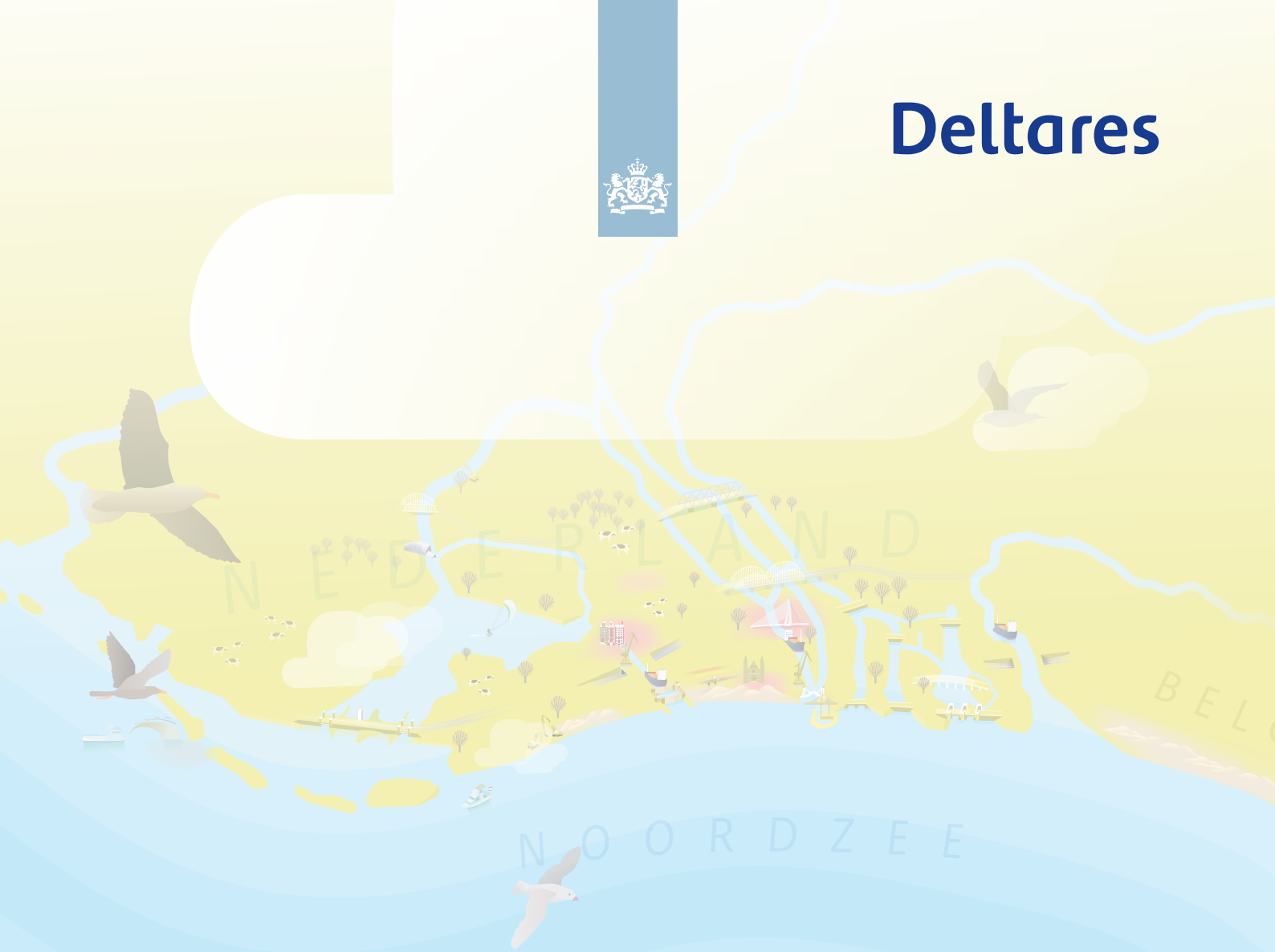
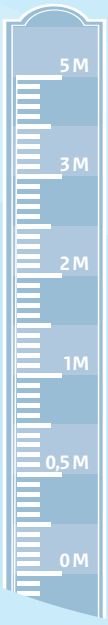
Deltares





Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel

Rapportnr 1120 039-009-BGS-0001

Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel
Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Auteur(s)
Joost Delsman
Ilja America
Tobias Mulder

Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel
Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Jeroen Ligtenberg, Meinte Blaas
Trefwoorden	Zeespiegelstijging, kennisprogramma, spoor II, verzilting, grondwater, doorspoeling, watervraag, LHM, LHM zoet-zout

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	17-05-2022
Projectnummer	11208039-009
Document ID	11208039-009-BGS-0001
Pagina's	89
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Joost Delsman	
	Ilja America	
	Tobias Mulder	

Technische samenvatting

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging richt zich op het onderzoeken of de verschillende voorkeurstrategieën in het Deltaprogramma houdbaar blijven in het licht van klimaatverandering en versnelde zeespiegelstijging. De houdbaarheid van de Voorkeursstrategie Zoetwater (met de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem als uitgangspunt) kan negatief worden beïnvloed door de toenemende verzilting van het grondwater door zeespiegelstijging, en als gevolg daarvan een toenemende zoutvracht op en doorspoelwatervraag aan het hoofdwatersysteem.

Het effect van een stijgende zeespiegel op verzilting van het grondwatersysteem en doorspoelwatervraag is onderzocht met behulp van een langjarige berekening met LHM zoet-zout, versie 4.1, en representatieve-jaar-berekeningen met het LHM, versie 4.1, voor zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m zeespiegelstijging. In deze berekeningen is een scenario gehanteerd waarbij sprake is van gematigde zeespiegelstijging (RCP4.5), onveranderde (huidige) meteorologie en onveranderd waterbeheer, inclusief voortgaande peilindexatie tot 2100. Met behulp van een Monte Carlo analyse zijn onzekerheden in beeld gebracht. Voor het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer zijn nadere analyses op regionale schaal uitgevoerd.

De berekende invloedssfeer van zeespiegelstijging op de landinwaartse grondwatersituatie strekt zo'n 10 tot 20 km vanaf de kust en vanaf de oevers van meestijgende binnenwateren. De hydrogeologische kenmerken van de ondergrond zijn bepalend voor de lengte van de invloedssfeer. Binnen de invloedssfeer neemt de kwelflux toe met maximaal 2 mm/d bij zichtwaarde 3 m zeespiegelstijging; de toename neemt exponentieel af met toenemende afstand van de kust. Toename van de kwelflux zorgt direct voor een toename van de zoutvracht naar het oppervlaktewater, omdat meer brak grondwater naar de oppervlakte stroomt. Over een langere tijdschaal trekt hierdoor ook dieper, zouter grondwater naar de oppervlakte, waardoor ook de zoutconcentratie van de kwel toeneemt. Hierdoor is een versnelling zichtbaar in de zoutvracht ten opzichte van de zeespiegelstijging. De toename van zoutvracht wordt voor de meeste gebieden gaandeweg voornamelijk bepaald door zeespiegelstijging; autonome processen en bodemdaling hebben bij 3 m zeespiegelstijging een kleiner effect op de zoutvracht. Bij 0.5 m zeespiegelstijging is de relatieve bijdrage van bodemdaling en autonome processen nog van eenzelfde orde van grootte als de bijdrage van zeespiegelstijging. De onzekerheid in de berekende zoutvracht wordt gemiddeld ingeschat op zo'n ± 7%, in brakke kwelgebieden kan de onzekerheid in zoutvracht echter tot een factor twee bedragen.

De verandering in de zoutvracht is in dit rapport vertaald naar een veranderde doorspoelwatervraag, onder de aanname dat huidige concentraties in het regionale oppervlaktewater gehandhaafd worden. De doorspoelwatervraag in poldergebieden neemt daarbij toe van totaal 20 m^3/s in de huidige situatie, tot ongeveer 50, 100 en 350 m^3/s voor respectievelijke zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m zeespiegelstijging; de onzekerheid om de doorspoelwatervraag is zo'n ± 25%. Vooral voor enkele kustnabije gebieden wordt een zeer grote doorspoelwatervraag berekend bij 3 m zeespiegelstijging. Het is zeer de vraag of het waterbeheer bij sterke zeespiegelstijging zoetwaterbeschikbaarheid in alle poldergebieden kan blijven faciliteren.

Voor het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer zijn, aanvullend op de bovenbeschreven landelijke analyse, regionale analyses uitgevoerd om de rol van kwel op de zoutbalans van de systemen met huidige zeespiegel en voor de zichtwaarden in meer detail in beeld te brengen. De directe zoutvracht naar het IJsselmeer is in de huidige situatie berekend als 8 kton Cl^-/j[1] (bandbreedte 5.2 tot 8.8 kton/j). De huidige directe (via de waterbodem) en indirecte (via het afwaterende gebied) zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer zijn berekend als respectievelijk 7 kton/j (bandbreedte 5.2 tot 8.8 kton/j) en 53 kton/j (bandbreedte 34 tot 68 kton/j). De zoutvracht in het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer neemt sterk toe met zeespiegelstijging, door de directe grondwaterconnectie voor beide binnenwateren met het buitenwater. De directe zoutvracht vanuit grondwater op het IJsselmeer neemt toe van huidig 8 tot 75 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging, op het Volkerak-Zoommeer neemt deze toe van huidig 7 tot 125 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging. De indirecte zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer neemt relatief minder toe, van huidig 53 tot 77 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging.

Voor het IJsselmeer is naast bovenstaande ook onderzocht hoe sterk getij op de Waddenzee en meerpeilvariatie de zoutvracht via de waterbodem beïnvloeden. Bij huidige zeespiegel is het effect van getij op de zoutvracht marginaal (8%) ten opzichte van een getijgemiddelde beschouwing. De jaargemiddelde vracht reageert wel sterk op langerdurende peilvariatie in het IJsselmeer. Bij een extreem droog jaar als 1921 (met zomerpeil-uitzakking tot -40 cm NAP) is de zoutvracht ca 50% hoger dan in een gemiddelde zomer. Bij toenemende zeespiegel neemt de relatieve gevoeligheid van de zoutvracht voor peiluitzakking af, omdat de peiluitzakking relatief kleiner wordt ten opzichte van het groter wordende waterstandsverschil tussen Waddenzee en IJsselmeer.

[1] Zout (in zoutconcentratie en zoutvracht) wordt in deze gehele rapportage uitgedrukt in massa-eenheden chloride. In verdere aanduidingen van de eenheid wordt de aanduiding ‘Cl^-‘ weggelaten.

Inhoud

	Technische samenvatting	**4**
1	**Inleiding**	**9**
1.1	Inleiding en kader	9
1.2	Doelstelling	9
1.3	Toegepaste modellen	10
1.3.1	Landelijk Hydrologisch Model (LHM)	10
1.3.2	LHM zoet-zout	10
1.4	Aanpak op hoofdlijnen	10
1.5	Terminologie en afkortingen	12
2	**Scenariodefinitie**	**14**
2.1	Inleiding	14
2.2	Uitgangspunten	14
2.2.1	Keuze representatief jaar	15
2.3	Zeespiegelstijging en doorwerking landinwaarts	16
2.3.1	Zeespiegelcurve	16
2.3.2	Doorwerking landinwaarts	17
2.3.2.1	‘Open blijft open, dicht blijft dicht’	17
2.3.2.2	Opstuwing rivierpeil	17
2.3.2.3	Zoutconcentratie oppervlaktewater	19
2.4	Overige (autonome) ontwikkelingen	20
2.4.1	Meteorologie	20
2.4.2	Socio-economische ontwikkelingen	21
2.4.3	Bodemdaling	21
2.4.4	Maatregelen Deltaprogramma Zoetwater	23
2.5	Overzicht scenario’s	23
3	**Methode**	**24**
3.1	Langjarige berekeningen LHM zoet-zout	24
3.1.1	LHM zoet-zout versie 4.1	24
3.1.2	Implementatie scenario randvoorwaarden	24
3.1.2.1	Aanpassing randvoorwaarden als gevolg van zeespiegelstijging	24
3.1.2.2	Aanpassing randvoorwaarden als gevolg van autonome ontwikkelingen	25
3.1.3	Langjarige berekeningen	27
3.2	Berekening doorspoelbehoefte	28
3.2.1	Inleiding	28
3.2.2	Doorspoeling polders	28
3.2.2.1	Onderscheiden mogelijk door te spoelen polders	28
3.2.2.2	Berekening doorspoelbehoefte polders	29
3.2.3	Doorspoeling boezemkanalen	29
3.2.4	Toekenning zoutvracht LSW	33
3.3	Representatieve-jaar berekening LHM voor zichtwaarden	33

3.3.1 Inleiding 33
3.3.2 Aanpassing randvoorwaarden 34
3.3.3 Inspelen chlorideconcentratie ondiep grondwater (TRANSOL) 34

3.4 Onzekerheidsanalyse 35
3.4.1 Inleiding 35
3.4.2 Onzekerheid initiële chlorideverdeling 35
3.4.3 Onzekerheid geologie 38
3.4.3.1 Deklaagweerstand IJsselmeer 39
3.4.3.2 Weerstand Volkerak-Zoommeer 40
3.4.4 Monte Carlo analyse onzekerheid in zoutvracht en doorspoelwatervraag 41

3.5 Regionale analyses – IJsselmeer 42
3.5.1 Uitsnede LHM zoet-zout 42
3.5.2 Getijdecyclus Waddenzee 43
3.5.3 Waterstandsverloop IJsselmeer 44
3.5.4 Gevoeligheidsanalyse directe zoutvracht 46

3.6 Regionale analyses – Volkerak-Zoommeer 47
3.6.1 Uitsnede LHM zoet-zout 47
3.6.2 Gevoeligheidsanalyse directe en indirecte zoutvracht 47

4 Landelijke resultaten 49

4.1 Langjarige ontwikkeling verzilting grondwatersysteem – LHM zoet-zout 49
4.1.1 Stijghoogte 49
4.1.2 Kwel – infiltratie 52
4.1.3 Zoutvracht 52

4.2 Verzilting oppervlaktewater en watervraag in een representatief jaar 57
4.2.1 Zoutvracht naar oppervlaktewater 57
4.2.2 Verzilting wortelzone 58
4.2.3 Watervraag doorspoeling 59
4.2.4 Chlorideconcentratie in oppervlaktewater 62
4.2.5 Watervraag hoofdwatersysteem 64

4.3 Onzekerheidsanalyse zoutvracht en doorspoelwatervraag 65
4.3.1 Onzekerheid in zoutvracht door initiële chlorideconcentratie en kwel 65
4.3.2 Onzekerheid in snelheid van zeespiegelstijging 67
4.3.3 Onzekerheid in watervraag voor polder-doorspoeling 68

5 Regionale analyses 70

5.1 Regionale analyses – IJsselmeergebied 70
5.1.1 Getijdecyclus Waddenzee 70
5.1.2 Waterstandsverloop IJsselmeer 71
5.1.3 Gevoeligheidsanalyse directe zoutvracht 72

5.2 Regionale analyses – Volkerak-Zoommeer 75

6 Discussie en conclusies 79

6.1 Beantwoording vraagstelling 79

6.2 Beschouwing onzekerheid 80
6.2.1 Onzekerheid in de gebruikte modellen en invoergegevens 81
6.2.2 Onzekerheid in methode en scenarioaannames 83
6.2.3 Synthese en implicaties voor vervolg 84

6.3 Implicaties voor regionaal waterbeheer 84
6.4 Aanbevelingen 85
6.4.1 Algemene aanbevelingen 85
6.4.2 Voor verder onderzoek en modelontwikkeling: 85
6.4.3 Specifiek voor vervolgberekeningen binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging: 86

Referenties **87**

1 Inleiding

1.1 Inleiding en kader

Het meerjarige Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) stelt zich tot doel de vraag te beantwoorden: "*Wat is de houdbaarheid van de voorkeurstrategieën (VKS) van het Deltaprogramma?"*

Kennisprogramma ZSS Spoor II bepaalt de waterstaatkundige effecten op de voorkeursstrategieën voor de zandige kust, waterveiligheid en zoetwatervoorziening. Voor dat laatste is de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH, Programmabureau Zoetwater (2020)) het uitgangspunt. De KZH geldt als randvoorwaarde voor de regionale zoetwaterstrategieën. Verzilting zet de houdbaarheid van de KZH onder druk. De houdbaarheid van de Nederlandse zoetwaterstrategie hangt niet alleen af van externe verzilting, maar ook van veranderingen in interne (grondwater-) verzilting. Zoete grondwatervoorraden in de kustzone ten behoeve van de drinkwatervoorziening, de landbouw en de industrie komen onder druk te staan. De stijghoogte in het watervoerend pakket in de kustzone neemt toe, en zorgt daarmee voor hogere grondwaterstanden en een toename van de (brakke) kwel en toenemende verzilting van het grondwater. Deze veranderde grondwatersituatie heeft in de vorm van een toenemende verzilting een directe weerslag op het regionale oppervlaktewatersysteem en beïnvloedt via een veranderd waterbezwaar en een veranderde watervraag ook het hoofdwatersysteem. Een belangrijk component hiervan is een veranderde doorspoelwatervraag bij toenemende verzilting.

Voor het IJsselmeergebied en het Volkerak-Zoommeer wordt het effect van zeespiegelstijging op de directe en indirecte zoutvracht van deze bekkens nader onderzocht. Daarbij wordt ook de huidige situatie, mede als referentie, uitvoeriger geanalyseerd.

In 2020 is op basis van de gesprekken met de regio's en analyse van de kennisvragen geconcludeerd dat het grondwatermodel LHM zoet-zout het meest geschikte, beschikbare instrument is om de kennisvragen omtrent zoute kwel in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging te beantwoorden. Eind 2020 is de validiteit en toepasbaarheid van het LHM zoet-zout nader onderzocht (Delsman, 2020). Hieruit is gebleken dat er nog enkele aanpassingen in de modelopzet nodig waren alvorens het model kon worden toegepast. Dit betreft de deklaagweerstand in het IJsselmeergebied en de ondiepe weerstand offshore.

1.2 Doelstelling

Concrete vragen die in deze studie worden beantwoord zijn:

- Wat is de invloedssfeer van zeespiegelstijging van 0.5 m en meer op de landinwaartse grondwatersituatie; hoe neemt de stijghoogte en (freatische) grondwaterstand toe?
- Hoe verandert de kwelflux (volumeflux grondwater) door zeespiegelstijging ten opzichte van de huidige situatie en hoe werkt deze door op de zoutvracht (zoutconcentratie maal volumeflux grondwater) en de doorspoelbehoefte van regionale poldergebieden?
- Wat is de directe en indirecte (via het afwaterende gebied) bijdrage vanuit het grondwater aan de zoutvracht van het hoofdwatersysteem en hoe verandert deze bijdrage bij zeespiegelstijging (voor deelgebieden IJsselmeergebied en Volkerak-Zoommeer)?
- Wat is de onzekerheid rond de in deze studie berekende zoutvrachten?

Voor het beantwoorden van deze kennisvragen worden berekeningen gemaakt met een geüpdatete versie van het landsdekkende LHM zoet-zout model (Delsman et al., 2020). De veranderingen in en plausibiliteit van LHM zoet-zout versie 4.1 zijn gerapporteerd in America et al. (2021).

1.3 Toegepaste modellen

1.3.1 Landelijk Hydrologisch Model (LHM)

Het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) beschrijft de hydrologie van het grondwater, onverzadigde zone en oppervlaktewater voor geheel Nederland (De Lange et al., 2014). Het LHM berekent daarmee de vraag en aanbod van water. Daarnaast berekent het LHM ook de uitspoeling van zout naar oppervlaktewater en transport van dit zout door het oppervlaktewatersysteem. Het grondwatersysteem en onverzadigde zone worden met een dagelijkse tijdstap berekend, het oppervlaktewater met een tien-daagse tijdstap.

Het LHM bestaat uit de volgende, gekoppelde, deelmodellen:

1. DM (DistributieModel), oppervlaktewatermodel dat landelijke waterverdeling berekent op basis van waterbeschikbaarheid en watervraag;
2. MOZART, oppervlaktewatermodel van het regionale watersysteem;
3. MODFLOW, grondwatermodel;
4. MetaSWAP, model van de onverzadigde zone;
5. TRANSOL, model van zouttransport in het ondiepe grondwater en de onverzadigde zone.

Transport en concentratie van zout worden alleen berekend in de deelmodellen DM, MOZART en TRANSOL. De langzame stroming van zout in het diepe grondwater wordt met een apart model berekend: het LHM zoet-zout.

1.3.2 LHM zoet-zout

Het LHM zoet-zout model is een in 2020 ontwikkeld gekoppeld dichtheidsafhankelijk grondwaterstromings- en zouttransport model, gebaseerd op en consistent met het LHM. Het LHM zoet-zout berekent de langzame verplaatsing van grondwater en daarin opgelost zout in het Nederlandse grondwatersysteem op een tijdschaal van decennia tot eeuwen. Het LHM zoet-zout maakt gebruik van de softwarecode iMOD-WQ (waarin de softwarecode SEAWAT is opgenomen), waarmee ook het effect van veranderende dichtheid op de grondwaterstroming wordt meegenomen. De softwarecode is geparallelliseerd om relatief snel de complexe zoet-zout berekeningen door te rekenen (Verkaik et al., 2021).

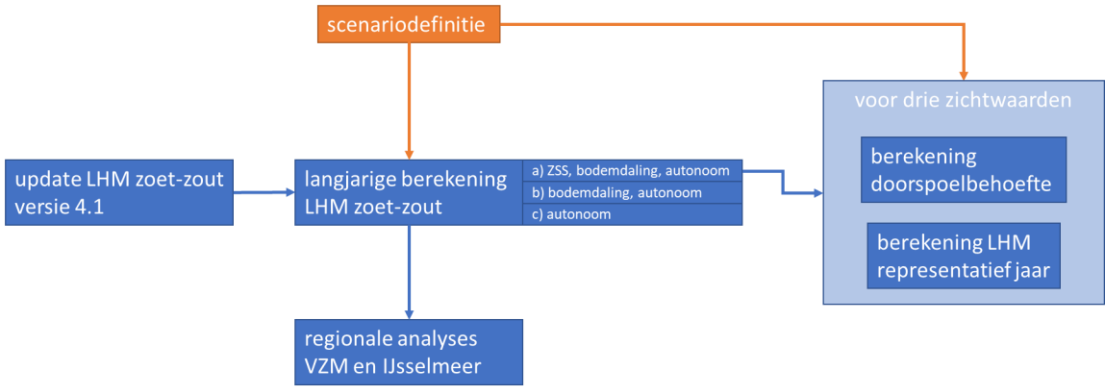
Het LHM zoet-zout is als onderdeel van deze studie geüpdatet naar versie 4.1, conform de meest recente LHM versie (America et al., 2021).

1.4 Aanpak op hoofdlijnen

De aanpak kent op hoofdlijnen de volgende stappen (Figuur 1.1):

1. Update LHM zoet-zout naar versie 4.1. Deze update is uitgevoerd omdat in een nadere analyse naar de bruikbaarheid van LHM zoet-zout 4.0 voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (Delsman, 2020) verbeterpunten waren geconstateerd rond de deklaagweerstand offshore en in het IJsselmeergebied. Tevens is met deze update de consistentie met LHM berekeningen gewaarborgd. Deze stap is apart gerapporteerd (America et al., 2021). LHM zoet-zout is hierin geüpdatet naar versie 4.1, de effecten van de modelaanpassingen en het model als geheel zijn hierbij als plausibel beoordeeld.

2. Scenariodefinitie. Door de lange responstijd van het grondwatersysteem kan niet met separate berekeningen voor tijdonafhankelijke zichtwaarden worden gewerkt, wat in hoofdzaak de aanpak is binnen Spoor II van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging: de voorgeschiedenis van zeespiegelstijging is mede bepalend voor de resultaten bij elke gekozen zichtwaarde. Om deze reden wordt het berekenen van langjarige grondwaterstroming en verzilting voor één tijdafhankelijk (*transient*) scenario uitgevoerd. Er moet daarvoor een intern consistent scenario worden ontwikkeld, waarin veel keuzen worden gemaakt die effect hebben op de berekende verzilting van het grondwatersysteem. Elementen van dit scenario zijn de tijdlijn van zeespiegelstijging, klimaat, autonome ontwikkelingen en verschillende keuzen in het waterbeheer. De scenariodefinitie is beschreven in hoofdstuk 2.



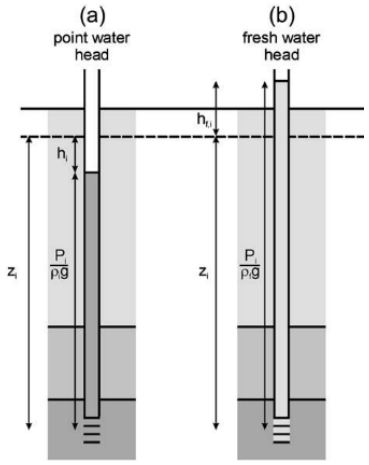
Figuur 1.1 Stappen aanpak op hoofdlijnen.

3. Berekeningen langjarige ontwikkeling verzilting van het grondwatersysteem als gevolg van zeespiegelstijging (berekening LHM zoet-zout). Voor het ontwikkelde scenario wordt een langjarige berekening met het LHM zoet-zout gemaakt, om de lange-termijn-ontwikkeling van verzilting van het grondwatersysteem gegeven een stijgende zeespiegel te berekenen. Er worden drie berekeningen gemaakt, om het effect van een stijgende zeespiegel te kunnen onderscheiden van het effect van bodemdaling en van de autonome aanpassing van de zoet-zout verdeling in het grondwater aan geologische en antropogene landschapsveranderingen in het verleden.
    a. berekening met zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome ontwikkeling (volledige scenario uit hoofdstuk 2),
    b. berekening met bodemdaling en autonome ontwikkeling (scenario hoofdstuk 2 exclusief zeespiegelstijging en meestijgend oppervlaktewater),
    c. berekening alleen autonome ontwikkeling (geen aanpassing randvoorwaarden, alleen na-ijleffecten als gevolg van landschapschapsveranderingen in het verleden).
4. Berekening watervraag voor doorspoeling (eigenstandige berekening op basis van berekening LHM zoet-zout volledige scenario). Bij een toenemende zoutvracht naar het oppervlaktewater is meer zoet water nodig om sloten en boezemkanalen door te spoelen en de huidige zoutconcentraties in het oppervlaktewater te handhaven. Deze doorspoelwatervraag wordt in het LHM als een vaste waarde opgegeven, en wordt voorafgaand aan de LHM berekening bepaald.

5. Berekening verloop verzilting oppervlaktewater en ontwikkeling watervraag voor representatief jaar voor zichtwaarden (berekening LHM zoet). Met het LHM model wordt de uitstroming van zout naar het oppervlaktewater gedurende het jaar berekend. Dit is belangrijk omdat bijvoorbeeld in een droog jaar de zoutvracht kleiner is dan gemiddeld (door minder uitspoeling), maar tegelijkertijd ook minder wordt verdund en dus leidt tot hogere concentraties. Daarnaast is met het LHM ook te bepalen hoe een toename van de doorspoelwatervraag in polders en boezems in een gebied leidt tot een hogere watervraag in de koppelpunten met het hoofdwatersysteem, waarbij rekening wordt gehouden met hergebruik van water in een boezemsysteem. Deze berekeningen worden gevoed met resultaten van de langjarige berekening met LHM zoet-zout voor het volledige scenario, dus inclusief zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome ontwikkeling.
6. Beschouwing van onzekerheid in rekenresultaten. Op basis van de rekenresultaten en onzekerheid in de basisdata wordt een beschouwing gegeven op de onzekerheid in de rekenresultaten. Deze analyse wordt ondersteund door een kwantitatieve Monte Carlo onzekerheidsanalyse.
7. Regionale analyses IJsselmeergebied en Volkerak-Zoommeer. Voor deze twee gebieden worden enkele kennisvragen nader uitgezocht op regionale schaal. Hiervoor worden modeluitsnedes van het LHM zoet-zout gebruikt.

1.5 Terminologie en afkortingen

- Deklaag – Benaming voor de Holocene klei-, zand en veenafzettingen, de dikte hiervan bedraagt enkele meters in laag Nederland. Deze laag werkt als een afsluitende laag boven het eerste watervoerende pakket. Regionale waterlopen liggen in laag Nederland voor het overgrote deel in de deklaag.
- District – Onderverdeling in het LHM van Nederland in 244 waterbeheereenheden.
- Doorspoeling – Het inlaten en weer uitlaten van een hoeveelheid water ten behoeve van waterkwaliteitsbeheer. In het LHM geschematiseerd als een vaste debietwaarde per LSW, en als een vaste debietwaarde voor takken in het hoofdwatersysteem.
- DRN randvoorwaarde – Randvoorwaarde waarmee de invloed van detailontwatering in de grondwatermodellen (LHM en LHM zoet-zout) is opgenomen. Het LHM en het LHM zoet-zout onderscheiden verschillende DRN randvoorwaarden: buisdrainage, maaiveldgreppels en oppervlakkige afstroming.
- GHB randvoorwaarde – ‘General Head Boundary condition’, randvoorwaarde (Cauchy type) waarmee de invloed van de zeewaterstand in de grondwatermodellen (LHM en LHM zoet-zout) is opgenomen.
- LHM – Landelijk Hydrologisch Model. Berekent hydrologie, watervraag, wateraanbod, zoutuitspoeling percelen op dagbasis. Gebruikte versie: 4.1 (Janssen et al., 2020).
- LHM zoet-zout – Zoet-zout versie van het Landelijk Hydrologisch Model. Berekent de langjarige stroming van zoet-zout grondwater mede onder invloed van dichtheidsverschillen. Gebruikte versie: 4.1 (America et al., 2021).
- Local surfacewater (LSW) – Onderverdeling in het LHM van het regionale oppervlaktewater in zo’n 8000 eenheden. Schaal houdt het midden tussen peilgebieden en polders.
- Point water head – Door verschillen in dichtheid is de stijghoogte (zie de definitie van stijghoogte) niet langer constant over de hele diepte van een watervoerende laag. De point water head is het niveau tot waar water met een bepaalde dichtheid in een buis stijgt als deze buis wordt ingebracht in een watervoerende laag (Figuur 1.2). Doordat het water eventueel een hogere dichtheid heeft dan zoet water, zal het water met de ter plaatse geldende dichtheid bij gelijke druk minder hoog stijgen dan zoet water zou hebben gedaan (Post et al., 2007).



Figuur 1.2 Schematische voorstelling van stijghoogtedefinities bij grondwater van variërende dichtheden: a) point water head, b) zoetwaterstijghoogte of fresh water head (uit Post et al., (2007)).

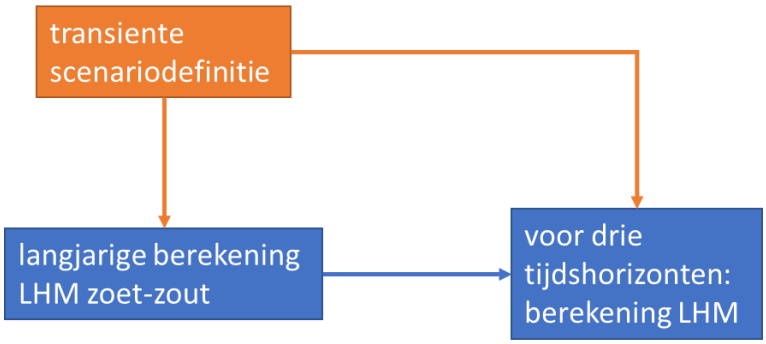
- RIV randvoorwaarde –Randvoorwaarde (Cauchy type) waarmee in de grondwatermodellen de invloed van het oppervlaktewater (rivieren, kanalen, sloten) is opgenomen. Het LHM en het LHM zoet-zout onderscheiden verschillende RIV randvoorwaarden: RIV-H (hoofdwatersysteem), RIV-P (primaire watergangen), RIV-S (secundaire watergangen) en RIV-T (tertiaire watergangen, droogvallende greppels).
- Stijghoogte – manier om waterdruk in grondwater uit te drukken. De stijghoogte is het niveau tot waar grondwater stijgt in een buis met open onderkant die in een watervoerende laag wordt gebracht. De stijghoogte is gelijk aan de z-coördinaat van een locatie plus de ter plaatse geldende waterdruk.
- Zichthorizon – een moment (jaar) behorend bij een zichtwaarde van zeespiegelstijging.
- Zichtwaarde – een specifieke waarde van de zeespiegelstijging (in m), in principe onafhankelijk van het moment waarop dit plaats vindt.
- Zoetwaterstijghoogte (in het Engels fresh water head) – Manier om stijghoogte bij verschillen in dichtheid uit te drukken (Figuur 1.2). De zoetwaterstijghoogte is de stijghoogte in een peilbuis wanneer het water in de buis in plaats van de daadwerkelijke zoutconcentratie zoet zou zijn (Post et al., 2007). De zoetwaterstijghoogte is minimaal gelijk aan of hoger dan de ‘point water head’.
- Zout – geheel aan in (grond)water opgeloste ionen. In deze rapportage wordt de hoeveelheid zout (in zoutvracht en zoutconcentratie) consequent uitgedrukt in eenheden chloride, het in het Nederlandse grondwater dominante anion. De concentratie totaal aan opgeloste zouten (TDS) is daarbij te berekenen als: TDS (g/L) ≈ 1.8 * Cl (g Cl^-/L).
- Zoutvracht – zoutconcentratie maal volumeflux grondwater. Een hoge zoutvracht correspondeert niet noodzakelijkerwijs met een hoge zoutconcentratie, zo is de zoutvracht vanuit het grondwater ’s winters hoog door een hoog drainagedebiet, maar zijn concentraties door minder bijmenging juist hoog in de zomer. Een hoge zoutvracht hoeft ook geen zoutbelasting voor een ontvangend watersysteem te betekenen, als de concentratie lager is dan de concentratie in het ontvangende water. Alle waarden voor de zoutvracht in dit rapport worden uitgedrukt in massa chloride per tijdseenheid.

2 Scenariodefinitie

De hier volgende definitie van het gehanteerde scenario is grotendeels eerder gerapporteerd als memo '*Voorstel scenariodefinitie verziltingsberekening Kennisprogramma Zeespiegelstijging*' (Delsman, 2021).

2.1 Inleiding

Voor de drie lange termijn zoet-zout grondwaterberekeningen (zeespiegelstijging inclusief autonoom en bodemdaling, autonoom en bodemdaling, alleen autonoom) wordt gebruik gemaakt van het LHM zoet-zout (Delsman et al., 2020). Het LHM zoet-zout is geüpdatet naar versie 4.1 (America et al., 2021). Op verschillende zichtwaarden van de zeespiegelstijging wordt aansluitend een berekening gedaan met LHM ('zoet'), versie 4.1 ten behoeve van de bepaling van de watervraag. De LHM 4.1 berekening betreft een berekening voor een specifiek jaar, met een aantal jaren inspeeltijd hieraan voorafgaand. Beide modellen vragen in een aantal gevallen om een iets andere scenario-input, omdat LHM zoet-zout jaargemiddelde randvoorwaarden kent, en randvoorwaarden voor LHM binnen een jaar variëren (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Doorwerking scenariodefinitie in verziltingsberekeningen: LHM zoet-zout voor de langjarige trend in grondwater bij stijgende zeespiegel, LHM (zoet) voor de watervraag binnen één jaar bij gekozen waarde van de zeespiegel.

2.2 Uitgangspunten

De definitie van het hier gehanteerde scenario is gebaseerd op de opgestelde uitgangspunten voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (Nolte et al., 2021). Er wordt om pragmatische redenen maar één scenario doorgerekend. Daarbij zijn de resultaten van de verziltingsberekeningen input voor een gevoeligheidsanalyse binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, waarbij meer variatie wordt opgelegd dan mogelijk is om in één scenario te vatten. Een belangrijk voorbeeld is het niet opnemen van meteorologische veranderingen in het scenario voor de verziltingsberekeningen. Effecten van zeespiegelstijging en meteorologische veranderingen worden in dit stadium ontkoppeld, zodat in vervolganalyses binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging scheiding van verschillende oorzaken van trends (en daarmee ook zicht op verschillende adaptatiemaatregelen) kan worden behouden.

Uit Nolte et al., 2021 zijn de volgende uitgangspunten voor het scenario overgenomen:

- DP2021: Nederland is in 2050 weerbaar tegen watertekort.
- Fundamentele karakter Voorkeurstrategie wijzigt niet (bijv. geen sluiscomplex in Nieuwe Waterweg)
- Aannames beleidsarm: beschouwde trendmatige ontwikkelingen (bv bodemdaling, watervraag) zijn autonoom.
- Zichtwaarden zeespiegelstijging (ZSS) voor waterstaatkundige analyses: 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 5m*
- Consistente klimaatscenario's ontbreken op tijdshorizon tot ca. 2200-2300. Er wordt gebruik gemaakt van gevoeligheidsanalyses in plaats van scenario-analyses.
- Klimaatscenario's voor Rijnafvoer en keuzes in landelijke waterverdeling buiten scope

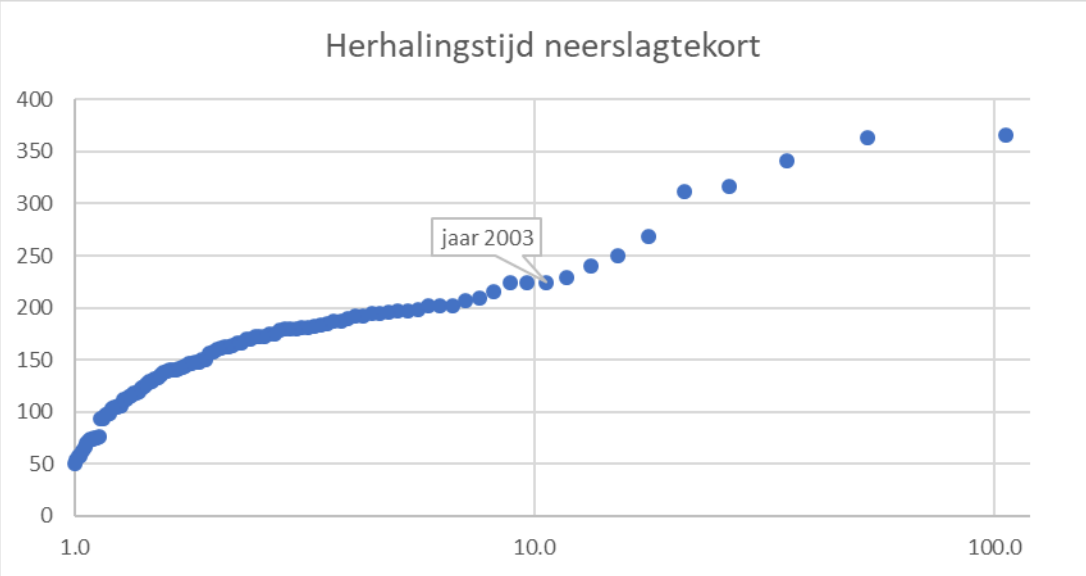
* De effecten op de 5m-zichtwaarde voor zeespiegelstijging worden niet berekend.

2.2.1 Keuze representatief jaar

Voor LHM zoet wordt op de gekozen zichtwaarden een 'representatief jaar' doorgerekend, met voorafgaand een inspeelperiode. Deze inspeelperiode is bedoeld om de zoutverdeling in de ondiepe ondergrond (deelmodel TRANSOL in het LHM) en de grondwatersituatie in te spelen.

Voor het representatieve jaar wordt een jaar met een herhalingstijd van het cumulatieve neerslagtekort van rond de 1/10 jaar gekozen. Deze herhalingstijd wordt beschouwd als de situatie waarbij wel sprake is van droogte en significante watervraag en doorspoelbehoefte, en waarbij nog net geen problemen in de waterverdeling optreden.

Op basis van analyse van de herhalingstijden van de verschillende jaren binnen de beschikbare 100-jarige reeks van het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) is het jaar 2003 gekozen als representatief jaar. Het neerslagtekort van dit jaar is 224 mm en kent een herhalingstijd van 10.6 jaar.



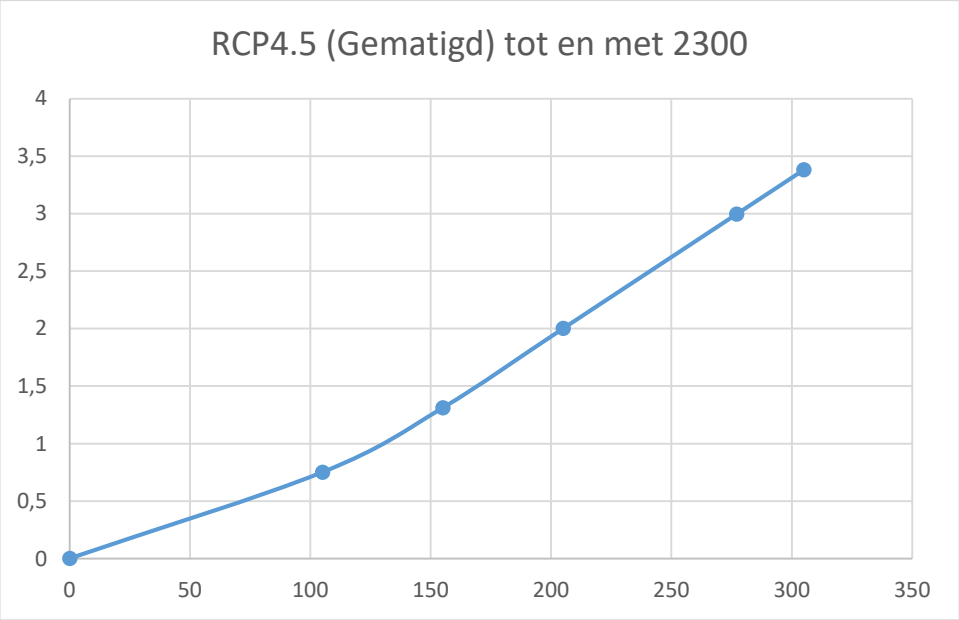
Figuur 2.2 Herhalingstijden van cumulatief jaarlijks neerslagtekort.

2.3 Zeespiegelstijging en doorwerking landinwaarts

2.3.1 Zeespiegelcurve

Voor de langzame verplaatsing van zoet en zout grondwater is het verloop in de tijd van de zeespiegelstijging van belang. Immers, het diepe grondwatersysteem ijlt (decennia) na op de verandering in zeespiegel. Bij een meer geleidelijke zeespiegelstijging zal grondwater zich over een langere tijdsperiode dus verder verplaatst hebben dan wanneer de zeespiegelstijging plaats heeft over een kortere tijdsperiode. In die zin is een gematigde zeespiegelstijging voor de analyse van optredende verzilting bij gegeven zeespiegelwaarden *worst case*. Zout grondwater heeft dan meer tijd gehad om zich landinwaarts en richting het oppervlaktewater te verplaatsen. Anderzijds worden binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging de resultaten van voorliggende studie gecombineerd met gevoeligheidsanalyses van het oppervlaktewatersysteem waarin juist een zeer snelle zeespiegelstijging als *worst case* geldt (gelet op snelheid van adaptatie). En tot slot is het van belang dat onderliggende aannames over autonome ontwikkelingen en beleidsarme aanpak tot grotere onzekerheid leiden naarmate zichtjaren verder in de toekomst liggen. Het is binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wenselijk om de verschillende aannames die ten grondslag liggen onder de combinatie van grondwaterstudies en oppervlaktewaterstudies zo consistent mogelijk te laten zijn.

Om deze redenen is besloten om in de voorliggende studie de “Gematigde” tijdlijn te hanteren, gebaseerd op het gematigde IPCC scenario RCP4.5. Deze keuze geeft ook rekenschap van het feit dat het scenario RCP4.5 waarschijnlijker is dan meer extreme IPCC RCP scenario’s die tot versnelde curves leiden. De bijbehorende zeespiegelcurve is uitgewerkt in (Vos, 2021). Deze zeespiegelcurve is kwadratisch tot 2150, daarna wordt een lineaire toename verondersteld. Figuur 2.3 geeft de opgestelde zeespiegelcurve.



Figuur 2.3 ZSS (m) volgens RCP4.5 tot 2300 (jaartal op x-as is relatief t.o.v. 1995, dus 255 = 2060 en 305 = 2300) met een gecombineerde polynoom (uit (Vos, 2021)*).*

We hanteren de zeespiegelstijging-zichtwaarden van 0,5 m, 1 m en 3 m in de berekening van doorspoelbehoefte en LHM representatieve jaar-berekeningen. De LHM zoet-zout berekeningen starten in 2000, dus vijf jaar later dan het startjaar 1995 voor de gehanteerde zeespiegelcurve. De zeespiegelcurve is vijf jaar opgeschoven om de curve in de berekening bij nul te laten beginnen. Hierbij wordt aangenomen dat de zichtwaarde 2 m door lineaire interpolatie tussen 1 m en 3 m kan worden vastgesteld.

Op basis van de gehanteerde zeespiegelcurve zijn de zichtwaarden te koppelen aan de volgende zichtjaren (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Koppeling zichtwaarden zeespiegelstijging in zichtjaren.

Zichtwaarde	Zichtjaar (Vos, 2021)	Zichtjaar– verschoven (deze studie)
0,5	2073	2078
1	2124	2129
2	2200	2205
3	2272	2277

2.3.2 Doorwerking landinwaarts

2.3.2.1 ‘Open blijft open, dicht blijft dicht’

Voor de landinwaartse doorwerking van het zeespiegelstijgingsscenario geldt het uitgangspunt dat ‘het fundamentele karakter van de Voorkeursstrategie niet wijzigt’ (Nolte et al., 2021). Dit houdt concreet in dat rivierarmen die nu open zijn, ook open blijven. Het waterpeil in deze rivierarmen stijgt dan ook mee met de zeespiegel. Dit geldt voor de Rijn-Maasmonding (inclusief het Haringvliet), de Ooster- en Westerschelde en de Eems-Dollard.

En waar een fysieke afscheiding is tussen de zee en het binnenwater, stijgt het landinwaartse peil niet mee. Dit geldt voor bijvoorbeeld het Lauwersmeer, IJsselmeer, Noordzeekanaal, Grevelingen, Veerse Meer en Volkerak-Zoommeer. Maar ook voor alle regionale boezemkanalen die op zee uitkomen.

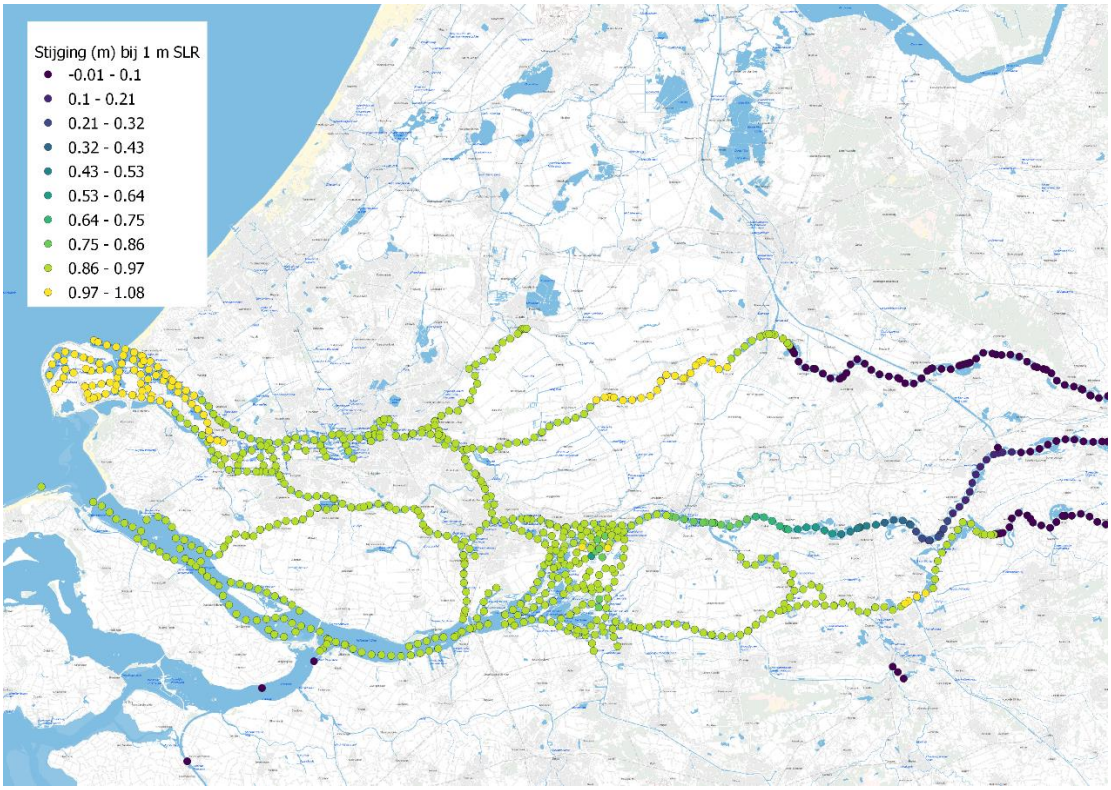
De Oosterschelde blijft het gehele zeespiegelstijgingsscenario meestijgen met de zeespiegel. De aanname wordt hierbij gemaakt dat de Voorkeursstrategie niet wijzigt, en de Oosterscheldekering te zijner tijd wordt gedimensioneerd op een hogere zeespiegel, en dijken langs de Oosterschelde worden verhoogd. Een soortgelijke aanname wordt gemaakt voor het Veerse Meer en de Grevelingen, al blijven deze meren juist op het huidig geldende waterpeil.

2.3.2.2 Opstuwing rivierpeil

Door opstuwing heeft zeespiegelstijging verder landinwaarts effect op rivierstanden. Dicht bij zee stijgt het waterpeil min of meer horizontaal mee, verder landinwaarts begint het verhang mee te spelen. De mate van ‘meestijgen’ is mede afhankelijk van de rivierafvoer: hoe lager de rivierafvoer, hoe sterker het relatieve effect van de zeespiegel op rivierwaterstanden landinwaarts. Met modelsimulaties is de stijging van rivierwaterstanden landinwaarts als gevolg van zeespiegelstijging bij een ZSS van 1, 2 en 3 m en verschillende afvoeren doorgerekend (De Jong, 2020). Merk op dat op basis van deze berekeningen de doorwerking van rivierwaterstanden niet voorbij de stuwen in Maas en Lek komt. Dit zal bij hoge afvoeren (gestreken stuwen) vanaf ca. 2m en bij lage afvoeren (gesloten stuwen) vanaf ca. 3 m zeespiegelstijging een te beperkte uitgestrektheid van de indringeffect betekenen. Een meer exacte indringing zal in een vervolgstudie binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging worden bepaald.

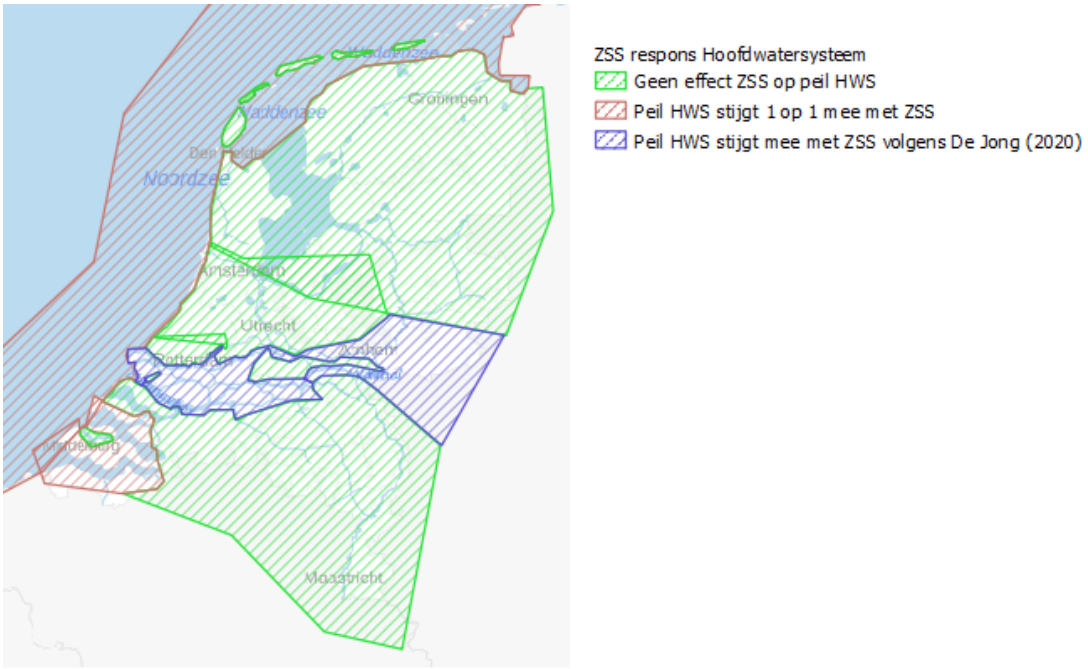
Voor het effect op grondwater is de gemiddelde situatie het meest van belang. We kijken daarom naar de resultaten bij mediane afvoer (1961 m^3/s). Klimaatverandering in rivierafvoeren wordt buiten beschouwing gelaten (Nolte et al., 2021).

Voor de Zeeuwse delta wordt aangegeven dat de open wateren min of meer gelijk meestijgen met de zeespiegelstijging, terwijl het peil in de gesloten wateren niet verandert (conform onder meer Maarse et al., 2021; Nolte et al., 2020).



Figuur 2.4 Doorwerking van 1 meter zeespiegelstijging op stijging rivierwaterstanden bij mediane rivierafvoer (1961 m^3/s bij Lobith). De doorwerking wordt scherp begrensd door de stuwen bij Hagestein en Lith, en de Volkeraksluizen (gebaseerd op De Jong, 2020).

In de scenariodefinitie wordt de doorwerking van de zeespiegelstijging op de rivierwaterstanden meegenomen voor het hoofdwatersysteem. Voor de Rijn-Maasmonding en de bovenstroomse riviertakken worden de berekeningsresultaten van De Jong (2020) voor verschillende zeespiegelstijgingswaarden lineair geïnterpoleerd voor de langzaam stijgende zeespiegel. Voor Ooster- en Westerschelde en Eems-Dollard stijgt het peil 1 op 1 mee met de zeespiegel. Overige peilen stijgen niet mee (Figuur 2.5).



Figuur 2.5 Indeling hoofdwatersysteem in type respons peil op zeespiegelstijging. Het resterende gebied volgt de berekende doorwerking zeespiegelstijging volgens De Jong (2020).

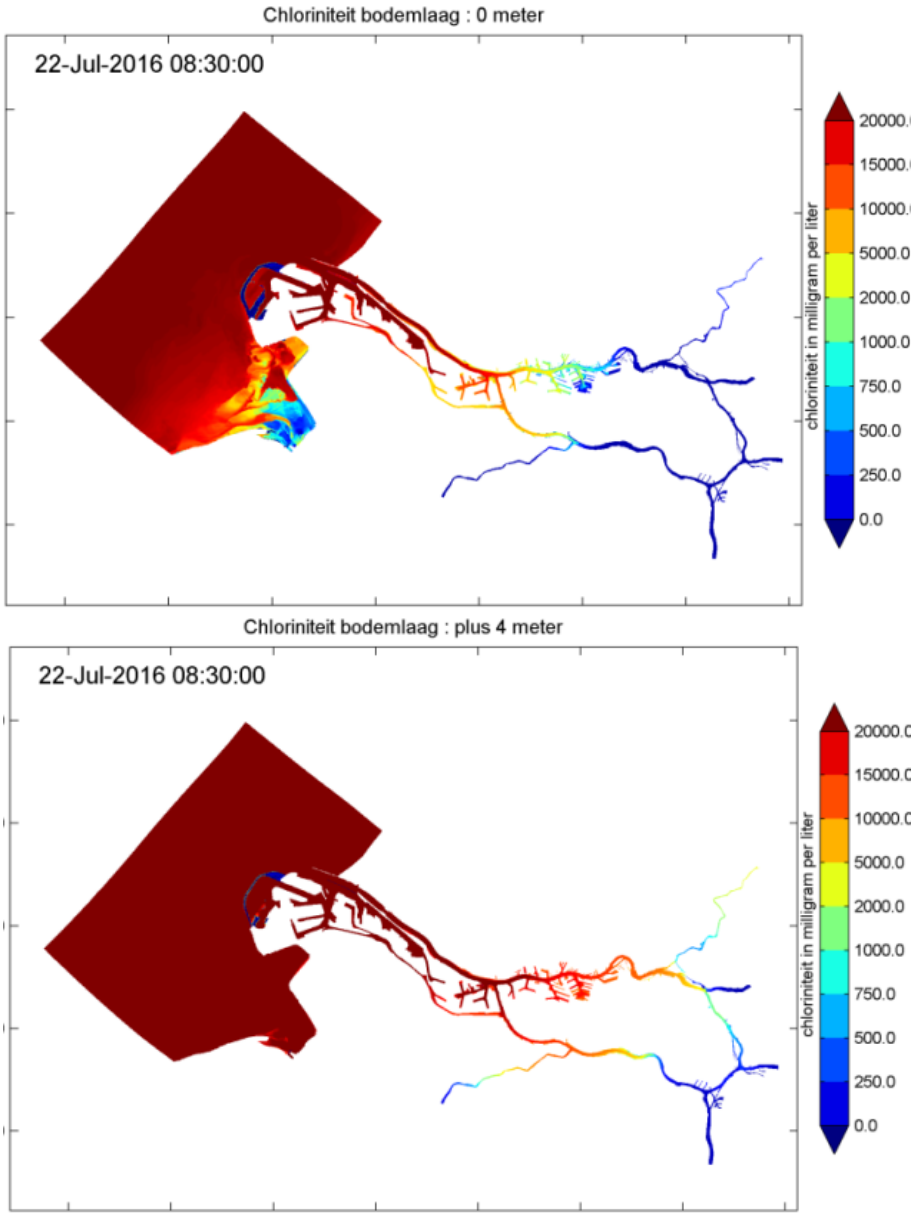
Deze randvoorwaarden worden voor LHM-zoet-zout 5-jaarlijks opgelegd in de zogenaamde RIV-H randvoorwaarde. Voor LHM zoet worden de maandelijkse rivierwaterstanden verhoogd met de voor de betreffende zeespiegelstijging geldende stijging.

2.3.2.3 Zoutconcentratie oppervlaktewater

De zouttong in open wateren schuift landinwaarts bij een zeespiegelstijging. Er zijn verkennende berekeningen gedaan voor de Rijn-Maasmonding in het kader van Haasnoot et al. (2018). Dit zijn voor zover bekend ook de enige snel beschikbare berekeningsresultaten. Uit Haasnoot et al. (2018): "*Er is volgens deze 3D simulaties bij een gemiddelde afvoer van ongeveer 2.200 m^3/s namelijk sprake van een lineaire toename van de zoutindringing in relatie tot de zeespiegelstijging*". Zie ook Figuur 2.6. Het Haringvliet is door Haasnoot et al. (2018) niet beschouwd. Bij gebrek aan informatie wordt aangenomen dat de chlorideconcentratie in het Haringvliet niet wijzigt onder invloed van zeespiegelstijging: het Haringvliet blijft gemiddeld zoet. Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging zullen in 2022 uitvoerigere berekeningen worden verricht naar de verschuiving van de zouttong in de Rijn-Maasmonding. De trend in achterwaartse verzilting van het Haringvliet is een open kennisvraag binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.

Voor de Zeeuwse delta wordt aangegeven dat de chlorideconcentratie in de open wateren (Oosterschelde, Westerschelde) min of meer gelijk zal blijven bij stijgende zeespiegelstijging (mond. meded. Arno Nolte, Thijs van Kessel, Deltares).

In het scenario nemen we de verandering van de gemiddelde chlorideconcentratie van de Rijn-Maasmonding mee, op basis van de berekeningen uit (Haasnoot et al., 2018). Hiervoor zijn berekeningsresultaten van het zoutgehalte boven de bodemlaag beschikbaar voor een twaalf-uurlijkse periode, voor huidige zeespiegel en bij een zeespiegelstijging van 4 m (de 2 m resultaten zijn niet bewaard). Tussen deze waarden van zeespiegel wordt lineair geïnterpoleerd. De waarden vervangen de opgelegde chlorideconcentratie (en dichtheid) in het berekende gebied. Dit betreft zowel de GHB randvoorwaarde (mondingsgebied) en de RIV-H randvoorwaarde (Rijn-Maasmonding).



Figuur 2.6 Chlorideconcentratie in Rijn-Maasmonding bij zeespiegelstijging (boven: 0 m, onder: 4m) bij een gemiddelde Rijnafvoer van 2000 m3/s (Haasnoot et al., 2018).

2.4 Overige (autonome) ontwikkelingen

2.4.1 Meteorologie

Een veranderende zeespiegel hangt samen met algehele klimaatverandering en dus ook met verandering in het meteorologisch klimaat. Dit laatste heeft, door veranderingen in neerslag en verdamping, en daarmee de grondwateraanvulling, een sterke invloed op berekende verzilting. Vooralsnog is er echter sprake van een brede range aan mogelijke meteorologische klimaateffecten bij de in deze studie toegepaste zeespiegelverandering.

Er is om de volgende redenen gekozen om effect van meteorologische klimaatklimaatverandering en daarmee samenhangende veranderingen in de grondwateraanvulling niet mee te nemen in het zeespiegelscenario:

- Effecten van zeespiegel en meteorologie worden ontkoppeld om in het vervolg van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging weer gecombineerd te kunnen worden. Zo blijft scheiding van verschillende oorzaken van trends (en daarmee zicht op mogelijke adaptatiemaatregelen) behouden.
- Consistente meteorologische klimaatscenario's ontbreken op de voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging relevante tijdshorizon die zich kan uitstrekken tot ca. 2200-2300 (Nolte et al., 2021).
- Er zijn geen berekeningen na 2085 met LHM zoet beschikbaar. Er is daarmee geen vertaling naar grondwateraanvulling beschikbaar.
- Meenemen van meteorologische klimaatverandering in het scenario zorgt voor een moeilijk(er) te duiden verziltingsbeeld. Zie hiervoor (Delsman, 2020).
- Meteorologische klimaatverandering heeft met name effect op watervraag, minder op verzilting (er is uiteraard wel een effect, maar dit is tweede-orde, zie bijvoorbeeld Oude Essink et al. (2010)). Dit watervraag-effect wordt in vervolgberekeningen binnen Kennisprogramma Zeespiegelstijging in de vorm van een gevoeligheidsanalyse meegenomen.

2.4.2 Socio-economische ontwikkelingen

Socio-economische ontwikkelingen kunnen zich in het scenario uiten door een veranderend landgebruik en dito grondwateraanvulling, aanpassingen in drinkwater- en industriewinningen, watersysteemaanpassingen et cetera. Socio-economische ontwikkelingen nemen we niet mee in het scenario, om de volgende redenen:

- Effecten van zeespiegel en socio-economische ontwikkelingen op de watervraag en aanbod worden ontkoppeld om in het vervolg van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging weer gecombineerd te kunnen worden. Zo blijft scheiding van verschillende oorzaken van trends (en daarmee zicht op mogelijke adaptatiemaatregelen) behouden.
- Er zijn geen projecties beschikbaar na 2050.

2.4.3 Bodemdaling

Bodemdaling heeft een significant effect op de langjarige grondwaterstroming en zouttransport. Bodemdaling is met name afhankelijk van beheerskeuzen (wordt het oppervlaktewaterpeil geïndexeerd of niet?) en van het klimaat.

Recent zijn nieuwe bodemdalingsprognoses gemaakt voor 2050 en 2100 (https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/bodemdalingsvoorspellings-kaarten) (Erkens et al., 2021). De prognoses zijn gemaakt voor twee scenario's: Business-as-Usual, met voortgaande peilindexatie en sterke klimaatverandering, en een 'Parijs-akkoord-scenario', met gematigde klimaatverandering en peilfixatie. Bij peilindexatie worden de oppervlaktewaterpeilen regulier (in tien-jaarlijkse cycli) aangepast aan de opgetreden bodemdaling, bij peilfixatie wordt het oppervlaktewaterpeil niet aangepast zodat vernatting optreedt en bodemdaling wordt geremd.

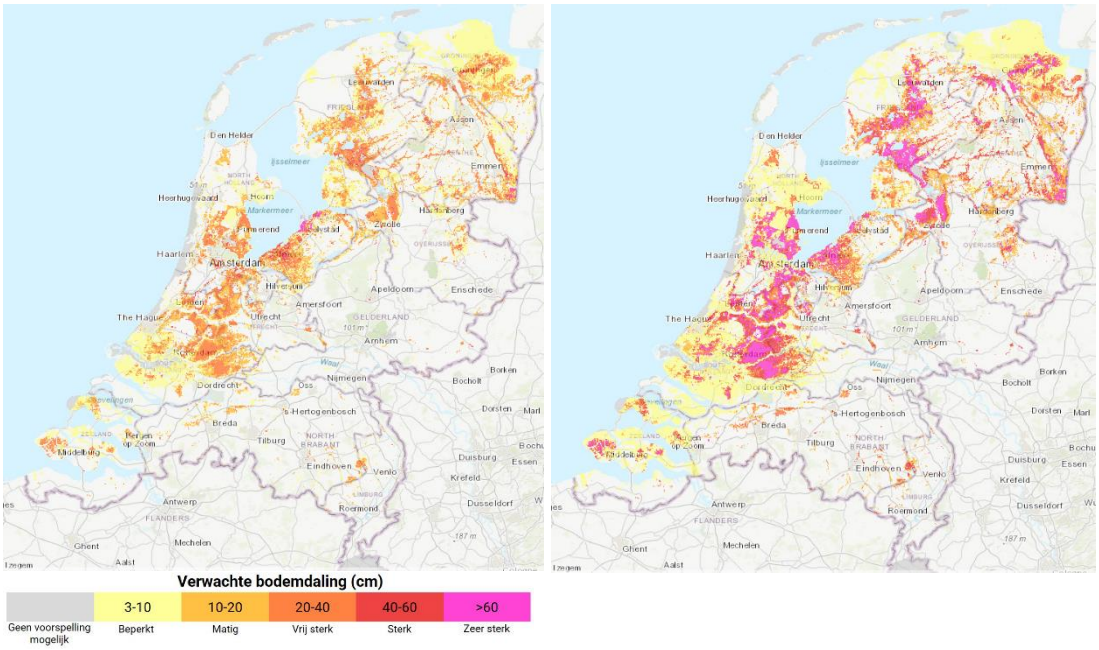
In het scenario gaan we uit van de business-as-usual bodemdalingsprognose. Peilindexatie past immers goed bij de 'business-as-usual'-aanname in het uitgangspuntendocument (Nolte et al., 2021). In de bodemdalingsberekening wordt wel een sterk klimaateffect verondersteld, waar we in het LHM scenario niet van uitgaan. De keuze voor dit scenario is toch gemaakt, omdat het effect van klimaatverandering op bodemdaling als kleiner wordt ingeschat dan het effect van de peilindexatie op bodemdaling (mond. meded. Gilles Erkens, Deltares).

Bodemdaling wordt in de langjarige berekeningen ook in isolatie beschouwd, waarmee het effect van deze aanname op de resultaten duidelijk wordt.

De voor 2100 voorspelde bodemdaling bij voortgaande peilindexatie wordt gezien als min of meer de bovengrens van de verwachte bodemdaling, omdat bij deze bodemdaling de in de Klimaatwet (Staatsblad, 2019) vastgelegde CO_2 reductiedoelstelling van 5% in 2050 (ten opzichte van 1990) door veenoxidatie niet haalbaar is (Raad van de Leefomgeving en infrastructuur, 2020). De Raad van de Leefomgeving en infrastructuur adviseert dan ook om de transitie van peilverlaging naar peilverhoging te maken en een harde doelstelling voor de vermindering van bodemverlaging op te nemen in de Omgevingswet (Raad van de Leefomgeving en infrastructuur, 2020).

Verder is voor langjarige grondwaterberekeningen met name de indexering van de oppervlaktewaterpeilen en drainagesystemen van belang. De maaivelddaling op zichzelf is daarbij van minder belang, deze is wel van belang in de representatieve jaar-berekeningen. In het scenario wordt daarom als volgt omgegaan met de berekende bodemdaling:

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



Figuur 2.7 Bodemdalingskaarten voor scenario 'hoog', peilindexatie en sterke klimaatverandering, voor de periode 2020 – 2050 (links) en 2020 – 2100 (rechts). Bron: https://klimaateffectatlas.nl/nl/bodemdalingsvoorspellings-kaarten.

2.4.4 Maatregelen Deltaprogramma Zoetwater

In het kader van het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) zijn verschillende ingrepen in het watersysteem voorzien. Keuzen in de landelijke waterverdeling zijn volgens (Nolte et al., 2021) evenwel buiten scope. DPZW maatregelen die niet zijn opgenomen in de bestaande LHM modelschematisatie worden niet opgenomen in het scenario. Dit betreft alle (fase 1 en 2 van het Deltaprogramma Zoetwater) maatregelen die nog geen huidige praktijk zijn (Hunink et al., 2020). Redenen hiervoor zijn:

- Effecten van zeespiegel en maatregelen in het kader van het DPZW op de watervraag en aanbod worden ontkoppeld om in het vervolg van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging weer gecombineerd te kunnen worden. Zo blijft scheiding van verschillende oorzaken van trends (en daarmee zicht op mogelijke adaptatiemaatregelen) behouden.
- De LHM berekeningen voor het DPZW, en daarmee de bestaande schematisatie van de verschillende fase 1 en 2 DPZW maatregelen zijn uitgevoerd met LHM versie 3.4, en daarmee niet direct consistent met / toe te passen in versie LHM 4.1.
- Het merendeel van de DPZW maatregelen zijn gericht op het vergroten op het wateraanbod en wegnemen van capaciteitsproblemen. In de LHM representatieve jaar-berekeningen zijn wateraanbod en capaciteitsproblemen modelmatig weggenomen om de berekening van de watervraag niet te beïnvloeden.

2.5 Overzicht scenario's

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de aspecten van het scenario die zijn opgenomen in de verschillende modelberekeningen.

Tabel 2.2 Overzicht scenario-onderdelen opgenomen in de verschillende modelberekeningen.

Scenario	Zeespiegel	Invloed ZSS landinwaarts	Chlorideverandering Rijn-Maasmonding	Veranderingen Meteorologie	Socio-economische ontwikkelingen	Bodemdaling – peilindexatie	Maatregelen DPZW	Autonome verandering zoet-zout verdeling
LHM zoet-zout – zeespiegelstijging, bodemdaling, autonoom	X	X	X	-	-	X	-	X
LHM zoet-zout – bodemdaling, autonoom	-	-	-	-	-	X	-	X
LHM zoet-zout – autonoom	-	-	-	-	-	-	-	X
LHM zoet – berekeningen zichtjaren	X	X	X	-	-	X	-	X

3 Methode

3.1 Langjarige berekeningen LHM zoet-zout

3.1.1 LHM zoet-zout versie 4.1

In de langjarige berekeningen wordt gebruik gemaakt van het recent geüpdatete LHM zoet-zout versie 4.1 model. In deze nieuwe versie is de offshore randvoorwaarde beter geïmplementeerd, is de deklaagweerstand in het IJsselmeergebied herzien, zijn infiltratie/drainageweerstanden van waterlopen conceptueel gelijk getrokken met het LHM (versie 4.1) en zijn interpolatieartefacten in de initiële zoutconcentratie van het grondwater op een pragmatische manier verwijderd. Zie America et al. (2021) voor een uitgebreide beschrijving van de veranderingen ten opzichte van LHM zoet-zout versie 4.0 en een plausibiliteitstoets van LHM zoet-zout versie 4.1.

3.1.2 Implementatie scenario randvoorwaarden

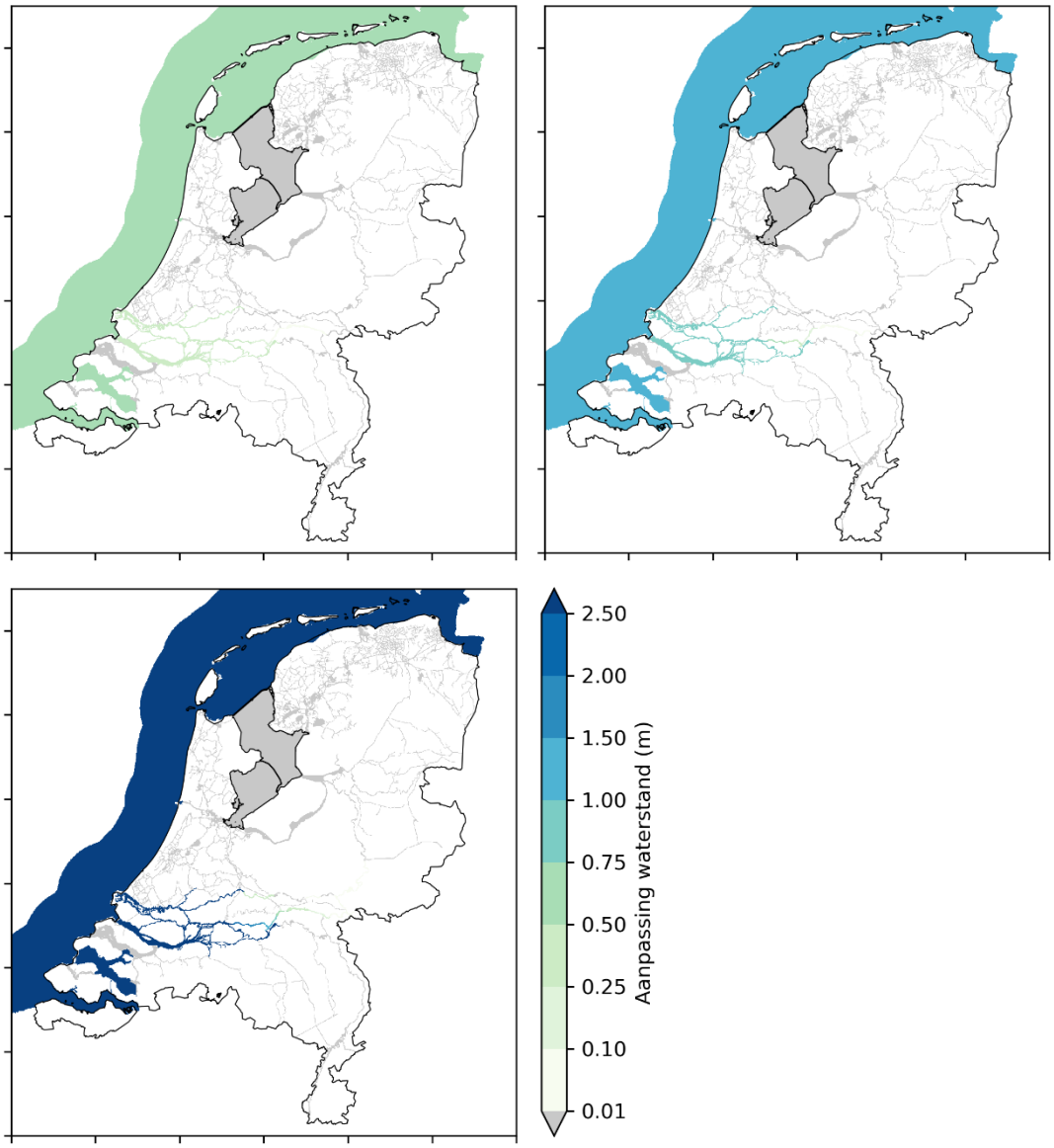
Er zijn drie verschillende langjarige berekeningen uitgevoerd om de effecten van zeespiegelstijging te kunnen onderscheiden van optredende autonome ontwikkelingen (bodemdaling en de autonome verplaatsing van de zoet-zoutverdeling). Tabel 2.2 geeft het overzicht van de opgenomen scenario-onderdelen per modelberekening.

3.1.2.1 Aanpassing randvoorwaarden als gevolg van zeespiegelstijging

De in hoofdstuk 2 beschreven scenariodefinitie is voor wat betreft zeespiegelstijging als volgt verwerkt in de randvoorwaarden van LHM zoet-zout:

- Noord- en Waddenzee (GHB randvoorwaarde):
  - Waterpeil stijgt overal één op één mee met zeespiegelstijging.
  - Chlorideconcentratie buitengaats van de Rijn-Maasmonding aangepast op basis van modelberekeningen (Haasnoot et al., 2018).
  - Geen aanpassing drainage- / infiltratieweerstand.
- Hoofdwatersysteem (RIV-H randvoorwaarde):
  - Waterpeil stijgt locatie-specifiek mee met zeespiegelstijging (zie onder meer De Jong (2020)).
  - Chlorideconcentratie in Rijn-Maasmonding (Haasnoot et al., 2018).
  - Geen aanpassing drainage- / infiltratieweerstand.

Deze aanpassingen zijn alleen opgenomen in de berekening ‘zeespiegelstijging, bodemdaling en autonoom’. De aanpassingen zijn gevisualiseerd in Figuur 3.1.



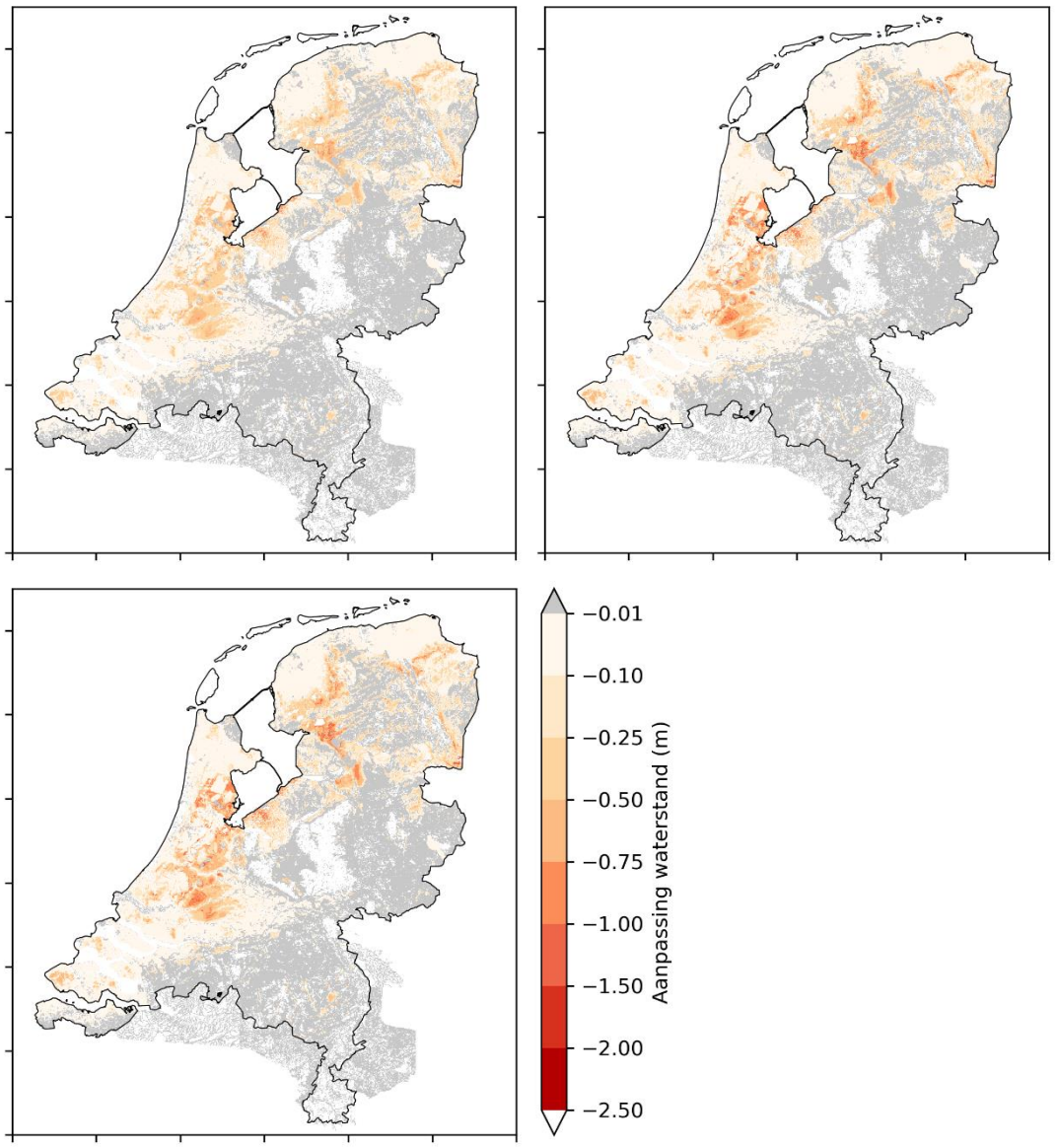
Figuur 3.1 Verschil in opgelegd waterpeil ten opzichte van de huidige situatie in de GHB (zee) en RIV-H (hoofdwatersysteem) randvoorwaarden, voor jaren 2078 (0.5 m ZSS, linksboven), 2129 (1 m ZSS, rechtsboven) en 2277 (3 m ZSS, onder).

3.1.2.2 Aanpassing randvoorwaarden als gevolg van autonome ontwikkelingen

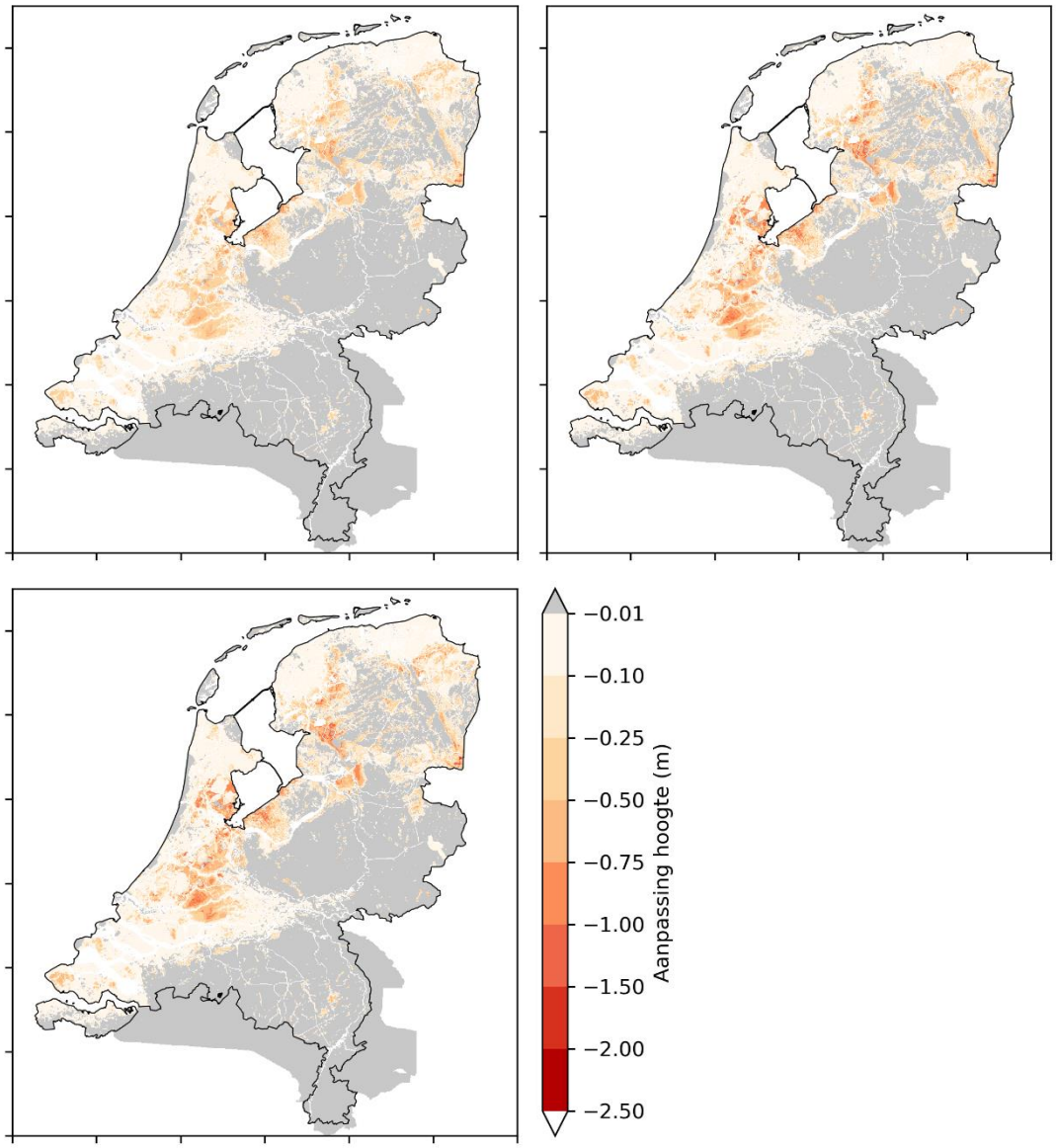
Bodemdaling is als enige autonome ontwikkeling meegenomen in het doorgerekende scenario. Bodemdaling is als volgt verwerkt in aanpassing van het regionaal oppervlaktewatersysteem (Figuur 3.2) en het maaiveld, greppel- en buisdrainage (Figuur 3.3):

- Regionaal oppervlaktewatersysteem (primaire, secundaire en tertiaire waterlopen, respectievelijk RIV-P, RIV-S en RIV-T randvoorwaarden):
    - Waterpeil daalt elke 10-jaar mee met bodemdaling, tot 2100 (https://www.klimaateffectatlas.nl/nl/bodemdalingsvoorspellings-kaarten).
    - Bodemhoogte daalt elke 10-jaar mee met bodemdaling, tot 2100.
    - Geen aanpassing drainage- / infiltratieweerstand.
- Buisdrainage, maaivelddrainage en oppervlakkige afstroming (respectievelijk DRN-B, DRN-MVGREP en DRN- SOF randvoorwaarden):
    - Absolute hoogteligging daalt elke 10-jaar mee met bodemdaling, tot 2100.
    - Geen aanpassing drainage- / infiltratieweerstand.

Deze aanpassingen zijn opgenomen in de berekening ‘zeespiegelstijging, bodemdaling en autonoom’, en de berekening ‘bodemdaling en autonoom’. In de berekening ‘autonoom’ zijn geen randvoorwaarden aangepast.



Figuur 3.2 Verschil in opgelegd waterpeil ten opzichte van de huidige situatie in primaire, secundaire en tertiaire waterlopen samen, voor jaren 2078 (0.5 m ZSS, linksboven), 2129 (1 m ZSS, rechtsboven) en 2277 (3 m ZSS, linksonder). Figuren rechtsboven en linksonder zijn gelijk, omdat de peilindexatie stopt in het jaar 2100.



Figuur 3.3 Verschil in opgelegd drainageniveau ten opzichte van de huidige situatie in de maaivelddrainage randvoorwaarde, voor jaren 2078 (0.5 m ZSS, linksboven), 2129 (1 m ZSS, rechtsboven) en 2277 (3 m ZSS, linksonder). Figuren rechtsboven en linksonder zijn gelijk, omdat de peilindexatie stopt in het jaar 2100.

3.1.3 Langjarige berekeningen

De berekeningen (periode 2000 – 2278) hebben gedraaid op de NHI server, met 24 cores was de rekentijd per berekening zo'n 2 weken. Modeluitvoer is jaarlijks weggeschreven.

3.2 Berekening doorspoelbehoefte

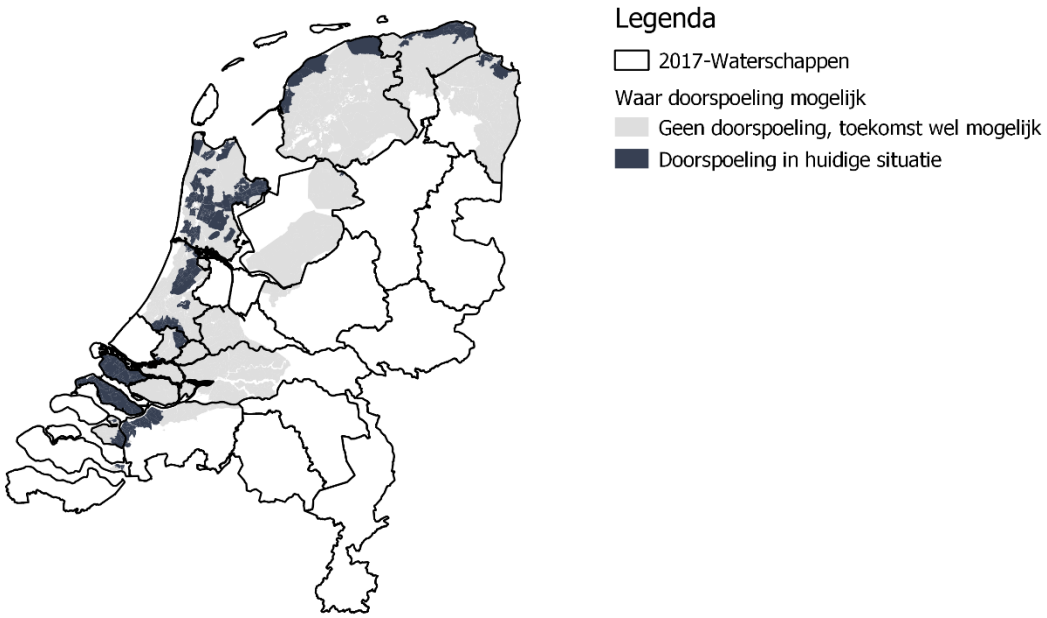
3.2.1 Inleiding

Polders en boezemwateren worden doorgespoeld om een bepaalde waterkwaliteit te handhaven. Vaak gaat het hierbij om het tegengaan van verzilting van het oppervlaktewater als gevolg van brakke kwel of zoutlek bij sluizen. In de scenariodefinitie gaan we uit van gelijk beleid, voor doorspoeling is dit vertaald als: waar in de huidige situatie wordt doorgespoeld: handhaaf de huidige concentratie door het aanpassen (veelal vergroten) van de doorspoelwatervraag. Bij een toenemende zoutvracht is meer doorspoeling nodig om eenzelfde concentratie te handhaven. In het LHM wordt doorspoeling als een vaste waarde opgegeven. Voorafgaand aan de LHM berekening moet daarom een goede inschatting worden gedaan hoeveel doorspoeling in een toekomstige situatie nodig is om de concentratie gelijk te houden.

3.2.2 Doorspoeling polders

3.2.2.1 Onderscheiden mogelijk door te spoelen polders

Voor doorspoeling van polders is ‘waar in de huidige situatie wordt doorgespoeld’ niet per polder, maar per waterschap een onderscheid gemaakt. Een waterschap dat polders doorspoelt zal bij gelijk beleid immers ook een polder waar in de huidige situatie niet wordt doorgespoeld, maar waar concentraties in de toekomst oplopen, gaan doorspoelen. Een waterschap dat in de huidige situaties polders met brakke kwel niet doorspoelt, zal dit ook bij toenemende zoutvracht niet gaan doen. Daarbij moet er uiteraard ook water kunnen worden aangevoerd: polders zonder wateraanvoermogelijkheden kunnen gegeven de scenariodefinitie ook in de toekomst niet doorspoelen. Figuur 3.4 geeft de onderscheiden polders (local surfacewater, LSW), waar bij een stijgende zoutvracht eventueel doorspoeling mogelijk is.



Figuur 3.4 Onderscheiden polders waar doorspoeling bij zeespiegelstijging mogelijk is.

3.2.2.2 Berekening doorspoelbehoefte polders

De benodigde doorspoeling om een polder door te spoelen tot een bepaalde streefconcentratie, gegeven een bepaalde boezemconcentratie en interne zoutvracht van een polder, kan worden berekend volgens:

$$Q_{doorspoel} = Q_{lsw} \frac{C_{lsw} - C_{streef}}{C_{streef} - C_{'boezem'}}, \quad (1)$$

met $Q_{doorspoel}$ het benodigde doorspoeldebiet (m^3/s), Q_{lsw} de interne waterafvoer van het LSW (poldereenheid in LHM-Mozart model) (m^3/s), C_{lsw} de concentratie in het LSW vóór doorspoelen (g/L), C_{streef} de door doorspoelen te bereiken streefconcentratie in het LSW (g/L), en C_{boezem} de concentratie in het boezemwater dat wordt ingelaten (g/L).

Bovenstaande formule wordt ingevuld met rekenresultaten van het LHM. De streefconcentratie is de gemiddelde LSW-concentratie in de huidige situatie (groeiseizoen 2003, zie paragraaf 3.3), of 100 mg/L voor LSW's met een concentratie lager dan 100 mg/L in de huidige situatie. Daarnaast wordt de streefconcentratie eventueel verhoogd tot minimaal 50 mg/L boven de boezemconcentratie, om grote doorspoeldebieten voor kleine kwaliteitsverbetering te voorkomen. De boezemconcentratie is de seizoensgemiddelde concentratie in het inlaatwater uit de boezem. De afvoer van en concentratie vóór doorspoeling in het LSW volgen uit de groeiseizoen-gemiddelde water- en zoutbalans van het LSW. Er wordt tenslotte alleen doorgespoeld als de LSW concentratie hoger is dan de boezemconcentratie. De waarden van de verschillende genoemde criteria zijn mede bepalend voor de uitkomst van de doorspoelbehoefte. Als onderdeel van de onzekerheidsanalyse (zie 3.4.4) zijn deze waarden dan ook gevarieerd in een gevoeligheidsanalyse.

3.2.3 Doorspoeling boezemkanalen

Doorspoeling in boezemkanalen vindt gewoonlijk plaats om zoutvracht als gevolg van interne verzilting te compenseren, of zoutlek door sluizen te mitigeren. Per boezemkanaal met doorspoeling - volgens de schematisatie van het Distributiemodel - is op basis van expertkennis ingeschat welke van beide redenen het voornamelijk betreft (tabel 3.1). Merk op dat in deze tabel geen doorspoeling in het Rijkswater is opgenomen, zoals bijvoorbeeld in het Amsterdam Rijnkanaal – Noordzeekanaal, en in de sluiscomplexen in de Afsluitdijk. Deze worden in het vervolg op voorliggende studie binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging nader beschouwd. Aangezien wateraanbod naar de regionale wateren in deze studie als niet limiterend wordt beschouwd, is mogelijke verandering van doorspoeling op deze locaties voor deze studie niet relevant.

Tabel 3.1 Type doorspoeling voor Distributiemodel links (met name boezemkanalen).

DM linkid	Omschrijving	Type
10451	Eemskanaal	zoutlek
10551	Friese boezem (Tjerk Hiddesluizen)	zoutlek
1036	Termunterzijldiep	zoutlek
1044	Westerwoldse Aa	zoutlek
20041	HHNK – Helsdeur	zoutlek
2005	HHNK – Waakzaamheid	zoutlek
40561	Schie-Parksluizen	zoutlek
40251	Rijnland – Spaarndam	interne verzilting
4028	Rijnland – Katwijk	interne verzilting
4062	Zuiderdiep boezem	interne verzilting
5029	Steenbergse Vliet	interne verzilting
5026	Dintel	interne verzilting
4006	Vecht	interne verzilting
1063	Electraboezem	interne verzilting

De doorspoeling van boezemwateren wordt voor beide typen (zoutlek, interne verzilting) als evenredig verondersteld met de zoutvracht.

$$Q_{doorspoel,t} = Q_{doorspoel,0} \frac{ZV_t}{ZV_0}, \qquad (2)$$

met $Q_{doorspoel,t}$ de benodigde doorspoeling op zichtwaarde t, $Q_{doorspoel,0}$ de huidige doorspoeling, en ZV_t en ZV_0 de zoutvracht op respectievelijk zichtwaarde t en huidig. De aanname in deze benadering is dus dat de systeemwerking (met name het zoetspoelrendement van een boezem) bij toenemende zoutvracht in de toekomst niet verandert. Deze aanname wordt voor de voorziene toepassing van de in dit rapport gepresenteerde resultaten voldoende nauwkeurig geacht. In de op dit rapport volgende gevoeligheidsanalyses binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging zal voor boezemsystemen die onderdeel zijn van de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (met name IJsselmeer en Amsterdam Rijnkanaal - Noordzeekanaal), wat betreft systeemwerking en daaruit resulterende doorspoelbehoefte en chloride-evenwichtswaarden in meer detail worden berekend.

De toename van de zoutvracht op de boezems is voor type interne verzilting ingeschat op basis van de totale berekende zoutvracht in het op de boezem afwaterende oppervlak. Voor het type zoutlek (externe verzilting) is de toename van de zoutvracht afhankelijk verondersteld van de zeespiegelstijging. Het zoutlek is ingeschat volgens een pragmatische benadering gebaseerd op (Uittenbogaard & Cornelisse, 2011), waarbij de uitgewisselde zoutmassa onder meer afhankelijk is van de kolkdiepte tot de macht 1.5. De zoutvracht op zichtwaarde t ZV_t is op deze manier ingeschat als:

$$ZV_t = ZV_0 \frac{\left(KD_0 + ZSS_t\right)^{1.5}}{\left(KD_0\right)^{1.5}}, \qquad (3)$$

met KD_0 als de huidige kolkdiepte, die voor alle sluizen als 4m is aangenomen, en ZSS de zeewaterstandsverhoging op zichtwaarde t. Uiteraard is deze aanpak een sterke versimpeling van de processen die spelen rond zoutuitwisseling bij scheepvaartsluizen. Er wordt momenteel gewerkt aan een ‘Zeesluisformulering’ waarmee de toegenomen zoutvracht beter kan worden ingeschat (Weiler, 2019, 2018). Voor het huidige doel, inschatten van de toename van de regionale watervraag als gevolg van verzilting middels langjarige berekeningen, wordt de aanpak voor deze studie als voldoende gezien. Het kan evenwel belangrijk zijn om de precieze toename van de zoutvracht en de daarmee samenhangende doorspoelwatervraag voor relevante watersystemen met behulp van de Zeesluisformulering apart en in meer detail uit te rekenen. Voor watersystemen die deel uitmaken van de strategische Klimaatbestendige Zoetwaterstrategie Hoofdwatersysteem buffers, zal dit in vervolg op deze studie plaatsvinden.

Nadere beschouwing gehanteerde inschatting zoutvracht zeesluizen
Tom O'Mahoney, Deltares

De gehanteerde relatie (vergelijking 3) is gebaseerd op de zoutflux door een open sluisdeur als gevolg van lock-exchange dichtheidsstroming. Door deze relatie te gebruiken wordt verondersteld dat de zoutindringing door deze uitwisselstroming de dominante bron is van zoutindringing door sluizen. Andere bronnen zijn de nivelleerstroming (schutschijf bij hoogwater wordt in de binnenvoorhaven geloosd) en waterverplaatsingen van schepen. Voor de zeesluizen van Nederland is dit een juiste aanname, de uitwisseling is de dominante bron. De zoutvracht door uitwisseling schaalt met de kolkdiepte, terwijl de nivelleerstroming schaalt met het verval (dat door getijvariaties gemiddeld klein is). Waterverplaatsingen van schepen geven netto een kleine bijdrage omdat het zoutlek door een schip dat de kolk invaart vanuit de boezem vaak wordt gecompenseerd door een gelijk schip dat juist vanuit de kolk naar binnen vaart. Opgemerkt wordt dat met zeespiegelstijging de bijdrage van de nivelleerstroming toe zal nemen. De aanname dat de dichtheidsstroming dominant is en dat andere bronnen van zoutindringing door sluizen niet veranderen met zeespiegelstijging geeft dus een onderschatting van de toename in zoutindringing door zeespiegelstijging.

De gehanteerde relatie (vergelijking 3) geeft de zoutflux als evenredig met de kolkdiepte tot de macht 1.5. Het oppervlak van de zoute stroming is een halve kolkdiepte vermenigvuldigt met de kolkbreedte en de snelheid is evenredig met de wortel van de kolkdiepte. Samen geeft dat een term die evenredig is met kolkdiepte tot de macht 1.5. Deze zoutflux geldt voor het begin van uitwisselen, de aanname is hier dat de tijd dat de sluisdeuren open zijn korter is dan de volledige uitwisseltijd. Deze aanname is redelijk voor de Nederlandse zeesluizen.

De snelheid van de dichtheidsstroming is ook afhankelijk van het dichtheidsverschil – (delta rho / rho_avg)^0.5. Vergelijking 3 veronderstelt dat dit dichtheidsverschil niet verandert met zeespiegelstijging. Deze aanname is niet juist, maar gezien de complexiteit van variatie van de dichtheid met veranderende condities en het kleine effect op de netto zoutindringing gerechtvaardigd. Als de zoutindringing groter wordt, wordt de binnenvoorhaven (aan de kant van de boezem) zouter. Het dichtheidsverschil over de binnendeur op het moment van openen neemt hierdoor af en daarmee ook de snelheid van de dichtheidsstroming. Aan de andere kant zal, door zeespiegelstijging, de dichtheid in de buitenvoorhaven toenemen. De zoete lozingen vanuit de sluis door het schutten vormen een kleinere proportie van het totale volume van het water in de voorhaven omdat de waterdiepte groter wordt. Deze toename in dichtheid aan de buitenkant zorgt voor een grotere dichtheid in de kolk en een groter dichtheidsverschil bij de binnendeur op het moment van openen. Deze twee effecten op het dichtheidsverschil worden in vergelijking 3 niet meegenomen. De effecten werken ook enigszins tegen elkaar. Het is moeilijk te zeggen of het verwaarlozen ervan een onder- of juist overschatting zal geven. In ieder geval zijn deze effecten tweede orde effecten. De Zeesluisformulering (ZSF) is in staat om zowel deze effecten als de andere bronnen van zoutindringing door schutsluizen wel mee te nemen.

Verder wordt verondersteld dat geen mitigerende maatregelen getroffen worden bij de sluizen als de zeespiegel stijgt.

3.2.4 Toekenning zoutvracht LSW

De zoutvracht op een LSW ($Q_{lsw} \cdot C_{lsw}$, zie vergelijking 1) is in eerste instantie ingeschat op basis van rekenresultaten van LHM zoet-zout. De zoutvracht in een specifiek jaar hangt mede af van de specifieke (meteorologische) omstandigheden in dat jaar. Daarom is de langjarig gemiddelde zoutvracht, zoals berekend met LHM zoet-zout, lineair geschaald naar het beoogde jaar. Dit is gedaan door per LSW een factor af te leiden hoe de langjarig gemiddelde zoutvracht per zichtwaarde zich verhoudt tot de in LHM berekende huidige situatie in een bepaald jaar met specifieke (meteo)omstandigheden, en deze factor toe te passen op de eerder berekende zoutvracht voor hetzelfde specifieke jaar in de toekomst, met zijn specifieke (meteo)omstandigheden.

De met deze methode berekende doorspoelgetallen leidden niet in alle gevallen tot het behalen van de chlorideconcentratie-streefwaarden in de LSW's. Er is daarom voor gekozen om een iteratieve procedure toe te passen, waarbij de door LHM voor een bepaalde zichtwaarde berekende zoutvracht (zie volgende paragraaf) als invoer is gebruikt voor de doorspoelberekening. Doordat de berekening van de zoutvracht uit grondwater min of meer onafhankelijk is van de oppervlaktewaterconcentratie in de LSW's, kon in de vervolgberekening worden volstaan met het doorrekenen van alleen de modellen MOZART en DM, waarbij de uitwisseling tussen MOZART en MODFLOW-MetaSWAP / TRANSOL werd overgenomen uit de eerste LHM berekening.

3.3 Representatieve-jaar berekening LHM voor zichtwaarden

3.3.1 Inleiding

LHM ('zoet') versie 4.1 is de meest recente versie van het LHM, aanpassingen ten opzichte van eerdere versies zijn beschreven in Janssen et al. (2020). Het LHM berekent de uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater in dagelijkse tijdstappen, waarbij de chlorideconcentratie in het diepe grondwater gedurende de rekenperiode constant wordt gehouden.

Het LHM 4.1 is recent gevalideerd (HKV et al., 2021). In deze validatie is voor het aspect verzilting vastgesteld dat het LHM 4.1 niet voldoet aan de gestelde criteria. Specifiek voor het model TRANSOL wordt in de validatie geconstateerd dat ruimtelijke en temporele patronen in de uitspoeling van zout naar oppervlaktewater overeenkomen met metingen, maar dat de wortelzone zoeter wordt berekend dan de ervaring is in het gebied (Schouwen-Duiveland, zie Acacia Water et al. (2021)). Daarnaast is voor Noord-Nederland geconstateerd dat de kwel- / infiltratiesituatie, en daarmee de zoutvracht, afwijkt door een afwijkende modelschematisatie van drainagediepten en weerstand (Acacia Water et al., 2021). Het LHM wordt in deze studie desondanks toegepast. In dezelfde validatie wordt namelijk opgemerkt dat het nagenoeg ontbreekt aan goede validatiegegevens, en een goede validatie daarom moeilijk is. Verder worden de geconstateerde tekortkomingen in hoofdzaak ingeschat als systematisch en wordt LHM in deze studie ingezet voor verschilberekeningen. Implicaties van de geconstateerde tekortkomingen op resultaten worden zo mogelijk geduid (paragraaf 0, en waar verder van toepassing).

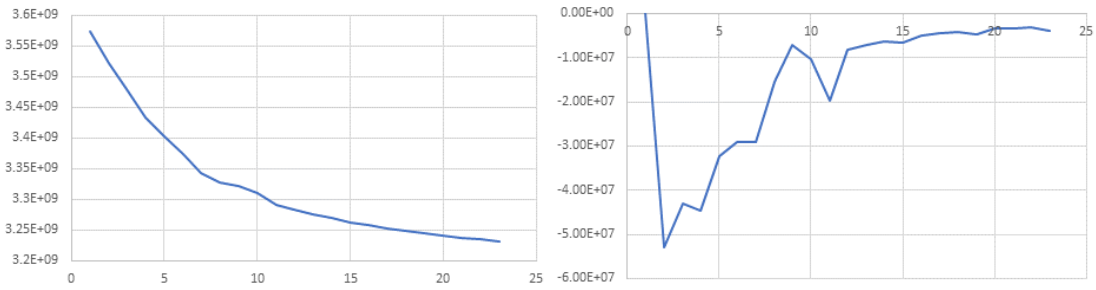
3.3.2 Aanpassing randvoorwaarden

De randvoorwaarden van het LHM zijn aangepast conform de uitgangspunten van de scenariodefinitie. De procedure hiervoor is in grote lijnen gelijk aan de procedure voor LHM zoet-zout, zoals beschreven in paragraaf 3.1.2, met enkele aanpassingen:

- De waterstand van het hoofdwatersysteem varieert in LHM maandelijks. Elk van deze maandelijkse peilen is op gelijke wijze aangepast voor de zichtwaarden conform de afbakening inFiguur 2.5. Er is geen onderscheid gemaakt naar bijvoorbeeld de rivierafvoer in een bepaalde maand.
- Het peil van het regionale systeem varieert tussen een zomer- en winterpeil. Beide peilen zijn gelijk aangepast aan de bodemdaling zoals beschreven in paragraaf 3.1.2.2. Hierbij is ook het koppelingsbestand tussen MODFLOW en MOZART (mf2lsw.csv) aangepast.
- Het maaiveld zoals gebruikt in MetaSWAP is aangepast volgens de bodemdaling zoals voor LHM zoet-zout beschreven in paragraaf 3.1.2.2.
- De chlorideconcentratie van wellen is aangepast voor de zichtwaarden door de berekende concentratie in LHM zoet-zout op de locaties van wellen verticaal te middelen over het eerste watervoerende pakket.

3.3.3 Inspelen chlorideconcentratie ondiep grondwater (TRANSOL)

De chlorideverdeling in het ondiepe grondwater wordt berekend met het model TRANSOL. Waar neerslag snel leidt tot veranderingen in de chlorideconcentratie van het drainagewater, is de respons van de ondiepe chlorideverdeling veel trager (De Louw et al., 2013; Delsman et al., 2016, 2014). Het inspelen van de ondiepe chlorideverdeling gegeven een veranderende grondwaterconcentratie aan de onderkant van de deklaag kost meerdere jaren. Het inspelen is gedaan door het jaar 2003 een x aantal jaar opnieuw te berekenen, en na elk jaar de berekende ondiepe chlorideverdeling als invoer voor het volgende inspeeljaar toe te passen. Het voordeel van deze methode ten opzichte van het doorrekenen van een langjarige periode met wisselende meteorologische omstandigheden, is dat het verloop van de chlorideconcentratie convergeert en als zodanig is te monitoren. Op basis van de convergerende zoutvracht (Figuur 3.5) is besloten een inspeeltijd van 25 jaar te hanteren. De ingespeelde zoutvracht is zo'n 10% lager dan zonder inspelen het geval zou zijn geweest. De gehanteerde methode heeft wel als nadeel dat de ingespeelde chlorideconcentratie in feite een situatie representeert alsof er een langjarige periode van relatieve meteorologische droogte is opgetreden, waardoor brak grondwater ondieper aanwezig is dan op basis van een langjarig gemiddelde situatie. De uitspoeling van zout die wordt berekend is dan ook naar verwachting hoger dan wanneer was uitgegaan van de werkelijk opgetreden wisselende meteorologische omstandigheden in de 25-jaar periode 1978 - 2003.



Figuur 3.5 Verloop totale zoutvracht (kg/jaar) (links) en verschil in zoutvracht (kg/jaar) (rechts) naar inspeelduur (jaren).

3.4 Onzekerheidsanalyse

3.4.1 Inleiding

De modelberekeningen die in deze rapportage worden beschreven zijn – zoals alle modelberekeningen – inherent onzeker. Immers, de vergelijkingen in een model zijn slechts een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid en daarbij zijn alle invoerparameters niet perfect bekend. Daarnaast is uiteraard ook sprake van onzekerheid in het gehanteerde scenario. Met de hier gepresenteerde onzekerheidsanalyse is een beeld te krijgen van de onzekerheid rondom de modelresultaten als gevolg van belangrijke modelparameters, begincondities en (tot bepaalde hoogte) keuze voor zeespiegelscenario. Andere onzekerheden zoals ten aanzien van de keuze voor het beleidsarme scenario en meteorologie worden niet nader onderzocht. Het onderzochte onzekerheidsbereik rondom de resultaten is relevant voor het vervolg binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Daarbinnen zal de uitvoer van de grondwatermodellering als invoer dienen voor een gevoeligheidsanalyse van het oppervlaktewatersysteem. Een onzekerheidsanalyse die gebruik maakt van landsdekkende berekeningen met de modellen zelf is door de hiermee gepaard gaande lange rekentijd niet realiseerbaar. Er zijn daarom twee parallelle benaderingen gevolgd om de onzekerheid rond de resultaten in beeld te brengen:

- Verdiepende regionale berekeningen, waarbij voor twee uitsneden van het LHM zoet-zout (IJsselmeer en Volkerak-Zoommeer) de invoer van de modelberekeningen (initiële chloridevertdeling en weerstand van de waterbodem) is aangepast en modelberekeningen zijn gemaakt.
- Een landsdekkende Monte Carlo aanpak op LSW niveau, uitgaande van de beschikbare landelijke modelresultaten. Hierbij zijn de onzekerheid rond zoutvracht en de berekende doorspoelwatervraag ‘achteraf’ in beeld gebracht. Onzekerheden die in deze analyse zijn meegenomen zijn de onzekerheid in de initiële chloridevertdeling, in kwelflux, in snelheid van zeespiegelstijging, in gehanteerde parameters in de doorspoelberekening en in inlaatconcentratie.

Dit hoofdstuk bespreekt eerst de invoer voor de regionale berekeningen (onzekerheid in initiële chloridevertdeling en deklaagweerstand). Vervolgens wordt de landsdekkende Monte Carlo analyse rond zoutvracht en doorspoelbehoefte besproken.

3.4.2 Onzekerheid initiële chloridevertdeling

De landsdekkende chloridevertdeling in het grondwater aan het begin van de berekeningen is gemaakt met behulp van geostatistische interpolatie van alle beschikbare meetgegevens van saliniteit van het grondwater (Delsman et al., 2020). Hiervoor is de geostatistische interpolatietechniek Multiple Indicator Kriging (MIK) gebruikt. In MIK worden overschrijdingskansen van meetwaarden voor verschillende grenswaarden successievelijk geïnterpoleerd (bijvoorbeeld de overschrijdingskans van 3 g/L is gegeven een onzekere meting op een punt 0.2). Vervolgens worden deze interpolaties samengevoegd tot een cumulatieve overschrijdingskans van chlorideconcentratie waarde per locatie. Met behulp van deze techniek kan in de interpolatie rekening worden gehouden met verschillende maten van onzekerheid per meting. Dit is belangrijk omdat de gebruikte metingen onderling sterk verschillen in onzekerheid (recente chemische laboratorium analyse van grondwater versus een geofysische VES meting uit de jaren ’60 van de vorige eeuw). Een gedetailleerde beschrijving van de gevolgde procedure is te vinden in (Delsman et al., 2020).

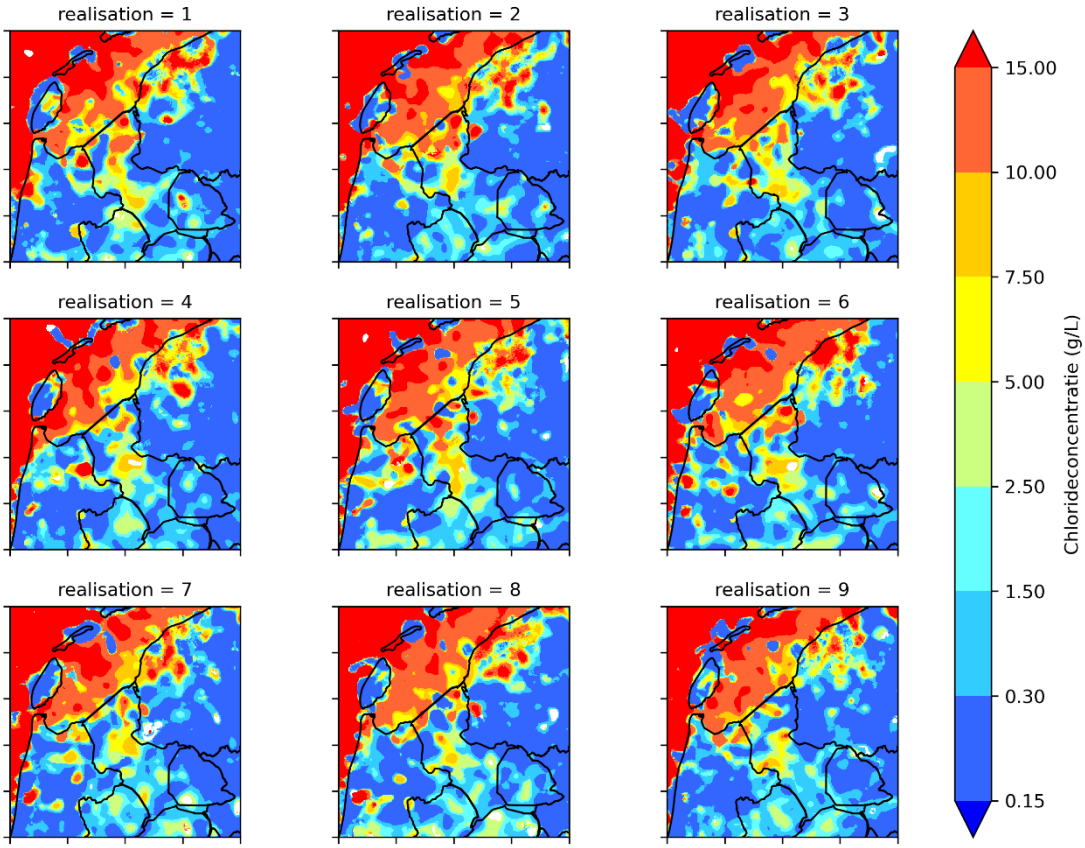
Het resultaat (de 3D interpolatie van chlorideverdeling in het grondwater) geeft per punt de kans op een chlorideconcentratie waarde. Dit bestand kunnen we echter niet direct gebruiken om voor een groter gebied een bepaalde chlorideconcentratie waarde met bijbehorende overschrijdingskans te selecteren. De kansen in de 3D chlorideverdeling gelden namelijk per punt, niet voor een groter gebied. Voor het selecteren van een bepaald percentiel, bijvoorbeeld het 10 percentiel, in de chlorideverdeling voor een groter gebied kan daarmee niet voor alle punten de 10-percentiel chlorideconcentratie worden geselecteerd: de kans dat overal de punt-10-percentiel waarde geldt is immers vele malen kleiner. Aan de andere kant, realisaties maken door per locatie random uit de chlorideverdeling te ‘trekken’ is ook niet goed mogelijk omdat naburige locaties met elkaar gecorreleerd zijn. Immers, wanneer een locatie in werkelijkheid zoeter is dan de mediane interpolatie, zal dit voor een nabijgelegen locatie waarschijnlijk ook gelden. Daarbij worden door menging (advectie en dispersie) in de modelberekening nabijgelegen hoge en lage waarden versmeerd tot een gemiddelde waarde.

Sequential Indicator Simulation is de wetenschappelijke standaardtechniek voor het maken van verschillende intern consistente realisaties van begincondities met een bepaalde overschrijdingskans uit, in dit geval, het 3D chlorideconcentratie bestand. Toepassen hiervan vergt teruggaan naar de oorspronkelijke data, kost veel rekenkracht, en was daarmee om pragmatische redenen niet mogelijk. In plaats daarvan is een pragmatische methode ontwikkeld, waarin een geografische correlatie is opgelegd aan de random trekking uit het 3D chlorideconcentratie bestand. Deze geografische correlatie is gelijk verondersteld aan de geografische correlatie in de oorspronkelijke metingen (gemodelleerde variogram zoals toegepast in de MIK (Delsman et al., 2020)).

De ontwikkelde procedure bestaat uit de volgende stappen, die per realisatie worden uitgevoerd:

1. Trek een uniform random veld ([0 – 1])
2. Convolueer dit uniform random veld met een 3D kernel met de variogramkenmerken volgens Delsman et al. (2020). Variogram parameters: range: 5900 m, nugget: 0.006, sill: 0.048, verticale anisotropie: 120.
3. Het resultaat van de convolutie geeft een ruimtelijk gecorreleerde trekking (percentielen) van de chlorideverdeling, maar tendeert naar het gemiddelde van het uniforme veld. Als volgende stap wordt het resultaat van stap 2 zo getransformeerd (QuantileTransform), dat de percentielverdeling van het uniforme veld weer gelijk is aan het oorspronkelijke uniforme random veld.
4. Met het resultaat uit stap 3 (percentielen op x,y,z locaties) worden chlorideconcentratie waarden getrokken uit de 3D chlorideverdeling.

Op deze manier zijn 100 realisaties gemaakt van een chlorideverdeling, met elk een gelijke kans van voorkomen. Figuur 3.6 geeft als voorbeeld 9 gegenereerde realisaties voor het IJsselmeergebied.

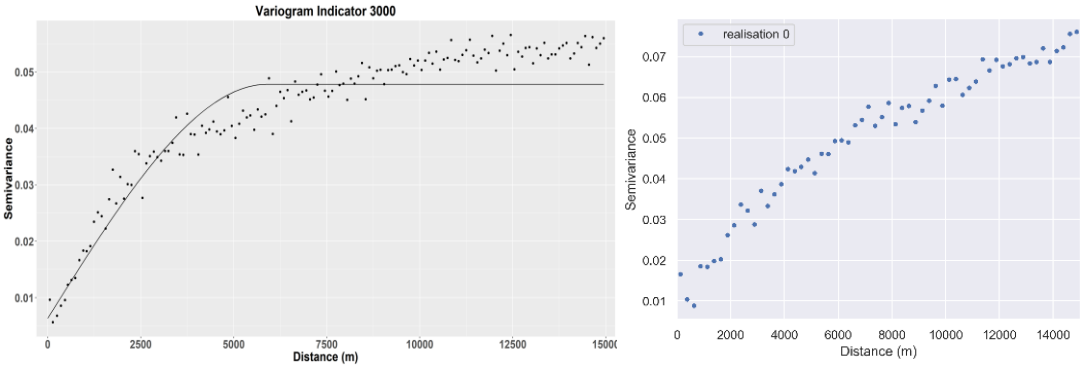


Figuur 3.6 Realisaties chlorideverdeling voor het IJsselmeergebied op -8 m NAP.

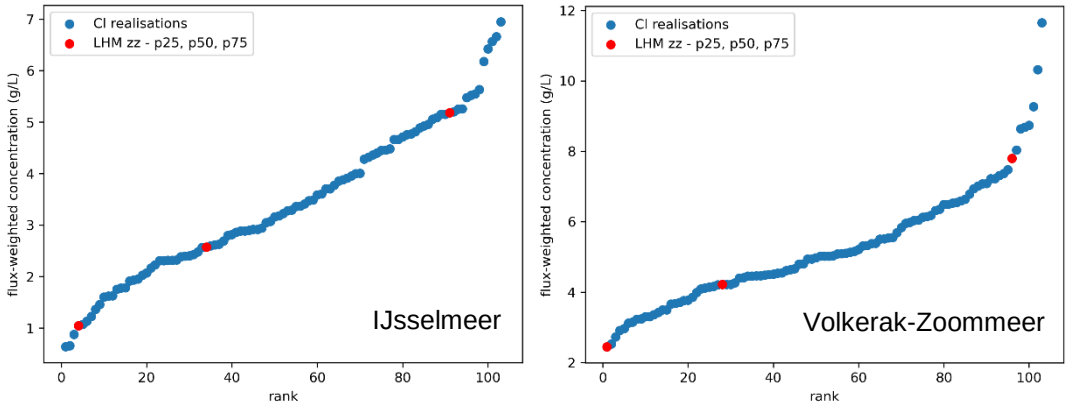
Voor een realisatie is het berekende semivariogram van de 3 g/L indicatorwaarde vergeleken met hetzelfde semivariogram zoals toegepast in de oorspronkelijke 3D chloride-interpolatie. Voor heel Nederland komt de vorm goed overeen, wat vertrouwen geeft in de toegepaste methode (Figuur 3.7). Voor de twee specifieke gebieden zijn er grotere afwijkingen, waarschijnlijk mede omdat de variogramkenmerken in de oorspronkelijke interpolatie voor heel Nederland zijn afgeleid, waar deze zeer waarschijnlijk regionaal zullen verschillen.

Om te duiden wat de overschrijdingskans wat betreft gebiedsgemiddelde zoutvracht is van de 25-, 50- en 75-percentielwaarden van de NHI zoet-zout 3D chlorideverdelingen, zijn de 100 realisaties vervolgens gerangschikt op basis van de kwel-gewogen gemiddelde chlorideconcentratie. Voor het IJsselmeer is dit de kwel-gewogen gemiddelde concentratie onder de deklaag van het IJsselmeer (kwel is min of meer beperkt tot de noordhoek van het IJsselmeer), voor het Volkerak-Zoommeer is dit de gemiddelde concentratie onder de deklaag onder het Volkerak-Zoommeer. Resultaten worden gegeven in Figuur 3.8. In rood zijn in Figuur 3.8 ook de op dezelfde wijze gemiddelde concentraties weergegeven, wanneer voor elke locatie de p25, p50 of p75 van de NHI zoet-zout 3D chlorideverdeling was toegepast. Zoals verwacht zijn de p25 en p75 van de 3D chlorideverdeling gemiddeld over een groter gebied ‘extremer’ dan de 25 en 75 percentiel op basis van de gerealiseerde chloridevelden (de linker en rechter rode puntjes in Figuur 3.8 corresponderen met een lager dan wel hoger percentiel dan respectievelijk p25 en p75). De p50 van de 3D chlorideverdeling (dit percentiel is gebruikt als initiële concentratie LHM zoet-zout) is beduidend ‘zoeter’ dan op basis van de realisaties het geval is (de p50 van de 3D chlorideverdeling correspondeert voor het IJsselmeer met de p35 van de verdeling op basis van de realisaties, voor het Volkerak-Zoommeer met zelfs ongeveer de p25).

Dit heeft waarschijnlijk te maken met de toepassing van een lognormale spreiding rondom de meetwaarden bij de realisatie van de 3D chloridevertdeling (Delsman et al., 2020). Bij een lognormale verdeling komt de p50 ‘zoeter’ uit dan het gemiddelde van de verdeling. Dit betekent voor de geschatte zoutvracht in de berekeningen dat deze in absolute zin wordt onderschat. In een onzekerheidsanalyse wordt hier verder naar gekeken (paragraaf 3.4.4).



Figuur 3.7 Toegepast semivariogram oorspronkelijke interpolatie (links), en semivariogram van chloriderealisatie voor Nederland met hier beschreven methode. Let op dat de y-as in beide figuren verschilt.



Figuur 3.8 Gerangschikte kwel gewogen concentratie onderkant deklaag voor de 100 realisaties van de chlorideconcentratie grondwater voor het IJsselmeer (links) en het Volkerak-Zoommeer (rechts). In rood zijn de percentielen p25, p50 (basis voor de initiële chlorideconcentratie LHM zoet-zout) en p75 van de NHI zoet-zout 3D chloridevertdeling weergegeven.

3.4.3 Onzekerheid geologie

Voor een groot deel van Nederland is voor de ondiepe ondergrond het GeoTOP voxel-databestand beschikbaar, dat de geologische stratigrafie en lithologie per 100 x 100 x 0,5 m^3 voxel beschrijft. De Holocene deklaag schematisatie in het LHM is gebaseerd op dit GeoTOP bestand. GeoTOP is stochastisch opgebouwd met behulp van Sequential Indicator Kriging. Uit 100 realisaties van lithologische opbouw is een cumulatieve kansdichtheidsfunctie van de verschillende lithologie-klassen (veen; klei; kleiig zand; fijn, matig en grof zand; grind) beschikbaar. Elk van de onderliggende realisaties heeft daarbij een gelijke kans van voorkomen.

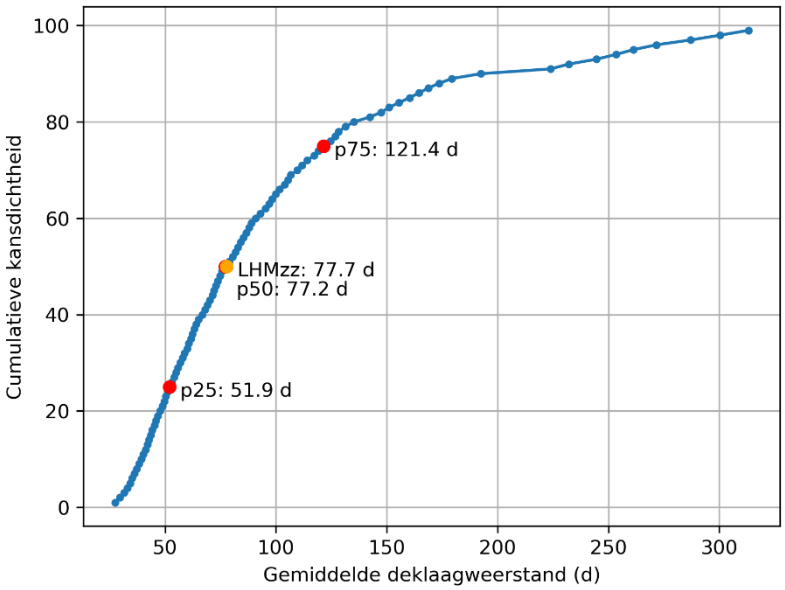
Bij aanvang van deze studie was beoogd de onzekerheid in de geologie voor de directe zoutvracht naar het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer te kwantificeren door verschillende van deze GeoTOP realisaties te gebruiken. Helaas bleek vervolgens dat: 1) de onderliggende realisaties voor het grootste deel van het Volkerak-Zoommeer niet (meer) beschikbaar waren bij TNO en bovendien het Volkerak-Zoommeer is ingesneden in het eerste watervoerende pakket (daarmee is de drainageweerstand van de RIV randvoorwaarde dominant in plaats van de deklaagweerstand), en 2) voor de deklaagweerstand onder het IJsselmeer een afwijkende methode is gebruikt om de weerstand te karakteriseren (Gunnink, 2019). In deze laatste methode is de gehele cumulatieve kansdichtheidsfunctie per voxel gebruikt om een weerstand af te leiden, in plaats van een enkele mediane lithologieklasse per voxel. De kans op een lithologieklasse per voxel is daarbij verondersteld representatief te zijn voor de verdeling binnen een voxel (dus 10% kans op klei is gehanteerd als: 10% van de dikte van de voxel is klei). De realisaties zijn zodoende niet langer eenvoudig onafhankelijk te gebruiken om een weerstand af te leiden.

Voor het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer zijn daarom twee verschillende methoden toegepast.

3.4.3.1 Deklaagweerstand IJsselmeer

GeoTOP realisaties zijn beschikbaar voor het grootste deel van het interessegebied rondom de Afsluitdijk. De volgende stappen zijn gevolgd:

1. Per GeoTOP realisatie is de weerstand bepaald aan de hand van de lithologieklasse per voxel in die realisatie. Hierbij is gebruik gemaakt van de lithologie – weerstand relaties die zijn toegepast voor de LHM schematisatie (Gunnink, 2019), alleen zijn deze niet, zoals in Gunnink (2019), toegepast op de cumulatieve kansverdeling van lithologieklassen, maar op de enkele lithologieklasse per voxel van de realisatie.
2. De onder 1) gerealiseerde weerstanden zijn stelselmatig lager dan de weerstand van Gunnink (2019). Dit komt doordat er in Gunnink (2019) op elke locatie wel een (kleine) kans op klei of veen is, die zich vertaalt in een hogere weerstand. De berekende weerstandsrealisaties zijn daarom op een pragmatische manier lineair geschaald, zodat de mediane weerstand per locatie uit de realisaties overeenkomt met de weerstand zoals berekend door Gunnink (2019).
3. Per locatie is de percentielverdeling van de zo berekende weerstanden bepaald. De in de gevoeligheidsberekeningen verder gehanteerde ’x-percentiel-weerstand’ is daarmee voor elke locatie de x-percentiel weerstand, in plaats van een individuele realisatie, en daarmee eenvoudiger te interpreteren (zie ook 3.5.4).



Figuur 3.9 Cumulatieve kansdichtheid van de gemiddelde deklaagweerstand (d) in het kwellende gebied in het IJsselmeer, met als rode stippen de 25-, 50- en 75-percentielwaarden weergegeven. De oranje stip is de gemiddelde deklaagweerstand (d) in het kwellende gebied in het IJsselmeer zoals die nu is opgenomen in het LHM.

In Figuur 3.9 is de gemiddelde weerstand in het kwellende gebied in het IJsselmeer per percentiel weergegeven, inclusief de in de LHM zoet-zout 4.1 gehanteerde weerstand (Figuur 3.9). De mediane waarde uit de percentielverdeling komt zoals verwacht goed overeen met de LHM zoet-zoutwaarde, omdat de waarde op basis hiervan zijn geschaald. In het algemeen is de bandbreedte van de weerstand klein te noemen. Dit komt door de beperkte dikte van de weerstandslaag, en de geringe variatie in lithologie die in boringen is aangetroffen.

3.4.3.2 Weerstand Volkerak-Zoommeer

In tegenstelling tot het IJsselmeer is het Volkerak-Zoommeer geschematiseerd als een randvoorwaarde in het tweede watervoerende pakket. De holocene deklaagweerstand speelt – anders dan voor het IJsselmeer – voor het Volkerak-Zoommeer geen rol (deze wordt namelijk volledig doorsneden). Alle geschematiseerde weerstand tussen het grondwater en het meer voor het Volkerak-Zoommeer bevindt zich in de drainage- / infiltratieweerstand van het Volkerak-Zoommeer. De drainageweerstand in het Volkerak-Zoommeer is in het LHM een vaste waarde van 14 dagen, de infiltratieweerstand is 140 dagen. De drainageweerstand is een expertwaarde, die in versie 4.1 gekalibreerd is naar 14 dagen (was 10 dagen in LHM versie 4.0) (Janssen et al., 2020).

De 14 dagen drainageweerstand komt goed overeen met de 15 dagen zoals gehanteerd in Oude Essink et al. (2008), waarin wel wordt vermeld dat de gehanteerde weerstand van 15 dagen waarschijnlijk aan de lage kant is, gegeven de aanwezige sliblagen en de in situ gemeten verticale doorlatendheid van 0,4 m/d (Oude Essink et al., 2008). In Oude Essink et al. (2018) wordt overigens geen onderscheid gemaakt in drainage- dan wel infiltratieweerstand.

Anders dan voor het IJsselmeer zijn voor het Volkerak-Zoommeer geen lithologische realisaties beschikbaar vanuit GeoTOP. Ook is er geen directe relatie tussen deze lithologie en de opgelegde drainageweerstand, het betreft immers een gekalibreerde expert-waarde. Er is daarom in overleg met de opdrachtgever voor gekozen de waarde voor de drainageweerstand van het Volkerak-Zoommeer in de gevoeligheidsanalyse te variëren tussen 0.1 en 10 maal de huidige drainageweerstand. De gekozen vermenigvuldigingsfactoren zijn voor hydraulische weerstanden in grondwater gevoeligheidsanalyses gebruikelijk, weerstanden verschillen namelijk snel een orde van grootte. De hier gehanteerde vermenigvuldigingsfactoren omspannen daarmee de realistisch geachte variatie van de drainageweerstand.

3.4.4 Monte Carlo analyse onzekerheid in zoutvracht en doorspoelwatervraag

Voor een landelijke onzekerheidsanalyse zijn de belangrijkste onzekerheidsbronnen geïdentificeerd. Er is sprake van onzekerheid in alle stappen, van geohydrologische parameters, grondwater-chlorideconcentratie en scenario-aannamen, vervolgens in de grondwatermodelberekening, de zoutvrachtberekening en – uiteindelijk – in de berekening van de doorspoelbehoefte.

De volgende belangrijkste onzekerheidsbronnen zijn geïdentificeerd:

- 3D chlorideverdeling. Onzekerheid hierin is gekwantificeerd, zie paragraaf 3.4.2.
- Geohydrologische parameters en daaruit volgend de berekening van kwel / infiltratie. Hier is geen kwantificering van beschikbaar. In de validatie van LHM (Van der Vliet, 2021) zijn geen kwantitatieve uitspraken gedaan over afwijkingen in de hoeveelheid kwel. In de meest recente kalibratie van het LHM (Janssen et al., 2020) is de weerstand van de eerste scheidende laag – bepalend voor de kwelhoeveelheid – slechts beperkt aangepast, en geeft daarmee ook geen aanwijzing voor onzekerheid in de kwel. Gebaseerd op expert-inschatting is de afwijking in de kwel- / infiltratieflux daarom gekarakteriseerd als een normaal-verdeelde relatieve afwijking met een gemiddelde afwijking van 0% en een standaarddeviatie van 10%.
- Snelheid van zeespiegelstijging. De snelheid van zeespiegelstijging is een scenario-aanname, waarbij is uitgegaan van het ‘gematigde’ scenario (paragraaf 2.3.1). Door de relatief langzame zeespiegelstijging in dit scenario zal de chlorideconcentratie in het grondwater zich bij eenzelfde zeespiegelstand meer tijd hebben gehad om zich aan te passen aan de veranderde condities dan bij een snellere zeespiegelstijging. Gemiddeld genomen zal de kwelconcentratie dan zouter zijn dan bij snellere zeespiegelstijging, en de zoutvracht daarmee hoger. Om de bandbreedte van dit effect van de onzekerheid in de snelheid van zeespiegelstijging in te schatten is de berekende kwel op de zeespiegel-zichtwaarden gecombineerd met de chlorideconcentratie van een zichtwaarde eerder[2]. De op deze manier benaderde zeespiegelcurve blijkt redelijk te vergelijken met een zeespiegelstijging volgens het extreme scenario (RCP 8.5, waarin 3 m zeespiegelstijging optreedt in 2200).
- Onzekerheid in de parameter ‘minimum concentratieverschil’ meegenomen. Deze parameter bepaalt tot welk concentratieverschil tussen de streefconcentratie in de polder en de concentratie van het inlaatwater moet worden doorgespoeld. Deze parameter is uniform gevarieerd tussen 25 mg/L en 75 mg/L.
- Onzekerheid in de berekende concentratie van het inlaatwater. Deze concentratie bepaalt mede de benodigde hoeveelheid doorspoeling. Doordat deze waarde wordt beïnvloed door bovenstroomse veranderingen, is deze parameter niet met zekerheid vooraf vast te stellen. Aan deze parameter is een normaal verdeelde variatie (gemiddeld 0%, standaarddeviatie 10%) rondom de uitgangswaarde toegekend.

[2] In deze aanpak is ook de 2 m zichtwaarde meegenomen, dus 3 m is gecombineerd met de chlorideconcentratie van 2 m (2205), niet met die van 1 m.

- Onzekerheid in de voor de doorspoelberekeningen gebruikte waterbalans en het gehanteerde representatieve jaar 2003. Deze onzekerheid is niet gekwantificeerd.
- Onzekerheid in de gebruikte modellen LHM zoet-zout en LHM. Deze onzekerheden zijn niet gekwantificeerd in de Monte Carlo analyse, maar worden kwalitatief beschouwd in paragraaf 6.2.

De onzekerheid in de eerste vijf geïdentificeerde bronnen is met een Monte Carlo analyse uitgewerkt tot een kwantificering van onzekerheid in zoutvracht en doorspoelbehoefte. In een eerste Monte Carlo analyse is de (normaal-verdeelde) onzekerheid in de kwel- / infiltratieflux gecombineerd met de onzekerheid in de initiële 3D chlorideverdeling (de 100 realisaties uit paragraaf 3.4.2), om te komen tot een onzekerheid in de zoutvracht naar het oppervlaktewater. Deze analyse is op modelcel-niveau (250x250 m^2) uitgevoerd. Er is gebruik gemaakt van Latin Hypercube Sampling om de random trekkingen zo goed mogelijk te spreiden over het bereik van de twee betrokken grootheden. De bestaande wisselwerking tussen zoutconcentratie en kwelflux door dichtheidsverschillen is hierbij niet meegenomen.

Vervolgens is een stapsgewijze Monte Carlo analyse uitgevoerd op polder (LSW)-niveau. Hierin zijn achtereenvolgens zoutvracht, ‘minimaal concentratieverschil’, snelheid van zeespiegelstijging en inlaatconcentratie gecombineerd in een Monte Carlo analyse. Met de getrokken waarden voor alle parameters is vervolgens de doorspoelbehoefte berekend volgens paragraaf 3.2.2. Ook in deze analyse is gebruik gemaakt van Latin Hypercube Sampling.

3.5 Regionale analyses – IJsselmeer

De uitgevoerde regionale analyses voor het IJsselmeergebied zijn erop gericht de zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer te kwantificeren en daarbij meer inzicht te krijgen in een aantal factoren die de zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer bepalen. De onzekerheid van de zoutvracht naar het IJsselmeer als gevolg van onzekerheden in de initiële chlorideconcentratie en de deklaagweerstand zijn onderzocht in een gevoeligheidsanalyse. Daarnaast zijn de invloed van de getijdecyclus in de Waddenzee en van het waterstandsverloop in het IJsselmeer op de zoutvracht naar het IJsselmeer onderzocht.

3.5.1 Uitsnede LHM zoet-zout

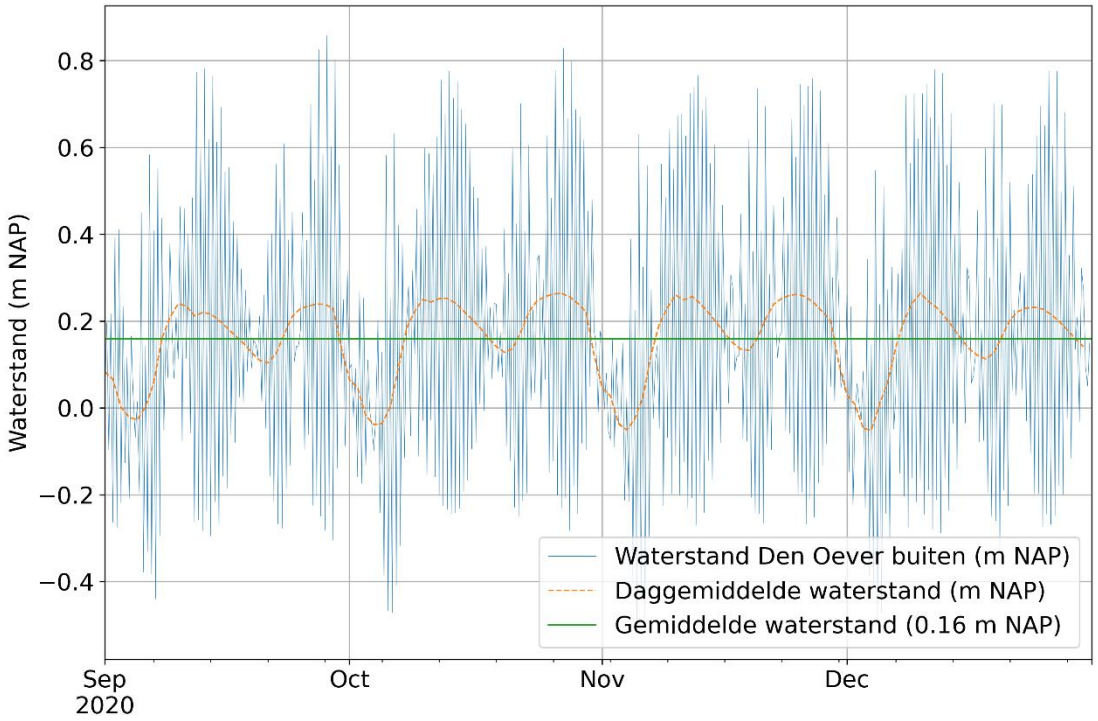
Voor de uitsnede van het IJsselmeer uit LHM zoet-zout is gekeken naar het gebied in en rondom het IJsselmeer waar een verandering van de stijghoogte optreedt als gevolg van de opgelegde zeespiegelstijging in het landelijke model. Het gekozen modeldomein is weergeven in Figuur 3.10. Aan de randen van de uitsnede zijn het landelijk berekende verloop in stijghoogten en concentraties opgelegd, om randeffecten te minimaliseren. Hiervoor is de berekening gebruikt met zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome ontwikkelingen. Alle randvoorwaarden zijn verder gelijk aan het LHM zoet-zout, uiteraard uitgezonderd de per scenario gemaakte aanpassingen.

Figuur 3.10 Modelrand van het IJsselmeer-deelmodel. Op de zwarte modelrand is het verloop van de stijghoogte en van de chlorideconcentratie in het grondwater overgenomen uit volledige LHM zoet-zout.

Voor de analyses rond de getijdegang in de Waddenzee en het verloop van het waterpeil in het IJsselmeer in een extreme zomer is als uitgangssituatie de huidige situatie (2020) gebruikt. De gevoeligheidsberekeningen beslaan de hele modelperiode en starten net als het uitgangsmodel in het jaar 2000.

3.5.2 Getijdecyclus Waddenzee

Om de getijdegang in de Waddenzee te modelleren is gebruik gemaakt van de gemeten waterstanden bij Den Oever - buiten in 2015. De beschikbare data bevat de waterstand buiten Den Oever - buiten per 10 minuten (Figuur 3.11). Per etmaal wordt het 2 keer eb en 2 keer vloed. De dataset is omwille van rekentijd geresampled naar de gemiddelde waterstand per 6 uur, de dominante frequentie van de getijcyclus. Het model wordt voor een heel jaar met tijdstappen van 6 uur doorgerekend voor de huidige situatie (jaar 2020). De gemeten waterstand is opgelegd in de Waddenzee-randvoorwaarde in het model (GHB randvoorwaarde). Door de kleine en steeds variërende tijdstap is voor deze berekening ook het kwantiteitsdeel van de modelberekening transient doorgerekend, de specifieke elastische bergingscoëfficient van de lagen onder de deklaag is ingesteld op $1 \cdot 10^{-5}$ m^{-1}. De berekening heeft hierdoor een inspeeltijd nodig, resultaten zijn geanalyseerd vanaf 1 september.



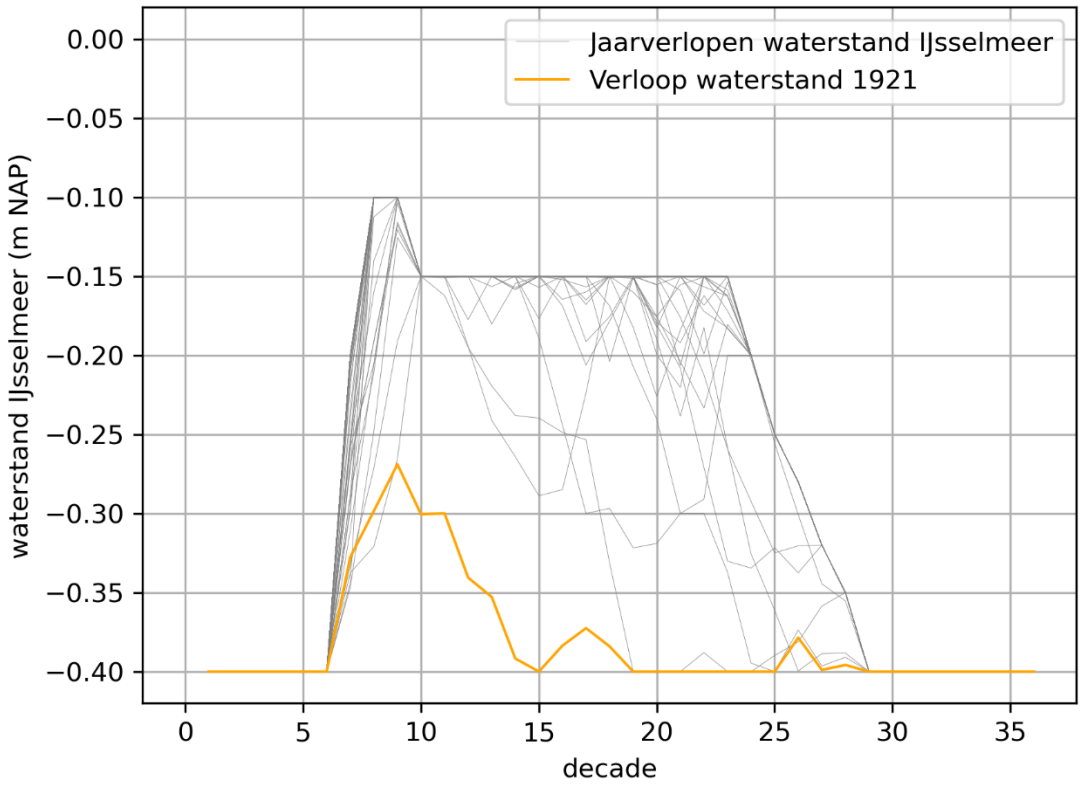
Figuur 3.11 In model geïmplementeerde waterstand van de Waddenzee (blauwe lijn), op basis van meetreeks meetpunt Den Oever - buiten in september tot en met december 2015 (bron: waterinfo.nl). Ter informatie zijn ook de daggemiddelde waterstand en de gemiddelde waterstand weergegeven.

3.5.3 Waterstandsverloop IJsselmeer

De waterstand in het IJsselmeer fluctueert doorgaans tussen de -0.40 m NAP in de winter en de -0.20 m NAP in de zomer. Het Peilbesluit van het IJsselmeergebied is recent herzien (Rijkswaterstaat, 2018). Sinds dit nieuwe peilbesluit geldt in de zomerperiode een flexibel peilbeheer, waarbij het peil kan variëren tussen -0.10 en -0.30 m NAP, waarbij het waterpeil van het voorjaar tot het najaar geleidelijk uitzakt. Er wordt een peilverloop beoogd in het IJsselmeer dat een vroege opzet kent in maart, waarbij de piek van -0.10 m NAP wordt aangehouden tussen 16 en 31 maart. Vervolgens is het meerpeil gemiddeld -0.20 m NAP vanaf half april tot half augustus, waarna het uitzakt tot -0.30 m NAP. In oktober zakt het peil vervolgens naar -0.40 m NAP (Rijkswaterstaat, 2018).

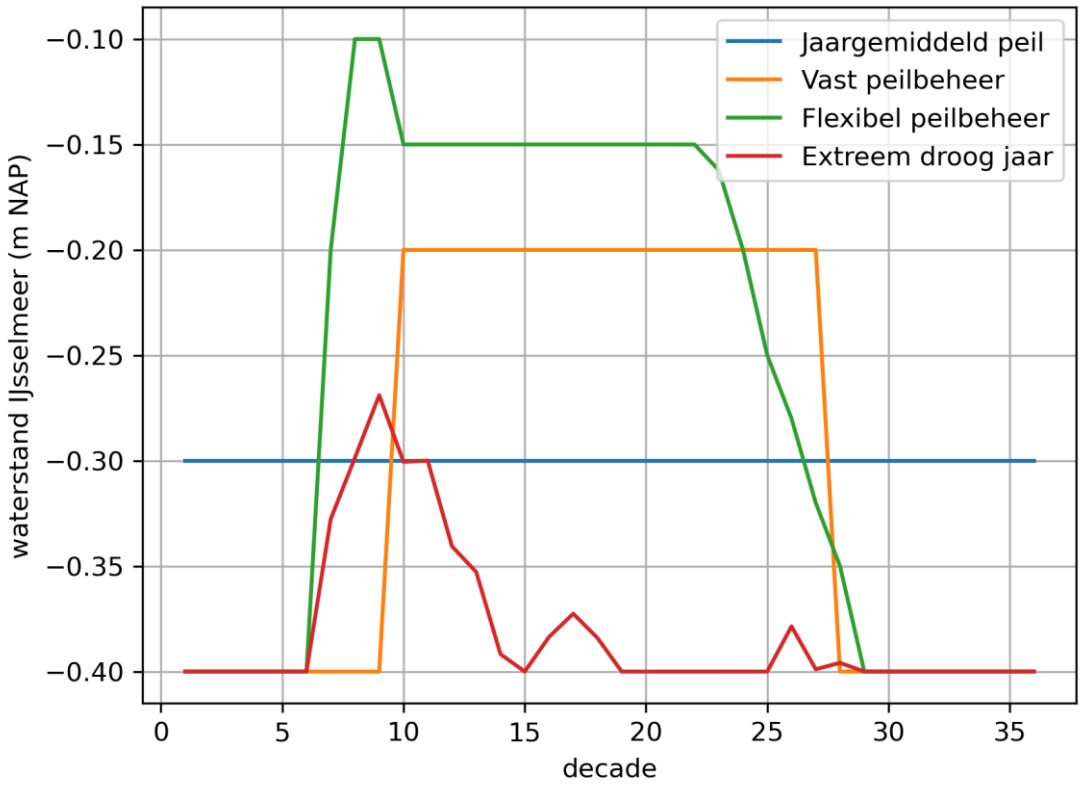
Dit peilverloop is in het kader van de ‘Stresstest voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II’ (Pouwels et al., 2021) geschematiseerd in het Distributiemodel van het LHM. In berekeningen voor de stresstest is voor een langjarige reeks uitgerekend hoe het meerpeil in verschillende zomers uitzakt, als rekening wordt gehouden met a) minder aanvoer over de IJssel als gevolg van bodemerosie in de Rijntakken, b) extra regionale watervraag als gevolg van het nathouden van veenweidegebieden, c) extra doorspoelwatervraag over de Afsluitdijk, en d) kortere voorspelhorizon, waardoor opzet tot -0.10 m NAP niet altijd mogelijk is. Om deze kortere voorspelhorizon te modelleren wordt in het Distributiemodel gedurende de zomer door middel van een meerpeil van -0.15 m NAP een extra buffer aangehouden.

In de onderstaande afbeelding is het berekende meerpeil voor de weerjaren tussen 1911 en 2011 per week opgenomen, voor de resultaten voor Deltascenario Stoom2050. In weerjaar 1921 was het extreem droog en kwam het peil niet boven de -0.25 m NAP (Pouwels et al., 2021). Het berekende extreme meerpeilverloop van 1921 is met tijdstappen van 2 weken opgelegd op het ingespeelde referentiemodel voor zichthorizon 1 m zeespiegelstijging. De uitsnede is ook doorgerekend met de gemiddelde tweeweekse peilvariatie op het IJsselmeer. Hiermee kan het verschil in zoutvracht worden bepaald tussen een jaar met een normaal peilverloop en een extreem droog jaar. Als kanttekening geldt hierbij dat dit het gemiddelde 'modelpeilverloop' betreft, waarin de zomerperiode een hoger meerpeil (-0.15 m NAP) kent dan beschreven in het peilbesluit (-0.20 m NAP).



Figuur 3.12 Berekend waterstandsverloop van het IJsselmeer voor de jaren 1911 – 2011 in de stresstest DPZW (Pouwels et al., 2021). De oranje lijn geeft het waterstandsverloop in het extreem droge jaar 1921 weer.

Om het effect van het waterstandsverloop in een extreem droog jaar op de zoutvracht naar het IJsselmeer te onderzoeken, zijn verschillende modelberekeningen gedaan voor de huidige situatie (jaar 2020). In deze berekeningen is elk een verschillend waterstandsverloop geïmplementeerd: een jaargemiddeld peil zoals gehanteerd in de langjarige berekeningen, het vaste zomer- en winterpeil, het flexibel peilbeheer en het berekende waterstandsverloop voor het extreem droge jaar 1921 (Figuur 3.13). Daarbij is de waterstand steeds in tiendaagse stappen geïmplementeerd in de IJsselmeer-randvoorwaarde (RIV randvoorwaarde).



Figuur 3.13 Geïmplementeerde waterstandsverlopen op het IJsselmeer.

3.5.4 Gevoeligheidsanalyse directe zoutvracht

De directe (via de waterbodem) zoutvracht naar het IJsselmeer vanuit het grondwater is sterk afhankelijk van de doorlatendheid van de bodem (deklaagweerstand) en de chlorideconcentratie van het grondwater. Om inzicht te krijgen in de onzekerheidsmarge rond de zoutvracht naar het IJsselmeer is de IJsselmeer uitsnede doorgerekend met verschillende combinaties van deklaagweerstand en initiële chlorideconcentratie, voor de gehele modelperiode. In de berekende directe zoutvracht naar het IJsselmeer maken we geen onderscheid in zogenaamde ‘dijkse kwel’ en langere stroombanen. Dit omdat het een arbitrair onderscheid betreft, dat gegeven de modelresolutie ook nog eens lastig te maken is.

Paragrafen 3.4.2 en 3.4.3.1 beschrijven respectievelijk de totstandkoming van de onderliggende kansverdelingen van de initiële chlorideconcentratie en deklaagweerstand. Hierbij is de keuze gemaakt om de gevoeligheidsberekeningen niet te baseren op de gemaakte realisaties van chlorideconcentratie en deklaagweerstand, maar op respectievelijk het NHI zoet-zout 3D chlorideconcentratie bestand en de percentielverdeling over de deklaagweerstand-realisaties. De ruimtelijk consistente lage, dan wel hoge waarde voor chlorideconcentratie en deklaagweerstand maakt de interpretatie van de resultaten beduidend eenvoudiger.

De volgende combinaties zijn doorgerekend:

- 25-percentiel initiële chlorideconcentratie en 25-percentiel deklaagweerstand (relatief zoet en doorlatend),
- 25-percentiel initiële chlorideconcentratie en 75-percentiel deklaagweerstand (relatief zoet en minder doorlatend),
- 75-percentiel initiële chlorideconcentratie en 25-percentiel deklaagweerstand (relatief zout en doorlatend),
- 75-percentiel initiële chlorideconcentratie en 75-percentiel deklaagweerstand (relatief zout en minder doorlatend).

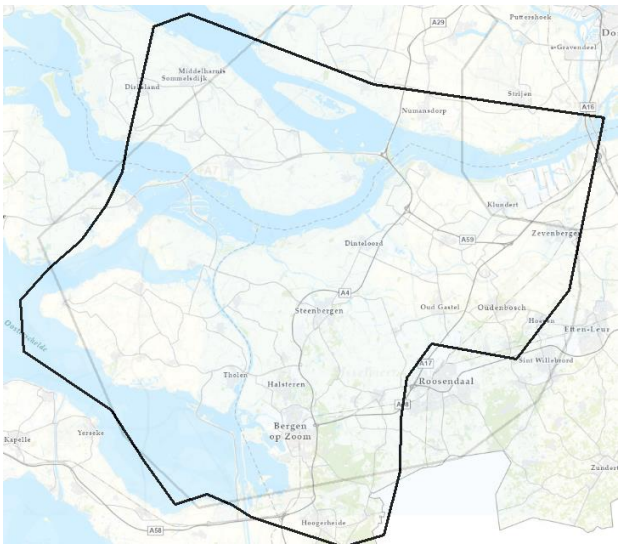
De gevoeligheidsberekeningen zijn uitgevoerd voor de gehele modelperiode (jaar 2000 – 2277). De chlorideverdeling is toegepast in het gehele modeldomein, de deklaagweerstand van het IJsselmeer alleen in het IJsselmeer.

3.6 Regionale analyses – Volkerak-Zoommeer

De uitgevoerde regionale analyses voor het Volkerak-Zoommeer zijn erop gericht zowel de directe (via de waterbodem) als de indirecte (via het afwaterende gebied) zoutvracht vanuit het grondwater naar het Volkerak-Zoommeer te kwantificeren, en daarbij inzicht te geven in de onzekerheid rondom de berekende zoutvracht.

3.6.1 Uitsnede LHM zoet-zout

De uitsnede uit het LHM zoet-zout model voor het Volkerak-Zoommeer omvat het Volkerak-Zoommeer zelf en het op het Volkerak-Zoommeer afwaterende gebied plus een buffer. Het modeldomein dat hierdoor ontstaat is weergeven in Figuur 3.14. Op de modelranden zijn het stijghoogte en concentratieverloop uit de langjarige LHM zoet-zout berekening opgelegd, om randeffecten te minimaliseren.



Figuur 3.14 Modelrand van het Volkerak-Zoommeer-deelmodel. Op de zwarte modelrand is het verloop van de stijghoogte en van de chlorideconcentratie in het grondwater overgenomen uit volledige LHM zoet-zout.

3.6.2 Gevoeligheidsanalyse directe en indirecte zoutvracht

De zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer vanuit het grondwater is sterk afhankelijk van de doorlatendheid van de bodem van het meer en de chlorideconcentratie van het grondwater. Om inzicht te krijgen in de onzekerheidsmarge rond de zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer is de Volkerak-Zoommeer uitsnede doorgerekend met verschillende combinaties van bodemweerstand en chlorideconcentratie, voor de gehele modelperiode.

Paragrafen 3.4.2 en 3.4.3.2 beschrijven respectievelijk de totstandkoming van de onderliggende kansverdeling van de chlorideconcentratie en pragmatische aanpak van de bodemweerstand voor het Volkerak-Zoommeer. De volgende combinaties zijn doorgerekend:

- 25-percentiel initiële chlorideconcentratie en 10 * bodemweerstand (relatief zoet en minder doorlatend),
- 25-percentiel initiële chlorideconcentratie en 0.1 * bodemweerstand (relatief zoet en doorlatend),
- 75-percentiel initiële chlorideconcentratie en 10 * bodemweerstand (relatief zout en minder doorlatend),
- 75-percentiel initiële chlorideconcentratie en 0.1 * bodemweerstand (relatief zout en doorlatend).

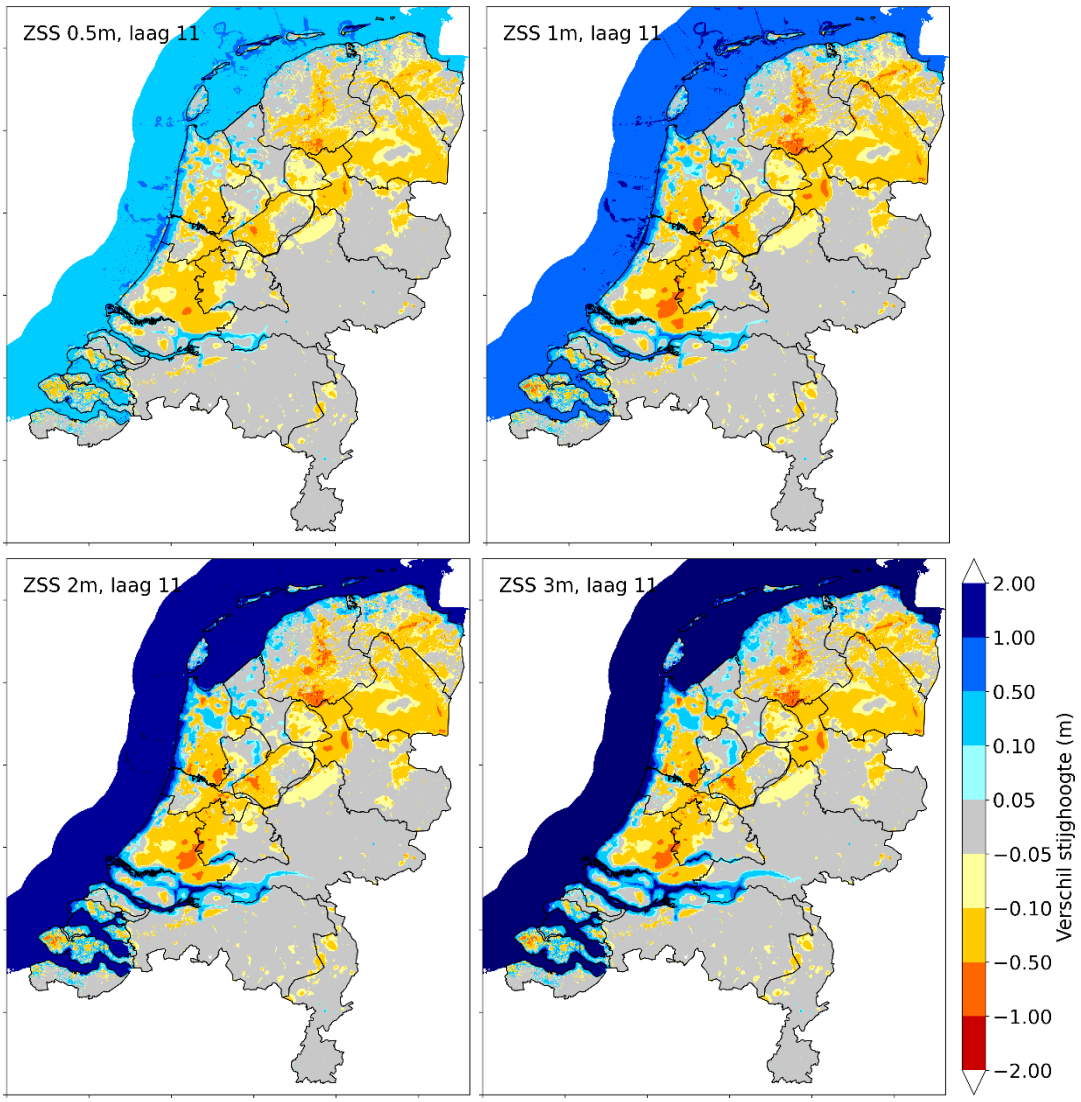
Voor het Volkerak-Zoommeer is gekeken naar zowel de directe zoutvracht (zout grondwater dat opkwelt in het Volkerak-Zoommeer) als de indirecte zoutvracht op het Volkerak-Zoommeer (zoutvracht vanuit afwaterend gebied). Door de gekozen aanpak varieert voor het afwaterende gebied in de berekeningen wel de initiële chlorideconcentratie, maar niet de weerstand van de ondergrond.

4 Landelijke resultaten

4.1 Langjarige ontwikkeling verzilting grondwatersysteem – LHM zoet-zout

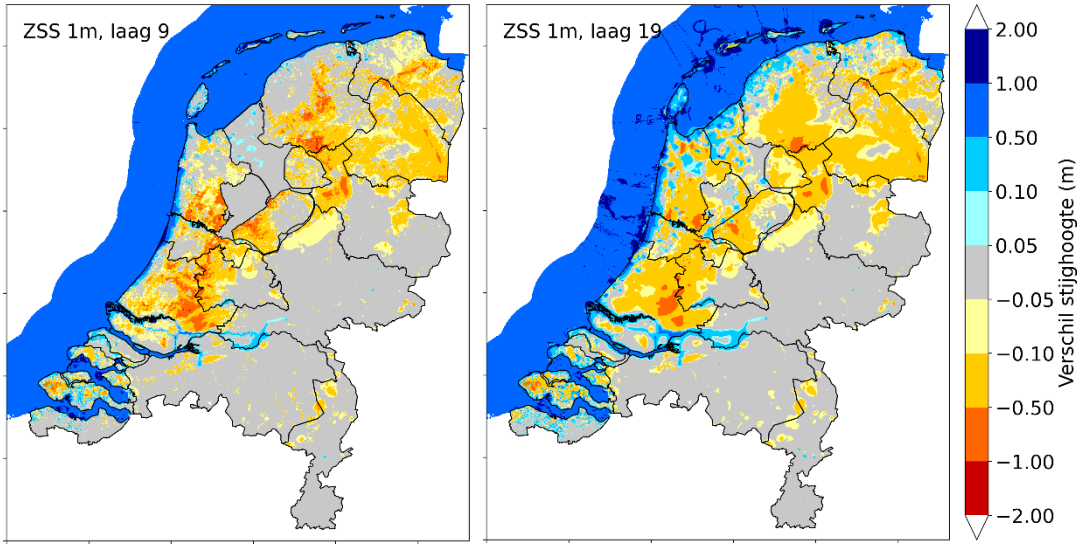
4.1.1 Stijghoogte

De verandering van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket onder invloed van het scenario wordt gegeven in Figuur 4.1. De stijghoogte in kustgebied en rivierengebied wordt merkbaar en relatief recht evenredig beïnvloed door de zeespiegelstijging langs de kust en de meestijgende oppervlaktewateren. Wat betreft ruimtelijke uitgestrektheid heeft de optredende bodemdaling echter een grotere invloed. Deze heeft in een groot deel van laag Nederland een daling van de absolute stijghoogte (ten opzichte van NAP) van 10 tot meer dan 50 cm tot gevolg. De invloed van bodemdaling stopt na 2100, wanneer in het scenario het oppervlaktewaterpeil niet langer geïndexeerd wordt. De stijging van de stijghoogte langs de kust blijft evenwel toenemen.



Figuur 4.1 Verschil stijghoogte (point water head, zie paragraaf 1.5) in laag 11 (top eerste watervoerende pakket) ten opzichte van huidige situatie voor zichtwaarden 0.5 m (linksboven), 1 m (rechtsboven), 2 m (linksonder) en 3 m (rechtsonder) zeespiegelstijging.

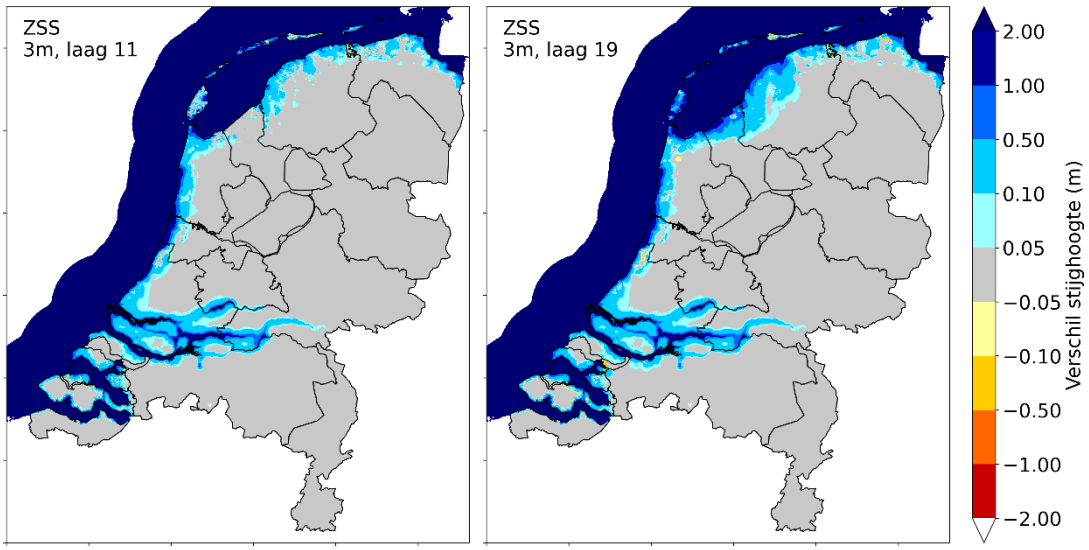
Figuur 4.2 toont de verandering van de stationaire freatische grondwaterstand en de stijghoogte in het tweede watervoerende pakket bij zichtwaarde 1 m. In het freatische grondwater is het effect van de zeespiegelstijging met toenemende afstand van de kust snel uitgewerkt, met uitzondering van de duingebieden. In de duingebieden kan de grondwaterstand zich vrijer instellen dan in het sterk ontwaterde binnenlandse gebied. De invloed van bodemdaling doet zich in het freatische grondwater juist sterker gelden dan in het eerste watervoerende pakket. Door bodemdaling is er daarom in absolute zin sprake van een daling van de stijghoogte, maar in relatieve zin (ten opzichte van de freatische grondwaterstand) juist van een verhoging van de stijghoogte. In het tweede watervoerende pakket is de invloed van bodemdaling nog gedempter zichtbaar dan in het eerste watervoerende pakket.



Figuur 4.2 Verschil stijghoogte (point water head, zie paragraaf 1.5) in laag 9 (freatisch grondwater, links) en laag 19 (tweede watervoerend pakket) ten opzichte van huidige situatie voor zichtwaarde 1 m zeespiegelstijging. Verschil stijghoogte voor laag 11 (eerste watervoerende pakket) is getoond in Figuur 4.1, rechtsboven.

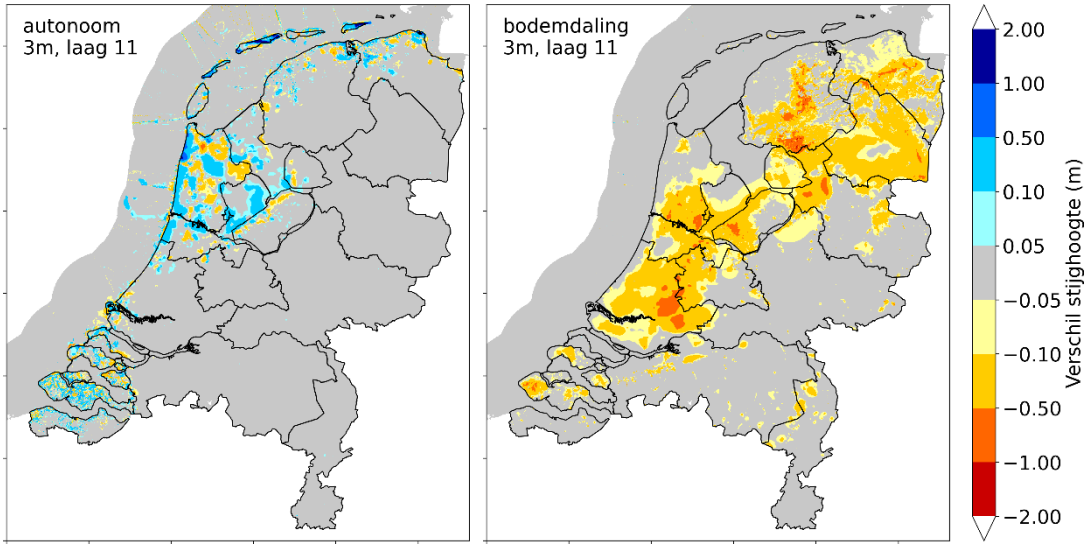
Het effect van alleen zeespiegelstijging op de druk in het grondwater is voor zichtwaarde 3 m geïsoleerd[3] weergegeven in Figuur 4.3. De invloed blijkt zich in het eerste watervoerende pakket te beperken tot zo'n 10 km van de kustlijn (en vanaf meestijgende rivieren). Deze zogeheten invloedssfeer varieert door Nederland, afhankelijk van geohydrologische kenmerken (Oude Essink, 2007). Hoe hoger de bovenliggende, afsluitende, weerstand, en hoe hoger de doorlatendheid van het watervoerende pakket, hoe verder landinwaarts de druk in het watervoerende pakket zal toenemen. Waar in Zeeland de invloedssfeer beperkt is door een dun watervoerend pakket, is het effect van zeespiegelstijging in Noord- en Zuid-Holland, en met name ook in Friesland verder landinwaarts merkbaar. De invloedssfeer reikt – zeker in Friesland – in diepere pakketten verder landinwaarts dan ondieper.

[3] Voor de getoonde geïsoleerde effecten van zeespiegelstijging en bodemdaling zijn resultaten van respectievelijk de berekening met alleen bodemdaling en autonome processen, en de berekening met alleen autonome processen van de berekening met zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome processen en de berekening met bodemdaling en autonome processen afgetrokken. Door de koppeling tussen stroming, zouttransport en dichtheid zijn deze effecten echter niet lineair optelbaar en maken we dus een kleine fout door dit wel als zodanig aan te nemen.



Figuur 4.3 Verschil stijghoogte (point water head, zie paragraaf 1.5) in laag 11 (eerste watervoerende pakket, links) en laag 19 (tweede watervoerend pakket, rechts) ten gevolge van alleen zeespiegelstijging voor zichtwaarde 3 m zeespiegelstijging (berekening met zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome processen minus de berekening met bodemdaling en autonome processen).

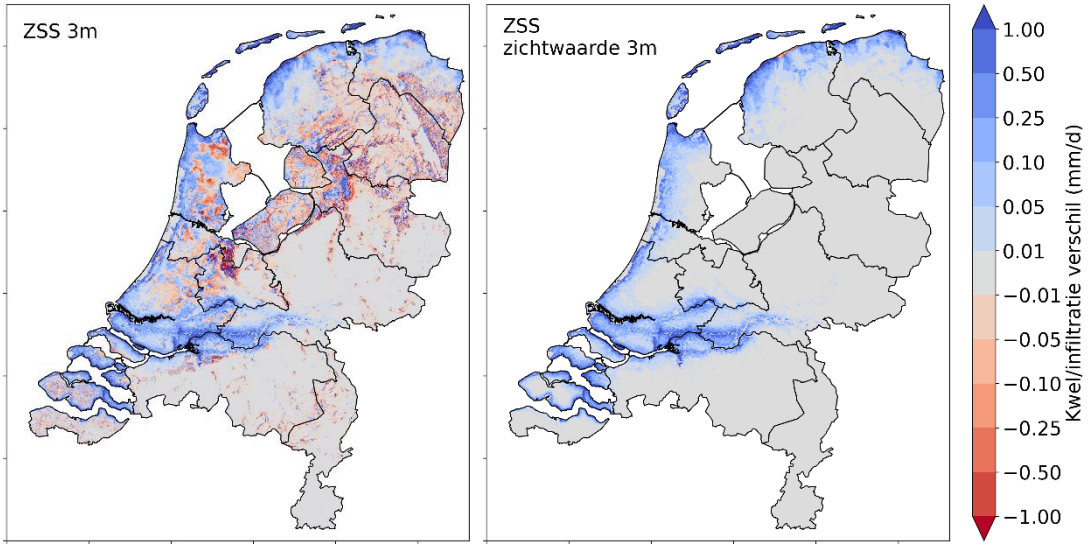
De geïsoleerde effecten van autonome processen en bodemdaling[3] op de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket zijn voor zichtwaarde 3 m weergegeven in Figuur 4.4. De voortgaande aanpassing van de zoet-zoutverdeling in het grondwater aan de geldende omstandigheden (randvoorwaarden) geeft een heterogeen beeld van zowel verlaging als verhoging van de stijghoogte, al naar gelang het grondwater respectievelijk verzilt dan wel verzoet. Bodemdaling geeft een brede verlaging van de stijghoogte in het gebied waar sprake is van bodemdaling. Deze daling is het gevolg van een met name peilindexatie-gedreven daling van de (absolute) grondwaterstand; effecten op kwel zijn heterogener en weerspiegelen de relatieve verschillen tussen grondwaterstand en stijghoogte (zie ook Figuur 4.5).



Figuur 4.4 Verschil stijghoogte (point water head, zie paragraaf 1.5) in laag 11 (eerste watervoerende pakket) ten gevolge van alleen autonome processen (links) en alleen bodemdaling[3] (rechts) voor zichtwaarde 3 m zeespiegelstijging.

4.1.2 Kwel – infiltratie

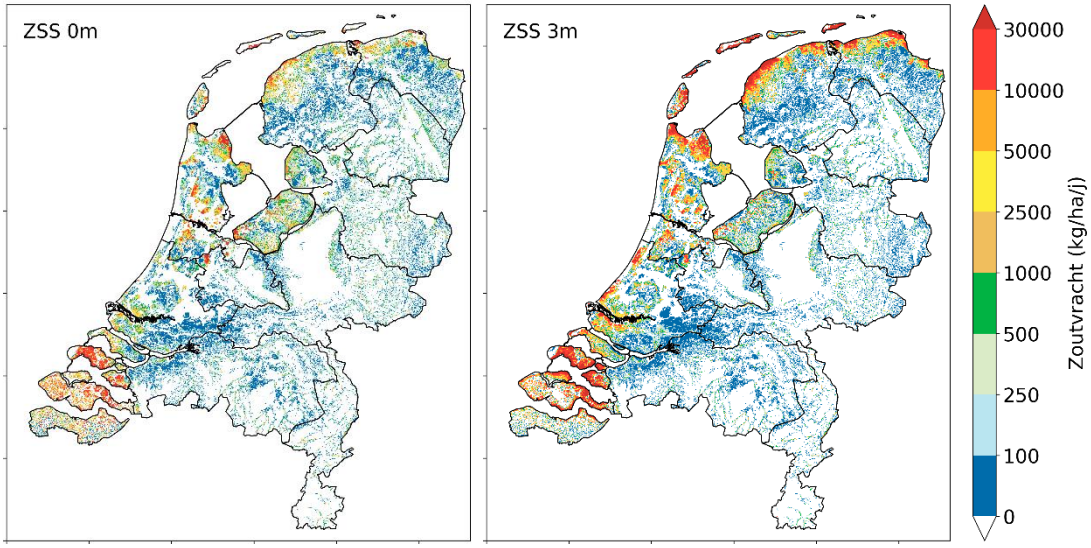
Door zowel de verhoging van de stijghoogte door zeespiegelstijging als de relatieve verhoging van de stijghoogte ten opzichte van de grondwaterstand door bodemdaling neemt de kwel – de opwaartse stroming van grondwater – toe. Zeespiegelstijging is vanaf een stijging vanaf zo'n 1 m dominant in deze kweltoename. Kwel neemt door uiteindelijk 3 m zeespiegelstijging toe met maximaal zo'n 2 mm/d direct langs de kust. Hoewel deze toename ook een duidelijke toename van het waterbezwaar betekent, is deze toename vrij constant over het jaar en neemt snel af met afstand tot de kust. De toename van waterbezwaar lijkt dan ook niet te leiden tot een plotselinge toename in benodigde maalcapaciteit, aangezien gemalen zijn gedimensioneerd op het kunnen uitmalen van piekbuien van zo'n 35 mm (continue maalcapaciteit zo'n 15 mm/d (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988)).



Figuur 4.5 Verschil kwel / infiltratie voor zichtwaarde 3 m ten opzichte van de huidige situatie (links), en alleen het effect van zeespiegelstijging op de verandering van kwel / infiltratie (rechts, berekening zeespiegelstijging, bodemdaling en autonoom minus berekening bodemdaling en autonoom).

4.1.3 Zoutvracht

De zoutvracht is de hoeveelheid zout die vanuit het eerste watervoerende pakket richting de oppervlakte stroomt en uiteindelijk uitstroomt in het oppervlaktewater. In de langjarige berekeningen speelt de berging in het ondiepe grondwater van zout geen rol, over een langere periode is de zoutvracht naar de deklaag vanuit het eerste watervoerende pakket gelijk aan de zoutvracht naar het oppervlaktewater. In de representatieve jaar-berekeningen met het LHM speelt de berging in het ondiepe grondwater wel een rol, zie paragraaf 4.2.1.



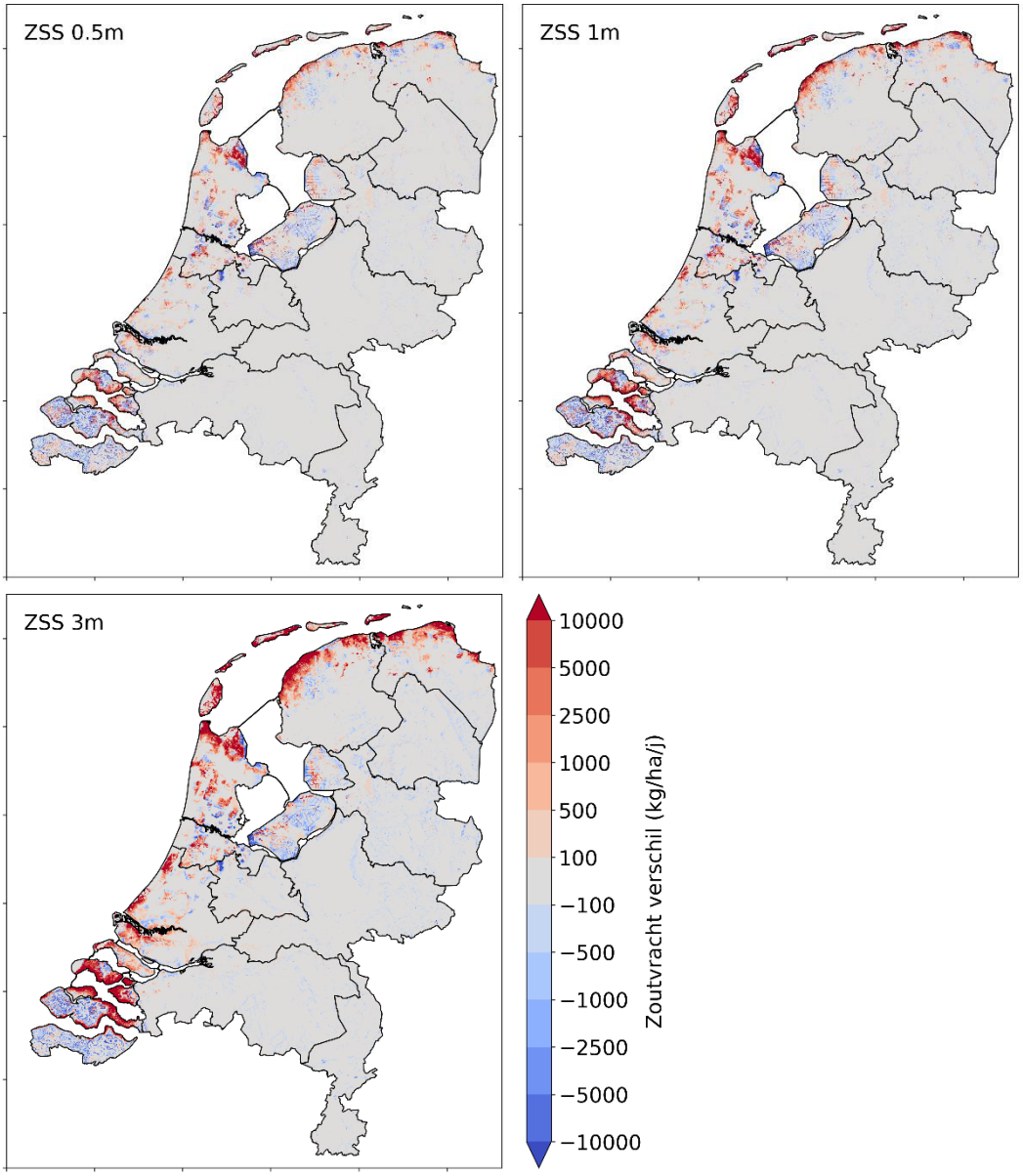
Figuur 4.6 Zoutvracht naar oppervlaktewater (kg/ha/jaar) voor de huidige situatie (links) en voor zichtwaarde 3 m zeespiegelstijging (rechts).

Figuur 4.6 geeft de zoutvracht in de huidige situatie en bij zichtwaarde 3 m zeespiegelstijging. Figuur 4.7 geeft het verschil in zoutvracht met de uitgangssituaties voor verschillende zichtwaarden. De gebieden in de invloedssfeer van zeespiegelstijging (Figuur 4.3) laten een duidelijke toename van de zoutvracht zien. Daarnaast treden ook veranderingen op in zoutvracht door autonome processen en bodemdaling. In Figuur 4.8 is de bijdrage van zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome processen uitgesplitst[3]. Voor zichtwaarde 3 m zeespiegelstijging is de bijdrage van zeespiegelstijging aan de toename van de zoutvracht dominant boven de andere processen. Het gebied waar de zoutvracht toeneemt door zeespiegelstijging is beperkter in omvang dan de invloedssfeer van zeespiegelstijging. Dit komt doordat niet in het hele invloedssfeer-gebied sprake is van een kwelsituatie (in een infiltratiesituatie is immers geen sprake van zoutvracht). Daarbij is er ook niet in het hele invloedssfeer-gebied sprake van brak grondwater. In de gebieden langs de grote rivieren neemt de kwel bijvoorbeeld wel toe, maar is het grondwater zoet.

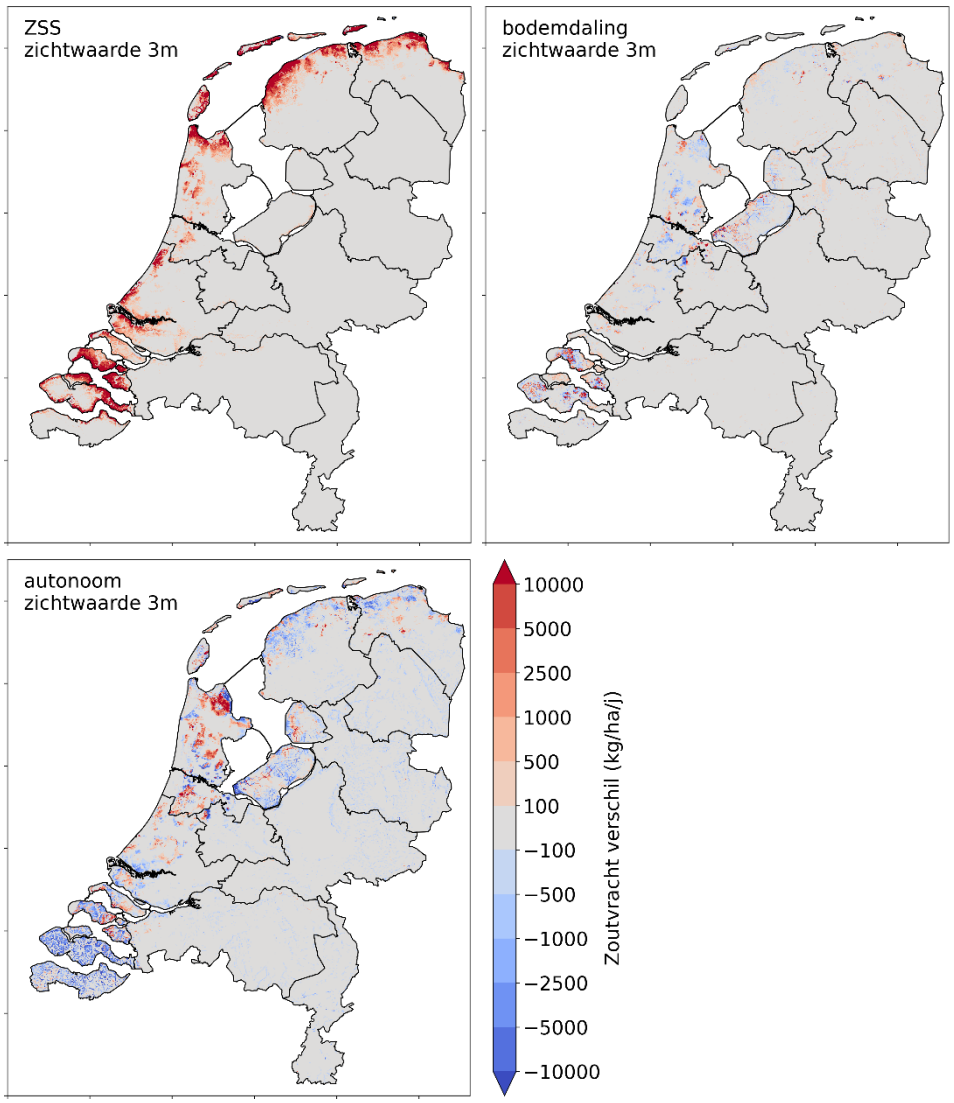
De toename van de zoutvracht in de diepe droogmakerijen (bijvoorbeeld Haarlemmermeer, Wieringermeer) is zowel het gevolg van de voortgaande toestroming van diep brak grondwater na de droogmaking (het autonome proces), als van zeespiegelstijging (vergelijk Figuur 4.8 linksboven en onder). Aan de oostrand van de Wieringermeer is door een autonoom proces juist verzoeting te zien: sinds de inpoldering stroomt geïnfiltreerd zoet IJsselmeerwater naar de Wieringermeer, waardoor de kwel aan de oostrand steeds verder verzoet. Door autonome processen is in meer gebieden sprake van verzoeting. In de veenpolders in het Noorderkwartier neemt de zoutvracht ook af door autonome processen. In de Flevopolders is in de oostelijke helft verzoeting te zien, de toestroom vanuit de Veluwe verzoet hier de kwel. Aan de westrand van de Flevopolders is neemt de zoutvracht toe, hier stroomt oud Zuiderzee-water sinds de inpoldering naar de oppervlakte.

Autonome processen omvatten het ‘naijl-effect’, de nog voortgaande aanpassing van het zoet-zoute grondwater aan veranderende omstandigheden in het verleden. Sommige van de chloride concentratie aanpassingen betreffen echter inspeeleffecten, aanpassingen aan interpolatie-artefacten in de initiële chlorideverdeling. Dit is bijvoorbeeld het geval voor enkele diepe droogmakerijen, zoals de Horstermeerpolder en de Middelburg-Tempelpolder (zie ook Delsman et al., 2020). Inspeeleffecten lijken ook verantwoordelijk voor de autonome zoutvrachtafname in de Zeeuwse polders en het Fries-Groningse kustgebied. Deze afname treedt op in de eerste jaren, en komt daarna tot stilstand.

Het effect van voortgaande bodemdaling op zoutvracht is relatief beperkt. Bodemdaling heeft voor de diepe droogmakerijen over het algemeen een afname van de zoutvracht tot gevolg, omdat de veenpolders aan de randen van de droogmakerij dalen, en daarmee de kweldruk afneemt. In de veenweidegebieden in Utrecht, Holland, Friesland en Overijssel heeft bodemdaling maar beperkt invloed op de zoutvracht, aangezien het hier veelal zoete gebieden betreft. In Zuid-Flevoland en Zeeland treden grotere verschillen op door bodemdaling door de aanwezigheid van ondiep brak grondwater in deze gebieden.

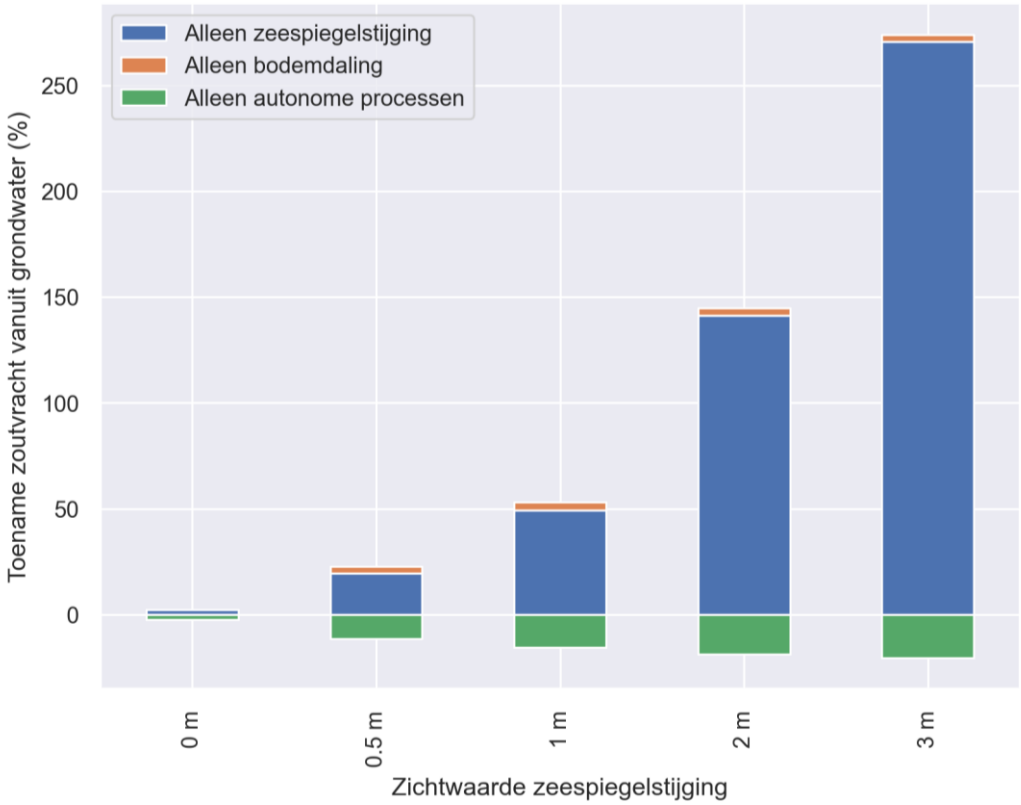


Figuur 4.7 Verschil zoutvracht naar oppervlaktewater (kg/ha/jaar) ten opzichte van de huidige situatie voor zichtwaarde 0.5 m (linksboven, 1 m (rechtsboven) en 3 m (linksonder).



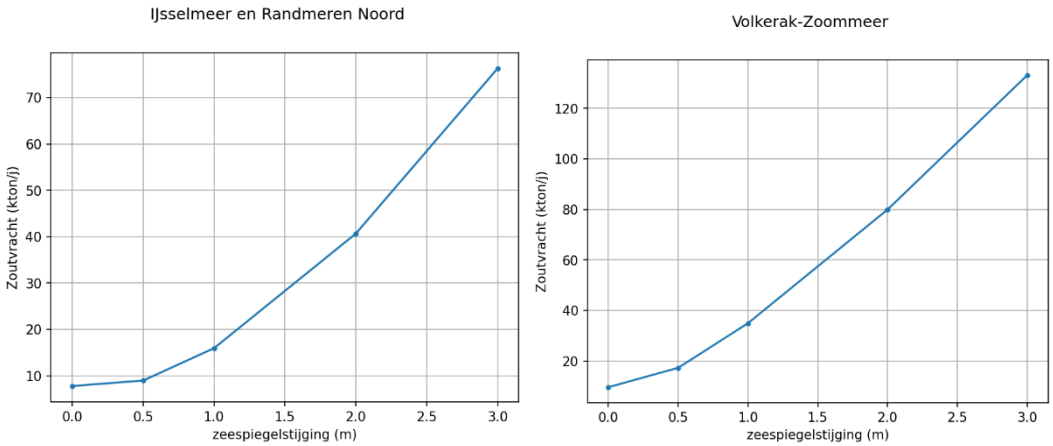
Figuur 4.8 Verschil zoutvracht naar oppervlaktewater (kg/ha/jaar) voor zichtwaarde 3 m, het geïsoleerde effect van zeespiegelstijging (linksboven), het geïsoleerde effect van bodemdaling (rechtsboven) en het geïsoleerde effect van autonome processen (linksonder).

Figuur 4.9 geeft het verloop van de totale zoutvrachtverandering in de tijd, uitgesplitst naar de afzonderlijke bijdragen van zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome processen. De zoutvrachtverandering laat ten opzichte van de zeespiegelstijging een versnelling zien, bij 0.5 m, 1 m, 2 m en 3 m zeespiegelstijging neemt de zoutvracht met respectievelijk 15%, 50%, 120% en 240% toe ten opzichte van de huidige zoutvracht. Deze versnelling wordt veroorzaakt door de langzame stroming van grondwater, waardoor onder invloed van zeespiegelstijging dieper, zouter grondwater langzaam naar de oppervlakte stroomt. De zoutvrachttoename is over langere perioden niet langer alleen het gevolg van een toename in kwel, maar ook van gaandeweg zouter wordend grondwater. Uit Figuur 4.9 blijkt ook de dominante invloed van de zeespiegelstijging op de zoutvrachttoename. Voor zichtwaarde 0.5 m is de invloed van zeespiegelstijging nog min of meer in dezelfde orde-grootte als autonome processen, voor hogere zichtwaarden is deze absoluut dominant. Dit komt deels doordat zeespiegelstijging slechts één kant opwerkt, terwijl autonome processen voor zowel een toe- als afname van de zoutvracht kunnen zorgen.



Figuur 4.9 Verandering in de totale zoutvracht over Nederland ten opzichte van huidige situatie (Mton/j) per zichtwaarde van de zeespiegelstijging, uitgesplitst naar de afzonderlijke bijdragen van zeespiegelstijging, bodemdaling en autonome processen.

Naast de zoutvracht naar regionale oppervlaktewateren geeft grondwater ook een directe zoutvracht op het hoofdwatersysteem. Figuur 4.10 geeft het verloop van de zoutvracht vanuit grondwater op het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer. De zoutvracht vanuit grondwater op het IJsselmeer neemt toe van 8 kton/j in de huidige situatie tot 75 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging, de zoutvracht vanuit grondwater op het Volkerak-Zoommeer neemt toe van huidig 7 tot 125 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging. De toename van de zoutvracht naar deze bekkens is relatief gezien groter dan voor heel Nederland. Dit komt door de relatief open connectie van deze bekkens – via het grondwater – naar het nabijgelegen zoute oppervlaktewater.



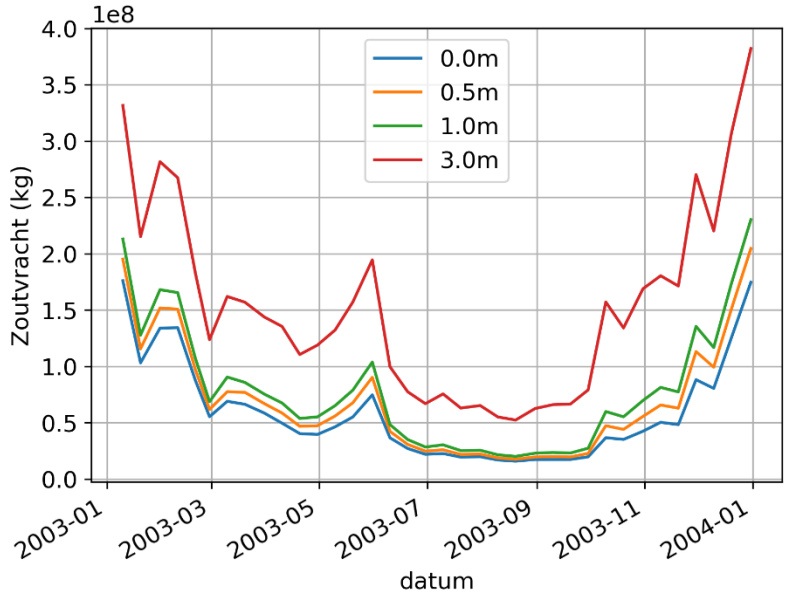
Figuur 4.10 Verloop zoutvracht naar IJsselmeer (links) en Volkerak-Zoommeer (rechts) bij toenemende zeespiegelstijging (kton/jaar).

4.2 Verzilting oppervlaktewater en watervraag in een representatief jaar

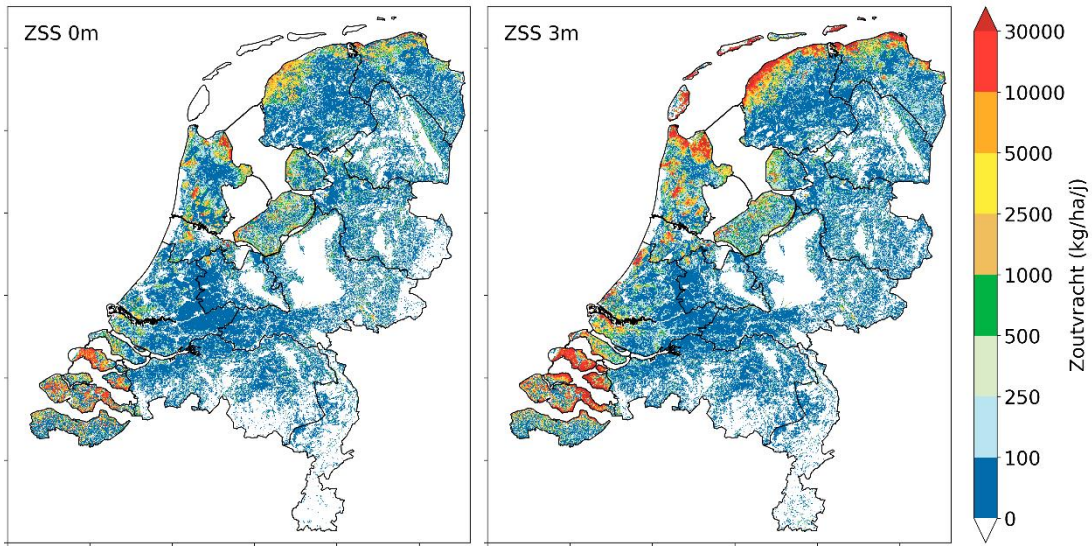
Op basis van de resultaten van de langjarige berekening is voor zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m een berekening gemaakt met het LHM voor een representatief droog jaar (2003). In deze berekening is de zoutconcentratie in het ondiepe grondwater (TRANSOL) in evenwicht gebracht met de geldende randvoorwaarden en zoutconcentratie aan de onderkant van de deklaag, waarna het jaar 2003 is doorgerekend. De meteorologie is gelijk gehouden aan de huidige situatie.

4.2.1 Zoutvracht naar oppervlaktewater

In de representatieve-jaar berekening is het verloop van de zoutvracht naar het oppervlaktewater gedurende het jaar 2003 berekend voor de zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m (Figuur 4.11). De zoutvracht naar oppervlaktewater is het hoogst in de winterperiode, wanneer de meeste drainage naar oppervlaktewater optreedt. In de droge zomer dalen de grondwaterstanden en stroomt er juist weinig grondwater naar het oppervlaktewater. De zoutvracht is dan ook het laagst. De zoutconcentratie in de sloot is gedurende de zomer daarbij juist het hoogst (afgezien van doorspoeling), aangezien het zoute grondwater dan slechts zeer beperkt wordt gemengd met zoete neerslag.



Figuur 4.11 Verloop zoutvracht naar oppervlaktewater gedurende het jaar 2003 (10^8 kg, totaal over Nederland) voor verschillende zichtwaarden.



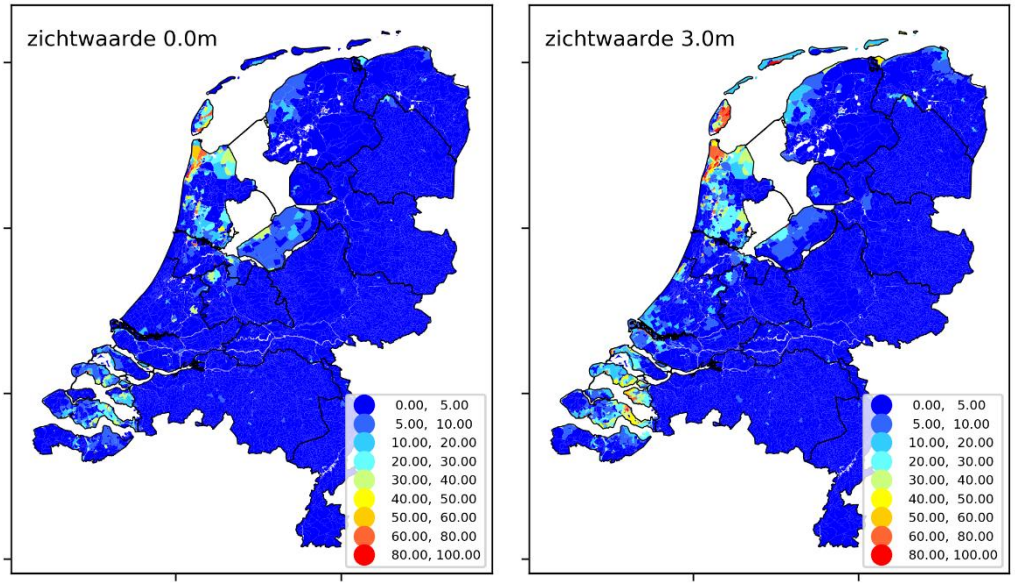
Figuur 4.12 Jaartotaal zoutvracht naar oppervlaktewater, voor de huidige situatie (links) en zichtwaarde 3 m (rechts).

De voor het representatieve jaar berekende totale zoutvracht naar oppervlaktewater is voor de huidige situatie en 3 m zeespiegelstijging weergegeven in Figuur 4.12. De patronen en jaartotalen komen goed overeen met de resultaten uit de langjarige berekening met LHM zoet-zout (Figuur 4.6); deze overeenkomst laat zien dat de zoutvracht over de deklaag over een langere periode bekeken inderdaad volledig uitstroomt naar het oppervlaktewater.

4.2.2 Verzilting wortelzone

Bij een sterkere kweldruk en toename van de zoutconcentratie van de kwel, neemt het risico op verzilting van de wortelzone toe, en daarmee het risico op zoutschade van landbouwgewassen (De Louw et al., 2013, 2011). In het LHM wordt de chlorideconcentratie van de wortelzone berekend door het model TRANSOL. Deze berekende concentraties worden in absolute zin niet bruikbaar geacht (zie 3.3.1 en Acacia Water et al., 2021). Uit de validatie van het LHM kwam onder meer naar voren dat de berekende verzilting van de wortelzone de door agrariërs ervaren verzilting lijkt te onderschatten (Acacia Water et al., 2021). Verzilting van de wortelzone is een heterogeen proces, waarbij onder meer de ligging van kleischeuren en drainage een rol speelt. Daarbij komt dat voor verzilting van de wortelzone het weer (het risico op verzilting van de wortelzone neemt toe bij drogere zomers) en de ligging van drainage (wordt de zoute kwel afgevoerd via de drainagebuizen) een minstens zo grote rol speelt als de kwelbelasting (De Louw et al., 2013, 2011).

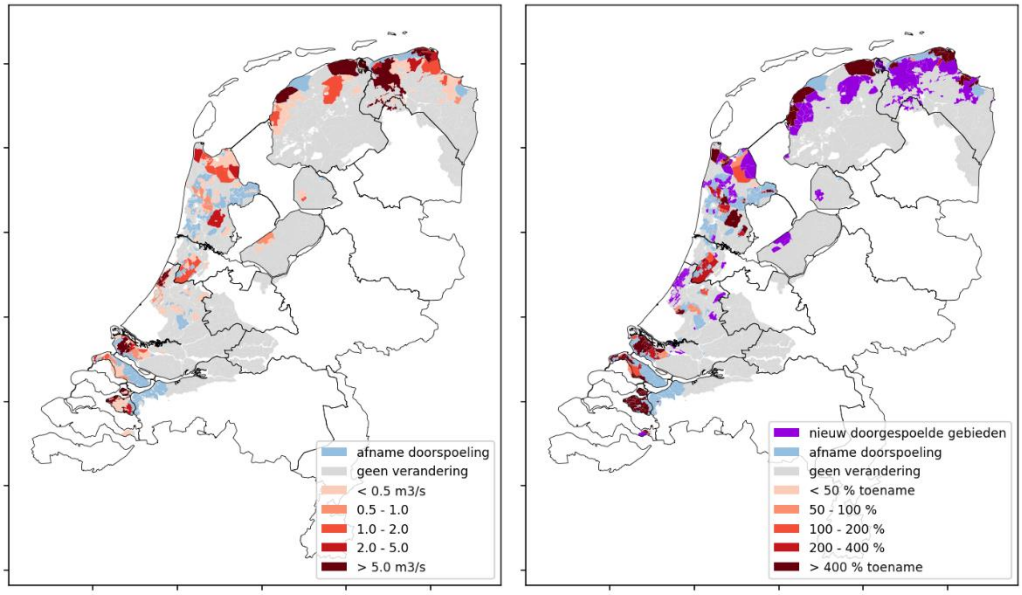
Gegeven deze beperkingen geeft Figuur 4.13 het berekende areaal waar de wortelzone een aan het eind van de zomer een chlorideconcentratie van meer dan 1 g/L bereikt. Deze figuur geeft hiermee meer in kwalitatieve zin aan waar problemen met zout in de wortelzone bij toenemende zeespiegelstijging een grotere rol kunnen gaan spelen. Problemen met zout in de wortelzone lijken in de huidige situatie met name te spelen op de Waddeneilanden, de Zeeuwse eilanden, de kop van Noord-Holland, Groot-Mijdrecht en de Friese kustregio. Bij een zichtwaarde van 3 m zeespiegelstijging spelen problemen met zout in de wortelzone in een groter gebied, problemen nemen met name toe op de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden, de Waddeneilanden en de kop van Noord-Holland.



Figuur 4.13 Berekend percentage van het landbouwareaal per LSW met een chlorideconcentratie in de wortelzone op 20 augustus 2003 hoger dan 1 g/L, voor de huidige situatie (links) en bij 3 m zeespiegelstijging (rechts), als indicatief voor waar problemen met zout in de wortelzone met name plaatsvinden.

4.2.3 Watervraag doorspoeling

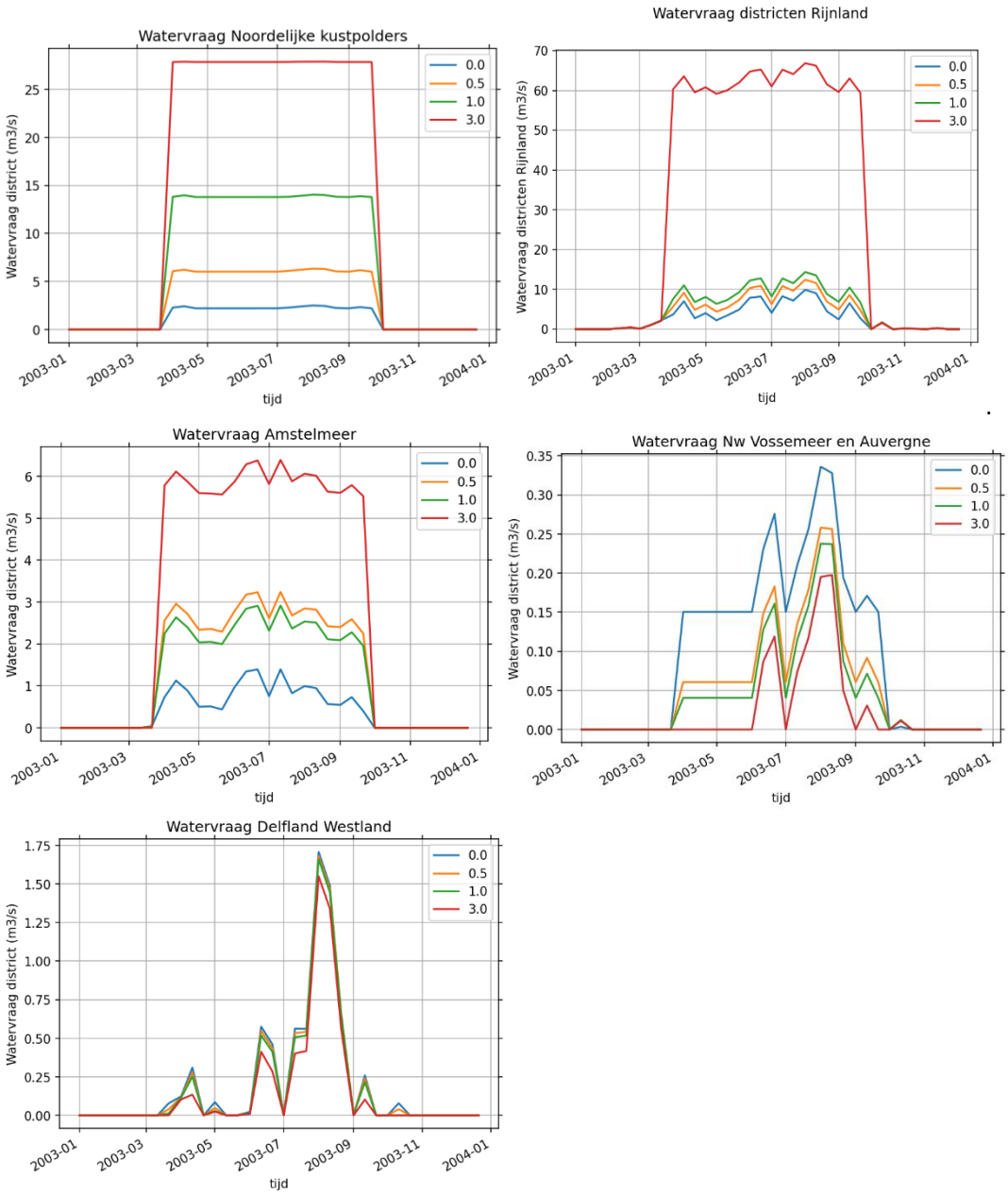
De watervraag voor doorspoeling is voorafgaand aan de finale representatieve jaar-berekening berekend aan de hand van de water- en zoutbalans uit een eerdere iteratie van de representatieve jaar (LHM) berekening. Figuur 4.14 geeft de veranderde doorspoelwatervraag per LSW voor zichtwaarde 3 m ten opzichte van de huidige situatie. In zijn algemeenheid neemt de doorspoelwatervraag toe, en wordt bij zeespiegelstijging ook in nieuwe gebieden doorspoeling noodzakelijk om huidige chlorideconcentraties in het oppervlaktewater te handhaven. Naast een algemene toename is in Figuur 4.14 voor sommige gebieden ook een afname van de doorspoelwatervraag te zien, veelal veroorzaakt door een autonome afname van de zoutvracht (paragraaf 4.1.3). Dit is onder meer het geval voor de veenpolders in Noord-Holland, en de West-Brabantse polders. De totale doorspoelwatervraag in polders neemt toe van 20 m^3/s in de huidige situatie, tot ongeveer 50, 100 en 350 m^3/s voor respectievelijke zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m.



Figuur 4.14 Verandering berekende doorspoelwatervraag vanuit de poldergebieden voor zichtwaarde 3 m, in absolute waarden (m^3/s, links), en procentuele verandering (rechts). In witte gebieden wordt geen polder-doorspoeling geschematiseerd (zie Figuur 3.4).

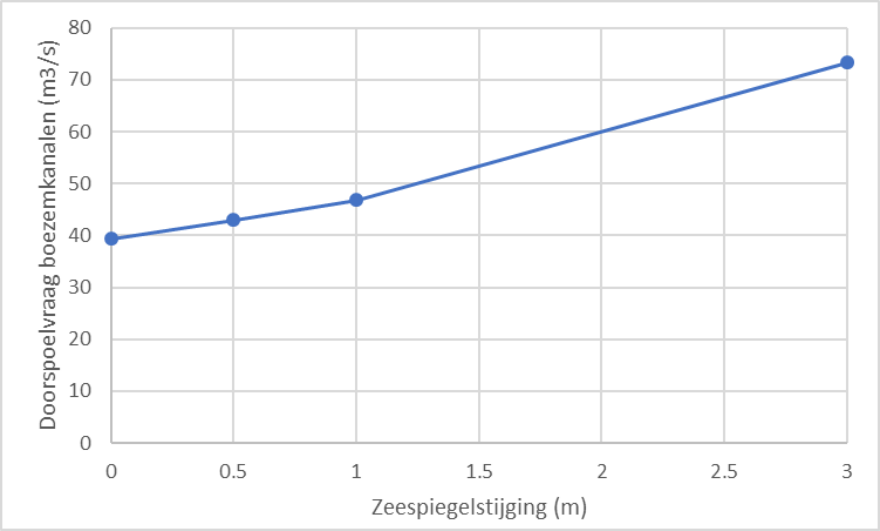
De doorspoelvraag is een deel van de watervraag van de LSW's, en daarmee van de districten (optelling meerdere LSW's). De andere componenten zijn peilbeheer en beregening. Figuur 4.15 geeft de watervraag van aantal geselecteerde districten, welke onderling verschillen in mechanismen die de doorspoelwatervraag vergroten of verlagen. Voor een aantal districten is de toename van zoutvracht en daarmee de benodigde doorspoeling dominant, zoals de Noordelijke kustpolders en ook opgeteld voor alle districten in Rijnland in Figuur 4.15. Doorspoeling is te herkennen als een vaste watervraag in de periode april tot oktober. Voor de Noordelijke kustpolders loopt de toename in doorspoelvraag redelijk gelijk op met de zeespiegelstijging. Rijnland laat echter een grote sprong zien naar zichtwaarde 3 m, die wordt veroorzaakt doordat de Rijnlandse bollenstreek bij deze zichtwaarde een sterke zoutvracht kent. Het zoethouden van de bollenstreek vergt bij deze zichtwaarde erg veel water. District Amstelmeer laat dan weer eerst een toename (0.5 m), vervolgens een kleine afname (1 m) en tenslotte een toename (3 m) in doorspoelvraag zien. Het betreft een complex gebied, waar zowel zeespiegelstijging, bodemdaling, als autonome processen de zoutvracht beïnvloeden.

Doordat de meteorologie voor de zichtwaarden gelijk is gehouden, verandert de watervraag voor peilbeheer en beregening naar verwachting weinig. Dit is ook zichtbaar in de figuren, doordat het variërende watervraagpatroon bovenop de vaste doorspoelwatervraag voor de zichtwaarden nagenoeg gelijk blijft. Voor het Westland in Delfland, waar geen polder-doorspoeling is opgenomen, is wel een beperkte afname van de watervraag zichtbaar, doordat de kwel door zeespiegelstijging toeneemt. Voor de Nieuw-Vossemeer Auvergnepolders in Brabantse Delta neemt de berekende zoutvracht door autonome processen gedurende de modelperiode af (zie ook 4.1.3), en daarmee neemt ook de doorspoelwatervraag af.



Figuur 4.15 Watervraag van enkele geselecteerde districten (voor peilbeheer, beregening en doorspoeling) Noordelijke kustpolders (Noorderzijlvest, linksboven), de opgetelde districten van Rijnland (Rijnland, rechtsboven), Amstelmeer (Hollands Noorderkwartier, midden links), Nieuw Vossemeer en Auvergnepolders (Brabantse Delta, midden rechts), Westland (Delfland, onder). Let op dat de y-as in de figuren verschilt.

De doorspoelwatervraag in de boezemsystemen is deels afhankelijk gesteld van de zoutvracht vanuit grondwater, en deels van de toegenomen zoutlek door zeesluizen. De berekende doorspoeling in alle beschouwde regionale boezemkanalen (zie tabel 3.1) samen, neemt toe van 40 m^3/s in de huidige situatie, tot een kleine 75 m^3/s bij 3 m zeespiegelstijging. De toename in doorspoeling van de boezemkanalen is relatief beperkt ten opzichte van de toename in doorspoeling van de polderwateren, maar telt wel mee in de totale zoetwaterbehoefte. De toename in doorspoeling wordt gedreven door hetzij de toename in zoutvracht door zeespiegelstijging, als de over een groter gebied uitgemiddelde toename in zoutvracht. Het betreft hier alleen de regionale boezemsystemen, de doorspoelbehoefte in het hoofdwatersysteem (NZK-ARK, sluizen Afsluitdijk, etc.) is niet beschouwd.

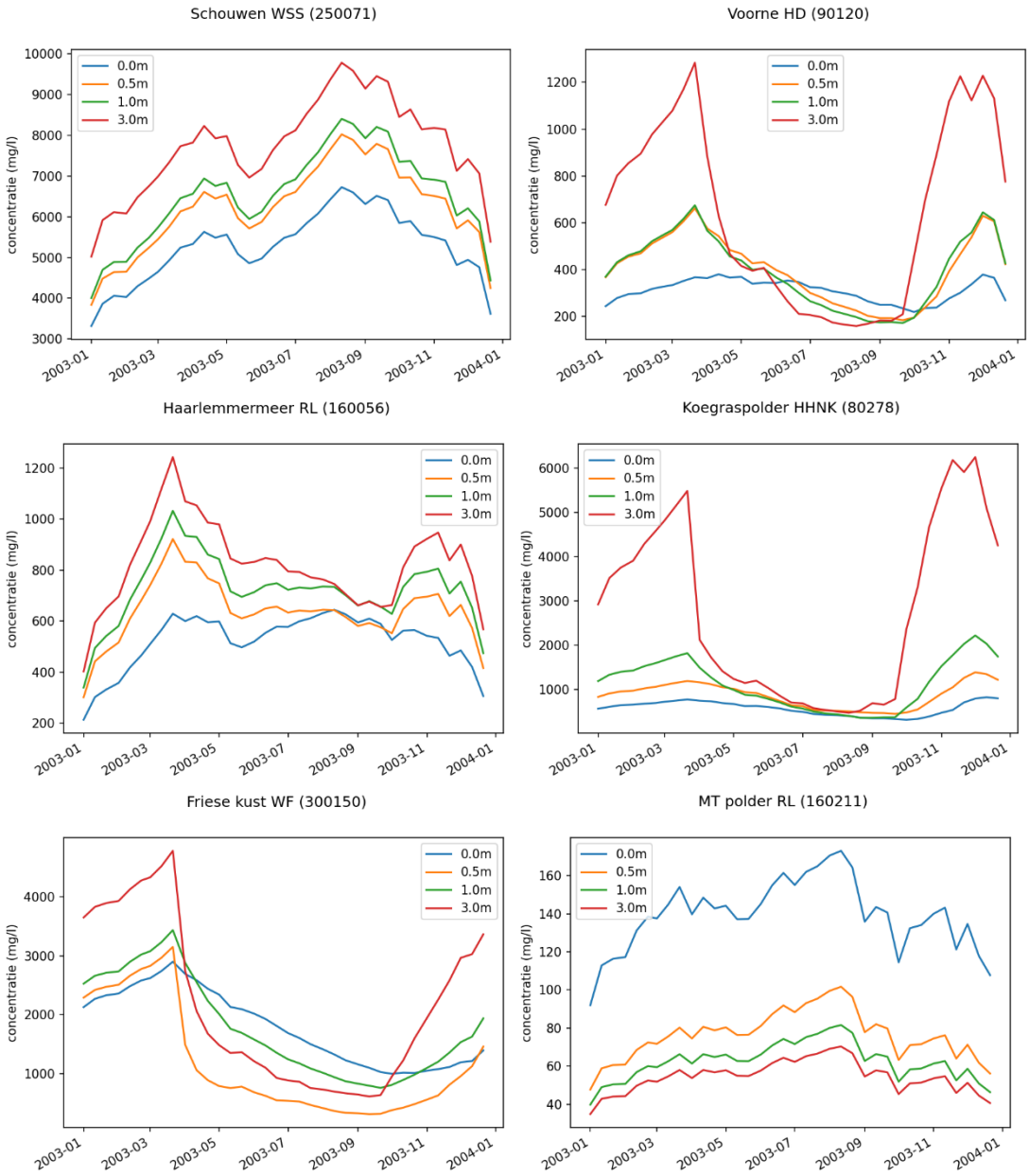


Figuur 4.16 Berekende doorspoelwatervraag in geselecteerde boezemkanalen bij zeespiegelstijging.

4.2.4 Chlorideconcentratie in oppervlaktewater

De chlorideconcentratie in het oppervlaktewater wordt voor de verschillende zichtwaarden bepaald door de verandering in zoutvracht, de toename van de kwelhoeveelheid, de verandering van de berekende doorspoeling, en de eventuele verandering in de concentratie van het inlaatwater. De meteorologie van het representatieve jaar is voor alle zichtwaarden gelijk.

Figuur 4.17 geeft verschillende voorbeelden van berekende chlorideconcentraties in het uitgeslagen polderwater. Het concentratieverloop voor Schouwen is kenmerkend voor een LSW met zoutbelasting waar niet wordt doorgespoeld. De concentratie neemt toe over de zomerperiode, en met een stijgende zeespiegel en toenemende zoutvracht neemt de concentratie in het oppervlaktewater toe. De LSW's Voorne, Haarlemmermeer, Koegraspolder en Friese kust zijn voorbeelden van doorgespoelde LSW's. In deze LSW's neemt de chlorideconcentratie in het groeiseizoen, wanneer wordt doorgespoeld, juist af ten opzichte van de winterperiode. Met de vooraf ingeschatte doorspoelhoeveelheid lukt het vrij aardig om de chlorideconcentratie gelijk te houden aan de huidige concentratie. Dit is niet voor alle LSW's het geval, zoals bijvoorbeeld voor LSW Friese kust. Reden hiervan kan een veranderde inlaatconcentratie van het water zijn in de uiteindelijke berekening vergeleken met de gehanteerde concentratie in de doorspoelberekening.



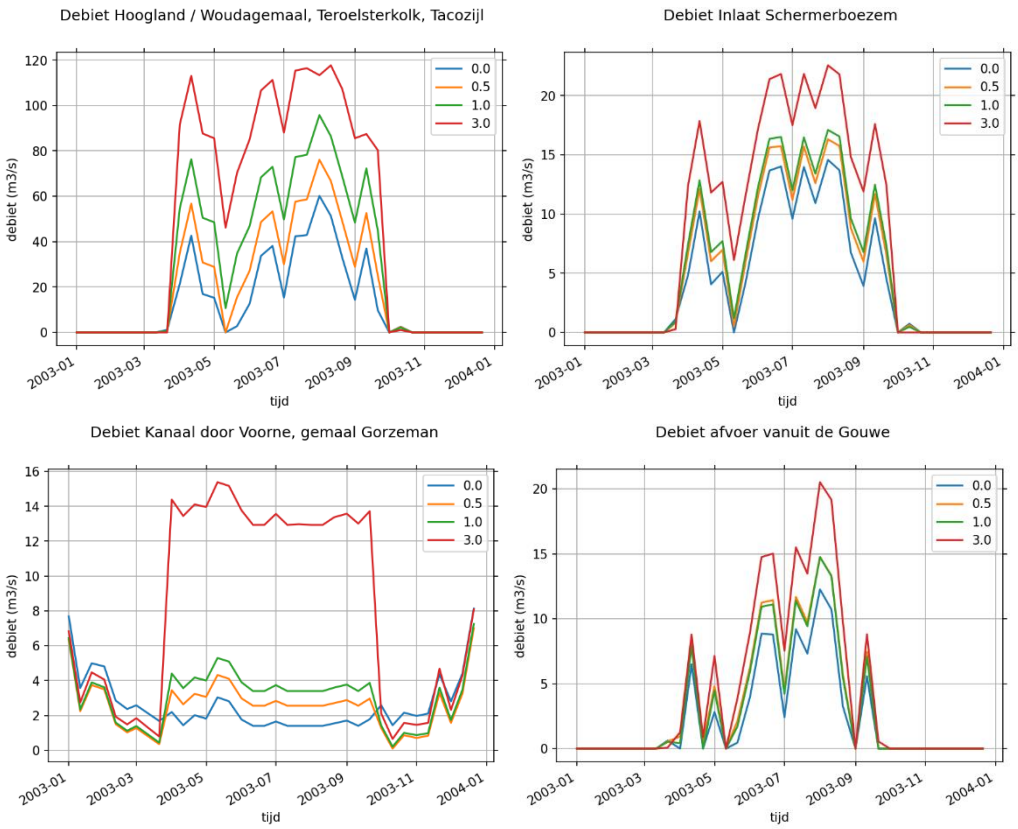
Figuur 4.17 Voorbeelden van berekende chlorideconcentratie in het uitgeslagen polderwater voor het representatieve jaar voor verschillende zichtwaarden.

Voor sommige dicht aan de kust liggende LSW's neemt de zoutvracht sterk toe, wat zich uit in hoog oplopende concentraties in de winterperiode (Koegraspolder). Als gevolg hiervan wordt een grote doorspoelwatervraag berekend, onder de aanname dat de huidige concentratie wordt gehandhaafd. Eenzelfde beeld is zichtbaar voor de bollenstreek in Rijnland (niet getoond). Voor LSW MT-polder (rechtsonder in Figuur 4.17) is te zien dat de zoutvracht over de tijd afneemt, waardoor ook de concentraties afnemen. Dit is niet naar verwachting, maar zeer waarschijnlijk een artefact van de 3D chloride interpolatieprocedure (zie ook (Delsman et al., 2020)).

4.2.5 Watervraag hoofdwatersysteem

Door de verandering in kwel- / infiltratie, en in sterkere mate door de veranderde doorspoelwatervraag, verandert de watervraag van de regionale systemen aan het hoofdwatersysteem. Figuur 4.18 geeft voor enkele locaties het berekende uitwisselingsdebiet tussen het hoofdwatersysteem en het regionale systeem. Deze uitwisseling betreft zowel watervraag voor doorspoeling, als watervraag voor beregening en peilbeheer. Door de gelijke meteorologie zijn de verschillen tussen de zichtwaarden voor wat betreft watervraag voor beregening en peilbeheer klein, de verschillen in watervraag aan het hoofdwatersysteem komen zo goed als volledig voor rekening van de verschillen in doorspoelwatervraag. Het is daarbij niet zo dat de regionale doorspoelvragen altijd optellen tot de regionale watervraag aan het hoofdwatersysteem, omdat er in het Distributiemodel op veel locaties sprake is van ‘hergebruik’ van doorspoelwater. Water waarmee polders worden doorgespoeld wordt uitgeslagen op de boezem en kan benedenstrooms opnieuw worden gebruikt. Vergelijk de totale watervraag van de districten van Rijnland in Figuur 4.15, met de door het Distributiemodel berekende vraag die bij de Gouda aan het hoofdwatersysteem wordt gesteld (Figuur 4.18, rechtsonder). In de meeste boezemsystemen wordt in wateraanvoersituaties een vaste stromingsrichting gehanteerd. Hergebruik van doorspoelwater kan optreden wanneer de doorspoelde polders bovenstrooms liggen van vervolgens doorgespoelde polders. Voor de situatie van de bollenstreek lijkt dit echter niet realistisch, uitgeslagen water wordt in noordelijke richting afgevoerd en hergebruik van het brakke water zal worden voorkomen.

Het berekende bijna volledige hergebruik van doorspoelwater in het Distributiemodel lijkt hiermee niet altijd realistisch. De in het Distributiemodel berekende watervraag aan het hoofdwatersysteem zal daarmee voor sommige boezemsystemen een onderschatting van de watervraag betekenen. De gesommeerde watervraag van de inliggende polders kan worden gebruikt als bovenwaarde voor de watervraag aan het hoofdwatersysteem, hierbij wordt geen water hergebruikt.

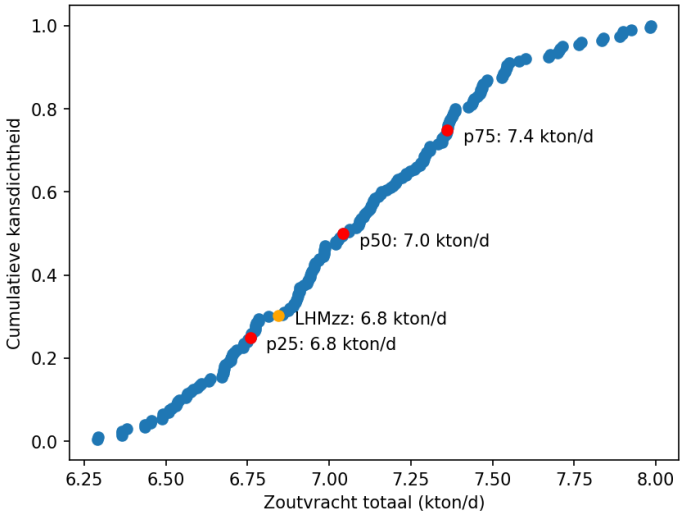


Figuur 4.18 Berekende uitwisselingsdebieten tussen regionaal systeem en hoofdwatersysteem op enkele locaties voor de verschillende zichtwaarden. Inlaat Friese boezem uit IJsselmeer (linksboven), inlaat Schermerboezem uit Markermeer (rechtsboven), Inlaat Voorne (linksonder) en inlaat Rijnland uit Hollandse IJssel (rechtsonder).

4.3 Onzekerheidsanalyse zoutvracht en doorspoelwatervraag

4.3.1 Onzekerheid in zoutvracht door initiële chlorideconcentratie en kwel

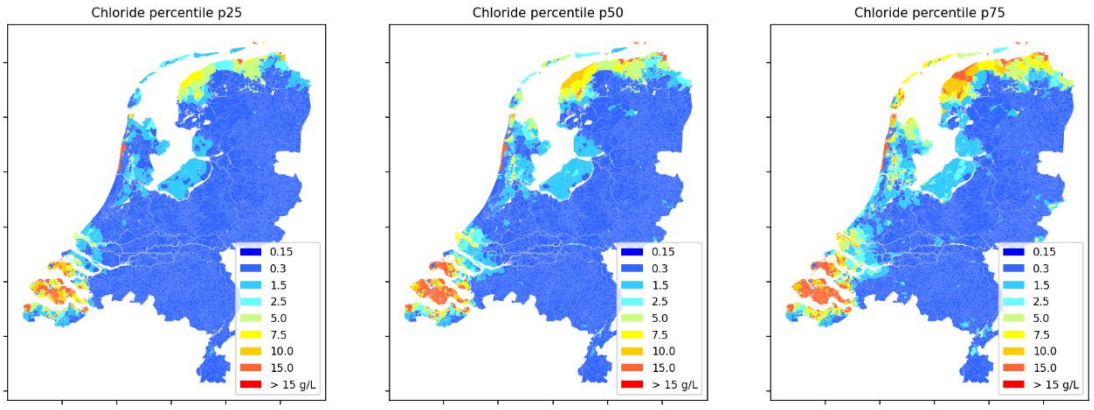
In een Monte Carlo analyse zijn de verschillende realisaties van het initiële 3D grondwater chlorideconcentratie bestand (zie paragraaf 3.4.2) gecombineerd met een normaal verdeelde variatie (μ=0, σ=10%) van de kwel- / infiltratieflux over de Holocene deklaag. Figuur 4.19 geeft de resulterende kansdichtheid van de totale zoutvracht in Nederland. De mediane zoutvracht komt uit op 7.0 kton Cl/d, de variatie tussen het 25- en 75-percentiel is 0.6 kton/d, de onzekerheid in de zoutvracht kan daarmee worden geschat als ± zo'n 5%. De totale diffuse zoutvracht (exclusief zoute wellen, daarmee te vergelijken met deze analyse) in de LHM zoet-zout berekeningen voor de huidige situatie is 6.8 kton/d en ligt daarmee op ongeveer het 30-percentiel uit de Monte Carlo analyse. De in LHM zoet-zout gehanteerde initiële chlorideverdeling geeft daarmee een kleine 3% lagere zoutvracht dan de mediane waarde. Dit is het gevolg van de gehanteerde lognormale onzekerheidsverdeling in de interpolatieprocedure, zoals ook besproken in paragraaf 3.4.2. Voor de berekende absolute zoutvracht lijkt dit een systematische onderschatting in de resultaten te betekenen. Voor relatieve veranderingen in zowel zoutvracht als zeker doorspoelwatervraag zal dit minder tot uitdrukking komen in de resultaten.



Figuur 4.19 Cumulatieve kansdichtheid van de berekende zoutvracht

Op basis van de Monte Carlo analyse is per local surfacewater de variatie in de chlorideconcentratie van de kwel bepaald. Figuur 4.20 geeft de 25-, 50- en 75-percentielwaarde van de (diffuse) kwelconcentratie per local surfacewater. De variatie in kwelconcentratie tussen het 25- en 75-percentiel bedraagt – in de brakke kwelgebieden – over het algemeen ongeveer een factor twee. Op kleinere schaal is de onzekerheid in de zoutvracht daarmee beduidend hoger dan uitgemiddeld over heel Nederland. In alle percentielen komen dezelfde brakke gebieden naar voren. Aan de randen van deze brakke gebieden zijn gebieden te vinden die in het 25-percentiel niet, en in het 75-percentiel wel brakke kwel kennen. Voorbeelden zijn met name te vinden in Zuid-Holland en zuidwest Friesland.

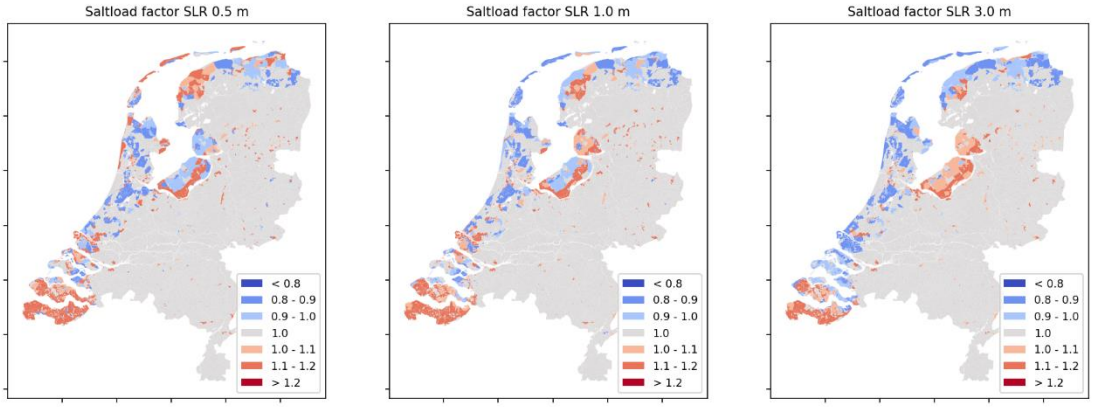
Let op dat in deze analyse de wisselwerking tussen zoutconcentratie (dichtheid) en grondwaterstroming (kwelflux) niet is beschouwd. Bij een hoge zoutconcentratie kan de opwaartse stroming door dichtheidsverschillen bijvoorbeeld worden geremd, zie voor een voorbeeld paragraaf 0.



Figuur 4.20 25-, 50- en 75-percentiel van de kwelflux-gewogen chlorideconcentratie over de Holocene deklaag, gemiddeld per local surfacewater. NB: door de LSW-middeling krijgen bijvoorbeeld duingebieden de concentratie toegekend van de enkele kwellende modelcellen in het LSW, terwijl deze LSW's met name bestaan uit infiltrerend zoet water.

4.3.2 Onzekerheid in snelheid van zeespiegelstijging

Grondwater stroomt langzaam, waardoor veranderingen in randvoorwaarden lang invloed blijven hebben op de grondwaterkwaliteit. In de scenariodefinitie (paragraaf 2.3.1) is om deze reden uitgegaan van een ‘gematigd’ zeespiegelstijgingsscenario. Door de relatief langzame zeespiegelstijging in dit scenario zal de chlorideconcentratie in het grondwater zich bij eenzelfde zeespiegelstand verder hebben ‘aangepast’ aan de veranderde condities dan bij een snellere zeespiegelstijging. Gemiddeld genomen zal de kwelconcentratie dan zouter zijn dan bij snellere zeespiegelstijging, en de zoutvracht daarmee hoger. Om de bandbreedte van dit effect van de onzekerheid in de snelheid van zeespiegelstijging in te schatten is de berekende kwel op de zeespiegel-zichtwaarden gecombineerd met de chlorideconcentratie van een zichtwaarde eerder[4]. De op deze manier benaderde zeespiegelcurve is redelijk te vergelijken met een zeespiegelstijging volgens het extreme scenario (RCP 8.5, waarin 3 m zeespiegelstijging optreedt in 2200). In deze analyse is daarmee alleen gekeken naar ‘snellere’ zeespiegelstijging dan gematigd, niet naar een mogelijk langzamere stijging.



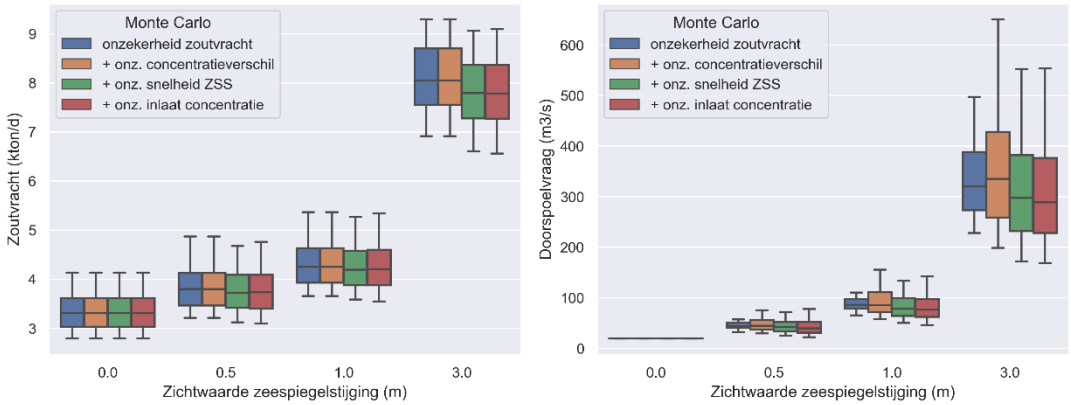
Figuur 4.21 Factor verschil zoutvracht op basis van grondwaterconcentratie eerdere zichtwaarde ten opzichte van de langjarige zoutvrachtberekening voor zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m. Bij de blauwe waarden (factor < 1) geeft een snellere zeespiegelstijging (dus een zichtwaarde valt eerder in de tijd) een lagere zoutvracht.

In Figuur 4.21 wordt getoond hoe de zo ingeschatte zoutvracht voor een snellere zeespiegelstijging (wanneer de zichtwaarde eerder in de tijd valt) zich verhoudt tot de berekende zoutvracht bij de gematigde zeespiegelstijging uit de scenariodefinitie. In de rode gebieden is de zoutvracht op een gegeven zichtwaarde hoger bij snelle dan bij gematigde zeespiegelstijging, in de blauwe gebieden juist lager. De rode gebieden (Flevoland, Zeeland, Friesland) corresponderen daarbij met de gebieden waarbij een autonome afname van de zoutvracht zichtbaar is (zie Figuur 4.8 en paragraaf 4.1.3). In de blauwe gebieden daarentegen is de zoutvracht op een gegeven zichtwaarde lager bij snellere zeespiegelstijging. Dit zijn met name de gebieden waar zeespiegelstijging de zoutvracht-toename bepaalt (Figuur 4.8 en paragraaf 4.1.3). In deze gebieden is de zoutvracht bij snellere zeespiegelstijging lager, omdat het zoutere, diepere grondwater minder tijd heeft gehad om richting de oppervlakte te stromen. In sommige gebieden spelen deze beide effecten, deze gebieden laten voor eerdere zichtwaarden een toename in zoutvracht zien, en bij voorgaande zeespiegelstijging juist een afname. Voor de totale zoutvracht is de afname van zoutvracht voor een gegeven zichtwaarde bij snellere zeespiegelstijging dominant.

[4] In deze aanpak is ook de 2 m zichthorizon meegenomen, dus 3 m is gecombineerd met de chlorideconcentratie van 2 m (2205), niet met die van 1 m.

4.3.3 Onzekerheid in watervraag voor polder-doorspoeling

De onzekerheden in de chlorideverdeling, kwel en snelheid van zeespiegelstijging zijn door middel van een stapsgewijze Monte Carlo analyse doorberekend in de berekende doorspoelwatervraag per local surfacewater. In deze stapsgewijze analyse is steeds een additionele onzekere factor meegenomen, waarmee de onzekerheid accumuleert. Naast de eerder besproken onzekerheid in de zoutvracht door onzekerheid in de initiële chlorideverdeling en kwel (paragraaf 4.3.1), en de onzekerheid in de snelheid van zeespiegelstijging (paragraaf 4.3.2), is in deze analyse de onzekere parameter 'minimaal concentratieverschil' meegenomen. Deze parameter bepaalt tot welk concentratieverschil tussen de streefconcentratie in het local surfacewater en de concentratie van het inlaatwater moet worden doorgespoeld. Deze parameter is uniform gevarieerd tussen 25 mg/L en 75 mg/L. Tenslotte is ook de concentratie van het inlaatwater gevarieerd, met een normaal verdeelde variatie (μ=0%, σ=10%) rondom de uitgangswaarde.



Figuur 4.22 Spreiding in totale zoutvracht (kton/d, links) en totale doorspoelwatervraag (m^3/s, rechts) voor potentieel door te spoelen local surfacewaters (zie Figuur 3.4) voor de huidige situatie en zichtwaarden voor zeespiegelstijging. NB. de 'whiskers' zijn getekend op de 5- en 95-percentielwaarden van de verdeling, in plaats van gebruikelijk op 1.5 maal de interkwartielafstand, om zo beter de uiteinden van de verdeling te tonen.

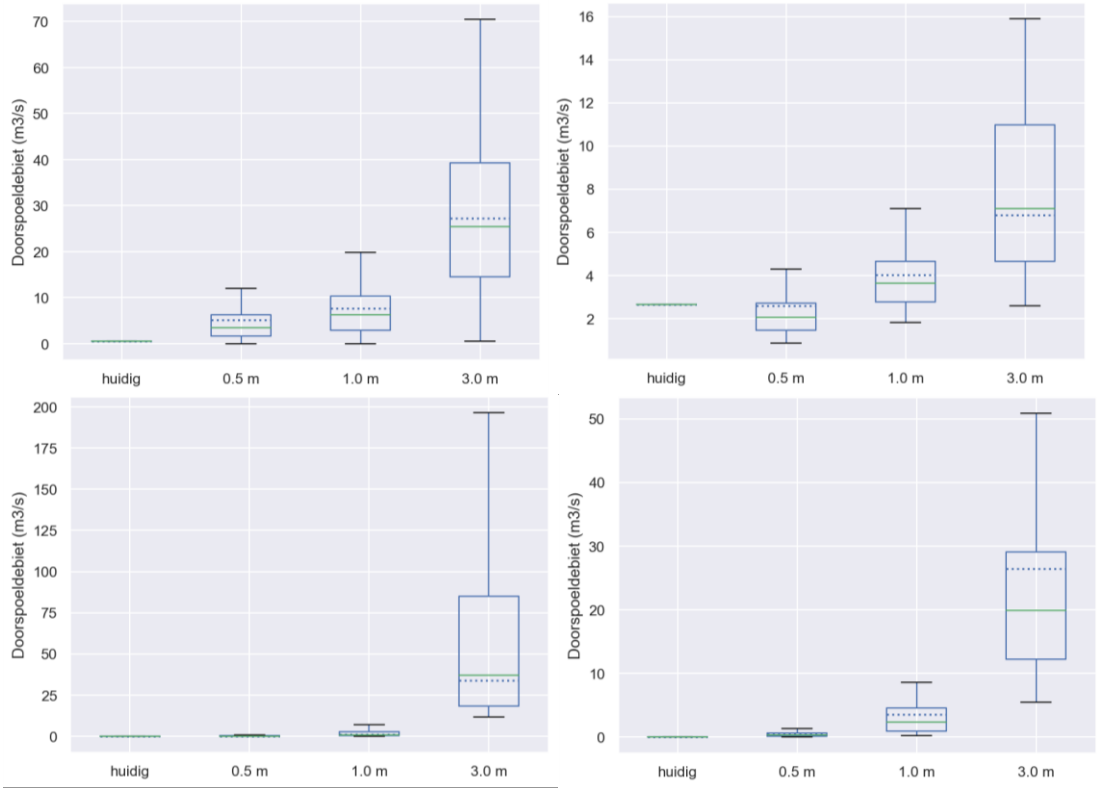
Figuur 4.22 geeft de met de stapsgewijze Monte Carlo analyse berekende spreiding in de totale zoutvracht en doorspoelwatervraag over Nederland. De figuur geeft per zichtwaarde en per analysestap de spreiding in de berekende zoutvracht en doorspoelwatervraag voor de potentieel door te spoelen polders (Figuur 3.4). In een eerste stap is de onzekerheid in zoutvracht geanalyseerd (initiële chlorideverdeling en kwel, blauw in Figuur 4.22), in een tweede stap is hieraan de aangenomen spreiding in de 'minimaal concentratieverschil' parameter toegevoegd (oranje in Figuur 4.22). In een derde en vierde stap zijn hier respectievelijk de onzekerheid in de snelheid van zeespiegelstijging (groen in Figuur 4.22) en de onzekerheid in de inlaatconcentratie van de polders (rood in Figuur 4.22) aan toegevoegd. Merk op dat de onzekerheid in snelheid van zeespiegelstijging alleen in de richting van een snellere zeespiegelstijging is geanalyseerd.

Figuur 4.22, links laat zien dat de belangrijkste onzekerheid in de berekende zoutvracht voortkomt uit de combinatie van onzekerheid in chlorideverdeling en onzekerheid in kwel (spreiding tussen 25- en 75-percentiel (interkwartielafstand) van 0.6, 0.7, 0.7, 1.1 kton/d respectievelijk, voor zichtwaarden 0 m, 0.5 m, 1 m, 3 m, oftewel zo'n ± 7% van de mediane zoutvracht). De berekende spreiding in de zoutvracht wordt in de vervolgstappen namelijk niet veel groter meer. De snelheid van zeespiegelstijging geeft een afname van de mediane zoutvracht, die met name bij hoge zeespiegelstijging (3 m) een duidelijke neerwaartse verschuiving van de gehele spreiding in zoutvracht laat zien. Dit komt doordat alleen de onzekerheid richting een snellere zeespiegelstijging dan de berekende is beschouwd.

De parameter ‘minimaal concentratieverschil’ speelt geen rol in de zoutvrachtberekening, er is dan ook geen invloed van de onzekerheid in deze parameter op de onzekerheid in de zoutvracht (geaccumuleerde onzekerheid neemt niet toe ten opzichte van eerdere analysestap). Ook het effect van variatie in inlaatconcentratie op de berekende spreiding in zoutvracht is beperkt, het gaat hier alleen om de toe- of afname van de zoutvracht via zout in het inlaatwater, een beperkte post in de zoutbalans.

De onzekerheid in de zoutvracht vertaalt zich in onzekerheid in doorspoelwatervraag (interkwartielafstand van 20, 40, 170 m^3/s respectievelijk voor zichtwaarden 0.5 m, 1 m, 3 m, oftewel zo’n ± 25% van de mediane doorspoelwatervraag). In de doorspoelwatervraag vergroot de ‘minimaal concentratieverschil’ parameter de onzekerheid. De snelheid van zeespiegelstijging geeft weer een afname van de doorspoelwatervraag, maar belangrijker ook een vergroting van de spreiding rondom de doorspoelwatervraag.

Op het niveau van DM-districten, met name die dicht langs de kust, kan de onzekerheid zich vertalen in een grote spreiding in de watervraag, soms zelfs met extreme uitschieters (Figuur 4.23).



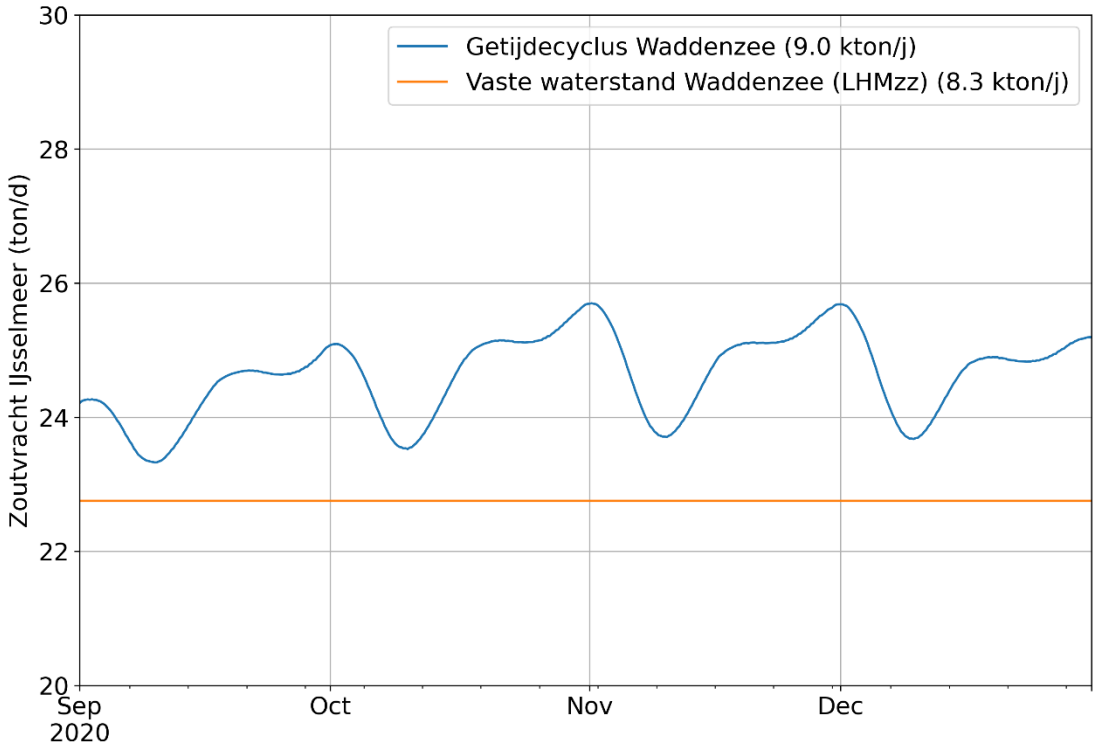
Figuur 4.23 Berekende onzekerheid in doorspoelbehoefte voor enkele geselecteerde districten: Het Bildt / Ropta (Friesland, linksboven), Schermerboezem Noord (Noord-Holland, rechtsboven), Rijnland – bollenstreek (Zuid-Holland, linksonder), en Tholen-West (Zeeland, rechtsonder). De groene lijn in de boxplots geeft de mediaan uit de verdeling weer, de gestippelde blauwe lijn de doorspoelwatervraag waarmee in de LHM berekeningen is gerekend. NB. de ‘whiskers’ zijn getekend op de 5- en 95-percentielwaarden van de verdeling, in plaats van gebruikelijk op 1.5 maal de interkwartielafstand, om zo beter de uiteinden van de verdeling te tonen.

5 Regionale analyses

5.1 Regionale analyses – IJsselmeergebied

5.1.1 Getijdecyclus Waddenzee

De variërende waterstand op de Waddenzee werkt via het grondwater door naar het IJsselmeer. Figuur 5.1 geeft het berekende verloop van de zoutvracht naar het IJsselmeer bij een variërende waterstand op de Waddenzee. De zoutvracht naar het IJsselmeer varieert mee met de waterstand op de Waddenzee. In het zoutvrachtverloop is het daggemiddelde waterstandsverloop op de Waddenzee – uitgesmeerd – te herkennen. Door berging in het grondwatersysteem werkt de hoogfrequente variatie van de zeewaterstand vertraagd en uitgemiddeld door onder het IJsselmeer. Gemiddeld is de zoutvracht over de opgelegde getijdecyclus hoger dan bij een opgelegde vaste waterstand op de Waddenzee. Gemiddeld is de gemeten waterstand bij Den Oever - buiten 0.16 m NAP. Voor een goede vergelijking is de getijde-berekening daarom vergeleken met een referentieberekening waarbij de Waddenzee waterstand op een vaste waarde van 0.16 m NAP is ingesteld. Vergeleken met deze berekening is de gemiddelde zoutvracht in de hoogfrequente berekening 8% hoger dan in de referentieberekening. De afwijking is beperkt en naar verwachting niet anders bij een andere zeespiegel. Het niet meenemen van deze kortdurende variaties leidt daarom niet tot andere conclusies voor de langjarige berekeningsresultaten.

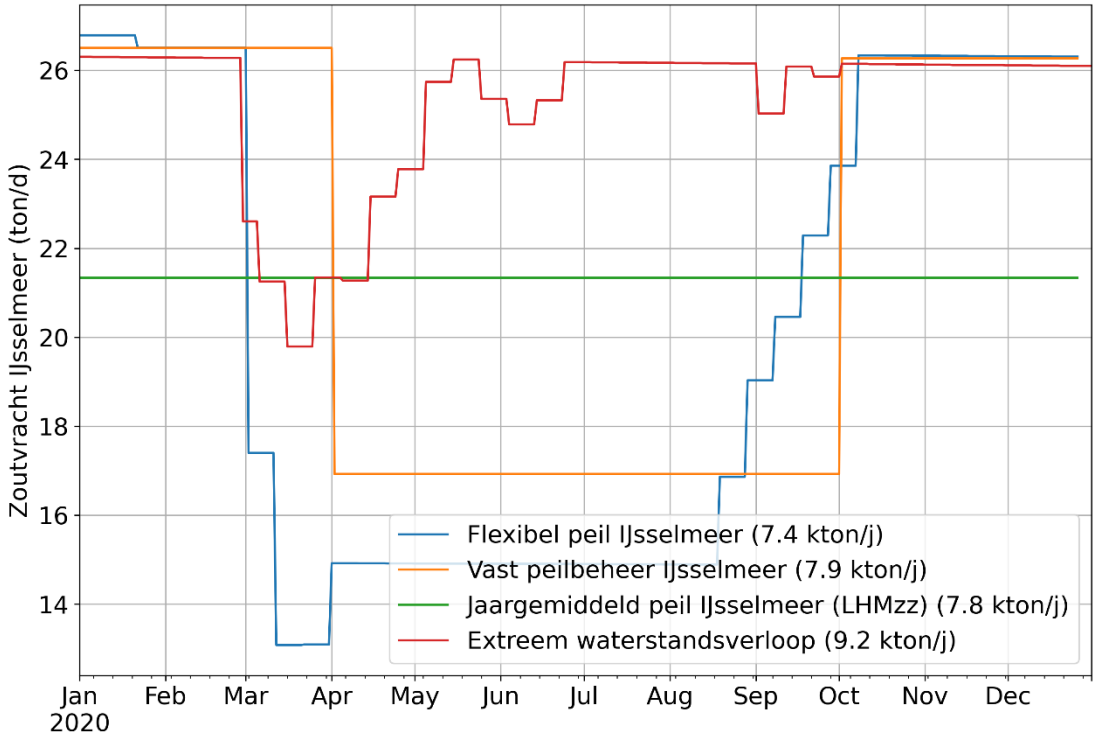


Figuur 5.1 Verloop berekende zoutvracht naar het IJsselmeer voor huidige situatie bij een opgelegde getijdecyclus in de Waddenzee. Waarden tussen haakjes in de legenda betreffen de jaartotale zoutvracht voor de verschillende waterstandsverlopen.

5.1.2 Waterstandsverloop IJsselmeer

De waterstand van het IJsselmeer beïnvloedt direct de kwelflux en daarmee de zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer. Voor het jaar 2020 zijn verschillende waterstandsverlopen gemodelleerd en vergeleken met een jaargemiddelde waterstand van -0.3 m NAP, zoals deze in de langjarige berekeningen is gehanteerd. De geïmplementeerde waterstandsverlopen zijn weergegeven in Figuur 3.13.

Figuur 5.2 geeft het verloop van de zoutvracht naar het IJsselmeer voor de verschillende waterstandsverlopen, in de legenda is tevens de jaartotale zoutvracht gegeven. De zoutvracht van de jaargemiddelde waterstand komt in jaartotaal goed overeen met het vaste peilbeheer (winter: -0.4 m NAP, zomer: -0.2 m NAP). Het flexibel peilbeheer leidt tot een 5% lagere jaartotale zoutvracht, door de eerdere opzet naar een hoger peil, en het in de zomer gehanteerde hogere peil (-0.15 m NAP in plaats van -0.2 m NAP). In een extreem droge zomer is de waterstand in het IJsselmeer lager dan gebruikelijk, en de kwelflux daarom hoger. De jaartotale zoutvracht is dan ook 19% hoger. Belangrijker is evenwel de hogere zoutvracht gedurende de droogteperiode, deze ligt zo'n 50% hoger dan in een normaal jaar (26 ton/d ten opzichte van 17 ton/d). Voor andere zichtwaarden van de zeespiegelstijging zal dit relatieve verschil afnemen, de uitzakking van het IJsselmeerpeil ten opzichte van het streefpeil ten opzichte van de waterstand op de Waddenzee wordt immers relatief kleiner bij hogere zeespiegel-zichtwaarden.



Figuur 5.2 Verloop berekende zoutvracht naar het IJsselmeer voor huidige situatie voor vier verschillende waterstandsverlopen: flexibel peilbeheer, vast peilbeheer, een jaargemiddelde waterstand en een waterstandsverloop in een extreem droog jaar. Waarden tussen haakjes in de legenda betreffen de jaartotale zoutvracht voor de verschillende waterstandsverlopen.

5.1.3 Gevoeligheidsanalyse directe zoutvracht

De zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer wordt gestuurd door het drukverschil tussen het watervoerend pakket onder het IJsselmeer en het IJsselmeer zelf, de weerstand tussen het watervoerend pakket en het IJsselmeer en de zoutconcentratie van het grondwater onder het IJsselmeer. Alle drie verschillen deze factoren tussen de verschillende realisaties, met een verschillende uitwerking op de zoutvracht naar het IJsselmeer.

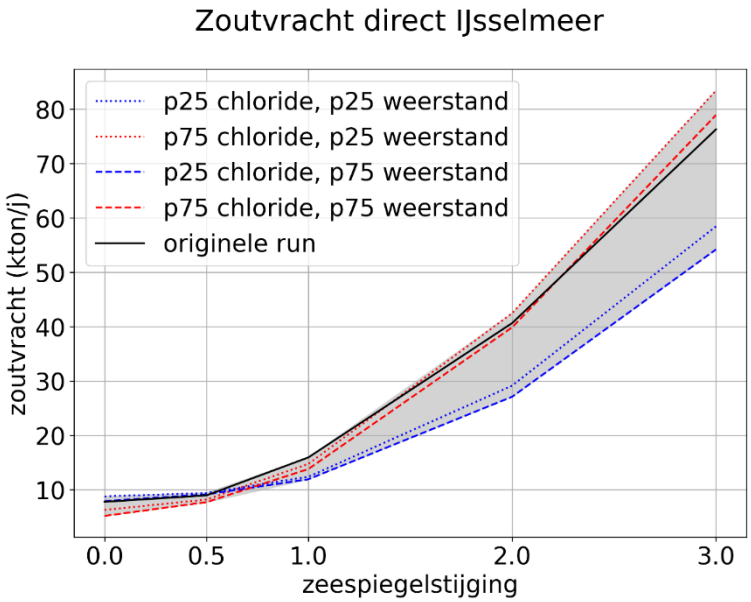
Tabel 5.1 geeft de totale berekende zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer voor de verschillende gevoeligheidsberekeningen en de originele berekening (langjarige berekening, landelijke resultaten). De zoutvracht varieert in de huidige situatie tussen 5.2 en 8.8 kton/j (originele berekening 7.8 kton/j), bij zichtwaarde 3 m ZSS is de zoutvracht toegenomen tot 54.2 tot 83.4 kton/j (originele berekening 76.3 kton/j). De toename van de zoutvracht met zeespiegelstijging is beduidend groter dan gemiddeld voor Nederland (Figuur 4.9). Dit komt door de – via het grondwater – sterke verbinding tussen de Waddenzee en het IJsselmeer.

De huidige zoutvracht vanuit grondwater op het IJsselmeer is in een eerdere studie op basis van analytische berekeningen ingeschat op 9 tot 20 kton/j (Boderie et al., 2012; Vergroesen, 2019). In deze studie wordt – op basis van een theoretisch betere methode – een lagere zoutvracht berekend dan de minimumwaarde uit Boderie et al. (2012), zelfs de maximale waarde uit de gevoeligheidsberekeningen ligt onder deze eerdere minimumwaarde.

Tabel 5.1 Berekende minimum en maximum totale zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer in de gevoeligheidsberekeningen ten opzichte van de originele berekening.

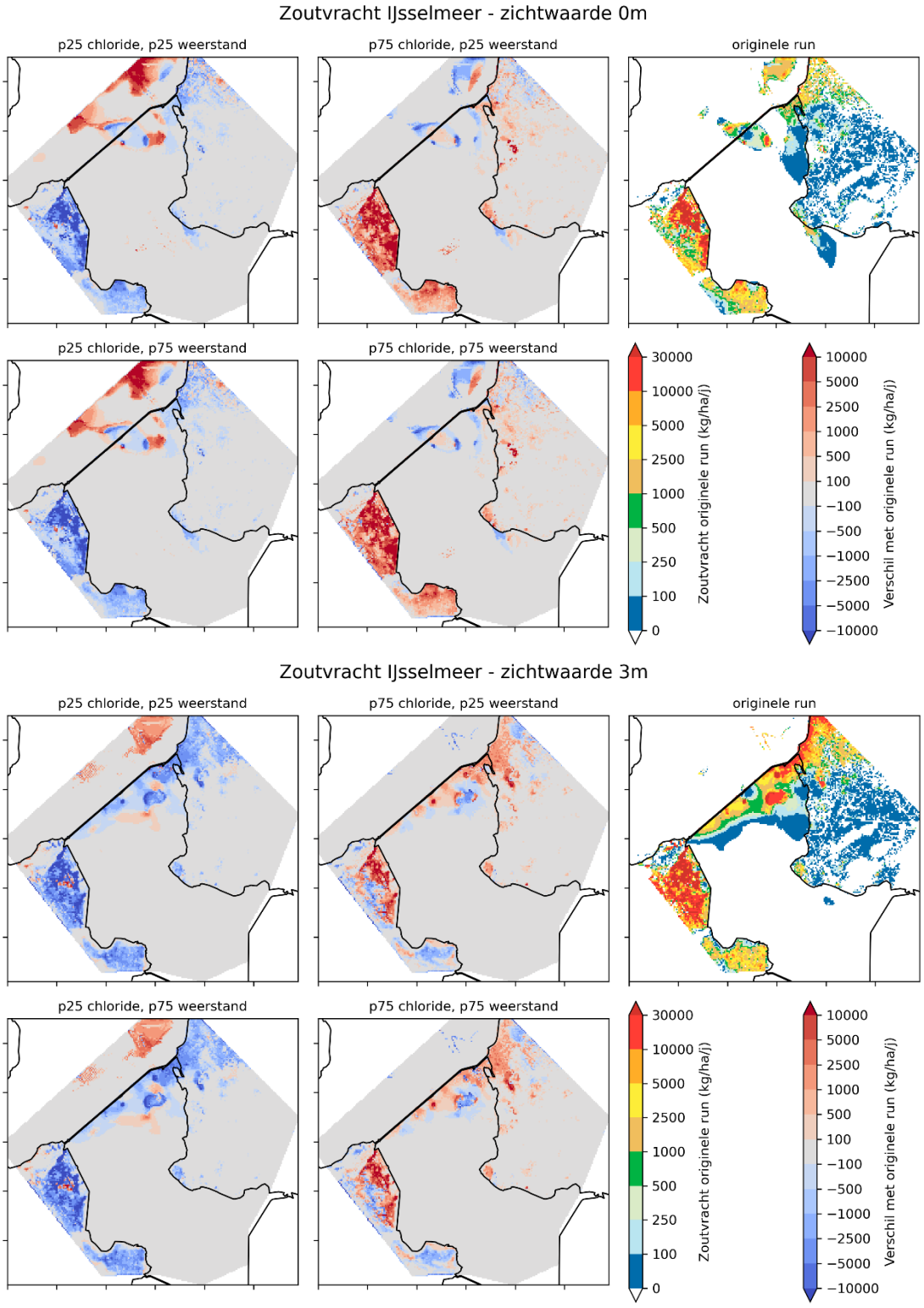
zichtwaarde (m ZSS)	zoutvracht originele berekening (kton/j)	minimum zoutvracht (kton/j) (% tov origineel)	maximum zoutvracht (kton/j) (% tov origineel)
0	7.8	5.2 (-33%)	8.8 (13%)
0.5	9.0	7.7 (-14%)	9.4 (5%)
1	16.0	11.9 (-25%)	16.0 (0%)
2	40.7	27.1 (-33%)	42.5 (4%)
3	76.3	54.2 (-29%)	83.4 (9%)

Figuur 5.3 laat het verloop van de zoutvracht naar het IJsselmeer voor de verschillende berekeningen zien. In het begin van de modelperiode geven de berekeningen met p25-chloride tegen-intuïtief de hoogste zoutvracht, en p75 chloride de laagste zoutvracht; de originele berekening bevindt zich hier tussen in. Gedurende de modelperiode draait dit om, vanaf zichtwaarde 2 m zeespiegelstijging levert de p75-chlorideberekening de hoogste zoutvracht. De originele run geeft een zoutvracht die dichter bij het maximum dan bij het minimum zit, voor zichtwaarde 1 m zeespiegelstijging is dit zelfs de berekening met de meeste zoutvracht naar het IJsselmeer. Dit patroon is te verklaren door het samenspel tussen zoutconcentratie, dichtheid, drukverschil en de kwelflux. In de zoetere (p25 chloride) berekeningen is de dichtheid van het grondwater in het watervoerende pakket lager. De opwaartse drijfkracht van dit zoetere water werkt mee met de richting van de grondwaterstroming, waardoor de kwelflux relatief hoog is en leidt tot een hogere zoutvracht. In de zoutere (p75 chloride) berekeningen werkt de dit andersom, heeft het grondwater dat omhoog gedrukt wordt een grotere dichtheid dan de mediane beginwaarden en is de kwelflux daardoor relatief laag, leidend tot een lagere zoutvracht naar het IJsselmeer. De zoutvracht varieert weinig tussen de verschillende deklaagweerstand-berekeningen met een gelijke initiële chlorideverdeling. De onzekerheid in de initiële chlorideverdeling is dominant in de onzekerheid in de zoutvracht naar het IJsselmeer.

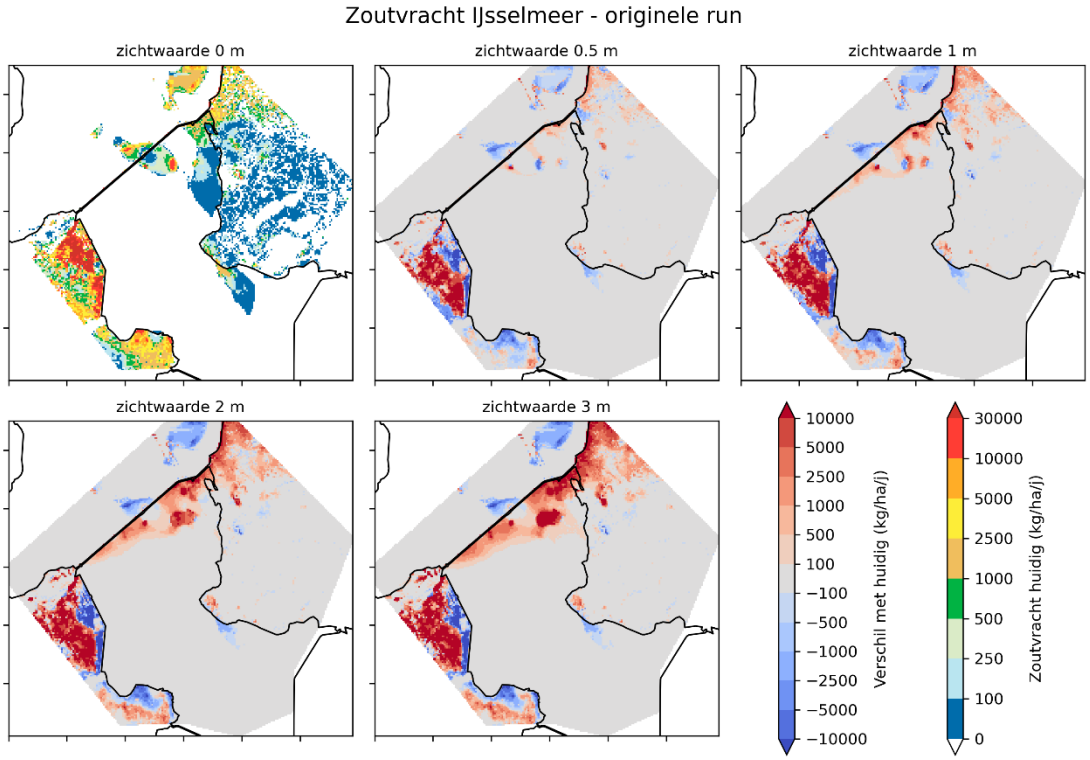


Figuur 5.3 Totale berekende zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer voor de verschillende gevoeligheidsberekeningen en de originele berekening.

Figuur 5.4 toont het ruimtelijk patroon van zoutvracht naar het IJsselmeer voor zichtwaarden 0 en 3 m zeespiegelstijging, ten opzichte van de originele berekening. Figuur 5.5 geeft het verloop van de zoutvracht voor de verschillende zichtwaarden voor de originele berekening. De zoutvracht naar het IJsselmeer lijkt zich in de huidige situatie te beperken tot de noordpunt van het IJsselmeer langs de Friese IJsselmeerkust en bij de Afsluitdijk bij Breezanddijk. In de 25-percentiel chlorideberekeningen is er in de huidige situatie ook sprake van zoutvracht in het gebied tussen Breezanddijk en de Friese IJsselmeerkust. Bij 3 m zeespiegelstijging neemt het gebied met zoutvracht sterk in omvang toe: langs de gehele Afsluitdijk is er nu sprake van zoutvracht naar het IJsselmeer. Door de invloed van de Wieringermeer is de zoutvracht aan de zuidkant van de Afsluitdijk wel beduidend kleiner dan in de noordhoek. Chloride concentraties van het opkwellende grondwater kunnen oplopen tot 10 g/L. Het opkwellende grondwater betreft grotendeels ‘oud’, voor de afsluiting geïnfiltreerd water. Met een stroomsnelheid in de orde van maximaal meters per dag komt grondwater dat oorspronkelijk in de Waddenzee is geïnfiltreerd niet verder dan honderden meters vanaf de Afsluitdijk.



Figuur 5.4 Verschil zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer voor zichtwaarde 0 m (boven) en 3 m zeespiegelstijging (onder) voor de verschillende gevoeligheidsberekeningen ten opzichte van de originele berekening. Zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer in de originele berekening is steeds rechtsboven weergegeven.



Figuur 5.5 Zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer voor verschillende zichtwaarden zeespiegelstijging voor de originele berekening. Zoutvracht voor zichtwaarde 0 m zeespiegelstijging is absoluut weergegeven, de latere zichtwaarden zijn ten opzichte van zichtwaarde 0 m.

5.2 Regionale analyses – Volkerak-Zoommeer

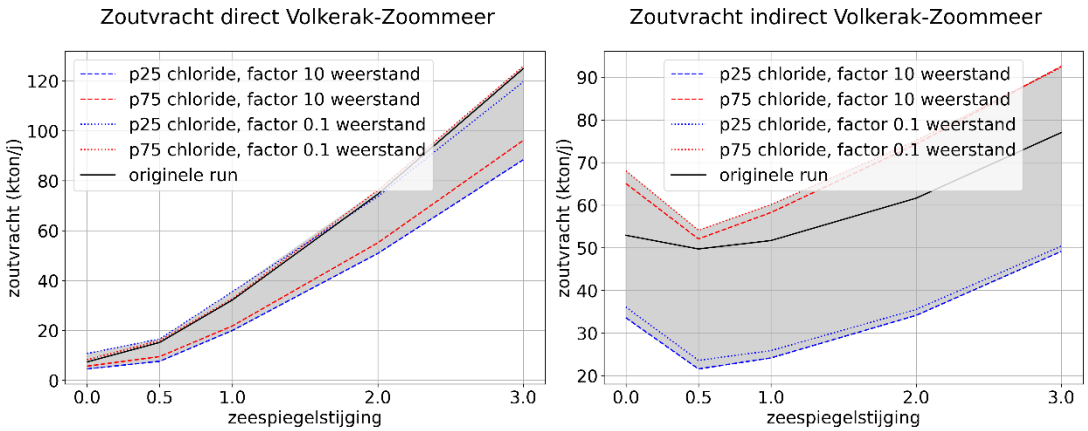
Voor het Volkerak-Zoommeer is een gevoeligheidsanalyse gedaan, waarbij combinaties van het 25- en 75-percentiel van de initiële chlorideverdeling en een tienvoudige verlaging dan wel verhoging van de weerstand van het Volkerak-Zoommeer voor de gehele modelperiode zijn doorgerekend. Tabel 5.2 geeft de berekende directe en indirecte zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer voor de gevoeligheidsberekeningen ten opzichte van de originele berekening (langjarige landsdekkende berekening). De huidige directe zoutvracht op het Volkerak-Zoommeer is eerder ingeschat op basis van mondelinge informatie op 29 kton/j (Vergroesen, 2020). De indirecte zoutvracht vanuit het grondwater is grotendeels op basis van meetgegevens bepaald als 54 kton/j (Vergroesen, 2020). De in deze studie berekende directe belasting is beduidend lager (7.3 kton/j, tussen 4.5 en 10.7 kton/j) dan vastgesteld door Vergroesen (2020). De hier berekende waarden zijn theoretisch beter onderbouwd. De in de originele berekening berekende indirecte belasting (52.9 kton/j) komt zeer goed overeen met Vergroesen (2020), wel geven de gevoeligheidsberekeningen een duidelijke onzekerheid van zo'n ± 30% rondom deze waarde.

Figuur 5.6 geeft het verloop van de totale directe en indirecte zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer bij verschillende zichtwaarden van de zeespiegelstijging. Voor de directe zoutvracht komt de belangrijkste onzekerheid voor rekening van de aangenomen factor voor de bodemweerstand van het Volkerak-Zoommeer, voor de indirecte zoutvracht is dit juist de onzekerheid in de initiële chlorideverdeling. De toename van de zoutvracht met stijgende zeespiegel is voor de directe zoutvracht relatief veel groter dan voor het afwaterende gebied. Het Volkerak-Zoommeer ligt direct aan de meestijgende Oosterschelde en staat via het grondwater (eerste watervoerende pakket) in directe verbinding met de Oosterschelde.

Voor het afwaterende gebied geldt dit minder, slechts een aantal gebieden worden sterk beïnvloedt door zeespiegelstijging (met name Tholen en in mindere mate Flakkee laten een toename van de zoutvracht zien). Door autonome processen neemt de zoutvracht in het afwaterende gebied tot zichtwaarde 0.5 m zeespiegelstijging zelfs enigszins af (met name in West-Brabant), om later weer toe te nemen.

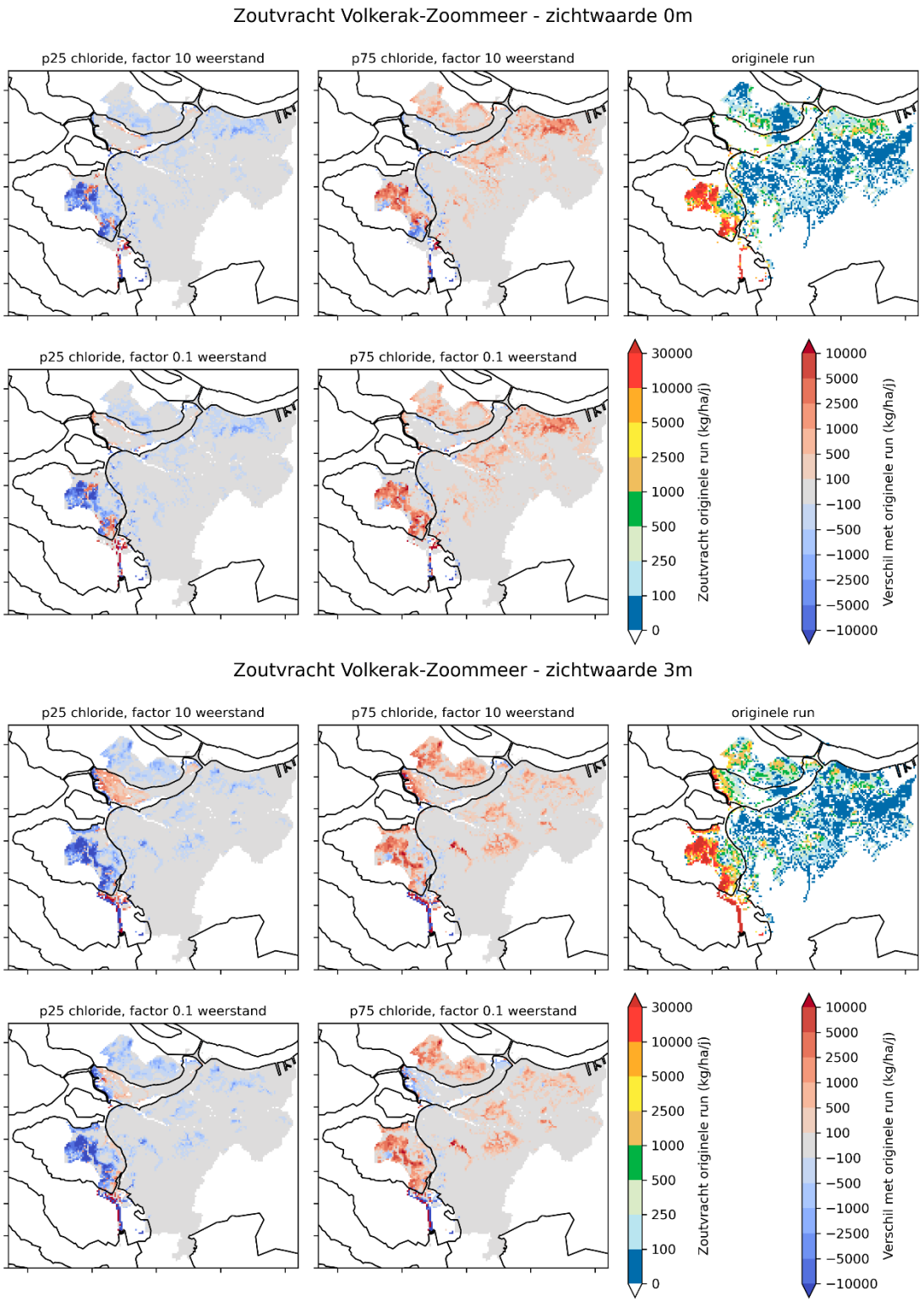
Tabel 5.2 Berekende minimum en maximum totale directe en indirecte zoutvracht vanuit het grondwater naar het (afwaterend gebied van het) Volkerak-Zoommeer in de gevoeligheidsberekeningen ten opzichte van de originele berekening.

	Direct naar Volkerak-Zoommeer			Indirect (afwaterend gebied VZM)		
zichtwaarde (m ZSS)	**zoutvracht originele berekening (kton/j)**	**minimum zoutvracht (kton/j) (% tov orig)**	**maximum zoutvracht (kton/j) (% tov orig)**	**zoutvracht originele berekening (kton/j)**	**minimum zoutvracht (kton/j) (% tov orig)**	**maximum zoutvracht (kton/j) (% tov orig)**
0	7.3	4.5 (-38%)	10.7 (46%)	52.9	33.6 (-37%)	68.0 (29%)
0.5	15.2	7.6 (-50%)	16.6 (9%)	49.7	21.6 (-57%)	54.1 (9%)
1	32.2	19.9 (-38%)	35.5 (10%)	51.7	24.1 (-53%)	60.1 (16%)
2	74.6	50.8 (-32%)	76.2 (2%)	61.6	34.1 (-45%)	75.1 (22%)
3	124.9	88.4 (-29%)	125.8 (1%)	77.0	49.1 (-36%)	92.5 (20%)

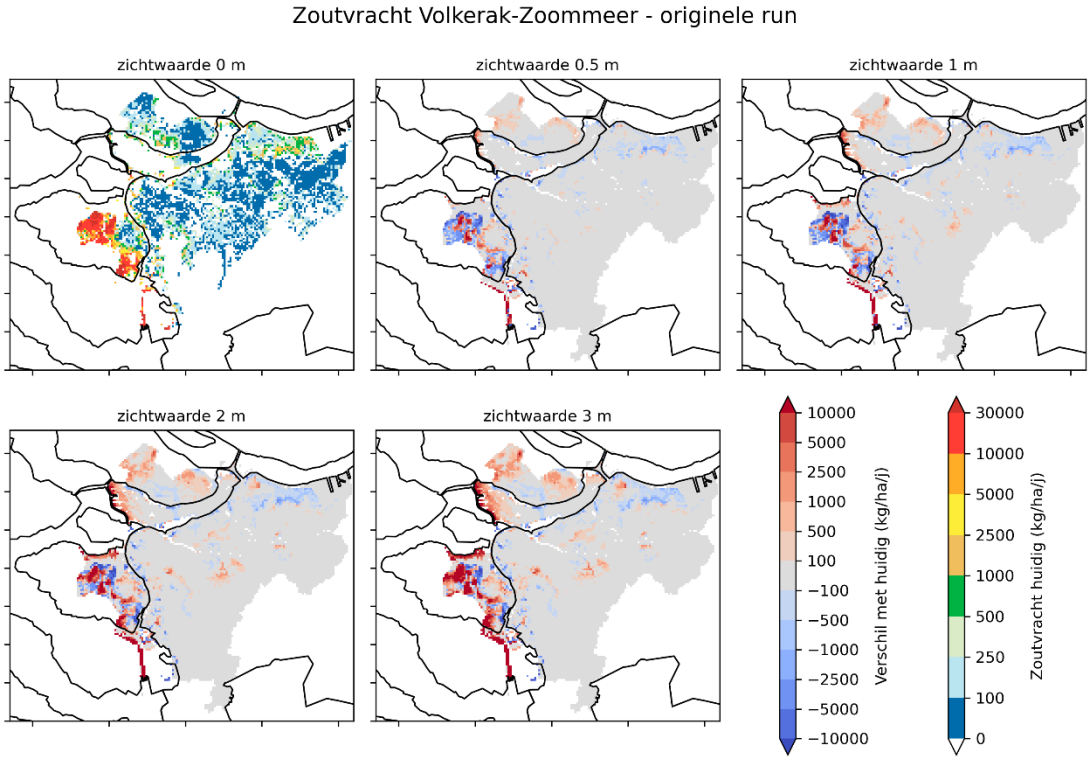


Figuur 5.6 Zoutvracht direct (links) en indirect (via afwaterende polders, rechts) naar het Volkerak-Zoommeer, voor de vier verschillende gevoeligheidsberekeningen en de originele berekening.

Het ruimtelijk patroon van zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer ten opzichte van de originele berekening voor zichtwaarden 0 en 3 m zeespiegelstijging wordt gegeven in Figuur 5.7. Figuur 5.8 geeft het verloop van de zoutvracht in de originele berekening voor de verschillende zichtwaarden. De zoutvracht direct naar het Volkerak-Zoommeer concentreert zich langs de rand van het Volkerak, en ten zuiden van gemaal Galathee (Oostflakkee). In het Zoommeer is er sprake van sterke zoutvracht langs de gehele lengte van de Oesterdam. Merk op dat de zoutvracht in de figuren alleen wordt getoond voor het Volkerak-Zoommeer en het hierop afwaterende gebied. Zoutvracht in het Markiezaatsmeer verder ten oosten van de Oesterdam wordt hierom niet getoond. Zoutvracht in het afwaterende gebied is in de huidige situatie het grootst op Tholen en in mindere mate op Oostflakkee en langs het Haringvliet. Bij hogere zichtwaarden neemt de directe zoutvracht in het Volkerak langs de Philipsdam sterk toe, in het Zoommeer met name langs de Oesterdam. De indirecte zoutvracht neemt met name op Tholen toe, hier zijn echter ook gebieden waar de zoutvracht autonoom afneemt. De zoutvracht in West-Brabant neemt met name langs het Haringvliet af.



Figuur 5.7 Verschil zoutvracht vanuit het grondwater naar het Volkerak-Zoommeer en afwaterend gebied voor zichtwaarde 0 m (boven) en 3 m zeespiegelstijging (onder), voor de verschillende gevoeligheidsberekeningen ten opzichte van de originele berekening. Zoutvracht vanuit het grondwater in de originele berekening is steeds rechtsboven weergegeven. Let op dat de zoutvracht alleen wordt getoond voor het Volkerak-Zoommeer en het op het Volkerak-Zoommeer afwaterende gebied.



Figuur 5.8 Zoutvracht vanuit het grondwater naar het Volkerak-Zoommeer en afwaterend gebied voor verschillende zichtwaarden zeespiegelstijging voor de originele berekening. Zoutvracht voor zichtwaarde 0 m zeespiegelstijging is absoluut weergegeven, de latere zichtwaarden zijn ten opzichte van zichtwaarde 0 m. Let op dat de zoutvracht alleen wordt getoond voor het Volkerak-Zoommeer en het op het Volkerak-Zoommeer afwaterende gebied.

6 Discussie en conclusies

6.1 Beantwoording vraagstelling

Wat is de invloedssfeer van een zeespiegelstijging van 0.5 m en meer op de landinwaartse grondwatersituatie; hoe neemt de stijghoogte en (freatische) grondwaterstand toe?
De invloedssfeer van zeespiegelstijging op de landinwaartse grondwatersituatie strekt zo'n 10 tot 20 km vanaf de kust en vanaf de oevers van meestijgende binnenwateren. De uitgestrektheid van de invloedssfeer wordt bepaald door kenmerken van de ondergrond en zo goed als niet door de mate van zeespiegelstijging. De mate van zeespiegelstijging bepaalt alleen de sterkte van de veranderingen in deze zone. Figuur 4.3 geeft de invloedssfeer van een zeespiegelstijging, in dit geval voor zichtwaarde 3 m.

Hoe verandert de kwelflux (volumeflux grondwater) door zeespiegelstijging ten opzichte van de huidige situatie?
De verandering van de kwel- / infiltratieflux volgt uit de bovengenoemde invloedsfeer van zeespiegelstijging. Landinwaarts hebben ook autonome ontwikkelingen (inclusief bodemdaling) invloed op kwel en infiltratie. De toename van de kwelflux bedraagt dicht langs de kust maximaal 2 mm/d bij zichtwaarde 3 m zeespiegelstijging; de toename neemt exponentieel af met toenemende afstand van de kust. Verandering van kwel en infiltratie zijn weergegeven in Figuur 4.5.

En hoe werkt deze verandering door op de zoutvracht (zoutconcentratie maal volumeflux grondwater)
Toename van de kwelflux zorgt momentaan voor een toename van de zoutvracht naar het oppervlaktewater, omdat meer brak grondwater naar de oppervlakte stroomt. Over een langere tijdschaal trekt hierdoor ook dieper, zouter grondwater naar de oppervlakte, waardoor ook de zoutconcentratie van de kwel toeneemt. Hierdoor is een versnelling zichtbaar in de zoutvracht ten opzichte van de zeespiegelstijging (Figuur 4.9). Het berekende ruimtelijke patroon van de verandering van de zoutvracht is weergegeven in Figuur 4.7. De onzekerheid in de berekende zoutvracht wordt ingeschat op zo'n ± 7% (interkwartielafstand, afstand tussen 25- en 75-percentiel), in brakke kwelgebieden kan de onzekerheid in zoutvracht een factor twee bedragen.

Hoe werkt de verandering in zoutvracht door op de doorspoelbehoefte van regionale poldergebieden?
Om huidige concentraties in het regionale oppervlaktewater bij toegenomen zoutvracht te handhaven neemt de doorspoelwatervraag toe (Figuur 4.14). Totale polder-doorspoelwatervraag neemt toe van 20 m^3/s in de huidige situatie, tot ongeveer 50, 100 en 350 m^3/s voor respectievelijke zichtwaarden 0.5 m, 1 m en 3 m zeespiegelstijging. Onzekerheid in de berekende polder-doorspoelwatervraag wordt ingeschat op zo'n ± 25% (interkwartielafstand). Boezem-doorspoeling neemt in de berekeningen toe van 40 m^3/s in de huidige situatie tot 75 m^3/s bij 3 m zeespiegelstijging.

Wat is de directe en indirecte (via het afwaterende gebied) bijdrage vanuit het grondwater aan de zoutvracht van het hoofdwatersysteem en hoe verandert deze bijdrage bij zeespiegelstijging (voor deelgebieden IJsselmeergebied en Volkerak-Zoommeer)?
De directe zoutvracht (in massa chloride per tijdeenheid) vanuit grondwater op het IJsselmeer neemt toe van huidig 8 tot 75 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging, op het Volkerak-Zoommeer neemt deze toe van huidig 7 tot 125 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging. De indirecte zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer neemt toe van huidig 53 tot 77 kton/j bij 3 m zeespiegelstijging (Tabel 5.1, Tabel 5.2). De relatieve toename van de directe zoutvracht met zeespiegelstijging is hoger dan landelijk gemiddeld, door de open grondwaterconnectie van de twee gebieden met het buitenwater. De indirecte zoutvracht neemt juist relatief beperkt toe, de toename is geconcentreerd in Tholen en in mindere mate Oostflakkee.

Uitzakking van het waterpeil in het IJsselmeer in een extreem droog jaar geeft een toename van zo'n 50% op de zoutvracht vanuit het grondwater (Figuur 5.2), bij hogere zichtwaarden van de zeespiegelstijging zal deze toename bij een uitzakkend IJsselmeerpeil relatief kleiner worden.

Wat is de onzekerheid rond de in deze studie berekende zoutvrachten?
De modelonzekerheid rond de in deze studie berekende zoutvrachten wordt ingeschat op ± 7% (interkwartielafstand), de onzekerheid rond de berekende polder-doorspoeling op ± 25% (interkwartielafstand). Dit zijn resultaten van een pragmatische kwantitatieve onzekerheidsanalyse, waarbij niet alle bronnen van onzekerheid in beschouwing konden worden genomen. Zie ook de volgende paragraaf voor een bredere beschouwing van de onzekerheid in de resultaten.

Voor de zoutvracht naar het IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer is de onzekerheid in de berekende zoutvracht met een gevoeligheidsanalyse onderzocht. De bandbreedte in de berekende huidige directe zoutvracht is voor het IJsselmeer 5.2 tot 8.8 kton/j (Tabel 5.1). Voor het Volkerak-Zoommeer is deze bandbreedte 4.5 tot 10.7 kton/j (Tabel 5.2). De in deze studie berekende huidige directe zoutvracht is voor zowel het IJsselmeer als het Volkerak-Zoommeer aan de lage kant vergeleken met eerdere studies, zelfs wanneer de onzekerheid in zoutvracht in beschouwing wordt genomen. De in deze studie berekende waarden zijn evenwel theoretisch beter onderbouwd, eerdere getallen betroffen eenvoudige analytische vergelijkingen en expert-inschattingen. De huidige indirecte zoutvracht naar het Volkerak-Zoommeer komt goed overeen met een op meetgegevens gebaseerde waarde voor de indirecte zoutvracht (Vergroesen, 2020). Het in de langjarige berekeningen niet meenemen van getijdefluctuatie op de Waddenzee lijkt een beperkte (8%) onderschatting van de zoutvracht naar het IJsselmeer te geven.

6.2 Beschouwing onzekerheid

Deze studie geeft inschattingen van de zoutvracht vanuit grondwater en de daarmee gepaard gaande watervraag (doorspoelbehoefte) bij een stijgende zeespiegel. Deze inschattingen zijn onzeker, door onzekerheid in de gebruikte modellen, invoergegevens, en gemaakte scenariokeuzen. Met behulp van een Monte Carlo aanpak is een deel van deze onzekerheid gekwantificeerd: namelijk de gevoeligheid voor onzekerheid in begincondities, snelheid van zeespiegelstijging en parameters voor de doorspoelberekening. Deze paragraaf geeft een bredere beschouwing van de onzekerheid in de resultaten.

6.2.1 Onzekerheid in de gebruikte modellen en invoergegevens

Een model is altijd een versimpeling van de werkelijkheid, dat is voor de gehanteerde modellen (LHM zoet-zout 4.1, LHM 4.1) niet anders. In deze modellen ligt de wetenschappelijke kennis van de fysica van grondwaterstroming besloten, inclusief stoftransport en het effect van dichtheid op grondwaterstroming. Met vertrouwen in de fysica is er ook vertrouwen in de fysische respons in het model op veranderingen in randvoorwaarden (bijvoorbeeld een zeespiegelstijging). Daarbij is er natuurlijk sprake van onzekerheid rond de berekeningen. De onzekerheid in deze modellen zit vooral in de (geohydrologische) schematisatie, invoerparameters, en met de gekozen resolutie gepaard gaande schaalproblematiek (processen spelen op kleinere schaal dan de modelschaal). In kwaliteitsberekeningen werken onzekerheden vanuit de kwantiteitsberekeningen door, naast onzekerheden in additioneel benodigde invoergegevens. Langjarige zoet-zout grondwaterberekeningen hebben daarbij te maken met het feit dat veranderingen in de startcondities zeer lang na-ijlen in de berekeningen. Uit de in deze studie uitgevoerde onzekerheidsanalyses blijkt dat de door zeespiegelstijging optredende berekende veranderingen voor grondwaterstroming en zoutvracht duidelijk groter zijn dan de ruis of onzekerheid in de resultaten (zie bijvoorbeeld Figuur 4.22, Figuur 5.3 en Figuur 5.6). Er kan daarom worden geconcludeerd dat de resultaten van deze studie op regionale schaal bruikbaar zijn.

De plausibiliteit van beide gebruikte modellen is recent uitgebreid extern en intern getoetst. Hieronder volgt een opsomming van de voor deze studie meest relevante bevindingen van deze toetsingen. De bevindingen geven regionaal specifieke kanttekeningen bij de resultaten. Voor LHM zoet-zout geldt dat de bruikbaarheid van dit model specifiek voor deze studie nader is onderzocht (Delsman, 2020), en dat gedane aanbevelingen in de toegepaste modelversie zijn verwerkt.

Het LHM (zoet) is in 2020 gevalideerd (HKV et al., 2021). De belangrijkste conclusies van deze validatie waren (selectie gegeven analyses in deze rapportage):

- Het LHM 4.1 presteert globaal hetzelfde als eerdere modelversies van het LHM.
- Het LHM 4.1 voldoet wisselend aan vooraf gestelde prestatiecriteria. Voor grondwater voldoet het LHM qua afwijking in GxG en stijghoogte, maar kent teveel uitschieters en voldoet niet qua grondwaterdynamiek en recessieverloop (uitzakking grondwaterstand in droge perioden). Berekende verdamping voldoet voor meetlocaties, grotere waterbalansgebieden en vergeleken met satellietmetingen voor droge jaren op regionale schaal, maar niet voor gemiddelde jaren. Berekende af- en aanvoeren voldoen voor grotere gebieden en afvoeren in het hoofdwatersysteem, niet voor afvoeren in het regionale systeem en aanvoeren. De berekening van de verzilting in het oppervlaktewater voldoet niet.
- Nuancering bij het verziltingsresultaat is de beperkte beschikbaarheid van validatiegegevens.
- Structureel te lage grondwaterstanden in duingebieden. Zie ook de volgende opsomming voor LHM zoet-zout: resultaten van deze studie zijn niet direct toepasbaar voor de duingebieden.
- Oppervlaktewater- en drainagesystemen in de kustzone van Noord-Nederland dienen verbeterd te worden.

De belangrijkste verbeterpunten zijn opgepakt in de eind 2021 opgeleverde LHM versie 4.2 (Janssen et al., 2022). Deze versie kon gezien het tijdspad evenwel niet worden toegepast in de huidige studie.

De parameterisatie van het LHM zoet-zout is gebaseerd op het LHM. Eind 2020 is de toepasbaarheid van de toenmalige versie van het LHM zoet-zout (4.0) voor gebruik binnen Kennisprogramma Zeespiegelstijging nader onderzocht (Delsman, 2020). Op basis van de bevindingen van Delsman (2020) is voor de huidige studie LHM zoet-zout geüpdatet naar LHM versie 4.1, en is de inspeeltijd van de initiële chloridevertdeling verkort (America et al., 2021). De plausibiliteit van LHM zoet-zout 4.1 is – los van de hierboven beschreven validatie LHM – getoetst door vergelijking met rekenresultaten van LHM 4.1, kwelbelasting van en zoutvracht naar enkele polders en een analyse van de (autonome) verplaatsing van de zoet-zoutverdeling. Naar deze studie vertaalde relevante conclusies uit de plausibiliteitstoets en rapportage van LHM zoet-zout 4.0 (Delsman et al., 2020) en de veranderingsrapportage LHM zoet-zout 4.1 (America et al., 2021) zijn:

- In zijn algemeenheid is LHM zoetzout 4.1 toepasbaar geacht voor berekeningen op landelijke / bovenregionale schaal ten behoeve van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.
- LHM zoet-zout is goed geïmplementeerd, verschillen tussen LHM zoet-zout en LHM zijn klein of verklaarbaar vanuit conceptuele verschillen (dichtheid, 3D versus quasi-3D, breuken en anisotropie).
- Uit vergelijking met beperkt gemeten zoutvrachten lijkt met name de zoutvracht via wellen te worden onderschat.
- De in LHM zoet-zout 4.1 geïmplementeerde pragmatische correctie van de zoet-zoutverdeling beperkt grote inspeelveranderingen in de zoet-zoutverdeling.
- LHM zoet-zout is niet toepasbaar voor de duingebieden zonder additionele analyse of kalibratie. Dit geldt ook voor de resultaten van deze studie, deze zijn niet toepasbaar voor de duingebieden.
- Door interpolatieartefacten in de 3D chloridevertdeling kunnen niet-realistische veranderingen van zoutvracht worden berekend, zoals bijvoorbeeld een afname van de zoutvracht in diepe polders als de Horstermeer. In deze studie is dit zichtbaar in een afname over de tijd van de zoutvracht naar verschillende diepe polders, zoals de Horstermeer, maar ook bijvoorbeeld de MT-polder en polder Mijdrecht. Deze interpolatieartefacten spelen met name bij scherpe zoet-zoutverschillen van beperkte omvang, zoals het naar een relatief kleine diepe polder opkegelende grondwater.
- In Zeeland en Friesland treden autonoom uitzakkingen van het zoet-zout grensvlak op, terwijl zeker voor Zeeland de initiële zoet-zoutverdeling goed bekend is (FRESHEM (Delsman et al., 2018)) en in evenwicht zou moeten zijn met de geldende randvoorwaarden. Dit verdient nader onderzoek. De autonome uitzakkingen zijn in deze studie in Zeeland goed zichtbaar, voor Zeeland dient naar het geïsoleerde effect van zeespiegelstijging te worden gekeken.
- Grondwaterstijghoogten in het LHM zijn niet gecorrigeerd voor dichtheidsverschillen. In de representatieve jaar-berekeningen voor de zichtwaarden kan de berekende kwel en daarmee zoutvracht daardoor afwijken van kwel en zoutvracht zoals berekend door LHM zoet-zout.
- De gehanteerde punt-mediane 3D zoutconcentratie in het grondwater als initiële zoutconcentratie in de LHM zoet-zout berekeningen is zoeter dan de punt-gemiddelde zoutconcentratie in de 3D zoet-zoutverdeling. Dit komt door de gehanteerde lognormaal verdeelde onzekerheid rondom metingen in de interpolatieprocedure. Deze fout is in deze studie nader onderzocht. Voor heel Nederland lijkt deze fout neer te komen op een onderschatting van de zoutvracht van zo'n 3%, maar de onderschatting zal voor specifieke gebieden groter zijn.

Paragraaf 6.2.3 geeft een synthese van de betekenis van de verschillende onzekerheidsbronnen voor de uitkomsten van deze studie.

6.2.2 Onzekerheid in methode en scenarioaannames

In de gehanteerde methode zijn verschillende aannames gedaan, die doorwerken op het eindresultaat. Voor een aantal van deze aannames is met een Monte Carlo analyse kwantitatief gemaakt wat het effect op de resultaten is. Dit was niet voor alle aannames mogelijk.

- In deze studie is de toegenomen watervraag voor doorspoeling in de boezems gerelateerd aan hetzij de verwachte toegenomen zoutlek door sluizen, hetzij de totale verandering van zoutvracht in het gebied. Deze benadering houdt geen rekening met waar op de boezem zout wordt uitgeslagen, en waar zoet water wordt gevraagd voor doorspoeling. Door de manier waarop watervraag door het Distributiemodel wordt berekend kan dit betekenen dat hergebruik van uitgeslagen doorspoelwater elders in het boezemsysteem wordt overschat, en watervraag aan het hoofdwatersysteem juist wordt onderschat. Deze studie laat grote verschillen (in het extreemste geval oplopend tot factoren) zien tussen de gesommeerde polder-doorspoeling in een gebied en de – door het Distributiemodel – gestelde lagere watervraag aan het hoofdwatersysteem.
- De snelheid van zeespiegelstijging heeft – door de langzame verplaatsing van de zoet-zoutverdeling – invloed op de uiteindelijke zoutvracht. Dit effect is op eenvoudige wijze, en alleen in de richting van een snellere zeespiegelstijging, in beeld gebracht in de onzekerheidsanalyse. Ondanks dat de zoutvracht bij snellere zeespiegelstijging voor een gegeven zichtwaarde lager uitvalt dan bij de in het scenario gehanteerde gematigde zeespiegelstijging, komt dit moment uiteraard wel sneller in de tijd, met minder tijd om hier op in te spelen met adaptatiemaatregelen.
- Bodemdaling is meegenomen als de verwachte bodemdaling bij voortgaande peilindexatie, tot 2100, waarna bodemdaling in de berekeningen stopt. Het is de vraag of peilindexatie daadwerkelijk voortduurt tot 2100, en of de mate van bodemdaling daarmee zo groot is als in deze studie aangenomen. Daarbij lijkt de bijdrage van bodemdaling op de verzilting van het grondwatersysteem op basis van deze studie overigens beperkt.
- Meteorologie is in de langjarige berekeningen en in de representatieve jaar-berekeningen verondersteld niet te veranderen. Meteorologie heeft met name effect op de berekende watervraag voor peilbeheer en beregening, deze worden in vervolgberekeningen van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging gevarieerd en daarmee wordt meteorologie meegenomen. Meteorologie heeft echter, via veranderende grondwaterstanden, ook effect op kwel en daarmee op de zoutvracht. Dit effect is op basis van eerdere studies (bijvoorbeeld Oude Essink et al. (2010)) van een kleinere orde gebleken dan het effect van zeespiegelstijging en daarom niet meegenomen. In zijn algemeenheid zal voor een droger toekomstig klimaat de kweldruk en daarmee de zoutvracht wat groter zijn dan hier berekend, en voor een natter toekomstig klimaat kleiner.
- De module TRANSOL (zout in het ondiepe grondwater en de wortelzone) is ingespeeld met successievelijk 25 keer het droge jaar 2003. De uitgangssituatie voor zoutconcentratie in het ondiepe grondwater is daarmee zouter (want minder gemengd met zoete neerslag en kwel relatief belangrijker) dan wanneer een klimaat-representatieve lange reeks zou zijn gebruikt. Het verschil in zoutvracht tussen de in deze studie ingespeelde TRANSOL en een ‘klimaatrepresentatief ingespeeld’ TRANSOL bedraagt ongeveer 25%. Dit verschil beïnvloedt de in dit rapport gepresenteerde verschillen in zoutvracht niet, deze zijn allemaal óf op basis van de langjarige LHM zoet-zout berekening, waarin TRANSOL niet wordt gebruikt, óf ten opzichte van de huidige situatie die ook op deze manier is ingespeeld.

- Het gekozen representatieve jaar 2003 is een droog jaar met een herhalingstijd van 10 jaar. Dit is het meest representatief voor situaties waarin mogelijk tekorten optreden, maar de berekende zoutvracht in 2003 is – door de lagere uitspoeling in dit droge jaar – wel lager dan de langjarig gemiddelde zoutvracht. Dit werkt naar verwachting niet significant door op de berekende veranderingen in doorspoelwatervraag.

6.2.3 Synthese en implicaties voor vervolg

In zijn algemeenheid zijn verschillende onzekerheden te onderscheiden die effect hebben op de berekeningen. Deze onzekerheden zijn in voorgaande paragrafen beschouwd, een aantal onzekerheden in de modelparameterisatie en aannames zijn daarbij kwantitatief onderzocht. De gedane aannames in de aanpak zorgen zowel voor hogere als lagere kwelbelasting en zoutvracht. Uit de kwantitatieve onzekerheidsanalyses is daarbij te concluderen dat de in deze studie berekende effecten van zeespiegelstijging duidelijk groter zijn dan de onzekerheid rondom deze effecten. De resultaten zijn dan ook goed bruikbaar op landelijke tot regionale schaal. Voor specifieke gebieden zoals de duingebieden moeten de resultaten evenwel met omzichtheid worden geïnterpreteerd.

Wel is duidelijk dat de resultaten sterk afhankelijk zijn van het gekozen beleidsarme scenario met onveranderende meteorologie. De toekomstige ontwikkeling zal per definitie anders zijn dan zoals aangenomen in het berekende scenario. Het is dan ook belangrijk de resultaten in die context te duiden. In vervolgberekeningen van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging worden het effect van enkele van deze scenario-aannamen (met name meteorologie en waterbeschikbaarheid) op de houdbaarheid van de Voorkeurstrategie Zoetwater verder onderzocht.

In deze vervolgberekeningen dient de spreiding in de hier gepresenteerde resultaten te worden meegenomen. Met name van belang zijn de – regionaal gedifferentieerde – spreiding in de zoutvracht en de doorspoelbehoefte. Voor die laatste is niet alleen de berekende spreiding in polder-doorspoelbehoefte van belang, maar ook in welke mate hergebruik van doorspoelwater in het regionale systeem leidt tot een watervraag aan het hoofdwatersysteem. De mate van hergebruik zoals berekend door het Distributiemodel wordt in ieder geval voor hogere zichtwaarden van zeespiegelstijging als niet betrouwbaar (te hoog) geacht, waardoor de watervraag aan het hoodswatersysteem wordt onderschat.

6.3 Implicaties voor regionaal waterbeheer

Uit de resultaten van deze studie volgen verschillende voorlopige boodschappen voor regionale waterbeheerders:

- Het effect van zeespiegelstijging op het grondwater is merkbaar tot zo'n 10 km van de kustlijn en meestijgende open wateren (Figuur 4.3). De zogeheten invloedssfeer van zeespiegelstijging varieert afhankelijk van ondergrondkenmerken. Zo is de berekende invloedssfeer in Zeeland beperkt, door het dunne watervoerende pakket onder de Zeeuwse eilanden.
- De kweldruk neemt in de invloedssfeer toe, maar niet alarmerend. De maximale toename betreft zo'n 2 mm/d bij 3 m zeespiegelstijging, maar neemt landinwaarts snel af (Figuur 4.5). Daarbij is gemaalcapaciteit berekend op kortdurende piekbuien, kwel is maar een zeer beperkt deel van deze piekbelasting.
- Door de hogere en zoutere kweldruk neemt het risico op verzilting van de wortelzone toe (Figuur 4.13). Voor verzilting van de wortelzone zijn meteorologie (risico op drogere zomers) en het beheer (mogelijkheid tot afvoer van zoute kwel via de drainage) minstens zo belangrijk als de toegenomen kweldruk door zeespiegelstijging (De Louw et al., 2013). De precieze wisselwerking tussen weer,

beheer en zeespiegelstijging op verzilting van de wortelzone verdient nader onderzoek.

- De zoutvracht naar oppervlaktewater neemt toe in de brakke kwelgebieden binnen de invloedssfeer van zeespiegelstijging (Figuur 4.7). Daarbij zijn ook gebieden die in de huidige situatie geen kweldruk ervaren, maar bij hogere zeespiegelstijging ‘omslaan’ naar kwelgebieden. De toename van zoutvracht wordt voor de meeste gebieden voornamelijk bepaald door zeespiegelstijging; autonome processen en bodemdaling hebben een kleiner effect op de zoutvracht.
- De doorspoelbehoefte neemt bij gelijk beheer sterk toe. Confrontatie met wateraanbod zal inzicht geven waar bij zeespiegelstijging mogelijk knelpunten in de zoetwaterverdeling optreden. Voor enkele kustnabije gebieden wordt een zeer grote doorspoelwatervraag berekend bij 3 m zeespiegelstijging (bijvoorbeeld de Bollenstreek en de Kop van Noord-Holland). Het is de vraag of het waterbeheer bij sterke zeespiegelstijging alle gebieden kan blijven faciliteren.
- Indien het IJsselmeer niet aan de vraag kan voldoen en het peil uitzakt tot onder de -30 cm NAP, neemt de zoutvracht vanuit het grondwater naar het IJsselmeer tot zo’n 50% toe (Figuur 5.2). Dit kan in deze perioden, wanneer het door een tekort aan doorspoelwater al moeilijk is om het IJsselmeer zoet te houden, tot extra problemen leiden. De zoutvracht is echter nog steeds klein in vergelijking tot het zoutlek bij de sluizen in de Afsluitdijk (Vergroesen, 2019). Merk op dat de zoutvracht vanuit grondwater zich concentreert in de noordoosthoek van het IJsselmeer. De chlorideconcentratie van dit kwelwater kan oplopen tot meer dan 10 g/L.

6.4 Aanbevelingen

Op basis van voorliggende studie kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

6.4.1 Algemene aanbevelingen

- Zeespiegelstijging heeft via verzilting van het grondwater en daarmee samenhangende watervraag een duidelijke impact op het Nederlandse zoetwaterbeheer. Verzilting van het grondwater dient dan ook een belangrijk aandachtspunt te zijn in verder onderzoek naar de effecten van zeespiegelstijging op het Nederlandse waterbeheer.
- In deze landelijke studie komen gebieden naar voren waar het huidige waterbeheer door verzilting van het grondwater door zeespiegelstijging op termijn niet langer houdbaar lijkt (onder meer de bollenstreek, kop van Noord-Holland, Tholen). Het wordt aanbevolen deze gebieden regionaal nader te onderzoeken.
- In het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wordt de houdbaarheid van de voorkeursstrategie Zoetwater bij verdergaande zeespiegelstijging onderzocht. De inzichten uit voorliggende studie zijn ook zeer relevant voor het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW). Resultaten uit deze studie dienen bijvoorbeeld input te zijn voor de nieuwe Deltascenario’s en daarmee uitgangspunt voor toekomstverkenningen binnen DPZW.
- Onderzoek de effecten van zeespiegelstijging op verzilting van het grondwater en de daarmee samenhangende watervraag in samenspraak met de verwachte veranderingen in het klimaat en socio-economie.

6.4.2 Voor verder onderzoek en modelontwikkeling:

- Uit de validatie van het LHM (Acacia Water et al., 2021) blijkt de berekening van de verzilting van de wortelzone niet voldoende nauwkeurig om in absolute termen te worden beschouwd in deze studie. Meer onderzoek is nodig naar de modellering van verzilting van de wortelzone onder invloed van door zeespiegelstijging toenemende kwel, veranderende meteorologie, beheer en verschillende bodemeigenschappen.

- De duingebieden worden niet voldoende nauwkeurig berekend met het gebruikte instrumentarium om hier uitspraken over te doen. Dit terwijl deze gebieden sterk onder invloed staan van een zeespiegelstijging en deze gebieden essentieel zijn voor de Nederlandse drinkwatervoorziening. Gedetailleerd onderzoek is nodig naar de invloed van zeespiegelstijging op de duinsystemen, waarbij ook verwachte morfologische veranderingen worden beschouwd.
- Onderzoek voor verdere ontwikkeling van het Distributiemodel of opvolgers van dit instrumentarium de implementatie van hergebruik van doorspoelwater in het regionale systeem, en de invloed hiervan op de gestelde watervraag aan het hoofdwatersysteem.
- Doorspoelwatervraag is in de huidige opzet a priori berekend. Implementatie van sturing op zoutconcentratie – in plaats van hard op te geven doorspoelgetallen – in de oppervlaktewatermodule van het LHM maakt deze voorafgaande berekening overbodig en garandeert handhaving van chlorideconcentraties bij een kloppende water- en zoutbalans.
- Meer kwantitatief inzicht in de onzekerheid in berekende zoutvrachten door een uitgebreidere Monte Carlo analyse. In een dergelijke analyse wordt het LHM zoet-zout daadwerkelijk doorgerekend met variërende parameters. Een dergelijke analyse kan worden uitgevoerd op een rekencluster.
- De gekoppelde berekeningen met LHM zoet-zout en het LHM (representatief jaar) kunnen worden verbeterd en / of versneld door: 1) implementatie van stationaire dichtheidscorrectie in het LHM, 2) versnelling inspelen zoutprofiel TRANSOL, 3) berekening doorspoelvraag intern in de LHM berekening (zie ook punt 2).
- Zoutlek door sluizen en de daarmee samenhangende doorspoeling van boezemwater is in deze studie pragmatisch beschouwd. Nader onderzoek met de Zeesluisformulering (Weiler, 2018) geeft een betere kwantificering van het verwachte zoutlek van zeesluizen bij zeespiegelstijging.

6.4.3 Specifiek voor vervolgberekeningen binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging:

- Confronteer de in deze studie bepaalde (spreiding in) veranderingen in zoutvracht en watervraag voor doorspoeling met verwachte veranderingen in watervraag en –aanbod als gevolg van veranderende meteorologie en rivierafvoer om de houdbaarheid van de Voorkeurstrategie Zoetwater te verkennen.
- Varieer de voor doorspoeling gestelde watervraag aan het hoofdwatersysteem tussen de met het Distributiemodel berekende watervraag (als minimale waarde, maximaal hergebruik van doorspoelwater) en de gesommeerde polder-doorspoelwatervraag in het achterland (als maximale waarde, minimaal hergebruik van doorspoelwater). Expert-inschatting kan helpen dit bereik op basis van systeemkenmerken in te perken.
- Gebruik in ieder geval de kwantitatief vastgestelde spreiding in zoutvracht en polder-doorspoelwatervraag in de op deze analyse volgende gevoeligheidsanalyse, met de kanttekening dat de kwantitatieve onzekerheidsanalyse slechts een deel van de onzekerheid in de resultaten omvat.

Referenties

Acacia Water, HKV, Berendrecht Consultancy, 2021. Validatie en toetsing LHM 4.1 - Deelrapport 4: Verzilting, HKV rapport 4313.10.

America, I., Mulder, T., Delsman, J.R., 2021. Veranderingsrapportage en plausibiliteitstoets LHM zoet-zout 4.1, Deltares rapport 11206798-013-BGS-0001. Utrecht.

Boderie, P., Bonte, M., Oude Essink, G.H.P., 2012. Effect peilvariaties op zoutbelasting Markermeer en IJsselmeer, Deltares rapport 1204495-004.

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

De Lange, W.J., Prinsen, G.F., Hoogewoud, J.C., Veldhuizen, A.A., Verkaik, J., Oude Essink, G.H.P., Van Walsum, P.E. V, Delsman, J.R., Hunink, J.C., Massop, H.T.L., Kroon, T., 2014. An operational, multi-scale, multi-model system for consensus-based, integrated water management and policy analysis: The Netherlands Hydrological Instrument. Environ. Model. Softw. 59, 98–108.

De Louw, P.G.B., Eeman, S., Oude Essink, G.H.P., Vermue, E., Post, V.E.A., 2013. Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. J. Hydrol. 501, 133–145.

De Louw, P.G.B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B.R., Gunnink, J.L., van Baaren, E.S., Oude Essink, G.H.P., 2011. Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15, 3659–3678.

Delsman, J.R., 2020. Nadere plausibiliteitsanalyse LHM zoet-zout ten behoeve van toepassing binnen KP Zeespiegelstijging, Deltares memo 11205261-003-BGS-0002.

Delsman, J.R., 2021. Voorstel scenariodefinitie verziltingsberekening KP Zeespiegelstijging, Deltares memo 11206798-014-BGS-0001.

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

Delsman, J.R., Van Baaren, E.S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karaoulis, M.C., Pauw, P., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P.G.B., Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Steuer, A., Meyer, U., Revil, A., Oude Essink, G.H.P., 2018. Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. Environ. Res. Lett. 13, 084011.

Delsman, J.R., Waterloo, M.J., Groen, M.M.A., Groen, J., Stuyfzand, P.J., 2014. Investigating summer flow paths in a Dutch agricultural field using high frequency direct measurements. J. Hydrol. 519, 3069–3085.

Delsman, J.R., Winters, P., Vandenbohede, A., Oude Essink, G.H.P., Lebbe, L., 2016. Global sampling to assess the value of diverse observations in conditioning a real-world groundwater flow and transport model. Water Resour. Res. 52, 1652–1672.

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

Gunnink, J.L., 2019. Deklaagweerstand IJsselmeer / Markermeer, TNO rapport 2019 R10715. Utrecht.

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

HKV, Berendrecht Consultancy, Acacia Water, 2021. Validatie en toetsing LHM 4.1 - Samenvattend hoofdrapport, HKV rapport PR4313.10. Lelystad.

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

Janssen, G., Walsum, P. van, America, I., Pouwels, J., Hunink, J., Vermeulen, P., Meshgi, A., Prinsen, G., Mulder, N., Visser, M., Kroon, T., 2020. Veranderingsrapportage LHM 4.1 - Beheer en onderhoud van de landelijke toepassing van het NHI, Deltares rapport 11205261-000-BGS-0001. Utrecht.

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

Maarse, M., Kleissen, F., Nolte, A., 2021. Klimaatrobuustheid van het waterbeheer van het Veerse Meer - Houdbaarheid in het licht van klimaatverandering, Deltares rapport 11206201-001-ZKS-0005. Delft.

Nolte, A., Vergouwen, S., Legat, A., Geurts, D., 2021. Vraagarticulatie en aanzet modelinstrumentarium voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor 2 Systeemverkenningen Zoetwater, Deltares rapport 11205272-018-ZWS-0014. Delft.

Nolte, A., Weeber, M., Geurts, D., Pans, S., Vreeken, T., Weiler, O., 2020. Klimaatrobuustheid van het waterbeheer van het Volkerak- Zoommeer, Deltares rapport 11203741-001-ZKS-0005.

Oude Essink, G.H.P., 2007. Effect zeespiegelstijging op het grondwatersysteem in het kustgebied. H2O 19, 60–64.

Oude Essink, G.H.P., Van Baaren, E.S., De Louw, P.G.B., 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. Water Resour. Res. 46, 1–16.

Oude Essink, G.H.P.P., Van Baaren, E.S., De Lange, W.J., De Wit, A., 2008. Beschouwing van de effecten van een zout Volkerak-Zoommeer op het grondwatersysteem. Deltares Rapp. 2008-U-R0774/A 103.

Post, V.E.A., Kooi, H., Simmons, C.T., 2007. Using hydraulic head measurements in variable-density ground water flow analyses. Ground Water 45, 664–71.

Pouwels, J., America, I., Delsman, J.R., Mens, M.J.P., 2021. Stresstest voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares rapport 11206829-002-ZWS-0001. Delft.

Programmabureau Zoetwater, 2020. Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem - Voorstel voor getrapte besluitvorming, RWS Informatie.

Raad van de Leefomgeving en infrastructuur, 2020. Stop Bodemdaling in Veenweidegebieden. Raad van Leefomgeving en Infrastuct.

Rijkswaterstaat, 2018. Peilbesluit IJsselmeergebied.

Staatsblad, 2019. Wet van 2 juli 2019, houdende een kader voor het ontwikkelen van beleid gericht op onomkeerbaar en stapsgewijs terugdringen van de Nederlandse emissies van broeikasgassen teneinde wereldwijde opwarming van de aarde en de verandering van het klimaat te bep.

Uittenbogaard, R.E., Cornelisse, J.M., 2011. Ontwerpstudie en praktijkproef Zoutlekbeperking Volkeraksluizen. Evaluatie maatregelen Volkeraksluizen, Deltares rapport 1201226-005. Delft.

Van der Vliet, N., 2021. Validatie en toetsing LHM 4.1 - Deelrapport 3: Oppervlaktewater, HKV rapport PR4313.10.

Vergroesen, T., 2019. Water en stoffen balans IJsselmeer, Deltares rapport 11203712-002-ZKS-0006. Delft.

Vergroesen, T., 2020. Water- en Chloridebalans Volkerak- Zoommeer, Deltares rapport 11205256-003. Delft.

Verkaik, J., van Engelen, J., Huizer, S., Bierkens, M.F.P., Lin, H.X., Essink, G.H.P.O., 2021. Distributed memory parallel computing of three-dimensional variable-density groundwater flow and salt transport. Adv. Water Resour. 154, 103976.

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

Weiler, O., 2018. Zoutindringing door schutsluizen Overzicht projecten en aanzet formulering t. b. v. netwerkmodellen, Deltares rapport 11200741-003.

Weiler, O., 2019. Verkenning noodmaatregelen verzilting IJsselmeer - Schutoperatie en bellenschermen, Deltares rapport 1120735-005.

Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. Cultuurtechnisch Vademecum, Cultuur technisch vademecum. Cultuurtechnische Vereniging, Utrecht.

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

Deltares

www.deltares.nl