

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Systemanalyse waterveiligheid

Bovenregionale rapportage

Systeemanalyse Waterveiligheid

Bovenregionaal syntheserapport

Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II - Systeemverkenningen

Datum	1 juli 2023
Versie	V1.0
Status	Definitief

Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van het **Kennisprogramma Zeespiegelstijging**, een initiatief van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de deltacommissaris. Het programma levert kennis op over de gevolgen van zeespiegelstijging en hoe Nederland daarmee kan omgaan. Deze kennis wordt gebruikt bij de herijking van het Deltaprogramma in 2026.

Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op kennisprogrammazeespiegelstijging.nl.

Uitgegeven door Kennisprogramma Zeespiegelstijging- Spoor 2
In opdracht van Rijkswaterstaat WVL
Auteurs Marit Zethof (HKV) en Jan Stijnen (HKV).

Datum juli 2023
Versie 1.0
Status Definitief

Versiebeheer

0.1	17 maart 2023	80% rapportage
0.2	27 maart 2023	Review RWS 80% rapportage
0.3	26 april 2023	99% rapportage
0.4	9 mei 2023	Review RWS 99% rapportage
0.5	25 mei 2023	99% rapportage
0.6	30 mei 2023	Review RWS 99% rapportage
0.7	9 juni 2023	100% rapportage
1.0	1 juli 2023	Publicatieversie



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Inhoud

1	Inleiding	4
1.1	Algemeen	4
1.2	Achtergrond project	4
1.3	Positionering Spoor II Systeemanalyse waterveiligheid	5
1.4	Scope.....	6
1.5	Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1	7
2	Bovenregionaal beeld	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen.....	11
2.3	Versterkingsopgave per watersysteem	20
2.4	Ruimtelijke impact.....	26
2.5	Kosten voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging	27
2.6	Conclusies	33
2.7	Een aantal potentiële oprekmogelijkheden	37
2.8	Gevoeligheidsanalyses.....	40
	Referenties	41

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) wordt kennis ontwikkeld om beter onderbouwd om te kunnen gaan met een onzekere zeespiegelstijging (ZSS) in de toekomst. Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging loopt van 2019 tot 2026 en dient de kennisleemten ten aanzien van de gevolgen van extreme zeespiegelstijging op het huidige te verkleinen. De inzichten uit het Kennisprogramma worden gebruikt voor de 6-jaarlijkse herijking van het Deltaprogramma in 2026 (DP 2027). Binnen het programma wordt kennis via vijf sporen ontwikkeld.

In spoor I wordt onderzoek gedaan naar de onzekerheden rondom het afsmelten van de ijskappen op Antarctica. Spoor II onderzoekt welke gevolgen ZSS heeft voor onze hoogwaterveiligheid en zoetwaterbeschikbaarheid en vormt daarmee belangrijke input voor de houdbaarheid van de voorkeursstrategie (VKS) van het Deltaprogramma. In Spoor III wordt een methode ontwikkeld om tijdig te kunnen signaleren en de nodige maatregelen hierop te kunnen nemen. Als de VKS niet meer houdbaarheid is, dan moet deze op termijn aangepast worden (spoor IV). In Spoor V wordt gekeken naar wat er nodig is om de noodzakelijke aanpassingen voor elkaar te krijgen

Dit rapport is onderdeel van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II Systeemverkenningen. In spoor II worden langs drie thema's verkenningen gedaan naar de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma, te weten waterveiligheid, de zandige kust en zoetwater. Voorliggende rapportage is onderdeel van het thema Waterveiligheid en is in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS) opgesteld.

Per Deltaprogramma deelgebied staan de resultaten beschreven voor de te verwachten waterveiligheidsopgave door zeespiegelstijging in het huidige hoofdwatersysteem. De voorliggende rapportage is een syntheserapport over alle deelgebieden van het Deltaprogramma. In paragraaf 1.4 staat een omschrijving van de scope.

1.2 Achtergrond project

In de komende eeuwen zal de zeespiegel verder stijgen. In het Deltaprogramma zijn de effecten van zeespiegelstijging tot 2100 meegenomen, waarbij geen rekening is gehouden met een mogelijke extra en onzekere versnelling van de zeespiegelstijging volgens het recente IPCC AR6 rapport [IPCC, 2023] en eerdere studies (bijv. [Bamber et al., 2019] en [De Conto en Pollard, 2016]). Met de systeemanalyse waterveiligheid binnen het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging willen Rijkswaterstaat en het Ministerie van IenW meer inzicht krijgen in de eerste orde effecten van verschillende zeespiegelstijgingen op het hoofdwatersysteem en de primaire waterkeringen in Nederland. Binnen het KP ZSS wordt kennis ontwikkeld om op een beter onderbouwde manier om te kunnen gaan met een onzekere ZSS.

Een stijgende zeespiegel heeft direct invloed op de hydraulische belastingen op de waterkeringen, doordat waterstanden en golven toenemen, maar ook indirect, omdat bijvoorbeeld spuiomogelijkheden onder vrij verval vanuit regionale systemen naar het hoofdwatersysteem, en van daaruit naar zee wijzigen. Ook de sluitfrequenties van stormvloedkeringen nemen toe. Door grotere belastingen is

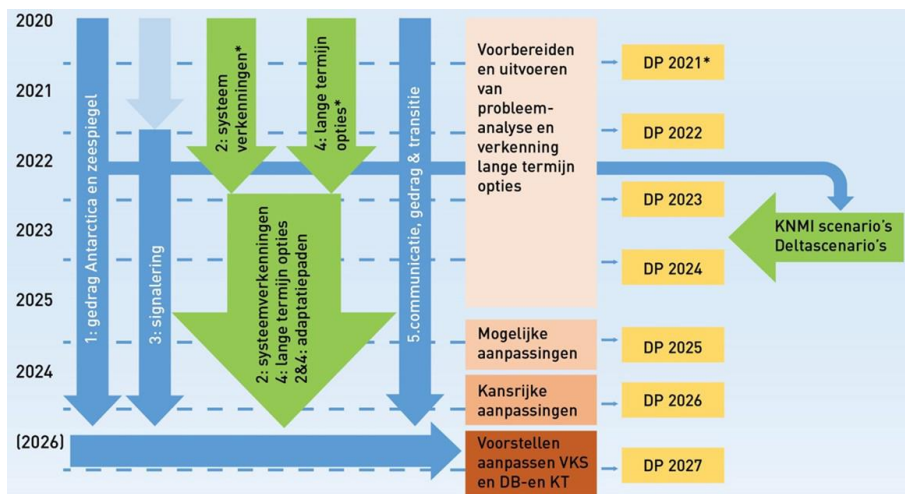
versterking van de keringen nodig om aan de vereiste overstromingskans te voldoen. De studie in dit project, zogenaamd systeemanalyse waterveiligheid, dient begrip van en inzicht te geven in het effect van zeespiegelstijging op de belastingen en de doorwerking daarvan op de overstromingskans. Vervolgens wordt de versterkingsopgave (ruimtebeslag en kostenindicatie) in beeld gebracht en worden overige relevante waterstaatkundige indicatoren ten behoeve van de houdbaarheid van de voorkeursstrategieën (VKS) waterveiligheid van het Deltaprogramma uitgerekend. Het KP ZSS gebruikt de resultaten van deze studie om in de volgende fase van Spoor II samen met de DP-regio's de impact van zeespiegelstijging op verschillende functies in beeld te brengen, de houdbaarheid van de voorkeursstrategie te duiden en oprekmogelijkheden te verkennen.

1.3 Positionering Spoor II Systeemanalyse waterveiligheid

De systeemanalyse waterveiligheid is onderdeel van Spoor II - Systeemverkenningen. De kennisontwikkeling van Spoor II is gericht op inzicht in de vraag:

'Tot hoeveel stijging volstaan de voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma en zijn aanpassingen mogelijk om deze strategieën langer vol te houden?'

Binnen het Spoor II zijn drie thema's geïdentificeerd: Waterveiligheid (keringen en kunstwerken), Zandige Kust (lange-termijn kustontwikkeling), en Zoetwater (verziltning en direct daaraan gekoppeld peilbeheer).



Figuur 1: Globale planning van de vijf sporen van KP ZSS. (bron: [Rijkswaterstaat, 2022a] - Ketenaanpak WV KP ZSS spoor 2 - Samenvatting modelaanpak WV bij ZSS).

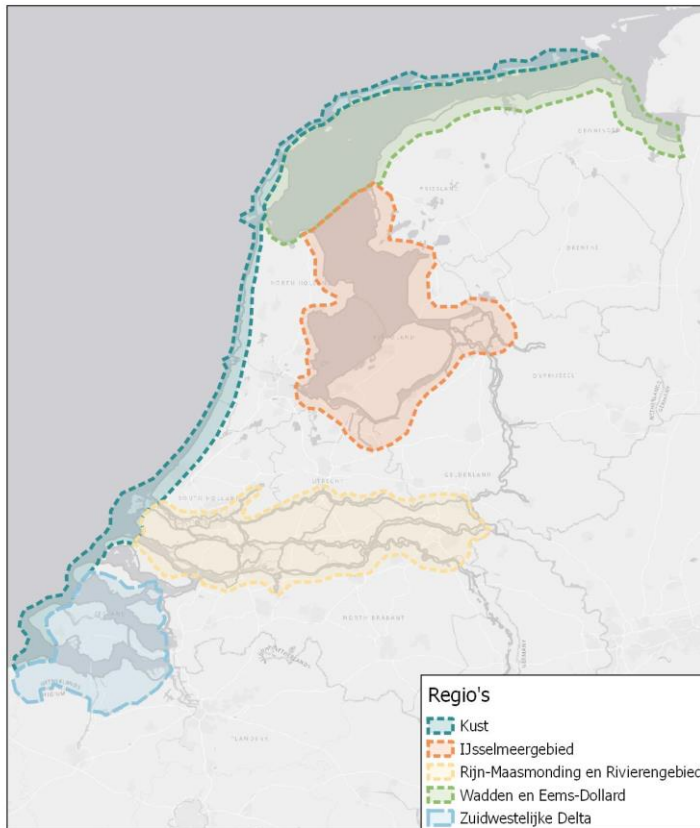
De doelstelling van spoor II Systeemverkenningen van KP ZSS is om:

- De waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging op de huidige watersystemen te bepalen;
- De mate van houdbaarheid van de voorkeursstrategieën (VKS) te duiden door waterstaatkundige effecten en andere effecten op gebiedsfuncties in beeld te brengen;
- Te verkennen en in beeld brengen:
 - wat de mogelijkheden voor het oprekken van de huidige VKS zijn;
 - wat de kansrijkheid van lange-termijn oplossingsrichtingen is; de lange-termijn oplossingsrichtingen worden in Spoor IV geagendeerd.

Dit rapport zal enkel het eerste punt behandelen.

1.4 Scope

De beleidsstudie is uitgevoerd voor alle dijken, dammen, duinen en een selectie van kunstwerken met een waterkerende functie waarvoor verwacht wordt dat de zeespiegelstijging invloed heeft op de waterveiligheidsopgave. De resultaten zijn gerapporteerd per deelgebied in onderliggende rapportages. Een overzicht van de deelgebieden is gegeven in Figuur 2.



Figuur 2: Scope dijken, dammen, duinen en kunstwerken in de bovenregionale synthese. In het Rivierengebied is voor waterveiligheid de bovenstroomse begrenzing van de Nederrijn-Lek, de IJsselkop en van de Waal de Pannerdenschekop. Voor de Maas reikt de scope tot Mook. Delen die verder bovenstrooms liggen vallen buiten de scope, omdat de beschouwde niveaus van zeespiegelstijging op waterveiligheid geen invloed hebben.

De waterveiligheidsopgave is per normtraject¹ (hierna traject genoemd) bepaald. De waterveiligheidsopgave voor de duinen is bepaald per kustdoorsnede². De kunstwerken zijn per object beschouwd. Omdat deze beleidsstudie gebaseerd is op landelijk uniforme uitgangspunten, is het schaalniveau van trajecten het meest passend.

¹ Een normtraject is een dijktraject of duintraject – bestaande uit kleinere dijkvakken of kustvakken – dat direct bescherming biedt tegen een overstroming vanuit het hoofdwatersysteem. Voor elk dijkvak of kustdoorsnede is de waterveiligheidsopgave bij de ondergrensnorm bepaald. Voor elk normtraject zijn eisen geformuleerd in termen van overstromingskansen. Deze zijn vastgelegd in de Waterwet. Een overstromingskans is een kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor het door het dijktraject beschermde gebied zodanig overstromt dat dodelijke slachtoffers of substantiële economische schade ontstaan.

² Per kusttraai waarvoor JARKUS metingen beschikbaar zijn.

In het Rivierengebied is voor waterveiligheid de bovenstroomse begrenzing van de Nederrijn-Lek, de IJsselkop en van de Waal de Pannerdensch kop. Voor de Maas reikt de scope tot Mook.

Voor de Grevelingen, het Volkerak-Zoommeer en het Schelde-Rijnkanaal is middels de gehanteerde uitgangspunten in deze studie verondersteld dat zeespiegelstijging geen impact heeft op de huidige voorkeursstrategieën van de regionale Deltaprogramma's. Het voortvloeiende peilverschil onder extreme condities door deze uitgangspunten, en de kosten voor het handhaven van het vaste peil op Grevelingen, Volkerak-Zoommeer en het Schelde-Rijnkanaal en daarmee de instandhouding van de waterstandsverschillen tussen deze watersystemen en omliggende watersystemen, zijn niet gekwantificeerd in deze studie.

De Afsluitdijk is buiten de scope van dit rapport gehouden omdat deze momenteel in versterking is. De veronderstelling is dat de Afsluitdijk tot ongeveer 2 tot 3 meter zeespiegelstijging veiligheid tegen overstromingen in het achterland zal bieden³. De kunstwerken die onderdeel zijn van de Afsluitdijk zijn wel beschouwd.

De Oosterscheldekering is een belangrijk onderdeel van de Zuidwestelijke Delta. De Oosterscheldekering is een complex kunstwerk dat niet op eenvoudige wijze te beschouwen is. In de komende jaren volgt een uitgebreide studie van Rijkswaterstaat Zee en Delta naar de effecten van zeespiegelstijging op de Oosterscheldekering. Deze resultaten zullen op een later moment aan het KP ZSS worden toegevoegd. In deze studie worden enkele grove uitgangspunten voor de Oosterscheldekering gehanteerd met betrekking tot vervanging of renovatie en bijbehorende kosten.

De Europoortkering (Maeslantkering en Hartelkering), Hollandse IJsselkering en Haringvlietsluizen zijn wel onderdeel van de scope volgens de huidige uitgangspunten.⁴

1.5 Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1

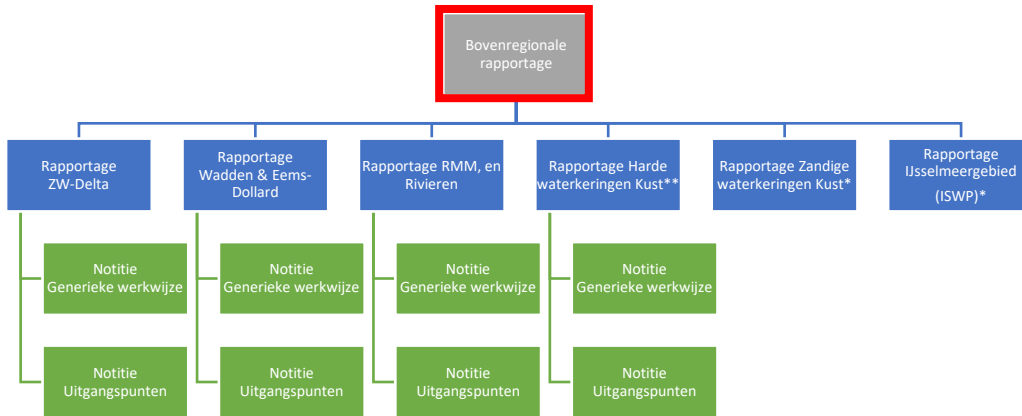
Voor de systeemanalyse waterveiligheid van Spoor II zijn 6 rapportages per regio van het Deltaprogramma opgesteld. Deze rapportages geven een beschouwing op de rekenkundige uitkomsten van Spoor II van het KP ZSS. Voor 4 regio's van het Deltaprogramma: Zuidwestelijke Delta, Waddengebied (inclusief Eems-Dollard), Kust (alleen harde waterkeringen kust) en Rijn-Maasmonding en Rivierengebied zijn de rapportages opgesteld door de combinatie HKV, Witteveen+Bos en IV-Infra ([Rijkswaterstaat,2023a], [Rijkswaterstaat,2023b], [Rijkswaterstaat,2023c] en [Rijkswaterstaat,2023d]). De systeemanalyses voor de Zandige waterkeringen Kust [Rijkswaterstaat,2022a] en IJsselmeergebied [Rijkswaterstaat,2019] zijn door Rijkswaterstaat gerapporteerd. De systeemanalyse IJsselmeergebied is ook bekend onder de naam Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) (2016-2019).

De bovenregionale synthese is geschreven op basis van deze 6 regio rapportages. Bij de bovenregionale rapportage hoort het duidingskader [RHDHV, 2021] om de rekenkundige resultaten te kunnen vertalen naar een oordeel over de houdbaarheid van de voorkeursstrategieën. Het duidingskader en de doorvertaling naar houdbaarheid vallen buiten de scope van deze studie.

³ Het ontwerp van de Afsluitdijk is gebaseerd op een relatief laag kritisch overslagdebiet van 10 l/s/m. Nieuwe dijken kunnen over het algemeen weerstand bieden tegen 100 l/s/m. De onderbouwing hiervan wordt gegeven in een onderzoeksrapport van Daneshi (2023).

⁴ Dit betekent dat de Europoortkering en de Hollandse IJsselkering respectievelijk een faalkans van 1/100 en 1/2.000 per sluitvraag hebben.

Systeemanalyse waterveiligheid Spoor II – fase 1



*) De systeemanalyses voor de Zandige waterkeringen Kust en het IJsselmeergebied zijn door Rijkswaterstaat uitgevoerd en gerapporteerd. In deze bovenregionale rapportage worden de resultaten voor deze Zandige waterkeringen Kust en het IJsselmeergebied geïntegreerd met de andere gebieden.

**) De systeemanalyses voor het Flauwe Werk, Veerse Gatdam en Brouwersdam zijn door Rijkswaterstaat uitgevoerd ([Rijkswaterstaat,2022a], [Rijkswaterstaat,2022b] en [Rijkswaterstaat,2022c]). De resultaten worden geïntegreerd in de rapportage Harde waterkeringen Kust [Rijkswaterstaat,2023d].

Figuur 3: Positionering Bovenregionale rapportage.

2 Bovenregionaal beeld

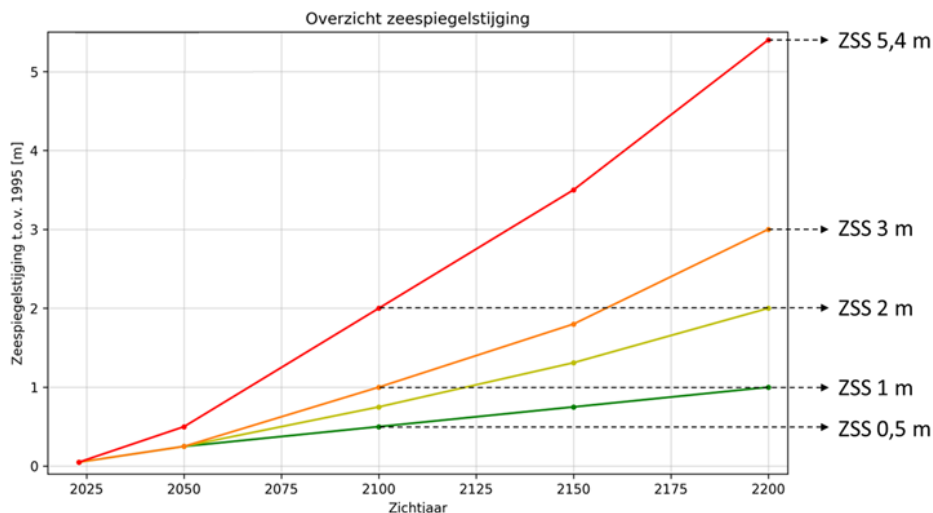
2.1 Inleiding

In de Systeemanalyse Waterveiligheid is onderzocht wat de impact is van diverse niveaus van de zeespiegelstijging op de houdbaarheid en potentiële oprekmogelijkheden van het huidige hoofwatersysteem. Met een oprekmogelijkheid wordt bedoeld het in essentie handhaven van de huidige regionale voorkeurstrategie door deze op punten aan te passen. Zodoende kunnen grootschalige systeemingenrepen uitgesteld worden (systeem verlengende maatregelen). De consequenties van een stijgende zeespiegel zijn inzichtelijk gemaakt op de:

1. Hydraulische belastingen (waterstanden en golven);
2. Versterkingsopgave (verwachte hoogte en breedte van primaire waterkeringen) en potentiële ruimtelijke knelpunten;
3. Kosten voor benodigde versterking van duinen, dijken en kunstwerken (inclusief zeesluizen).

Daarna volgt een reflectie op de grootste bronnen van onzekerheid in de gevolgde aanpak en op enkele potentiële oprekmogelijkheden in het huidige watersysteem aan de hand van gevoeligheidsanalyses.

Voor 5 verschillende zeespiegelstijgingen (0,5 / 1 / 2 / 3 / 5,4 m)⁵ volgen indicaties voor de te verwachten waterstanden en minimaal benodigde kruinhoogtes (ook wel het Hydraulisch Belastingniveau genoemd, HBN). Op basis van die informatie, gecombineerd met specifieke informatie over de aanwezige hoogte en opbouw van de waterkeringen en kunstwerken, worden uitspraken gedaan over de te verwachten kosten. Deze analyses zijn gedaan langs verschillende tijdlijnen die een mate van zeespiegelstijging tussen nu en 2200 beschrijven (Figuur 4) [Rijkswaterstaat, 2021a].



Figuur 4: Volgens tijdlijnen zijn voor verschillende zeespiegelstijgingen indicaties van de te verwachten waterstanden, minimaal benodigde kruinhoogtes en kosten.

⁵ Voor de watersystemen Oosterschelde en de Zandige Waterkeringen langs de Kust is de impact bepaald tot een zeespiegelstijging van 3 m. De berekening voor 5,4 m zeespiegelstijging voor deze watersystemen volgt in een latere fase van het KP ZSS. Voor het IJsselmeergebied zijn in de in de ISWP-studie beschouwde tijdlijnen tot een zeespiegelstijging van 1,75 m vertaald en geëxtrapoleerd naar een zeespiegelstijging van 5,4 m.

Voor de kosten is niet alleen de absolute waarde van de zeespiegelstijging van belang, maar ook de snelheid waarmee de stijging plaatsvindt. Als bijvoorbeeld een zeespiegelstijging van 2 m in zichtjaar 2200 optreedt, dan geeft dat een andere kostenschatting dan wanneer dezelfde mate van zeespiegelstijging eerder optreedt (bijvoorbeeld 2 m in 2100). Naarmate de zeespiegelstijging zich sneller ontwikkelt zal de benodigde aanpassing per versterkingsstap aan de waterkeringen groter zijn, het aantal versterkingsronden om te voldoen aan dezelfde mate van zeespiegelstijging zal echter afnemen. Met name dat laatste is gunstig voor de kosten, omdat verreweg de grootste bijdrage aan de totale kosten van een dijkversterking volgt uit de vaste kosten (als je ergens aan de slag gaat kost het relatief weinig om iets meer te doen). Dus ondanks dat de benodigde aanpassingen aan de waterkeringen per versterkingsstap groter zullen worden met een stijgende zeespiegel, kunnen de kosten om aan een bepaalde mate van zeespiegelstijging te voldoen in totaal lager uitvallen. De kosten per m zeespiegelstijging zullen bij een snellere zeespiegelstijging lager uitvallen dan bij een langzamere zeespiegelstijging. De jaarlijkse kosten zijn bij een snellere zeespiegelstijging wel hoger dan bij een langzamere zeespiegelstijging.

Op basis van bovenstaande constatering wordt voor de vergelijkbaarheid het beeld voor de opgave en kosten besproken aan de hand van een bepaalde mate van zeespiegelstijging passend bij de voorkeursstrategie van de regionale Deltaprogramma's in het zichtjaar 2200. Alle figuren en tabellen in deze rapportage zijn passend bij zichtjaar 2200, tenzij anders is vermeld. Ten aanzien van de bodemontwikkeling is de voorkeursstrategie van de regionale Deltaprogramma's Zuidwestelijke Delta en Kust het laten meegroeien van de bodem met de zeespiegelstijging. Voor het Deltaprogramma Wadden is uitgegaan van het voortzetten van de huidige trend van de bodemontwikkeling [Elias et al., 2016].

Tabel 1: Relatie zeespiegelstijging ten opzichte van zichtjaar 1995 en 2050, waarbij tussen 1995 en 2050 uitgegaan is van een zeespiegelstijging van 0,25 m (Referentie in tijdlijn Laag). Hierbij is de veronderstelling dat de zeespiegelstijging in de huidige situatie (2023) ten opzichte van 1995 circa 0,05 m is.

Zeespiegelstijging ten opzichte van	
Zichtjaar 1995	Zichtjaar 2050
1,0 m	0,75 m
2,0 m	1,75 m
3,0 m	2,75 m
5,4 m	5,15 m

De kosten in deze studie zijn bepaald uitgaande van een zeespiegelstijging die exact volgens de tijdlijnen in Figuur 4 verloopt. In werkelijkheid is de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt onzeker en wordt de zeespiegelstijging binnen een ontwerpproject zo goed mogelijk geprobeerd in te schatten voor een periode van 50 jaar voor dijken en 100 jaar voor constructies en kunstwerken (levensduur ontwerp). De gepresenteerde kostenschattingen zijn daarom in dat opzicht aan de onderzijde van de bandbreedte, wanneer de zeespiegelstijging versnelt zal de veronderstelde levensduur van de versterkingen immers niet gehaald worden en zullen meer versterkingsrondes nodig zijn om uiteindelijk aan dezelfde mate van zeespiegelstijging te voldoen in 2200.

Op dit moment voldoen nog niet alle waterkeringen aan de norm uit de Waterwet (maximale overstromingskans) en zijn ook nog niet alle waterkeringen aangemerkt voor een versterkingsronde binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma. Om op een landelijk consistente manier verschillende watersystemen met elkaar te kunnen vergelijken, is aangenomen dat alle dijken en kunstwerken in 2050 voldoen aan de

norm in de Waterwet ("systeem op orde"). Zo wordt een pragmatische knip gelegd tussen de kosten die gemaakt moeten worden om aan de nieuwe normen te voldoen en de kosten die gemaakt moeten worden ten gevolge van zeespiegelstijging.

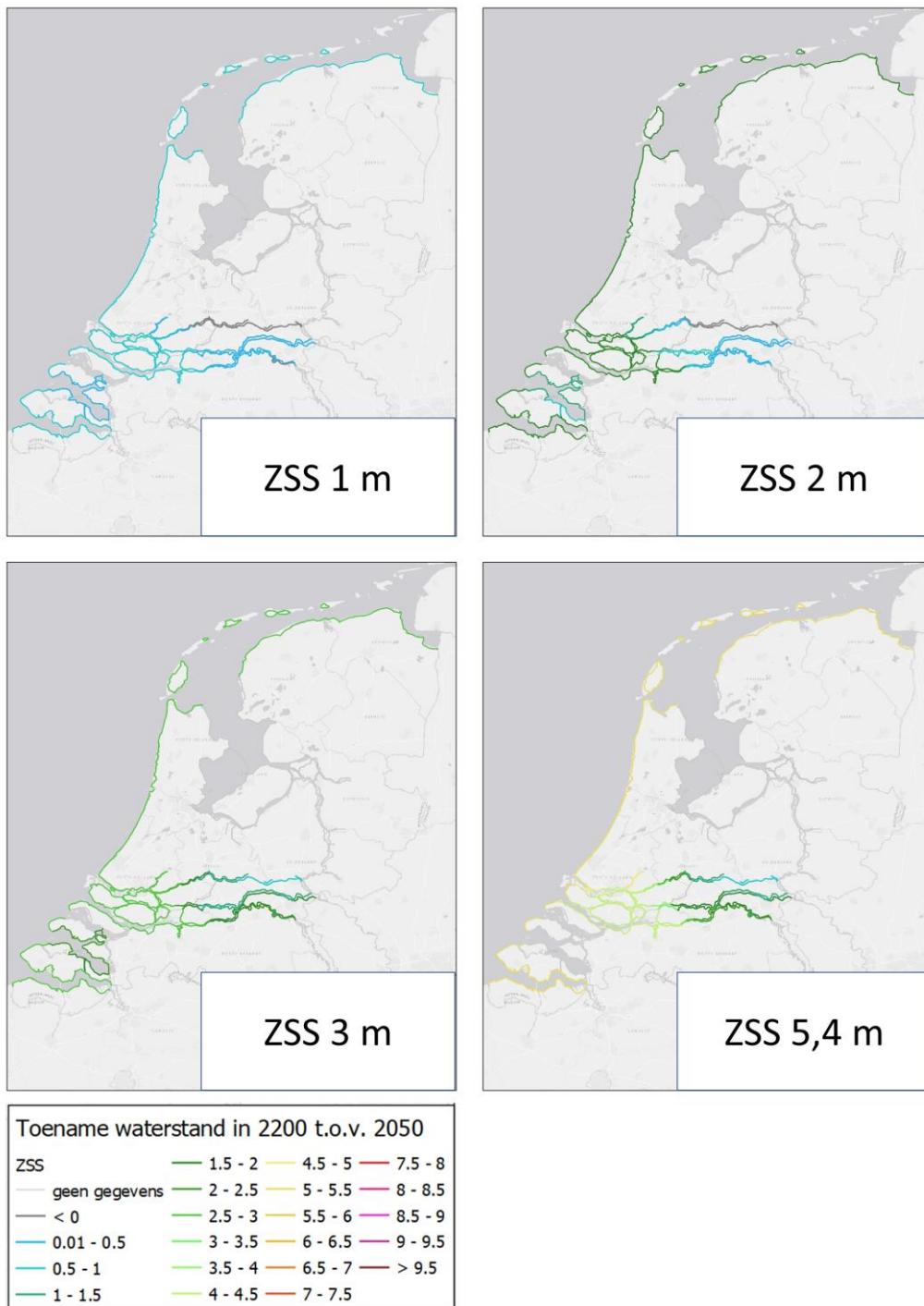
2.2 Invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen

In deze paragraaf beschouwen we de invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen. Door een stijgende zeespiegel nemen de hydraulische belastingen toe, zowel in de dagelijkse situatie als bij extremere omstandigheden. Voor de impact van zeespiegelstijging op de waterveiligheidsopgave van de primaire waterkeringen is het van belang te weten wat het effect van zeespiegelstijging is op de waterveiligheid en te voldoen aan de normen van de Waterwet (waarop de waterkeringen beoordeeld worden). Een toenemende zeespiegel heeft niet alleen invloed op de waterveiligheid van de primaire waterkeringen, maar ook op de overstroming van buitendijkse gebieden. In deze beleidsstudie is het effect van verschillende niveaus van zeespiegelstijging beschouwd (tot ruim 5 m, aangeduid als 5 m), met uitzondering van de Oosterschelde en de duinenkust waarvoor in deze fase van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging tot een zeespiegelstijging van maximaal 3 m is gekeken. In een latere fase zal ook de impact van een zeespiegelstijging van 5 m in deze gebieden beschouwd worden.

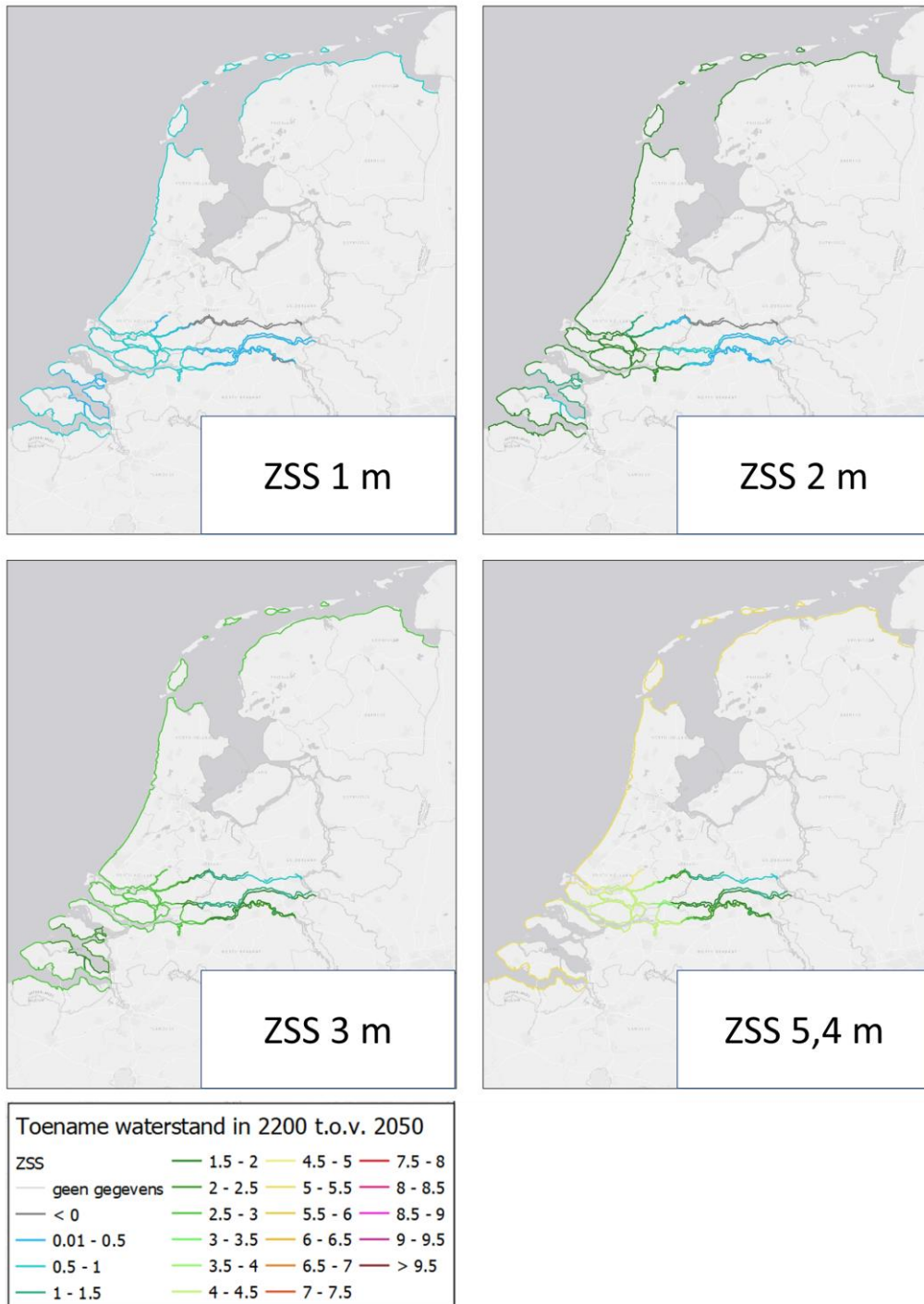
2.2.1 Impact op de waterstanden

Gewoonlijk werkt zeespiegelstijging direct door op de dagelijkse waterstanden in de betreffende watersystemen. In het geval van een storm, in combinatie met zeespiegelstijging, vallen de extreme condities hoger uit dan nu. Dit wordt hierna per deelgebied besproken.

De stormvloedkeringen dienen in het geval van storm het achterliggende gebied te beschermen tegen hoge zeewaterstanden door stormvloed. Gewoonlijk staan de stormvloedkeringen open, wat betekent dat de stijging van de zeespiegel direct doorwerkt op de dagelijkse waterstanden, ook in het gebied achter de stormvloedkeringen. De effecten van de stormvloedkeringen op het achterliggende gebied verschillen per deelsysteem en worden hierna afzonderlijk besproken.



Figuur 5 geeft een beeld van de toename van de waterstand bij de norm ten opzichte van 2050 per traject voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging.



Figuur 5: Toename van het waterstand bij de norm ten opzichte van 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging (ZSS). Het IJsselmeergebied is niet opgenomen, vanwege de afwijkende tijdlijnen binnen de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) IJsselmeergebied [Rijkswaterstaat, 2019] ten opzichte van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Voor de Oosterschelde zijn alleen de hydraulische belastingen bepaald tot en met 3 m.

Oosterschelde

De Oosterscheldekering zorgt ervoor dat waterstanden op het Oosterschelde bekken tijdens een storm op zee relatief laag blijven. Naarmate de zeespiegel stijgt, zal de Oosterscheldekering (bij gelijkblijvend sluitpeil) vaker moeten sluiten. Elke keer dat de kering moet sluiten, is er een kans dat dit niet helemaal correct gaat. Als door zeespiegelstijging het aantal sluitingen toeneemt, zal ook het aantal keren dat de kering niet correct sluit toenemen. Door de hogere waterstanden op zee, zullen ook zullen de waterstanden (gemiddeld gezien over een groot aantal gevraagde sluitingen) op het Oosterscheldebekken toenemen als de zeespiegel stijgt. Ook zal vanaf een bepaalde zeewaterstand de kering gaan overlopen. Vanaf een niveau van NAP +5,6 m gebeurt dit in het stroomgat van de Hammen en vanaf NAP +5,8 m gebeurt dit ook in de Roompot en de Schaar. Bij zeespiegelstijging zal dat eerder gebeuren. Het aantal sluitingen van de Oosterscheldekering als functie van zeespiegelstijging wordt in paragraaf 2.2.3 besproken.

Als het sluitpeil van de stormvloedkering gelijk blijft en de zeespiegel blijft stijgen, zal de kering vaker en ook langer dicht zijn, tot uiteindelijk een bijna continu gesloten situatie. Bij hogere waarden van zeespiegelstijging is in de analyses het sluitpeil van de Oosterscheldekering daarom verhoogd (de kering sluit vanaf een hogere zeewaterstand). Dit is als gevoeligheidsanalyse onderzocht, zie paragraaf 2.7. Kort gezegd zal door het verhogen van het sluitpeil de toename van het aantal sluitingen door zeespiegelstijging worden beperkt. Dit resulteert in hogere waterstanden in het achterliggende gebied.

In de Rijn-Maasmonding is het huidige systeem een "afsluitbaar-open" systeem, waarbij de Europoortkering (bestaande uit de Maeslantkering in de Nieuwe Waterweg, de Hartelkering in het Hartelkanaal en de tussenliggende verbindingdijk) dicht gaat als verwacht wordt dat de waterstand het sluitpeil van NAP +3,0 m bij Rotterdam (of NAP +2,9 m bij Dordrecht) overschrijdt. Zolang de waterstand bij Rotterdam (of Dordrecht) beneden dit sluitpeil ligt, dringt de zeespiegelstijging direct door op het achterliggende gebied.

Bij een gelijkblijvend sluitpeil zal de Europoortkering vaker dicht gaan door zeespiegelstijging. Per sluitvraag verandert de kans op falen van het sluiten weliswaar niet, maar doordat de Europoortkering vaker moet sluiten, neemt wel het aantal keer dat de kering moet sluiten per jaar toe. Door zeespiegelstijging zullen hogere waterstanden op zee vaker optreden en dat zal ook in het achterliggend gebied vaker gaan gebeuren. Dit heeft ook consequenties voor de buitendijks gelegen gebieden. Door zeespiegelstijging zullen de waterstanden toenemen, ook als de stormvloedkeringen nog niet moeten sluiten.

Om het aantal keren dat de Europoortkering bij een toenemende zeespiegel moet sluiten te beperken (met name voor de toegang van de haven voor de scheepvaart), is voor de hogere zeespiegelstijgingen in deze studie gekozen om het sluitpeil te verhogen. De sluitfrequentie van de Europoortkering als functie van zeespiegelstijging wordt in paragraaf 2.2.3 besproken. Vanaf een niveau van NAP +5,0 m (met of zonder zeespiegelstijging) beginnen de Maeslantkering en delen van de verbindende keringen (enkele overlaten) over te lopen en het achterliggende gebied in te stromen. De Hartelkering loopt over vanaf een niveau van NAP +3,0 m. Bij zeespiegelstijging zal dat eerder gebeuren.

Hoe verder stroomopwaarts een locatie van Hoek van Holland en de Haringvliet sluizen vandaan ligt, hoe minder het effect van de stijgende zeespiegel doorwerkt, door de tegenwerkende druk van de afvoer en het verhang van de rivieren. In het algemeen geldt dat hoe hoger de mate van zeespiegelstijging, hoe verder de stijgende zeespiegel doorwerkt op de rivieren in bovenstroomse richting. Als de Europoortkering correct sluit en nog niet overloopt (zie hierna), zorgt deze ervoor dat de hoge waterstanden van een storm niet meer doorwerken op het achterliggende gebied. Op het moment dat de stormvloedkeringen zijn gesloten,

blijven de waterstanden in het gebied echter nog steeds, maar veel beperkter, toenemen door de aanvoer van water via de rivieren. Hoe langer de stormvloedkeringen zijn gesloten en hoe hoger de afvoer vanaf de rivieren, hoe meer de waterstanden in het gebied achter de stormvloedkeringen zullen stijgen. Daarom is het van groot belang de stormvloedkeringen in deze situatie zo snel mogelijk ook weer te openen, zodat het extra water dat zich heeft opgebouwd achter de stormvloedkeringen vrij naar zee kan stromen. Waterstanden en golven in de Rijn-Maasmonding worden dus niet alleen beïnvloed door waterstanden vanaf zee, of door afvoer vanaf de rivier, maar ook door het (sluit)gedrag van de stormvloedkeringen en de wind.

In deze beleidsstudie is het uitgangspunt gehanteerd dat de Maeslantkering een faalkans heeft van 1/100 per sluitvraag. Dat wil zeggen dat gemiddeld één van de 100 keer dat deze dicht moet gaan, het sluitproces faalt (de kering niet volledig sluit) en dus een hoge zeewaterstand het gebied instroomt. Dit leidt tot hoge waterstanden in het hele gebied van de Rijn-Maasmonding en de rivieren Nederrijn-Lek, Waal en Maas. Doordat in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied het effect van zeespiegelstijging in combinatie met een andere rivierafvoer in de verschillende scenario's is beschouwd, is niet eenduidig te zeggen hoe ver de invloed van zeespiegelstijging doorwerkt op de rivieren.

De Hollandse IJsselkering zorgt ervoor dat de waterstanden op de Hollandse IJssel niet te hoog worden. In lijn met de voorkeursstrategie is de werking van de Hollandse IJsselkering beschouwd met een faalkans van 1/2.000 per sluitvraag (de verwachte faalkans in 2050). De Hollandse IJsselkering gaat dicht bij een sluitpeil van NAP +2,25 m bij Krimpen a/d IJssel, gekoppeld aan een verwachte waterstand bij Hoek van Holland groter of gelijk aan NAP +3,0 m. Bij gelijkblijvend sluitpeil zullen waterstanden aan de Rotterdamse zijde van de Hollandsche IJsselkering toenemen door zeespiegelstijging, waardoor ook vaker hogere waterstanden op de Hollandse IJssel optreden. De stormvloedkering zal ook vaker moeten sluiten door zeespiegelstijging. De sluitfrequentie van de Hollandse IJsselkering als functie van zeespiegelstijging wordt in paragraaf 2.2.3 besproken. Net als bij de Oosterscheldekering en de Europoortkering is ook voor de Hollandsche IJsselkering het sluitpeil verhoogd voor de hoogste zeespiegelstijgingen. De Hollandse IJsselkering zal overlopen vanaf een waterstand van NAP +5m, waardoor er vanaf dat niveau een flink extra volume water het achterliggend gebied instroomt.

De Haringvlietsluizen (kruinhoogte op NAP+5 m) zorgen ervoor dat bij hoge rivierafvoeren spuien onder vrij verval via het Haringvliet naar de Noordzee mogelijk is. De waterstanden aan de binnenzijde (Haringvliet) stijgen mee met de zeespiegel en dit beïnvloedt ook de waterstanden in de rest van de Rijn-Maasmonding. Als het aantal stormen gelijk blijft, zal spuien onder vrij verval hetzelfde blijven. Neemt dit aantal toe, zal door zeespiegelstijging spuien onder vrij verval minder vaak mogelijk zijn. Hoe groot deze beperking bij zeespiegelstijging wordt, is in deze studie niet expliciet onderzocht, al is in een gevoeligheidsanalyse wel gekeken naar het overlopen ervan in combinatie met andere stormvloedkeringen.

IJsselmeergebied (IJsselmeer, Markermeer, Veluwe randmeren en Vecht-IJsseldelta)

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is een systeemanalyse uitgevoerd, waarvoor zoveel mogelijk een landelijk uniforme aanpak is gehanteerd. Voor het IJsselmeer- en Markermeergebied en de Vecht-IJsseldelta is het effect van klimaatverandering reeds onderzocht in de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) IJsselmeergebied [Rijkswaterstaat, 2019]. Op gehanteerde uitgangspunten wijkt deze studie lichtelijk af van de landelijke uniforme aanpak in de andere watersystemen. Binnen ISWP IJsselmeergebied zijn twee andere tijdlijnen (standaard en versneld) met ook andere uitgangspunten beschouwd dan de vier tijdlijnen die binnen KP ZSS zijn gehanteerd. De resultaten van de kostenberekeningen uit de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer zijn

daarom vertaald naar de tijdlijnen uit het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Op die manier zijn de beschikbare resultaten uit de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer zoveel mogelijk geïntegreerd met de aanpak in de Systeemanalyses waterveiligheid voor de andere regio's van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.

Eén van de belangrijkste (beleids)uitgangspunten die binnen de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer is gehanteerd is dat de Afsluitdijk bij stijging van de zeespiegel op hoogte en sterkte gehouden wordt. In alle binnen de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer onderzochte peilbeheeralternatieven is daarom de Afsluitdijk niet onderscheidend. De kosten voor de Afsluitdijk als dam zijn niet meegenomen. De kosten voor de schut- en spuisluizen in de Afsluitdijk zijn wel meegenomen. De meerpeilen van het IJssel- en Markermeer worden in de basis gehandhaafd. Het streefpeil van het IJsselmeer (incl. Ketelmeer, Vossemeer en Zwarte Meer) en Markermeer (incl. Gooimeer) is NAP-0,4 m in de winter en NAP-0,2 m in de zomer. Het streefpeil van de Veluwerandmeren is NAP-0,3 m in de winter en NAP-0,05 m in de zomer.

Daarnaast vindt een gematigde beheersing van de meerpeilpieken plaats: meerpeilpieken met een frequentie van 1/10 per jaar worden vastgehouden (dit aantal neemt niet toe). Na 2050 wordt 0,3 m meerpeilstijging⁶ (zowel IJssel- als Markermeer) open gehouden als beleidsruimte om, indien nodig, beperkt met de zeespiegelstijging mee te stijgen. Dit geeft een veiligheidsopgave in het IJsselmeergebied, ook door een toename van de afvoer vanaf de IJssel. Op basis van expert judgement van pompdeskundigen is binnen ISWP geconstateerd dat het mogelijk moet zijn om het meerpeil te handhaven tot zeespiegelstijgingen van 5 m.

De spuisluizen in de Afsluitdijk zorgen ervoor dat bij een hoog peil op het IJsselmeer (door een hoge IJssel- en/of Vechtafvoer) kan worden gespuid op de Waddenzee. De huidige spuicapaciteit van de spuisluizen in de Afsluitdijk komt overeen met de uitgangspunten uit de ISWP studie [Rijkswaterstaat, 2019]. In Rijkswaterstaat (2021b) is onderzocht dat de rol van spuisluizen in de waterafvoer afneemt bij stijging van de zeespiegel. Om het huidige gemiddelde winterpeil te handhaven zijn bij 50 cm zeespiegelstijging al pompen nodig, maar het aandeel van spuien in de waterafvoer is dan nog groot. Bij 1 m zeespiegelstijging wordt vrijwel geen water meer door de spuisluizen afgevoerd. De spuisluizen hebben dan enkel nog effect op de beheersing van de extremere meerpeilpieken. Bij meer dan 2 m zeespiegelstijging heeft spuien geen functie meer in het dagelijks beheer. Spuisluizen kunnen dan hooguit nog gezien worden als een laatste redmiddel bij grootschalig falen van de pompen (risicoreductie).

Waddenzee, Kust en Westerschelde

Voor de gebieden die niet beschermd worden door een stormvloedkering (Westerschelde, Noordzee en Waddenzee) is het uitgangspunt gehanteerd dat de dagelijkse en extreme waterstanden in gelijke mate als de zeespiegelstijging toenemen. Bij een zeespiegelstijging van bijvoorbeeld 1 m zal de waterstand ook grofweg 1 m hoger liggen ten opzichte van nu. Afhankelijk van het gekozen bodembeheer varieert dit getal iets per regio. In de Westerschelde en langs de kust is aangenomen dat de bodem meegroeit met de zeespiegel, waardoor de zeespiegelstijging exact doorwerkt in de waterstanden (precies 1 m dus). In de Waddenzee is aangenomen dat de huidige trend van de bodem zich voortzet (gedeeltelijk meegroeien), waardoor de zeespiegel soms wat meer en soms wat minder doorwerkt dan 1 m op de waterstanden.

⁶ In de hydraulische belastingen is gerekend met een vast meerpeil. De ruimte voor de meerpeilstijging van 0,3 m is niet meegenomen in de berekeningen.

2.2.2 Impact op de minimaal benodigde kruinhoogtes voor golfoverslag

Ook de hydraulische belastingen door golfoverslag nemen toe door zeespiegelstijging (zowel door hogere waterstanden als door hogere golven die ontstaan door de grotere waterdiepten). Uiteraard blijft ruimtelijke variatie (net als in de huidige situatie) bestaan door variatie in oriëntatie, strijklengten, bodemligging, voorlanden, etc. Figuur 6 geeft een beeld van de toename van de waterstand bij de norm ten opzichte van 2050 per traject voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging.

Oosterschelde

De Oosterscheldekering zorgt ervoor dat ook de gemiddelde toename van de hydraulisch belastingniveaus op de Oosterschelde minder groot is dan de stijging van de zeespiegel. Dit geldt in ieder geval tot een onderzochte zeespiegelstijging van +3 m. Logischerwijs is het effect van zeespiegelstijging op de hydraulisch belastingniveaus op de Oosterschelde hoger dan op de waterstanden, doordat de golven ook toenemen, tenzij de bodem volledig mee kan groeien met de zeespiegelstijging. Merk op dat niet is beschouwd of de huidige Oosterscheldekering deze extreme condities functioneel en constructief kan keren.

Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied

In de Rijn-Maasmonding neemt het hydraulisch belastingniveau netto net iets meer toe dan de stijging van de zeespiegel. De reden is dat de stormvloedkering de doordringing van de zeespiegelstijging in gesloten toestand weliswaar dempt, maar door de stijging van de zeespiegel zal het aantal sluitingen per jaar toenemen en daarmee ook het aantal keren per jaar dat de stormvloedkeringen niet correct sluiten. Door zeespiegelstijging neemt de kans op een hoge zeewaterstand toe en die werkt ook door in het gebied achter de stormvloedkeringen. Desalniettemin blijven de stormvloedkeringen een deel van de hoge zeewaterstand bij storm buiten houden. Net als bij de Oosterscheldekering is niet onderzocht of de huidige Europoortkering de extreme condities functioneel en constructief kan keren.

In het Rivierengebied nemen de hydraulische belastingniveaus minder toe dan de zeespiegelstijging, omdat naast de werking van de stormvloedkeringen het effect van zeespiegelstijging uitdempt in stroomopwaartse richting door tegendruk van de rivierafvoer. De hydraulische belastingniveaus nemen in het Rivierengebied wel toe door hogere rivierafvoeren. Bestaand beleid voor de afvoerverdeling, zoals "Lek Ontzien" zorgen ervoor dat de toename van de minimaal benodigde kruinhoogtes langs de Nederrijn-Lek minder is dan de Waal en de Maas.

IJsselmeergebied (IJsselmeer, Markermeer, Veluwe randmeren en Vecht-IJsseldelta)

De invloed van de zeespiegelstijging op het IJsselmeergebied is beperkt omdat er extra pompen worden ingezet. Door het aanpassen van de pompcapaciteit kan tot een zeespiegelstijging van 5 m een vast meerpeil gehandhaafd worden. De variaties in de minimaal benodigde kruinhoogten van de omliggende waterkeringen (en de bijbehorende kosten) worden veroorzaakt door de toename van de afvoer van de IJssel in de toekomst en de wind (scheefstand van het wateroppervlak en golven).

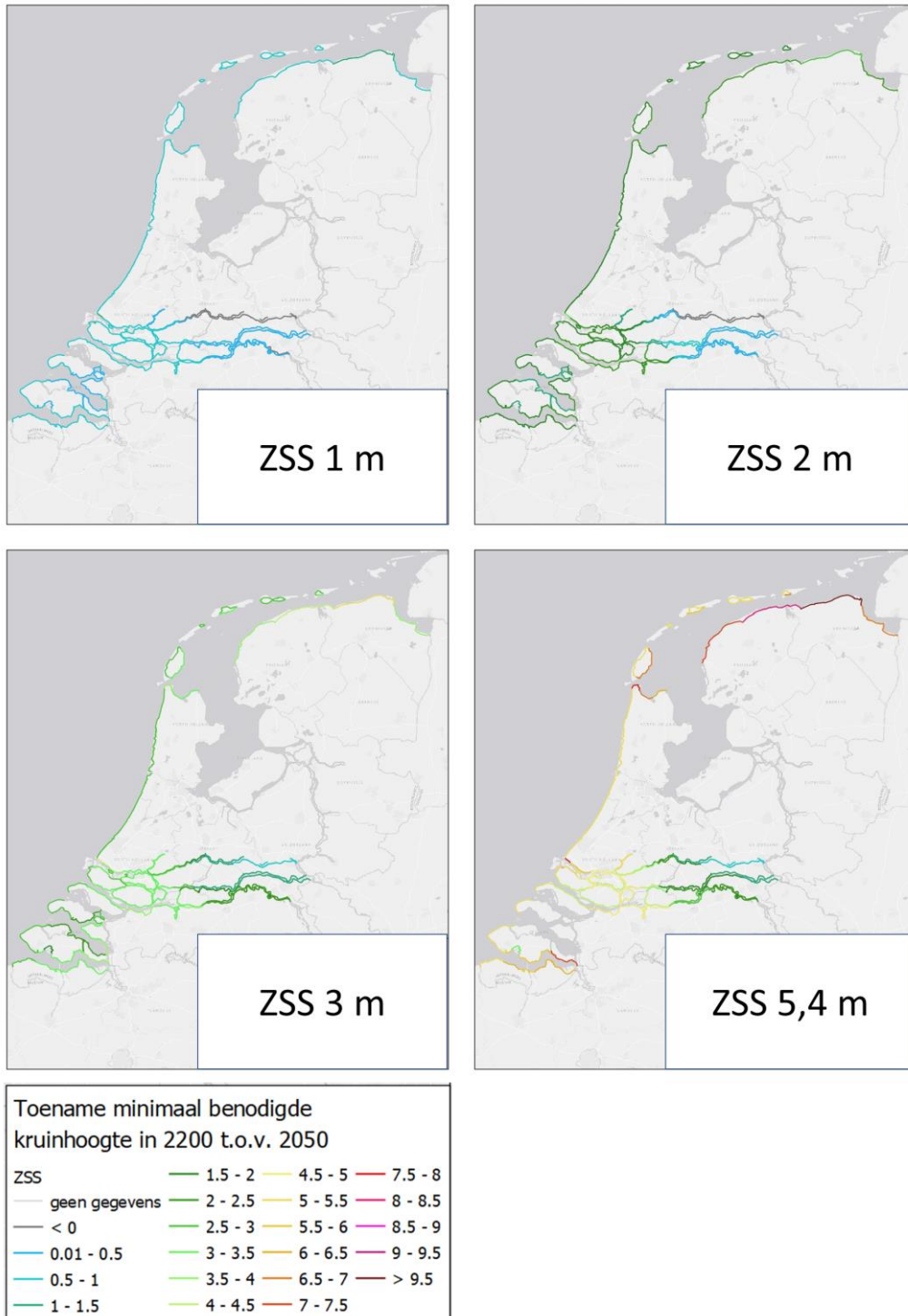
Kust en Westerschelde

Voor de kust en de Westerschelde is de voorkeursstrategie dat de bodem volledig meegroeit met de stijging van de zeespiegel. Op basis daarvan is aangenomen dat de hydraulische belastingniveaus in dezelfde mate toenemen als de zeespiegelstijging, want doordat de bodem meegroeit, neemt de waterdiepte (en dus de golven) niet toe.

Waddenzee

Voor de Waddenzee is de voorkeursstrategie dat de bodem de huidige gemeten trend volgt. Deze trend kan zowel eroderend als sedimentierend (aanzanding) zijn. Netto stijgt de zeespiegel sneller dan dat de bodem groeit, waardoor de toename

van de hydraulische belastingniveaus meer is dan de zeespiegelstijging. De grootste toename van de hydraulische belastingniveaus is in de Oostelijke Waddenzee tussen Lauwersmeer en Eemshaven, omdat hier de grootste golven optreden aan de teen van de dijk. Langs de Eems-Dollard zijn de golfhoogtes lager. Dit gebied ligt meer in de luwte, waardoor minder golfdoordringing optreedt.



Figuur 6: Toename van de minimaal benodigde kruinhoogte bij de faalkansen bij de norm ten opzichte van 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging

(ZSS). Hierbij past de morfologie volgens zichtjaar 2200. Het IJsselmeergebied is niet opgenomen, vanwege de afwijkende tijdlijnen binnen de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) IJsselmeergebied [Rijkswaterstaat, 2019] ten opzichte van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Voor de Oosterschelde zijn alleen de hydraulische belastingen bepaald tot en met 3 m. Voor de zandige waterkeringen langs de kust is de mate van duinafslag bepalend voor de opgave en zodoende is geen minimaal benodigde kruinhoogte bepaald. De weergegeven toename van de minimaal benodigde kruinhoogte voor de kust is een fictieve maat voor een waterkering, waarbij het kustfundament meegroeit met de zeespiegelstijging.

In Figuur 6 staat de gemiddelde toename van de hydraulisch belastingniveaus bij de norm per traject ten opzichte van 2050 passend bij zichtjaar 2200, voor een zeespiegelstijging van 0,75 m, 1,75 m, 2,75 m en 5,15 m (Tabel 1). In deze beleidsstudie is het uniforme uitgangspunt van een overslagdebiet van 5 l/s/m voor alle dijken gehanteerd. Dit leidt gemiddeld genomen tot wat hogere minimaal benodigde kruinhoogtes dan die uit de 1^e landelijke beoordelingsronde (LBO1) met het WBI2017. Voor de kunstwerken geldt dat de hoogteopgave is bepaald op basis van de overloopsituatie. Deze grovere benadering wijkt ook af van de 1^e landelijke beoordelingsronde (LBO1), waarin het overslagdebiet probabilistisch is bepaald en daarnaast rekening is gehouden met kombeging achter het kunstwerk.

2.2.3 Sluitfrequenties van de stormvloedkeringen

Zoals hiervoor beschreven zorgen de stormvloedkeringen ervoor dat, mits zij correct sluiten bij een storm, de hoge zeewaterstanden niet het achterliggend gebied instromen totdat deze beginnen over te lopen.

In deze beleidsstudie wordt de houdbaarheid van de huidige strategie verkend binnen de grenzen van het huidige watersysteem. Hierbij is aangenomen dat de stormvloedkeringen ook bij een stijgende zeespiegel kunnen blijven functioneren zoals in het huidige systeem en constructief stabiel blijven. Dit betekent dat ook bij hogere zeewaterstanden de stormvloedkeringen dezelfde betrouwbaarheid van het sluitproces kunnen garanderen. Binnen KP ZSS is uitgegaan van een faalkans van 1/100 per sluitvraag van de Europoortkering en van 1/2.000 per sluitvraag voor de Hollandsche IJsselkering. Voor de Haringvlietsluizen is de faalkans als verwaarloosbaar klein beschouwd. Ook voor de Oosterscheldekering gelden eisen aan de betrouwbaarheid van het sluitproces volgens dezelfde veiligheidsfilosofie als de Europoortkering en Hollandse IJsselkering, maar omdat de Oosterscheldekering uit meerdere objecten bestaat is dit niet eenvoudig in één getal te vatten.

De stormvloedkeringen sluiten als verwacht wordt dat het sluitpeil wordt overschreden. Als het huidige sluitpeil gehandhaafd blijft, dan betekent dit dat bij een stijgende zeespiegel de stormvloedkeringen vaker dicht zullen gaan en langer gesloten zullen zijn. Dit heeft consequenties voor andere functies zoals beheer- en onderhoud van de stormvloedkering, maar ook scheepvaart, buitendijkse gebieden, natuur/ecologie en morfologie. Deze effecten worden beschouwd in fase 2 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. In voorliggende studie is hierop geanticipeerd door bij hogere zeespiegelstijgingen de sluitpeilen van de verschillende stormvloedkeringen op basis van expert judgment te verhogen om het aantal sluitingen te beperken zodat het karakter van 'afsluitbaar open' gehandhaafd blijft. Het inzetpeil van de bergingsmaatregel Volkerak-Zoommeer is op eenzelfde manier verhoogd als het sluitpeil van de Maeslantkering. Het optimum tussen het aantal sluitingen, de waterstanden in het achterliggende gebied en de effecten van open en gesloten stormvloedkeringen op andere functies dient nader onderzocht te worden.

Tabel 2: Aantal sluitingen per jaar van de Oosterscheldekering, Europoortkering en Hollandse IJsselkering voor een bepaalde mate van zeespiegelstijging, passend bij andere (autonome) effecten in het zichtjaar 2200. Voor een zeespiegelstijging van 0,5 m en 1,0 m is uitgegaan van de huidige sluitpeilen. Afhankelijk van de stormvloedkering en de mate van zeespiegelstijging zijn de sluitpeilen verhoogd. De sluitfrequentie voor de Hollandse IJsselkering is bepaald op basis van de veronderstelling dat deze 10x vaker sluit dan de Europoortkering.

Zeespiegelstijging ten opzichte van 1995	Sluitfrequentie Oosterscheldekering	Sluitfrequentie Europoortkering	Sluitfrequentie Hollandse IJsselkering	Verhoging sluitpeil [m]
0,05 m (huidig)	1 / 2 jaar	1 / 18 jaar	1 / 2 jaar	0
0,5 m	4,5 per jaar	1 / 2 jaar	5 per jaar	0
1,0 m	45 per jaar	6 per jaar	60 per jaar	0
1,0 m	11 per jaar	Niet bepaald	Niet bepaald	0,25
1,5 m	46 per jaar	Niet bepaald	Niet bepaald	0,50
2,0 m	Niet bepaald	1 per jaar	10 per jaar	1,25
3,0 m	Niet bepaald	1 / 6 jaar	1,7 per jaar	2,50
5,4 m (*)	Niet bepaald	160 per jaar	160 per jaar	2,50

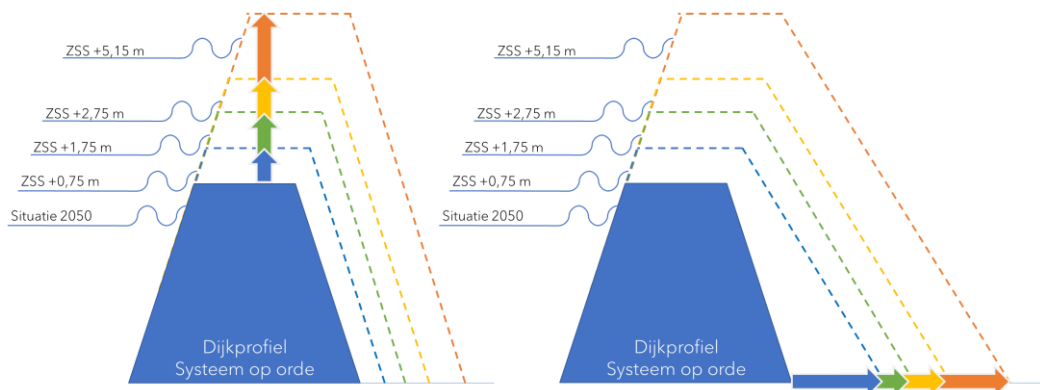
(*) De toename van de zeespiegelstijging is alleen verwerkt via de statistiek van de zeewaterstand, niet in de fysica (zelfde fysische toestand als bij 3 m zeespiegelstijging).

Het is goed om op te merken dat aangezien de hoogte van de schuiven van de Maeslantkering gelijk is aan NAP +5 m, dat bij een zeespiegelstijging van 5,4 m de stormvloedkering elk getij onder water zal staan.

2.3 Versterkingsopgave per watersysteem

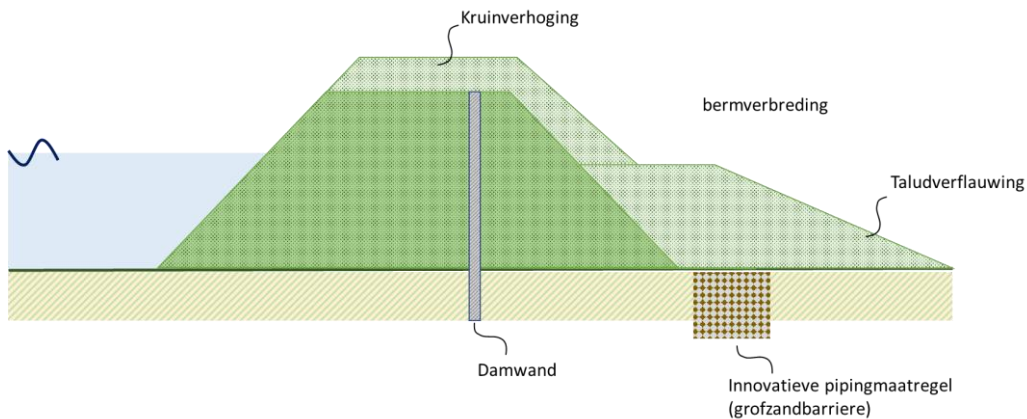
Het effect van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave van dijken en kunstwerken is bepaald door voor verschillende waarden van zeespiegelstijging te bepalen (1) wat de benodigde dimensies van de keringen zijn om aan de norm te blijven voldoen bij zeespiegelstijging, (2) waar er ruimtelijke knelpunten zijn en (3) wat de bijbehorende kosten zijn om de dijken en kunstwerken te versterken. Voor de dijken is de versterkingsopgave bepaald op basis van de opgave voor de benodigde kruinhoogte, piping en macrostabiliteit. Dit zijn de drie belangrijkste faalmechanismen die gezamenlijk de dimensies van een dijk bepalen en die worden beïnvloed door zeespiegelstijging. Voor kunstwerken is de versterkingsopgave bepaald op basis van de benodigde (kerende) kruinhoogte.

De opgave voor de dijken bestaat uit een verhoging van de kruin en een verbreding van de dijkbasis. Verbreding van de dijk kan het gevolg zijn van een verhoging van de kruin, maar ook om te voldoen aan de eisen voor piping (d.m.v. een berm) en/of macrostabiliteit. Figuur 7 laat schematisch zien hoe de opgave varieert voor verschillende mate van zeespiegelstijging.



Figuur 7: Schematisatie weergave van de hoogteopgave en sterkteopgave (verbreiding dijkbasis door taludverflauwing) voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van 2050. Het kan ook zijn dat een dijk resthoogte / -sterkte heeft en dat de dijk pas een opgave krijgt bij hogere niveaus van zeespiegelstijging.

Om te voldoen aan de veiligheidseisen bestaan er voor dijken verschillende oplossingsrichtingen voor een versterking, zoals het aanleggen of verlengen van een bestaande berm, verflauwing van het huidige talud of constructieve maatregelen als een damwand.



Figuur 8: Voorbeelden van oplossingen voor een dijkversterking in grond en/of constructieve maatregelen.

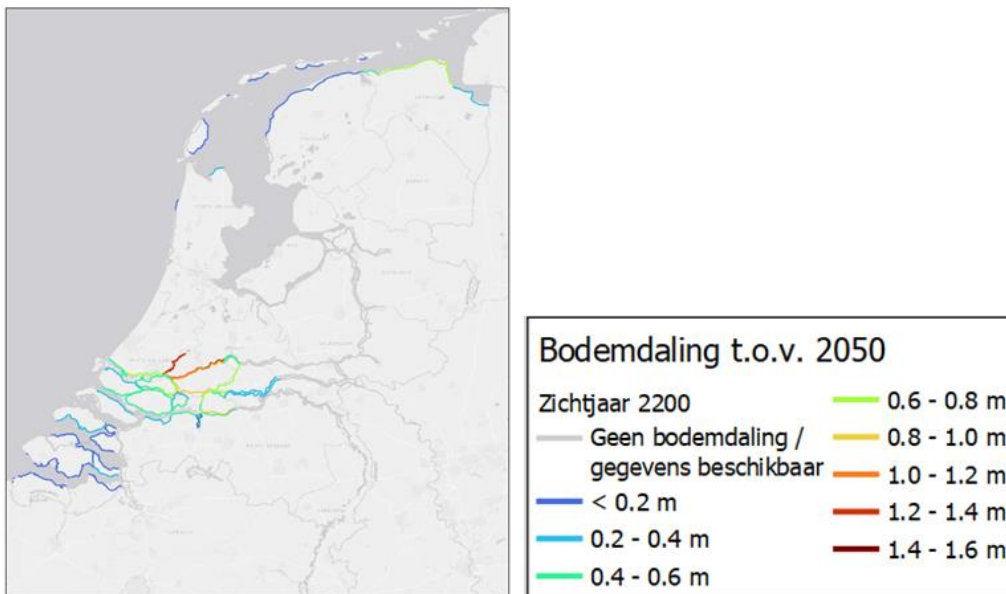
In deze beleidsstudie is de basisvariant een binnenwaartse grondoplossing zolang het ruimtelijk past, gecombineerd met constructieve oplossingen als een grondoplossing niet meer kan worden ingepast vanwege aanwezige bebouwing. In deze variant wordt dus geen bebouwing geamoveerd. Deze basisvariant sluit het beste aan bij de huidige ontwerppraktijk. De dijken worden versterkt voor een ontwerplevensduur van 50 jaar. De eventuele constructieve elementen in de dijk (damwanden, diepwanden, kistdammen) worden geraamd met een levensduur van 100 jaar.

De opgave voor kunstwerken bestaat uit een verhoging van de huidige kerende hoogte van het kunstwerk⁷. Dit kan betekenen dat het kunstwerk gedeeltelijk versterkt wordt, of volledig vervangen wordt bij het bereiken van het einde van de ontwerplevensduur van 100 jaar.

⁷ Bij een indicatie van de versterkingskosten van een kunstwerk wordt ook rekening gehouden met de overige eisen t.a.v. constructieve sterkte, betrouwbaarheid sluiten en piping etc.

De impact van zeespiegelstijging op de waterveiligheidsopgave is bepaald ten opzichte van zichtjaar 2050, het jaar waarin alle dijken en kunstwerken minimaal voldoen aan eisen bij de norm. Omdat in de huidige situatie nog niet alle dijken en kunstwerken voldoen aan de eisen bij de norm, is eerst de opgave tot en met 2050 bepaald om het systeem van dijken en kunstwerken "op orde" te brengen. Hierbij is rekening gehouden met 0,25 tot 0,50 m⁸ zeespiegelstijging ten opzichte van 1995. Ook zijn er dijken en kunstwerken die nu méér bescherming bieden dan de minimaal benodigd bij de norm. Voor deze dijken en kunstwerken geldt dat het eerste versterkingsmoment pas ná 2050 ligt.

Om de versterkingsopgave in een zichtjaar goed te kunnen duiden is het van belang om te realiseren dat ook autonome ontwikkelingen als bodemdaling (Figuur 9) en ontwikkeling van de morfologie al kunnen leiden tot een versterkingsopgave.



Figuur 9: Ruimtelijk beeld gehanteerde bodemdaling passend bij zichtjaar 2200 ten opzichte van 2050.

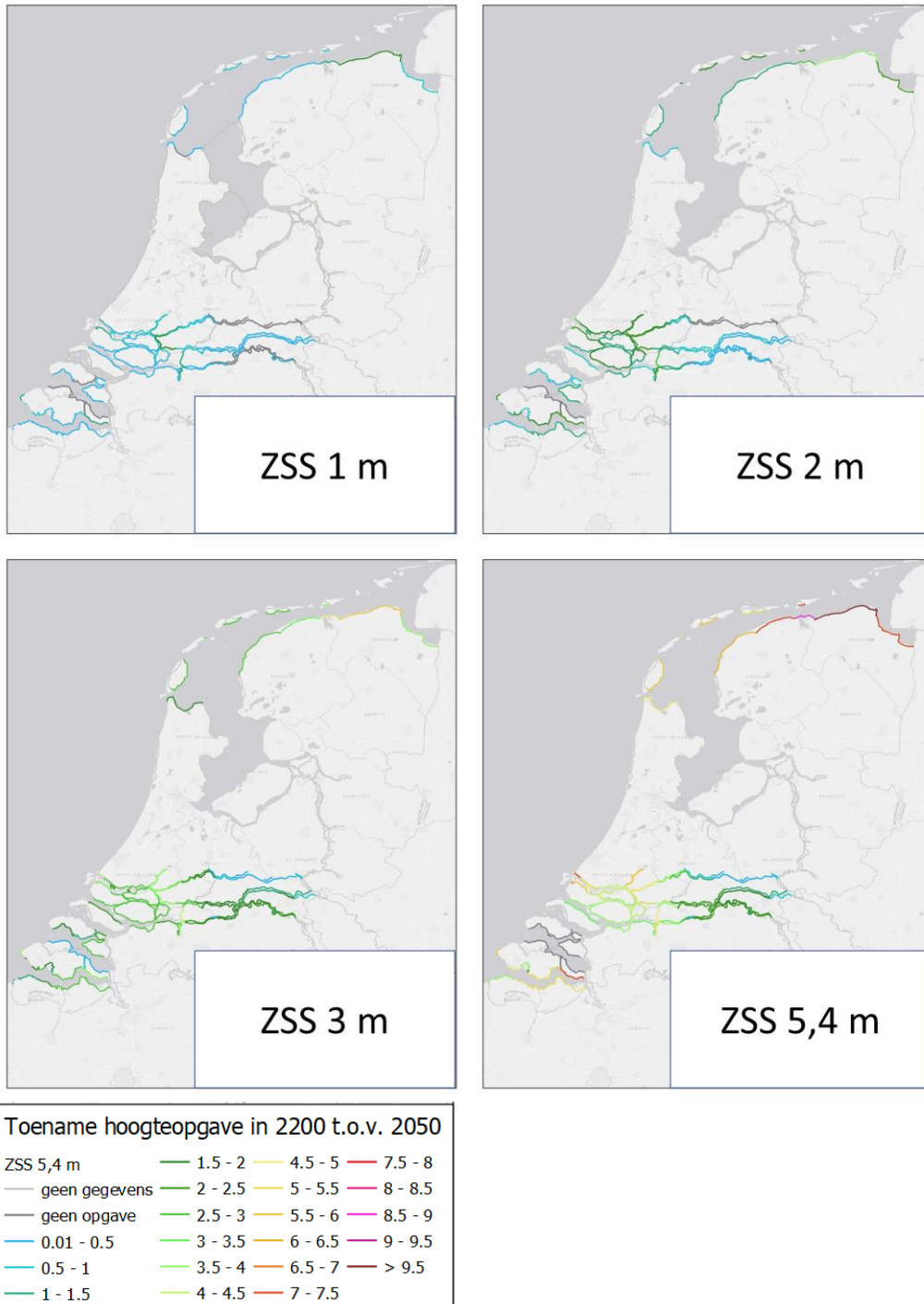
Hoogteopgave dijken

De impact van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave voor de benodigde kruinhoogte voor dijken in het zichtjaar 2200 ten opzichte van zichtjaar 2050 (op orde, tijdlijn Laag) is in Tabel 3 weergegeven. De hoogteopgave is bepaald per dijkvak en vervolgens is de hoogteopgave per traject bepaald, waarbij is gemiddeld over alleen de te versterken dijkvakken langs een traject.

In Figuur 10 is de gemiddelde toename van de hoogteopgave per traject ten opzichte van 2050 getoond. Dit betreft dus de toename ten opzichte van 'systeem op orde'. De toename van de minimaal benodigde kruinhoogte als functie van de zeespiegelstijging is een goede indicator voor de toename van de hoogteopgave (benodigde kruinhoogte) voor de dijken. Als een dijk geen resthoogte heeft in 2050, dan is de toename van de hoogteopgave ten opzichte van 2050 gelijk aan de toename van de minimaal benodigde kruinhoogte door zeespiegelstijging en bodemdaling (onder de dijk). Een vergelijking van Figuur 10 met Figuur 6 geeft inzicht in de normtrajecten in 2050 met een zekere resthoogte op basis van de

⁸ In 2050 zijn de dijken en kunstwerken minimaal op orde. Dijken en kunstwerken hebben in de regel een ontwerplevensduur van respectievelijk 50 tot 100 jaar, waardoor bij de versterkingsopgave rekening wordt gehouden met de mate van zeespiegelstijging in het ontwerpzichtjaar. De waterkeringen kunnen in 2050 nog resthoogte (en/of reststerkte) hebben.

landelijk uniforme uitgangspunten in deze beleidsstudie (zoals een golfoverslagdebiet van 5 l/s/m voor dijken). Om o.a. die reden wijkt dit beeld af van de resultaten uit de 1^e landelijke beoordelingsronde primaire waterkeringen (LBO1). Ook het aantal beschouwde dwarsdoorsneden is op een grovere schaal uitgevoerd.



Figuur 10: Hoogteopgave ten opzichte van 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging. De morfologie en bodemdaling is passend bij zichtjaar 2200.

Tabel 3: Gemiddelde hoogteopgave per regio op basis van alleen de te versterken trajecten per watersysteem voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging ten opzichte van 2050. Voor het aantal te versterken km dijk per watersysteem wordt verwezen naar Tabel 5.

ZSS ten opzichte van 2050	Gemiddelde hoogteopgave voor de dijken over alleen te versterken trajecten per regio*						
	Zuid-westelijke delta II	RMM – delta	Rivieren-gebied	Wadden-gebied	Zandige water-keringen kust	Harde water-keringen kust IV	IJsselmeergebied
0,75 m	0,5	0,7	0,3	0,7	Niet bepaald	0,7	Niet bepaald
1,75 m	1,3	1,8	0,6	1,7	Niet bepaald	1,2	Niet bepaald
2,75 m	2,2	3,1	1,7	3,1	Niet bepaald	2,3	Niet bepaald
5,15 m	5,3	4,7	2,1	6,5	Niet bepaald	4,6	Niet bepaald

I) Voor de zandige waterkeringen langs de kust is de hoogteopgave niet relevant, want hier wordt de opgave bepaald op basis van de duinafslaghoeveelheid.

II) Voor de Zuidwestelijke Delta is de gemiddelde hoogteopgave bij een zeespiegelstijging van 5,15 m ten opzichte van 2050 alleen bepaald voor de Westerschelde.

III) Voor het IJsselmeergebied is de versterkingsopgave in de ISWP studie bepaald aan de hand van twee afwijkende tijdlijnen dan in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging zijn gehanteerd. Het is daarom enkel mogelijk om de in de ISWP studie berekende kosten te vertalen naar de tijdlijnen van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.

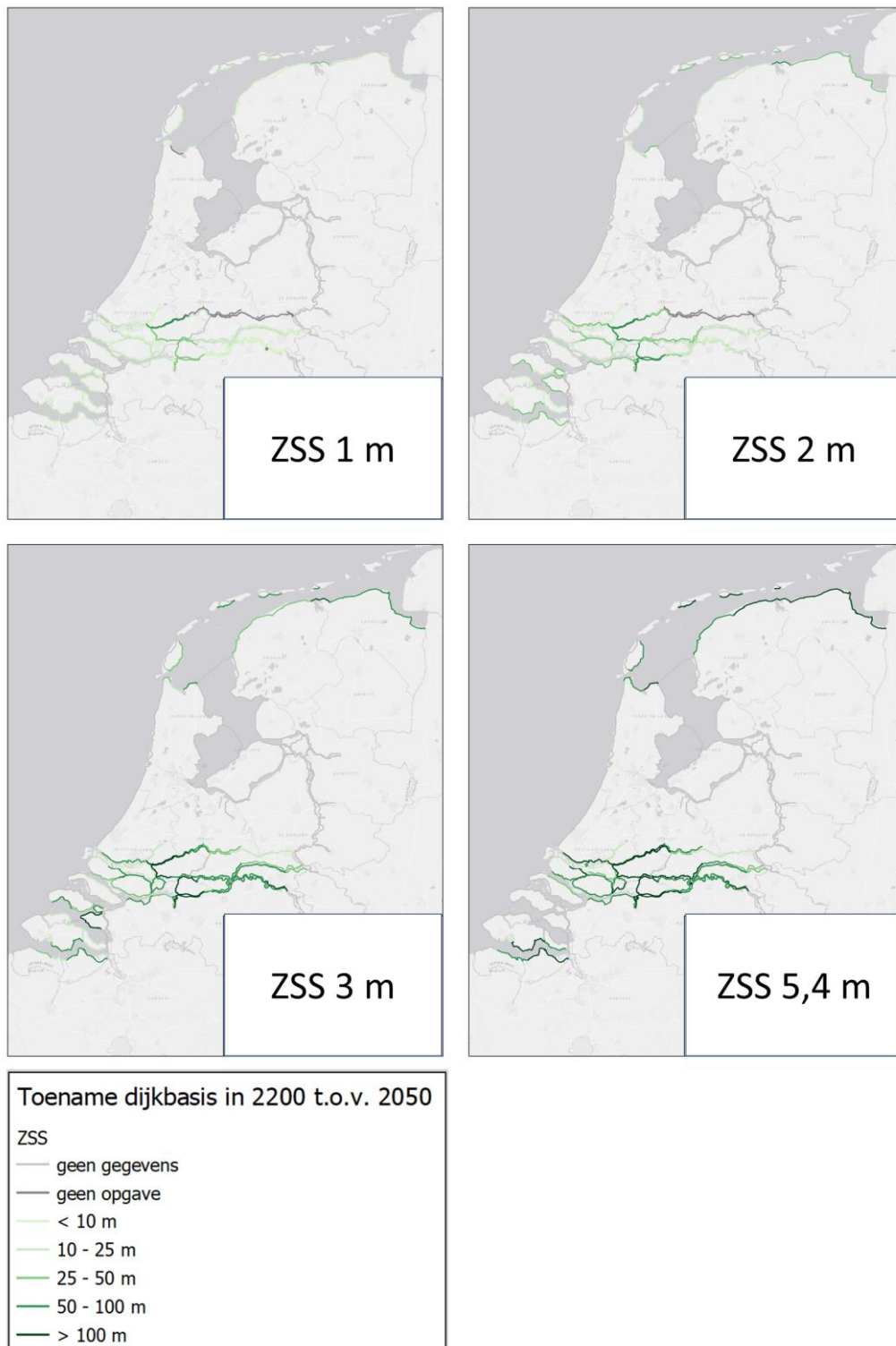
IV) de gemiddelde hoogteopgave voor de harde waterkeringen langs de kust is bepaald op basis van alle bolwerken en harde waterkeringen, met uitzondering van het Flaauwe Werk, Veerse Gatdam en Brouwersdam.

Hoogteopgave kunstwerken

In deze beleidsstudie is de hoogteopgave voor de kerende hoogte van de kunstwerken bepaald op basis van het mechanisme overloop, omdat de hoogteopgave op basis van overslagdebiet van 10 l/s/m tot onrealistisch hoge hoogteopgaves zou leiden. Dit betekent dat de hoogteopgave ten opzichte van 2050 even snel toeneemt als de zeespiegelstijging. Net als voor de dijken zijn er ook kunstwerken die nog een zekere resthoogte hebben, en pas bij hogere mate van zeespiegelstijging versterkt dienen te worden.

Opgave verbreding dijkbasis

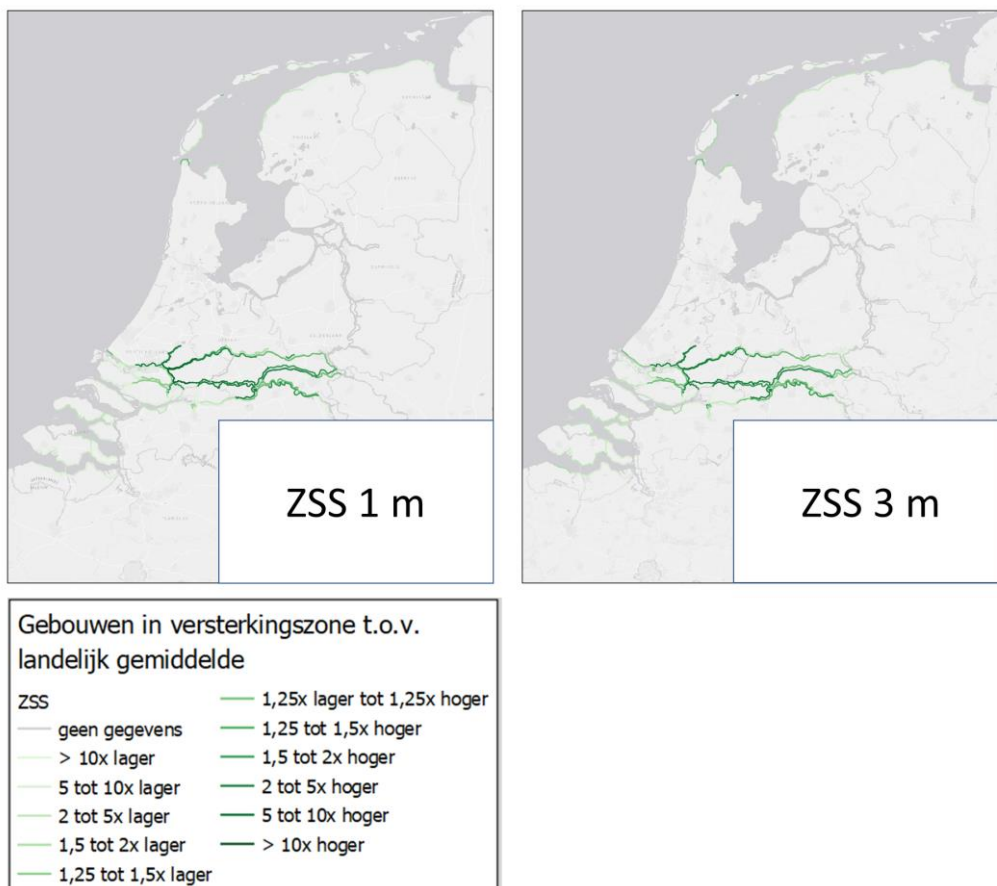
In Figuur 11 is de gemiddelde benodigde toename van de verbreding van de dijkbasis per traject ten opzichte van 2050 getoond. Dit betreft dus de toename ten opzichte van 'systeem op orde'. Voor de Kust en het IJsselmeergebied is de hoogteopgave niet bepaald. De opgave voor de verbreding van de dijkbasis is bepaald per dijkvak en vervolgens is de opgave per traject bepaald, waarbij is gemiddeld over alleen de te versterken dijkvakken langs een traject.



Figuur 11: Opgave verbreding dijkbasis ten opzichte van 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging. De morfologie en bodemdaling is passend bij zichtjaar 2200.

2.4 Ruimtelijke impact

De omvang van de versterkingsopgave is hierboven besproken. In deze paragraaf geven we inzicht in welke regio's de grootste ruimtelijke knelpunten zullen ontstaan. Als indicator hiervoor hanteren we het aantal gebouwen die zich bevinden in de versterkingszone van de waterkering. In regio's met grote ruimtelijke knelpunten zullen meer constructieve dijkversterkingsmaatregelen – zoals damwanden – genomen (moeten) worden dan in regio's met minder ruimtelijke knelpunten waar dijkversterkingen vaker met een volledige grondoplossing uitgevoerd kunnen worden⁹.



Figuur 12: Aantal gebouwen aanwezig in de versterkingszone ten opzichte van het landelijk gemiddelde, o.b.v. het aantal gebouwen in de versterkingszone per km per traject. Het landelijk gemiddelde is bepaald o.b.v. alle trajecten met ten minste 1 gebouw in de versterkingszone. Hierbij is uitgegaan van de gebouwen in het Basis Administratie Gebouwen (BAG) met peildatum 1 oktober 2021.¹⁰ Links: zeespiegelstijging van 1 m t.o.v. 1995. Rechts: zeespiegelstijging van 3 m t.o.v. 1995. Voor het IJsselmeergebied, de IJssel en de Kust is deze data niet beschikbaar.

Om regio's onderling te kunnen vergelijken, gebruiken we als maatstaf het aantal gebouwen in de versterkingszone per te versterken km dijk als functie van de zeespiegelstijging. Deze waarde wordt vergeleken met het landelijk gemiddelde in Figuur 12. Data om de ruimtelijke impact te bepalen is alleen beschikbaar voor de

⁹ Andere oplossingen waaraan gedacht kan worden zijn bijvoorbeeld buitendijks versterken, of watersysteemmaatregelen. Deze maatregelen zijn in deze studie buiten beschouwing gelaten.

¹⁰ KOSWAT maakt gebruik van een verouderde bebouwingsdatabases o.b.v. de TOP10NL 2013/2014.

Zuidwestelijke Delta¹¹, Waddengebied, Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied. Voor het IJsselmeergebied en de Kust is het aantal gebouwen in de versterkingszone niet bepaald. De ruimtelijke knelpunten zijn het grootst in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied. In de Rijn-Maasmonding is er veel stedelijk gebied met dorpen/steden die direct achter of op de waterkering liggen. In het Rivierengebied worden dorpskernen afgewisseld met veel lintbebouwing direct tegen de dijk aan.

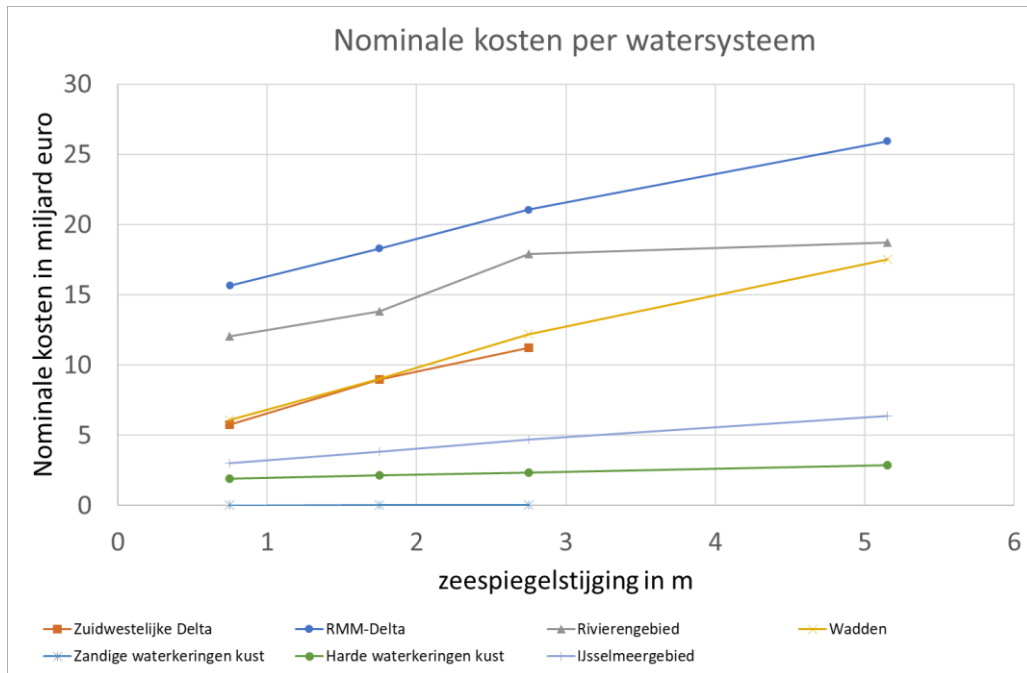
Het uiteindelijk aantal te amoveren gebouwen in de versterkingszone hangt af van de te volgen versterkingsstrategie. Dit zal veelal een lokale afweging blijven die niet op basis van deze studie gemaakt kan worden. In de huidige ontwerppraktijk worden soms ook reeds huizen geamoveerd of verplaatst, net zoals dat in de toekomst het geval zal zijn. Welke optie het "beste" is, zal in werkelijkheid per project worden geoptimaliseerd, net zoals dat nu het geval is. Bij de strategie "business as usual" (basisvariant) wordt geen bestaande bebouwing in de versterkingszone geamoveerd. Hierbij wordt opgemerkt dat een dijkversterking zonder amoveren of verplaatsen van bestaande bebouwing in de versterkingszone wel technisch mogelijk moet zijn. Ook in de huidige situatie zijn er bebouwde dijken, waarbij de ruimtelijke inpassing van een (constructieve) dijkversterking niet eenvoudig zal zijn. Afhankelijk van de lokale omstandigheden van een specifiek versterkingsproject, zal de daadwerkelijke versterkingsstrategie een combinatie zijn van (evt. constructieve) versterkingen waarbij de omgeving gespaard blijft met een volledige grondoplossing waarbij eventueel bebouwing in de versterkingszone tijdelijk of permanent geamoveerd dient te worden.

2.5 Kosten voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging

Voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging tot 5,4 m (Tabel 1 en Figuur 4) zijn op basis van de versterkingsopgave voor de dijken en kunstwerken de nominale kosten¹² voor de waterveiligheidsopgave in een zichtjaar ten opzichte van zichtjaar 2050 (referentie – tijdlijn Laag) bepaald. De nominale kosten die nodig zijn om alle dijken en kunstwerken in een zichtjaar precies aan de norm te laten voldoen bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging, zijn verminderd met de kosten om het systeem op orde te brengen tot en met 2050 (Figuur 13 en Tabel 4). Hiermee kan min of meer een directe relatie worden gelegd tussen een mate van zeespiegelstijging ten opzichte van 2050 en de bijbehorende kosten voor de waterveiligheidsopgave van de dijken en kunstwerken die hieruit volgt. De huidige trend van bodemdaling is ook meegenomen in de opgave en daarmee in de kosten.

¹¹ Voor de Oosterschelde kent het ruimtelijk beeld een hoge mate van onzekerheid, omdat voor de Oosterschelde slechts een beperkt aantal locaties beschikbaar was waarvoor de hydraulische belastingen bepaald zijn.

¹² In de Systeemanalyse Waterveiligheid worden toekomstige investeringskosten en baten niet teruggerekend naar het basisjaar (contant gemaakt) via de discontovoet, maar worden de nominale kosten passend bij eenzelfde zichtjaar gepresenteerd. De discontovoet is een percentage waarmee verwachte kosten en baten in de toekomst worden teruggerekend naar het basisjaar van het project. Het verdisconteren van toekomstige kosten en baten naar eenzelfde basisjaar, gebeurt wel in een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA's) om kosten en baten - die in verschillende tijdschalen verwacht worden -, op dezelfde manier te waarderen. Bron: <https://www.rwseconomie.nl/discontovoet>



Figuur 13: Totale nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken per watersysteem als functie van de zeespiegelstijging in m.

Tabel 4: Totale nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken per watersysteem voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging.

ZSS ten opzichte van 2050	Nominale kosten voor dijken en kunstwerken in miljard euro							
	Totaal	Zuidwestelijke delta III)	RMM – delta IV)	Rivieren- gebied	Wadden- gebied	Zandige waterkeri ngen kust I)	Harde waterkeri ngen kust II)	IJsselmeer gebied
0,75 m	44,5	5,8	15,7	12,1	6,1	0,03	1,9	3,0
1,75 m	56,1	9,0	18,3	13,8	9,0	0,03	2,2	3,9
2,75 m	69,5	11,2	21,1	17,9	12,2	0,03	2,3	4,7
5,15 m	80,4	9,0	25,9	18,7	17,5	Niet bepaald	2,9	6,4

I) Betreft de kosten voor het versterken van de zandige waterkeringen. De kosten voor het kustonderhoud zijn niet in begrepen.

II) Betreft kosten inclusief sluiscomplex IJmuiden, met uitzondering van de Zeesluis IJmuiden.

III) Betreft de kosten exclusief de vervangingskosten voor de Oosterscheldekering. Deze zijn geraamd op 3 miljard euro voor gedeeltelijke versterking en 6 miljard euro voor volledige vervanging (bron: Rijkswaterstaat GPO).

IV) Betreft de kosten inclusief de kosten voor alle stormvloedkeringen, Haringvlietssluisen en Volkeraksluisen.

V) Betreft alleen de kosten voor het versterken van de dijken. De kosten voor het afvoeren van water zijn opgenomen in de kosten voor het Waddengebied. De kosten voor het vervangen van de Ramspolkering zijn niet meegenomen.

De kosten in Figuur 13 en Tabel 4 zijn de totale nominale kosten in zichtjaar 2200 per watersysteem voor de basisversterkingsstrategie voor de dijken (zie tekstbox hieronder). Voor de kunstwerken zijn de kosten gepresenteerd voor de strategie die tot de laagste kosten leidt: aanpassing van het kunstwerk bij een hoogtetekort, zodat deze blijft voldoen tot einde levensduur, of volledige vervanging (waarvan in ieder geval sprake is bij einde levensduur).

De nominale kosten voor de dijken zijn gebaseerd op het prijspeil 2021 inclusief BTW en voor de kunstwerken op prijspeil 2022. Dit betekent dat er geen rekening

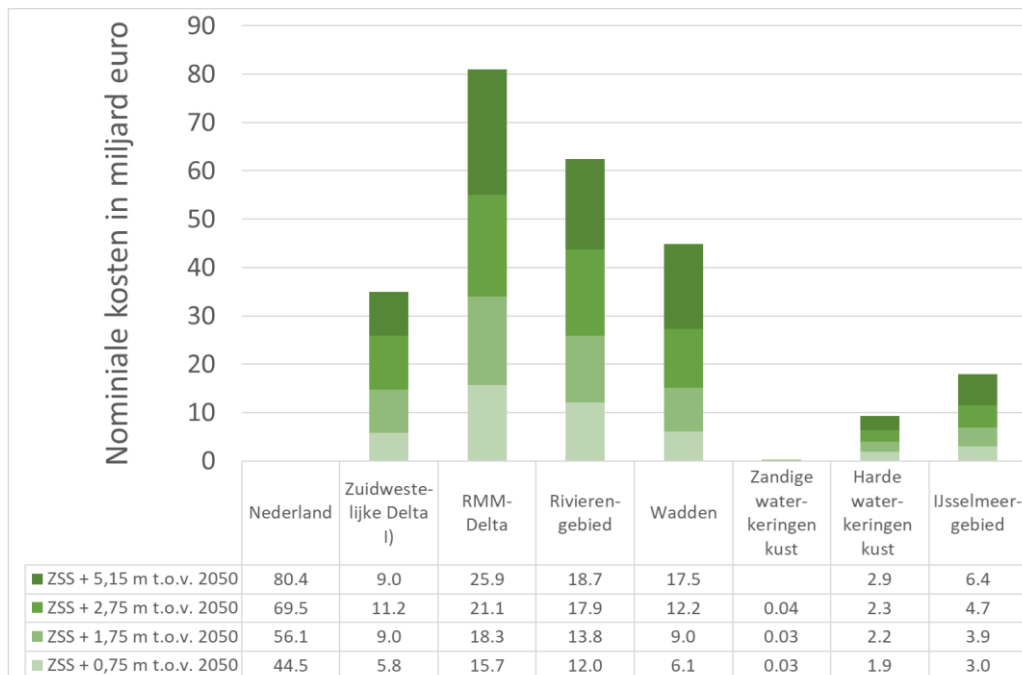
wordt gehouden met inflatie. Een eventueel tekort aan materiaal, materieel en uitvoeringscapaciteit in de toekomst kan ervoor zorgen dat kosten van dijkversterkingen meer zullen stijgen dan de gemiddelde prijsontwikkeling in Nederland, waardoor dijkversterkingen relatief duurder worden. Dit effect is in de analyse niet meegenomen.

Mix van verschillende versterkingsstrategieën

In deze systeemverkenning is de versterkingsstrategie "business as usual" als basisvariant beschouwd. Deze strategie bestaat uit een grondoplossing zolang het past en anders worden constructieve maatregelen getroffen. Deze strategie wordt hoofdzakelijk in Nederland toegepast. In werkelijkheid bestaat een dijkversterkingstraject uit een mix van versterkingsstrategieën met verschillende oplossingen, zo ook volledige grondoplossingen waarbij de aanwezige bebouwing in de versterkingszone zo nodig tijdelijk of permanent geamoveerd dient te worden. De gekozen strategie is afhankelijk van lokale omstandigheden die leiden tot de "beste" oplossing.

2.5.1 Kosten voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging ten opzichte van het Systeem op orde tot en met zichtjaar 2050

De totale nominale kosten voor het versterken van alle dijken en kunstwerken om te voldoen aan de eisen bij 1 m zeespiegelstijging in zichtjaar 2200 zijn 45 miljard euro. Dit is exclusief de kosten tot en met 2050 om de waterkeringen minimaal op orde brengen aan de norm. Een uitsplitsing van de totale kosten bij een zeespiegelstijging van 1 m naar regio (Figuur 14) geeft een bijdrage van 27 % van het Rivierengebied, 35 % Rijn-Maasmonding, 13 % Zuidwestelijke delta, 13 % Waddengebied, 7 % Meren en Vecht-IJsseldelta < 1 % Zandige waterkeringen langs de kust en 4 % Harde waterkeringen langs de kust. De Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied hebben de grootste bijdrage aan de totale kosten bij 1 m zeespiegelstijging. Het betreft hier voornamelijk stedelijk gebied, wat leidt tot hogere kosten voor de versterkingsopgave. De totale kosten voor het versterken van alle dijken en kunstwerken om te voldoen aan de waterveiligheidseisen bij 2 m zeespiegelstijging in zichtjaar 2200 zijn 56 miljard euro. Dit is een toename van 25 % ten opzichte van de kosten voor 1 m zeespiegelstijging. Hieruit volgt dat de gemiddelde kosten per te versterken km niet evenredig toenemen met de mate van zeespiegelstijging. De vaste kosten van een dijkversterking vormen namelijk een groter aandeel in de kosten dan de variabele kosten. Met de vaste kosten bedoelen we de kosten die onafhankelijk zijn van de omvang van de dijkversterking (bijv. engineering, inrichting van de bouwplaats, maar bijvoorbeeld ook het vervangen of herstellen van infrastructuur en een deel van de kosten van een damwand die sowieso al 20 m de diepte in moet naar de draagkrachtige laag) en de variabele kosten de kosten die afhankelijk zijn van de omvang van de dijkversterking (bijv. grondvolume, de extra benodigde damwandlengte 'aan de bovenkant', of de extra plekken waar een damwand nodig is doordat de dijkversterking niet meer past in de beschikbare ruimte). De vaste kosten blijven min of meer gelijk bij verschillende mate van zeespiegelstijging. De variabele kosten zijn bij een zeespiegelstijging van 1 m lager dan 2 m, omdat bijvoorbeeld minder grond en materiaal nodig is. Ook voor de hogere zeespiegelstijgingen van 3 en 5,4 m hebben de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied de grootste bijdrage aan de totale kosten. Wel wordt het aandeel van de totale kosten voor het Waddengebied bij een zeespiegelstijging van 3 en 5,4 m groter ten opzichte van een zeespiegelstijging van 1 en 2 m en het aandeel van het Rivierengebied juist iets lager. Dit komt doordat in het Waddengebied de toename van de hydraulische belastingen door zeespiegelstijging, en daardoor de benodigde kruinhoogte, groter is dan in het Rivierengebied.



I) ZSS+5,15 m t.o.v. 2050 betreft voor de Zuidwestelijke Delta alleen de kosten voor de Westerschelde.

Figuur 14: Toename van de nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging ten opzichte van de nominale kosten voor Systeem op orde tot en met zichtjaar 2050. Onder de Zuidwestelijke Delta vallen alleen de Oosterschelde en Westerschelde; de kosten voor de Oosterscheldekering zijn niet meegenomen.

De totale kosten bij een zeespiegelstijging van 1 m in zichtjaar 2200 zijn gemiddeld over alle watersystemen te verdelen over de versterkingsopgave van dijken voor 70% en van kunstwerken voor 30%. Daarbij is aangenomen dat de Oosterscheldekering in de periode 2050 tot 2200 eenmaal gedeeltelijk gerenoveerd is en eenmaal volledig vervangen, voor alle niveaus van zeespiegelstijging. Zoals opgemerkt in de inleiding is de inhoudelijke uitwerking van de waterveiligheidsopgave van de Oosterscheldekering buiten de scope gelaten, maar zijn de huidig geschatte versterkingskosten van 3 miljard euro voor gedeeltelijke vervanging/renovatie en 6 miljard euro voor volledige vervangen bij het huidige prijspeil meegenomen in bovengenoemde verdeling (bron Rijkswaterstaat GPO). Bij hogere mate van zeespiegelstijging nemen de kosten voor de versterkingsopgave voor de dijken toe naar 80-90% en de kunstwerken af naar 10-20%. In deze beleidsstudie is namelijk verondersteld dat de omvang van de versterkingsopgave van de kunstwerken minder invloed heeft op de hoogte van de versterkingskosten van kunstwerken.

2.5.2 Kosten per te versterken km dijk

De totale nominale kosten per watersysteem hebben betrekking op alle te versterken dijken en kunstwerken in een watersysteem. Deze kosten worden sterk gedomineerd door het totaal aantal te versterken kilometers dijk en in mindere mate door het aantal te versterken of te vervangen kunstwerken per watersysteem. Het Rivierengebied beslaat een veel hoger areaal aan km waterkering dan bijvoorbeeld de Oosterschelde en de Westerschelde samen, waardoor de totale kosten van het Rivierengebied hoger zijn. Vertaald naar de kosten per te versterken km dijk is het beeld gelijkmatiger. In Tabel 5 zijn de nominale kosten voor het versterken van alleen de dijken en zandige waterkeringen langs de kust per niveau van zeespiegelstijging ten opzichte van 2050 per te versterken km waterkering weergegeven.

Voor lagere niveaus van zeespiegelstijging tot 1 m moet circa 90 % van de dijken en kunstwerken uit de scope van deze studie versterkt worden. Vanaf circa 2 m zeespiegelstijging geldt dat circa 95 % van alle dijken en kunstwerken versterkt dienen te worden.

Tabel 5: Totale nominale kosten per te versterken km in miljoen euro voor alle dijken per watersysteem voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging.

ZSS ten opzichte van 2050	Nominale kosten per te versterken km voor alleen dijken langs de kust in miljoen euro							
	Totaal alle deelgebieden	Zuid-westelijke delta I)	RMM - delta	Rivieren-gebied	Wadden-gebied	Zandige waterkeringen kust	Harde waterkeringen kust	IJsselmeer gebied II)
0,75 m	14 (2116 km)	11 (325 km)	25 (210 km)	16 (418 km)	16 (586 km)	Niet bepaald	19 (14 km)	6 (547 km)
1,75 m	18 (2243 km)	20 (351 km)	32 (259 km)	20 (456 km)	19 (589 km)	Niet bepaald	22 (24 km)	7 (547 km)
2,75 m	24 (2257 km)	26 (352 km)	44 (262 km)	26 (459 km)	26 (595 km)	Niet bepaald	30 (24 km)	9 (547 km)
5,15 m	31 (2054 km)	45 (161 km)	64 (263 km)	33 (461 km)	27 (595 km)	Niet bepaald	46 (27 km)	12 (547 km)

I) De kosten per km voor een zeespiegelstijging van 5,15 m ten opzichte van 2050 zijn gebaseerd op alleen de te versterken dijken langs de Westerschelde.

II) Voor het bepalen van de gemiddelde kosten per te versterken km is voor het IJsselmeergebied verondersteld dat alle dijken versterkt moeten worden, ongeacht de mate van zeespiegelstijging.

De kosten per kilometer te versterken dijk zijn een goede parameter om de orde grootte kosten voor zeespiegelstijging in perspectief te plaatsen. Daarom zijn in Tabel 5 de nominale kosten per te versterken km dijk voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging, gecorrigeerd voor de kosten tot en met 2050 om de waterkeringen minimaal op orde brengen. Hier zijn de kosten voor het versterken van de kunstwerken niet meegenomen.

De gemiddelde kosten per te versterken km variëren tussen de verschillende watersystemen / regionale deltaprogramma's. De gemiddelde kosten per te versterken km hebben een bandbreedte van circa 5 tot 25 miljoen euro per te versterken km voor 0,75 m zeespiegelstijging en van 10 tot 45 miljoen euro voor 2,75 m, berekend over veelal meerdere versterkingsrondes. De totale nominale kosten per km te versterken dijk zijn het hoogste in de Rijn-Maasmonding (Tabel 5). De voornaamste reden is dat hier veel ruimtelijke knelpunten zijn, waardoor is aangenomen dat veel constructieve maatregelen (damwanden) worden toegepast die relatief duur zijn t.o.v. versterking in grond. Daarnaast geldt ook dat in delen van dit gebied de autonome bodemdaling (Figuur 9) het hoogste is (veengebieden), waardoor ook zonder zeespiegelstijging al een opgave ontstaat.

De totale nominale kosten per te versterken km dijk geven deels inzicht hoe deze zich verhouden tot de huidige dijkversterkingskosten binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (anno 2022) die gemaakt worden om alle dijken en kunstwerken te laten voldoen aan de veiligheid behorende bij de norm in 2050. In de volgende paragraaf presenteren we de jaarlijkse kosten per m zeespiegelstijging ten opzichte van het jaarlijkse budget van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (anno 2022) die gemaakt worden om alle dijken en kunstwerken te laten voldoen aan de veiligheid behorende bij de norm in 2050.

2.5.3 Gemiddelde jaarlijkse kosten per m zeespiegelstijging

De totale nominale kosten die geïnvesteerd moeten worden om alle dijken en kunstwerken in heel Nederland te versterken zodat deze voldoen aan de veiligheid bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging, verspreid over de periode 2050 –

2200 (periode van 150 jaar) zijn te vinden in Tabel 6 (in tabel 4 staan de totale kosten in miljoen euro, niet per jaar).

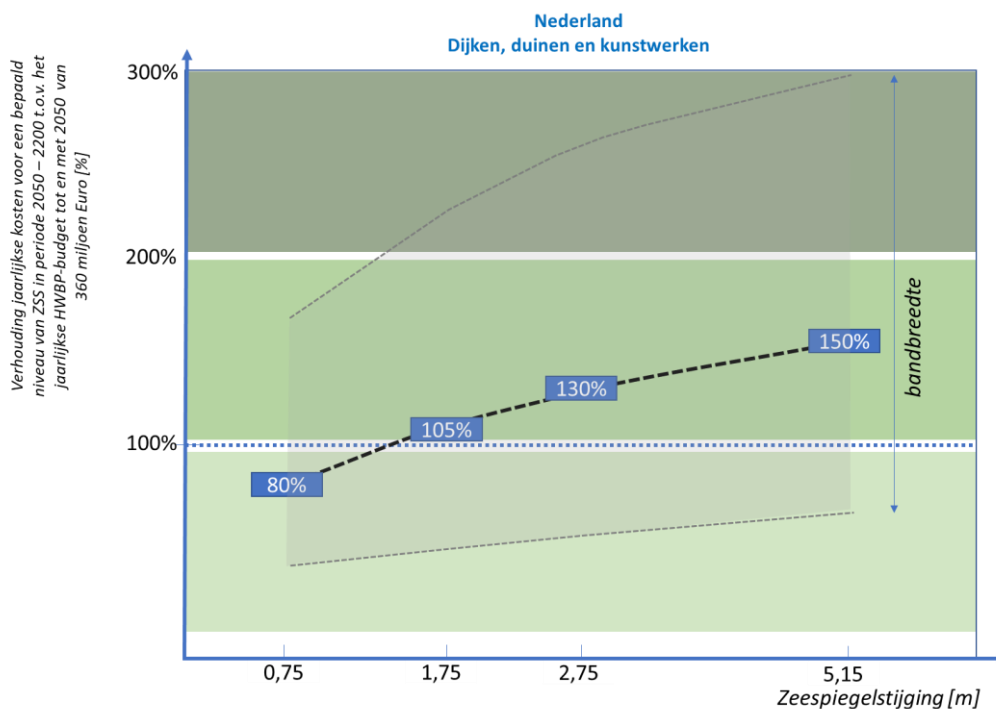
Tabel 6: Totale nominale kosten per jaar in miljoen euro voor alle dijken en kunstwerken per watersysteem voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging ten opzichte van 2050. De getallen zijn afgerond op 5 miljoen euro per jaar

ZSS ten opzichte van 2050	Nominale kosten <u>per jaar</u> voor de dijken en kunstwerken miljoen euro							
	Totaal alle deelgebieden	Zuid-westelijke delta I)	RMM – delta	Rivieren-gebied	Wadden-gebied	Zandige waterkeringen kust	Harde waterkeringen kust	IJsselmeer gebied
0,75 m	295	40	40	105	80	< 1	15	20
1,75 m	375	60	60	120	90	< 1	15	25
2,75 m	465	75	80	140	120	< 1	15	30
5,15 m	535	60	115	175	125	Niet bepaald	20	45

I) De kosten per jaar voor een zeespiegelstijging van 5,15 m ten opzichte van 2050 zijn van toepassing op alleen de Westerschelde. Daarom zijn de kosten per jaar lager dan bij een zeespiegelstijging van 2,75 m ten opzichte van 2050.

Door de totale nominale kosten per jaar als maatstaf te nemen, is een vergelijking te maken met de orde-grootte jaarlijkse kosten om alle dijken en kunstwerken in Nederland te laten voldoen aan de veiligheid behorende bij de norm in 2050. De jaarlijkse totale nominale kosten bij een zeespiegelstijging van 1 m zeespiegelstijging zijn circa 295 miljoen euro per jaar. Dat is circa 80% van het jaarlijkse Hoogwaterbeschermingsprogramma budget (jaarlijkse budget orde 360 miljoen euro)¹³. Voor een zeespiegelstijging van 2,0 m, 3,0 m en 5,4 m zijn dit op basis van de gehanteerde uitgangspunten en beschouwde gebieden respectievelijk 375, 465 en 535 miljoen euro. Gegeven alle onzekerheden richting de toekomst concluderen we dat de te verwachten jaarlijkse kosten in dezelfde orde-grootte liggen als die over de periode 2023-2050.

¹³ <https://www.hwbp.nl/werkwijze/financiering-hwbp-en-projecten>. Overigens worden niet alle huidige investeringen in waterveiligheid uit het HWBP budget bekostigd, maar soms ook uit Vervangings- en Renovatie (VenR) gelden/overwegingen.



Figuur 15: Schematische weergave van de jaarlijkse nominale kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging in de periode 2050 – 2200 ten opzichte van het jaarlijks budget van Hoogwaterbeschermingsprogramma (anno 2022) van 360 miljoen euro. De zwarte gestippelde lijn zijn de berekende kosten. De lichtgrijze lijn geeft schematisch een (niet berekende) bandbreedte weer van ongeveer een factor 2.

2.6 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde analyses concluderen we dat:

- de toename van de zeespiegel langs de gehele kust (Westerschelde, Hollandse Kust en Waddenzee) kan, gezien vanuit een waterveiligheidsperspectief, worden gekeerd. Dijkversterkingen in deze gebieden zijn (technisch) mogelijk op basis van de gehanteerde uitgangspunten.
- op het niveau van een watersysteem kan het concept "afsluitbaar open" onder bepaalde voorwaarden kan blijven bestaan. Hiervoor zijn wel maatregelen noodzakelijk, denk daarbij aan het verhogen van het sluitpeil om het aantal verwachte sluitingen van de stormvloedkeringen acceptabel te houden en daaraan gekoppeld het veilig kunnen keren van de resulterende hogere binnenwaterstanden. Ongeacht de zeespiegelstijging zullen stormvloedkeringen een deel van de stormvloed buiten blijven houden, waarbij de randvoorwaarde geldt dat ze dit constructief en functioneel aan moeten kunnen.
- voor het IJsselmeer als boezemsysteem geldt dat het door zeespiegelstijging (en door toename van de afvoeren) steeds kostbaarder zal worden om meerpeilpieken te beheersen. Dit betekent de aanleg van meer pompen en sluisen, maar ook sterkere dijken.
- de kosten voor benodigde dijkversterkingen door zeespiegelstijging (en toenemende afvoeren) liggen in dezelfde ordegrrootte als de huidige kosten voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma.
- in het algemeen geldt dat niet overal zonder meer dijken kunnen worden aangelegd of versterkt (denk aan stedelijke gebied). In die gevallen kunnen constructieve (op maat) maatregelen uitkomst bieden. Andere

versterkingsmogelijkheden, zoals buitendijks of watersysteemmaatregelen, zijn niet beschouwd in deze studie en kunnen mogelijk ook een oplossing bieden. In het uiterste geval zal (een deel van de) bebouwing in de versterkingszone geamoveerd moeten worden.

In deze paragraaf zijn een aantal conclusies verbonden aan de hand van drie criteria: technische haalbaarheid, maatschappelijke hinder / overlast en kostenindicatie. In deze beleidsstudie worden geen waardeoordelen gegeven of voorkeuren benoemd. Ook wordt de opgave nog niet geduid ten aanzien van een aantal functies waaronder scheepvaart, natuur en ecologie, leefbaarheid buitendijks gebied. Dit is onderdeel van fase 2 van Spoor II van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Uiteindelijk zijn dit onderwerpen waarbij bestuurlijke en maatschappelijke afwegingen gemaakt moeten worden.

Houdbaarheid huidige strategie

Voor de verschillende zeespiegelstijgingsscenario's zijn versterkingsstrategieën (van volledige grondoplossingen tot constructieve versterking) beschouwd die globaal een oplossingsrichting kunnen zijn voor de versterkingsopgave. Per versterkingsproject zal de uiteindelijke versterkingsstrategie een mix zijn van volledige grondoplossingen al dan niet aangevuld met innovatieve maatregelen om de verbreding van de berm te beperken, eventueel in combinatie met het amoveren van bebouwing en aangevuld met constructieve oplossingen waar we de omgeving juist willen sparen.

De ruimtelijke inpasbaarheid van een versterkingsopgave kan op een aantal locaties voor knelpunten zorgen. Er zijn een aantal typologieën van dijkbebauwing te onderscheiden. Voor elk van deze typologieën zijn meerdere mogelijke oplossingsrichtingen voor een dijkversterking beschreven vanuit technisch perspectief. In deze beleidsstudie is geen onderzoek gedaan naar andere aspecten, bijvoorbeeld de wenselijkheid om achter hogere dijken te wonen. Daarnaast is de beschikbaarheid van voldoende grond/klei en materialen, evenals voldoende capaciteit bij de (lokale) overheden en markt om een dijkversterking te realiseren een belangrijke voorwaarde voor de technische haalbaarheid van huidige systeem. Laatst genoemde randvoorwaarden vallen buiten de scope van deze studie.

1. *Onbebouwde dijk (zonder gebouwen of andere ruimtebeperkende objecten in de versterkingszone)*

Bij dit type dijk is geen bebouwing aanwezig op de dijk en in de versterkingszone en lijken zowel een volledige grondoplossing als constructieve maatregelen mogelijke oplossingsrichtingen voor een kruinverhoging of een binnenwaartse versterking.

2. *Eenzijdig bebouwde dijk met bebouwing op het binnentalud*

Bij dit type dijk is alleen bebouwing aanwezig op het binnentalud. Doordat geen bebouwing aanwezig is op het buitentalud is één van de mogelijke oplossingsrichtingen voor de hoogteopgave het plaatsen van een verticale wand, waarmee de kerende hoogte wordt opgehoogd. Buitenwaartse versterking van de waterkering is mogelijk, wanneer dit vanuit rivierkundig oogpunt (hoogwaterafvoer, scheepvaart, ...) is toegestaan. Een alternatief is kruinverhoging via een grondoplossing, wat alleen mogelijk is als de bestaande bebouwing op het binnentalud wordt geamoveerd of tijdelijk wordt opgevijseld dan wel permanent op palen wordt gebouwd.

3. *Eenzijdig bebouwde dijk met bebouwing op het buitentalud*

Bij dit type dijk is alleen bebouwing aanwezig op het buitentalud. Doordat geen bebouwing aanwezig is op de kruin en het binnentalud geldt hier dezelfde argumentatie als voor een onbebouwde dijk (typologie 1), omdat het uitgangspunt voor deze beleidsstudie alleen binnenwaartse versterking is.

4. *Tweezijde bebouwde dijk aan de buiten- en binnentalud*

Bij dit type dijk is zowel bebouwing aanwezig op zowel het buitentalud en het binnentalud. Doordat aan beide zijden van de dijk bebouwing aanwezig is, is één van de mogelijke oplossingsrichtingen dat de bestaande bebouwing aan zowel de binnenzijde als de buitenzijde wordt verwijderd, tijdelijk wordt opgevijseld of permanent op (opvijzelbare) palen wordt gebouwd (indien dit nog niet het geval is). Een alternatieve oplossingsrichting is dat de bestaande bebouwing een kerend element vormt, waarbij de doorgangen tussen bebouwing worden afgesloten met demontabele wanden en dat deuren en ramen ook waterkerend worden gemaakt. Er is geen onderzoek gedaan tot welke hoogte demontabele wanden een waterkerende functie kunnen garanderen. Daarnaast stelt een oplossingsrichting met demontabele wanden grote eisen aan de beheerorganisatie die verantwoordelijk is dat deze wanden tijdig en correct worden opgebouwd. Op grotere schaal vormen ook watersysteemmaatregelen mogelijke oplossingen.

Voor de stormvloedkeringen is in deze beleidsstudie een belangrijk uitgangspunt gehanteerd dat de kunstwerken in het huidige watersysteem ook bij hogere mate van zeespiegelstijging dezelfde betrouwbaarheid kunnen garanderen en constructief stabiel blijven, zodat aan de veiligheid bij de norm wordt voldaan. Voor de houdbaarheid van het huidige systeem is met name dit uitgangspunt voor de stormvloedkeringen van belang. De technische haalbaarheid van de huidige betrouwbaarheid van de sluiting voor de Europoortkering, de Hollandsche IJsselkering en de Oosterscheldekering dient nader onderzocht te worden. Ook wordt aanbevolen onderzoek te doen naar de constructieve sterkte van de stormvloedkeringen bij overlopen.

Voor de zachte kust (duinen) is de voorkeurstrategie om de duinen mee te laten groeien met het kustfundament. De belangrijkste randvoorwaarde voor deze oplossingsrichting is de beschikbaarheid van voldoende zand in de Noordzee. Dit is ondergebracht bij thema zandige kust binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.

Maatschappelijke hinder / overlast

De stijging van de zeespiegel heeft naast invloed op de waterveiligheid ook impact op overige functies zoals de bereikbaarheid en leefbaarheid van het buitendijkse gebied, scheepvaart, morfologie van de bodem en natuur/ecologie. De impact van zeespiegelstijging op die functies valt buiten de scope van deze studie en wordt opgepakt in fase 2 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Hieronder wordt kort ingegaan op de invloed van zeespiegelstijging op de inundatie van buitendijkse gebieden. Zoals gezegd volgt in fase 2 een vertaling naar de effecten op bereikbaarheid en leefbaarheid.

De buitendijkse gebieden tussen de primaire keringen worden beïnvloed door de zeespiegelstijging. Onder de huidige, dagelijkse omstandigheden (als de stormvloedkeringen geopend zijn) staan deze gebieden in de regel droog. Naarmate de zeewaterstand stijgt, lopen deze gebieden (afhankelijk van hun hoogte) langzaam onder water. Deze buitendijkse gebieden zullen steeds vaker onderlopen en grotere waterdiepten geven naarmate de zeespiegel stijgt. De stormvloedkeringen zijn in gesloten toestand in staat om de grote piekwaterstanden vanaf zee te blokkeren, ook voor deze gebieden. Dit geldt echter alleen voor extreme gebeurtenissen (dat zijn immers de situaties waarin de stormvloedkeringen gesloten worden). Voor omstandigheden waarbij de stormvloedkeringen niet hoeven te sluiten, werkt de zeespiegelstijging in grote delen van het buitendijkse gebied een-op-een door in de hydraulische belastingen. De invloed van de zeespiegelstijging neemt wel langzaam af in bovenstroomse richting, waar het rivierwater meer en meer tegenwicht biedt aan het zeewater.

Kostenindicatie

Voor de verschillende zeespiegelstijgingen zijn de kosten voor het versterken van de dijken en kunstwerken bepaald, waarbij uitgegaan is van de versterkingsstrategie "traditionele versterking met constructieve maatregelen waar niet voldoende ruimte is" (business as usual). Hieruit vallen een aantal zaken te concluderen:

- De snelheid van zeespiegelstijging heeft invloed op de totale kosten om eenzelfde niveau van zeespiegelstijging te bereiken. Bij een snelle zeespiegelstijging van 1 m in bijv. 2100 zijn de totale kosten lager dan bij een gematigdere zeespiegelstijging van 1 m in bijv. 2200. De reden hiervoor is dat de benodigde aanpassingen aan de waterkeringen per versterkingsronde weliswaar groter zijn, maar *het aantal* versterkingsronden om aan een bepaalde mate van zeespiegelstijging te voldoen zal afnemen. De vaste kosten hebben een relatief groot aandeel op de totale kosten. Als je eenmaal bezig bent met een versterking kost het relatief weinig om iets meer te doen. Omdat bij een snellere zeespiegelstijging minder versterkingsrondes nodig zijn dan bij gematigdere zeespiegelstijging zijn de totale vaste kosten lager.
- Er is een lineaire trend tussen de stijging van de zeespiegel en de toename van de totale nominale kosten. De stijging van de zeespiegel (in meters) gaat echter sneller dan de stijging van de totale nominale kosten (in euro's): een verdubbeling van de zeespiegelstijging geeft beduidend minder dan een verdubbeling van de kosten. De vaste kosten van een versterking hebben immers een groter aandeel in de totale kosten dan de variabele kosten. Met name de variabele kosten zijn afhankelijk van de omvang van de versterking en nemen zodoende toe bij zeespiegelstijging en de vaste kosten blijven min of meer gelijk.
- De totale nominale kosten per jaar voor het versterken van alle dijken, dammen, duinen en kunstwerken zodat deze voldoen aan de veiligheid bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging tot circa 2 m liggen in dezelfde orde grootte als het jaarlijks budget van het Hoogwaterbeschermingsprogramma van circa 360 miljoen euro bij een gelijk prijspeil en uitgaande van de in deze studie gehanteerde uitgangspunten. Bij een zeespiegelstijging van 3 m en 5,4 m zullen de totale nominale kosten per jaar ongeveer 130% tot 150% zijn van het jaarlijks budget van het Hoogwaterbeschermingsprogramma van 360 miljoen euro. Belangrijke kanttekening hierbij is dat toekomstige prijsstijgingen erg onzeker zijn en een grote invloed hebben op deze conclusie.
- De totale nominale kosten hebben een onzekerheidsbandbreedte op watersysteemniveau van een factor 2. Op kleinere schaalniveaus (trajecten of dijkvakken) zal de afwijking groter zijn. Deze bandbreedte neemt toe voor hogere niveaus van zeespiegelstijging. Toekomstige prijsstijgingen zijn geen onderdeel van deze schatting, omdat deze te onzeker zijn om daar een schatting voor af te geven. Deze uitgangspunten hebben naar verwachting de grootste invloed op een kosten:
 - De versterkingskosten voor de dijken, duinen en kunstwerken zijn gebaseerd op kostenramingen op basis van KOSWAT. De ramingen kunnen op dijkvakken afwijken van de werkelijke kosten binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma vanwege onvoorziene lokale complexiteit, of omdat bijvoorbeeld in de praktijk in (locatie)specifieke gevallen andere ontwerpkeuzes gemaakt worden.
 - De versterkingsopgave voor dijken, duinen en kunstwerken is bepaald o.b.v. landelijk uniforme uitgangspunten en fragility curves die passen bij een 'type' dijk. Dit wijkt af van een lokale verfijnde schematisaties zoals in de wettelijke beoordeling (LBO1) zijn gehanteerd. Ook voor kunstwerken geldt dat de versterkingsopgave is bepaald op basis van een grovere benadering, wat zal afwijken van het veiligheidsbeeld uit de 1^e landelijke beoordelingsronde.
 - De versterkingskosten gaan ervan uit dat één uniforme versterkingsstrategie voor het hele gebied zal worden toegepast, terwijl in de praktijk een dijkversterkingsproject zal bestaan uit een combinatie van zowel

constructieve versterking met een volledige grondoplossing eventueel innovatieve maatregelen.

2.7 Een aantal potentiële oprekmogelijkheden

In deze beleidsstudie is een aantal mogelijke maatregelen onderzocht om de huidige inrichting van het systeem "op te rekken". Hiermee wordt bedoeld dat handhaving van het huidige systeem langer voortgezet kan worden, waardoor grootschalige systeeminterventies uitgesteld of voorkomen kunnen worden. In Tabel 7 staat een aantal oprekmogelijkheden die binnen deze beleidsstudie zijn onderzocht¹⁴. Nadrukkelijk wordt vermeld dat deze lijst een eerste inventarisatie betreft, niet uitputtend is en de maatregelen niet in samenhang zijn onderzocht. Het onderzoeken van potentiële oprekmogelijkheden is onderdeel van fase 2 van het spoor II van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. De uitgevoerde analyses binnen deze beleidsstudie hebben tot doel om te bepalen welke oprekmogelijkheden wel of niet kansrijk lijken, mogelijk in combinatie met anderen, om nader te onderzoeken.

Tabel 7: Overzicht van de potentiële oprekmogelijkheden die binnen deze beleidsstudie zijn onderzocht. Deze lijst is niet uitputtend. *) alleen Westerschelde, **) alleen Oosterschelde, ***) Ruimte voor de rivier maatregelen in de delta's verdrinken door extreme zeespiegelstijging.

Nr.	Oprekmogelijkheid	Wadden	Zuidwestelijke Delta	Rijn-Maasmonding en Rivierengebied	Kust
1.	Bodemontwikkeling	V	V *		V
2.	Vegetatie voorlanden	V	V *		
3.	Faalkans EPK			V	
4.	Sluitpeil EPK			V	
5.	Overstroombaarheid EPK			V	
6.	Berging in Grevelingen			V	
7.	Systeemwerking door normvariatie			V	
8.	Ruimte voor de rivier			V***	
9.	Sedimentbeheer rivieren			V	
10.	Sluitpeil OSK		V **		
11.	Lekdebiet OSK		V **		
12.	Meegroeiën voorlanden		V **		

1. Het uitgangspunt is dat de bodem van de Westerschelde en Noordzee volledig meegroeit met de zeespiegelstijging, conform de voorkeursstrategie van de regionale Deltaprogramma's Zuidwestelijke Delta en Kust-. Dit zorgt ervoor dat de hydraulische belastingen even snel stijgen als de toename van de zeespiegelstijging. Voor de Westerschelde en Noordzee zorgt dit voor een reductie van maximaal 6% op de minimaal benodigde kruinhoogte (absolute reductie is ongeveer 1 m bij een zeespiegelstijging van 5,4 m) ten opzichte van het scenario waarbij de bodem niet meegroeit met de zeespiegelstijging. Dit leidt tot een besparing op de nominale kosten van ongeveer 10%. Voor de Waddenzee is de voorkeursstrategie dat de bodem de huidige trend volgt. Dit levert een reductie op de minimaal benodigde kruinhoogte van maximaal 6% (absolute reductie is circa 0,9 m bij een zeespiegelstijging van 5,4 m) ten opzichte van het scenario waarbij de bodem niet meegroeit met zeespiegelstijging. De reductie van de nominale kosten is ongeveer 10 tot 15%.

¹⁴ Voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zijn de mogelijke oprekmogelijkheden onderzocht voor een selectie van 10 trajecten verspreid over het gebied.

Voor de Wadden geldt ook dat het scenario waarbij de bodem volledig zou meegroeien met de zeespiegelstijging leidt tot een grotere afname van de minimaal benodigde kruinhoogte; tot wel 2,3 m bij een zeespiegelstijging van 5,4 m.

2. Het aanbrengen van vegetatie op het voorland is een maatregel om de golfgroei te remmen. Het effect van deze maatregel hangt af van het type gras dat aanwezig is. Als het gras niet breekt, dan remt het de golfgroei waardoor de golven lager zijn en daarmee ook de minimaal benodigde kruinhoogte. Bij een grotere mate van zeespiegelstijging heeft deze maatregel echter een verwaarloosbaar effect. De aanwezigheid van vegetatie heeft als 2^e orde positief effect het invangen van sediment, waardoor de voorlanden aangroeien en de hydraulische belastingen reduceren.
3. Het verkleinen van de faalkans van de Europoortkering met een factor 10 is een maatregel die de waterstanden in het achterland kan reduceren. Het effect van een verbeterde faalkans naar 1/1.000 per sluitvraag heeft met name effect op de trajecten direct achter de Europoortkering en hangt (naast de locatie) ook af van de terugkeertijd waarbij naar het effect wordt gekeken. Bij een zeespiegelstijging van 5,4 m is de grootste afname van de minimaal benodigde kruinhoogte net achter de Maeslantkering 0,7 m. Voor de andere trajecten iets verder van Europoortkering is de afname 0,2 tot 0,4 m. De reductie op de waterstanden is ongeveer 50% tot 75% van de afname van de minimaal benodigde kruinhoogte. Dit leidt tot een reductie van de nominale kosten van circa enkele procenten, omdat het maar voor enkele trajecten net achter de Europoortkering effect heeft. Er is geen onderzoek gedaan of het verkleinen van de faalkans functioneel en constructief haalbaar is.
4. Een mogelijke maatregel om de toename van het aantal sluitingen van de stormvloedkeringen (Europoortkering en Oosterscheldekering) te beperken, is het verhogen van het huidige sluitpeil. Daardoor gaan de stormvloedkeringen minder vaak dicht ten opzichte van het aantal sluitingen bij het huidige sluitpeil. Het effect van een aangepast sluitpeil is voor gebeurtenissen die vaak voorkomen (kleine terugkeertijden) het grootst voor de buitendijks gelegen gebieden net achter de stormvloedkeringen. Het effect op de waterstanden bij de norm is daar juist beperkt. Voor bovenstrooms gelegen locaties is het effect van het sluitpeil ook beperkt (voor alle terugkeertijden). In het tussengebied is het effect op de waterstand bij de norm het grootst (enkele decimeters). Voor zowel de Europoortkering als de Oosterscheldekering was het effect van deze maatregel op de nominale kosten niet goed te bepalen, vanwege een beperkte set aan beschikbare hydraulische databases met een aangepast sluitpeil.
5. Het beperken van de overstroombaarheid van de Maeslantkering, Hartelkering en verbindende keringen in de Rijn-Maasmonding zorgt voor lagere waterstanden als deze stormvloedkeringen correct sluiten bij een storm. Het effect van een volledig beperken van de overstroombaarheid van de Maeslantkering, Hartelkering en de verbindende keringen wordt besproken voor een zeespiegelstijging van 5,4 m. Voor de locaties net achter de Maeslantkering is de reductie op de waterstand beperkt tot maximaal 0,1 m. In het rivierengebied is de waterstandsafname 0,2 – 0,3 m. In het overgangsgebied zorgt dit voor een afname van de waterstanden met 0,5 – 0,6 m. Dit leidt met name tot een reductie van de nominale kosten van circa 10% in de Rijn-Maasmonding en Nederrijn-Lek en 5% op de Waal en Maas voor zeespiegelstijgingen van 3 en 5,4 m.
6. De inzet van de Grevelingen en Volkerak-Zoommeer als waterbergingsgebied tezamen leidt tot lagere waterstanden op met name Haringvliet en Hollandsch Diep. Voor de gebieden direct achter de Europoortkering heeft dit minder invloed (maximaal 0,15 m bij een zeespiegelstijging van 5,4 m), omdat deze

verder van het bergingsgebied liggen en ze daarnaast een strengere norm hebben waarbij de faalkans van de Europoortkering dominant is. In het rivierengebied is de waterstandsafname ook beperkt tot 0,15 m bij een zeespiegelstijging van 5,4 m. In het tussenliggende gebied zorgt de inzet van extra berging voor een waterstandsafname van 0,3 tot 0,6 m. De inzet van het waterbergingsgebied zorgt voor een reductie van de nominale kosten met maximaal 10 % bij een zeespiegelstijging van 5,4 m.

7. **Systeemwerking door normvariatie.** Het effect wordt toegelicht bij een zeespiegelstijging van 5,4 m. In het gebied achter de Maeslantkering en Hartelkering is de afname van de waterstand van maximaal 0,2 – 0,3 m en in het rivierengebied maximaal 0,1 – 0,3 m. In het tussenliggende gebied is de waterstandsreductie door systeemwerking het grootst en maximaal rond 1 m. De maximale kostenreductie is bij een zeespiegelstijging van 5,4 m grofweg 15%. Net als bij het verhogen van sluitpeil, geldt ook hier geldt dat bij een gematigdere zeespiegelstijging de procentuele reductie groter zal zijn. Hierbij wordt opgemerkt wordt dat gebieden met lagere norm (als 1/300 per jaar) ook zullen overlopen ("systeemwerking door variatie van de normen in een gebied").
8. **Rivierverruimende maatregelen** hebben vooral effect in het bovenrivierengebied en zijn weinig effectief in de Rijn-Maasmonding dat door de waterstanden op zee wordt gedomineerd. Daarnaast zal de effectiviteit afnemen naarmate de middenstand van het getij in het gebied met meerdere meters stijgt. Rivierverruimende maatregelen zorgen voor een reductie van de nominale kosten met maximaal 30%. Bij lagere mate van zeespiegelstijging tot circa 2100 is het effect op met name de Nederrijn-Lek groter, maar richting 2200 neemt het effect af door de beleidsmaatregel Lek-Ontzien.
9. **De bodemontwikkeling van de Rijn-Maasmonding** wordt grotendeels bepaald door de hoeveelheid baggeractiviteit. Richting de toekomst wordt verwacht dat: (1) zeespiegelstijging zorgt voor een toename van de sedimenttoevoer vanuit de kust, (2) afvoer veranderingen zorgen voor een toename van de sedimenttoevoer vanuit de rivieren en (3) baggerhoeveelheden toenemen door hogere sedimenttoevoer en grotere schipdimensies. De huidige trend is voornamelijk erosie, met op een paar plekken beperkte aanzanding (1-10 cm). Toekomstige sedimentmanagementstrategieën zijn zeer bepalend voor de bodemontwikkeling in de Rijn-Maasmonding. Op basis het huidige sedimentmanagement is er geen reden om aan te nemen dat de bodemontwikkeling een negatieve invloed heeft op de hoogwaterveiligheid.
10. **Verhogen van het sluitpeil van de Oosterscheldekering** is deels besproken onder punt 4 hierboven. De Oosterscheldekering hoeft minder vaak te sluiten (waardoor de kans op falen afneemt). De waterstanden onder dagelijkse omstandigheden op het achterliggend bekken nemen toe door het verhogen van het sluitpeil. Het effect op de waterstanden bij de norm is beperkt..
11. **Het effect van het halveren van het lekdebiet van de Oosterscheldekering** levert weinig tot geen verandering in de hydraulische belastingen bij de normfrequentie, waarmee ook de impact op de opgave voor de keringen langs de Oosterschelde verwaarloosbaar is. In de praktijk zal in de situatie waarbij de Oosterscheldekering gesloten is, er minder water door de Oosterscheldekering binnen kunnen dringen. In de probabilistische berekening is dit effect beperkt. Het verkleinen van het lekdebiet zal de houdbaarheid van de voorkeursstrategie dus niet kunnen oprekken. In deze beleidsstudie is de invloed van het halveren van het lekdebiet van de Oosterscheldekering op de waterberging in de Oosterschelde niet onderzocht; zie hiervoor het onderzoek naar Plan Sluizen [HKV, 2015].

12. In de Oosterschelde is gekeken naar het effect van het meegroeien van de voorlanden met de zeespiegel. Een verhoging van de aanwezige voorlanden met een +0,5 m zorgt bij een zeespiegelstijging van 0,5 m voor gemiddeld 0,1 m en maximaal 0,3 m lagere minimaal benodigde kruinhoogtes. Dit effect verdwijnt nagenoeg volledig naarmate de zeespiegelstijging meer en meer toeneemt. Op de meeste plekken met een voorland is geen sprake van een opgave, waardoor de impact van deze gevoeligheidsanalyse op de waterveiligheidsopgave nauwelijks zichtbaar zal zijn.

2.8 Gevoeligheidsanalyses

Invloed van het meenemen van modelonzekerheden

In de basisberekeningen voor de hydraulische belastingen is géén rekening gehouden met modelonzekerheden in de waterstand en golfparameters. Om te verifiëren dat deze aanname de conclusies op hoofdlijnen niet beïnvloeden, is het effect voor 10 verspreid gelegen trajecten in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied onderzocht, conform de gehanteerde modelonzekerheden in het BOI2023 [HKV, 2021a]. Bij de normfrequentie zijn de verschillen in de waterstanden circa 0,05 – 0,10 m en in de minimaal benodigde kruinhoogtes 0,1 – 0,2 m. Het effect op de minimaal benodigde kruinhoogtes is groter, omdat niet alleen de onzekerheid in de waterstand, maar ook die in de golfhoogte en golfperiode een rol speelt. Het meenemen van modelonzekerheden heeft invloed op nominale kosten voor de beschouwde trajecten, maar zeer beperkt.

Invloed van overstromingen in het Bovenstroomse Duitse deel van de Rijn

Het aftoppen van de Rijnafvoer op 18.000 m³/s zorgt vooral in het afvoergedomineerde deel van het Rivierengebied voor een verlaging van de waterstanden. Het aftoppen van de Rijnafvoer heeft zeer weinig effect in de Rijn-Maasmonding, dat gedomineerd is door hoge zeewaterstanden. Door aftoppen van de Rijnafvoer op 18.000 m³/s (wat veroorzaakt kan worden door het overlopen van de waterkeringen in Duitsland) zal het water achterlangs via het achterland alsnog richting Nederland stromen en benedenstrooms op de IJssel, het Pannendensch Kanaal of de Waal terecht komen. Laatst genoemde effect is niet meegenomen in deze studie.

Referenties

- | Auteur | Titel |
|---|---|
| 1. Bamber et al. (2019). | Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. Bamber, J.L., M. Oppenheimer, R. E. Kopp, W. P. Aspinall en R. M. Cooke. Proceedings of the National Academy of Sciences 116(23), pp. 11195-11200 (DOI: 10.1073/pnas.1817205116). may 2019. |
| 2. Daneshi (2023). | Hoelang kan de Afsluitdijk mee met de huidige kenmerken en hoe robuust is die aangelegd aan de waddenzeezijde! M. Daneshi. Afstudeeronderzoek. Begeleid door Rijkswaterstaat, WVl. Van Hall Larenstein. Februari 2023. |
| 3. De Conto en Pollard (2016). | Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. Nature 531(7596):591-597. DOI:10.1038/nature17145. maart 2016. |
| 4. Elias, E., Van der Spek, A., & Lazar, M. (2016). | 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 - Geologie en Mijnbouw, 1-27. doi:10.1017/njg.2016.37 |
| 5. HKV (2015). | Achtergrondrapportage varianten voor afsluiting Rijnmond; MHW en HBN berekeningen in de Rijn-Maasmonding. T. Botterhuis en J.W. Stijnen. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL, HKV-rapport PR3014.20, Lelystad, augustus 2015. |
| 6. HKV (2021a). | Productieberekeningen BOI2023; Deelperceel 3: Rijn- en Maasmonding (conceptuitgangspunten). C. Oerlemans, J.W. Stijnen, M. Bénit en A. Paarlberg. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV- en Arcadis rapport PR4538.10, Lelystad, 26 oktober 2021. |
| 7. IPCC (2023). | Synthesis report of the IPCC Sixth assessment report (AR6). 20 maart 2023. |
| 8. RHDHV (2021). | Duidingskader strategieën zeespiegelstijging. In opdracht van Rijkswaterstaat, WVl. Referentie: BI1832-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001. Status: S0/P01.01. 8 december 2021. |
| 9. Rijkswaterstaat WVl (2019) | Beleidsaanbevelingen voor het langetermijn peilbeheer in het IJsselmeergebied: eindrapport integrale studie waterveiligheid en peilbeheer IJsselmeergebied. R Emmelzwaal, A.J. A. Kors, I. Tanczos, A. Hebbink en J. Helmer. Juni 2019. |
| 10. Rijkswaterstaat (2021a). | Tijdelijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging. RWS memo. 24 maart 2021. |
| 11. Rijkswaterstaat (2021b). | Kennisdocument Waterveiligheid IJsselmeergebied. Kennisprogramma zeespiegelstijging fase 1. A. R Emmelzwaal, november 2021. |
| 12. Rijkswaterstaat (2022a). | Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Zandige waterkeringen kust. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v1.0, oktober 2022. |
| 13. Rijkswaterstaat (2022b). | Systeemanalyse Waterveiligheid. Systeemanalyse Waterveiligheid. Deelrapport Harde Kust - Onderdeel Veerse Gatdam. 11 november 2022. |
| 14. Rijkswaterstaat (2022c). | Systeemanalyse Waterveiligheid. Systeemanalyse Waterveiligheid. Deelrapport Harde Kust - Onderdeel Flauwe Werk. 11 november 2022. |
| 15. Rijkswaterstaat (2022d). | Systeemanalyse Waterveiligheid. Systeemanalyse Waterveiligheid. Deelrapport Harde Kust - Deelsectie Brouwersdam. 18 oktober 2022. |
| 16. Rijkswaterstaat (2023a). | Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Waddenzee en Eems-Dollard. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023. |

17. Rijkswaterstaat (2023b). Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023.
18. Rijkswaterstaat (2023c). Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Harde waterkeringen kust. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023.
19. Rijkswaterstaat (2023d). Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Zuidwestelijke Delta. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023.

