

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Systemanalyse Waterveiligheid

Bovenregionaal syntheserapport Systemverkenningen

Rapportnummer: PR5157.20



RWS INFORMATIE

Systeemanalyse Waterveiligheid

Bovenregionaal syntheserapport

Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Systemverkenningen

| | |
|--------|------------------|
| Datum | 11 november 2025 |
| 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 |
| In opdracht van | Rijkswaterstaat WVL |
| Auteurs | Wouter ter Horst (HKV) |
| Informatie | Ir. A. Labrujere |
| Functie | Technisch Manager Waterveiligheid |
| Telefoon | 06 2509 3164 |
| E-mail | Astrid.Labrujere@rws.nl |
| Datum | November 2025 |
| Versie | 1.0 |
| Status | Definitief |

Versiebeheer

| | | |
|-----|------------|---|
| 0.1 | 25-09-2025 | Concept rapportage |
| 0.9 | 17-10-2025 | Definitief concept (opmerkingen RWS verwerkt) |
| 1.0 | 12-11-2025 | Definitief rapport |
| | | |
| | | |
| | | |



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Inhoud

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding | 4 |
| 1.1 | Algemeen | 4 |
| 1.2 | Achtergrond project | 4 |
| 1.3 | Positionering Systeemanalyse waterveiligheid | 5 |
| 1.4 | Scope..... | 6 |
| 1.5 | Fasering | 7 |
| 2 | Hoofdboodschappen | 9 |
| 3 | Bovenregionaal beeld | 11 |
| 3.1 | Impact van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen | 13 |
| 3.2 | Impact van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave | 15 |
| 3.3 | Ruimtelijke impact..... | 19 |
| 3.4 | Impact op dijkversterkingskosten | 21 |
| 4 | Oprekmaatregelen | 23 |
| 4.1 | Strategieverlengende maatregelen in de Rijn-Maasmonding..... | 23 |
| 4.2 | Maatregelen in overige regio's..... | 29 |
| 5 | Bevindingen en aanbevelingen | 30 |
| 5.1 | Aannames | 30 |
| 5.2 | Bevindingen..... | 31 |
| 5.3 | Discussiepunten | 31 |
| 5.4 | Conclusies | 33 |
| | Referenties | 34 |
| | Bijlage A: Overzicht rapporten Systeemanalyse Waterveiligheid | 36 |
| | Bijlage A.1: Overzichtsfiguur rapporten | 36 |
| | Bijlage A.2: Beschrijving achtergrondrapporten Systeemanalyse Waterveiligheid .. | 37 |
| | Bijlage A.3: Referenties genoemde rapporten..... | 39 |
| | Bijlage B: Beschouwing bovenregionaal beeld | 43 |
| | Bijlage B.1: Impact per deelgebied | 43 |
| | Bijlage B.2: Nadere informatie kosten dijkversterkingen | 47 |
| | Bijlage B.3: Impact op sluitfrequenties van stormvloedkeringen | 49 |
| | Bijlage C: Impact van zeespiegelstijging in figuren | 51 |
| | Bijlage C.1: Impact op waterstanden..... | 51 |
| | Bijlage C.2: Impact op HBN..... | 52 |
| | Bijlage C.3: Impact op hoogteopgave | 53 |
| | Bijlage C.4: Impact op benodigde dijkbreedte | 54 |
| | Bijlage C.5: Impact op aantal gebouwen in versterkingszone..... | 55 |

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 watersysteem 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 aan de hand van vier vragen ontwikkeld.

Ten eerste wordt onderzoek gedaan naar de onzekerheden rondom het afsmelten van de ijskappen op Antarctica. Ten tweede wordt in de systeemanalyses onderzocht welke gevolgen ZSS heeft voor onze hoogwaterveiligheid en zoetwaterbeschikbaarheid en vormt daarmee belangrijke input voor de houdbaarheid van de voorkeursstrategie (VKS) van het Deltaprogramma. Ten derde wordt een methode ontwikkeld om tijdig te kunnen signaleren en de nodige maatregelen hierop te kunnen nemen. Ten slotte wordt bekeken in de lange termijn denkrichtingen welke aanpassingen aan de VKS nodig zijn als die niet meer houdbaar zijn.

Dit rapport is onderdeel van de systeemverkenningen van het Kennisprogramma. In de verkenningen worden langs drie thema's onderzoek gedaan naar de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma, te weten waterveiligheid, de zandige kust en zoetwater. In de systeemverkenningen wordt met behulp van de Impactanalyse ook het effect op andere functies onderzocht. 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 het Deltaprogramma en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat meer inzicht krijgen in de eerste orde effecten van verschillende zeespiegelstijgingen op het hoofdwatersysteem en de primaire waterkeringen in Nederland. Rijkswaterstaat voert de systeemanalyse uit. Binnen het KP ZSS wordt kennis ontwikkeld om op een beter onderbouwde wijze en lange termijn blik 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

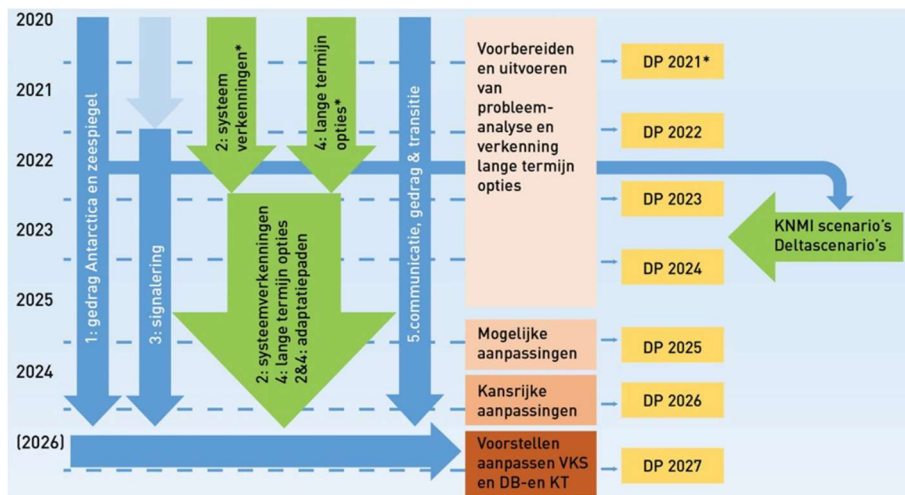
naar het hoofdwatersysteem, en van daaruit naar zee wijzigen. Ook de sluitfrequenties van stormvloedkeringen nemen toe. Door grotere hydraulische belastingen (hogere waterstanden en grotere golven) is vaker en in grotere mate een versterking van de keringen nodig om aan de vereiste overstromingskans te voldoen. De studie in dit project, de zogenaamde 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 effecten ten behoeve van de houdbaarheid van de voorkeursstrategieën (VKS) waterveiligheid van het Deltaprogramma uitgerekend. De waterstaatkundige effecten zijn beschreven in het Duidingskader [RHDHV, 2021]. Het KP ZSS stelt de resultaten van deze studie beschikbaar zodat in de volgende fase de DP-regio's de impact van zeespiegelstijging op verschillende functies in beeld te kunnen brengen, de houdbaarheid van de voorkeursstrategie te duiden en overige oprekmogelijkheden te verkennen.

1.3 Positionering Systeemanalyse waterveiligheid

De systeemanalyse waterveiligheid 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 de systeemanalyses zijn in totaal drie thema's geïdentificeerd: Waterveiligheid (keringen en kunstwerken), Zandige Kust (lange-termijn kustontwikkeling), en Zoetwater (verzilting en direct daaraan gekoppeld peilbeheer).



Figuur 1: Globale planning van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (bron: [Rijkswaterstaat, 2022a])

De doelstelling van Systeemanalyses 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;

- o wat de kansrijkheid van lange-termijn oplossingsrichtingen is; de lange-termijn oplossingsrichtingen worden in Spoor IV geagendeerd.

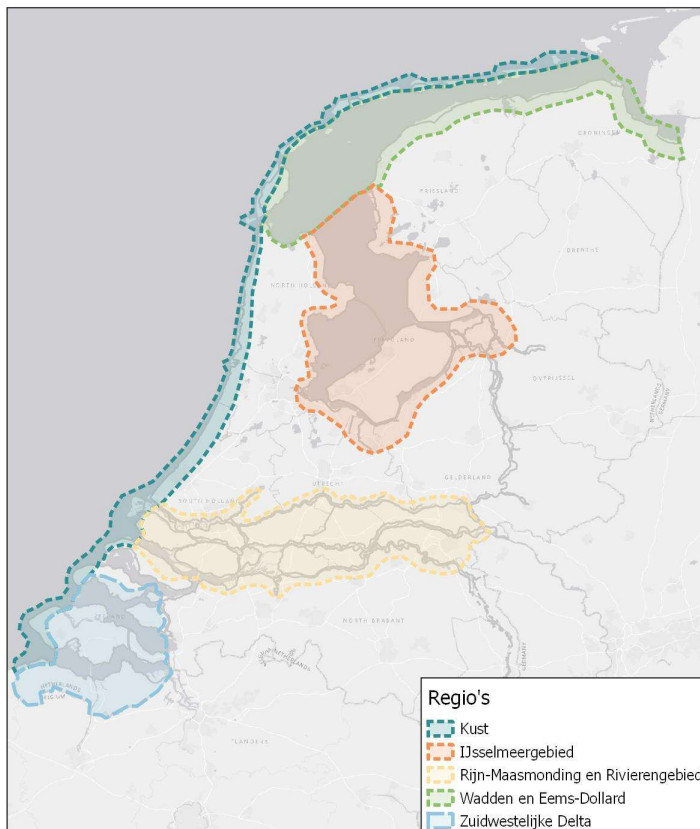
Dit rapport gaat in op alle drie de punten.

Een overzicht van alle rapporten die in het kader van de systeemanalyse waterveiligheid zijn gemaakt, is weergegeven in Bijlage A.

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.

Een overzicht van alle rapporten die in het kader van de Systeemanalyse Waterveiligheid zijn gemaakt is opgenomen in bijlage A. 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 Pannerdensche kop. 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.

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 Fasering

De Systeemanalyse Waterveiligheid bestaat uit twee fasen. In de eerste fase is voor verschillende regio's het effect van zeespiegelstijging bepaald. Deze effecten zijn per regio beschreven in een rapport. 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).

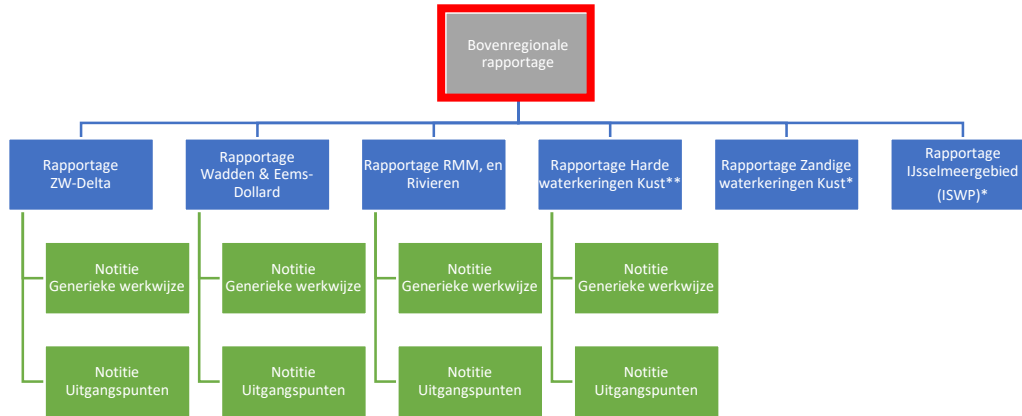
¹ Een normtraject is een dijktraject of duintraject – bestaande uit kleinere dijkvakken of kustvakken - dat direct bescherming biedt tegen een overstroming vanuit het hoofdwatersysteem. Voor elk dijkvak of kustdoorsnede is de waterveiligheidsopgave bij de ondergrensnorm bepaald. Voor elk normtraject 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 kustraii waarvoor JARKUS metingen beschikbaar zijn.

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.

Op basis van de rapportages per regio is als eindpunt van fase 1 de bovenregionale synthese geschreven [Rijkswaterstaat, 2023e].



*) 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.

In de tweede fase van de systeemanalyse zijn de oprekmogelijkheden onderzocht. De gedachte is om maatregelen te definiëren die ervoor kunnen zorgen dat een veiligheidsstrategie langer kan worden gevolgd. Voor de Rijn-Maasmonding zijn op deze wijze pakketten met strategieverlengende maatregelen samengesteld en doorgerekend.

Daarnaast is voor een aantal andere regio's gekeken welke maatregelen kunnen worden ingezet om een extra bijdrage aan de waterveiligheid. Het gaat hierbij om de volgende maatregelen:

- Het verbeteren van de Oosterscheldekering
- Het vergroten van pompcapaciteit op de Afsluitdijk
- Het vergroten en verhogen van voorlanden in de Waddenzee en de Westerschelde.

2 Hoofdboodschappen

In dit hoofdstuk zijn de hoofdboodschappen uit de systeemanalyse waterveiligheid weergegeven. De hoofdboodschappen hebben betrekking op fase 1 (effect van zeespiegelstijging) en fase 2 (oprekmaatregelen). In de hoofdboodschappen zijn de belangrijkste inzichten uit de analyses opgesomd. In de hoofdstukken 3 (Bovenregionaal Beeld), 4 (Oprekmaatregelen) en 5 (Bevindingen en aanbevelingen) zijn de hoofdboodschappen verder uitgewerkt.

1) Zeespiegelstijging kan in principe worden gekeerd

Een zeespiegelstijging tot 3m langs de gehele kust (Westerschelde, Hollandse Kust en Waddenzee) kan, gezien vanuit een waterveiligheidsperspectief, worden gekeerd. Dijkversterkingen in deze gebieden zijn technisch mogelijk, maar zorgen onder andere voor een aanzienlijke ruimteclaim.

2) Dagelijkse omstandigheden doen ertoe

Ook dagelijkse waterstanden stijgen. Dit heeft een groot effect op buitendijkse gebieden en bepaalt voor een groot deel de versterkingskosten van dijken in het huidige watersysteem. Grofweg 80% van de versterkingskosten komen in de Rijn-Maasmonding voort uit het feit dat ook de dagelijkse waterstanden door zeespiegelstijging stijgen.

3) Ook versterkingskosten zonder zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging is slechts één van de oorzaken waarom in de toekomst dijkversterkingen nodig zullen zijn. Naast vervanging en renovatie van de keringen vanwege onderhoud (einde levensduur), hebben we door klimaatverandering te maken met een toename van de rivierafvoer en een bodemdaling die blijft doorzetten. Met name deze laatste oorzaak draagt in grote delen van Nederland fors bij aan de (toekomstige) versterkingsopgave.

4) Het sluitpeil is een belangrijke sleutel

Het peil waarbij voorliggende stormvloedkeringen gesloten worden (sluitpeil) is een belangrijke knop. Het beïnvloedt de veiligheid en wateroverlast in het achterliggende gebied. Het bepaalt hoe vaak een stormvloedkering dicht gaat en daarmee de eventuele hinder voor scheepvaart. Bij verdergaande zeespiegelstijging ontstaat er een conflict tussen verhogen van het sluitpeil en het verhogen van de sluitfrequentie. Bij een hogere sluitfrequentie wordt de scheepvaart steeds vaker belemmerd en wordt het technisch onderhoud van de stormvloedkeringen steeds uitdagender. Hiermee komt de houdbaarheid van de voorkeursstrategie in zicht.

5) Maatregelen kunnen de voorkeursstrategie beperkt verlengen

Maatregelen als extra waterberging, het verbeteren van stormvloedkeringen (lagere faalkans) en het inzetten van pompen verlagen de waterstanden in het betreffende gebied. Hiermee kan de voorkeursstrategie in dat gebied langer in stand worden gehouden. Het is echter zo dat de waterstandsverlaging ten opzichte van de totale zeespiegelstijging niet groot is.

6) Buitendijkse gebieden zijn kwetsbaar

Buitendijkse gebieden komen als eerste in de problemen bij zeespiegelstijging. Door het Afsluitbaar-Open systeem stijgen ook de dagelijkse waterstanden, waardoor buitendijkse gebieden bij een zeespiegelstijging van 0,5m tot 1,0m in de problemen kunnen komen. Het maaiveld is in deze gevallen nog hoog genoeg, maar aanleg van infrastructuur en nutsvoorzieningen kan in de problemen komen door de hoge dagelijkse waterstanden.

7) Regionale boezemsystemen komen onder druk te staan

Door zeespiegelstijging zullen veel boezemsystemen onder druk komen te staan. Door de combinatie van bodemdaling, hogere rivierafvoeren en zeespiegelstijging wordt het steeds kostbaarder om boezempeilen te beheersen. Dit betekent de aanleg van meer pompen en sluizen, maar ook sterkere dijken.

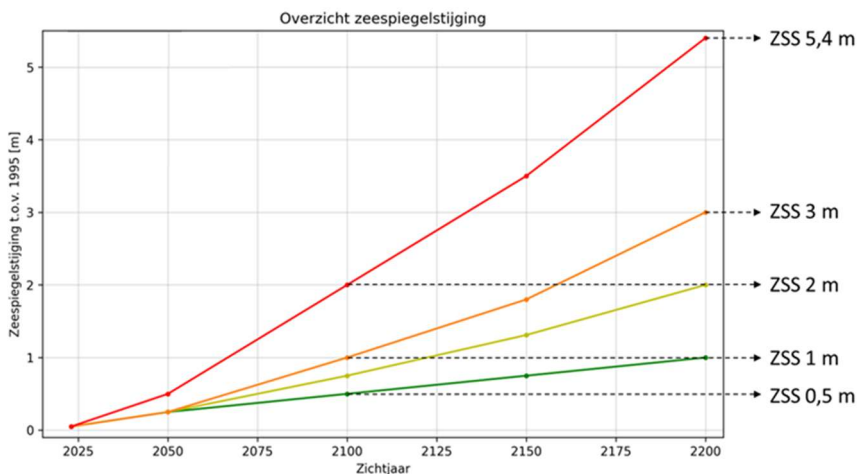
3 Bovenregionaal beeld

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 (systeem verlengende maatregelen). Zodoende kunnen grootschalige systeeminterventies uitgesteld worden. 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 en stormvloedkeringen).

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]. Naast zeespiegelstijging zijn ook de verwachte toename van de rivierafvoer en bodemdaling meegenomen in de berekeningen.



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

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

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.

kostenschattning dan wanneer dezelfde mate van zeespiegelstijging éérder 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 meter 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 zeespiegelstijging van 1m (Tijdlijn Extreem in 2100) en 3m (Tijdlijn Extreem in 2200). 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]. 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 omgevingswaarde uit de Omgevingswet (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 omgevingswaarde in de Omgevingswet ("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.

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 |

Tabel 1 laat zien dat tussen 1995 en 2050 een zeespiegelstijging van 0,25m is ingeschat. Dit betekent dat in toekomstige zichtjaren de zeespiegelstijging ten

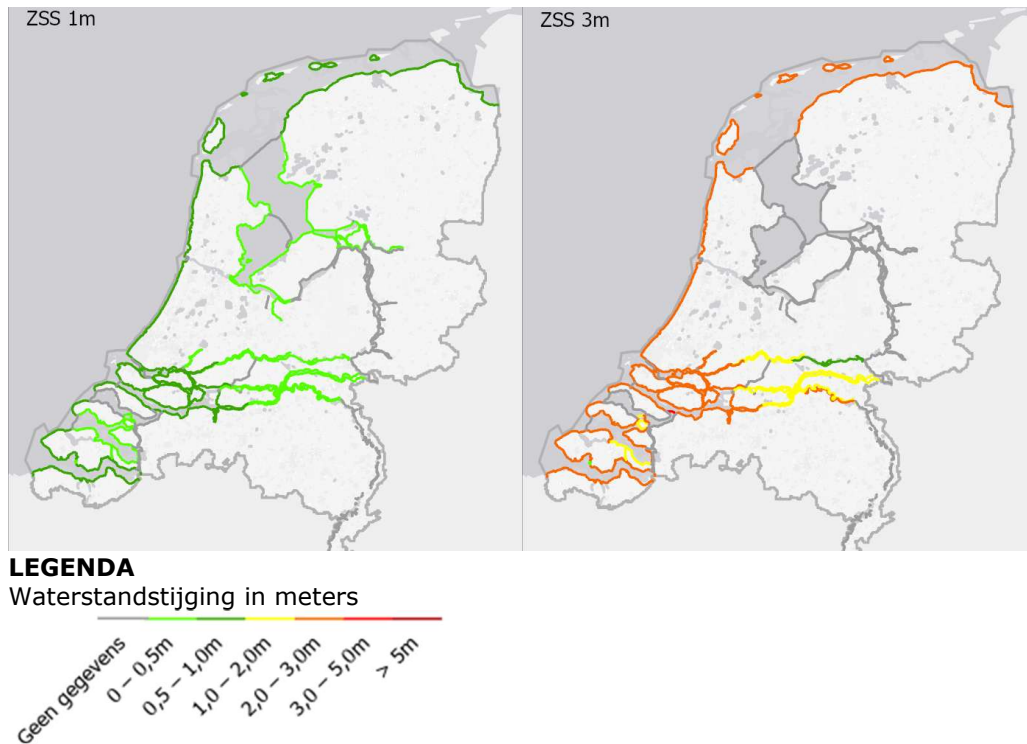
opzichte van 2050 lager is. Gemakshalve spreken wij in dit rapport over zeespiegelstijging van 0,5m, 1m, 2m, 3m en 5m. Hierbij worden de getallen in Figuur 4 en Tabel 1 bedoeld.

3.1 Impact van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen

In deze paragraaf beschouwen we de impact 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. Een toenemende zeespiegel heeft niet alleen invloed op de waterveiligheid van de primaire waterkeringen, maar ook op de overstroming van buitendijkse gebieden. In deze paragraaf is op verschillende onderdelen de impact voor 1m en 3m zeespiegelstijging weergegeven. In bijlage C zijn figuren opgenomen waar de impact voor 1m, 2m, 3m en 5m is te zien.

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

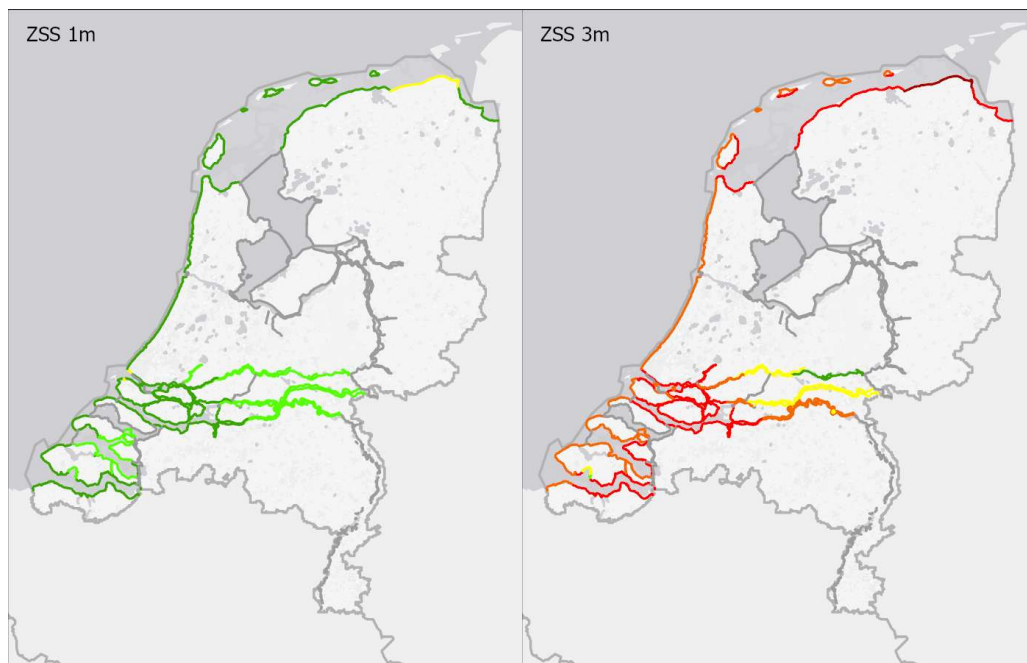


Figuur 5: Toename van de waterstand bij de norm ten opzichte van 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging (ZSS).

Voor het IJsselmeergebied is alleen de zeespiegelstijging van 1,0m opgenomen aangezien dit grootste zeespiegelstijging is die in kaart is gebracht in 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 zeespiegelstijging.

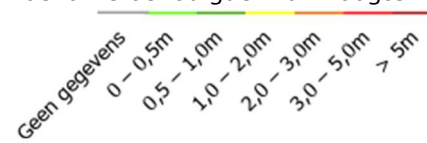
3.1.2 Impact op de minimaal benodigde kruinhoogtes voor golfoverslag

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.



LEGENDA

Toename benodigde kruinhoogte in meters



Figuur 6: Toename van de minimaal benodigde kruinhoogte bij de faalkanseis 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 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 1m en 3m zeespiegelstijging. 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

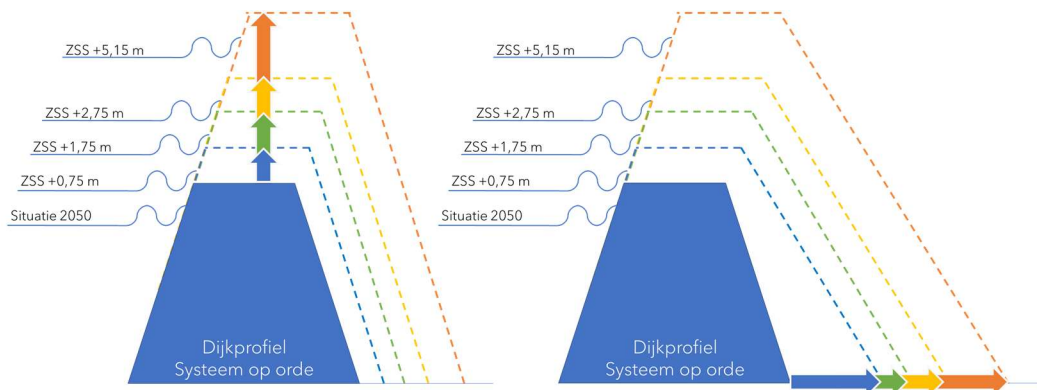
benodigde kruinhoogtes dan die uit de 1^e landelijke beoordelingsronde met overstromingskansen (LBO1) met het WBI2017. Voor de kunstwerken geldt dat de hoogteopgave is bepaald op basis van de overloopsituatie. Deze grovere benadering wijkt ook af van de 1^e landelijke beoordelingsronde met overstromingskansen (LBO1), waarin het overslagdebiet probabilistisch is bepaald en daarnaast rekening is gehouden met komberging achter het kunstwerk.

3.2 Impact van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave

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 eis horend bij de omgevingswaarde 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. Bij de kostenberekening voor dijken wordt tevens een toeslag op de kosten voor het aanpassen van de dijkbekledingen gegeven.

Uitgangspunt Systeem op orde

De impact van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave is bepaald ten opzichte van zichtjaar 2050, het jaar waarin alle dijken en kunstwerken minimaal voldoen aan eisen uit de omgevingswet. Omdat in de huidige situatie nog niet alle dijken en kunstwerken voldoen aan de omgevingswaarde uit de omgevingswet, is eerst de opgave tot en met 2050 bepaald om het systeem van dijken en kunstwerken "op orde" te brengen. Bij de bepaling van deze opgave zijn de dijkversterkingen die nu al op het Hoogwaterbeschermingsprogramma staan buiten beschouwing gelaten. Voor de overige dijkvakken die niet aan de omgevingswaarde voldeden is bepaald welke dijkversterking noodzakelijk is om in 2050 aan de eisen te voldoen. Ook zijn er dijken en kunstwerken die nu méér bescherming bieden dan minimaal benodigd bij de omgevingswaarde. Voor deze dijken en kunstwerken geldt dat het eerste versterkingsmoment pas ná 2050 ligt. Voor de zichtjaren 2100, 2150 en 2200 is vervolgens steeds het verschil met het uitgangspunt "Systeem op orde" c.q. het zichtjaar 2050 bepaald.



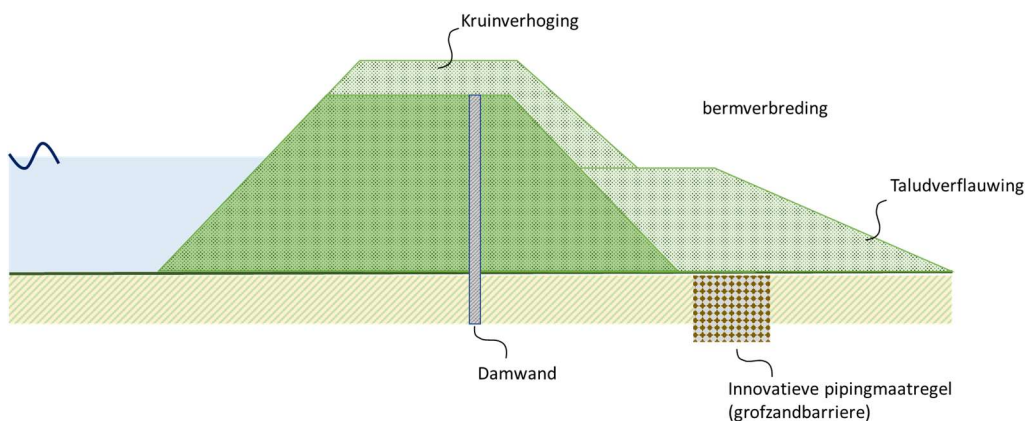
Figuur 7: Schematische weergave van de hoogteopgave en sterkteopgave (verbreding dijkbasis door taludverflauwing) voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging.

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.

Verschillende versterkingsmaatregelen

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.

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 ontwerp- en uitvoeringspraktijk. De dijken worden versterkt voor een vaste ontwerplevensduur van 50 jaar. De eventuele constructieve elementen in de dijk (damwanden, diepwanden, kistdammen) worden ontworpen met een levensduur van 100 jaar.



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

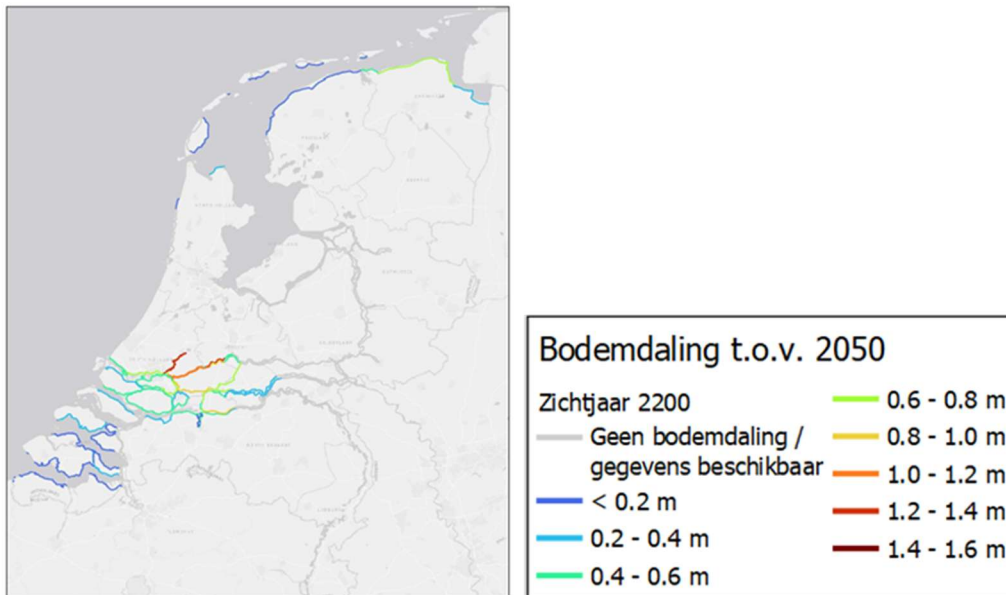
De opgave voor kunstwerken bestaat uit een verhoging van de huidige kerende hoogte van het kunstwerk⁶. Dit kan betekenen dat het kunstwerk gedeeltelijk versterkt wordt, of volledig vervangen wordt bij het bereiken van het einde van de ontwerplevensduur van 100 jaar.

In algemene zin worden de kosten van dijkversterkingen bepaald op basis van de huidige stand der techniek. De meest recente innovaties tav piping (bijvoorbeeld Verticaal Zanddicht Geotextiel en Grofzandbarriere) zijn meegenomen in OKADER al worden zij in de praktijk nog weinig toegepast.

Bodemdaling en morfologie

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.

⁶ 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.



Figuur 9: Ruimtelijk beeld gehanteerde bodemdaling passend bij zichtjaar 2200 ten opzichte van 2050 [Deltares, 2014].

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 2 weergegeven. De hoogteopgave is bepaald per dijkvak en vervolgens is de gemiddelde hoogteopgave per traject bepaald. Hierbij is rekening gehouden met de totale lengte dijkvakken met een hoogteopgave en de hoogteopgave bij deze dijkvakken.

Tabel 2: 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 bijlage B.2.

| ZSS ten opzichte van 2050 | Gemiddelde hoogteopgave voor de dijken | | | | | | |
|---------------------------|--|-------------|-----------------|---------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|
| | Zuid-westelijke delta II | RMM – delta | Rivieren-gebied | Wadden-gebied | Zandige water-keringen kust | Harde water-keringen kust IV | IJsselmeergebied III |
| 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 |

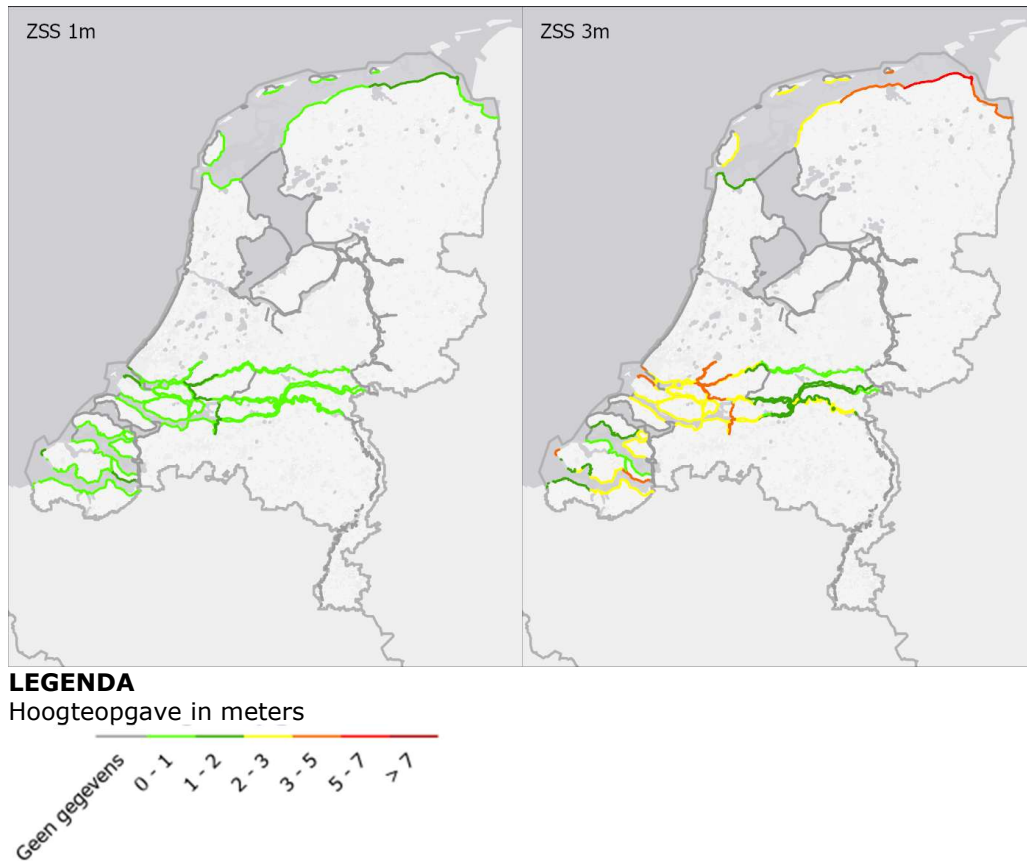
I) Voor de zandige waterkeringen langs de kust is de hoogteopgave niet relevant, want hier wordt de opgave bepaald op basis van de duinafslaghoeveelheid.

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.

In Figuur 10 is de gemiddelde toename van de hoogteopgave per traject in meters ten opzichte van 2050 (systeem op orde) getoond.



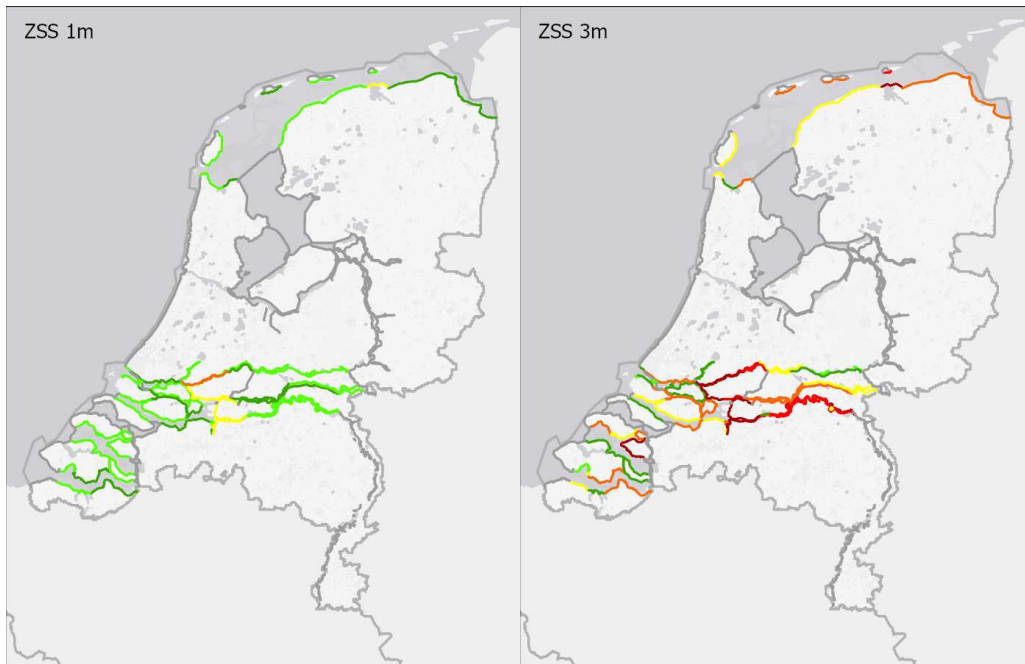
Figuur 10: Hoogteopgave ten opzichte van 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging.

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.

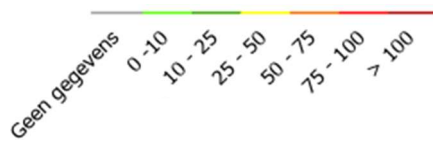
Als een dijk geen resthoogte heeft in 2050, dan is de toename van de hoogteopgave ten opzichte van 2050 gelijk aan de toename van de minimaal benodigde kruinhoogte door zeespiegelstijging en bodemdaling (onder de dijk).

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.

**LEGENDA**

Benodigde dijkbreedte in meters



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

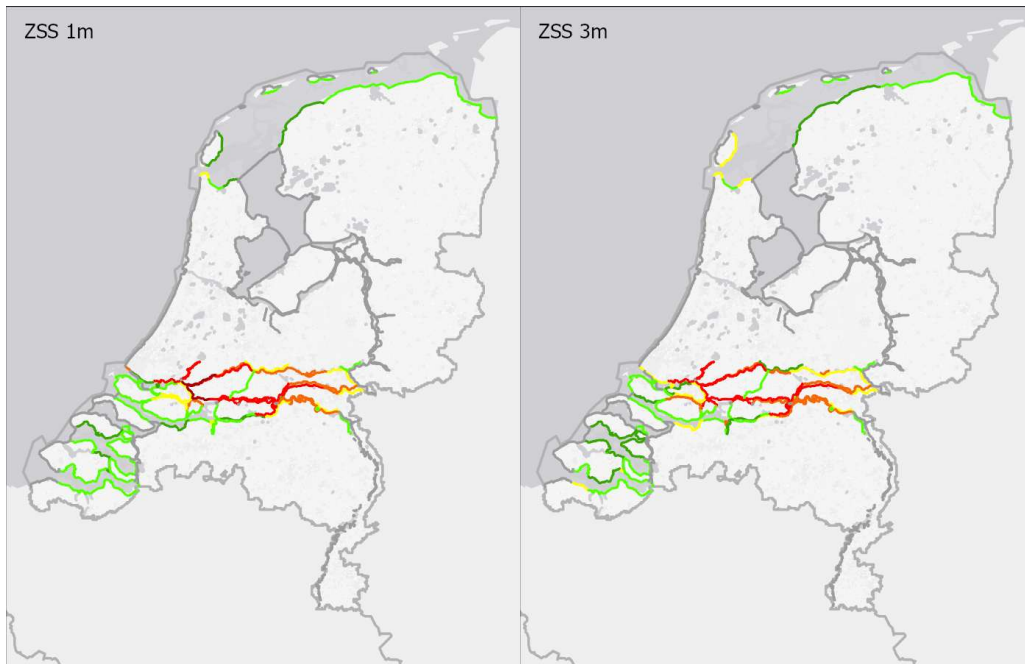
Hoogteopgave kunstwerken

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.

3.3 Ruimtelijke impact

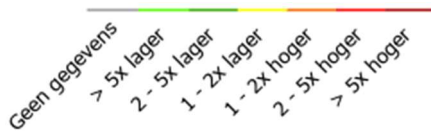
De omvang van de versterkingsopgave is hierboven besproken. In deze paragraaf geven we inzicht in welke regio's de grootste ruimtelijke knelpunten zullen ontstaan. Als indicator hiervoor hanteren we het aantal gebouwen die zich bevinden in de versterkingszone van de waterkering. In regio's met grote 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 worden⁷.

⁷ Andere oplossingen waaraan gedacht kan worden zijn bijvoorbeeld buitendijks versterken, of watersysteemmaatregelen. Deze maatregelen zijn in deze studie buiten beschouwing gelaten.



LEGENDA

Toename aantal gebouwen in versterkingszone (factor)



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 2021.⁸ 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 Zuidwestelijke Delta⁹, 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 nu al huizen geamoveerd of verplaatst, net zoals dat in de toekomst het geval zal zijn. Welke optie het "beste" is, zal in werkelijkheid per

⁸ KOSWAT maakt gebruik van een verouderde bebouwingsdatabases o.b.v. de TOP10NL 2013/2014.

⁹ 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.

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.

3.4 Impact op dijkversterkingskosten

Voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging zijn op basis van de versterkingsopgave voor de dijken en kunstwerken de kosten¹⁰ voor de waterveiligheidsopgave in een zichtjaar ten opzichte van zichtjaar 2050 (referentie – tijdlijn Laag) bepaald. Deze kosten zijn weergegeven in Figuur 13. De 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. Op deze manier is gecorrigeerd voor dijken die nu niet aan de norm voldoen en tevens is bodemdaling meegenomen.



Figuur 13: Kosten van zeespiegelstijging ten opzichte van 2050 (Systeem op orde)

Bij de kosten worden de volgende opmerkingen geplaatst:

- In OKADER wordt in het jaar (t) dat een dijk niet meer voldoet de dijk versterkt met een ontwerplevensduur van 50 jaar. In het jaar (t+50) voldoet de dijk dan nog net. Het eerstvolgende versterkingsmoment in OKADER is dan na 55 jaar aangezien er met tijdstappen van 5 jaar wordt gerekend. Stel de dijk moet voor het eerst versterkt worden in 2045 (en dit geldt voor een aanzienlijk aantal dijken die nu nog niet geprogrammeerd zijn binnen het HWBP), dan vindt de 2^e versterking dus plaats in 2100, en de 3^e versterking in 2155. In het 3^e tijdvak van 2100-2150 zit dan geen versterking. Dit gegeven heeft weinig

¹⁰ In de Systeemanalyse Waterveiligheid worden toekomstige investeringskosten en baten niet teruggerekend naar het basisjaar (contant gemaakt) via de discontovoet, maar worden de kosten passend bij eenzelfde zichtjaar gepresenteerd.

consequenties voor de totale dijkversterkingskosten die zijn uitgerekend, maar zorgt wel voor een lichte verandering in toedeling van de kosten over de verschillende tijdsintervallen.

- Voor de kosten van de zandige waterkeringen langs de kust geldt dat onderhoudskosten (o.a. suppleties) niet zijn meegenomen. Het betreft alleen versterkingskosten.
- Voor de harde waterkeringen langs de kust geldt dat de kosten van het sluisencomplex IJmuiden zijn meegenomen met uitzondering van de Zeesluis IJmuiden.
- De kosten voor de Zuidwestelijke delta zijn 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).
- De kosten voor het IJsselmeergebied betreffen alleen de kosten voor het versterken van de dijken (ISWP, 2019). 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 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.

In bijlage B.2 wordt nader ingegaan op de kosten per kilometer te versterken dijk en de gemiddelde jaarlijkse kosten.

4 Oprekmaatregelen

Na een eerste fase van de Systeemanalyse Waterveiligheid zijn verschillende mogelijkheden onderzocht om de huidige voorkeursstrategie te verlengen. Dat is door het ISWP gedaan, maar ook door het KPZSS voor de RMM. Het doel is om vast te stellen met welke maatregelen de voorkeursstrategie effectief verlengd kan worden en om vast te stellen waar de grenzen liggen van de huidige voorkeursstrategie.

In dit hoofdstuk wordt in de eerste paragraaf ingegaan op strategieverlengende maatregelen in de Rijn-Maasmonding. In de tweede paragraaf worden verschillende oprekmaatregelen in andere regio's besproken.

4.1 Strategieverlengende maatregelen in de Rijn-Maasmonding

De beschouwde maatregelen voor de Rijn-Maasmonding zijn samengenomen in drie verschillende maatregelpakketten. Dit betekent echter niet dat er geen enkele maatregel aan het watersysteem wordt uitgevoerd wanneer niet een van de drie maatregelpakketten wordt beschouwd. Er is sprake van een basissituatie die het huidige watersysteem op peil houdt. In deze basissituatie geldt:

- De noodzakelijke vervanging (en eventuele verbetering) van de huidige SVK's, zoals voorzien in de Voorkeursstrategie, is beschouwd als een oprekmaatregel en zijn daarom geen onderdeel van de basissituatie.
- De waterkeringen zijn op orde. Alle dijkversterkingen via het reguliere Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) worden in mindering gebracht op de berekende opgave. In 2050 zijn de dijken minimaal op orde, maar omdat dijken in de regel versterkt worden voor 50 jaar kunnen zij in 2050 nog resthoogte (en/of reststerkte) hebben.

In aanvulling op de basissituatie zijn drie maatregelpakketten onderzocht (Oerlemans et al., 2024):

Maatregelpakket I: Uitbreiding waterberging in de Zuidwestelijke Delta

Dit maatregelpakket houdt in dat ten opzichte van de basissituatie wordt gekozen om het waterbergend vermogen in de Zuidwestelijke Delta uit te breiden. Door voldoende doorstroomoppervlak in de Volkerakdam en de Grevelingendam te realiseren, wordt extra waterberging gecreëerd op het Grevelingenmeer bij sluiting van de stormvloedkeringen.



Figuur 14: Weergave maatregelpakket I met vergroting van doorstroomoppervlakte in de Volkerakdam en de Grevelingendam

Maatregelpakket II: Verbeteren Europoortkering en Haringvlietdam (+ uitvoering pakket I)

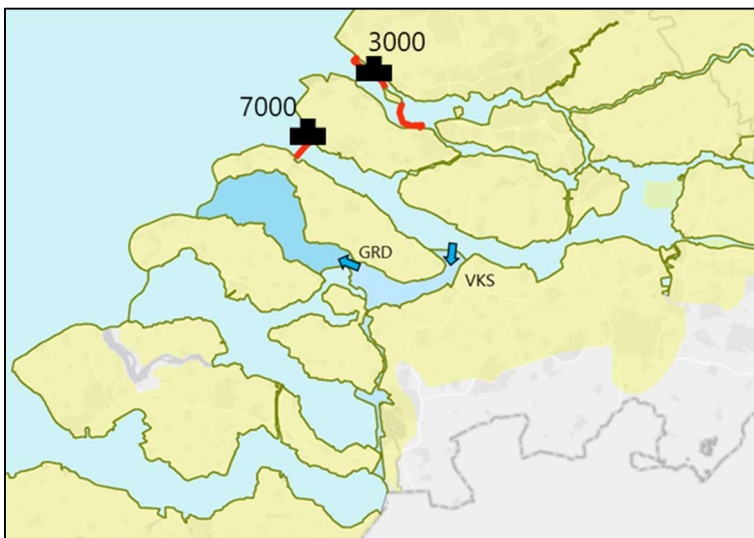
Maatregelpakket II betekent het verkleinen van de faalkans van de Europoortkering (EPK: Maeslant- en Hartelkering) tot 1x per 5.000 sluitingen. Daarnaast wordt de kerende hoogte van de EPK en de Haringvlietdam aanzienlijk verhoogd.



Figuur 15: Weergave maatregelpakket II met verbeteren Europoortkering en Haringvlietdam (plus uitvoering maatregelpakket I)

Maatregelpakket III: Aanleg van gemalen (+ uitvoering pakket II)

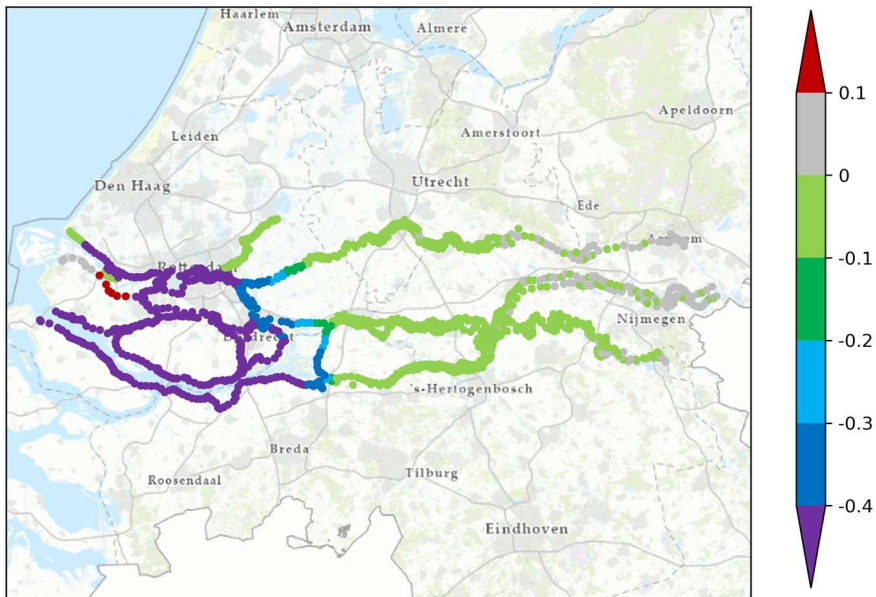
Maatregelpakket III bevat de aanleg van gemalen bij de EPK en bij de Haringvlietdam om tijdens hoogwater extra water uit het systeem te kunnen pompen, zodat de waterstand bij een sluiting van de stormvloedkeringen niet te hoog oploopt (mocht de waterberging onvoldoende zijn). Bij maatregelpakket III wordt er tevens voor gekozen om waterberging eerder in te zetten.



Figuur 16: Weergave van maatregelpakket III met de aanleg van gemalen bij de Europoortkering en de Haringvlietdam (plus uitvoering maatregelpakket II)

4.1.1 Resultaten berekeningen strategieverlengende maatregelen

Voor de Rijn-Maasmonding zijn de effecten van de maatregelpakketten op de lokale waterstand bepaald (zie Figuur 17 als voorbeeld). Op basis van de waterstandseffecten is vervolgens de verlaging van de versterkingsopgave en de daaraan gekoppelde kostenreductie bepaald.

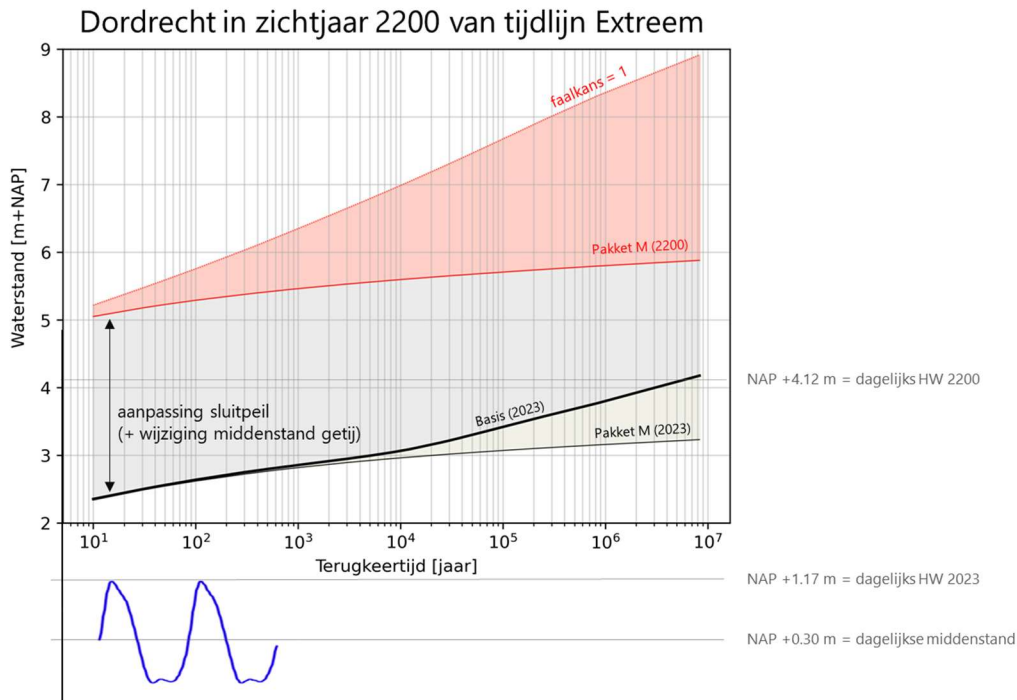


Figuur 17: Voorbeeld van gebiedsdekkende uitvoer (waterstandsdeling bij uitvoering maatregelpakket III in 2100 bij 1,0m zeespiegelstijging)

Om gedetailleerder inzicht te krijgen in de effecten op waterstand, versterkingsopgave en kosten is ingezoomd op één locatie (Dordrecht). De informatie die in onderstaande tekst voor Dordrecht wordt gepresenteerd is voor iedere locatie in Figuur 17 beschikbaar).

Effect op de waterstand

Figuur 18 geeft waterstandsfrequentielijnen voor diverse toestanden van het watersysteem op voorbeeldlocatie Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem. Onder de figuur geven we een nadere toelichting op de gepresenteerde informatie, waarbij we voor het bepalen van de bandbreedte van de resultaten ook het maximaal haalbare effect van systeemmaatregelen ("pakket M") introduceren.



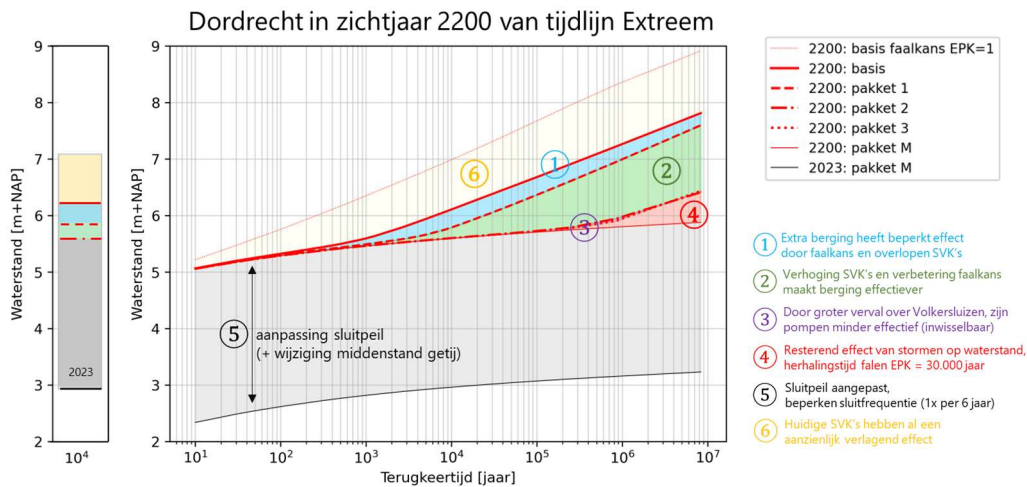
Figuur 18: Waterstandsfrequentielijnen voor diverse toestanden van het watersysteem op voorbeeldlocatie Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem.

De dikke zwarte lijn, Basis (2023), geeft de waterstandsfrequentielijn in de basissituatie (de huidige voorkeursstrategie, zonder de maatregelpakketten) in 2023. De waterstand met een herhalingsstijd van 1/10.000 per jaar komt daarin overeen met NAP +3,07 m.

De blauwe lijn geeft het dagelijks getij weer met als piekwaarde de dagelijkse hoogwaterstand van NAP +1,17m.

De onderste, dunne grijze lijn, Pakket M (2023), is de frequentielijn voor het fictieve maatregelpakket M voor zichtjaar 2023, wat het theoretisch maximale effect van maatregelen simuleert. Deze lijn bevat dus geen toename van de zeespiegelstijging en geen toename van de rivierafvoer omdat we nog in 2023 zitten. De bovenste, dunne rode stippellijn (faalkans = 1) geeft een indicatie voor de waterstandsfrequentielijn in het zichtjaar 2200, uitgaande van tijdlijn Extreem, wanneer we géén Europoortkering zouden hebben. Dit is een bovengrens van waterstanden die zouden kunnen optreden.

Voor 2200 geven de onderste rode lijn (Pakket M 2200) en de bovenste rode lijn (faalkans = 1) de uiterste grenzen van de waterstanden aan. De onderste rode lijn is de minimale waterstand die met een theoretisch maximaal pakket aan maatregelen kan worden gehaald. In dit plaatje zijn de uitkomsten van de maatregelpakketten I, II en III weergegeven. Dit is gedaan in Figuur 19.



Figuur 19: Waterstandsfrequentielijnen voor diverse toestanden van het watersysteem op voorbeeldlocatie Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem.

In Figuur 19 is het effect van maatregelpakket I aangegeven met de blauwe kleur. De inzet van berging laat een waterstandsdaling van enkele decimeters zien bij Dordrecht. Verder is te zien dat het effect van maatregelpakketten II en III relatief groot is. Bij een 1/10.000-jaar waterstand is het effect 0,4 á 0,5m. Wat de figuur ook laat zien is dat de effectiviteit van de maatregelpakketten dicht tegen de lijn van het maximaal haalbare aan zitten. Meer winst is er dus niet te halen binnen de huidige voorkeursstrategie.

Effect op de versterkingsopgave

De dijkversterkingsopgave betreft in welke mate de dijk versterkt moet worden in een bepaald zichtjaar (in hoogte en breedte). Dit is een gevolg van toenemende hydraulische belasting en afnemende sterkte in de tijd. De dijkversterkingsopgave die ontstaat door zeespiegelstijging wordt gereduceerd met de maatregelpakketten t.o.v. de basisanalyse. Indien de belastingen toenemen in de toekomst, worden de keringen met een interval van +- 50 jaar versterkt. Naast de toenemende belastingen speelt bodemdaling een rol in de mate van versterken. Voor enkele normtrajecten loopt deze bodemdaling op tot meer dan één meter in 2200.

De hoogteopgave is een een-op-een gevolg van de toenemende hydraulische belastingen en de bodemdaling, in vergelijking met de kruinhoogte. Bij afnemende hydraulische belastingen door de maatregelpakketten neemt de hoogteopgave ook af in deze mate.

Om de effecten van de maatregelpakketten inzichtelijk te maken kijken we naar de deelgebieden Haringvliet-Hollandsdiep en Rijnmond-Drechtsteden (zie als voorbeeld Tabel 3 voor tijdlijn Extreem).

Tabel 3: Overzicht hoogte- en sterkteopgave reductie voor zichtjaren 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem.

| Rijnmond-Drechtsteden Haringvliet-Hollandsdiep | Hoogteopgave-reductie | | Sterkteopgave-reductie | |
|---|-----------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | 2100 Extreem | 2200 Extreem | 2100 Extreem | 2200 Extreem |
| Extra berging (pakket I) | 5% (<-0,1) | 10% (-0,1m) | 5% (-1m) | 4% (-2m) |
| Verbeterde SVK's (pakket II) | 10% (-0,1m) | 14% (-0,4m) | 8% (-1m) | 5% (-3m) |
| Inzet pompen (pakket III) | 40% (-0,2m) | 14% (-0,4m) | 10% (-2m) | 6% (-3m) |

* De opgave wordt gepresenteerd als gemiddelde opgave per strekkende km

* De hoogteopgave voor de basisanalyse betreft gemiddeld 0,5m/km en 2,9m/km in respectievelijk 2100 en 2200

* De sterkteopgave voor de basisanalyse betreft gemiddeld 18m/km en 54m/km in respectievelijk 2100 en 2200

Zichtbaar is dat de afname in hoogteopgave significant is, zeker in 2100. De afname in sterkteopgave is echter beperkt. Uit Tabel 3 volgt dat de maatregelen zorgen voor een significante reductie van de opgave, maar voorkomen de opgave niet. Deze opgave blijft met alle maatregelpakket overeind, omdat de in de huidige voorkeursstrategie de 'dagelijkse' waterstanden toenemen in de tijd.

Effect op de dijkversterkingskosten

De doorvertaling van de veranderingen in de hydraulische belastingen zijn voor de verschillende maatregelpakketten ook inzichtelijk gemaakt in termen van dijkversterkingskosten (zie als voorbeeld Tabel 4 voor tijdlijn Extreem).

Tabel 4: Overzicht waterstands- en kostenreductie voor zichtjaren 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem.

| | Waterstandsreductie | | Kostenreductie | |
|------------------------------|---------------------|--------------|----------------|---------------|
| | 2100 Extreem | 2200 Extreem | 2100 Extreem | 2200 Extreem |
| Extra berging (pakket I) | < 0,2m | < 0,4m | 1% (130 mln.) | 1% (260 mln.) |
| Verbeterde SVK's (pakket II) | < 0,5m | < 0,6m | 4% (470 mln.) | 2% (800 mln.) |
| Inzet pompen (pakket III) | < 0,7m | < 0,6m | 4% (570 mln.) | 3% (1,0 mld.) |

* In de basissituatie zijn de kosten voor 2100 Extreem 12,9 mld. euro en voor 2200 Extreem 36,3 mld. euro.

Wat opvalt uit de tabel is dat, ondanks de reductie van de waterstanden met meerdere decimeters (oplopend tot verlagingen van 0,7 m), de reducties in termen van vermeden dijkversterkingskosten procentueel beperkt blijven tot maximaal 4%. De huidige voorkeursstrategie is gebaseerd op het principe van een open-afsluitbare delta, wat betekent dat we de stijging van de zeespiegel (dagelijkse omstandigheden) toestaan en juist de extreme stormcondities buiten de delta houden. Die keuze brengt echter kosten met zich mee (ook zonder zeespiegelstijging). En het open-afsluitbare principe betekent dat de zeespiegelstijging ook onder 'dagelijkse' waterstanden moet worden gekeerd. Ook om enkel deze 'dagelijkse' waterstanden te kunnen keren, zullen de dijken moeten worden versterkt, ondanks dat de mate van de versterking wordt gereduceerd met de maatregelen.

De kostenreductie door de maatregelpakketten blijkt relatief beperkt t.o.v. de kosten die toch al gemaakt moeten worden om de 'dagelijkse' waterstanden te keren. Ook speelt mee dat er sprake blijft van een versterkingsinterval van 50 jaar (zie uitgangspunten in hoofdstuk 5). In zichtjaar 2200, bij tijdlijn Extreem, zal de Rijn-Maasmonding bij een zeespiegelstijging van 3 m nog steeds een stijging van de waterstanden van rond de 2,4m te verwerken krijgen. Dit betekent dat grofweg evenveel versterkingsrondes worden uitgevoerd, waarbij de mate van versterking enigszins wordt beperkt, maar niet dusdanig dat een versterkingsronde niet noodzakelijk is.

4.2 Maatregelen in overige regio's

Ook in andere regio's kunnen net als in de Rijn-Maasmonding systeemmaatregelen worden uitgevoerd die ervoor zorgen dat de waterveiligheid toeneemt. De belangrijkste worden in deze paragraaf behandeld.

IJsselmeergebied: vergroten pompcapaciteit

Het waterpeil in het IJsselmeergebied wordt beheerd en stijgt in ieder geval tot 2050 niet mee met de zeespiegelstijging. Na 2050 is er beleidsmatig rekening gehouden met een toename van het meerpeil van 30cm. Dit leidt tot een toenemende vraag naar pompcapaciteit aangezien spuien onder vrij verval minder vaak mogelijk is.

In de studie Waterveiligheidsperspectief IJsselmeergebied [HKV, 2024] zijn meerpeilen berekend voor verschillende zeespiegelstijgingen tot 1m en verschillende pomp-strategieën. De studie laat zien dat bij een zeespiegelstijging van 1m de toename van het meerpeil kan worden beperkt tot orde 0,5m. Om dit mogelijk te maken is echter een forse pompcapaciteit van 2.100m³/s nodig.

In algemene zin kan worden gesteld dat de waterveiligheid in het IJsselmeergebied altijd een samenspel zal zijn tussen dijkverhogingen en voldoende pompcapaciteit.

Waddenzee: vergroten en verhogen voorlanden

De aanwezigheid van voldoende lange en hoge voorlanden zorgen voor golfreductie. Op deze manier wordt de golfbelasting op waterkeringen en kan de dijkversterkingsopgave afnemen. De afgelopen decennia is veel kennis opgedaan over deze golfreducerende werking. In de Handreiking Voorland (HWBP, 2019) is veel van deze kennis gebundeld.

Ondanks de aanwezige kennis wordt het potentieel van voorlanden nog niet volledig benut. Met name op plekken waar golfbelasting een grote rol speelt valt nog veiligheidswinst te halen. Dit is het geval in bijvoorbeeld de Waddenzee en de Westerschelde.

Zuidwestelijke delta: Verbetering Oosterscheldekering

In de EZZO-studie (Zandvoort, 2019) is gekeken naar de effecten van zandhonger en zeespiegelstijging op de Oosterschelde en naar de rol die de Oosterscheldekering hier bij speelt. De Oosterscheldekering zal bij zeespiegelstijging vaker dicht moeten om hetzelfde veiligheidsniveau aan het achterland te bieden. Dit heeft echter een negatief effect op ecologie en natuur. De Oosterschelde zal hierdoor steeds meer het karakter van een afgesloten watersysteem krijgen, vergelijkbaar met de Grevelingen en het Haringvliet.

De studie laat tevens zien dat verbeteringen aan de Oosterscheldekering mogelijk zijn door de kering te verhogen en het sluitregime te optimaliseren. Hiermee kan in ieder geval een zeespiegelstijging tot 1 meter opgevangen worden.

5 Bevindingen en aanbevelingen

Dit hoofdstuk geeft een beschouwing op de resultaten van de Systeemanalyse Waterveiligheid van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Tijdens de systeemanalyse is veel inzicht verkregen in het effect van zeespiegelstijging op waterstanden, waterkeringen en kosten van dijkversterkingen. Dit inzicht is voornamelijk gebaseerd op modelberekeningen en kostenkentallen. Naast de rekenkundige analyse nodigt de systeemanalyse ook uit om op basis van expertkennis bevindingen te benoemen die geen uitkomst zijn van berekeningen maar wel een waardevolle inkleuring geven van discussies die tijdens het project hebben plaatsgevonden. Hieraan wordt in dit hoofdstuk invulling gegeven waarbij gekozen is om het hoofdstuk onder te verdelen in aannames, bevindingen, discussiepunten en conclusies.

5.1 Aannames

Onderstaand zijn de belangrijkste aannames beschreven waarbij ook wordt ingegaan op het effect van de aanname op de uitkomsten van de studie.

Het huidige hoogwatersysteem als vertrekpunt

Het huidige hoogwatersysteem is logischerwijs het vertrekpunt voor de studie. Dit betekent dat is uitgegaan van de huidige inrichting van het hoogwatersysteem en dat grotendeels is uitgegaan van de huidige afvoerverdeling met als enige verschil dat bij hogere afvoeren, die ook toenemen door klimaatverandering, een andere afvoerverdeling wordt gehanteerd.

Voor toekomstige scenario's zijn geen aanpassingen van het systeem meegenomen. Dit betekent o.a. dat de riviermorfologie niet wordt aangepast, maar dat de huidige situatie met beheer en onderhoud op peil wordt gehouden. Voor het Waddengebied en de Westerschelde geldt dat verschillende meegroeiscenario's van de bodem in het watersysteem zijn bekeken.

De kosten voor constructieve oplossingen spelen een belangrijke rol

Een dijkversterking in de vorm van een grondoplossing is een relatief goedkope maatregel. In veel gevallen zal voor zo'n grondoplossing gekozen worden wanneer de ruimte dit toelaat. Een deel van het studiegebied bevindt zich echter in een regio waar sprake is van veel (lint)bebouwing op en rond de waterkering. Op deze plekken wordt vaak gekozen voor constructieve oplossingen zoals kwelschermen, damwanden en kistdammen.

De sterkte van dijken wordt beschreven met fragility curves

De sterkte van dijken is beschreven met een beperkt aantal verschillende fragility curves (typologieën). Dit betekent dat de sterkte van afzonderlijke dijkvakken op een grove manier is ingeschat waarbij geen gebruik is gemaakt van de daadwerkelijk aanwezige grondparameters. Voor een landelijke beleidsstudie is deze werkwijze echter voldoende robuust en nauwkeurig en een verfijning ten opzichte van eerdere landelijke studies zoals WV21.

Vaste versterkingsintervallen

De inschatting van dijkversterkingen en bijbehorende kosten is gedaan met behulp van OKADER. Met deze rekentool is bepaald in welk jaartal dijkvakken niet meer voldoen aan de omgevingswaarde, wat de aard en omvang van de dijkversterking is en welke kosten hier mee gemoeid zijn.

OKADER maakt gebruik van vaste versterkingsintervallen van 50 jaar. Dit betekent dat ieder dijkvak dat versterkt wordt om de 50 jaar weer versterkt wordt.

5.2 Bevindingen

Onderstaande bevindingen en discussiepunten zijn naast de rekenkundige inzichten waardevol om te benoemen in dit synthese rapport.

Kennisontwikkeling is een belangrijke bron van onzekerheid

Het KP-ZSS beschouwt een tijdshorizon tot en met 2200. Dit betekent dat er 175 jaar vooruit wordt gekeken. In deze tijdsperiode zal niet alleen de (zee)waterstand zich ontwikkelen, maar ook de rivierafvoer, maar zaken als bodemdaling en het algemeen prijspeil. Voor veel van deze parameters wordt gekozen om lineair te extrapoleren vanaf een zeker jaar, bv voor rivierafvoeren vanaf 2085. De vraag is of dit terecht is en of kennisontwikkeling er mogelijk voor zorgt dat er een knik in de lineaire ontwikkeling ontstaat. Dit kan enerzijds betekenen dat gewenste of ongewenste ontwikkelingen tot een stilstand komen, maar het kan ook betekenen dat er juist een versnelling van de ontwikkeling plaatsvindt. Het gevolg is dat deze kennisontwikkeling zorgt voor een (zeer) grote onzekerheidsband, met name voor het tweede deel van de periode (2075-2200).

Oprekken kan in beperkte mate

De studie naar strategieverlengende maatregelen laat zien dat de huidige voorkeursstrategie kan worden opgerekt, maar dat dit eindig is. Door het plaatsen van pompen, het creëren van extra berging en het verbeteren van stormvloedkeringen kan de voorkeursstrategie langer worden volgehouden, maar het is niet onderscheidend. De bovengenoemde maatregelen zorgen maximaal 0,5m tot 1,0m waterstands daling.

De vraag is echter waar het knikpunt ligt, dit hangt af van een criterium wanneer we vinden dat de VKS niet meer acceptabel is (teveel kosten, teveel overlast). Dit criterium is in deze studie niet gedefinieerd en daarom kan ook niet objectief gesteld worden wanneer er een einde komt aan de voorkeursstrategie. Wel kan op basis van steekhoudende argumenten een meer subjectieve discussie worden gevoerd over knikpunten.

Kosten van maatregelen zijn hoog

De kosten van de maatregelen in de Rijn-Maasmonding en in de overige regio's zijn over het algemeen hoog in relatie tot de reductie van de dijkversterkingskosten. Voor de uitvoering van maatregelpakketten I, II en III zijn de gezamenlijke kosten geraamd om 10 miljard euro met als bandbreedte 6 tot 14 miljard euro). Het grootste deel van deze kosten (75%) hangen samen met de aanleg van pompen in maatregelpakket III.

5.3 Discussiepunten

Op basis van de uitgevoerde systeemanalyse zijn de volgende discussiepunten te noemen.

Er lijken in breder perspectief wel knikpunten te zijn

De systeemanalyse waterveiligheid laat geen knikpunten zien tot 2200. Dit betekent echter niet dat er geen mogelijke knikpunten te benoemen zijn. Wanneer er breder wordt gekeken dan alleen binnendijkse waterveiligheid lijkt het logisch dat het buitendijks gebied en het regionaal systeem vóór 2200 tegen een knikpunt aanlopen.

In het Rijnmondgebied is veel buitendijks gebied met een maaiveldhoogte van ~3m NAP en een uitgiftepeil voor bebouwing van 3,60m NAP. Deze niveaus hangen samen met het huidige sluitpeil van de Maeslantkering. Een verhoging lijkt onafwendbaar omdat anders de scheepvaart te veel wordt gehinderd en het technisch onderhoud van de stormvloedkering niet meer uitvoerbaar kan worden. Een verhoging heeft echter veel consequenties voor gebiedsontwikkeling die gaande is in deze gebieden, bijvoorbeeld op de aanleg/vervanging van nutsvoorzieningen en

infrastructuur, en op aanleghoogtes van percelen voor nieuwbouw. De noodzaak voor een beslissing rondom deze gebieden lijkt, gegeven de houdbaarheid van de gebieden bij een stijgende zeespiegelstijging en dus buitenwaterstand in de Rijn-Maasmonding, een van de meest urgente vragen.

Ook de koppeling met het regionale systeem kan zorgen voor een knikpunt. Zeespiegelstijging kan echter een groot effect hebben op het regionale systeem en kosten die gemoeid zijn met aanpassingen aan het regionale systeem kunnen fors zijn. Zo zullen koppelingen tussen het primaire systeem en het regionale systeem (o.a. gemalen, sluizen) moeten worden aangepast en meegroeien met het veranderde klimaat. Dat kan betekenen dat deze objecten andere functies zullen moeten gaan vervullen. Sluizen, gemalen en andere uitwateringsconstructies zullen meer capaciteit moeten krijgen, waarbij het de vraag is of de kosten lineair of harder zullen stijgen.

Ook kan er sprake zijn van een terugslag-effect als het lozen van water uit het regionale systeem minder makkelijk gaat, waardoor er regionaal meer waterberging plaats moet vinden. De koppeling met het regionale systeem moet integraal worden bekeken omdat een deel van de oplossing ook in het hoofdwatersysteem kan liggen (mn op de meren).

De koppeling tussen het hoofdwatersysteem en het regionale watersysteem

Samenhang voorliggende keringen, sluitpeil en sluitfrequentie

Voorliggende stormvloedkeringen zoals de Maeslantkering en de Oosterscheldekering zijn een belangrijk onderdeel van de huidige voorkeursstrategie Afsluitbaar Open. Een indicatie wanneer de stormvloedkeringen het einde van hun levensduur bereiken is moeilijk te geven, maar wanneer zij vervangen worden is het van belang om in brede zin naar de waterveiligheid te kijken. Bij deze vervangingsopgave dient een systeemanalyse uitgevoerd te worden waarbij ook het achterliggende systeem van primaire en regionale waterkeringen wordt beschouwd. Ook het sluitpeil en sluitfrequentie spelen bij voorliggende keringen een belangrijke rol. Zeespiegelstijging met behoud van de voorkeurstrategie zal betekenen dat of het sluitpeil of de sluitfrequentie hoger wordt. Wanneer het sluitpeil wordt verhoogd heeft dit een negatief effect op het achterliggende gebied (o.a. dijken en buitendijks gebied) en wanneer de sluitfrequentie wordt verhoogd heeft dit negatief effect op de toegankelijkheid van de Rotterdamse haven. Ook kan technisch onderhoud niet meer uitvoerbaar blijken.

Uiteindelijk zal een hogere zeespiegel zorgen voor meer druk op voorliggende keringen, waarbij deze vaker dicht zullen gaan en er een conflict kan ontstaan tussen belangen. Voor het ene belang (bv. havenfunctie) is minder vaak sluiten waardevol, terwijl voor het andere belang (bv. veiligheid achterliggende gebied) vaker sluiten gewenst is.

Vervangingsopgave

De vraag bij de vervangingsopgave voor de Maeslantkering is tot welk moment deze kan worden uitgesteld door aanpassing van het sluitpeil. Uiteindelijk hangt dit samen met de vraag wat voor het achterliggende systeem haalbaar is. Wanneer komt er dagelijks te veel water het systeem in? Wat is een sluitfrequentie die acceptabel is? En is er dan nog sprake van een open systeem?

In de werksessie 'De rol van kunstwerken' (verslag kanttekeningen van dijken en de rol van kunstwerken) is al aangegeven dat bij een vervanging van een voorliggende kering een systeemanalyse moet worden uitgevoerd, waarbij naar een optimale inrichting van het gehele veiligheidssysteem moet worden gekeken. Voor de waterveiligheid van (zuid-west) Nederland zijn de voorliggende stormvloedkeringen (zoals de Maeslantkering en de Oosterscheldekering) en hun sluitpeil één van de belangrijkste 'draaiknoppen'.

5.4 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde systeemanalyse 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. In de estuaria kan ophogen en fixeren van voorlanden daarbij helpen.
- 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 ordegrootte 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 het licht van bovengenoemde conclusies worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Het is aan te bevelen om aandacht te schenken aan de vraag hoe een stormvloedkering te ontwerpen die 5m zeespiegelstijging aan kan en ook een zeer hoge betrouwbaarheid heeft. Kan een dergelijke kering gebouwd worden en welke kosten komen daarbij kijken. Is het technisch onderhoud van zo'n kering om aan de betrouwbaarheidseisen te blijven voldoen haalbaar?
- Bij de vervanging van stormvloedkeringen zal een gedetailleerde analyse van voorliggende kering inclusief het achterliggende watersysteem nodig zijn. Zo'n analyse helpt ook om de gedachten over toekomstige strategieën aan te scherpen. Het is aan te bevelen om al op korte termijn een dusdanige analyse uit te voeren en niet te wachten tot het moment van vervangen is genaderd.

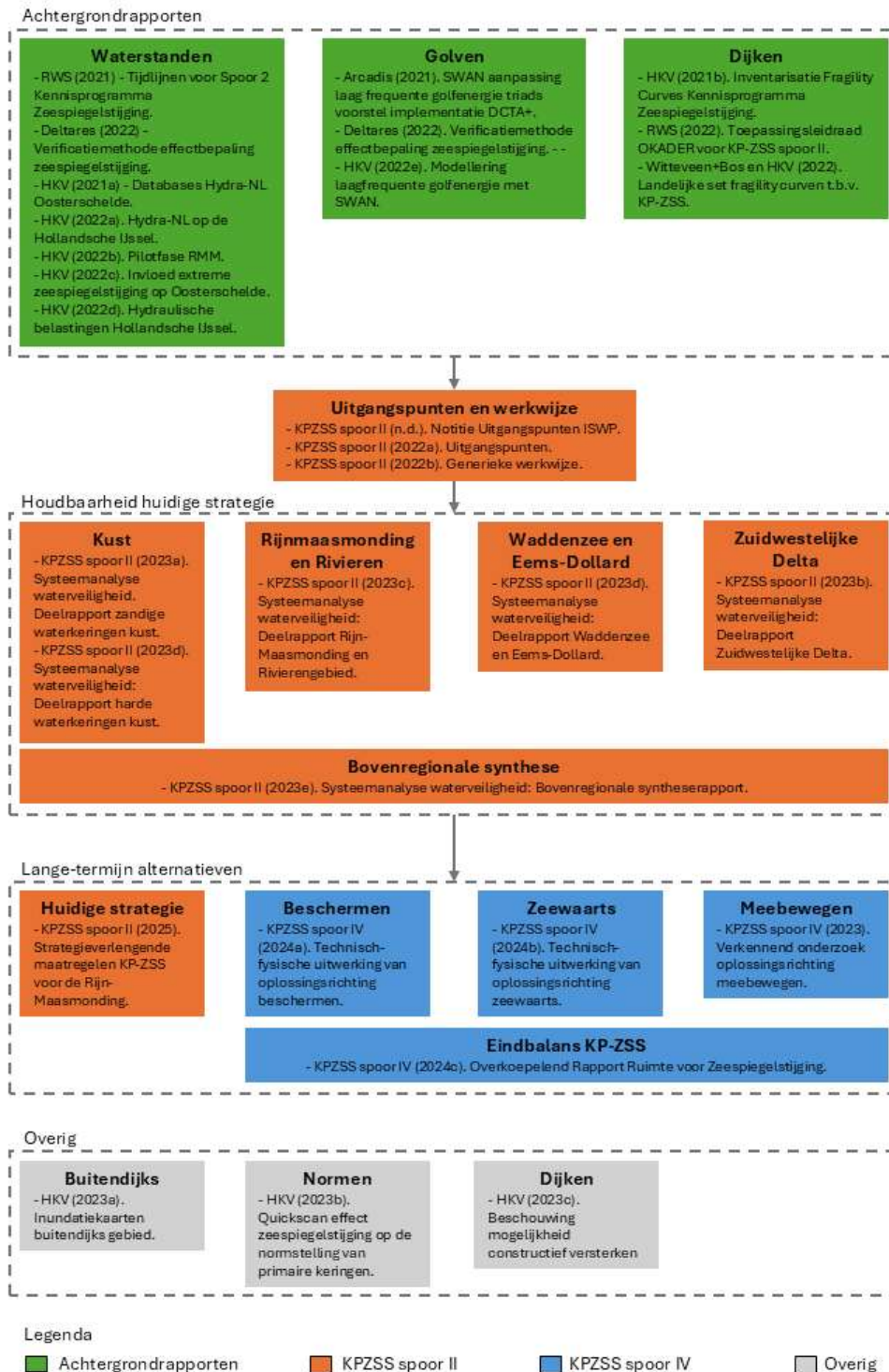
Referenties

- | 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. Deltares (2014), | Bodemdaling in het rivierengebied rapp.nr 1209392-000-VEB-0038, Delft, juli 2014 |
| 5. 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 |
| 6. 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. |
| 7. 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. |
| 8. HKV (2024). | Waterveiligheidsperspectief IJsselmeergebied. Technisch achtergrondrapport, PR4991.10. in opdracht van Rijkswaterstaat WVL. |
| 9. HWBP (2019). | Handreiking Voorland. Uitgegeven door de Projectoverstijgende verkenning Voorlanden van het Hoogwaterbeschermingsprogramma. April 2019. |
| 10. IPCC (2023). | Synthesis report of the IPCC Sixth assessment report (AR6). 20 maart 2023. |
| 11. 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. |
| 12. Rijkswaterstaat WVL (2019) | Beleidsaanbevelingen voor het langetermijn peilbeheer in het IJsselmeergebied: eindrapport integrale studie waterveiligheid en peilbeheer IJsselmeergebied. Remmelzwaal, A.J. A. Kors, I. Tanczos, A. Hebbink en J. Helmer. Juni 2019. |
| 13. Rijkswaterstaat (2021a). | Tijdlijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging. RWS memo. 24 maart 2021. |
| 14. Rijkswaterstaat (2021b). | Kennisdocument Waterveiligheid IJsselmeergebied. Kennisprogramma zeespiegelstijging fase 1. A. Remmelzwaal, november 2021. |
| 15. Rijkswaterstaat (2022a). | Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Zandige waterkeringen kust. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v1.0, oktober 2022. |
| 16. Rijkswaterstaat (2022b). | Systeemanalyse Waterveiligheid. Systeemanalyse Waterveiligheid. Deelrapport Harde Kust - Onderdeel Veerse Gatdam. 11 november 2022. |
| 17. Rijkswaterstaat (2022c). | Systeemanalyse Waterveiligheid. Systeemanalyse Waterveiligheid. Deelrapport Harde Kust - Onderdeel Flaauwe Werk. 11 november 2022. |

18. Rijkswaterstaat (2022d). Systeemanalyse Waterveiligheid. Systeemanalyse Waterveiligheid. Deelrapport Harde Kust - Deelsectie Brouwersdam. 18 oktober 2022.
19. Rijkswaterstaat (2023a). Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Waddenzee en Eems-Dollard. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023.
20. Rijkswaterstaat (2023b). Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Rijn-Maasmonding en Riviereengebied. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023.
21. Rijkswaterstaat (2023c). Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Harde waterkeringen kust. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023.
22. Rijkswaterstaat (2023d). Systeemanalyse Waterveiligheid –Deelrapport Zuidwestelijke Delta. Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II – Systeemverkenningen, v0.9, april 2023.
23. Rijkswaterstaat (2023e). Systeemanalyse waterveiligheid: Bovenregionale syntheserapport fase 1. Datum: 1 juli 2023.
24. Zandvoort M, van der Zee E & Vuik V (2019) De effecten van zeespiegelstijging en zandhonger op de Oosterschelde. Eindrapport van de studie EZZO: Tauw BV, Altenburg & Wymenga en HKV Lijn in Water. I.o.v. Rijkswaterstaat Zee en Delta. Utrecht / Middelburg.

Bijlage A: Overzicht rapporten Systeemanalyse Waterveiligheid

Bijlage A.1: Overzichtsfiguur rapporten



Bijlage A.2: Beschrijving achtergrondrapporten Systeemanalyse Waterveiligheid

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KPZSS) heeft in totaal zo'n 30 rapporten opgeleverd die Nederland voorbereiden op extreme zeespiegelstijging. Sommige rapporten zijn direct onderdeel van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Deze rapporten zijn gestructureerd weergegeven in Figuur 1. Hieronder lees je per categorie wat de rapporten bevatten en hoe ze samenhangen.

Achtergronddocumenten

Waterstanden

Het KPZSS bouwt voort op achtergrondrapporten die de basis vormen voor spoor II. Dit spoor test of de huidige voorkeursstrategie van afsluitbaar-open standhoudt bij versnelde zeespiegelstijging. Het rapport RWS (2021) vormt de basis van de onderliggende methode door de KNMI-klimaatscenario's te vertalen naar tijdlijnen. Binnen KPZSS worden 4 tijdlijnen gebruikt die lopen tot 2200: Laag, Middel, Extreem en Zeer Extreem. Elke tijdlijn koppelt zeespiegelstijging tot 5 meter aan verwachte rivierafvoeren voor specifieke zichtjaren. Andere uitgangspunten voor de methode komen ook aan bod in RWS (2021). De betrouwbaarheid van deze methode is onderzocht in Deltares (2022). Hier zijn aannames gevalideerd zoals de relatie dat zeespiegelstijging van 'x' meter resulteert in een lokale waterstijging van 'x' meter.

De waterstandsberekeningen zijn uitgevoerd met SOBEK3. HKV (2022b) hoe de modelschematisatie voor de Rijn-Maasmonding en het riviereven gebied is ontwikkeld. Aangezien het hier gaat om hoge zeespiegelstijgingen, is de betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de hele modelketen getest. Dit bevat SOBEK3 inclusief de SingleRunner om de stormvloedkeringen aan te sturen, de Golfgenerator om Bretschneider berekeningen te maken en de HRD-generator voor het genereren van databases die vervolgens in Hydra-NL gebruikt kunnen worden.

Voor specifieke gebieden zijn aparte analyses uitgevoerd. De Rijn-Maasmonding en rivieren gebruiken de standaard SOBEK3-schematisatie. De Hollandsche IJssel vormt een uitzondering (HKV, 2022d): dit gebied ligt achter twee stormvloedkeringen, waardoor ook de faalkans van de Hollandsche IJsselkering meetelt. Voor de Oosterschelde zijn eveneens aparte analyses gedaan (HKV, 2021a; HKV, 2022c). Een opvallend is dat de analyse aantoont dat het open karakter van de Oosterschelde onhoudbaar wordt bij zeespiegelstijging van meer dan 2 meter (HKV, 2022c).

Golven

De achtergrondrapporten over golven hebben met name betrekking op de SWAN-golfmodellering. Een belangrijk punt hierbij was hoe om te gaan met de onderschatting van laagfrequente golfenergie in deltagebieden zoals de Waddenzee. Arcadis (2021) ontwikkelde een uitgebreide DCTA-formulering (Discrete Collinear Triad Approximation) die golven uit verschillende richtingen kan modelleren. Dit is een uitgebreide versie van de bestaande DCTA-formulering die niet-collineaire interacties tussen golven met verschillende richtingen kan modelleren. Deze DCTA-formulering bleek niet te convergeren naar een theoretische evenwichtssituatie en de methode kon niet gevalideerd worden binnen dit project. HKV (2022e) verbeterde deze formulering door zowel som- als verschilinteracties te modelleren en zowel collineaire als niet-collineaire interactie. Het prototype komt goed overeen met metingen, maar vereist wel verdere kalibratie voor implementatie in SWAN.

Het rapport Deltares (2022) bevestigt dat wind en waterstand nauwelijks gevoelig zijn voor veranderingen in bodemhoogte of verschillende SWAN-versies. Dit scheelt rekenwerk want het betekent dat er geen varianten met verschillende bodemhoogtes doorgerekend hoeven te worden. Ook verminderen deze inspanningen modelonzekerheid in hydraulische belastingberekeningen bij zeespiegelstijging.

Dijken

Voor het bepalen van de dijkversterkingsopgave is gewerkt met fragility curves voor dijken. Fragility curves geven de faalkans van een dijk conditioneel op de hydraulische belastingen. HKV (2021) geeft een plan van aanpak voor het beschrijven van de sterkte van primaire waterkeringen door middel van fragility curves. Hoe deze aanpak toegepast kan worden met OKADER, welke uitgangspunten daarbij horen en hoe de koppeling met KOSWAT-databases eruitziet is toegelicht in RWS (2022). De uiteindelijke landelijke set aan fragility curves is afgeleid en beschreven in Witteveen+Bos & HKV (2022). De financiële analyses voor dijkversterkingskosten baseren zich op de beginsituatie van 2023, waarbij uitsluitend versterkingskosten ná 2050 worden gerapporteerd. Deze kosten worden gecorrigeerd voor investeringen die nodig zijn om het systeem vóór 2050 op norm te brengen.

Uitgangspunten en werkwijze

Het Kennisprogramma hanteert dezelfde methode voor alle deelgebieden. De rapporten over uitgangspunten (KPZSS spoor II, 2022a) en werkwijze (KPZSS spoor II, 2022b) documenteren alle modelkeuzes en aannames. Het IJsselmeer is niet apart doorgerekend in spoor II. Wel zijn resultaten uit de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) vertaald naar KPZSS-tijdlijnen voor vergelijking tussen regio's (HKV, n.d.).

Houdbaarheid huidige strategie

De systeemanalyses waterveiligheid brengen in kaart wat zeespiegelstijging tot 5 meter betekent voor de dijkversterkingen. De studies zijn gericht op het beoordelen van de houdbaarheid van de huidige voordeurstrategie afsluitbaar-open van het Deltaprogramma op het gebied van waterveiligheid. De methode bestaat uit de volgende stappen: eerst zijn de hydraulische belastingen (waterstanden + golven) bepaald, dan de dijkversterkingsopgave (hoogte- en sterktekorten) en tot slot kosten en ruimtebeslag. Berekeningen zijn uitgevoerd voor vier tijdlijnen (Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem) tot 2200. Gevoeligheidsanalyses tonen de invloed van aannames zoals bodemligging en modelonzekerheden.

De studies zijn uitgevoerd voor diverse deelgebieden in Nederland. Voor de kust is gekeken naar de zachte waterkeringen (KPZSS spoor II, 2023a) en harde waterkeringen (KPZSS spoor II, 2023e). Het Rijn-Maasmonding en Rivierengebied richt zich op dijken, dammen en de kunstwerken van de primaire waterkeringen, inclusief de Europoortkering, Maeslantkering, Haringvlietsluizen en Hollandsche IJsselkering. De Nederrijn-Lek (tot aan de IJsselkop), Waal (tot aan het splitsingspunt) en Maas (tot Mook) horen ook bij dit deelgebied (KPZSS spoor II, 2023c). Voor de Waddenzee en Eems-Dollard zijn de dijken en kunstwerken langs de kust geanalyseerd, met uitzondering van de Afsluitdijk zelf (KPZSS spoor II, 2023d). De Stevin sluizen en Lorentz sluizen zijn wel meegenomen. De Zuidwestelijke Delta behandelt de primaire waterkeringen langs de Oosterschelde en Westerschelde, waarbij de Oosterscheldekering zelf als complex kunstwerk afzonderlijk wordt behandeld (KPZSS spoor II, 2023b). De synthese van alle deelgebieden vergelijkt alle deelgebieden en benoemt de grootste knelpunten (KPZSS spoor II, 2023f).

Lange-termijn strategieën

De lange-termijn strategieën zijn onderzocht in KPZSS spoor II (fase 2) en in het KPZSS spoor IV. KPZSS spoor II (2025) verkent hoe we de strategie 'beschermen

open' kunnen volhouden op de lange termijn. Daarbij zijn drie maatregelpakketten zijn doorgerekend: a) stormvloedkeringen versterken tegen extreme waterstanden én betrouwbaarder maken door de faalkans te verlagen b) het Volkerak-Zoommeer inzetten als tijdelijke buffer voor rivierwater c) grote pompcapaciteit installeren bij Haringvliet en Nieuwe Waterweg om water weg te pompen als de stormvloedkeringen dicht zijn tijdens hoge rivierafvoeren.

Binnen KPZSS spoor IV zijn drie consortia aan de slag gegaan met fundamenteel verschillende oplossingsrichtingen. 'Meebewegen' houdt in dat Nederland zich aanpast door flexibel landgebruik en het benutten van natuurlijke processen, met focus op het beperken van overstromingsgevolgen (KPZSS spoor IV, 2023). 'Beschermen' zet in op het doorontwikkeling van de huidige Nederlandse voorkeursstrategie, met 4 varianten van combinaties aan extra keringen en pompen (KPZSS spoor IV, 2024a). 'Zeewaarts' creëert extra bergingsruimte in zee via een kustmeer met beheersbaar waterpeil (KPZSS spoor IV, 2024b). De belangrijkste bevinding van deze rapporten is dat Nederland kan veilig en leefbaar kan blijven bij 5 meter zeespiegelstijging, vooral via 'Beschermen' en 'Zeewaarts'. Voor 'Meebewegen' is verdere verdieping nodig. Een volledig meebewegen strategie bleek onrealistisch vanwege grootschalige overstromingen en gedwongen migratie. De 'hybride' variant, die primaire keringen handhaaft waar economisch noodzakelijk, is wel haalbaar maar vraagt ingrijpende maatschappelijke veranderingen.

Het syntheserapport "Ruimte voor Zeespiegelstijging" bundelt alle inzichten (KPZSS spoor IV, 2024c). Alle strategieën vragen veel ruimte en leiden tot diepgaande veranderingen in waterbeheer en landgebruik. De beschikbaarheid van zoetwater zal in alle scenario's afnemen door toenemende verzilting. In de praktijk zijn combinaties van maatregelen uit verschillende richtingen mogelijk en wenselijk. De studies benadrukken dat Nederland nu moet beginnen met onderzoek en maatschappelijke discussie om keuzeruimte open te houden voor toekomstige generaties.

Bijlage A.3: Referenties genoemde rapporten

Arcadis (2021). SWAN aanpassing laag frequente golfenergie triads voorstel implementatie DCTA+. Arcadis rapport D10039740:42. Auteur: Matthijs Benit.
p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Offerte\Documenten achtergrond\Arcadis (2021) - SWAN aanpassing laag frequente golfenergie triads.pdf

Deltares (2022). Verificatiemethode effectbepaling zeespiegelstijging. Deltares rapport 11206798-002-BGS-0012. Auteur: Jacco Groeneweg.
p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Offerte\Documenten methode\Deltares (2022) - Verificatiemethode effectbepaling zeespiegelstijging.pdf

HKV (2021a). Databases Hydra-NL Oosterschelde. HKV rapport PR4400.10 Auteur: Matthijs Duits. Datum: februari, 2021.
p:\Archief\PR\4001-4500\4400.10\Rapportage\Databases Oosterschelde voor Hydra-NL (eindversie).pdf

HKV (2021b). Inventarisatie Fragility Curves Kennisprogramma Zeespiegelstijging. HKV rapport PR4505.10. Auteur: Jochem Caspers, Don de Bake en Bas Kolen. Juli 2021.
p:\Archief\PR\4501-5000\4504.10\Rapportage\PR4504.10_Eindrapport_PvA Fragility Curves KPZSS definitief.pdf

RWS (2021). Tjldlijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging. RWS memo. Auteur: Robert Vos. Datum: 24-03-2001.
p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Offerte\Documenten methode\Vos (2021) - Memo tijdlijnen KPZSS-WP2_240321_def.pdf.

HKV (2022a). Hydra-NL op de Hollandsche IJssel. HKV rapport PR4620.10. Auteur: Matthijs Duits. Datum: februari, 2022.

p:\Archief\PR\4501-5000\4620.10\Rapportage\Testrapport Hydra-NL op de Hollandsche IJssel (eindversie).pdf

HKV (2022b). Pilotfase RMM. HKV rapport PR4423.10. Auteurs: Cees Oerlemans, Bart Thonus en Ton Botterhuis. Datum: maart, 2022.

p:\Archief\PR\4001-4500\4423.10\Rapportage\Pilotfase_RMM_Eindrapport_final.pdf

HKV (2022c). Invloed extreme zeespiegelstijging op Oosterschelde. HKV rapport PR4400.10. Auteur: Matthijs Duits. Datum: april, 2022.

p:\Archief\PR\4001-4500\4400.10\Rapportage\Invloed extreme zeespiegelstijging op Oosterschelde (eindversie).pdf

HKV (2022d). Hydraulische belastingen Hollandsche IJssel. HKV rapport PR4611.10. Auteurs: Dorien Honingh, Jan Stijnen, Ton Botterhuis, Cees Oerlemans en Guus Rongen. Datum: juni, 2022

p:\Archief\PR\4501-5000\4611.10\KMSinfo\Rapportage\PR4611 Conceptrapport HIJ in KP ZSS (definitief).pdf

HKV (2022e). Modellerings laagfrequente golfenergie met SWAN. HKV rapport PR4658.10. Auteur: Matthijs Benit. Datum: november 2022.

p:\Archief\PR\4501-5000\4658.10\Rapportage\PR4658.10 SWAN aanpassing laagfrequente golfenergie triads vervolg - definitief.pdf

HKV (2023a). Inundatiekaarten buitendijks gebied. HKV memo PR4682.10. Auteurs: Marit Zethof en Abe Klaas de Jong. Datum: 12 juni 2023.

p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Opleveringen\20230615_Memo_buitendijkse inundatie\20230615_Memo_buitendijkse inundatie.rar\Memo_overstromingskaarten_buitendijks_gebied_KP ZSS_def.docx

HKV (2023b). Quickscan effect zeespiegelstijging op de normstelling van primaire keringen. HKV memo PR4682.10. Auteurs: Jakolien Leenders en Marit Zethof.

p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Opleveringen\20230615_Memo_normering.rar\20230615_Memo_normering\Notitie_ZSS_normstelling_definitief.pdf

KPZSS spoor II (2022a). Uitgangspunten. RWS Concept v.1.0. Auteurs: Marit Zethof, Bastiaan Kuijper, Maarten Jansen, Cas van Bemmelen, Tim van Engelen, David Knops en Bert van den Berg. Datum: 28 juli, 2022.

p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Opleveringen\20220728_Notities generieke werkwijze, ugp en datamanagement\Notitie_uitgangspunten_wv_kpzss_v1.0.pdf

KPZSS spoor II (2022b). Generieke werkwijze. RWS concept v.1.0. Auteurs: Marit Zethof, Bastiaan Kuijper, Maarten Jansen, Cas van Bemmelen, Tim van Engelen, David Knops en Bert van den Berg. Datum: 28 juli, 2022.

p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Opleveringen\20220728_Notities generieke werkwijze, ugp en datamanagement\Notitie_generieke_werkwijze_systeemanalyse_wv_kpzss_v1.0.pdf

KPZSS spoor II (2023a). Systeemanalyse waterveiligheid: Deelrapport zandige waterkeringen kust. Auteurs: onbekend. Datum: maart 2023.

<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-zandige-waterkeringen-kust---kp-zss>

KPZSS spoor II (2023b). Systeemanalyse waterveiligheid: Deelrapport Zuidwestelijke Delta. Auteurs: Marit Zethof, Jan Stijnen, Bastiaan Kuijper, Cees Oerlemans, Maarten Jansen, Tim van Engelen, David Knops en Bert van den Berg. Datum: 30 mei 2023.
<https://open.overheid.nl/documenten/4d8199f4-98ac-40f6-b89a-ec5d1273f4b2/file>

KPZSS spoor II (2023c). Systeemanalyse waterveiligheid: Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied. Auteurs: Marit Zethof, Jan Stijnen, Bastiaan Kuijper, David Knops en Bert van den Berg. Datum: 30 mei 2023.
<https://open.overheid.nl/documenten/3df57467-d9ba-42a1-862a-b90eb6e93eba/file>

KPZSS spoor II (2023d). Systeemanalyse waterveiligheid: Deelrapport Waddenzee en Eems-Dollard. Auteurs: Marit Zethof, Maarten Jansen, Tim van Engelen, David Knops, Jan Stijnen en Bert van den Berg. Datum: 30 mei 2023.
<https://open.overheid.nl/documenten/4d8199f4-98ac-40f6-b89a-ec5d1273f4b2/file>
<https://www.deltaprogramma.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-waddenzee-en-eems-dollard---kp-zss/Systeemanalyse+waterveiligheid+Waddenzee+en+Eems-Dollard+-+KP+ZSS.pdf>

KPZSS spoor II (2023e). Systeemanalyse waterveiligheid: Deelrapport harde waterkeringen kust. Auteurs: Marit Zethof, Maarten Jansen, Bert van den Berg, David Knops en Jan Stijnen. Datum: 30 mei 2023.
<https://open.overheid.nl/documenten/2759f70f-0ba2-48c9-9c25-e13d1efab23f/file>

KPZSS spoor II (2023f). Systeemanalyse waterveiligheid: Bovenregionale syntheserapport. Auteurs: Marit Zethof en Jan Stijnen. Datum: 1 juli 2023.
<https://open.overheid.nl/documenten/d5d65a73-2aa4-4ef0-b3c2-6f3b11b0a759/file>

KPZSS spoor II (2025). Strategieverlengende maatregelen KP-ZSS voor de Rijn-Maasmonding. Auteurs: Wouter ter Horst, Bastiaan Kuijper, Ton Botterhuis, Jan Stijnen en David Knops. Datum: januari, 2025.
p:\PR\5157.10\Opleveringen\2025_03_21 Eindoplevering\Rapporten en memo's\20250131 Eindrapportage Strategieverlengende maatregelen v3.0.pdf

KPZSS spoor II (n.d.). Notitie Uitgangspunten ISWP. Auteurs: onbekend. Datum: onbekend.
p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Toeleveringen\20230223_ISWP_resultaten en notitie\RE Integreer resultaten ISWP in KP ZSS.msg

KPZSS spoor IV (2023). Verkennend onderzoek oplossingsrichting meebewegen. Datum: 10 november 2023.
<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/2024/03/04/eindrapportage-oplossingsrichting-meebewegen>

KPZSS spoor IV (2024a). Technisch-fysische uitwerking oplossingsrichting Beschermen. Datum: 15 februari 2024.
<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/2024/03/04/eindrapportage-oplossingsrichting-beschermen>

KPZSS spoor IV (2024b). Technisch-fysische uitwerking oplossingsrichting zeewaarts. Datum 16 februari 2024.
<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/2024/03/04/eindrapportage-oplossingsrichting-zeewaarts>

KPZSS spoor IV (2024c). Overkoepelend Rapport Ruimte voor Zeespiegelstijging.
Datum: <https://www.deltaprogramma.nl/documenten/2024/03/04/rapport-ruimte-voor-zeespiegelstijging>

RWS (2022). Toepassingsleidraad OKADER voor KP-ZSS spoor II. RWS rapport v.1.0. Auteur: Peter de Grave. Datum: februari, 2022.
p:\Archief\PR\4501-5000\4682.10\Offerte\Documenten methode\RWS (2022) - Toepassingsleidraad OKADER voor KP ZSS spoor 2.pdf

Witteveen+Bos en HKV (2022). Landelijke set fragility curven t.b.v. KP-ZSS. Witteveen+Bos rapport: 129320/22-010.261. Auteurs: Daniel Fiolet, David Knops, Matthijs Gensen, Guy Dupuits en Paulina Kindermann. Datum: 11 juli 2022.
p:\Archief\PR\4501-5000\4619.10\Rapportage\129320-22-010.261-rapc01 KP-ZSS_rapportage_fragility_curven.pdf

Bijlage B: Beschouwing bovenregionaal beeld

Bijlage B.1: Impact per deelgebied

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 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 verderop in de tekst 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. 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.

HBN - 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 Rivierengebied

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 bijlage B.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 bijlage B.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.

HBN - 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. Toch 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)

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 meerpeilstijging¹¹ (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).

HBN - 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).

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.

HBN – Waddenzee, 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.

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

¹¹ 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.

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.

Bijlage B.2: Nadere informatie kosten dijkversterkingen

De kosten van dijkversterkingen kunnen op verschillende manieren worden uitgesplitst. Hieronder zijn kosten per kilometer dijkversterking en de gemiddelde jaarlijkse kosten beschreven.

Kosten per kilometer

De totale 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 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 kosten per te versterken km in miljoen euro voor alle dijken per watersysteem voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging.

| ZSS ten opzichte van 2050 | 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 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 kosten per km te versterken dijk zijn het hoogste in de Rijn-Maasmonding. 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 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.

Gemiddelde jaarlijkse kosten per m zeespiegelstijging

De totale 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.

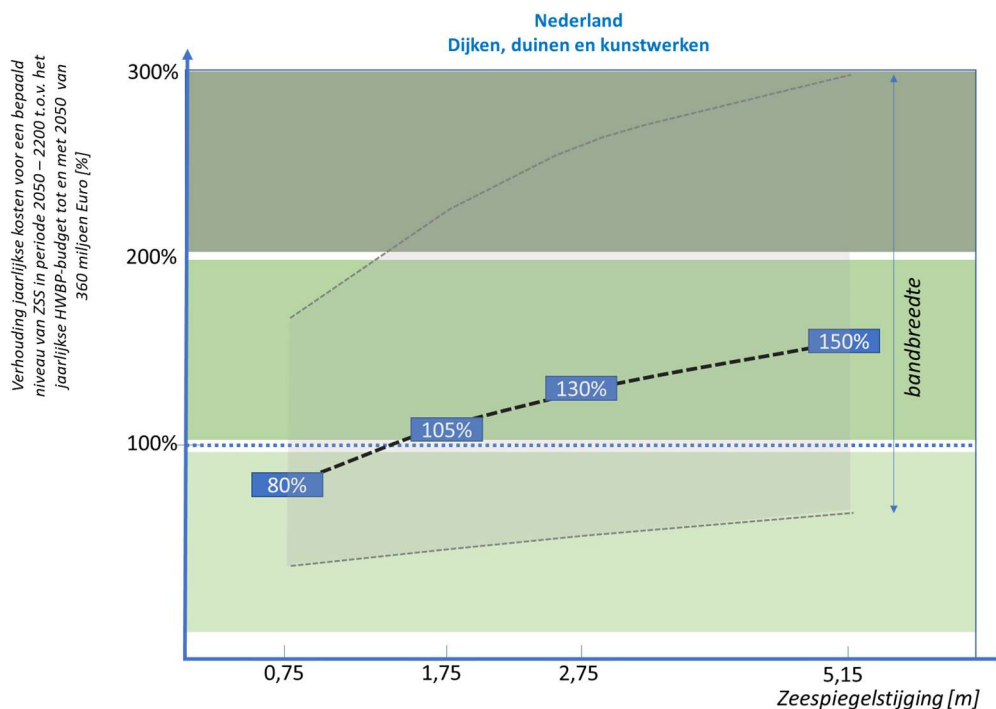
Tabel 6: Totale kosten per jaar in miljoen euro voor alle dijken en kunstwerken per watersysteem voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging ten opzichte van 2050. De getallen zijn afgerond op 5 miljoen euro per jaar

| ZSS ten opzichte van 2050 | Kosten per jaar 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 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 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)¹². 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.

¹² <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 20: Schematische weergave van de jaarlijkse 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.

Bijlage B.3: Impact op sluitfrequenties van stormvloedkeringen

Stormvloedkeringen zorgen 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 7: 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.

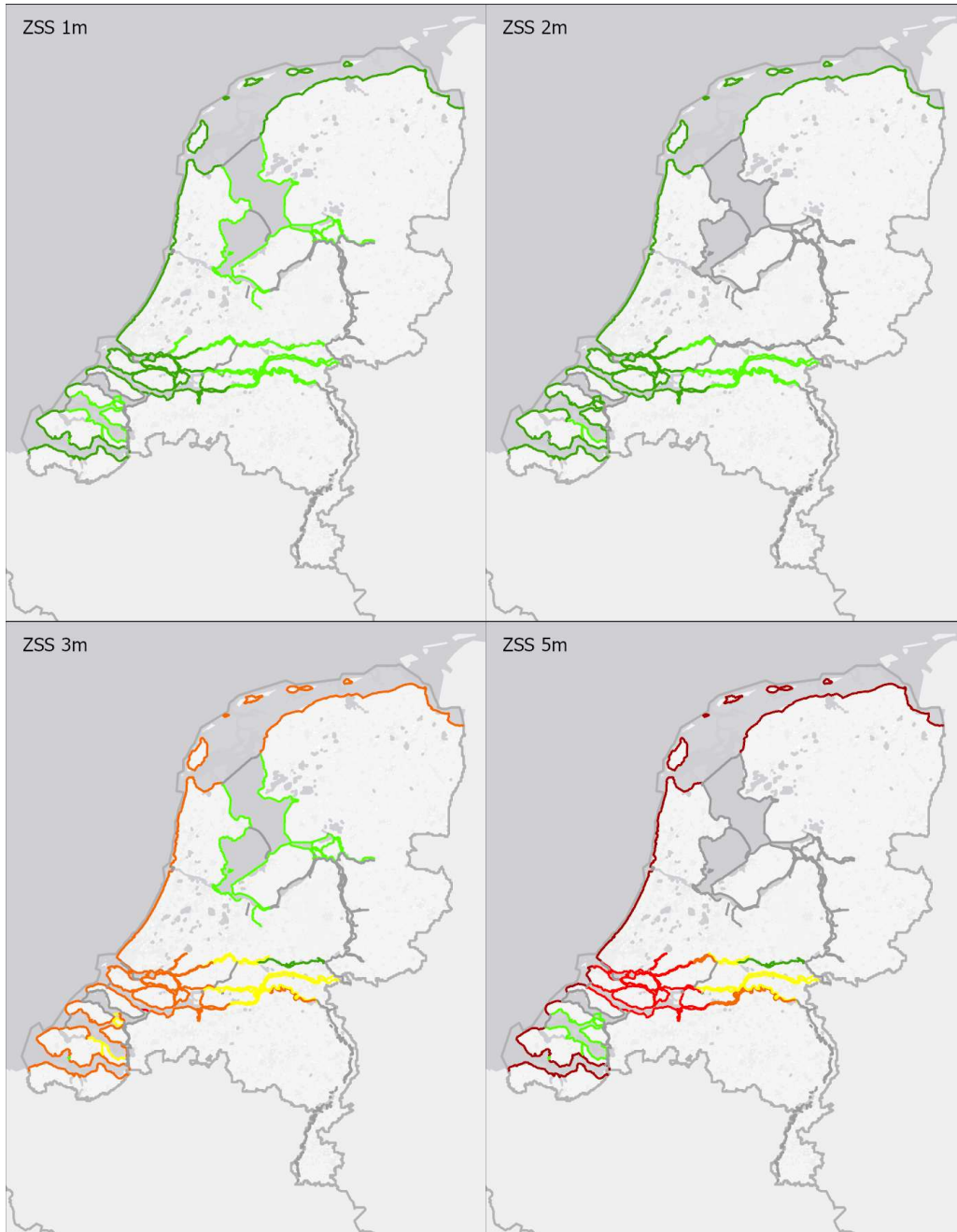
| Zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 | Sluitfrequentie Oosterschelde- kering | Sluitfrequentie Europoortkering | Sluitfrequentie Hollandse IJsselkering | Verhoging sluitpeil [m] |
|--|--|---------------------------------|--|-------------------------|
| 0,05 m (huidig) | 1 / 2 jaar | 1 / 18 jaar | 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.

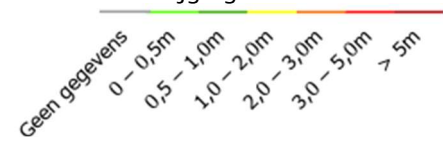
Bijlage C: Impact van zeespiegelstijging in figuren

Bijlage C.1: Impact op waterstanden

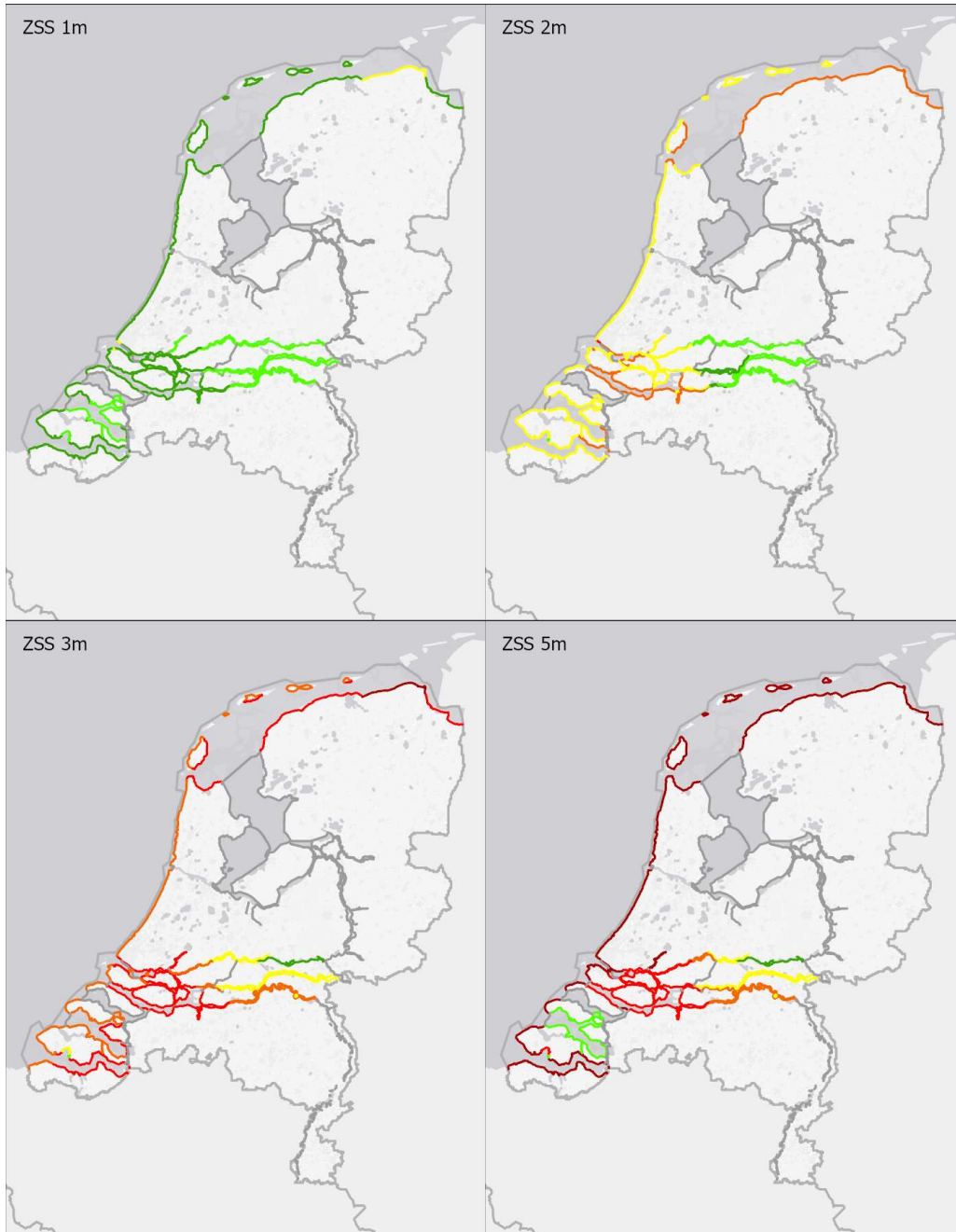


LEGENDA

Waterstandstijging in meters

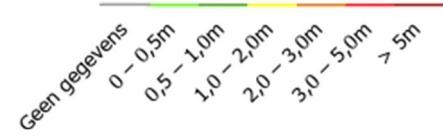


Bijlage C.2: Impact op HBN

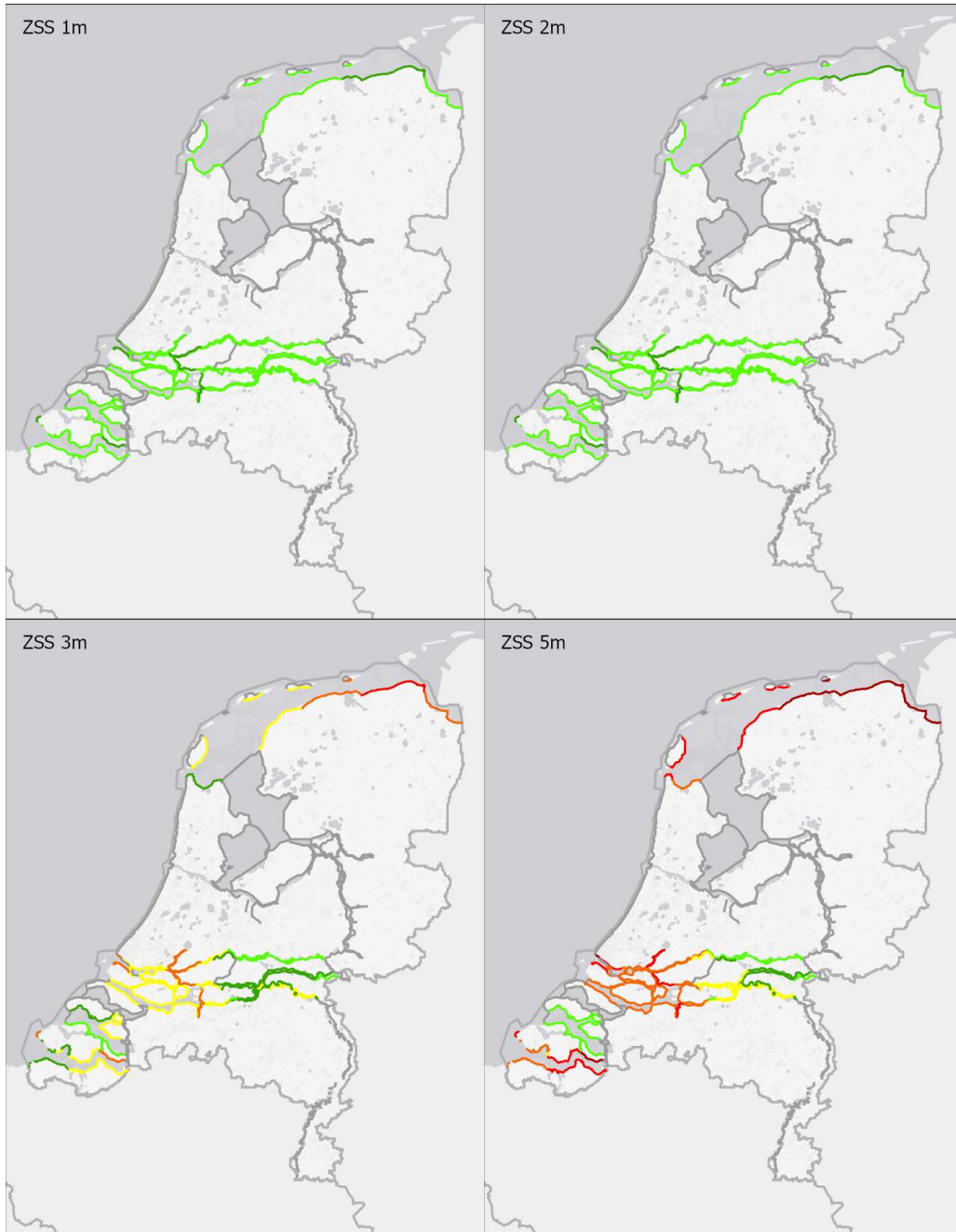


LEGENDA

Toename benodigde kruinhoogte in meters

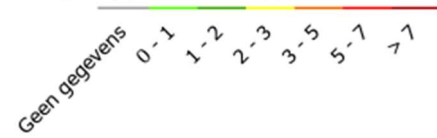


Bijlage C.3: Impact op hoogteopgave

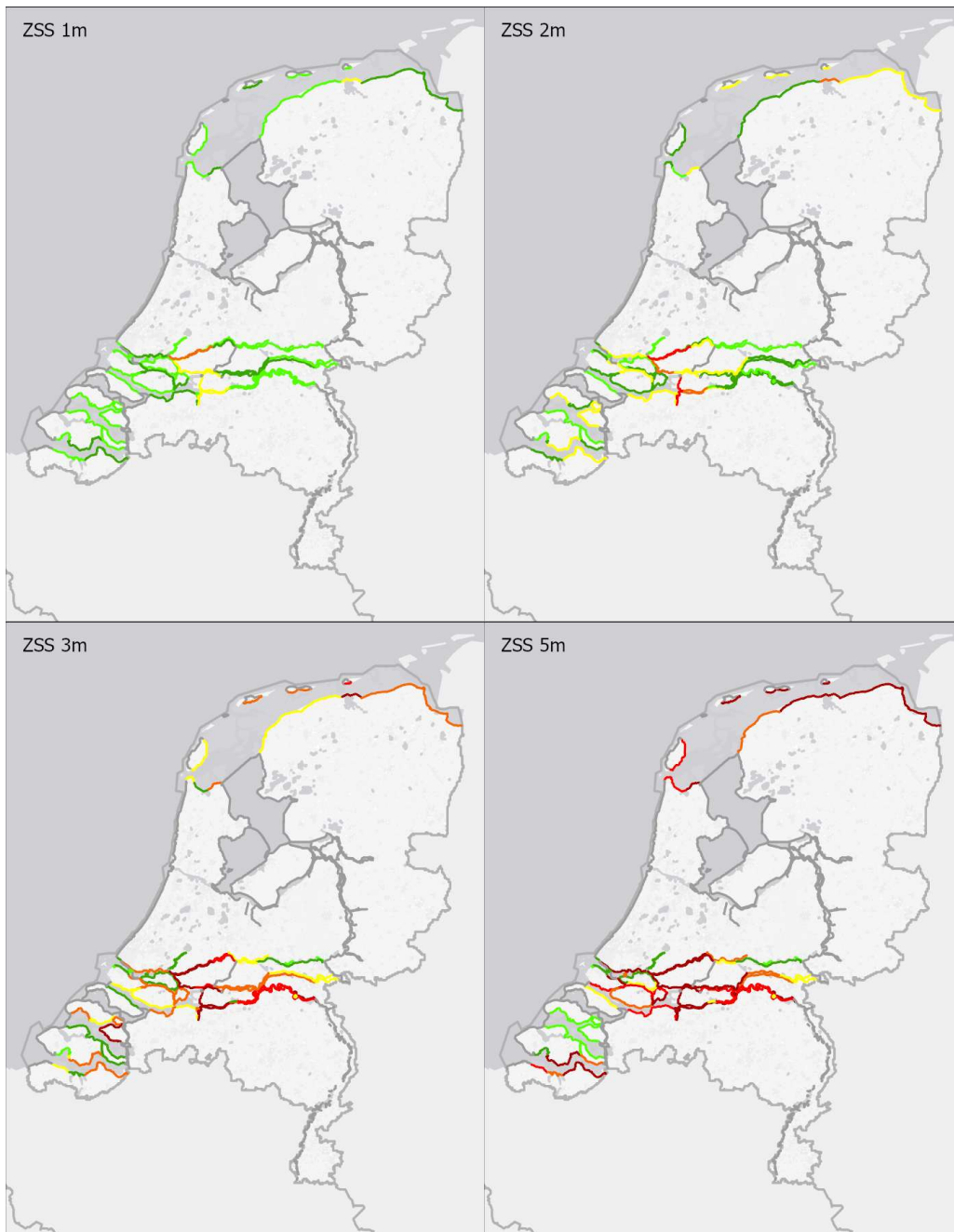


LEGENDA

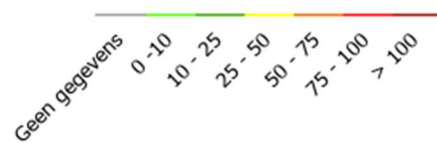
Hoogteopgave in meters



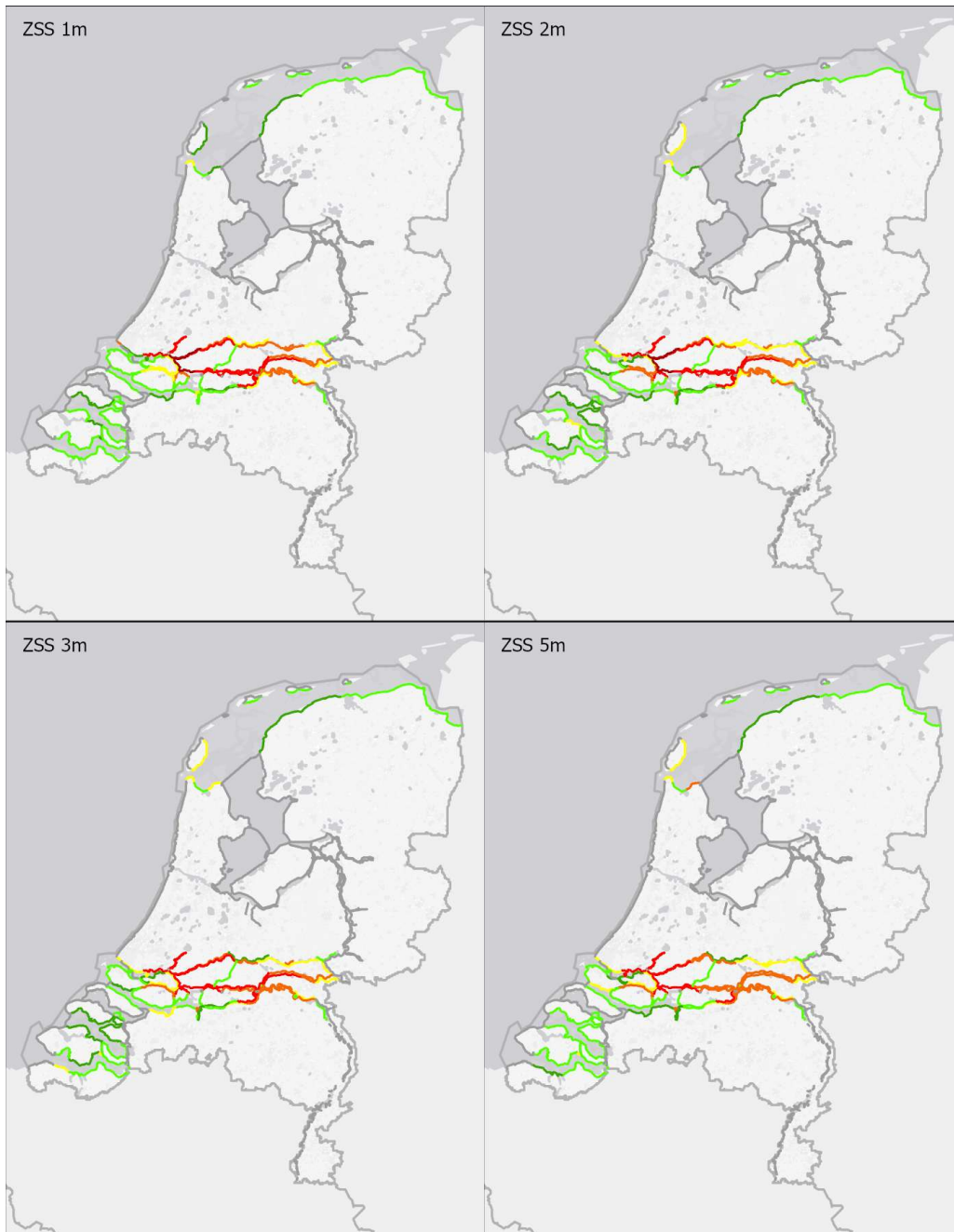
Bijlage C.4: Impact op benodigde dijkbreedte



LEGENDA
Benodigde dijkbreedte in meters



Bijlage C.5: Impact op aantal gebouwen in versterkingszone



LEGENDA

Toename aantal gebouwen in versterkingszone (factor)

