

COASTAR

REFERENTIESITUATIE HYDRO(GEO)LOGIE ZUID-HOLLAND



ALLIED WATERS®



Rapport

COASTAR. Referentiesituatie hydro(geo)logie Zuid-Holland

Deltares rapport 11200070-001-BGS-0001
Mei 2018

OPDRACHTGEVER

TKI Watertechnologie

KWALITEITSBORGER(S)

Dr. G.H.P. (Gualbert) Oude Essink (Deltares)

AUTEUR(S)

E.S. (Esther) van Baaren (Deltares)

H. (Huite) Bootsma (Deltares)

Dr. G.H.P. (Gualbert) Oude Essink (Deltares)

VERZONDEN AAN

Projectpartners TKI COASTAR

STATUS

Dit document is openbaar en is uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de resultaten zijn openbaar.

JAAR VAN PUBLICATIE
2018

MEER INFORMATIE

E info@coastar.nl
I www.coastar.nl



ALLIED WATERS®



COASTAR® is een initiatief van Allied Waters, Arcadis, Deltares en KWR en wordt ondersteund door bedrijfsleven en overheden in laag Nederland.

© Allied Waters, Arcadis, Deltares, KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
mei 2018	E.S. (Esther) van Baaren		Dr. G.H.P. (Gualbert) Oude Essink		Drs. M.J.M. Kuijper	
	H. (Huitema) Bootsma					
	Dr. G.H.P. (Gualbert) Oude Essink					

Samenvatting

Deze rapportage beschrijft de resultaten van het eerste werkpakket van het Topsector Water project COASTAR: Beschrijving van de referentiesituatie m.b.t. de hydro(geo)logie. Dit rapport dient als basis voor het verder uitwerken van de verschillende oplossingen die COASTAR biedt op regionale schaal. Op sectoraal, lokaal en regionaal niveau zijn veel studies gedaan in het studiegebied; in dit rapport wordt de relevante informatie uit al deze studies samengevoegd tot een goed overzicht van de referentiesituatie. De ruimtelijke samenhang binnen het studiegebied wordt zichtbaar gemaakt en de fysische basis voor verdere uitwerking van COASTAR wordt gelegd. Hierbij is gebruik gemaakt van bestaande informatie en (model)studies.

Inhoud

Samenvatting	2
1 Inleiding	4
1.1 COASTAR	4
1.2 COASTAR Zuid-Holland	4
1.3 Aanpak en gebruikshandleiding	5
2 Conceptuele weergave ondergrond	6
3 Opbouw ondergrond	9
4 Grondwaterstroming	15
4.1 Stijghoogte	15
4.2 Kwel en infiltratie	16
5 Grondwaterkwaliteit	18
5.1 Zoet-Zout	18
5.2 Geochemie	21
6 Infrastructuur	22
7 Watervraag	26
8 Wateraanbod	27
9 Tot slot	29
10 Referenties	30

1 Inleiding

1.1 COASTAR

Wereldwijd bestaat een groeiende behoefte aan zoetwater in kustgebieden wereldwijd, terwijl aan de andere kant een stijgende zeespiegel, bodemdaling en een toename van perioden van extreme neerslag zorgen voor een afname van de zoete watervoorraden door verzilting van het grondwater en oppervlaktewater (Döll, 2009; Giosan e.a., 2014; Gleeson ea., 2012; Minderhoud ea., 2017; Neumann e.a., 2015; Syvitski e.a., 2009; Taylor e.a., 2012; Wada e.a., 2010). Gewasopbrengsten dalen, de leefbaarheid neemt af en men moet een beroep doen op dure alternatieve zoetwatervoorziening voor drinkwater, landbouw, industrie, ecologie (environmental flows) en stedelijk waterbeheer (bevoeiing parken, straatreiniging etc.). Vanwege deze optelsom aan problemen hebben kustgebieden een steeds minder aantrekkelijk vestigingsklimaat (Winsemius e.a., 2018).

Ook Nederland kent problemen met de beschikbaarheid van zoetwater, bijvoorbeeld in het westen en zuidwesten van het land. 'Zoetwatertekorten moeten worden voorkomen ... de watervoorziening moet robuuster ... zoetwater moet optimaal worden benut voor economie en nutsfuncties', aldus het Deltaprogramma Zoetwater (2015). In tijden van wateroverschot wordt zoet water afgevoerd naar zee, in droge perioden hebben we dit water juist nodig: watertekorten zijn dan ook het gevolg van een gebrek aan voldoende zoetwater van voldoende kwaliteit op het juiste moment en op de juiste plaats. Jaarrond is regionaal geen sprake van zoetwatertekort, maar van een gebrek aan opslagcapaciteit. Gebruikmaken van gebiedseigen, tijdelijke opgeslagen overschotten in de ondergrond wordt nu nog gezien als een kleinschalige maatregel die slechts lokaal kan worden ingezet door eindgebruikers.

Als oplossing voor problemen in de Nederlandse zoetwatervoorziening in kustgebieden is COASTAR (COastal Aquifer STorage and Recovery) in het leven geroepen: een handelingsperspectief voor een robuuste zoetwatervoorziening in Laag-Nederland door grootschalige inzet van de ondergrond voor opslag en levering van zoetwater (COASTAR, 2016). COASTAR zet grootschalige ondergrondse oplossingen in voor een robuuste zoetwatervoorziening en droogtebestrijding door:

1. een brug te slaan tussen wateraanbod en –vraag in ruimte en tijd middels ondergrondse berging en
2. verzilting van grond- en oppervlaktewater tegen te gaan door afvang en gebruik van brakwater voor zoetwaterproductie.

1.2 COASTAR ZUID-HOLLAND

In 2017 is gestart met het uitwerken van de uitvoerbaarheid van COASTAR voor de regio Zuid-Holland. Doel van deze studie is het planmatig en kritisch onderzoeken en ontwikkelen van het concept COASTAR ten behoeve van opname als adaptatiestrategie voor de zoetwatervoorziening van laag Nederland. Het focusgebied is de regio Den Haag-Westland-Rotterdam (Figuur 1.1), mede als voorbeeld voor andere regio's in Nederland en kustgebieden wereldwijd.

Binnen COASTAR Zuid-Holland wordt eerst gekeken naar watergebruikers die op zoek zijn naar een betrouwbare bron van hoogwaardige waterkwaliteit en bereid zijn daarvoor te betalen. De focus ligt dan ook op de drinkwatersector, industrie en glastuinbouw.

COASTAR is een concept geïnitieerd door KWR, Arcadis, Deltares en Allied Waters. In dit Topsector Water project werken deze uitvoerende partijen samen met de provincie Zuid-Holland, Hoogheemraadschap van Delfland, gemeente Westland, Dunea, Evides en LTO glaskracht. Het project bestaat uit verschillende werkpakketten:

1. Beschrijving referentiesituatie
2. Waterbank Westland
3. Gebruik brakwater
4. Uitwerken financieringsvormen
5. Opstellen Masterplan
6. Opschaling en Inbedding
7. Eindconferentie

Deze rapportage beschrijft de resultaten van het eerste werkpakket 'Beschrijving referentiesituatie'.



FIGUUR 1.1 LIGGING VAN HET FOCUSGEBIED COASTAR TKI OP DE TOPOGRAFISCHE KAART. DE RODE LIJN GEEFT DE GRENZEN VAN HET FOCUSGEBIED AAN.

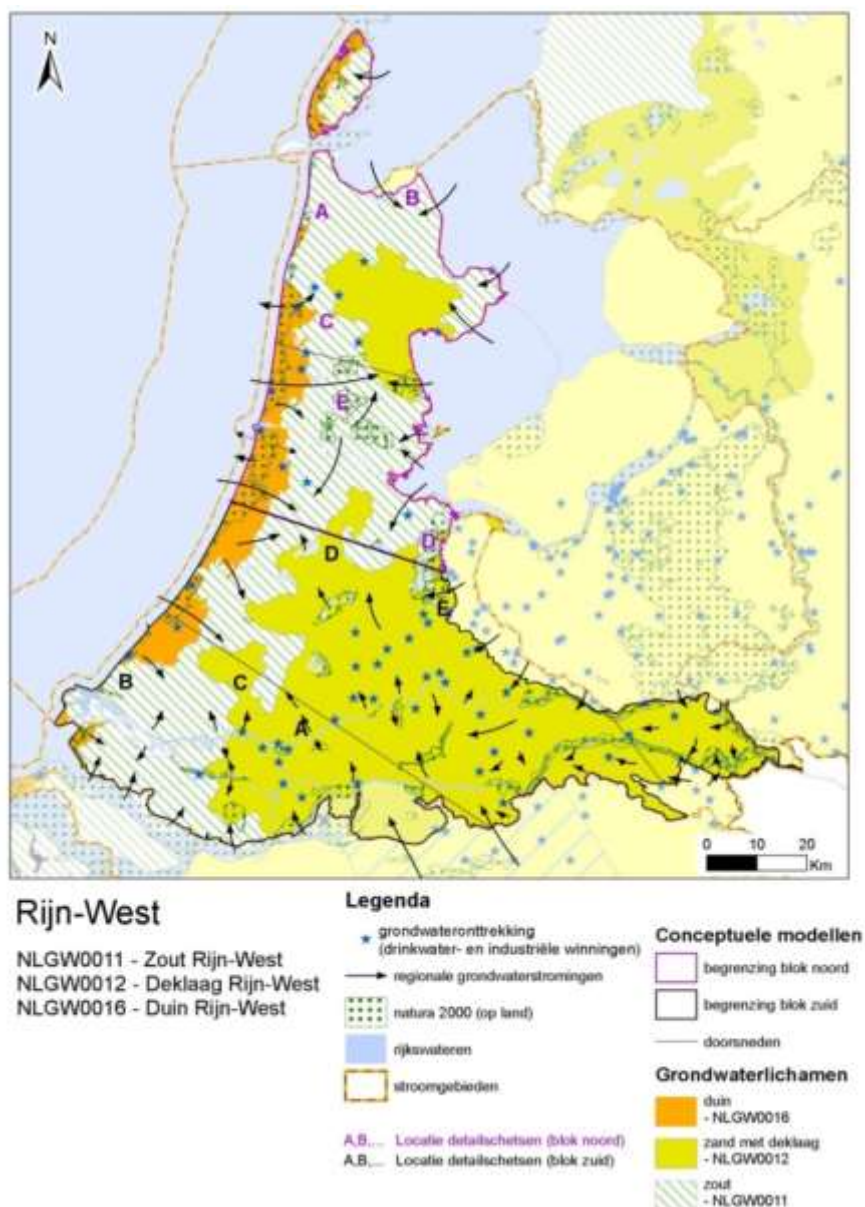
1.3 AANPAK EN GEBRUIKSHANDLEIDING

Deze rapportage beschrijft de resultaten van het eerste werkpakket van het Topsector Water project COASTAR: 'Beschrijving referentiesituatie'. Dit rapport dient als basis voor het verder uitwerken van de verschillende oplossingen die COASTAR biedt op regionale schaal. Op sectoraal, lokaal en regionaal niveau zijn al veel studies zijn gedaan in het studiegebied. In dit rapport wordt de relevante informatie uit deze studies samengevoegd tot een overzicht van de referentiesituatie. De ruimtelijke samenhang binnen het studiegebied wordt zichtbaar gemaakt en de fysische basis voor verdere uitwerking van COASTAR wordt gelegd. Hierbij is gebruik gemaakt van bestaande informatie en (model)studies.

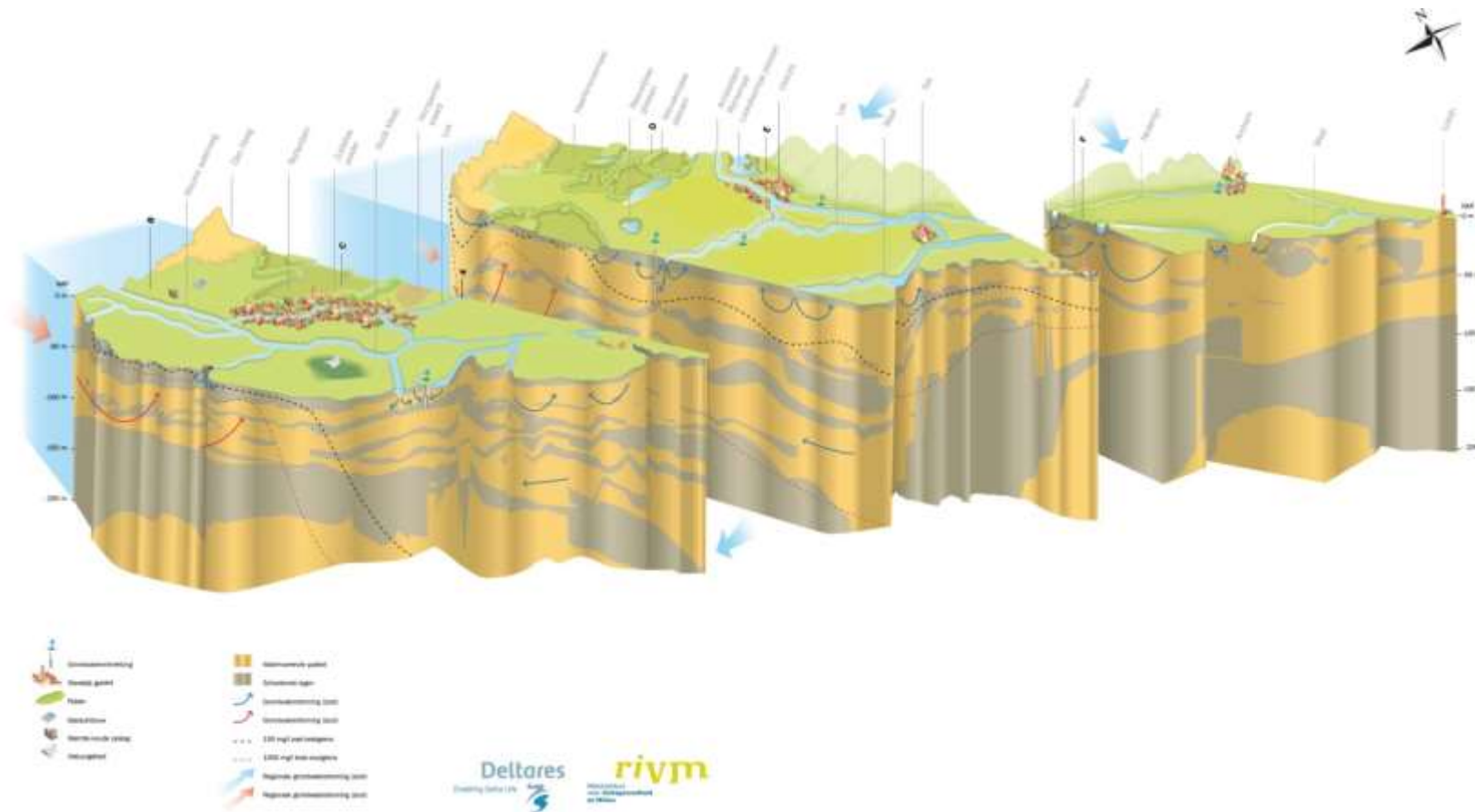
De resultaten in deze rapportage kunnen gebruikt worden om het regionale systeem te analyseren en begrijpen, en om COASTAR op conceptuele schaal te plaatsen in de ondergrond en in de ruimte. Het gebruikte schaalniveau is niet geschikt voor (gedetailleerde) ontwerpstudies: de modelresultaten hebben een lage resolutie ($250 \times 250 \text{ m}^2$), de watervoerende pakketten zijn een sterke versimpeling van de grillige geologische werkelijkheid en lokaal ontbreken vaak metingen over de zoet-zout verdeling van het grondwater. In de aanbevelingen wordt verder ingegaan op datagebruik, dataverzameling en modellen voor lokale studies.

2 Conceptuele weergave ondergrond

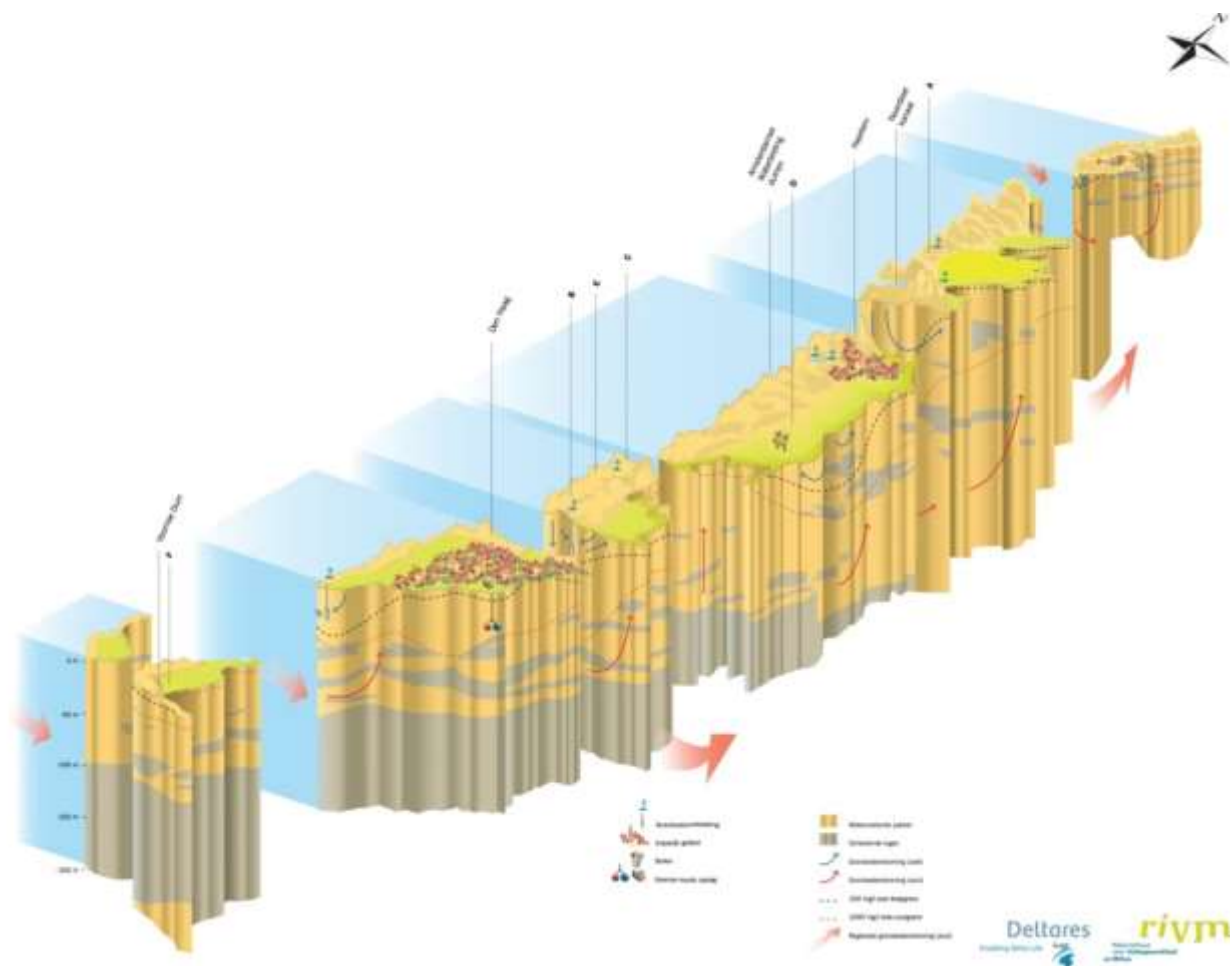
In dit hoofdstuk wordt de ondergrond conceptueel weergegeven zoals gepresenteerd in Deltares & RIVM (2013) (Figuur 2.1, Figuur 2.2 en Figuur 2.3). Het doel van deze conceptuele modellen is het inzichtelijk maken van de belangrijkste processen in relatie tot de hydro(geo)logische toestand en de zoet-zout verdeling voor de grondwaterlichamen in laag Nederland. Deze conceptuele modellen zijn onderdeel van de 'factsheets grondwaterlichamen' die Nederland in 2013 aan de Europese Commissie heeft geleverd als onderdeel van de Kaderichtlijn Water rapportage. Voor COASTAR geven deze figuren op grove schaal de relaties weer binnen de ondergrond en tussen de ondergrond en de bovengrond.



FIGUUR 2.1 CONCEPTUEEL GRONDWATERLICHAAM, GEZAMENLIJK ZOUT RIJN-WEST, DEKLAAG RIJN-WEST EN DUIN RIJN-WEST. BRON: DELTARES & RIVM (2013).



FIGUUR 2.2 CONCEPTUEEL GRONDWATERLICHAAM, 3D, ZUID-HOLLAND. BRON: DELTARES & RIVM (2013).



FIGUUR 2.3 CONCEPTUEEL GRONDWATERLICHAAM, 3D, DUINEN NOORD- EN ZUID-HOLLAND. BRON: DELTARES & RIVM (2013).

3 Opbouw ondergrond

Dit hoofdstuk beschrijft de opbouw van de ondergrond van boven naar beneden, dus van jong naar oud. Aan de westelijke rand van de Nederlandse Delta kent het focusgebied met name de laatste ca. 10 000 jaar (Holoceen) een sterke invloed van de nabijgelegen kust (Vos, 2015). Onder het maaiveld, dat ongeveer op zeeniveau ligt, bevindt zich een pakket van ca. 20 m met zowel wadafzettingen (zand, silt, klei) en lagunaire afzettingen (silt, klei, veen) uit deze periode, die doorgaans matig tot slechtdoorlatend zijn. Ruimtelijk is veel variatie aanwezig in deze deklaag. Door eerdere inbraken van de zee in het gebied wordt de grens tussen zoet en zout grondwater in de bovenkant van deze deklaag aangetroffen (Post, 2004).

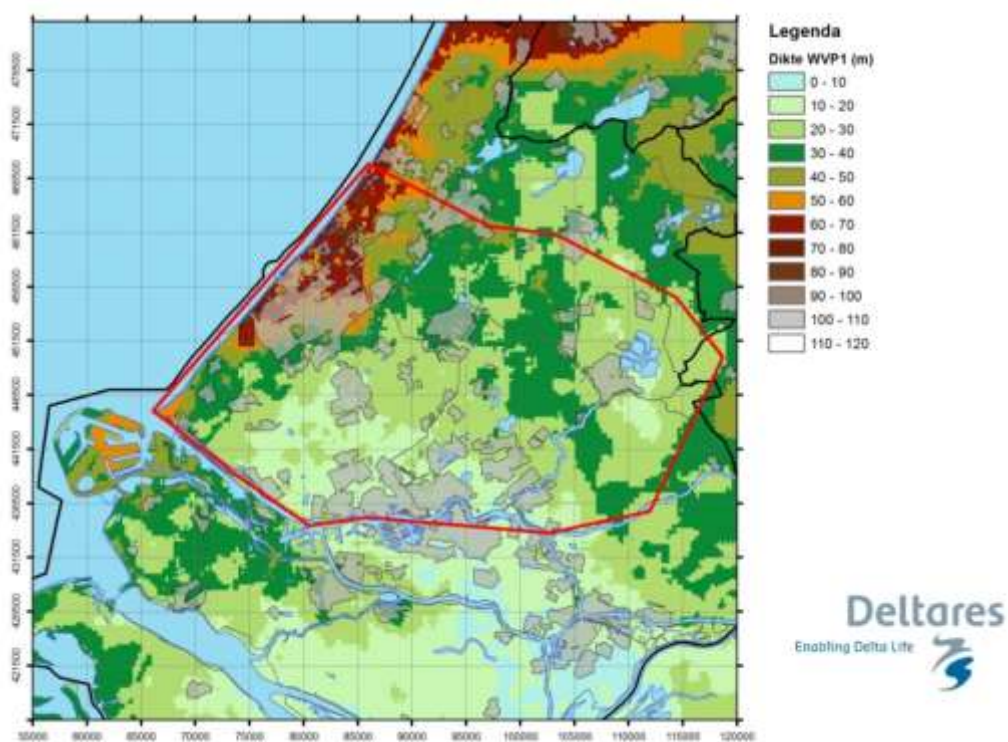
Onder de slechtdoorlatende deklaag bevinden zich de Pleistocene goeddoorlatende zandpakketten (watervoerend pakketten ook wel aquifers genoemd), die worden begrensd door slechtdoorlatende (klei)lagen, ook wel scheidende weerstandslagen of aquitards genoemd. Het eerstewatervoerend pakket bevindt zich op circa 20 tot 40 m-mv (meter beneden maaiveld). In het zuiden is dit watervoerend pakket enigszins dunner, terwijl het meer naar het noorden juist dikker wordt aangetroffen, zie Figuur 3.1. Het tweede en derde watervoerend pakket laten juist een grotere dikte in het midden van het gebied zien, en zijn dunner aan de oost- en westzijde van het focusgebied (Figuur 3.2 en Figuur 3.3). Figuur 3.4 laat twee doorsnedes zien voor de bodemopbouw in het focusgebied (REGIS 1, zie ook <https://www.dinoloket.nl/>).

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de aanwezige geologische formaties in het focusgebied, en de vertaling naar watervoerende pakketten en weerstandslagen. Hoewel de hydrogeologische indeling van het grondwatermodel Zuid-Holland meer detail geeft, wordt voor de eenvoud de benaming van de Provincie Zuid-Holland in dit rapport aangehouden.

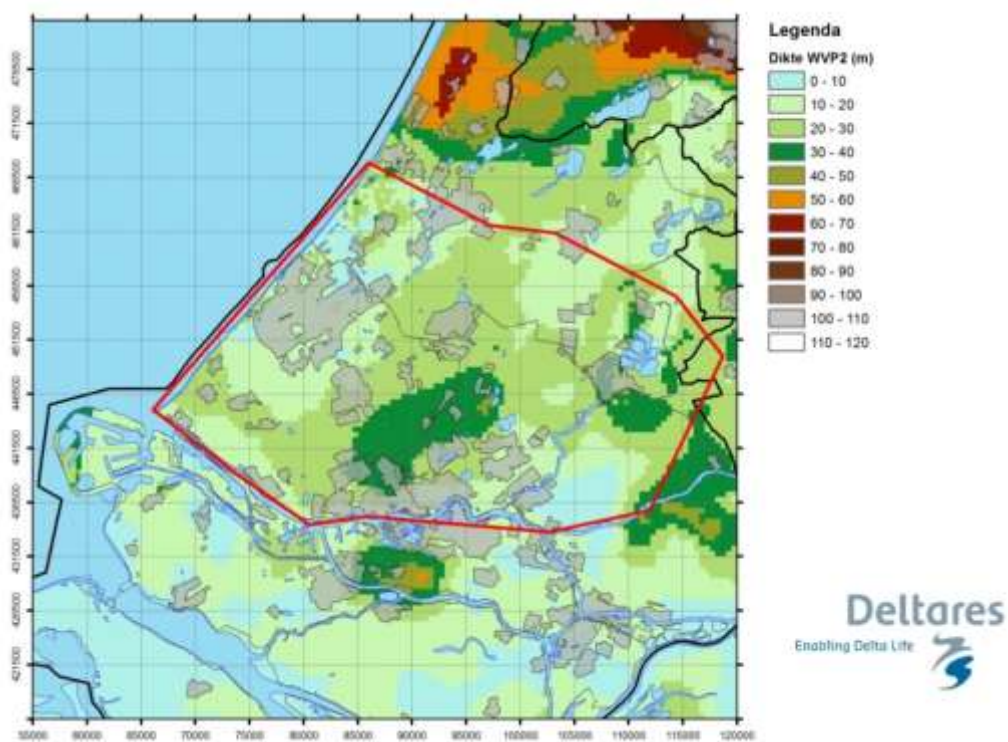
De gepresenteerde opbouw van de ondergrond, Figuur 3.4, is erg homogeen en zal in werkelijkheid veel heterogener zijn. Zo zullen kleilagen waarschijnlijk niet continu doorlopen en zal er klei en veen aanwezig zijn binnen de watervoerende pakketten. Ook zijn zandbanen onvoldoende meegenomen. GeoTOP (Stafleu, 2016) geeft een heterogener beeld van de bovenste 50 meter, maar de werkelijkheid kan nog heterogener zijn. In Figuur 3.5 staat het verschil tussen REGIS en GeoTOP weergegeven voor een profiel in het studiegebied.

TABEL 3.1 VERTICALE LAAGSCHEMATISATIE IN 9 MODELLAGEN VAN HET GRONDWATERSTROMINGSMODEL VAN ZUID-HOLLAND, EN DE INDELING VAN PROVINCIE ZUID-HOLLAND. OVERGENOMEN EN AANGEPAST UIT OUDE ESSINK (2017).

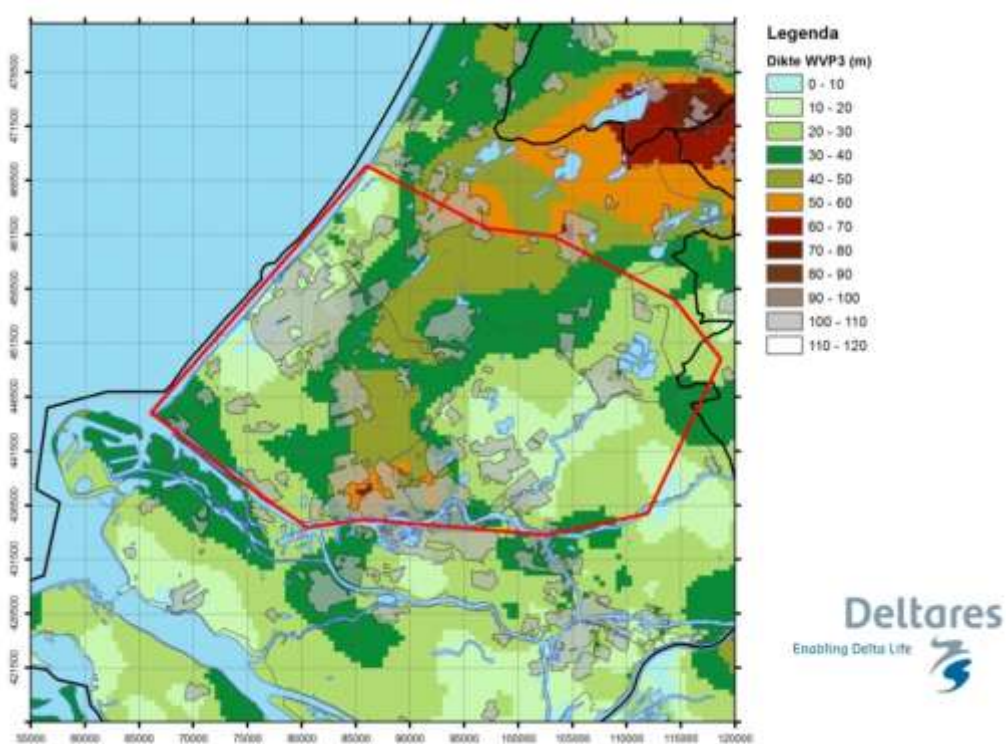
Formatie, oude benaming	Formatie, nieuwe benaming	Hydrogeologische indeling grondwatermodel Zuid-Holland	Benaming door Provincie Zuid- Holland
<i>Westland</i>	<i>Naaldwijk, Nieuwkoop, Echteld</i>	<i>Deklaag / freatisch pakket</i>	Watervoerende lagen binnen deklaag
Westland, Nuenen groep, Twente		Verticale weerstand deklaag	
<i>Twente</i>	<i>Boxtel</i>	<i>Eerste watervoerend pakket</i>	WVP1: Watervoerende lagen tussen deklaag en formatie Kedichem
<i>Eem</i>		<i>Eerste scheidende laag: Eem</i>	
<i>Eem</i>	<i>Eem, Woudenberg</i>	<i>Tweede watervoerend pakket</i>	
<i>Drente</i>		<i>Tweede scheidende laag: Drente</i>	
<i>Drente, Kreftenheye</i>	<i>Drente</i>	<i>Derde watervoerend pakket</i>	
<i>Urk</i>		<i>Derde scheidende laag: Urk</i>	
<i>Urk / Sterksel</i>	<i>Urk / Sterksel</i>	<i>Vierde watervoerend pakket</i>	WVP2: Watervoerende lagen tussen formatie Kedichem en formatie Tegelen
Enschede / Kedichem	Peize, Waalre, S tamproy	Vierde scheidende laag: Enschede en Kedichem	
<i>Kedichem, Harderwijk</i>		<i>Vijfde watervoerend pakket</i>	
Tegelen		Vijfde scheidende laag: Tegelen- en Belfeldklei	WVP3: Watervoerende lagen tussen formatie Tegelen en formatie Maassluis
<i>Tegelen</i>	<i>Waalre</i>	<i>Zesde watervoerend pakket</i>	
Maassluis		Zesde scheidende laag: Maassluis	Watervoerende lagen tussen formatie Maassluis en formatie Oosterhout
<i>Maassluis</i>		<i>Zevende watervoerend pakket</i>	
Oosterhout		Zevende scheidende laag: Kalloklei	
<i>Oosterhout</i>		<i>Achtste watervoerend pakket</i>	
Oosterhout		Slecht doorlatende basis	



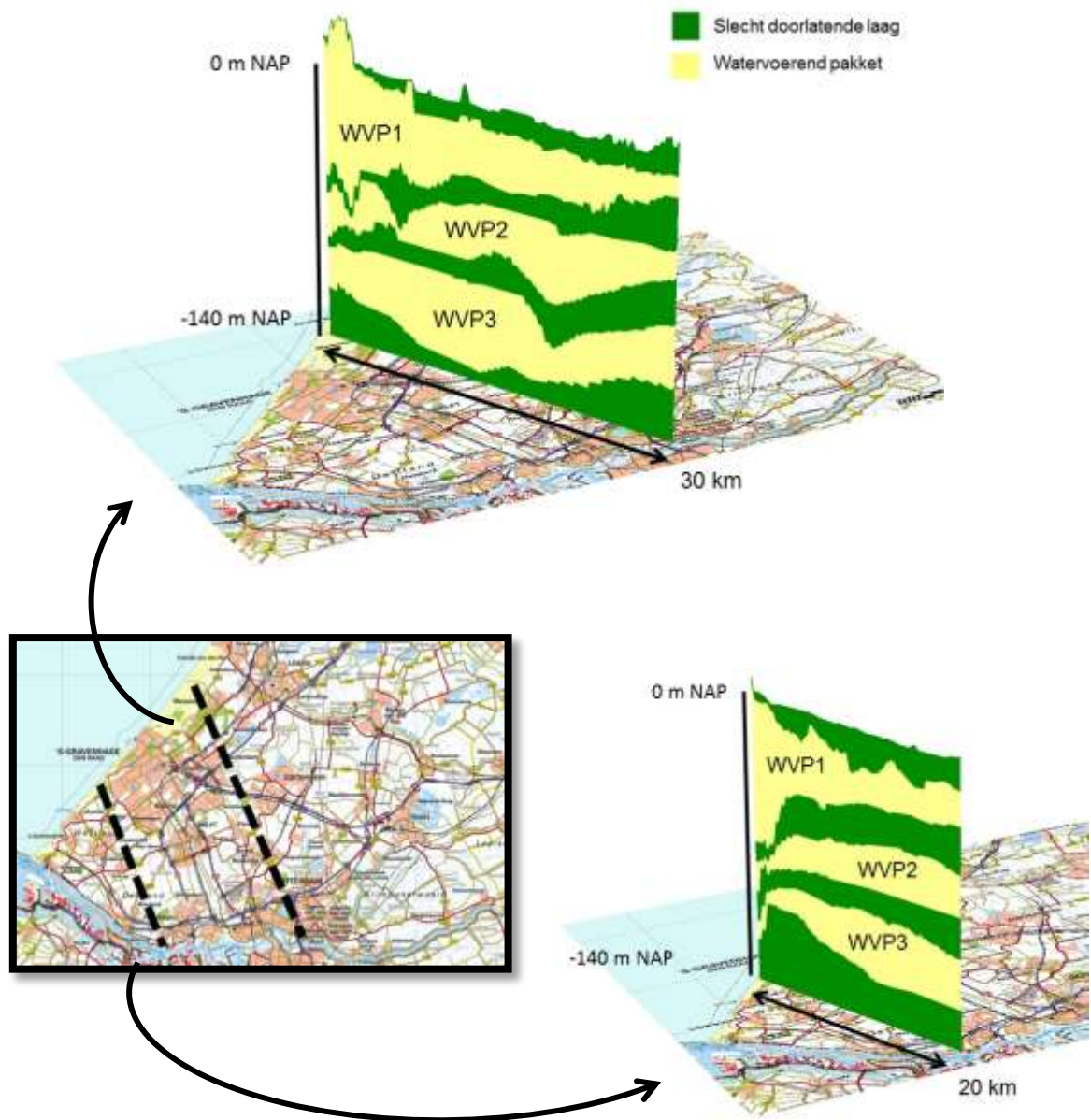
FIGUUR 3.1 DIKTE VAN HET EERSTE WATERVOERENDE PAKKET.



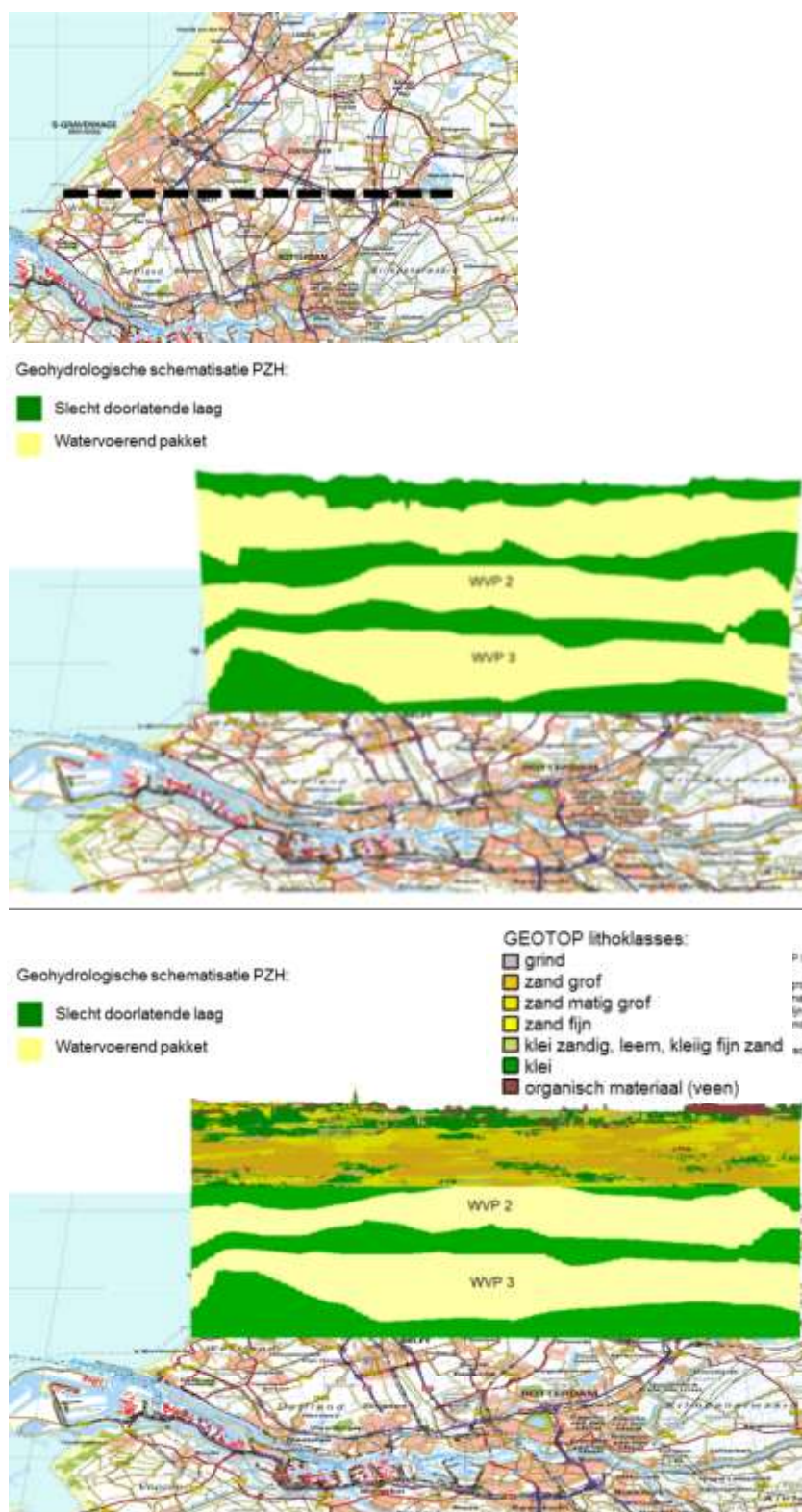
FIGUUR 3.2 DIKTE VAN HET TWEEDE WATERVOERENDE PAKKET.



FIGUUR 3.3 DIKTE VAN HET DERDE WATERVOERENDE PAKKET.



FIGUUR 3.4 TWEE DOORSNEDES VAN DE BODEMOPBOUW IN HET FOCUSGEBIED. DE BOVENSTE DOORSNEDE LAAT DE OPBOUW VAN WATERVOERENDE PAKKETTEN EN WEERSTANDSLAGEN ZIEN VOOR DE DOORSNEDE WASSENAAR – KRIMPEN AAN DE IJSEL. DE ONDERSTE DOORSNEDE LAAT DE OPBOUW VAN WATERVOERENDE PAKKETTEN EN WEERSTANDSLAGEN ZIEN VOOR DE DOORSNEDE MONSTER - VLAARDINGEN. BEIDE DOORSNEDES BEGINNEN IN DE VERTICAAL BIJ MAAIVELD EN GAAN TOT EEN DIEPTE VAN -140 M NAP.

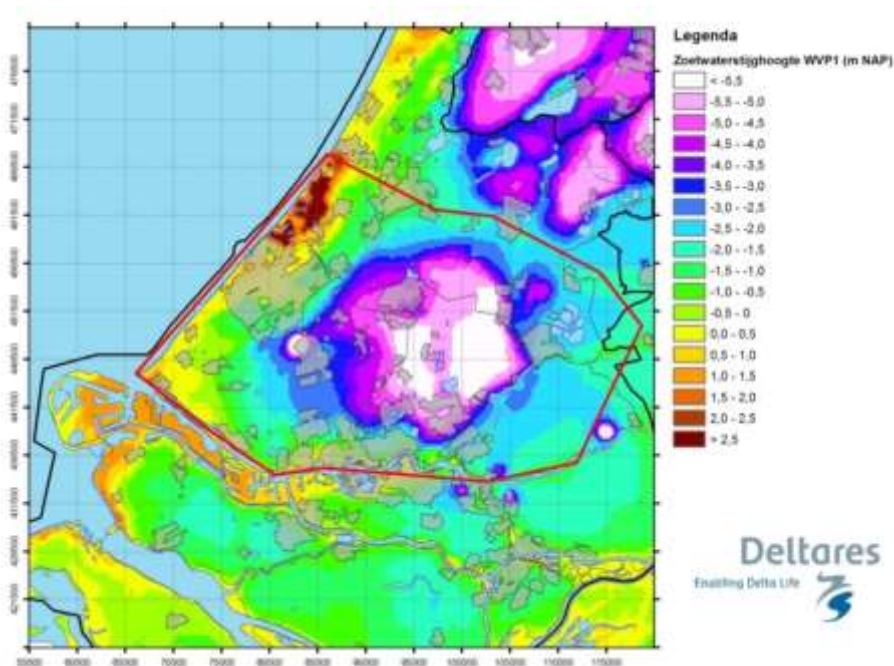


FIGUUR 3.5 A. LOCATIE DOORSNEDEN; B. ONDERGRONDSCHEMATISATIE VOLGENS REGIS 1 EN C. ONDERGRONDSCHEMATISATIE MET GEOTOP IN DE BOVENSTE 50 METER (MEEST WAARSCHIJNLIJKE LITHOKLASSE).

4 Grondwaterstroming

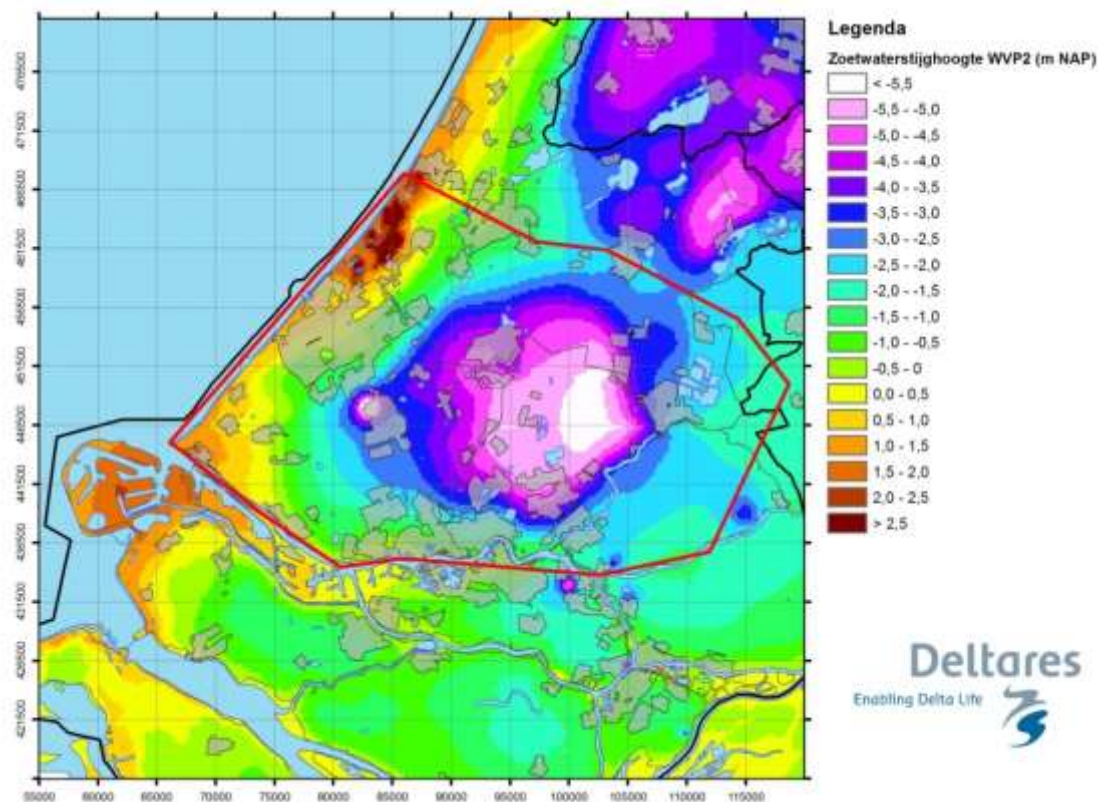
4.1 STIJGHOOGTE

Figuur 4.1 en Figuur 4.2 laten het stijghoogte¹ patroon zien in het midden van het eerste en het tweede watervoerende pakket, respectievelijk. Deze stijghoogtes zijn berekend met het Zuid-Holland grondwatermodel (Minnema e.a., 2004; Oude Essink ea., 2008; Oude Essink en Hunink, 2011). Grote verschillen in stijghoogte laten indirect de stromingsrichting van het grondwater zien: van hoge stijghoogte naar lage stijghoogte. Bijvoorbeeld stroming van de duinen richting de diepe polders in het binnenland. Rond Delft is de grondwateronttrekking van DSM zichtbaar. Weliswaar is men in 2017 gestart deze onttrekking stapsgewijs af te bouwen, het huidige debiet veroorzaakt nog steeds een serieuze lokale stijghoogteverlaging. Het grondwatermodel omvat het gebied rondom de provincie Zuid-Holland inclusief de op grondwater gebied dominante Haarlemmermeer polder en de polder Groot-Mijdrecht. Het is een stationair model wat betreft de grondwaterstroming, dat wil zeggen: de oppervlaktewaterpeilen in het model zijn gemiddelde peilen van het zomer- en winterpeil voor de situatie van 2004. De grondwateronttrekkingen zijn de gemiddelde gegevens voor het jaar 2004 zonder wisseling over de seizoenen. Deze kaarten geven daarmee een beeld van een gemiddelde situatie. Het model heeft een horizontale schaal van cellen van 250 bij 250 m² en is daarmee geschikt voor de regionale schaal.



FIGUUR 4.1 STIJGHOOGTE PATROON HALVERWEGE HET 1E WATERVOERENDE PAKKET (FEITELIJK IS HET EEN ZOETWATERSTIJGHOOGTE PATROON, OM VERSCHILLEN IN DICHTHEIDSVREDELING VAN HET GRONDWATER CORRECT MEE TE NEMEN). UIT: OUDE ESSINK EN HUNINK, 2011.

¹ In grondwater met verschillen in zoet en zout wordt de term *zoetwaterstijghoogte* gebruikt. Dit is een 'fictieve stijghoogte in brak of zout grondwater, indien deze zou worden gemeten in een peilbuis gevuld met zoet water'. Als al het water zoet is, is de zoetwaterstijghoogte gelijk aan de stijghoogte. Maar zout heeft een hogere dichtheid dan zoet water en zorgt daarmee voor een grotere druk. In zoet-zout gebieden is stroming direct afleiden uit verschillen in zoetwaterstijghoogte dan ook niet direct mogelijk.



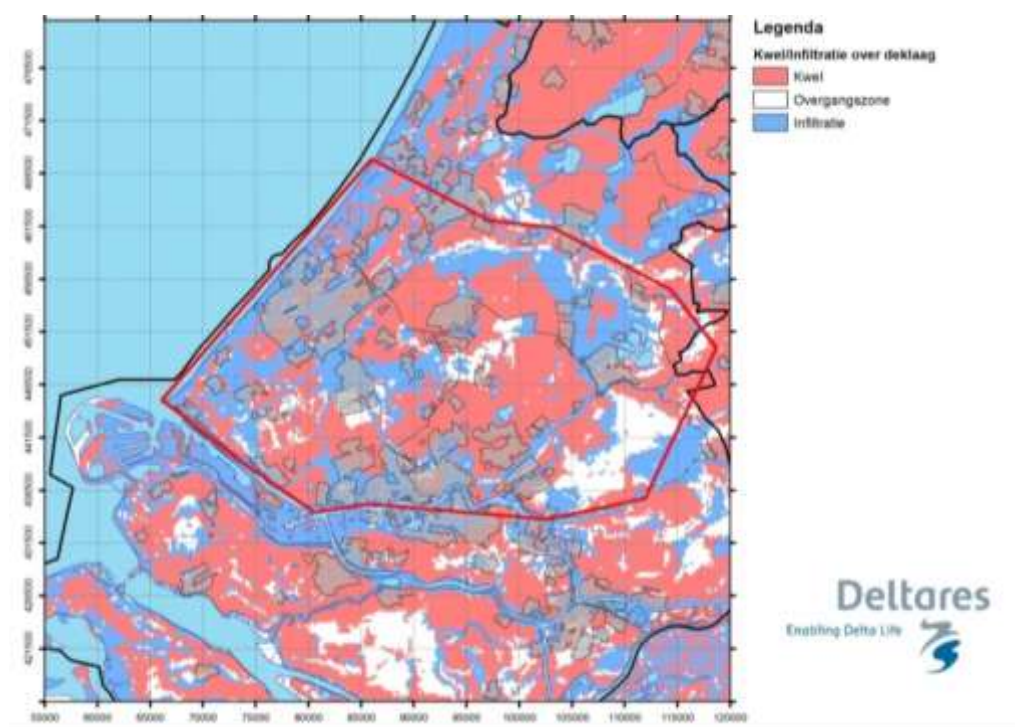
FIGUUR 4.2 STIJGHOOGTE PATROON HALVERWEGE HET 2E WATERVOERENDE PAKKET (FEITELIJK IS HET EEN ZOETWATERSTIJGHOOGTE PATROON, OM VERSCHILLEN IN DICHTHEIDSVERDELING VAN HET GRONDWATER CORRECT MEE TE NEMEN). UIT: OUDE ESSINK EN HUNINK, 2011.

4.2 KWEL EN INFILTRATIE

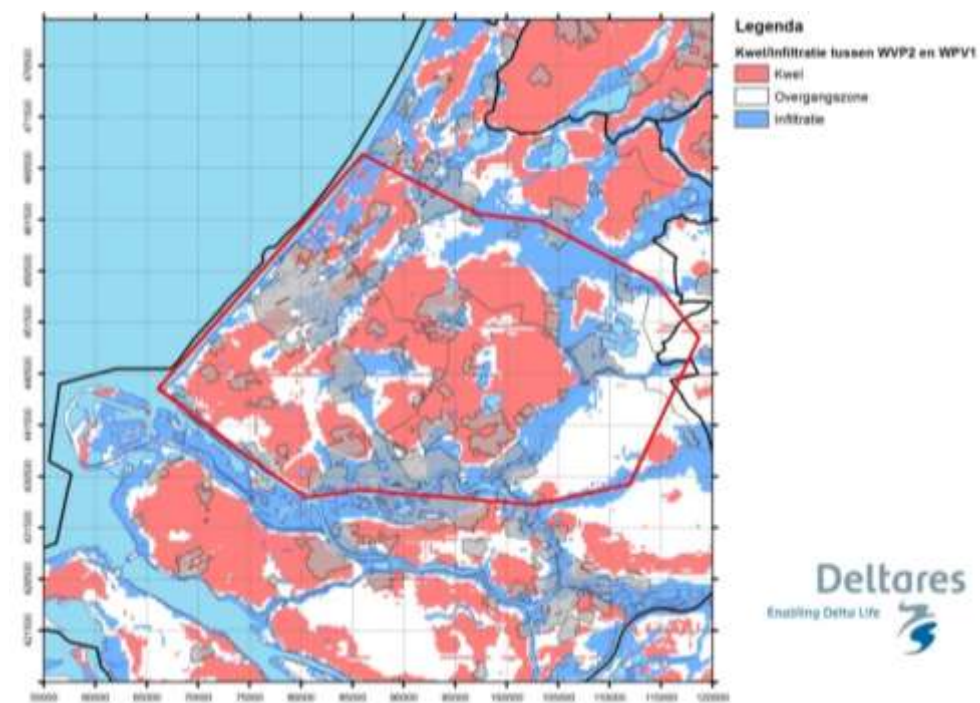
Figuur 4.3 en Figuur 4.4 laten de stationaire kwel- en infiltratiepatronen zien voor het focusgebied. In theorie is de kwel- en infiltratieflux het verschil tussen de stijghoogte uit het eerste watervoerend pakket en de freatische grondwaterstand/slootpeil gedeeld door de weerstand van de deklaag. De kwelkaart wordt samengesteld uit berekende modelfluxen op basis van de ligging van het weerstandsbiedende deel van de deklaag ten opzichte van de modellagen.

De kwel- en infiltratie laat een rijk geschakeerd patroon zien. In grote lijnen kan in Figuur 4.3 de stijghoogteverdeling uit Figuur 4.1 herkend worden: landschappelijk gezien fungeren de gebieden met hoge stijghoogten (bijvoorbeeld de duinen, polderranden) als infiltratiegebieden, van waar het grondwater via de dieper gelegen pakketten naar de diep gelegen polders stroomt. Enkele onttrekkingen bij de rivieren zijn ook duidelijk te herkennen, evenals de DSM onttrekking bij Delft. In vergelijking met Figuur 4.1 is het stijghoogtepatroon van Figuur 4.2 meer geleidelijk: de grilligheid van de grondwaterstand in het freatische pakket en het oppervlaktewatersysteem is extra gedempt door de tweede slechtdoorlatende laag.

De kwelflux wordt gegeven per gridcel van 250x250m (wit is interval -0.05 - +0.05 mm/dag). Als gevolg daarvan kan het kwel- en infiltratiepatroon alleen op een regionale schaal en niet op een lokale schaal (zoals op de overgang tussen polders met verschillende waterpeilen) worden beschouwd. Bovendien kunnen kleinschalige infiltratie- en kwelprocessen op perceel schaal en wellen (die overigens veelvuldig voorkomen in de Provincie Zuid-Holland (De Louw ea., 2010, 2013) niet worden weergegeven. Een veel kleinere schaal is daarvoor nodig (bijv. 25*25m² of zelfs kleiner).



FIGUUR 4.3 KWEL-/INFILTRATIE OVER DE DEKLAAG TUSSEN FREATISCHE GRONDWATER EN 1E WATERVOERENDE PAKKET. ROOD IS STROMING (VOLGENS HET MODEL) VAN HET 1E WATERVOEREND PAKKET RICHTING HET FREATISCHE PAKKET. GRIJS GEARCEERD IS STEDELIJK GEBIED. UIT: OUDE ESSINK EN HUNINK, 2011.



FIGUUR 4.4 KWEL-/INFILTRATIE OVER DE SCHEIDENDE LAAG TUSSEN 1E EN 2E WATERVOEREND PAKKET. ROOD IS STROMING (VOLGENS HET MODEL) VAN HET 2E NAAR HET 1E WATERVOEREND PAKKET. STEDELIJK GEBIED IS GRIJS GEARCEERD. UIT: OUDE ESSINK EN HUNINK, 2011.

5 Grondwaterkwaliteit

5.1 ZOET-ZOUT

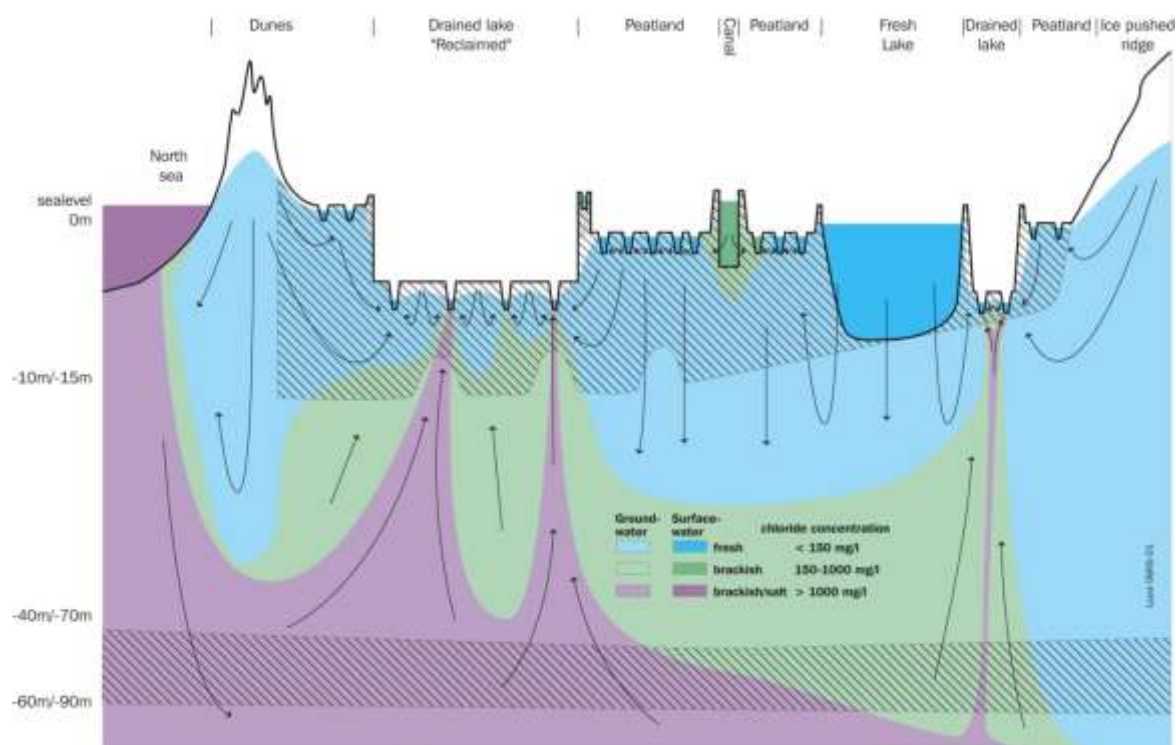
Het grondwater in het laaggelegen Nederlandse kustgebied is op vele plaatsen brak tot zout. Tot een paar duizend jaar geleden stroomde zoet regenwater vanuit het hooggelegen land richting de zee, die destijds flink lager stond dan nu (Vos, 2015). Gaandeweg steeg het zeeniveau en daalde het land door oxidatie van veen, inklinking van klei en abrupte maaiveldsverlagingen (de door mensen in korte tijd gecreëerde polders en droogmakerijen). Tijdens de Holocene transgressies zijn grote delen van Zuid-Holland overstroomd door het zoute water uit de Noordzee zodat zout water de overwegend zoete watervoerende pakketten kon indringen, al dan niet via vrije convectie (o.a. Post, 2004; Delsman e.a., 2014). Omdat het zoute grondwater zwaarder is dan zoet grondwater, kon het geïnfiltreerde zoute water snel in de diepe ondergrond binnendringen en het zoete grondwater verdringen. Door menging (hydrodynamische dispersie), wisselende grondwaterstromingspatronen en meerdere regressies en transgressies van de zee met verschillende concentraties infiltratie water is de overgang tussen zoet en zout lang niet overal scherp. Daarbij heeft de heterogeniteit van de ondergrond (zandpakketten afgewisseld door klei en leemlagen) tot extra menging (hydrodynamische dispersie) gezorgd (Kooi en Groen 2001; Kooi e.a., 2000). Door al deze processen zijn in de ondergrond zones met brak grondwater ontstaan, terwijl een stukje verderop het grondwater weer zoet kan zijn. Na het droogleggen van de droogmakerijen en door de bodemdaling in de (diepe) polders kan brak tot zout grondwater aan de oppervlakte komen door kwel. In de hoger gelegen delen van Zuid-Holland infiltreert juist het neerslagoverschot en dat heeft geleid tot verzoeting van het grondwater. De duinen zijn hier een duidelijk voorbeeld van. Zie ook Figuur 5.1 (Deltafact Brakke kwel, STOWA; Delsman 2014).

Figuur 5.2 en Figuur 5.3 tonen de chlorideverdeling van het grondwater in de provincie Zuid-Holland. De driedimensionale chlorideverdeling is gebaseerd op een driedimensionale interpolatie van chloride concentratie monsters, Verticale Elektrische Sonderingen (VES) en boorgatmetingen (Oude Essink e.a., 2008). De zoet-zout verdeling in de ondergrond kan op korte afstand flink variëren en er is slechts een beperkt aantal metingen beschikbaar (deze kaarten kunnen dus slechts voor regionale toepassingen gebruikt worden).

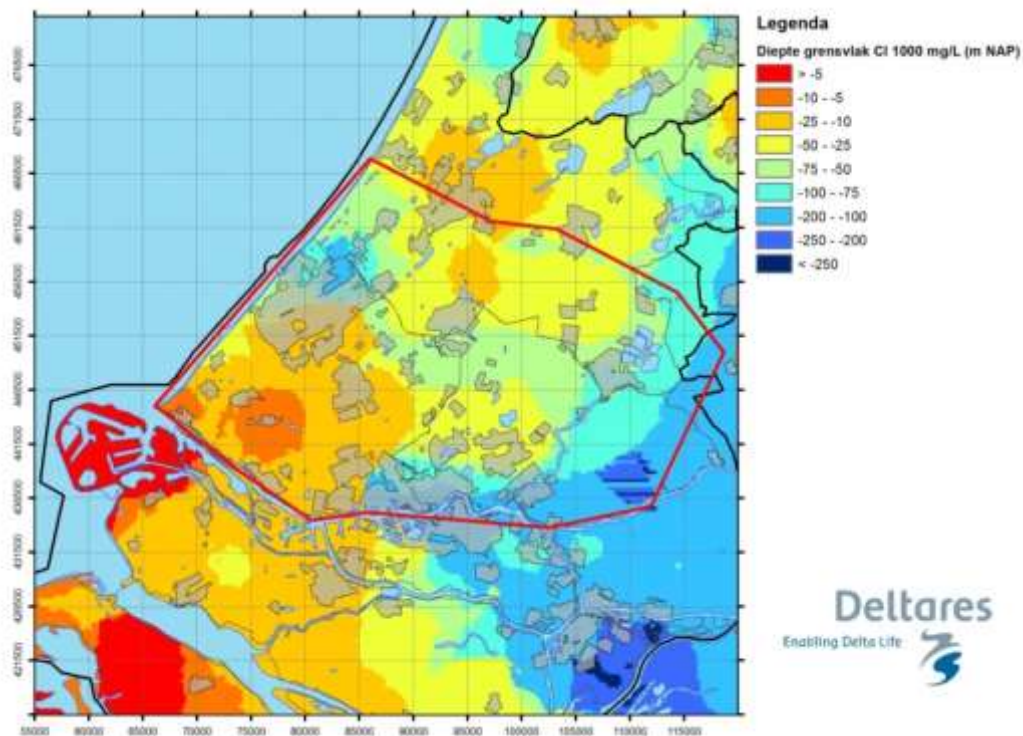
Enkele gehanteerde grenzen van de chloride concentratie staan in Tabel 5.1 weergegeven. Dit is de classificatie van Stuyfzand (1986) voor drinkwater. Ter informatie staan ook de zoutschadedrempels volgens Maas (1977) voor landbouwgewassen in de tabel weergegeven. Voor meer informatie over deze zoutschadedrempels wordt verwezen naar Stuyt (2013).

TABEL 5.1 ZOET-BRAK-ZOUT GRENZEN VOOR DRINKWATER EN LANDBOUW.

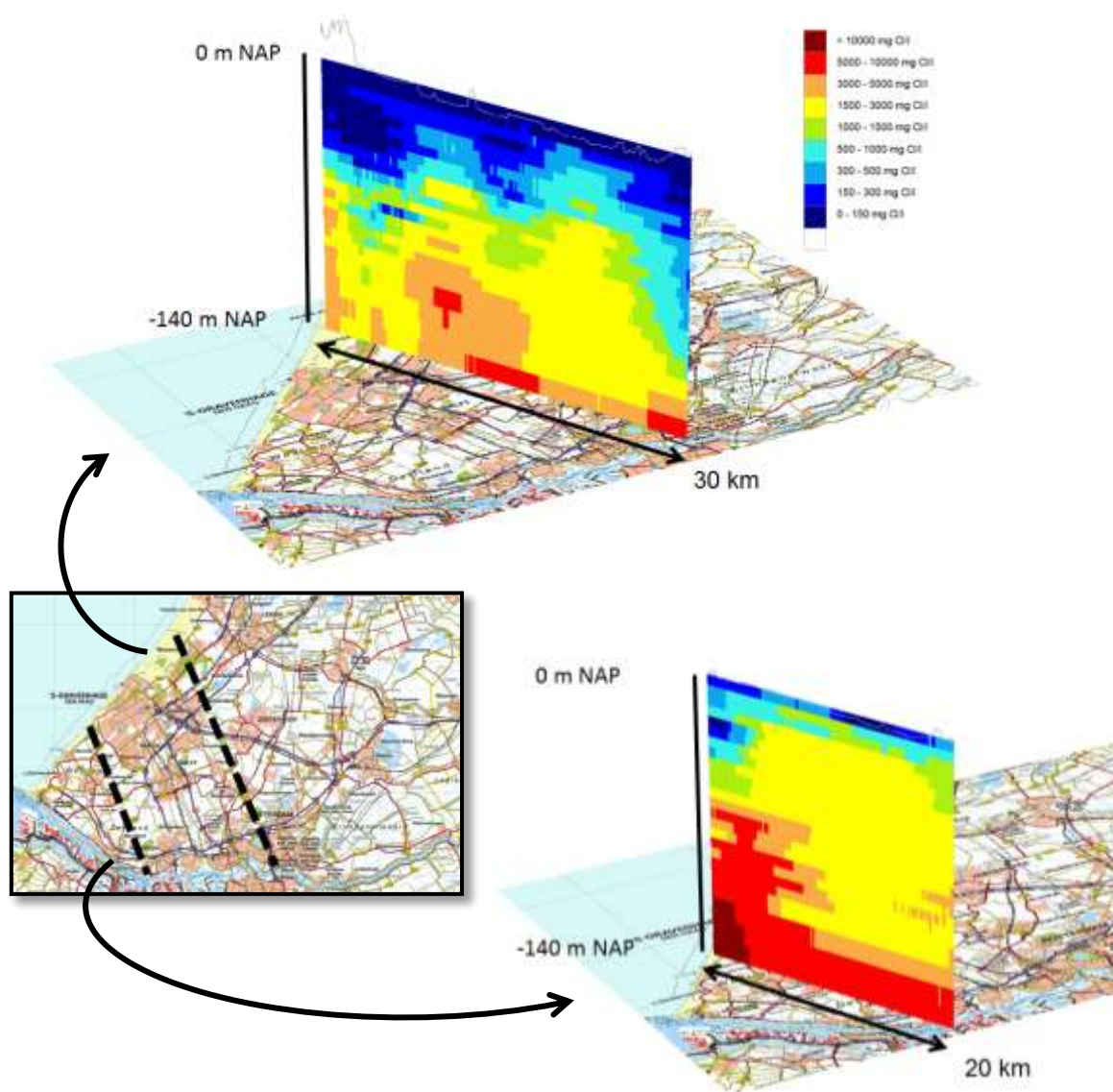
Beschrijving	Chloride concentratie [mg Cl/l]
Classificatie van Stuyfzand (Stuyfzand, 1986)	
Zoet	< 150
Zoet-brak	150 – 300
Brak	300 – 1000
Brak – zout	1000 – 10000
zout	> 10000
Zoutschadedrempelwaarde landbouw (Maas, 1977)	
Gevoelige gewassen	300
Matig gevoelige gewassen	600
Matig tolerante gewassen	1200
Tolerante gewassen	2400



FIGUUR 5.1 VEREENVOUDIGD REGIONAAL PROFIEL VAN WEST NAAR OOST MET ONDERGRONDSCHEMATISATIE, GRONDWATERSTROMINGSPATRONEN EN ZOUTGEHALTES VAN HET GRONDWATER.



FIGUUR 5.2 DIEPTE VAN HET 1000 MG/L CHLORIDEGRENSVLAK IN M TEN OPZICHTE VAN NAP. UIT: OUDE ESSINK E.A., 2008.



FIGUUR 5.3 TWEE DOORSNEDES VAN DE CHLORIDEVERDELING IN HET FOCUSGEBIED. DE BOVENSTE LAAT DE CHLORIDEVERDELING ZIEN VOOR DE DOORSNEDE WASSENAAR – KRIMPEN AAN DE IJSEL. DE ONDERSTE LAAT DE CHLORIDEVERDELING VOOR DE DOORSNEDE MONSTER - VLAARDINGEN. BEIDE DOORSNEDES BEGINNEN IN DE VERTICAAL BIJ 0 M NAP EN GAAN TOT EEN DIEPTE VAN -140 M NAP. UIT OUDE ESSINK E.A., 2008.

5.2 GEOCHEMIE

Tabel 5.2 toont enige chemische karakteristieken van de bovenste 15 m van de ondergrond in het focusgebied, op basis van de DINO-database (Vermooten e.a., 2007). Het Holocene deel van de ondergrond bestaat uit de Formatie van Naaldwijk en/of de Formatie van Nieuwkoop, en/of de Formatie van Echteld. Voor diepere formaties zijn nauwelijks analyses beschikbaar.

TABEL 5.2 MEDIANE CONCENTRATIES IN GEOTOPGEBIED 1B (HOLLAND) UIT VERMOOTEN ET. AL (2007).

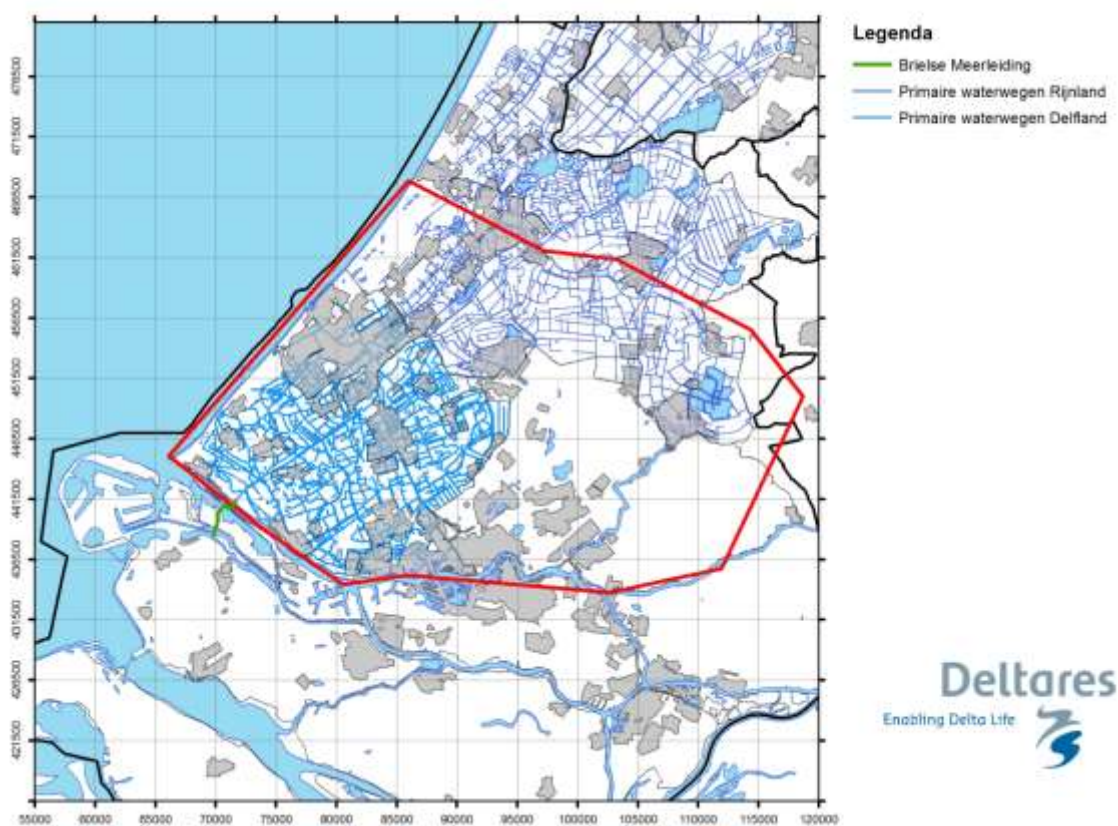
Formatie	Fe (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	pH	Hardheid (mmol/L)	Si CaCO ₃ verzadigings- index
Holoceen	5.65	18.9	0.03	6.2	10.35	7.4	6.98	0.52
Boxtel	8.4	15394	0.11	5.96	2.6	7.2	5.61	0.37
Kreftenheye	294	18.73	18.93	0.02	4.1	7.2	5.37	0.38

6 Infrastructuur

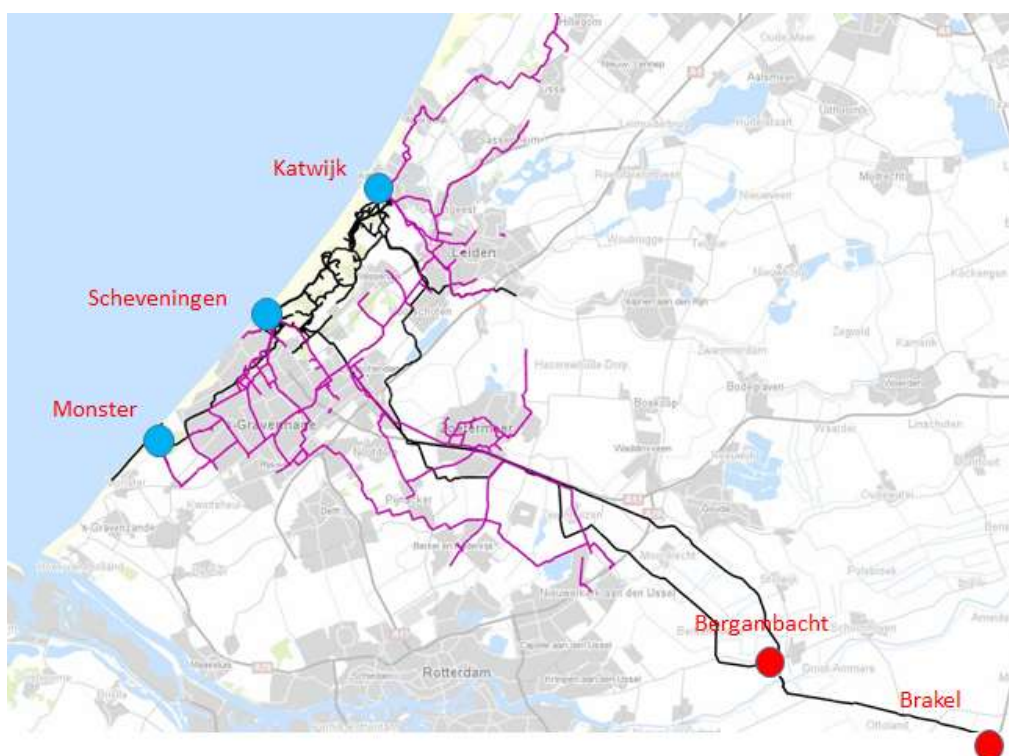
Figuur 6.1 laat de ligging van de primaire waterwegen in de waterschappen Delfland en Rijnland zien, en de ligging van de Brielse Meerleiding. Met deze leiding kan water vanuit het Brielse Meer naar het oppervlaktewatersysteem van Delfland getransporteerd worden. Daar wordt het ingelaten bij gemaal Winsemius.

Figuur 6.2 en Figuur 6.3 laten de productielocaties en pijpleidingen zien voor de drinkwatervoorziening in het focusgebied door Dunea en Evides.

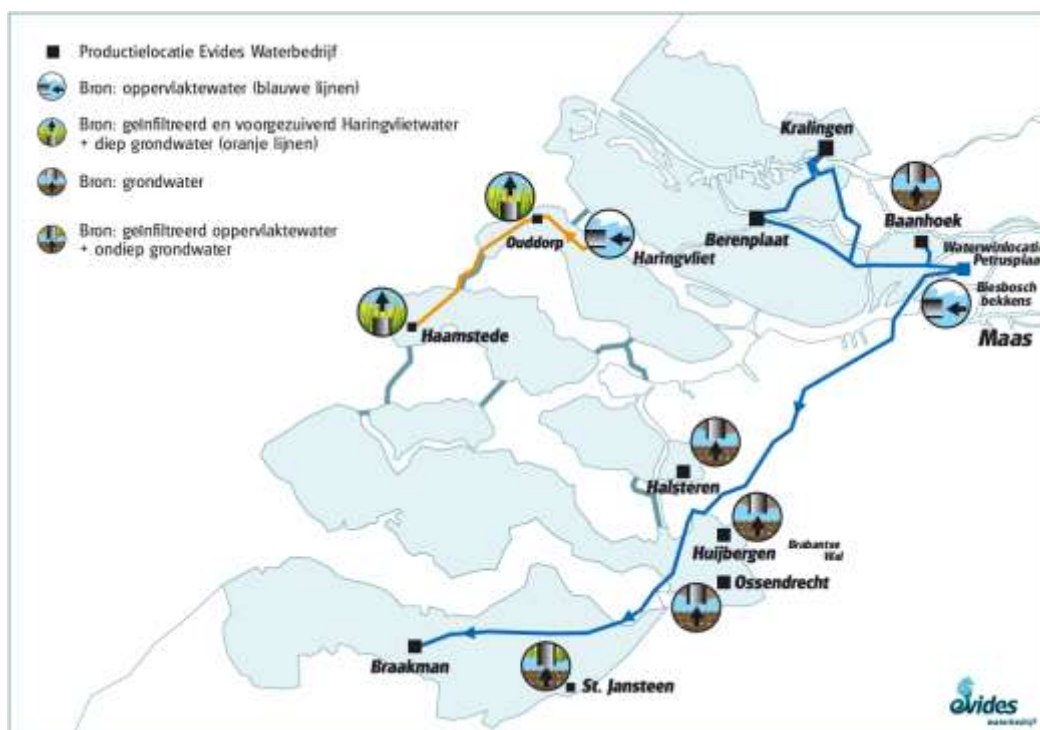
De ligging van de zuiveringsregio's van de AWZI's van Delfland is afgebeeld in Figuur 6.4. Het effluent van de installaties Harnaspolder en Houtrust wordt afgevoerd naar zee, en het effluent van De Grootte Lucht en Nieuwe Waterweg wordt afgevoerd naar de Nieuwe Waterweg. Figuur 6.5 laat de ligging van de afvalwaterzuiveringsinstallaties (AWZI's) in Rijnland zien. Rijnland wordt hier weergegeven omdat de Polder de Noordplas één van de cases is die binnen dit COASTAR project wordt uitgewerkt. In tegenstelling tot Delfland wordt het effluent niet afgevoerd, maar geloosd op boezem wateren en maakt het nadrukkelijk deel uit van de jaarlijkse waterbalans (ca. 10-15%) (persoonlijke communicatie M. Kramer, 22 september 2017).



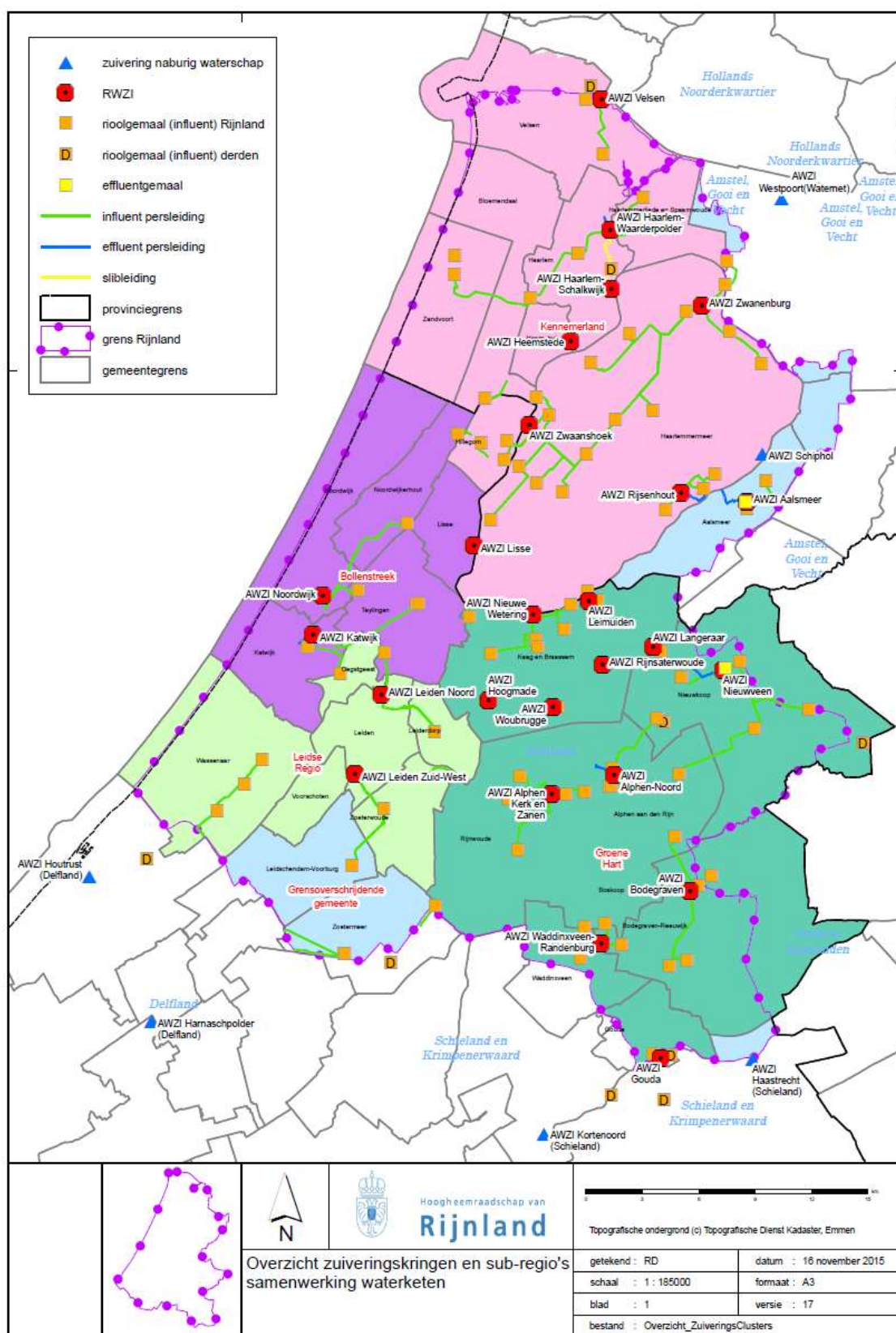
FIGUUR 6.1 LIGGING VAN PRIMAIRE WATERWEGEN IN DE WATERSCHAPPEN DELFLAND EN RIJNLAND, EN DE BRIELSE MEERLEIDING (GROEN).



FIGUUR 6.2 DRINKWATERVERZIEGING DUNEA. ZWARTE LIJNEN GEVEN PIJPLEIDINGEN VOOR AANVOER VAN RIVIERWATER AAN, PAARSE LIJN PIJPLEIDINGEN VOOR TRANSPORT VAN DRINKWATER.



FIGUUR 6.3 DRINKWATERVERZIEGING EVIDES. ALLEEN DE PRODUCTIELOCATIES BERENPLAAT EN KRALINGEN LEVEREN AAN HET FOCUSGEBIED.



FIGUUR 6.5

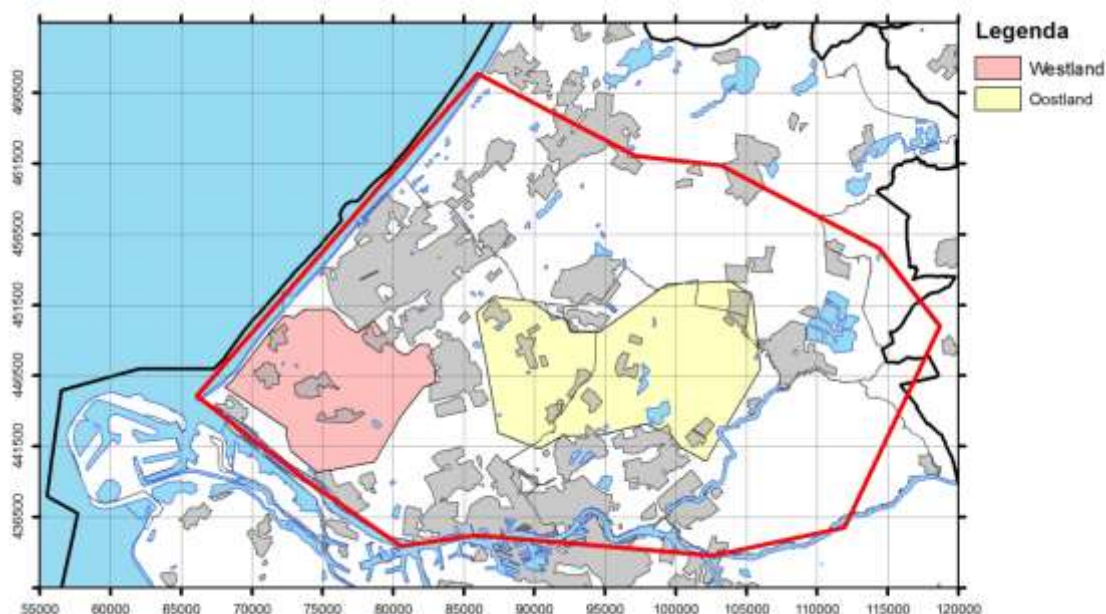
ZUIVERINGSREGIO'S WATERSCHAP HOOGHEEMRAADSCHAP VAN RIJNLAND.

7 Watervraag

Tabel 7.1 laat de watervraag voor de Dunea productielocaties zien te Solleveld, Meijendel, en Berkheide (Persoonlijke communicatie G. Zwolsman, 21 augustus 2017); voor de Evides productielocatie te Kralingen, Rijnmond (Persoonlijke communicatie H. Geerse en E. Nijsingh, 14 september 2017); en de watervraag voor de glastuinbouw in de gebieden Westland en Oostland (Appelman et. al, 2013). De globale ligging van de glastuinbouwgebieden is afgebeeld in Figuur 7.1 (persoonlijke communicatie K. Zuurbier, 4 september 2017).

TABEL 7.1 WATERVRAAG IN HET FOCUSGEBIED, UITGESPLITST NAAR GEBRUIKSSECTOR EN GEBIED.

Gebruikssector	Gebied	Watervraag (Miljoen m ³ /jaar)
Drinkwater	Solleveld	8.0
	Meijendel	45.0
	Berkheide	25.0
	Rijnmond (Evides)	52.0
Industrie / grootverbruik	Rijnmond (Evides)	7.0
Glastuinbouw	Westland	19.4
	Oostland	8.1
Drinkwater	Totaal	130.0
Industrie	Totaal	7.0
Glastuinbouw	Totaal	27.4
Totaal		164.4



FIGUUR 7.1

LIGGING VAN DE GLASTUINBOUWGBIEDEN WESTLAND EN OOSTLAND.

8 Wateraanbod

Tabel 8.1 laat enkele termen van de waterbalans zien, berekend met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) 3.3.0 (Kroon e.a., 2017) voor de periode 1998-2006 voor het gehele focusgebied (Figuur 1.1). Dit was een relatief natte periode voor het focusgebied, met 994 mm/jaar ten opzichte van het langjarig gemiddelde van ca. 900 mm/jaar (KNMI, geen datum).

Voor Delfland is het jaarlijkse debiet van afvalwaterzuiveringsinstallaties (AWZI) voor het jaar 2016 getoond, en het gemiddelde debiet van de Brielse Meerleiding (persoonlijke communicatie M. Süß, 15 augustus 2017). De ligging van de Brielse Meerleiding is afgebeeld in Figuur 6.1. In extreem droge perioden kan het debiet van het Brielse Meer 4 m³/s bedragen (0.35 miljoen m³/d).

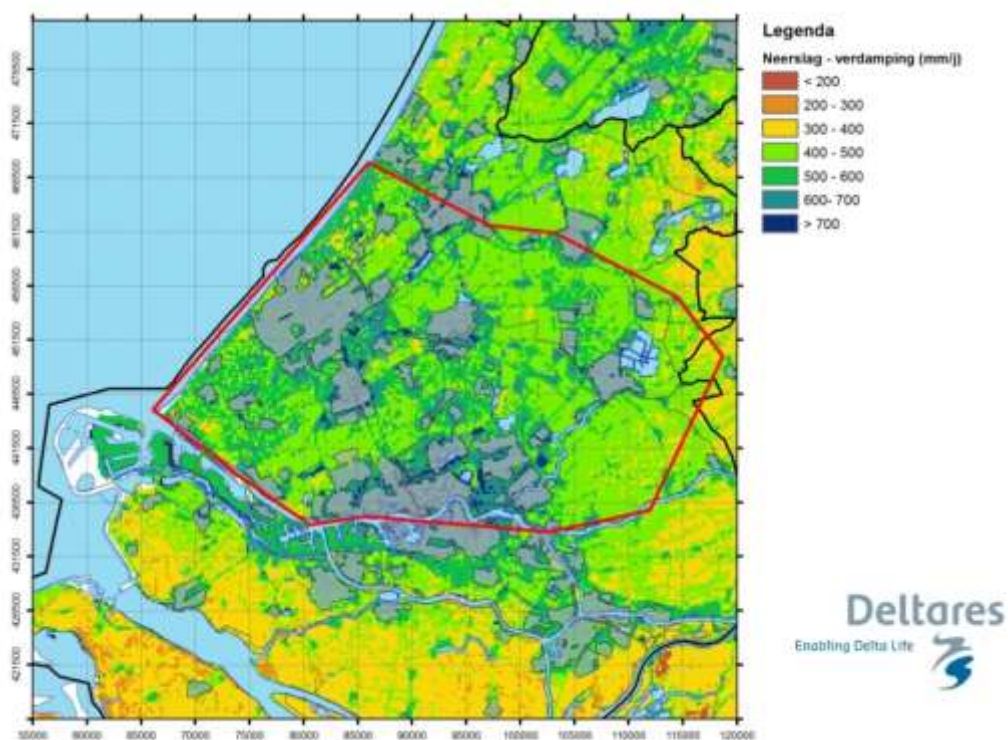
TABEL 8.1 WATERAANBOD VOOR VERSCHIEDENE TERMEN IN DE WATERBALANS, GEMIDDELDE DEBIET VAN DE BRIELSE MEERLEIDING, EN JAARLIJKS DEBIET AFVALWATERZUIVERINGSINSTALLATIE (AWZI) EFFLUENT.

Gebied	Type	Wateraanbod (mm/j)	Wateraanbod (miljoen m ³ /jaar)
Focusgebied	Neerslag 1998-2006	994	1146.1
Focusgebied	Neerslag minus verdamping 1998-2006	549	632.9
Focusgebied	Grondwateraanvulling 1998-2006	289	333.7
Delfland	Brielse Meerleiding		14.2
AWZI Harnaspolder	Effluent 2016		71.3
AWZI Houtrust	Effluent 2016		23.8
AWZI De Groote Lucht	Effluent 2016		27.9
AWZI Nieuwe Waterweg	Effluent 2016		8.9
Delfland	Effluent 2016 Totaal		131.8

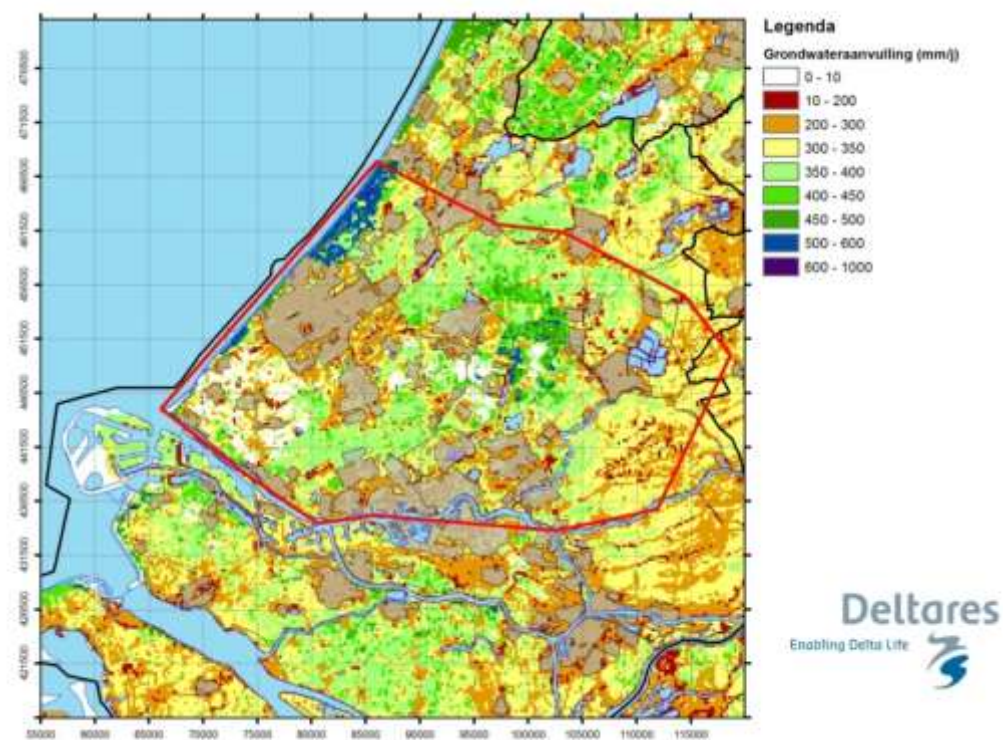
Figuur 8.1 en Figuur 8.2 laten respectievelijk de hoeveelheid neerslag minus de actuele verdamping (neerslagoverschot), en de grondwateraanvulling zien voor de periode 1998-2006, berekend met het LHM 3.3.0 (Kroon e.a., 2017). De glastuinbouwgebieden zijn duidelijk aanwijsbaar als gebieden met minimale grondwateraanvulling, waar het (regen)water wordt opgeslagen en gebruikt of wordt afgevoerd.

Globaal geldt dat het neerslagoverschot groot is in bebouwd gebied, doordat verharde oppervlakken weinig verdampen in vergelijking met oppervlakken met vegetatie. Het water infiltreert echter niet, maar wordt oppervlakkig afgevoerd: de grondwateraanvulling in stedelijk gebied is alsnog laag, zie Figuur 8.1 in vergelijking met Figuur 8.2. De duinen daarentegen zijn duidelijk herkenbaar als gebieden met grote grondwateraanvulling.

Tevens valt op dat Voorne-Putten en Goeree-Overflakkee droger zijn dan het focusgebied. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de neerslagpatronen: in de periode 1998-2006 is in het focusgebied ca. 150-200 mm per jaar meer gevallen dan op de twee Zuid-Hollandse eilanden. In de langjarige gemiddelden 1981-2010 is valt er ca. 100 mm/jaar meer (KNMI, geen datum).



FIGUUR 8.1 NEERSLAG MINUS ACTUELE VERDAMPING VOOR DE PERIODE 1998-2006, UIT LHM 3.3.0. GRIJS GEARCEERD IS STEDELIJK GEBIED.



FIGUUR 8.2 GRONDWATERAANVULLING VOOR DE PERIODE 1998-2006, UIT LHM 3.3.0. GRIJS GEARCEERD IS STEDELIJK GEBIED.

9 Tot slot

Deze rapportage beschrijft de resultaten van het eerste werkpakket van het Topsector Water project COASTAR: 'Beschrijving referentiesituatie'. Dit rapport dient als basis voor het verder uitwerken van de verschillende oplossingen die COASTAR biedt op regionale schaal. Op sectoraal, lokaal en regionaal niveau zijn veel studies zijn gedaan in het studiegebied, in dit rapport wordt de relevante informatie uit een aantal van deze studies samengevoegd tot een goed overzicht van de referentiesituatie.

In dit rapport is gebruik gemaakt van bestaande informatie en (model)studies. Veel gegevensbronnen zijn verouderd. De ondergrondmodellen GeoTOP en REGIS 2 zijn (relatief) recent beschikbaar gekomen; deze modellen beschrijven de geologie en lithologie gedetailleerder dan REGIS 1 in het beschikbare grondwatermodel dat de grondwaterstroming en het transport van zout in het grondwater beschrijft. De watervoerende pakketten die beschreven worden in REGIS 1 vormen een sterke vereenvoudiging van de grillige geologische werkelijkheid (zie vergelijking REGIS1 en GeoTOP in Figuur 3.5). Ook een betere zoet-brak-zout verdeling van het grondwater is pas zeer recent beschikbaar gekomen en zodoende nog niet gecombineerd met andere data in het grondwatermodel. De geohydrologische modelresultaten zijn stationair en op vrij grove schaal ($250 \times 250 \text{ m}^2$). Met deze (ver)oude(rde) bronnen met relatief lage resolutie kan echter de ruimtelijke samenhang binnen het studiegebied wel goed inzichtelijk gemaakt worden. Het vormt in voldoende mate de fysische basis voor verdere (grove) uitwerking van COASTAR in de andere werkpakketten van het Topsector Water project COASTAR.

Voor het gedetailleerder uitwerken van de verschillende oplossingen van COASTAR is echter ook een gedetailleerdere beschrijving van de ondergrond en het grondwater nodig, zowel voor de ontwerpfase als de pilot- en implementatiefase. Aanbevolen wordt om de in dit rapport gebruikte informatie te combineren met nieuwe data en modellen tot nieuwe basisbestanden en kaarten. Waar nodig zal nieuwe data van het grondwatersysteem (stroming, kwaliteit, etc.) verzameld moeten worden. Deze aanbevelingen worden verder uitgewerkt in de andere werkpakketten. Voor toepassingen voor grondwater binnen oplossingen van COASTAR en ontwerpstudies is een dynamische benadering van grondwaterstroming en stoftransport nodig en is een veel fijnere schaal noodzakelijk. Ook kan dan additionele informatie benut worden over bijvoorbeeld de zoet-brak-zout verdeling en kwaliteit van het grondwater. De Provincie Zuid-Holland en Deltares zijn bezig met een traject rondom de ontwikkeling van een nieuw modelinstrumentarium voor het grondwater systeem op basis van nieuwe beschrijvingen van de ondergrond en het grondwater, en met behulp van iMOD voor consistente berekeningen en simulaties op verschillende schaalniveau's. Het wordt steeds beter mogelijk om processen als klimaatverandering, verzilting, bodemdaling, warmtetransport en grondwaterstroming gecombineerd te simuleren. Voor lange termijn effecten kan hierbij aangesloten worden op de Deltascenario's (Dammers, 2014). Voor ontwerpstudies als de oplossingsrichtingen binnen COASTAR biedt het bovengenoemde modelinstrumentarium kwantificering en lokalisering van effecten van oplossingsrichtingen.

10 Referenties

COASTAR rapporten

COASTAR. Referentiesituatie hydro(geo)logie:

Bootsma, H., Van Baaren, E., Oude Essink, G., 2018. COASTAR. Referentiesituatie hydro(geo)logie Zuid-Holland, Rapportnummer: 11200070-001, Deltares.

COASTAR. Verkenning waterbank Westland:

Stofberg, S.F., Zuurbier, K.G., 2018. COASTAR. Verkenning waterbank Westland, Rapportnummer: KWR2018.002, KWR.

COASTAR. Verkenning brakwaterwinning:

Stofberg, S.F., Zuurbier, K.G., Janssen, G., Oude Essink, G., Van Baaren, E., Bonnekamp, T., De Buck, W., Hulzebos, J., Schetters, M., Zwolsman, G., 2018. COASTAR. Verkenning strategische brakwaterwinning, Rapportnummer: KWR2018.028, KWR, Deltares, Arcadis, en Dunea.

COASTAR. Verkenning kosten, baten en financiering:

Posma, J.C., Klooster, J.P.G.N., 2018. COASTAR. Verkenning kosten, baten en financiering van drie cases in de regio Den Haag - Westland – Rotterdam, Rapportnummer: 079762618 0.11, Arcadis.

Overige referenties

Appelman, W., Koeman-Stein, N., Creusen, R., Paalman, M., Raterman, B., & Voogt, W. (2014). Vergroten zelfvoorzienendheid watervoorziening glastuinbouw: watervraag glastuinbouw Haaglanden: deelrapport A (No. nummer KvK105/2013A). Programmabureau Kennis voor Klimaat.

COASTAR, Robuuste zoetwatervoorziening voor laag-Nederland schuilt in de ondergrond. Webrapport 2016. http://www.alliedwaters.com/wp-content/uploads/2016/08/ALWA_Coastar-Rapport_Web_spreads.pdf

Dammers, E., van den Born, G.J., Bruggeman, W., van den Hurk, B. Beersma, J., Polman, N., Folmer, C., 2014. Verhaallijnen van de Deltascenario's voor 2050 en 2100.

De Louw, P. G. B., Vandenbohede, A., Werner, A. D., & Oude Essink, G. H. P. (2013). Natural saltwater upconing by preferential groundwater discharge through boils. *Journal of Hydrology*, 490, 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.025>

De Louw, P. G. B., Oude Essink, G. H. P., Stuyfzand, P. J., & van der Zee, S. E. A. T. M. (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 394(3–4), 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.009>

Deltafact brakke kwel.

[http://deltaproof.stowa.nl/Publicaties/deltafact/Beprijzen_van_water_voor_de_landbouw/Brakke_kwel.aspx]. Geraadpleegd: 9 februari 2018.

Deltares & RIVM, 2013. Grondwaterlichaam in Nederland – Conceptuele modellen. <https://publicwiki.deltares.nl/display/GWLNL/>. Geraadpleegd: 30 augustus 2017

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.

Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environmental Research Letters*, 4(3), 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006>

Giosan, L. L., Syvitski, J. P. M., Constantinescu, S., & Day, J. W. (2014). Protect the world's deltas. *Nature*, 516(7529), 31-33. <https://doi.org/10.1038/516031a>

Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>

KNMI, geen datum. Klimaatatlas Gemiddelde Jaarlijkse Neerslag, Langjarig gemiddelde 1980-2010. <http://www.klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php>. Geraadpleegd: 5 oktober 2017.

Kooi H, Groen J. 2001. Offshore continuation of coastal groundwater systems; predictions using sharp-interface approximations and variable-density flow modelling. 246: 19–35

Kooi H, Groen J, Leijnse A. 2000. Modes of seawater intrusion during transgressions. *Water Resources Research* 36 (12): 3581–3589 DOI: 10.1029/2000WR900243.

Kroon, T., Veldhuizen, A., Burgering, L., Van Walsum, P., Janssen, G., Van der Bolt, F., Verkaik, J., 2017. Veranderingsrapportage LHM 3.3.0, Ontwikkeling ten behoeve van de waterkwaliteit en versnelling van de landelijke toepassing van NHI.

Maas, E.V. and G.J. Hoffman, 1977. Crop Salt Tolerance - Current Assessment. *J. Irr.Drain.Div.*1977(6):115-134.

Minderhoud, P. S. J., Erkens, G., Van Hung, P., Vuong, B. T., Erban, L. E., Kooi, H., & Stouthamer, E. (2017). Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 12, 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7146>

Minnema, B., Kuijper, M.J.M., Oude Essink, G.H.P., Maas, C., 2004. Bepaling toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland.

Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment. *PLoS ONE*, 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>

Oude Essink, G.H.P., Van Baaren, E.S., Van Vliet, M., 2008, Verkennende studie klimaatverandering en verzilting grondwater in Zuid-Holland.

Oude Essink, G.H.P., Hunink, J.C., 2011. Kwel- en isohypsenkaarten Provincie Zuid-Holland.

Oude Essink, G.H.P., 2017. Zoet-Zout kaarten ondergrond Provincie Zuid-Holland.

Post, V. E. A. 2004. Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. Vrije Universiteit Amsterdam.

- Rijksoverheid, zonder jaar. Conceptuele modellen grondwaterlichamen KRW.
<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/kaderrichtlijn-water/grondwater/grondwater-krw-0/conceptuele-modellen/> Geraadpleegd: 30 augustus 2017
- Stafleu, J. 2016, Productspecificatie Ondergrondmodel GeoTOP.
- Stuyfzand, P.J., 1986. A new hydrochemical classification of water types with examples of application to the Netherlands (in Dutch). *H2O*. 19(23), pp. 562-568.
- Stuyt, L.C.P.M., van Bakel, P.J.T., Delsman, J., Massop, H.T.L., Kselik, R.A.L., Paulissen, M.P.C.P., Oude Essink, G.H.P., Hoogvliet, M. en Schipper, P.N.M., 2013, Zoetwatervoorziening in het Hoogheemraadschap van Rijnland; Onderzoek met hulp van €ureyeopener 1.0, 93 p. Alterra-rapport 2439.
- Syvitski, J. P. M., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W. H., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., ... Nicholls, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10), 681-686.
<https://doi.org/10.1038/ngeo629>
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., ... Treidel, H. (2012). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(April), 322-329. <https://doi.org/doi:10.1038/nclimate1744>
- Vermooten, J.S.A, Maring, L. Hettelaar, J.M.M., Van Oyen, G.J.L, Griffioen, J., 2007. Landsdekkende, geologische karakterisering van de regionale grondwatersamenstelling in de GeoTOP van Nederland.
- Vos, P. P. C. (2015). Origin of the Dutch coastal landscapes; Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series. Utrecht University.
- Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20), L20402. [<https://doi.org/10.1029/2010GL044571>].
- Winsemius, H. C., Jongman, B., Veldkamp, T. I. E., Hallegatte, S., Bangalore, M., & Ward, P. J. (2018). Disaster risk, climate change, and poverty: assessing the global exposure of poor people to floods and droughts. *Environment and Development Economics*, (May), 1–21.
<https://doi.org/10.1017/S1355770X17000444>