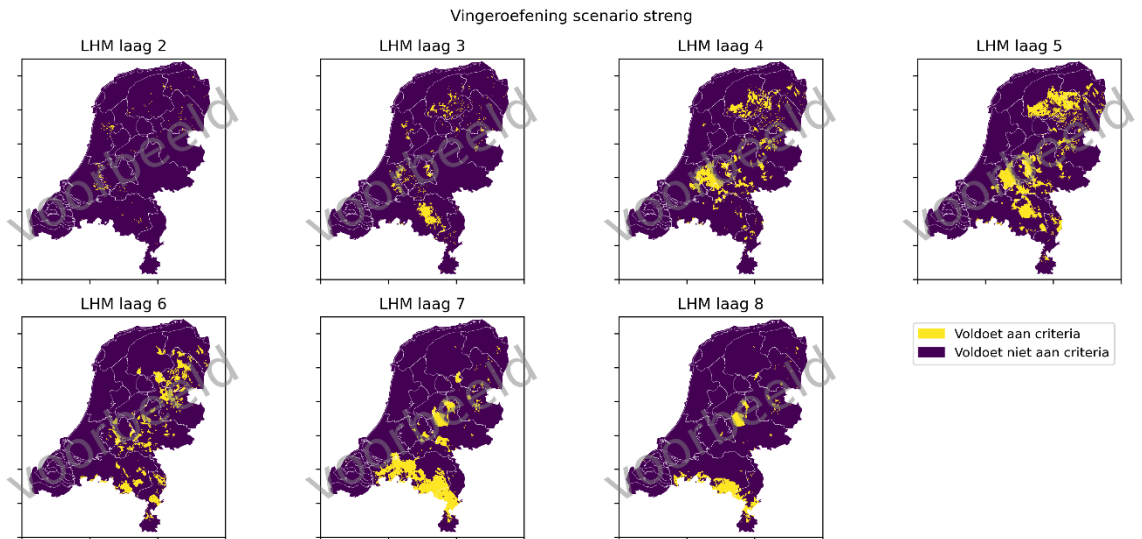
In Tabel 4 zijn de kenmerken van de drie uitgewerkte voorbeelden weergegeven. Het strenge voorbeeld stelt hogere eisen aan een grondwatervoorraad dan het soepele voorbeeld, voor wat betreft KD, bovenliggende weerstand, chlorideconcentratie en reistijd vanaf maaiveld. Met 'bovenliggende weerstand' wordt hier bedoeld de som van de verticale hydraulische weerstanden van alle bovenliggende LHM-modellagen. Het streng-plus voorbeeld voegt daaraan nog toe een criterium voor minimum oppervlakte, en de uitsluiting van bestaande grondwaterbeschermingsgebieden en door provincies aangewezen aanvullende strategische voorraden, zoals gekarteerd in component 2 van de NGR-kartering (Zaadnoordijk & Hettelaar, 2023).

Tabel 4. Kenmerken van de uitgewerkte voorbeelden van het gebruik van de resultaten van de NGR 3D-kartering.

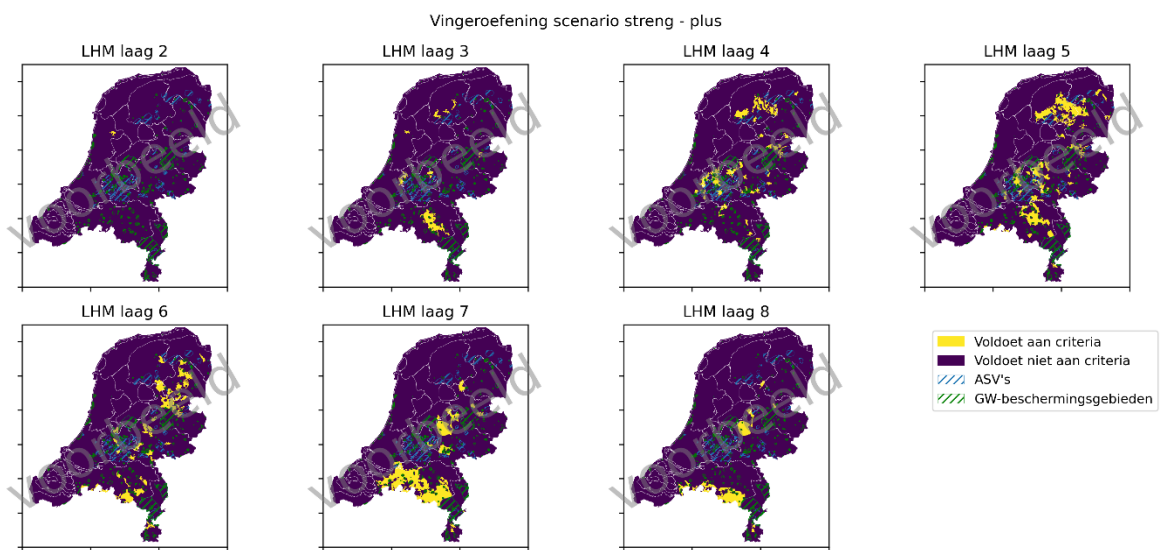
Voorbeeld	Streng	Streng-plus	Soepel
KD (m ² /d)	> 1000	> 1000	> 500
Bovenliggende weerstand (d)	> 1000	> 1000	-
Chlorideconcentratie (mg/L)	< 150	< 150	< 5000
Reistijd vanaf maaiveld (jaar)	> 150	> 150	-
Minimum diameter (km)		> 5	
Minimum oppervlakte (km ²)	-	> 20	-
Uitgezonderde gebieden	-	ASV gebieden, gw-beschermingsgebieden	-
Onzekerheid chloride	75-percentiel (conservatief)	75-percentiel (conservatief)	25-percentiel (niet-conservatief)

6.2.2 Voorbeeldresultaten

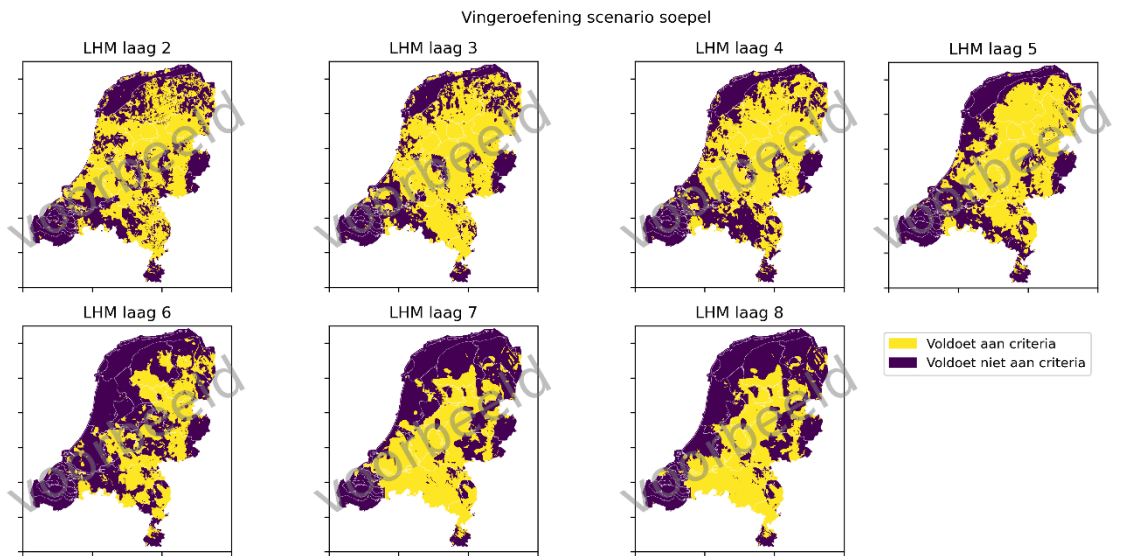
In figuren 11, 12 en 13 zijn de voorbeeldresultaten weergegeven per LHM-modellaag, in de vorm van gebieden die voldoen aan de opgelegde criteria (geel) en gebieden die niet voldoen (paars). Het opleggen van strengere grenswaarden (Voorbeelden Streng en Streng-plus) komt duidelijk tot uiting in een veel kleiner oppervlak aan grondwatervoorraden die in aanmerking komen als mogelijke NGR. Figuur 14 bevat voor elk van de drie voorbeelden een 2D-kaart van alle grondwater van natuurlijke kwaliteit voor heel Nederland, verkregen door projectie over elkaar van de kaarten voor de afzonderlijke LHM-lagen. Door deze projectie verdwijnt de diepte-gerelateerde informatie uit het kaartbeeld. Dit is (deels) ondervangen met een visualisatie van de voorbeeldresultaten in enkele willekeurig gekozen geohydrologische dwarsdoorsneden. Deze zijn weergegeven in figuren 15, 16 en 17.



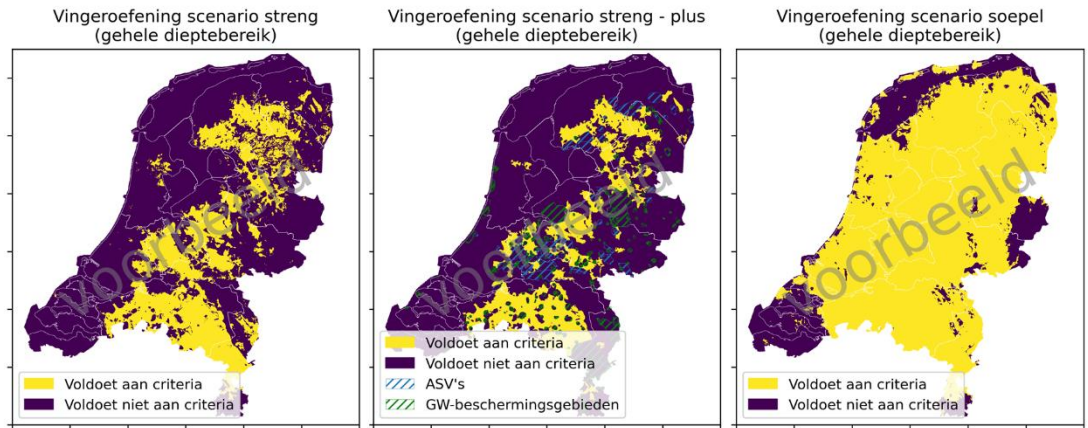
Figuur 11. Resultaat van de uitwerking van het voorbeeld 'Streng'.



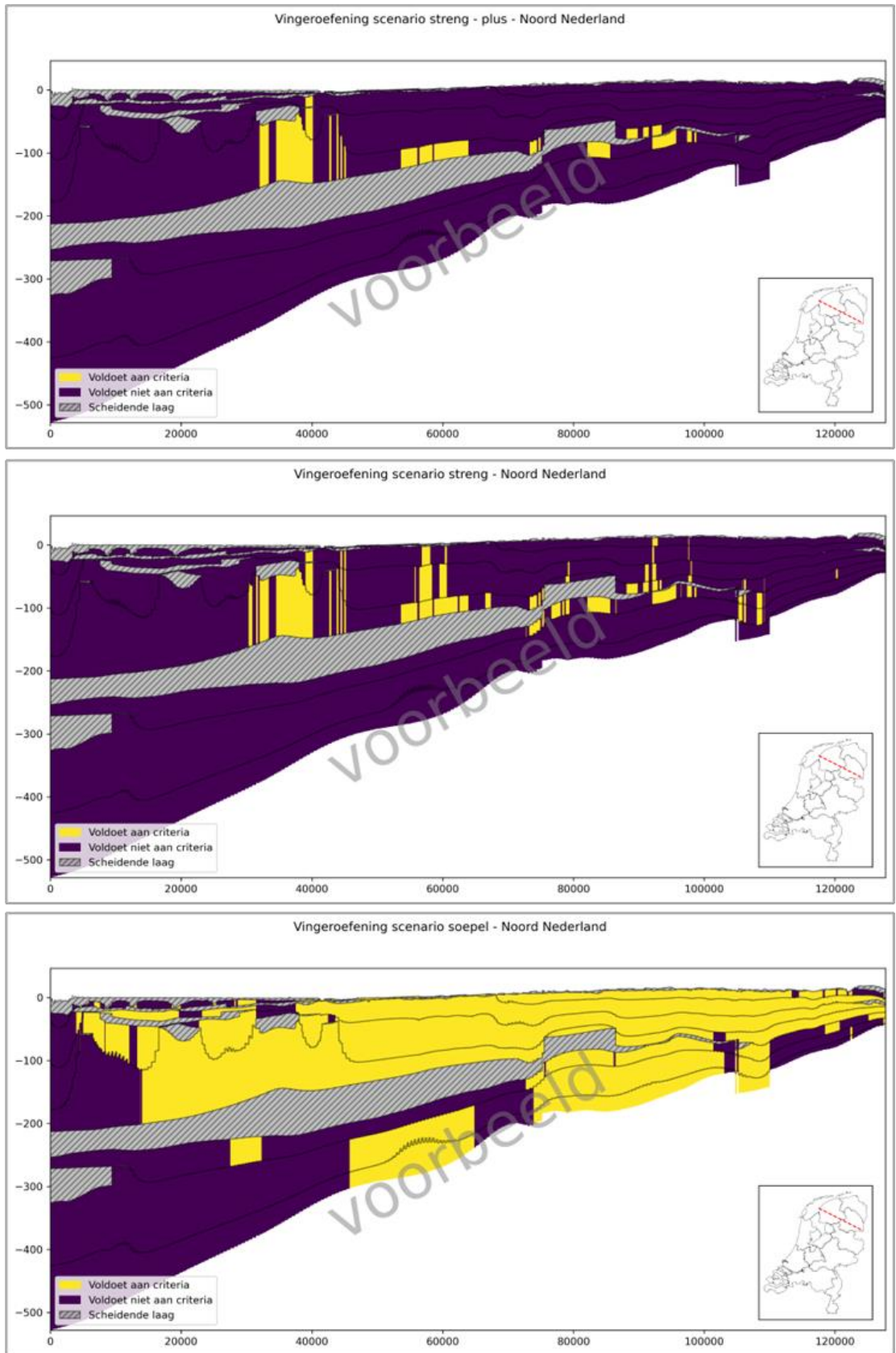
Figuur 12. Resultaat van de uitwerking van het voorbeeld 'Streng-plus'.



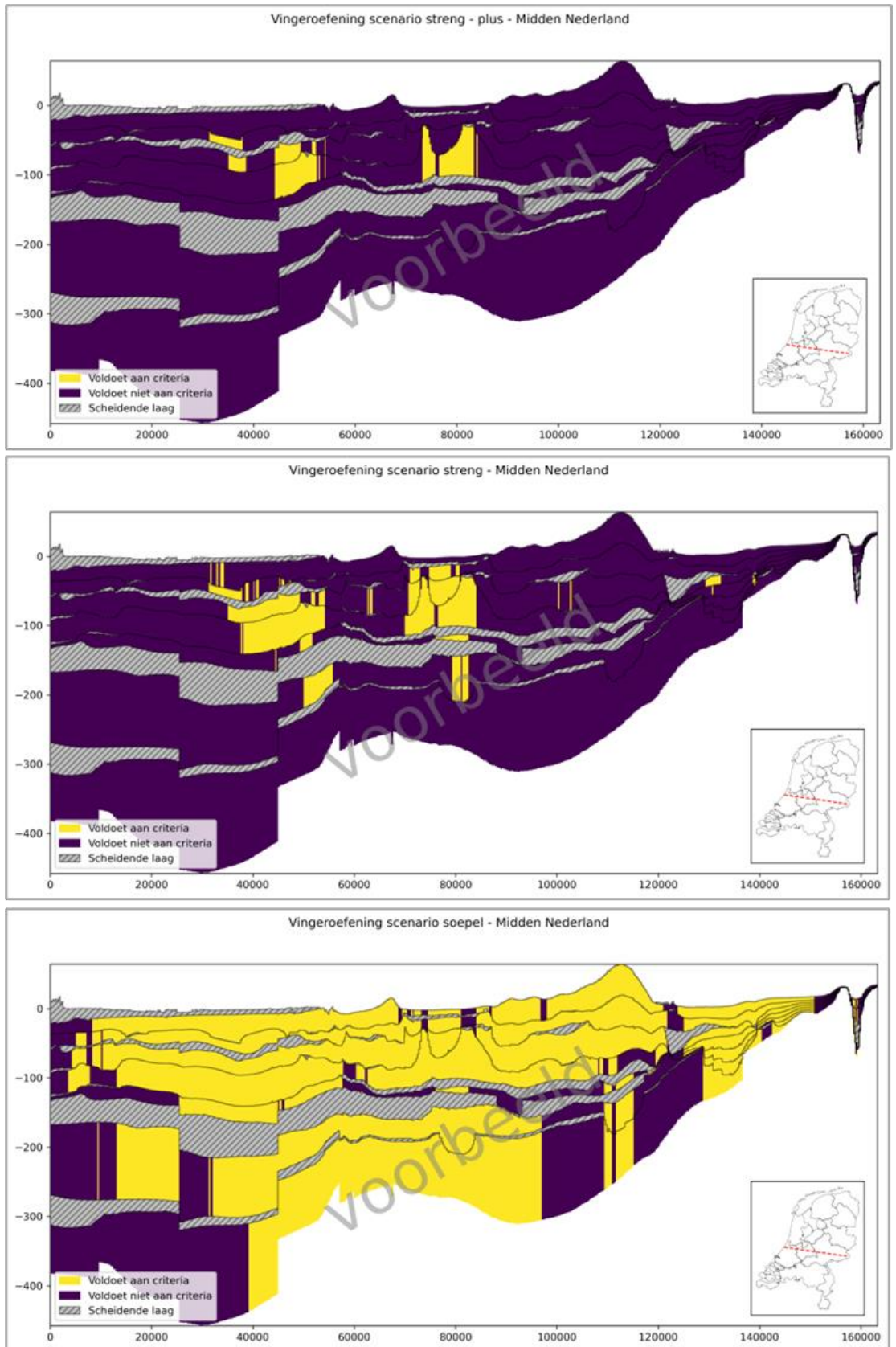
Figuur 13. Resultaat van de uitwerking van het voorbeeld 'Soepel'.



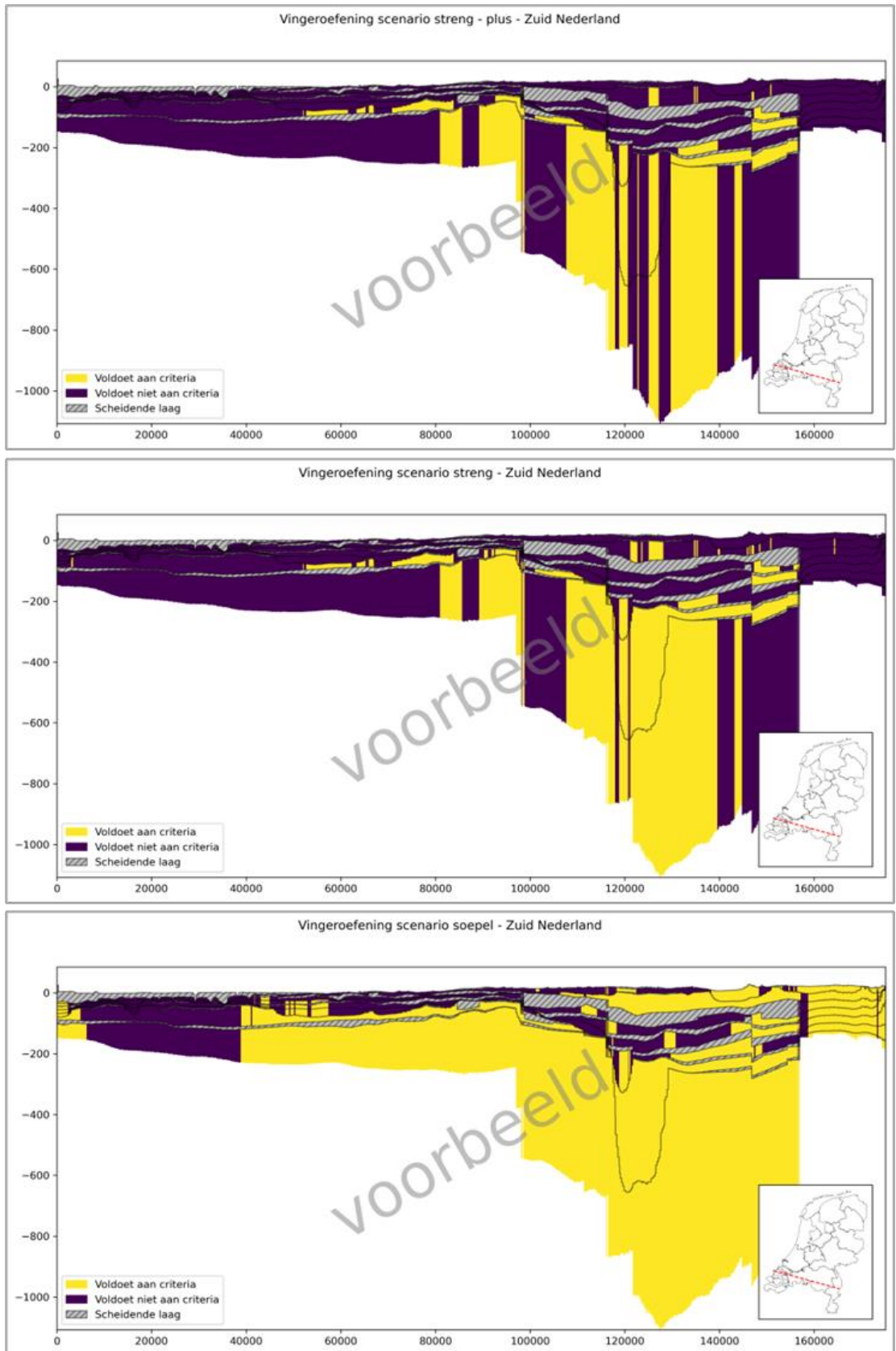
Figuur 14. 2D-kaarten van alle grondwater van natuurlijke kwaliteit voor heel Nederland, verkregen door projectie over elkaar van de voorbeeldkaarten voor de afzonderlijke LHM-lagen.



Figuur 15. Geohydrologische dwarsdoorsneden met visualisaties van de voorbeeldresultaten voor Noord-Nederland.



Figuur 16. Geohydrologische dwarsdoorsneden met visualisaties van de voorbeeldresultaten voor Midden-Nederland.



Figuur 17. Geohydrologische dwarsdoorsneden met visualisaties van de voorbeeldresultaten voor Zuid-Nederland.

7 Conclusie

Component 1 van het project “3D-kartering Nationale Grondwater Reserves” heeft als doel een 3D-kartering uit te voeren van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit voor heel Nederland. Deze 3D-kartering levert enkele van de bouwstenen op voor het bestuurlijke proces rondom de eventuele begrenzing van Nationale Grondwater Reserves in Nederland. De bouwstenen zijn 3D-beelden van karakteristieken van de ondergrond die relevant zijn voor het begrenzen van de NGRs, zoals hydraulische karakteristieken, chloride concentraties, ouderdom van het grondwater en fluxen.

De 3D-kartering omvat geheel Nederland en maakt primair gebruik van informatie uit het Landelijk Hydrologisch Model (LHM), versie 4.2, aangevuld met regionale informatie. Voor een groot deel van Nederland is het mogelijk om de eerste kleiige eenheid van de Formatie van Breda (BRk1), aan de basis van het LHM, als ondergrens voor de NGR 3D-kartering te gebruiken. In zuidelijk Nederland wordt deze ondergrens gevormd door diverse eenheden van Paleogene ouderdom, en (in Zuid-Limburg) het Carboon. Aan de basis van het LHM zijn over het algemeen grote verticale weerstanden aanwezig, en in de daaronder aanwezige aquifers komen te lage doorlatendheden voor om ze geschikt te maken voor drinkwaterwinning. Dit maakt de ondergrens van het LHM een geschikte ondergrens voor de NGR 3D-kartering.

De gekarteerde ondergrondkarakteristieken zijn het doorlaatvermogen (KD) van watervoerende lagen, de verticale weerstand (c-waarde) van scheidende lagen, grensvlakken van het chloridegehalte in het grondwater ter karakterisatie van de zoet-brak verdeling, en reistijd van het grondwater vanaf maaiveld. Deze karakteristieken zijn in de vorm van landelijke, gebiedsdekkende grids met een resolutie van 250 m x 250 m gekarteerd per LHM-modellaag. Voor zover beschikbaar is onzekerheidsinformatie rond deze karakteristieken, alsmede de invloed van breukwerking, betrokken of afgeleid uit de LHM-resultaten of vanuit regionale informatiebronnen.

De resultaten van de kartering zijn ondergebracht in een [online viewer](#).² Ten tijde van de afronding van dit rapport was de ontwikkeling van de viewer, in het bijzonder de 3D visualisatie van de verschillende data bronnen, nog in volle gang. Ook was er nog geen terugvertaling van LHM-lagen naar regionale watervoerende en scheidende lagen beschikbaar. Daarom worden in dit rapport de resultaten (nog) voor LHM-modellagen gepresenteerd.

Om gevoel te krijgen voor de bandbreedte in mogelijke NGR-begrenzings bij gebruik van de resultaten van de kartering, zijn als vingeroefening enkele fictieve voorbeelden uitgewerkt. In de voorbeelden zijn uiteenlopende grenswaarden voor de ondergrondkarakteristieken gehanteerd, en aanvullende beperkingen op grond van voorraadgrootte, bestaande grondwaterbeschermingsgebieden en reserveringen. Het opleggen van strengere grenswaarden komt duidelijk tot uiting in een veel kleiner oppervlak aan grondwatervoorraden die in aanmerking komen als mogelijke NGR. De resultaten van de vingeroefening zijn weergegeven per LHM-laag en als 2D-kaarten van alle grondwater van natuurlijke kwaliteit voor heel Nederland, verkregen door projectie over elkaar van de kaarten voor de afzonderlijke LHM-lagen. Tenslotte zijn de voorbeeldresultaten gevisualiseerd in enkele willekeurig gekozen geohydrologische dwarsdoorsneden.

²

<https://portal.gdngeoservices.nl/arcgis/home/webmap/viewer.html?webmap=084db90960db4b8e871a3159e44ef151>

8 Referenties

Baisch, S., Koch, C., Stang, H., Pittens, B., Drijver, B. & Buik, N (2016). Defining the Framework for Seismic Hazard Assessment in Geothermal Projects V0.1. Technical Report, version 161005, Q-con GmbH / IF Technology B.V.

Biesheuvel, A. (2004). Onderzoek ruwwaterproductie Losser. Rapport LS15-1/krub/001, Witteveen+Bos, Almere.

Broers, H.P., Stuurman, R.J., de Lange, W.J. (2015). Een aanzet voor de begrenzing van Nationale Grondwater Reserves. Deltares rapport 1209468-011-BGS-0001, Versie 01, 18 november 2015, definitief.

Broers, H.P., de Weert, J. (2015). Datering voor waterwinning: edelgassen en isotopen in het ruwwater van Brabant Water. Vaststellen van de leeftijdsopbouw van het onttrokken water en de herkomst van methaan. Deltares rapport BGS-14225-0001.

Broers, H.P., Hinsby, K., Kivits, T., Jurgens, B. (2021) Investigation of age distributions in water supply wells and recommendations for application of tracers and models mainly for estimating groundwater ages between 100 and 1000 years. GeoERA – HOVER, Deliverable D6.4, Final report.

Broers, H.P. en Kivits, T. (2022). Datering van het ruwwater op 17 winlocaties van Vitens in het rivierengebied van Gelderland en Utrecht. TNO-rapport TNO 2022 R11188.

Cirkel, G., van Vliet, M. & Dijkstra, J. (2022). Mogelijke lange-termijneffecten van grootschalige geothermie op grondwaterkwaliteit. STOWA Deltafact, Kennisimpuls Waterkwaliteit, versie 2.

Deckers, J., Vernes, R., Dabekaussen, W., den Dulk, M., Doornenbal, H., Duser, M., Hummelman, J., Matthijs, J., Menkovic, A., Reindersma, R., Walstra, J., Westerhoff, W. & Witmans, N. (2014). Geologisch en hydrogeologisch 3D model van het Cenozoïcum van de Roerdalslenk in Zuidoost-Nederland en Vlaanderen (H3O – Roerdalslenk). H3O-report 2014/ETE/R/1 / TNO 2014 R10799.

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. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3891-2014>

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

Duggal, K.N., Soni, J.P. (1996). Elements of Water Resources Engineering. Publisher New Age International, p. 270.

Hunink, J., van Walsum, P., Vermeulen, P., Pouwels, J., Bootsma, H., Janssen, G., Swierstra, W., Prinsen, G., Meshgi, A., Veldhuizen, A., de Lange, W., Hummelman, J., Bos – Burgering, L. & Kroon, T. (2020). Veranderingsrapportage LHM 4.0. Deltares rapport 11203718-000-BGS-0002, Utrecht.

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

Janssen, G., van Walsum, P., Vermeulen, P., Pouwels, J., van der Gaast, J., Meshgi, A., Amerika, I., Hunink, J., Prinsen, G. & Kroon, T. (2022). Veranderingsrapportage LHM 4.2. Deltares rapport 11206816-001-BGS-0002, Utrecht.

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

Olsthoorn, Th.N. (1977). In Nederlandse zandformaties zijn het doorstroomde en het totale porievolume aan elkaar gelijk. H2O (10) 1977, pp. 118-122.

Ruthy, I. & Dassargues, A. (2009). Carte hydrogéologique de Wallonie 1/25.000, Gemmenich – Botzelaar 35/5-6, Henri-Chapelle – Raeren 43/1-2, Petergensfeld – Lammersdorf 43/3-4. Notice explicative, Université de Liège.

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

Vernes, R.W., Deckers, J., Bakker, M.A.J., Bogemans, F., De Ceukelaire, M., Doornenbal, J.C., den Dulk, M., Duser, M., Van Haren, T.F.M., Heyvaert, V.M.A., Kiden, P., Kruisselbrink, A.F., Lanckacker, T., Menkovic, A., Meyvis, B., Munsterman, D.K., Reindersma, R., ten Veen, J.H., van de Ven, T.J.M., Walstra, J., Witmans, N. (2018). Geologisch en hydrogeologisch 3D model van het Cenozoïcum van de Belgisch-Nederlandse grensstreek van Midden-Brabant / De Kempen (H3O – De Kempen). VITO, TNO Geologische Dienst Nederland en Belgische Geologische Dienst, rapport TNO 2017 R11261 – VITO 2017/RMA/R/1348.

Verhagen, F., van Steijn, T., van der Wal, B., Swierstra, W. & Vermue, H. (2019). Update Hydrologische Gereedschapskist Noord-Brabant. Rapport RoyalHaskoningDHV nr. BF3823WATR1902061020WM, Amersfoort.

Vernes, R.W., Kruisselbrink, A.F., Ten Veen, J.H., Stam, J.C., Doornenbal, J.C., Hettelaar, J.M.M., Menkovic, A., Munsterman, D.K., Reindersma, R., Van de Ven, T.J.M. & Witmans, N. (in voorbereiding). Geologisch en hydrogeologisch 3D model van het Kenozoïcum van het noordwestelijke deel van de Roerdalslenk in de provincie Noord-Brabant (H3O-Roerdalslenk Noordwest). TNO-rapport xxxx.

Zaadnoordijk, W.J., Vernes, R.W., Reindersma, R. & Buma, J.T. (2022) Hydrogeologisch basismodel Zuid-Nederland. TNO-rapport TNO 2022 R11720.

Zaadnoordijk, W.J., Hettelaar, J. & Kivits, T. (2023) Inventarisatie huidige activiteiten en reserveringen. Deelrapportage 2 van project 3D-kartering Nationale Grondwater Reserves. Rapport nr. 11207846-002-BGS-0005.



9 Ondertekening

Mariëlle van Vliet
Tweede lezer

Jelle Buma
Auteur

Denise Maljers
Afdelingshoofd Geomodelling

45 van 63	3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit 11207846-002-BGS-0004, 22 februari 2023, definitief TNO 2023 R10885
-----------	--



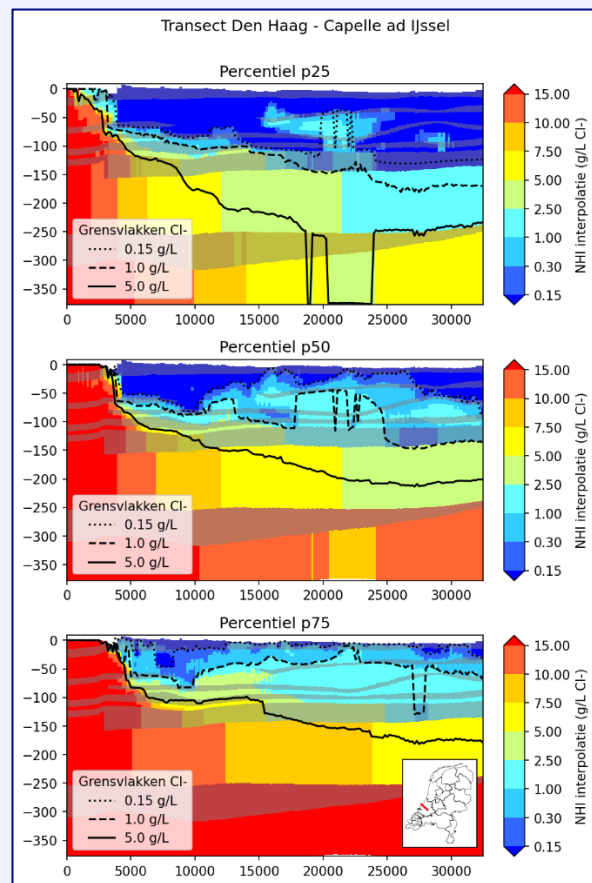
Bijlage 1 Dwarsprofielen grensvlakken chloride

De hiernavolgende dwarsprofielen tonen de 25-, 50- en 75-percentielwaarden van de kansverdeling van de met LHM zoet-zout gesimuleerde grensvlakdiepte na een inspeelperiode³ van 20 jaar (zwarte lijnen in de dwarsprofielen), met als startconditie de chlorideverdeling uit het 3D-chloridebestand van NHI (kleurenlegenda). Paarse lijnen boven het profiel geven inversies weer (zout boven zoet grondwater).

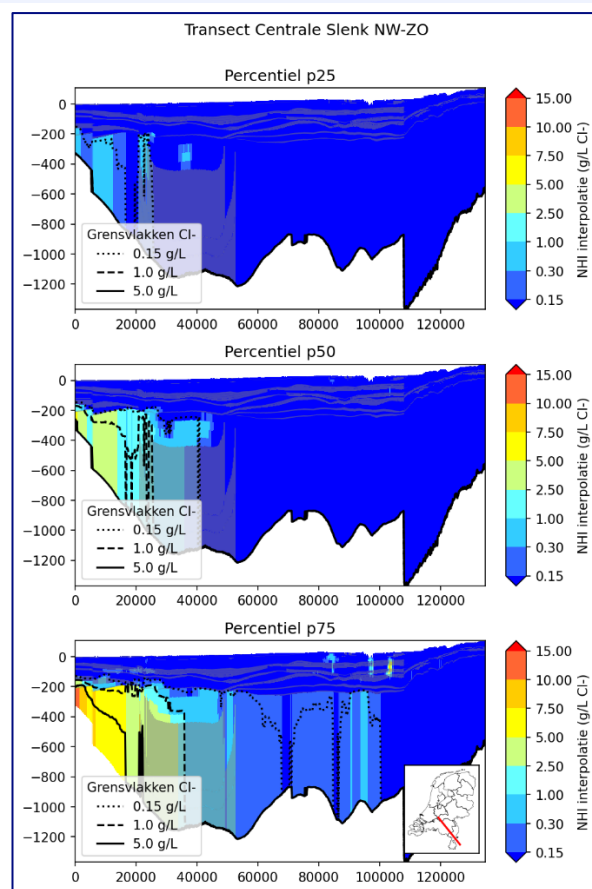
Als gevolg van de 20-jarige modelsimulatie komt de chlorideverdeling meer in overeenstemming met het grondwaterstromingspatroon, en nemen artefacten als gevolg van de 3D-interpolatie af. De aanpak is beschreven in Hoofdstuk 3.4.

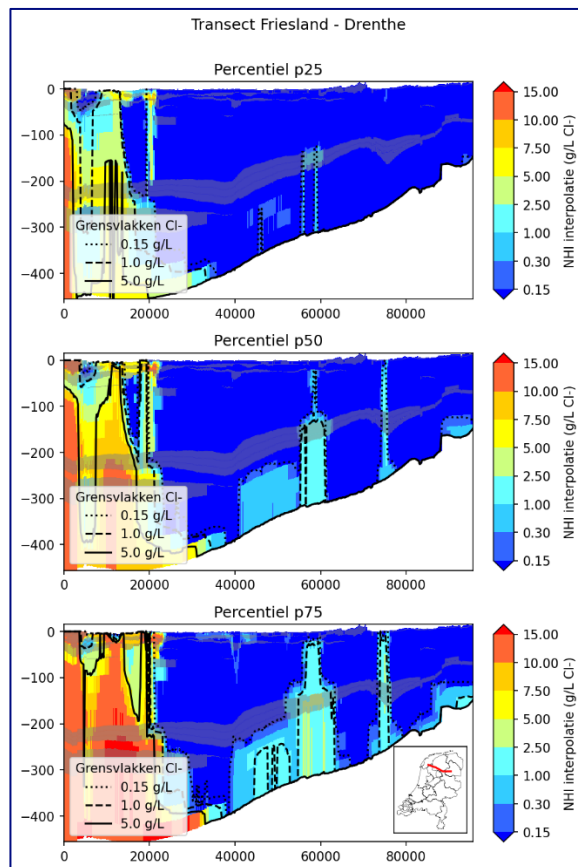
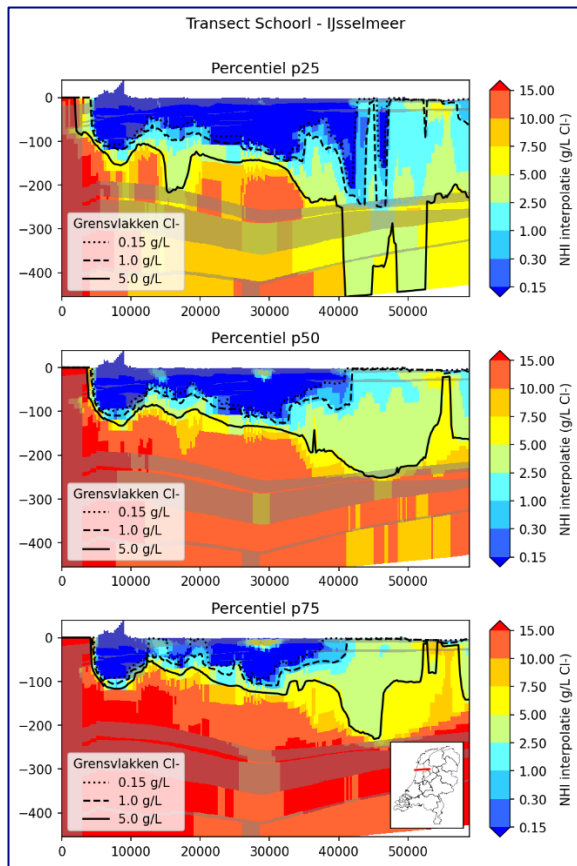
³ De inspeelperiode gaat over het inspelen van de zoet-zout verdeling. Er wordt gestart met een geostatistisch geïnterpoleerde zoet-zout verdeling, op basis van metingen van verschillende ouderdom. Om niet-fysische artefacten door de interpolatie (bv zout boven zoet waar je dit niet verwacht) zo veel mogelijk weg te krijgen, starten we het model in 2000, en runnen het tot 2020 (Delsman et al., 2020).

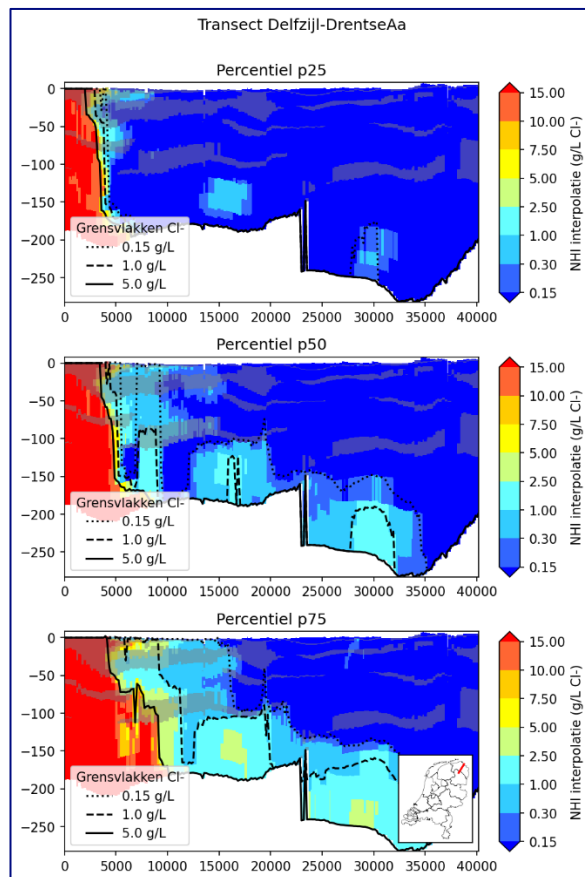
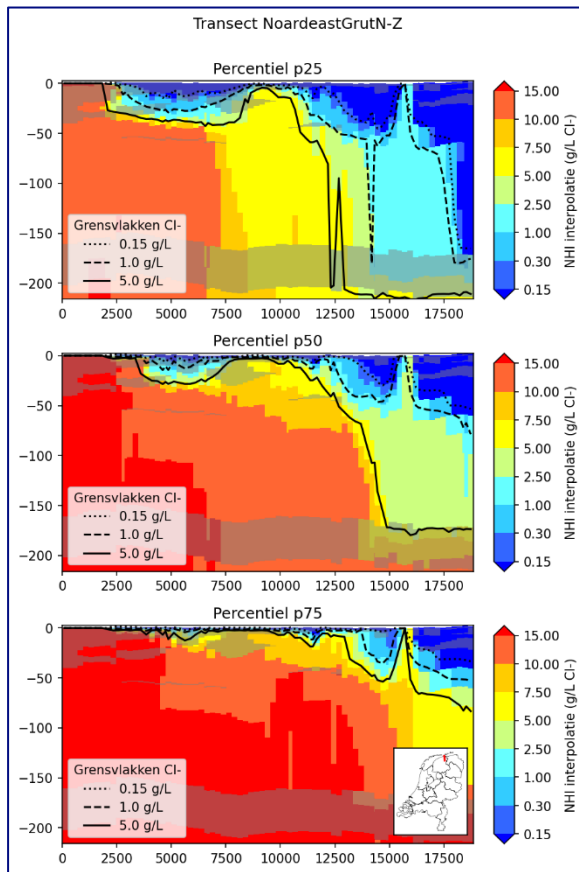


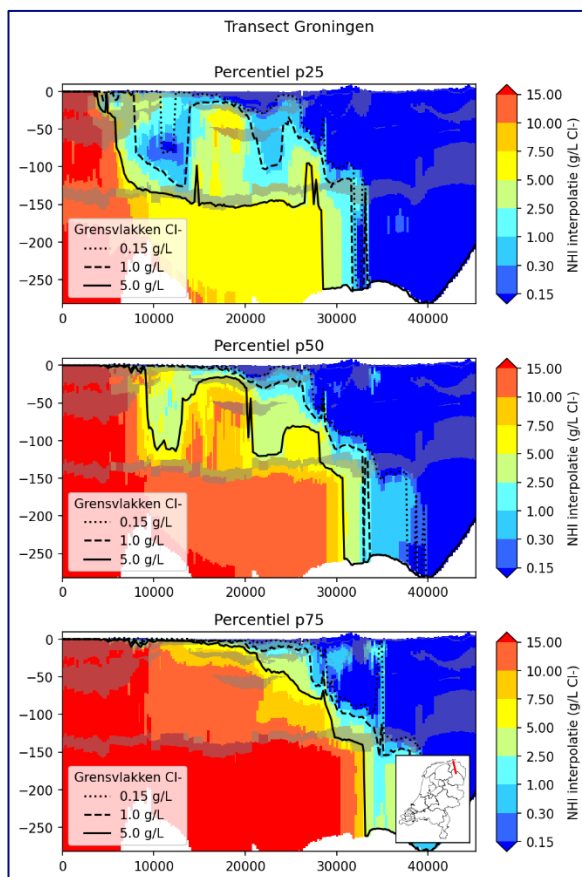
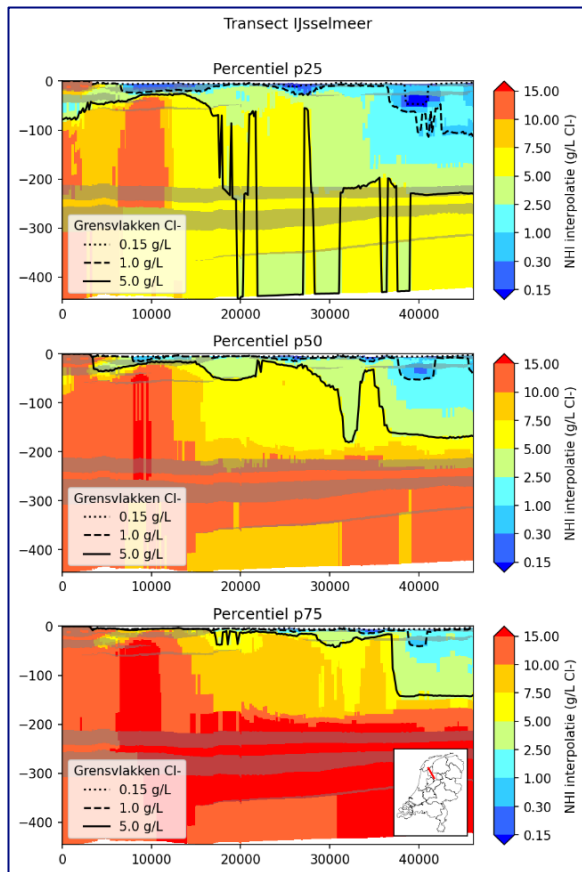


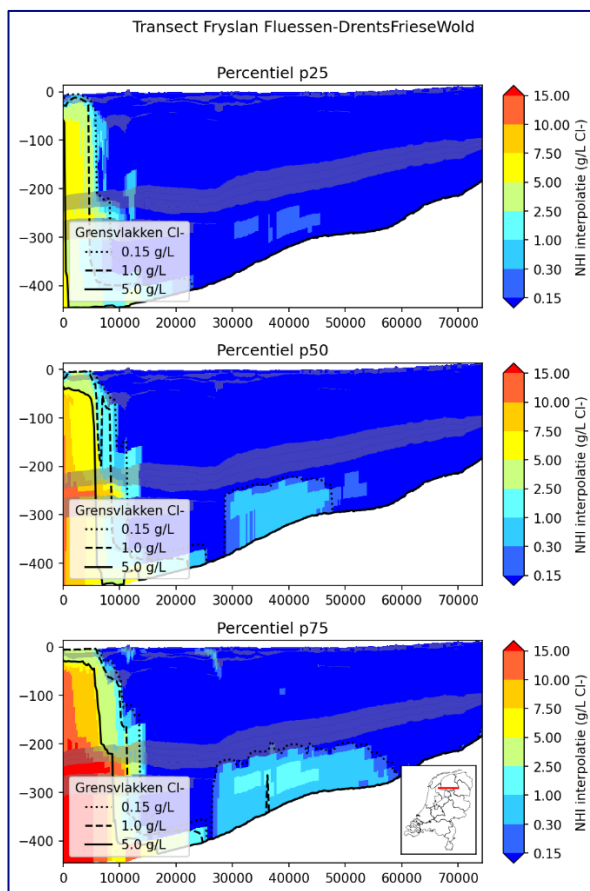
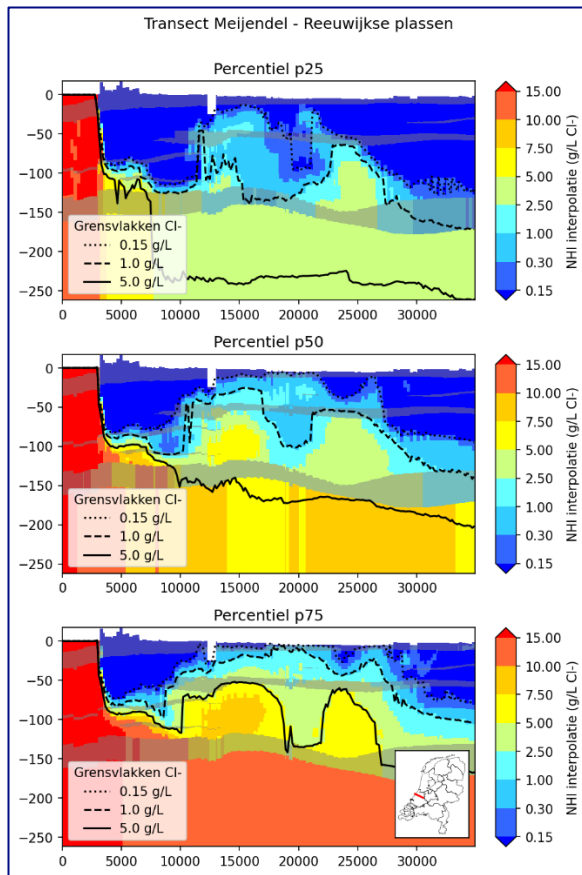
25-, 50- en 75-percentielwaarden van de kansverdeling van de met LHM zoet-zout gesimuleerde grensvlakdiepte na een inspeelperiode van 20 jaar, met als startconditie de chlorideverdeling uit het 3D-chloridebestand van NHI (kleurenlegenda). De grijze vlakken stellen de scheidende lagen voor. X-as geeft de aantal meters voor vanaf begin tot einde van de transect.

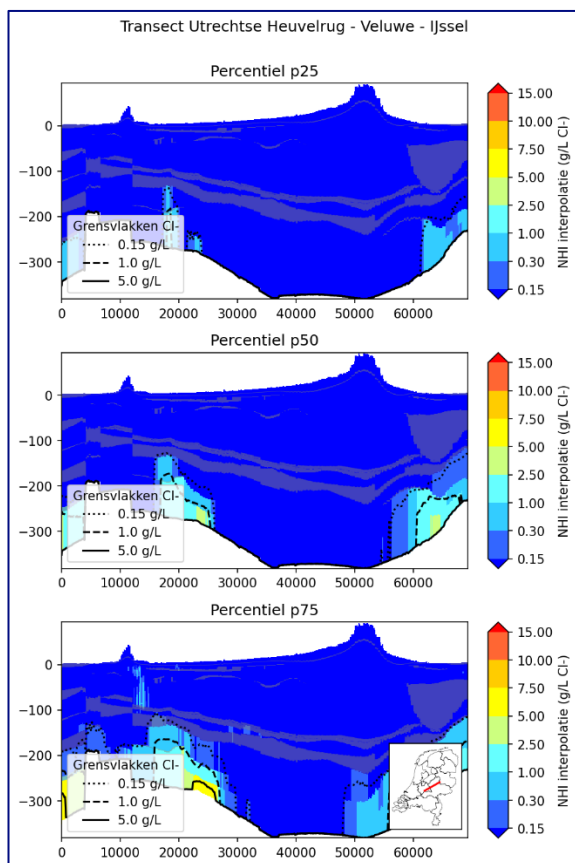
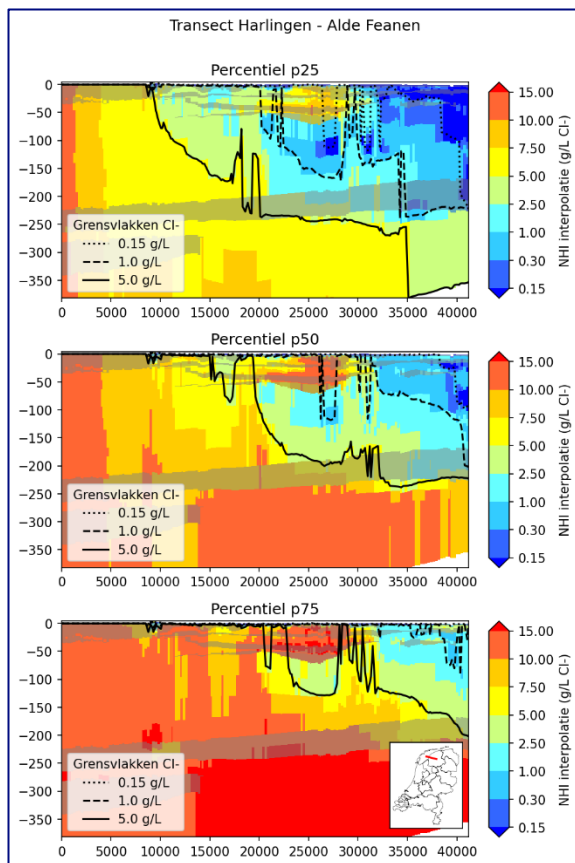


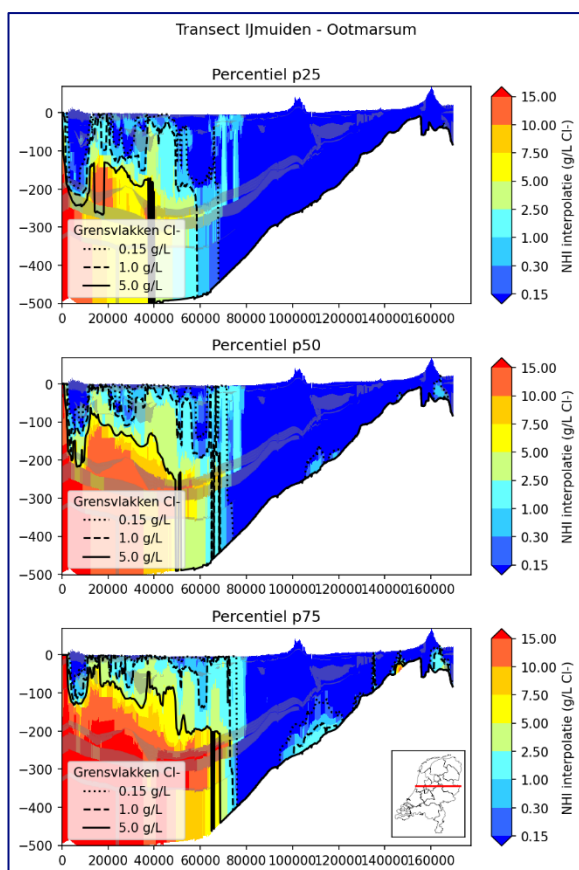
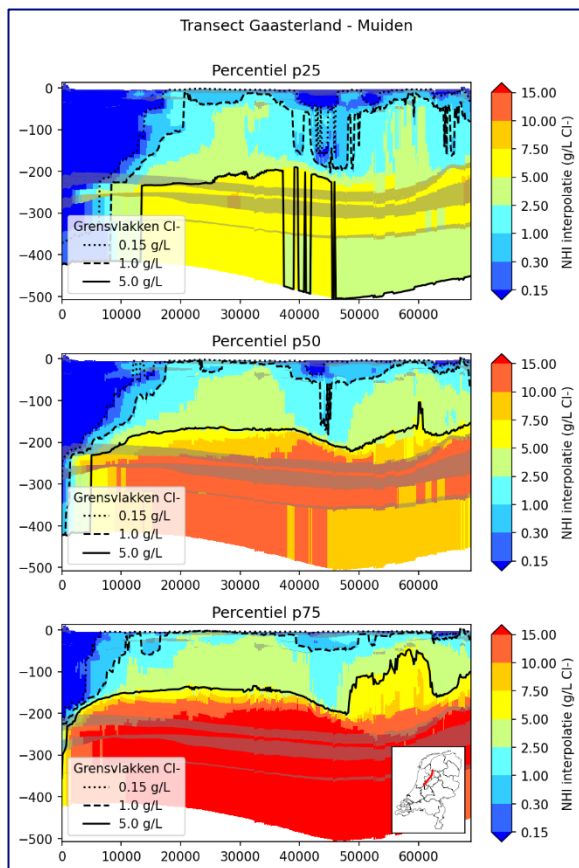


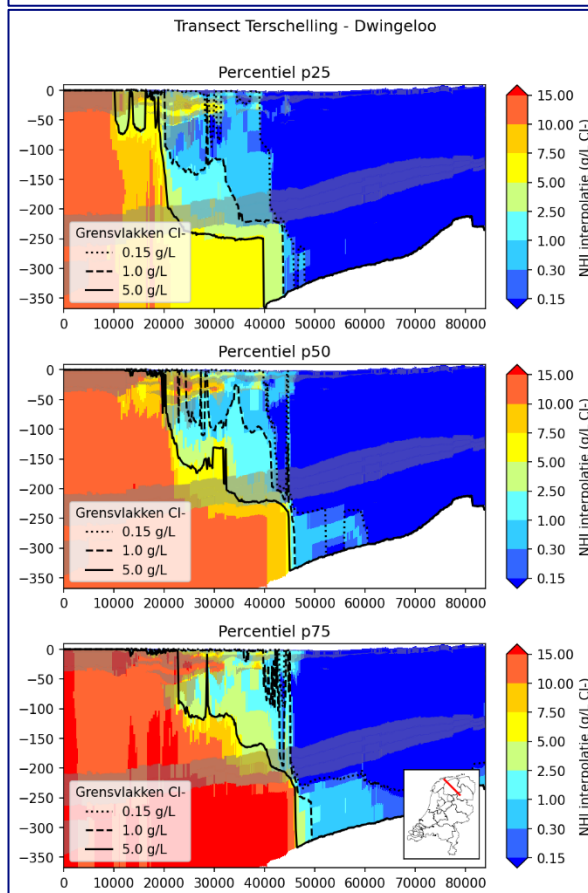
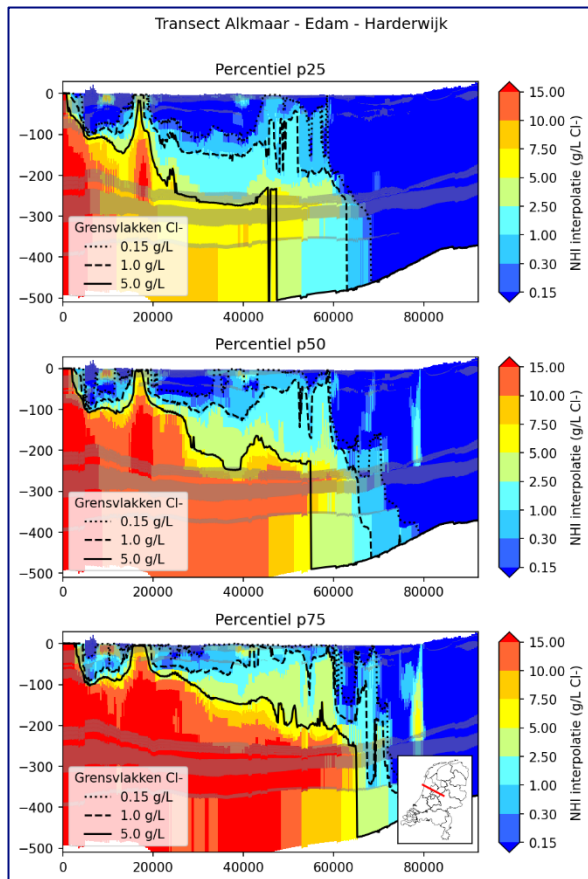


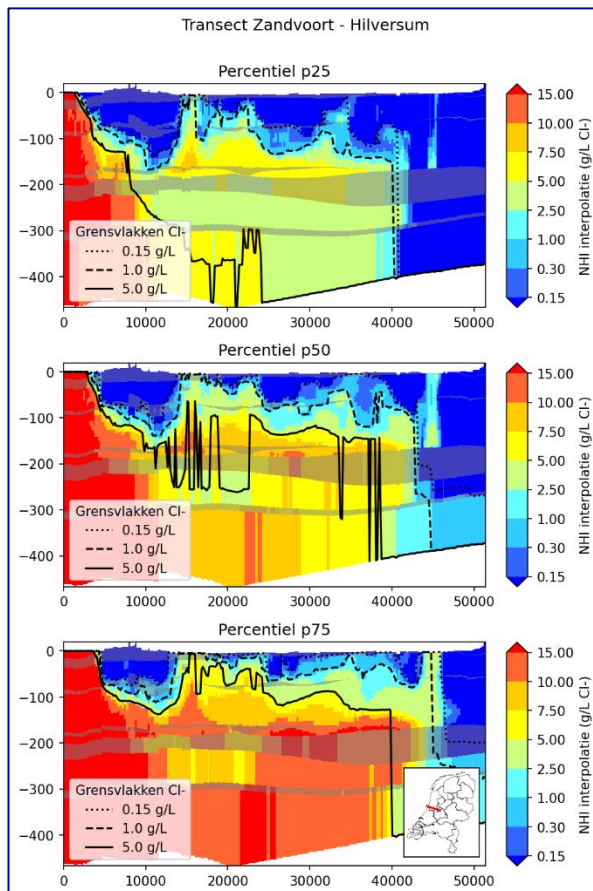
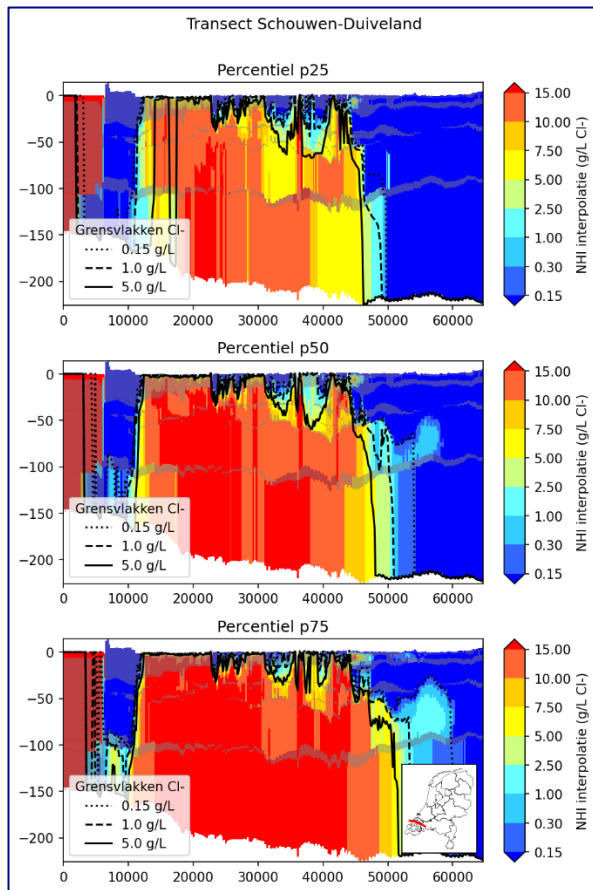


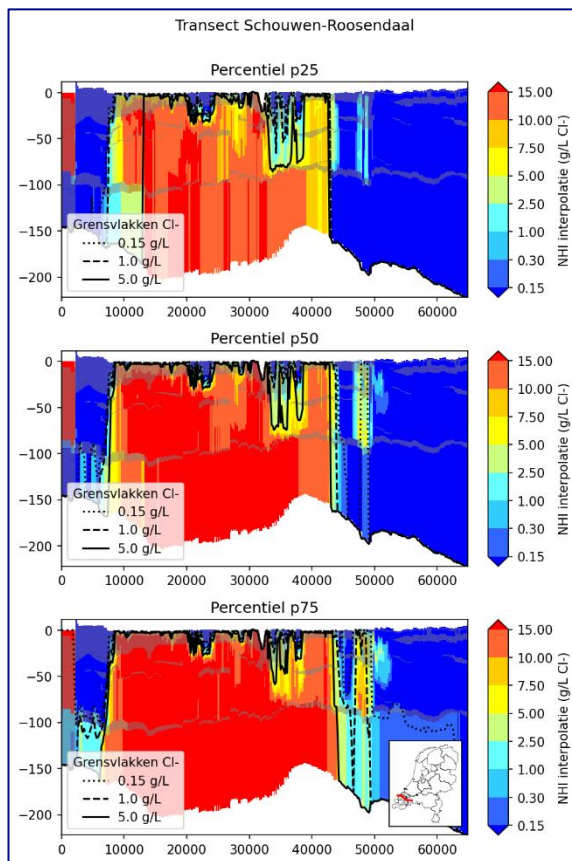
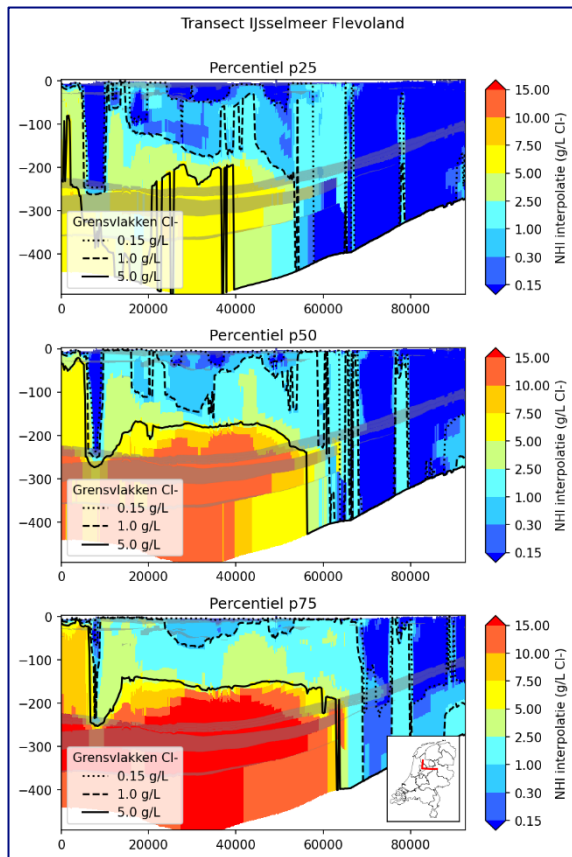


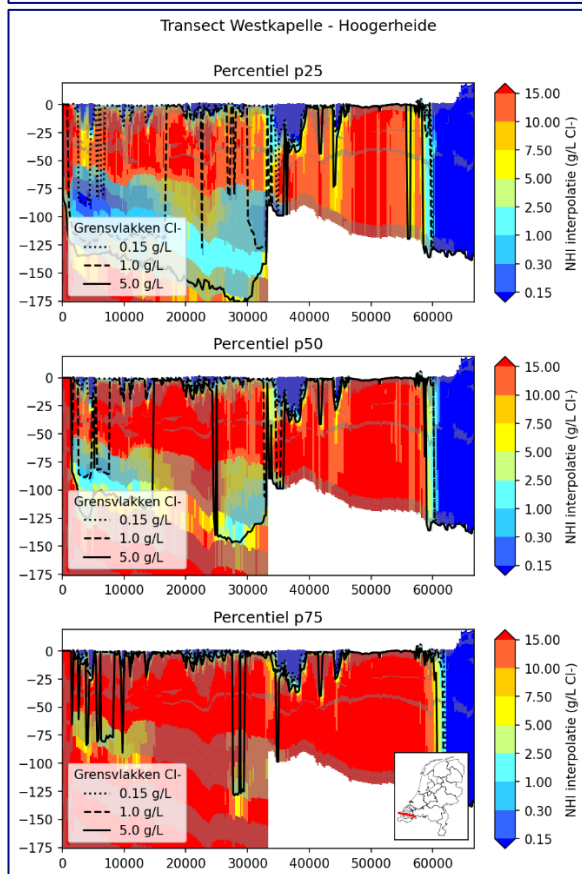
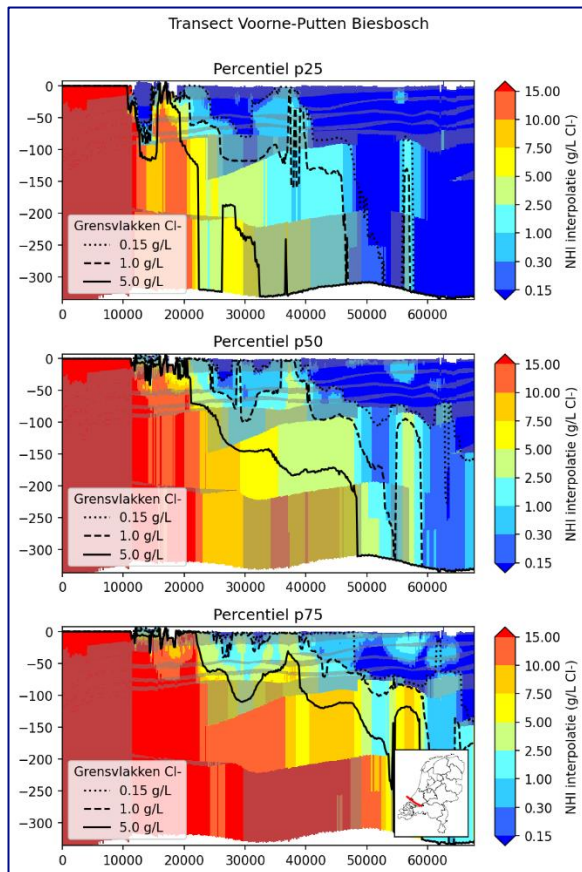


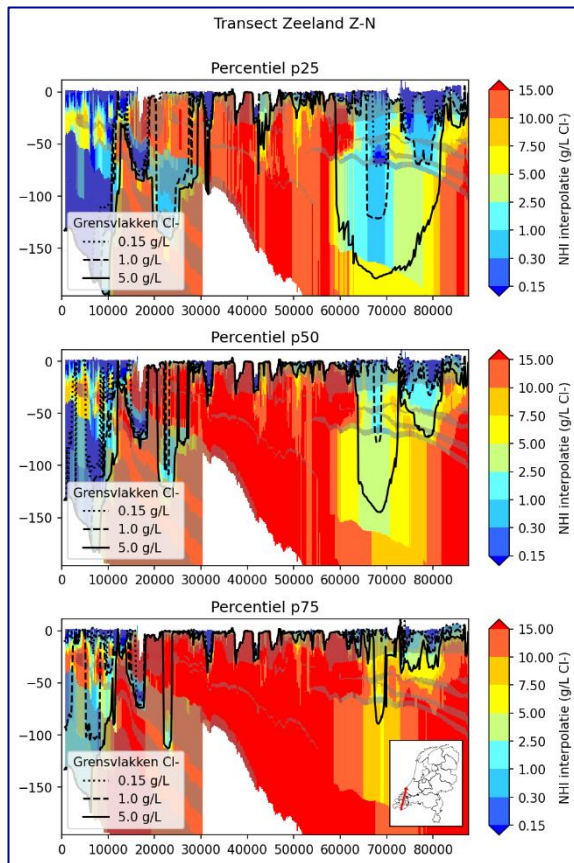












Bijlage 2 Veranderingsrapportage LHM zoet zout versie 4.1.2

(zie memo Veranderingsrapportage_LHMzz4.1.2.docx, wordt bij de definitieve versie in de pdf versie toegevoegd)

59 van 63	3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit 11207846-002-BGS-0004, 22 februari 2023, definitief TNO 2023 R10885
-----------	--



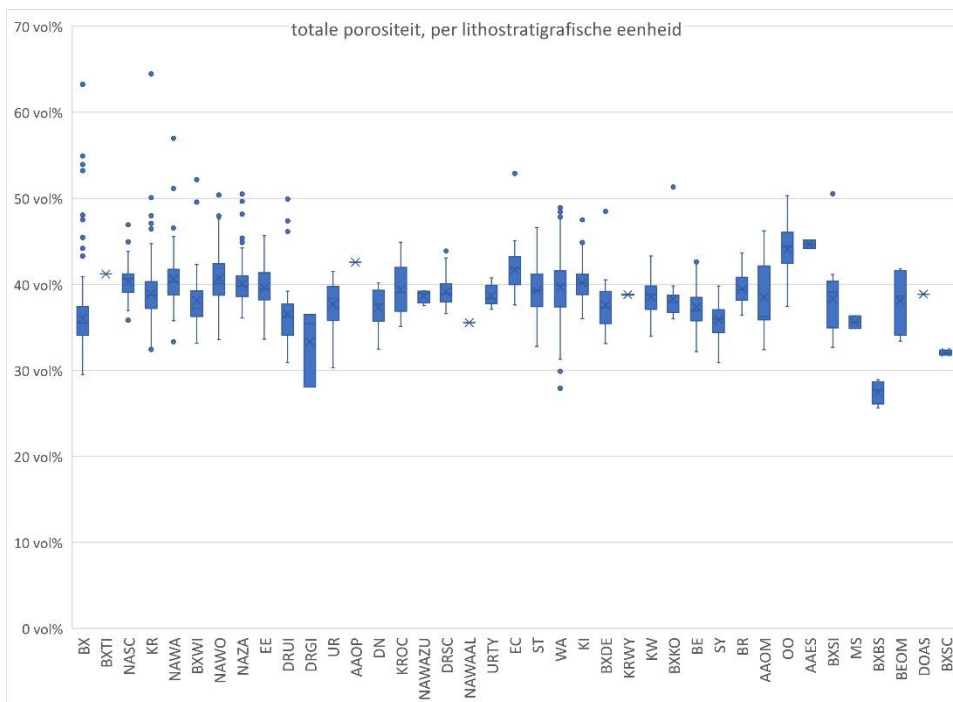
Bijlage 3 Onderbouwing bandbreedten porositeit voor reistijdberekeningen

1. Porositeit van watervoerende lagen

Van belang voor reistijden van grondwater is het doorstroomde porievolume van het sediment. Dit wordt ook vaak aangeduid met de term 'effectieve porositeit', maar deze term wordt verder niet gebruikt, omdat in het verleden rond dit begrip veel spraakverwarring is ontstaan (Olsthoorn, 1977). Tegenover het doorstroomd porievolume staat het totale porievolume of totale porositeit. Door Olsthoorn (1977) wordt gesteld dat de Nederlandse watervoerende pakketten waaruit zoet water wordt onttrokken (met uitzondering van Zuid-Limburg), een totale porositeit hebben die binnen nauwe grenzen varieert rond 38 (volume)%. Ook wordt gesteld dat in die pakketten het totale en het doorstroomde porievolume aan elkaar gelijk kunnen worden gesteld.

De conclusie van Olsthoorn (1977) is getoetst met voorlopige meetgegevens uit TOPINTEGRAAL, het langlopende boor- en meetprogramma van de ondiepe ondergrond van TNO Geologische Dienst Nederland (TNO GDN). Op basis van de droge volumieke massa (*dry bulk density*) van in Kopecky-ringen gestoken monsters, en een aanname voor de volumieke massa van kwartskorrels van 2650 kg per m³, is voor ruim 2100 relatief 'schone' zandmonsters, met een gemiddeld zandpercentage van 95,7%, een gemiddelde totale porositeit berekend van 38,9 vol% ± 3,5 vol%, zie Figuur 18. Deze waarde bevestigt derhalve de conclusie van Olsthoorn (1977), maar ligt hoger dan de waarden van 30 of 35 vol% die vaak in stoftransportmodellen worden aangehouden. Wel moet worden opgemerkt dat in de TOPINTEGRAAL-monsterverzameling relatief weinig grindhoudende grofzandmonsters voorkomen. Van dergelijke sedimenten wordt verwacht dat ze een grote spreiding in de korrelgrootteverdeling hebben. Dit kan leiden tot lagere porositeiten, omdat kleinere korrels de ruimten tussen de grotere opvullen.





Figuur 18. Totale porositeit per lithostratigrafische eenheid. Op basis van voorlopige meetgegevens uit TOPINTEGRAAL, het langlopende boor- en meetprogramma van de ondiepe ondergrond van TNO GDN.

Alles overwegende is besloten om reistijdberekeningen uit te voeren met een beste schatting van porositeitswaarden van 38 volume%. Om de invloed van de onzekerheid rond deze parameter op de gesimuleerde reistijden te kwantificeren, zijn bovendien berekeningen uitgevoerd met porositeitswaarden van 30 volume% (veel gebruikte waarde in stoftransportmodellen) en 46 volume%. In plaats van 8% afgetrokken van 38 volume% is deze er nu bij opgeteld.

2. Porositeit van scheidende lagen

Anders dan bij zand is het doorstroomd porievolume van klei aanzienlijk kleiner dan het totale porievolume, maar er is binnen de randvoorwaarden van de opdracht geen kwantitatieve informatie over gevonden. Ook voor klei wordt vaak een waarde voor het doorstroomd porievolume van 30 vol% aangehouden in stof- en warmtetransportmodellen. Het is echter niet uit te sluiten dat het doorstroomd porievolume in klei aanzienlijk lager kan liggen.

Alles overwegende is besloten om reistijdberekeningen uit te voeren met een beste schatting van porositeitswaarden van 40 volume%. Om de invloed van de onzekerheid rond deze parameter op de gesimuleerde reistijden te kwantificeren, zijn bovendien berekeningen uitgevoerd met porositeitswaarden van 10 volume% en 50 volume%.

62 van 63	3D-kartering van zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit 11207846-002-BGS-0004, 22 februari 2023, definitief TNO 2023 R10885
-----------	--



Bijlage 4 Begrippenlijst

ASV	Aanvullende Strategische Voorraden; waar de provincies verantwoordelijk zijn voor het borgen van de bronnen voor de drinkwatervoorziening op de middellange termijn (2040)
BRO	Basis Registratie Ondergrond
c-waarde	Verticale weerstand
DGM	Digital Geologisch Model van Nederland. 3D-lagenmodel dat de ondergrond van Nederland tot ongeveer 500 meter onder NAP in blokken van 100 x 100 meter weergeeft
DGM-diep	Gestapeld rastermodel dat dertien geologische lagen bevat, variërend in ouderdom van Carboon tot Neogeen
GeoTOP	3D-model dat de ondergrond tot maximaal 50 meter onder NAP in blokken (voxels) van 100 x 100 x 0,5 meter weergeeft
H3O-naam zoals H3O Roerdalslenk	Hydrogeologische 3D-modellering Ondergrond. Het betreft een serie projecten gericht op de grensstreken. Samen met partners uit België en Duitsland wordt gewerkt aan modellen met een eenduidige interpretatie van de hydrogeologische eenheden in de grensgebieden
HCOV	Hydrogeologisch Codering van de Ondergrond van Vlaanderen
IBRAHYM-Roerdalslenk	Grondwater Modelinstrumentarium Limburg
K,	Doorlatendheid
Kh	Horizontale doorlatendheid
KD	Doorlaatvermogen is de doorlatendheid K maal de dikte D
LHM	Landelijk Hydrologische Model. De landelijke toepassing van het NHI (Nederlands Hydrologisch Instrumentarium)
LHM zoet zout	Landsdekkend zoet-zout grondwatermodel, gebaseerd op LHM versie 4.0. Dit model berekent op nationale schaal de stroming van zoet en zout grondwater, en is geschikt om landsdekkende verziltingsstudies mee uit te voeren.
MIPWA model	Hydrologisch instrumentarium voor grondwaterstudies in Noordoost-Nederland
NGR	Nationale Grondwater Reserves; Zoet en brak grondwater van natuurlijke kwaliteit
NHI	Nederlands Hydrologisch Instrumentarium
REGIS	Hydrogeologisch Model. 3D-lagenmodel dat de ondergrond van Nederland tot ongeveer 500 meter onder NAP in blokken van 100 x 100 meter weergeeft.
STRONG	Strukturvisie 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.