

**Bijlagen bij het rapport:
Mogelijke gevolgen van versnelde
zeespiegelstijging voor het
Deltaprogramma. Een verkenning.**

11202230-005

A Verslag workshop zeespiegelstijging

Op 26 juli 2017 vond een workshop plaats met experts van KNMI, Universiteit Utrecht, Staf Deltacommissaris en Deltares met als doel een nieuwe schatting te maken van de mogelijke bandbreedte van zeespiegelstijging. De aanleiding van deze workshop was dat er nieuwe inzichten zijn over versnelde zeespiegelstijging in de komende eeuw. Deze inzichten zijn echter onzeker. Wel is de verwachting dat de bovengrens van de nieuwe KNMI scenario's zal worden bijgesteld zoals ook is gedaan in Verenigde Staten en Verenigd Koninkrijk. Op basis de huidige stand van zaken schatten we de ondergrens voor het jaar 2100 op ca. 35 cm stijging, op basis van extrapolatie van de meest recente metingen, zonder rekening te houden met emissies. Onder aanname van versnelde ijskapdynamiek ligt de bovengrens tussen de 2 en 3 meter voor 2100. Voor 2200 lopen de schattingen richting 5 tot 8 m.

Aanleiding en doel workshop

De workshop had tot doel de vraag te beantwoorden: *Wat is de mogelijke bovengrens van de te verwachten zeespiegelstijging in 2050, 2100 en daarna (tot 2200), als nieuwe inzichten over veranderingen in de massabalans van Groenland en vooral Antarctica worden meegenomen?* Dit zal worden gebruikt om in te schatten of de huidige voorkeursstrategieën in het Deltaprogramma toereikend zijn, en hoe eventuele knelpunten kunnen worden opgelost met bijsturende of nieuwe maatregelen.

De bedoeling is nadrukkelijk niet om deze getallen als nieuwe leidraad te gaan hanteren voor waterbeheer in Nederland. Wel is het belangrijk om oog te houden voor signalen dat de voorkeursstrategieën mogelijk versneld geïmplementeerd of bijgestuurd moeten worden. Zulke strategische afwegingen kunnen beter niet op nauwe bandbreedtes van zeespiegelstijging worden gebaseerd, maar ook op basis van zorgvuldig gekozen indicatoren voor deze signalen. Er is meer relevante informatie dan alleen de bandbreedte van het IPCC, die is gebaseerd op consensus in het wetenschappelijke domein. Ook waarden die ver buiten die range liggen zijn uitermate relevant in het kader van adaptief deltamanagement, en zouden daarom meegenomen moeten worden. Zo kan de verwachting van een versnelde zeespiegelstijging er toe leiden dat een maatregelenpakket voor de middellange termijn wordt overgeslagen, of vraagt dit om na te denken over grote (anders dan business-as-usual) maatregelen die meer tijd vragen om te implementeren. Voorbeelden van indicatoren om relevante signalen op te vangen zijn nieuwe studies van modellen en observaties van processen als afkalving of opbrekende ijsplaten op Groenland maar vooral ook Antarctica, waarnemingen van de zeespiegel zelf, en (toekomstige) multi-model experimenten van dynamische ijskapprocessen. Het toetsen van de voorkeursstrategieën aan deze indicatoren is conform het concept adaptief deltamanagement. Hiertoe is ook een Signaalgroep opgericht om tijdig te kunnen reageren op nieuwe inzichten.

De directe aanleiding van dit onderzoek in opdracht van de Staf Deltacommissaris is het uitkomen van een nieuwe studie van De Conto en Pollard (2016) in *Nature*⁶³. Deze paper heeft versnelde afbraak van de ijskap op Antarctica gemodelleerd, en geeft aan dat 2 meter zeespiegelstijging mogelijk al in 2100 bereikt wordt, en 21 meter in 2500.

⁶³ De Conto, R., Pollard, D. (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531, 591-597. <http://dx.doi.org/10.1038/nature17145>

Deltares heeft in november 2016 een eendaagse hackathon gereorganiseerd⁶⁴, om de effecten van 21 meter zeespiegelstijging te bestuderen. De KNMI studie van Le Bars et al.⁶⁵ heeft dit vertaald naar probabilistische scenario's van de mondiale zeespiegelstijging in 2100. Deze bevindingen zijn samengevat door KNMI en Deltares in een factsheet voor de Signaalgroep van het Deltaprogramma.

Nieuwe inzichten

Wereldwijd stijgt de zeespiegel als gevolg van thermische expansie en toenemend watervolume in de oceaan door veranderingen in de massabalans van ijskappen en processen als grondwateronttrekking en opslag in stuwmeren. Lokaal is de zeespiegelverandering anders dan het wereldwijde gemiddelde, door zwaartekrachteffecten van de ijskappen op de lokale zeespiegel, oceaancirculatie, en lokale bodemdaling of -stijging.

Het IPCC maakt schattingen van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging met behulp van modellen op basis van klimaatprojecties. Hierin spelen vooral thermische expansie, smelten van gletsjers en ijskappen een grote rol. De effecten van een veranderende massabalans van Antarctica is hierin een zeer onzekere factor.

Nieuwe inzichten laten zien dat dit effect mogelijk veel groter kan zijn als gevolg van de volgende mechanismen:

- Marine Ice Sheet Instability (MISI): afsmelten van onderaf van gletsjers op een komvormige zeebodem. De zogenaamde "grounding line" van het ijs verplaatst zich landinwaarts, waardoor nog meer ijs aan relatief warm water wordt blootgesteld en er nog meer afsmelt.
- Hydrofracturering: Warme lucht, neerslag en smeltwater zorgen voor scheuren in de ijsplaten voor de kust, waardoor water omlaag sijpelt en het ijs erodeert. Deze ijsplaten houden het landijs op Antarctica op zijn plaats.
- Ice Cliff Instability (ICI): Als de ijsplaat voor de kust van Antarctica afbreekt en er een klif ontstaat, kan deze breken onder het eigen gewicht.

Marine Ice Sheet Instability werd wel door IPCC in 2013 behandeld, maar werd beoordeeld als een zeer onzekere factor. De paper van De Conto en Pollard (DCP) heeft voor het eerst laten zien wat de effecten van vooral hydrofracturing en Ice Cliff Instability zijn in termen van toekomstige zeespiegelstijging. Door het meenemen van deze effecten konden ze de historische zeespiegelstijging beter simuleren. Deze twee laatste processen zijn al wel op Groenland waargenomen, maar nog niet op Antarctica. Zelf geven de auteurs aan dat er veel onzekerheid is over de snelheid waarmee de geschatte stijging kan optreden.

Daarnaast zijn er nieuwe studies met betrekking tot gecorrigeerde satellietmetingen die laten zien dat de zeespiegelstijging al een versnelling vertoont. Dit komt vooral door het smelten van Groenland. De huidige snelheid is ca. 3 mm per jaar⁶⁶.

⁶⁴ <https://www.deltares.nl/nl/nieuws/gevolgen-versnelde-zeespiegelstijging-hacken/>

⁶⁵ Le Bars, D. et al. (2017), Environmental Research Letters, 12, 044013. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa6512>

⁶⁶ Chen, X. et al. (2017). The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993-2014, Nature Climate Change, 7, <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE3325>

Rondom het paper van DCP is ook wat controversen ontstaan, met name over de mechanismen die beschreven zijn en hoe deze werkelijk zo kunnen voordoen. De algemeen heersende mening is dat er nog weinig bekend is over deze nieuwe mechanismen, en dat een robuuste uitspraak over de kans op verdere versnelling nog niet mogelijk is. Wel kan worden geconcludeerd dat het *mogelijk* is dat in 2100 de zeespiegel veel hoger is dan in de IPCC scenario's en de huidige scenario's van KNMI wordt aangenomen, maar de omvang is onbekend.

Dat de verwachtingen over zeespiegelstijging hoger uit kunnen vallen dan is meegenomen in de Deltascenario's onderschrijven de workshopdeelnemers, en ook dat het voor het Deltaprogramma van belang is om ook hogere scenario's te beschouwen. Het KNMI zal in het kader van nieuwe scenario's die in 2020 worden gepubliceerd de zeespiegelscenario's waarschijnlijk naar boven toe bijstellen.

De deelnemers geven aan dat de precieze hoogte van de zeespiegel in 2100 zeer onzeker is. Maar er kan wel een keuze worden gemaakt van een scenario gebaseerd op de inzichten van DCP om de voorkeursstrategieën te testen. Le Bars et al. (2017) heeft de studie van DCP als uitgangspunt genomen voor een doorvertaling naar probabilistische scenario's van de mondiale zeespiegelstijging in 2100. Hierbij is de aanname gedaan dat de processen van DCP tot versnelde afbraak van de Antarctische ijskap leiden, een realistisch beeld geven van de bovengrens van de te verwachten zeespiegelstijging en dus als uitgangspunt kunnen dienen voor een extreem zeespiegelstijgingsscenario. Daarnaast zijn de probabilistische schattingen gebaseerd op nog een aantal andere onzekerheden, waardoor de bandbreedte nog groter wordt. Onderstaande tabel geeft de schattingen weer voor de lokale zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust voor twee IPCC emissiescenario's. RCP4.5 kan worden gezien als een plausibele ondergrens van emissies (cf. het Parijs-akkoord) en RCP8.5 als een bovengrens. Tot aan het jaar 2050 worden nog geen grote effecten van deze versnelde zeespiegelstijging verwacht.

Tabel A.1 Schattingen zeespiegelstijging (in centimeter) voor de Nederlandse kust in 2100, ten opzichte van 1985-2005, op basis van de studie van Le Bars et al. (2017)³.

Percentiel	RCP4.5	RCP8.5
5%	29	75
10%	46	101
50%	108	195
90%	173	289
95%	192	317

Ook NOAA in de VS heeft zijn hoge schatting voor 2100 bijgesteld van 2 naar 2,5 m op basis van literatuurstudies en waarnemingen⁶⁷. Na 2100 schatten ze dit op 7,5 m. De Thames Estuary 2100 studie gebruikte een hoge schatting van 2,7 m. In een rapport aan het UK Parlement wordt overzicht gegeven van recente literatuur⁶⁸.

⁶⁷ Sweet, W.V. et al. (2017). *Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States*. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083.

⁶⁸ Houses of Parliament (2017) *Projecting Future Sea Level Rise* www.parliament.uk/post

Hierin wordt verwezen naar een studie van UK Government Office of Science⁶⁹ dat dit jaar gepubliceerd zal worden en dat recent onderzoek naar projecties voor zeespiegelstijging beschrijft. Daarin wordt een extreem scenario van 2,5 m in 2100 gepresenteerd.

Onzekerheden

- Er zijn nog weinig studies naar de mechanismen van hydrofracturering en ice-cliff instability. Het IPCC gaat hier in het special report on Oceans and Cryosphere (SROCC) en AR6 aandacht aan besteden.
- Er is nog weinig bekend over negatieve feedbacks; zoals instantaan gravitatie effect (zeespiegel wordt nabij het afsmeltende landijs lokaal lager waardoor vooral MISI mechanisme mogelijk vermindert); en tektonische rebound door ontlasting van de ondergrond die tot opheffen van het continent leidt.
- Schattingen over kansen van zeespiegelstijgingen variëren van normale tot scheve verdelingen. Dit kan gevolgen hebben voor de hoge percentielen.
- Het is essentieel om tijdig het signaal op te pikken. Wanneer en met welke indicatoren kunnen we het pad van versnelde veranderingen op Antarctica en snellere zeespiegelstijging onderscheiden van de huidige Deltascenario's?

Conclusies

- Voor het Deltaprogramma is het van belang de strategieën te toetsen aan extreme maar plausibele scenario's, die verder gaan dan de "likely range" van de Deltascenario's. De getallen voor zeespiegelstijging die hieronder worden voorgeteld voldoen hier aan, maar zijn nadrukkelijk niet een vervanging van de "likely range" van de Deltascenario's.
- De huidige KNMI scenario's die de basis vormen van de Deltascenario's gaan uit van 35-85 cm in 2100⁷⁰. Dit is niet de hele bandbreedte, maar de waarschijnlijke bandbreedte ("likely range") (5-95% percentiel volgens Le Bars) zoals ook IPCC hanteert (NB: 5-95% is de "very likely" range, maar vanwege onzekerheden heeft het IPCC hier "likely" van gemaakt).
- Er zijn waarnemingen en nieuwe inzichten over het fysieke systeem dat het afsmelten Antarctica vanaf 2050 mogelijk een veel grotere bijdrage zal hebben op zeespiegelstijging. Deze inzichten zijn niet verwerkt in de huidige Deltascenario's. Als er wordt aangenomen dat de mechanismen zoals beschreven door DCP van versnelde afbraak van de Antarctische ijskap een realistisch beeld geven van de bovengrens van de te verwachten zeespiegelstijging, dan is het mogelijk om een nieuw uitgangspunt te nemen voor een extreem zeespiegelstijgingsscenario.
- Een ondergrens voor de te verwachten zeespiegelstijging in 2100 ligt op ongeveer 33 cm als we uitgaan van de nieuwe gemeten trend van 3 mm jaar, zonder rekening te houden met de invloed van emissiescenario's. Wanneer hier wel rekening mee wordt gehouden door – gebaseerd op de metingen – uit te gaan van RCP4.5 als redelijke ondergrens voor emissies en de ondergrens van ongeveer 29 cm (5% percentiel volgens Le Bars). Deze getallen lopen dus nauwelijks uiteen.
- Voor het jaar 2100 ligt de bovengrens op 3,2 meter voor het IPCC scenario RCP8.5 waarbij net als bij de Deltascenario's is uitgegaan van de hoge schatting van Le Bars, dus 95% percentiel. Bij lagere emissies, op basis van RCP4.5 ligt een mogelijke bovengrens op 1,9 meter in 2100.

⁶⁹ Edwards, 2017 (In Review). *Current and Future Impacts of Sea Level Rise on the UK*. Government Office of Science, "Foresight, Future of the Sea" Evidence Review.

⁷⁰ Deltaprogramma (2014) *Deltascenario's voor 2050 en 2100 nadere uitwerking*.

<https://www.deltacommissaris.nl/deltaprogramma/documenten/publicaties/2014/05/27/deltascenarios-voor-2050-en-2100-nadere-uitwerking-2012-2013>

- Voor het jaar 2200, als RCP8.5 wordt gevolgd en het klopt dat Antarctica meer bijdraagt dan nu geschat, dan kan de zeespiegelstijging na 2100 heel veel verder oplopen. Hier zijn weinig schattingen van, maar deze lopen uiteen van 5,5 en 8 m. Bij dergelijke stijgingen komen we volgens de Deltares-hackathon op onbekend terrein en zal Nederland er heel anders uit gaan zien.
- Voor het Deltaprogramma is het van belang om signalen van versnelde zeespiegelstijging goed te volgen. De volgende signalen zijn dan van belang:
 - Ijsplaten verdwijnen;
 - Bekkens op Antarctica waarin iets verandert;
 - Satellietwaarnemingen in plaats van lokale getijdemetingen die te veel “ruis” meten;
 - Waarneming van ice cliff instability en hydrofracturing op Antarctica; bevestiging van de studie van DCP;
 - Modelinstrumentarium dat in Nederland aanwezig is, zoals een eigen ijskapmodel;
 - Multi-model studies die de onzekerheden verkleinen;
 - Internationale inspanningen (door IPCC of CMIP) om beter inzicht (en consensus) te krijgen in het effect van ijskappen op de mondiale zeespiegel
- Omdat de gevolgen groot kunnen zijn, maar de inzichten nog onzeker, is nader onderzoek naar versnelde zeespiegelstijging en consequenties nodig. De Nederlandse overheid en ook universiteiten, KNMI en Deltares zouden in een onderzoeksprogramma hier op aan kunnen sturen.

Deelnemers workshop:

Sybren Drijfhout (KNMI en Universiteit Utrecht), Dewi Le Bars (KNMI), Renske de Winter (Universiteit Utrecht), Heiko Goelzer (Universiteit Utrecht), Bart van den Hurk (KNMI), Rob van Dorland (KNMI), Jos van Alphen (Staf DC), Marjolijn Haasnoot (Deltares), Laurens Bouwer (Deltares)

Afwezig en achteraf gesproken:

Roderik van der Wal (Universiteit Utrecht)

B Toelichting aanpak zoetwatervoorziening

B.1 Interne verzilting

Model van de Provincie Zuid-Holland

In het verleden zijn voor de Provincie Zuid-Holland een aantal studies uitgevoerd waarin de veranderingen in het grondwatersysteem onder invloed van autonome ontwikkelingen, zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering zijn gekwantificeerd (Minnema et al, 2004; Oude Essink et al, 2008b, 2010). Tevens is het effect van menselijk handelen geschat: het effect van brijnlozingen in het tweede watervoerend pakket, landaanwinningen voor de kust, en het stopzetten van grote grondwaterwinning te DSM Gist-brocades te Delft. Met dit bovenbeschreven drie-dimensionele model wordt dichtheidsgedreven grondwaterstroming en gekoppeld zout transport gemodelleerd. De ondergrond is geschematiseerd met een TNO ondergrondschematisatiemodel (REGIS I). Uitvoer is mogelijk op verschillende momenten in de tijd van zoetwaterstijghoogten, chloride concentraties en snelheidsvelden.

Met het model is het zeespiegelstijgingsscenario RCP8.5 tot 2200 doorgerekend. Er vindt altijd autonome verzilting plaats; hiermee wordt het proces aangeduid waarbij in voornamelijk gebieden die onder zeeniveau liggen zout grondwater van grotere diepten langzaam richting de oppervlakte stroomt, onder invloed van de huidige stromingsrichting van het grondwater. Dit komt doordat de zoet-zout verdeling in het grondwatersysteem nog niet in evenwicht is met de ingrepen in het landschap van de laatste eeuwen (Delsman et al., 2014; Oude Essink et al., 2010). Om een goede vergelijking met de referentie situatie te maken is ook een scenario doorgerekend waarbij geen zeespiegelstijging en geen bodemdaling is opgelegd aan het model; er vindt in dit scenario dus alleen een autonome verzilting plaats. Het zeespiegelstijgingsscenario RCP8.5 betekent in 2100 een zeespiegelstijging van 3 m en in 2200 van 8 m. De resultaten van het model worden elke 25 jaar afgedrukt: 2000, 2025, etc.

Model Eureyeopener Rijnland

De Eureyeopener Rijnland is een model dat is ontwikkeld voor de afweging tussen doorspoelbehoefte en zoutschade aan gewassen. De Eureyeopener (EEO) berekent de doorspoelbehoefte van verschillende polders in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Rijnland, afhankelijk van de geldende water- en zoutbalans en op te geven streef-chlorideconcentraties in deze polders. De Eureyeopener vertaalt deze doorspoelbehoefte, rekening houdend met de stroming van water door de Rijnlandse boezem, in een watervraag aan het hoofdwatersysteem bij de inlaat van Gouda. Daarnaast berekent de Eureyeopener de schade aan gewassen bij deze concentraties. De water- en zoutbalans in de Eureyeopener is gebaseerd op het Landelijk Hydrologisch Modelinstrumentarium (LHM, versie 3.02) voor het jaar 2003, en is gemiddeld over het groeiseizoen. De werking van de Eureyeopener is uitgebreid beschreven in Stuyt et al. (2013).

Koppeling PZH-model en Eureyeopener

De modelresultaten van het PZH-model zijn als volgt verwerkt tot Eureyeopener modellen:

- Sommatie kwel/infiltratie en zoutvrucht per Eureyeopener gebied
- Aanpassen van de water- en zoutbalans van de Eureyeopener:
 - Als niet tijdstap nul (huidig):
Verdisconteer de verandering van kwel / infiltratie in het PZH model ten opzichte van huidig in, achtereenvolgens, de EEO balansposten DRAINAGE_DP,

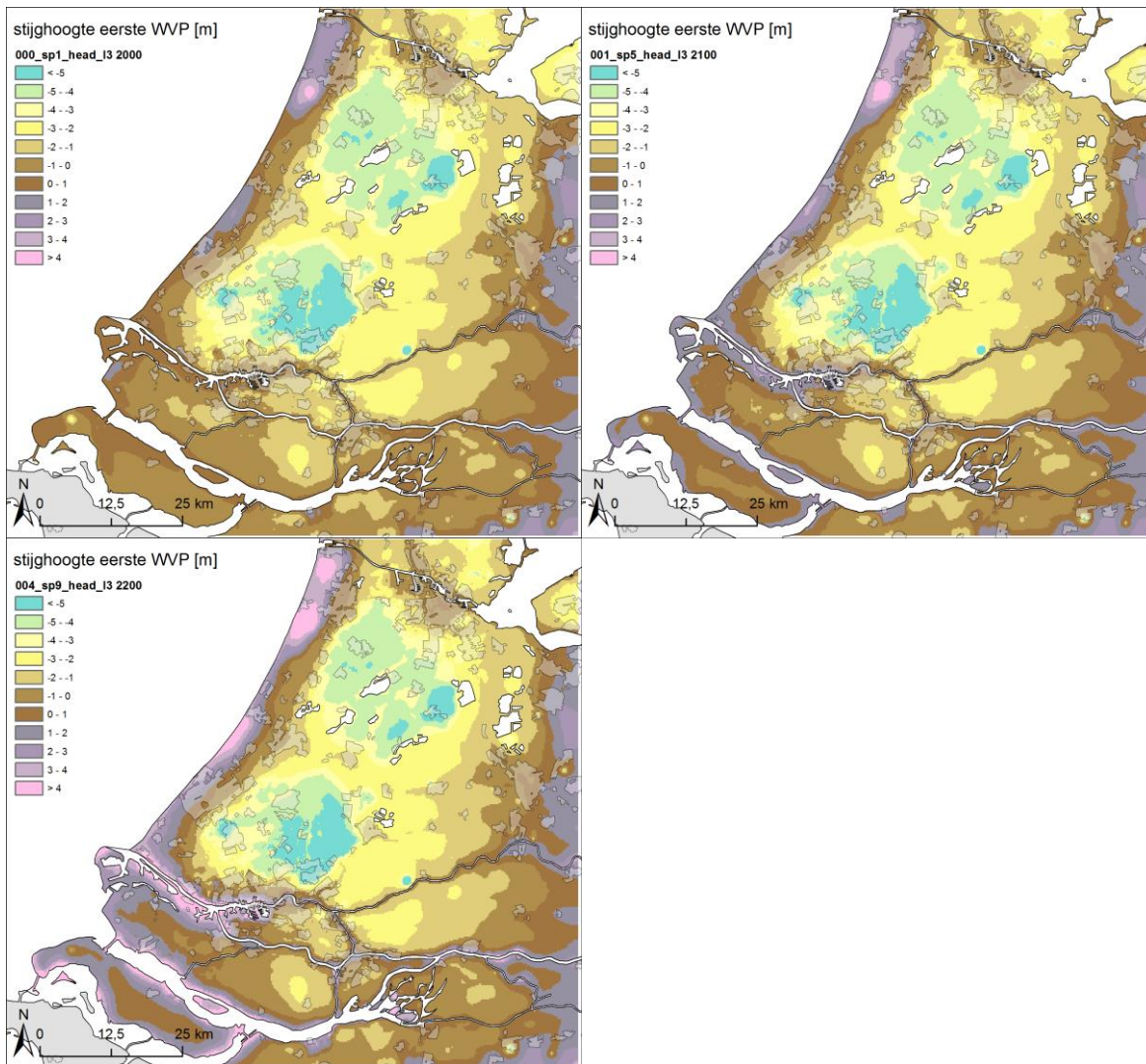
DRAINAGE_SH of INFILTRATION_SH. Tel de verandering hierbij op bij de balanspost. Balansposten DRAINAGE_DP en DRAINAGE_SH mogen hierbij niet negatief worden. Komt de waarde van de balanspost onder nul, verdisconteer het verschil dan met de volgende balanspost.

- Alle tijdstappen:
 - Maak de zoutvracht in de EEO gelijk aan de PZH rekenresultaten. Pas hiervoor de concentraties aan van de termen DRAINAGE_DP en DRAINAGE_SH
 - Voer een berekening uit met de Eureyeopener
 - Sla de benodigde doorspoelhoeveelheden en de benodigde inlaat bij Gouda op
- In de Eureyeopener berekeningen is de water- en zoutbalans niet verder aangepast. Klimaatontwikkelingen worden dus **niet** meegenomen. De water- en zoutbalans is representatief voor een 1 in de 10 droog jaar in de huidige situatie.

Modelresultaten: toename stijghoogteverandering watervoerend pakket

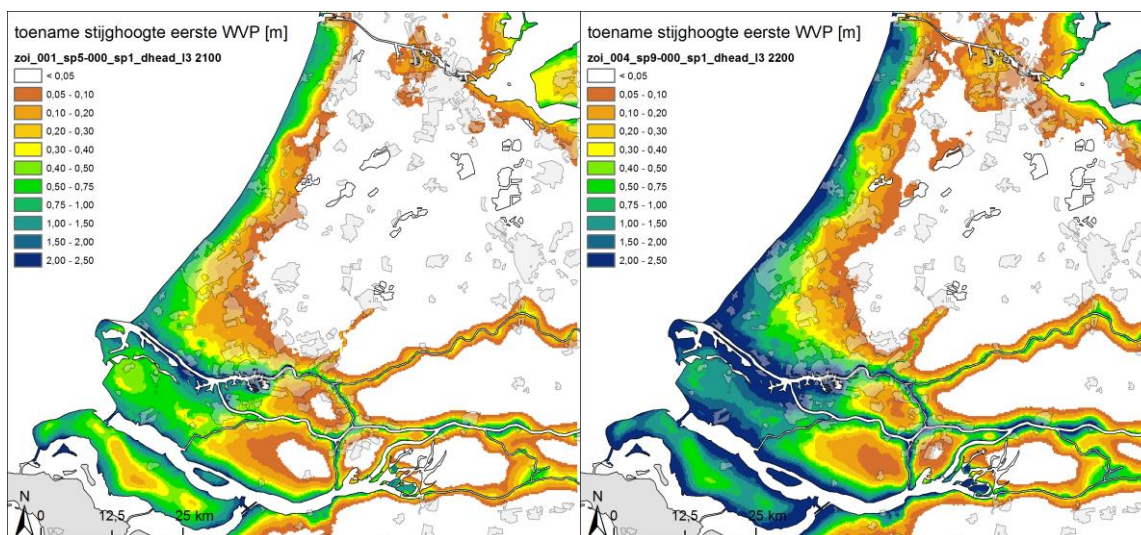
Figuur B.1 geeft inzicht in de absolute toenames in stijghoogte⁷¹ bij een versnelde zeespiegelstijging RCP8.5 van 3 m in 2100 en 8 m in 2200.

⁷¹ De stijghoogte is de hoogte ten opzichte van een referentievlak, tot waar het grondwater opstijgt in een buis die zowel in open verbinding staat met de atmosfeer als met het grondwater in een watervoerend pakket.



Figuur B.1 Stijghoogte in het eerste watervoerend pakket: met name stijgingen in de kustzone, het Rotterdamse havengebied, Voorne-Putten en Goerree-Overflakkee: links boven; huidige situatie; rechts boven versnelde zeespiegel RCP8.5 2100; links onder versnelde zeespiegel RCP8.5 2200.

Modelresultaten: absolute toename stijghoogteverandering in het eerste watervoerend pakket.



Figuur B.2 Absolute toename in de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket door een versnelde zeespiegelstijging onder RCP8.5: links in 2100 (3 m) en rechts 2200 (8 m).

Modelresultaten kwel en zoutvracht

Tabel B.1 Schatting toename kwel voor enkele deelgebieden in Zuid-Holland (in Mm^3/jaar) ten opzichte van de huidige kwelflux (2^{de} kolom). De factor in de laatste 4 kolommen betreft t.o.v. de huidige kwel. Het getal 3,4 in 2200 voor gehele Provincie Zuid-Holland (Geheel PZH) betekent een 3,4 keer zo grote kwel als nu (460 i.p.v. 137 in Mm^3/jaar). Tevens zijn de Haarlemmermeerpolder (Provincie Noord-Holland) en Groot-Mijdrecht (Provincie Utrecht) toegevoegd.

Provincie Zuid-Holland	Huidige kwelflux	referentie	zss1	zss1	zss2
	(2000)	(2100)	(2050)	(2100)	(2200)
Geheel PZH	~136,9	1,0	1,1	1,9	3,4
Noordplas	~5,7	1,0	1,0	1,0	1,0
Goeree-Overflakkee	~6,4	1,0	1,4	4,6	10,6
Voorne-Putten	~6,8	1,0	1,1	2,1	3,7
Delfland	~4,4	1,0	1,1	2,3	4,9
Provincie Noord-Holland					
Haarlemmermeerpolder	~29,2	1,0	1,0	1,0	1,0
Provincie Utrecht					
Groot-Mijdrecht	~12,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabel B.2 Schatting toename zoutvracht voor enkele deelgebieden in Zuid-Holland (in Mton/jaar) ten opzichte van de huidige zoutvracht (2^{de} kolom). De factor in de laatste 4 kolommen betreft t.o.v. de huidige zoutvracht. : Het getal 4.8 in 2100 voor gehele Provincie Zuid-Holland (Geheel PZH) betekent een 4.8 keer zo grote zoutvracht (471 i.p.v. 98 in Mton/jaar). Tevens zijn de Haarlemmermeerpolder (Provincie Noord-Holland) en Groot-Mijdrecht (Provincie Utrecht) toegevoegd.

Provincie Zuid-Holland	Huidige zoutvracht	referentie	zss1	zss1	zss2
	(2000)	(2100)	(2050)	(2100)	(2200)
Geheel PZH	~98	1,0	1,3	4,8	14,5
Noordplas	~4	0,8	0,9	0,8	0,8
Goerree-Overflakkee	~25	0,8	1,3	5,2	17,0
Voorne-Putten	~19	1,0	1,2	2,3	5,0
Delfland	~4	1,0	1,2	3,0	19,2
Provincie Noord-Holland					
Haarlemmermeerpolder	~63	1,3	1,2	1,3	1,7
Provincie Utrecht					
Groot-Mijdrecht	~14	0,7	0,7	0,7	0,8

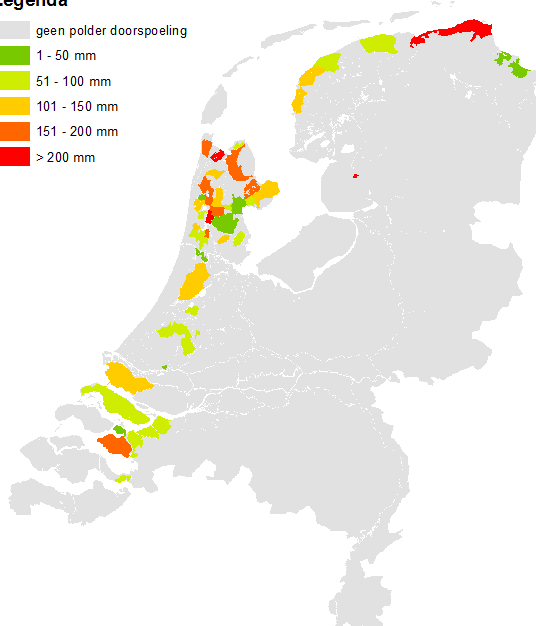
Modelresultaten Eureyeopener

Tabel B.3 Resultaten Eureyeopener berekeningen voor de scenario's Referentie en KNMI versnelde zss RCP8.5.

	Referentie					KNMI versnelde zss RCP 8,5				
	Doorspoeling		Doorspoeling	Inlaatbehoefte	Zoutschade	Doorspoeling		Doorspoeling	Inlaatbehoefte	Zoutschade
	Zoutvracht	totaal	Haarlemmermeer	Gouda	gewassen	Zoutvracht	totaal	Haarlemmermeer	Gouda	gewassen
	Mton/jr	Mm3/jr	Mm3/jr	Mm3/jr	ME/jr	Mton/jr	Mm3/jr	Mm3/jr	Mm3/jr	ME/jr
2000	85	44	39	85	16	85	44	39	85	16
2050	97	61	52	100	16	98	60	53	97	16
2100	104	73	60	112	16	116	98	63	122	16
2150	108	72	66	112	16	186	113	77	130	29
2200	112	83	70	123	15	260	201	85	184	29

Legenda

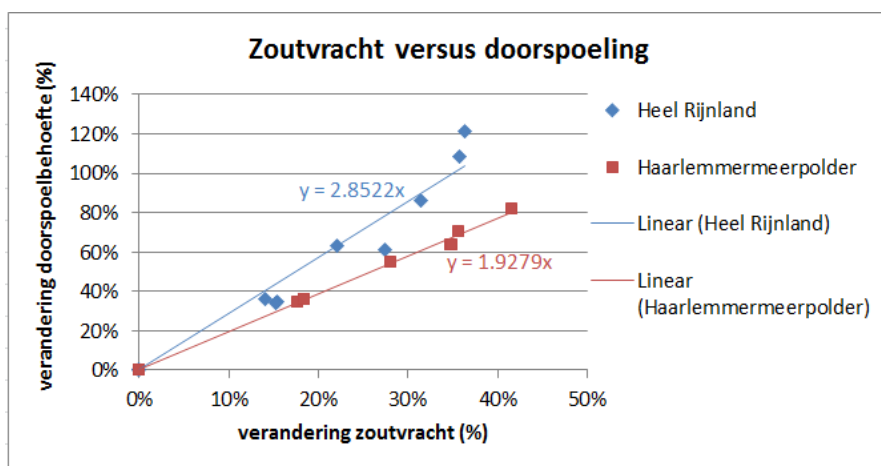
- geen polder doorspoeling
- 1 - 50 mm
- 51 - 100 mm
- 101 - 150 mm
- 151 - 200 mm
- > 200 mm



Figuur B.3 Doorspoelbehoefte op polderniveau (Delsman, 2017).

B.2 Relatie zoutvracht en doorspoelbehoefte

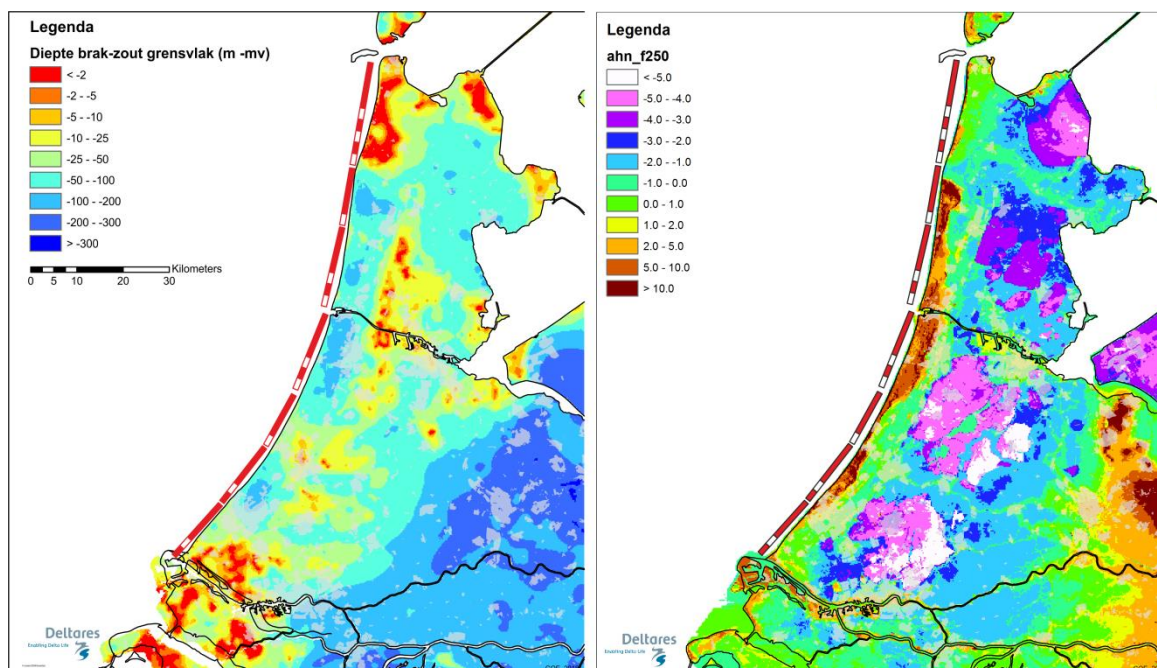
De relatie tussen de toename van de zoutvracht en toenemende doorspoelbehoefte is lineair, maar niet eenduidig. De toegenomen zoute kwel leidt namelijk niet alleen tot meer zout, maar ook tot meer water in het systeem. De verhouding tussen deze variabelen, en in verhouding tot de zoete termen van de waterbalans (neerslag), bepaalt hoe sterk de doorspoelbehoefte toeneemt. Daarnaast varieert de inlaatconcentratie door veranderingen elders in het gebied. Om resultaten in het beheersgebied van Rijnland te kunnen vertalen naar de rest van Nederland, is de relatie tussen toegenomen zoutvracht en benodigde doorspoeling in het beheersgebied van Rijnland afgeleid (Figuur 8.1). Voor heel Rijnland neemt de doorspoelbehoefte bijna driemaal zoveel toe als de zoutvracht toeneemt. Voor alleen de Haarlemmermeerpolder is dit minder, hier neemt de doorspoelbehoefte tweemaal zo snel toe als de toename van de zoutvracht.



Figuur 8.1 Relatie tussen toenemende zoutvracht en toenemende doorspoelbehoefte berekend door de Eureyeopener.

B.3 Zoetwatervoorraden onder de duinen

De schatting van de verandering van de zoetwatervoorraden in de duinen wordt gedaan met een zevental 2D numerieke modellen langs de Hollandse kust, die allemaal representatief zijn voor het desbetreffende gebied (Figuur B.4). De modellen bevatten dichtheidsgedreven grondwaterstroming en gekoppeld zouttransport. Per 3D model van 10km lengte worden hydrogeologische parameters zoals hydraulische doorlatendheden en initiële zoet-zout verdelingen van de ondergrond ingevoerd. Tevens wordt het polderwaterpeil in het achterland opgegeven. Vervolgens wordt per 2D model over een simulatie periode van 200 jaar de versnelde zeespiegelstijging RCP8.5 opgegeven. De verandering in de zoetwatervolumes wordt uit de modelresultaten gehaald.



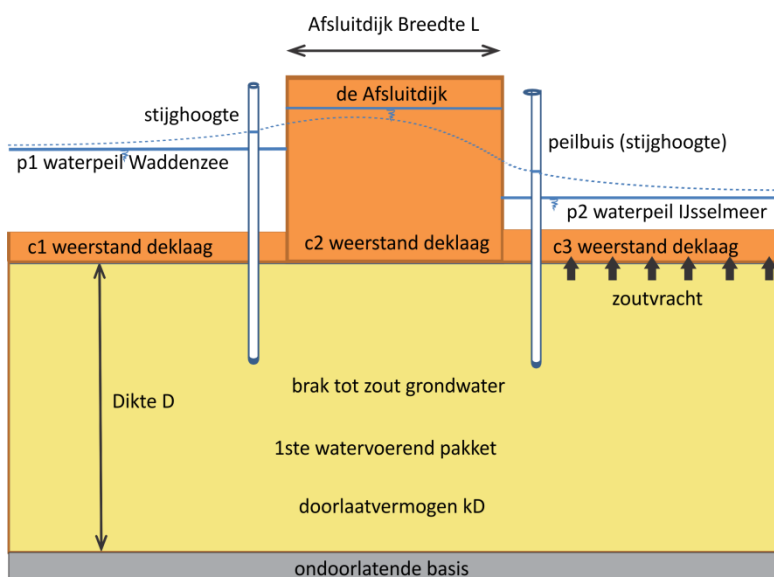
Figuur B.4 links: diepte brak-zout grensvlak (in m onder maaiveld), rechts: AHN (m).

B.4 Schatting zoutvracht onder de Afsluitdijk aan de hand van een analytische vergelijking

De mate van toename van de zoutvracht onder de Afsluitdijk naar het IJsselmeer bij een toenemend waterpeil op de Waddenzee is afhankelijk van de volgende aspecten (zie Figuur B.5): a. het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket (dikte en hydraulische conductiviteit samen), b. de weerstand van de deklaag, c. de zoutconcentratie van het grondwater ter plaatse, d. het waterpeilverschil tussen de Waddenzee en de Afsluitdijk, en tenslotte e. (in mindere mate) de breedte van de tussenliggende afsluitdijk. Het gehanteerde conceptuele schema is te zien in Figuur B.5 ; het systeem bestaat uit drie delen, ieder met zijn eigen karakteristieken.

Met een analytische vergelijking (de Formule van Mazure, inclusief enkele aanpassingen) kan een eerste orde schatting worden gedaan van de invloed van een hoger waterpeil op de Waddenzee op de zoutvracht vanuit het grondwatersysteem onder het IJsselmeer. Deze formule is geldig als de stroming door de watervoerende laag horizontaal is, de stroming door de slechtdoorlatende laag verticaal is en het kwelwater direct wordt afgevoerd.

De deklaag en het watervoerende pakket zijn homogeen verdeeld met constante hydraulische weerstand en doorlaatvermogen, per segment. In de berekening is aangenomen dat de waterpeilen in zowel de Waddenzee als het IJsselmeer tot 'oneindig' ver reiken. Verschillende vormen van deze formule (en de afleidingen) staan in o.a. TAW (2004), Van Dam (1992), Huisman (1972) en Oude Essink et al. (2008a). Er wordt gerekend met een constant verschil in waterpeil tussen de Waddenzee en het IJsselmeer. De geohydrologische parameters zijn met expert judgement geschat (Tabel B.4).



Figuur B.5 Het conceptuele 2D model achter de analytische berekening.

Tabel B.4 Geohydrologische parameters voor de referentie case.

Waddenzee		Afsluitdijk		IJsselmeer		Parameters
p1	0.0	p2	4.0	p3	-0.20	waterpeil [m]
kD1	5000	kD2	5000	kD3	5000	kD watervoerend pakket [m ² /d]
c1	500	c2	500	c3	500	c deklaag [d]
l1	1581	l2	1581	l3	1581	l1 karakteristieke lengte [m]

In Tabel B.5 is de geschatte zoutvracht voor een zestal geohydrologische parameter combinaties weergegeven.

Tabel B.5 Schatting zoutvracht (in Mton/jaar) voor een zestal parameter combinaties, over de gehele Afsluitdijk; schatting achtergrond chloride concentratie is 5000 mg Cl⁻/L (Oude Essink, 2008c).

Parameter combinatie	Korte beschrijving combinatie	Zoutbelasting (Mton/jaar)	Factor groter dan referentie
Combinatie 1 referentie case	Waddenzee peil = 0m	~28	n.v.t.
Combinatie 2 geohydrologie	Waddenzee peil = 0m, 2*kD en c/2	~55	~2
Combinatie 3 geohydrologie	Waddenzee peil = 0m, 2*kD en 2*c	~23	~0.8
Combinatie 3 zoutgehalte	Waddenzee peil = 0m, 10000mg Cl ⁻ /L	~55	~2
Combinatie 4 zss1 (3m in 2100)	Waddenzee peil = 3m	~297	~11
Combinatie 5 zss2 (8m in 2200)	Waddenzee peil = 8m	~746	~27

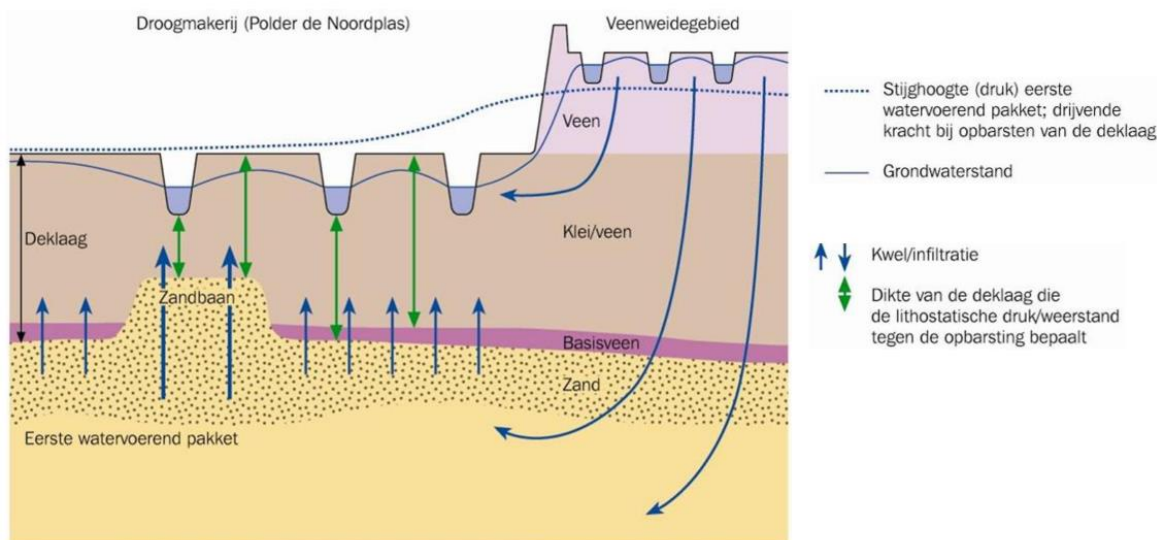
Uit Tabel B.5 blijkt dat bij een versnelde zeespiegelstijging volgens RCP8.5 (3 m in 2100 en 8 m 2200) de zoutvracht over de Afsluitdijk naar het IJsselmeer 11 en 25 keer zo groot worden als in de huidige situatie, respectievelijk.

De lineaire trendlijn van de toename zoutvracht ZV is ongeveer gelijk aan: $ZV = 28 + 90 * ZSS$ (in Mton/jaar), waar ZSS de zeespiegelstijging is (in m).

B.5 Opbarstingsindex en interpretatie

De getoonde kaarten in paragraaf 6.6 laten de berekende, gekwantificeerde, opbarstingsindex zien. De waarden geven slechts een indicatie (groot/matig/klein) van de kans dat opbarsting daadwerkelijk optreedt Figuur B.6, of een maat voor de gevoeligheid van

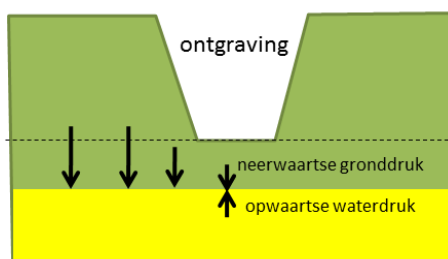
een terrein voor opbarsting bij lichte of zwaardere ingrepen (vooral ontgravingen). De index heeft dus geen heel precieze betekenis. Hieronder wordt verder een aantal aspecten besproken die relevant zijn voor de interpretatie.



Figuur B.6 Kwel en kans op opbarsting van de deklaag (verhouding tussen de lithostatische druk van de deklaag en de stijghoogtedruk) in een diepe polder (De Louw et al., 2012).

Vergelijking van de gebruikte index met geotechnische toetsnormen

De gehanteerde opbarstingsindex is afgeleid uit de toetsingsnorm die gebruikt wordt voor het bepalen van ‘bezwijken door opdrijven’ in de Nederlandse norm voor geotechnisch ontwerp van constructies (Nederlandse Norm (NEN), 2016). Het bezwijken door opdrijven van een bodemlaag, bijvoorbeeld onder een ontgraving of bouwput (= constructie) (Figuur B.7), is wat in de huidige studie wordt aangeduid met ‘opbarsten’.



Figuur B.7 Schematische weergave van de situatie bij een ontgraving of bouwput.

De geotechnische norm geeft aan dat de waterspanning te allen tijde kleiner moet zijn dan de constant veronderstelde verticale gronddruk aan de basis van de laag waarvoor bezwijken door opdrijven wordt getoetst. Om bezwijken/opbarsten te voorkomen geldt dan (in de notatie van dit rapport: p = opwaartse waterdruk, σ = verticale gronddruk):

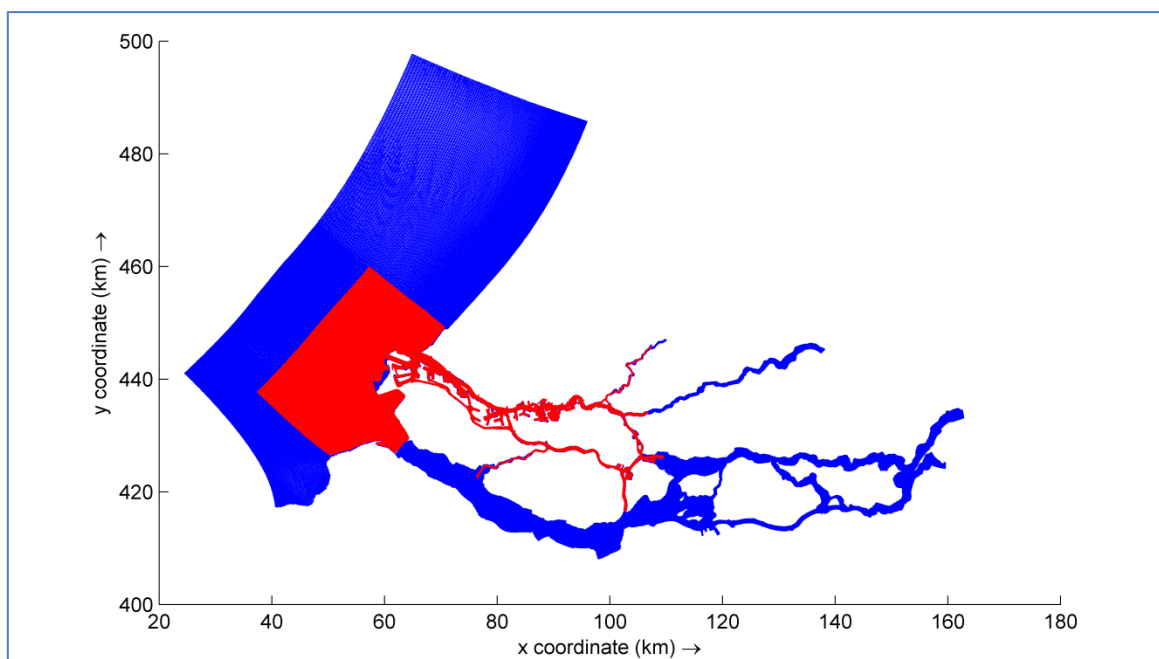
$$p \leq \sigma \text{ ofwel } I = \frac{\sigma}{p} \geq 1$$

Het kritieke punt (opbarstingsgrenswaarde) I ligt volgens de norm dus bij $I = 1$. In de praktijk is het echter gebruikelijk om een veiligheid van 1.1 te gebruiken. Soms wordt voor bouwfasen

die niet al te lang duren ook wel 1.05 geaccepteerd. De contourwaarde 1.1 die in paragraaf paragraaf 6.3.1 wordt gebruikt moet dus in principe geïnterpreteerd worden als een waarde waarvoor de kans dat opbarsting plaatsvindt klein is.

B.6 Externe verzilting

Het OSR model omvat een twee-tal deelmodellen, Het dieptegemiddelde Havenmodel en het drie-dimensionale NSC model. De omvang van beide deelsystemen wordt getoond in Figuur B.8.



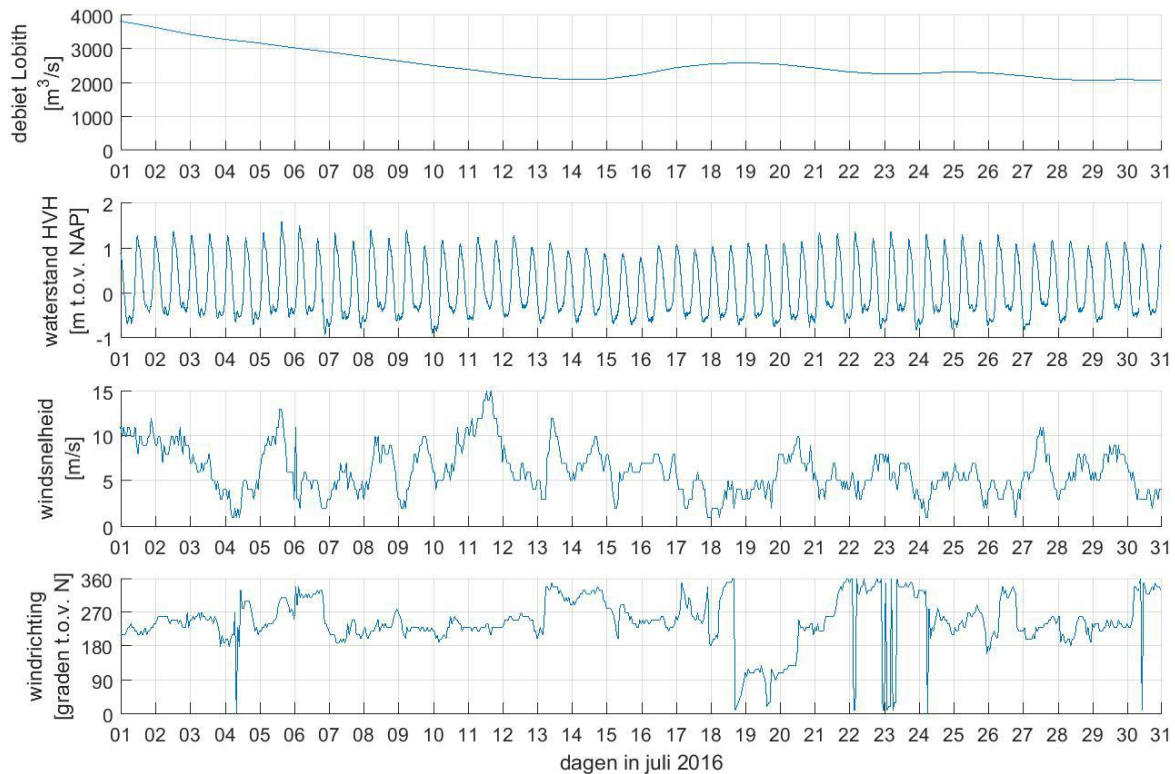
Figuur B.8 Omvang Havenmodel (blauw) en NSC model (rood)

Het Havenmodel genereert de randvoorwaarden voor het drie-dimensionale NSC model. Voor de rivierranden Lek, Beneden Merwede, Dortsche Kil en Spui betreft het debieten en dieptegemiddelde zoutconcentraties. Voor een uitgebreide beschrijving van het modelsysteem wordt verwezen naar (Kranenburg, 2015 (jun)).

Met betrekking tot het modelsysteem wordt opgemerkt dat:

- De locatie van de rivierranden van het drie-dimensionale NSC model is bepaald door zoutindringing onder de huidige condities,
- Ondanks de fijnheid van beide modellen, en de daarmee gepaard gaande enorme rekeninspanning, blijkt zoutindringing/stratificatie extreem moeilijk te modelleren. Vergelijking van berekende met gemeten zoutgehalten in de Nieuwe Waterweg laten vaak te lage berekende zoutgehalten bij de bodem zien. Dit betekent dat de berekende stratificatie vaak minder is dan de daadwerkelijk optredende stratificatie.
- De Haringvlietsluizen worden in de berekening met het Havenmodel aangestuurd middels het LozingsProgrammaHaringvlietsluizen 1984 (LPH84). Dit betekent dus dat het effect van kieren met de Haringvlietsluizen, aanvangend september 2018, niet is verdisconteerd in de berekeningen. Dit kan ook niet omdat het kierprogramma middels “Lerend implementeren” gaat worden afgeleid en dus momenteel nog niet bekend is.

De condities in deze simulatie staan weergegeven in onderstaande figuur:

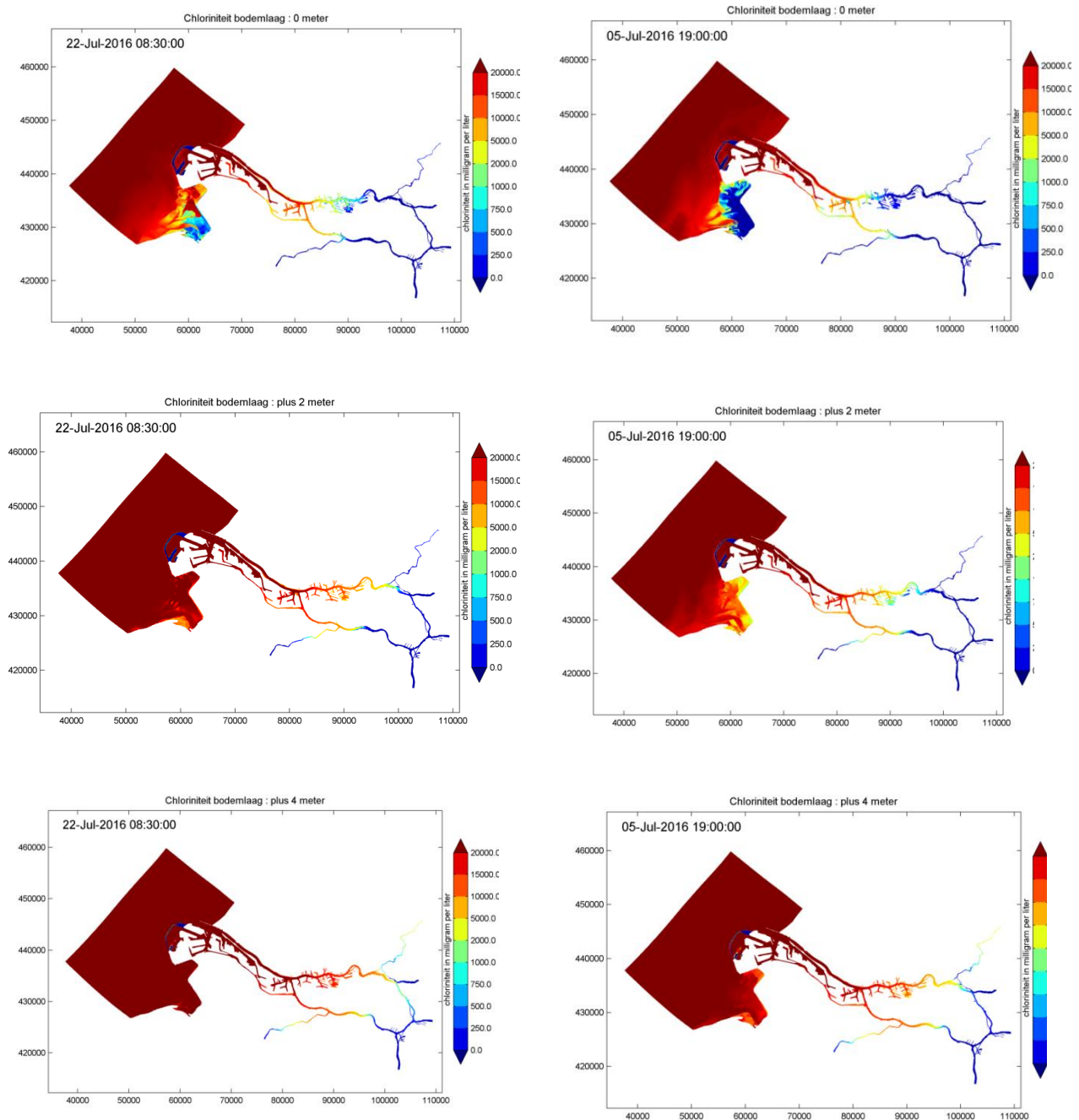


Figuur B.9 Afvoer bij Lobith, waterstand bij Hoek van Holland en de windsnelheid en richting bij Hoek van Holland tijdens de simulatieperiode in juli 2016 (bron: <http://live.waterbase.nl/>).

Tijdens de simulatieperiode loopt het debiet bij Lobith van bijna 4000m³/s terug naar 2000-2500m³/s en varieert de waterstand tussen de -1 m NAP en 1,5 m NAP. Er stond in de periode een matig tot krachtige wind.

Resultaten

Onderstaande figuur laat de maximale zoutindringing zien uit de simulatie voor twee verschillende afvoeren.



Figuur B.10 Zoutconcentraties bij 0, 2, 4 m zeespiegelstijging voor afvoer van 2000m³/s (links) en voor afvoer van 3000 m³/s (rechts).

C Implementatietijd in het verleden

Deltawerken

Na de watersnoodramp werd in februari 1953 de Deltacommissie ingesteld. Deze commissie kreeg de opdracht om maatregelen te formuleren ten behoeve van een veilige Nederlandse delta. In 1958 werd de eerste Deltawet goedgekeurd, waardoor men formeel akkoord kreeg voor de implementatie van de Deltawerken. Uiteindelijk zijn er 13 dammen en waterkeringen gebouwd. De implementatietijd per constructie varieerde tussen de 3 (Zandkreekdam) en 14 (Haringvlietsluizen) jaar. Het laatste onderdeel van de Deltawerken, de Maeslantkering, werd in 1997 afgerond, hierdoor kwam de totale duur van uitvoering op 44 jaar uit.

Ruimte voor de rivier

Het onderzoek voor de Planologische Kernbeslissing (PKB) Ruimte voor de rivier heeft circa 4-5 jaar geduurd. Verder doorliep de PKB het toenmalige besluitvormingsproces, bestaande uit ontwerp, inspraak, definitief kabinetsstandpunt en vastgesteld besluit. Dit besluitvormingsproces behelsde ongeveer 2 jaar. De implementatie van projecten binnen Ruimte voor de Rivier nam ongeveer 10 jaar in beslag.

Klimaatbestendige wateraanvoer (KWA)

De eerste stap van de uitbreiding van de KWA is gepland om in 2021 gereed te zijn. Daarvoor is een jaar uitgetrokken voor het nader onderzoeken van de uitvoerbaarheid van diverse maatregelen en ongeveer 2 jaar voor het uitwerken van het plan. Voor de realisatie staat ook ongeveer 2 jaar.