

Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma

Een verkenning



| Inhoud | |
|---|----|
| 1 Inleiding | 13 |
| 1.1 Signaal van mogelijk extra versnelde zeespiegelstijging | 13 |
| 1.2 Doel van deze studie | 14 |
| 1.3 Het Deltaprogramma en het signaal van versnelde zeespiegelstijging | 14 |
| 1.4 Afbakening | 16 |
| 2 Aanpak | 18 |
| 2.1 Stapsgewijze aanpak | 19 |
| 2.2 Identificeren van het optreden van knikpunten | 19 |
| 2.3 Onderzochte thema's | 20 |
| 3 Scenario's en projecties voor zeespiegelstijging | 22 |
| 3.1 Huidige Deltascenario's en nieuwe inzichten | 23 |
| 3.2 Projecties voor versnelde zeespiegelstijging | 27 |
| 3.3 Gebruik projecties met versnelde zeespiegelstijging in deze studie | 28 |
| 3.4 Gebruik van projecties met versnelde zeespiegelstijging in het buitenland | 28 |
| 4 Kustfundament, Waddenzee en zuidwestelijke delta | 30 |
| 4.1 Inleiding | 31 |
| 4.2 Kust | 31 |
| 4.2.1 Zeespiegelstijging en kusterosie | 31 |
| 4.2.2 Suppletievolume en frequentie | 32 |
| 4.2.3 Beschikbaarheid en bruikbaarheid zand | 33 |
| 4.2.4 Organisatie en kosten uitvoering | 34 |
| 4.2.5 Impact van zandwinning en suppletie op natuur en gebruik kust | 37 |
| 4.3 Waddenzee | 38 |
| 4.4 Zuidwestelijke Delta | 39 |
| 4.5 Rijn-Masdelta | 40 |
| 4.6 Gevolgen voor voorkeursstrategie | 41 |
| 5 Waterveiligheid | 44 |
| 5.1 Inleiding | 45 |
| 5.2 De betekenis van versnelde zeespiegelstijging in het kort | 45 |
| 5.3 Gevolgen van de versnelde zeespiegelstijging voor stormvloedkeringen en zeesluizen | 46 |
| 5.3.1 Invloed van de zeespiegelstijging op het kerende vermogen | 47 |
| 5.3.2 Verandering van de sluitfrequentie van de Maeslantkering en Oosterscheldekering | 48 |
| 5.4 Invloed van zeespiegelstijging op rivierwaterstanden | 52 |
| 5.4.1 Invloed zeespiegelstijging bij dagelijkse condities | 52 |
| 5.4.2 Invloed zeespiegelstijging bij stormcondities en hoge afvoeren | 53 |
| 5.4.3 Coïncidentie hoge zeewaterstanden en grote rivieraafvoeren | 54 |
| 5.4.4 Effectiviteit rivierverruimingsmaatregelen | 54 |
| 5.5 IJsselmeer en Afsluitdijk | 54 |
| 5.6 Geverg voor de voorkeursstrategie en vervolgopties | 56 |
| 6 Zoetwatervoorziening | 58 |
| 6.1 Inleiding | 59 |
| 6.2 Verzilting via de rivieren en het gebruik van inlaatpunten | 60 |
| 6.3 Verzilting via het grondwater en de watervraag | 66 |
| 6.3.1 Kwel en zoutbelasting in Zuid-Holland | 66 |
| 6.3.2 Watervraag voor doorspoelen in Hoogheemraadschap Rijnland | 68 |
| 6.3.3 Watervraag aan het IJsselmeer | 69 |
| 6.4 Zoetwatervoorraad onder de duinen | 70 |
| 6.5 Verzilting van de zoetwatervoorraad in het IJsselmeer | 71 |
| 6.6 Opbarsting van de bodem en consequenties voor grondwateroverlast en zout | 71 |
| 6.7 Geverg voor de voorkeursstrategie en vervolgopties | 72 |
| 7 Conclusies en aanbevelingen | 74 |
| 7.1 Conclusies | 75 |
| 7.1.1 Zeespiegelstijging | 75 |
| 7.1.2 Geverg voor het Deltaprogramma | 75 |
| 7.1.3 Geverg voor de voorkeurstrategieën op basis van knikpunten en hun moment van optreden | 76 |
| 7.2 Aanbevelingen voor een kennisagenda | 80 |

Samenvatting

De zeespiegel kan mogelijk (veel) sneller gaan stijgen dan tot nog toe is aangenomen in het Deltaprogramma. Deze extra versnelling heeft te maken met recente inzichten over het mogelijk versneld afbreken en smelten van het landijs op Antarctica. Op voorstel van de Signaalgroep¹ is in het Deltaprogramma 2018 opgenomen dat de mogelijke consequenties van de resulterende extra versnelde zeespiegelstijging nader onderzocht gaan worden. Dit rapport beschrijft de resultaten van een eerste verkenning naar de mogelijke gevolgen van deze extra versnelde zeespiegelstijging voor het kustfundament (inclusief de Wadden en zuidwestelijke delta), de waterveiligheid, en de zoetwatervoorziening in Nederland en de implicaties voor de voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma.

Dat de zeespiegel de komende eeuw en ook daarna blijft stijgen is zeker. Onzeker is echter hoeveel en met welke snelheid dit zal gaan gebeuren. Dit hangt onder meer af van de emissies van broekgasgassen en dus ook van het internationale klimaatbeleid. Het Nederlandse beleid is er op gericht om de doelstellingen uit het akkoord van Parijs te halen (maximaal 2°C wereldwijde temperatuurstijging). Er is nog veel onzekerheid over de toekomstige emissies en de opwarming en zeespiegelstijging die daarmee gepaard gaan. Vanwege de potentieel grote implicaties voor Nederland en daarmee ook voor het Deltaprogramma is daarom ook gekeken naar een extreme zeespiegelstijging die het gevolg kan zijn van een emissiescenario dat leidt tot 4°C wereldwijde temperatuurstijging.

Deze verkenning is gericht op een aantal sleutelvragen die samen met betrokkenen van het Deltaprogramma zijn vastgesteld, maar is beperkt in zijn opzet. Zo beperkt de studie zich tot de fysieke wereld, en richt deze zich op de fysieke interventies die binnen het huidige watersysteem met het huidige gebruik van het water en de huidige instituties gedaan worden. Daarbij is als uitgangspunt verondersteld dat de vigerende beleidsstrategieën worden doorgezet en de maatschappij (in Nederland en daarbuiten) niet verandert, terwijl dit in werkelijkheid wel het geval zal zijn.

Welke zeespiegelstijging kunnen we in Nederland verwachten in 2050, 2100 en 2200 bij een extra versnelde zeespiegelstijging?

De zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedraagt momenteel circa 2 mm per jaar. De nu in Nederland gebruikte Deltascenario's zijn gebaseerd op de KNMI'14 scenario's. Deze gaan uit van een zeespiegelstijging met maximaal 0,4 m in 2050 en maximaal 1,0 m in 2100 (ten opzichte van 1995). Recente signalen en inzichten over mogelijk extra versnelde zeespiegelstijging als gevolg van het versneld afbreken en afsmelten van Antarctica zijn hierin niet verwerkt. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zal deze nieuwe inzichten nader bestuderen en hierover in 2019 (Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate) en 2021 (6th Assessment Report) rapporteren. Daarna zal het KNMI de scenario's voor Nederland actualiseren (publicatie verwacht in 2021).

Hierop vooruitlopend heeft het KNMI projecties gemaakt voor zeespiegelstijging tot het jaar 2100, waarin deze nieuwe inzichten, die overigens nog onzeker zijn, over Antarctica wel verwerkt zijn². Tot 2050 verschillen deze projecties nauwelijks van de bovenwaarde van de Deltascenario's³ (de scenario's Warm en Stoom). Na 2050 gaan de projecties sterk van de Deltascenario's afwijken en neemt ook de onzekerheidsmarge toe, vooral aan de bovenzijde. Voor 2100 gaan de Deltascenario's uit van een stijging tussen 0,35 m en 1,0 m. In de nieuwe projecties wordt een zeespiegelstijging van 0,3 tot maximaal 2,0 m mogelijk geacht, mits de Parijs-doelen van maximaal 2°C opwarming in deze eeuw worden gehaald. Bij een sterkere opwarming van de aarde (met 4°C in 2100) kan dit oplopen tot 2,0 m (middenwaarde) en maximaal 3,0 m (bovenwaarde) in 2100⁴. Na 2100 kan deze extra versnelde zeespiegelstijging doorzetten tot 5 en mogelijk 8 m in 2200.

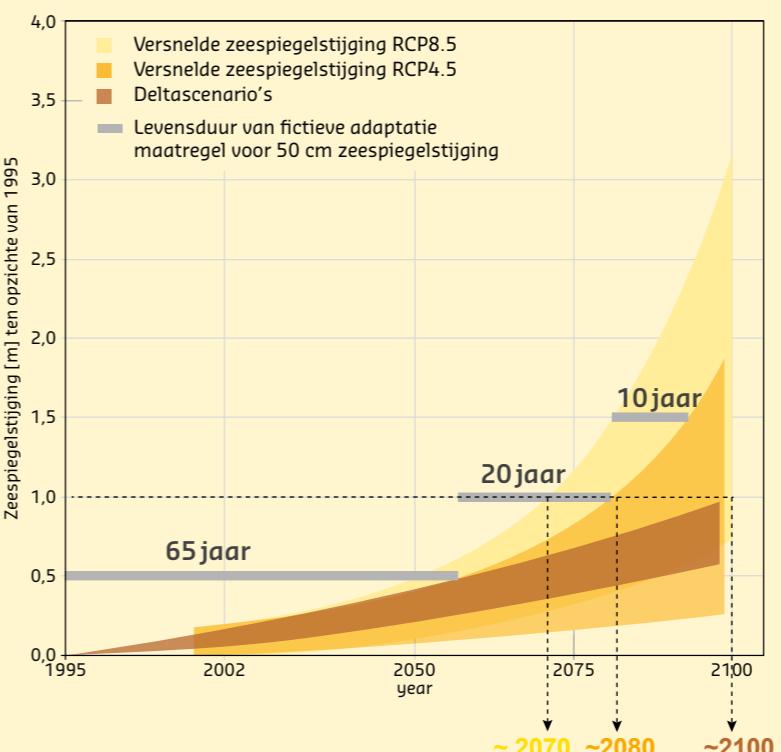
Niet alleen de absolute stijging van de zeespiegel is belangrijk, maar ook de stijgsnelheid per jaar. De zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is momenteel circa 2 mm/jr. In de Deltascenario's loopt deze snelheid op naar 10 mm/jaar rond 2050 tot maximaal 14 mm/jaar in 2100. Bij de extra versnelde zeespiegelstijging kan deze

laatste snelheid al bereikt worden rond 2050, en loopt deze daarna op tot circa 20-35 mm/jaar rond 2070 en tot mogelijk zelfs 60 mm/jaar of meer aan het einde van deze eeuw.

Hoe zijn de mogelijke gevolgen verkend?

De voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma bestaan uit een combinatie van maatregelen die, naarmate de omstandigheden veranderen, ingezet kunnen worden. Het moment waarop nieuwe of aanvullende maatregelen aan de orde kunnen komen noemen we een knippunkt. Voorbeeld: de sluitfrequentie van een stormvloedkering wordt dermate hoog dat de ontwerpeisen overschreden worden of dat de kosten of effecten maatschappelijk onaanvaardbaar worden.

In deze verkenning is eerst in beeld gebracht op welke wijze de extra versnelde zeespiegelstijging knippunten kan veroorzaken op het gebied van het kustfundament, waterveiligheid en zoetwatervoorziening. Beschreven wordt bij welke mate van zeespiegelstijging of bij welke snelheid van zeespiegelstijging een knippunkt kan optreden. Met de projecties voor extra versnelde zeespiegelstijging is vervolgens geschat wanneer een knippunkt optreedt en hoeveel eerder dit is ten opzichte van de Deltascenario's. Hoe sneller de zeespiegelstijging, hoe eerder knippunten optreden, en ook hoe korter de functionele levensduur van maatregelen wordt (Figuur 1).



Figuur 1 Gevolgen van extra versnelde zeespiegelstijging geïllustreerd aan de hand van de bandbreedte van de Deltascenario's en de projecties voor 2 en 4°C opwarming in 2100 (RCP4.5 en RCP8.5). De functionele levensduur van adaptatiemaatregelen wordt kleiner (links). Bijvoorbeeld: de functionele levensduur van een maatregel voor 50 cm zeespiegelstijging kan bij een versnelende zeespiegelstijging afnemen van circa 65, naar 20, naar 10 jaar. Knippunten treden eerder op. Bijvoorbeeld: Een knippunkt bij 1 m treedt volgens de bovenwaarde van de Deltascenario's op rond 2100, maar komt bij extra versnelde zeespiegelstijging op zijn vroegst 20 tot 30 jaar eerder. Een knippunkt bij 2 m treedt in de Deltascenario's op ver na 2100, maar komt bij extra versnelde zeespiegelstijging al voor in deze eeuw (op zijn vroegst rond 2090).

Wat zijn de mogelijke gevolgen van extra versnelde zeespiegelstijging?

Kustfundament

De voorkeursstrategie voor de kust, Wadden en zuidwestelijke delta beoogt het doen meegroeien van het kustfundament met de zeespiegelstijging door middel van zandsuppleties. Op dit moment wordt circa 12 miljoen m³ zand per jaar aangebracht ter compensatie van erosie en voor het meegroeien van het kustfundament. Naarmate de stijgsnelheid van de zeespiegel toeneemt, is meer zand nodig. Een eenvoudige berekening geeft enig idee over de toename van de zandbehoefte bij grotere stijgsnelheden. In de Deltascenario's Warm en Stoom loopt de stijgsnelheid op via circa 10 mm/jaar in 2050 tot circa 14 mm/jaar aan het eind van de eeuw. Rond 2050 is als gevolg daarvan al 3 à 4 keer zo veel zand nodig als nu jaarlijks aangebracht wordt, oplopend tot 4 à 5 keer zoveel aan het eind van de eeuw. De projecties met extra versnelde zeespiegelstijging vragen tot 2050 ongeveer evenveel zand als de Deltascenario's Stoom en Warm, maar vereisen rond 2100 een suppletiehoeveelheid die kan oplopen tot 20 keer zo veel als de huidige volumes (+2°C) of nog veel meer (+4°C). Het is nog onduidelijk wat de gevolgen van deze structurele en grootschalige zandwinning en suppleties zijn voor andere belangen en waarden (recreatie, natuurwaarden) en wat dit betekent voor de kosten, organisatie en uitvoering.

¹ De Signaalgroep heeft als taak relevante, externe ontwikkelingen voor het Deltaprogramma en haar Deltabeslissingen te signaleren en aan te geven of bijsturing voor de hand ligt. De Signaalgroep bestaat uit inhoudelijke experts van voor het Deltaprogramma relevante en gezaghebbende kennisinstellingen.

² Le Bars, D. et al. (2017), Environmental Research Letters, 12, 044013. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa6512>

³ De Deltascenario's vertonen ook een versnelling na 2050, zij het zeer beperkt. In de nieuwe projecties gaat het om een extra versnelling ten gevolge van het versneld afsmelten van landijs op Antarctica.

⁴ Een temperatuurstijging van 2°C in 2100 wordt benaderd door het IPCC RCP4.5 scenario, een temperatuurstijging van 4°C in 2100 wordt benaderd door het IPCC RCP8.5 scenario.

Hoewel een deel van het gesupplieerde zand door zeestromingen uiteindelijk in de Waddenzee terecht komt, is het de vraag of dit voldoende is om de bodem van de Waddenzee te laten meestijgen met de zeewaterstand. Verkennende berekeningen laten zien dat de Westelijke Waddenzee vanaf een zeespiegelstijging van 6 mm/jaar en de Oostelijke Waddenzee vanaf 10 mm/jaar de stijging niet meer kan bijhouden. Bij een snellere stijging neemt het areaal aan intergetijdengebied (slikken, platen en kwelders) sneller en sterker af. Deze kritieke stijgsnelheden worden rond 2050 en uiterlijk 2065 overschreden in zowel de Deltascenario's Warm en Stoom als in de projecties met versnelde zeespiegelstijging.

De gevolgen voor de zuidwestelijke delta variëren sterk per deltabekken. De Oosterschelde heeft nu al een groot zandtekort. Om de schorren en platen te laten meegroeien met de zeespiegelstijging zullen grootschalige suppleties nodig zijn. De Westerschelde wordt sterk beïnvloed door menselijk handelen, onder meer door het verplaatsen van sediment uit de vaargeul naar elders. Ook hier zal op termijn extra sediment nodig zijn om buitendijkse gebieden mee te laten groeien. Nader onderzoek is nodig naar de effecten van versnelde zeespiegelstijging op de afgedamde deltabekkens (Grevelingen, Veerse Meer, Volkerak-Zoommeer).

Waterveiligheid

De analyse voor waterveiligheid in deze studie is gericht op de waterkerende kunstwerken langs de kust (sluizen, stormvloedkeringen). De voorkeursstrategieën zijn gericht op het voldoen aan de nieuwe normen voor de waterkeringen in 2050. De extra versnelde zeespiegelstijging manifesteert zich naar verwachting op zijn vroegst vanaf 2050. Tot 2050 zijn de voorkeursstrategieën daarom nog houdbaar. De extra versnelling zorgt ervoor dat vanaf 2050 de functionele levensduur van de kunstwerken korter wordt en vervanging 10 (+2 °C) tot 20 jaar (+4°C) eerder aan de orde kan zijn als geen compenserende (levensduur-verlengende) maatregelen worden genomen. Ook de vervanging van een aantal stormvloedkeringen (zoals de Maeslantkering en de Oosterscheldekering) kan eerder nodig zijn dan tot nu toe voorzien, bijvoorbeeld vanwege een sterk oplopende sluitfrequentie.

Bij een extra versnelde zeespiegelstijging wordt de functionele levensduur van de buitenste waterkeringen bekort als geen aanvullende maatregelen worden genomen (Figuur 1). Dit kan betekenen dat in het ontwerp van nieuwe stormvloedkeringen en zeesluizen of bij het aanpassen van bestaande keringen al rekening gehouden moet worden met mogelijke uitbreidingen, verhogingen en/of versterkingen. Verder is van belang in welke mate het achter de buitenste waterkering liggende gebied aangepast moet worden om bestand te zijn tegen zeespiegelstijging. De stijging van de zeespiegel zal immers doorwerken naar het gebied dat beschermd wordt door de afsluitbare keringen, zowel binnen- als buitendijks. Dat gebeurt via oplopende waterstanden (bij niet gesloten kering) en een toenemende kans op het gelijktijdig optreden van sluiting van de kering en hoge rivieraafvoer. Hierdoor nemen de belastingen op de waterkeringen in het benedenrivierengebied toe in hoogte, duur en frequentie. Hoewel de kans op coïncidetie van hoogwater op de rivieren en storm op zee toeneemt, nemen de effecten hiervan niet overal evenredig toe met de zeespiegelstijging. Nader onderzoek moet uitwijzen voor welke locaties dit effect van belang is voor de maatgevende waterstanden en hoe snel deze bij versnelde zeespiegelstijging toenemen. Ook zullen eerder maatregelen nodig zijn voor de buitendijkse gebieden en zal de vraag hoe lang de huidige strategie van "afsluitbaar-open" voor het Rijnmondgebied houdbaar is naar voren komen.

De verkorte functionele levensduur heeft ook gevolgen voor de planning en uitvoering van versterkingen van keringen. Voor de waterkeringen langs de kust en de Westerschelde wordt de stijgsnelheid waaraan we ons moeten aanpassen ongeveer 10-30 keer zo groot in het jaar 2100.

De voorkeurstrategie voor het IJsselmeergebied gaat uit van spuien als het kan, pompen als het moet. Bij een zeespiegelstijging van 0,65 m wordt spuien onder vrij verval onder gemiddelde condities van neerslag, Rijnafvoer en stormopzet vrijwel onmogelijk, omdat het niveau van het meerpeil dan zelfs bij laagtijd onder het niveau van de buitenwaterstand ligt. Bij (extreme) hoogwatergebeurtenissen op het IJsselmeer kan spuien nog wel een bijdrage blijven leveren, omdat het meerpeil dan hoger staat. Bij een zeespiegelstijging van 1,75 m is er een pompcapaciteit op de Afsluitdijk nodig van 1.000 tot maximaal 3.200 m³/s om alle IJsselaafvoer en neerslagoverschot af te voeren, afhankelijk van de eisen die worden gesteld aan de waterveiligheid (4 tot 13 keer zo veel als de nu geplande beschikbare capaciteit in 2022). Een dergelijke zeespiegelstijging kan volgens de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging mogelijk al worden bereikt rond het jaar 2100. Uitbreiding van de pompcapaciteit kan worden uitgesteld of gereduceerd indien het streefpeil op het IJsselmeer wordt verhoogd, maar hier is extra inspanning voor dijkversterking rond het meer mee gemoeid.

Zoetwatervoorziening

De onzekerheden over de zoetwateropgaven voor de eerstkomende decennia worden gedomineerd door de onzekere ontwikkelingen in watervraag en waterbeschikbaarheid vanuit rivieren en neerslag. Meer verzilting door een stijgende zeespiegel speelt daarin tot 2050 een ondergeschikte rol. Een extra versnelde zeespiegelstijging kan vanaf 2050 wél een significante toename van de zoutindringing via de rivieren opleveren, waardoor inlaatpunten in het benedenrivierengebied (Gouda, Lek, Bernisse) vaker en langer moeten sluiten. Om dit te compenseren zou rond 1 m zeespiegelstijging een permanent alternatief nodig kunnen zijn voor inlaatpunt Gouda, bijvoorbeeld de dagelijkse inzet van wat nu de calamiteitenaivoer is in geval van extreme droogte; de klimaatbestendige wateraanvoer (KWA). Bij een opwarming van 2°C is dit rond 2100 mogelijk noodzakelijk, in de meer extreem projectie die uitgaat van 4°C opwarming is dat mogelijk rond 2070 al aan de orde. Capaciteitsvergrooting is dan mogelijk ook nodig door toename van het neerslagtekort, het vaker samenvallen van verzilting en piek in watervraag, en een toename van de vraag door verzilting via de ondergrond. Nadere analyses zijn nodig om dit te bepalen. Rond 2 m zeespiegelstijging en in combinatie met lage afvoeren volgens de Deltascenario's Warm en Stoom is inlaatpunt Bernisse regelmatig niet bruikbaar voor het Brielse Meer. De alternatieve inlaat via Spijkenisse is mogelijk al eerder (bij weinig zeespiegelstijging) beperkt bruikbaar.

Door toenemende zoute kwel vanuit het diepe grondwater kunnen in de laag gelegen gebieden aan de kust (zone 10-20 km) grondwaterproblemen optreden, en kan de zoetwatervraag voor doorspoelen toenemen. Dit is het gevolg van zowel zeespiegelstijging als autonome ontwikkeling door de inpoldering, bodemdaling, grondwateronttrekkingen. Waar de toenemende verzilting in de diepe polders ten zuiden van het Noordzeekanaal tot 2100 met name veroorzaakt wordt door autonome ontwikkelingen, domineert in andere gebieden waarschijnlijk de invloed van de stijgende zeewaterstand (Noord-Holland, Friesland, Groningen). Nader onderzoek moet uitwijzen wat dit betekent voor de benodigde beschikbare zoetwatervoorraden in het IJsselmeer en de delta. Eerste berekeningen laten zien dat de watervraag voor doorspoelen tegen het einde van de eeuw significant kan groeien als gevolg van verzilting via de ondergrond in alle projecties en scenario's.

Wat zijn de mogelijke gevolgen van extra versnelde zeespiegelstijging voor de voorkeursstrategieën?

De onzekerheid over de toekomstige zeespiegelstijging is met de nieuwe projecties groter geworden, vooral inzake de bovenwaarden. Deze bovenwaarden bepalen wanneer op zijn vroegst knikpunten kunnen optreden en andere maatregelen uit de voorkeursstrategieën of geheel andere maatregelen aan de orde kunnen komen. Het onderzoek laat zien dat het daarbij belangrijk is onderscheid te maken tussen een projectie met extra versnelde zeespiegelstijging die uitgaat van 2°C opwarming (dus conform het klimaatakkoord van Parijs), en een meer extreme projectie die uitgaat van 4°C opwarming, met name voor het moment waarop dit kan gebeuren (zie Figuur 2).

In een emissescenario dat leidt tot maximaal 2°C opwarming is er tot 2050 geen extra versnelde zeespiegelstijging merkbaar en zijn de voorkeursstrategieën houdbaar, maar is in 2100 een zeespiegelstijging mogelijk van 1,0 m tot maximaal 2,0 m. Vanaf 2050 zijn de volgende ontwikkelingen mogelijk (zie ook figuur 2):

- Toenemend verlies aan intergetijdengebied in de westelijke en later oostelijke Waddenzee.
- Toenemende behoefte aan suppletiezand: 3 tot 4 keer zo veel als huidig rond 2050 (geldt ook voor de Deltascenario's) en mogelijk 12 tot 20 keer zo veel als huidig in 2100; deze behoefte neemt verder toe na 2100.
- Verkorting van de functionele levensduur van een aantal kunstwerken en stormvloedkeringen als geen aanvullende maatregelen worden genomen, en daardoor mogelijk eerdere vervanging hiervan (eerder dan conform hun technische levensduur).
- Toename van de sluitfrequentie van de Maeslantkering en Oosterscheldekering met ongeveer een factor 30 bij 1 m stijging (in 2100 bij RCP4.5 en de Deltascenario's Warm en Stoom). Dit komt neer op 3 keer per jaar sluiten voor de Maeslantkering en 45 keer per jaar voor de Oosterscheldekering. Bij een verdere stijging is dit nog vaker, namelijk 30 keer per jaar voor de Maeslantkering bij stijging met 1,5 m en ieder getij bij 1,3 m stijging voor de Oosterscheldekering.
- Toename van de frequentie en mate van overschrijding van ontwerppelen van stormvloedkeringen in het jaar 2100 met een factor 20 tot 100. De herhalingstijden van de ontwerppelen zijn bij 1 m stijging circa eens in de 20 jaar voor de Maeslantkering.
- Structurele inzet van pompen op de Afsluitdijk vanaf 0,65 m stijging (rond 2085).
- Structurele inzet van een alternatief voor zoetwatervoorziening via Gouda (mogelijk KWA) bij een zeespiegelstijging van 1 m. Mogelijk capaciteitsvergrooting en een nieuwe oostelijke aanvoer voor zoetwatervoorziening Midden-West Nederland nodig rond 2100. Rond 2100 zijn aanvullende maatregelen voor Bernisse nodig.
- Significante toename van de watervraag aan het IJsselmeer voor doorspoelen als gevolg van zoutindringing via het grondwater, en nog verdere toename na 2100.

In een emissescenario dat leidt tot 4°C mondiale opwarming kan de zeespiegel in 2100 volgens de projecties 2 m tot maximaal 3 m zijn gestegen. Ook in dit geval is tot 2050 de extra versnelde zeespiegelstijging nauwelijks merkbaar en zijn de voorkeursstrategieën houdbaar. Bij deze projectie dient rekening te worden gehouden met (zie ook figuur 2):

- Eerder verlies van het intergetijdengebied in de Waddenzee.
- Toename van de suppletiebehoefte met een factor 3 tot 4 keer de huidige hoeveelheden rond 2050 tot meer dan 25 keer zo veel of meer in 2100, en verdere toename na 2100.
- Voortijdige vervanging van een aantal kunstwerken en stormvloedkeringen; veel eerder dan conform hun technische levensduur.
- Een dusdanig frequenter sluiting van de Maeslantkering en Oosterscheldekering dat deze nagenoeg permanent gesloten zijn.
- Toename van de frequentie en mate van overschrijding van ontwerppeilen van stormvloedkeringen. Bij 2 m stijging is dit met een factor 300 tot 10.000. Voor de Maeslantkering en Haringvlietdam zal deze overschrijding vaker zijn dan eens per 10 jaar. Voor de Oosterscheldekering is dit bijna eens per 10 jaar. Dit neemt verder toe bij een stijging van 3 m.
- Structurele inzet van pompen op de Afsluitdijk vanaf 0,65 m zeespiegelstijging (rond 2075) om het volledige neerslagoverschot en de IJsselafvoer uit te kunnen pompen.
- Verschuiving van de structurele inzet van KWA naar 2070 voor de zoetwatervoorziening van Midden-West Nederland. Een nieuwe oostelijke aanvoer is mogelijk nodig vanaf 2 m, met ook een grotere capaciteit. Tegen het eind van de eeuw zijn grootschalige alternatieven voor onder meer Bernisse waarschijnlijk noodzakelijk.
- Significante toename van de watervraag aan het IJsselmeer voor doorspoelen als gevolg van zoutindringing via het grondwater (meer dan bij RCP4.5), en nog veel meer na 2100.

Conclusies en aanbevelingen

De nieuwe inzichten over het mogelijk versneld afbreken en smelten van het landijs op Antarctica kunnen leiden tot een extra versnelde zeespiegelstijging en dus een grotere zeespiegelstijging dan is aangenomen in de Deltascenario's. De extra versnelling is mogelijk door een aantal processen die leiden tot het versneld afsmelten van landijs op Antarctica en die tot nu toe niet waren onderkend. Naar verwachting leveren deze processen tot 2050 geen grote bijdrage aan de zeespiegelstijging, maar daarna kan deze bijdrage snel toenemen. Of deze versnelde zeespiegelstijging in de toekomst werkelijk zal optreden is vooral nog onzeker, en zal in de komende jaren door IPCC en KNMI verder onderzocht en met (internationale) monitoring en onderzoek aangetoond moeten worden.

Deze verkenning laat zien dat een extra versnelling van de zeespiegelstijging op zijn vroegst vanaf 2050 merkbaar gaat worden in de zeespiegel zelf. Zoals hierboven geschetst betekent dit voor de voorkeursstrategieën dat maatregelen die in de tweede helft van deze eeuw voorzien worden eerder op de agenda kunnen komen en/of meer inspanning vragen. Naarmate het minder goed lukt om de klimaatafspraken van Parijs na te komen, en daarmee de opwarming te beperken tot 2 graden, verschuiven de knikpunten meer naar voren en nemen de benodigde inspanningen meer toe. Zowel in de keuze van maatregelen als het ontwerp zal nadrukkelijker rekening gehouden moeten worden met deze mogelijke extra versnelling van de zeespiegelstijging, maar ook met de bijbehorende grotere onzekerheidsmarges.

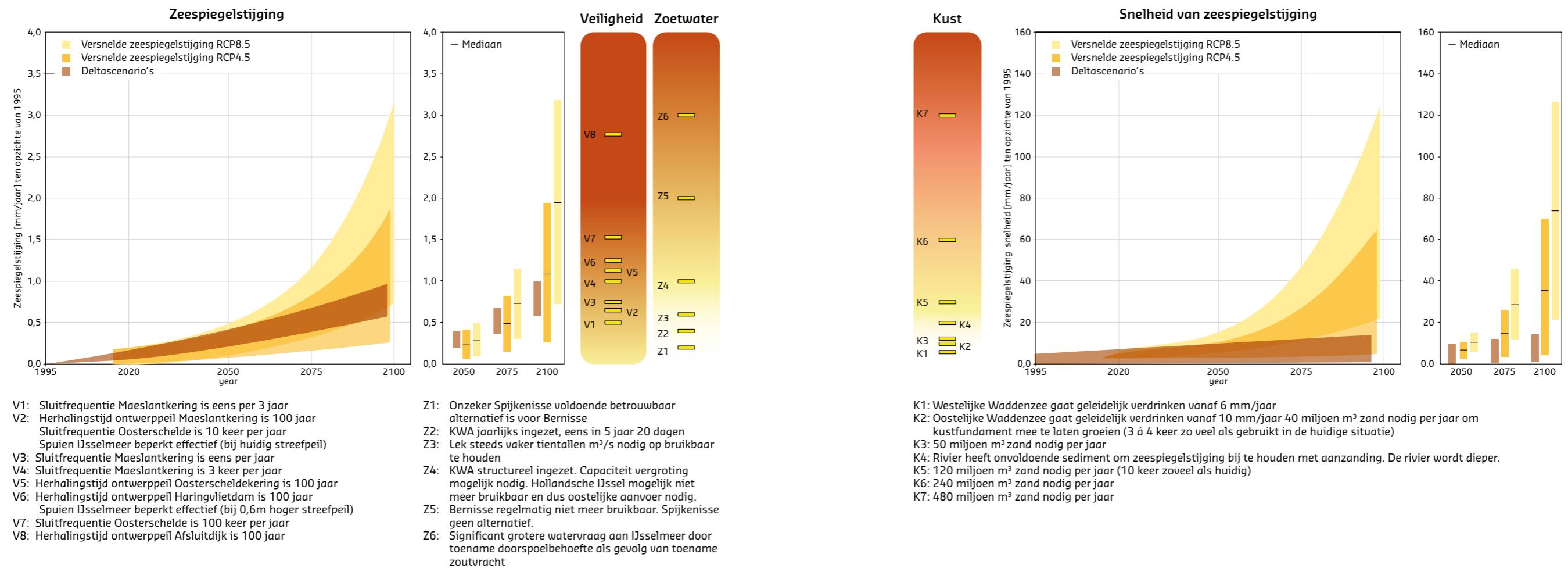
Vanwege de potentieel grote gevolgen voor Nederland is het ten eerste belangrijk om het afbreken en afsmelten van Antarctica en de daaruit resulterende zeespiegelstijging op de voet te volgen door (internationale) observaties en onderzoek, en daarmee enerzijds de onzekerheid over dit verschijnsel op korte termijn te verkleinen en anderzijds tijdig signalen te krijgen over dit verschijnsel om adequaat handelen te kunnen voorbereiden.

Ten tweede is het belangrijk tijdig te starten met het verkennen en uitvoeren van de benodigde adaptatiemaatregelen. Hierbij is zowel de snelheid van de stijging als ook de periode na 2100 van belang, want maatregelen met een levensduur van 100 jaar worden nu al ontworpen voor 2120 en een snellere stijging vraagt eveneens om een snellere planning en implementatie of een veel grotere maatregel. Vooral de functionele levensduur, die bij een extra versnelde zeespiegelstijging sterk afneemt, vraagt bijzondere aandacht. Voor grote investeringen met een lange levensduur of langdurig grote gevolgen voor de samenleving is het verstandig te onderzoeken hoe we de veel grotere onzekerheid in de projecties van (snelheid van) zeespiegelstijging mee kunnen nemen in de planstudie of ontwerpfasen, bijvoorbeeld in de vorm van een robuustheidstoets. Voor kleinere en flexibele maatregelen is monitoren en signaleren op basis van waarnemingen en projecties voorlopig voldoende.



Ten derde is het noodzakelijk meer kennis te verwerven over de relatie tussen opwarming, afsmelten van landijs en zeespiegelstijging, en de mogelijke gevolgen van een extra versnelde zeespiegelstijging. Denk daarbij aan:

- de lange-termijn sedimenthuishouding van het kustfundament (inclusief de (voormalige) estuaria in de zuidwestelijke delta, de Waddenzee en het benedenrivierengebied), de benodigde suppleties en de effecten daarvan op andere belangen en waarden;
- de ontwikkeling in de faalkans, het sluitpeil en de sluitfrequentie van stormvloedkeringen;
- de impact op de dijkopgave en buitendijkse gebieden;
- de zoutindringing in het benedenrivierengebied en de consequenties voor het gebruik en de capaciteit van inlaten;
- de zoutindringing via het grondwater en consequenties voor de watervraag;
- de benodigde pompcapaciteit als gevolg van een toename van de kwel;
- de ruimtelijke inrichting en het waterbeheer van de delta, de overgangsgebieden en de kuststrook (bebouwing, inrichting van havens, doorlaatmiddelen);
- de maatschappelijke gevolgen van het te laat of te vroeg investeren;
- en het in beeld brengen van alternatieve adaptatiepaden voor een (snelle) stijging van meer dan 1 m, inclusief planning en implementatie.



Figuur 2 Samenvatting van de gevonden knippunten (midden) bij een stijgende zeespiegel (in cm ten opzichte van 1995) voor waterveiligheid (v1-v8), zoetwatervoorziening (z1-z6) en bij een toename in de stijgsnelheid (mm/jaar) voor het kustfundament, Waddenzee, de zuidelijke delta en morfologische ontwikkeling van de rivieren (k1-k7). De linker en rechter figuur geven de gebruikte zeespiegelscenario's in deze studie, volgens KNMI' 2014 (Deltascenario's met bandbreedte 2 tot 4°C opwarming in 2100) en de projecties (RCP4.5 en RCP8.5; die ook een bandbreedte is van 2 tot 4°C opwarming in 2100) ten opzichte van 1995. De projecties zijn specifiek voor de Nederlandse kust, en wijken dus iets af van die in de publicatie van Le Bars et al. 2017. De bandbreedte is weergegeven voor de onderwaarde (p5) en de bovenwaarde (p95), ook voor 2050, 2075 en 2100 aan de rechterkant van de figuur. De middenwaarde (p50) is hier aangegeven met een zwarte lijn. De Deltascenario's hebben geen middenwaarde. Bijvoorbeeld: V7 (sluitfrequentie Oosterscheldekering is 100 keer per jaar) vindt plaats rond 1.5 m. Dat is na 2100 in de Deltascenario's en rond 2080 en 2090 volgens bovenwaarden van respectievelijk RCP8.5 en RCP4.5. Ook na 2100 stijgt de zeespiegel verder en zullen meer knippunten in beeld komen.



Inleiding

1

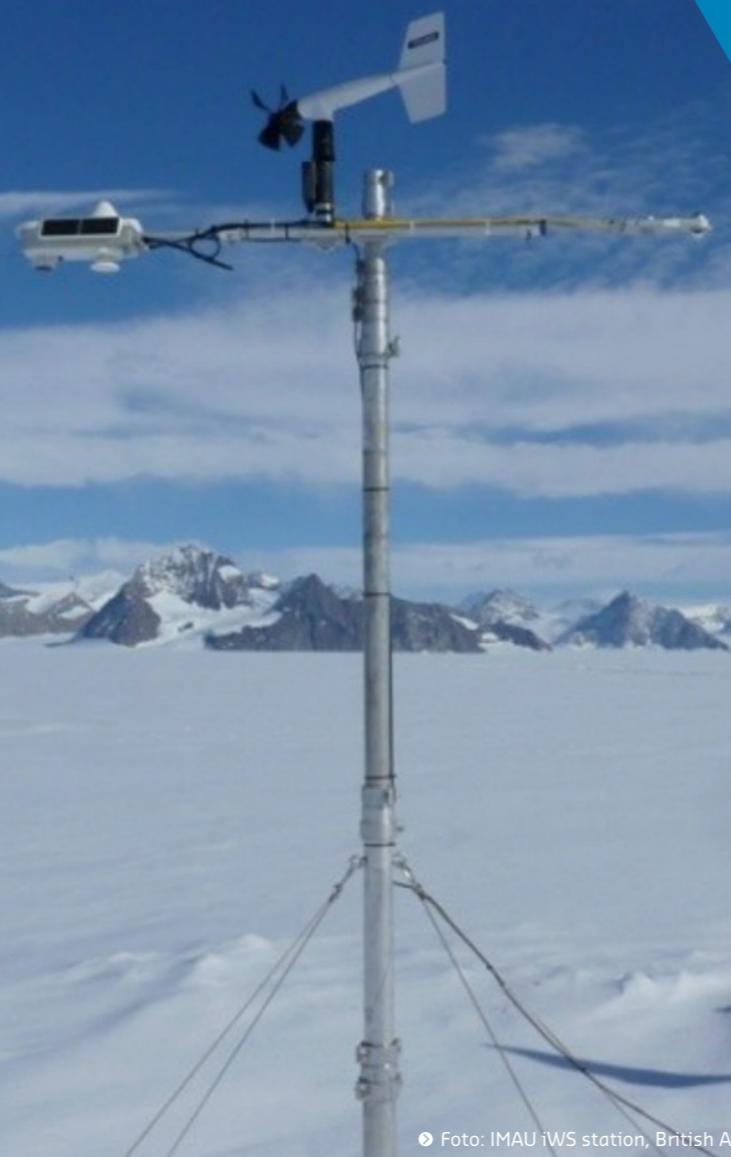


Foto: IMAU iWS station, British Antarctic Survey.

1.1 | Signaal van mogelijk extra versnelde zeespiegelstijging

In een aantal recente wetenschappelijke publicaties wordt de conclusie getrokken dat de zeespiegel mogelijk (veel) sneller kan gaan stijgen dan nu verondersteld wordt in de Deltascenario's. De Deltascenario's zijn de uitgangspunten voor het Deltaprogramma. Deze extra versnelling heeft te maken met recente inzichten over het mogelijk versneld afbreken en smelten van het landijs op Antarctica, en is de aanleiding voor dit onderzoek dat in opdracht van de Staf Deltacommissaris is uitgevoerd.

Een destabilisatie van delen van de Antarctische IJskap kan wereldwijd leiden tot zeer grote zeespiegelstijging. Hierover wordt sinds de jaren zestig van de vorige eeuw met regelmaat in de wetenschappelijke literatuur gerapporteerd⁵. De Conto en Pollard hebben in 2016⁶ op grond van de uitkomsten van een nieuw model van de Antarctische ijskap geconcludeerd dat deze mogelijk veel onstabiler is dan werd verondersteld. Ze geven aan dat de bijdrage van enkel deze ijskap aan mondiale zeespiegelstijging in 2100 mogelijk meer dan een meter bedraagt, en in 2500 meer dan 15 meter. Naar aanleiding hiervan heeft Deltares in november 2016 een eendaagse 'hackathon' georganiseerd⁷, om de gevolgen van een dergelijke zeespiegelstijging voor Nederland te bestuderen. Medewerkers van het KNMI⁸ hebben de studie van De Conto en Pollard vertaald naar probabilistische scenario's voor de mondiale zeespiegelstijging in 2100. Deze projecties geven een zeespiegelstijging tot maximaal ruim drie meter in 2100 (zie ook Hoofdstuk 3). Deze bevindingen zijn door KNMI en Deltares samengevat in een factsheet voor de Signaalgroep⁹ van het Deltaprogramma. De signalering van mogelijk versnelde zeespiegelstijging is tevens in het Deltaprogramma 2018 opgenomen:

"Op 30 maart 2016 heeft het tijdschrift Nature nieuwe wetenschappelijke inzichten gepubliceerd over het afbraakproces van de Antarctische ijskap en de versnelde zeespiegelstijging, die daar mogelijk het gevolg van is. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zal deze inzichten valideren en hierover in 2019 rapporteren. Daarna kan het KNMI de zeespiegelstijgingsprojecties actualiseren. Het Deltaprogramma beoordeelt daarna via het proces van 'meten, weten, handelen' of bijstelling van de voorkeursstrategieën nodig is en op welke manier."¹⁰

Of de verdere versnelling van zeespiegelstijging werkelijk optreedt en of deze extra versnelling werkelijk zo extreem kan zijn als geschat wordt in het scenario van De Conto en Pollard, is zeer onzeker. Toch zijn deze publicatie, de studies van het KNMI en die van de Universiteit Utrecht¹¹ voor het Deltaprogramma aanleiding geweest om de gevolgen van de mogelijke versnelling en extreme zeespiegelstijging voor Nederland te onderzoeken. De ontwikkelingen kunnen namelijk gevolgen hebben voor de strategische keuzes in het Deltaprogramma en er is tijd nodig om keuzes eventueel bij te stellen. De versnelde zeespiegelstijging is niet iets waar we morgen mee te maken gaan krijgen. Naar de huidige inzichten

5 Nature (2018). The scientist who predicted ice-sheet collapse — 50 years ago. *Nature* 554, 5–6 (2018). <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-018-01390-x>

6 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>

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

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

9 De Signaalgroep van het Deltaprogramma heeft als taak relevante externe ontwikkelingen te signaleren en aan te geven of bijsturing voor de hand ligt en bestaat uit inhoudelijke experts van een aantal voor het Deltaprogramma relevante en gezaghebbende kennisinstellingen.

10 <https://deltaprogramma2016.deltacommissaris.nl/viewer/paragraph/1/1-deltaprogramma-/chapter/inleidende-samenvatting/paragraph/opgaven-verbinden-samen-op-koers#809BF238-B587-4A04-93646961A0999D8B>

11 De Winter, R.C. et al. (2017). Natural Hazards and Earth System Sciences, 17, 2125–2141. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2125-2017>

gaat het spelen na 2050. De aanpassingen die mogelijk nodig zijn, vragen een tijdig onderzoek en, indien nodig, planvorming en voorbereiding van implementatie. Daarmee is verkenning van dit onderwerp niet urgent, maar wel zeer belangrijk.

Met het beoordelen van effecten van zeespiegelstijging van meer dan 1 m die ook nog eens binnen 2 à 3 generaties kan plaatsvinden, komen we op nieuw terrein. Er bestaan slechts een beperkt aantal rapportages over de gevolgen van grote zeespiegelstijging^{12,13,14,15,16}. Een verkenning naar gevolgen van extra versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma ontbreekt, hetgeen heeft geleid tot de vraag naar de onderliggende studie.

1.2 | Doel van deze studie

Het doel van deze studie is het **verkennen** van de mogelijke gevolgen van versnelde en extra versnelde zeespiegelstijging voor de voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma. Het doel is om een aantal belangrijke implicaties van een snellere zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma te beschrijven in het licht van de duurzame effectiviteit van de voorgenomen maatregelen. Daarnaast wordt een kennisagenda voor aanvullend onderzoek opgesteld om aannames beter te onderbouwen en gevolgen en keuzes voor beleid concreter te duiden.

Deze studie heeft daarom tot doel de volgende hoofdvragen te beantwoorden:

1. Welke **zeespiegelstijging** kunnen we volgens de genoemde studies naar extra versnelde zeespiegelstijging in Nederland verwachten in 2050, 2100 en 2200?
2. Welke zeespiegelstijging en snelheid van die stijging leveren knelpunten op voor de voorgenomen maatregelen? Met andere woorden: hoeveel zeespiegelstijging kunnen de **voorkeursstrategieën** aan? Tot wanneer zijn de voorkeursstrategieën toereikend onder de huidige Deltascenario's en tot wanneer bij de geplande versnelde zeespiegelstijging?
3. Welk aanvullend **onderzoek** is nodig om belangrijke aannames en gevolgen van versnelde zeespiegelstijging nader te onderzoeken?

Vanwege het verkennende karakter en de beperkte doorlooptijd van deze studie is het onderzoek beperkt tot de voorkeursstrategieën voor Waterveiligheid, het Kustfundament en de Zoetwatervoorziening en daarbinnen gericht op een aantal sleutelvragen. Deze vragen zijn geformuleerd samen met staf Deltacommissaris, het kennisnetwerk en andere betrokkenen bij het Deltaprogramma. De sleutelvragen komen in de hoofdstukken over de betreffende thema's aan bod.

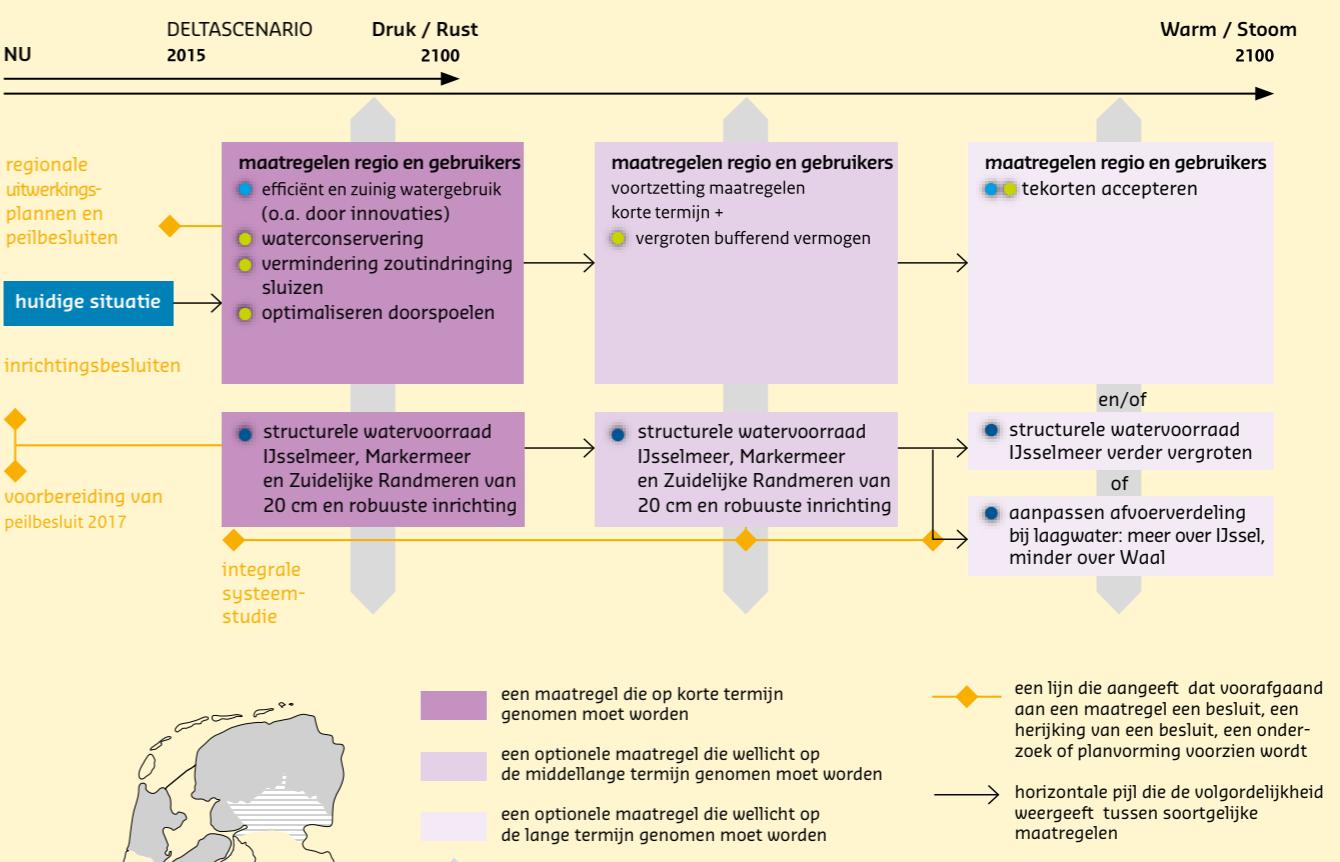
1.3 | Het Deltaprogramma en het signaal van versnelde zeespiegelstijging

Het Deltaprogramma omarmt het principe van adaptief deltamanagement. Adaptief deltamanagement is een vorm van management waarbij bewust en op transparante wijze wordt omgegaan met toekomstonzekerheden^{17,18}. Voor adaptief deltamanagement is het tijdig signaleren van toekomstige veranderingen cruciaal voor tijdige implementatie en bijstelling van de voorkeursstrategieën. Via de systematiek van meten-weten-handelen wordt gemonitord en geëvalueerd of we nog in de goede richting en in het goede tempo werken¹⁹. Hier voor is een Signaalgroep opgericht met als taak relevante ontwikkelingen te signaleren en aan te geven of bijsturing voor de hand ligt. De signaalgroep heeft de mogelijk versnelde zeespiegelstijging gesignalerd en ingebracht in het Deltaprogramma.

Het Deltaprogramma gebruikt de Deltascenario's om op basis van het concept adaptief deltamanagement voorkeurstrategieën te ontwikkelen. Op basis van deze toekomstscenario's en een verkenning van alternatieve

adaptatiepaden (opeenvolging gelinkte van maatregelen) zijn in de voorkeursstrategieën korte-termijn maatregelen en lange-termijnopties beschreven. Een adaptatiepadenkaart laat zien welke paden kunnen worden doorlopen om bij veranderende omstandigheden aan de gestelde doelen te voldoen (zie Figuur 1.1). De volgende stap in een adaptatiepad wordt genomen als de stap ervoor niet meer voldoende is voor het bereiken van de doelen. Er is dan een **knippunt** bereikt. Afhankelijk van hoe de toekomst uitpakt, kunnen de strategieën sneller of langzamer uitgevoerd worden, dan wel worden bijgesteld. Inzicht in signalen over veranderingen in de toekomstontwikkeling is daarom belangrijk, zodat investeringsbeslissingen tijdig (niet te vroeg of te laat) worden genomen en waar nodig kunnen worden aangepast.

Signalen voor een sneller stijgende zeespiegelstijging dan is aangenomen bij het bepalen van voorkeurstrategieën, kunnen leiden tot bijsturing van deze strategieën. Een belangrijke veronderstelling in de Deltascenario's is namelijk dat de veranderingen (zeespiegelstijging, klimaatverandering) na 2050 niet veel sneller zullen gaan dan voor 2050. De tijd waarbinnen beslissingen zullen moeten worden voorbereid en genomen blijft dan min of meer gelijk. Bij een extra versnelde zeespiegelstijging verandert dit echter: De tijd om beslissingen te nemen en maatregelen te implementeren wordt veel korter. En het betekent ook dat de periode waarin bepaalde maatregelen effectief zijn wordt verkort. Versnelde zeespiegelstijging kan er toe leiden dat de maatregelen versneld moeten worden uitgevoerd, of dat sommige maatregelen beter kunnen worden overgeslagen, omdat er maar kort profijt is of dat heel andere maatregelen nodig zijn (zie Figuur 1.2). Vooralsnog is dit onzeker. Omgaan met deze onzekerheden hoort bij het anticiperen op de toekomst zoals beoogd wordt met adaptief deltamanagement.



Figuur 1.1 Voorbeeld van een adaptatiepadenkaart: de voorkeursstrategie Zoetwater IJsselmeergebied (Deltaprogramma, 2015).

12 Rijkswaterstaat DGW. Zeespiegelstijging. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, 1986.

13 Aerts, J., T. Sprong, B. Barnink. Aandacht voor Veiligheid. Leven met Water, Klimaat voor Ruimte, DG Water. Rapportnummer: 009/2008

14 Klijn, F., P. Baan, K.M. de Brujin & J. Kwadijk (2007). Overstromingsrisico's in Nederland in een veranderend klimaat; verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het project Nederland Later. WL-rapport Q4290, Delft.

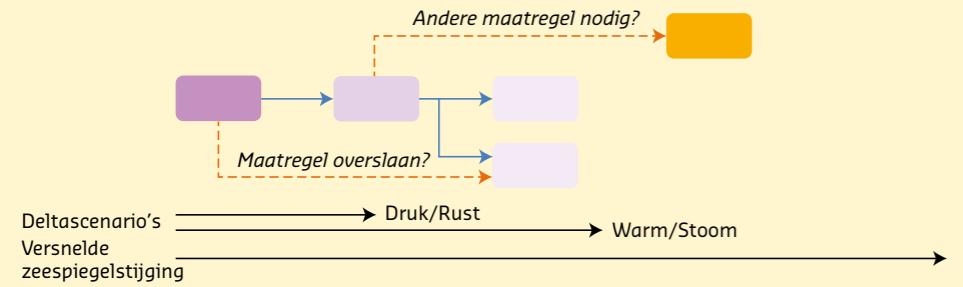
15 Kok, M., B. Jonkman, W. Kannig, T. Rijcken, J. Stijnen (2008). Toekomst voor het Nederlandse polderconcept. Technische en financiële houdbaarheid. PR1468. 10 TU Delft, Royal Haskoning, HKV

16 Olsthoorn, X., P. van der Werff, P., L.M. Bouwer, D. Huitema, 2008. Neo-Atlantis: The Netherlands under a 5-m sea level rise. Clim. Change 91, 103–122. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9423-z>

17 Deltaprogramma (2012). Deltaprogramma 2013. Werk aan de delta. De weg naar deltabeslissingen. <https://www.deltacommissaris.nl/documenten/publicaties/2012/09/18/deltaprogramma-2013>

18 Van Rhee, G. C. (2012) Handreiking Adaptief deltamanagement. Stratelligence Rapport. <https://deltaprogramma.pleio.nl/file/download/9761712>

19 Deltaprogramma (2017). Deltaprogramma 2018. Doorwerken aan een duurzame en veilige delta. <https://www.deltacommissaris.nl/deltaprogramma/documenten/publicaties/2017/09/19/dp2018-nl-printversie>



Figuur 1.2 Een fictief adaptatiepad en mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging. De paarse blokken zijn de huidige blokken met maatregelen voor de korte, midden en lange termijn (2 opties in dit voorbeeld). Bij versnelde en extreme zeespiegelstijging zijn mogelijk alternatieve maatregelen nodig (oranje blok), en kan het zijn dat sommige maatregelen slechts kort effectief zijn, waardoor ze overgeslagen kunnen worden (onderste oranje pijl).

1.4 | Afbakening

Deze studie richt zich op de nu voorziene maatregelen in Nederland en dus de huidige voorkeurstrategieën in het Deltaprogramma, en niet op het identificeren van nieuwe maatregelen dan wel veranderingen in de inrichting van Nederland. Het is echter denkbaar dat bij snellere zeespiegelstijging naar nieuwe en 'out-of-the-box' oplossingen gekeken moet worden die wellicht de Nederlandse grenzen overschrijden.

In deze studie worden nieuwe inzichten over zeespiegelstijging beschouwd. Voor de projecties voor bodemdaling, intense neerslag en maximale rivierafvoeren handhaven we hetgeen is verondersteld in de Deltascenario's.

De studie beperkt zich tot de fysieke en maakbare wereld, en richt zich op de "harde" maatregelen die binnen het huidige watersysteem met het huidige gebruik van het water en de huidige wetgeving en instituties genomen worden. Daarbij is als uitgangspunt genomen dat de strategieën worden doorgedragen en de maatschappij (in Nederland en daarbuiten) niet verandert, terwijl dit in werkelijkheid wel het geval zal zijn. In deze verkenning zijn ook niet alle aspecten van het deltabeheer meegenomen (bijvoorbeeld natuur, governance). Belangrijke aandachtspunten die niet aan de orde komen zijn o.m.

- Natuur; deze zal als gevolg van de zeespiegelstijging en bijbehorende adaptatiemaatregelen sterk veranderen;
- Instituties en wetgeving; ook deze zullen in de loop van de tijd sterk veranderen. Ze vormen belangrijke randvoorwaarden voor het al dan niet implementeren van maatregelen; en
- Economie, maatschappij en maatschappelijke krachten. Ook deze zullen zowel nationaal als internationaal bij dergelijke grote veranderingen in de leefomgeving grote veranderingen doormaken.

Ook zijn de gevolgen voor andere, minder goed beschermd, delta's en kustgebieden waarmee Nederland belangrijke (economische) relaties heeft niet in beschouwing genomen.

Het rapport is geschreven voor de medewerkers van het Deltaprogramma. Met een aantal is er gedurende het onderzoek contact geweest, zowel bij een startbijeenkomst als bij presentaties en besprekingen van tussenresultaten in het Kennisnetwerk.



Aanpak

2



2.1 | Stapsgewijze aanpak

De werkwijze van deze studie volgde de onderstaande stappen:

- Welke zeespiegelstijging we in 2050, 2100 en 2200 kunnen verwachten bij een extra versnelde zeespiegelstijging als gevolg van het versneld afbrokken en afsmelten van Antarctica is gedefinieerd in een bijeenkomst over zeespiegelstijging met experts van KNMI en Universiteit Utrecht. Dit heeft geleid tot projecties voor versnelde zeespiegelstijging tot 2100 met een doorkijk naar 2200 die verder worden gebruikt in deze studie.
- Vervolgens zijn de te beantwoorden kennisvragen nader gespecificeerd in overleg met vertegenwoordigers Deltaprogramma in een startbijeenkomst.
- Feedback op deze kennisvragen is gegeven door het Kennisnetwerk van het Deltaprogramma. Hieruit zijn aanvullende onderwerpen gekomen, die in deze studie beschreven worden op basis van bestaande studies, maar niet nader bestudeerd zijn met extra analyses.
- Daarna zijn de kennisvragen uitgewerkt en beantwoord via verkennende (model)berekeningen, deskundigenoordeel en een literatuurstudie.
- De tussenresultaten zijn besproken met staf Deltacommissaris en vertegenwoordigers van de onderwerpen uit het Deltaprogramma en in bijeenkomsten van het Kennisnetwerk.
- Vervolgens is er een rapport opgesteld, dat in concept en ter commentaar gestuurd is naar o.a. RWS, KNMI en de staf Deltacommissaris.
- In het Kennisnetwerk is gevraagd om feedback op de vertaling van de resultaten naar de betekenis voor de voorkeursstrategieën.
- Uiteindelijk zijn de resultaten besproken met de begeleidingscommissie bestaande uit vertegenwoordigers van Staf DC, DGWB en RWS.
- Vijf onafhankelijke hoogleraren hebben een externe review uitgevoerd op het conceptrapport.

Deze verkenning is gericht op het beantwoorden van een aantal sleutelvragen en benoemt een aantal aanvullende belangrijke onderwerpen. De mate van detail van de analyse en bepaling van de effecten kan daardoor sterk verschillen. Ook zijn niet alle aspecten van deltabeheer meegenomen.

2.2 | Identificeren van het optreden van knikpunten

De voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma bestaan uit een combinatie van maatregelen die, naarmate de omstandigheden veranderen, ingezet kunnen worden. Het moment waarop nieuwe of aanvullende maatregelen aan de orde kunnen komen noemen we een **knikpunt**²⁰.

Om te onderzoeken hoeveel zeespiegelstijging de voorkeursstrategieën aan kunnen, zonder noodzakelijke transitie naar een andere strategie, kijken we in deze studie naar knikpunten. Er is sprake van een knikpunt, ook wel beleidsomslagpunt genoemd, als de gestelde doelen door de veranderde omstandigheden niet meer behaald kunnen worden en vervolgstappen of aanvullende maatregelen nodig zijn. In werkelijkheid is er zelden sprake van een hard knikpunt, maar zijn er wel belangrijke omstandigheden of gebeurtenissen te identificeren die aanpassing van het beleid vergen. We identificeren knikpunten in termen van mate van zeespiegelstijging of snelheid van zeespiegelstijging. Bijvoorbeeld: 'de sluitfrequentie van een stormvloedkering wordt dermate groot dat de ontwerpen overschreden worden of de kosten of effecten maatschappelijk onaanvaardbaar worden'. Ook de noodzaak van een significante intensivering van een maatregel rekenen we hier tot knikpunt. Bijvoorbeeld: een forse toename van het benodigde suppletievolume doordat de snelheid van zeespiegelstijging toeneemt.

²⁰ Kwadijk, J.C.J., M. Haasnoot, et al. (2010) Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands. *WIREs Climate Change* 10.1002/wcc.64

De **Deltascenario's** voor zeespiegelstijging uit het Deltaprogramma en de **projecties** voor versnelde zeespiegelstijging gebruiken we om te schatten *wanneer* een knikpunt optreedt. Bij minder grote en snelle stijging zal dit later zijn dan in scenario's met versnelde en extreme zeespiegelstijging. Met de scenario's en projecties doen we een zogenoemde 'Wat-al' studie in combinatie met de knikpuntenanalyse. Bijvoorbeeld: een stijging van 1 m resulteert in belangrijk gevolg Y (knikpunt). Als de zeespiegel stijgt volgens projectie X dan zal dit eerder, namelijk rond 2060-2070, plaatsvinden.

2.3 | Onderzochte thema's

De studie omvat zoals overeengekomen tijdens de startbijeenkomst drie thema's, in aansluiting op drie belangrijke deelprogramma's van het Deltaprogramma. Binnen elk van die thema's zijn weer keuzes gemaakt wat precies nader te analyseren. Het gaat om de volgend thema's:

- Kustfundament;
- Waterveiligheid;
- Zoetwatervoorziening.

In het thema **Kustfundament** richten we ons op de vraag hoe de kustlijnpositie met zandsuppletie gehandhaafd kan worden bij verschillende snelheden van zeespiegelstijging. We gaan hiervoor na of er voldoende zand beschikbaar is en welk volume nodig is. We maken gebruik van bestaande studies en kennis over effecten van de snelheid van de zeespiegelstijging voor de sedimentbalans van de Nederlandse kust, waaronder verkennende berekeningen voor de Waddenzee.

In het thema **Waterveiligheid** richten we ons op de vraag in hoeverre een versnelde zeespiegelstijging de levensduur van belangrijke kunstwerken kan beïnvloeden. We doen dat door overschrijdingskansen van ontwerpcondities en sluitfrequenties te beschouwen in het licht van versnelde zeespiegelstijging. Verder geven we beschouwingen over de gevolgen van zeespiegelstijging op het achterland van de kunstwerken en over de gevolgen voor de benodigde pomp- en spuicapaciteit voor het IJsselmeer.

In het thema **Zoetwatervoorziening** richten we ons op de vraag in hoeverre de invloed van zeespiegelstijging op zoutindringing via het grondwater en via de rivieren verandert met snellere zeespiegelstijging. En op de vraag wat die verandering betekent voor de zoetwatervraag en de beschikbaarheid van de inlaatpunten. We hebben hiervoor verkennende modelberekeningen voor het benedenrivierengebied en Rijnland gemaakt. Op basis hiervan hebben we een extrapolatie gedaan naar de rest van Nederland.



Scenario's en projecties voor zeespiegelstijging

3



3.1 | Huidige Deltascenario's en nieuwe inzichten

Het Deltaprogramma gaat uit van de vier Deltascenario's^{21,22}. Deze scenario's zijn een weergave van een onder- en bovenwaarde aangenomen voor zeespiegelstijging, gerelateerd aan een 2°C en 4°C wereldwijde temperatuurstijging in 2050 en 2100. De waarden zijn weergegeven in onderstaande tabel. Deze zeespiegelscenario's zijn gebaseerd op de KNMI'14 scenario's²³, waarin inzichten uit het vijfde assessment-rapport van het IPCC²⁴ (gepubliceerd in 2013) zijn verwerkt. Voor 2100 is een bovenwaarde van 1 m vastgesteld²⁵. Dit is de 95% bovenwaarde die is afgeleid van de bandbreedte van CMIP5 klimaatprojecties en expert judgement over de bijdrage van grote ijskappen en gletsjers²⁶. Het IPCC komt in 2019 (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC) rapport) en 2021 (Zesde assessment-rapport) met nieuwe bevindingen ten aanzien van zeespiegelstijging. Het KNMI zal in 2019 een duiding geven van de betekenis van het SROCC rapport voor Nederland, en publiceert in 2021 nieuwe klimaatscenario's voor Nederland.

Tabel 3.1 Zeespiegelstijging in de Deltascenario's uit 2014 in cm ten opzichte van 1995^{21,22}.

| Scenario | Warm/Stoom | Druk/Rust |
|----------|------------|-----------|
| 2050 | +40 | +15 |
| 2100 | +100 | +35 |

Op 26 juli 2017 vond een workshop plaats met experts van KNMI, Universiteit Utrecht, Staf Deltacommissaris en Deltares. De workshop had tot doel de mogelijke zeespiegelstijging in 2050, 2100 en daarna (tot 2200) vast te stellen, rekening houdend met nieuwe inzichten over veranderingen in de massabalans van Groenland en vooral Antarctica. De kwantitatieve informatie die op basis van deze workshop is verzameld, is geen voorschot op de nieuwe KNMI scenario's, maar is uitsluitend voor deze studie bedoeld als invoer voor de bepaling van de gevoeligheid van de voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma voor versnelde zeespiegelstijging. Om verwarring met de officiële KNMI scenario's te voorkomen, spreken we van *projecties* voor versnelde zeespiegelstijging (en niet van scenario's).

Wereldwijd stijgt de zeespiegel als gevolg van thermische expansie en toenemend watervolume in de oceaan door veranderingen in de massabalans van ijskappen en gletsjers, grondwateronttrekking en opslag in stuwenmeren. Zeespiegelverandering vertoont ruimtelijke variaties, door zwaartekrachteffecten van de ijskappen op de lokale zeespiegel, atmosfeer- en oceaancirculatie, en lokale bodemdaling of -stijging.

Het IPCC maakt schattingen van de toekomstige gemiddelde mondiale zeespiegelstijging op grond van paleo-reconstructies, analyses van waarnemingen en uitkomsten van klimaatmodellen. Een veranderende ijsmassabalans van Antarctica is hierin een zeer onzekere factor.

21 Deltascenario's voor 2050 en 2100. Nadere uitwerking 2012-2013. Deltares, KNMI, PBL, CPB, LEI. https://www.deltacommissaris.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2014/05/27/deltascenarios-voor-2050-en-2100-nadere-uitwerking-2012-2013/Deltascenario%27s+voor+2050+en+2100_tcm309-351190.pdf

22 Bruggeman, W., J.C.J. Kwadijk, B. van den Hurk, J.J. Beersma, R. van Dorland, G. van den Born, J. Matthijsen (2016) Verkenning actualiteit Deltascenario's. Deltares, KNMI, PBL. <https://www.deltares.nl/app/uploads/2016/09/20160906-verkenning-houdbaarheid-deltascenarios-incl-bijlagen.pdf>

23 KNMI'14. Klimaatscenario's voor Nederland. http://www.klimaatscenarios.nl/images/Brochure_KNMI14_NL.pdf

24 IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

25 Tijdens deze studie is naar voren gekomen dat het gebruik van de geactualiseerde Deltascenario's (1 meter zeespiegelstijging in 2100, in plaats van 85 cm) niet altijd in de volle breedte van het Deltaprogramma lijkt te zijn meegenomen, terwijl dit wel belangrijk kan zijn voor de robuustheid van de voorkeursstrategieën

26 De Vries, H., Katsman, C. and Drijfhout, S., 2014: Constructing scenarios of regional sea level change using global temperature pathways, Environmental Research Letters, Volume 9, Number 11

Nieuwe inzichten van De Conto en Pollard²⁷ (2016) laten zien dat de Antarctische bijdrage aan zeespiegelstijging mogelijk veel groter kan zijn dan waar tot voor kort vanuit gegaan werd. Daarbij moet onderscheid gemaakt worden tussen enorme ijsplaten, langs de randen van Antarctica, waar het landijs zich drijvend in de oceaan uitstrekken en afkalft in de vorm van ijsbergen, en het landijs dat zich met een dikte van 2 tot maximaal 5 km op het vasteland van Antarctica bevindt. De ijsplaten langs de rand van Antarctica nemen de laatste jaren in omvang af, maar drijven op het water en hebben bij afsmelten geen effect op de zeespiegelstijging. Deze ijsplaten remmen wel het afstromen van landijs af. Dit landijs voegt bij afsmelten smeltwater aan de oceaan toe en heeft daarom wel effect op de zeespiegelstijging.

De ijsplaten nemen in omvang af door twee mechanismen:

- Marine Ice Sheet Instability: afsmelten van onderaf van gletsjers op een komvormige zeebodem. De zogenoemde "grounding line" van het ijs verplaatst zich landinwaarts, waardoor nog meer ijs aan relatief warm water wordt blootgesteld en er nog meer afsmelt.
- Hydrofracturing: Warme lucht, neerslag, smeltwater en warm oceaanwater zorgen voor scheuren in de ijsplaten voor de kust, waardoor water omlaag sijpelt en het ijs erodeert. Aangezien deze ijsplaten het landijs op Antarctica op zijn plaats houden heeft erosie van die ijsplaten potentieel een groot effect op de snelheid waarmee het landijs in zee terecht komt.

De combinatie van deze twee mechanismen leidt tot het afbreken van enorme stukken van de ijsplaten, maar omdat dit drijvend ijs betreft heeft het nog geen effect op de zeespiegelstijging. Afsmelten van landijs kan gaan optreden als de ijsplaten langs de randen verdwenen zijn en het landijs niet meer tegenhouden. Dan kan een onomkeerbaar proces optreden waarbij de randen van de landijskap onder het eigen gewicht afbreken ("Ice Cliff Instability") en zich steeds verder terugtrekken. Deze processen leveren naar verwachting tot 2050 nog geen significante bijdrage aan de zeespiegelstijging, maar daarna kan het afbrokkelen en afsmelten van het landijs hard gaan en met een grote bijdrage aan de zeespiegelstijging tot gevolg.

Medewerkers van het KNMI²⁸ hebben de studie van De Conto en Pollard als uitgangspunt genomen voor een doorvertaling naar projecties van de mondiale zeespiegelstijging in 2100. In deze studie van Le Bars et al is aangenomen dat versnelde afbraak van de Antarctische ijskap een realistisch beeld geeft van de bovenwaarde van de te verwachten zeespiegelstijging. Gegeven een bepaald concentratieverloop van broeikasgassen in de atmosfeer is de zeespiegelstijging gekwantificeerd door middel van een kansverdeling, waarin de mediaan (50% kans) en 5%- en 95%-percentielwaarden zijn bepaald (zie ook kader). In Tabel 3.2 is de mediaanwaarde aangeduid als "middenwaarde", terwijl de p95 is aangeduid als "bovenwaarde". Ten behoeve van deze studie zijn deze resultaten door Le Bars omgezet in projecties voor de Nederlandse kust. Deze projecties zijn dus schattingen voor de zeespiegelstijging die uitgaan van de RCP4.5 en RCP8.5 concentratie scenario's (Tabel 3.2) van het IPCC. RCP4.5 veronderstelt lagere emissies en opwarming dan RCP8.5, en kan geassocieerd worden met 2°C wereldwijde temperatuurstijging in 2100 en een redelijk succesvolle uitvoering van het Parijs-akkoord. RCP8.5 veronderstelt hogere broeikasgas-emissies en leidt in 2100 tot 4°C wereldwijde temperatuurstijging.

Internationaal klimaatbeleid en het Nederlandse beleid zijn er op gericht om de twee gradendoelstelling van het akkoord van Parijs te halen. Er is echter een kans dat deze doelstelling niet gehaald wordt, ofwel doordat emissies hoger zijn of doordat de opwarming groter blijkt te zijn. Daarom is er ook gekeken naar een scenario van 4 °C temperatuurstijging.

Tabel 3.2 Zeespiegelstijging volgens de projecties voor versnelde zeespiegelstijging voor de onderwaarde (p5), middenwaarde (p50) en bovenwaarde (p95) in cm ten opzichte van 1995 (Le Bars et al. 2017). Deze projecties zijn specifiek voor de Nederlandse kust, en wijken dus iets af van de publicatie. Zie kader (p26) voor de uitleg van de betekenis van de onder, midden, bovenwaarde.

| Concentratie scenario | RCP4.5 | | | RCP8.5 | | |
|-----------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | Onderwaarde | Middenwaarde | Bovenwaarde | Onderwaarde | Middenwaarde | Bovenwaarde |
| 2050 | 7 | 24 | 41 | 9 | 29 | 47 |
| 2100 | 29 | 108 | 192 | 75 | 195 | 317 |



Deze projecties zijn omgeven met de nodige onzekerheid. De bron van die onzekerheid betreft in de eerste plaats de grote onzekerheid over de mechanismes die De Conto en Pollard onderkennen (er zijn nog weinig empirische onderzoeken en modelstudies) over de terugkoppelingen in de respons van de ijskappen. Ook is er onzekerheid over hoe die onzekerheden met elkaar gecombineerd moeten worden. Voor meer informatie over de workshop en achtergrond van deze projecties wordt verwezen naar bijlage A. In de workshop werd ook het belang erkend van waarnemingen en modelstudies om veranderingen in de ijskappen op Antarctica en Groenland en de zeespiegel te verifiëren en om vroegtijdig signalen over een mogelijke versnelling te verkrijgen. Dit laatste is belangrijk omdat fysieke monitoring van het zeeniveau in informatie met een enorme vertraging levert.

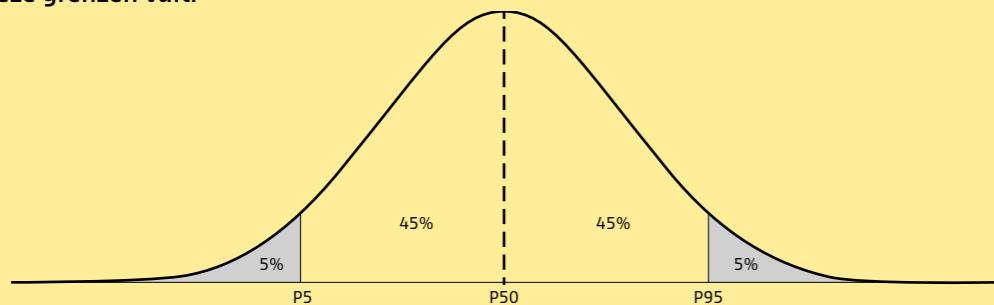
Het is minstens zo belangrijk om de wetenschappelijke inzichten goed te monitoren (en dus genoeg expertise in huis te hebben), en te monitoren welke scenario's en maatregelen in andere gebieden in de wereld worden gebruikt of overwogen. Nederland zal mogelijk niet het eerste land zijn waar de impact van versnelde zeespiegelstijging een grote impact zal hebben. Verder moet niet alleen de lokale zeespiegel aan de Nederlandse kust worden gemonitord, maar moeten ook de mondiale veranderingen in de zeespiegel worden gevolgd. Lokale fluctuaties zijn namelijk niet representatief voor wereldwijde zeespiegelvariaties.

27 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>

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

Toelichting op de onderwaarde, middenwaarde en bovenwaarde (p05, p50 en p95) van projecties

We gebruiken in de beschrijving van de projecties de termen "onderwaarde", "middenwaarde" en "bovenwaarde" als synoniem voor de wiskundige termen p05, p50 en p95. De term 'p05' verwijst naar de waarde van de zeespiegelstijging die, gegeven een scenario en bepaalde aannames, een kans op overschrijden heeft van 5% (zie onderstaand figuur) en dus een kans op overschrijden van 95%. Analoog hebben de p50 en p95 waarden een overschrijdingskans van 50% resp. 95%. De p50-waarde is een middenwaarde, omdat er een even grote kans (50%) op overschrijding respectievelijk overschrijding van deze waarde is. De p05 en p95 waarden worden gebruikt als onderwaarde respectievelijk bovenwaarde van een onzekerheidsband. Nadrukkelijk zijn dit geen uiterste grenzen; er is een kans van 10% dat een waarde buiten deze grenzen valt.

**Gebruik in deze studie**

Met deze naamgeving volgen we het KNMI. In de voorliggende studie moeten deze termen echter niet geïnterpreteerd worden alsof ze de volledige onzekerheid kwantificeren. De onzekerheden die LeBars beschrijft met de p05 en p95 hebben deels betrekking op de onzekerheden die De Conto en Pollard gebruiken in hun model. LeBars breidt die onzekerheden uit door ook de onzekerheid in de stijging van de temperatuur rond Antarctica mee te nemen voor zowel de RCP4.5. en de RCP8.5. Omdat ze niet de volledige onzekerheid beschrijven, kunnen ze niet als achterliggende statistiek worden gebruikt om een formele risicoanalyse te doen. Daarom moeten ze niet worden geïnterpreteerd als: "de kans dat de zeespiegel nog meer stijgt dan volgens de p95 van LeBars projectie is 5%". LeBars doet namelijk een aantal aannamen die ook een (grote, maar onbekende) onzekerheid in zich dragen, namelijk:

- dat De Conto en Pollard het bij het rechte eind hebben en hun model de (onzekerheid in) de response van de ijskap juist weergeeft.
- dat de temperatuur van het oceaanwater rond Antarctica zich onder de ontwikkeling van broeikasgasconcentratie RCP4.5 en RCP8.5 zich in de komende decades inderdaad zo ontwikkelen als de gekoppelde klimaat-oceaan modellen suggereren.
- Naast de onderzochte RCP4.5 en RCP8.5 zijn nog heel veel andere mogelijke ontwikkelingen van concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer denkbaar. Dit zijn overigens wel de twee toekomsten die vaak in adaptatiestudies worden gebruikt.

De duiding die wij aan deze projecties geven is dat het fysisch plausibele ontwikkelingen zijn van de stijging van de zeespiegel in de komende eeuw op basis van de beste inzichten die momenteel vorhanden zijn over de (in)stabieliteit van de Antarctische ijskap. Daarbij reflecteert de zeespiegelstijging volgens RCP8.5-bovenwaarde een zeer hoge (maar plausibele) ontwikkeling en de zeespiegelstijging volgens RCP4.5-onderwaarde een zeer lage (maar eveneens plausibele) ontwikkeling.

Vanuit risicobeheer is het gebruikelijk om conservatieve aannames te doen, en hiervoor worden vaak bandbreedtes van 90-95% aangehouden, waarbij er dus aandacht is voor de extreme waarden die weliswaar een kleine kans hebben, maar mogelijk tot grote gevolgen leiden, zoals dat ook voor de Deltascenario's Warm en Stoom is gedaan.

3.2 | Projecties voor versnelde zeespiegelstijging

Figuur 3.1 geeft een vergelijking van de Deltascenario's en de twee projecties met versnelde zeespiegelstijging van Le Bars et al. (2017), inclusief metingen afkomstig uit de zeespiegelmonitor²⁹. Tevens is in Figuur 3.2 de stijgsnelheid gegeven in mm/jaar. Zowel bij de projecties voor versnelde zeespiegelstijging als bij de Deltascenario's is een verdeling van onzekerheden weergegeven in de vorm van onzekerheidsbanden (p05 – P95), en de onder-, midden- en bovenwaarden (zie Kader voor een toelichting op deze bandbreedte).

De bovenwaarde van de bandbreedte van de Deltascenario's is gebruikt voor de Deltascenario's Warm en Stoom. De onderwaarden zijn gebruikt in de scenario's Rust en Stoom. Ook voor de projecties is een bandbreedte aangegeven. De middenwaarden voor de projecties staan aan de rechterzijde van de figuur weergegeven met zwarte lijnen (zie ook tabel 3.2). De Deltascenario's hebben geen middenwaarde.

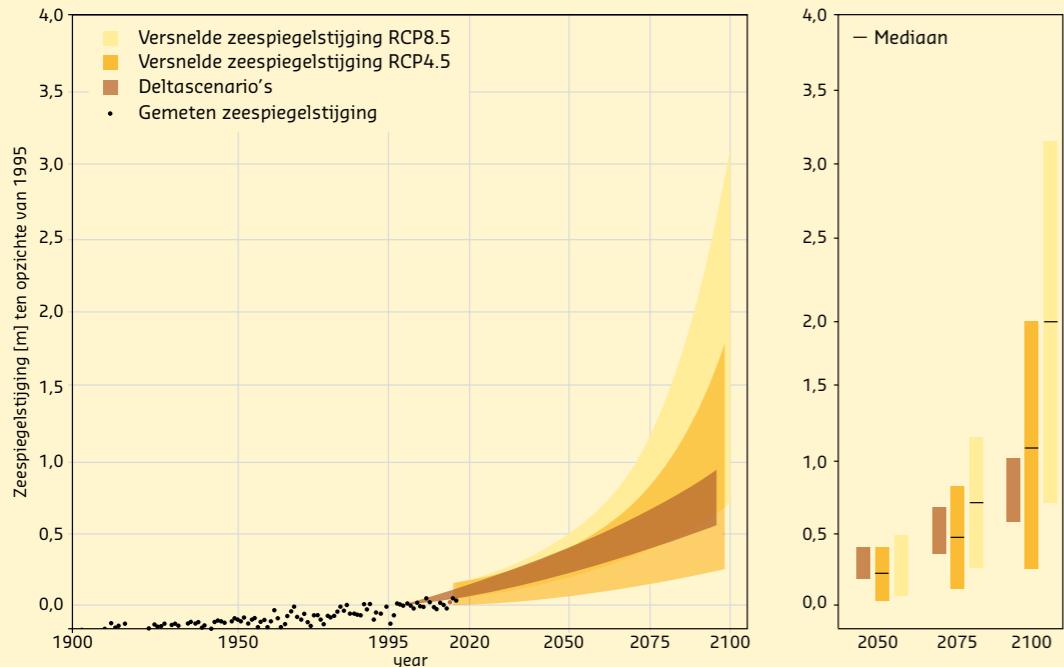
De waargenomen stijgsnelheid van de zeespiegel aan de Nederlandse kust gedurende de laatste eeuw is in de orde van 2 mm/jaar. Dat ligt onder het wereldwijde gemiddelde van circa 3 mm/jaar zoals nu wordt waargenomen. Zowel de Deltascenario's Warm en Stoom als de projecties voor versnelde zeespiegelstijging voorzien een grotere stijgsnelheid voor de nabije toekomst. De Deltascenario's vertonen een versnelling van de zeespiegelstijging na 2050, zij het zeer beperkt. In feite gaat het in de nieuwe projecties dus om een extra versnelling van de zeespiegelstijging.

Een vergelijking van de Deltascenario's Warm en Stoom met de twee projecties voor versnelde zeespiegelstijging laat het volgende zien:

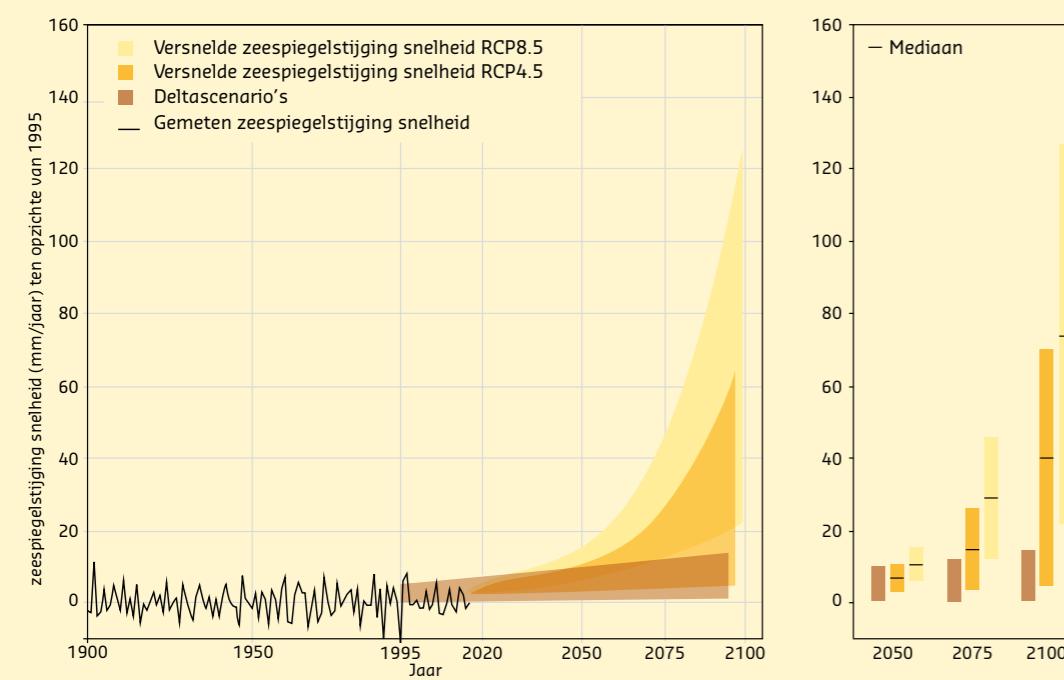
- Tot het jaar 2050 wordt nog geen substantieel grotere zeespiegelstijging verwacht; in zowel de Deltascenario's Warm en Stoom als bij versnelde zeespiegelstijging is de stijging rond 2050 0,4 m t.o.v. 1995.
- Verschillen tussen de Deltascenario's en de projecties met versnelde zeespiegelstijging worden pas zichtbaar na het jaar 2050.
- De zeespiegelstand volgens de (hoge) Deltascenario's Warm en Stoom komt overeen met de middenwaarde volgens het lage emissiescenario (RCP4.5). Met andere woorden een hoge zeespiegelstand volgens de Deltascenario's, is in de projecties van versnelde zeespiegelstijging na 2050 een middenwaarde in de RCP4.5 projectie. De bovenwaarde van dit lage emissiescenario is vergelijkbaar met de middenwaarde van het hogere emissie scenario (RPC8.5).
- In het jaar 2100 zou volgens de Deltascenario's Warm en Stoom een stijging van 1 m kunnen zijn bereikt. Dit is ook het geval volgens de middenwaarde van de RCP4.5 projectie met versnelde zeespiegelstijging. Volgens de middenwaarde van de RCP8.5 is dat eerder: rond 2080. Volgens de bovenwaarden van de projecties voor versnelde zeespiegelstijging wordt 1 m al bereikt rond 2070 en 2080 voor respectievelijk RCP8.5 en RCP4.5.
- De snelheid van de stijging loopt in het Deltascenario op naar ongeveer 10 mm/jaar rond 2050 en 14 mm/jaar in 2100. Bij versnelde zeespiegelstijging is deze snelheid 10 tot 15 mm/jaar in 2050, circa 20-35 mm/jaar in 2070 en aan het einde van deze eeuw tot (veel) meer dan 60 mm/jaar.

Belangrijk is ook om vast te stellen dat de stijging van de zeespiegel volgens alle scenario's en projecties doorgaat na het jaar 2100.

²⁹ Baart, F., G. Rongen, R. Nicolai, C. van de Vries. (2017, November 24). Sea-level monitor (Version v2017.04). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1065964>



Figuur 3.1 Gebruikte zeespiegelscenario's volgens KNMI'14 (Deltascenario's) en de projecties van Le Bars et al. 2017 (RCP4.5 en RCP8.5), alsmede de metingen t.o.v. 1995 (Baart et al. 2017). De projecties zijn specifiek voor de Nederlandse kust, en wijken dus iets af van de publicatie. De bandbreedte is weergegeven voor de onderwaarde (p5) en de bovenwaarde (p95), ook voor 2050, 2075 en 2100 aan de rechterkant van de figuur. De middenwaarde (p50) is aangegeven met een zwarte lijn. De Deltascenario's hebben geen middenwaarde. De metingen zijn ook t.o.v. de stand in 1995. Toen stond de zeespiegel 0,04 m tot NAP.



Figuur 3.2 Stijgnelheden van de Deltascenario's en de projecties voor zeespiegelstijging, volgens KNMI'14 (Deltascenario) en de projecties van Le Bars et al. 2017, en de metingen (Baart et al. 2017). De bandbreedte is weergegeven voor de onderwaarde (p5) en de bovenwaarde (p95), ook voor 2050, 2075 en 2100 aan de rechterkant van de figuur. De middenwaarde (p50) is hier aangegeven met een zwarte lijn. De Deltascenario's hebben geen middenwaarde.

3.3 | Gebruik projecties met versnelde zeespiegelstijging in deze studie

De Deltascenario's en de projecties voor versnelde zeespiegelstijging worden in deze studie gebruikt om de mogelijke gevolgen van extra versnelling van de zeespiegelstijging door het versneld afsmelten van Antarctica voor het Deltaprogramma te illustreren. We verkennen hoeveel zeespiegelstijging de voorkeursstrategieën aan kunnen en welke belangrijke knikpunten (zie hoofdstuk 2), er kunnen worden bereikt. De scenario's gebruiken we om aan te geven wanneer, en met welke onzekerheid (bandbreedte), knikpunten zouden kunnen optreden. We houden rekening met de onzekerheden per emissescenario en geven aan vanaf wanneer knikpunten ongeveer kunnen gaan optreden bij respectievelijk de middenwaarde en de bovenwaarde van de projecties van versnelde zeespiegelstijging.

De scenario's en projecties worden dus gebruikt om te verkennen wat er kan gebeuren (en wanneer) als de zeespiegel sneller stijgt dan aangenomen is in de Deltascenario's. Met andere woorden: we doen een zogenaamde 'Wat-als' studie; wat als de projecties van De Conto en Pollard en LeBars et al. de waarheid worden. De onzekerheid is immers groot. De relevantie van de recente bevindingen is ook al groot in geval van de middenwaarde van de projecties. Daarom worden de gevolgen ook voor deze middenwaarde projecties in beeld gebracht. Vanwege de mogelijk grote impact worden ook de consequenties van de bovenwaarde van de projecties geanalyseerd, zoals gebruikelijk bij risico-analyses. De onderwaarde van de projecties behoort ook tot de mogelijke toekomsten, maar is niet nader beschouwd, omdat de Deltascenario's hogere waarden meenemen en er hier in de strategievorming dus al rekening mee is gehouden. Er is geen probabilistische risicoanalyse gedaan waarmee kansen van de scenario's zijn verdisconteerd.

Voor waterveiligheid en zoetwatervoorziening is niet alleen de zeespiegel van belang, maar zijn ook rivierafvoeren en lokale neerslag belangrijk. Waar relevant voor de analyse maken we hier gebruik van de aannamen en gegevens van de Deltascenario's.

3.4 | Gebruik van projecties met versnelde zeespiegelstijging in het buitenland

In het buitenland worden ook geregeld projecties van extreme zeespiegelstijging gebruikt voor beleidsstudies. De federale overheidsorganisatie NOAA in de VS gaf al eerder en onafhankelijk van de studie van De Conto en Pollard een hoge schatting voor de gemiddelde zeespiegelstijging in 2100: 2,5 m op basis van literatuurstudies en waarnemingen³⁰. De Thames Estuary 2100 studie ontwikkelde een adaptief plan tot een stijging van 2,7 m. In een rapport aan het UK Parliament wordt een overzicht gegeven van de recente literatuur³¹. Hierin wordt verwezen naar een studie van UK Goverment Office of Science³² dat recent onderzoek naar projecties voor zeespiegelstijging beschrijft. Daarin wordt een zeespiegelstijging van 2,5 m in 2100 genoemd uit de UKCPO9 scenario's uit 2009, dat kan worden gebruikt bij voorbeeld de planning van aanleg van gevoelige infrastructuur.

³⁰ Sweet, W.V. et al. (2017). Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083.

³¹ Houses of Parliament (2017) Projecting Future Sea Level Rise www.parliament.uk/post

³² Edwards, T. (2018). Current and Future Impacts of Sea Level Rise on the UK. Foresight, Government Office of Science: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/663885/Future_of_the_sea_level_rise.pdf

Kustfundament, Waddenzee en zuidwestelijke delta

4



4.1 | Inleiding

De duinen, stranden, vooroever en buitendelta's langs de Nederlandse kust vormen de natuurlijke hoogwaterbescherming tegen overstroming vanuit zee. Om deze duinen mee te laten groeien met de zeespiegelstijging dient het kustfundament waar ze deel van uitmaken eveneens mee te groeien. De voorkeurstrategie voor de kust bestaat dan ook uit het mee laten groeien van dit kustfundament door zandsuppletie waarbij de volumina worden aangepast op basis van monitoring. Het suppletiebeleid beoogt overigens niet alleen het handhaven van de kustlijn (het eerste doel), maar ook het bijdragen aan lokale en regionale doelen gericht op een economisch sterke en aantrekkelijke kust.

De hoofdvragen voor dit thema zijn:

- Wat is de invloed van (versnelde) zeespiegelstijging op de benodigde hoeveelheid zandsuppletie?
- Tot welke (snelheid van) zeespiegelstijging kan de kustlijnpositie gehandhaafd worden met zandsuppleties?
- Is er voldoende zand beschikbaar voor uitbreiding van het jaarlijks suppletievolume?
- Bij welke (snelheid van) zeespiegelstijging is er een kans dat de Waddenzee niet meer kan meegroeien?
- Wat zijn de effecten op de sedimentbalans in de Zuidwestelijke delta en de Rijn-Maasmonding?

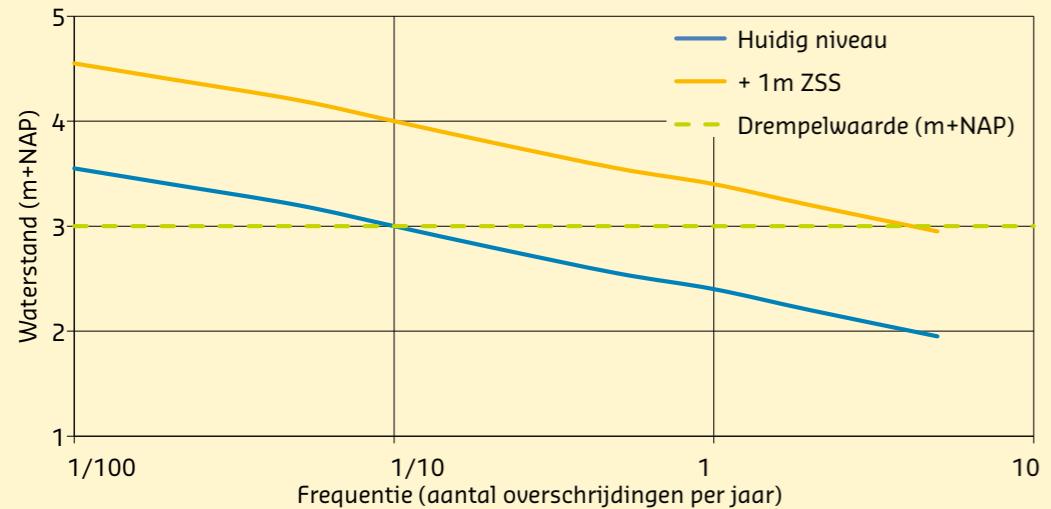
Ter beantwoording van deze vragen is gebruik gemaakt van (model)studies waarin de effecten van hogere zeewaterstanden geanalyseerd worden, en van kennis over de sedimentbalans van de kust, Waddenzee, Zuidwestelijke delta en Rijn-Maasmonding.

4.2 | Kust

4.2.1 Zeespiegelstijging en kusterosie

Een stijging van het gemiddelde zeeniveau betekent ook een toenemende frequentie van hoge waterstanden, met als gevolg een sterkere erosie van strand en duin. Figuur 4.1 illustreert deze relatie tussen hoogwater en zeespiegelstijging: een stijging van het gemiddeld hoogwater bij West-Terschelling met 1 m resulteert in een toename van de frequentie van een stormvloedwaterstand van 3 m + NAP van eens per 10 jaar naar ca. 5 keer per jaar.

Onder evenwichtscondities wordt het afgeslagen zand afgezet op het meest zeewaartse deel van het strand en op de ondiepe onderwateroever, vanwaar het in verloop van de tijd weer terugkeert naar strand en de duinen (zeereep). Bij de vaker optredende hoogwaterstanden door een stijging van de zeespiegel zal echter de beschikbare hersteltijd voor het kustprofiel ook afnemen, waardoor de erosie structureel wordt. Dit effect wordt versterkt door de afvoer van het afgeslagen sediment in kustlangse of kustdwarse richting. Vooral in de buurt van zeegaten zal de netto afvoer van zand naar achterliggende getijdebekkens de sedimenthoeveelheid van de kust verkleinen. Zonder aanvulling van het zandvolume zal de kustlijn landwaarts opschuiven. Met aanvulling kan de kustlijn op zijn positie blijven en wordt bovendien de toename van de frequentie van extreme waterstanden gepareerd door kustfundament, strand en zeereep mee omhoog te laten groeien.



Figuur 4.1 Effect van een 1 m hoger gemiddeld hoogwater met 1 meter op de frequentie van overschrijding van + 3 m NAP (Dutch Ordnance Datum = DOD), voor West-Terschelling.

Kortom: om de kustlijn op zijn plaats te houden bij een stijging van de zeespiegel is aanvulling met zand nodig, waarbij het aantal te brengen volume zand bepaald wordt door de snelheid van stijging. Hierbij kunnen er verschillende redenen zijn om een knipunt te onderkennen, zoals: het suppletievolume wordt te groot, de beschikbaarheid van zand schiet tekort, de effecten op recreatie en natuur zijn onaanvaardbaar, of de organisatie en kosten van de suppleties zijn onaanvaardbaar. Deze elementen worden hieronder nader beschreven.

4.2.2 Suppletievolume en frequentie

De kust handhaven met het suppleren van zand heeft twee componenten: 1) zand voor het aanvullen van het zand dat erodeert uit het kustprofiel en verdwijnt richting getijdebekken en over de landsgrens; en 2) zand voor het meegroeien van het kustfundament met een stijgende zeespiegel. Bij een sneller stijgende zeespiegel zullen beide toenemen en zal er dus meer zand nodig zijn. Hoewel hier niet echt sprake van een hard knipunt is, kunnen we wel schatten welke suppletievolumes bij bepaalde stijgingssnelheden nodig zijn.

Op dit moment is het niet duidelijk wat de suppletiebehoefte is voor een structureel en duurzaam evenwicht in de Nederlandse kustzone bij een stijgende zeespiegel. Daartoe wordt het onderzoeksprogramma Kustgenese 2.0 uitgevoerd dat in 2020 vragen moet beantwoorden over hoe zo'n evenwicht eruit ziet, en wat de daarvoor benodigde suppletievolumina en effectieve uitvoeringswijzen zijn.

Volume van suppleties

In de huidige situatie wordt 12 miljoen m³/jaar zand aangebracht ter compensatie van erosie en voor het meegroeien van het kustfundament met de zeespiegel. Naarmate de snelheid van zeespiegelstijging groter wordt, is ook meer zand nodig en zullen de kosten oplopen (Tabel 4.1). Een sterk vereenvoudigde berekening geeft enig inzicht in de toename van de zandbehoefte als gevolg van een stijgend zeeniveau. Uitgaand van de (deel)doelstelling dat het kustfundament meegroeit met het stijgend zeeniveau, en van een oppervlakte van het kustfundament van 4.000 km² (NB dit is zonder Waddenzee en Ooster- en Westerschelde), kan het benodigde zandvolume berekend worden door vermenigvuldiging van dit oppervlak met het aantal mm zeespiegelstijging per jaar. Zo is voor het meegroeien met een stijging van 1 mm/jaar 4 miljoen m³ zand nodig en bij 5 mm/jaar 20 miljoen m³. Naarmate de snelheid van zeespiegelstijging groter wordt, is ook meer zand nodig en zullen de kosten oplopen (Tabel 4.1). Het werkelijk benodigde zandvolume zal waarschijnlijk zelfs nog groter zijn aangezien in deze berekening géén rekening is gehouden met de te compenseren erosie van de kustlijn.

Met 40 miljoen m³/jaar kan bijvoorbeeld een stijging van 10 mm/jaar worden bijgehouden. In de Deltascenario's Warm en Stoom loopt de stijgsnelheid op van circa 10 mm/jaar in 2050 tot circa 14 mm/jaar aan het eind van de eeuw. Rond 2050 is dus al 3 à 4 keer zo veel zand nodig dan dat nu jaarlijks aangebracht wordt, en aan het eind van de eeuw 4 à 5 keer zo veel.

Ook bij versnelde zeespiegelstijging zal op zijn vroegst rond 2050 3 à 4 keer zo veel zand nodig zijn, als we uitgaan van de bovenwaarden van deze projecties. Het verschil tussen de projecties voor versnelde zeespiegelstijging en ook de Deltascenario's is in die periode niet groot. Als 'Parijs' niet gehaald wordt en er grotere emissie plaatsvinden (RCP8.5) dan zal dit tot 5 jaar eerder het geval zijn. Volgens de middenwaarden van de projecties met RCP4.5 en RCP8.5 wordt de stijgsnelheid van 10 mm/jaar bereikt in respectievelijk 2065 en 2045.

In geval van RCP4.5 loopt het suppletievolume voor het meegroeien met de zeespiegelstijging aan het einde van de eeuw op tot 12 tot 20 keer zo veel voor respectievelijk de midden- en bovenwaarde van de projecties. Voor RCP8.5 is dit 20 tot 40 keer zo veel voor de midden en bovenwaarde. De snelheid kan in dat geval oplopen tot meer dan 60 mm/jaar, waarbij circa 240 miljoen m³/jaar gesuppleerd moet worden om het kustfundament mee te laten groeien. Ter illustratie: dit komt overeen met 12 Zandmotoren per jaar.

Tabel 4.1 Schatting van de relatie tussen snelheid van zeespiegelstijging en het benodigde volume zand om het kustfundament mee te laten groeien met de zeespiegelstijging en de kosten daarvan. Dit is gebaseerd op een eenvoudige berekening van het oppervlak van kustfundament (4000 km²) en de zeespiegelstijging. Het zandvolume ten behoeve van het handhaven van de kustlijn bij een snellere zeespiegelstijging als gevolg van erosie is hierin niet meegenomen. Dat wordt onderzocht in kustgenese 2.0.

| Snelheid (mm/jaar) | Benodigde volume zand (miljoen m ³ /jaar) | Kosten suppletie (miljoen euro) |
|--------------------|--|---------------------------------|
| 2 | 8 | 28 - 40 € |
| 3 | 12 | 42 - 60 € |
| 5 | 20 | 70 - 100 € |
| 12,5 | 50 | 175 - 250 € |
| 30 | 120 | 420 - 600 € |
| 40 | 160 | 560 - 800 € |
| 60 | 240 | 840 - 1200 € |

Voortzetting van de huidige suppletiepraktijk (onderwatersuppleties in de zone van NAP-5 tot -8 m) zal resulteren in een versteiling van het kustprofiel. Dit kan op den duur een extra toename van de afvoer van zand uit het ondiepe deel van het kustprofiel naar het diepe deel veroorzaken. Dit effect is ook te verwachten bij de Zandmotor maar is vooralsnog niet waargenomen. De benodigde volumes kunnen dus groter uitvallen en monitoring blijft noodzakelijk.

Frequentie van suppleties

Bij een gegeven suppletiebehoefte wordt de frequentie van suppleren bepaald door het volume van de individuele suppleties. Bij een toenemende vraag zijn er dus 2 opties: vaker terugkomen of meer zand per keer aanbrengen. Bij een toenemende frequentie van hoge waterstanden, met daarmee het risico van meer kustafslag, lijkt het aanleggen van grotere zandbuffers zinvol. De huidige suppletiepraktijk is gebaseerd op suppleties op de onderwateroever met een gemiddelde omvang van 1 à 2 miljoen m³ en een frequentie van ongeveer eens per 5 jaar. Inmiddels wordt geëxperimenteerd met andere suppletievormen om ervaring op te doen. Zo zijn de laatste 10 jaar bijvoorbeeld geulwandsuppleties die tevens een getijgeul stabiliseren (volume ca. 5 miljoen m³) en megasuppleties zoals de Zandmotor (volume ca. 20 miljoen m³) uitgevoerd. De snelheid en wijze van herverdeling van de aangebrachte zandvolumina is een van de te onderzoeken aspecten. Daarnaast zijn de effecten van de aanleg op het bodemleven op de onderwateroever van belang.

4.2.3 Beschikbaarheid en bruikbaarheid zand

Er ligt voldoende zand in het Nederlandse deel van de Noordzee de kust te handhaven. Er zijn drie factoren die de daadwerkelijke beschikbaarheid en bruikbaarheid van dat zand voor suppleties beïnvloeden: de kwaliteit van het zand, ruimtebeslag door andere functies en de winddiepte.

Kwaliteit van het zand

Niet al het zand is geschikt om op de kust te suppleren. Zandvoorkomens kunnen aanzienlijk verschillen in mineralogische samenstelling en korrelgrootteverdeling. Om de nadelige gevolgen van suppleren op de natuur van onderwateroever, strand en duin te minimaliseren wordt zand gebruikt dat zoveel mogelijk lijkt op het zand op de doellocatie. Ook vanuit het gebruik van het strand worden eisen gesteld aan de samenstelling (afronding korrels, laag schelp- en grindgehalte). Tenslotte wordt gebruik gemaakt van zandvoorkomens met een zo laag mogelijk slibgehalte om vertroebeling van het water zoveel mogelijk te voorkomen, omdat een aantasting van het lichtklimaat negatieve gevolgen voor de natuur met zich meebrengt.

Ruimtebeslag door andere functies

Een toenemend ruimtebeslag van activiteiten op de Noordzee heeft gevolgen voor de beschikbaarheid van zand (Figuur 4.2). Door de aanleg van vaste infrastructuur zoals kabels, pijpleidingen, windmolenvelden en dergelijke neemt het voor zandwinning beschikbare oppervlak zeebodem in het huidige reserveringsgebied voor zandwinning (oppervlakte ca. 5200 km²) af. Ook het toenemende ruimtebeslag buiten het reserveringsgebied beperkt de winbare zandvoorraad. Zo heeft het PBL scenario's van de ontwikkeling van windenergie op de Noordzee uitgewerkt, waarbij in het scenario met de hoogste groei in 2050 17 tot 26 % van het Nederlands Continentaal plat door windparken in beslag genomen zal worden³³). Dat betekent dat mogelijk een deel van de zandwinning buiten het huidige reserveringsgebied zal gaan plaats vinden. Figuur 4.3 toont beschikbare gebieden voor zandwinning buiten het huidige reserveringsgebied, rekening houdend met bestaand of toekomstig ruimtegebruik. De transportkosten, en daarmee de zandprijs, zullen toenemen met de afstand van het zandwingegebied tot de kust.

Winddiepte

Het winnen van zand op grotere diepte brengt hogere kosten met zich mee. De samenstelling van de zeebodem varieert aanzienlijk met de diepte. Dit betekent dat vergroting van de maximale winddiepte om het ruimtebeslag van de zandwinning te verkleinen niet altijd mogelijk is. Dit vraagt om een gedegen inventarisatie, planning en monitoring van zandwingegebieden.

4.2.4 Organisatie en kosten uitvoering

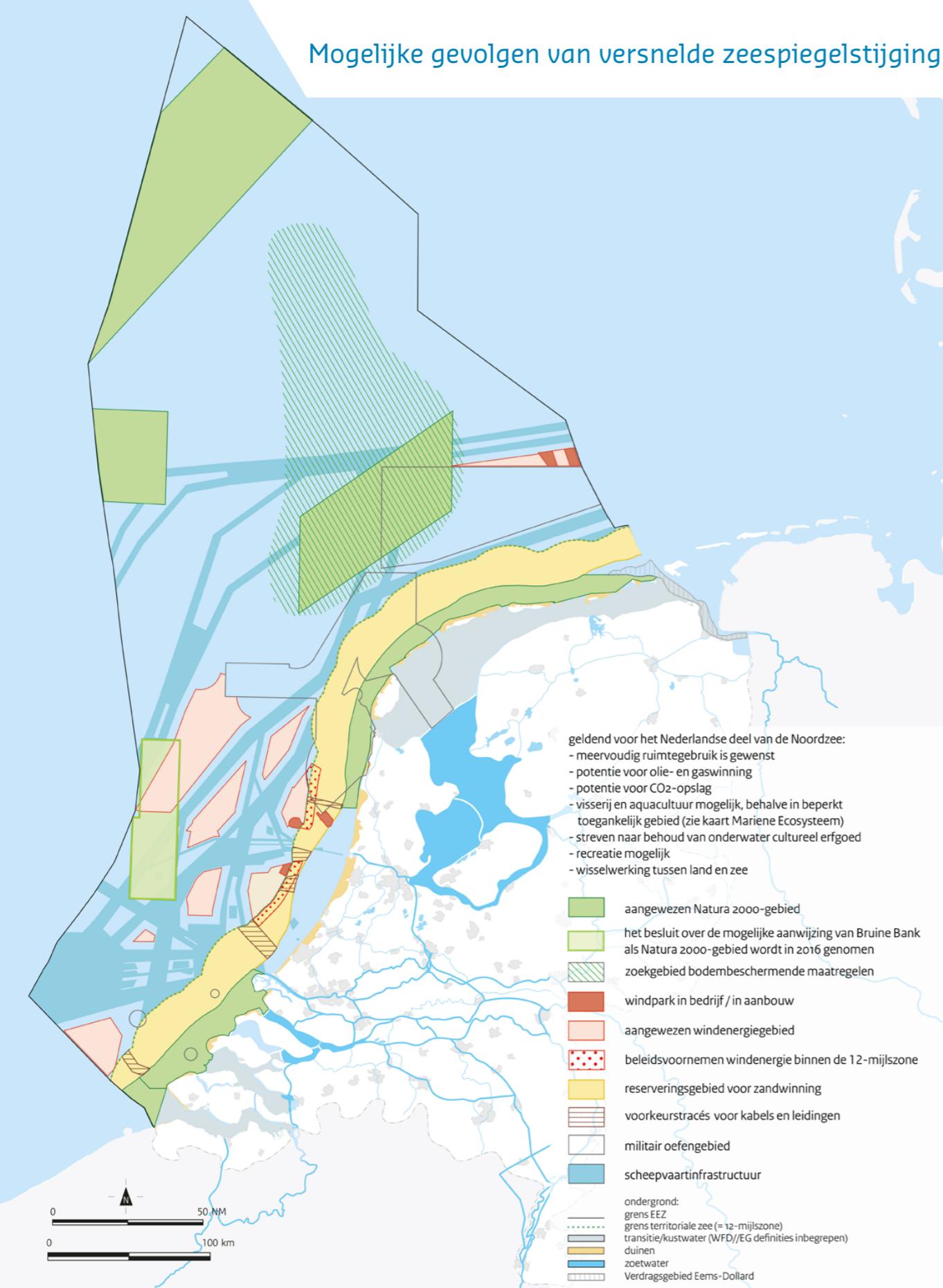
Technisch gezien is zandsuppletie lang op te schalen. Grottere volumes vragen echter een andere organisatie en uitvoering en bekostiging. Ook zal de cyclus van jaarlijkse toetsing en suppletieplanning opgeschaald moeten worden.

De kostprijs van suppleties hangt sterk af van de vaarafstand tussen de win- en stortlocatie en van contractvorm. De brandstofkosten zullen een direct effect hebben op de prijs per kubieke meter. Flexibilisering van de uitvoeringsperiode resulteert meestal in een lagere prijs. De huidige kosten van reguliere zandsuppleties bedragen circa € 5 per m³. Uitgaand van deze prijs komen de kosten voor het suppleren van 160 miljoen m³ op € 800 miljoen. Bij grote projecten daalt de prijs per m³. Rekenen we met een Zandmotorprijs van ca. € 3,50 per m³ dan komen de totale kosten op € 560 miljoen.

³³ Matthijssen, J., Dammers, E., Elzenga, H., 2018. De toekomst van de Noordzee. De Noordzee in 2030 en 2050: een scenariostudie. PBL publicatie 2728, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag



Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging



voor het Deltaprogramma



4.2.5 Impact van zandwinning en suppletie op natuur en gebruik kust

Verplaatsing van zeer grote volumina zand zal grote gevolgen hebben voor bodemleven, zowel in wingegebieden als in suppletiegebieden. Het is de vraag of het bodemleven in de kustzone nog voldoende tijd krijgt om te herstellen. Het inzetten van megasuppleties, als alternatief voor kleinschaliger suppleties, verlaagt de verstoringsfrequentie waardoor het bodemleven meer tijd voor herstel krijgt. Door de toegenomen zandverliezen en het frequent aanbrengen van grote hoeveelheden zand om de verliezen te compenseren, nemen de zandtransporten en daarmee de snelheid van morfologische veranderingen in de kustzone toe. Dit houdt in dat ook stroming en golven in dit gebied sterker gaan variëren, waardoor bijvoorbeeld zandbanken en muistromen sneller ontstaan en zich verplaatsen. Dit heeft gevolgen voor het gebruik van strand en kust.

4.3 | Waddenzee

Vraag en aanbod van sediment

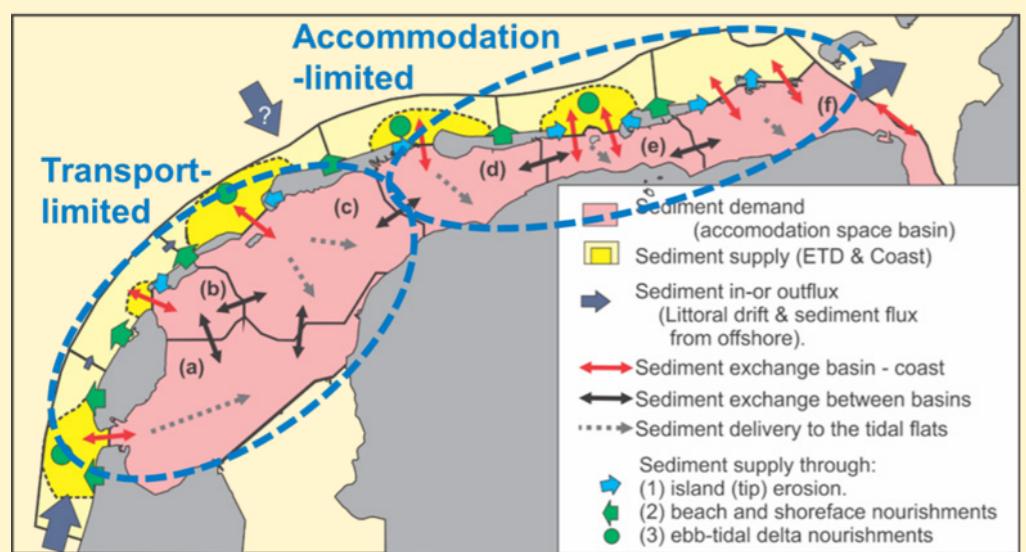
De Waddenzee en de aangrenzende kustzone maken deel uit van een sedimentdelend systeem. Dat betekent dat de Waddenzee voor aanvulling van zijn sedimentvoorraad afhankelijk is van aanvoer via de zeegaten uit de Noordzeekustzone (Figuur 4.4). De ontwikkeling van de bodemligging van de Waddenzee sinds 1935 laat zien dat netto sediment wordt afgezet, waarbij de gemiddelde sedimentatie groter is dan de huidige relatieve zeespiegelstijging³⁵. De belangrijkste bronnen van zand zijn de buitendelta's, die onder meer eroeren als gevolg van de afsluitingen van de Zuiderzee en de Lauwerszee, en de kust van Noord-Holland en de Waddeneilanden. Zandverliezen aan de kustlijn worden gecompenseerd met suppleties, waardoor deze suppleties eveneens een rol spelen in de sedimentbalans van de Waddenzee.

Een snellere zeespiegelstijging zal leiden tot een toenemende behoefte aan sediment in de Waddenzee. Hoewel een deel van het gesupplieerde sediment in de Waddenzee terecht komt, is het de vraag of dit voldoende is om de bodem van de Waddenzee te laten meestijgen. Dit hangt mede af van de transportcapaciteit voor zand en de snelheid van stijging.

De morfologische ontwikkeling van de Waddenzee kan beschouwd worden als een balans-vraagstuk: om de wadplaten te handhaven moet aan de vraag in debekkens voldaan worden door aanbod uit de kustzone. In de huidige situatie kunnen in de Waddenzee twee delen worden onderscheiden:

- de westelijke Waddenzee, van Texel tot aan het wantij van Terschelling, waar relatief weinig wadplaten (tot 40% van het totale oppervlak) voorkomen, en
- de oostelijke Waddenzee, van het wantij van Terschelling tot aan de Eems, waar het oppervlak aan wadplaten groot is, tot 70 % van het bekkenoppervlak.

Het relatief geringe plaatoppervlak in de westelijke Waddenzee betekent dat er nu reeds een grote vraag naar sediment is. Er is echter geen sprake van extreme netto import van zand, ondanks voldoende beschikbaarheid van zand in de kustzone. Dit is een gevolg van het feit dat er een bovenlimiet is aan de transportcapaciteit voor zand door de zeegaten: het systeem is *transport-gelimiteerd* (Figuur 4.4). In de oostelijke Waddenzee wordt relatief weinig sediment afgezet, het systeem van geulen en platen lijkt in dynamisch evenwicht en zelfs bodemdaling door gaswinning heeft in de huidige situatie geen effect op de gemiddelde ligging van de wadplaten. De daling van de wadbodem wordt vrijwel direct aangevuld. Dit deel van het systeem is *vraag-gelimiteerd*.



Figuur 4.4 Het sedimentdelend systeem van de Waddenzee. De import van zand wordt in de westelijke Waddenzee beperkt door de transportcapaciteit en in de oostelijke Waddenzee door de ruimte om zand af te zetten. (Bron: WaddenAcademie, 2018.³⁶)

³⁵ Elias, EPL, van der Spek, AJF, Wang, ZB, de Ronde, J, 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. Netherlands Journal of Geosciences, 91 (3), 293-310

³⁶ WaddenAcademie 2018. Position paper Sea-level rise, subsidence and morphodynamics in the Dutch Wadden Sea, 2030, 2050, 2100

Versnelde zeespiegelstijging

Bij een snellere zeespiegelstijging zal de gemiddelde waterdiepte in de waddenbekkens toenemen, waardoor er extra sediment nodig is om de wadplaten te handhaven. Voor de westelijke Waddenzee, waar de vraag al groter is dan de aanvoer, zal de aanvoer steeds verder achter gaan lopen, waardoor het oppervlak aan wadplaten zal afnemen. Verkennende berekeningen (met het ASMITA-model) laten zien dat bij een totale stijgsnelheid van circa 6 mm/jaar (inclusief bodemdaling) mogelijk het kritieke punt bereikt wordt waarbij de westelijke Waddenzee de stijging niet meer bij kan houden. Voor de oostelijke Waddenzee wordt het omslagpunt bepaald door het moment waarop de transportcapaciteit niet langer voldoende is om aan de toenemende vraag te voldoen. Vanaf een totale stijgsnelheid van circa 10 mm/jaar zal de aanvoer gaan achterlopen.

De zandtransporten in en rond de zeegaten zijn cruciaal voor de aanvoer van voldoende zand. Het effect van de erosie van buitendelta's (zie hierboven) op waterbeweging en sedimenttransporten is onderzocht met behulp van een numeriek model³⁷. Deze verkennende berekeningen laten het volgende zien:

- het effect van zowel in oppervlak als in hoogte sterk gereduceerde buitendelta's op de transporten is gering.
- Een hogere zeespiegel resulteert in grotere netto transporten langs de (eiland) kust naar de zeegaten.
- Een verkenning van het effect van het niet meegroeien van wadplaten op de waterbeweging in en rond het zeegat geeft aan dat bij een zeespiegelstijging van 1 m het effect op de waterbeweging en daarmee op het zandtransport klein is, terwijl bij een zeespiegelstijging van 2 m het effect groot is. De gevolgen hiervan voor de sedimenttransporten tussen kustzone en getijdebekkens zijn nog onvoldoende duidelijk.

De morfologische ontwikkelingen in het Eems estuarium worden in de huidige situatie vooral door menselijk handelen bepaald. Of en hoe dit systeem mee kan groeien met toekomstige zeespiegelstijging zal hier mede van afhangen.

4.4 | Zuidwestelijke Delta

Door het verschillende karakter van de voormalige zeegaten en estuaria in de Zuidwestelijke Delta zijn er verschillende ontwikkelingen te verwachten van versnelde zeespiegelstijging.

Westerschelde

De sedimentbalans van de Westerschelde is sterk beïnvloed door menselijk handelen en dat zal in de toekomst niet anders zijn. Momenteel wordt er jaarlijks circa 10 miljoen m³ sediment verplaatst binnen de Westerschelde om de vaargeul op diepte en breedte te houden (exclusief het baggerwerk in havens). De ruimte voor het storten van het opgebaggerde sediment is daarbij vaak juist genoeg in dit netto zandvangende systeem. Dat heeft in de eerste plaats vergunningstechnische achtergronden.

Toch heeft ook dit estuarium op termijn extra sediment nodig, om mee omhoog te groeien met het stijgend zeeniveau. Hierbij gaat het niet simpelweg om een vermenigvuldiging van het oppervlak met de zeespiegelstijging, omdat sedimenttransport hier een significante invloed heeft op de balans. Op dit moment worden de mogelijkheden onderzocht voor grootschalig sedimentbeheer, zoals verspreiden van zand in het mondingsgebied als dat vrijkomt bij vaargeulonderhoud in het estuarium. Grootschalig sedimentbeheer kan alleen binnen randvoorwaarden betreffende de hoogwaterbescherming langs het estuarium en mede met het oog op natuurwaarden.

Oosterschelde

Meegroeien met de zeespiegelstijging is in de Oosterschelde onmogelijk gezien het grote tekort op de zandbalans dat daar nu al bestaat. Dat wordt veroorzaakt door het feit dat er door de aanwezigheid van de kering vrijwel geen netto zandimport plaatsvindt, zand bezinkt in de grote ontgrondingskuilen aan weerszijden van de kering. Het gereduceerde getij achter de kering leidt daarnaast tot afbraak van de platen. Een belangrijke te beantwoorden vraag is of, en zo ja hoe de geulen, platen en schorren in de Oosterschelde mee moeten groeien. Dit zal niet vanzelf gaan. De effecten van zeespiegelstijging op de gebruiksfuncties van de Oosterschelde en eventuele maatregelen worden op dit moment in een ander kader onderzocht.

³⁷ Met een ASMITA-model is de grootschalige uitwisseling van zand tussen kustzone en getijdebekkens berekend. Voor ieder zeegat van de Nederlandse Waddenzee is uitgerekend wat de kritische snelheid is. Eventuele veranderingen in de in- en uitstroming door de zeegaten worden daarin meegenomen. Van der Spek, AJF, Elias, EPL, Lodder, Q, Hoogland, R, 2015. Toekomstige Suppletievolumes – Eindrapport. Deltas rapport 1208140-005-ZKS-0001.

Overige Deltabekkens

Voor de Grevelingen is een stijgende zeespiegel niet het grootste probleem. Door de afsluutdam is er geen directe relatie tussen de waterstanden op zee en in het afgesloten bekken. Op termijn zal het peil van het Grevelingenmeer echter aangepast moeten worden aan het gestegen waterpeil op zee, of er moet worden gepompt. Plannen om de Grevelingen door te spoelen met zeewater ter verbetering van de waterkwaliteit zullen deze aanpassing eerder nodig maken. In alle gevallen heeft dit consequenties voor de buitendijkse gebieden die niet uit zichzelf mee kunnen groeien. Vergelijkbare problemen met buitendijkse gebieden kunnen ontstaan in andere afgesloten delen van het zuidwestelijk estuariumgebied (Veerse Meer, Volkerak-Zoommeer). De gevolgen voor het Haringvliet hangen af van het beheer van de spuisluizen.

Voordelta

De voormalige buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen vormen een zandige buffer voor de kusten van Voorne en Goeree. Door de landwaartse verplaatsing van het zand in de voormalige buitendelta's kan de morfologie meegroeien met een stijgende zeespiegel. Lokaal kunnen complicaties ontstaan door inscharenden kortsuitgeultjes die de kust eroeren of te sterke afscherming van de kust waardoor de opbouwende werking van golven wegvalt en eroderende krachten niet langer gecompenseerd worden.

De buitendelta van de Oosterschelde kan zich vrij aanpassen. Door de zeespiegelstijging zullen de getijdebieten in de hoofdgeulen toenemen, waardoor de buitendelta zich door interne herverdeling van zand zelfs weer kan uitbreiden.

De Westerscheldemonding blijkt min of meer stabiel te blijven ondanks grote veranderingen in het estuarium³⁸. Ontwikkelingen hier zullen vooral bepaald worden door menselijk handelen. Het meegroeien met de zeespiegel zal hierbij wel grote hoeveelheden zand vragen die waarschijnlijk aan de kust en aan het estuarium worden onttrokken. Daarbij kan een geul die nu al dicht onder de kust van Walcheren loopt (Oostgat) en aansluit op de Westerschelde nog verder uitschuren. In welke mate een snellere zeespiegelstijging tot volstrekt ander geulgedrag leidt is nog niet onderzocht. Wel zijn er initiatieven om hier via praktijkproeven meer inzicht in te krijgen.

4.5 | Rijn-Maasdelta

Een rivier ontwikkelt zich morfologisch door een samenspel tussen de bewegingen van water en sediment. Dit samenspel wordt gestuurd door (1) de waterstanden benedenstroms, (2) veranderingen in eigenschappen als geometrie en ruwheid van het beschouwde riviertraject (bijvoorbeeld door adaptatiemaatregelen), en (3) toevvoer van water en sediment van bovenstroms. Menselijk ingrijpen in het stroomgebied heeft een veel groter effect op de morfologische ontwikkeling van de waterlopen dan klimaatverandering. Adaptatiemaatregelen in reactie op (versnelde) zeespiegelstijging zijn daarom overheersend. Bovendien blijken de morfologische effecten van hogere piekafvoeren en langduriger lage afvoeren elkaar min of meer op te heffen³⁹.

Een belangrijke vraag voor de rivieren in de Rijn-Maasdelta is hoe de benedenrivieren zich morfologisch zullen aanpassen aan een stijgende zeespiegel. Door stijging van de zeespiegel zal de invloed van de zee in de vorm van getijdewerking, zoutindringing en waterstandsverhoging zich landinwaarts uitbreiden.

Aanzanding blijft niet beperkt tot de benedenloop

In theorie is de belangrijkste morfologische aanpassing aan een stijgend zeeniveau aanzanding als gevolg van afnemende stroomsnelheden. Zulke aanzanding begint in de benedenrivieren en zou zich uit kunnen breiden naar de Nederlandse bovenrivieren (Rijntakken en Maas) en zelfs tot in Duitsland. Door zo'n stroomopwaartse uitbreiding van de aanzanding zouden op lange termijn de waterstanden in de bovenrivieren kunnen stijgen. Op zeer lange termijn zou het gehele lengteprofiel omhoog kunnen schuiven. In de praktijk worden onze rivieren echter voortdurend

door baggerwerkzaamheden op diepte gehouden. Daarom moet onderscheid gemaakt worden tussen wat in het zomerbed gebeurt en wat er intussen met de uiterwaarden gebeurt.

Als het zeeniveau snel stijgt, kan aanzanding in de rivieren dat niet volgen. Een snelle berekening laat zien dat het lengteprofiel van de Waal en Merwede met een lengte van ca. 100 km, een breedte van 350 m en een jaarlijks zandtransport van 0,7 miljoen m³, per jaar 20 mm kan stijgen. Hierbij moet opgemerkt worden dat aanzanding in werkelijkheid niet gelijkmatig over de lengte van de rivieren zal optreden. Uitgaande van 20 mm/jaar, zou dat vanaf 2060-2070 overschreden gaan worden bij een versnelde zeespiegelstijging

Niet alleen nadelen voor de rivieren

Een van de grootste zorgen van Rijkswaterstaat is echter niet de aanzanding, maar juist de voortdurende bodemerosie in het bovenrivierengebied, die plaatselijk oploopt tot 2 tot 3 cm per jaar. Bodemerosie kan de bevaarbaarheid van het vaarwegennet aantasten, ondermijnt waterbouwkundige kunstwerken, verdroogt uiterwaarden en kan de afvoerverdeling op de riviersplitsingen doen veranderen. Deze erosie is het gevolg van ingrepen zoals stuwen en dammen in het stroomgebied, normalisering van de rivier, zandwinning en vaarwegonderhoud.

De gesignaleerde mogelijke aanzanding als gevolg van een stijging van de zeespiegel kan helpen deze erosie af te remmen. Als aanzanding van de rivierbodem de stijging van de waterstanden echter niet kan bijhouden, zal het verhang van de rivier verder afnemen.

Morfologische aanpassing hangt af van keuzes voor adaptatie

De te verwachten morfologische aanpassing zal afhangen van de ingrepen die worden gedaan om de effecten van de zeespiegelstijging op waterstanden en zoutindringing te mitigeren (blijft de Waal een vrij afstromende rivier of worden stuwen en sluizen aangelegd? Komen er nieuwe keringen in de mondingen? Worden uiterwaarden anders ingericht? Blijft het IJsselmeerpeil laag of stijgt dit mee met het zeeniveau?). Voor de morfologische ontwikkeling van de rivieren zelf lijkt er niet direct aanleiding om maatregelen te nemen, maar de morfologische reactie op andere ingrepen zou wel aanvullende maatregelen nodig kunnen maken.

Naast zand ook slib

Rivieren transporteren niet alleen zand maar ook slib. Veranderingen in getijdewerking en zoutindringing als gevolg van zeespiegelstijging verplaatsen het troebelingsmaximum van slibtransport en de plekken waar slib op de bodem wordt afgezet.

Getijdewerking in de Rijn-Maasmonding

Sterke getijstromen en grote variatie in de samenstelling van de ondergrond bepalen de morfodynamica van de rivieren in de Rijn-Maasmonding rond Rotterdam. Daardoor zijn diepe erosiekuilen ontstaan die kabels en leidingen blootleggen en de stabiliteit van primaire waterkeringen aantasten. Als de sedimentatie achterblijft op de zeespiegelstijging wordt het getijvolume vergroot. Dat kan lokaal leiden tot grotere stroomsnelheden. Bestaande erosiekuilen kunnen verder uitschuren en nieuwe erosiekuilen kunnen ontstaan.

4.6 | Gevolgen voor voorkeursstrategie

De kust met zand op orde houden bij een snel stijgende zeespiegel vraagt zeer veel zand, maar het is technisch gezien niet onmogelijk. Ruimtelijke reservering om voldoende zand beschikbaar te hebben is dan wel nodig.

De frequentie en omvang van zandsuppleties worden bepaald door de snelheid van zeespiegelstijging. Bij de stijging van circa 2 mm/jaar zoals waargenomen langs de Nederlandse kust, voldoet de huidige praktijk. Het meegroeien van de Waddenzee is daar niet explicet in meegenomen, omdat dat geen beleidsdoelstelling is voor de Kustlijnzorg. Alleen de verliezen uit de kustzone worden gecompenseerd. Het onderzoeksprogramma Kustgenese 2.0 moet in 2020 antwoorden geven op de vraag hoe een structureel en duurzaam evenwicht in de Nederlandse kustzone eruit ziet, en wat de daarbij benodigde suppletiebehoefte en effectieve uitvoeringswijzen zijn.

³⁸ Elias, EPL, van der Spek, AJF, Lazar, M, 2017. The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; impacts of large-scale engineering. Netherlands Journal of Geosciences, 96 (3), 233-259.

³⁹ Krekt, A.H., T.J. van der Laan, R.A.E. van der Meer, B. Turpijn, O.E. Jonkeren, A. van der Toorn, E. Mosselman, J. van Meijeren & T. Groen (2011): Climate change and inland waterway transport: impacts on the sector, the Port of Rotterdam and potential solutions. Arcadis, Port of Rotterdam, Ministry of Infrastructure and the Environment, VU University of Amsterdam, Delft University of Technology, Deltares and TNO. Knowledge for Climate, project HSRR08, CfK/037/2011, ISBN/EAN 978-94-90070-434.

Naar verwachting kan de westelijke Waddenzee een zeespiegelstijging van meer dan circa 6 mm/jaar niet meer bijhouden, met een afname van het areaal wadplaten tot gevolg. Ditzelfde gebeurt bij ongeveer 10 mm/jaar in de Oostelijke Waddenzee. In zowel de Deltascenario's Warm en Stoom als de projecties met versnelde zeespiegelstijging wordt deze stijgsnelheid bereikt binnen enkele decennia (zie hoofdstuk 3).

Voor de Zuidwestelijke Delta verschillen de gevolgen van een versnelde zeespiegelstijging sterk per deelsysteem. Zo wordt de sedimentbalans van de Westerschelde vooral bepaald door menselijk handelen (baggeren) en dat zal in de toekomst zo blijven. Om mee te groeien met de zeespiegel zal extra sediment nodig zijn. Voor de Oosterschelde is meegroeien met de zeespiegelstijging naar verwachting echter onmogelijk, gezien het grote tekort aan zand dat er nu al bestaat. De vraag is of en hoe platen en schorren mee moeten en kunnen groeien. In de huidige situatie wordt jaarlijks 12 miljoen m³ zand gesuppleerd. Met dit volume kan het kustfundament in principe 3 mm/jaar meegroeien. (NB de berekening van het huidige suppletievolume gaat niet alleen uit van meegroeien, maar ook van erosie van het kustfundament!) Een snellere stijging van de zeespiegel vraagt meer zand. In de Deltascenario's Warm en Stoom stijgt de zeespiegel met een snelheid van 10 mm/jaar rond 2050 en met 14 mm/jaar aan het einde van de eeuw. Bij versnelde zeespiegelstijging is de snelheid rond 2050 nog vergelijkbaar met de Deltascenario's. In al deze toekomstprojecties moeten we dus rekening houden met een 3 tot 4 keer groter suppletievolume in 2050. Bij versnelde zeespiegelstijging kan de snelheid aan het einde van de eeuw oplopen tot 60 mm/jaar of meer. Dit vraagt (volgens de eenvoudige berekening) om tenminste 20 keer zo veel zand als nu wordt gesuppleerd. Hierin is een toename van erosie van het fundament niet meegenomen. Bij lagere emissies volgens RCP4.5, is dit tegen het einde van de eeuw of later. Bij hoge emissies volgens het RCP8.5 is dit rond 2080 – 2095 voor respectievelijk de boven- en middenwaarde van de projecties.

De vraag is tot welke snelheid van stijging de huidige voorkeurstrategie kan worden voortgezet. Duidelijk is dat een dergelijke grootschalige suppletie-operatie om een andere organisatie van de uitvoering vraagt. Daarnaast zal het winnen en aanbrengen van zeer grote volumes zand serieuze gevolgen hebben voor de ecologie van de kustzone. De kosten van grootschalig suppleren zijn aanzienlijk maar zijn vergeleken bij andere uitgaven op de rijksbegroting beperkt. Een continue grootschalige aanvulling van de zandvoorraad van de kust vergroot de dynamiek van kustzone en strand, wat consequenties zal hebben voor de verschillende gebruiksfuncties en natuurwaarden.

Of suppleren een 'no regret'-maatregel is, als op termijn bij een steeds grotere en snellere stijging alsnog tot andere maatregelen wordt besloten, hangt af van de effecten waar rekening mee wordt gehouden. Door te suppleren blijft de samenhang van de kuststrook behouden. De effecten voor bodemfauna en ecologie van de kustzone zullen echter aanzienlijk zijn. Het is vooralsnog niet duidelijk of deze effecten reversibel en acceptabel zijn.

Rijn-Maasdelta

Aanzanding als gevolg van afname van de stroomsnelheden door zeespiegelstijging kan het huidige probleem van bodemerosie in de rivieren verminderen. Met het huidige aanbod van rivierzand kan de aanzanding 2 cm zeespiegelstijging per jaar bijhouden, geschat op basis van zandtransport en oppervlak van de rivier. Als aanzanding van de rivierbodem de waterstandsstijging niet kan bijhouden, zal de gemiddelde diepte en daarmee de bevaarbaarheid toenemen. Erosiekuilen kunnen groter worden en nieuwe kuilen kunnen ontstaan door toenemende stroomsnelheden als gevolg van een groter getijvolume door hogere zeewaterstanden.



Waterveiligheid

5



5.1 | Inleiding

Het belangrijkste operationele doel van de voorkeursstrategie voor het Deltaprogramma Waterveiligheid voor de periode tot 2050 is dat de hoogwaterbescherming van Nederland moet voldoen aan de nieuwe veiligheidsnormering. Om hieraan te voldoen bevat het Deltaprogramma een groot aantal maatregelen die voor 2050 gerealiseerd moeten worden. Veel van deze maatregelen zijn opgenomen in (lang) lopende uitvoeringsprogramma's. De belangrijkste maatregelen zijn de versterking van waterkeringen, rivierverruiming, aanpassen van stormvloedkeringen, vergroten van de pompcapaciteit van de Afsluitdijk, het suppleren van zand en het op orde krijgen van de rampenbestrijding. In de voorkeurstrategieën komen voor de periode na 2050, bij een zich voortzettende klimaatverandering en versnelde zeespiegelstijging, nieuw te maken keuzes in beeld. Voorbeelden daarvan zijn het al dan niet aanpassen van de afvoerverdeling van de rivieren, het aanpassen of vervangen van de Maeslantkering, Hartelkering en Hollandse IJsselkering, het al dan niet handhaven van de streefpeilen in het IJsselmeer en Markermeer, een beslissing of de huidige kustlijn gehandhaafd wordt en het al dan niet afsluiten van de Nieuwe Waterweg middels de aanleg van een zeesluis.

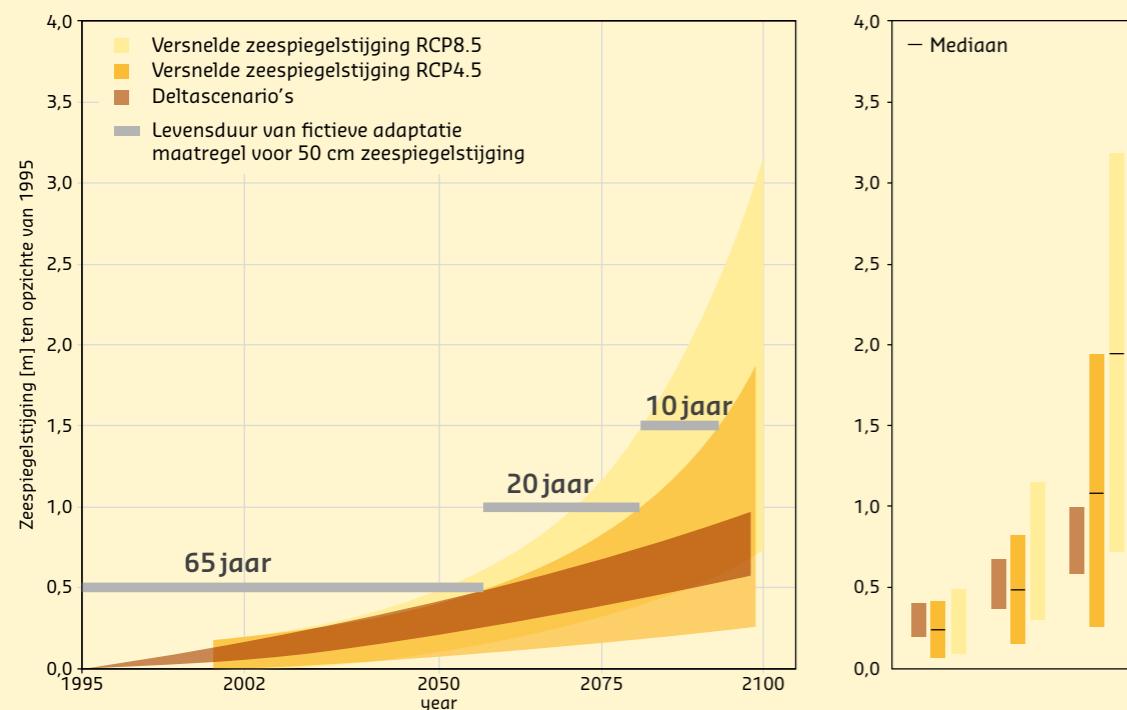
Om deze keuzes weloverwogen te maken, zijn in veel situaties al voor 2050 verkennende studies nodig voor onderbouwing van beslissingen die na 2050 moeten worden genomen. De uitkomsten daarvan zouden kunnen leiden tot het aanpassen van mogelijke strategieën die na 2050 moeten worden geïmplementeerd en mogelijk al tot het nemen van voorlopige beslissingen.

5.2 | De betekenis van versnelde zeespiegelstijging in het kort

De voorkeurstrategie voor waterveiligheid houdt rekening met adaptatie aan een doorlopend stijgende zeespiegel gedurende deze eeuw. Hierbij is verondersteld dat de stijgsnelheid per jaar in de loop van deze eeuw niet veel groter wordt dan deze nu is. In de geschatte projecties van de versnelde zeespiegel wordt deze stijgsnelheid na 2050 echter voortdurend groter. Hoewel het onzeker is of deze projecties uitkomen, is het belangrijk om de mogelijke gevolgen ervan op de voorkeursstrategie tijdig in kaart te brengen.

Tot 2050 ontlopen de zeespiegelstijging volgens de beide Deltascenario's Warm en Stoom enerzijds en die volgens de projecties van de versnelde zeespiegelstijging anderzijds elkaar weinig. Op grond van de geprojecteerde zeespiegelstanden hoeft de huidige voorkeursstrategie voor Waterveiligheid dan ook in elk geval tot 2050 niet aangepast te worden. Dat betekent versterking van waterkeringen tot aan het jaar 2050, conform de nieuwe normen. De beoordeling van de keringen ten opzichte van de nieuwe normen is nog bezig en evaluatie van de normen is voorzien van nu tot 2050. Zonder aanpassingen van de normen zal ook bij het uitblijven van versnelde en extreme zeespiegelstijging een aantal kunstwerken vanaf 2040 naar verwachting niet meer voldoen aan de normen; dit komt doordat voor deze kunstwerken de normen strenger zijn dan voorheen.

Wat de mogelijke versnelling van de zeespiegelstijging betekent voor de uitvoering van de strategie na 2050 wordt geïllustreerd in Figuur 5.1. Als we de middenwaarde van de RCP8.5 projectie of de bovenwaarde van RCP4.5 als uitgangspunt nemen, dan was een aanpassing voor 0,5 m stijging in 1995 nog voldoende om circa 65 jaar vooruit te kunnen. In 2060 is de functionele levensduur van een extra 0,5 m afgenomen tot 20 jaar en daarna neemt deze af tot 10 jaar. Dat brengt met zich mee dat adaptatie met relatief kleine stappen steeds lastiger wordt. De maatregelen zullen dan immers steeds korter effectief zijn, en er is weinig tijd voor planning en implementatie. Een optie is om (heel veel) grotere maatregelen te nemen.



Figuur 5.1 Illustratie van de verkleining van de functionele levensduur van adaptatiemaatregelen aan 0,5 m stijging van de zeespiegel. Deze illustratie geldt voor de bovenwaarde van RCP4.5 en de middenwaarde van RCP8.5.

5.3 | Gevolgen van de versnelde zeespiegelstijging voor stormvloedkeringen en zeesluizen

Voor de hoogwaterbescherming van Nederland vormen de grote stormvloedkeringen en zeesluizen belangrijke schakels. Er is daarom een verkenning uitgevoerd wat de zeespiegelstijging in de loop van deze eeuw zou betekenen voor de functionaliteit van vier van de belangrijkste kunstwerken: de Afsluitdijk, de Maeslantkering, De Haringvlietdam en de Oosterscheldekering. Belangrijke eigenschappen die de functionaliteit van deze keringen bepalen zijn het kerende vermogen, hun sterke, de frequentie waarmee ze moeten sluiten en de betrouwbaarheid van de sluitprocedure. Van deze eigenschappen zijn de eerste en derde in beschouwing genomen in onze analyses. Mechanismen zoals piping, sterke en stabiliteit van de kering, die bepalend zijn voor het 'falen' van de kering, zijn dus niet meegenomen evenmin als de betrouwbaarheid van sluiting. Onderstaande analyse vormt dan ook een eerste-ordebenadering van de functionaliteit van de keringen in de komende 80 jaar onder de aannname van een mogelijk extra versnelde zeespiegelstijging. Een volledige beoordeling van wat de keringen maximaal kunnen keren, vergt een veel gecompliceerde onderzoeken, omdat dit afhankelijk is van de specifieke eigenschappen van de keringen en hun omgeving. Een dergelijk onderzoek valt buiten de scope van deze verkenning en zal in elk geval uitgevoerd worden in het kader van de 12-jarige cyclus van beoordelen.

5.3.1 Invloed van de zeespiegelstijging op het kerende vermogen

Het kerende vermogen is voor de waterveiligheid de belangrijkste eigenschap van deze kunstwerken. De eisen die hiervoor aan de kunstwerken gesteld worden vinden hun oorsprong in de in 2017 ingevoerde nieuwe normen. Toch hebben we er niet voor gekozen om deze analyse uit te voeren in het licht van de nieuwe normering, om verwarring met de formele beoordeling te voorkomen. De voorliggende verkenning voor de lange termijn is dan ook geen beoordeling op grond waarvan de keringen goed- of afgekeurd zouden moeten worden. Die beoordeling vindt immers plaats in een ander traject, waarin door de keringbeheerders voor alle keringen een beoordeling wordt opgesteld.

5.3.1.1 Ontwerppeilen

De verkenning start met een schatting van wat de keringen aan waterstanden kunnen keren. Er is bewust voor gekozen om de golfsbelasting buiten de analyses te houden. Het nader vaststellen van de mate van golfoverslag vraagt om uitgebreider onderzoek, waarin gebruik gemaakt wordt van meer detailgegevens van de keringen dan voor de onderhavige studie beschikbaar waren. Waar mogelijk zijn de ontwerppeilen van de keringen gebruikt als maat voor de vergelijking met toekomstige stormvloedwaterstanden. Voor de kunstwerken waarvoor geen ontwerppeil beschikbaar is, is de kerende hoogte als maat genomen. De volgende ontwerppeilen, welke zijn verkregen van contactpersonen bij Rijkswaterstaat, zijn gebruikt in de analyses:

- Afsluitdijk: Als onderdeel van het 'Deltaprogramma Veiligheid' is voorzien om de Afsluitdijk te renoveren waarbij deze dijk stormvloedwaterstanden die optreden bij een zeespiegelstijging van 1 m zou moeten kunnen keren. Voor de Afsluitdijk gebruiken we als criterium het ontwerppeil bij Den Oever zoals dat is opgegeven voor de nieuw te bouwen keersluis aan de buitenkant van de bestaande schutsluizen. Dit ontwerppeil is NAP +6,5 m.
- Maeslantkering: Voor de Maeslantkering gebruiken we als criterium de gemiddelde kerende hoogte van NAP +5 m. Die is gelijk aan het niveau van de bovenzijde van de sluitdeuren.
- Haringvlietdam: Voor de Haringvlietdam gebruiken we als criterium de kerende hoogte van de binnenste deur van de spuisluis. Deze is NAP +5 m.
- Oosterscheldekering: Voor de Oosterscheldekering gebruiken we het ontwerppeil van NAP +5,5 m zoals dat was voorgeschreven tijdens de bouw.

Bij de huidige zeewaterstand hebben deze ontwerppeilen een bepaalde frequentie van overschrijden. Met een stijgende zeespiegel zal die frequentie omhoog gaan. Dit zal tevens, indien sluitcriteria niet wijzigen, aanleiding geven tot het vaker sluiten van de stormvloedkeringen. Ter illustratie een voorbeeld: bij de huidige zeespiegel is de geschatte frequentie van een stormvloedwaterstand van NAP +3 m bij Hoek van Holland ongeveer eens per tien jaar (of een kans van 1/10 per jaar). Als de zeespiegel met 1 meter stijgt, zal die frequentie ongeveer drie keer per jaar zijn, een toename met een factor 30. In elk jaar is het dan zeer waarschijnlijk dat de waarde van NAP +3 m bij Hoek van Holland tenminste één keer wordt overschreden.

De huidige frequentie van overschrijden gebruiken we als referentiewaarde waarmee we de projecties voor de toekomstige frequenties gaan vergelijken. Hoe snel de frequentie in de loop van de jaren verandert, is afhankelijk van de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. Om dat te bepalen zijn de stormvloedwaterstanden verhoogd met behulp van de verschillende zeespiegelprojecties.

Een vergelijking tussen de ontwerppeilen en deze veranderende overschrijdfrequenties laat zien wat we in de loop van de eeuw kunnen verwachten van het waterkerende vermogen van stormvloedkeringen op basis van hun huidige hoogte. Uiteraard kan door het versterken of verhogen van de keringen een aanpassing worden gedaan waardoor de stormvloedkering hogere waterstanden kan keren. Verder geldt dat een overschrijding van het ontwerppeil in de huidige toestand van de keringen niet per definitie betekent dat deze keringen 'falen' of 'bezwijken'.

5.3.1.2 Bepaling van de frequenties van de ontwerppeilen

Voor de verschillende kunstwerken zijn met Hydra-NL, dat onderdeel is van het WBI-instrumentarium⁴⁰, berekeningen uitgevoerd om overschrijdfrequenties te bepalen van de ontwerppeilen. Dit is gedaan voor de huidige zeespiegelstand en voor verschillende zeespiegelstijgingen die in de projecties en scenario's voorkomen.

We nemen aan dat de (kans op een bepaalde) stormopzet ongewijzigd blijft onder alle scenario's. Dat betekent dat de zeespiegelstijging één-op-één doorwerkt in hogere piekwaterstanden op zee. Als voorbeeld: stel dat op een bepaalde locatie de waterstand bij de normfrequentie wordt geschat op NAP +4 m en één van de scenario's verwacht voor een bepaald jaar een stijging van de zeespiegel met 0,5 m, dan wordt de verwachte waterstand bij de normfrequentie NAP +4,5 m. Overigens is het niet zeker dat de aanname van een ongewijzigde stormopzet correct is, dit zou in een later stadium uitgezocht moeten worden.

⁴⁰ Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017: Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017; Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen

De stijging van de gemiddelde zeespiegel voor de komende eeuw volgt uit de scenario's en projecties. Hierbij is de zeespiegelstijging relatief genomen ten opzichte van het jaar 1995. We gaan uit van de stijging volgens de middenwaarde van de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging (zie hoofdstuk 3). We laten echter ook zien bij welke zeespiegelstijging dit gebeurt. Door dit te relateren aan de projecties kan worden geschat wanneer dit optreedt bij de onder-, midden-, en bovenwaarde van de projecties. De betekenis voor het Deltaprogramma brengen we in beeld door eenzelfde exercitie te doen met als uitgangspunt de zeespiegelstijging volgens de Deltascenario's Warm en Stoom. Deze analyse levert een eerste indicatie op voor de verandering van overschrijdfrequenties in de tijd en de onzekerheden daarover.

5.3.1.3 Veranderingen in terugkeertijden van ontwerppeilen voor deze eeuw

De resultaten presenteren we twee manieren:

- De zeespiegelstijging waarbij belangrijke terugkeertijden van de overschrijding van ontwerppeilen van de onderzochte keringen naar verwachting gaan voorkomen. Hiermee volgen we de 'knikpunten'-aanpak zoals beschreven in hoofdstuk 2, al gaat het hier niet om heel harde knikpunten waarbij doelen niet gehaald worden, maar om belangrijke mijlpalen waarbij een frequentie van overschrijding van het ontwerppiel van eens in de 10, 100, 1000, 10.000 en 100.000 jaar wordt gehaald (Figuur 5.2). Met behulp van de scenario's en projecties kan worden ingeschat wanneer dit kan gaan gebeuren. Deze resultaten zijn scenario-neutraal. Bij nieuwe scenario's kan gemakkelijk opnieuw worden ingeschat wanneer de terugkeertijden worden verwacht bij een bepaald scenario.
- Voor drie zichtjaren (2050, 2085, 2100) presenteren we de verwachte terugkeertijden van de ontwerppeilen voor de onderzochte keringen voor de Deltascenario's Warm en Stoom en voor de middenwaarde van de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging (Tabel 5.1). Voor de volledigheid toont de tabel ook de frequenties voor het referentiejaar 2023. Het onderlinge verschil in terugkeertijden tussen de vier verschillende jaartallen geeft een eerste indicatie van het verloop van het kerende vermogen van de onderzochte kunstwerken in de komende 80 jaar, op basis van hun huidige hoogte.

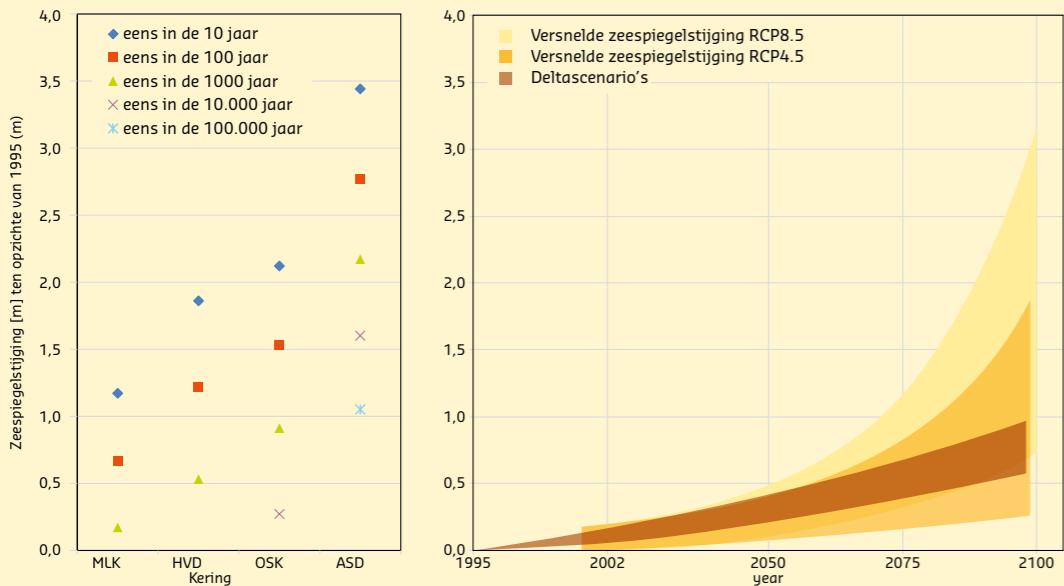
Uit Tabel 5.1 blijkt dat er tot 2050 weinig verschillen optreden tussen de verschillende projecties en scenario's. Dit is het gevolg van de kleine verschillen tussen de zeespiegelstanden volgens de projecties en scenario's. Na 2050 en vooral in de laatste twee decades van deze eeuw blijkt duidelijk dat het kerende vermogen van de kunstwerken erg sterk afneemt bij de projecties van een versneld stijgende zeespiegel. Anders gezegd: de kans dat een storm leidt tot een piekwaterstand op zee die hoger is dan het ontwerppiel, wordt snel groter. Handhaving van het gewenste beschermingsniveau zal in de 2^e helft van deze eeuw meer en meer inspanning kosten.

In Tabel 5.1 zijn we uitgegaan van middenwaarden van zeespiegelstijging voor de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging. Om deze middenwaarden liggen brede pluimen die de onzekerheden om deze waarden weergeven. Figuur 5.2 brengt deze onzekerheid in verband met verschillende terugkeertijden voor de ontwerppeilen. Deze figuur laat zien dat bij een zeespiegelstijging van rond de 2 m de jaarlijkse kans op een storm die leidt tot het overschrijden van de ontwerppeilen van de Haringvlietsluis en Oosterscheldekering in de orde van eens in de 10 jaar ligt; voor de Maeslantkering zelfs hoger. Het ligt binnen de bandbreedte van de onzekerheden dat we dit binnen deze eeuw kunnen bereiken. Het ligt ook binnen de bandbreedte van de projecties dat dit mogelijk pas lange tijd na 2100 bereikt gaat worden.

Tabel 5.1 Indicatie van de terugkeertijden (jaren) van de overschrijding van het ontwerppiel voor de stormvloedkeringen voor (a) de huidige situatie (2023) en de zichtjaren (b) 2050; (c) 2085 en (d) 2100 bij zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 volgens de middenwaarden van de projecties voor extra versnelde zeespiegelstijging die uitgaan van de uitvoering van het Parijsakkoord (RCP4.5); sterk toenemende broeikasgasconcentraties (RCP8.5) en de Deltascenario's Warm en Stoom. De terugkeertijden zijn afgerond. Tussen de 100 duizend en 10 duizend afgerond op 10.000-tallen, tussen 10.000 en 1000 op 1000-tallen; tussen 1000 en 100 op 100-tallen en beneden de 100 op 10-tallen.

| (a) 2023 | | | | | |
|------------------------|------------------------|---|--|--|--|
| Kering | Ontwerppiel (m+NAP) | Deltascenario's Warm en Stoom (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP4.5 (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP8.5 (Jaren) | |
| Zeespiegelstijging (m) | | 0,17 | 0,10 | 0,10 | |
| Maeslantkering | 5,0 | > 1.000 | >1.000 | >1.000 | |
| Haringvlietdam | 5,0 | > 3.000 | >3.000 | >3.000 | |
| Oosterscheldekering | 5,5 | > 10.000 | >10.000 | >10.000 | |
| Afsluitdijk | 6,5 | >100.000 | > 100.000 | > 100.000 | |
| (b) 2050 | | | | | |
| Kering | Ontwerppiel (m+NAP) | Deltascenario's Warm en Stoom (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP4.5 (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP8.5 (Jaren) | |
| Zeespiegelstijging (m) | | 0,40 | 0,23 | 0,28 | |
| Maeslantkering | 5,0 | > 300 | >500 | >400 | |
| Haringvlietdam | 5,0 | > 1.000 | >2.000 | >1.000 | |
| Oosterscheldekering | 5,5 | > 7.000 | >10.000 | >9.000 | |
| Afsluitdijk | 6,5 | >100.000 | > 100.000 | > 100.000 | |
| (c) 2085 | | | | | |
| Kering | Ontwerppiel (m+NAP) | Deltascenario's Warm en Stoom (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP4.5 (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP8.5 (Jaren) | |
| Zeespiegelstijging (m) | | 0,80 | 0,64 | 106 | |
| Maeslantkering | 5,0 | >50 | >80 | >10 | |
| Haringvlietdam | 5,0 | >400 | >500 | >100 | |
| Oosterscheldekering | 5,5 | >1.000 | >2.000 | >500 | |
| Afsluitdijk | 6,5 | >100.000 | >100.000 | >60.000 | |
| (d) 2100 | | | | | |
| Kering | Ontwerppiel (m+NAP) | Deltascenario's Warm en Stoom (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP4.5 (Jaren) | Versnelde zeespiegelstijging RCP8.5 (Jaren) | |
| Zeespiegelstijging (m) | | 1,00 | 1,07 | 1,94 | |
| Maeslantkering | 5,0 | >20 | >10 | <10 | |
| Haringvlietdam | 5,0 | >200 | >60 | <10 | |
| Oosterscheldekering | 5,5 | >800 | >400 | >20 | |
| Afsluitdijk | 6,5 | >100.000 | >60.000 | >2.000 | |

Figuur 5.2 geeft de terugkeertijden voor overschrijdingen van de ontwerppeilen als functie van de zeespiegelstijging. Met behulp van de bandbreedte voor de Deltascenario's en de projecties kan worden afgeleid wanneer dit ongeveer kan gaan plaatsvinden. Uit Figuur 5.2 blijkt dat voor alle keringen de overschrijdingsfrequentie van het stormvloedpeil telkens met een factor 10 toeneemt bij een zeespiegelstijging in het bereik van 0,5 tot 0,8 meter. Dat impliceert dat de decimeringshoogte⁴¹ van waterstanden bij de stormvloedkeringen in het bereik van 0,5 tot 0,8 meter ligt. Deze decimeringshoogte is een indicator voor het effect van een mogelijk extra versnelde zeespiegelstijging. Om een voorbeeld te geven: bij de middenwaarde van de RCP4.5 projectie en de Deltascenario's Warm en Stoom is de zeespiegel in het jaar 2100 met ongeveer 1 m gestegen ten opzichte van 1995. Dat is dus gelijk aan ongeveer 1,3 à 2 keer de decimeringshoogte. Dat betekent dat bij RCP4.5 volgens de middenwaarde in het jaar 2100 de overschrijdingskansen van ontwerppeilen met een factor 20-100 zijn toegenomen ten opzichte van de referentiesituatie van 1995. Dit is rond 2080 volgens de middenwaarde in de RCP8.5 projectie. In 2100 is volgens de middenwaarde van de RCP8.5 projectie de zeespiegel ongeveer 2 m gestegen. Dat is dus gelijk aan ongeveer 2,5 à 4 keer de decimeringshoogte. In dat geval zijn de overschrijdingskansen van ontwerppeilen met een factor 300-10.000 toegenomen.



Figuur 5.2 Terugkeertijden (10, 100, 1000, 10.000 en 100.000 jaar) van de overschrijding van het ontwerppeil voor de Maeslantkering (MLK), Haringvlietdam (HVD), Oosterscheldekering (OSK) en Afsluitdijk (ASD) (links). Met behulp van de scenario's en projecties in de rechter figuur kan worden geschat wanneer dit kan gaan optreden. Bijvoorbeeld: de terugkeertijd van eens in de 10 jaar voor de overschrijding van het ontwerppeil van de Maeslantkering wordt bereikt bij 1,15 m zeespiegelstijging. Dit komt op z'n vroegst voor rond 2075 (bovenwaarde RCP8.5), of later, rond 2085 volgens de middenwaarde van RCP8.5 of de bovenwaarde van RCP4.5 of na 2100 in de Deltascenario's.

5.3.2 Verandering van de sluitfrequentie van de Maeslantkering en Oosterscheldekering

De Maeslantkering en de Oosterscheldekering zijn het grootste deel van de tijd geopend. De Maeslantkering vanwege het scheepvaartverkeer naar en vanuit Rotterdam via de Nieuwe Waterweg, de Oosterscheldekering om de natuurwaarden en schelpdierkweek in de Oosterschelde te garanderen. Deze keringen sluiten alleen bij een dreigende stormopzet op zee. Wanneer deze keringen vaker en langer moeten sluiten als gevolg van een stijgende zeespiegel, verliezen ze mogelijk deze gewenste functionaliteiten. Voor de Oosterscheldekering en de Maeslantkering is de sluitfrequentie dan ook een belangrijk criterium voor het functioneren.

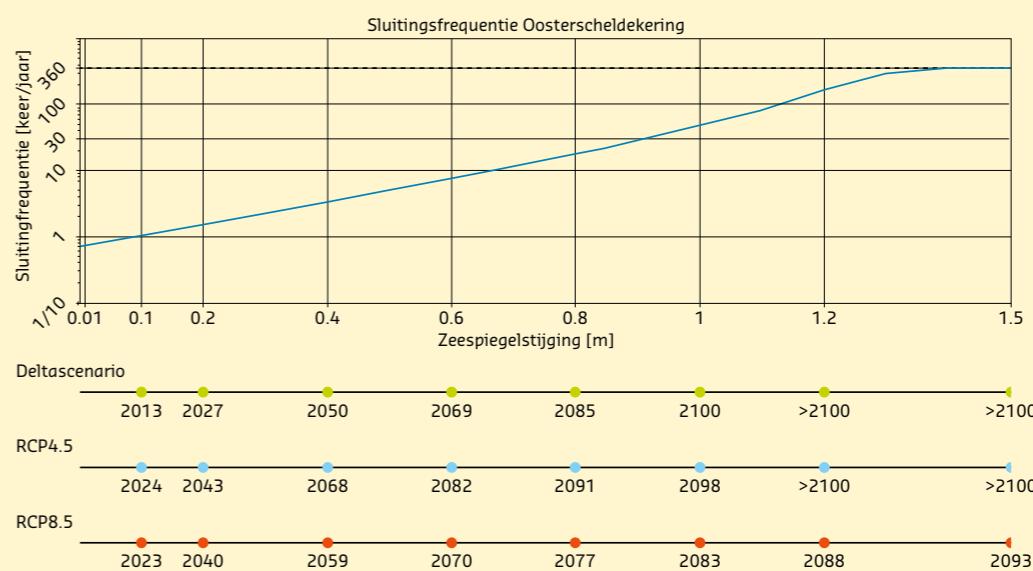
Met een stijgende zeespiegel zal de sluitfrequentie toenemen. De Maeslantkering moet nu sluiten bij een waterstand van NAP +3,0 m bij Rotterdam (en/of NAP +2,9 m bij Dordrecht). Dat komt nu ongeveer eens in de 10 jaar voor. Wanneer de zeespiegel bijvoorbeeld met 1,5 meter is gestegen zal die kering, bij gelijke sluitcriteria, in de wintermaanden zeer regelmatig dicht zijn. Deze stijging zal rond 2090 voorkomen volgens de middenwaarde van de RCP8.5 en de bovenwaarde van de RCP4.5 projectie en rond 2080 volgens de bovenwaarde van de RCP8.5 projectie.

Met behulp van Hydra-NL is berekend wat de invloed is van zeespiegelstijging op de sluitfrequentie van deze keringen (Figuur 5.3 en Figuur 5.4), onder de aanname van gelijkblijvende sluitcriteria. De sluitfrequentie neemt bij benadering exponentieel toe met de zeespiegelstijging. Dit exponentiële verloop zet zich door tot het moment dat de kering vrijwel permanent gesloten is, daarna heeft de lijn een vlak verloop (zie Figuur 5.4). Voor de Maeslantkering loopt de frequentie op van eens per 16 jaar naar eens per 3 jaar (0,5 m zeespiegelstijging), 3 keer per jaar (1,0 m zeespiegelstijging) tot 30 keer per jaar (1,5 m zeespiegelstijging). Voor de Oosterscheldekering loopt de frequentie op van eens per anderhalf jaar naar 5 keer per jaar (0,5 m zeespiegelstijging), via 45 keer per jaar (1,0 m zeespiegelstijging) tot vrijwel permanente sluiting (1,5 m zeespiegelstijging).

Voor de Maeslantkering is een sluitfrequentie van 1 keer per jaar gesuggereerd als knikpunt in verband met de belemmering voor de scheepvaart⁴². Dat knikpunt wordt overschreden bij ongeveer 0,75 m zeespiegelstijging. Vanuit constructief oogpunt kan de Maeslantkering naar verwachting een sluitfrequentie van maximaal 3 keer per jaar aan⁴³; dat knikpunt wordt overschreden bij ongeveer 1,0 m zeespiegelstijging. Er zijn geen vergelijkbare knikpunten voor de Oosterschelde, maar ergens tussen de 1,0 en 1,5 m zeespiegelstijging zal de kering zó vaak moeten sluiten dat die niet meer functioneert en vervangen moet worden door een alternatief.



Figuur 5.3 Sluitfrequentie Maeslantkering afhankelijk van de zeespiegelstijging. Deze grafiek is bepaald met Hydra-NL. Onder de grafiek is aangegeven wanneer bepaalde niveaus van zeespiegelstijging worden bereikt in de Deltascenario's Warm en Stoom en bij de middenwaarden van de projecties voor extra versnelde zeespiegelstijging.



Figuur 5.4 Sluitfrequentie Oosterscheldekering afhankelijk van de zeespiegelstijging. Deze grafiek is bepaald met Hydra-NL. Onder de grafiek is aangegeven wanneer bepaalde niveaus van zeespiegelstijging worden bereikt in de Deltascenario's Warm en Stoom en bij de middenwaarden van de projecties voor extra versnelde zeespiegelstijging. De stippelijn geeft de maximale frequentie aan dat met dit model berekend kan worden. Dit maximum is gelijk aan het aantal getijden per winterhalfjaar (360). Het bereiken van dit maximum impliceert dat in elke getijperiode het sluitcriterium wordt bereikt.

⁴¹ Absoluut verschil in hoogte tussen een waterstand met een bepaalde overschrijdingsfrequentie en een waterstand met een overschrijdingsfrequentie, die een factor 10 hoger of lager is.

⁴² Deltaprogramma | Rijnmond-Drechtsteden, 2011: Deltaprogramma 2012 - Probleemanalyse Rijnmond-Drechtsteden; Impact van klimaatverandering en sociaal-economische ontwikkeling op waterveiligheid en zoetwatervoorziening.
⁴³ Sacha de Goederen, Rijkswaterstaat, persoonlijke communicatie

Door de snellere toename in sluitfrequentie van de Maeslantkering en de Oosterscheldekering komt een belangrijke keuze voor de voorkeursstrategie op lange termijn in beeld over het al dan niet permanent afsluiten van zeearmen die nu nog een open verbinding met de zee hebben. Mogelijk moet daarom al voor 2050 worden nagedacht over gesloten varianten die nodig zouden kunnen zijn om na 2050 de effecten van versnelde zeespiegelstijging op te vangen.

De bovenstaande sluitfrequenties zijn, zoals vermeld, berekend onder de aanname van ongewijzigde sluitcriteria. De keringen zouden wellicht meer zeespiegelstijging aan kunnen door het sluitpeil te laten "meestijgen" met de zeespiegel, zodat de sluitfrequentie niet, of minder snel, toeneemt. Dit stelt wel hogere eisen aan de waterkeringen in het achterland. Tevens geldt dat de buitendijkse gebieden achter de keringen dan vaker onder water zullen staan. Het reducerende effect van de Maeslantkering op hydraulische belastingen zal naar verwachting onder alle scenario's en bij alle projecties behouden blijven als de sluitcriteria meebewegen met de zeespiegel.

5.3.2.1 Gevolgen voor het achterliggende gebied

Omdat de Maeslantkering en de Oosterscheldekering normaliter open staan, zal het water achter deze keringen meestijgen met de zeespiegel. Dit geldt ook voor het water achter de Haringvlietsluizen, dat in open verbinding staat met de rest van het Benedenrivierengebied. Daarbij komt: het peil van het Haringvliet moet hoog genoeg blijven om het rivierwater te kunnen spuien rond laagwater op zee.

Deze hogere waterstanden op de binnenwateren hebben tot gevolg dat de marge tussen de waterstand bij sluiten van de keringen en de dijkhoogtes langs de rivieren kleiner wordt. Voor de veiligheid in het benedenrivierengebied is deze marge van belang voor het bergen van de afvoer van de Rijn en Maas. Met het stijgen van de zeespiegel zal ook tijdens extreme hoogwatergebeurtenissen het overslagdebiet over de stormvloedkeringen kunnen toenemen; en dat extra water zal geborgen moeten kunnen worden. Het effect hiervan is overigens naar verwachting klein. Een bijkomend effect van de hogere waterstanden op de binnenwateren is dat buitendijs gelegen bewoonde gebieden in toenemende mate te maken krijgen met wateroverlast.

Omdat de keringen vaker moeten sluiten bij hogere zeespiegel, zal ook de frequentie toenemen dat een kering ten onrechte niet sluit. Dat heeft gevolgen voor maatgevende waterstanden in het zee-gedomineerde deel van het benedenrivierengebied, zoals we verderop beschrijven in paragraaf 5.4.2.

Als de marge voor berging kleiner wordt en het totale overslagdebiet over de kering groter wordt zal de waterberging op het Volkerak-Zoommeer (VZM) vaker moeten worden ingezet. De capaciteit hiervan zal echter ook afnemen: omdat het VZM moet kunnen spuien naar o.a. de Westerschelde (bij Bath) zal de reguliere waterstand van het VZM ook hoger worden, waarmee de capaciteit van de waterberging afneemt. De stijging van de zeespiegel heeft dus ook gevolgen voor de waterveiligheid in het achterliggende gebied. Dergelijke consequenties zijn in deze studie nog niet verkend.

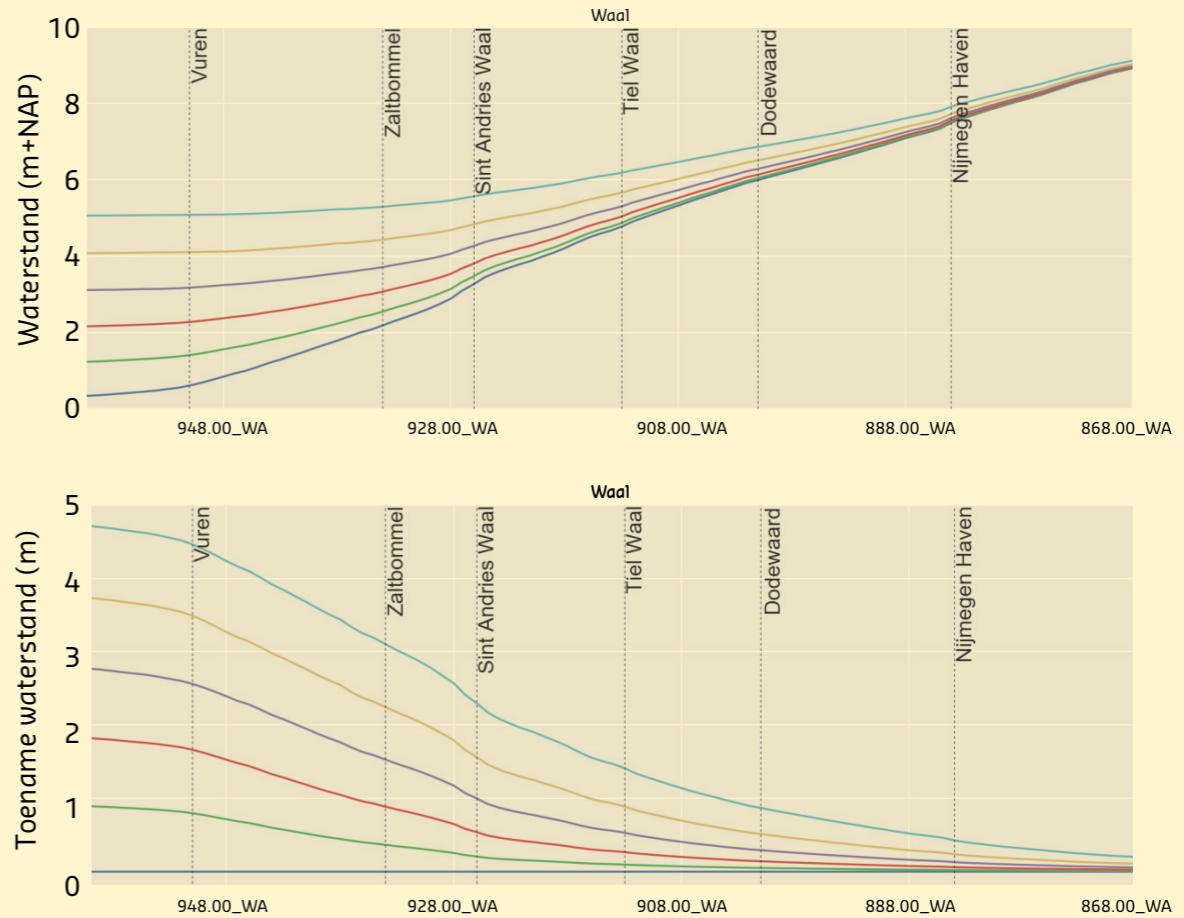
5.4 Invloed van zeespiegelstijging op rivierwaterstanden

5.4.1 Invloed zeespiegelstijging bij dagelijkse condities

Een hogere zeespiegel resulteert, bij open stormvloedkeringen, in een evenredige toename van de waterstanden in het zee-gedomineerde deel van het benedenrivierengebied. Maar ook verder bovenstroms kan een hogere zeewaterstand invloed hebben op waterstanden als gevolg van het 'backwater effect'⁴⁴. Figuur 5.5 illustreert dit effect door voor verschillende zeewaterstanden de berekende waterstand te tonen lang de Waal. In alle berekeningen is een gemiddelde rivieraafvoer aangenomen: 2.200 m³/s bij Lobith.

Uit de figuur blijkt dat het effect van een verhoogde zeewaterstand weliswaar afneemt in stroomopwaartse richting, maar vanwege het backwater-effect tot ver bovenstroms merkbaar is, *in extremis* zelfs tot aan de splitsingspunten. Op diverse trajecten zal de relatieve invloed van de zeewaterstand op bijvoorbeeld maatgevende waterstanden daarom toenemen als gevolg van de zeespiegelstijging. In de huidige situatie komt de zee-invloed op maatgevende waterstanden ongeveer tot Gorinchem.

⁴⁴ Het backwater-effect beschrijft de invloed van een 'obstructie' in de rivier op bovenstroomse waterstanden. In dit geval is de zee(waterstand) de obstructie.



Figuur 5.5 Waterstanden op de Waal bij een gemiddelde Rijnaafvoer (2200 m³/s) en zes verschillende zeewaterstanden bij Hoek van Holland (NAP +0 m tot +5 m). Onder: waterstandsverhoging in vergelijking met de situatie van een zeewaterstand van NAP +0 m.

5.4.2 Invloed zeespiegelstijging bij stormcondities en hoge afvoeren

Bij (extreme) stormcondities wordt de Maeslantkering gesloten en is Figuur 5.5 niet meer van toepassing. De invloed van de zeespiegelstijging werkt daarom niet één-op-één door op maatgevende waterstanden in het benedenrivierengebied. Dat neemt niet weg dat in het zee-gedomineerde deel van het benedenrivierengebied de maatgevende waterstanden voor een belangrijk deel worden bepaald door gebeurtenissen waarbij de stormvloedkering toch open is. Dit zijn gebeurtenissen waarbij de kering had moeten sluiten vanwege hoge zeewaterstanden, maar waarbij dat ten onrechte niet is gelukt. De kans dat de kering ten onrechte niet sluit bij een sluitvraag is geschat op 1%⁴⁵. De invloed van de zeespiegelstijging werkt daarom weliswaar niet één-op-één door, maar bij Rotterdam is de invloed van zeespiegelstijging nog altijd in de orde van 85%⁴⁶. Dit betekent dat een zeespiegelstijging van 1 m ongeveer 0,85 m toename in de maatgevende waterstanden tot gevolg heeft in het zee-gedomineerde deel van het benedenrivierengebied. Dit effect kan mogelijk (deels) gemitigeerd worden door een grotere betrouwbaarheid van sluiting te realiseren (ofwel: het verlagen van de kans dat de kering ten onrechte niet sluit).

In het bovenrivierengebied zijn condities met hoge rivieraafvoeren maatgevend. Voor deze condities is Figuur 5.5 evenmin van toepassing, omdat het *backwater-effect* veel minder groot is bij hoge afvoeren dan bij lage of gemiddelde afvoeren. Zolang de zeespiegelstijging beperkt blijft tot 1 à 2 m zal de invloed ervan op maatgevende waterstanden in het bovenrivierengebied daarom beperkt zijn. Het strekt wel tot aanbeveling om uit te zoeken tot hoe ver bovenstroms de zeespiegelstijging een (significante) invloed heeft op maatgevende waterstanden.

⁴⁵ Dit is de kans die binnen het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI) wordt gebruikt bij het berekenen van hydraulische belastingen. Deze kans is dus geïmplementeerd in Hydra-NL

⁴⁶ HKV en TU Delft, 2012: Afsluitbare waterkeringen in de Rijnmond; beantwoording van vragen Deltadeelprogramma Rijnmond-Drechtsteden. (Tabel 4.9)

5.4.3 Coïncidentie hoge zeewaterstanden en grote rivieraafvoeren

Coïncidentie heeft betrekking op het gelijktijdig voorkomen van gebeurtenissen. Op het gebied van coïncidentie is in de Rijn-Maasmonding (RMM) vooral het samenvallen van grote rivieraafvoeren van Rijn en Maas en hoge zeewaterstanden relevant, voor:

- Hoge waterstanden in het gebied, vooral in het 'overgangsgebied'; het gebied waar de hoogwaterstanden significant worden beïnvloed door zowel rivieraafvoeren als zeewaterstanden.
- De langst mogelijke sluitingsduur van de stormvloedkeringen. Als de keringen gesloten zijn kan het rivierwater tijdelijk niet afgevoerd worden. Bij relatief hoge rivieraafvoeren zal het bergingsvolume in het benedenrivierengebied eerder gevuld zijn en moeten de keringen ook eerder geopend worden.

Zeespiegelstijging heeft tot gevolg dat hoge zeewaterstanden vaker voorkomen. De kans op het gelijktijdig voorkomen van hoge afvoeren en hoge zeewaterstanden zal dan evenredig toenemen. In het zee-gedomineerde deel heeft dit, zoals vermeld in paragraaf 5.4.1, tot gevolg dat de maatgevende waterstanden substantieel hoger worden, met ongeveer 85% van de zeespiegelstijging. Hoe verder stroomopwaarts, hoe groter de relatieve invloed van de rivieraafvoer op de lokale waterstanden. Voor rivier-gedomineerde locaties is het effect van zeespiegelstijging daarom minder sterk dan voor zee-gedomineerde locaties. Bij zeespiegelstijging neemt de omvang van het zee-gedomineerde gebied echter toe.

Concluderend kan worden vastgesteld dat hoewel de kans op coïncidentie toeneemt, de effecten hiervan niet overal evenredig toenemen met de zeespiegelstijging.

5.4.4 Effectiviteit rivierverruimingsmaatregelen

Ruimte-voor-de-riviermaatregelen hebben als doel het verlagen van hoogwaterstanden als gevolg van grote rivieraafvoeren. In het zee-gedomineerde deel van het benedenrivierengebied is de invloed van de rivieraafvoer voor de hoogwaterstanden gering en daarmee is de toegevoegde waarde van rivierverruimingsmaatregelen op die locaties eveneens gering. Over het algemeen geldt: hoe verder stroomafwaarts, hoe groter de relatieve invloed van de zeewaterstand op de lokale hoogwaterstanden en dus hoe beperkter de effectiviteit van rivierverruiming.

Paragraaf 5.4.1 beschrijft dat één van de gevolgen van zeespiegelstijging is dat het zee-gedomineerde gebied in landwaartse richting verschuift. Op diverse riviertrajecten zal de relatieve invloed van de zeewaterstand daarom toenemen als gevolg van de zeespiegelstijging. Dat heeft tot gevolg dat op deze locaties het waterstandsverlagende effect van rivierverruiming zal afnemen.

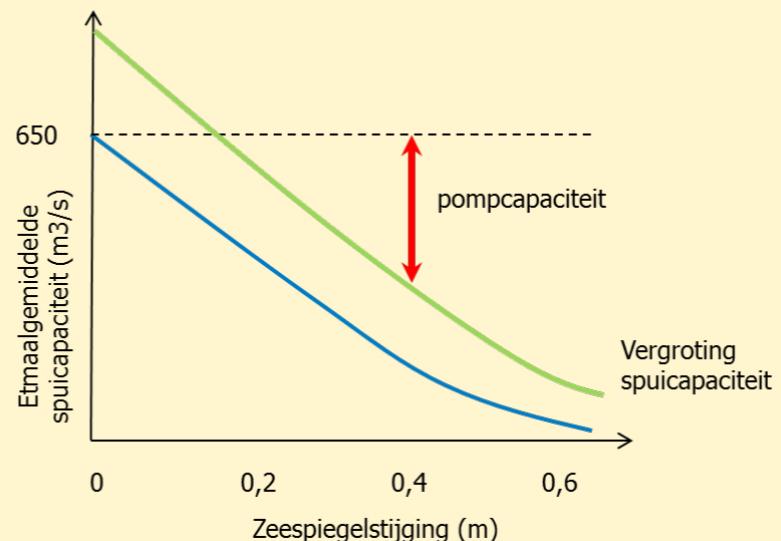
Het aantal ruimte-voor-de-rivierprojecten dat zich in het benedenrivierengebied bevindt is gering. Een zeespiegelstijging van 2 tot 3 m heeft alleen gevolgen voor ver stroomafwaarts gelegen projecten. Aangezien hier de maatgevende waterstand meer wordt bepaald door de zeewaterstand dan door de rivieraafvoer, heeft versnelde zeespiegelstijging naar verwachting slechts beperkte gevolgen voor de voorkeursstrategie op korte en lange termijn ten aanzien van rivierverruiming. Mogelijk heeft de zeespiegelstijging nog enige invloed op de effectiviteit van de maatregelen 'Noordwaar' en 'Overdiepse Polder'; dit zal uitgezocht moeten worden.

5.5 | IJsselmeer en Afsluitdijk

Bij een stijgende zeespiegel nemen de mogelijkheden om onder vrij verval te spuien bij de Afsluitdijk af. Daarom is al eerder gekozen voor het installeren van pompen om peilstijging op het IJsselmeer tot 2050 te voorkomen. Hierdoor komen in het jaar 2022 een pompcapaciteit van $240 \text{ m}^3/\text{s}$ en twee extra spuimiddelen beschikbaar. Bij een stijgende zeespiegel zullen de mogelijkheden onder vrij verval te spuien echter afnemen en zijn op termijn extra maatregelen nodig om het streefpeil te handhaven.

Figuur 5.6 toont een schematische weergave van de wisselwerking tussen beschikbare spuicapaciteit en benodigde pompcapaciteit en de invloed van zeespiegelstijging daarop⁴⁷. Een stijging van de zeespiegel heeft tot gevolg dat de (etmaalgemiddelde) spuicapaciteit afneemt. De afname kan gecompenseerd worden door vergroting van de pompcapaciteit en/of uitbreiding van de spuicapaciteit. De spuicapaciteit kan vergroot worden door extra spuiken te installeren, of door het IJsselmeer op een hoger peil te beheren. De laatste maatregel resulteert wel in hogere belastingen voor de waterkeringen rond het meer, met mogelijk een extra opgave voor

dijkversterking tot gevolg. De benodigde pompcapaciteit bij de Afsluitdijk is dus afhankelijk van meerdere factoren: de spuicapaciteit, het streefpeil van het IJsselmeer, de gestelde veiligheidsnorm en de keuze om maatgevende hoogwatergebeurtenissen wel/niet/ten dele te mitigeren door berging in het IJsselmeer.



Figuur 5.6 Schematische weergave van de wisselwerking tussen beschikbare spuicapaciteit en benodigde pompcapaciteit en de invloed van zeespiegelstijging daarop. Bron: intreerde Prof. Dr. Ir. Bas Jonkman.

Het uitgangspunt van de deltabeslissing IJsselmeergebied is dat het gemiddelde winterpeil (NAP-0,25 m) van het IJsselmeer en Markermeer in ieder geval tot 2050 gelijk blijft. Het meerpeil fluctueert sterk in de tijd. In perioden met hoge IJsselaafvoeren stijgt het meerpeil; in de perioden daarna wordt het meerpeil terug gebracht naar het streefpeil van NAP-0,40 m⁴⁸. Door zeespiegelstijging zal de spuicapaciteit geleidelijk afnemen. Uitgaande van een getij-amplitude bij Den Oever en Kornwerderzand⁴⁹ van circa 0,9 m en een gemiddeld peil van NAP-0,25 m, zijn er bij een zeespiegelstijging 0,65 m onder "gemiddelde" condities dus vrijwel geen spuimogelijkheden meer. Bij een dergelijke zeespiegelstijging kan alleen gespuid worden bij hoge meerpeilen en/of bij oostenwind (afwaaiing op de Waddenzee). Een zeespiegelstijging van 0,65 m kan dus als een knippunt beschouwd worden. Dit is rond 2085 voor de middenwaarde van de RCP4.5 projectie en rond 2070 volgens de middenwaarde van RCP8.5. Volgens de projecties kan dit op zijn vroegst rond 2060 gaan gebeuren. De spuiken bij het IJsselmeer zullen echter niet buiten gebruik raken bij een dergelijke zeespiegelstijging. Vooral bij (extreme) hoogwatergebeurtenissen kan spuiken een belangrijke bijdrage blijven leveren omdat dan het meerpeil hoger staat. Verder zal het eventueel verhogen van het streefpeil ertoe bijdragen dat de spuicapaciteit extra benut kan worden.

In de integrale studie waterveiligheid en peilbeheer IJsselmeergebied (ISWP)⁵⁰ is gekeken naar noodzakelijke versterkingen van keringen rond het IJsselmeer na 2050, rekening houdend met voortgaande zeespiegelstijging. In de ISWP-studie zijn verschillende opties voor pompen, spuiken en peilverhoging verder uitgewerkt. Hierbij is gekeken naar het ophogen van het streefpeil van het IJsselmeerpeil in de winter met 0,30 meter tussen 2050 en 2100, en vervolgens met nog eens 0,30 meter extra tussen 2100 en 2150. De analyses in de ISWP-studie zijn uitgevoerd voor de periode tot het jaar 2175, waarbij rekening is gehouden met een zeespiegelstijging van 1,15 m in 2125 en 1,75 m in 2175. Uit deze studie blijkt dat een pompcapaciteit nodig is van $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ indien [a] de spuicapaciteit en het winterpeil gelijk blijven aan de huidige situatie en [b] de eis gesteld wordt dat de meerpeilpiek met een herhalingsperiode van 100.000 jaar bij 1,75 m zeespiegelstijging gelijk moet blijven aan de piek met dezelfde herhalingsperiode in de referentiesituatie (0 m zeespiegelstijging). Echter, als "slechts" de meerpeilpiek met een herhalingsperiode van 1 jaar bij 1,75 m zeespiegelstijging gelijk moet blijven aan de piek met dezelfde herhalingsperiode in de referentiesituatie, is een pompcapaciteit van $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ voldoende.

⁴⁸ RWS, sept 2015, Zoetwatervoorraad IJsselmeergebied op peil. Een nieuw peilbesluit voor het IJsselmeergebied

⁴⁹ Vlag, 2009, Hydrologische Trends IJsselmeer, Dirk Vlag, Rijkswaterstaat Dienst IJsselmeergebied, afdeling Watersystemen, Datum 16 december 2009

⁵⁰ RWS, 2018, Technische en economische analyse van langetermijnstrategieën, voor peilbeheer in het IJsselmeergebied, Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied fase 3, At Remmelzwaal, A. Kors, I. Tanczos, J. Helmer & H. Berger.

⁴⁷ Bron: Intreerde Prof. Dr. Ir. Bas Jonkman

Uitbreiding van de pompcapaciteit kan worden uitgesteld of gereduceerd indien het streefpeil op het IJsselmeer wordt verhoogd, maar hier zijn dus extra kosten voor dijkversterking rond het meer mee gemoeid. Verhogen van het winterpeil met 0,6 m en het verdubbelen van de spuicapaciteit verminderen allebei de eerder genoemde benodigde pompcapaciteit van 3.200 m³/s, tot respectievelijk 2.500 m³/s en 3.100 m³/s, en in combinatie tot 2.200 m³/s. Dit geldt dus bij een prestatie-eis waarbij de meerpeilpiek met een herhalingstijd van 100.000 jaar bij 1,75 m zeespiegelstijging gelijk moet blijven aan de piek met dezelfde herhalingstijd in de referentiesituatie. Als deze eis wordt verlaagd tot het gelijk blijven van de meerpeilpiek met een herhalingstijd van 1 jaar, dan is 1.000 m³/s pompcapaciteit voldoende.

De maximaal benodigde pompcapaciteit voor het IJsselmeer bij 1,75 m zeespiegelstijging ligt dus ongeveer tussen de 1.000 en 3.200 m³/s, afhankelijk van keuzes die gemaakt worden over de spuicapaciteit, het streefpeil en de prestatie-eis. Verder leidt meer pompcapaciteit tot een kleinere versterkingsopgave van de waterkeringen langs de grote meren, maar voor de totale kosten lijkt dit volgens de ISWP-studie weinig uit te maken.

Een zeespiegelstijging van 1,75 m kan volgens de huidige studie mogelijk al worden bereikt rond het jaar 2100 volgens de middenwaarde van de hogere projectie voor versnelde zeespiegelstijging (RCP8.5) en de bovenwaarde van de lagere projectie (RCP4.5). Bij de middenwaarde van de lagere projectie is dit na 2100. Dit kan in deze projectie eind van deze eeuw leiden tot het vergroten van de pompcapaciteit en een eventuele opzet van het winterpeil, plus versterkingsopgave van de waterkeringen om het IJsselmeer.

5.6 | Gevolgen voor de voorkeursstrategie en vervolgopties

Een extra versnelde zeespiegelstijging heeft tot gevolg dat we steeds minder tijd krijgen om ons hieraan aan te passen. Dat brengt met zich mee dat adaptatie met een reeks van relatief kleine ingrepen lastig wordt. Maatregelen zullen dan immers steeds korter effectief zijn. In Figuur 5.1 is inzichtelijk gemaakt hoe een reeks aanpassingen van de kerende hoogte met telkens 0,5 m de levensduur van de kering zou kunnen verlengen. Wat de figuur vooral laat zien is dat iedere volgende verhoging van de kering een steeds kortere verlenging van de levensduur geeft. Dit illustreert dat er tot 2050 nog voldoende tijd is voor het aanpassen van kunstwerken, maar dat de situatie na 2060 vrij snel tot een veel grotere opgave zal leiden. Dit vraagt om grotere aanpassingen en/of maatregelen die relatief eenvoudig uit te breiden zijn.

Die verkorte functionele levensduur heeft grote gevolgen voor de planning en uitvoering van versterkingen van keringen. Versterking van keringen vraagt capaciteit, financiële middelen en (heel veel) tijd voor de uitvoering. Ter illustratie: de huidige uitvoeringssnelheid van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) van ongeveer 25 kilometer per jaar betekent dat de totale lengte van primaire keringen in Nederland (ca. 3150 km) in ongeveer 125 jaar één keer wordt versterkt. In de afgelopen 125 jaar is de zeespiegel ruim 0,2 m gestegen. In de komende 125 jaar zou, volgens de middenwaarden van de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging, de zeespiegel tot meer dan 2 m hoger kunnen worden. Voor de keringen langs de Hollandse en Zeeuwse kust (325 km), de Waddenzee (285 km) en de Westerschelde (165 km) wordt de snelheid waarmee we ons moeten aanpassen daarmee ongeveer 10 keer zo groot. In mindere mate geldt dit ook voor keringen langs de Oosterschelde (195 km), het merengebied (530 km) en het benedenrivierengebied (680 km), waar de belastingen door de zeewaterstand worden beïnvloed. Bij het tussentijds versterken van deze keringen zal (veel) meer marge ingebouwd moeten worden om rekening te houden met de mogelijke toekomstige omstandigheden. Verder kan de extra versnelde zeespiegelstijging aanleiding zijn om na te denken over alternatieve oplossingen.

De extra versnelling van de zeespiegelstijging kan ook gevolgen hebben voor de normering van de waterkeringen. De basis van de huidige normering berust op een combinatie van een economische optimalisatie en eisen aan veiligheid van individuen en groepen. In de betreffende analyses is rekening gehouden met veranderingen in de tijd van zowel de schade die optreedt bij overstroming van het beschermde gebied als met veranderingen in de kans op overstromingen als gevolg van klimaatverandering en zeespiegelstijging. Bij deze analyses was het uitgangspunt voor de huidige normering een maximaal te verwachten zeespiegelstijging van 1 m in 2100, ten opzichte van de stand in 1995. Hier was de (impliciete) aanname dat de stijgsnelheid maximaal circa 14 mm/jaar zou bedragen. Bij een extra versnelde zeespiegelstijging kan de stijgsnelheid toenemen tot 60mm/jaar of meer. Dit zal van invloed zijn op de uitkomst van de kosten-optimalisatie, en kan daarmee van invloed zijn op de normen zelf. Deze invloed zal echter pas na 2050 merkbaar zijn, en een aanpassing van de normen is al voorzien rond 2050 vanwege maatschappelijke en fysieke veranderingen.

Ook bij de beoordeling van primaire waterkeringen (WBI) zal ingespeeld moeten worden op de mogelijkheid van extra versnelde zeespiegelstijging. In de huidige beoordelingsprocedure (WBI) van de waterkeringen wordt gebruik gemaakt van twee normen: een signaleringswaarde en een ondergrens. De signaleringswaarde is de strengste van de twee en heeft tot doel de beheerder tijdig aan te zetten tot planning van een versterking. Een extra versnelde zeespiegelstijging verkort de periode tussen het niet meer voldoen aan de signaleringswaarde en het niet meer voldoen aan de ondergrens. Dit vraagt naar verwachting op de lange termijn (ruim na 2050, dus als de normen mogelijk alweer een keer zijn geactualiseerd) om een heroverweging van deze waarden, waarbij grotere onderling verschillen worden gehanteerd om de periode tussen signalering en het bereiken van de ondergrenswaarde te verlengen.

Kunstwerken en keringen worden zo ontworpen dat deze binnen de gehele verwachte levensduur voldoen aan de gestelde normen. Vooral voor keringen met een lange levensduur is het van belang dat in de randvoorwaarden rekening wordt gehouden met mogelijk veranderende condities tijdens de levensduur van de kering zoals zeespiegelstijging en verhoogde kansen op extreme afvoeren. Momenteel worden hiervoor het G en W+ scenario van KNMI'06 gehanteerd voor zowel zeespiegelstijging als afvoerstatistiek. Er zijn plannen om bij het ontwerpen ook rekening te houden met scenario-onzekerheid, vooral ten aanzien van zeespiegelstijging en hoge rivieraanvoeren. De voorgaande analyse laat zien dat dit zeker voor de zeespiegelstijging verstandig lijkt. Bij een versnelde zeespiegelstijging wordt de levensduur van kunstwerken korter, en dit vraagt om robuustere of uitbreidbare ontwerpen. Een extra uitdaging hierbij is dat de nieuwe projecties resulteren in grotere onzekerheidsbanden. Dit is van belang in het afwegingskader van robuuste ontwerpen tegen maatschappelijk verantwoorde kosten. Ontwerpen voor adaptatie zal daarmee in toenemende mate een aantrekkelijk alternatief zijn. Dit zou betekenen dat in het ontwerp al rekening gehouden wordt met mogelijke uitbreidingen, verhogingen en/of versterkingen van de waterkering indien gedurende de levensduur van de kering blijkt dat de effecten van klimaatverandering (veel) sneller gaan dan waar in het ontwerp rekening mee is gehouden.

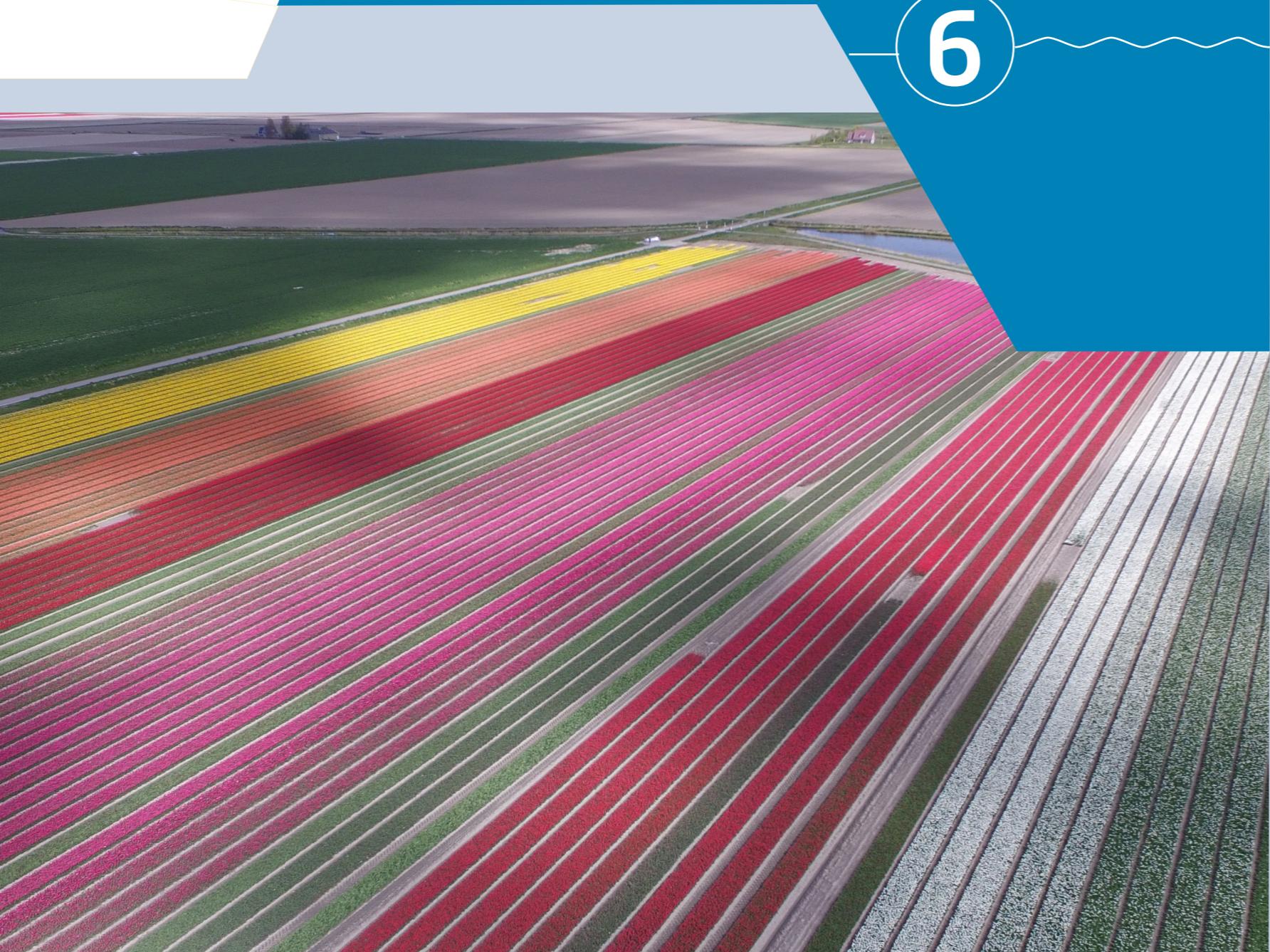
Voor de diverse stormvloedkeringen zal een knikpunt voor een eventuele systeemsprong zich op verschillende momenten openbaren. De huidige studie geeft inzicht in de mogelijke invloed van versnelde zeespiegelstijging op het vervroegd optreden van dergelijke knikpunten. Zo blijkt bijvoorbeeld dat voor alle stormvloedkeringen de overschrijdingsfrequentie van het stormvloedpeil telkens met een factor 10 toeneemt bij een zeespiegelstijging in het bereik van 0,5 tot 0,8 meter. Voor ieder scenario en elke projectie kunnen deze waarden vertaald worden in een tijdstip van optreden van een knikpunt. Het nader vaststellen van het tijdstip van optreden van relevante knikpunten vraagt echter om uitgebreider onderzoek, waarin gebruik gemaakt wordt van meer detailgegevens van de keringen dan voor de onderhavige studie beschikbaar waren, en waarbij ook rekening wordt gehouden met de gevolgen voor het achterliggende gebied wat betreft dijkversterkingen, buitendijkse gebruiksfuncties, natuurwaarden en zoutindringing.

Een eventueel extra versnelde zeespiegelstijging leidt tot hogere kosten voor hoogwaterbescherming. De kosten zijn sterk afhankelijk van de gekozen oplossing. Zo kan voor de Maeslantkering bij de beoogde vervanging rond 2070 worden gekozen voor wederom een open-afsluitbare zeezijde of voor een gesloten zeezijde. De kosten voor een open-afsluitbare zeezijde zullen, bij versnelde zeespiegelstijging, mogelijk hoger uitvallen dan voor een gesloten zeezijde. Dit komt vooral door grotere overstromingsrisico's buitendijs, hogere investeringskosten voor dijkversterking langs de benedenrivieren en schade door zoutindringing.



Zoetwatervoorziening

6



6.1 | Inleiding

Zeespiegelstijging en veranderingen in rivieraafvoer beïnvloeden de zoetwatervoorziening in westelijke en noordelijke provincies van Nederland. Ook de lokale neerslag en de verdamping als gevolg van klimaatverandering en veranderingen in landgebruik beïnvloeden de zoetwatervoorziening; zowel de beschikbaarheid van als de vraag naar zoetwater. Het belangrijkste effect van zeespiegelstijging en klimaatverandering is de verdeling tussen zoet en zout water in dit gebied. Zeewater stroomt door het deels open estuarium het land binnen, maar wordt door het zoete water van de rivieren tegengehouden. Bij hoge zeewaterstanden en lage rivieraafvoeren komt het zoute water verder landinwaarts. Bij lage zeewaterstanden en hoge rivieraafvoeren stroomt juist relatief veel zoetwater de Noordzee in. Door de afwisseling van hoge en lage zeewaterstanden en rivieraafvoeren varieert het zoutgehalte in het benedenrivierengebied sterk in de tijd. Dagelijks spelen de getijden een rol. De afwisseling van hoge en lage rivieraafvoeren speelt op de tijdschaal van seizoenen, maar bij hoogwaters ook soms op die van weken. Op de lange termijn zijn veranderingen relevant in de gemiddelde zeewaterstand en in de duur, frequentie en intensiteit van (zeer) lage rivieraafvoeren die naar verwachting als gevolg van klimaatverandering veranderen.

Naast het indringen van zout zeewater via het open water in het estuarium, leidt zeespiegelstijging tot een toename van de grondwaterdruk en daarmee tot een toename van (zoute) kwel. Ook dat leidt tot hogere zoutconcentraties in het polderwatersysteem van West- en Noord-Nederland. Om de gevolgen van deze (interne) verzilting te beheersen wordt het polderwatersysteem doorgespoeld, waar veel zoetwater voor nodig is. De verwachte toename in de verzilting heeft daarom invloed op de vraag naar zoetwater voor de doorspoeling.

Het (beneden)rivierengebied vormt een belangrijke bron van zoetwater door het inlaten van water vanuit het hoofdwatersysteem naar regionale wateren ten behoeve van peilbeheer, doorspoelen, beregening en voor de inname van koel-, proces- en drinkwater. Zoutconcentraties groter dan 150 tot 250 mg Cl/l zijn in veel gebieden een grens waarboven geen water meer ingelaten wordt vanwege zoutgevoelige functies.

Om de zoetwatervoorziening ook bij klimaatverandering op orde te houden bestaat de voorkeurstrategie uit maatregelen in het hoofdwatersysteem, de regionale watersystemen en bij watergebruikers. Deze studie richt zich op de maatregelen in het hoofdwatersysteem⁵¹ voor de zoetwatervoorziening van de noordelijke provincies, het benedenrivierengebied en het zuidelijke en westelijke deel van Rijnmond.

Voor de zoetwatervoorziening van de noordelijke provincies bestaat de strategie in het hoofdwatersysteem uit een stapsgewijze voorraadvergrooting in het IJsselmeer door aanpassingen van het streefpeil. Op de korte termijn levert dit een extra buffer op van 0,2 m waterschijf (~ 240 miljoen m³ of ~400 miljoen m³ als het Markermeer ook wordt meegerekend), die op de middellange termijn vergroot kan gaan worden tot 0,4-0,5 m waterschijf (~480-600 miljoen m³; ~800-1.000 miljoen m³ inclusief Markermeer). Op de lange termijn kan deze buffer nog verder worden vergroot of kan de aanvoer van water naar het IJsselmeer worden vergroot door verhoudingsgewijs meer Rijnwater via de IJssel te leiden.

⁵¹ Overige maatregelen vallen onder de vlag "slim waterbeheer" en bestaan o.a. uit de mogelijkheden van waterbesparende maatregelen in de regio, het uitvoeren van klimaatpilots, en het accepteren van tekorten of hogere zoutconcentraties onderzocht.

In het benedenrivierengebied ligt een groot aantal inlaatpunten voor water. Die inlaatpunten voorzien onder meer de hoogheemraadschappen van Rijnland, Delfland en Schieland. Deze inlaten worden gesloten als het buitenwater (tijdelijk) te zout is. In Midden-West Nederland wordt de zogenaamde Klimaatbestendige Water Aanvoer (KWA) gebruikt om gedurende die periodes toch voldoende zoetwater in te laten. De KWA wordt in de huidige situatie gevoed via het Amsterdam Rijnkanaal dat zó ver bovenstrooms ligt dat dit buiten het bereik van de zoutindringing ligt. De benedenstroomse inlaatpunten (zoals bij Gouda) zullen vaker en langer dicht moeten bij een stijgende zeespiegel. In de huidige Deltascenario's (vooral Warm en Stoom) zijn het vooral de lagere afvoeren, die in deze scenario's frequenter voorkomen, die aanleiding geven tot het vaker afsluiten van de inlaatpunten. Bij klimaatverandering kan ook de vraag van de regio naar zoetwater uit het hoofdwatersysteem toenemen door een toenemende verdamping en een afnemende neerslag. De maatregelen die voor het benedenrivierengebied worden overwogen in de voorkeurstrategie zijn:

- Het vergroten van de capaciteit van de KWA. Op de korte termijn gaat het om een uitbreiding van $7 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (KWA+). Om een capaciteit van meer dan $11 \text{ m}^3/\text{s}$ te kunnen realiseren zijn mogelijk aanvullende inlaten nodig.
- Voor de lange termijn is het een optie om de capaciteit van de KWA verder uit te breiden naar $24 \text{ m}^3/\text{s}$ (KWA++) of nog meer, en eventueel te komen tot een permanente aanvoer vanuit het oosten.

Het zuidelijke en westelijke deel van Rijnmond ontvangt zoetwater voor een belangrijk deel via het Bernisse-Brielse Meer systeem. Dit wordt gevoed door het inlaatpunt Bernisse. Om meer frequente en langdurigere sluiting van deze inlaatpunten het hoofd te bieden voorziet de voorkeurstrategie van het Deltaprogramma in:

- voor de korte termijn het weer in gebruik nemen van de oude inlaat van Spijkenisse en het vervolgens optimaliseren van het samenspel tussen de innamepunten van Bernisse en Spijkenisse;
- voor de langere termijn het vergroten van de voorraad via een verdubbeling van de buffercapaciteit van het Brielse Meer, eventueel in combinatie met extra aanvoer vanuit de oostelijker gelegen Biesbosch; en
- voor de zeer lange termijn een grootschalige alternatieve aanvoer.

Hoofdvragen van dit onderzoek voor de zoetwatervoorziening zijn:

- Wat is het effect van de versnelde zeespiegelstijging op de zoutconcentraties in het benedenrivierengebied en aldus voor de inlaten voor watervoorziening langs de Hollandse IJssel, Lek en het Bernisse-Brielse Meer systeem, en wat zijn de implicaties voor de voorkeursstrategie van zoetwater?
- Wat is het effect van zeespiegelstijging via een toename van zoute kwel en bijgevolg hogere zoutconcentraties in polders op de watervraag voor doorspoelen?
- Wat zijn de gevolgen van zeespiegelstijging op de zoetwatervoorraad in de duinen, op de kans op opbarsting van deklagen in diepe polders, op de grondwaterstanden langs de kust en op de zoutlast voor het IJsselmeer?

Om deze vragen te beantwoorden hebben we gebruik gemaakt van (bestaande) simulaties met numerieke modellen. Bij alle simulaties geldt de belangrijke randvoorwaarde dat we uitgaan van een open Rijnmond (d.w.z. open Nieuwe Waterweg, maar een tijdens laagwatersituaties gesloten Haringvliet).

6.2 | Verzilting via de rivieren en het gebruik van inlaatpunten

De mate van verzilting via de rivieren hangt af van zowel de zeewaterstanden, en dus het dagelijkse getij en de lange-termijn zeespiegelstijging, alsmede de rivieraafvoeren, welke vooral seizoensafhankelijk zijn. Een lagere rivieraafvoer betekent minder tegendruk van het zoete rivierwater en heeft dus tot gevolg dat zout water verder stroomopwaarts kan indringen. Deze (externe) verzilting treedt vooral op in zomer en najaar als de rivieraafvoeren laag zijn. In de zomerperiode is de watervraag aan het hoofdwatersysteem het grootst. Een stijging van de zeespiegel betekent een grotere zoutindringing. Daarnaast heeft klimaatverandering tot gevolg dat de verdamping toeneemt en daarmee de vraag naar zoetwater uit de regio aan het hoofdwatersysteem. In de Deltascenario's Warm en Stoom neemt ook de rivieraafvoer af in de zomerperiode.

Aanpak

Voor het kwantificeren van de effecten van zeespiegelstijging is gebruik gemaakt van het volgende:

1. bestaande simulaties met een 1D stromingsmodel voor lage zeespiegelstijgingen in combinatie met verschillende afvoeren.
2. een 3 dimensionaal (3D) stromingsmodel voor hoge zeespiegelstijgingen.

Ad1) Een zeespiegelstijging van $0,4 \text{ m}$ en $0,85 \text{ m}$ is doorgerekend in combinatie met een 100-jarige reeks van rivieraafvoeren. Dit is gedaan met het Nationale Water Model (NWM). In dit model wordt de waterbeweging door een 1D stromingsmodel (Sobek-NDB) gesimuleerd.

Ad2) Een 3D model is beter geschikt voor grote zeespiegelstijging omdat de zoutconcentraties vanwege dichtheidsverschillen in de diepte variëren (zie Bijlage B) en de mate van zoutindringing hierdoor beïnvloed wordt. Berekeningen van 3D stromingsmodellen zijn echter rekenintensief. Daarom is een beperkt aantal simulaties uitgevoerd voor $0,2$, 2 en 4 m zeespiegelstijging. Hierbij zijn steeds 31 dagen doorgerekend waarin de rivieraafvoer bij Lobith afnam van ongeveer $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ tot $2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie bijlage B). Deze afvoer is meer dan wat er gemiddeld wordt afgevoerd gedurende het zomerhalfjaar. De gemiddelde afvoer van de Rijn in het zomerhalfjaar (April-September) kan door klimaatverandering afnemen van $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ in de huidige situatie naar $1850 \text{ m}^3/\text{s}$ in 2050 en $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ in 2085⁵².

Voor de beoordeling van de effecten zijn drie locaties gekozen:

- Monding Hollandsche IJssel. Deze locatie is een indicator voor de verzilting van de Hollandse IJssel. Langs deze riviertak liggen belangrijke innamepunten voor zoetwater.
- Monding Lek. Deze locatie is een indicator voor de verzilting van de Lek. Langs de Lek ligt een aantal belangrijke innamepunten voor zoetwater, waaronder voor drinkwaterinname.
- Bernisse en Spijkenisse. Het Brielse Meer wordt gebruikt voor zoetwatervoorziening voor diverse waterschappen en de industrie in de Rijnmond. Het Brielse Meer wordt gevuld via de Bernisse-inlaat aan het Spui. Spijkenisse wordt meegenomen in de analyses, omdat wordt overwogen om de Spijkenisse-inlaat (Oude Maas) in te gaan zetten als neveninlaat voor als het water bij Bernisse tijdelijk te zout is.

Monding Hollandsche IJssel

In de huidige situatie kan de monding van de Hollandsche IJssel verzilt raken bij een lage rivieraafvoer en windopzet op zee. Bij windopzet gaat het vaak om kortdurende verzilting en bij lage rivieraafvoer om langdurige verzilting. Indien de monding verzilt raakt is het verstandig om geen water aan de Hollandsche IJssel te onttrekken, omdat hiermee relatief zout water de rivier opgetrokken wordt. Bij langdurige verzilting is inzet van de KWA nodig. Deze inzet is nodig bij minimaal 7 dagen aaneengesloten zoutconcentraties van meer dan 200 mg/l (zie Figuur 6.1). Dit komt onder de huidige klimaatomstandigheden naar verwachting ongeveer eens in de 10 à 20 jaar voor.

Bij een zeespiegelstijging van $0,4 \text{ m}$ zal de inzet van de KWA naar schatting ongeveer eens in de 5 jaar nodig zijn als ook rekening wordt gehouden met lagere rivieraafvoeren volgens het Deltascenario Warm in 2050. Hierbij is uitgegaan van een overschrijding van 200 mg Cl/l van minimaal 20 dagen, waarvan minimaal 7 dagen aaneengesloten, gedurende het zomerhalfjaar. Een langdurige inzet van mogelijk maanden in plaats van enkele weken zal eens in de 10 à 20 jaar voorkomen.

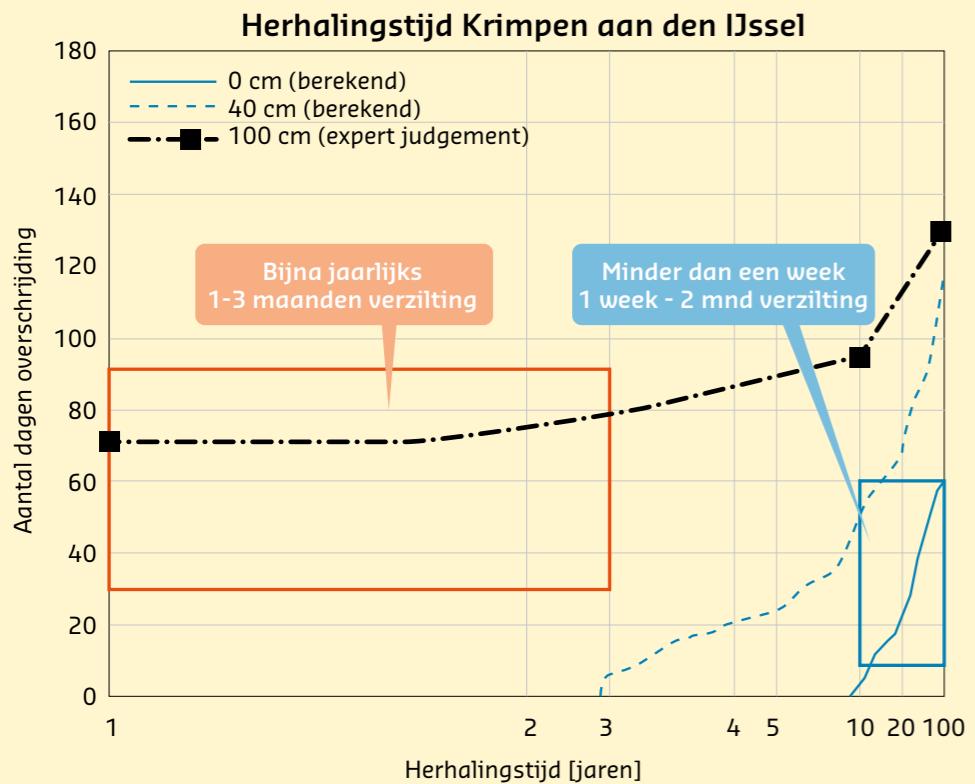
Bij een zeespiegelstijging van 1 m zal de monding van de Hollandsche IJssel naar schatting bijna jaarlijks gedurende 1 tot 3 maanden te hoge zoutconcentraties kennen. De KWA moet dan zo vaak en zo lang worden ingezet, dat het geen noodmaatregel meer is, maar een structurele maatregel. Figuur 6.1 geeft voor verschillende waarden van de zeespiegelstijging (zie legenda) weer hoe vaak perioden met voortdurende ($> 7 \text{ dagen}$) verzilting ($> 200 \text{ mg/l}$) voorkomen gedurende het zomerhalfjaar. Deze grafieken zijn gebaseerd op een combinatie van simulaties uit het Deltaprogramma en expert judgement. In de simulaties is uitgegaan van een zeespiegelstijging van $0,85 \text{ m}$, maar lagere afvoeren van de Rijn die horen bij de vorige generatie klimaatscenario's. Ook de simulaties met het 3D-model wijzen in deze richting. Er is volgens deze 3D simulaties bij een gemiddelde afvoer van ongeveer $2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ namelijk sprake van een lineaire toename van de zoutindringing in relatie tot de zeespiegelstijging.

⁵² Klijn, F. M. Hegnauer, J. Beersma & F. Sperna Weiland (2015). Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivieraafvoeren van Rijn en Maas? Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivieraafvoeren. Deltares-rapport 1220042, Delft. DOI: 10.13140/RG.2.1.4399.5601

Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging

voor het Deltaprogramma

(Figuur 6.2). Bij 1 m hogere zeespiegel zou de inlaat van de Hollandsche IJssel dan nog net wel of net niet bruikbaar zijn bij gemiddelde afvoeren en waarschijnlijk niet meer bruikbaar bij lagere afvoeren.

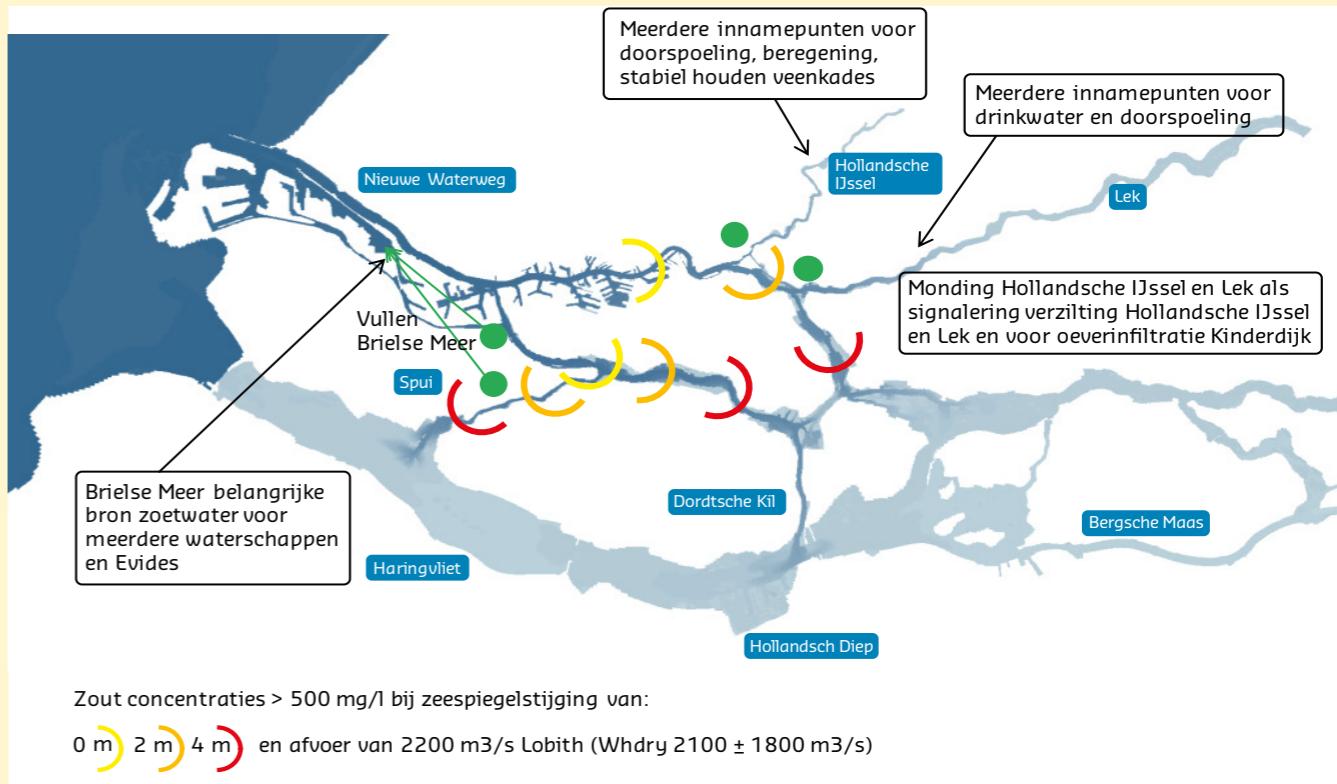


Figuur 6.1 Herhalingstijd van het voorkomen van perioden met langdurige (> 7 dagen) verzilting ($> 200 \text{ mg/l}$) gedurende het zomerhalfjaar voor verschillende waarden van de zeespiegelstijging (zie legenda). Deze grafieken zijn gebaseerd op een combinatie van simulaties uit het Deltaprogramma en expert judgement.

Een 2 m hogere zeespiegel leidt, volgens de 3D berekeningen, tijdens vloed en bij gemiddelde afvoeren tot hoge zoutconcentraties ($> 500 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$) bij de monding van de Hollandsche IJssel (Figuur 6.2). In dergelijke situaties is het stopzetten van onttrekkingen uit de Hollandsche IJssel nodig om het water op de Hollandsche IJssel voldoende zoet te houden. Bij lagere rivieraafvoeren, die bij klimaatverandering volgens het Deltascenario Warm en Stoom vaker optreden, is de monding naar schatting gedurende de gehele getijdecyclus verzilt. Bij 2 m zeespiegelstijging kan dus bij gemiddelde afvoeren niet ingelaten worden.

De resultaten hebben de volgende betekenis voor de inzet van de KWA, uitgaande van een open Nieuwe Waterweg:

- Rond 0,4 m zeespiegelstijging in combinatie met het frequenter voorkomen van lagere rivieraafvoeren, zal eens in de ongeveer 5 jaar langdurige verzilting optreden. Hiervoor is inzet van de KWA nodig om aan de watervraag vanuit de regio te voldoen. Dit is gebaseerd op resultaten van eerder onderzoek ten behoeve van het Deltaprogramma.
- Voorliggend onderzoek laat zien dat bij 1 m zeespiegelstijging de KWA dusdanig vaak en lang moeten worden ingezet, dat deze niet langer als een noodmaatregel kan worden beschouwd.
- Vanaf 2 m zeespiegelstijging voldoet de KWA helemaal niet meer en is een permanent alternatief nodig voor de zoetwatervoorziening van West-Nederland.



Figuur 6.2 Zoutindringing tijdens vloed voor verschillende zeewaterstanden bij een afvoer van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Monding Lek

In de huidige situatie is de monding van de Lek zelden langdurig verzilt. Bij een zeespiegelstijging van 0,4 m is de monding van de Lek ongeveer elke 5 à 10 jaar verzilt bij lagere afvoeren (zie bijlage B). Doorspoeling van de Lek is onder deze condities noodzakelijk om te voorkomen dat het zout de Lek optrekt.

Bij 2 m zeespiegelstijging blijft volgens de simulaties met het 3D model de monding van de Lek nog zoet, bij gemiddelde rivieraafvoeren (circa $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ in Figuur 6.2). Wel is de verwachting dat bij lagere rivieraafvoeren dan waarmee gesimuleerd is, de monding regelmatig zal verzilten.

Tussen de 2 en 4 m zal steeds vaker verzilting optreden. Meer water zal nodig zijn om het zoute water terug te dringen. Hoeveel water hiervoor beschikbaar is, hangt af van de afvoerverdeling over de Rijntakken en van hoeveel water er uit de Lek wordt ontrokken. Of dit water ook beschikbaar is, is nu nog ongewis.

Bij een zeespiegelstijging van 4 m treedt er bij een afvoer van $2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ al bijna dagelijks verzilting op bij hoogwater ($> 500 \text{ mg/l}$) (Figuur 6.2). Bij lagere afvoeren is de monding van de Lek waarschijnlijk gedurende de gehele getijcyclus verzilt.

Bernisse en Spijkenisse

Bernisse is onder normale condities zoet. Kortdurende verzilting kan optreden ten gevolge van windopzet, waarbij zout via de Nieuwe Waterweg, Oude Maas en het Spui naar het Haringvliet komt (achterwaartse verzilting). Langdurige verzilting ($>$ paar dagen) treedt alleen op als gevolg van nalevering door achterwaartse verzilting⁵³. Het gaat hierbij meestal om een beperkte (<30%) verhoging ten opzichte van de norm van $150 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$. Spijkenisse is onder normale condities afwisselend zoet/zout ten gevolge van getijdestromingen. Inname kan dan onder vrij verval tijdens periodes waarbij de chlorideconcentratie lager is dan $150 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$ (zogenoemd inlaatvenster). Bij een zeespiegelstijging van 0,4 m is de verwachting dat achterwaartse verzilting van het Spui ter hoogte van inlaat Bernisse vaker zal voorkomen en ook groter zal zijn. Achterwaartse verzilting kan op dit moment echter nog niet goed gesimuleerd

⁵³ Door windopzet kan zout via de Nieuwe Waterweg, Oude Maas en Spui doordringen tot in het Haringvliet, dit wordt achterwaartse verzilting genoemd. Indien de Haringvlietsluizen (nagenoeg) dicht staan, blijft zout op het Haringvliet en wordt het via het Spui, de Oude Maas en Nieuwe Waterweg weer teruggeleverd aan zee. Dit kan voor langdurig verhoogde chlorideconcentraties zorgen bij Bernisse.

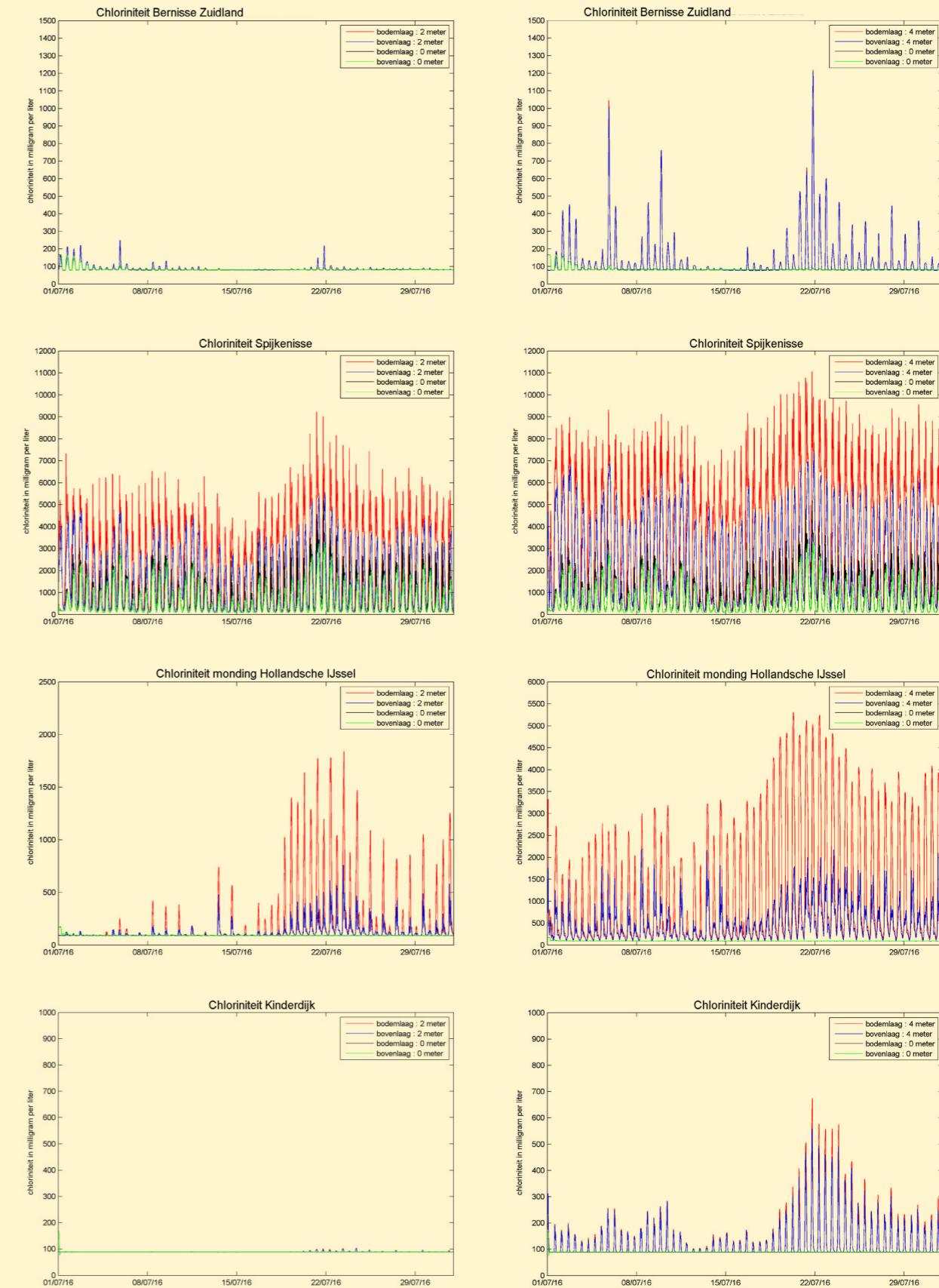


worden met de modellen. Dit zal nader onderzocht moeten worden om de gevolgen bij minder vergaande zeespiegelstijging beter te kunnen schatten. Omdat Spijkenisse dichter bij zee ligt dan Bernisse is deze locatie gevoeliger voor zeespiegelstijging en is het ook bij minder zeespiegelstijging (< 0.4 m) onduidelijk of Spijkenisse een voldoende alternatief is in geval Bernisse langdurig verzilt. Mogelijk is de volgende stap uit het adaptatiepad - het vergroten van de buffer op en kleinschalige aanvoer vanuit de Biesbosch - dan al nodig.

Bij een zeespiegelstijging van 2 m bereiken tijdens vloed en rivieraafvoeren van 2200 m³/s zoutconcentraties van meer dan 500 mg Cl/l het Spui. Water met deze concentraties bereikt Bernisse niet (zie Figuur 6.3). Bij Bernisse treden alleen incidentele zoutpieken (>150 mg Cl/l) op. Bij lage rivieraafvoeren en/of windopzet zullen deze zoutpieken vaker optreden en bestaat de kans op langdurige nalevering. Tijdens deze perioden is een alternatieve aanvoer voor het Brielse Meer gewenst, maar lijkt Spijkenisse geen bruikbaar alternatief meer, omdat onder gemiddelde afvoercondities bij Spijkenisse het inlaatvenster al beperkt is.

Een zeespiegelstijging van 4 m leidt in de 3D simulaties bij gemiddelde rivieraafvoeren tot nagenoeg dagelijkse zoutpieken bij Bernisse (Figuur 6.3). Of er onder deze omstandigheden voldoende inlaatvenster⁵⁴ over is om het Brielse Meer via Bernisse van zoetwater te voorzien is niet bekend. Bij windopzet of lage rivieraafvoeren worden echter langdurige inlaatbeperkingen verwacht; Spijkenisse is dan geen bruikbaar alternatief inlaatpunt meer voor Bernisse.

⁵⁴ Moment gedurende het getij waarbij het water zoet is (<150 mg Cl/l) en het waterstandverhang voldoende is om zoetwater in te kunnen nemen voor het Brielse Meer.



Figuur 6.3 Zoutconcentraties voor Bernisse (boven), Spijkenisse, Monding Hollandse IJssel, en Kinderdijk (onder) bij 0, 2, en 4 m zeespiegelstijging. De locaties van de tijdsreeksen zijn weergegeven in bijlage B.

6.3 | Verzilting via het grondwater en de watervraag

Een hogere zeewaterstand leidt in de laaggelegen kustgebieden tot een toename van de kwel (grondwaterstroom naar de oppervlakte). In geval van een zoute ondergrond leidt dit ook tot een toename van zout in het ondiepe grondwater en in het oppervlaktewater. Bij een stijgende zeespiegel neemt de kwel en zoutbelasting direct toe. Bovendien stroomt relatieve zout grondwater van grotere diepten naar de oppervlakte, waardoor de zoutbelasting extra toeneemt. Dit is een veel langzamer proces dat speelt op een tijdschaal van decennia. Laaggelegen polders in West- en Noord-Nederland worden 'doorgespoeld' met zoet water om negatieve consequenties van te hoge zoutconcentraties voor de landbouw tegen te gaan. Dit is een belangrijk deel van de totale watervraag van het landelijk gebied aan het hoofdwatersysteem.

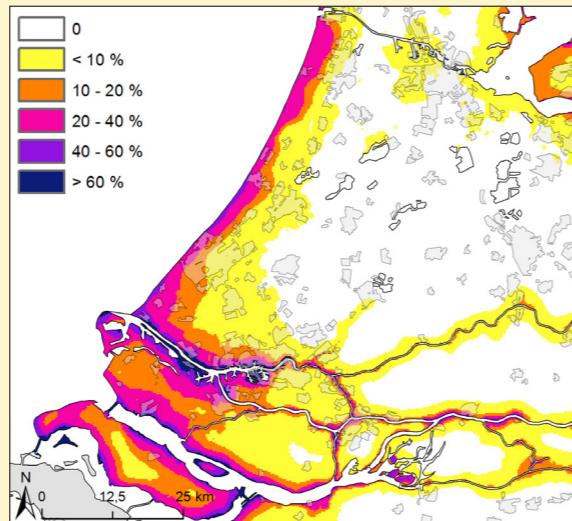
Ook zonder zeespiegelstijging is er sprake van verzilting via het grondwater als gevolg van natuurlijke processen en menselijke activiteiten, die al vele eeuwen gaande zijn. Inpoldering, bodemdaling en grondwateronttrekkingen zorgen er voor dat zout grondwater uit de diepe ondergrond met de tijd langzaam naar de ondiepe ondergrond stroomt en uiteindelijk het grond- en oppervlaktewater bereikt. Dit zijn ontwikkelingen die los staan van de zeespiegelstijging.

Om effecten van extra versnelde zeespiegelstijging op zoutindringing en de watervraag te kunnen beoordelen zijn verkennende berekeningen gedaan met het grondwater- en zouttransportmodel van Zuid-Holland en een waterbalans- en waterverdelingsmodel voor Rijnland, omdat er geen landelijk model beschikbaar is voor dergelijke analyses (zie Bijlage B). Een 'vertaling' naar andere gebieden is gemaakt op basis van de geologische eigenschappen van de ondergrond en watersysteemkenmerken. Vanwege het verkennende karakter van de studie en de lange rekentijd van de modellen zijn slechts twee situaties doorgerekend:

1. Een referentie zonder zeespiegelstijging om inzicht te krijgen in de autonome ontwikkeling van zoutindringing via de ondergrond;
2. Een situatie met een extra versnelde zeespiegelstijging volgens de bovenwaarde van de projectie volgens RCP8.5 om inzicht te krijgen in de maximaal mogelijke zoutindringing. De neerslag en verdamping zijn gebaseerd op het jaar 2003, en zijn niet aangepast. Omdat de stroming van zout grondwater langzaam verloopt, is ver vooruit gekeken, namelijk naar de jaren 2050, 2100, 2150 en 2200.

6.3.1 Kwel en zoutbelasting in Zuid-Holland

De invloed van zeespiegelstijging op de kwel is vooral te vinden in de zone tot 10 à 15 kilometer van de kust. Figuur 6.4 geeft weer welk percentage van een verhoging van de zeewaterstand op de Noordzee terug te vinden is in de stijghoede van het grondwater. Dat is een indicator voor de mogelijke kwelflux. Te zien is dat stedelijk gebied in de duinrand te maken krijgt met een flink hogere stijghoede⁵⁵. In het zuidelijke deel van Zuid-Holland is de invloed van een zeespiegelstijging groter, omdat open water, waarvan de waterstand onder directe invloed is van de zee, hier altijd dichtbij is. De meeste diepe polders die momenteel voor een flinke zoutvracht zorgen in Zuid-Holland bevinden zich juist buiten de invloedsfeer van de zeespiegelstijging. Het betreft hier polders zoals de Haarlemmermeer, Groot-Mijdrecht, de Noordplaspolder, en de Middelburg-Tempelpolder.

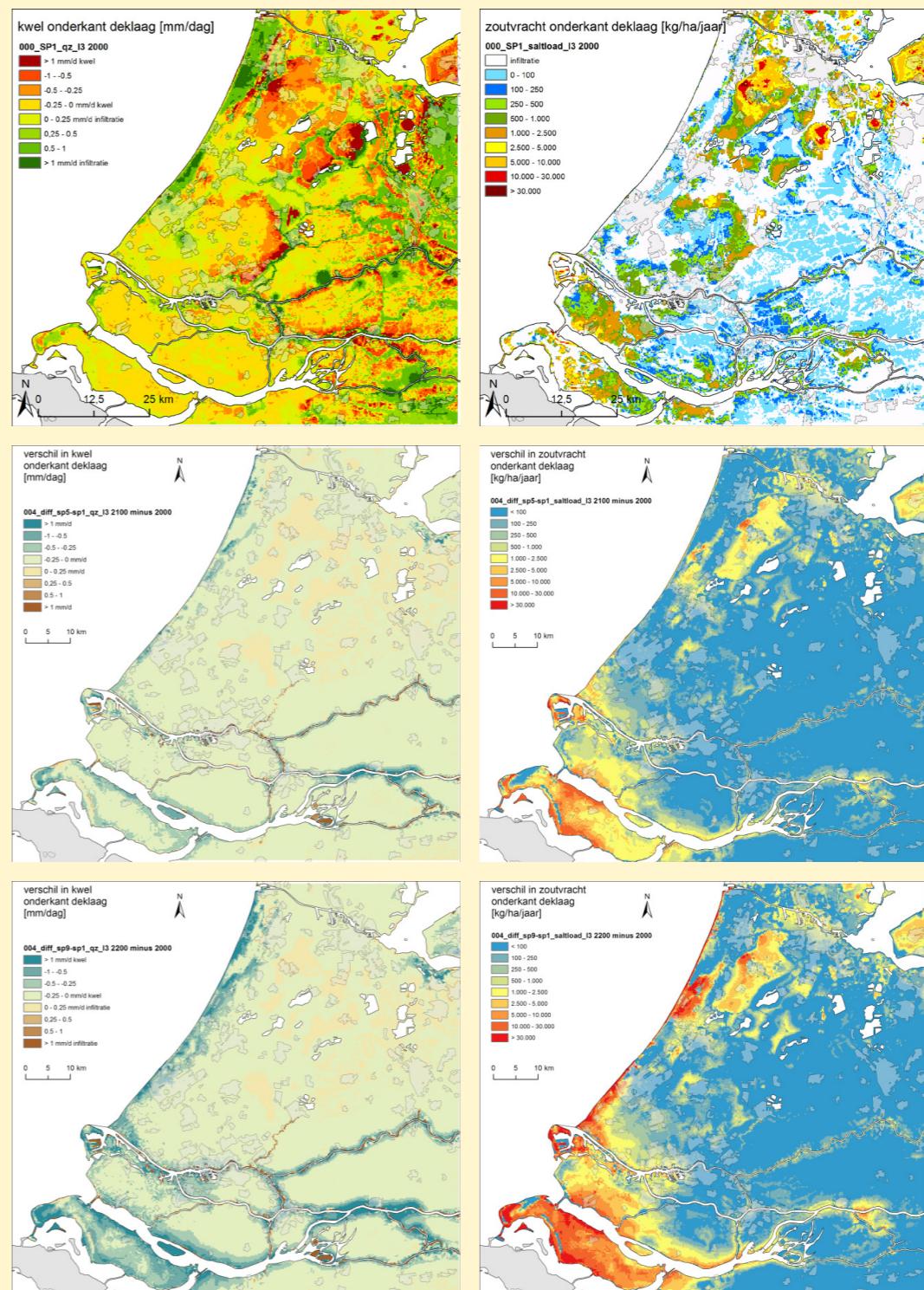


Figuur 6.4 Invloedsfeer van een zeespiegelstijging (als % van de stijging van het zeewaterpeil op de Noordzee).

De simulaties geven de kwelflux aan de onderkant van de deklaag. Dit is een indicator voor de kwel aan het oppervlak. De verandering van de kwel en de zoutvracht bij een extra versnelde zeespiegelstijging zijn te zien in Figuur 6.5. Dit geeft een indicatie van de verzilting van het grond- en oppervlaktewater. Verschillen in polderpeilen en ondergrondparameters veroorzaken een grillig patroon. Buiten de invloedsfeer neemt de kwel bij een zeespiegelstijging niet toe, maar in de kustzone wel. In het zuidelijke deel van de provincie, en dan met name de kuststrook, slaat infiltratie om naar (flinke)

⁵⁵ De stijghoede is de hoogte ten opzichte van een referentievak, 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.

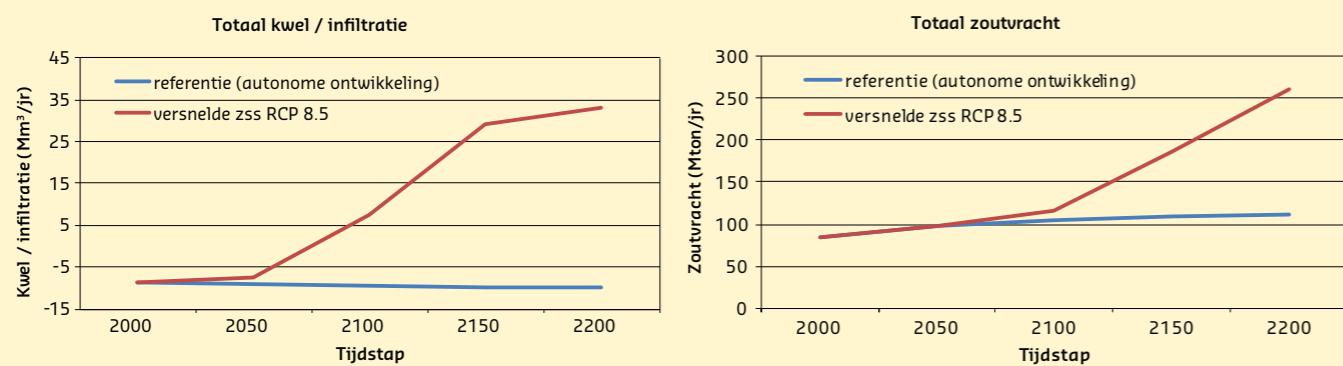
kwel. Dit gebeurt ook in de bollenstreek; hier is op sommige locaties sprake van een omslag van 'zoete' infiltratie naar zoute kwel. Met een toename van de kwel neemt ook de zoutvracht toe; bij de RCP8.5 projectie met een factor 1,5 in 2050, een factor 5 in 2100, tot een factor 15 in 2200 ten opzichte van de huidige situatie. Autonome verzilting speelt een belangrijke rol in de diepe polders, over de hele provincie is de bijdrage van autonome verzilting echter te verwaarlozen. In het zuidelijke deel van de provincie neemt de zoutvracht flink toe bij extra versnelde zeespiegelstijging, en ook aan de duinrand is een toename te zien. In de diepe polders, die buiten de invloedsfeer van zeespiegelstijging liggen, neemt de zoutvracht toe door het autonome verziltingsproces (verzilting neemt met de tijd toe en is hier niet gerelateerd aan zeespiegelstijging).



Figuur 6.5 Kwel onderkant deklaag op -12.5 m NAP in de huidige situatie (linksboven), en zoutvracht (in kg/ha/jaar) onderkant deklaag op -12.5 m NAP (rechtsboven). Midden verandering kwel (links) en zoutvracht (rechts) bij extra versnelde zeespiegelstijging volgens bovenwaarde van RCP8.5 in 2100 ten opzichte van huidig. Onder verandering kwel (links) en zoutvracht (rechts) bij extra versnelde zeespiegelstijging in 2200 ten opzichte van huidig.

De totale infiltratie-kwelbalans in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Rijnland verandert van netto circa 8.5 Mm³ per jaar infiltratie naar circa 7.5 Mm³ kwel in het jaar 2100, en naar 33 Mm³ kwel in 2200 bij een extra versnelde zeespiegelstijging volgens de bovenwaarde van de projectie voor RCP8.5. Omdat de kwelbalans alleen reageert op de extra druk door de hogere zeespiegel, mogen andere ontwikkelingen worden verwaarloosd.

Tot 2100 neemt de zoutvracht toe door processen die nu al optreden als gevolg van andere ontwikkelingen; van circa 85 naar 105 Mton/jaar. Er is een beperkte extra toename door versnelde zeespiegelstijging, namelijk met circa 10 Mton/jaar. Dit komt door het trage proces van zoutindringing via de diepe ondergrond en de dominantie van de andere ontwikkelingen in het gebied van Rijnland (zie discussie eind 6.3.2). Na 2100 neemt de zoutvracht bij zeespiegelstijging beduidend meer toe dan wanneer alleen de autonome ontwikkelingen worden meegenomen, en wordt zeespiegelstijging steeds meer het dominante proces. De toename bedraagt dan circa 180 Mton/jaar in 2150 en meer dan 250 Mton/jaar in 2200.



Figuur 6.6 Ontwikkeling kwel/infiltratie en zoutvracht in het beheersgebied van Hoogheemraadschap van Rijnland bij autonome ontwikkeling zonder zeespiegelstijging (referentie) en bij extra versnelde zeespiegelstijging volgens de bovenwaarde van de projectie RCP8.5.

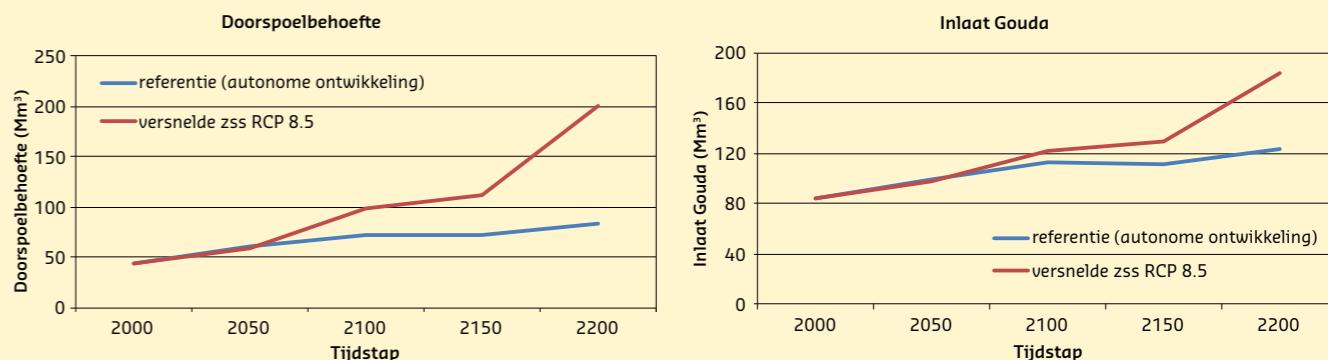
6.3.2 Watervraag voor doorspoelen in Hoogheemraadschap Rijnland

Als door zeespiegelstijging de hoeveelheid kwel en de zoutvracht toeneemt, heeft dit gevolgen voor de watervraag voor het doorspoelen van de polders. De verkennende berekeningen laten zien dat de doorspoelbehoefte zich proportioneel ontwikkelt aan de zoutvracht. In de referentiesituatie verdubbelt de doorspoelbehoefte van circa 40 Mm³ tot 70 Mm³ per zomerhalfjaar in 2100 en tot 80 Mm³ per zomerhalfjaar in 2200 als gevolg van autonome ontwikkelingen. Bij een extra versnelde zeespiegelstijging volgens de bovenwaarde van de projectie RCP8.5 neemt de doorspoelbehoefte toe tot 90 Mm³ per zomerhalfjaar in 2100 en tot 200 Mm³ per zomerhalfjaar in 2200. In 2100 is de doorspoelbehoefte bij de bovenwaarde van de projectie RCP8.5 dus ongeveer verdubbeld en in 2200 verviervoudigd ten opzichte van de huidige situatie. Dit is het gevolg van een combinatie van autonome ontwikkelingen en de zeespiegelstijging. In dit gebied tot 2100 in een verhouding 6:4 (zie ook eind van deze paragraaf).

De grotere doorspoelbehoefte leidt tot een grotere watervraag aan het hoofdwatersysteem. Die is minder dan de totale vraag, omdat deze in Rijnland deels voldaan kan worden met water uit andere polders, onder andere doordat ook de zoete kwel toeneemt als gevolg van een grotere grondwaterdruk door een groter verschil tussen de zeewaterstand en de waterstanden in het binnenland. De totale watervraag aan het hoofdwatersysteem, inclusief de watervraag voor peilbeheer, neemt toe van circa 85 Mm³ in een huidig droog jaar, tot circa 120 Mm³ in 2100 en tot circa 185 Mm³ (continu ongeveer 12 m³/s) in 2200 bij de bovenwaarde van de RCP8.5 projectie, terwijl deze door autonome ontwikkelingen slechts toeneemt tot 110 Mm³ in 2100 en 125 Mm³ in 2200. Door zeespiegelstijging neemt de totale watervraag dus met ongeveer 10 Mm³ toe in 2100 en met 100 Mm³ in 2200.

De capaciteit van de inlaat bij Gouda lijkt in eerste instantie niet beperkend voor deze grotere gemiddelde inlaatbehoefte. Deze is 285 Mm³ bij dagelijks inlaten gedurende het zomerhalfjaar, wat overeenkomt met circa 18 m³/s. Deze getallen zijn echter gebaseerd op een gemiddelde watervraag, en niet op een piekwatervraag. Verder zijn in de berekening geen andere effecten van klimaatverandering meegenomen, zoals een verandering van neerslag en verdamping die in de Deltascenario's Warm en Stoom ook tot een toename van de watervraag leiden. Ook de

socio-economische ontwikkelingen zijn niet meegenomen die tot grotere watervraag kunnen leiden. Bovendien is de berekende watervraag aan het hoofdwatersysteem meer dan verdubbeld, terwijl die in de huidige situatie al af en toe beperkt is en inzet van de KWA nodig is. Een nadere analyse van de benodigde (piek)capaciteit is nodig om betere uitspraken te doen over zowel de autonome ontwikkeling als de situatie met klimaatverandering en (versnelde)



zeespiegelstijging.

Figuur 6.7 Ontwikkeling doorspoeling en inlaatbehoefte tussen huidig en 2200 bij autonome ontwikkeling (referentie) en bij extra versnelde zeespiegelstijging (bovenwaarde RCP8.5).

Het Hoogheemraadschap van Rijnland kent een aantal specifieke kenmerken waardoor de effecten van versnelde zeespiegelstijging op de toename van zoutvracht, doorspoelbehoefte en watervraag aan het hoofdwatersysteem beperkt blijven. De grootste bron van verzilting zijn diepe polders met zoute kwel, vooral veroorzaakt door zoute wellen (De Louw et al., 2013, 2011, 2010; Delsman et al., 2013). Deze polders liggen op ruime afstand van de kust, waardoor het effect van zeespiegelstijging beperkt is. Binnen de invloedssfeer van de zeespiegelstijging liggen juist met name relatief 'zoete' polders, die er met toegenomen zoete kwel voor zorgen dat de watervraag aan het hoofdwatersysteem deels wordt 'gecompenseerd'. Rijnland is een gebied waar de ingrepen in het landschap van de laatste eeuwen nog sterk doorwerken in de verdeling van zoet en zout in het grondwater (Delsman et al., 2014). Hierdoor is in het gebied sprake van sterke autonome verzilting.

6.3.3 Watervraag aan het IJsselmeer

Ook in de rest van Nederland kan een toename van de zoutvracht als gevolg van autonome verzilting en versnelde zeespiegelstijging leiden tot een grotere watervraag voor doorspoelen. Dit is naar verwachting vooral het geval in de volgende twee typen gebieden:

- Doorgespoelde (landbouw)gebieden dichtbij de kust waar de invloed van de zeespiegelstijging groot is.
- Doorgespoelde (landbouw)gebieden verder van de kust met zoute wellen. Hier is de invloed van de zeespiegelstijging beperkt tot afwezig, maar speelt autonome verzilting een rol, die ook doortrekt in de doorspoelbehoefte.

Op basis van deze kenmerken kunnen we de kop van Noord-Holland, en een deel van de Friese en Groningse kustregio aanmerken als gevoelig voor een toenemende doorspoelvraag als gevolg van zeespiegelstijging. Deze gebieden in Noord-Nederland krijgen hun doorspoelwater aangeleverd uit het IJsselmeer. In de huidige situatie krijgen deze voor zeespiegelstijging kwetsbare gebieden circa 127 Mm³ per zomerhalfjaar voor doorspoelen. Dit is bijna de helft van wat totaal aan het IJsselmeer (300 Mm³) wordt gevraagd voor doorspoelen⁵⁶. Om een schatting te kunnen maken van de toename van de watervraag aan het IJsselmeer dient te worden bepaald: 1) hoe de zoutvracht toeneemt in deze gebieden, en 2) hoe deze toename zich vertaalt in een grotere doorspoelvraag.

Voor de zoutvracht is gebruik gemaakt van de resultaten voor Zuid-Holland en Rijnland (paragraaf 6.3.2). Opschalen van deze bevindingen naar andere delen van Nederland is lastig omdat de specifieke geologische omstandigheden sterk variëren. Vergelijkbare gebieden als in Rijnland liggen rondom de Rijn-Maasmonding (Voorne-Putten, Delfland en Goeree-Overflakkee).

⁵⁶ In (Ter Maat et al., 2014) wordt zo'n 300 Mm³ aangegeven als doorspoeling waarvoor water aan het IJsselmeer wordt onttrokken. De hier gepresenteerde getallen wijken af, doordat ze recenter zijn, en niet alle doorspoeling bevatten waarvoor IJsselmeerwater wordt gebruikt. Doorspoeling buiten de invloedssfeer, en doorspoeling van de boezemkanalen zijn in de hier gepresenteerde getallen niet meegenomen.

Net als in de beïnvloede gebieden in Noord-Nederland liggen deze binnen de invloedssfeer van de zeespiegel, komt er op verschillende plekken ondiep zout grondwater voor en zijn dit geen diepe polders. De overige brakke kwelpolders in Rijnland zijn niet geschikt als referentie, omdat deze zich buiten de invloedssfeer van versnelde zeespiegelstijging bevinden en vooral te maken hebben met het autonome verziltingsproces. De toegenomen zoutvracht verschilt per polder en is bij een extra versnelde zeespiegelstijging volgens de bovenwaarde van de projectie RCP8.5 voor respectievelijk Voorne-Putten, Delfland en Goeree-Overflakkee ongeveer 2, 3, tot 5 keer zo veel in 2100 als in de huidige situatie. Na 2100 neemt deze nog verder toe, maar voor een eerste schatting kijken we alleen naar 2100.

Op basis van een relatie tussen de toename van de zoutvracht en de toename van de doorspoelbehoefte voor Rijnland (de toename voor doorspoelen is 2 tot 3 keer zo veel als de zoutvracht, zie Bijlage B3), schatten we dat de doorspoelbehoefte over deze drie gebieden gemiddeld zo'n 5 tot 8 keer toeneemt. Extrapolerend naar Noord-Nederland en daarmee naar de watervraag aan het IJsselmeer voor doorspoelen, zou dit een doorspoelbehoefte betekenen van zo'n 700 tot 1100 Mm³ (44 - 63 m³/s of 0,6-0,9 m- waterschijf in het IJsselmeer en Markermeer). Dit is vergelijkbaar met de huidige totale watervraag aan het IJsselmeer in een huidig droog jaar (950 Mm³; Ter Maat et al., 2014). In een extreem droog jaar is de watervraag in de huidige situatie zo'n 1300 Mm³. Aan deze watervraag kan in de huidige situatie met het huidige waterpeilbeheer nog net worden voldaan.

Bij een lagere zeespiegelstijging, volgens de projectie RCP4.5, is naar verwachting ook een grotere buffer nodig. Een eerste schatting is dat de toename van de zoutvracht en daarmee gepaard gaande doorspoelbehoefte ongeveer de helft is van de RCP8.5 projectie. Aanvullend onderzoek is nodig om betere schattingen te maken, ook voor de zeespiegelstijging volgens de Deltascenario's.

6.4 | Zoetwatervoorraad onder de duinen

De diepe grote zoetwaterlenzen die voor de drinkwatervoorziening van Zuid- en Noord-Holland belangrijk zijn (beheerd door Dunea, Waternet, en PWN) kunnen met aangepast beheer de komende 100 jaar een zeespiegelstijging van enkele meters aan, zolang het duinmassief groot en hoog genoeg is en aldus grondwaterstandsopbolling toestaat. Hier nemen de volumes met maximaal 10% af. De afname in zoetwatervolume vindt vertraagd plaats, omdat tijd nodig is om het volume af te bouwen.

Op een nog langere termijn - na 2200 zal bij een extra versnelde zeespiegelstijging volgens de bovenwaarde van de projectie RCP8.5 (3 m in 2100) het zoetwatervolume uiteindelijk flink afnemen, tot 40% van het oorspronkelijke volume. Op deze termijn - na 2200 - verdwijnen bij dergelijke zeespiegelstanden in elk geval alle middelgrote zoetwaterlenzen (tot ~60-80m dik). Dit zijn de zoetwaterlenzen op de Waddeneilanden, in Friesland en Groningen (waar zoetwaterlenzen een beperkte dikte hebben), in de Kop van Noord-Holland, en in de omgeving van Hoek van Holland en Katwijk. De grotere zoetwaterlenzen zullen waarschijnlijk zodanig krimpen dat ze functioneel niet meer kunnen worden ingezet voor de drinkwatervoorziening.

Tabel 6.1 Schatting van de verandering in zoetwatervoorraad in de duinen langs de Hollandse Kust bij extra versnelde zeespiegelstijging volgens de bovenwaarde van de projectie RCP8.5.

| Segment langs de Nederlandse kust | Lengte profiel (km) | Grove schatting huidige zoetwatervolume (miljoen m ³) | Overgebleven volume onder RCP8.5 in 2100, (%) | Overgebleven volume onder RCP8.5 in 2200, (%) |
|-------------------------------------|---------------------|---|---|---|
| Hoek van Holland - Ter Heijde | 15 | 45 | 20 | 0 |
| Ter Heijde - Wassenaar | 15 | 575 | 90 | 40 |
| Wassenaar - Katwijk | 12.5 | 35 | 60 | 0 |
| Katwijk - IJmuiden | 17.5 | 1400 | 90 | 60 |
| Wijk aan Zee - Egmond | 17.5 | 875 | 90 | 60 |
| Egmond - Hondsbossche Zeewering | 12.5 | 1075 | 100 | 70 |
| Hondsbossche Zeewering - Den Helder | 22.5 | 275 | 80 | 20 |

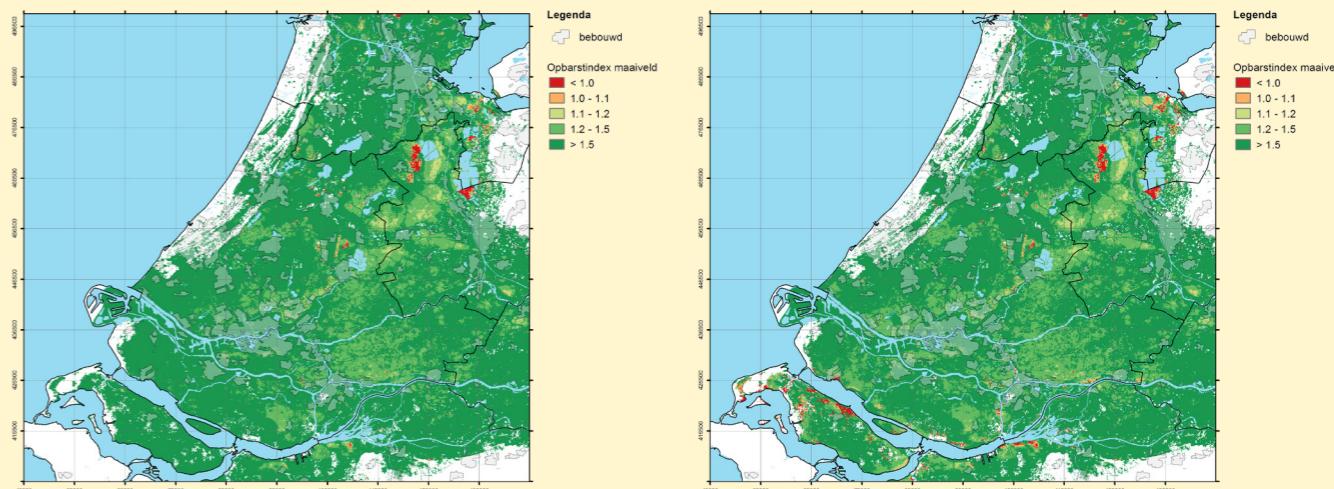
6.5 | Verzilting van de zoetwatervoorraad in het IJsselmeer

Het waterstandverschil aan weerskanten van de Afsluitdijk veroorzaakt een grondwaterstroming vanuit de Waddenzee in de richting van het IJsselmeer, een zogenaamde dijkse kwal. Omdat het grondwater hier brak tot zout is, zal dit gepaard gaan met een zoutvracht naar het IJsselmeer. Volgens een eerste orde schatting op basis van enkele analytische formules zal bij een zeespiegelstijging van 3 m (de bovenwaarde van RCP8.5 projectie in 2200) de zoutvracht over de Afsluitdijk naar het IJsselmeer toenemen met een factor 10 (zie Bijlage B).

6.6 | Opbarsting van de bodem en consequenties voor grondwateroverlast en zout

Bij een hoge kweldruk en een 'lichtgewicht' bodem, kan de bodem opbarsten. Bij opbarsting ontstaat een verticale verbinding in de afdekkende laag en kan grondwater gemakkelijk uit het watervoerend pakket naar het oppervlaktewater stromen; dit resulteert in een zogenaamde wel. Dit fenomeen kan leiden tot een grote kwelstroom met vaak zout en nutriëntenrijk grondwater, met verslechtering van de oppervlaktewaterkwaliteit tot gevolg (De Louw et al., 2007). Opbarsten kan ook gevolgen hebben voor de stabiliteit van dijken, voornamelijk op risicolocaties zoals langs rivieren en polders.

Binnen de invloedssfeer van de kust (zie paragraaf 6.3.1) neemt het risico op opbarsten toe door zeespiegelstijging, omdat de kweldruk toeneemt. Figuur 6.8 laat zien dat er op dit moment voornamelijk in het noordwesten van de provincie Utrecht een opbarstingsrisico aanwezig is. De komende 50 jaar zullen er niet veel gebieden met verhoogd opbarstingsrisico bijkomen. In de duinen (dicht bij zee) is er namelijk nauwelijks een deklaag aanwezig; indien die er wel is dan ligt er een zware grondmassa bovenop. Het Westland heeft een zeer dikke deklaag en dat biedt zodoende ook voldoende tegenwicht. In 2200 kan op de Zuid-Hollandse eilanden (Goeree-Overflakkee en Voorne-Putten) de kans op opbarsting toenemen. Opschalen van deze bevindingen naar andere delen van Nederland is lastig omdat de specifieke geologische omstandigheden sterk variëren. Omstandigheden die een grotere kans op opbarsten geven zijn de aanwezigheid van goed doorlatende lagen en het ontbreken van een zware afdekkende grondmassa. Gebieden die hier mogelijk aan voldoen zijn onder andere Voorne-Putten en Goeree-Overflakkee. Volgens een eerdere quickscan⁵⁷ bevinden andere risicogebieden zich in de Kop van Noord-Holland en het benedenrivierengebied (o.a. Drechtsteden), en mogelijk ook in de kustzone van Friesland.



Figuur 6.8 Opbarstingsindex op het maaiveld in de Provincie Zuid-Holland bij extreme zeespiegelstijging: links boven huidige situatie, rechts bij 8m zeespiegelstijging (bovenwaarde RCP8.5 in 2200).

⁵⁷ Kwadijk, J.C.J., Van Vuren, S., Verhoeven, G., Oude Essink, G.H.P., Snepvangers, J. J.J. C., Calle, E., 2007: Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding; Verwachtingen, schattingen en berekeningen voor het MNP-project "Nederland later".

6.7 | Gevolgen voor voorkeursstrategie en vervolgopties

Zoetwatervoorziening Midden West Nederland (verzilting via rivieren)

Zeespiegelstijging zorgt voor een toename van de zoutindringing in het benedenrivierengebied, terwijl hier belangrijke inlaatpunten voor de drinkwatervoorziening liggen. Eerste analyses wijzen er op dat al bij 1 m zeespiegelstijging de monding van de Hollandsche IJssel jaarlijks langdurig kan verzilten. De inzet van de KWA als alternatief voor inlaten bij Gouda kan daardoor niet meer als noodmaatregel worden gezien, zeker niet als ook de rivieraanvoeren in het zomerhalfjaar gaan afnemen door klimaatverandering (volgens Deltascenario's Warm en Stoom). Er zal naar een structureelere oplossing moeten worden gezocht. In Deltascenario's Warm en Stoom is dit in 2100 het geval. Bij een extra versnelde zeespiegelstijging is dit op zijn vroegst rond 2070 - 2080 (respectievelijk boven- en middenwaarde voor de RCP8.5 projectie) of in ieder geval rond 2080-2100 (respectievelijk de boven en middenwaarde volgens projectie RCP4.5). Bovendien zullen aanvoerproblemen vaker samenvallen met een piek in de watervraag voor peilhandhaving en beregeling en een verhoogde vraag voor doorspoelen als gevolg van een toename van de zoutvracht via het grondwater. Dit is een extra aanleiding voor het vergroten van de KWA. Om te beoordelen of die maatregelen zinvol zijn, zijn aanvullende analyses nodig. Op lange termijn komt een oostelijke aanvoer of misschien het accepteren van hogere zoutconcentraties in de polders in beeld.

Door zeespiegelstijging zal inlaatpunt Bernisse steeds vaker langdurig verzilten. Tijdens deze perioden is een alternatieve aanvoer nodig om het Brielse Meer te vullen. Bij zeespiegelstijging < 0,4 m is onduidelijk of Spijkenisse een voldoende alternatief is als Bernisse langdurig verzilt. Mogelijk is het vergroten van de buffer en kleinschalige aanvoer vanuit de Biesbosch dan al nodig. Bij circa 2 m zeespiegelstijging en in combinatie met lage afvoeren volgens Deltascenario's Warm en Stoom is Bernisse regelmatig niet meer bruikbaar. Afhankelijk van de projectie is dit rond 2090 (bovenwaarde RCP8.5), 2100 (middenwaarde RCP8.5 of de bovenwaarde RCP4.5) of na 2100 (middenwaarde RCP4.5 en Deltascenario's). De alternatieve aanvoer via Spijkenisse is mogelijk al vrij snel, bij weinig zeespiegelstijging, slechts beperkt bruikbaar. Verder onderzoek is nodig om te verkennen welke stappen noodzakelijk zijn onder deze condities. De Lek heeft in de huidige klimaatcondities zeer zelden te maken met verzilting. Bij 0,4 m zeespiegelstijging (rond 2050) zal langdurige verzilting van de monding naar verwachting elke 5 à 10 jaar optreden en is het nodig om voldoende afvoer over de Lek te garanderen om te voorkomen dat de Lek verzilt. Bij grotere zeespiegelstijging zal dit steeds vaker en langer nodig zijn.

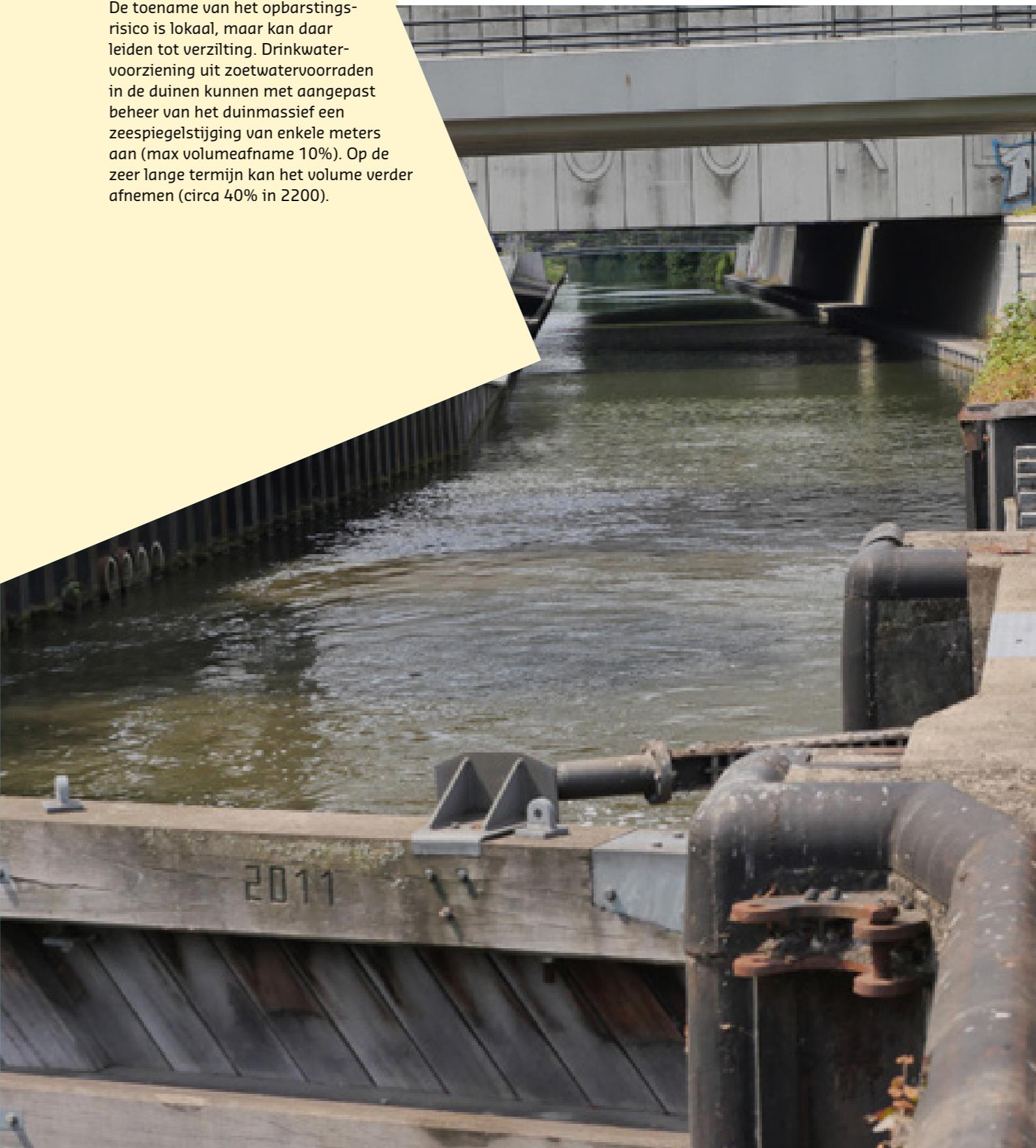
Zoetwatervoorziening voor doorspoelen (verzilting via het grondwater)

Tot 2050 lijken de gevolgen voor de zoetwatervoorziening niet groot, omdat ook bij een extra versnelde zeespiegelstijging het zeewaterpeil pas na 2050 flink gaat stijgen. Richting 2100 kunnen de effecten echter tot verschillende knelpunten leiden. In stedelijke gebieden binnen enkele kilometers langs de kustlijn zorgen verhoogde stijghoogen en grondwaterstanden voor (veel) meer grondwateroverlast. De toename van de zoutvracht leidt in de poldersystemen nabij de kust tot een grotere doorspoelbehoefte, en daarmee tot een grotere watervraag aan het hoofdwatersysteem. In de diepe Hollandse polders is de toename van verzilting het gevolg van zowel autonome ontwikkeling alsmede de zeespiegelstijging, in de overige gebieden domineert de zeespiegelstijging. Na 2100 domineert de zeespiegelstijging overal.

Over het algemeen hebben de diepe polders ten zuiden van het Noordzeekanaal weinig problemen, doordat ze veelal buiten de invloedssfeer van de zeespiegelstijging liggen en er ook een toename is van zoete kwel. De agrarische kustgebieden in Friesland, Groningen, op de Hollandse eilanden, en in de kop van Noord-Holland kunnen daarentegen sterk gaan verzilten. Handhaven van de eisen aan zoutconcentraties in het polderwater door het huidig landgebruik impliceert een veel grotere doorspoelvraag, naar schatting ongeveer ter grootte van de huidige totale watervraag in een droog jaar. Deze grotere watervraag kan zonder verdere maatregelen leiden tot tekorten in het IJsselmeergebied in droge jaren. Het is echter denkbaar dat de watervraag verandert als gevolg van waterbesparende maatregelen.

Een toename van de watervraag voor doorspoelen komt bovenop een mogelijk toenemende watervraag door klimaatverandering (vooral bij Deltascenario's Warm en Stoom), waarvoor in de voorkeursstrategie al een grotere buffer is gepland. Vanwege het feit dat in de projecties de extra versnelling vooral na 2050 plaatsvindt, is de mogelijk benodigde extra buffer in het IJsselmeer door extra versnelde zeespiegelstijging naar schatting vooral in het laatste kwartaal van deze eeuw nodig. Daarmee lijkt de geplande maatregel dus niet zozeer eerder nodig, maar is voor de laatste stap in de voorkeurstrategie mogelijk wel een veel grotere buffer nodig bij gelijkblijvende doorspoelbehoefte.

De toename van het opbarstingsrisico is lokaal, maar kan daar leiden tot verzilting. Drinkwatervoorziening uit zoetwatervoorraden in de duinen kunnen met aangepast beheer van het duinmassief een zeespiegelstijging van enkele meters aan (max volumeafname 10%). Op de zeer lange termijn kan het volume verder afnemen (circa 40% in 2200).



Conclusies en aanbevelingen

7



7.1 | Conclusies

7.1.1 Zeespiegelstijging

Dat de zeespiegel de komende eeuw en ook daarna blijft stijgen is zeker. Onzeker is hoeveel en met welke snelheid dit zal gaan gebeuren. Het is niet de vraag *of* Nederland te maken gaat krijgen met 1, 2, 3 of meer meter zeespiegelstijging; het is de vraag *wanneer* dit gaat gebeuren.

Tot 2050 verschillen de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging niet veel van de huidige Deltascenario's Warm en Stoom, waarin is uitgegaan van sterke klimaatverandering. Na 2050 (rond 0,4 m stijging ten opzichte van 1995) treden echter significante verschillen op. In het jaar 2100 zou volgens de Deltascenario's een stijging van maximaal 1 m zijn bereikt, volgens nieuwe projecties van het KNMI kan deze stijging hoger uitvallen. In een projectie van 4°C opwarming (RPC8.5⁵⁸) kan de zeespiegelstijging mogelijk zelfs tot 3 m oplopen in 2100. De nu gehanteerde bovenlimiet uit de Deltascenario's van 1 m wordt in de projecties voor versnelde zeespiegelstijging mogelijk al bereikt vanaf 2070 (RPC8.5) of vanaf 2080 (RPC4.5). Na 2100 houdt de zeespiegel niet op met stijgen. Bij een extra versnelde zeespiegelstijging kan dit oplopen tot 5 à 8 m in 2200.

Niet alleen de absolute stijging van de zeespiegel is een belangrijk gegeven, ook de stijgsnelheid per jaar is belangrijk voor adaptatie. Ook deze stijgsnelheid is onzeker, maar is in de projecties voor extra versnelde zeespiegelstijging in elk geval veel groter dan waar nu vanuit wordt gegaan. De zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is momenteel 2 à 3 mm/jaar. In de Deltascenario's Warm en Stoom loopt deze snelheid op naar 10 mm/jaar rond 2050 en naar maximaal 14 mm/jaar in 2100. Bij de extra versnelde zeespiegelstijging is een stijgsnelheid van 10 mm/jaar al bereikt rond 2050, en deze loopt daarna op tot circa 20-35 mm/jaar rond 2070 en tot mogelijk zelfs 60 mm/jaar of meer aan het einde van deze eeuw.

7.1.2 Gevolgen voor het Deltaprogramma

Algemene conclusies voor het Deltaprogramma op basis van de verkenning zijn:

1. **De plausibiliteit en mogelijke gevolgen van een extra versnelde zeespiegelstijging zijn belangrijk om nader te onderzoeken**, omdat deze stijging er na 2050 toe kan leiden dat we anders met ons water- en kustbeheer om zullen moeten gaan. De mate van versnelling van de zeespiegelstijging is onzeker, maar kan belangrijke gevolgen hebben voor Nederland en voor de voorkeurstrategieën van het Deltaprogramma.
2. **Extra versnelde zeespiegelstijging is belangrijk, maar nog niet urgent voor het Deltaprogramma**, omdat we nu nog niet direct op een andere strategie over hoeven te gaan. Er is tijd om het signaal en de mogelijke gevolgen nader te onderzoeken en na te denken over alternatieven en deze tijdig in te zetten indien dit nodig blijkt. Het verkrijgen van signalen en het bijstellen van strategieën is een essentieel onderdeel van adaptief deltamanagement. Het goed monitoren door analyses van (internationale) observaties en het bijhouden en opstellen van toekomstprojecties is dan ook belangrijk om signalen tijdig te krijgen en onzekerheden te verkleinen.
3. **Het is raadzaam om bij de (extra) versnelde zeespiegelstijging ook met de periode na 2100 rekening te houden**. De zeespiegel blijft ook na 2100 (mogelijk sneller) stijgen. Dergelijke stijgingen zijn nu al relevant voor investeringen die in de komende jaren worden gedaan met een lange beoogde levensduur en/of effect op de samenleving. Sommige processen, zoals aanpassing van

⁵⁸ RCP4.5 scenario benadert een temperatuurstijging van 2 °C in 2100, en RCP8.5 een temperatuurstijging van 4 °C in 2100.

grondwaterpeilen aan zeespiegelstijging en verzilting via het grondwater gaan (zeer) langzaam, maar duren onverminderd voort. Een en ander betekent dat aanpassing aan veranderende natuurlijke randvoorwaarden nog zeer lang het adagium in het Deltabeheer zal zijn.

4. Tijd wordt cruciaal bij een extra versnelde zeespiegelstijging. Volgens de projecties van het KNMI wordt de versnelde zeespiegelstijging vanaf het jaar 2050 voor het eerst merkbaar. Na 2050 verloopt de stijging veel sneller dan nu en moet er binnen korte tijd veel gebeuren, zoals sneller en meer suppleren aan de kust, het op kortere termijn versterken of vervangen van stormvloedkeringen en andere hoogwaterbeschermingskunstwerken dan we nu voorzien, en het verplaatsen en vergroten van zoetwaterinlaten. Ter illustratie: aanpassingen die in 1995 ontworpen zijn voor een stijging van 0,5 m hadden een functionele levensduur van 65 jaar. Bij versnelde zeespiegelstijging kan de functionele levensduur per 0,5 m zeespiegelstijging in 2060 zijn afgangen tot 20 jaar en in 2080 tot 10 jaar⁵⁹. Dat betekent dat adaptatie aan relatief kleine zeespiegelstijgingen niet meer volstaat. De maatregelen zullen dan immers steeds korter effectief zijn en snellere planning en besluitvorming zal nodig zijn. Of en tot welk moment de voorkeurstrategieën toereikend zijn, zal in de eerste plaats hiervan afhangen. Naast de mate van zeespiegelstijging is dus ook de stijgsnelheid belangrijk; zowel voor de gevolgen (voorbeeld: bij grotere snelheden moet meer zand gesuppleerd worden), als voor het bepalen welke adaptatiemaatregelen nodig zijn.

7.1.3 Gevolgen voor de voorkeurstrategieën op basis van knippunten en hun moment van optreden

Om te onderzoeken of de voorkeursstrategieën een versnelde zeespiegelstijging - zoals beschreven in recente studies - aan kunnen, is gekeken naar knippunten, oftewel: veranderde omstandigheden die aanpassingen van het beleid vragen. Afhankelijk van de mate en snelheid van de stijging zal dit eerder of later nodig zijn (zie figuur 7.1). De onzekerheid over de zeespiegelstijging is met de nieuwe projecties, vooral hun bovenwaarden, sterk toegenomen. Deze bovenwaarden zijn belangrijk voor de beslissing wanneer op zijn vroegst actie moet worden genomen. Bij nieuwe inzichten over zeespiegelstijging kunnen de resultaten van deze studie worden gebruikt om het moment van optreden van de knippunten te actualiseren zonder de hele analyse opnieuw te hoeven doen.

Bij een zeespiegelstijging tot 0,4 m (rond 2050): In zowel de Deltascenario's Warm en Stoom als in de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging vindt dit rond 2050 plaats.

- *Kustfundament, Waddenzee en zuidwestelijke delta:*

- Rond 2050 is de stijgsnelheid dusdanig groot dat er 3 tot 4 keer de huidige hoeveelheden voor zandsuppletie nodig zijn om de kust te kunnen laten meegroeien. In de Deltascenario's is dit circa 10 jaar later.
- De Westelijke en Oostelijke Waddenzee kunnen de stijging niet meer bij houden vanaf respectievelijk 6 en 10 mm/jaar en gaan langzaam verdrinken. In de rivieren is sprake van aanzanding, omdat er nog net voldoende sedimentaanvoer is om de stijging bij te houden.

- *Waterveiligheid:*

- De sluitfrequentie is toegenomen tot eens per 4 jaar voor de Maeslantkering en 3 keer per jaar voor de Oosterscheldekering bij gelijkblijvend sluitcriterium.
 - De frequentie van overschrijden van het ontwerppeil van de belangrijke kunstwerken voor waterveiligheid neemt toe met ongeveer een factor 3 à 5.
- *Zoetwatervoorziening:*
- Inzet van de Klimaatbestendige WaterAanvoer (KWA) is ongeveer eens in de 5 jaar nodig om aan de watervraag vanuit Midden-West Nederland te voldoen.
 - Onduidelijk of Spijkenisse een voldoende alternatief is als Bernisse langdurig verzilt.
 - Voldoende doorspoeling van de Lek is noodzakelijk als de monding van de Lek langdurig verzilt.

Bij een zeespiegelstijging tussen 0,4 en 1 m (vanaf 2050 tot afhankelijk van de projectie/het scenario 2070 à 2100): Een stijging van 1 m is de bovenwaarde van de huidige Deltascenario's in 2100 en de middenwaarde van de RCP4.5 projectie (leidt naar verwachting tot een opwarming van ongeveer 2°C in 2100, uitgaande van nakomen klimaatafspraken Parijs) en komt volgens de projecties met een extra versnelde stijging (bovenwaarde RCP8.5; een projectie met hoge emissies en 4°C in 2100) op zijn vroegst rond 2070 voor.

- *Kustfundament, Waddenzee en zuidwestelijke delta:*

- Als gevolg van de grotere stijgsnelheid in de projecties met een extra versnelde zeespiegelstijging zal zandsuppletie voor de kust verder moeten worden opgeschaald. Dit vraagt een andere organisatie. De benedenrivieren worden dieper omdat er onvoldoende sediment wordt aangevoerd.

⁵⁹ Deze getallen gelden voor de middenwaarde van de projectie voor RCP8.5 en de bovenwaarde van RCP4.5 van het IPCC.

- *Waterveiligheid:*

- Bij gelijkblijvend sluitpeil gaan de Oosterscheldekering en Maeslantkering steeds vaker sluiten. De sluitfrequentie van de Maeslantkering is rond 1 m zeespiegelstijging 3 keer per jaar. De Oosterscheldekering sluit ongeveer 45 keer per jaar bij 1 m zeespiegelstijging.
- De overschrijdfrequentie van het ontwerppeil van de keringen neemt toe met ongeveer een factor 20 à 50. Voor de Maeslantkering betekent dit ongeveer eens in de 20 jaar.
- Vanaf 0,65 m zeespiegelstijging is het niet meer goed mogelijk om onder vrij verval te spuien via de Afsluitdijk en is structurele inzet van pompen nodig.

- *Zoetwatervoorziening:*

- De betrouwbaarheid van de zoetwatervoorziening via Gouda is zodanig laag geworden dat er een structurele inzet van een alternatief voor zoetwatervoorziening nodig is. Een nieuwe oostelijke aanvoer voor zoetwatervoorziening in Midden-West Nederland is mogelijk nodig.
- De capaciteit van bestaande alternatieve aanvoerroutes wordt ontoereikend. De mate waarin is afhankelijk van de ontwikkeling van de watervraag. Er zal mogelijk capaciteitsvergroting nodig zijn.
- Aanvullende maatregelen vanwege de afnemende leveringszekerheid van zoetwater via de inlaat Bernisse zijn nodig ten behoeve van zoetwatervoorziening via Brielme Meer.
- Door een toenemende zoute kwal neemt de watervraag voor het doorspoelen van laaggelegen gebieden in de kustzone toe. Zo ook de watervraag aan het IJsselmeer. Dit is het gevolg van zowel de autonome ontwikkeling als de zeespiegelstijging.

Bij een zeespiegelstijging van meer dan 1 m (vanaf 2070 à 2100). Deze stijging ligt buiten de huidige bandbreedte van de Deltascenario's tot 2100. In de projecties met extra versnelde zeespiegelstijging wordt 1 m stijging op zijn vroegst omstreeks 2070-2085 bereikt. In alle scenario's stijgt de zeespiegel na 2100 meer dan 1 m. Bij extra versnelde zeespiegelstijging kan dit oplopen tot 5 tot 8 m in 2200.

- *Kustfundament, Waddenzee en zuidwestelijke delta:*

- Als gevolg van de hogere stijgsnelheid zal tot 25 keer meer zand nodig zijn om mee te groeien met de zeespiegelstijging.

- *Waterveiligheid:*

- Tussen 1 en 2 m stijging nemen de sluitfrequenties van de open afsluitbare keringen verder toe. Bij 2 m is er onder de huidige sluitcriteria, een dusdanig grote toename van de sluitfrequentie van de Maeslantkering en Oosterscheldekering dat deze nagenoeg permanent gesloten zijn.
- Tussen 1 en 2 m stijging neemt de frequentie van overschrijding van de ontwerppeilen van de keringen toe met een factor 300 tot 10.000; tot (meer dan) eens in de 10 jaar (Maeslantkering, Oosterscheldekering en Haringvlietdam).
- Vanaf 1,35 m zeespiegelstijging is het ook bij een verhoging van het streefpeil met 0,6 m onder gemiddelde condities niet meer mogelijk om onder vrij verval te spuien door de Afsluitdijk.
- Bij een zeespiegelstijging van 1,75 m is er een pompcapaciteit op de Afsluitdijk nodig tot maximaal 3200 m³/s om alle IJsselafvoer en neerslagoverschot af te voeren.
- Als we er van uitgaan dat we minimaal een gelijkblijvend beschermingsniveau willen handhaven, lijkt het een redelijke veronderstelling dat de grote kunstwerken moeten zijn aangepast of vervangen bij een zeespiegelstijging van 1 à 1,5 m. Op zijn vroegst, onder de aanname van een extra versnelde zeespiegelstijging, wordt dat niveau omstreeks 2070 bereikt.

- *Zoetwatervoorziening:*

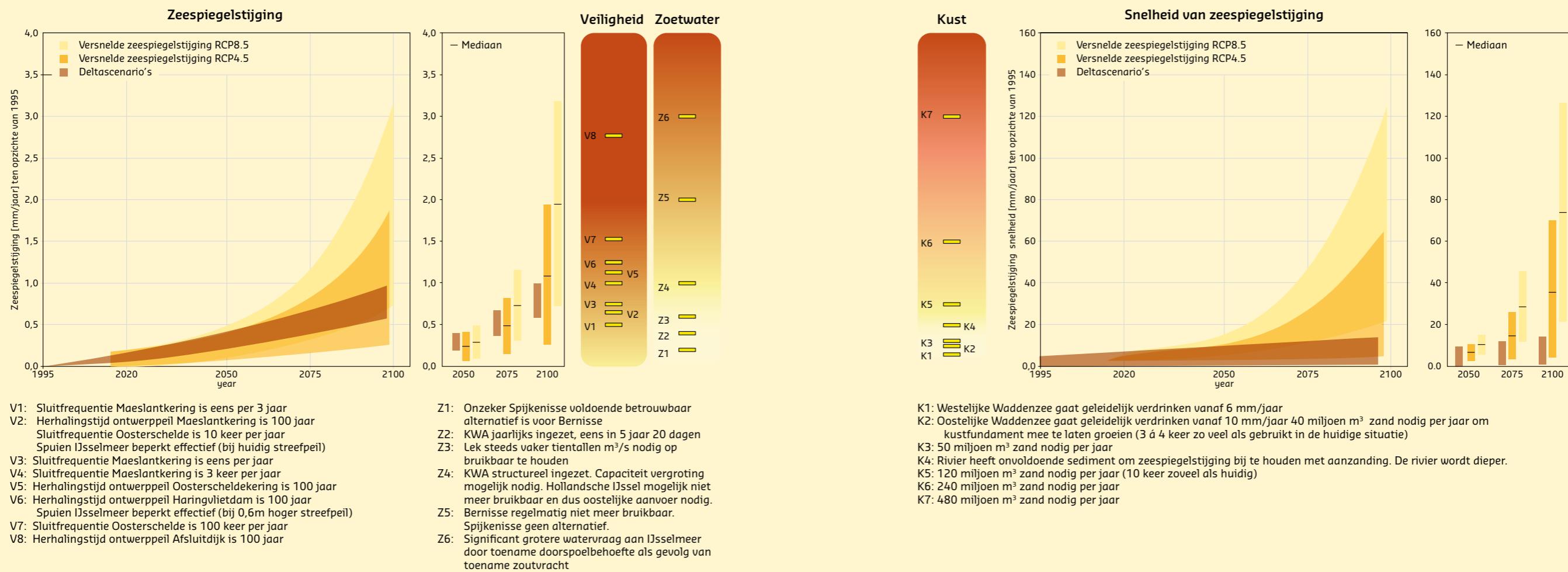
- Een nieuwe oostelijke zoetwateraanvoer is nodig voor Midden-West Nederland.
- Bernisse als inlaat voor Brielme Meer is zeer regelmatig niet bruikbaar en alternatieve aanvoer via Spijkenisse is niet of onvoldoende inzetbaar. Grootschalige alternatieven voor onder meer de Bernisse inlaat zijn waarschijnlijk noodzakelijk.
- De watervraag aan het IJsselmeer neemt significant toe (mogelijk verdubbeling) door een toename van de doorspoelbehoefte tegen verzilting via het grondwater, aannemende dat de landbouw vergelijkbare zouttolerantie en daarmee waterbehoefte blijft houden. Zeespiegelstijging wordt steeds meer de dominante factor ten op zichte van de autonome ontwikkelingen.

Implicaties voor de voorkeursstrategieën

Bovenstaande knippunten betekenen op hoofdlijnen dat de voorkeursstrategieën tot 2050 houdbaar zijn. De inzet van waterbeheermaatregelen zal echter frequenter zijn, dan wel geïntensifieerd worden; keringen zullen vaker sluiten, veel meer suppletiezand is nodig voor het meegroeien van de kust, en de alternatieve aanvoer van zoetwater zal vaker nodig zijn:

Op de korte termijn is het van belang om goed te monitoren wat er gebeurt en in de toekomst kan gebeuren op Antarctica en met de zeespiegel. Daarnaast is nader onderzoek nodig naar de gevolgen van extra versnelde zeespiegelstijging en een beleidsanalyse om alternatieve strategieën voor een stijging van meer dan 1 m te verkennen. Hierbij horen tijdpaden voor planning en implementatie. Het is raadzaam te onderzoeken hoe we de veel grotere onzekerheid in de projecties van (snelheid van) zeespiegelstijging mee kunnen nemen in planstudies en ontwerpen, bijvoorbeeld in de vorm van een robuustheidstoets.

Na 2050 zal de vervanging van kunstwerken eerder in beeld komen als gevolg van een sterk afnemende functionele levensduur. Ook zullen eerder maatregelen nodig zijn voor de buitendijkse gebieden en zal de vraag hoe lang de huidige strategie van "open afsluitbaar" houdbaar is naar voren komen. Een sterke toename van de behoefte aan suppletiezand om de kust mee te laten groeien vraagt mogelijk om een andere uitvoering. Niet alleen vanwege de hoeveelheid en frequentie, maar ook vanwege de gevolgen voor natuur en recreatie. De vraag naar zoetwater neemt sterk toe. Dit vraagt eerdere implementatie van geplande maatregelen en mogelijk een capaciteitsvergroting en/of alternatieve aanvoer voor zoetwater richting Midden-West Nederland (KWA, Brielse Meer) en Noord Nederland (IJsselmeer), dan wel een transformatieve aanpassing van het watergebruik.



Figuur 7.1 Samenvatting van de gevonden knikpunten (midden) bij een stijgende zeespiegel (in cm ten opzichte van 1995) voor waterveiligheid (v1-v8), zoetwatervoorziening (z1-z6) en bij een toename in de stijgsnelheid (mm/jaar) voor het kustfundament, Waddenzee, de zuidelijke delta en morfologische ontwikkeling van de rivieren (k1-k7). De linker en rechter figuur geven de gebruikte zeespiegelscenario's in deze studie, volgens KNMI' 2014 (Deltascenario's met bandbreedte 2 tot 4°C opwarming in 2100) en de projecties (RCP4.5 en RCP8.5; die ook een bandbreedte is van 2 tot 4°C opwarming in 2100) ten opzichte van 1995. De projecties zijn specifiek voor de Nederlandse kust, en wijken dus iets af van die in de publicatie van Le Bars et al. 2017. De bandbreedte is weergegeven voor de onderwaarde (p5) en de bovenwaarde (p95), ook voor 2050, 2075 en 2100 aan de rechterkant van de figuur. De middenwaarde (p50) is hier aangegeven met een zwarte lijn. De Deltascenario's hebben geen middenwaarde. Bijvoorbeeld: V7 (sluitfrequentie Oosterscheldekering is 100 keer per jaar) vindt plaats rond 1.5 m. Dat is na 2100 in de Deltascenario's en rond 2080 en 2090 volgens bovenwaarden van respectievelijk RCP8.5 en RCP4.5. Ook na 2100 stijgt de zeespiegel verder en zullen meer knikpunten in beeld komen.

7.2 | Aanbevelingen voor een kennisagenda

Het versneld afbreken en smelten van de ijskappen van Antarctica is te vertragen als klimaatverandering beperkt blijft. Dat kan als iedereen zich aan het Parijsakkoord houdt. Dit geeft extra tijd voor adaptatie. Dit kan voor Nederland een extra reden zijn om een streng mitigatiebeleid te voeren en ook andere landen te stimuleren zich aan de afspraken van het Parijsakkoord te houden.

In de context van een onzeker, maar mogelijke extra versnelde zeespiegelstijging betekent adaptief delta management (ADM) immers:

- Inspanning om een eventuele versnelde zeespiegelstijging tijdig te signaleren,
- verkennen en kwantificeren van mogelijke gevolgen,
- uitvoeren van aanvullend onderzoek om te beoordelen of het nodig is de huidige voorkeursstrategieën aan te passen, en zo ja wanneer, en
- nadenken over alternatieve (robuste en/of flexibeler) strategieën, en tijdig implementeren indien nodig.

Onderstaande aanbevelingen hebben betrekking op deze aspecten van ADM en hebben samenvattend tot doel: de onzekerheden over mogelijke zeespiegelstijging te verkleinen en het inzicht in de gevolgen voor en het adaptieve vermogen van de maatschappij te vergroten. Ze vormen de aanzet tot een op te stellen kennisagenda.

Versterk onderzoek naar zeespiegelstijging

Vanwege de mogelijke gevolgen en de snelheid van de zeespiegelstijging is het nader onderzoeken en de vinger aan de pols houden belangrijk. Dit vraagt om fundamenteel onderzoek, waaronder het monitoren en modelleren van het gedrag van de grote ijskappen zoals op Antarctica en de gevolgen daarvan voor de zeespiegel, alsmede het bijhouden van internationale wetenschappelijke literatuur en publicaties van het IPCC. Het monitoren van de zeespiegelstijging rond Nederland blijft noodzakelijk, maar een versnelling kan vaak pas na enige tot vele jaren worden gesignalerd. Door de grote natuurlijke variabiliteit van de lokale zeewaterstanden is monitoring van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging en het bijhouden van wetenschappelijke kennis over mechanismen een indicator die eerder een signaal kan geven. Ook het bijhouden van wat er in andere landen in de wereld gebeurt, zal waarschijnlijk krachtiger "early warning" signalen opleveren dan de zeespiegel zelf. Nederland is niet het eerste land wat in grote problemen zal komen.

Onderwerpen die relevant zijn voor de mogelijke gevolgen van een extra versnelde zeespiegelstijging zijn:

- De lange-termijn sedimenthuishouding van het kustfundament (inclusief de (voormalige) estuaria in de Zuidwestelijke Delta, de Waddenzee en het benedenrivierengebied), de benodigde suppleties en de effecten daarvan op andere belangen en waarden zoals natuur en recreatie, en de noodzaak tot ruimtelijke reserveringen voor zandwinning;
- De ontwikkeling in de faalkans, het sluitpeil en de sluitfrequentie van stormvloedkeringen;
- De ontwikkeling van de dijkversterkingsopgave en van de overstromingsrisico's in buitendijkse gebieden;
- De zoutindringing in het benedenrivierengebied;
- De zoutindringing via het grondwater en de consequenties voor de watervraag aan het IJsselmeer en de benedenrivieren;
- De benodigde pompcapaciteit voor poldergemalen als gevolg van een toename van de kwal;
- De maatschappelijke gevolgen van te vroeg of te laat investeren.
- Verkennen van aanpassingen en alternatieven voor een grotere en snellere zeespiegelstijging (meer dan 1 m en meer 10 mm/jaar) inclusief planning, organisatie en tijdpaden.
- De mogelijke gevolgen voor andere delta's in de wereld en de gevolgen daarvan voor Nederland, denk alleen al aan de internationale handel over zee.



Ontwikkel een methode om robuustheid en adaptiviteit van plannen en ontwerpen te evalueren en onzekerheid over de snelheid van zeespiegelstijging mee te nemen, bijvoorbeeld in de vorm van een robuustheidstoets. Vooral voor investeringen met een lange levensduur of mogelijk grote maatschappelijke gevolgen, zoals nieuw te bouwen of te vervangen kunstwerken, is dit belangrijk. Hierbij gaat het zowel om de mogelijkheid tot het snel genoeg kunnen aanpassen via levensduurverlenging als om alternatieven, zoals het open houden van de opties voor toekomstige aanpassingen en alternatieven.

Verken alternatieven voor aanpassing aan zeespiegelstijgingen van in totaal meer dan 1 m en met een snelheid groter dan 10 à 15 mm/jaar en schat aan de hand van de verwachte implementatietijd wanneer uiterlijk een beslissing moet worden genomen en of dit in de pas loopt met het mogelijk opmerken van signalen. Het voorbereiden en implementeren van adequate maatregelen kan immers veel tijd kosten (zie kader bijlage C). Bij versnelde stijging wordt de functionele levensduur korter. Dit kan een reden zijn om bepaalde maatregelen niet meer in te zetten omdat er immers maar kort van kan worden geprofiteerd. Neem hierbij ook de samenhang tussen de gevolgen voor de strategieën voor hoogwaterbescherming en zoetwatervoorziening mee, bijvoorbeeld door de gevonden knippunten en noodzaak en timing van maatregelen in samenhang te beschouwen. Dit kan namelijk aanleiding geven tot andere besluiten dan wanneer ze afzonderlijk worden beschouwd. Een voorbeeld van een verband tussen de strategieën voor waterveiligheid en zoetwatervoorziening is het open houden van afsluitbare waterkeringen in het benedenrivierengebied, respectievelijk hun vervanging door sluizen, die immers de zoutindringing en daarmee de zoetwatervoorziening zal beïnvloeden.

Colofon

| | |
|---|---|
| Uitgave | Deltares, in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur & Water - staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat - Water Verkeer en Leefomgeving |
| Datum | September 2018, Delft |
| Projectteam | Marjolijn Haasnoot, Laurens Bouwer, Ferdinand Diermanse, Jaap Kwadijk, Ad van der Spek, Gualbert Oude Essink, Joost Delsman, Otto Weiler, Marjolein Mens, Judith ter Maat, Theo van der Kaaij, Remco Plieger, Ymkje Huismans, Kees Sloff, Erik Mosselman, Gerda Lenselink. |
| Review | Prof. Dr. Frans Klijn (Deltares) |
| Externe review | Prof. Dr. Hans Middelkoop (Universiteit Utrecht), Prof. Dr. Bart van den Hurk (KNMI), Prof. Dr. Ir. Bas Jonkman (Technische universiteit Delft), Prof. Ir. Eelco van Beek (Universiteit Twente), Prof. Dr. Jeroen Aerts (Vrije Universiteit Amsterdam – IVM) |
| Begeleidingscommissie | Jos van Alphen, Chantal Bijkerk, Stefan Pluis (staf Deltacommissaris), Harold van Waveren, Wout de Vries, Marko Ludeking (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving), Frank Hallie (Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat, DG Water en Bodem) |
| Externe betrokkenen | Dewi Le Bars, Sybren Drijfhout (KNMI), Neeltje Kielen (Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving), Koos Poot (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat). De auteurs zijn deze partijen erkentelijk voor hun bijdragen. |
| Referentie | M. Haasnoot, L. Bouwer, F. Diermanse, J. Kwadijk, A. van der Spek, G. Oude Essink, J. Delsman, O. Weiler, M. Mens, J. ter Maat, Y. Huismans, K. Sloff, E. Mosselman, 2018, Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning. Deltares rapport 11202230-005-0002. |
| Contactpersoon | Dr. Marjolijn Haasnoot (marjolijn.haasnoot@deltares.nl) |
| Bijlagen zijn te downloaden van: | https://www.deltares.nl/nl/publication/mogelijke-gevolgen-van-versnelde-zeespiegelstijging-voor-het-deltaprogramma-een-verkenning/ |
| Foto's | Adobe Stock: Cover, p3, p23 en p64 RWS beeldbank: p9, p15, p30, p57 en p81 Guus Schoonevlie: p11 |

