



Analyse van bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland





Analyse van bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland

Colofon

Uitgave — Deltares, in opdracht van staf Deltacommissaris, DG Water en Bodem, Rijkswaterstaat WVL, in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Daarnaast is gebruik gemaakt van resultaten uit het strategisch programma van Deltares 'Rethinking the delta'.

Begeleiding opdrachtgever — Jos van Alphen, Myrthe Leijstra en Neeltje Kielen.

Datum — September 2022, Delft

Editors — Marjolijn Haasnoot, Ferdinand Diermanse

Auteurs —

Hoofdstuk 1&2: Marjolijn Haasnoot, Ferdinand Diermanse
Hoofdstuk 3: Marjolijn Haasnoot, Gundula Winter
Hoofdstuk 4: Marjolijn Haasnoot, Ferdinand Diermanse, Gundula Winter, Ymkje Huismans, Jaap Kwadijk, Jeroen Aerts, Rutger van der Brugge, Renske de Winter
Hoofdstuk 5: Ferdinand Diermanse, Dana Stuparu
Hoofdstuk 6: Ferdinand Diermanse, Frans Klijn, Nathalie Asselman, Marjolijn Haasnoot, Jurjen de Jong, Karin de Bruijn
Hoofdstuk 7: Ymkje Huismans, Lodewijk de Vet, Marcel Taal, Tommer Vermaas, Bas van Maren, Zheng Bing Wang, Edwin Elias, Ad van der Spek, Jasper Dijkstra, Erik Mosselman, Kees Sloff, Bregje van Wesenbeeck, Peter Herman, Bas Huisman, Marjolijn Haasnoot.
Hoofdstuk 8: Jaap Kwadijk, Judith Blaauw, Marjolijn Haasnoot

Interne reviewers — Bart van den Hurk, Ap van Dongeren, Gerda Lenselink

Referentie — Haasnoot, M, F. Diermanse (ed.) (2022) Analyse van bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland. Deltares 11208062-005-BGS-0001

Figuren en opmaak — Ilse van den Broek

Illustraties ©Carof-Beeldleveranciers (pagina 17, 52)

Foto's — Shutterstock (pagina 46 Isabel Nabuurs)

Dit rapport behoort bij spoor IV van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. De sporen zijn:
Spoor I Zeespiegelstijging en Antarctica. Wat kunnen we verwachten?
Spoor II Systeemverkenningen. Hoe houdbaar zijn de voorkeursstrategieën?
Spoor III Signaleringsmethodiek. Wanneer handelen?
Spoor IV Lange termijn opties. Wat is het handelingsperspectief?
Spoor V Implementatievraagstukken. Hoe krijgen we het voor elkaar?

Inhoud



Colofon	3
Samenvatting	7



1 Inleiding	15
1.1 Aanleiding	16
1.2 Doel	18



2 Aanpak	21
-----------------	-----------



3 Moment van overschrijden van zeespiegelwaarden	27
3.1 Onzekerheid in tijd	28
3.2 Moment van zeespiegelwaarden	28
3.3 Gebruik voor adaptatie	31



4 Oplossingsruimte, bouwstenen en adaptatiepaden	33
4.1 Oplossingsruimte	34
4.2 Bouwstenen binnen de oplossingsrichtingen	36
4.3 Oplossingsruimte en adaptatiepaden	41
4.4 Maladaptatie en low-regret bouwstenen	47
4.5 Lange termijn adaptatie-opgave en de relatie met andere opgaven en ontwikkelingen	49



5 Overstromingskansen langs de kust en bouwstenen waterkeren	53
5.1 Verandering overstromingskansen	54
5.2 Benodigde mate van dijkophoging	55
5.3 Ruimte voor bredere dijken	56



6 Hoge rivierafvoeren en bouwstenen voor afvoeren en bergen	59
6.1 Uitwerkingen variant Beschermen-open	60
6.2 Uitwerkingen variant Beschermen-gesloten en Zeewaarts	63
6.3 Aanpassen afvoerdeling splitsingspunten	67
6.4 Conclusies	70



7 Sedimentbouwstenen	71
7.1 Land ophogen met behulp van natuurlijke processen	72
7.2 Meegroeien van de bodem van de Waddenzee	75
7.3 Kunstmatig land ophogen	81
7.4 Sedimentstrategieën integraal evalueren	81
7.5 Conclusies	82



8 Benodigde tijd voor aanpassen	83
8.1 Benodigde tijd van projecten uit het verleden	84
8.2 Hoe snel kan Nederland zich aanpassen in de toekomst?	87



9 Conclusies en reflectie	89
9.1 Conclusies	90
9.2 Reflectie	93



10 Referenties	97
-----------------------	-----------



11 Bijlagen	103
--------------------	------------

Samenvatting



De zeespiegel stijgt, maar hoe snel en hoeveel deze in de toekomst verder zal stijgen is onzeker. De zeespiegelstijging is sterk afhankelijk van hoe snel en hoeveel de mens wereldwijd de uitstoot van broeikasgassen en daarmee de opwarming van de aarde beperkt. Er zijn steeds meer aanwijzingen dat de zeespiegel hoger kan uitkomen dan de bandbreedte van 0,3 – 1 m in 2100 die is gebruikt voor het maken van het adaptatieplan van het Deltaprogramma. 'Een wereldwijde zeespiegelstijging van 2 m in 2100 en 5 m in 2150 is niet uit te sluiten vanwege onzekere processen in de ijskappen', schrijft het IPCC (2021). Dit kan belangrijke gevolgen hebben voor Nederland. Om goed zicht te krijgen op de mogelijke zeespiegelstijging, de gevolgen hiervan voor kustfundament, waterveiligheid en zoetwatervoorziening, en het identificeren van lange termijn oplossingen, is het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) opgezet door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de Deltacommissaris.

Deze studie is onderdeel van het KP ZSS en heeft tot doel om meer kennis te vergaren over mogelijke maatregelen voor aanpassen aan zeespiegelstijging. Daarbij ligt de focus op waterveiligheid en in het bijzonder het versterken/ophogen van dijken, het afvoeren van het rivierwater, sedimentmaatregelen en de verandering van het overstromingsrisico bij alleen onderhouden van de huidige dijken en keringen. Daarnaast worden nieuwe inzichten meegenomen over het moment van optreden van zeespiegelwaarden en de beschikbare tijd voor adaptatie. De voornamelijk verkennende analyses en berekeningen zijn verricht ter voorbereiding op regionale bijeenkomsten en vooruitlopend op meer gedetailleerde analyses.

Zeespiegelstijging, wanneer?

Maatregelen voor aanpassen aan zeespiegelstijging zijn ontworpen om een bepaalde mate van zeespiegelstijging aan te kunnen. Informatie over wanneer (in welke periode) een relevante zeespiegelstijging kan worden bereikt geeft inzicht in a) wanneer aanvullende maatregelen nodig zijn, b) wat de functionele levensduur is van een maatregel, c) hoe (met welke maatregelen of met welk ontwerp) aan te passen door rekening te houden met de gewenste levensduur van een maatregel en de daarbij behorende zeespiegelstijging, en d) of hieruit signalen zijn te halen om tijdig te beslissen voor implementatie van maatregelen.



Het moment van bereiken van een stijging van 0,25 m ten opzichte van 1995-2014 aan de Nederlandse kust ligt voor de mediane waarde van alle beschouwde zeespiegelscenario's rond 2050. Een stijging van 0,5 m wordt in alle scenario's vrijwel zeker in de tweede helft van deze eeuw bereikt, tenzij de opwarming onder de 2°C beperkt blijft (SSP1-RCP2.6¹), maar ook dan is het mogelijk dat dit niveau deze eeuw of iets later bereikt wordt. In de komende 130 jaar (tot 2150) is er in alle scenario's een kans dat 1 m bereikt wordt, dus ook als de doelen van het Parijs akkoord gehaald worden, en daarmee komt de noodzaak voor aanvullende maatregelen op het huidige Deltaprogramma plan sowieso in beeld. In de IPCC zeespiegelscenario's voor 2300 kan een stijging van 2-3 m ook bij een relatief lage opwarming tot 1.5°C bereikt worden. In het geval van een zeer snelle stijging met een grote en snelle bijdrage van Antarctica kan dit veel eerder gebeuren, namelijk rond 2100. Een adaptief plan dat op termijn minimaal 2-3 m zeespiegelstijging aan kan (of tenminste een zinvolle tussenstap is op weg naar een lange termijn oplossing die dat wel kan), lijkt daarmee niet overbodig.

Bij een hogere snelheid van zeespiegelstijging kunnen de Wadplaten steeds minder meegroeien, is steeds meer zand nodig voor het meegroeien van het kustfundament en is minder tijd beschikbaar voor adaptatie. Een stijgsnelheid van 5 mm/jaar (bijna 2 keer zo snel als nu) wordt in zowel de scenario's met een opwarming onder de 2°C (SSP1-2.6) als met hoge opwarming (SSP5-8.5) overschreden in de komende 20 jaar (bij de mediane schatting). Een stijgsnelheid van 10 mm/jaar is mogelijk in alle scenario's, maar heeft in het SSP1-2.6 scenario een zeer kleine kans van optreden (5% vanaf ongeveer 2045). Grotere stijgsnelheden zoals 15 en 20 mm/jaar komen alleen voor in het SSP5-8.5 scenario, maar de onzekerheid over het moment van optreden is groot. Een stijgsnelheid van meer dan 20 mm/jaar wordt alleen bereikt in scenario's met een extra versnelde zeespiegelstijging.

¹ De nieuwe scenario's van het IPCC bestaan uit een combinatie van een Shared Socio-economic Pathway (SSP) die de onderliggende socio-economische ontwikkelingen beschrijven (het nummer staat voor een scenario) en de een Representative Concentration Pathways (RCP), waarbij het nummer staat voor de mate van radiatieve forcing (in W m⁻²). In het scenario SSP1-2.6 stijgt de temperatuur wereldwijd gemiddeld op de lange termijn (2081-2100) met 1,3-2,4 °C. In het scenario SSP2-4.5 is dit 2,1-3,5 °C en in het scenario SSP5-8.5 stijgt dit naar 3,3-5,7 °C. Voor meer informatie over de IPCC scenario's verwijzen we naar de IPCC AR6 rapportage <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

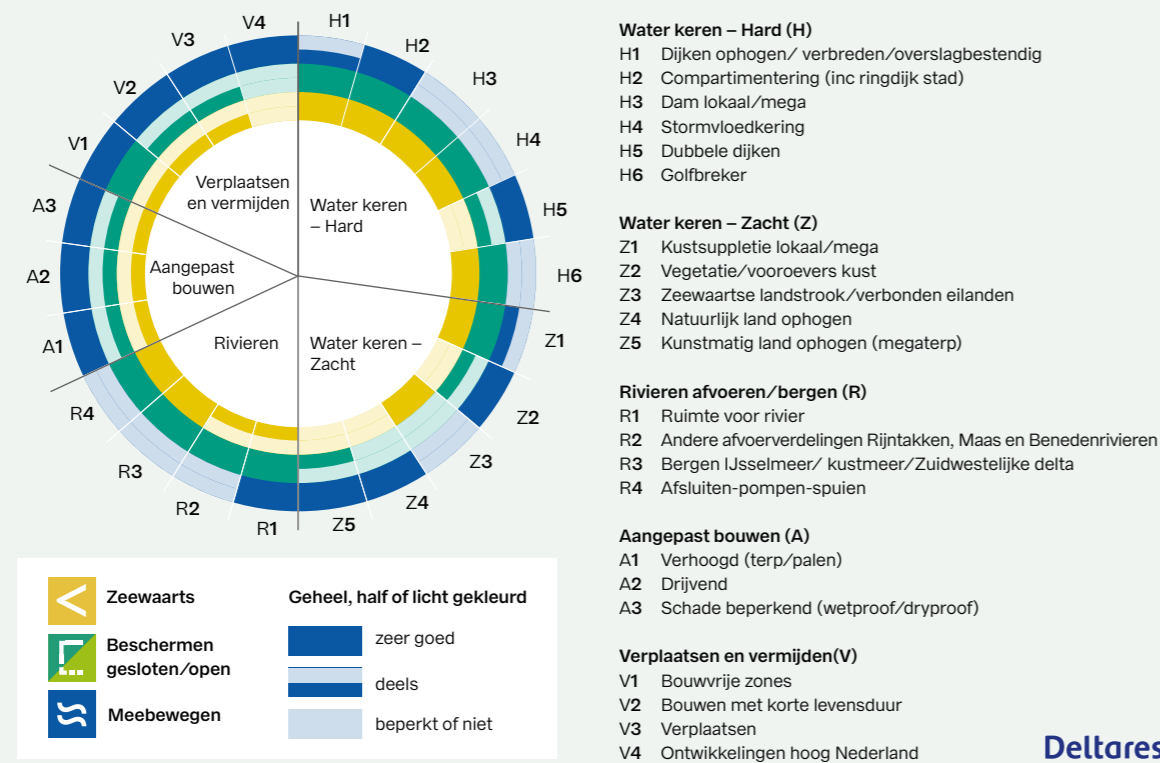
Bouwstenen en adaptatiepaden

Wereldwijd bestaat de oplossingsruimte voor aanpassen aan zeespiegelstijging uit de strategieën *beschermen* (met de huidige of met een nieuwe *zeewaartse* kustlijn), *meebewegen* via aangepaste bebouwing en landbouw en het *gepland terugtrekken* van kwetsbare functies (IPCC, 2022). Bij een toenemende zeespiegelstijging neemt de totale oplossingsruimte af en verandert de verhouding tussen de strategieën. Het beschermen van het achterland tegen overstromingen zal bij verdergaande zeespiegelstijging steeds meer inspanning kosten, niet alle effecten voorkomen en ingrijpende neveneffecten hebben. Aangepast bouwen (bijv. verhoogd) is vooral in nieuwbouwlocaties toepasbaar en loopt uiteindelijk tegen grenzen aan om gevolgen voldoende te beperken. Nog meer *meebewegen* met het water middels *gepland terugtrekken* komt daarom steeds meer in beeld. Dit hangt echter sterk af van het type kust, cultuur en mate van bebouwing. Een vergroting van de oplossingsruimte, en de beschikbare adaptatie-opties daarbinnen, kan bereikt worden met sturende maatregelen zoals wetgeving, ruimtelijke planning en innovatie, creëren van draagvlak, en financiering, maar is beperkt door bijvoorbeeld fysieke grenzen.

Voor Nederland spannen de vier oplossingsrichtingen *Beschermen-open*, *Beschermen-gesloten*, *Meebewegen* en *Zeewaarts* uit het KP ZSS samen de oplossingsruimte op (zie Box). In deze studie zijn verschillende bouwstenen voor aanpassen aan zeespiegelstijging geïdentificeerd, die samen een uitwerking van een oplossingsrichting kunnen vormen (zie Figuur S1). De bouwstenen bestaan uit fysieke maatregelen om de waterveiligheid te waarborgen en kunnen in vervolgstudies aangevuld worden met maatregelen voor zoetwatervoorziening en natuur.









Alle oplossingsrichtingen vergen op korte termijn voorbereidende maatregelen, onderzoek en experimenten om ze op termijn (op grote schaal) te kunnen implementeren. De voorbereidende maatregelen bestaan voornamelijk uit maatregelen die (op termijn) de ruimte beschikbaar houden of maken (bijv. door tijdelijke allocatie van gebruiksfuncties of functies die combinaties toelaten). Aangezien de benodigde ruimte voor adaptatie in de verschillende oplossingsrichtingen slechts ten dele overlappen zal het open houden van alle opties meer ruimte kosten dan wanneer keuzes gemaakt worden.

Adaptatiewiel met bouwstenen voor waterveiligheid



Figuur S.1 Mogelijke bouwstenen voor adaptatie aan zeespiegelstijging en de mate waarin deze bouwstenen passen bij de oplossingsrichtingen Zeewaarts (geel), Beschermen gesloten/open (groen) en Meebewegen (blauw) (geheel gekleurd vlak = zeer goed, half gekleurd vlak = deels, licht gekleurd vlak = beperkt of niet). Het betreft hier fysieke maatregelen om de gevolgen van hoogwaters te beperken. Deze lijst kan uitgebreid worden met maatregelen die gericht zijn op het voorkomen van of aanpassen aan toenemende verzilting of maatregelen ter vergroting van de zoetwaterbeschikbaarheid of maatregelen gericht op het aanpassen van gedrag of economische en institutionele maatregelen.

Lange termijn oplossingsrichtingen en adaptatiepaden:

- Beschermen-open:** In deze oplossingsrichting blijft de Nieuwe Waterweg afsluitbaar open. De huidige Maeslantkering zal vaker moeten sluiten vanwege de stijgende zeespiegel en om dat te kunnen doen, aangepast of vervangen moeten worden. Een andere optie is het verhogen van het sluitpeil. Om de zeespiegelstijging in combinatie met de hogere piekafvoeren te accommoderen zijn hogere dijken nodig of brede overslagbestendige dijken in combinatie met aangepast bouwen. Dit laatste kan een trigger zijn om bij verdergaande klimaatverandering richting *Meebewegen* over te stappen. Een alternatief is om later alsnog de Nieuwe Waterweg af te sluiten aan zee- en rivierzijde en over te stappen naar bijvoorbeeld een hybride variant van *Beschermen-gesloten/open*. In dat geval kan de regio Rijnmond-Drechtsteden (bij hoogwater) afgesloten worden van Maas en Waal en wordt het water van deze rivieren afgevoerd via een open verbinding in het Haringvliet en/of Grevelingen (hybride variant).
 

- Beschermen-gesloten:** Indien de Maeslantkering vervangen wordt door een dam met sluiscomplex, zal zich vergelijkbaar met het IJsselmeer een binnenmeer vormen achter de kering. Om het rivierwater af te voeren is een combinatie van spuien (alleen mogelijk als het meerpeil hoger is dan de zeewaterstand), pompen en bergen nodig tijdens perioden van hoge rivierafvoeren. Er zijn drie hoofdvarianten: 1) een pomp-spuisysteem bij de Nieuwe Waterweg en/of Haringvliet; 2) meer afvoeren via de IJssel naar het IJsselmeer en 3) de Waal en Maas omleiden via de zuidwestelijke delta (via Grevelingen en/of Haringvliet) met een afsluitbare open kering en een pomp-spuisysteem of via een open systeem (de hybride variant). Om de hoge afvoeren van Rijn en Maas te kunnen uitpompen is voldoende capaciteit en ruimte nodig voor een serie van pompen. Om ook de extreme afvoeren volledig te kunnen uitpompen zou het totale pompsysteem, een capaciteit van meer dan 10.000 m³/s moeten hebben. Uitgaande van de huidige pompen zal een zo'n pompsysteem ongeveer 6-10 km breed zijn. Daarmee zou een Haringvlietdam en Nieuwe Waterweg nog niet voldoende ruimte hebben (samen 3km), waardoor omleiding van afvoeren in beeld komt.
 

- Meebewegen:** In deze oplossingsrichting staat 'leven met het water' en 'water als sturend principe' centraal (meer centraal dan in de andere oplossingsrichtingen). *Meebewegen* begint met meer ruimte geven aan water en het accepteren van een grotere kans op overstromen dan in de huidige situatie. Het beperken van de gevolgen daarvan kan gerealiseerd worden door aangepast bouwen, vermijden van bouwen in risicogebieden, aangepast bouwen en het verplaatsen en stimuleren van ontwikkelingen in hoog Nederland. Veengebieden kunnen worden vernat om emissies en bodemdaling tegen te gaan en ruimte te geven aan natuur voor aanpassen aan klimaatverandering. Ruimte kan worden gecreëerd (bijvoorbeeld in Rijnmond-omgeving) voor brede en overslagbestendige dijken die de schaal en diepte van een eventuele overstroming beperken. Bij vergaande zeespiegelstijging zijn twee hoofdvarianten: 1) een variant met veel activiteiten verplaatsen naar hoog Nederland en 2) een variant met grote drijvende steden en megaterpen.
 

- Zeewaarts:** Gebrek aan ruimte op het land en ontwikkelingen op zee kunnen een trigger zijn voor de oplossingsrichting *Zeewaarts* in de vorm van een bredere kuststrook, of met nieuwe (met elkaar verbonden) eilanden. Met een nieuwe kust bestaande uit één of meerdere eiland(en) in combinatie met dammen en een randmeer ontstaat meer ruimte voor woningbouw en economische activiteiten en ook het tijdelijk bergen van hoge rivierafvoeren. Deze variant heeft ingrijpende gevolgen voor de natuur, verstoort de natuurlijke dynamiek die de huidige kust nu helpt om mee te groeien, heeft een grote opgave voor de waterkwaliteit van het meer en vraagt veel zand. Het aanleggen van een Noordzeedam is een extreme vorm van zeewaarts aanpassen, waarbij ook internationaal samengewerkt moet worden.
 


Aandachtspunten regionale bijeenkomsten

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging organiseert regionale bijeenkomsten om de effecten van versnelde zeespiegelstijging en mogelijkheden voor adaptatie te verkennen. Voor de komende regionale bijeenkomsten zien we de volgende aandachtspunten:

- Het nader identificeren van kritieke beslissingen, die bepalend zijn voor een adaptatiepad, zowel stimulerend als beperkend/afsluitend. Daarbij gaat het om fysieke maatregelen (bijv. het afsluiten van de Rijn-Maasmonding), governance (organisatie, wet- en regelgeving) ter ondersteuning van opties, het ‘niet-nemen’ van beslissingen (bijv. niet tijdig starten met natuurlijke landspiegelstijging), en beslissingen vanuit andere opgaven en ontwikkelingen (zoals woningbouw in uiterwaarden).
- Het nader identificeren van low-regret maatregelen die robuust zijn (d.w.z. nodig in veel van zeespiegelscenario's en oplossingsrichtingen) en/of flexibel zijn zodat ze verdere aanpassing mogelijk maken ook in andere oplossingsrichtingen. Ook hier gaat het om adaptatiemaatregelen aan zeespiegelstijging en andere klimaatgevolgen, en om keuzes rondom andere opgaven en transities.
- Het beschouwen van de samenhang met andere gebieden bij het identificeren van kritieke beslissingen en low-regret maatregelen.
- Het meenemen van de lange termijn implicaties van beslissingen, zoals de lange termijn houdbaarheid van een maatregel, mogelijke spijt door lock-in en onomkeerbare gevolgen voor bijvoorbeeld natuur.
- Bepalen welke maatregelen passen bij de lange termijn adaptatie-opgave en bij de benodigde systeemverandering in waterbeheer waarin water en bodem sturend zijn.
- Het identificeren van potentiële implicaties van veranderen van strategie (bijv. grote overstap kosten, maatschappelijke impact).
- Het nader inschatten van de mogelijkheden voor het creëren van ruimte voor (rivier)water en mogelijkheden voor grootschalige experimenten met bouwstenen.
- Het inschatten van de benodigde tijd voor ontwerpen en realiseren van maatregelen.

Lange termijn adaptatie-opgaven en andere ontwikkelingen

Iedere hoeveelheid extra wereldwijde opwarming heeft een bepaalde mate van zeespiegelstijging tot gevolg. Dit noemen we een zeespiegelerfenis. De daarmee samenhangende lange termijn adaptatie-opgaven onderstreept het belang van het beperken van klimaatverandering. Uitgaande van de IPCC zeespiegelstijging projecties voor 2300 is deze adaptatie-opgave zo'n 0,3-3 m bij een opwarming onder de 2°C. Alleen rekening houden met de waarschijnlijke bandbreedte van zeespiegelstijging in 2100, wat tot dusver gedaan is in Nederland, vergt op termijn dus aanvullende adaptatie van mogelijk een paar meter. Dit kan veel hoger uitvallen tot meerdere meters onder hoge opwarming of vele meters bij een zeer grote bijdrage van Antarctica (zo'n 14 m in 2300). Er is tijd om dit ‘adaptatie-gat’ later op te pakken, mits er bij de huidige planning rekening wordt gehouden met deze lange termijn adaptatie-opgave, zodat voortgebouwd kan worden op de maatregelen en andere investeringen die in de komende decennia worden gedaan. Daarmee wordt maladaptatie, door aanpassingen die uiteindelijk tot verlies of hoge overstapkosten, voorkomen.

Nederland heeft meerdere opgaven en de komende jaren wordt er veel geïnvesteerd. Hoewel de tijdschalen van deze ontwikkelingen onderling verschillen, kunnen korte termijn investeringen de lange termijn adaptatie-mogelijkheden en opgaven sterk beïnvloeden. Deze ontwikkelingen vragen om grote (systeem)veranderingen. Samen en geïntegreerd oppakken levert meer mogelijkheden voor synergie en reduceert de mate van ‘spijt’ (regret).

Overstromingskansen langs de kust en bouwsteen waterkeren

Zonder nieuwe maatregelen na 2050 zullen de overstromingskansen toenemen. De toename in overstromingskansen verschilt sterk per locatie. Als we de overstromingskansen benaderen door de faalkans ten gevolge van overslag/overloop, dan wordt een toename van de overstromingskansen met een factor 10 op sommige plaatsen al bereikt bij zo'n 0,5 m zeespiegelstijging, terwijl dit bij enkele locaties langs de Hollandse kust pas bij 1,5 m zeespiegelstijging wordt bereikt. Bij deze getallen is geen rekening is gehouden met mogelijke bodemaanpassingen van de kust. De benodigde dijkverhoging om de overstromingskansen gelijk te houden varieert ook sterk, tot wel een factor 3 onderling verschil. Op sommige locaties is dit naar schatting ruim twee keer zo groot als de mate van zeespiegelstijging door de toename in golfhoogte die de zeespiegelstijging met zich mee brengt.

Rivierbouwstenen

In de huidige *Beschermen-open* strategie resulteert de zeespiegelstijging in verhoogde waterstanden in het benedenrivierengebied en deze invloed wordt met een hogere zeespiegel steeds verder landinwaarts merkbaar. Dit leidt tot een toename in de veiligheidsopgave en een afname in de mogelijkheid voor natuurlijke afwatering vanuit polders. De Maeslantkering zal steeds vaker moeten sluiten omdat het sluitpeil vaker overschreden wordt. Als de sluitfrequentie hoger wordt dan de constructie toe laat zal of a) het sluitpeil hoger moeten worden (met een grotere veiligheidsopgave voor het achterland tot gevolg) of b) de kering vervangen moeten worden met een nieuwe afsluitbare kering of met een (permanent afgesloten) dam met een sluis en een pomp-spuil systeem. In een gesloten variant kan het waterpeil kunstmatig op een gewenst peil gehouden worden en verlaagt het extreme waterstanden in het benedenrivierengebied met zo'n 0,5 - 1 m. Echter, ook in een gesloten toestand werkt de zeespiegelstijging vrijwel 1-op-1 door op hoge waterstanden, doordat bij hoge afvoeren van de Rijn en Maas een deel van het overtollige water gespuid moet worden en dat kan alleen als de binnenwaterstand hoger is dan de buitenwaterstand. De enige manier om dat te voorkomen is om voldoende pompcapaciteit te installeren zodat ook de hoge afvoeren van Rijn en Maas (grotendeels) uitgedompt kunnen worden. Dat vraagt echter om een pompcapaciteit van meer dan 10.000 m³/s. Dat is meer dan 40 keer de capaciteit van het grootste pompsysteem in Nederland (bij de zeeluis van IJmuiden), waar met de huidige pompen een breedte van 6 tot 10 km nodig voor is.

Bij een kleinere pompcapaciteit zijn aanvullende maatregelen nodig om het overstromingsrisico in het rivierengebied niet toe te laten nemen, zoals het vergroten van waterbergend oppervlak, de spuicapaciteit en/of het vergroten van de afvoer over de IJssel. Bij meters zeespiegelstijging wegen dergelijke maatregelen echter niet op tegen het vergroten van de pompcapaciteit. Een andere optie is het verder ophogen van dijken, maar de beschikbare ruimte daarvoor is niet overal aanwezig. Een alternatief kan zijn om de afvoer van de Waal en Maas om te leiden naar de zuidwestelijke delta en Rijnmond Drechtsteden af te sluiten tijdens hoogwater. Langs deze alternatieve route is meer ruimte beschikbaar voor dijkverhoging, mits deze ruimte gereserveerd wordt en beschikbaar blijft.

Sedimentbouwstenen langs de kust

Sediment (bestaande uit zand en slib) kan worden ingezet om kustgebieden mee te laten groeien met de zeespiegelstijging. Zand is voorradig in de Noordzeebodem en wordt via suppleties op de Noordzeekust aangebracht ten behoeve van onderhoud en om mee te groeien met de zeespiegelstijging. Ook het Waddengebied zal bij een

steeds snellere zeespiegelstijging meer moeite hebben om mee te groeien waardoor het areaal wadplaten afneemt. Dit kan voor delen van het Waddengebied al gebeuren bij beperkte extra versnelling van de zeespiegelstijging. Bij een structurele overschrijding van de kritische grens van zeespiegelstijging (6 à 7 mm/jaar voor de Westelijke Waddenzee en meer dan 10 mm/jaar in de Oostelijke Waddenzee) verdrinken op termijn de wadplaten volledig.

Er zijn diverse sedimentbouwstenen om de bodem van de Waddenzee mogelijk beter te laten meegroeien met de zeespiegel, zoals zandsuppleties in de zeegaten of direct op de platen en het beter vasthouden van sediment. Zandsuppleties in de zeegaten heeft als voordeel dat veel sediment het gebied in gebracht kan worden wat zich door de natuurlijke processen verspreidt waardoor het grovere sediment in de geulen terecht komt en het fijnere sediment op de platen. Hoeveel meegroeivermogen dit uiteindelijk kan opleveren is onbekend. Hoewel er voorlopig voldoende zand voorradig is voor zandsuppleties voor het meegroeien van het kustfundament en de wadplaten is er bij een steeds sneller stijgende zeespiegel mogelijk onvoldoende (goed winbaar) zand beschikbaar in het huidige reserveringsgebied in de buurt van het Waddengebied. Verder weg is meer beschikbaar tegen sterk oplopende kosten.

Sediment kan eveneens gebruikt worden voor het natuurlijk ophogen van land langs de kust, bijvoorbeeld met dubbele dijken en wisselpolders. Praktijkvoorbeelden laten zien dat bij de juiste condities en voldoende slib lokaal meegroeï mogelijk is. Bij het opschalen van deze concepten zijn tijdigheid en ruimtelijke integraliteit essentieel. Hoe eerder van de (continue) slibstroom wordt afgetapt, hoe meer sediment ingevangen kan worden. Verkennende berekeningen laten zien dat bij grote opschaling een deel van de kuststrook mee kan groeien (bijvoorbeeld: de Friese en Groningse Waddenkust zou bij een stijging van gemiddeld 10 mm/jaar en een invangpercentage van 50% een strook van ruim 3 km breed kunnen meegroeien). In combinatie met dijken kan dit bijdragen aan de bescherming van het achterland tegen overstromingen met lagere kosten en meer voordelen voor natuur dan wanneer alleen voor dijken wordt gekozen.

Tijd voor adaptatie

Grote waterstaatkundige werken hebben in het verleden veel tijd gekost. Gedachtevorming, planvorming, en uitvoering vragen alles bij elkaar vaak vele decennia (Deltawerken: zo'n 80 jaar, ruimte voor de rivier zo'n 30 jaar). Daardoor ontstaat het risico dat adaptatie zoveel tijd inneemt dat er gedurende de het ontwerp en realiseren van de maatregelen al substantiële veranderingen in het klimaat en zeespiegelstand kunnen optreden. Dat vergroot het belang om tijdig (grootschalige) maatregelen te onderzoeken en te innoveren, maar ook om tijdig keuzes te maken.

Reflectie

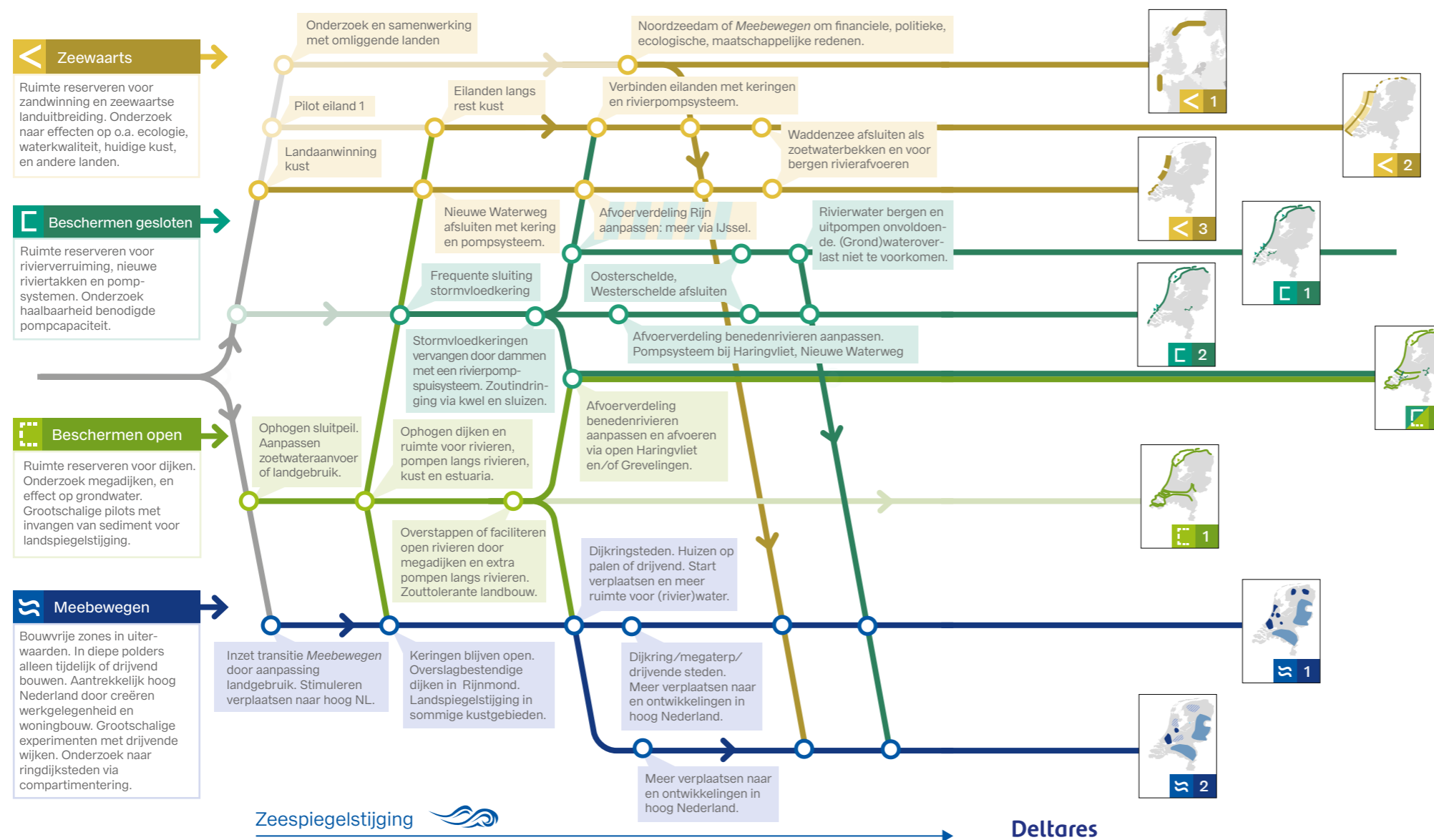
Deze studie presenteert meerdere bouwstenen voor het aanpassen aan zeespiegelstijging. Een combinatie van deze bouwstenen vormt een uitwerking van een mogelijke oplossingsrichting. De adaptatiepaden laten zien dat er kritieke keuzes zijn, ook aan het begin van de adaptatiepaden, die sterk bepalend zijn voor de toekomst. Keuzes met betrekking tot de Maeslantkering en de inrichting van het rivierengebied bepalen in sterke mate de adaptatiepaden, en de eerste keuze daarvoor komt al bij een beperkte mate van zeespiegelstijging in beeld.

Naast kritieke keuzes zijn er ook bouwstenen die robuust zijn omdat ze in veel paden voorkomen. Vaak hebben ze ook andere baten, zoals voor aanpassen aan andere klimaatgevolgen, klimaatmitigatie en natuur. Ze vragen daarom verdere uitwerking. Sommige bouwstenen zouden al (deels) ingezet kunnen worden om 'vooruit te werken', namelijk:

- Het creëren van ruimte voor waterberging en afvoercapaciteit van (rivier)water. (N.B. Aangezien de benodigde ruimte in de verschillende oplossingsrichtingen slechts ten dele overlappen zal het

open houden van alle opties meer ruimte kosten dan wanneer keuzes gemaakt worden.);

- Het vernatten van veenweidegebieden om de mate van bodemdaling in deze gebieden te reduceren en daarmee ook de kwetsbaarheid tegen overstromen en droogte (ook relevant voor mitigatie en natuur);
- Het starten met het faciliteren van natuurlijke meegroei van Wadplaten met gebruik van sediment (zand en slib);
- Het vermijden van bouwen in locaties die zeer kwetsbaar zijn in geval van een overstroming, d.w.z. locaties waar het water snel arriveert en de overstromingsdiepte groot kan zijn;
- Het initiëren van voorbereidende maatregelen, onderzoek en experimenten om de diverse bouwstenen op langere termijn (op grote schaal) te kunnen implementeren.



Figuur S.2 Adaptatiepaden voor de oplossingsrichtingen op basis van de bouwstenen en nadere analyse van de oplossingsrichtingen en verder ontwikkelde ideeën in het KP ZSS. De blokken links geven aan welke voorbereidende maatregelen en onderzoek nu nodig is om deze adaptatiepaden op termijn uit te kunnen voeren indien nodig en gewenst.

Inleiding



Zoutelande

1.1 | Aanleiding

De zeespiegel stijgt en zal voorlopig blijven stijgen, maar de mate waarin en het tempo waarmee is onzeker en in belangrijke mate afhankelijk van de opwarming van de aarde. Een onmiddellijke en grote beperking van de uitstoot van broeikasgassen leidend tot een netto nul uitstoot rond 2050 is cruciaal om opwarming te beperken tot 1.5°C (IPCC, 2022a). Het recente IPCC rapport geeft aan dat de zeespiegel de komende decennia steeds sneller gaat stijgen en kan leiden tot een wereldgemiddelde stijging tussen de 0,3 en 1m in 2100, afhankelijk van de opwarming (IPCC, 2021). Er is echter ook een kans op een zeer snelle zeespiegelstijging. 'Een wereldwijde zeespiegelstijging van 2 m in 2100 en 5 m in 2150 is niet uit te sluiten vanwege onzekere processen in de ijskappen', aldus het IPCC (IPCC, 2021). Daarmee is er een mogelijkheid dat de zeespiegel sneller gaat stijgen dan eerder is aangenomen in het Deltaplan voor klimaatadaptatie van het Deltaprogramma. Dit kan belangrijke gevolgen hebben voor Nederland: zonder aanvullende maatregelen neemt bij een extra² versnelde zeespiegelstijging de kans op overstromingen sneller toe en zal de beschikbaarheid van voldoende zoetwater in relatief droge zomers eerder en in toenemende mate onder druk komen (Deltares, 2018).

Om goed te kunnen inspelen op de gevolgen van een onzekere en mogelijk veel snellere zeespiegelstijging is het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) opgezet door het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de Deltacommissaris. Het doel van het KP ZSS is het vergaren en ontwikkelen van kennis ter ondersteuning van besluiten in de volgende zes-jaarlijkse herijking van het Deltaprogramma in 2026. Dat is het eerstvolgende moment waarop het Deltaplan uit 2014 met haar Deltabeslissingen en strategieën wordt geëvalueerd en, indien nodig bijgesteld. Dit adaptieve plan bestaat uit korte termijn maatregelen die zijn verbonden aan lange termijn strategieën en opties. Afhankelijk van hoe de toekomst uitpakt worden maatregelen eerder of later geïmplementeerd of aangepast. De Signaalgroep van het Deltaprogramma houdt daarom jaarlijks bij of er nieuwe relevante informatie is die aanleiding geeft voor een bijstelling van het adaptieve plan. Op basis van studies van het KNMI en Deltares gaf de Signaalgroep in 2018 aan dat een mogelijk extra versnelde zeespiegelstijging belangrijk kan zijn voor het Deltaprogramma, waarna Deltares in opdracht van de Deltacommissaris nader onderzoek uitvoerde over mogelijke gevolgen van zeespiegelstijging (Deltares, 2018) wat in 2019 resulteerde in het KP ZSS.



Marken

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is langs vijf sporen georganiseerd: 1) zeespiegelstijging en Antarctica, 2) systeemverkenningen, 3) signaleringsmethode, 4) handelingsperspectief voor een verre toekomst en 5) implementatiestrategie. (zie voor nadere informatie: <https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/kennisontwikkeling-en-signalering/zeespiegelstijging>)

Dit rapport is onderdeel van spoor 4. Dat spoor heeft tot doel te onderzoeken welke oplossingsrichtingen er zijn voor aanpassing aan een hoge en zeer snelle zeespiegelstijging, waarbij de huidige waterbeheerstrategie mogelijk tegen grenzen aanloopt, en wat dit betekent voor mogelijke adaptatiepaden en activiteiten die in de komende 20 jaar opgepakt moeten worden. In 2019 heeft Deltares, in opdracht van het Deltaprogramma, een eerste analyse gedaan van ideeën en mogelijke oplossingsrichtingen voor een hoge en snelle zeespiegelstijging in de komende 100 tot 200 jaar (Deltares, 2019). Vier oplossingsrichtingen zijn beschreven (zie Figuur 1 en Figuur 2), te weten:

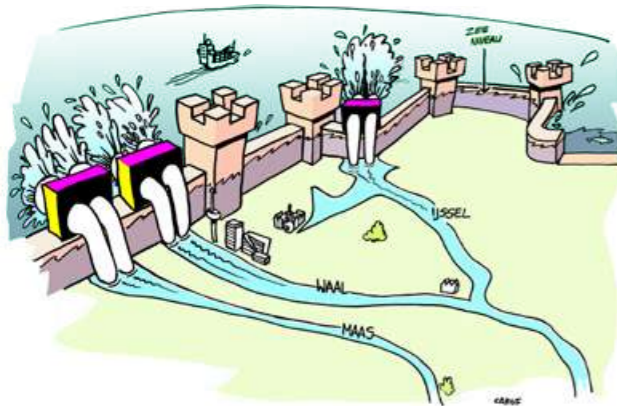
- **Beschermen-gesloten:** beschermen van de kust tegen overstromingen en erosie met harde of zachte maatregelen, zoals keringen, zandsuppletie of wetlands. Rivierarmen worden afgesloten (met dammen);
- **Beschermen-open:** idem als Beschermen-gesloten, maar de rivieren blijven in open verbinding met de zee;
- **Zeewaarts:** creëren van nieuw, hoger en zeewaarts gelegen land om de delta tegen gevolgen van overstroming te beschermen;
- **Meebewegen:** verkleinen van de kwetsbaarheid voor de gevolgen van een hogere zeespiegelstijging door water- of zouttolerant landgebruik (zoals drijvende gebouwen en infrastructuur op palen), ophogen van land, ruimtelijke planning en/of verplaatsen.

²Het huidige adaptatieplan van het Deltaprogramma maakt gebruik van Deltascenario's uit 2014. Deze scenario's vertonen ook een versnelling na 2050, zij het zeer beperkt, wat leidt tot een stijging van 0,3 tot 1 m in 2100. De nieuwe inzichten geven aan dat extra versnelling mogelijk is door het versneld afsmelten van landijs op Antarctica, wat leidt tot een veel hogere stijging in 2100.

De vier oplossingsrichtingen spannen samen de oplossingsruimte op en zijn bedoeld om deze oplossingsruimte nader te analyseren. In het kader van het KP ZSS zijn in de periode 2020-2022 in verschillende regio's bijeenkomsten gehouden om te verkennen wat de vier oplossingsrichtingen betekenen voor het gebied en welke aandachtspunten, dilemma's en mogelijkheden er zijn voor verbinding met andere opgaven en maatschappelijke ontwikkelingen. Daarnaast zijn bijeenkomsten georganiseerd waarin diverse groepen hun ideeën³ voor aanpassing aan zeespiegelstijging hebben toegelicht, welke vervolgens zijn besproken met experts op het gebied van waterbeheer. Deze bijeenkomsten hebben inspiratie en bouwstenen opgeleverd voor het samenstellen van lange termijn oplossingsrichtingen.

Dit rapport gaat in op een aantal kennisvragen die voortkomen uit de hierboven genoemde bijeenkomsten en de eerdere rapportages. De kennisvragen hebben betrekking op onderdelen, zogenaamde bouwstenen, van de oplossingsrichtingen. Een bouwsteen is een kritieke eenheid (maatregel of portfolio van maatregelen) die samen met andere bouwstenen een uitwerking van een oplossingsrichting voor aanpassing aan zeespiegelstijging vormen. Verschillende combinaties van bouwstenen zijn mogelijk, ook binnen een bepaalde oplossingsrichting. In dit rapport staan deze bouwstenen centraal bij het verder analyseren van de oplossingsrichtingen.

Beschermen gesloten



Beschermen open



Zeewaarts



Meebewegen



Carof beeldleveranciers

Figuur 1 Vier oplossingsrichtingen om met hoge zeespiegelstijging om te gaan (Deltares, 2019). (Schetsen zijn gemaakt door ©Beeldleveranciers-Carof in opdracht van Deltares).

Deltares



Kornwerderzand

1.2 | Doel

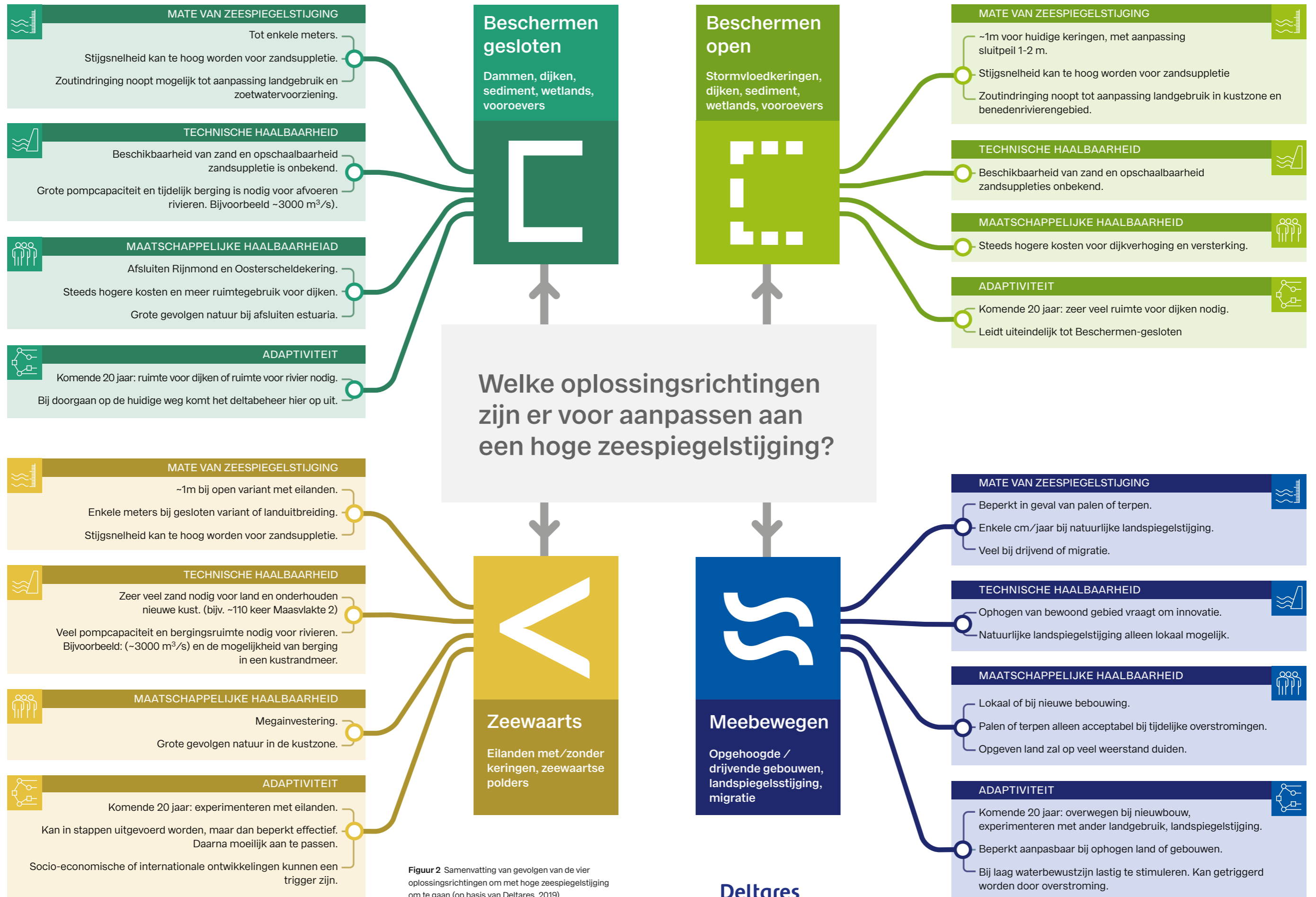
Het doel van deze studie is bijdrage te leveren aan een verdere uitwerking van oplossingsrichtingen en adaptatiepaden voor een hoge en extra versnelde zeespiegelstijging, en in het bijzonder het nader analyseren van een aantal bouwstenen daarbinnen, te weten het versterken/ophogen van dijken, het afvoeren van de rivieren, en op sediment-gebaseerde maatregelen. Ook beschrijven we een nieuwe methode voor het gebruik van zeespiegelscenario's door te kijken naar wanneer bepaalde waarden van zeespiegelstijging worden behaald en de mate van onzekerheid die daaraan gekoppeld is.

Door dit brede pallet aan onderwerpen zijn de hoofdstukken in dit rapport divers van aard. De keuze voor onderwerpen is in overleg met het KP ZSS team gemaakt uit de lijst met kennisvragen opgehaald uit de regiobijeenkomsten en eerdere studies. Het betreft vooral vragen rondom het waarborgen van de waterveiligheid en kritieke keuzes die daartoe gemaakt kunnen worden. Zoetwatervoorziening en natuur zullen ook gevolgen ondervinden van zeespiegelstijging en te nemen adaptatiemaatregelen, maar dat is niet de focus van deze studie. Dit rapport biedt uiteindelijk ingrediënten voor het formuleren van de oplossingsrichtingen in spoor 4 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en geeft input voor nieuwe regiobijeenkomsten.

De volgende vragen staan centraal:

- Wanneer kunnen we een bepaalde zeespiegel(stijgsnelheid) verwachten volgens de meest recente inzichten in de diverse scenario's en wat is de onzekerheid in timing? (hoofdstuk 3)
- Welke bouwstenen zijn beschikbaar voor aanpassen aan zeespiegelstijging, hoe passen deze binnen alternatieve adaptatiepaden en waar is mogelijke synergie of conflict met andere maatschappelijke opgaven? (hoofdstuk 4)
- Hoe veranderen overstromingskansen bij harde waterkeringen langs de kust en hoeveel moeten deze keringen opgehoogd worden om het overstromingsrisico niet toe te laten nemen bij een stijgende zeespiegel? (hoofdstuk 5)
- Hoe kan bij een stijgende zeespiegel het water van de rivieren naar zee afgevoerd worden, waarbij ook de waterveiligheid gewaarborgd blijft? (hoofdstuk 6)
- Hoe kan sediment gebruikt worden als bouwsteen voor aanpassen aan zeespiegelstijging? (hoofdstuk 7)
- Hoeveel tijd is er nodig (geweest) om adaptatiemaatregelen te realiseren en wat betekent dit voor de adaptatiestrategie? (hoofdstuk 8)

³ Een overzicht van ideeën voor aanpassen aan zeespiegelstijging en ook korte pitches van de plannemakers is te vinden op de wiki <http://nladapt.deltares.nl>



Figuur 2 Samenvatting van gevolgen van de vier oplossingsrichtingen om met hoge zeespiegelstijging om te gaan (op basis van Deltares, 2019).

Aanpak



Maeslantkering

Dit rapport bevat analyses van verschillende bouwstenen voor adaptatie aan hoge zeespiegelstijging. Als gevolg daarvan verschilt de aanpak per hoofdstuk. Het overkoepelende doel is het vergroten van kennis over onderliggende bouwstenen van de vier oplossingsrichtingen. Iedere analyse beschrijft daarom de relatie tussen de bouwstenen, de keuzes die daarbij gemaakt kunnen worden en de oplossingsrichtingen.

Centraal in de aanpak staat het concept van adaptief plannen op basis van een verkenning van verschillende adaptatiepaden, een reeks van maatregelen over de tijd (Haasnoot et al., 2013). Het adaptieve Deltaplan van het Deltaprogramma bestaat uit korte termijn maatregelen en lange termijn opties die, naarmate de omstandigheden veranderen, ingezet kunnen worden (Deltaprogramma, 2015). Op deze manier kan Nederland zich voorbereiden op een onzekere toekomst en kan adaptatie stapsgewijs plaatsvinden, afhankelijk van hoe de toekomst uitpakt, mits voldoende rekening wordt gehouden met de lange termijn adaptatie-opgaven en onzekerheden. De omstandigheden waarbij maatregelen niet meer voldoen en nieuwe of aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn noemen we een knikpunt⁴ (Kwadijk et al. 2010). Daarnaast kunnen er ook kansen ontstaan (door bijvoorbeeld innovaties) of ontwikkelingen die een reden kunnen zijn om andere of aanvullende maatregelen te nemen. De aanvullende maatregelen na een knikpunt vormen samen een adaptatiepad. Meerdere combinaties en volgordes van maatregelen zijn mogelijk, en zo ontstaan meerdere adaptatiepaden. Op basis van een verkenning van oplossingsrichtingen en adaptatiepaden kunnen 'low-regret' korte termijn maatregelen worden geïdentificeerd om noodzakelijke aanpassingen en voorbereidingen te doen, alsmede lange termijn opties voor een verdergaande klimaatverandering en zeespiegelstijging. In een eerdere studie zijn adaptatiepaden gemaakt voor de oplossingsrichtingen voor aanpassen een hoge zeespiegelstijging. Figuur 3 geeft - op hoofdlijnen - aan wat redenen kunnen zijn voor een overstap naar een andere oplossingsrichting en/of voor aanvullende maatregelen.

In het rapport is, waar nodig en mogelijk, een kwantitatieve schatting gemaakt van de gevolgen van zeespiegelstijging en van de impact van maatregelen in termen van waterstanden, hoeveelheden zand, benodigde (aanpassingen aan) infrastructuur, en ruimte en inrichting van de delta. De kwantificering is gebaseerd op eerdere studies en op nieuwe verkennende berekeningen en analyses. Meer gedetailleerdere analyses over de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige strategie van het Deltaprogramma worden uitgevoerd in spoor 2 van



Aquaduct Vechtzicht

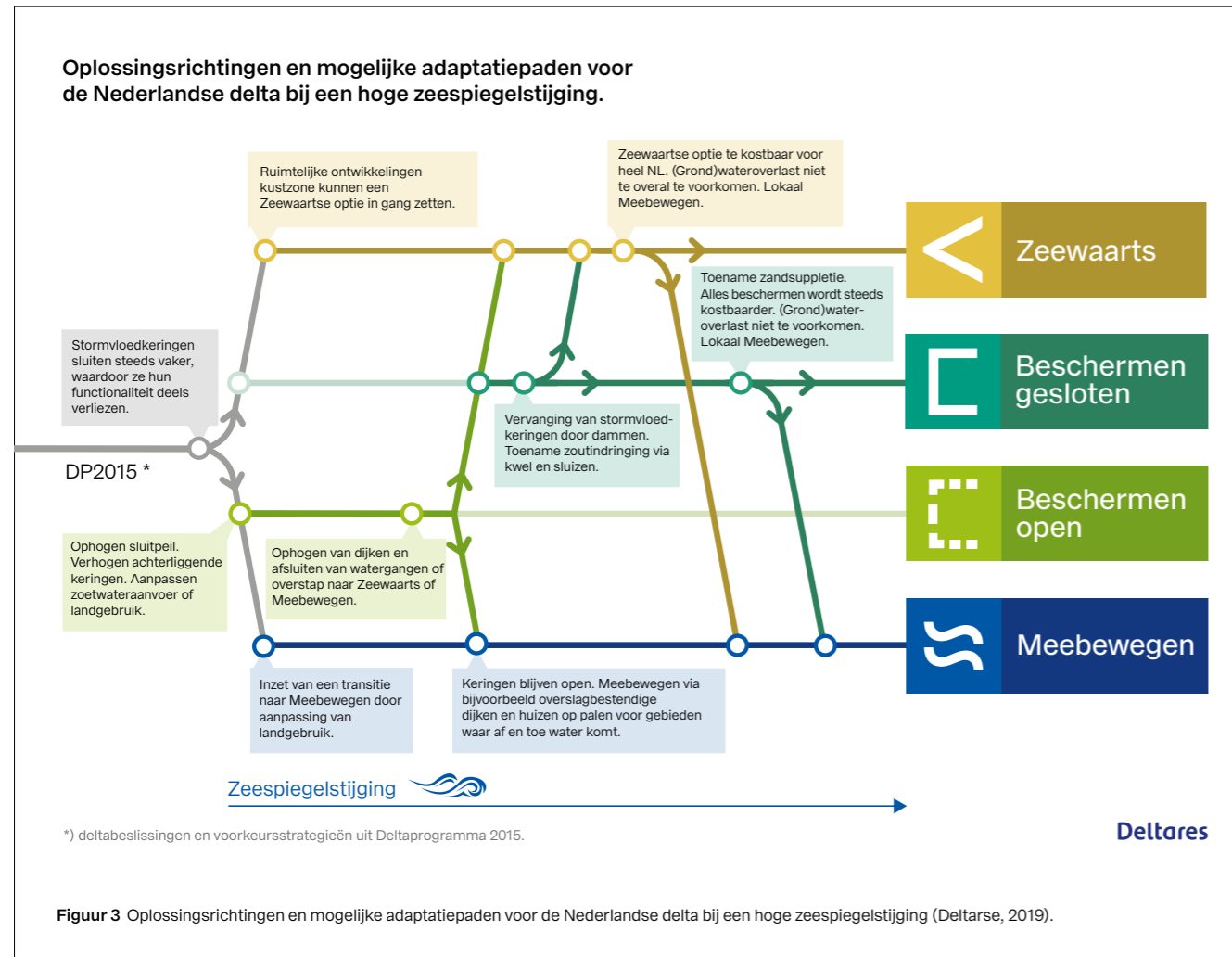
het KP ZSS. Deze analyses zijn in voorbereiding en maken geen onderdeel uit van dit rapport.

Hoofdstuk 3 - Moment van overschrijden van zeespiegelwaarden

Onzekerheden in de toekomstige zeespiegelstijging worden doorgaans aangegeven in de vorm van een bandbreedte voor een bepaald klimaatscenario in een bepaald jaar of in een tijdserie (vaak in/tot 2100). In plaats van hoeveel stijgt de zeespiegel, is het ook mogelijk te kijken naar wanneer stijgt de zeespiegel met een bepaalde (eventueel kritische) hoeveelheid. Deze manier van analyseren van de onzekerheid in de zeespiegelstijging past goed bij de knikpunten-aanpak. In deze aanpak wordt immers eerst gekeken bij welke omstandigheden (zeespiegelstijging of snelheid) een knikpunt ontstaat, waarna aanvullende/andere maatregelen nodig zijn. Vervolgens wordt aan de hand van de scenario's gekeken wanneer deze omstandigheden voor kunnen komen onder verschillende scenario's.

In hoofdstuk 3 worden daarom onzekerheden beschouwd in de tijdsduur tot het moment waarop een bepaalde mate of snelheid van zeespiegelstijging wordt bereikt. Dit wordt gedaan voor de lokale projecties uit het IPCC AR6 rapport (IPCC, 2021), omdat deze schattingen geven tot 2150, ook voor projecties met een extra versnelde zeespiegelstijging door een zeer grote bijdrage van Antarctica. Deze tijdsperiode tot 2150 is relevant voor maatregelen

⁴ Er is sprake van een knikpunt, ook wel beleidsomslagpunt genoemd, als de gestelde doelen van het huidige beleid door de veranderde omstandigheden niet meer behaald kunnen worden en vervolgstappen of aanvullende maatregelen nodig zijn. In werkelijkheid is er zelden sprake van een hard knikpunt, maar zijn er wel belangrijke omstandigheden of gebeurtenissen te identificeren die aanpassing van het beleid vergen. In het KP ZSS zijn knikpunten vaak gedefinieerd in termen van mate van zeespiegelstijging of snelheid van zeespiegelstijging.



Figuur 3 Oplossingsrichtingen en mogelijke adaptatiepaden voor de Nederlandse delta bij een hoge zeespiegelstijging (Deltare, 2019).

met een lange levensduur. Ook de Deltascenario's zijn meegenomen. Resultaten voor de KNMI scenario's uit het klimaatsignaal van 2021 staan in de bijlage. Voor elk van de scenario's wordt op basis van de tijdseries bepaald in welke periode (tijdvak) verschillende zeespiegelwaarden (een bepaalde mate van zeespiegelstijging of een bepaalde snelheid van zeespiegelstijging) bereikt kunnen worden en welke mate van onzekerheid aan deze timing gebonden is. Bijvoorbeeld: "er is 90% zekerheid dat x m zeespiegelstijging bereikt wordt tussen 2070 en 2090 in emissiescenario RCP4.5". We bespreken een voorbeeld van hoe dit gebruikt kan worden voor een aantal bouwstenen en het adaptief plannen.

Hoofdstuk 4 - Oplossingsruimte, bouwstenen en adaptatiepaden

Hoofdstuk 4 beschrijft mogelijke bouwstenen die gebruikt kunnen worden voor een nadere specificatie en regionalisatie van de oplossingsrichtingen. Een eerste uitwerking is gedaan door te beschrijven hoe deze bouwstenen passen binnen mogelijke adaptatiepaden uit Figuur 3. Bouwstenen kunnen fysieke (waterstaatkundige) maatregelen zijn, maar ook andere typen maatregelen, zoals het aanpassen van gedrag en economische maatregelen. De bouwstenen in dit rapport zijn hoofdzakelijk fysieke maatregelen. De bouwstenen zijn een eerste aanzet en hebben vooral betrekking op maatregelen om de gevolgen van hoogwater te beperken en in beperkte mate op verzilting en zoetwaterbeschikbaarheid.

De lijst van bouwstenen is deels gebaseerd op een inventarisatie van ideeën voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland (<http://nladapt.deltares.nl>). Voor iedere bouwsteen beschrijven we wat de bijdrage kan zijn aan adaptatie en zeespiegelstijging.

Een ruimtelijk beeld van mogelijke locaties voor deze bouwstenen, zogenaamde zoekgebieden, is gemaakt op basis van criteria en kaartmateriaal over bijvoorbeeld landgebruik, bodem, water en benodigde ruimte voor de maatregelen. Met behulp van de bouwstenen zijn de landelijke adaptatiepaden opgesteld, waarin de (mogelijke) implementatie van deze bouwstenen in chronologische volgorde gezet zijn. De diverse stappen in de adaptatiepaden worden daarbij gerelateerd aan de vier oplossingsrichtingen, waarbij ook transitie tussen de oplossingsrichtingen onderling mogelijk zijn. Uit de adaptatiepaden zijn vervolgens enkele voorbeelden gedestilleerd van mogelijke 'regret' activiteiten en mogelijke 'lock-ins'.

Een relatie tussen deze bouwstenen en adaptatiepaden enerzijds en overige maatschappelijke opgaven (zoals de woningbouwopgave, energietransitie, landbouwtransitie, en de achteruitgang van natuur en biodiversiteitstransities) anderzijds, is geschetst op basis van recent uitgekomen rapporten en expert judgement. Het huidige rapport betreft een eerste uitwerking.

Hoofdstuk 5 - Overstromingskans langs de kust en bouwstenen waterkeren

Hoofdstuk 5 gaat in op de invloed van zeespiegelstijging op overstromingskansen van dijken langs de kust. Op basis daarvan is geschat in welke mate de keringen moeten worden opgehoogd om de overstromingskans gelijk te houden en welk ruimtebeslag dit kan hebben. Dit is relevant is voor de oplossingsrichtingen *Beschermen-open* en *Beschermen-gesloten*. De toename van de overstromingskansen bij een gelijkblijvende dijkhoogte is relevant voor de oplossingsrichting *Meebewegen*. Hiertoe zijn berekeningen uitgevoerd met Hydra-NL.

Hydra-NL is een probabilistische rekenmodule die beheerders ondersteunt bij het beoordelen van bestaande keringen en het ontwerp van nieuwe waterkeringen en/of dijkversterkingen. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een stijging van 0 m tot 2 m in stappen van 0,2 m. Voor elke waarde van de zeespiegelstijging is met Hydra-NL de overstromingskans berekend voor het faalmechanisme 'golfoverslag'; waarbij een kritiek overslagdebiet is aangenomen van 1 l/m/s. Daarmee is een relatie afgeleid tussen zeespiegelstijging en overstromingskans. De berekeningen zijn uitgevoerd voor ongeveer 35 locaties, verspreid langs de Waddenkust, de Hollandse kust en de Deltakust, waarvan we er 10 representatieve laten zien. Dit zijn allemaal locaties met dijken of andere 'harde' waterkeringen. Hydra-NL is namelijk niet ontwikkeld voor de beoordeling en ontwerp van duinen.

Het gebruik van Hydra-NL heeft in deze context een aantal beperkingen:

- De analyse gaat tot 2 m, omdat er bij hogere waarden van de zeespiegelstijging sprake is van zeer hoge overschrijdingskansen, buiten het toepassingsbereik van Hydra-NL.
- De berekende overstromingskansen zijn het resultaat van onvoldoende 'hoogte'. Andere faalmechanismen, zoals het falen van bekledingen zijn hier niet meegenomen in de berekeningen, maar worden wel besproken in paragraaf 5.3.
- Mogelijke veranderingen in de kustmorfologie en stormklimaat niet zijn meegenomen.
- Hydra-NL maakt gebruik van een database met resultaten van modelsimulaties met een hydrodynamisch model. Met dat model zijn geen expliciete simulaties uitgevoerd met zeespiegelstijging. Er zijn wel berekeningen uitgevoerd met verschillende maten van stormopzet. In de analyses met Hydra-NL wordt x meter zeespiegelstijging daarom gerepresenteerd door x m extra stormopzet. In de praktijk zal dit niet helemaal één op één lopen vanwege hydromorfologische veranderingen.
- Het effect van eventuele extra suppleties op de morfologie zijn niet meegenomen.

Vanwege deze beperkingen zijn de resultaten een eerste orde inschatting van overstromingskansen als gevolg dijkhoogte-falen en hebben ze vooral betrekking op de situatie van versnelde zeespiegelstijging, waarin de voorover onvoldoende tijd krijgt om zich aan te passen. In het kader van spoor 2 van het kennisprogramma zullen in een later stadium wél berekeningen gedaan worden met gebruik van verschillende bodemliggingsscenario's en hogere zeespiegelstijgingen dan 2 m.



Hoofdstuk 6 - Hoge rivierafvoeren en bouwstenen voor afvoeren en bergen

In hoofdstuk 6 staat de vraag centraal hoe bij een stijgende zeespiegel het water van de rivieren naar zee afgevoerd kan worden op een manier dat ook de waterveiligheid gewaarborgd blijft. Van dit veelomvattende vraagstuk worden enkele relevante aspecten uitgewerkt. In de eerste plaats worden verschillende opties geschetst die corresponderen met de vier oplossingsrichtingen. Vervolgens worden de mogelijke gevolgen van deze keuzes kwantitatief uitgewerkt.

Voor de oplossingsrichting *Beschermen-open en Meebewegen* is met een 1-dimensionaal hydrodynamisch model (SOBEK 3) het effect op de waterstanden in de rivier bepaald voor verschillende combinaties van rivierafvoeren en zeewaterstanden. Hieruit blijkt hoe ver zeespiegelstijging bovenstrooms kan doorwerken in de rivierwaterstanden. Met Hydra-NL zijn de consequenties voor de maatgevende waterstanden in het rivierengebied bepaald bij een stijgende zeespiegel. Hierbij is ook gekeken naar de gevolgen van aanvullende maatregelen in het geval van de oplossingsrichting *Beschermen-open*, namelijk: 1) een maatregel (niet nader gedefinieerd) die leidt tot een verlaging van de faalkans van de Maeslantkering (of mogelijke opvolger), en 2) een mogelijke aanpassing van het sluitpeil van de Maeslantkering.

Voor de oplossingsrichtingen *Beschermen-gesloten* en *Zeewaarts* zijn simulaties uitgevoerd met een waterbalansmodel waarin het bedrivierengebied gemodelleerd is als een binnenmeer, vergelijkbaar

met het IJsselmeer. Dit model berekent de invloed van de zeespiegelstijging en de waterstaatkundige inrichting op maatgevende peilen. De waterstaatkundige inrichting betreft keuzes zoals de hoeveelheid pomp- en spuicapaciteit, het beschikbare bergings-oppervlak, de afvoerverdeling bij de splitsingspunten en het streefpeil in het gebied. Met een probabilistische rekenmethode zijn vervolgens voor verschillende combinaties van deze keuzes overschrijdingsfrequenties van peilen afgeleid, om de impact van deze keuzes op extreme peilen te bepalen en te analyseren wat dit betekent de oplossingsrichtingen en keuzes daarin.

Ook een aanpassing van de afvoerverdeling is nader geanalyseerd. Met een vergelijkbaar model als voor het benedenrivierengebied (DEZY; HKV, 2020a) zijn de gevolgen voor de IJsselmeerpeilen berekend, als er een groter aandeel van de Rijnafvoer via de IJssel afgevoerd wordt. Daarnaast is voor alle drie de Rijntakken bepaald in hoeverre het mogelijk is om de afvoercapaciteit te vergroten met het oog op een eventuele verandering van de afvoerverdeling bij de splitsingspunten.

Hoofdstuk 7 - Sedimentbouwstenen

Hoofdstuk 7 beschrijft hoe sediment (zand en slib) gebruikt kan worden als bouwsteen voor aanpassing aan zeespiegelstijging, bestaande uit natuurlijk land ophogen, het faciliteren van meegroeien van het Waddengebied en kunstmatig land ophogen. Daartoe wordt gekeken naar de sedimentvraag en -aanbod voor verschillende locaties. De analyse is grotendeels gebaseerd op: 1) volume-berekeningen van beschikbare hoeveelheden sediment in de Noordzee en van benodigde hoeveelheden sediment om het (relevante deel van het) kustfundament mee te laten groeien met de zeespiegel, en 2) kennis van processen van sediment-transport en aangroei van het kustfundament. Bij de analyses van beschikbare hoeveelheden sediment voor suppleties is ook rekening gehouden met de mogelijkheid dat dit sediment deels voor andere functies gebruikt wordt en dat andere functies het winnen van sediment deels kunnen verhinderen. Voor het stimuleren van meegroeien van land en ondiepten zijn door experts verschillende mogelijkheden geïdentificeerd, te weten: aangroei door volledig natuurlijke processen, methoden waarbij de natuurlijke processen van aangroei bevorderd worden door menselijke ingrepen en suppleties. Dit is uitgewerkt in mogelijke adaptatiepaden bestaande uit sediment bouwstenen.

Bij de berekening van de beschikbare zandvolumes is rekening gehouden met de huidige reserveringsgebieden en regelgeving. Het huidige gereserveerde gebied voor zandwinning ligt tussen de 12-mijlsgrens en de doorgaande NAP -20 m dieptelijn (het 'reserveringsgebied'). Landwaarts hiervan is winning niet toegestaan vanwege de instandhouding van het kustfundament. Zeewaarts van



Waddenzee, Friesland

het gebied worden de kosten van winning hoger (grotere vaarafstand) en hebben andere functies prioriteit, maar kan zandwinning in principe wel plaatsvinden. Binnen het reserveringsgebied zijn hoeveelheden zand berekend op basis van het Delfstoffen Informatie Systeem (DIS 2.1, scenario B2, '0-1 zand' (Blauw et al. 2018)). Conform het huidige beleid zijn daarnaast gebieden uitgesloten in verband met veiligheid of natuurdoelstellingen. De berekende getallen wijken af van die gepresenteerd in Blauw et al. (2018), doordat in die berekeningen andere gebiedsgrenzen en andere uitsluitingsgebieden zijn gebruikt.

Er zijn meer factoren van belang, waarvan de invloed op de hoeveelheden beschikbaar zand nog niet allemaal meegenomen zijn in de berekeningen, waaronder:

- Gebieden met explosieven, scheepswrakken, toekomstige windparken en kabels & leidingen en gebieden voor commerciële zandwinning. Met name explosieven en commerciële zandwinning kunnen een substantiële impact hebben op de hoeveelheid beschikbaar zand (10% reductie van de beschikbaarheid op basis van een expert schatting). Voor commercieel gebruik is moeilijk een schatting te geven, ook omdat dit zal variëren in de tijd en ruimte. Momenteel is dit rond de 50% van de huidige volumes die gewonnen worden voor de hele kuststrook (<https://www.noordzeeloket.nl/>).
- Scheepvaartroutes. Volgens het huidige beleid kan er binnen de scheepvaartroutes zand worden gewonnen, maar dit wordt in de praktijk niet gedaan. Omdat de scheepvaartroutes een groot deel van het gebied beslaan en in de toekomst winning daar mogelijk

moeilijk(er) is door grotere scheepvaartintensiteit, is de analyse uitgevoerd zonder het sediment rondom de scheepvaartroutes.

- Onzekerheid over de dikte van de laag beschikbaar zand. Het DIS 2.1 is ontwikkeld op basis van beschikbare boringen binnen het reserveringsgebied, die in dit gebied een lage data dichtheid hebben en waarvan de meesten de einddiepte van het model (12 m onder zeebodem) niet bereiken. Daardoor is de onzekerheid van het DIS in dit gebied relatief groot.

Hoofdstuk 8 – Benodigde tijd voor aanpassen

Bij een steeds sneller stijgende zeespiegelstijging, wordt het steeds belangrijker tijdig te handelen en maatregelen voldoende snel te realiseren. In hoofdstuk 8 analyseren we daarom, op basis van een literatuurstudie, hoe snel Nederland in het verleden is geweest met het realiseren van een aantal grootschalige waterbeheerprogramma's en adaptatiemaatregelen die kenmerkend zijn voor het Nederlandse watersysteem. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de tijd die besteed is aan de gedachtevorming, planvorming en uitvoering. Door de benodigde tijd voor aanpassen te combineren met de omstandigheden waaronder een knippunt plaats vindt (uit hoofdstuk 4 en 5, en eerdere studies), en het moment van het overschrijden van zeespiegelwaarden (hoofdstuk 3), kan inzicht verkregen worden in potentiële bottlenecks en de consequenties daarvan aanpassen (zoals de noodzaak voor versnelling en/of grotere maatregelen).



Maas

Moment van overschrijden van zeespiegelwaarden



De toekomstige zeespiegelstijging is onzeker en hangt sterk af van de mate waarin we wereldwijd in staat zijn om emissies en daarmee de opwarming van de aarde te beperken. Ook onzekerheden in hoe het klimaat en overige fysieke systeem hierop reageren spelen een rol. Het mogelijk versneld afbreken en afsmelten van de ijskappen op Antarctica is één van de onzekerheden in het fysieke systeem. Dit hoofdstuk gaat in op het moment van overschrijden van een bepaalde zeespiegelwaarde en beschrijft de onzekerheid daarvan in termen een tijdvak. Samen met kennis over de mate van zeespiegelstijging waarbij een adaptatieknippunt optreedt, kan worden bepaald in welke periode een knippunt kan gaan optreden en hoeveel tijd er is voor adaptatie. Deze analyse geeft daarmee een goede basis voor het volgende hoofdstuk over adaptatiepaden.

3.1 | Onzekerheid in tijd

Vanwege onzekerheden wordt de mogelijke zeespiegelstijging vaak aangegeven in de vorm van een bandbreedte van de hoeveelheid stijging in een bepaald jaar (vaak in 2100) of in een tijdserie (vaak tot 2100). Figuur 4 (bovenste panel) toont dit op basis van de recente IPCC scenario's voor de Nederlandse kust (IPCC, 2021; <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>). Deze zeespiegelscenario's geven de zeespiegel trend weer en niet de jaar tot jaar fluctuaties door bijvoorbeeld stormopzet. Nieuw in vergelijking met voorgaande IPCC rapporten is dat er nu ook een stijging is weergegeven tot de zichtjaren 2150 en 2300. Voor adaptatie is dit relevant, omdat veel maatregelen een lange levensduur hebben (bijvoorbeeld de stormvloedkeringen). Daarbij gaat het niet alleen om de technische en functionele levensduur, maar ook de maatschappelijke levensduur die ontstaat als maatregelen en investeringen weer andere ontwikkelingen aantrekken. De langere tijdseries geven ook beter inzicht in de lange termijn adaptatie-opgave (zie paragraaf 4.5).

Een alternatief voor het presenteren van de hoeveelheid stijging in een bepaald jaar is het presenteren van het moment waarop een bepaalde mate van zeespiegelstijging wordt bereikt en de mate van onzekerheid in dat moment van optreden (Slangen et al. 2022; IPCC, 2021; onderste panel van Figuur 4). De onzekerheid wordt daarmee in de tijd uitgedrukt. Dit geeft aan of er sprake is van een onvermijdelijke stijging die in alle scenario's voorkomt of dat het bereiken van een bepaald zeespiegelniveau

onzeker is. Die onzekerheid kan uitgedrukt worden in een periode (startjaar-eindjaar) waarbinnen een bepaald zeespiegelniveau met een bepaalde mate van waarschijnlijkheid bereikt zal worden. Bijvoorbeeld, in alle scenario's kan een stijging van 0,25 m wordt gemiddeld (mediane waarden) rond 2050 bereikt, maar kan als we kijken naar de waarschijnlijke bandbreedte⁶ over zo'n 15 à 20 jaar bereikt worden. In het geval de opwarming beperkt wordt, kan dit ook pas rond 2085 bereikt worden, zoals aangegeven met de bovengrens van de waarschijnlijke bandbreedte.

Deze manier van presenteren van zeespiegelstijging scenario's past goed bij de 'knippunten aanpak', die ook gevolgd is bij eerdere studies voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en nu ook de basis vormt van spoor 2 van het Kennisprogramma zeespiegelstijging. Dit houdt in dat eerst de condities worden bepaald waarbij nieuwe of aanvullende maatregelen aan de orde (moeten) komen. In de zeespiegelstijging studies identificeren we knippunten in termen van zeespiegelwaarden: de mate of snelheid van zeespiegelstijging. Bijvoorbeeld: 'de sluitfrequentie van een stormvloedkering wordt dermate groot dat de ontwerpeisen overschreden worden of de kosten of effecten maatschappelijk onaanvaardbaar worden'. De scenario's worden dan gebruikt om te kijken wanneer een knippunt kan voorkomen, 'op zijn vroegst' en 'uiterlijk'. Dat is dus vergelijkbaar met de periode waarin een bepaalde mate van zeespiegelstijging wordt overschreden.

We gebruiken hier als voorbeelden de Deltascenario's en de projecties uit het recente IPCC rapport (locatie Nederlandse kust), omdat daar waarden afgeleid zijn tot 2150; ook voor de projecties met een potentieel grotere bijdrage van Antarctica. De referentieperiode voor de zeespiegelstijging is 1995-2014.

3.2 | Moment van zeespiegelwaarden

De momenten van het bereiken van relevante drempelwaarden beschrijven we voor de mate van zeespiegelstijging en de snelheid van zeespiegelstijging voor de lage, middelmatige en zeer hoge IPCC scenario's⁵, te weten: SSP1-2.6, SSP2-4.5 en SSP5-8.5. Voor SSP1-2.6 en SSP5-8.5 wordt gekeken naar twee deelscenario's, namelijk met en zonder extra bijdrage van Antarctica. Deze scenario's staan respectievelijk voor een lange termijn

⁵ De nieuwe scenario's van het IPCC bestaan uit een combinatie van een Shared Socio-economic Pathway (SSP) die de onderliggende socio-economische ontwikkelingen beschrijven (het nummer staat voor een scenario) en de een Representative Concentration Pathways (RCP), waarbij het nummer staat voor de mate van radiative forcing (in $W m^{-2}$). Voor meer informatie over de IPCC scenario's verwijzen we naar de IPCC AR6 rapportage <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

⁶ De waarschijnlijke bandbreedte komt overeen met de p17 en p83. Als een jaartal het label p83 heeft volgens een gegeven scenario betekent het dat er een kans van 83% is dat het bereiken van het niveau van zeespiegelstijging eerder optreedt dan dat jaar. Voor p17, p50 en p95 is die kans 17%, 50% en 95% respectievelijk. Er is daarom een kans van 66% dat de zeespiegelstijging binnen de waarschijnlijke bandbreedte valt (83%-17% = 66%).

(2081-2100) wereldwijde opwarming, hier aangegeven voor de mediaanwaarde en voor de waarschijnlijke bandbreedte⁶ tussen haakjes: 1,8 (1,3-2,4), 2,7 (2,1-3,5) en 4,4 (3,3-5,7) °C ten opzichte van pre-industrieel niveau. Het verschil in zeespiegelstijging tussen het lage scenario (SSP1-2.6) en het zeer lage scenario SSP1-1.9 (1.5 °C) is op de beschouwde tijdschaal tot 2150 gering (0,61 versus 0,67 m); daarom is het laatstgenoemde scenario niet verder beschouwd. Op de tijdschaal van honderden jaren neemt het verschil tussen het lage en zeer lage scenario overigens wel significant toe, wat belangrijk is voor de lange termijn

adaptatie-opgave. Conform het IPCC rapport beschrijven we de periode voor de waarschijnlijke bandbreedte, tenzij anders aangegeven.

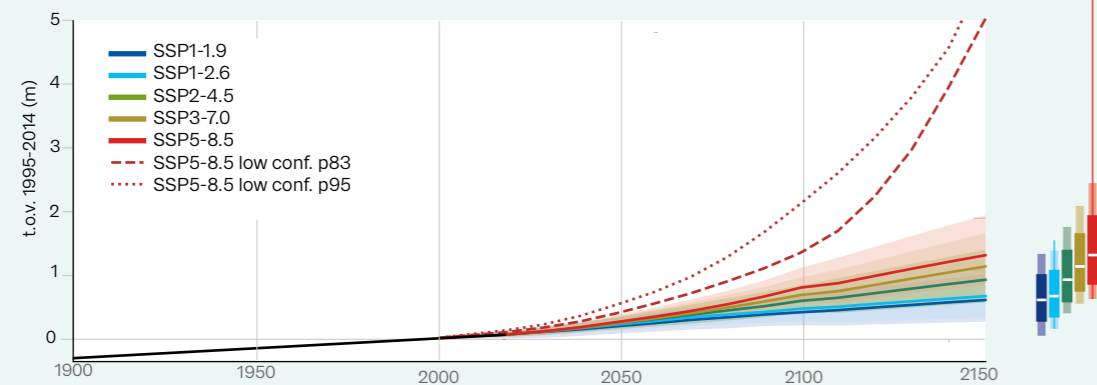
Mate van zeespiegelstijging

Het moment dat een zeespiegelstijging van 0,25 m ten opzichte van 1995-2014 bereikt wordt, verschilt weinig tussen de scenario's, ook als rekening wordt gehouden een extra versnelde zeespiegelstijging door een grote

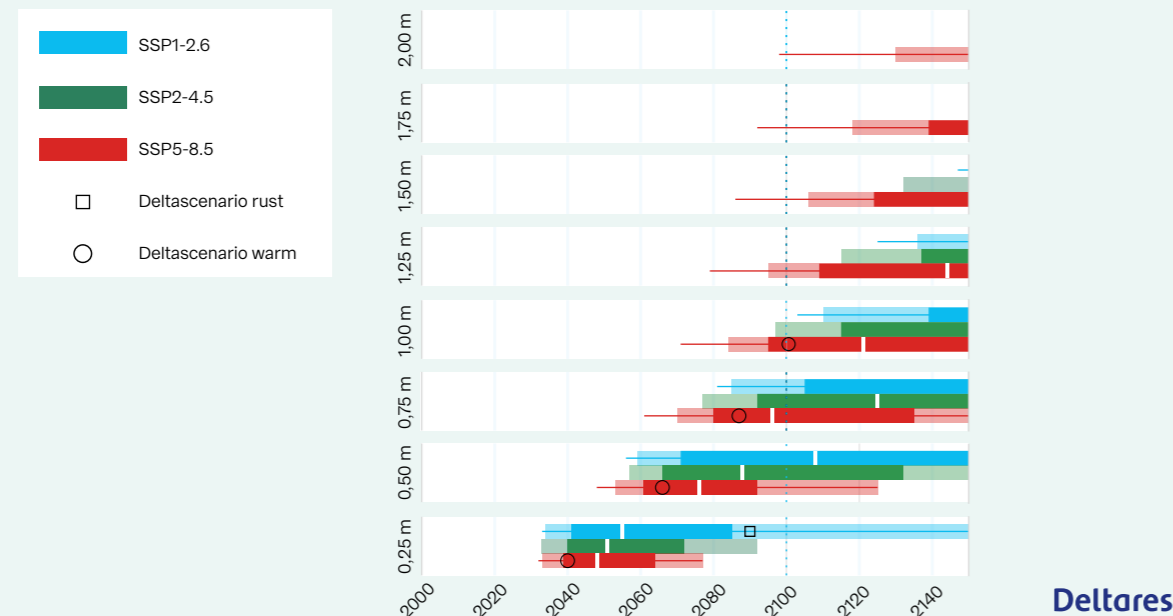
Tabel 1 Timing van zeespiegelwaarden langs de Nederlandse kust voor een stijging ten opzichte van een referentieperiode 1995-2014 voor verschillende scenario's (IPCC, 2021). Alleen de waarden tot 2150 zijn meegenomen. Jaartallen geven de mediane waarde en voor de waarschijnlijke bandbreedte (17-83% kans). Figuur 4 geeft ook de zeer waarschijnlijke bandbreedte weer (5-95%). De scenario's met * zijn de scenario's waarin processen zijn meegenomen met een kleine kans, en grote bijdrage van Antarctica en die uiteindelijk leiden tot een extra versnelde zeespiegelstijging.

Zeespiegelstijging	SSP1-RCP2.6	SSP2-RCP4.5	SSP5-RCP8.5	SSP1-RCP2.6*	SSP5-RCP8.5*
0,25 m	2055 (2041-2085)	2051 (2040-2072)	2048 (2039-2064)	2055 (2040-2085)	2048 (2038-2065)
0,5 m	2108 (2071-2150)	2088 (2066-2132)	2076 (2061-2092)	2108 (2070-2150)	2075 (2057-2092)
0,75 m	>2150				
(2105-2150)	2125 (2092- 2150)	2096 (2080-2135)	2150 (2150-2105)	2092 (2072-2135)	
1,0 m	>2150	2150 (2115-2150)	2121 (2095-2150)	2150 (2150-2136)	2107 (2085-2150)
1,25 m	>2150	2150 (2137-2150)	2144 (2109-2150)	>2150	2121 (2096-2150)
1,5 m	>2150	>2150	2150 (2124-2150)	>2150	2132 (2105-2150)
1,75 m	>2150	>2150	2150 (2139-2150)	>2150	2142 (2112-2150)
2,0 m	>2150	>2150	>2150	>2150	2150 (2116-2150)

Zeespiegelstijging



Moment van overschrijden van zeespiegelwaarden



Figuur 4 Zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust voor verschillende klimaatscenario's op basis van IPCC WG1 (2021). Boven: tijdseries met waarschijnlijke bandbreedte (17-83% kans). Dunne lijn is het 'low confidence' kleine kans scenario met grote bijdrage van Antarctica. Onder: periode waarin zeespiegelwaarden overschreden worden. De boxen geven: de mediane waarde (witte streep), de waarschijnlijke bandbreedte (17-83% kans, donkere kleur), en de zeer waarschijnlijke bandbreedte weer (5-95%, lichte kleur). Voor de scenario's SSP1-2.6 en SSP5-8.5 is de low confidence projectie met grote bijdrage van Antarctica weergegeven (dunne lijn). In het scenario SSP1-2.6 stijgt de temperatuur wereldwijd gemiddeld op de lange termijn (2081-2100) met 1,3-2,4 °C. In het scenario SSP2-4.5 is dit 2,1-3,5 °C en in het scenario SSP5-8.5 stijgt dit naar 3,3-5,7 °C.

bijdrage van Antarctica. De mediane schatting ligt rond 2050 (Tabel 1, Figuur 4). Op zijn vroegst vindt dit volgens de scenario's plaats al ergens in de komende 15 jaar plaats en uiterlijk in het laatste kwartaal van deze eeuw (volgens de waarschijnlijke bandbreedte). Een stijging van 0,5 m wordt vrijwel zeker bereikt in de tweede helft van deze eeuw, tenzij de opwarming onder de 2°C beperkt blijft (SSP1-RCP2.6), maar ook dan is het mogelijk dat dat niveau deze eeuw of iets later bereikt wordt. In het geval van een extra versnelde zeespiegelstijging als gevolg van een grote bijdrage van Antarctica en hoge opwarming wordt 0,5 m overschreden rond 2075 (2057-2092). Ook bij lagere opwarming, waarbij de wereldwijde temperatuurstijging onder de 2°C blijft (SSP1-2.6), is er een kleine kans op een grotere bijdrage van Antarctica. Een stijging van 0,5m wordt dan bereikt rond 2110 (2070- na 2150).

Voor grotere stijgingen hangt het moment waarop deze bereikt worden steeds meer af van het emissiescenario en of de ijskappen op Antarctica versneld afbreken en smelten. Een stijging van 1 m wordt bij een lage en middelmatige opwarming in de komende 130 jaar niet bereikt bij de mediane schatting, maar nog wel bij de bovenkant van de waarschijnlijke bandbreedte (p83), namelijk rond 2135 bij SSP1-2.6 en rond 2115 bij SSP2-4.5. Bij grote opwarming wordt dit bij de mediane schatting bereikt rond 2120 (2095- na 2150) en bij een extra versnelde zeespiegelstijging is dit zo'n 15 jaar eerder, namelijk rond 2105 (2071- na 2150). Een stijging van 2 m wordt op z'n vroegst rond 2130 gehaald (p95) bij grote opwarming zonder extra versnelde stijging. In het geval van een extra versnelde zeespiegelstijging kan dit veel eerder voorkomen, namelijk al aan het eind van deze eeuw (p95). De mediane schatting van een stijging van 2m zit in dit scenario net na 2150 en de p83 rond 2115.

Voor 2300 geeft het IPCC rapport (2021) aan dat de wereldwijd gemiddelde zeespiegel gemiddeld tussen de 0,3 en 3 m zal stijgen bij lage CO₂-emissies (SSP1-2.6) en tussen de 1,7 en 6,8 m bij hoge emissies (SSP5-8.5). Als rekening wordt gehouden met een grote bijdrage van Antarctica kan dit oplopen tot 16 m.

Snelheid zeespiegelstijging

Ook voor de stijgsnelheden is een analyse gedaan van de perioden waarin deze bereikt worden, omdat dit relevant is voor het meegroeien van de zandige kusten en het Waddengebied (hoofdstuk 7). Stijgsnelheden kunnen tijdelijk toenemen en daarna weer afnemen. Dit is in tegenstelling tot een bepaalde mate van stijging die, eenmaal overschreden, niet meer afneemt in de scenario's. De analyses van de perioden waarin stijgsnelheden worden overschreden (bijlage) laten zien dat een stijgsnelheid van 5 mm/jaar in zowel de scenario's met een opwarming onder de 2°C (SSP1-2.6) als met hoge opwarming (SSP5-8.5) wordt overschreden in de komende 20 jaar volgens de mediane schatting. Een stijging van 10 mm/jaar zit in de bandbreedte van alle scenario's, maar komt in SSP1-2.6 alleen voor bij de p95 (vanaf ongeveer 2045). Meer dan 10 mm/jaar wordt in SSP2-4.5 bij de bovenwaarde van de waarschijnlijke bandbreedte (p83) in het laatste kwartaal van deze eeuw overschreden, en kan in SSP5-8.5 vanaf 2070 (p50) en 2050 (p83) voorkomen. Grotere stijgsnelheden zoals 15 en 20 mm/jaar komen alleen voor in het SSP5-8.5 scenario, maar de bandbreedte van het moment van optreden is groot. Een stijging van meer dan 20 mm/jaar wordt alleen bereikt in scenario's met een extra versnelde stijging. Bij een scenario dat leidt tot 2 m zeespiegelstijging in 2100 komen dergelijke snelheden bijvoorbeeld al rond 2060 voor en dit kan toenemen tot 60 mm/jaar rond 2100 en 120 mm/jaar rond 2150.

3.3 | Gebruik voor adaptatie

De periode waarin een bepaalde zeespiegelwaarde wordt bereikt, kan aanvullende inzichten geven in hoe aan te passen en wanneer aan te passen. We lichten dit verder toe.

1) Hoe aan te passen

Wanneer het bereiken van een relevante zeespiegelwaarde binnen de beoogde levensduur van een maatregel valt, zal dat de functionele levensduur van een maatregel (zoals een waterkerende constructie) verkorten. Een relevante zeespiegelwaarde is de zeespiegelstijging waarbij aanvullende maatregelen nodig zijn (een adaptatieknippunt). Afhankelijk van de gevolgen voor de functionele levensduur kan dit een reden zijn om andere adaptatie-maatregelen te kiezen.

Bij een kleine bandbreedte in het moment waarop zo'n zeespiegelwaarde wordt bereikt, is er weinig onzekerheid over het moment waarop het einde van de levensduur verwacht wordt. Bij een grotere bandbreedte, die geheel binnen de beoogde levensduur valt, is er vooral onzekerheid over het moment van het einde van de levensduur, maar is het duidelijk dat de levensduur korter is door het stijgen van de zeespiegel. Meer informatie (via nieuwe signalen die in de toekomst binnen kunnen komen) kan de onzekerheid over het einde van de levensduur gaandeweg verminderen. Als een kritische grens slechts bij een deel van de klimaatscenario's wordt overschreden, is het mogelijk dat klimaatmitigatie een verkorting van de levensduur kan voorkomen.

Bovenstaande is niet alleen van toepassing voor een bepaalde maatregel, maar ook voor een adaptatieplan en de levensduur daarvan en vormt daarmee de tijdschors van een beslissingsanalyse. Het adaptatieplan van het Deltaprogramma, dat in 2015 gepubliceerd is, houdt rekening met een zeespiegelstijging tot 1 m in 2100. In de komende 130 jaar kan dit niveau in alle scenario's worden bereikt, zij het met een kleinere kans als de opwarming beperkt blijft tot onder de 2°C. Het is dus aannemelijk dat er op termijn (eind deze eeuw of eerste helft volgende eeuw) aanvullende maatregelen nodig zijn. In de IPCC zeespiegelscenario's voor 2300 zien we dat een stijging van 2-3 m ook bij een lage opwarming tot 1.5 C bereikt kan worden. Het is dus aannemelijk dat er op termijn (eind deze eeuw of eerste helft volgende eeuw) aanvullende maatregelen nodig zijn. Als we kijken naar de IPCC zeespiegelscenario's voor 2300, zien we dat een stijging van 2-3 m ook bij een lage opwarming tot 1.5 C bereikt kan worden. Een adaptief plan waarmee we op termijn minimaal aan te kunnen passen aan 2-3 m lijkt daarmee niet overbodig (zie ook paragraaf 4.5.1 over lange termijn adaptatie-opgave).

Gegeven een gewenste functionele levensduur van een maatregel (of adaptatieplan) kunnen de zeespiegelwaarden

voor de scenario's ook gebruikt worden voor het ontwerpen van een maatregel en/of adaptatieplan. Bijvoorbeeld, wanneer een maatregel minimaal 30 jaar mee moet kunnen, dan is dat met een functioneel ontwerp dat rekening houdt met 0,5m zeespiegelstijging te realiseren, ook bij een extra versnelde zeespiegelstijging. En als het materiaal een langere levensduur heeft (wellicht met aanvullend onderhoud) kan de levensduur mogelijk opgerekt worden tot het eind van de eeuw in het geval een zeespiegelstijging van 0,5 m dan pas optreedt.

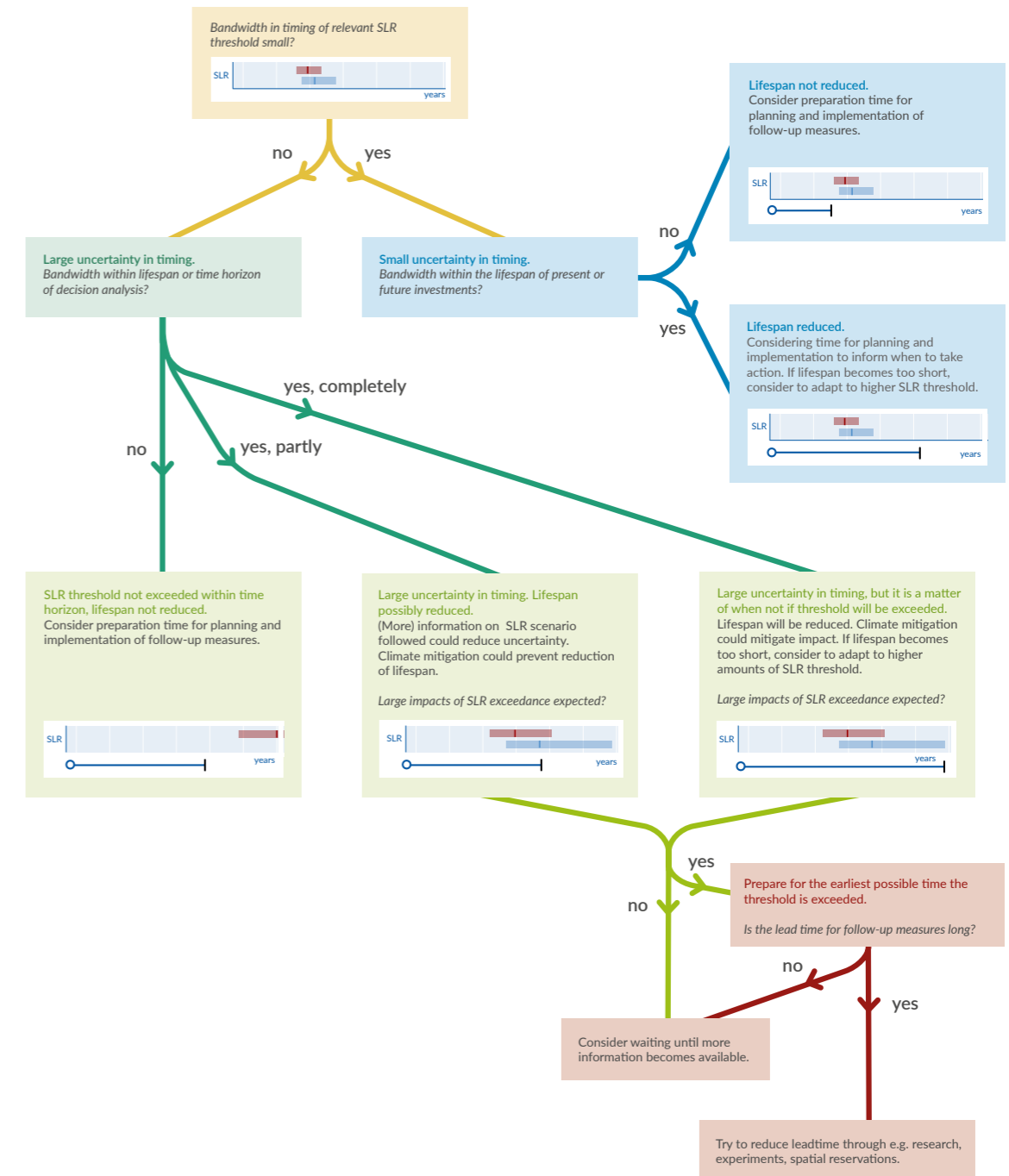
2) Wanneer aan te passen

De periode waarin een bepaalde zeespiegelstijging overschreden kan worden gebruikt om een 'signaalwaarde' te evalueren, namelijk op het potentieel om als waarschuwingssignaal te dienen en de besluitvorming te informeren. Om voldoende tijd te hebben voor de planning en implementatie van maatregelen moeten betrouwbare signalen worden gedetecteerd vóórdát een beslispunt optreedt.

Stel, een stijging van 0,25 m wordt gebruikt als signaalwaarde om maatregelen te nemen die bij 0,4 m geïmplementeerd moeten zijn. In alle scenario's wordt 0,25 m rond 2050 overschreden (Figuur 4, uitgaande van de mediane schatting). Een stijging van 0,4 m komt zo'n 23 (15-27) jaar later bij SSP2-4.5 en 17 (13-18) jaar onder het SSP5-8.5 scenario. Bij het scenario SSP1-2.6 is er veel meer tijd, maar in het geval van een extra versnelde zeespiegelstijging die tot 2 m rond 2100 leidt, is er maar 10 jaar tijd tussen het bereiken van 0,25 m en 0,4 m zeespiegelstijging. Een signaal bij 0,25 m laat in dat scenario erg weinig tijd voor bijvoorbeeld het nemen van een grootschalige maatregel indien die rond 0,4 m zeespiegelstijging klaar zou moeten zijn om de risico's niet te laten toenemen. Andere zeespiegelwaarden of signalen van Antarctica kunnen mogelijk eerder een signaal geven. In een dergelijk scenario is bijvoorbeeld al wel eerder vast te stellen dat de zeespiegel relatief snel stijgt (zie bijlage) en dat een waarde van 0,4 m in een afzienbare tijd mogelijk is. Echter rondom een snelheidssignaal zit in werkelijkheid ruis door jaar-tot-jaar fluctuaties.

Te laat zijn met aanpassen betekent dat het veiligheidsniveau tijdelijk lager is. Indien dit ongewenst is en elke toename van risico voorkomen dient te worden, kan worden besloten om over te gaan tot planning en implementatie van maatregelen, omdat het in elk scenario een kwestie van tijd is voordat 0,4 m bereikt gaat worden. Een andere mogelijkheid is om het plan aan te passen en te kiezen voor een maatregel die meer zeespiegelstijging aan kan, zodat er meer tijd is voor eventuele vervolgmaatregelen. Ook is het mogelijk om tijdig voorbereidingen te treffen, zoals het klaar hebben van een plan en ontwerp, regelgeving of ruimtelijke ordening, om sneller tot implementatie van maatregelen

How can information on the uncertainty in timing of SLR help decision making?



Figuur 5 Stroomschema ter illustratie van hoe de bandbreedte in de timing van een zeespiegelstijging gebruikt kan worden voor adaptatie rekening houdend met de levensduur van maatregelen en de benodigde tijd voor planvorming en uitvoering (Slangen et al. 2022).

over te kunnen gaan, en daarmee de doorlooptijd van signaal naar implementatie te verkorten. Het verleden laat immers zien dat deze voorbereidende activiteiten veel tijd in beslag kunnen nemen en daarom tijdig opgepakt moeten worden (zie hoofdstuk 8.1).

Oplossingsruimte, bouwstenen en adaptatiepaden



Het concept van adaptief plannen wordt gebruik om rekening te houden met grote onzekerheden, zoals een mogelijk zeer snelle zeespiegelstijging. Het Deltaprogramma volgt deze aanpak ook. Kort gezegd houdt dit in dat er verschillende routes worden uitgestippeld om aan te passen aan klimaatverandering en zeespiegelstijging. Deze routes bestaan uit een reeks van mogelijke maatregelen (adaptatiepaden) door de tijd heen. Voor een verkenning van mogelijke adaptatiepaden kan het inzichtelijk zijn om de oplossingsruimte voor adaptatie (de beschikbare adaptatie opties) in beeld te brengen inclusief waar deze door wordt beïnvloed. Dit hoofdstuk gaat eerst in op het concept oplossingsruimte en de generieke oplossingsruimte voor aanpassen aan zeespiegelstijging. Daarna bespreken we de bouwstenen en de adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland.

4.1 | Oplossingsruimte

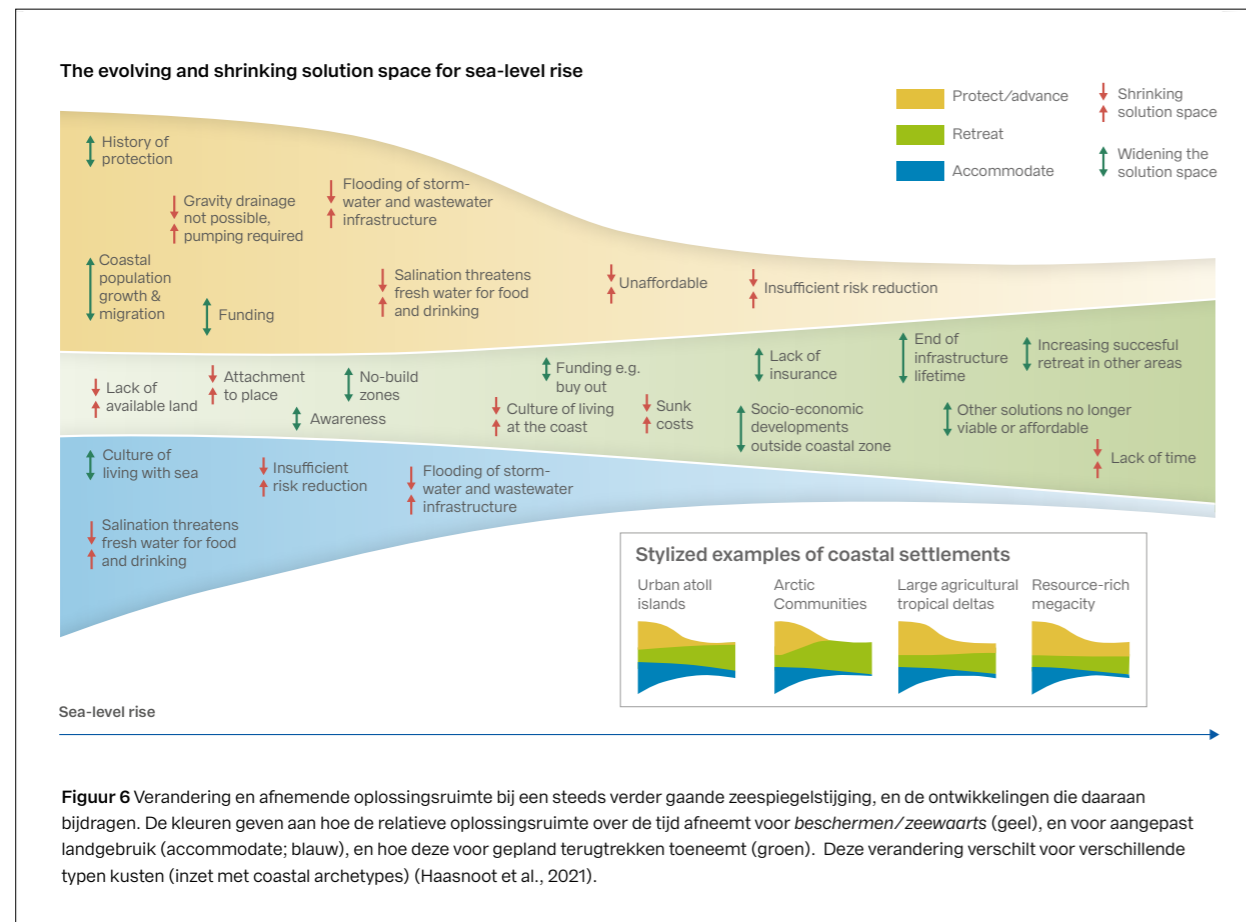
Het concept oplossingsruimte voor aanpassen aan klimaatverandering wordt gebruikt om te beschrijven welke maatregelen beschikbaar zijn. De oplossingsruimte bestaat daarom uit de adaptatie opties die effectief zijn om de gevolgen van klimaatverandering kunnen beperken én ook haalbaar zijn om geïmplementeerd te worden (Haasnoot et al. 2020). Ze wordt bepaald door zowel fysieke (ruimtelijk, technisch) als maatschappelijke (culturele, socio-economische en politieke institutionele) dimensies. Binnen deze dimensies zijn er 'harde' grenzen waarna geen adaptatie meer mogelijk is, en 'zachte' grenzen die met aanvullende maatregelen geëlimineerd kunnen worden (Dow et al., 2013; IPCC, 2022b). In feite gaat het om barrières en beperkingen voor adaptatie waar wel of niet wat aan te doen is. Gebrek aan ruimte voor een maatregel kan een harde grens zijn als er ook echt geen

ruimte aanwezig is en is een zachte grens als de ruimte beschikbaar gemaakt kan worden. Bij harde grenzen gaat het vaak op fysiologische grenzen zoals temperatuur en vochtigheid waardoor sommige plekken op aarde onleefbaar zijn/worden in tijden van extreme hitte, maar ook zoutgehalte en mariene hittegolven voor natuur. Ook tijd voor het realiseren van maatregelen kan een harde grens zijn. Zachte grenzen hebben te maken met financiële middelen, beschikbaarheid kennis en institutionele setting. Adaptatie kan het bereiken van zachte grenzen uitstellen of voorkomen, totdat harde grenzen worden bereikt.

De oplossingsrichtingen *Beschermen-open*, *Beschermen-gesloten*, *Zeewaarts* en *Meebewegen*, spannen samen de oplossingsruimte op die theoretisch gezien mogelijk is. De mate waarin deze oplossingsrichtingen bij kunnen dragen aan adaptatie verandert echter door de omstandigheden, en bij voortgaande zeespiegelstijging, in de tijd. De oplossingsruimte kan groter of kleiner worden door 1) externe veranderingen buiten de directe invloed van de actoren, en door 2) geplande acties, die de oplossingsruimte opzettelijk wijzigen ten behoeve van adaptatie. Deze externe veranderingen en acties hangen samen met fysieke en maatschappelijke dimensies (tabel 1) en zijn onderling afhankelijk. Een externe verandering is bijvoorbeeld de mate of snelheid van zeespiegelstijging waardoor er minder tijd is voor sommige maatregelen of waardoor ze technisch niet meer mogelijk zijn. Een overstroming (hier of elders) kan bijvoorbeeld leiden tot een verandering in bewustzijn of tot kansen voor andere strategieën vanwege de schade. En ruimtelijke ontwikkelingen kunnen de haalbaarheid voor adaptatie-opties beperken. Daarentegen kan verandering van wetgeving en financiële middelen de mogelijkheid tot implementatie van adaptatie maatregelen juist versnellen, en kan ruimtelijke planning opties open houden.

Tabel 2. Voorbeeld van externe veranderingen en geplande acties die de oplossingsruimte vormgeven (aangepast van Haasnoot et al., 2020).

	Fysieke dimensie (bijv. ruimte, technisch)	Maatschappelijke dimensie (bijv. sociaal, economisch, cultureel, politiek)
Externe veranderingen die de oplossingsruimte vormgeven	<ul style="list-style-type: none"> - Mate en snelheid van klimaatverandering - Versnelde zeespiegelstijging - Extreme gebeurtenissen, zoals extreme neerslag, droogte, overstroming - Meerdere kleinere gebeurtenissen 	<ul style="list-style-type: none"> - Verandering nationaal perspectief en politiek oriëntatie - Bevolkingsgroei/afname - Economische groei/afname - (Inter)nationaal beleid en afspraken - Maatschappelijke veranderingen
Geplande acties die de oplossingsruimte vormgeven	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoring en detectie van signalen - Technologische innovaties - Onderzoek, experimenten en pilots - Ruimtelijke ontwikkelingen in relatie met transities en grote opgaven 	<ul style="list-style-type: none"> - Wet- en regelgeving - Bewustwording creëren - Coalitievorming en nieuwe financieringsvormen - Monitoring en evaluatie - Klimaatmitigatie



Een afnemende oplossingsruimte voor laaggelegen kustgebieden

In het algemeen, neemt bij een toenemende zeespiegelstijging de oplossingsruimte af (zie Figuur 6; Haasnoot et al. 2021). Daarbinnen veranderen de mogelijkheden voor verschillende oplossingsrichtingen. Zo nemen de mogelijkheden voor beschermen en ‘aangepast landgebruik’ over het algemeen af, terwijl die voor het ‘gepland terugtrekken’ toeneemt. Dit is in Figuur 6 weergegeven met de verandering van de grootte van de vlakken. De oplossingsruimte kan om verschillende redenen veranderen (tekst in de vlakken van Figuur 6) en in sommige situaties ook kleiner en (weer) groter gemaakt worden. De verandering van de oplossingsruimte hangt sterk af van de lokale omstandigheden, zoals de fysieke omstandigheden, maatregelen uit het verleden, en institutionele context. Voor grote steden in ontwikkelde landen is het aannemelijk dat beschermen langer een groter onderdeel uitmaakt van de oplossingsruimte, terwijl er voor kleine eilanden de oplossingsruimte voor beschermen veel sneller afneemt en die voor gepland terug trekken eerder in beeld komt (zie inzet Figuur 6 voor verschillend kusttypes). Tegelijkertijd kan aangepast landgebruik daar langer onderdeel zijn van de oplossingsruimte. We lichten dit verder toe.

Aangepast landgebruik met maatregelen zoals opgehoogde gebouwen, kan aanvankelijk effectief en haalbaar zijn, maar zijn niet genoeg om risico’s op termijn voldoende te verkleinen bij een verder gaande zeespiegelstijging en verzilting van grondwater. Bovendien is het aanpassen van bebouwing en infrastructuur vooral in nieuw te bouwen locaties haalbaar. Ook meer natuurlijke oplossingen zoals offshore riffen of wetland herstel, hebben beperkte toepassing, o.a. door gebrek aan ruimte en/of voldoende sediment om mee te bewegen tot op een gewenste hoogte. Dergelijke natuurlijke maatregelen zullen naar verwachting op veel plaatsen slechts tijdelijke aanpassingen zijn en vaak complementair aan de meer harde infrastructuur. Harde bescherming (hetzij door de huidige kustlijn of door nieuwe zeewaartse kustlijn) met behulp van dijken, dammen of kunstmatige eilanden, kan een effectieve oplossing zijn op sommige plekken met name bij megasteden in welvarende landen, maar kent beperkingen, doordat de aanhoudende en mogelijke (sterk) versnelde zeespiegelstijging het steeds moeilijker maakt de levensduur van waterinfrastructuur binnen de beschikbare tijd te verlengen. Ook zal harde bescherming niet voor iedereen en overal een betaalbare lange termijn oplossing zijn en evenmin zal het de effecten van stijgend grondwater en mogelijke (sterk) versnelde rivierafvoeren of de bestaande en toenemende schade (bijv. als dijken falen) tegenhouden. Gepland terugtrekken is het enige alternatief dat uiteindelijk alle kwetsbaarheid tegen zeespiegelstijging echt wegneemt (IPCC, 2022b).

4.2 | Bouwstenen binnen de oplossingsrichtingen

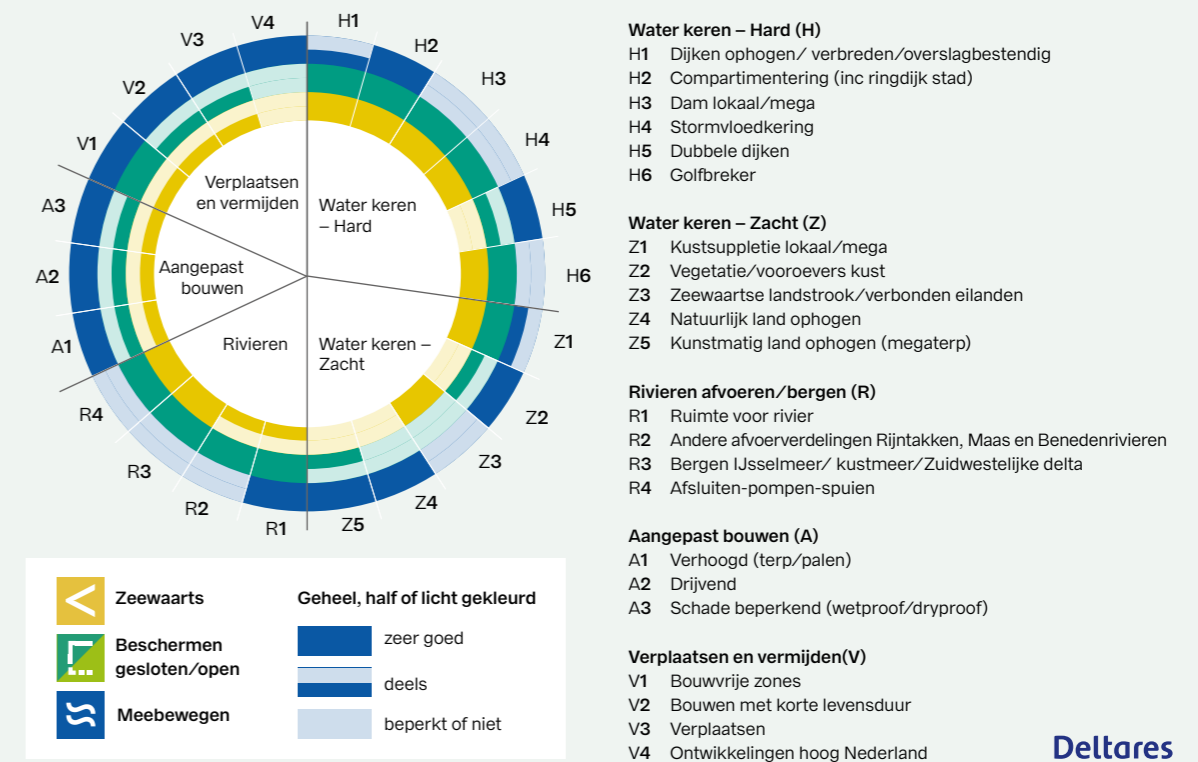
De vier oplossingsrichtingen *Beschermen-gesloten*, *Beschermen-open*, *Zeewaarts* en *Meebewegen* zijn gebaseerd op de adaptatiestrategieën zoals gedefinieerd door het IPCC (IPCC, 2022b), het huidige plan van het Deltaprogramma (Deltaprogramma 2015), en een inventarisatie van ideeën voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland. Deze ideeën en plannen zijn te vinden op de website NLadapt (<http://nladapt.deltares.nl>). Deze oplossingsrichtingen illustreren mogelijke toekomst bij een hoge zeespiegelstijging (> 2 m). De verkenning van adaptatiepaden met een reeks van maatregelen over de tijd geeft inzicht in korte termijn maatregelen die zijn verbonden aan de lange termijn strategieën en oplossingsrichtingen. Ook geeft het inzicht in de daarbij behorende voorbereidingen zoals onderzoek, pilots en korte termijn acties (zoals wetgeving) om deze lange termijn opties te creëren of open te houden. Het verkennen van adaptatiepaden helpt ook bij het identificeren van mogelijke lock-ins waarin het moeilijk en/of kostbaar wordt om aanvullende maatregelen te nemen

of te veranderen van strategie. Een eerste aanzet daartoe is gedaan in Haasnoot et al. (2019).

Om de oplossingsrichtingen en adaptatiepaden verder uit te werken is een set van generieke bouwstenen opgesteld (Figuur 7). Een ‘bouwsteen’ is in feite een kritieke eenheid (maatregel of portfolio van maatregelen) die samen met andere bouwstenen een uitwerking (inrichtingsvariant) van een oplossingsrichting voor aanpassing aan zeespiegelstijging vormt. Figuur 7 laat zien dat bouwstenen in meerdere oplossingsrichtingen kunnen voorkomen, zij het soms in een andere mate. Tabel 3 op blz 39 en 40 beschrijft de relatie tussen de bouwstenen enerzijds en bestaande waterwerken en plannen voor adaptatie anderzijds.

De bouwstenen zoals hier gepresenteerd zijn allemaal fysieke maatregelen. Er bestaan ook andere typen maatregelen zoals het aanpassen van gedrag (bijvoorbeeld bewustwording en evacuatie) en economische maatregelen (bijvoorbeeld verzekeren) die een aanvulling kunnen zijn op deze fysieke maatregelen. Daarnaast zijn er voor de realisatie van maatregelen aanvullende activiteiten nodig, bijvoorbeeld rondom wet- en regelgeving.

Adaptatiewiel met bouwstenen voor waterveiligheid



Figuur 7 Eerste set van bouwstenen voor adaptatie aan zeespiegelstijging en de mate waarin deze bouwstenen bij de oplossingsrichtingen *Zeewaarts* (geel), *Beschermen gesloten/open* (groen), *Meebewegen* (blauw) passen (geheel gekleurd vlak = zeer goed, half gekleurd vlak = deels, licht gekleurd vlak = niet). Het betreft hier fysieke maatregelen om de gevolgen van hoogwater te beperken. Daarnaast zijn er ook maatregelen nodig voor verzilting en zoetwaterbeschikbaarheid, en er ook andere typen maatregelen zoals het aanpassen van gedrag, economische en institutionele maatregelen. In de bijlage staat ook een tabel gepresenteerd en Tabel 3 op blz 39-40 geeft een uitgebreider overzicht met een link naar bestaande situatie en ideeën.

De in dit rapport genoemde bouwstenen zijn een eerste aanzet en hebben vooral betrekking op maatregelen om de gevolgen van hoogwater te beperken en in beperkte mate op verzilting en zoetwaterbeschikbaarheid.

De effectiviteit van bouwstenen is afhankelijk van lokale omstandigheden. In Tabel 3 is aangegeven in welke regio(s) deze bouwstenen naar verwachting toepasbaar zijn. Op basis van de volgende criteria en data hebben we mogelijke locaties waar bouwstenen toepasbaar kunnen zijn weergegeven in een kaart (Figuur 8):

- Waterkeren - hard met dijken ophogen/verbreden/overslagbestendig maken (H1c) en compartimentering (H2): bij grote stedelijke gebieden zoals regio Haarlem, Rotterdam/Den Haag, Leiden, Amsterdam
- Waterkeren - zacht met zandsuppleties (Z1) langs de gehele zandige kust, met een mogelijke nieuwe zeewaartse kustlijn in het kustgebied van Holland en Zeeland.
- Natuurlijk land ophogen met wisselpolders of dubbele dijken (H5, Z2, Z4) in gebieden met veel sediment en niet te veel stedelijk gebied, zoals bij de Westerschelde, Waddenkust en Eems
- Kunstmatig land ophogen (Z5) in diepere polders met sterke (zandige) bodem, zoals voormalige droogmakerijen in de Haarlemmermeerpolder, Zuidplaspolder en Zoetermeer.

- Ruimte voor de Rivier (R1): langs alle riviertakken, op locaties waar de rivierafvoer sterk bepalend is voor de waterstand.
- Andere afvoerverdeling over de riviertakken (R2): hier kunnen diverse alternatieven overwogen worden zoals meer afvoer over de IJssel of Waal; en/of meer afvoer richting Haringvliet en Grevelingen.
- Rivierwater bergen (R3): in het IJsselmeer, bekken van de zuidwestelijke delta, en een nieuw te maken kustmeer, en eventueel nieuw bekken als het Waddengebied wordt afgesloten van de Noordzee.
- Een pomp-spuisysteem (R4): kan overwogen worden langs de (nieuwe zeewaartse) kust, bij de Nieuwe Waterweg, het Haringvliet of Grevelingen. Ook kan het bestaande pompsysteem bij de Afsluitdijk uitgebreid worden.
- Aangepast bouwen (A1, A2, A3) of bouwvrije zones (V1): in gebieden met slappe grond/veengebied en waar het in de toekomst natter wordt door klimaatverandering en waar ook emissies beperkt moeten worden.
- Bouwvrije zones en bouwen met een korte levensduur (V1 en V2): in rivierdalen en gebieden met maaiveld lager dan NAP+2 m, waar ruimte nodig is voor adaptatiemaatregelen zoals rivierwater afvoeren, water bergen, water keren en zandwinning.
- Ontwikkelingen hoog Nederland (V4): in gebieden met maaiveld boven NAP+5 m en buiten de ecologische hoofdstructuur en rivierdalen

In het Kennisprogramma Zeespiegelstijging zal nader onderzoek plaatsvinden naar deze bouwstenen om meer inzicht te krijgen in effectiviteit, haalbaarheid en flexibiliteit van de maatregelen⁷.



Geschiktheidskaart voor bouwstenen

- H1 Dijken ophogen
- H1 Dijken ophogen/ verbreden/overslagbestendig
- H2 Compartimentering (inc ringdijk stad)
- H5 Dubbele dijken
- Z2 Vegetatie / vooroevers kust
- Z4 Natuurlijk land ophogen
- Z1 Kustsuppletie lokaal/mega
- H1 Dijken ophogen langs rivieren
- R2 afvoerverdeling aanpassen
- Z3 Zeewaartse landstrook / verbonden eilanden
- Z5 Kunstmatig land ophogen (megaterp)
- R1 Ruimte voor rivier
- R3 waterbergen voor rivieren
- R4 Afsluiten-pompen-spuien
- A1 Verhoogd (terp/palen)
- V1 Bouwvrije zones
- V2 Bouwen met korte levensduur
- V4 Ontwikkelingen hoog Nederland
- V1 Bouwvrije zones
- V2 Bouwen met korte levensduur



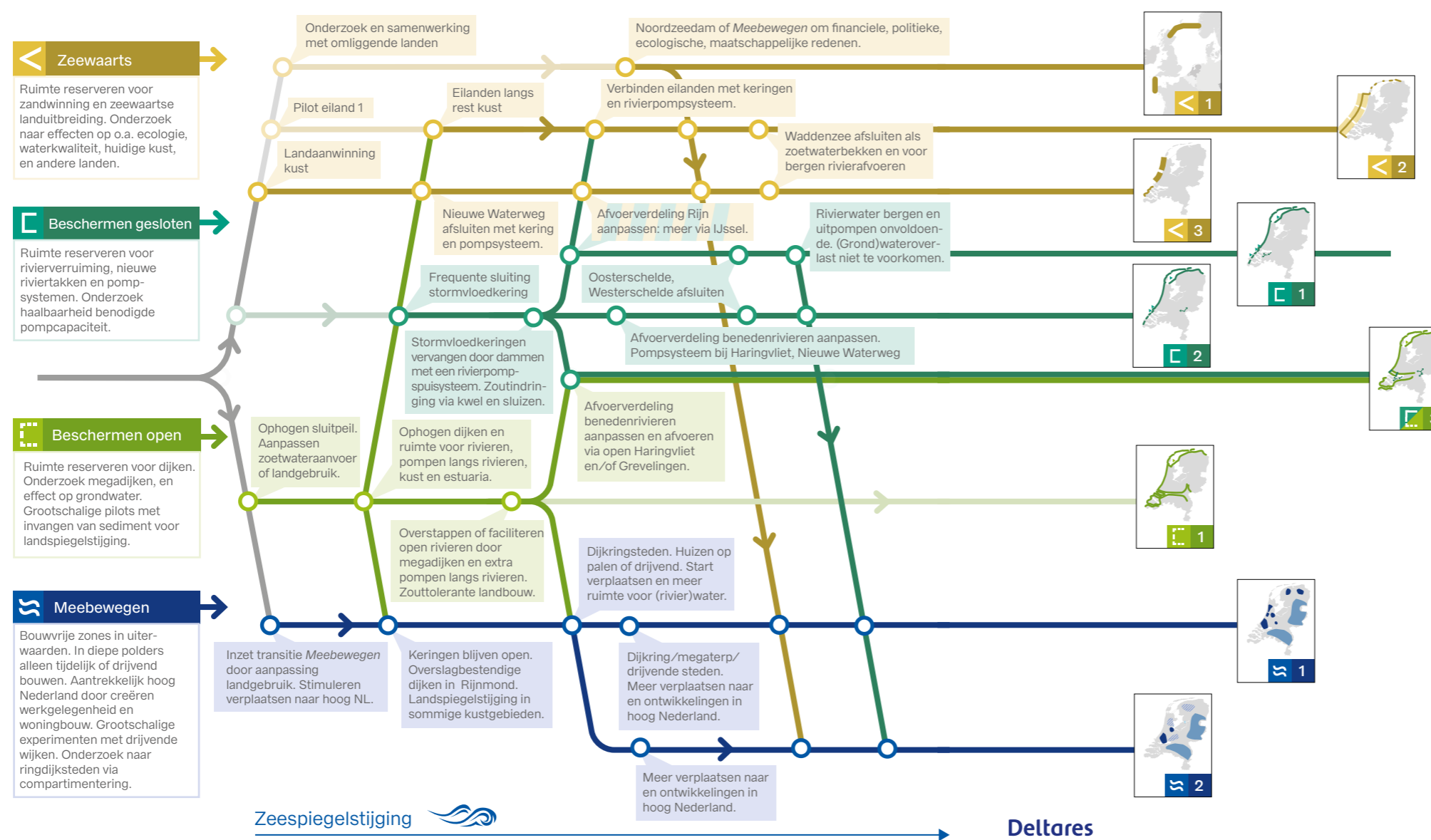
Figuur 8 Kaart met mogelijke locaties voor toepassing van de bouwstenen. Het betreft vooral de geschiktheid van gebieden voor deze bouwstenen. Sommige bouwstenen zijn mogelijk in hetzelfde gebied en hebben daarom dezelfde legenda-eenheid. Er zijn ook bouwstenen die in meerdere gebieden mogelijk zijn.

⁷ In het kennisprogramma zeespiegelstijging vind nader onderzoek plaats naar a) de mate waarin de bouwstenen bijdragen aan het doelbereik voor het waterbeheer (waterveiligheid, zoetwater) en wat de effecten zijn op andere doelen, functies en waarden (economische sectoren, natuur, leefomgeving, klimaatmitigatie), b) de kosten en technische en maatschappelijke uitvoerbaarheid onder verschillende mate en snelheid van zeespiegelstijging, en c) de flexibiliteit/adaptiviteit van maatregelen (zoals: houden ze opties open (flexibel), wordt het lastig over te stappen (lock-in), sluiten ze opties uit (lock-out)).

Tabel 3: Overzicht van bouwstenen voor adaptatie aan zeespiegelstijging, de plannen en ideeën waarop deze bouwsteen is gebaseerd én een koppeling met de regio's waarin deze bouwstenen kunnen worden toegepast. In deze tabel is geen complexiteit nagestreefd. Onderscheid is gemaakt in de volgende vier regio's: MW = Middenwest (vaste kust Zuid-Holland, rivierengebied); ZW = Zuidwest (Zuidelijk Deltabekken); N = Noord-Holland, Wadden, Friesland, Groningen, IJsselmeer); H = Hoog Nederland

ID	Bouwsteen	Beschrijving en doel in relatie tot zeespiegelstijging	Plannen en ideeën met deze bouwsteen	Regio
Waterkeren - Hard				
H1a	Dijken ophogen/versterken	Traditionele dijken ter bescherming van het achterland tegen overstromingen. Deze worden breder naarmate ze hoger worden. Bij gebrek aan ruimte kunnen damwanden of vernageling gebruikt worden.	Voorkeursstrategie Deltaprogramma	ZW, MW, N
H1b	Dijken verbreden (superdijken)	Een superdijk heeft een breedte van mogelijk honderden meters, is doorbraakbestendig waardoor het de schaal en ook waterdiepte beperkt. Deze brede dijk biedt plaats om (tijdelijk) op te bouwen.	Deltadijk - Terpdijk – Klimaatdijk Superdijk	ZW, MW, N
H1c	Overslagbestendige dijken	Doorbraak- en overslagbestendige dijken zijn bestand tegen golfoverslag doordat ze een verstevigd hard binnentalud hebben. Hierdoor is het volume overstromend water beperkt (in vergelijking met traditionele dijken). Mogelijk als onderdeel van een dubbele dijk of in combinatie met compartimentering.	Overslagbestendige dijk	ZW
H2	Compartimentering	Extra dijken in het landschap die niet permanent aan het water liggen zodat kleinere compartimenten ontstaan en schaal van overstroming bij doorbraak primaire kering beperkt wordt, bijvoorbeeld rondom grote steden	Plan B: NL2200 Compartimenteren en ophogen van laag Nederland	MW
H3a	Dam - lokaal	Een dwars door een watergang gelegen afsluiting om water te keren, waardoor de kans op overstromen langs de benedenrivieren en andere binnenwateren kleiner wordt.	Plan Sluizen Advies Borm & Huijgens Sluizen en Duinen	MW, ZW
H3b	Dam - mega	Afsluiting van de Noordzee of een dam voor de Nederlands kust (Noordzeedijk) om hoge buitenwaterstanden te keren en de waterstanden van de binnenwateren laag te houden.	Noordzeedijk/ NEED	
H4	Stormvloedkeringen	Een beweegbare waterkering ter bescherming van het achterland die alleen gesloten wordt tijdens perioden van hoge buitenwaterstanden.	De zuidwestelijke Delta2200	ZW
H5	Dubbele dijk	Combinatie van een buitendijk en binnendijk die gezamenlijk het achterland beschermen tegen overstromen. Het gebied tussen beide dijken wordt regelmatig onder water gezet om sediment te laten bezinken zodat het land ophoogt en nieuwe natuur ontstaat. Kan gecombineerd worden met Z5a	Dubbele dijken	ZW, MW,N
H6	Golfbreker	Constructie langs de kust die ten doel heeft golven te breken zodat de golfbelasting op het achtergelegen land of de achtergelegen kering gereduceerd wordt. Dit kan ook gerealiseerd worden met riffen van levende schelpdieren zoals oesters en mosselen die de golfaanval verminderen.	Kunstriffen, Plan T	ZW, MW, N
Waterkeren – Zacht				
Z1a	Kustsuppleties - lokaal	Lokale zandsuppleties verstevigen en verhogen de duinen, het strand en de vooroever om te beschermen tegen overstromingen. Dergelijke suppleties moeten regelmatig herhaald worden.	Zwakke schakel Delflandse kust Op de eilanden: Natuurlijke toekomst voor NL 2120	ZW, N
Z1b	Kustsuppleties - mega	Zelfde als lokale zandsuppleties maar dan met substantieel groter volumes. Deze hoeven minder vaak toegepast te worden dan lokale zandsuppleties. De natuurlijke processen verspreiden het zand naar andere kustlocaties.	Zandmotor Delfland De zuidwestelijke Delta 2200 Natuurlijke toekomst voor NL 2120	MW, N
Z2	Duinen versterken	Duinen beschermen het achterliggende gebied tegen overstromingen en kunnen door natuurlijke of kunstmatige processen versterkt en opgehoogd worden.	Verstuiving in de duinen Sluizen en Duinen	ZW, N
Z3	Vegetatie en vooroever aan de kust	Vegetatie en vooroever voor de primaire waterkeringen kunnen de golfbelasting reduceren. Vegetatie kan ook sediment binden en zo de kust ophogen.	Zachte superdijk Rijnmonding als estuarium	N, ZW
Z4a	Zeewaartse eilanden verbonden met keringen	Dit betreft landaanwinning, eilanden voor de kust of een landstrook met binnenmeer. Deze kunnen de golfbelasting op de huidige kustlijn reduceren. Indien de eilanden verbonden zijn met keringen kunnen deze ook hoge buitenwaterstanden keren. Het achterliggende binnenmeer kan gebruikt worden om hoge rivierafvoeren tijdelijk te bergen.	Deltawerken van de Toekomst Plan Emergo Delta 21 de Tulp Fryske Fiersichten NL 2300 Haakse Zeedijk Verbrede Kust Brede kuststrook Advies Borm & Huijgens	MW, ZW, N
Z4b	Zeewaartse landstrook	Uitbreiding van de huidige kust, waardoor een nieuwe bredere kust ontstaat die de golfbelasting op de duinen en dijken reduceert.	Plan Waterman Nieuwe Hollandse Bos-variant	MW, ZW, N

ID	Bouwsteen	Beschrijving en doel in relatie tot zeespiegelstijging	Plannen en ideeën met deze bouwsteen	Regio
Z5a Z5b Z5c Zbd	Natuurlijk land ophogen met a) binnendijks met dubbele dijken, b) binnendijks wisselpolders, c) buitendijks getijddepark, d) buitendijks vooroever	a) Combinatie met H5 om natuurlijk land op te hogen middels sedimentatie. Inundatie van het land tussen de dijken wordt geregeld middels een duiker. b) Een wisselpolder is een polder die afwisselend in gebruik is en onder water wordt gezet waar sedimentatie plaats vindt en het land hoger wordt. c) Buitendijks sedimentatie bevorderen door een 'getijdenpark' waarbij natuur en recreatie gecombineerd worden met invang van slib, d) Dijken met een breed golf-remmend voorland, bestaande uit schorren, kwelders, zeegras of wad en slikplaten, dat meegroeit met zeespiegelstijging.	Dubbele dijken Natuurlijke toekomst voor NL 2120 Vorming washovers en sluffers Waker en Slaper Rijke Wadden	ZW, N
Z6	Kunstmatig land ophogen (megaterp)	Een megaterp is een grote kunstmatige ophoging in het landschap. Door de extra hoogte zijn functies op de terp extra beschermd tegen de gevolgen van overstromingen	Nederland omhoog Plan B: NL2200 Compartimenteren en ophogen van laag Nederland	MW, N
Rivieren afvoeren en bergen				
R1	Ruimte voor de rivier	Verbreden van uiterwaarden en aanleggen van nevengeulen en riviertakken om hoogwaterstanden in rivieren te reduceren en de afvoercapaciteit te vergroten.	Ruimte voor de rivier	MW
R2a R2b R2c	Andere afvoer verdelingen Rijntakken, Maas en Benedenrivieren	Door realisatie van een andere afvoerverdeling kunnen bepaalde kwetsbare locaties ontzien worden. Bijvoorbeeld een andere afvoerverdeling over de Rijntakken (Waal/Lek/IJssel), of een andere verdeling tussen de Nieuwe Waterweg, Haringvliet en eventueel Grevelingen.	Nieuwe Hollandse Bos-variant Advies Borm & Huijgens Meer via Haringvliet: Plan Beaufort Plan Weiler	ZW, MW, N, H
R3a R3b R3c	Rivierafvoer bergen IJsselmeer/ binnemeer kust/ ZWD	In afgesloten rivieren moet tijdens perioden van hoge afvoeren een deel van het water geborgen worden als de pomp- en spuicapaciteit niet voldoende zijn. Vergroten van bergingscapaciteit reduceert hoge waterstanden in de (voormalige) rivieren en daarmee de belasting op de waterkeringen.	Haakse Zeedijk Delta 21	MW
R4	Pompen en spuien van rivierafvoer na afsluiting met een dam (H3)	Twee methoden om water bij een afgesloten riviertak of estuarium naar zee te leiden om waterstanden aan de binnenzijde van de dam zoveel mogelijk op streefpeil te houden.	Extra spuicapaciteit in de Afsluitdijk	N, ZW
Aangepast landgebruik/bouwen				
A1	Verhoogd (terp, palen) bouwen en infrastructuur	Verhoogd bouwen op een terp of op palen om de gevolgen in het geval van een overstroming of tijdelijke waterberging te beperken.	Risicobewust bouwen op de zeekering	MW, ZW, N
A2	Drijvend bouwen	Bouwen van vastgoed en andere assets op een in het water drijvende ondergrond of op zo'n manier dat het kan drijven zonder schade op te lopen.	Drijvend Schiphol Amfibisch wonen Drijvende stad Blue21 Perspectief 2121 - Land met een plan	MW, ZW, N
A3a A3b	Schadebeperkend bouwen Zouttolerante landbouw	Wetproofing en dry-proofing van huizen om gevolgen in het geval van een overstroming te beperken. Zouttolerante landbouw beperkt de gevolgen van verzilting	Zilte botanie, landgoed en proeftuin Zilte landbouw in Zeeland Zilte landbouw op Texel	
Vermijden en verplaatsen				
V1	Bouwvrije zones	Het verbieden van bouwplannen in risicogebieden om gevolgen van overstromingen te beperken en in gebieden die nodig zijn voor adaptatiemaatregelen zoals waterberging of versterken keringen.		MW, ZW, N
V2	Tijdelijke en/of verplaatsbare bebouwing	Het alternatief op "vastgoed": huizen die relatief eenvoudig te verplaatsen zijn in het geval het overstromingsrisico in dat gebied te groot wordt of wanneer ruimte nodig is voor adaptatiemaatregelen. Dit vergroot flexibiliteit.		MW, ZW, N
V3	Verplaatsen	Het gepland en geleidelijk verplaatsen van bebouwing en infrastructuur uit risicogebieden of plekken waar ruimte nodig is voor adaptatiemaatregelen.	Plan B - Nederland 2200 Plan New Netherlands NL 2300	MW, ZW, N, H
V4	Ontwikkelingen in hoog NL	Aantrekkelijker maken van wonen in Hoog Nederland door beschikbaarheid van voldoende woningen en werkgelegenheid met als doel migratie uit de meer kwetsbare laaggelegen delen van Nederland te stimuleren.	Perspectief 2121 - Land met een plan	H



Figuur 9 Adaptatiepaden voor de oplossingsrichtingen op basis van de bouwstenen en nadere analyse van de oplossingsrichtingen en verder ontwikkelde ideeën in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. De blokken links geven aan welke voorbereidende maatregelen en onderzoek nu nodig is om deze adaptatiepaden op termijn uit te kunnen voeren indien nodig en gewenst.

4.3 | Oplossingsruimte en adaptatiepaden

De vier oplossingsrichtingen kunnen alle, parallel (regionaal) of na elkaar in de tijd, een rol spelen in de regionale invulling van adaptatie aan (hoge) zeespiegelstijging. In de praktijk zullen vaak combinaties van maatregelen uit deze oplossingsrichtingen worden gekozen. Hoeveel zeespiegelstijging een oplossingsrichting aan kan, hangt in sterke mate af van het ontwerp en de gekozen dimensies van de maatregelen. Technisch is er veel mogelijk maar benodigde inspanningen zullen toenemen naarmate de zeespiegel verder en sneller stijgt en niet alle klimaatgevolgen kunnen voorkomen worden. Beperkingen van de oplossingsrichtingen komen vooral voort uit beschikbaarheid van materiaal (zoals

zand), ruimte, maatschappelijk draagvlak en budget. Ook de benodigde tijd voor planning en implementatie van maatregelen legt beperkingen op, zowel voor de technische als maatschappelijke haalbaarheid (zie hoofdstuk 8). Dit geldt met name voor grote infrastructurele werken en ingrijpende (transformatieve) maatregelen die uiteindelijk tot systeemveranderingen leiden, zoals de landbouwtransitie, woningbouw en energietransitie, het verplaatsen van infrastructuur, of het opgeven van land. Kansen kunnen ontstaan en worden benut als grote opgaven en transitie worden ingezet voor klimaatadaptatie.

In deze studie zijn de eerder ontwikkelde adaptatiepaden (Deltares, 2019; Figuur 3 in hoofdstuk 2) een stap verder uitgewerkt met behulp van de bouwstenen beschreven in

paragraaf 4.2. Figuur 9 toont deze adaptatiepaden in relatie tot de vier oplossingsrichtingen. Dit figuur kan daarmee gezien worden als een meer gedetailleerdere variant in vergelijking met de adaptatiepaden van Haasnoot et al., (2019). De oplossingsrichtingen in deze nieuwe figuur bevatten enkele varianten van de oplossingsrichtingen. De oplossingsrichting *Zeewaarts* is opgesplitst in 3 varianten: landuitbreiding, zeewaarts verbonden eilanden en een Noordzeedam. *Beschermen-gesloten* is opgedeeld in 1) een variant met volledige gesloten kustlijn (behalve de Wadden) zonder aanpassing van de rivierafvoeren uitgaande van een megapomp bij de Nieuwe Waterweg en Haringvliet, 2) een variant met een aanpassing van de rivierafvoeren naar IJsselmeer of Zuidwestelijke delta, en 3) een hybride variant met *Beschermen-open* waarin het Rijnmond gebied ook aan bovenstroomse zijde afgesloten kan worden voor

hoge afvoeren van de Waal en met nog een open verbinding met Haringvliet en/of Grevelingen voor het afvoeren van rivierwater. Voor *Meebewegen* is gekozen voor een variant met compartimentering van grootstedelijke gebieden en meer stedelijke ontwikkelingen in hoog Nederland, en een variant met een paar beschermde grootstedelijke gebieden en drijvend wonen en ontwikkelingen in hoog Nederland.

Alle oplossingsrichtingen vergen op korte termijn voorbereidende maatregelen, onderzoek en experimenten om ze later (op grote schaal) te kunnen implementeren. De voorbereidende maatregelen bestaan voornamelijk uit ruimte-reserveringen of maatregelen die ruimte beschikbaar houden of kunnen maken (bijv. door tijdelijke allocatie van gebruiksfuncties). Aangezien de ruimtelijke reserveringen in de verschillende oplossingsrichtingen slechts ten dele overlappen zal het open houden van alle opties meer ruimte kosten dan wanneer keuzes gemaakt worden. De uiteindelijke uitwerking van overlappende ruimte-reserveringen, bijvoorbeeld voor het afvoeren van rivierwater naar zee, is afhankelijk van strategische keuzes, zoals het veranderen van de afvoerdeling bij de splitsingspunten of meer water richting zuidwestelijke delta of naar een nieuw aan te leggen kustmeer. Onderzoek moet de technische haalbaarheid en opschaalbaarheid van maatregelen aantonen, bijvoorbeeld voor de zeewaartse eilanden, bergen en afvoeren rivierwater, en voor verplaatsen uit risicogebieden. Ook de beschikbaarheid van materiaal (zoals zand), financiële middelen en tijd en de gevolgen voor natuur is onderwerp van onderzoek. We lichten de paden hieronder verder toe.

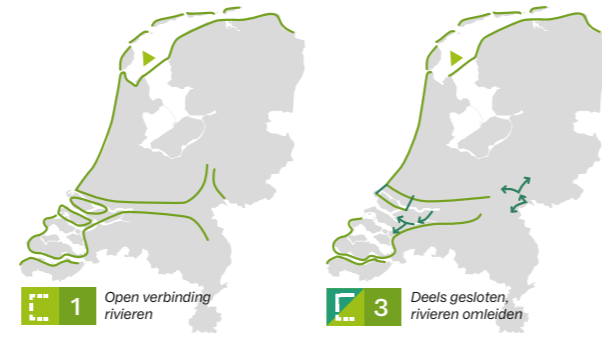
Beschermen-open

De huidige strategie van Nederland is een combinatie van *Beschermen-open* (Eems-Dollard, Nieuwe Waterweg, Oosterschelde en Westerschelde) en *Beschermen-gesloten* (IJsselmeer, Grevelingen, Haringvliet, Noordzeekanaal). In de oplossingsrichting *Beschermen-open* blijven de grote riviertakken in open verbinding met de zee. De invloed van het getij strekt zich verder bovenstrooms uit naarmate de zeespiegel in hoogte toeneemt. In het benedenrivierengebied heeft dit tot gevolg dat de rivierwaterstanden onder gemiddelde condities even veel toenemen als de zeespiegelstijging. Onder extreme condities is de toename kleiner door het sluiten van de Maeslantkering. Deze kering zal wel steeds vaker moeten sluiten; van eens per 15 jaar met de huidige gemiddelde zeespiegelstand naar 3 keer per jaar bij 1 meter zeespiegelstijging tot 30 keer per jaar bij 1,5 meter zeespiegelstijging (Deltares, 2018). Het sluitpeil van de kering zal opgehoogd moeten worden om te voorkomen dat deze vaker sluit dan wenselijk is (en mogelijk is de Maeslantkering constructief niet geschikt om zo vaak te sluiten). De maatgevende waterstanden op de benedenrivieren worden daardoor steeds hoger.

Beschermen gesloten



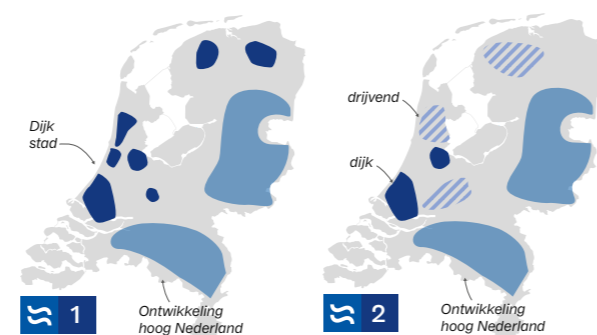
Beschermen open



Zeewaarts



Meebewegen



Figuur 10 Schetsen van de varianten (aangegeven met een nummer) binnen de oplossingsrichtingen Zeewaarts, Beschermen-open, Beschermen-gesloten en Meebewegen.

Dit werkt met een toenemende zeespiegel steeds verder landinwaarts door en dijken langs het rivierengebied zullen dan opgehoogd en verstevigd moeten worden om het beschermingsniveau in stand te houden.

Naast zeespiegelstijging leidt klimaatverandering ook tot een toename van piekafvoeren in de winter; extreem hoge afvoeren zullen dan vaker voorkomen. Voor het beperken van de gevolgen daarvan is meer ruimte nodig in het bovenrivierengebied. Om het overstromingsrisico te beperken moeten dijken verder opgehoogd worden in het benedenrivierengebied. Indien gekozen wordt voor brede overslagbestendige rivierdijken zullen overstromingen bij een hogere zeespiegelstijging vaker gaan voorkomen. Het adaptatiepad heeft elementen van de oplossingsrichting *Meebewegen*. Dit kan dan uiteindelijk ook een trigger

zijn richting *Meebewegen*. Een alternatief is om later alsnog de Nieuwe Waterweg af te sluiten aan zee- en rivierzijde en over te stappen naar bijvoorbeeld een hybride variant van *Beschermen-gesloten/open*. In dat geval kan de regio Rijnmond Drechtsteden (bij hoogwater) afgesloten worden van Maas en Waal en wordt het water van deze rivieren afgevoerd via een open verbinding in het Haringvliet en of Grevelingen. Langs de kust is steeds meer zand nodig om het kustfundament in stand te houden en het Waddengebied mee te laten stijgen om het beschermingsniveau tegen overstromen niet te laten afnemen. Afhankelijk van de mate van zeespiegelstijging en socio-economische ontwikkelingen kunnen commercieel gebruik (bijv. ophoogzand in woonwijken) en ruimtebeslag (bijv. windparken) in de toekomst tot knelpunten leiden.

Beschermen-gesloten

Wanneer de bestaande afsluitbare stormvloedkeringen vaker moeten sluiten dan aanvaardbaar of technisch mogelijk is, zullen deze vervangen moeten worden (eventueel met een tussenstap van aanpassingen aan het sluitpeil). Een optie is om de Maeslantkering te vervangen door een dam met een sluisencomplex. In dat geval kunnen de Rijn en Maas niet meer vrij afwateren via de Nieuwe Waterweg. Vergelijkbaar met het IJsselmeer zal zich een binnenmeer vormen achter de kering. Dat meer zal zich vormen op de locatie van de bestaande wateren in het benedenrivierengebied zoals de Lek, Waal, Merwede, Nieuwe Maas, Oude Maas, Hollands Diep en Haringvliet (totale oppervlak in de orde van grootte van 400 km²). Verder kan overwogen worden om andere bergingsgebieden aan het meer te koppelen, zoals Grevelingen en Oosterschelde waardoor het oppervlak vergroot wordt (totale oppervlak van ongeveer 1000 km²). De spuien kunnen alleen ingezet worden als het peil van het nieuw ontstane binnenmeer hoger is dan de zee­waterstand. De mogelijkheid om te kunnen spuien is daarom afhankelijk van het te kiezen streefpeil van het binnenmeer en de mate van zeespiegelstijging. Wanneer spuien niet mogelijk is, zal de afvoer van de twee Rijntakken en de Maas moeten worden uit­gepompt. De mogelijkheden tussen bergen, spuien en afvoeren en de gevolgen voor de maatgevende waterstanden in het nieuwe binnenmeer wordt besproken in hoofdstuk 6.

Er zijn grofweg drie alternatieve paden binnen deze oplossingsrichting *Beschermen-gesloten*: 1) Vasthouden aan de huidige afvoer­verdeling van de Rijn en Maastakken en een pomp-spuisysteem bij de Nieuwe Waterweg en/of Haringvliet; 2) aanpassen van de afvoer­verdeling en meer afvoer via de IJssel en het IJsselmeer in combinatie met een (kleiner) pomp-spuisysteem bij de Nieuwe Waterweg en/of Haringvliet, en 3) de Waal en Maas omleiden via de zuidwestelijke delta, namelijk via Grevelingen en/of Haringvliet (3a) via een pomp-spuisysteem bij een gesloten kering of (3b) met een afsluitbaar open kering.

Voor het incidenteel bergen van rivierwater tijdens periodes van hoge afvoeren is in deze oplossingsrichting ruimte nodig, wat in het gedrang kan komen door diverse socio-economische ontwikkelingen in de regio. Voor het volledig uitpompen van de rivierafvoeren is voldoende pompcapaciteit nodig, bij zeer hoge rivierenafvoeren is dit meer dan 10.000 m³/s (zie hoofdstuk 6). Dit zou theoretisch kunnen met een serie pompen. Daarvoor is ook ruimte nodig. Dit is eerder geschat op ongeveer 0,3-0,5 m per m³/s (Hackathon 2016 in Haasnoot et al. 2017). Om de gemiddelde afvoer van de Rijn en Maas direct uit te kunnen pompen is bij het huidige type pompen dan zo'n 1 tot 1,5 km strekkende meter langs de kustlijn nodig voor het pompsysteem en voor de maximale afvoer is dit zo'n 6 tot 10 km. Ter vergelijking: de huidige Haringvlietdam is 3,5 km lang; de sluisen nemen daarvan ongeveer 1 km in beslag. De Nieuwe waterweg is ongeveer 0,5 km breed. Dat samen lijkt dus voldoende voor de gemiddelde afvoer, maar onvoldoende om de benodigde pompcapaciteit te kunnen realiseren voor de maximale afvoeren. Er kan ook voor gekozen worden om een kleinere pompcapaciteit te implementeren en bij hoogwaters een (groter) deel te bergen en/of spuien (zie hoofdstuk 6). Extra bergingsruimte kan gecreëerd worden door de bekkens in de zuidwestelijke delta hierbij te betrekken of door meer rivierwater via de IJssel naar het IJsselmeer af te voeren. Het pompen van water zal meer energie kosten bij een grotere zeespiegelstijging en grotere piekafvoeren als gevolg van klimaatverandering. Bij een gesloten variant in de Nieuwe Waterweg kan overwogen worden om de haven nog meer te verplaatsen naar de buitenzijde van de kering om de toegankelijkheid van de haven te verbeteren. In de *Beschermen-gesloten* oplossingsrichting wordt op termijn mogelijk ook de Oosterschelde afgesloten en nog later eventueel ook de Westerschelde.



Meebewegen

Vanwege de zeespiegelerfenis (paragraaf 4.5) en de daarmee samenhangende lange termijn adaptatie-opgave, benodigde tijd voor adaptatie en mogelijkheden voor het combineren met andere ontwikkelingen, kan *Meebewegen* een aantrekkelijke strategie zijn. In deze oplossingsrichting worden dijken niet opgehoogd. In plaats daarvan wordt een grotere kans op overstromen geaccepteerd en wordt de oplossing in het reduceren van het overstromingsrisico gezocht in het reduceren van de nadelige gevolgen van een overstroming. Water wordt daarmee meer sturend voor de ruimtelijke inrichting.

Deze oplossingsrichting begint met kleinschalig *meebewegen* door beperkt meer ruimte aan het water geven en landgebruik aan te passen (bijvoorbeeld met wisselpolders), vermijden van bouwen in risicogebieden en stimuleren van ontwikkelingen in hogere delen van Nederland en vervolgens water op steeds grotere schaal de ruimte te geven en het in toenemende mate concentreren van woongebieden in hoger gelegen delen middels verplaatsen. De huidige afsluitbare keringen blijven behouden en er wordt steeds meer ruimte beschikbaar gemaakt om overvloedig regenwater en rivierwater op te vangen. In kustgebieden met extensief landgebruik en voldoende sediment, zoals delen van Noord-Nederland en de Zeeuwse delta, wordt grootschalig ingezet op experimenten met natuurlijke landspiegelstijging. De uiterwaarden worden bouwvrije zones. De veengebieden worden vernat om bodemdaling en emissies tegen te gaan, en ruimte en veerkracht te creëren voor natuur om zich aan te passen aan klimaatverandering. Bouwen in veengebieden is zeer beperkt mogelijk, mits tijdelijk en verplaatsbaar, op palen of drijvend. Het toepassen van drijvende wijken (zoals Schoonschip in Amsterdam) wordt opgeschaald, als experiment voor drijvende steden. De mogelijkheid voor een dijkcompartimentstad (een stad omringt door een hoge dijk) wordt onderzocht. In de Rijnmond-omgeving wordt ruimte gecreëerd voor brede en overslagbestendige dijken die de schaal en diepte van een eventuele overstroming beperken. In hoog Nederland wordt werkgelegenheid en woningbouw gecreëerd om ontwikkelingen buiten risicogebieden op gang te brengen.

Op de langere termijn worden grote steden in Midden-west Nederland eilanden of 'kapen' in een nieuw te maken dijkcompartiment. Landspiegelstijging wordt verder opgeschaald waar voldoende sediment beschikbaar is in Noord-Nederland en de zuidwestelijke delta, om een brede hogere landstrook te creëren (Hoofdstuk 7). Huizen uit overgebleven risicogebieden worden verplaatst.

Bij verdergaan op het pad van *Meebewegen* ontstaat er een keuze tussen 1) een pad waarin veel meer migratie richting hogere gelegen gebieden plaats vindt, in combinatie met beperkt drijvend bouwen in laag Nederland en 2) een pad

waarin veel drijvende steden en megaterpen gecreëerd worden. Op de heel lange termijn worden de eilandsteden achter dijkcompartimenten moeilijk te beschermen, en zullen deze verplaatst, drijvend, of megaterpen moeten worden.

Wanneer de oplossingsrichtingen *Beschermen* en *Zeewaarts* bij een extreem hoge en snelle zeespiegelstijging niet meer houdbaar blijken is een overstap naar *Meebewegen* mogelijk. Investerings in het gebied hebben dan mogelijk niet het verwachte rendement gehaald, en aangebrachte effecten op natuur zijn mogelijk onomkeerbaar.

Zeewaarts

Gebrek aan ruimte op het land en ontwikkelingen op zee kunnen een trigger zijn voor de oplossingsrichting *Zeewaarts*. Er zijn op hoofdlijnen twee varianten: 1) een zeewaartse verbreding van de kuststrook, die de kust verder beschermt, en 2) eilanden die golfwerking op de kust afschermt en bij hogere zeespiegel een nieuwe kustlijn vormen door ze te verbinden met keringen. Het gaat in beide gevallen om ingrijpende aanpassingen in het kuststelsel die niet alleen nieuwe ruimte voor functies opleveren, maar ook de functies in de omliggende gebieden beïnvloeden, zoals natuur, wonen en toerisme. Een ander idee dat past binnen deze oplossingsrichting, maar vooral is benoemd om klimaatmitigatie te bevorderen, is de implementatie van een Noordzeedam (tussen Noorwegen en Schotland, én door het Kanaal) (Groeskamp en Kjellsson, 2020).

Bij het verbreden van de kuststrook wordt in feite een extra bufferzone gecreëerd die de veiligheid van de huidige kustlijn en het achterland bevordert. Naast het verhogen van de kustveiligheid wordt ook nieuwe ruimte gecreëerd voor recreatie, natuur en grondwaterwinning. De kust kan in dit alternatief geleidelijk meegroeien met de zeespiegel door middel van het aanbrengen van zand, wat net als bij de oplossingsrichting *Beschermen-open*/gesloten in steeds grotere mate gesuppleerd moet worden om de zeespiegelstijging bij te houden. Dit gaat ten koste van de beschikbare ruimte voor zandwinning in de ondiepe kustzone. Een zeewaartse uitbreiding heeft, op kleinere schaal, eerder plaats gevonden bij de kust van Delfland en de tweede Maasvlakte.

Het plaatsen van eilanden voor de Hollandse kust is een meer ingrijpend alternatief. De eilanden kunnen gefaseerd gemaakt worden, die bij voortgaande zeespiegelstijging kunnen worden verbonden met keringen. Eenmaal gebouwd zal verdere aanpassing van de eilanden en keringen aan verdergaande zeespiegelstijging niet eenvoudig zijn. Met de eilanden kan veel ruimte gecreëerd kan worden voor diverse functies. Voor dit alternatief is echter veel zand nodig. Zandwinning voor de eilanden

zelf en voor het onderhoud en meegroeien van de nieuwe kust moet van alternatieve locaties moet komen, omdat de eilanden voor een groot deel op de plek van bestaande zandwinning zullen liggen. De alternatieve locaties zijn diepere plekken waardoor de winning kostbaarder is. De kust zal ingrijpend veranderen. Momenteel profiteert de zandige kust van de natuurlijke getij- en golfdynamiek, waardoor het strand en de duinen met behulp van suppleties mee kunnen groeien met de zeespiegelstijging. Bij het plaatsen van eilanden verandert deze dynamiek, waardoor erosie optreedt en het meegroeien bemoeilijkt wordt. Het afgesloten kustmeer biedt ruimte voor het tijdelijk bergen van hoge rivierafvoeren (zie hoofdstuk 6). Dit relatief stilstaande water kan te maken krijgen met zuurstofarme condities in diepere delen achter de eilanden met grote impact op de ecologie en sterke verslibbing van de achterliggende kust met gevolgen voor recreatie, toerisme en ecologie.

Naast de zeewaartse kustuitbreiding en de nieuwe eilanden bestaat een idee voor het bouwen van een Noordzeedam (tussen Noorwegen en Schotland, én door het Kanaal), verder zeewaarts en gezamenlijk met andere landen te

financieren, bouwen en onderhouden. Dit zeer ingrijpende idee is verder uitgewerkt als waarschuwing voor de adaptatieschaal bij een zeer grote klimaatverandering (Groeskamp en Kjellsson, 2020). Dit idee is complexer en van een andere orde dan de andere oplossingsrichtingen, vooral vanwege de schaal, de technische uitdagingen en vanwege de vereiste instemming en inbreng van meerdere landen. De getijdynamiek zal grotendeels uit de hele Noordzee en Oostzee verdwijnen met ingrijpende gevolgen voor onder meer het hele ecosysteem en visserij.

De zeewaartse eilanden verbonden met een dam en Noordzeedam bieden de mogelijkheid om rivierwater tijdens perioden van hoge afvoeren tijdelijk te bergen en vanaf daar te pompen en te spuien. In het geval van een zeewaartse kustuitbreiding is er nog een keuze voor het open houden of afsluiten van de rivieren. Bij het afsluiten zijn dezelfde varianten mogelijk voor het afvoeren van de rivieren als bij *Beschermen-gesloten*. Een overstap naar *Meebewegen* kan gebeuren als gevolg van financiële, politieke, technische, ecologische, en maatschappelijke redenen.





4.4 | Maladaptatie en low-regret bouwstenen

Op basis van de adaptatiepaden, beschreven in paragraaf 4.3, zijn maatregelen te identificeren die potentieel tot regret (spijt) leiden en maatregelen die juist low-regret zijn omdat ze in meerdere paden voorkomen of flexibel zijn voor verdere aanpassing.

Maladaptatie, lock-in en regret bouwstenen

Er zijn diverse overstapmomenten (transfers) denkbaar tussen de oplossingsrichtingen om bij verdergaande zeespiegelstijging waterveiligheid en zoetwatervoorziening te waarborgen, zoals beschreven in paragraaf 4.3. Idealiter wordt er tijdig op dergelijke overstapmomenten geanticipeerd, opdat het aantal regret-activiteiten beperkt blijft en om lock-ins te voorkomen die een overstap belemmeren.

Regret kan ontstaan als stapsgewijs veel wordt geïnvesteerd in een oplossingsrichting die uiteindelijk niet meer houdbaar is, de investeringen relatief kort gebruikt zijn en/of de transfer-kosten of maatschappelijke impact om over te stappen naar een ander pad heel groot is (lock-in). Het IPCC rapport (2022b) spreekt in dit geval ook wel over maladaptatie, adaptatie met ongewenste uitkomsten waardoor verdere adaptatie moeilijker of kostbaarder wordt, de uitstoot van broeikasgassen groter wordt, de gevolgen voor anderen groter worden of de oplossingsruimte voor anderen kleiner/te klein wordt (op andere locaties of in de toekomst). Een voorbeeld is de bouw van waterkeringen voor beschermen van het achterland en water infrastructuur voor de toelevering van water, die respectievelijk kunnen leiden tot een toename

van woningbouw en zoetwater-afhankelijke landbouw, die mogelijk op langere termijn moeilijk houdbaar blijken, als ze niet worden meegenomen in een lange termijn adaptief plan.

Maladaptatie kan beperkt worden door rekening te houden met andere sectoren, andere ontwikkelingen (4.5.2) en de lange termijn adaptatie-opgave (IPCC, 2022b, zie ook paragraaf 4.5). Zo kan stapsgewijs investeren in een oplossingsrichting die uiteindelijk die niet houdbaar is, gezien de lange termijn adaptatie-opgave, zonde zijn van de investering. Dat hangt niet alleen samen met de kosten en levensduur van de maatregelen, maar ook met de investeringen die deze maatregelen weer aantrekken. Een integrale multi-sectorale adaptieve (paden) planning kan regret en mogelijke lock-ins zichtbaar maken, en kan helpen de lange termijn adaptatie-opgave op te breken in kleinere stappen en daarmee adaptatie versnellen met low-regret en flexibele maatregelen en maladaptatie te voorkomen (IPCC, 2022b; zie ook de volgende paragraaf).

Mogelijke regret-activiteiten hebben te maken met sterke koerswijziging in de adaptatie en het niet rekening houden met onomkeerbare gevolgen, onzekerheden en de lange termijn adaptatie-opgave, bijvoorbeeld:

- Afwachten en niet rekening houden met onzekerheden die de einde levensduur van bestaande maatregelen kunnen verkorten waardoor onvoldoende tijd is om te experimenteren, maatregelen te ontwerpen en te realiseren.
- Investeren in terpen en drijvend bouwen, waarna besloten wordt om over te stappen naar een Zeewaartse strategie en de meerwaarde van dergelijke dure maatregelen beperkt of nihil is.
- Investeren in dammen om de huidige kustlijn af te sluiten waarna besloten wordt om over te stappen naar een Zeewaartse strategie waardoor deze mogelijk hun functie verliezen.
- Investeren in een dure bescherming of zeewaartse uitbreiding waarna later alsnog besloten wordt om over te stappen op de oplossingsrichting *Meebewegen*.
- Aangepast bouwen in diepe polders met ruimte voor opslag van extreme neerslag zonder rekening te houden met de gevolgen en maatregelen die nodig zijn voor het aanpassen aan de lange termijn zeespiegelstijging.
- Verlagen van grondwaterstand om wateroverlast tegen te gaan, terwijl bodemdaling verder gaat met als gevolg een verdergaand emissie van broeikasgassen en verzakkingen van infrastructuur en gebouwen.

- Te laat beginnen met onderzoek, experimenten, planning en realisatie van maatregelen, bijvoorbeeld doordat geen rekening wordt gehouden met vertraging door verrassingen en fouten, waardoor risico's (tijdelijk) te hoog worden.
- Kiezen voor tijdelijke maatregelen die onomkeerbare gevolgen hebben voor natuur.

Een lock-in situatie ontstaat als overstappen naar een ander adaptatiepad heel kostbaar wordt, niet meer mogelijk wordt door onvoldoende tijd, of een grote maatschappelijke impact heeft. Er is dan sprake van grote 'padafhankelijk' waarbij eerder gemaakte keuzen in sterke mate de vervolg opties bepalen (Hanger-Kopp et al., 2022). Echt onmogelijk om over te stappen wordt het misschien nooit, maar of er dan voldoende tijd is om maatregelen goed uit te voeren en de risico's voldoende beperkt te houden is een vraag. Een voorbeeld van een zichzelf versterkend pad is de aanleg van dijken om veiligheid te garanderen, wat meer mensen en investeringen aantrekt die ook voor de toekomst bescherming verwachten. Dit wordt ook wel het dijken-effect genoemd (Di Baldassarre et al. 2009; De Moel et al. 2011). Ook het ontwateren van veengebieden voor menselijke activiteiten zoals landbouw en (woningbouw) triggert een zichzelf versterkend pad met bodemdaling en CO₂: ontwatering leidt tot veenoxidatie, uitstoot van broeikasgassen en bodemdaling met als gevolg dat grondwaterstanden weer hoger komen te staan en er eerder wateroverlast ontstaat bij extreme neerslag. Om schade te voorkomen is een verdere ontwatering nodig wat leidt tot verdere bodemdaling etc. De uitstoot van broeikasgassen leidt tot meer klimaatverandering. Daarom adviseerde de Raad voor de Leefomgeving en Inrichting om te stoppen met ontwatering in veengebieden (RLI, 2020). Andere voorbeelden van lock-in activiteiten hebben vooral te maken met de andere opgaven waar Nederland voor staat. Dit wordt in de volgende paragraaf besproken.

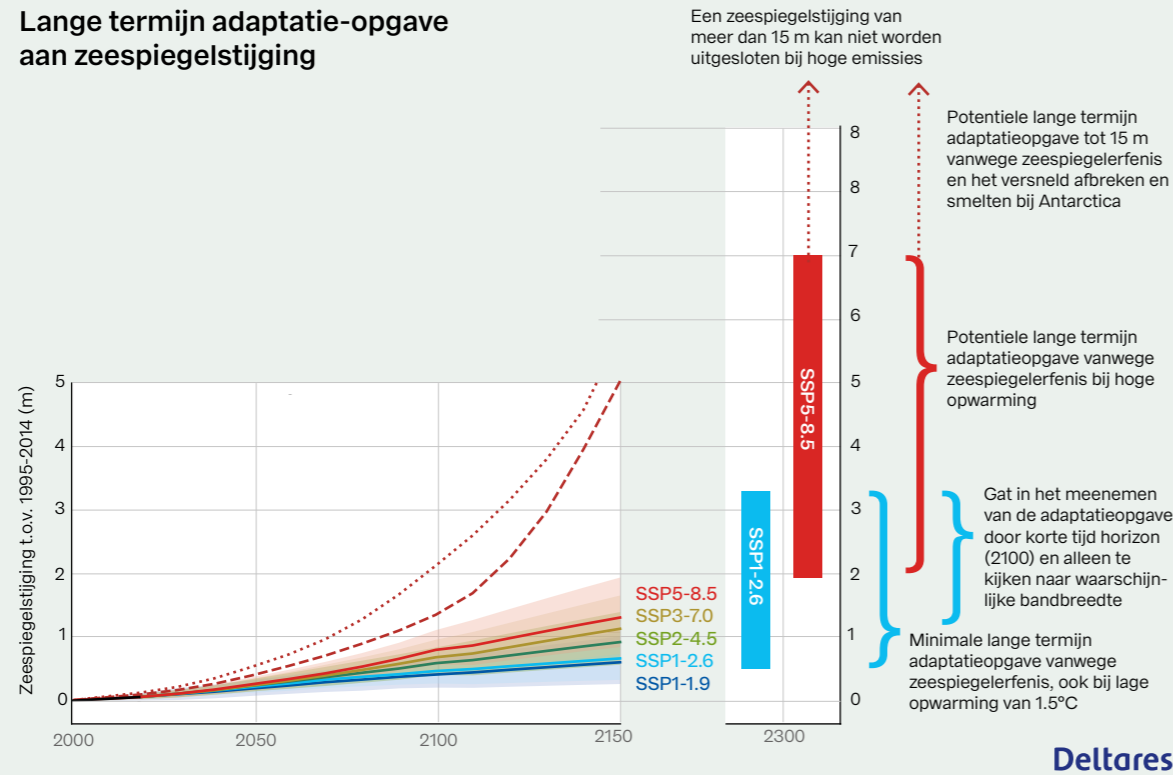
Low-regret bouwstenen

Potentiele low-regret bouwstenen zijn maatregelen die in meerdere paden voorkomen, en/of staan aan het begin van een pad en zijn flexibel genoeg om later aangevuld te kunnen worden met andere maatregelen bij een verder gaande zeespiegelstijging. Dat houdt overigens niet in dat dit altijd 'laaghangend fruit' is en ze kunnen nog steeds ongewenste nevengevolgen hebben, bijvoorbeeld omdat de maatregelen niet te combineren zijn met de huidige functies en gewenste ontwikkelingen. Dit vraagt om een aanpassing in het paradigma, die past bij de verandering van water volgt naar water stuurt en een ruimtegebruik op waterbasis. Veel adaptatie-maatregelen hebben ook andere baten (IPCC, 2022b) en kunnen weer andere mogelijkheden creëren.

Mogelijke low-regret maatregelen zijn:

- Het creëren van ruimte voor waterberging en afvoercapaciteit voor de rivieren (bijv. richting IJssel en/of via zuidwestelijke delta) is in meerdere paden nodig en is daarmee een potentiële low-regret maatregel om nader te onderzoeken. De mate waarin die ruimte nodig is verschilt per pad.
- Met het aanpassen van het sluitpeil kan tijd gekocht worden om meer te leren over de toekomstige zeespiegelstijging en de maatregelen. Bijvoorbeeld om tijd te hebben om grote maatregelen nader te onderzoeken en om te experimenteren. Om de veiligheid te houden op het huidige niveau, vraagt het aanpassen van het sluitpeil ook om het ophogen van dijken en aanpassen van buitendijks gebied in de Rijnmond. In het geval van een overstap naar de hybride *Beschermen* oplossingsrichting (met een gesloten Rijnmond, maar open Zuidwestelijke delta) is dit mogelijk een regret maatregel voor het deel in de Rijnmond, omdat de aanpassingen dan niet meer nodig zijn, tenzij met de aanpassingen ook andere baten meegenomen worden.
- Niet bouwen in locaties die zeer kwetsbaar zijn in geval van een overstroming, d.w.z. locaties waar het water snel arriveert en de overstromingsdiepte groot kan zijn (De Bruijn and Klijn, 2009), is een low-regret maatregel die er voor zorgt dat gevolgen minder groot worden, in het geval van een overstroming. Ook bij de oplossingsrichtingen *Beschermen* en *Zeewaarts* is het mogelijk dat een overstroming plaats vindt, na falen van de keringen.
- Het vernatten van veenweidegebieden om de mate van bodemdaling in deze gebieden te reduceren zorgt in alle paden voor een minder grote toename van kwetsbaarheid. Ook in het licht van de conclusie van RLI, waarin wordt aangegeven dat het onvermijdelijk is om dit te doen vanwege de uitstoot van broeikasgassen en het beperken van klimaatverandering, is dit een potentieel low-regret maatregel.
- Het starten met het nader onderzoeken van maatregelen om meegroei van de Wadplaten in deze gebieden te stimuleren is een low-regret, juist op de korte termijn. Dit kan namelijk al bij weinig extra stijgsnelheid gebeuren en is daardoor in alle scenario's mogelijk. Door zo vroeg mogelijk te beginnen hebben maatregelen meer effect; er kan immers in meer tijd meer sediment ingevangen worden (paragraaf 7.2). Dat laatste geldt ook voor het stimuleren van meegroeien van de vooroevers (landspejelstijging, paragraaf 7.1).

Lange termijn adaptatie-opgave aan zeespiegelstijging



Figuur 11 Lange termijn adaptatie-opgave voor aanpassen aan zeespiegelstijging. NB. Hier zijn de recente IPCC projecties weergegeven omdat deze ook een schatting geven voor na 2100. De lange termijn zeespiegelstijging geeft inzicht in de uiteindelijke zeespiegelstijging en dus opgave waar delta's mee te maken krijgen, ook wel 'adaptation commitment' genoemd. [dit figuur wordt aangeoast met zelfde zeespiegelstijging als hoofdstuk 3. Eventueel samenvoegen]

4.5 | Lange termijn adaptatie-opgave en de relatie met andere opgaven en ontwikkelingen

De geschetste oplossingsrichtingen bieden een denkraam voor het onderzoeken van mogelijke adaptatiestrategieën voor de lange termijn en wat de implicaties zijn voor de komende 20 jaar. Dat laatste is belangrijk omdat we uit het verleden weten dat het plannen, ontwikkelen en realiseren van grote ingrepen lang duurt en daar dus op tijd aan begonnen moet worden (zie ook hoofdstuk 8). Bovendien wordt er in de komende decennia flink geïnvesteerd en verbouwd vanwege de woningbouwopgave, landbouwtransitie, energietransitie en de opgaven rondom natuur en biodiversiteit (Coalitieakkoord 2022 en financiële bijlage, 2021). Hoe verhouden deze opgaven en ontwikkelingen en de daarmee samenhangende ruimtelijke herinrichting en nieuwe infrastructuur zich tot de oplossingsrichtingen voor zeespiegelstijging en de lange termijn adaptatie-opgave? In hoeverre zijn de keuzes die in de komende 20 jaar gemaakt worden sturend voor een van de oplossingsrichtingen en vice versa? Waar zijn mogelijkheden voor synergie en waar liggen risico's voor adaptatie-opgave op lange termijn? In deze paragraaf gaan

we eerst in op wat de lange termijn adaptatie-opgave is en vervolgens leggen we de link met de andere ontwikkelingen.

4.5.1 Lange termijn adaptatie-opgave

Het bijzondere aan zeespiegelstijging is dat het aan de ene kant onzeker is hoeveel de zeespiegel op een bepaald moment gaat stijgen, maar aan de andere kant is het wel duidelijk dat deze zal gaan stijgen. De lange termijn zeespiegelstijging is sterk afhankelijk is van de wereldwijde opwarming van de aarde. Dit wordt ook wel de zeespiegelerfenis genoemd. Een simpele vuistregel daarvoor is: iedere graad opwarming leidt uiteindelijk op een termijn van honderden jaren tot een wereldwijd gemiddeld stijging van zo'n 2,5 m (Levermann et al. 2014). Het IPCC (2021) berekende voor 2300 dat de wereldgemiddelde zeespiegel tussen de 0,3 en 3 m stijgt bij lage CO₂-emissies en daarmee samenhangende opwarming (SSP1-2.6) en tussen de 1,7 en 6,8 m bij hoge emissies en opwarming (SSP5-8.5). Als rekening wordt gehouden met een grote bijdrage van Antarctica kan dit oplopen tot 15 m. De zeespiegelerfenis en de daarmee samenhangende lange termijn adaptatie-opgaven onderstrepen nogmaals het belang van het beperken van klimaatverandering.

Rekening houdend met deze zeespiegelerfenis, is er dus ook lange termijn erfenis voor gevolgen en daarmee (op termijn) een noodzaak voor adaptatie. We krijgen dus te maken met een lange termijn adaptatie-opgave (Haasnoot et al. 2021). Figuur 11 illustreert dit aan de hand de recente IPCC projecties (IPCC, 2021). Het geeft aan voor welke zeespiegelstijging adaptatie op de lange termijn minimaal nodig is, maar ook wat er potentieel nog meer bij komt bij een hoge opwarming, en nog meer bij komt wanneer Antarctica versneld afbreekt en smelt. Wanneer alleen gekeken wordt naar de waarschijnlijke bandbreedte uit de zeespiegelprojecties tot 2100, zoals in de meeste huidige adaptatieplannen het geval is, is er verschil tussen de zeespiegelstijging die het plan aankan en dat er op termijn kan gaan voorkomen. Oftewel: een gat tussen de adaptatie-opgave die is meegenomen en de minimale adaptatie-opgave op de lange termijn, en dat gat kan groter uitpakken. De waarschijnlijke bandbreedte in 2100 voor SSP1-2.6 en SSP5-8.5 ligt tussen de 0,28 en 1,12 m aan de Nederlandse kust. Voor de lange termijn reikt dit voor SSP1-2.6 tot 3 m in 2300 en potentieel veel meer kan worden met hoge opwarming SSP5-8.5 en bij een zeer grote bijdrage van Antarctica is dat nog veel meer. Een dergelijk gat heeft het risico dat er geen rekening wordt gehouden met grenzen aan adaptatie en dus potentieel maladaptatie en verkeerde investeringen die leiden tot 'regret' en 'lock-in' (zie ook vorige paragraaf).

Idealiter wordt er met adaptatieplannen wel rekening gehouden met de lange termijn adaptatie-opgave, zodat ze of 3 m stijging kunnen accommoderen of (minimaal) op termijn een zinvolle tussenstap zijn naar een andere lange termijn oplossing die dat wel kan. Uit deze lange termijn adaptatie-opgave wordt niet alleen duidelijk dat klimaatmitigatie de adaptatie-opgave aanzienlijk kleiner maakt, en dat anticiperen op 3 m low-regret is, maar ook dat de lange termijn adaptatie-opgave potentieel zo groot is, dat het de vraag is of dit met alle oplossingsrichtingen geadresseerd kan worden.

4.5.2 Relatie met andere opgaven en transities

Hoe ingrijpender de adaptatie-opgave, hoe groter de verwevenheid met andere grote opgaven en transities, die invloed hebben op de fysieke ruimte en het watersysteem. Het gaat hierbij om de woningbouwopgave, energietransitie, landbouwtransitie, en het herstel van natuur en biodiversiteit. Deze opgaven en transities hebben invloed op de 1) de oplossingsruimte van adaptatie (welke opties zijn beschikbaar) en 2) de noodzaak tot adaptatie, vanwege hun invloed op de gevolgen van klimaatverandering. De opgaven raken elkaar in de ruimte en mogelijkheden ontstaan daarom door gebiedsgericht samen te gaan werken. Er kunnen mogelijkheden gecreëerd worden als klimaatadaptatie meelift en

geïntegreerd wordt opgepakt met de andere opgaven en transities. Ruimtelijke inrichting en locatiekeuze van opgaven en transities zijn sterk bepalend voor de klimaatadaptatie op termijn. Ontwerpend onderzoek kan helpen bij het verkennen van de geïntegreerde transitiepaden in de tijd.

Beperkingen van de oplossingsruimte voor klimaatadaptatie ontstaan bij concurrentie om ruimte. De ontwikkelingen nemen ruimte in, die dan mogelijk niet meer te gebruiken is voor adaptatiemaatregelen, zoals het ophogen van dijken en bergen van regen en rivierwater. Bevolkingsgroei en verstedelijking en bovengemiddelde economische ontwikkelingen komen vooral voor in overstromingsgevoelige gebieden (Deltares et al., 2021). Net als bij zeespiegelstijging zijn er ook voor de maatschappelijke transities verschillende oplossingsrichtingen te benoemen. Deze worden ook wel ontwikkelingsrichtingen genoemd. Ontwikkelingsrichtingen die leiden tot een vergroting van de adaptatie-opgave zijn bijvoorbeeld het realiseren van woningbouw en (energie)infrastructuur in laag-geleden 'overstroombare' gebieden waardoor het risico toeneemt en meer bescherming nodig is.

De komende jaren zullen veel investeringen worden gedaan op plekken die kwetsbaar zijn en steeds kwetsbaarder worden bij een hogere zeespiegel (Tabel 4; SWECO 2021). De grootste investeringen vinden plaats in de Randstad, waar vooral de woningbouw een belangrijke factor is. En als de zeespiegel stijgt worden deze gebieden nog kwetsbaarder en daarmee wordt de noodzaak tot adaptatie groter, tegelijkertijd is er minder fysieke ruimte voor adaptatiemaatregelen. Ook wordt het kostbaarder en mogelijk lastiger om naar *Meebewegen* over te stappen. Dit benadrukt nogmaals het belang van integratie van opgaven en invulling geven aan het adagium dat water sturend moet zijn bij ruimtelijke ontwikkelingen (Coalitieakkoord, 2022; Deltares et al., 2021; Pelzer, 2021).

Het gelijk houden van de adaptatie-opgaven of zelfs een reductie van de adaptatie-opgave is ook mogelijk bij verdergaande verstedelijking. Bijvoorbeeld door woningen waterproof te maken om schade te beperken in het geval van een overstroming, of door woningbouw te realiseren in hoger gelegen delen, of in gebieden te bouwen waar eerst de grond wordt opgehoogd. Een ander voorbeeld is het niet bouwen langs of op dijken om te voorkomen dat het lastiger wordt de dijken te verbreden, of het voorkomen van conventionele bebouwing in een rivierdal waardoor het lastiger en kostbaarder wordt om meer ruimte te geven aan de rivier. Door een mogelijke afname van conventioneel landbouwareaal zou er ruimte vrij kunnen komen voor extra waterberging, in combinatie met natuur die weinig eist van het water of in combinatie met andere type landbouw eventueel aangevuld met compensatie voor opbrengstverlies door tijdelijke waterberging.

Tabel 4 Landelijke investeringsopgaven per regio tot 2050. Merk op dat er dubbeltellingen zijn in de bedragen vanwege de overlap in regio's (dat geldt vooral voor centraal Holland, Kust en Rijnmond Drechtsteden). De geschatte totaal som van de investeringen komt daardoor lager uit (668 miljard euro) dan de som van de kosten per regio (891 miljard euro) (Bron: SWECO, 2021).

Regio	Investeringsopgaven (Miljard Euro)
Waddengebied	70
IJsselmeergebied	140
Kust	201
Centraal Holland	233
Rijnmond Drechtsteden	175
Zuidwestelijke Delta	72

Uiteindelijk zal er meer inzicht moeten komen in de synergiën en trade-offs bij de verschillende oplossingsrichtingen voor adaptatie en de andere opgaven. Zonder afstemming in ruimte en tijd tussen ruimtelijk-economische opgaven, investeringsagenda's en de lange termijn oplossingsrichtingen voor versnelde zeespiegelstijging, is het risico op regret van investering en het vergroten van de lock-in groot. Bovendien worden kansen gemist, zoals een transitie naar een bepaalde oplossingsrichting die goed past bij de socio-economische ontwikkelingen.

Mogelijke synergiën tussen adaptatie en woningbouw-opgave, energietransitie, landbouwtransitie, en het herstel van natuur en biodiversiteit zijn:

- Vernatten veenweidegebieden om emissie en bodemdaling te beperken biedt de mogelijkheid om water te bergen en creëert potentieel ruimte voor natuur ten behoeve van klimaatadaptatie en bouwsteen drijvend, huizen op palen, samen met mitigatie emissies uit veen
- Bij de landbouwtransitie komt mogelijk ruimte vrij voor andere opgaven, of voor een combinatie van landbouw met een van de andere opgaven, zoals wateropslag ten behoeve van klimaatadaptatie, of voor klimaatadaptieve woningbouw buiten risicogebieden.
- Niet bouwen in uiterwaarden en creëren extra ruimte voor afvoeren van rivieren, biedt kansen voor natuurherstel

- Woning en werken aantrekkelijk maken in hoog NL voorkomt dat de adaptatie-opgave groter wordt (mits ook rekening gehouden wordt met natuur/biodiversiteitsverlies in hoog NL).

Voorbeelden van mogelijke conflicten en lock-ins zijn:

- Bouwen op locaties waardoor het niet meer mogelijk is om daar in de toekomst waterkeringen te bouwen of versterken.
- Bouwen in polders waardoor het implementeren van terpen of drijvend bouwen veel kostbaarder zo niet onmogelijk is.
- Bouwen in risicogebieden waar het beperken van gevolgen via aangepast bouwen en evacuatie op termijn onvoldoende is.
- Investeren in energietransitie in risicogebieden waardoor de lock-in en adaptatie-opgave groter wordt, of plekken die later nodig zijn voor ruimte voor adaptatiemaatregelen, waardoor de mogelijkheden voor adaptatie (de oplossingsruimte) kleiner worden.

Bouwstenen oplossingen

Water keren – Hard (H)

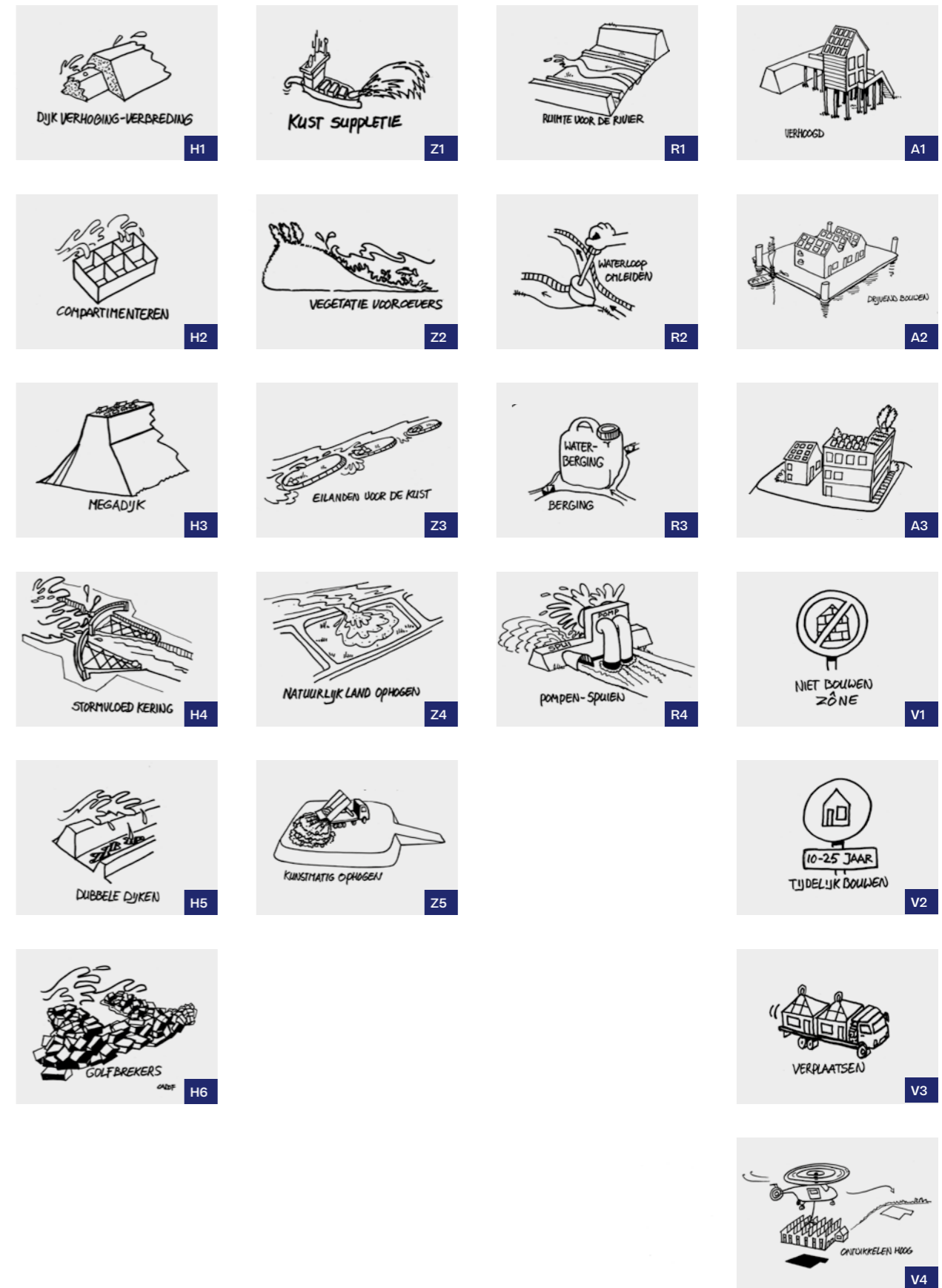
Water keren – Zacht (Z)

Rivieren afvoeren/bergen (R)

Aangepast bouwen (A)

Verplaatsen en vermijden (V)

Figuren door ©Carof-Beeldleveranciers in opdracht van staf Deltacommissaris



Overstromingskansen langs de kust en bouwstenen waterkeren



Oosterscheldekering

Zonder (aanvullende) maatregelen leidt zeespiegelstijging tot een toename van de overstromingskans. In de uiterste variant van de oplossingsrichting *Meebewegen* worden de zeekeringen (duinen en dijken) niet aangepast en worden de gevolgen van een overstroming op een andere manier aangepakt (bijvoorbeeld door aangepast te bouwen of door verplaatsen). Hiertoe is het relevant om te weten hoe de overstromingskans verandert bij een stijgende zeespiegel. Bij oplossingsrichtingen *Beschermen-open* en *Beschermen-gesloten* worden zeekeringen aangepast om het overstromingsrisico gelijk te houden. Voor de duiding daarvan is uitgerekend in hoeverre de dijken zouden moeten worden aangepast om de overstromingskans niet te laten toenemen en welk ruimtebeslag dit mogelijk kan hebben. Voor een indicatie van de verandering in de overstromingskans zijn verkennende berekeningen uitgevoerd met het model Hydra-NL (zie hoofdstuk 2 voor een beschrijving van de methode). In deze aanpak wordt de overstromingskans benaderd door de berekende faalkans ten gevolge van het faalmechanisme 'golfoverslag'; er is geen rekening gehouden met andere faalmechanismen. Overal waar in onderstaande tekst over overstromingskans wordt gesproken, wordt dus deze faalkans ten gevolge van overslag bedoeld. Deze benadering is uitgevoerd met modellen die tot 2 m zeespiegelstijging kunnen rekenen en wordt later gedetailleerder doorgerekend, ook voor hogere zeespiegelstijging. Er worden alleen harde zeeweringen beschouwd omdat Hydra-NL niet ontwikkeld voor de beoordeling en ontwerp van zachte zeeweringen zoals duinen.

5.1 | Verandering overstromingskans

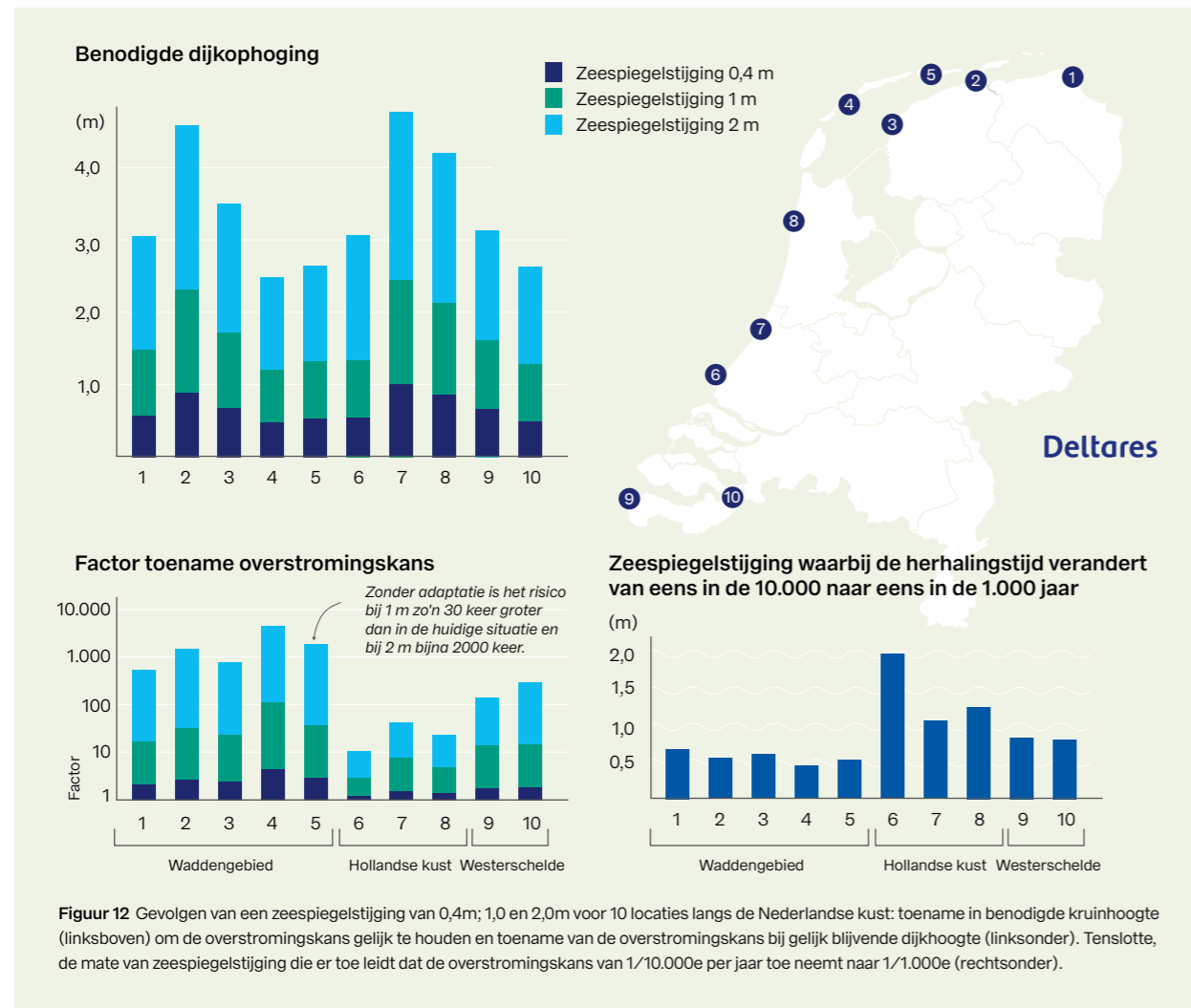
Figuur 12 (rechtsonder) geeft voor 10 kustlocaties weer bij welke zeespiegelstijging de overstromingskans van een waterkering (zonder aanvullende maatregelen) toeneemt van 1/10.000e per jaar naar 1/1.000e per jaar; een toename met een factor 10. Voor de onderlinge vergelijkbaarheid van locaties is aangenomen dat alle waterkeringen bij het huidige zeespiegelniveau dezelfde overstromingskans hebben (1/10.000e per jaar). Uit de figuur blijkt dat er sprake is van grote ruimtelijke spreiding. In het Waddengebied kan bij zo'n 0,5 m zeespiegelstijging al sprake zijn van een toename van een factor 10 in overstromingskans, terwijl er langs de Hollandse kust locaties zijn waarvoor dat pas het geval is bij meer dan een meter zeespiegelstijging. De ruimtelijke verschillen in Figuur 12 worden bepaald door de volgende factoren:

1. Het verschil per locatie tussen de 1/10.000 jaar waterstand en de 1/1.000 jaar waterstand (de decimeringshoogte).
2. De verandering in golfbelasting als gevolg van zeespiegelstijging (hogere waterstanden kunnen leiden tot hogere golfbelasting bij dezelfde windcondities).

Het tweede punt wordt verder besproken in paragraaf 5.2. Ter toelichting op het eerste punt: de decimeringshoogte is een indicator voor de steilheid van de frequentielijn van de waterstand. De decimeringshoogte is gedefinieerd als het absolute verschil in hoogte tussen een hoogwaterstand en een waterstand met een overschrijdingsfrequentie die een factor 10 hoger of lager is. Langs de Hollandse kust is de decimeringshoogte over het algemeen groter dan in de Waddenzee vanwege o.a. een grotere stormopzet (Witteveen en Bos, 2011). Dat betekent dat langs de Hollandse kust een verandering in de overschrijdingskans gepaard gaat met een relatief grote verandering van de waterstand. En omgekeerd betekent dat een verandering in de waterstand langs de Hollandse kust gepaard gaat met een relatief kleine verandering van de overstromingskans. Een verandering in de waterstand langs de Waddenzee gaat juist gepaard met een relatief grote verandering van de overstromingskans.

Een factor 10 toename in de overstromingskans betekent, bij verder gelijkblijvende omstandigheden – zoals geïnvesteerd vermogen en aantal inwoners – , een factor 10 toename in het overstromingsrisico. In gebieden waar een dergelijke toename in kans als eerste wordt bereikt als gevolg van de zeespiegelstijging, zoals de Waddenzee en Westerschelde, zullen dus naar verwachting eerder geconfronteerd worden met waterkeringen die niet aan de norm voldoen (mede) als gevolg van zeespiegelstijging.

In de analyses zijn bodembewegingen niet meegenomen. In werkelijkheid zullen de vooroevers van de keringen in enige mate zullen meegroeiën met de zeespiegelstijging, waardoor de golfbelasting lager zal zijn. Dit zal met name in de Waddenzee het geval zijn. Daardoor zijn de uitkomsten mogelijk minder gunstig voor de Waddenzee en de Westerschelde dan hier gepresenteerd. In spoor 2 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wordt dit nader uitgewerkt. Aan de andere kant kunnen vooral Noordzeekusten steiler worden door een gebrek aan aanvoer van sediment op natuurlijke manier. Dit zou de aangroei kunnen belemmeren.



De grafiek linksonder in Figuur 12 toont de verandering van de overstromingskans bij 0,4; 1,0 en 2,0 m zeespiegelstijging, uitgaande van de volgende uitgangspunten:

- De referentie-overstromingskans (0 m zeespiegelstijging) is gelijk aan 1/10.000 per jaar
- De overstromingskans is gekoppeld aan de hoogte van de dijk en daarmee aan het berekende hydraulische belastingniveau.

Uit deze grafiek blijkt dat zeespiegelstijging in de Waddenzee de grootste toename van overstromingskans veroorzaakt; gevolgd door de Westerschelde. Dit is in lijn met de grafiek rechtsonder in Figuur 12.

5.2 | Benodigde mate van dijkophoging

De extra benodigde kruinhoogte om de overstromingskans in de oplossingsrichtingen Beschermen-open en

Beschermen-gesloten op hetzelfde niveau te houden bij zeespiegelstijging is niet gelijk aan de mate van zeespiegelstijging. De golfbelasting verandert immers ook bij een toename van de zeespiegel (hogere waterstanden kunnen leiden tot hogere golven bij dezelfde windcondities) en daardoor kan de benodigde kruinhoogte meer toenemen dan de mate van zeespiegelstijging.

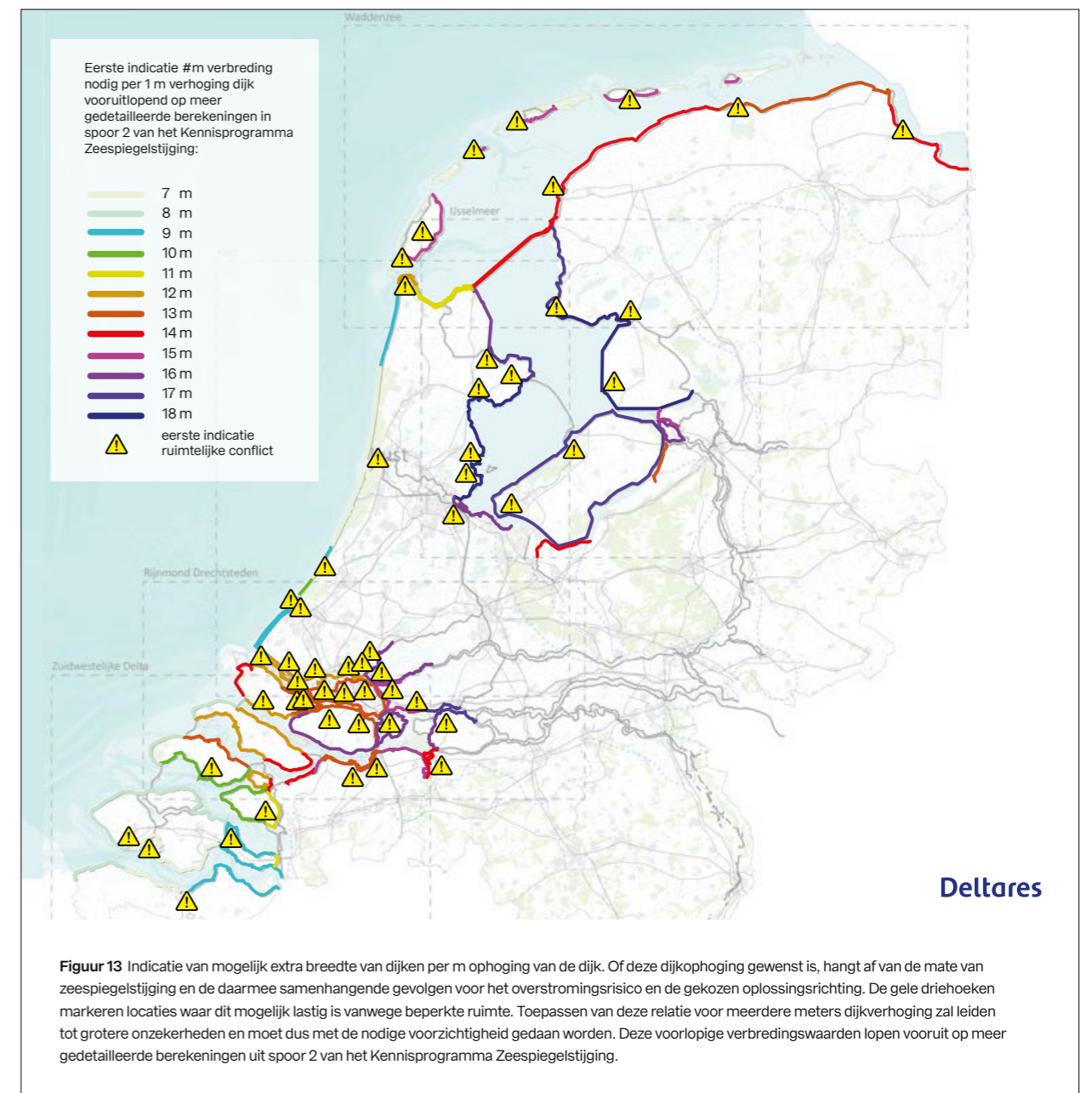
De berekende toename in benodigde kruinhoogte bij een zeespiegelstijging van 0,4 1,0 en 2,0 m staat in Figuur 12. Het ruimtelijke patroon is onregelmatiger dan het patroon van de verandering in overstromingskansen (rechtsonder). Dat komt doordat golfbelastingen, en daarmee golfoploop tegen de dijk, in vergelijking met waterstanden sterker bepaald worden door lokale condities. Voor meerdere locaties geldt dat een zeespiegelstijging van 1m gepaard gaat met een residuele (extra) toename in benodigde kruinhoogte van meer dan 2 m. Hieruit blijkt dat deze dijken meer dan evenredig mee moeten groeien met de zeespiegelstijging om de overstromingskans gelijk te houden.

5.3 | Ruimte voor bredere dijken

Het ophogen van bestaande dijken is een bouwsteen die vooral voor de hand ligt bij de oplossingsrichtingen *Beschermen-open* en *Beschermen-gesloten*. Een dijkverhoging brengt ook over het algemeen een dijkverbredening met zich mee. Om een inschatting te maken van de ruimtelijke impact van dijkverhoging is per dijktraject de ratio bepaald tussen de verandering in de maatgevende hoogwaterstand en dijkverbredening. Deze ratio is bepaald op basis van vijf indicatoren: 1) dikte slappe lagen, 2) sterkte slappe lagen, 3) karakteristieke tijdsduur van een hoogwater, 4) hoogte dijk, en 5) of er een kans is op opdrijven. De ratio van scores en dijkverbredingen is gevalideerd aan de hand van het onderzoek dat is gedaan in het kader van de herijking van het Deltaprogramma Rijnmond Drechtsteden, specifiek bijlage G van het rapport “Invloed hoge scenario’s zeespiegelstijging voor Rijn-Maas Delta” (Kind et al., 2019).

Figuur 13 toont een eerste inschatting van de benodigde extra breedte van dijken bij een dijkverhoging van 1 m langs de Waddenzee en in de Zuidwestelijke delta. NB. Dit is niet perse gelijk aan 1 m zeespiegelstijging (zie vorige paragraaf en Figuur 12, linksboven).

De benodigde verhoging is regelmatig meer dan 1 m bij 1 m zeespiegelstijging. Bijvoorbeeld: voor de locatie 3 in figuur 12 is een dijkverhoging nodig van bijna 2 m nodig, met daarbij behorende extra dijkbreedte van zo'n 25 m. De gele driehoeken markeren locaties waar dit als eerste tot 'conflict' met huidige ruimtegebruik kan leiden. Dit is met name het geval wanneer (een forse) dijkverbredening ingepast moet worden in verstedelijkt gebied. Als de ruimte er niet is zijn er ook alternatieven voor dijkophoging en versterken, bijvoorbeeld door het gebruik van damwanden en vernageling. Dit heeft echter als nadeel dat het kostbaarder is en dat het daarna lastiger wordt om de dijk alsnog op te hogen.



5.4 | Conclusies

De toename van de overstromingskans door zeespiegelstijging verschilt sterk per locatie. Als we de overstromingskans benaderen door de faalkans ten gevolge van overslag/overloop, dan wordt een toename van de overstromingskans met een factor 10 op sommige plaatsen al bereikt bij 0,5 m zeespiegelstijging, bij andere locaties is dat in de orde van 1,5 m. De benodigde mate van dijkverhoging die nodig is om de overstromingskans gelijk te houden varieert ook sterk langs de kust, tot wel een factor 3 onderling verschil tussen locaties. Op sommige locaties is de benodigde dijkverhoging ruim twee keer zo veel als de mate van zeespiegelstijging, als gevolg van de toename in golfhoogte die de zeespiegelstijging met zich mee brengt.

In de berekeningen is geen rekening gehouden met bodemaanpassingen van de kust. Dergelijke aanpassingen kunnen er toe leiden dat de factor 10 toename pas bij hogere zeespiegelstijging bereikt wordt. In het kader van het KP ZSS worden daarom aanvullende berekeningen uitgevoerd waarin verschillende morfologische scenario's worden toegepast voor de ontwikkeling van de vooroevers en stranden in reactie op de zeespiegelstijging.

Het ophogen van dijken is vooral een uitdaging met het oog op het ruimtevraagstuk. In dichtbebouwde locaties, vooral in het Rijnmondgebied, is de ruimte om dijken te verbreden zeer beperkt en moet naar innovatieve oplossingen gezocht worden.

Hoge rivierafvoeren en bouwstenen voor afvoeren en bergen



Noordwaard Polder, Biesbosch

Bij grote mate van zeespiegelstijging zullen belangrijke strategische keuzes gemaakt moeten worden voor de inrichting van het rivierengebied. Voor elk van de vier oplossingsrichtingen voor aanpassen aan zeespiegelstijging uit hoofdstuk 4 werken we uit wat dit betekent voor de rivieren en welke keuzes te maken zijn, voor de oplossingsrichtingen *Beschermen-open*, *Beschermen-gesloten* en *Zeewaarts*. Vervolgens worden de mogelijke gevolgen van deze keuzes kwantitatief uitgewerkt voor de waterstanden in de rivieren, het IJsselmeer en de afvoerverdeling. Ook is een verkenning gedaan naar mogelijke bouwstenen voor afvoeren, bergen, pompen en spuien van de rivierafvoeren.

6.1 | Uitwerkingen variant Beschermen-open

Een hogere zeespiegel resulteert, bij afwezigheid van keringen in de riviermonding, in een evenredige toename van de waterstanden in het zee-gedomineerde deel van het benedenrivierengebied. In het benedenrivierengebied neemt de waterstand onder gemiddelde omstandigheden bijna even veel toe als de mate van zeespiegelstijging. Ook verder bovenstrooms (landinwaarts) heeft een hogere zeewaterstand invloed op waterstanden door opstuwning. Figuur 14 illustreert dit opstuwningseffect door voor verschillende scenario's van zeespiegelstijging de corresponderende waterstand te tonen lang de Waal. Deze rivierwaterstanden zijn berekend met gebruik van een 1-dimensionaal hydrodynamisch model (SOBEK 3, zie de Bruijn et al., 2020). In alle berekeningen is de huidige mediane rivierafvoer aangenomen: 2000 m³/s bij Lobith. Merk op dat in al deze berekeningen geen rekening is gehouden met het eventueel sluiten van de Maeslantkering. Uit de figuur blijkt dat het effect van een verhoogde zeewaterstand weliswaar afneemt in stroomopwaartse richting, maar vanwege het opstuwende effect tot ver bovenstrooms merkbaar is, in extremis (bij 6 m zeespiegelstijging) zelfs tot aan de splitsingspunten waardoor de afvoerverdeling zal worden beïnvloed. De figuur laat ook zien dat de invloed van de zeespiegelstijging op bovenstroomse rivierwaterstanden sterker dan evenredig toeneemt. Bijvoorbeeld bij locatie Tiel is de afstand tussen de zwarte lijn (0 m zeespiegelstijging) en de groene lijn (3 m zeespiegelstijging) veel kleiner dan de afstand tussen de groene lijn (3m zeespiegelstijging) en de rode lijn (6 m zeespiegelstijging).

Hoe ver Landinwaarts de opstuwende werking van de zeewaterstanden merkbaar is, is afhankelijk van de afvoer van de rivier. Tijdens perioden van lage afvoeren kan de waterstandstoename tientallen kilometers verder bovenstrooms oplopen. Tijdens perioden van hoge afvoeren is het verhogende effect van zeespiegelstijging

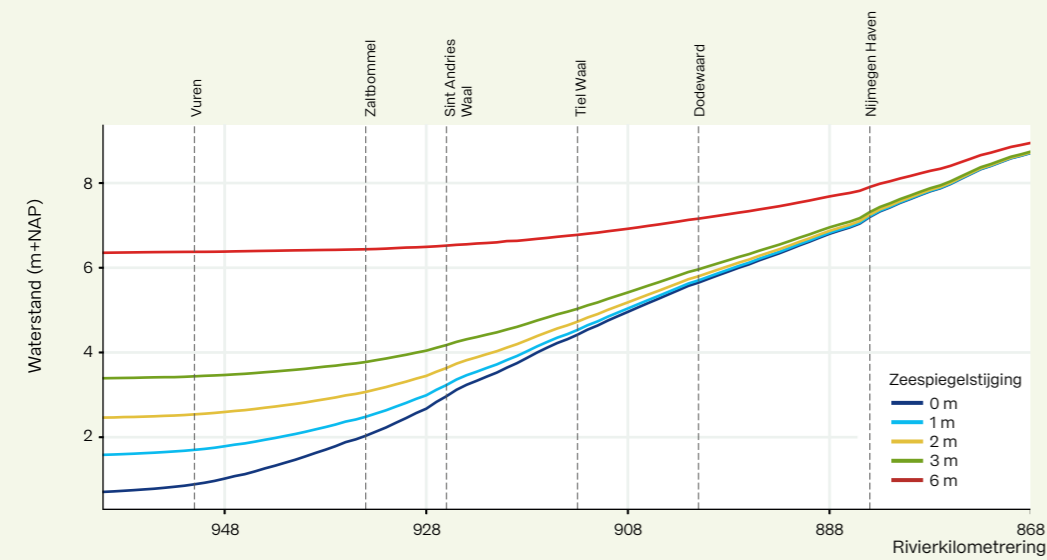


Rivier Lek, tussen Vianen and Lexmond

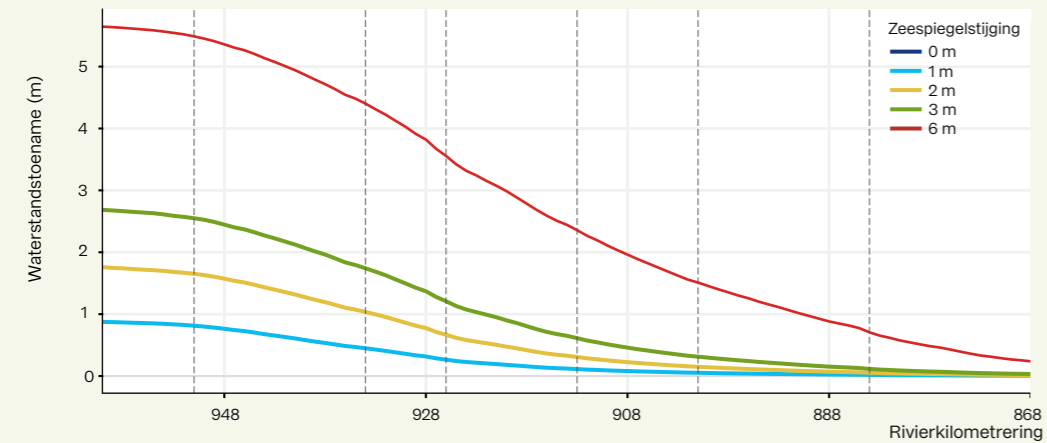
op de waterstand in de rivier substantieel kleiner dan tijdens perioden van mediane afvoeren. Figuur 14 toont bijvoorbeeld het relatieve verhogende effect (welk deel van de zeespiegelstijging is nog merkbaar) tijdens een gebeurtenis met een Rijnaflow van 16.500 m³/s; een afvoer met een geschatte herhalingsperiode van ongeveer 10.000 jaar bij het huidige klimaat. In dat geval is bij een zeespiegelstijging van 3 m het verhogende effect maximaal 1 m aan de benedenstroomse zijde van de Waal. In de huidige situatie komt de zee-inval op maatgevende waterstanden ongeveer tot Gorinchem (net benedenstrooms van Vuren). De toename van extreme piekwaterstanden in het rivierengebied is in de situatie van *Beschermen-open* dus veel kleiner dan de toename van gemiddelde en lage waterstanden, zeker bij (extreme) zeespiegelstijging.

In Figuur 14 is de invloed van het sluiten van de stormvloedkering niet meegenomen. De waterstanden in deze figuren zijn daarom vooral representatief voor de situatie waarin hoge zeewaterstanden (grotendeels) zijn toe te schrijven aan zeespiegelstijging, dus niet aan stormopzet. De invloed van de stormvloedkering bij extreme zeespiegelstijging (meerdere meters) kan vooralsnog niet berekend worden omdat het bestaande instrumentarium (Hydra-NL) daar niet geschikt voor is.

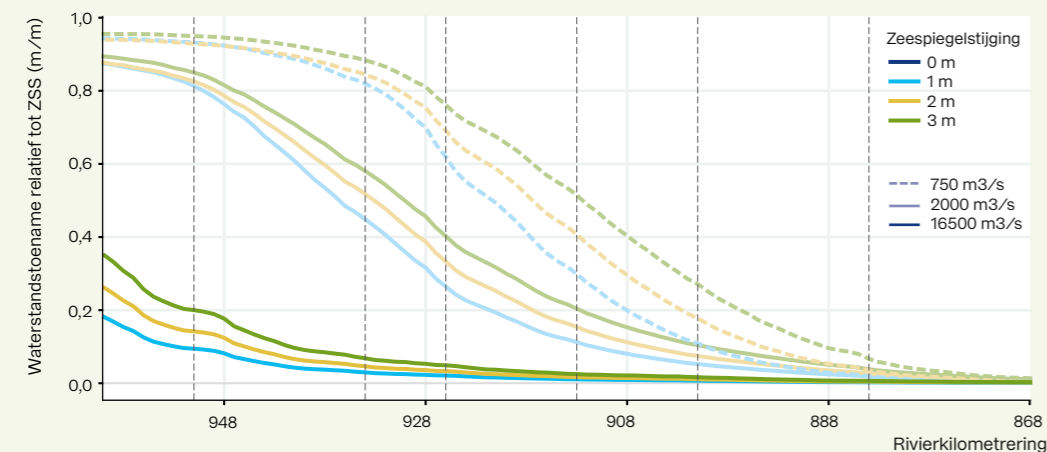
Waterstand op de Waal bij een Rijnaflow van 2000 m³/s en verschillende zeespiegelstanden



Waterstandtoename op de Waal door zeespiegelstijging bij een Rijnaflow van 2000 m³/s



Waterstandtoename op de Waal door zeespiegelstijging bij verschillende Rijnaflowen

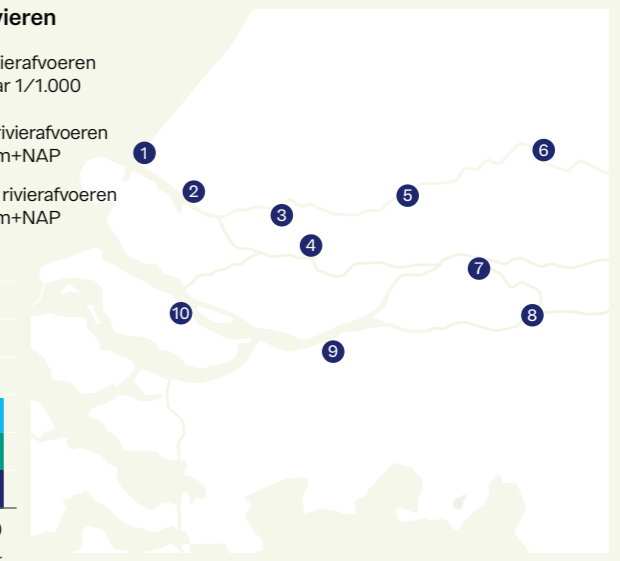
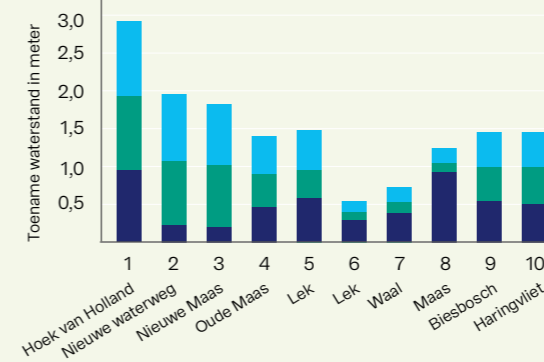


Figuur 14 Boven: Langsdoorsnede van de waterstanden op de Waal bij de huidige mediane Rijnaflow (2.000 m³/s bij Lobith) en vijf zee­water­stan­den bij Hoek van Holland. Midden: water­stands­ver­hoging in ver­gelijking met de situ­atie zonder zeespiegel­stijging. Onder: In­loed van de zeespiegel­stijging op rivier­water­stan­den op de Waal (toename als frac­tie van de zeespiegel­stijging) tij­dens een hoog­water­ge­beur­tenis met een (piek-)afvoer van 16.500 m³/s bij Lobith, een mediane afvoer van 2.000 m³/s bij Lobith en een laag­water­ge­beur­tenis met een afvoer van 750 m³/s bij Lobith (Bron: data uit De Bruijn et al., 2022)

Deltares

Toename maatgevende hoogwaterstand op de rivieren

- Bij zeespiegelstijging van 0 naar 1m, toename extreme rivierafvoeren door klimaatverandering, en verlaging faalkans kering naar 1/1.000
- Bij zeespiegelstijging van 1 naar 2m toename van extreme rivierafvoeren door klimaatverandering, en verhoging sluitpeil naar 3,80m+NAP
- Bij zeespiegelstijging van 2 naar 3m toename van extreme rivierafvoeren door klimaatverandering, en verhoging sluitpeil naar 4,55m+NAP



Deltares

Figuur 15 Toename van de maatgevende hoogwaterstand (in m) op 10 locaties door een combinatie van veranderingen in vergelijking met de huidige situatie. Het gaat hier om een 'open' situatie met een afsluitbare kering, dus passend bij de oplossingsrichting *Beschermen-open*. Bron: Deltares (2019a).

In het kader van spoor 2 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wordt gewerkt aan de ontwikkeling van een dergelijk rekeninstrumentarium, maar die is in het huidige stadium nog niet beschikbaar.

In het kader van de 'herijking Deltaprogramma 2021' zijn wel analyses uitgevoerd om de invloed van 1, 2 en 3 meter zeespiegelstijging op extreme waterstanden in de Rijn-Maas delta te bepalen, rekening houdend met de werking van de stormvloedkering. Daarbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Bij 1 meter zeespiegelstijging is de Maeslantkering (MLK) vervangen door een nieuwe variant (MLK+) met een kleinere kans op 'ten onrechte niet sluiten' (1 op 1.000 in plaats van 1 op 100).
- De sluitfrequentie van de kering mag niet groter zijn dan 3 keer per jaar. Deze sluitfrequentie wordt bereikt vanaf 1 m zeespiegelstijging ten opzichte van het niveau van 1995. Vanaf het moment dat de gemiddelde zeespiegel dat niveau heeft bereikt wordt het sluitpeil evenredig opgehoogd met de zeespiegelstijging om de sluitfrequentie constant te houden.

- In de modelberekeningen voor de scenario's met 1, 2 en 3 m zeespiegelstijging is voor de rivierafvoer het W+-scenario voor het jaar 2100 gebruikt (overeenkomend met +3.5 C in 2085). Feitelijk is dus het gecombineerde effect beschouwd van 1, 2 en 3m zeespiegelstijging enerzijds en hogere extreme rivierafvoeren anderzijds.

Figuur 15 toont de toename van de maatgevende hoogwaterstand (MHW⁸) bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging. Bij de toename van 0 naar 1 m zeespiegelstijging (en bijbehorende veranderingen in rivierafvoer en kenmerken Maeslantkering) zijn de grootste verschillen zichtbaar bij de bovenstroomse locaties langs de Maas en aan de zee­waartse zijde van de stormvloedkering. Voor de locaties bovenstrooms wordt de toename in MHW vrijwel volledig veroorzaakt door de verwachte toename in extreme afvoeren. Voor de zuidelijke beneden­stroomse locaties (Hollands Diep, Haringvliet) is de toename van het MHW in de orde van 0,5m, voor de noordelijk gelegen locaties ten oosten van de Maeslantkering is de toename in de orde van 0,25m. Voor de laatste groep locaties wordt het effect van 1m zeespiegelstijging grotendeels gemitigeerd door de afname in de faalkans van de Maeslantkering van 1/100 naar 1/1.000. Als die laatste aanpassing niet wordt gedaan nemen de maatgevende waterstanden voor die locaties met bijna een meter toe.

⁸De term 'MHW' wordt niet meer gebruikt bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen vanwege de overstap naar de overstromingsrisico-benadering in 2017. Als indicator voor de invloed van zeespiegelstijging op hoge waterstanden in een complex gebied als de Rijn-Maas monding is het MHW nog wel een doelmatig begrip.

Bij de toename van 0 naar 2m zeespiegelstijging is de toename in MHW over het hele gebied in de orde van grootte van 1m, met uitzondering van locaties aan de zeevaartse zijde van de stormvloedkering (~2m toename) en bovenstrooms langs de Lek en Waal (~0,5m toename). Bij de toename van 0 naar 3m zeespiegelstijging is de toename in de MHW over het hele gebied in de orde van grootte van 1,5-2m, met uitzondering van locaties aan de zeevaartse zijde van de stormvloedkering (~3m toename) en bovenstrooms langs de Lek en Waal (tussen 0,5 en 1,0 m toename). Voor de zuidelijke benedenstroomse locaties (Hollands Diep, Haringvliet) is de toename van het MHW lager dan voor de noordelijk gelegen locaties ten oosten van de Maeslantkering (dit in tegenstelling tot de situatie bij 1 m zeespiegelstijging).

De verhoging van maatgevende waterstanden is een eerste indicatie van de toename in de veiligheidsopgave. Dijken zullen opgehoogd en versterkt moeten worden om het huidige veiligheidsniveau te handhaven. Verder zal de afwatering vanuit de polders steeds verder bemoeilijkt worden. Dat kunnen overwegingen zijn om over te stappen op een gesloten variant waarin het waterpeil in het benedenrivierengebied gestuurd kan worden.

6.2 | Uitwerkingen variant Beschermen-gesloten en Zeewaarts

In de strategie *Beschermen-gesloten* en *Zeewaarts* ontstaat er in het benedenrivierengebied en/of voor de Hollandse kust een binnenmeer, waar de rivieren (Waal, Lek en Maas) op afwateren. In het geval van de oplossingsrichting Zeewaarts kan dit een groot randmeer zijn langs de kust van Noord- en Zuid-Holland. In beide oplossingsrichtingen kunnen de Waal, Lek en Maas niet meer vrij afwateren op de Noordzee en moet al het overtollige water naar zee gepompt en/of gespuid worden. Bij meer dan 1m zeespiegelstijging zal spuien onder gemiddelde condities niet mogelijk zijn, tenzij het streefpeil van het nieuw te vormen binnenmeer verhoogd wordt tot boven NAP, wat uiteraard gevolgen heeft voor de dijken langs de rivieren en ook de kwel langs het binnenmeer en de mogelijkheid voor natuurlijk afvoeren uit de polders.

Om een laag streefpeil in het binnenmeer gedurende het grootste deel van het jaar te kunnen handhaven, en daarmee afstroming van omliggende polders door middel van spuien mogelijk te maken, zijn pompen nodig met een capaciteit die groter is dan de gemiddelde gezamenlijke afvoer van de Lek, Waal en Maas. Het Plan Sluizen (Rijkswaterstaat, 2015) gaat bijvoorbeeld uit van een pompcapaciteit van 3.000 m³/s.

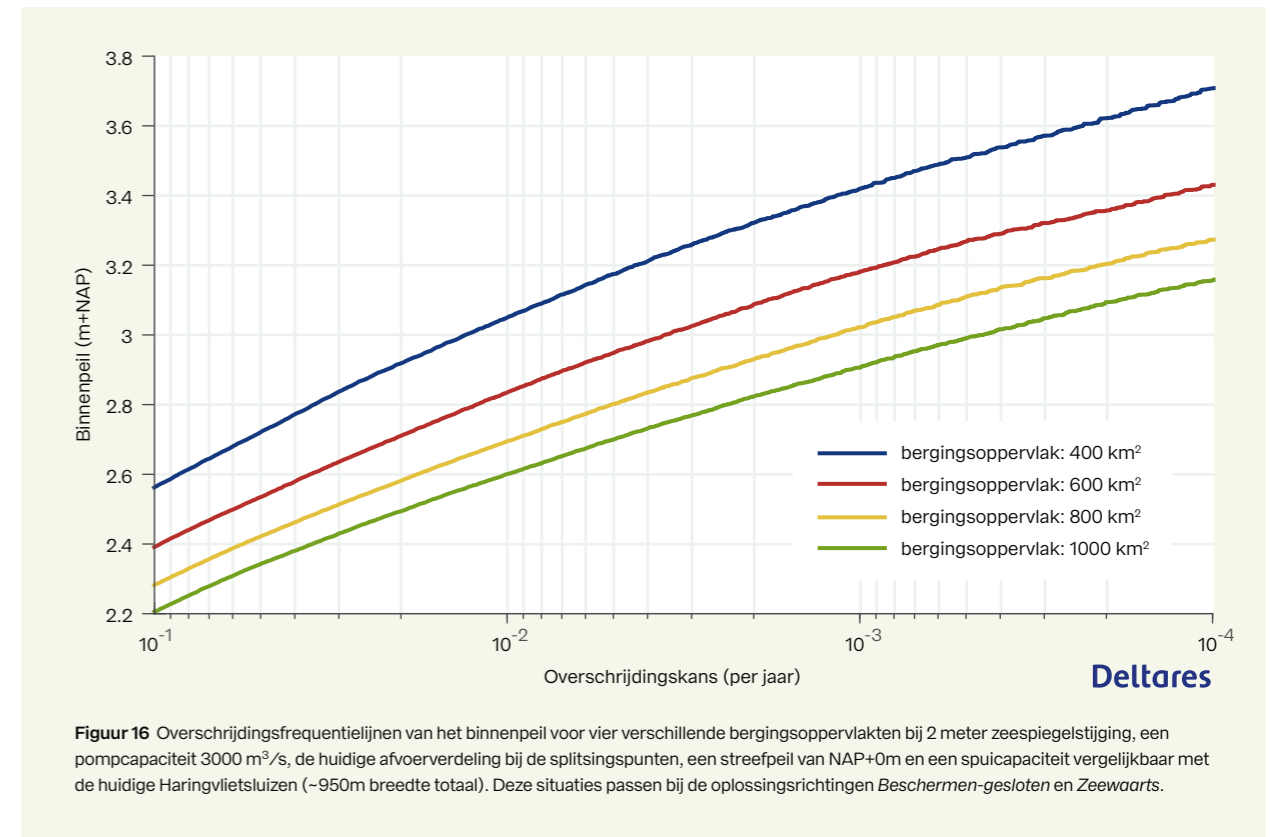
Tijdens hoogwaters op de Rijn en Maas is die capaciteit onvoldoende en zal een deel van de afvoer geborgen en/of gespuid moeten worden. Dat laatste is alleen mogelijk door het peil aan de binnenzijde van de sluizen tijdelijk te laten stijgen. Hoe groter de zeespiegelstijging, des te hoger het binnenpeil⁹ zal moeten zijn om te kunnen spuien. Als gelijktijdig een substantiële stormopzet op zee plaatsvindt zal het binnenpeil nog verder moeten stijgen om te kunnen spuien.

Om een beeld te krijgen van de dynamiek van het binnenpeil tijdens hoogwater-gebeurtenissen en van de kansen op extremen heeft Deltares een eenvoudig balansmodel ontwikkeld (Deltares 2019a) en verder doorontwikkeld in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. In het waterbalansmodel zijn de volgende systeemkenmerken aanpasbaar:

- De zeespiegelstijging ten opzichte van de huidige (referentie-)situatie;
- Het afvoerpercentage van de Rijn dat richting de IJssel wordt afgevoerd (en dus niet het benedenrivierengebied bereikt);
- Het streefpeil in het gebied achter de sluizen;
- De totale oppervlakte van het waterbergingsgebied;
- De capaciteit van de pompen waarmee water naar zee gepompt kan worden; en
- De totale breedte van de spuigaten (als representant van de spuicapaciteit).

Vijf van de zes systeemkenmerken zijn – binnen grenzen – te sturen door keuzes in de toekomstige waterstaatkundige inrichting van Nederland; de zesde parameter is de zeespiegelstijging. Met dit model zijn strategieën vergeleken door kansen op hoge binnenpeilen te bepalen voor verschillende systeemtoestanden (d.w.z. verschillende combinaties van bovenstaande gebiedskenmerken). Voor dat doeleinde is een probabilistisch model ontwikkeld waarmee de overschrijdingsfrequentielijn van het binnenpeil wordt afgeleid op basis van simulaties van alle mogelijke combinaties van rivierafvoeren en stormopzet.

Figuur 16 toont als voorbeeld de berekende overschrijdings-frequentielijnen van het binnenpeil voor vier verschillende bergingsoppervlakten in een situatie met 2m zeespiegelstijging ten opzichte van 1995. We merken op dat het binnenpeil niet hetzelfde is als de waterstand; de eventuele wind- en golfopzet zijn niet meegenomen. De frequentielijnen zijn dus niet geschikt om benodigde



dijkhoogtes af te leiden. De onderlinge vergelijking tussen de verschillende frequentielijnen maakt het wel mogelijk om het reducerende effect van een maatregel op hoge meerpeilen (en daarmee benodigde dijkhoogte) in te schatten.

Voor de details van het model en de frequentie-analyses verwijzen we naar Deltares (2019a) en De Bruijn et al. (2022). Daaruit blijkt onder meer dat een toename van de gemiddelde zeespiegel een verticale verschuiving geeft in de frequentielijn die nagenoeg gelijk is aan de mate van zeespiegelstijging. Anders gezegd, de zeespiegelstijging werkt vrijwel 1-op-1 door op de waarde van het binnenpeil die correspondeert met een bepaalde terugkeertijd. Dus ondanks het feit dat het binnengebied wordt afgesloten van zee middels een dam met sluis, werkt de zeespiegelstijging (vrijwel) vrijwel 1-op-1 door op de maximale peilen tijdens hoogwatergebeurtenissen. Dit roept twee vragen op:

(i) Hoe is dat mogelijk? en

(ii) Is het afsluiten van het gebied dan wel zinvol met het oog op hoogwaterbescherming?

ad i) Het antwoord op de eerste vraag is dat tijdens hoge rivierafvoeren de rol van spuien zeer bepalend is voor de hoogte van het binnenpeil. Tijdens hoogwaters op de Rijn met een piekafvoer van, bijvoorbeeld, 10.000 m³/s is de afvoer gedurende een periode van dagen tot weken groter dan de beschikbare pompcapaciteit. Het peil loopt dan op tot het moment dat gespuid kan worden.

De spuicapaciteit is dusdanig groot dat het peil daarna niet of nauwelijks meer toe neemt. Het moment waarop gespuid kan worden is het moment waarop het peil van het binnengebied hoger staat dan de zeewaterstand. Hoe groter de mate van zeespiegelstijging, hoe later dat moment komt. Vandaar dat het maximale binnenpeil tijdens een hoogwatergebeurtenis (vrijwel) 1-op-1 afhankelijk is van de mate van zeespiegelstijging. Deze 1-op-1 relatie kan alleen voorkomen worden door de pompcapaciteit substantieel groter te maken, zoals verderop in dit document wordt besproken.

ad ii) Het afsluiten van de zeezijde is met het oog op waterveiligheid wel degelijk zinvol. Het leidt namelijk tot een reductie van extreem hoge waterstanden (peilen) in het gebied. De reductie varieert van 0 tot 1 m (Rijkswaterstaat 2015; Deltares, 2019a) waardoor het achterliggende gebied extra beschermd wordt en het nodige bespaard kan worden op dijkversterkingen. Kortom het afsluiten van het gebied resulteert in een substantiële verlaging van hoge waterstanden (peilen), maar de extreme peilen nemen vervolgens wel evenredig toe met de zeespiegelstijging. Ook na afsluiten van de rivieren zullen bij verdere zeespiegelstijging dus aanvullende maatregelen nodig zijn om de waterveiligheid in stand te houden.

⁹ In deze analyse wordt de dynamiek van het binnenpeil gemodelleerd voor de situatie van een gesloten zeezijde. Dat is nadrukkelijk niet hetzelfde als de waterstand. Als gevolg van scheefstand bij harde wind kan de waterstand lokaal hoger/lager uitvallen dan het binnenpeil.

Om mogelijke aanvullende maatregelen verder te analyseren zijn simulaties uitgevoerd waarbij de waarden van de grootheden (pompcapaciteit, bergingsoppervlak etc.) verder zijn opgevoerd. In deze simulaties zijn telkens twee systeemkenmerken tegelijk gevarieerd, terwijl de overige systeemkenmerken constant zijn gehouden. Dat geeft inzicht in hoeverre de combinaties elkaar kunnen aanvullen. De resultaten van de analyses staan weergegeven in Tabel 5 (1 meter zeespiegelstijging in de rechterbovenhoek en 2 meter zeespiegelstijging in de linkerbovenhoek) en Tabel 6 (3 en 4 meter zeespiegelstijging). De getallen en bijbehorende kleuren tonen de binnenpeilen met een overschrijdingsfrequentie van 1/1.000 per jaar. Relatief lage waarden van het binnenpeil hebben een groene of lichtblauwe kleur, relatief hoge waarden hebben een gele, oranje of rode kleur.

Zoals te verwachten neemt in Tabel 5 en Tabel 6 het aantal gele, oranje of rode cellen toe bij een grotere mate van zeespiegelstijging. In de rechterbovenhoek van Tabel 5 (1 m zeespiegelstijging) zijn deze kleuren niet waarneembaar (peilen < NAP+3 m) terwijl in Tabel 6 deze kleuren juist overheersen (peilen > NAP+3m). Uit het kleurverloop van 1m naar 2, 3 en 4m zeespiegelstijging is te zien dat bij hogere zeespiegelstijging de peilen in het achterliggende (rivieren)gebied alleen laag gehouden kunnen worden door realisatie van hele grote pompcapaciteit (orde 9.000 tot 12.000 m³/s), en eventuele combinatie met extra berging, groter aandeel IJsselafvoer en extra sluisbreedte. Uit Tabel 5 en Tabel 6 blijkt verder de volgende invloed van de zes systeemparameters op extreme binnenpeilen:

- 1 m zeespiegelstijging resulteert in een ongeveer even grote (~1m) toename in extreme binnenpeilen, met uitzondering van de simulaties met extreem grote pompcapaciteit (9.000 m³/s en 12.000 m³/s).
- 15% extra afvoer naar de IJssel levert in de regel ongeveer 2 dm daling op van extreme binnenpeilen. NB, dit betreft 15% van de Rijnafvoer; voor de IJssel zelf betekent dit een verdubbeling van de afvoer (omdat de IJsselafvoer ongeveer 15% van de Rijnafvoer is).
- 500 m extra spuibreedte (ongeveer de halve totale breedte van de Haringvlietsluizen) levert in de regel ongeveer 1 tot 3 dm daling op in extreme binnenpeilen. Een volgende extra 500 m spuibreedte levert minder winst op, in de meeste gevallen ongeveer 1 dm.

- Een toename van het bergende oppervlak van 400 km² (ongeveer het totale oppervlak van de Zuid-Hollandse wateren in het benedenrivierengebied) naar 1.000 km² (Oosterschelde, Grevelingen en Veerse Meer toegevoegd) levert in de meeste gevallen een reductie op van ongeveer 5 dm in extreme binnenpeilen¹⁰. In simulaties met extreem grote pompcapaciteit (9.000 m³/s en 12.000 m³/s) en grote mate van zeespiegelstijging (4m) wordt met deze toename van het bergend oppervlak een substantieel grotere reductie van extreme meerpeilen gerealiseerd.
- Een toename in het streefpeil in het gebied achter de sluizen heeft in de meeste gevallen een verwaarloosbare invloed op hoge binnenpeilen.
- Een toename in de pompcapaciteit van 3.000 m³/s naar 6.000 m³/s levert een reductie in extreme meerpeilen op van ongeveer 4 dm. Een verdere ophoging met nog eens 3.000 m³/s heeft een substantieel groter (reducerend) effect op extreme meerpeilen.

De diverse maatregelen zoals het vergroten van de spuicapaciteit of het bergingsoppervlak zijn dus mogelijk effectieve adaptatiemaatregelen, maar bij extreme zeespiegelstijging is dit onvoldoende om hetzelfde beschermingsniveau te houden als in de huidige toestand. In dat geval zal de oplossing vooral gezocht moeten worden in het vergroten van de pompcapaciteit. Aanvullend kan overwogen worden om dijken in het benedenrivierengebied substantieel op te hogen of minder strikte normen hanteren voor deze dijken (en daarmee grotere overstromingskansen accepteren). De laatste optie past bij de oplossingsrichting *Meebewegen*.



¹⁰ Een bijkomend nadeel van het vergroten van het bergend oppervlak is dat het na afloop van het hoogwater extra lang duurt om het water weg te pompen (omdat er meer geborgen is). Het gebied heeft dan dus extra lang met verhoogde binnenpeilen te maken.

Tabel 5 Binnenpeilen met jaarlijkse overschrijdingskans van 1/1.000, in het nieuw te vormen meer in een gesloten toestand bij *Beschermen-gesloten* of *Zeewaarts*. Afhankelijk van de grootte gaat het hier om het huidige rivierengebied met daarbij delen van de zuidwestelijke delta bij Beschermen-gesloten en of een nieuw te vormen kustmeer bij de oplossingsrichting Zeewaarts. De peilen staan weergegeven voor verschillende combinaties van systeemkenmerken. Telkens zijn twee systeemkenmerken tegelijkertijd gevarieerd (aangegeven op de horizontale respectievelijk verticale as), terwijl de overige systeem-kenmerken constant zijn gehouden (namelijk: pompcapaciteit 3.000 m³/s, IJssel fractie 15%, streefpeil NAP+0m, bergingsoppervlak 400 km² en spuibreedte 500 m). De rechterbovenhoek toont resultaten bij 1 m zeespiegelstijging, de linkerbovenhoek toont resultaten bij 2 m zeespiegelstijging. De IJssel fractie is het deel van de Rijnafvoer bij Lobith wat naar het IJsselmeer wordt gestuurd. In de huidige situatie is dat zo'n 15%. Het streefpeil is het meerpeil wat gestreefd wordt te bereiken middels pompen, spuien en of bergen. Het bergingsoppervlak is het oppervlak wat wordt gecreëerd voor berging. Het huidige benedenrivierengebied heeft zo'n 450 km² en door Oosterschelde, Grevelingen en Veerse Meer toe te voegen wordt dit zo'n 1000 km² en een toename naar 4000 km² kan via een nieuw kustmeer. Bijvoorbeeld een pompcapaciteit van 3000 m³/s in combinatie met een bergingsoppervlak van 400 km² resulteert bij 1 m stijging in een binnenmeerpeil dat eens in de 1000 jaar voorkomt van 2,4 m. +NAP. Bij een zeespiegelstijging van 2 m is dit 3,4 m +NAP. Een veel grotere pompcapaciteit van 12.000 m³/s kan het peil dan verlagen naar 1,8m +NAP. Echter bij een stijging van 4 m (tabel 6) is dit weer verhoogd naar 3,1 m +NAP. Met een zeer groot bergingsoppervlak van 4.000 km² (in een kustmeer) is dit te verlagen naar 0,3 m +NAP (tabel 6).

Zeespiegelstijging	1 m	IJssel-fractie (%)			Streefpeil (m+NAP)				Bergings-oppervlak (km²)				Pomp-capaciteit (m³/s)				Spui-breedte (m)		
		15	30	45	0	1	2 m	400	800	1.200	4.000	3.000	6.000	9.000	12.000	500	1.000	1.500	
IJssel-fractie (%)	15				2,4	2,4	2,7	2,5	2,1	1,9	1,4	2,4	2,0	1,6	1,0	2,6	2,4	2,3	
	30				2,2	2,2	2,6	2,3	1,9	1,7	1,3	2,2	1,8	1,2	0,4	2,4	2,2	2,1	
	45				2,0	2,0	2,4	2,0	1,7	1,5	1,1	2,0	1,5	0,7	0,0	2,1	2,0	1,9	
Streefpeil (m+NAP)	0	3,4	3,2	3,0				2,4	2,1	1,9	1,4	2,4	2,0	1,6	1,0	2,6	2,4	2,3	
	1	3,4	3,2	3,0				2,5	2,1	1,9	1,5	2,4	2,1	1,7	1,3	2,6	2,4	2,3	
	2	3,4	3,2	3,0				2,7	2,4	2,3	2,1	2,7	2,4	2,2	2,1	2,7	2,7	2,6	
Bergings-oppervlak (km²)	400	3,4	3,3	3,0	3,4	3,4	3,5					2,4	2,1	1,6	1,0	2,7	2,4	2,4	
	800	3,0	2,9	2,6	3,0	3,0	3,1					2,1	1,7	1,3	0,8	2,4	2,1	2,0	
	1.200	2,8	2,7	2,5	2,8	2,8	2,9					1,9	1,6	1,2	0,7	2,3	1,9	1,8	
	4.000	2,2	2,0	1,8	2,2	2,4	2,5					1,4	1,1	0,7	0,3	1,7	1,4	1,3	
Pomp-capaciteit (m³/s)	3.000	3,4	3,2	3,0	3,4	3,4	3,4	3,4	3,0	2,8	2,2					2,6	2,4	2,3	
	6.000	3,0	2,7	2,4	3,0	3,0	3,0	3,1	2,7	2,5	1,8					2,2	2,0	2,0	
	9.000	2,5	2,1	1,2	2,5	2,6	2,7	2,6	2,2	2,0	1,1					1,7	1,6	1,5	
	12.000	1,8	0,4	0,0	1,7	2,0	2,3	1,8	1,4	1,0	0,3					1,0	1,0	0,9	
Spui-breedte (m)	500	3,5	3,3	3,1	3,5	3,5	3,5	3,6	3,3	3,1	2,4	3,5	3,2	2,6	1,8				
	1.000	3,3	3,2	3,0	3,3	3,3	3,4	3,4	3,0	2,8	2,2	3,3	3,0	2,5	1,7				
	1.500	3,3	3,1	2,9	3,3	3,3	3,3	3,4	2,9	2,7	2,1	3,3	2,9	2,5	1,7				

Bovengrens van klasse (m +NAP)



Tabel 6 Dezelfde informatie als in Tabel 5, maar dan voor zeespiegelstijgingen van 3 en 4 meter.

Zeespiegelstijging	3 m	IJssel-fractie (%)			Streefpeil (m+NAP)			Bergings-oppervlak (km²)				Pomp-capaciteit (m³/s)				Spui-breedte (m)		
		15	30	45	0	1	2	400	800	1.200	4.000	3.000	6.000	9.000	12.000	500	1.000	1.500
IJssel-fractie (%)	15				4,3	4,3	4,3	4,4	4,0	3,8	3,0	4,3	4,0	3,4	2,5	4,5	4,3	4,3
	30				4,2	4,2	4,2	4,2	3,8	3,6	2,7	4,2	3,7	2,9	0,4	4,3	4,2	4,1
	45				3,9	3,9	3,9	4,0	3,6	3,4	2,2	3,9	3,3	1,2	0,0	4,0	3,9	3,9
Streefpeil (m+NAP)	0	5,3	5,1	4,9				4,4	4,0	3,8	3,0	4,3	4,0	3,4	2,4	4,5	4,3	4,3
	1	5,3	5,1	4,9				4,4	4,0	3,8	3,2	4,3	4,0	3,5	2,7	4,5	4,3	4,3
	2	5,3	5,2	4,9				4,4	4,0	3,8	3,3	4,3	4,0	3,5	3,0	4,5	4,3	4,3
Bergings-oppervlak (km²)	400	5,4	5,2	5,0	5,4	5,4	5,4					4,4	4,0	3,5	2,5	4,5	4,4	4,4
	800	5,0	4,8	4,5	5,0	5,0	5,0					4,0	3,6	3,1	1,6	4,2	4,0	3,9
	1.200	4,7	4,5	4,2	4,7	4,7	4,8					3,8	3,4	2,7	1,1	4,0	3,8	3,7
	4.000	3,6	3,0	2,2	3,6	3,9	4,2					3,0	2,2	1,1	0,3	3,1	2,9	2,9
Pomp-capaciteit (m³/s)	3.000	5,3	5,1	4,9	5,3	5,3	5,3	5,4	5,0	4,7	3,6					4,5	4,3	4,3
	6.000	4,9	4,6	4,2	4,9	4,9	5,0	5,0	4,5	4,3	2,2					4,1	4,0	3,9
	9.000	4,4	3,6	1,2	4,4	4,4	4,5	4,4	3,8	3,3	1,1					3,5	3,4	3,4
	12.000	2,9	0,4	0,0	2,8	3,4	3,7	3,1	1,6	1,1	0,3					2,5	2,4	2,4
Spui-breedte (m)	500	5,5	5,2	5,0	5,4	5,4	5,4	5,5	5,1	4,9	3,6	5,4	5,0	4,4	2,8			
	1.000	5,3	5,1	4,9	5,3	5,3	5,3	5,4	4,9	4,7	3,6	5,3	4,9	4,4	2,8			
	1.500	5,3	5,1	4,9	5,3	5,3	5,3	5,4	4,9	4,6	3,5	5,3	4,9	4,3	2,8			

Bovengrens van klasse (m +NAP)



6.3 | Aanpassen afvoerverdeling splitsingspunten

Het aanpassen van de afvoerverdeling van de splitsingspunten is een relevante bouwsteen in diverse plannen en oplossingsrichtingen, zoals ook besproken in paragraaf 6.2. Uiteraard vraagt dat wel om de nodige aanpassingen in het gebied. Paragraaf 6.3.1 gaat in op de vraag of en hoe de afvoercapaciteit vergroot kan worden op de Rijntak(ken) als deze een groter percentage van de hoogwaterafvoer te verwerken krijgen. Paragraaf 6.3.2 beschrijft enkele gevolgen voor het IJsselmeer indien besloten wordt om meer afvoer over de IJssel te sturen.

6.3.1 Afvoercapaciteit van de Rijntakken

De afvoercapaciteit van de huidige Rijntakken en Maas is onvoldoende voor de toenemende debieten die in de toekomst worden verwacht, en een hogere zeespiegel maakt dat uitstroming naar zee onder vrij verval steeds meer wordt belemmerd. In de systeembeschouwing voor Integraal Riviermanagement (IRM) is geschat dat nog deze eeuw gerekend moet worden op 10-15% grotere Rijnafoeren en 10-20% grotere Maasafvoeren (Sperna-Weiland et al., 2015; Klijn et al., 2015).

Het ENW (ENW-advies) heeft onlangs nog herbevestigd dat de argumenten voor het ontzien van de Lek nog valide zijn (langste rivier, moeilijk te verruimen, langs en naar kwetsbaarste delen van het land) en dat vergroting van de afvoercapaciteit voor de Rijn dus gezocht zou moeten worden in:

- een groter percentage van de Rijnafoer via het IJsseldal naar het noorden,
- of forse vergroting van de capaciteit van de Waal.

De huidige afvoerverdeling

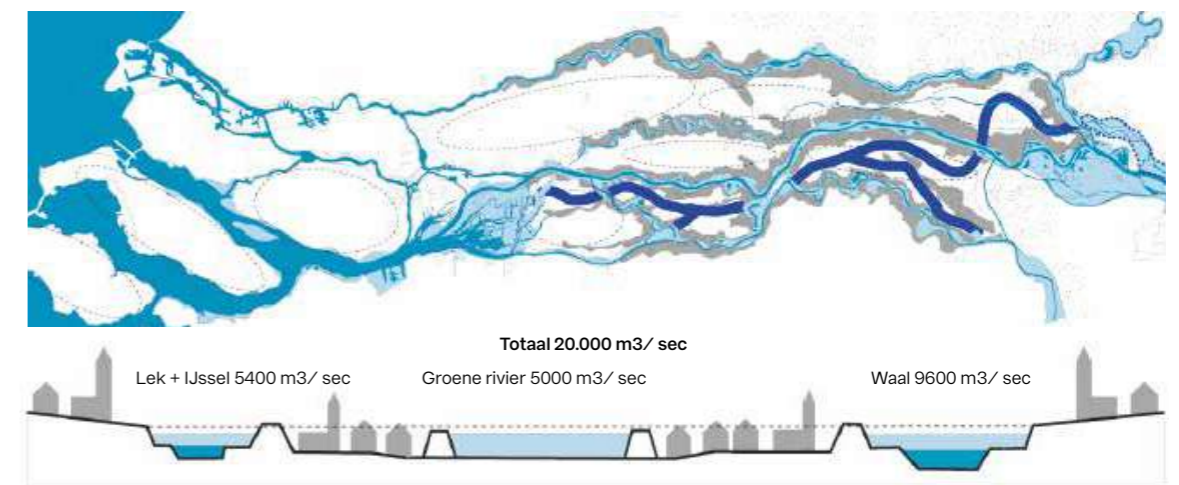
De ontwikkeling van de Rijn- en Maasdelta is gekenmerkt door veelvuldige natuurlijke rivierverleggingen – avulsies (Kleinans et al., 2013; Stouthamer et al., 2015). In de afgelopen 5000 jaar was er in Nederland gemiddeld één avulsie per 125 jaar. Tot de mens dijken ging opwerpen.

In de late Middeleeuwen had de Waal steeds meer terrein gewonnen, maar toen begon de IJssel naar het noorden te stromen en steeds meer water te trekken, tot wel 25% van de Rijnafoer (Van Til, 1979; Dierx et al., 2021). Door ingrijpen van de mens bleef de Waal daarna de grootste Rijntak. Met de scheiding van Maas en Waal in 1904 is de Waal vervolgens ontdaan van de ruimte die de voorheen meestromende Maas bood. Al bij de scheiding van Maas en Waal was men zich er van bewust dat de hoogwaterstanden op de Waal daardoor hoger zouden worden (“Commissie van deskundigen in zake de Verhoging van den Waterspiegel op de Waal door de afsluiting van de Heerewaardenschen Overlaten”, 1894).

Dit illustreert ten eerste dat het vasthouden van een bepaalde rivierloop in een delta gedurende meer dan duizend jaar tegennatuurlijk is omdat rivieren in sedimentaire afzettingen inherent instabiel zijn. De diverse Rijntakken hebben door deze ontstaansgeschiedenis een sterk verschillend karakter en ze gedragen zich

De groene rivier als nieuwe component in het rivierenlandschap

Deltares



Figuur 18. Een stelsel van groene rivieren (dikke blauwe lijnen) door de kommen langs de Waal voor een extra afvoer van 5.000 m³/s met dwarsprofiel (Rietveld, 2003). De ellipsen zijn diepe rivierkommen.

verschillend. Zo wezen Silva et al. (2000) op het feit dat de Waal veel hoger boven het land uit rijst dan de andere rivieren. En in het kader van IRM wordt gewezen op het verschillend gedrag van de rivieren bij toenemende Rijnafoer: waar de IJssel relatief rustig ‘ademt’ door een deels overstroombare riviervlakte, lijkt de Waal meer te ‘hyperventileren’ in een nauw korset van hoge dijken langs diepe polders.

Met door de klimaatverandering mogelijk toenemende hoogwaterafvoeren wordt het handhaven van de door het vigerende beleid gewenste afvoerverdeling steeds lastiger. De verhanglijnen in het splitsingspuntengebied (Figuur 17) tonen – bij een afvoer van zo’n 16.500 m³/s te Lobith – een sterk verhang op het Pannerdens Kanaal en de IJssel, terwijl de Waal daar juist een klein verhang kent. Door stuwung op de Waal zal er dan dus procentueel meer water naar de andere Rijntakken gaan.

Meer afvoer over de IJssel?

In De Rijn op Termijn (WL, 1997; Baan & Klijn, 1998) is verkend hoe het rivierengebied van de Rijntakken zou kunnen worden aangepast aan grote klimaatveranderingen. Daarbij is het IJsseldal als meest kansrijk geïdentificeerd om meer water over af te voeren, omdat:

- de afvoer via een relatief korte route en onder fors verval moet plaatsvinden. De IJssel is bij hoogwater ongeveer even lang als de Waal; de Nederrijn-Lek is veel langer (Klijn, 1999).

- grote rivierafvoeren bij voorkeur naar een gebied met grote bergingscapaciteit moeten worden geleid (voor het geval niet op zee gespuid kan worden). Het IJsselmeergebied heeft een veel grotere capaciteit dan het Hollands Diep - Haringvlietgebied.

- hoogwaters niet langs de meest kwetsbare gebieden moeten worden geleid. Het IJsseldal is een rivierdal, waaruit evacuatie gemakkelijker is dan vanuit door rivieren omsloten badkuipdijkeringen en waar de overstromingsdieptes beperkt blijven.

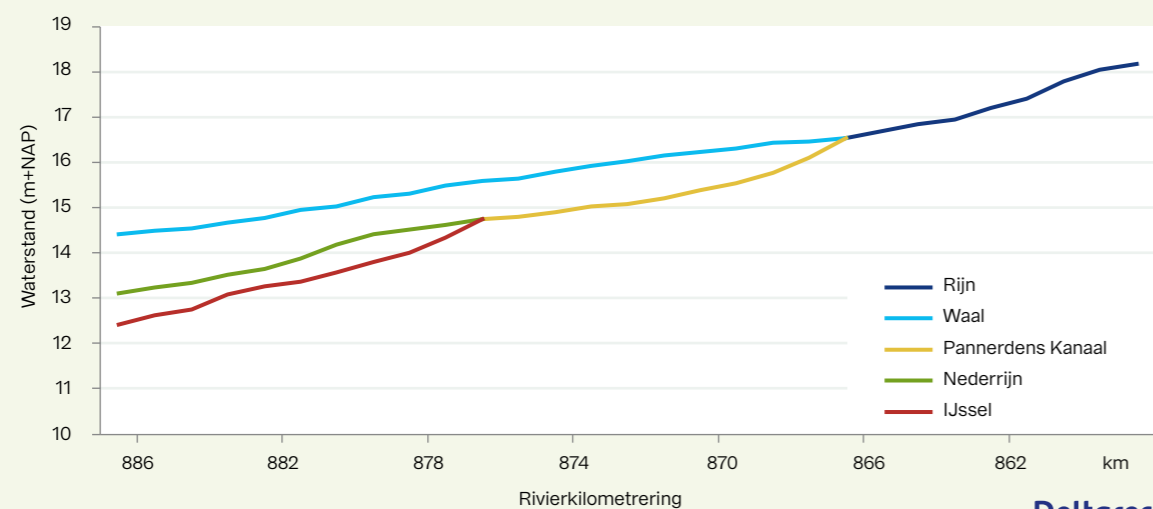
- rivierverruiming en natuurontwikkeling goed samen gaan. De IJssel leent zich door de geomorfologische omstandigheden het meest voor de ontwikkeling van een nagenoeg natuurlijke rivier.

Merk op dat de IJssel in de huidige configuratie een veel kleiner percentage van de piekafvoer van de Rijn afvoert (15%) dan de Lek (21%) en de Waal (64%). Een extra hoeveelheid afvoer zal voor de IJssel een relatief veel grotere toename zijn dan voor de Lek en vooral de Waal.

Meer afvoer over de Waal?

Er zijn ook suggesties gedaan om de afvoercapaciteit van de Waal te vergroten (zie [Plan Beaufort](#)). Als daarbij wordt geprobeerd om de Lek geheel van extra afvoer te vrijwaren, zou ruim 5.000 m³/s extra langs de Waal afgevoerd moeten worden. Zonder rivierverruiming zou dat ongeveer 2,5 m hogere dijken vragen. Ook dient een regelwerk in het Pannerdens Kanaal aangelegd te worden om het water de Waal op te krijgen. Als de Lek daarentegen niet wordt ontzien, moet het water ergens in het westen weer veilig door of langs het Rijnmondgebied geleid worden; dat levert een grote omweg op.

Verhanglijnen rivieren



Figuur 17 De verhanglijnen langs de bovenloop van de Rijntakken bij een rivierafvoer van zo’n 16.500 m³/s.

Mogelijkheden van grootschalige rivierverruiming zijn verkend in o.a. IRMA-SPONGE Living with Floods (Vis et al., 2001), in de Spankrachtstudie (RWS-RIZA) en in Ruimte voor de Rivier, ruimte voor de Natuur? (Van Rooij et al., 2000; Klijn et al., 2002). Uit deze verkenningen blijkt het lastig direct naast de rivier extra ruimte te vinden, reden om in veel studies die ruimte in de – relatief legere – komgebieden van de Betuwe en andere dijkvingen te zoeken.

Voor de Spankrachtstudie is voor de Rijntakken en de Maas gekeken waar mogelijkheden waren voor dijkverleggingen of bypasses die de afvoercapaciteit fors konden vergroten. Deze studie inspireerde velen, waaronder Ronald Rietveld (Academie voor Bouwkunst, Amsterdam), die door een reeks opeenvolgende groene rivieren¹¹ 5.000 m³/s naar de Biesbosch stuurde (Figuur 18), en Wolfert et al. (2004) die vooral de potenties voor natuurontwikkeling verkenden.

6.3.2 Mogelijke gevolgen voor het IJsselmeer

In paragraaf 6.3 is een bouwsteen besproken waarbij een substantieel groter deel van de Rijnaivoer richting de IJssel gestuurd wordt dan nu het geval is. De vraag is wat dat betekent voor de IJssel en het IJsselmeer. De gevolgen voor de IJssel zijn besproken in paragraaf 6.3.1. In de onderhavige paragraaf bespreken we de gevolgen voor de waterhuishouding van en waterveiligheid rondom het IJsselmeer.

Met behulp van het probabilistische model DEZY (HKV, 2020) zijn verschillende verkennende berekeningen gedaan om na te gaan wat de effecten zijn op de dynamiek van het IJsselmeerpeil als meer Rijnaivoer over de IJssel wordt gestuurd in combinatie met (extreme) zeespiegelstijging. Er zijn 1440 varianten doorgerekend waarbij ook de spui- en pompcapaciteit op de Afsluitdijk zijn gevarieerd. Dit zijn alle mogelijke combinaties van:

- Zeespiegelstijging: 0, 1, 2, 3, 4 en 5 m;
- Afvoerhoger, x % (x = 0, 5, 10, 20) extra afvoer over de IJssel (percentage van de Lobithafvoer);
- Spuicapaciteit: a) referentiec capaciteit na oplevering van de geplande nieuwe spuumiddelen bij Den Oever en b) verdubbeling van de referentiec capaciteit ;
- Streefpeil: -0,40; -0,10; 0,20; 0,60 en 1,10 m+NAP;
- Pompcapaciteit: 0, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000 en 5.000 m³/s.

Het IJsselmeer is nauw verbonden met het Markermeer en het Noordzeekanaal. In de berekeningen is aangenomen dat het streefpeil voor het Markermeer en het NZK/ARK (-0.40 m+NAP) ongewijzigd blijft. Aangezien er op de Houtribdijk geen pompen aanwezig zijn, zal zowel het Markermeerpeil als het Noordzeekanaalpeil meestijgen met het IJsselmeerpeil tijdens perioden van hoogwater op het IJsselmeer. Voor de overige uitgangspunten wordt verwezen naar HKV (2020b). Details van de berekeningen staan beschreven in staan beschreven in de bijlage. Hieronder worden de belangrijkste conclusies beschreven.

De zeespiegelstijging en een eventuele afvoertoe name vanuit de IJssel, Vecht en regio hebben een substantiële invloed op de meerpeilstatistiek. Uit de analyses kan geconcludeerd worden dat het installeren van een grote pompcapaciteit effectief is om het meerpeil te reduceren tijdens extreme hoogwaters. De investering die daarvoor nodig is kan een forse besparing opleveren op kosten die gemaakt moeten worden voor dijkverhoging.

Het verdubbelen van de spuicapaciteit heeft slechts een beperkte invloed op overschrijdingskansen van extreme meerpeilen. Toch betekent dit niet dat spuien weinig zinvol is. Als het gemiddelde meerpeil meestijgt met de zeespiegel kan de extra spuicapaciteit in het dagelijks gebruik worden ingezet. Spuien in combinatie met tijdelijke meerpeilstijging is effectiever dan pompen voor het afvoeren van extra IJsselafvoer. Spuien is evenwel alleen mogelijk is als het meerpeil meestijgt met de zeespiegel, waardoor dijkverhoging langs het IJsselmeer en de benedenloop van de IJssel noodzakelijk is om de overstromingskansen niet te laten toenemen. Een hoger meerpeil zal ook een grotere overstromingskans in buitendijks gebied tot gevolg hebben.

Bij een toename van de zeespiegel zal dus de afweging gemaakt moeten worden tussen (een combinatie van) de volgende strategieën:

- in stand houden van het streefpeil door toename van de pompcapaciteit;
- Het laten toenemen van het streefpeil waardoor spuien mogelijk blijft en dijkverhoging noodzakelijk is;
- Minder afvoer over de IJssel (en dus meer over Waal en Lek);
- Accepteren van grotere overstromingskansen voor het achterland.

6.4 | Conclusies

Hoe kan bij een stijgende zeespiegel het water van de rivieren naar zee afgevoerd worden, zodat ook de waterveiligheid gewaarborgd blijft?

Het antwoord op deze vraag is voor drie oplossingsrichtingen beschreven: *Beschermen-open*, waarbij de rivieren en estuaria zo veel mogelijk in open verbinding blijven met de zee en *Beschermen-gesloten* en *Zeewaarts*, waarbij de rivieren en estuaria zoveel mogelijk worden afgesloten met dammen.

Beschermen-open

- De zeespiegelstijging zal steeds verder bovenstrooms invloed hebben op waterstanden en daarmee op overstromingsrisico's; in extremis zelfs tot aan Nijmegen (bij meerdere meters zeespiegelstijging).
- De toename in de rivierwaterstand als gevolg van zeespiegelstijging is substantieel groter bij lage rivierafvoeren dan bij hoge rivierafvoeren.
- In het benedenrivierengebied neemt de waterstand onder gemiddelde omstandigheden bijna even veel toe als de mate van zeespiegelstijging. Voor extreme zeewaterstanden is dat niet het geval vanwege de inzet van de Maeslantkering. De kans op overschrijden van extreme waterstanden in het gebied neemt, zonder aanvullende maatregelen, wel toe als gevolg van zeespiegelstijging.
- Een mogelijk te realiseren reductie van de faalkans van de Maeslantkering (of de opvolger ervan) heeft vooral een groot verlagend effect op extreme waterstanden bij Rotterdam en verder bovenstrooms op de Lek.

Beschermen-gesloten en Zeewaarts

- Het vervangen van de Maeslantkering door een gesloten variant met een sluizencomplex leidt tot een reductie in extreme waterstanden van 0,5 - 1 m in het benedenrivierengebied.
- In de gesloten toestand zal de zeespiegelstijging vrijwel 1-op-1 doorwerken op hoge waterstanden. Dit komt doordat bij hoge afvoeren van de Rijn en Maas een deel van het overtollige water gespuid moet worden en dat kan alleen als de binnenwaterstand hoger is dan de buitenwaterstand.
- Maatregelen als het vergoten van de pompcapaciteit, spuicapaciteit of het beschikbare bergingsoppervlak kunnen hoge waterstanden reduceren, maar zullen in de regel onvoldoende zijn om het overstromingsrisico niet toe te laten nemen bij meerdere meters

zeespiegelstijging. Bij meerdere meters zeespiegelstijging zullen daarom meer ingrijpende maatregelen nodig zijn, zoals:

- Het omleiden Waal en Maas richting zuidwestelijke Delta,
- Het substantieel vergroten van de afvoer over de IJssel,
- Enkele meters dijkverhoging,
- Een zeewaartse variant waarmee veel extra bergingsoppervlakte wordt gecreëerd in de nieuw ontstane binnenmeren,
- Creëren van een veelvoud aan pompcapaciteit.
- De laatste maatregel maakt in theorie alle andere maatregelen overbodig, als daarmee zelfs extreme afvoeren van Rijn en Maas 'instantaan' uitpomp kunnen worden. Dat vraagt echter om een pompcapaciteit van meer dan 10.000 m³/s.

Het aanpassen van de afvoerverdeling als mogelijke bouwsteen voor adaptatie

- Het substantieel vergroten van de afvoercapaciteit op de Rijntakken om meer sturing te kunnen geven aan de afvoerverdeling en andere gebieden te kunnen ontzien is één van de bouwstenen die genoemd wordt in diverse plannen voor adaptatie aan zeespiegelstijging.
- De rivier de IJssel biedt daartoe de beste mogelijkheden. Het IJsseldal is relatief breed waardoor de waterstand beperkt hoger wordt bij hogere afvoeren, de afstand over de IJssel is relatief kort waardoor het verhang relatief groot is en het IJsselmeer biedt extra bergingsruimte om tijdelijk hoge afvoeren in op te slaan.
- Een groter percentage afvoeren over de Waal levert meer ruimtelijke conflicten dan over de IJssel. En de waterstand op de Waal tijdens hoogwatergebeurtenissen zou dan toenemen, terwijl deze in vergelijking met de andere Rijntakken al relatief ver boven het landschap uitkomt.
- Extra water afvoeren over de Lek ligt niet voor de hand. De afstand over de Lek is relatief lang, waardoor het verval klein is, wat het afvoeren van het aanvullende rivierwater bemoeilijkt. Als de Lek niet wordt ontzien of extra water te verwerken krijgt moet het water ergens in het westen weer veilig door of langs het Rijnmondgebied geleid worden; dat levert een grote omweg op.

¹¹ Een groene rivier is een bedijkt afvoertracé, dat alleen bij hoge rivierafvoeren watervoerend is.

Sedimentbouwstenen



Zandmotor, Ter Heijde

Sediment, bestaande uit zand en slib, vormt de basis van onze delta en heeft, naast de keringen en dijken, een belangrijke rol in de bescherming tegen overstroming. In dit hoofdstuk gaan we in op mogelijke bouwstenen die gebruik maken van sediment vter bescherming van kustgebieden. In het bijzonder kijken we naar mogelijkheden voor het natuurlijk land ophogen, het faciliteren van meegroeien van het Waddengebied, en het kunstmatig ophogen van de zeebodem.

De basis van het zandige systeem is het kustfundament. Het kustfundament omvat het gehele zandgebied, nat én droog, dat als geheel van belang is als drager van functies in het kustgebied. De zeewaartse grens van het kustfundament bevindt zich op NAP -20m lijn. Aan de landzijde omvat het kustfundament alle duingebieden én alle daarop gelegen harde zeeweringen. De vooroevers en het strand breken de golven en de duinen vormen de laatste verdedigingslinie. Het slib draagt bij aan de veiligheid als bouwstof van kwelders en slikken, die ook de golven breken voor ze de keringen bereiken.

De hoeveelheid zand dat nodig is om het kustfundament te laten meegroeien met de zeespiegelstijging is eerder in beeld gebracht: met een snellere stijging is meer zand nodig, zo'n 3 à 4 keer meer dan de huidige situatie bij een stijging van 10 mm/jaar, en zo'n 5 keer meer bij 15 mm/jaar (Deltares, 2018; Rijkswaterstaat, 2020). Ook de gevolgen van de zeespiegelstijgsnelheid voor het meegroeien van de bodem van de Waddenzee zijn onderzocht. Bij snellere stijging van de zeespiegel zal het steeds lastiger zijn voor de Waddenzeebodem om in gelijke mate mee te groeien (paragraaf 7.2; Wang et al. 2018, Deltares 2018, Wang et al. 2020, Huismans et al. 2022).

7.1 | Land ophogen met behulp van natuurlijke processen

Er zijn verschillende manieren om binnen- en buitendijkse gebieden in kustsystemen te laten meegroeien met de zeespiegel. Daarmee wordt in dit rapport bedoeld het op een natuurlijke manier ophogen van het land of de waterbodem met behulp van menselijke ingrepen en gebruik makend van natuurlijke processen. Het natuurlijk ophogen van land kan zowel langs de rivieren als in de gebieden waar getij een rol speelt: de estuaria en de kust. Vanwege de lage sedimentbeschikbaarheid in het rivierwater in de Nederlandse delta (Cox et al 2022), focussen we ons hier op de mogelijkheden met meer meegroeipotentie langs de kust en in de estuariene systemen. Binnendijks langs de kust kunnen polders op een natuurlijke manier opslibben via een open verbinding

met het aangrenzende kustsysteem. Dit kan tijdelijk in de vorm van 'wisselpolders', waarbij de polder afwisselend in de tijd wordt ingezet voor meegroei, landbouw of recreatie. Het kan permanent in de vorm van 'dubbele dijken', waarbij tussen twee dijken sediment wordt ingevangen.

Buitendijks kan sedimentatie worden bevorderd door: a) getijdenparken¹² waarbij natuur en recreatie gecombineerd worden met invang van slib, b) dijken met een breed golf-remmend voorland, bestaand uit schorren, kwelders, zeegras of wad en slikplaten, dat meegroeit met zeespiegelstijging, en c) riffen van levende schelpdieren zoals oesters en mosselen die de golfaanval verminderen. Elementen van deze maatregelen worden al in bestaande projecten toegepast, vaak met natuurontwikkeling als doelstelling. Buitendijks meegroeien past vooral bij de oplossingsrichtingen *Beschermen-open* en *Beschermen-gesloten*, terwijl het binnendijks meegroeien meer voor de hand ligt bij de oplossingsrichting *Meebewegen*.

Het meegroeivermogen van een bepaald gebied - het natuurlijke vermogen van een gebied om de relatieve zeespiegelstijging bij te houden - wordt bepaald door de vraag naar sediment, het aanbod van sediment, de frequentie van overstroming en energetische condities (o.a. sterkte van stroming en hoogte van golven). Een indicatie van het meegroeivermogen bij wisselpolders en dubbele dijken kan verkregen worden uit het experiment bij Perkpolder, een gebied in de Westerschelde dat dagelijks twee keer onder water loopt. Na opening van de polder zijn meerdere centimeters sedimentatie per jaar waargenomen (Van de Lageweg et al., 2019). Ook rif-vormende schelpdieren, zoals oesters of mosselen, zorgen voor invang van sediment en bepalen daarmee het meegroeivermogen, mits deze schelpdieren de zeespiegelstijging zelf ook kunnen bijhouden (Wallis et al. 2015; Chowdhury et al. 2019). In de getijdenparken bij de Groene Poort langs de Nieuwe Waterweg zijn lokaal ook meerdere centimeters aangroei per jaar waargenomen (Nijhuis, 2021). Deze getallen zijn in lijn met geobserveerde sedimentatiesnelheden voor landspiegelstijgingsprojecten wereldwijd (Cox et al 2022), welke variëren tussen de 6 mm/jaar tot ruim 200mm/jaar.

De hierboven beschreven manieren van natuurlijk land ophogen met behulp van menselijk ingrijpen zorgen er voor dat schade minder groot is in het geval van een dijkdoorbraak (Zhu e.a. 2020). Daarnaast levert het een meer divers landschap op (landbouw, aquacultuur en natuur) en heeft het een positieve invloed op ecologische ontwikkelingen (Van Belzen et al., 2021). Natuurlijke oplossingen (zoals door het stimuleren of herstellen van kwelder/schorvegetatie) worden al langere tijd en wereldwijd als een kosteneffectieve maatregel voor de

¹² Getijdenparken zijn gebieden die worden ingericht als intergetijdzone langs rivieroevers, in voormalige polders en in havens, met name voor recreatie en natuur en in de stedelijke omgeving ook tegen hittestress en voor verbetering van stedelijke kwaliteit.



kustbescherming gezien (Borsje et al., 2011); Temmerman et al., 2013; Van Zelst et al., 2021). In een hybride vorm, waarbij buitendijkse wetlands de golfloop en daarmee de kracht van water en de hoogte van waterstanden op een dijk verminderen, kan het ook kosten voor dijk aanpassingen besparen (IPCC, 2022b).

7.1.1 | Sedimentbeschikbaarheid voor natuurlijk land ophogen

De potentie van het natuurlijk ophogen van land op grote schaal hangt vooral af van de sedimentbeschikbaarheid in de aangrenzende systemen, de mogelijkheid om het sediment in het gewenste gebied te krijgen en of het daar vervolgens permanent bezinkt. Dit laatste hangt af van lokale karakteristieken zoals getijslag, slibgehalte, aanwezigheid vegetatie en hoogteligging, ook wel de invangcapaciteit genoemd.

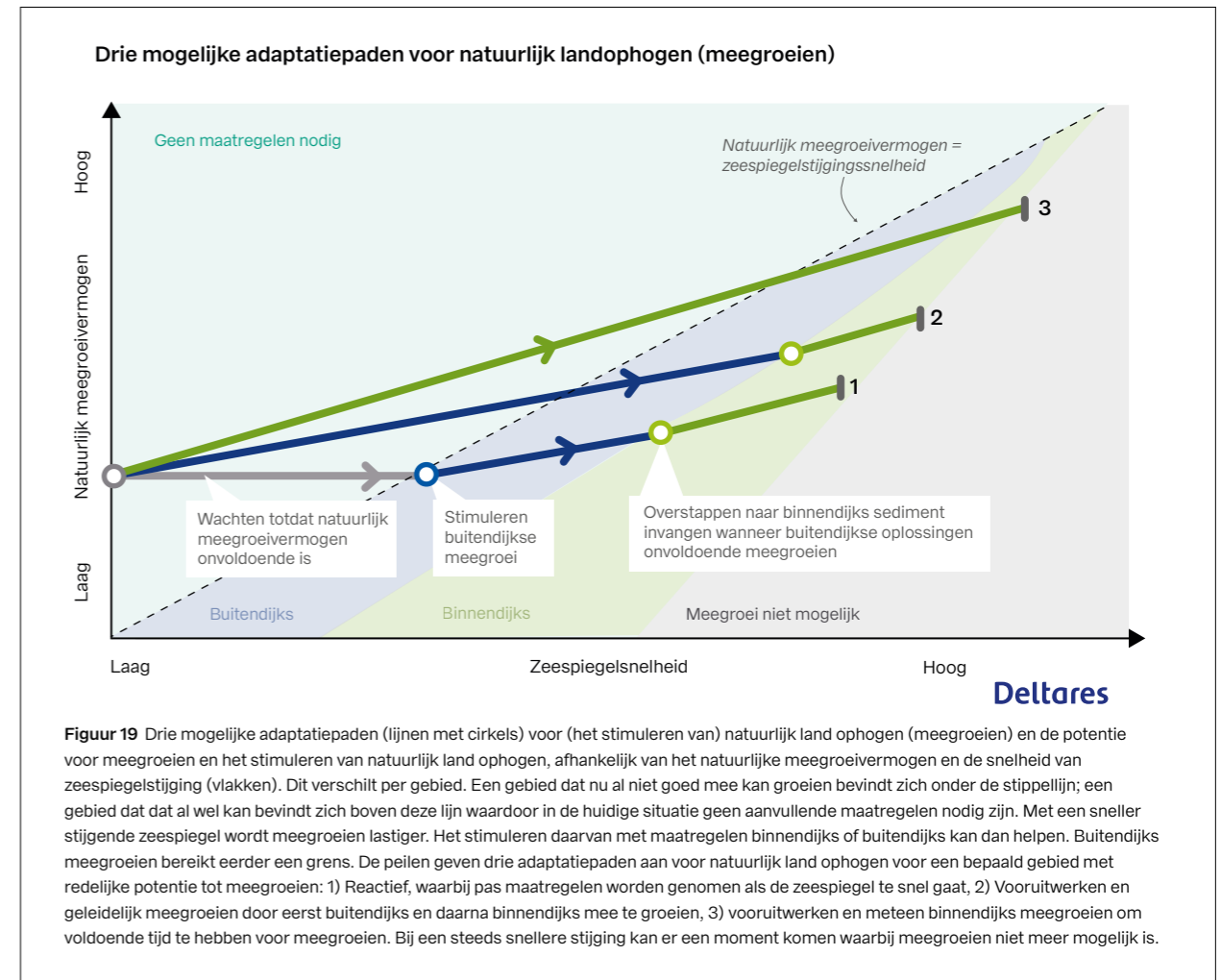
Om een indicatie te krijgen van de potentie (en schaal) van het natuurlijk land ophogen is een illustratieve berekening gedaan op basis de hoeveelheid slib dat jaarlijks de Nederlandse kust passeert via de netto stroming (aangedreven door getij en wind) vanuit de Zeeuwse kust naar Noord-Holland en vervolgens langs de Waddeneilanden (ruim tien miljoen ton slib; Oost et al, 2021). Niet al dat sediment kan worden ingevangen. Voor verschillende invangpercentages van sediment en voor verschillende snelheden van de zeespiegelstijging

is berekend welk oppervlakte met deze hoeveelheid slib kan meegroeien, uitgaande van een dichtheid van het slib na consolidatie van 1500 kg/m³ (Tabel 7). Voor een kust van 100 km (ongeveer de Friese en Groningse kust van Afsluitdijk tot Eems) zou bij een stijging van gemiddeld 10 mm/jaar en een invangpercentage van 50% een strook van ruim 3 km breed kunnen meegroeien. Met dit relatief hoge invangpercentage is het dus beperkt mogelijk om hele kuststroken langs de estuariene systemen mee te laten groeien.

7.1.2 | Wanneer beginnen met stimuleren natuurlijk land ophogen?

Bij toepassing van het faciliteren van het natuurlijk land ophogen op grote schaal is tijdig starten om meerdere redenen gunstig. Ten eerste omdat de beschikbaarheid van sediment een knelpunt kan gaan vormen, vooral wanneer deze bouwsteen op grotere schaal toegepast gaat worden. Hoe eerder sediment ingevangen wordt, hoe langer (en dus meer) sediment in de loop van de tijd aan het meestrijgende kustsysteem toegevoegd kan worden. Ten tweede is er tijd nodig om te experimenteren en leren hoe op te schalen. De huidige voorbeelden zijn namelijk (relatief) kleinschalig en de effectiviteit en mogelijkheid om op te schalen hangt af van het natuurlijke meegroeivermogen. Het moment om te starten met het stimuleren van het natuurlijk land ophogen is daarom ook verschillend per gebied en wordt onder andere bepaald door de snelheid van zeespiegelstijging, de sedimentbeschikbaarheid en de golf- en getijcondities.

Figuur 19 toont een eerste indicatie van adaptatiepaden voor het natuurlijk land ophogen, gemaakt op basis van expert judgement. We maken onderscheid tussen binnendijks en buitendijks stimuleren van natuur land ophogen, en tussen anticiperende strategieën waarin vooruitgewerkt wordt (en er dus meer tijd is om sediment in te vangen) en een reactieve strategie waarin er gewacht wordt met stimuleren totdat de zeespiegelstijging te snel gaat voor het natuurlijke meegroeien:



Figuur 19 Drie mogelijke adaptatiepaden (lijnen met cirkels) voor (het stimuleren van) natuurlijk land ophogen (meegroeien) en de potentie voor meegroeien en het stimuleren van natuurlijk land ophogen, afhankelijk van het natuurlijke meegroeivermogen en de snelheid van zeespiegelstijging (vlakken). Dit verschilt per gebied. Een gebied dat nu al niet goed mee kan groeien bevindt zich onder de stippellijn; een gebied dat dat al wel kan bevindt zich boven deze lijn waardoor in de huidige situatie geen aanvullende maatregelen nodig zijn. Met een sneller stijgende zeespiegel wordt meegroeien lastiger. Het stimuleren daarvan met maatregelen binnendijks of buitendijks kan dan helpen. Buitendijks meegroeien bereikt eerder een grens. De peilen geven drie adaptatiepaden aan voor natuurlijk land ophogen voor een bepaald gebied met redelijke potentie tot meegroeien: 1) Reactief, waarbij pas maatregelen worden genomen als de zeespiegel te snel gaat, 2) Vooruitwerken en geleidelijk meegroeien door eerst buitendijks en daarna binnendijks mee te groeien, 3) vooruitwerken en meteen binnendijks meegroeien om voldoende tijd te hebben voor meegroeien. Bij een steeds snellere stijging kan er een moment komen waarbij meegroeien niet meer mogelijk is.

- Pad 1 “Reactief”. Een pad waarbij niet vooruitgewerkt wordt en waarbij pas wordt gestart met maatregelen als het buitendijkse gebied niet meer op natuurlijke wijze kan meegroeien met de zeespiegel. In dat geval worden eerst maatregelen genomen om buitendijkse groei te stimuleren (zie paragraaf 7.1). Pas als dit bij verdere zeespiegelstijging onvoldoende is, wordt overgestapt op het invangen van sediment binnendijks.
- Pad 2 “Vooruitwerken en buitendijks beginnen”. Een pad waarbij al gestart wordt met het buitendijks stimuleren van de meegroei, vóórdat deze gebieden niet meer op natuurlijke wijze kunnen meegroeien. Hierdoor wordt een voorsprong opgebouwd en wordt pas bij een hogere zeespiegelstijging de limiet bereikt waarbij de buitendijkse gebieden niet meer mee kunnen groeien. Daarna kan worden overgestapt op binnendijks invangen.
- Pad 3 “Vooruitwerken door binnendijks te stimuleren”. Bij dit pad wordt al gestart met binnendijks invangen, vóórdat de buitendijkse gebieden niet meer op natuurlijke wijze kunnen meegroeien. Omdat sediment binnendijks makkelijker kan worden vastgehouden doordat daar typisch luwere condities zijn, heeft deze optie de potentie

om sneller mee te groeien en een grotere voorsprong te nemen dan bij meteen buitendijks stimuleren. Resultaat van deze strategie is dat de limiet waarbij buitendijks en binnendijks meegroeien niet meer mogelijk is pas optreedt bij een hogere zeespiegelstijging (verder in de toekomst) dan bij de andere twee strategieën.

De adaptatiepaden (pijlen) in Figuur 24 laten zien dat eerder ingrijpen in het systeem tot gevolg heeft dat er tot grotere waarden van zeespiegelstijging meegegroeid kan worden (pijl komt hoger). Bij binnendijks meegroeien kan sneller een voorsprong behaald worden (steilere pijl, komt hoger uit). Indicatieve berekeningen van Van Belzen et al. (2021) tonen dat elk decennium uitstel ongeveer een jaar extra aan meegroei vergt. Voor een nadere uitwerking van de potentie en timing van natuurlijk land ophogen op langere termijn en effecten op de omgeving zijn grootschalige pilots en studies nodig. Deze vertraging bij een latere opening van een polder wordt ook onderschreven door modelberekeningen van Weisscher et al. (2022).

Tabel 7 Indicatieve berekening van het oppervlak (in km²) dat kan meegroeien met de zeespiegelstijging, uitgaande van de totale hoeveelheid slib dat jaarlijks de Nederlandse kust passeert (10 miljoen ton).

Invang-percentage slib	Snelheid zeespiegelstijging in mm/jaar			
	5	10	15	20
10%	133	67	44	33
30%	400	200	133	100
50%	667	333	222	167

7.2 | Meegroeien van de bodem van de Waddenzee

7.2.1 Bouwstenen voor het stimuleren van het meegroeien

Bij versnelde zeespiegelstijging kan de bodem van de Waddenzee niet meer volledig meegroeien met de zeespiegel. Geulen zullen dan dieper worden en het plaatareaal zal afnemen. Schattingen voor deze kritische grens van zeespiegelstijging zijn rond de 6 à 7 mm/jaar voor de bekkens in de Westelijke Waddenzee en meer dan 10 mm/jaar voor de bekkens in de Oostelijke Waddenzee (Wang et al. 2018). Wanneer deze grens structureel wordt overschreden verdrinken op termijn de wadplaten volledig. Het moment waarop dat gebeurt is afhankelijk van de mate van overschrijding van deze kritische grens. Recente berekeningen suggereren dat bij een versnelling van de zeespiegelstijging naar 17 mm/jaar in het jaar 2100 (in dat scenario is er 78 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 2000), het verlies in hoogte en plaatareaal voor de grote bekkens in 2100 tussen de 20 en 50% ligt, zie Figuur 20. Dit betreft het hoogteverlies ten opzichte van de (stijgende) zeespiegel. De kleine bekkens zitten in dit scenario alle nog onder de kritische grens, maar verliezen wel in areaal en hoogte (<20%; Huismans et al. 2022).

Er zijn verschillende maatregelen die het Waddengebied en kwelders kunnen helpen mee te groeien. Daarvoor moet wel voldoende zand beschikbaar blijven in de kustzone, ook voor transport het bekken in. Dit kan

bevorderd worden door het uitvoeren van zandsuppleties aan de Noordzeekant van de eilanden. Het versterken van meegroeien in het Waddengebied zelf, kan door a) het versterken van de sediment import; b) het suppleren van sediment in de Waddenzee; c) het beter vasthouden van sediment, door kleinschalige maatregelen en d) door grootschalige geometrische ingrepen (Figuur 21).

Versterken van de sedimentimport

Door sediment te suppleren op strategische locaties in het zeegat, op de buitendelta of langs de aanliggende eilanden kan de sedimentimport van het bekken¹³ versterkt worden. De meest effectieve manier om veel zand het bekken in te krijgen is door middel van suppleties in het diepste deel van het zeegat. Hier treden grote stroomsnelheden op, waardoor het suppletiemateriaal zich snel herverdeelt en grote hoeveelheden kunnen worden aangebracht. Een deel van dit materiaal zal rechtstreeks het bekken in getransporteerd worden en een deel verspreid zich richting de buitendelta, waar het bijdraagt aan de instandhouding van de kustzone. Dankzij natuurlijke sortering van het sediment komt het type sediment dat het meest geschikt is voor een bepaalde locatie ook daar terecht, namelijk de grovere fractie in de geulen en op de buitendelta en de fijnere fracties verder weg in het bekken en op de platen.

Bij dit type suppletie hangt het van de natuurlijke processen af waar het sediment terechtkomt. Dit zal niet altijd precies daar zijn waar het voor veiligheid of de natuurdoelstellingen

het meest nodig is. Door rekening te houden met de korrelgroottesamenstelling van het sediment, valt hier mogelijk in te sturen maar dit zal mogelijk kostenverhogend werken. Het kan jaren tot mogelijk tientallen jaren duren voordat de suppleties helpen om gebieden ver weg van het zeegat substantieel mee te laten groeien. In welke mate de sedimentimport versterkt kan worden is onbekend. Op basis van expert-beoordeling wordt geschat dat het totale transport (natuurlijk en ten gevolge van suppleties) in de orde ligt van tien miljoen m³/jaar, en wellicht zelfs hoger. Bij een suppletie in de Westerschelde verspreidde het sediment vanuit de suppletielocatie zich met een snelheid oplopend tot enkele miljoenen m³/jaar (Huismans, 2022). Het is aannemelijk dat de snelheden in het diepste deel van de zeegaten tussen de Waddeneilanden minimaal even groot zijn, of zelfs groter. Voor de zeegaten tezamen resulteert dit dan een transportcapaciteit van orde grootte 10 miljoen m³/jaar, en in het gunstigste geval zelfs meer.

Het is met de bestaande kennis nog niet te voorspellen of het sediment zich voldoende over het bekken kan verspreiden en dus ook niet of het effectief is om platen achter in het bekken mee te laten groeien. Als dit het geval is, zou dit bij gelijke verspreiding uitkomen op ongeveer een halve meter per eeuw, en mogelijk meer. Een combinatie van veldproeven en modelsimulaties is nodig om dit nader te bepalen.

Suppleren van sediment in de bekkens

Voor suppleties in het bekken geldt dat dit een aanpassing van beleid en regelgeving vraagt, omdat het momenteel niet is toegestaan om in de Waddenzee te suppleren. In principe zijn er bij suppleren in een bekken twee opties: suppleren in de geulen of direct op de platen. Bij suppleren in de geulen komt door de natuurlijke dynamiek in het systeem (een deel van) het sediment op de platen terecht. Voorwaarde is dat de stroomsnelheden in de geulen voldoende groot zijn (zie De Vet e.a., 2020 voor een voorbeeld in de Westerschelde). Voordeel van dit type suppletie is dat het sediment vrij snel (naar schatting in de orde van maanden tot enkele jaren) bijdraagt aan substantiële aangroei van de platen en er geen of alleen een tijdelijke verstoring plaatsvindt van de ecologie op de platen zelf. Nadeel van deze optie is dat sediment van buiten het bekken naar binnen moet worden gebracht. Verder is het niet zeker of stroomsnelheden in de Waddenzee voldoende groot zijn voor dit type suppletie.

Bij het suppleren op de platen wordt sediment direct op de plaat gebracht. Hierbij zijn twee opties denkbaar, waarbij het sediment ofwel uit de geulen van het bekken wordt gehaald, ofwel van buiten het bekken komt. Suppleren met sediment uit het bekken heeft als nadeel dat de geulen verder verdiepen. In een verdiepte geul gaat de stroming langzamer en neemt het vermogen om zand vanuit de geulen naar de platen te transporteren af, met minder



Engelschoek tussen Vlieland en Terschelling

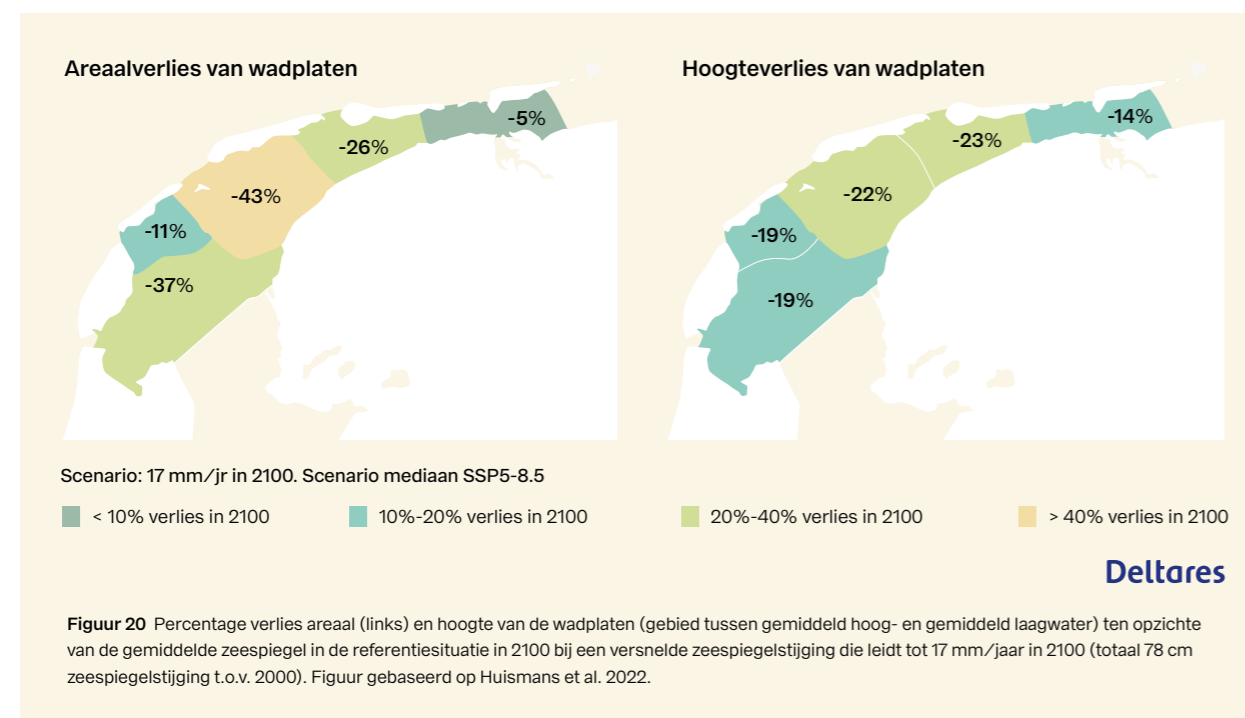
plaatgroei, of zelfs meer erosie tot gevolg. Bij het suppleren met sediment van buiten het bekken is dit minder het geval, maar dat heeft als nadeel dat sediment over grote afstanden verplaatst moet worden.

Recente projecten in de Oosterschelde hebben laten zien dat met dit soort suppleties succesvol ruim een miljoen m³ per plaat aangebracht kan worden ten behoeve van ecologie (zie onder meer van der Werf et al. 2015, 2019 en Walles et al. 2021). Hoewel dit type suppletie op korte termijn effectief kan zijn, wordt het areaalverlies niet structureel opgelost en is er sprake van (tijdelijke) verstoring van de ecologie. Ook is de schaalbaarheid onzeker. Daarmee lijkt dit type suppletie alleen geschikt voor het gericht laten meegroeien van enkele platen, in het bijzonder die met de belangrijkste ecologische waarden, die met andere oplossingen niet- of onvoldoende meegroeien.

Voor het evenwichtig laten meegroeien van de zandige en slibrijke platen is voldoende aanbod van slib van belang. Hoewel slib momenteel in ruim voldoende mate aanwezig is, kan dit op termijn veranderen als gevolg van een toegenomen vraag door zeespiegelstijging. Om slibrijke platen en kwelders op te hogen, kan overwogen worden slibsuppleties uit te voeren met slib uit baggerwerken. Nader onderzoek is nodig om de haalbaarheid hiervan te bepalen, omdat het door de golfwerking en wind-gedreven stroming niet vanzelfsprekend is hoe slib vastgehouden kan worden op platen (Baptist et al. 2019).

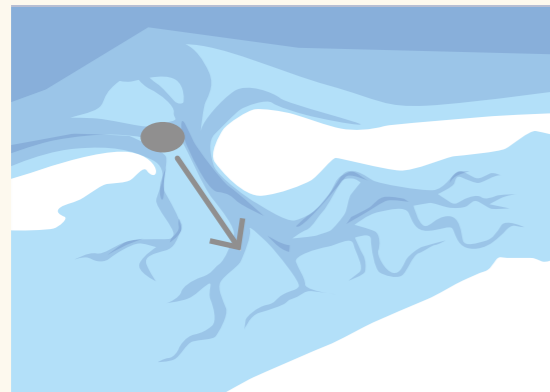
Sediment beter vasthouden met kleinschalige maatregelen

Een andere optie om delen van de Waddenzee meer mee te laten groeien is het beter vasthouden van sediment dat elk getij in en uit het systeem stroomt. Met het invangen van slib is ruime ervaring opgedaan; de kwelderwerken zijn hier een voorbeeld van. Door aanleg van bijvoorbeeld

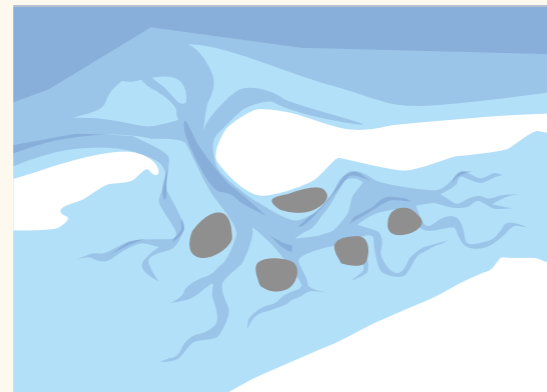


¹³ een deel van het waddengebied waarbinnen het sediment verspreid wordt

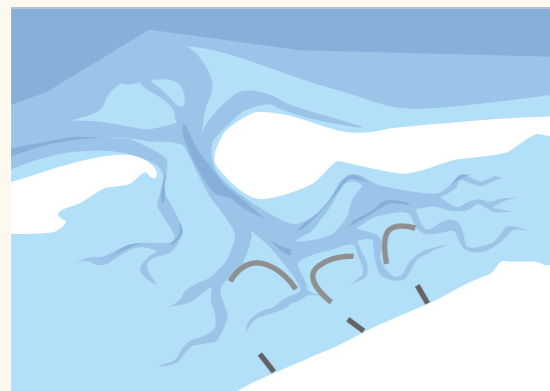
Versterken import



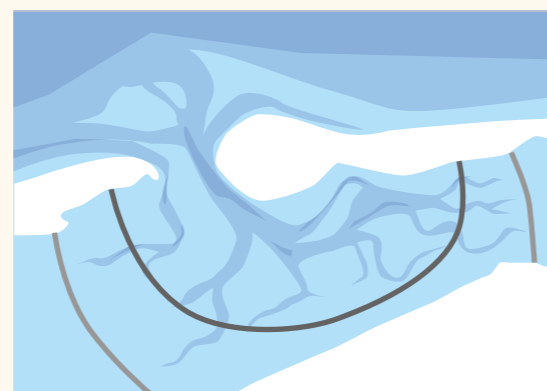
Suppleties in het bekken



Sediment beter vasthouden



Grootschalige ingrepen



Figuur 21 Mogelijke bouwstenen om het Waddengebied (beter) te laten meegroeien met een snellere zeespiegelstijging. Onderstaande tabel ligt de bouwstenen en hun voor en nadelen toe.

Deltares

Mogelijke bouwstenen	Voor- en nadelen	Voornaamste kennislacune
Versterken import import van sediment versterken via suppletie van sediment in de keel van het zeegat.	+ grote suppleties mogelijk + geen of beperkte verstoring ecologie + natuurlijke sortering sediment - beperkte invloed op waar het sediment terecht komt - langere tijd sediment gebieden achterin bereikt - geen structurele oplossing	Met hoeveel de sedimentimport versterkt kan worden en waar het in het bekken terecht komt.
Suppleties in het bekken suppleties in de Waddenzee zelf, in de geulen of direct op de platen.	+ ervaring met deze methode (Oosterschelde en Westerschelde) + meegroei van platen instantaan tot maximaal enkele jaren+ grote invloed op waar sediment terecht komt - nu niet toegestaan om in de Waddenzee te suppleren - (tijdelijke) verstoring ecologie bij suppletie op de plaat - langere vaarafstanden voor suppleren - geen structurele oplossing	Tijdschaal herstel ecologie na plaatsuppletie, technische en praktische realiseerbaarheid bij opschaling.
Sediment beter vasthouden op lokale schaal het sediment dat elk getij in en uitstroomt beter vasthouden.	+ ervaring met methode m.n. slib in kwelders + effectiever dan suppletie voor vasthouden sediment- onbekend of meegroei van platen voldoende is - risico op sterke meegroei van de kwelders dan wadplaten	Hoe kan sediment op de platen beter vast gehouden worden en hoe dit te verdelen over we verschillende gebieden.
Grootschalige ingrepen grootschalige aanpassingen zoals compartimentering om delen van het systeem sneller laten meegroeien.	- geen ervaring met deze schaal - risico op negatieve gevolgen vanwege verstoring complexe dynamiek	Kennis van hoe grootschalige ingrepen het complexe samenspel van sediment, getij en wind beïnvloeden en wat hier de gevolgen van zijn.



Domburg, Zeeland

rijdsdammen, worden luwten gecreëerd waar slib beter bezinkt en waar, na voldoende aanslibbing, ook vegetatie ontstaat. Verwacht wordt dat kwelders goed mee kunnen groeien met de stijgende zeespiegel, mits ze niet eroderen door golfaanval. Zolang de wadplaten voor de kwelders intact blijven, zullen golven voldoende gedempt worden om grootschalige erosie te voorkomen en hoeft de kweldergeroei naar verwachting voorlopig niet extra gestimuleerd te worden. Een potentieel risico van een sterke meegroei van de kwelders ten opzichte van de wadplaten is dat de resulterende steilere overgang tussen plaat en kwelder leidt tot de vorming van een klif. Een dergelijk klif leidt tot erosie van het kweldergebied. Hierdoor zal het kwelderareaal afnemen, terwijl de kwelders nog wel verticaal aanslibben (zoals nu in de Oosterschelde gebeurt). Het is daarom belangrijk dat de maatregelen de meegroei van platen en kwelders op een evenwichtige manier stimuleren. Met het invangen van zand op de platen is nog geen ervaring. Mogelijk kan met hoge zanddammen, die boven water op de platen worden aangebracht, luwten worden gecreëerd waar zand tijdens stroomkentering kan bezinken. Zo hebben stuifdijken de afschermende werking van Rottumerplaat en Rottumeroog voor het achterliggende wad versterkt, waardoor daar grote, in de luwte liggende plaatcomplexen zijn behouden.

Grootschalige ingrepen

Tot slot zijn er nog grootschalige ingrepen denkbaar om sediment beter vast te houden of delen van de Wadden beter mee te laten groeien. Door de verstoring van de

grootschalige dynamiek is de haalbaarheid en gevolgen van dit soort ingrepen onzeker en kunnen ze mogelijk zelfs in het tegenovergestelde effect resulteren, namelijk erosie in plaats van meegroeien.

Twee opties binnen de categorie grootschalige maatregelen zijn het verkleinen van bekkens of het compartimenteren van de Waddenzee. De achterliggende gedachte bij het verkleinen van bekkens is dat kleinere bekkens makkelijker meegroeien, omdat er minder sediment nodig is om mee te groeien en het sediment minder ver het systeem in getransporteerd hoeft te worden. Bij het substantieel verkleinen van de bekkens wordt een deel van het intergetijdegebied opgegeven, ten behoeve van meegroei van het resterende deel van het intergetijdegebied. Bij verkleining van het bekken zal de getijdynamiek veranderen, zoals is waargenomen in de Oosterschelde na aanleg van de Deltawerken en zoals waargenomen na de afdamming van de Lauwerszee. Door de afname van de komberging worden de geulen te groot voor de hoeveelheid water die in- en uitstroomt. Door deze verandering in de getijdynamiek zal eerst juist erosie van platen optreden. Pas als na decennia voldoende sediment is aangevoerd om de geulen te verkleinen, zullen de platen weer gaan meegroeien. Indien gelijktijdig sprake is van versnelde zeespiegelstijging, zal dit laatste mogelijk niet meer gebeuren.

Compartimentering van de Waddenzee kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door het aanleggen van (zand) dammen op de wanttijen. Hiermee kan meer slib worden

Tabel 8: Berekend beschikbaar zandvolume in wingebieden nabij het Waddengebied. Zie methode voor toelichting op de uitsluitingsgebieden en scheepvaartroutes. De toevoeging tussen haakjes is een schatting voor het nog uit te sluiten oppervlak voor winning, i.v.m. aanwezigheid van explosieven (-10%). Met andere keuzes (bijv. ten aanzien de maximale winddiepte) of wanneer grotere vaarafstanden worden geaccepteerd, wordt het beschikbare volume groter.

Zandvolumes	Wingebied	Zone		Totaal
		West	Oost, incl. Eems	
Volume zand beschikbaar tussen NAP -20 m en 12 nautische mijl; max. winddiepte 12 m (miljard m³)	nabije deel reserveringsgebied	9.7	5.8	15.5 (-1.5)
	nabije deel reserveringsgebied, uitsluitingsgebieden cf. huidig beleid	5.7	3.7	9.4 (-0.9)
	nabije deel reserveringsgebied, uitsluitingsgebieden cf. huidig beleid, exclusief scheepvaartroutes	3.5	2.1	5.6 (-0.6)

vastgehouden en worden extra luwtegebieden gecreëerd waar zand makkelijker vastgehouden kan worden. Het is echter niet evident hoe deze zanddammen succesvol aan te leggen en ook voor deze maatregel geldt dat door verandering van het complexe samenspel van sediment, getij en wind, grote onvoorziene nadelige effecten kunnen optreden (Wang en van der Weck, 2002).

7.2.2 | Sedimentbeschikbaarheid en -behoefte om te kunnen meegroeien

Sedimentbeschikbaarheid

Voor het meegroeien van de bodem van de Waddenzee en de aangrenzende kustzone is vooral zand nodig (naast slib). Om een indicatie te krijgen van hoeveel zand er beschikbaar is in het gebied dat bestemd is voor zandwinning (het reserveringsgebied), zijn illustratieve berekeningen gedaan, conform de methode beschreven in hoofdstuk 2. Hierbij is uitgegaan van het huidige reserveringsgebied (tussen de 12-nautische mijlsgrens en de voet van het kustfundament op -20 m NAP) en een winddiepte tot 12 meter diep in Noordzeegebied dat nabij de Waddenzee ligt. In dit gebied is maximaal zo'n 15 miljard m³ zand beschikbaar (Tabel 8). In de praktijk is dit echter minder, omdat niet alles gebruikt mag of kan worden, zoals bijvoorbeeld in gebieden met windparken, kabels en leidingen en Natura 2000 gebieden. Indien hier rekening mee wordt gehouden neemt de beschikbare hoeveelheid zand af tot zo'n 10 miljard m³. Daarnaast wordt momenteel niet gewonnen in scheepvaartgeulen. Als ook deze gebieden niet meegenomen worden in de schattingen, is ongeveer 5 miljard m³ zand beschikbaar.

Sedimentbehoefte

De beschikbaarheid kan afgezet worden tegen de verwachtingen over de sedimentbehoefte onder toekomstige beleidsscenario's. In het Kennisprogramma

Zeespiegelstijging, onderdeel Zandige Kust, wordt hier nader onderzoek naar gedaan. Hier volstaan we met een paar indicatieve berekeningen. Voor het kustfundament nabij het Waddengebied is, uitgaande van het volledig meestijgen, voor iedere meter zeespiegelstijging bijna 2 miljard m³ nodig. Dit volume is geschat op basis van het oppervlak van het kustfundament (grens bij NAP -20 m). In de praktijk zal het benodigde volume kleiner zijn, wanneer in lijn met de huidige strategie zal worden gestuurd op het behoud van de basiskustlijn en niet op het opheffen van het hele kustfundament.

Elias et al (2012) hebben een eerste schatting gemaakt van de hoeveelheid sediment (zand en slib) dat in de Waddenzee terecht kan komen via natuurlijk transport. Over een periode van 80 jaar (in de vorige eeuw), is in totaal 575 miljoen m³ afgezet in een gebied dat in oppervlakte gelijk is aan 4/5 van het totale Waddengebied. Dat is dus gelijk aan ongeveer 7 miljoen m³ per jaar. Deze schatting is in lijn met indicatieve modelberekeningen (Wang & Lodder, 2019, Lodder et al., 2022). Om een schatting te kunnen maken van de toekomstige sedimentvraag, is als voorbeeld een constante stijging van 17 mm/jaar aangenomen, conform de snelheid van zeespiegelstijging in 2100 bij het RCP8.5-scenario (Vermeersen et al., 2018). In dat scenario stijgt de zeespiegel 1 m in 59 jaar tijd. Bij een vergelijkbare sedimentimport als afgeleid in Elias et al (2012) van 7 miljoen m³ per jaar, is de sedimentimport in een periode van 59 jaar in de orde van grootte van 0,4 miljard m³. Dit is een grove schatting om een idee te krijgen van de orde grootte van de hoeveelheid sediment die op natuurlijke wijze in de Waddenzee terecht kan komen. Het is afhankelijk van onder meer het verloop van de zeespiegelstijging hoeveel sediment er per meter zeespiegelstijging in de Waddenzee terecht kan komen. Om volledig mee te groeien met 1m zeespiegelstijging zou 2 miljard m³ nodig zijn, los van of dit fysisch of praktisch mogelijk is en/of nodig is voor de gebruiksfuncties.

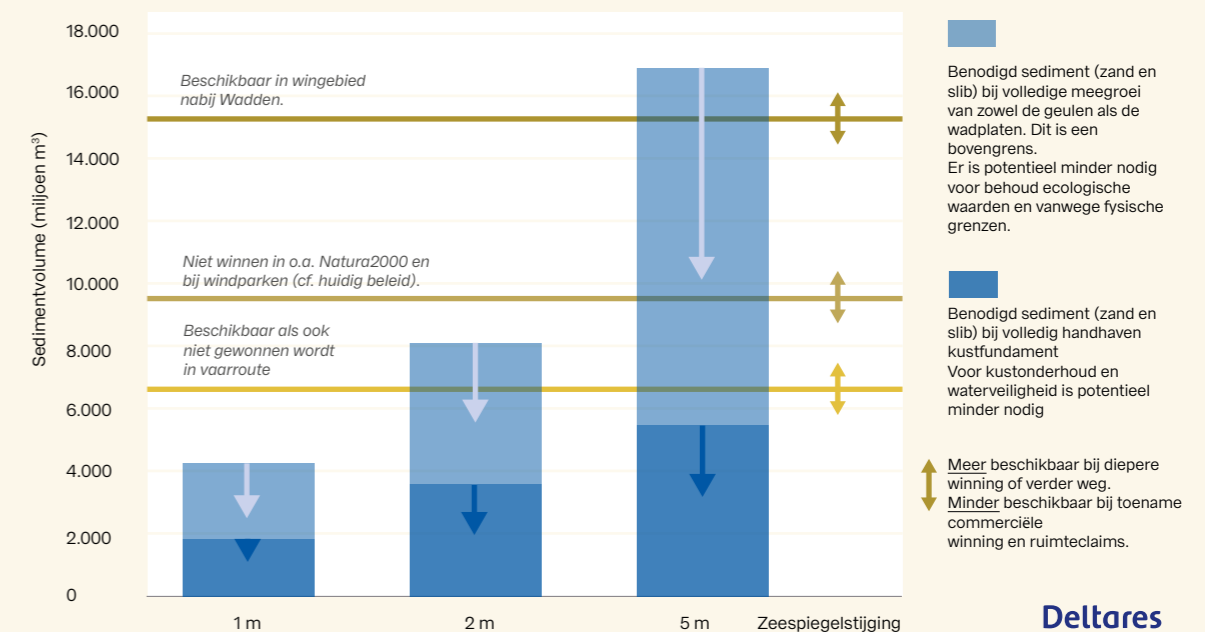
Figuur 22 toont de beschikbaarheid en potentiële benodigdheid om mee te groeien met zeespiegelstijging. De sedimentbeschikbaarheid, weergegeven met horizontale lijnen, is geschat voor a) het reserveringsgebied nabij de Wadden, b) hetzelfde gebied met uitsluiting van Natura2000 gebied en windparken (conform huidig beleid), en c) wanneer ook vaartroutes uitgesloten (Tabel 8). Een toename van (commerciële) winning en ruimtegebruik kan de leiden tot een afname van het beschikbaarheid. Meer zand is beschikbaar als dieper en/of verder weg gewonnen wordt.

Een vergelijking met het sedimentbehoefte geeft inzicht in of hier mogelijk problemen gaan ontstaan. De staafdiagrammen geven aan hoeveel sediment er nodig is om het Waddengebied en het kustfundament in het Waddengebied volledig te laten meegroeien met de zeespiegelstijging. Voor het kustfundament is er naar verwachting minder nodig om de kustveiligheid te waarborgen. Ook voor de sedimentbehoefte van de Waddenzeebodembodem gaat het om een bovengrens, omdat in dat geval zowel de wadplaten en de geulen geheel meegroeien. Voor natuur zijn vooral de wadplaten van belang en is dus minder sediment nodig. Zoals hierboven

geschetst het is waarschijnlijk ook fysisch niet mogelijk om volledige meegroei te realiseren.

Uit deze vergelijking van zandbeschikbaarheid en behoefte, blijkt dat er voorlopig geen knelpunten lijken te ontstaan, mits dit zand beschikbaar blijft voor meegroeien van het Waddengebied. Er zijn echter ook andere gebruiksfuncties die hier aanspraak op maken, zoals zandwingebieden voor commerciële winning van m.n. ophoogzand. Dit benadrukt het belang van beleid dat gericht is op het beschikbaar houden van de zandvoorraden voor kustbeheer. Bij een steeds sneller stijgende en hogere zeespiegel loopt de kans op dat niet meer voldoende (goed winbaar) zand beschikbaar is in de buurt van het Waddengebied en alleen verder weg beschikbaar is tegen sterk oplopende maatschappelijke kosten. Of er daadwerkelijk knelpunten ontstaan, en wanneer, hangt enerzijds af van beleidskeuzes ten aanzien van de beschikbaarheid (waar en tot welke diepte gewonnen kan en mag worden en toekomstige maatschappelijke en planologische ontwikkelingen) en anderzijds van de mogelijke en benodigde (voor functies veiligheid en natuur) meegroei van het Waddengebied.

Sedimentbeschikbaarheid en benodigdheid voor meegroeien met zeespiegelstijging in het Waddengebied



Figuur 22 Sedimentbeschikbaarheid en sedimentvraag voor meegroei van het Waddengebied. De horizontale lijnen geven de sedimentbeschikbaarheid aan in a) het totale potentiële wingebied nabij de Wadden, b) in hetzelfde wingebied maar met uitsluiting van Natura2000 gebieden en windparken (conform huidig beleid), en c) als ook niet wordt gewonnen in vaartroutes (zie tabel 5). Pijlen omhoog en omlaag geven aan dat er respectievelijk meer (diepere winning of verder weg) of juist minder (bij toename gebruik of ruimtebeslag andere functies) beschikbaar kan zijn. De staafdiagrammen geven aan hoeveel sediment nodig is met volledige meegroei van het kustfundament (donkerblauw) en de Waddenzee (blauw). Dit is een bovengrens. De pijlen omlaag geven aan dat er in de praktijk waarschijnlijk minder nodig zal zijn, als het sedimentbeheer zich primair richt op behoud van de functies veiligheid en natuur.



Egmond aan Zee

7.3 | Kunstmatig land ophogen

Naast het natuurlijk ophogen van land is het ook mogelijk om land kunstmatig op te hogen. Dat gebeurt nu al bij nieuwbouwwijken om land te stabiliseren, maar het kan nog grootschaliger en hoger, bijvoorbeeld in het geheel ophogen van diepe polders voor er gebouwd gaat worden. Het ophogen van land is een beproefde methode, maar moet wel worden afgewogen tegen de hoeveelheid beschikbaar sediment (en kosten); er is in de regel namelijk veel sediment voor nodig. Ter illustratie: het ophogen van de Haarlemmermeer tot +5 m NAP is ongeveer 2000 miljoen m³ nodig (100 keer het volume van de zandmotor; de huidige maaiveldhoogte van het Haarlemmermeer varieert grofweg tussen NAP-1m en NAP-5m). Ter vergelijking: voor het aanleggen van 3 eilanden ter grootte van Texel in de oplossingsrichting *Zeewaarts* voor een zeespiegelstijging van 2 m is het totale zandvolume ongeveer 20.000 miljoen m³ nodig (1000 keer zo veel als de zandmotor; Deltares 2019). Met eenzelfde volume kan de gehele kust van Noord en Zuid-Holland 2,5 km worden uitgebouwd.

7.4 | Sedimentstrategieën integraal evalueren

Het natuurlijk land ophogen binnendijs en buitendijs, dan wel het (stimuleren) van het meegroeien van het Waddengebied moet in samenhang/integraal bekeken worden. Het sediment (zand en slib) kan immers maar één keer gebruikt worden en er zijn andere functies met een sedimentvraag. Gebieden waar sediment gewonnen kan worden, worden mogelijk ingezet voor andere doeleinden, zoals windmolens, transport of eilanden. De sedimentstromen tussen de gebieden zijn gekoppeld en vormen een gesloten balans. Het gaat hier om grofweg drie systemen: 1) het langtransport van sediment van de Zeeuwse kust, langs de Hollandse kust en daarna langs de Wadden richting Duitsland, 2) de Zeeuwse estuaria, benedenrivierengebied en de Waddenbekkens (zie Figuur 20), 3) de lokale kustgebieden (bijv. kwelders).

Het gebruik van sediment moet gefaciliteerd worden uit de aangrenzende gebieden en kan betekenen dat andere gebieden nadelige gevolgen ondervinden. Bovendien heeft het gevolgen voor de hoeveelheid sediment dat de buurlanden bereikt. In dit kader kan het relevant zijn om integraal af te wegen waar welke sediment maatregelen het beste kunnen worden ingezet en nader te specificeren hoe de sedimentbeschikbaarheid en vraag veranderen over de tijd, met name voor het bepalen van de schaalbaarheid van dit type maatregelen.

7.5 | Conclusies

Sediment kan worden ingezet om kustgebieden te helpen om op natuurlijke wijze mee te laten groeien met de zeespiegelstijging. Dit hoofdstuk bespreekt een aantal sediment-bouwstenen en de mate waarin sediment voldoende voorradig is daarvoor. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen zand en slib, omdat de beschikbaarheid en geschiktheid voor maatregelen anders is.

Zand is voorradig in de Noordzeebodem en wordt via suppleties op de kust aangebracht om mee te groeien. In de toekomst kunnen zandsuppleties mogelijk ook worden ingezet om de Waddenzee beter te laten meegroeien. Zandsuppleties in de zeegaten lijkt van de onderzochte bouwstenen het meest aantrekkelijk omdat hiermee veel zand te verspreiden is en op een natuurlijke manier in het bekken verspreid wordt. De overige bouwstenen kunnen mogelijk lokaal en aanvullend werken. Het betreft hier echter een verkennende analyse van sediment-bouwstenen voor het Waddengebied en aanvullend onderzoek is nodig om dit nader te bepalen.

Voor het meegroeien van de bodem van de Waddenzee en het kustfundament moet er voldoende zand zijn. Hoewel er veel zand voorradig is, is dat niet zonder meer voldoende voor alle beschouwde beleids- en zeespiegelstijging scenario's. Dit benadrukt het belang om tijdig voldoende zand te reserveren voor kustonderhoud. Door parallel

meer kennis op te doen over de zandbeschikbaarheid en zandbehoefte kan bepaald worden of er knelpunten gaan ontstaan en wanneer.

Slib is fijn sediment dat voorradig is in waterkolom. Het kan worden benut door diverse manieren van natuurlijk land ophogen, zoals dubbele dijken en wisselpolders. Praktijkvoorbeelden laten zien dat bij de juiste condities deze bouwsteen mogelijkheden bieden om mee te groeien met de zeespiegel. De mate waarin is afhankelijk van de invangcapaciteit van het sediment en de snelheid van de zeespiegelstijging. Bij het opschalen van deze concepten zijn tijdigheid en ruimtelijke integraliteit essentieel. Bij zeer grootschalig en tijdig toepassen zou in theorie met deze bouwsteen een strook langs de kust worden opgehoogd en daarmee helpen het achterland te beschermen in combinatie met dijken of aangepast bouwen. Hoe eerder gestart wordt, hoe meer sediment er ingevangen kan worden en hoe meer de kuststrook kan worden opgehoogd.

Het op ruimtelijke schaal integraal beschouwen van deze bouwsteen is om twee redenen van belang. Ten eerste omdat het invangen van slib effect heeft op de beschikbaarheid van slib in het aangrenzende systeem. Ten tweede omdat de mate van zeespiegelstijging en de locatie van toepassen van deze bouwsteen mede bepalend zijn voor wat de beste timing en combinatie is van binnen- en buitendijkse meegroeiconcepten.



Zandbank, Ameland

Benodigde tijd voor aanpassen



Dijk, Rozenburg

Wereldwijd bestaat er een ‘adaptatiegat’ tussen enerzijds benodigde en geplande adaptatie en anderzijds tussen geplande en gerealiseerde adaptatie, om gevolgen van klimaatverandering voldoende te reduceren (IPCC, 2022b). In Europa wordt progressie gemaakt met het aanpassen aan de huidige en toekomstige gevolgen van klimaatverandering. Steeds meer landen, regio’s en steden in Europa ontwikkelen klimaatadaptatiebeleid. Ook is er meer geld beschikbaar voor adaptatie en is het bewustzijn over de gevolgen van klimaatverandering en noodzaak tot adaptatie toegenomen. Diverse adaptatiemaatregelen zijn uitgevoerd, maar veel van deze maatregelen zijn kleinschalig en er zijn weinig voorbeelden van ingrijpende veranderingen die nodig zijn voor de lange termijn klimaatverandering. Bovendien zijn de maatregelen vooral gericht op een specifieke sector zoals water of landbouw, of beperkt tot een specifieke stad of regio. Ondanks de toegenomen ambities om ons aan te passen blijft de uitvoering in de praktijk daarom vaak achter. Hierdoor is het ‘adaptatiegat’ de afgelopen jaren verder toegenomen. Met de huidige snelheid en mate van adaptatie is de verwachting dat dit gat in de toekomst groter wordt (IPCC 2022b).

Het Deltaprogramma houdt de voortgang van implementatie van adaptatieplannen bij en monitort of de doelen in 2050 gehaald gaan worden. Hieruit volgt dat er nog een flinke versnelling nodig is (Deltaprogramma, 2019, 2022). Met een snellere zeespiegelstijging is het nodig steeds sneller en/of met grotere maatregelen aan te passen (Deltares, 2019). Dat roept de vraag op hoe snel Nederland in het verleden is geweest bij het uitvoeren van grootschalige adaptatiemaatregelen en hoe snel Nederland die in de toekomst kan implementeren.

8.1 | Benodigde tijd van projecten uit het verleden

Om de vraag te beantwoorden hoe snel we in het verleden zijn geweest met aanpassen, is een analyse uitgevoerd van een aantal grootschalige waterbeheerprojecten en adaptatiemaatregelen die kenmerkend zijn voor het Nederlandse watersysteem. Daarbij is onderscheid gemaakt in de tijd die besteed is aan de gedachtevorming, planvorming en uitvoering.

De volgende, voor het Nederlands waterbeheer kritieke, werken zijn daarbij geanalyseerd: De Deltawerken, Ruimte voor de Rivier, het Peilbesluit IJsselmeer, Het Kierbesluit in het Haringvliet en de invoering van de nieuwe normering voor hoogwaterbescherming. We hebben onderzocht wanneer begonnen is met deze werken en hoeveel tijd het heeft gekost tot ze gereed waren.

Terwijl het afronden van de werken zich redelijk goed laat definiëren, is de start veel lastiger precies vast te stellen. Als startpunt beschouwen we de publicatiedatum van de rapportages over de gedachtevorming waar later veel naar wordt gerefereerd.

De Deltawerken, 1930-2010, 80 jaar

Al in de jaren 30 van de vorige eeuw waren er rapporten die melding maakte van te zwakke dijken in de zuidwestelijke delta. In 1942 werd het Verlandingsplan beschreven dat voorzag in verlanding langs natuurlijke weg die 200 jaar zou duren, waardoor de kustlijn gesloten zou worden. In de naoorlogse periode voor de stormvloed was men begonnen met de afsluiting van de Brielse Maas¹⁴. Na de overstroming in 1953 werd de uitvoering versneld ter hand genomen en werd direct begonnen met de Algerakering in de Hollandse IJssel. Die werkzaamheden zijn afgerond in 1958, al voordat de Deltacommissie haar definitieve rapport opleverde in 1960, en ook voordat de uitvoering van de Deltawerken in de Deltawet, in 1958 aanvaard, werd vastgelegd. De laatste grote oplevering betrof de Maeslantkering in 1997. Maar de Deltawerken werden gereed verklaard toen alle dijken op deltahoogte waren gebracht in 2010.

Ruimte voor de Rivier, 1986-2019, 33 jaar

De publicatie van het Plan Ooievaar in 1986 kan gezien worden als het begin van de gedachtevorming voor het meer ruimte creëren en natuurlijker maken van de grote rivieren in Nederland. Dit plan beschrijft een ontwikkelingsvisie van het Nederlandse rivierengebied met een compleet werkend biotische riviersysteem in samenhang met maatschappelijke activiteiten als landbouw, scheepvaart, veiligheid, delfstoffenwinning en recreatie. In het plan werd gepleit voor ruimtelijke scheiding van landbouw en natuur door verbetering van landbouw in komgronden, het inrichten van de uiterwaarden als natuurgebied en gemengd grondgebruik op de oeverwallen. Bij het geheel dienden de belangrijke historische aspecten bewaard te blijven. Het rapport markeerde op twee manieren een andere wijze van denken. Ten eerste was de heersende gedachte dat gronden zo veel mogelijk geschikt dienden te zijn voor landbouw, waarvoor ruilverkaveling veel werd ingezet. Dit ging ten koste van natuur en ruimte voor de rivier. Ten tweede was de heersende gedachte dat bescherming van de natuur vooral door behoud van de bestaande natuurwaarden bereikt moest worden. Hieraan werd het perspectief van herstel door ontwikkeling van karakteristieke natuurlijke processen toegevoegd.

¹⁴ https://nl.wikipedia.org/wiki/Johan_van_Veen

In januari 1993 werden de uitgangspunten voor de rivierdijkversterkingen in het Boertien I rapport ter discussie gesteld. Hierin werd aangegeven dat het verlies aan waarden en functies ten gevolge van de dijkversterking mee moest worden genomen in de veiligheidsnorm (en niet alleen de directe materiële kosten). Ook pleitte het rapport voor een aanpassing in de wijze van berekenen van de maatgevende afvoeren en om ook maatregelen om de maatgevend waterstanden te verlagen mee te nemen.

Naar aanleiding van de hoogwaters van 1993 en 1995 werd besloten om deze ideeën versneld uit te voeren in een ‘Deltaplan grote rivieren’ (MinVenW, 1995). Dit leidde tot de planologische kernbeslissing Ruimte voor de Rivieren in 2006 (RIZA, 2006). Met de opening van de hoogwatergeul Reevediep (begin 2019) werd het programma Ruimte voor de Rivier officieel afgerond¹⁵.

Waterveiligheid volgens de nieuwe Normering Hoogwaterveiligheid 1998-2050 (?), 52 (?) jaar

De eerste Deltacommissie in 1960 adviseerde al dat een hoogwaternormering een afweging moest zijn tussen de schade die op zou treden bij een overstroming en de kosten die nodig waren voor de bescherming. Met de destijds beschikbare technologie kon dat nog niet gedetailleerd worden uitgewerkt. In de publicatie van het Marsroute onderzoek (1998) werd deze gedachte van een veiligheidsbenadering op basis van overstromingsrisico's voor het eerst uitgewerkt (TNO, 1998).

In het studieproject De Veiligheid van Nederland in Kaart (DWW, 2003) werden de kansen op en de gevolgen van

overstromingen van de 53 dijkkringen in Nederland in kaart gebracht volgens die nieuwe methode. Publicaties van het Milieuplanbureau (RIVM, 2004) en de commissie Veerman (Deltacommissie, 2008) benadrukten de urgentie van een herziening van de bestaande hoogwater normering. Uiteindelijk leidde dit in 2014 tot nieuwe afspraken om Nederland te beschermen tegen overstromingen (Deltaprogramma, 2014) en de start in 2017 van het Hoogwaterbeschermingsprogramma, een samenwerking tussen 21 Waterschappen en het Rijk aan de grootste dijkversterkingsoperatie sinds de Deltawerken. Het doel is dat in 2050 alle primaire keringen aan de normen voldoen.

In 2022 worden volgens de planning versterkingsprojecten uitgevoerd voor 600 km primaire keringen. Voor meer dan de helft is de verkenning klaar en is de fase van planuitwerking of realisatie gestart. Bij de start van het programma werd de totale lengte van de benodigde dijkversterkingen tot 2050 geschat op ongeveer 1500 km. Voor 767 km daarvan staan inmiddels (begin 2022) projecten in de programmering.

Kierbesluit Haringvlietdam 1989-2019, 30 jaar

Al in de jaren 70 is geconstateerd dat de Deltawerken waarschijnlijk een ecologische achteruitgang in de Delta veroorzaken. Het belang van het estuariene milieu voor de ecologie wordt in de 2e Nota waterhuishouding vermeld (1984). In het nationaal Milieubeleidsplan en de 3e nota waterhuishouding in 1989-1990 worden de ideeën voor ander beheer van de Haringvlietsluizen om de estuariene dynamiek te herstellen voor het eerst genoemd (WUR, 2015). In 1994 verschijnt de startnotitie van de MER voor de Haringvlietsluizen waarin de probleemomschrijving gericht is op de negatieve effecten die het huidige beheer van de sluizen heeft op de natuurwaarden (WUR, 2015).

In 2000 wordt het besluit “Beheer Haringvlietsluizen” van kracht. Dit besluit behelst een eerste stap in de richting van meer getijdenwerking in het Haringvliet met ‘getemd getij’. Met deze maatregel zouden de sluizen vaker en verder open worden gezet, zodat in het Haringvliet een getijverschil van in totaal 70 cm kon worden gerealiseerd. De uitvoering van dit besluit wordt echter diverse keren verschoven onder meer omdat er een aanzienlijke schade aan de landbouw door verzilting werd verondersteld. In 2010 wordt het besluit onderdeel gemaakt van het internationale Stroomgebiedbeheersplan Rijndistrict op grond van de Kaderrichtlijn water. Uiteindelijk worden de sluizen in 2019 voor de eerste keer open gezet waarbij er een uitgebreid monitoringsprogramma wordt opgezet naar het verziltingseffect in het Haringvliet.



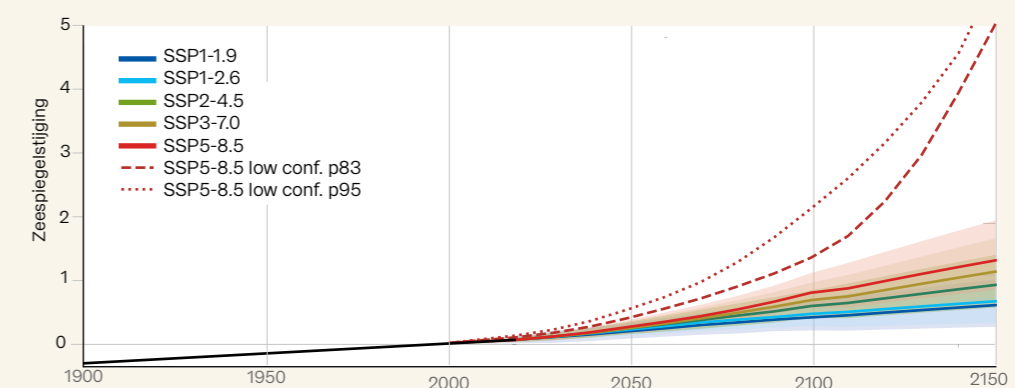
Haringvlietdam

Peilbesluit IJsselmeer 1992-2018, 26 jaar

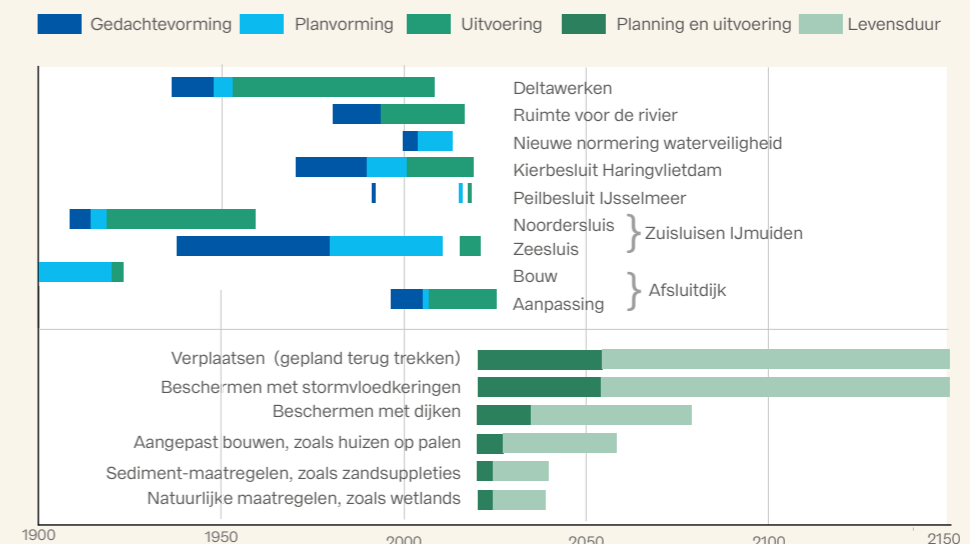
Het peilbeheer in het IJsselmeer staat al lange tijd ter discussie. Hierbij speelt belangenafweging tussen onder meer waterveiligheid, waterbeschikbaarheid en ecologie een rol. De eerste belangenafweging speelt al ten tijde van de Zuiderzeewet in 1919. In de tweede en de derde Nota's Waterhuishouding wordt deze expliciet gemaakt. Voor de wijze waarop die belangenafweging plaatsvindt krijgt de PAWN studie (RWS, 1982) voor de tweede Nota waterhuishouding een internationale prijs. In 1992 wordt een peilbesluit genomen waarbij er een vast zomerpeil van NAP-0,2 m wordt gehandhaafd (RWS, 1992). Daarmee ontstond een “tegennatuurlijk” hoger peil in de zomer en een lager peil in de winter (NAP-0,4 m). Hierna zijn er

diverse studies uitgevoerd, die meer een flexibel peilbeheer aanbevelen. Met een toenemende waardering van natuur werd een meer natuurlijk peilbeheer voorgesteld wat een lager zomerpeil betekent dan het peilbesluit in 1992 (RWS, 1992). In 2000 stelt de commissie Tielrooy een hoger peil voor om de zoetwatervoorziening in de zomer zekerder te stellen, ook in het licht van klimaatverandering (CW, 2000). Na diverse studies wordt in het Deltaprogramma in 2015 besloten om de voorbereiding te treffen voor flexibel peilbeheer voor het structureel beschikbaar krijgen van een buffer van 20 centimeter in het IJsselmeergebied. Daarbij treffen de beheerders enkele mitigerende maatregelen voor flexibel peilbeheer en treffen ze nu al enkele maatregelen voor mogelijk verdere flexibilisering van het peil. Het Peilbesluit werd in 2018 ondertekend.

Zeespiegelstijging scenario's



Gedachte vorming, planvorming, uitvoering, levensduur



Figuur 23 De tijd die het gekost heeft grote infrastructurele werken uit te voeren (midden) met de geobserveerde en geprojecteerde zeespiegelstijging volgens het IPCC (2021; boven). Typische levensduur van maatregelen aan zeespiegelstijging (onder).

¹⁵ <https://www.magazinesrijkswaterstaat.nl/zakelijkeninnovatie/2019/02/leren-van-ruimte-voor-de-rivier>

Zeesluis IJmuiden, respectievelijk 25, 11, 20 en 10 jaar

Het zeesluizencomplex bij IJmuiden kent een lange geschiedenis van aanpassingen¹⁶. De eerste sluisen waren onderdeel van werkzaamheden om de haven van Amsterdam beter bereikbaar te maken. Die toegang was begin 19e eeuw moeilijk door de verzanding van het IJ en de lange, lastige vaarroutes via het Noord-Hollands kanaal en de Zuiderzee. Het sluisencomplex werd diverse keren vergroot om de steeds groter wordende schepen toegang tot de Amsterdamse haven te geven. De eerste oplevering was de Zuidersluis in 1876, vervolgens de Middensluis in 1896, de Noordersluis in 1929, en de zeesluis in 2022.

De realisatie van de eerste sluis, de Zuidersluis (afmeting 120x18x7,75m) nam 25 jaar in beslag, gerekend vanaf de instelling van een commissie in 1852 om een verkenning te doen naar de bouw van een sluis tot 1876, het jaar waarin de eerste sluis werd geopend. Al gauw bleek de sluis te klein om de groter wordende schepen te schutten. In 1885 werd het eerste ontwerp geleverd voor een vergroting. De vergroting was in 1896 gereed en nam daarmee 11 jaar beslag. Deze sluis, de latere Middensluis had een afmeting van 225x25x10m. Tien jaar later rond 1909, kwam opnieuw de wens op voor een verdere vergroting. In 1921 werd besloten om een nieuwe sluis te bouwen. Dit derde project kostte 20 jaar, waarvan 10 gebouwd werd¹⁷, en leidde tot de Noordersluis met een afmeting van 225x25x10m. Deze werd opgeleverd in 1929, maar het duurde tot 1960 voordat ten volle gebruik kon worden gemaakt van de capaciteit, omdat de doorvaart van het Noordzeekanaal beperkend was.

In 2022 is de Zeesluis opgeleverd waarvoor de studies in 2012 waren afgerond. De bouw startte in 2016 en nam, onder meer door een aantal tegenslagen 6 jaar in beslag. Deze sluis heeft een omvang van 500x70x18m.

Afsluitdijk (bouw 46 jaar; aanpassing 27 Jaar)

De voorgeschiedenis van de Afsluitdijk¹⁸ begint in 1886 met een onderzoek of drooglegging in de Zuiderzee haalbaar was. In 1891 ontwierp Lely een eerste plan hiervoor. Na de watersnood van 1916 en de hongersnood van 1918 werd besloten tot de bouw van de dijk. Al in 1920 werd de Amstedijk aangelegd waarmee het eiland Wieringen aan het vaste land van Noord-Holland kwam te liggen. In 1927 startte de bouw van de Afsluitdijk zelf en de afsluiting was in 1932 voltooid.

Rond 1998 realiseerde men zich dat de spuicapaciteit onvoldoende was om het peilbeheer te handhaven. Dat zou op termijn vanwege de zeespiegelstijging een steeds serieuzer probleem worden (RIKZ, 2002). Na aanvankelijk uitstel vanwege geldgebrek werd deze bouw in 2006 onderdeel gemaakt van een voorstel om de Afsluitdijk te vernieuwen. Deze vernieuwing heeft meerdere doelen. Ze bestaat uit het versterken van het dijklichaam en de schut- en spuisluisen (waterveiligheid), het vergroten van de capaciteit om water af te voeren van het IJsselmeer naar de Waddenzee (peilbeheer) en het verbeteren en onderhouden van rijksweg A7 (wegverkeer). Daarnaast worden extra werkzaamheden meegenomen op het gebied van natuur en recreatie en toerisme. Na de aankondiging in 2007 om hier binnen 15 jaar mee te starten werd in 2018 daadwerkelijk gestart met de werkzaamheden. De huidige verwachting is dat deze in 2025 gereed zullen zijn.

8.2 | Hoe snel kan Nederland zich aanpassen in de toekomst?

Hoe snel Nederland kan zijn in het aanpassen aan klimaatverandering en zeespiegelstijging hangt van veel factoren af, waaronder:

- Bewustwording van het probleem
- Noodzaak om er iets aan te doen bij de politiek, bestuurders, en breder draagvlak in de maatschappij;
- Analyse van mogelijke adaptatieopties en richtingen;
- Innovatie en onderzoek naar maatregelen vanwege de grootte van de adaptatie-opgave;
- Nadere analyse van adaptatie opties. Evaluatie en keuze over adaptatie opties en richting samen met betrokkenen o.a. aan de hand van overeenstemming tussen betrokken partijen en maatschappelijk draagvlak;
- Inpassingen van de maatregelen in samenhang met andere ontwikkelingen en opgaven;
- Ontwerp van de adaptatiemaatregelen;
- Financiën en institutionele aspecten regelen (bijv. onteigenen grond);



Kronwerderzand, Afsluitdijk

- Implementatie van de maatregelen;
- Technologische ontwikkelingen.

Deze vele factoren maken dat het zeer onzeker is hoe snel we ons kunnen aanpassen in de toekomst. Immers een deel, zoals hoe we in de toekomst tegen de wereld aankijken, is inherent onzeker. Het verleden geeft een eerste indicatie, maar hier ging het om een andere adaptatie-opgave. Sinds die tijd zijn er ook veel technische en wetenschappelijke ontwikkelingen geweest. De gedachtevorming over de benodigde maatregelen en strategieën in het verleden bestreken een periode van tenminste 25 jaar (Eerste sluiscomplex bij IJmuiden) tot een jaar of 80 (Deltawerken). Vertaald naar nu zou dit betekenen dat we voor de makkelijke/snelle beslissingen halverwege deze eeuw klaar zijn en voor de moeilijkere grotere beslissingen rond het einde van de eeuw.

De projecten uit het verleden die we hebben beschouwd verschillen in mate van complexiteit. Verder zijn de technische mogelijkheden toegenomen en is de samenleving sterk veranderd tussen eind 19e eeuw en nu. Toch is duidelijk dat grote projecten (heel) veel tijd in beslag nemen. Als we dit naar de toekomst projecteren betekent dit dat er gedurende de uitvoering naar verwachting al een aanzienlijke zeespiegelstijging zal plaatsvinden. Die stijging zal groter zijn dan in het verleden, ook in de scenario's met lage zeespiegelstijging. Ook is de onzekerheid in de mate van zeespiegelstijging over een dergelijke periode veel groter dan in het verleden.

Zoals eerder vermeld heeft het recente IPCC rapport geconcludeerd dat adaptatie in Europa is toegenomen maar de hoeveelheid en snelheid van adaptatie is onvoldoende om risico's te beperken (IPCC, 2022b). Het monitoren en evalueren van de implementatie en effectiviteit van maatregelen is belangrijk om te detecteren we wel snel genoeg zijn en waar versnelling nodig en mogelijk is, en of het adaptatie-gat kleiner of groter aan het worden is. Het Deltaprogramma houdt dit bij en heeft aangegeven dat versnelling nodig is (Deltaprogramma, 2021).

¹⁶ https://nl.wikipedia.org/wiki/Sluisen_van_IJmuiden

¹⁷ https://www.planviewer.nl/imro/files/NL.IMRO.9927.IPzeetoeengijmnd14-VA01/t_NL.IMRO.9927.IPzeetoeengijmnd14-VA01.html#_2.1_Ontstaansgeschiedenis

¹⁸ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Afsluitdijk>

Conclusies en reflectie



Vanwege grote onzekerheden in de zeespiegelstijging die mogelijk deze eeuw al meer en sneller stijgt dan eerder is aangenomen bij het maken van het adaptieve plan van het Deltaprogramma, is het Kennisprogramma Zeespiegelstijging opgezet. In deze studie is een aantal bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan een hoge zeespiegelstijging geïdentificeerd en verder uitgewerkt. Hierbij stonden een aantal vragen centraal, die voortkomen uit de genoemde bijeenkomsten en de eerdere rapportages uit het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. Het betreft vooral vragen rondom het waarborgen van de waterveiligheid en kritieke keuzes die daartoe gemaakt kunnen worden. Ook zoetwatervoorziening en natuur zullen gevolgen ondervinden van zeespiegelstijging en te nemen adaptatiemaatregelen, maar dat is niet de focus van deze studie. Dit rapport biedt ingrediënten voor het formuleren van de oplossingsrichtingen in spoor 4 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en geeft input voor nieuwe regiobijeenkomsten. We bespreken de conclusies aan de hand van de onderzoeksvragen en reflecteren vervolgens op de bevindingen.

9.1 | Conclusies

Wanneer kunnen we een bepaalde zeespiegelstijging (of stijgsnelheid) verwachten volgens de meest recente inzichten in de diverse scenario's en wat is de onzekerheid in timing?

- Volgens de mediane schatting van alle klimaatscenario's wordt een zeespiegelstijging van 0,25 m ten opzichte van 1995-2014 rond 2050 bereikt. Een stijging van 0,5 m wordt vrijwel zeker bereikt in de tweede helft van deze eeuw, tenzij de opwarming onder de 2°C beperkt blijft (SSP1-RCP2.6), maar ook dan is het mogelijk. Voor grotere stijgingen hangt het moment waarop deze bereikt worden sterk af van het emissiescenario en of de ijskappen op Antarctica versneld afbreken en smelten. Een stijgsnelheid van 5 mm/jaar wordt in zowel de scenario's met een opwarming onder de 2°C (SSP1-2.6) als met hoge opwarming (SSP5-8.5) overschreden in de komende 20 jaar volgens de mediane schatting. Een stijging van 10 mm/jaar zit in de bandbreedte van alle scenario's (vanaf ongeveer 2045), maar komt in SSP1-2.6 alleen voor in de bovenkant van de bandbreedte (p95).
- Voor het jaar 2300 geeft het recente IPCC rapport aan dat de wereldwijd gemiddelde zeespiegel tussen de 0,3 en 3 m zal stijgen bij lage CO₂-emissies (SSP1-2.6) en tussen de 1,7 en 6,8 m bij hoge emissies (SSP5-8.5). Als rekening wordt gehouden met een mogelijk grotere bijdrage van Antarctica kan dit oplopen tot 15 m.

- Informatie over de timing van de zeespiegelwaarden kan gebruikt worden om in te schatten wanneer de voorbereiding en uitvoering van een maatregel ingezet moet worden, hoe lang een maatregel voldoende werkzaam blijft, en ook om een maatregel te ontwerpen voor de te verwachten zeespiegelwaarden in die periode.
- Het overschrijden van een zeespiegelwaarde is potentieel een signaal voor het starten met uitvoeren van adaptatiemaatregelen. De beschikbare en benodigde tijd voor voorbereiding en implementatie van vervolgmaatregelen is mede bepalend voor de signaalwaarde. Aanvullende signalen, zoals bijvoorbeeld kennis over de stabiliteit van de ijsmassa op Antarctica, kunnen daarbij helpen. Dit wordt verder onderzocht in spoor 3 van het Kennisprogramma.

Welke bouwstenen zijn beschikbaar voor aanpassen aan zeespiegelstijging, en hoe passen deze binnen alternatieve adaptatiepaden en waar is mogelijke synergie of conflict met andere maatschappelijke opgaven?

- Er zijn 22 bouwstenen geïdentificeerd, onderverdeeld in de categorieën harde waterkeringen, zachte waterkeringen, riviermaatregelen, aanpassingen in landgebruik en "voorkomen en verplaatsen". Deze bouwstenen hebben vooral betrekking op waterveiligheid en kunnen later uitgebreid worden met bouwstenen voor zoetwatervoorziening en natuur. Met de bouwstenen zijn adaptatiepaden opgesteld door ze in chronologische volgorde te zetten. De adaptatiepaden geven aan waar logische overstapmomenten tussen de oplossingsrichtingen onderling zijn.
- Uit de adaptatie paden blijkt dat er diverse beslissingen te nemen zijn. Kritieke keuzes bevinden zich al in het begin van de paden, en worden ook sterk beïnvloed door andere opgaven en transitie in Nederland. Daarmee lijkt een deel van de kritieke beslissingen over maatregelen en strategieën op de relatief korte termijn (komende 20 jaar) te liggen. Zo bepalen keuzes rondom Maeslantkering en rivieren in sterke mate de adaptatiepaden, en de eerste keuze daarvoor komt al bij een beperkte mate van zeespiegelstijging in beeld.
- Alle oplossingsrichtingen en bijbehorende adaptatiepaden vergen op korte termijn (de komende 20 jaar) voorbereidende maatregelen, onderzoek en experimenten om ze op termijn (op grote schaal) te kunnen implementeren. De voorbereidende maatregelen bestaan voornamelijk uit maatregelen die (op termijn) de ruimte beschikbaar houden of maken (bijv. door tijdelijke allocatie van gebruiksfuncties of functies die combinaties toelaten).

- Vanwege de zeespiegelerfenis en lange termijn adaptatie-opgave, lijkt een adaptief plan dat op termijn minimaal 2-3 m zeespiegelstijging aan kan (of tenminste een zinvolle tussenstap is op weg naar een lange termijn oplossing die dat wel kan), niet overbodig. In het geval van een grote en snelle bijdrage van Antarctica kan een dergelijke zeespiegelstijging al rond 2100 plaatsvinden.

Hoe veranderen overstromingskansen bij harde waterkeringen langs de kust en hoeveel moeten deze keringen opgehoogd worden om overstromingskansen niet toe te laten nemen bij een stijgende zeespiegel?

- De overstromingskans is benaderd door de kans op falen ten gevolge van golfoverslag, dus door het overschrijden van een extreme waterstand in combinatie met hoge golven. Zonder (aanvullende) maatregelen neemt de overstromingskans toe, maar de toename verschilt sterk per locatie. Een factor 10 toename in overstromingskans voor het faalmechanisme golfoverslag wordt op sommige locaties langs de Waddenzee al bereikt bij 0,4 m zeespiegelstijging, bij andere locaties (langs de Hollandse kust) is dat in de orde van 1,5 m. Deze getallen zijn gebaseerd op berekeningen waarbij geen rekening is gehouden met morfologische aanpassingen van de kust. Dergelijke aanpassingen kunnen er toe leiden dat de factor 10 toename pas bij een andere zeespiegelstijging bereikt wordt.
- De benodigde dijkverhoging om de overstromingskans voor het faalmechanisme golfoverslag gelijk te houden bij zeespiegelstijging varieert ook sterk tussen locaties langs de kust, tot wel een factor 3 onderling verschil. Op sommige locaties langs de Hollandse kust en de Waddenzee is de benodigde dijkverhoging ruim twee keer zo groot als de mate van zeespiegelstijging, als gevolg van de toename in golfhoogte die de zeespiegelstijging met zich mee brengt.
- In dichtbebouwde locaties, vooral in het Rijnmondgebied, is de ruimte om dijken te verbreden zeer beperkt.

Hoe kan bij een stijgende zeespiegel het water van de rivieren naar zee afgevoerd worden, waarbij ook de waterveiligheid gewaarborgd blijft?

Het antwoord op deze vraag wordt voor twee oplossingsrichtingen beschreven: Beschermen-open, waarbij de rivieren en estuaria zo veel mogelijk in open verbinding blijven met de zee en Beschermen-gesloten, waarbij de rivieren en estuaria zoveel mogelijk worden afgesloten met dammen.

Beschermen-open

De zeespiegelstijging zal steeds verder bovenstrooms invloed hebben op waterstanden en daarmee op overstromingsrisico's; in extremis zelfs tot aan Nijmegen (bij meerdere meters zeespiegelstijging):

- De toename in de rivierwaterstand als gevolg van zeespiegelstijging is substantieel groter bij lage rivierafvoeren dan bij hoge rivierafvoeren.
- In het benedenrivierengebied neemt de waterstand onder gemiddelde omstandigheden bijna even veel toe als de mate van zeespiegelstijging. Voor extreme zeewaterstanden is dat niet het geval vanwege de inzet van de Maeslantkering. De kans op overschrijden van extreme waterstanden in het gebied neemt, zonder aanvullende maatregelen, wel toe als gevolg van zeespiegelstijging.
- Een mogelijk te realiseren reductie van de faalkans van de Maeslantkering (of de opvolger ervan) heeft vooral een groot verlagend effect op extreme waterstanden bij Rotterdam en verder bovenstrooms op de Lek.

Beschermen-gesloten

- Het vervangen van de Maeslantkering door een gesloten variant met een sluizencomplex leidt tot een reductie in extreme waterstanden van 0,5 - 1 m in het benedenrivierengebied.
- In de gesloten toestand zal de zeespiegelstijging ook vrijwel 1-op-1 doorwerken op hoge waterstanden. Dit komt doordat bij hoge afvoeren van de Rijn en Maas een deel van het overtollige water gespuid moet worden en dat kan alleen als de binnenwaterstand hoger is dan de buitenwaterstand.
- Maatregelen als het vergoten van de pompcapaciteit, spuicapaciteit of het beschikbare bergingsoppervlak kunnen hoge waterstanden reduceren, maar zullen in de regel onvoldoende zijn om het overstromingsrisico niet toe te laten nemen bij meerdere meters zeespiegelstijging. Bij meerdere meters zeespiegelstijging zullen daarom meer ingrijpende maatregelen nodig zijn, zoals:
 - Het omleiden Waal en Maas richting zuidwestelijke Delta

- Het substantieel vergroten van de afvoer over de IJssel
- Enkele meters dijkverhoging
- Een zeewaartse variant waarmee veel extra bergingsoppervlakte wordt gecreëerd in de nieuw ontstane binnenmeren
- Creëren van een veelvoud aan pompcapaciteit

- De laatste maatregel maakt in theorie alle andere maatregelen overbodig, als daarmee zelfs extreme afvoeren van Rijn en Maas 'instantaan' uitpompt kunnen worden. Dat vraagt echter om een pompcapaciteit van meer dan 10.000 m³/s.

Het aanpassen van de afvoerverdeling als mogelijke bouwsteen voor adaptatie:

- Het substantieel vergroten van de afvoercapaciteit op de Rijnakken om meer sturing te kunnen geven aan de afvoerverdeling en andere gebieden te kunnen ontzien is één van de bouwstenen die genoemd wordt in diverse plannen voor adaptatie aan zeespiegelstijging. De rivier de IJssel biedt daartoe de beste mogelijkheden. Het IJsseldal is relatief breed waardoor de waterstand beperkt hoger wordt bij hogere afvoeren, de afstand over de IJssel is relatief kort waardoor het verhang relatief groot is en het IJsselmeer biedt extra bergingsruimte om tijdelijk hoge afvoeren in op te slaan.
- Een groter percentage afvoeren over de Waal levert meer ruimtelijke conflicten dan over de IJssel. En de waterstand op de Waal tijdens hoogwatergebeurtenissen zou dan toenemen, terwijl deze in vergelijking met de andere Rijnakken al relatief ver boven het landschap uitkomt.
- Extra water afvoeren over de Lek ligt niet voor de hand. De afstand over de Lek is relatief lang, waardoor het verhang klein is, wat het afvoeren van het aanvullende rivierwater bemoeilijkt. Als de Lek niet wordt ontzien of extra water te verwerken krijgt moet het water ergens in het westen weer veilig door of langs het Rijnmondgebied geleid worden; dat levert een grote omweg op.

Hoe kan sediment gebruikt worden als bouwsteen voor aanpassen aan zeespiegelstijging?

- Sediment (zand en slib) kan worden ingezet om kustgebieden mee te laten groeien met de zeespiegelstijging. Zand is voorradig in de Noordzeebodem en wordt via suppleties op de kust aangebracht om mee te groeien.
- Zandsuppleties kunnen ook worden ingezet om de Waddenzee beter te laten meegroeien bij een steeds snellere zeespiegelstijging. Er zijn diverse sedimentbouwstenen te bedenken om de bodem van de Waddenzee beter te laten meegroeien met de zeespiegel, zoals: zandsuppleties in de zeegaten, zandsuppleties direct op de platen, beter vasthouden van sediment en grootschalige maatregelen om bekkens te verkleinen. Met zandsuppleties is al ervaring opgedaan in andere gebieden. Zandsuppleties in de zeegaten, eventueel aangevuld met een combinatie van andere maatregelen, heeft als voordeel dat veel sediment het gebied in gebracht kan worden en dit zich door de natuurlijke processen waardoor het grovere sediment in de geulen terecht komt en het fijnere sediment op de platen. Hoeveel meegroeivermogen dit kan opleveren is echter nog niet bekend.
- Voor het meegroeien van de Wadden en het kustfundament moet er voldoende zand zijn. Hoewel er veel zand voorradig is en er voorlopig geen knelpunten lijken te ontstaan, loopt bij een steeds sneller stijgende en hogere zeespiegel de kans op dat niet meer voldoende (goed of rendabel winbaar) zand beschikbaar is of alleen tegen sterk oplopende maatschappelijke kosten. Dit benadrukt het belang om tijdig voldoende zand te reserveren voor kustonderhoud.
- Slib kan eveneens gebruikt worden voor landspiegelstijging. Het kan worden benut voor diverse meegroeiconcepten, zoals dubbele dijken en wisselpolders. Praktijkvoorbeelden laten zien dat bij de juiste condities en voldoende slib, deze concepten de mogelijkheid bieden om effectief mee te groeien met de zeespiegel. Bij het opschalen van deze concepten zijn tijdigheid en ruimtelijke integraliteit essentieel. Hoe eerder van de (continue) slibstroom wordt afgetapt, hoe meer sediment beschikbaar is voor meegroei.
- Een integrale analyse van de inzet van sedimentbouwstenen aan de kust is van belang omdat het benutten van sediment in de meegroeiconcepten gefaciliteerd moet worden uit de aangrenzende watersystemen. Dit kan betekenen dat andere functies en/of gebieden in de kustsystemen hier nadelige gevolgen van ondervinden.

Hoeveel tijd is er nodig (geweest) om adaptatiemaat-regelen te realiseren en wat betekent dit voor de adaptatiestrategie?

- Grote waterstaatkundige werken ten behoeve van de waterveiligheid hebben in het verleden veel tijd gekost, met name voor gedachtevorming en planvorming, maar ook de uitvoering. Op basis van deze ervaringen leren we dat adaptatie veel tijd kan gaan kosten, mogelijk zoveel tijd dat gedurende de implementatietijd al substantiële veranderingen in het klimaat en zeespiegelstand kunnen optreden. Dat vergroot het belang om tijdig keuzes te maken.
- Er is geen eenduidig beeld over hoeveel tijd de voorgenomen, deels incrementele, adaptieve maatregelen ten behoeve van de watervoorziening kosten. Maar de schattingen over de duur lopen in de orde van een tot meerdere decennia.

9.2 | Reflectie

Het Deltaprogramma heeft een adaptief plan met flexibele en robuuste maatregelen op de korte termijn om de nodige aanpassingen te doen om veiligheid en zoetwatervoorziening te blijven garanderen. Deze korte termijn acties moeten ook kennis en opties ontwikkelen en relevante opties open houden voor de langere termijn, rekening houdend met de lange termijn adaptatie-opgave en onzekerheden die mogelijk vragen om een versnelling van adaptatie. Deze studie is onderdeel van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging met als doel om de oplossingsrichtingen, bouwstenen en adaptatiepaden te onderzoeken voor aanpassen aan een zeespiegelstijging buiten het huidige adaptieve plan.

Lange termijn adaptatie-opgave nu al meenemen in kritieke keuzes

Een adaptief plan tot 1 m betekent niet dat keuzes voor adaptatie tegenaan een hogere zeespiegelstijging pas daarna komen. Deze studie laat zien dat kritieke keuzes die sterk richting geven aan de strategie al vroeg in de adaptatiepaden liggen, en daarmee mogelijk dichterbij dan eerder gedacht. Daarnaast staan er veel ontwikkelingen op stapel die de mogelijkheden voor adaptatie, de oplossingsruimte, en ook de noodzaak tot adaptatie beïnvloeden. Het is dus niet alleen de zeespiegelstijging die de opgave bepaalt. Bij onvoldoende integratie en het niet meenemen van de lange termijn adaptatie-opgave aan zeespiegelstijging, bestaat het risico dat de oplossingsruimte afneemt en de noodzaak voor adaptatie juist groter wordt, of dat (onbewust) een richting in geslagen wordt die ongewenst is en/of op de lange termijn niet houdbaar is. Als minder opties worden opengehouden, wordt de oplossingsruimte kleiner. Dat hoeft niet per se nadelig te zijn, als er maar bewust gekozen wordt.

Een voorbeeld van een kritieke (richtinggevende) keuze die naar verwachting de komende decennia gemaakt moeten worden betreft de vervanging van de Maeslantkering en dan vooral de keuze tussen een nieuwe stormvloedkering of een gesloten variant. Dit bepaalt in grote mate het uiteindelijke adaptatiepad en oplossingsrichting van in elk geval het rivierengebied en dit werkt potentieel door richting zuidwestelijke delta en IJsselmeergebied. Een kritieke keuze vanuit andere opgaven en transities is bijvoorbeeld de keuze waar en hoe te bouwen. Dit bepaalt de beschikbare ruimte en opgave voor adaptatie.

De inrichting van de fysieke ruimte is een belangrijke sleutel voor de oplossingsruimte voor adaptatie aan zeespiegelstijging in Nederland. Dit rapport bevestigt deze bevinding uit eerdere studies (bijv. Deltares, 2019). Een adaptieve strategie is erop gericht om opties open te houden en te voorkomen dat we in lock-in situaties terecht komen. Tegelijkertijd zijn er andere ontwikkelingen, zoals de geplande grootschalige huizenbouw, die mogelijk het open houden van alle opties bemoeilijken, omdat er minder ruimte is voor bijvoorbeeld waterbergen, waterafvoeren of dijken versterken. Het open houden van alle opties lijkt een aantrekkelijke strategie, maar dat betekent soms wel dat fysieke ruimte moet worden opengehouden voor alle opties. Uitstel van keuzes betekent daarmee dat relatief veel ruimte gereserveerd moet worden die soms niet past bij het huidige landgebruik of gewenste ontwikkelingen vanuit andere opgaven. Dit vraagt om een aanpassing in het paradigma, die past bij de verandering van “water volgt” naar “water stuurt” en een ruimtegebruik op waterbasis. Veel adaptatie-maatregelen hebben ook andere baten (IPCC, 2022b) en kunnen weer andere mogelijkheden creëren.

Een voorbeeld van fysieke ruimtereservering voor het open houden van opties, is rivierverruiming. Op termijn is ruimte nodig om grotere piekafvoeren te kunnen verwerken. Voor een deel is hier overlap in de oplossingsrichtingen, maar voor een deel niet. Hoe en waar precies die rivierverruiming moet worden gerealiseerd is mede afhankelijk van de afvoerverdeling bij de splitsingspunten en de mogelijke overstap naar de strategie *Beschermen-gesloten*. De afvoerverdeling kan mogelijk aangepast worden in de toekomst om rivierwater doelmatiger en veiliger af te voeren naar zee in tijden van hoogwater. Het uitgangspunt van het huidige beleid voor de Rijntakken is gericht op het ontzien van de Lek en alle extra afvoer over Waal en IJssel te sturen (80:20). Eerder zijn voorstellen gedaan alle extra afvoer door het IJsseldal te sturen (De Rijn op Termijn; WL, 1998), of juist over de Waal (o.a. Plan Beaufort). Het betekent dat door het uitstellen van een lange-termijn keuze feitelijk het reserveren van het hele westelijk IJsseldal en het hele centrale rivierengebied gewenst zou zijn. Het betekent ook dat stedelijke ontwikkeling aan weerszijden van de rivier te allen tijde moet worden voorkomen, omdat dit op termijn een

knelpunt (‘flessenhals’) kan opleveren voor het afvoeren van rivierwater tijdens extreme hoogwaters. Locaties waar dit mogelijk kan spelen langs de IJssel zijn Zutphen, Deventer en Zwolle. Ook langs de Nederrijn/Lek, Waal en Maas zijn diverse locaties die een flessenhals zouden kunnen worden.

Robuuste en flexibele maatregelen

Naast kritieke keuzes zijn er ook bouwstenen die robuust zijn omdat ze in veel paden voorkomen, dan wel flexibel zijn en de mogelijkheid laten voor aanvullende maatregelen. Dat zijn maatregelen die aandacht behoeven in verdere uitwerking en sommige zouden al ingezet kunnen worden om ‘vooruit te werken’. Voorbeelden van dergelijke ‘low-regret’ maatregelen zijn a) Het creëren van ruimte voor waterberging en afvoercapaciteit (een relevant element in alle oplossingsrichtingen). Er moeten nog wel keuzes gemaakt worden over welke ruimte exact gereserveerd zal moeten worden; b) Vernatten van veenweidegebieden om de mate van bodemdaling in deze gebieden te reduceren (ook relevant vanuit mitigatie en natuur); c) Starten met het faciliteren van natuurlijke meegroei met behulp van sediment (zand en slib); d) Niet bouwen in locaties die zeer kwetsbaar zijn in geval van een overstroming, d.w.z. locaties waar het water snel arriveert en de overstromingsdiepte groot kan zijn (De Bruijn and Klijn, 2009).

Alle oplossingsrichtingen vergen op korte termijn voorbereidende maatregelen, onderzoek en experimenten om ze op lange termijn (op grote schaal) te kunnen implementeren. Een voorbeeld van experimenten die in meerdere oplossingsrichtingen van pas komen zijn opschalen van drijvend bouwen, bebouwing die in drijvend te maken is of te verplaatsen is, meegroei opties voor de Wadden en aanvullende beschermende maatregelen in dichtbevolkte gebieden, rekening houdend met beperkingen in de beschikbare ruimte in dichtbevolkte gebieden.

Vroeg inzetten maatregelen vergroot effectiviteit

Sommige bouwstenen hebben tijd nodig om te volgroeien, vooral de natuurlijke oplossingen. Deze maatregelen bieden vaak ook andere baten, zoals het vergroten van de leefbaarheid en herstel van biodiversiteit. Bovendien kunnen dergelijke maatregelen die vaak gebruik maken van natuurlijke aangroei met sediment meer bijdragen aan adaptatie als ze vroeg worden ingezet omdat er dan meer tijd en daarmee ook sediment beschikbaar is voor het meegroei. Dit zijn maatregelen die al ingezet zouden kunnen worden.

Onzekerheden en adaptatie-gat

Er zijn grote onzekerheden over de mate en snelheid van zeespiegelstijging, maar er zijn ook zekerheden. Eerdere studies rondom klimaatverandering gebruikten verschillende scenario’s om een bandbreedte van de klimaatdrivers op een bepaald moment te geven als input voor een gevolgenstudie, vaak in 2050 en 2100. Deze studie voegt daar een ander perspectief aan toe (op basis van Slangen et al. 2022; IPCC, 2021), namelijk: welke zeespiegelstijging is zeker en wanneer, met welke bandbreedte, kunnen we deze verwachten? Voor sommige stijgingen en snelheden is het, in de komende 150 jaar, een kwestie van tijd voordat deze bereikt worden.

Verder kijken dan 2100 is belangrijk omdat veel investeringen, vooral de kritieke keuzes en grote investeringen in het waterbeheer een lange levensduur hebben en/of een lange termijn maatschappelijke impact. Voor verschillende typen waterbeheermaatregelen laten we zien welke zeespiegelstijging binnen hun levensduur kan optreden. Nog verder in de toekomst kijken geeft inzicht in de lange termijn zeespiegelerfenis, de zeespiegelstijging die verwacht kan worden afhankelijk van de opwarming van de aarde, en daarmee ook in de lange termijn adaptatie-opgave. Wanneer alleen tot 2100 gekeken wordt voor adaptatieplannen ontstaat er mogelijk een adaptatie-gat; een verschil tussen de zeespiegel waarmee in een plan rekening is gehouden en wat er uiteindelijk optreedt. Dit kan tot zo’n 2 m ongeadresseerde zeespiegelstijging zijn bij lage opwarming of vele meters bij hoge opwarming. Dit is niet per definitie een probleem maar kan maladaptatie tot gevolg hebben vanwege lock-in en maatregelen die uiteindelijk niet houdbaar zijn.

De lange termijn adaptatie-opgave onder verschillende scenario’s laat zien dat mitigatie deze opgave aanzienlijk kleiner maakt, en dat anticiperen op minimaal 3 m low-regret is. Het laat echter ook zien dat de lange termijn adaptatie-opgave potentieel zo groot is en meegenomen moet worden in het verder uitwerken en evalueren van oplossingsrichtingen en adaptatiepaden, omdat het een vraag is of de lange termijn adaptatie-opgave met alle oplossingsrichtingen geadresseerd kan worden. Als we kijken naar de IPCC zeespiegelscenario’s voor 2300, zien we dat zelfs in een scenario waarin de Parijsdoelen gehaald worden en de opwarming onder de 1.5°C blijft, een stijging van 3 m bereikt kan worden. Een adaptief plan dat 3 m stijging kan accommoderen of in ieder geval een zinvolle tussenstap is naar een andere lange termijnoplossing die dat wel kan lijkt daarmee wenselijk.

Regionalisering en experimenten nodig

Om goed onderbouwde keuzes te kunnen maken is verdere regionalisering van de oplossingsrichtingen, bouwstenen en adaptatiepaden nodig. Voor de komende regionale bijeenkomsten zien we de volgende aandachtspunten: het nader identificeren van kritieke beslissingen en low-regret maatregelen (zowel vanuit Deltaprogramma en adaptatie, als vanuit keuzes rondom andere opgaven en transities, het beschouwen van de samenhang met andere gebieden), het meenemen van de lange termijn consequenties van beslissingen, het identificeren van potentiële implicaties van veranderen van strategie, de mogelijkheden voor het creëren van ruimte voor (rivier)water en mogelijkheden voor het grootschalige experimenten voor bouwstenen, en inschatting van benodigde tijd voor ontwerpen en realiseren van kritieke maatregelen.

Om in het geval van hoge zeespiegelstijging ook echt te kunnen opschalen, zijn experimenten en verkenningen nodig in de komende 20 jaar. Tot nu toe hebben de studies naar gevolgen en mogelijkheden voor aanpassen aan hoge zeespiegelstijging vooral gekeken naar waterveiligheid en beperkt naar zoetwatervoorziening. De gevolgen voor natuur van zeespiegelstijging, maar ook van de adaptatiemaatregelen zijn nog weinig onderzocht. Ook de schaalbaarheid van maatregelen en hoeveel zeespiegelstijging de oplossingsrichtingen uiteindelijk aankunnen is onvoldoende bekend. Nadere analyses zouden zich kunnen toespitsen op de volgende onderwerpen: waterkwaliteit randmeren kust, technische haalbaarheid ophogen land in bebouwd gebied, schaalvergroting natuurlijk ophogen land (dubbele dijken, wisselpolders, (natuurlijke) golfbrekers, vegetatie), beschikbaarheid sediment en benodigd sediment (uitwerken sedimentbouwstenen in integraal sedimentplan), waterstanden in riviergebied bij Beschermen-gesloten om gevolgen voor dijkaanpassingen te analyseren, de potentie voor opschalen drijvend wonen, en uitwerken afvoeren rivieren en risicogebieden (o.a. in het licht van bouwplannen).

De komende 10 jaar zijn belangrijk voor Nederland.

Ten eerste omdat deze jaren (maar ook daarna) sterk bepalend zijn voor de opwarming van de aarde en daarmee de zeespiegelerfenis waar deze gebieden mee te maken krijgen. Ten tweede, in de komende jaren worden veel investeringen gedaan op het gebied van woningbouw, energietransitie en landbouw en daarmee (onbewuste) keuzes voor de toekomst van het waterbeheer in Nederland. Ze bepalen de noodzaak voor adaptatie, en ook de mogelijkheden voor adaptatie. De keuzes die daarbij worden gemaakt zullen voor lange tijd bepalend zijn voor de inrichting van Nederland. Het niet of onvoldoende anticiperen op de lange termijn adaptatie-opgave heeft

niet alleen gevolgen voor volgende generaties, maar mogelijk ook al eerder, bijvoorbeeld als het afsluiten van verzekeringspolissen en hypotheekbeïnvloed gaan worden door water-gerelateerde risico's (onder het motto "eerlijkheid/ intergenerational justice"). Ten derde, deze periode is belangrijk voor het nader onderzoeken en experimenteren met mogelijkheden voor aanpassen aan hoge zeespiegelstijging, om straks indien nodig, tijdig maatregelen te kunnen implementeren en te kunnen opschalen. Hierbij gaat het niet alleen om te onderzoeken of iets technisch of economisch haalbaar is, maar ook of iets maatschappelijk wenselijk is en past bij de andere opgaven, en hoe het implementeren van dergelijke maatregelen te realiseren is met de juiste sturing en wetgeving.

Referenties



Strand, Vlissingen

- Baan, P. & F. Klijn, (1998). *De Rijn op termijn: een veerkrachtstrategie*. WL-rapport R3124.10, Delft. iii + 65 pp.
- Baptist, M.J., T. Gerkema, B.C. van Prooijen, D.S. van Maren, M. van Regteren, K. Schulz, I. Colosimo, J. Vroom, T. van Kessel, B. Grasmeijer, P. Willemsen, K. Elschot, A.V. de Groot, J. Cleveringa, E.M.M. van Eekelen, F. Schuurman, H.J. de Lange, M.E.B. van Puijenbroek (2019), *Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor', Ecological Engineering*, Volume 127,2019, [10.1016/j.ecoleng.2018.11.019](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.019).
- Blauw et al., (2018). *Update Delfstoffen Informatie Systeem - DIS 2.1. Deltares*, rapport 11202051-002-BGS-0008
- Borsje, B.W., B.K. Van Wesenbeeck, F. Dekker, P. Paalvast, T.J. Bouma, M.M. Van Katwijk, M.B. De Vries, (2011). *How ecological engineering can serve in coastal protection*. *Ecol. Eng.*, 37 (2011), pp. 113-122
- Coalitieakkoord 2021-2025, (2022). *Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst, VVD, D66, CDA en ChristenUnie, en budgettaire bijlage coalitieakkoord*.
- CW, (2000). *Waterbeleid voor de 21e eeuw – geef water de ruimte en de aandacht die het verdient. Commissie Waterbeheer 21e eeuw*.
- De Bruijn, K. and Klijn, F., 2009. *Risky places in the Netherlands: a first approximation for floods*, *Journal of Flood Risk Management* 2(1):58 – 67, [10.1111/j.1753-318X.2009.01022.x](https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01022.x)
- De Bruijn, K.M., Diermanse, F., Weiler, O.M., De Jong, J.S. and Haasnoot M., (2022). *Protecting the Rhine-Meuse delta against sea level rise: what to do with the river's discharge?* *J Flood Risk Management*. 2022, [10.1111/jfr3.12782](https://doi.org/10.1111/jfr3.12782)
- De Moel, H., Aerts, J. C. J. H. & Koomen, E. Development of flood exposure in the Netherlands during the 20th and 21st century. *Glob. Environ. Chang.* 21, 620–627 (2011).
- Defacto, (2021a): Ruimtelijke ontwerp verkenning gevolgen versnelde zeespiegelstijging; Tussenresultaat eerste projectfase ('work in progress'), Defacto Stedenbouw in opdracht van het Ministerie van BZK, het Deltaprogramma en Ministerie IenW.
- Defacto (2021b): Versnelde zeespiegelstijging, synthesesessie. Verslag synthesesessie kennisprogramma zeespiegelstijging, 21 juni 2021, Defacto Stedenbouw in opdracht van het Ministerie van BZK, het Deltaprogramma en Ministerie IenW.
- Deltacommissie, (2008). *Samen werken met water; een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst – bevindingen van de Deltacommissie 2008*.
- Deltaprogramma, (2014). *Werken aan de delta; kansrijke oplossingen voor opgaven en advies*.
- Deltaprogramma Rivieren, (2016). *Reserveren met ruimte voor ontwikkeling - Ruimtelijk Reserveren Rijnstrangen*. Eindrapport.
- Di Baldassarre, G., Castellarin, A. & Brath, A. *Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy*. *Hydrol. Sci. J.* 54, 1007–1017 (2009).
- Dow K, Berkhout F, Preston BL, Klein RTJ, Midgley G, Shawet MR (2013) Limits to adaptation. *Nat Clim Chang* 3:305–307. [10.1038/nclimate1847](https://doi.org/10.1038/nclimate1847)
- Chowdhury, M.S.N., Walles, B., Sharifuzzaman, S. et al. (2019). *Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast*. *Sci Rep* 9, 8549. [10.1038/s41598-019-44925-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44925-6)
- DWW, 2003: project VNK (de Veiligheid van Nederland in Kaart) – *Overstromingen in Nederland, kansen en gevolgen*. Ministerie van Verkeer en waterstaat – Directoraat-generaal Rijkswaterstaat; Dienst Weg en Waterbouwkunde.
- De Vet, P. L. M., van Prooijen, B. C., Colosimo, I., Ysebaert, T., Herman, P. M. J., & Wang, Z. B. (2020). *Sediment disposals in estuarine channels alter the ecomorphology of intertidal flats*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, e2019JF005432. [10.1029/2019JF005432](https://doi.org/10.1029/2019JF005432)
- Deltaprogramma 2015, (2014). *Werk aan de delta, de beslissingen om Nederland veilig en leefbaar in de 21e eeuw*, Deltacommissaris, ministerie van Infrastructuur en Milieu en ministerie van Economische Zaken.
- Deltaprogramma, (2021): *Iedere schop in de grond Klimaatbestendig; Nationaal Deltaprogramma 2022*.
- Deltares (2017). Haasnoot, M., L. Bouwer, J. Kwadijk (ed) (2017) *Als de zeespiegel sneller stijgt.. Resultaten van een Policy Hackathon naar knippunten en mijlpalen bij adaptatie aan extreme zeespiegelstijging in Nederland*. [Downloaden](#)

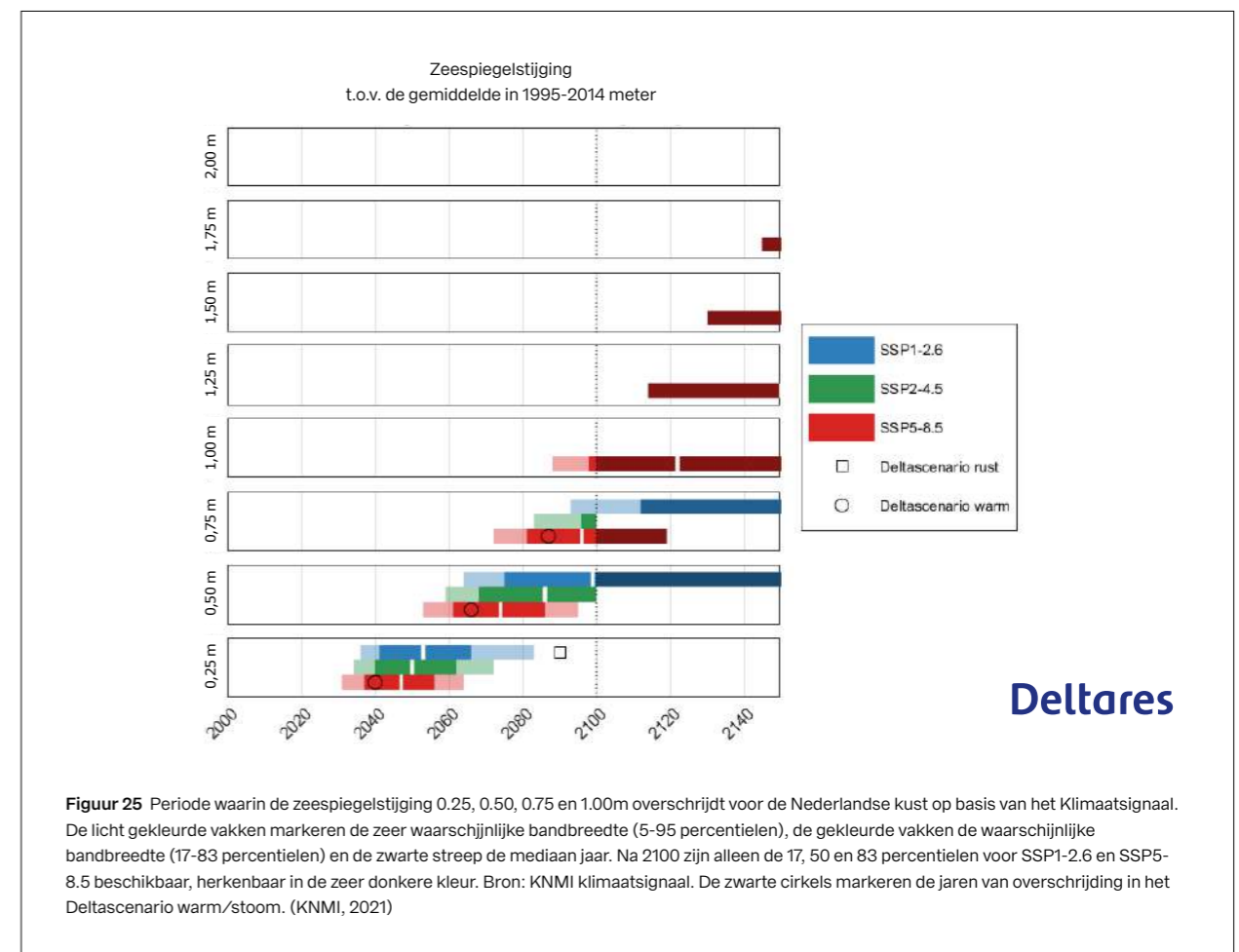
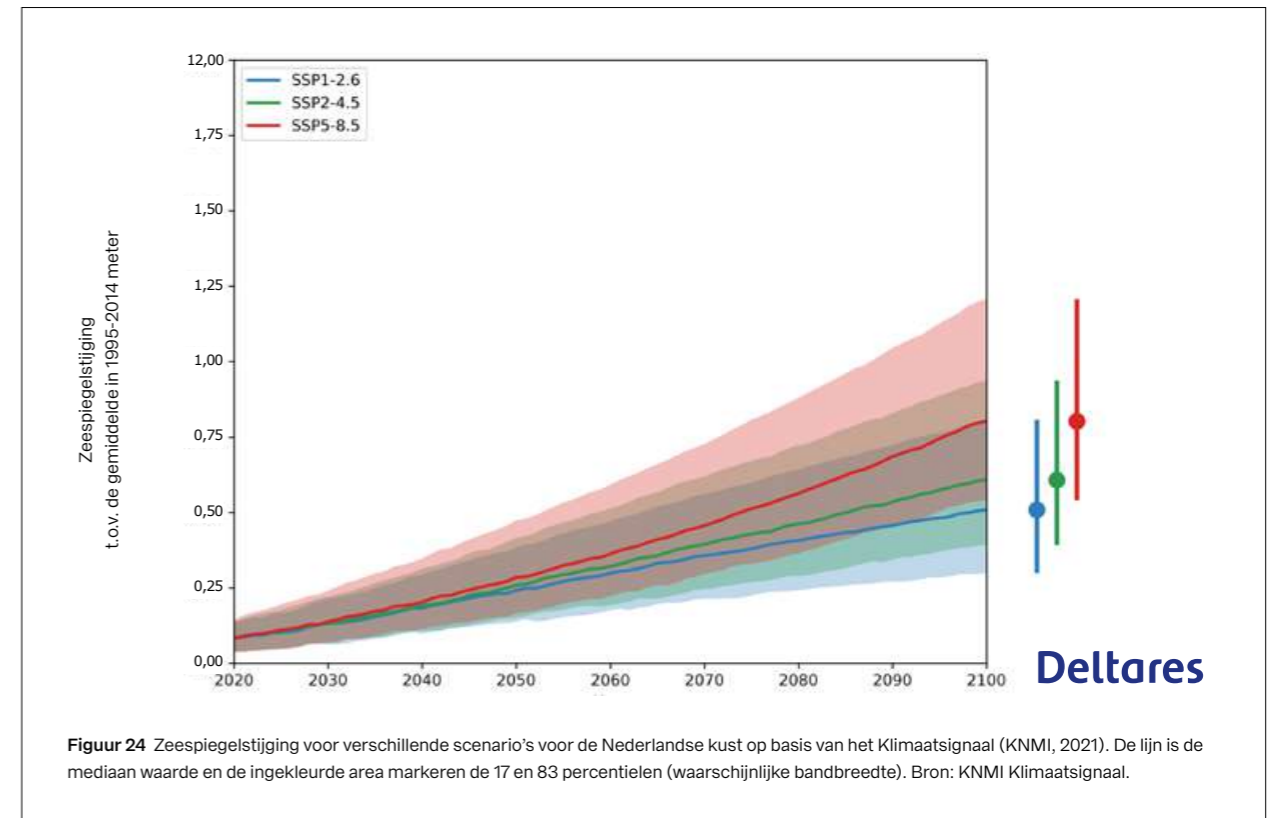
- Deltares, (2018). Haasnoot, M., L. Bouwer, F. Diermanse, J. Kwadijk, A. van der Spek, G. Oude Essink, J. Delsman, O. Weiler, M. Mens, J. ter Maat, Y. Huismans, K. Sloff, E. Mosselman. *Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning*. Deltares rapport 11202230-005-0002. [Downloaden](#)
- Deltares, (2019). Haasnoot, M., F. Diermanse, J. Kwadijk, R. de Winter, G. Winter. *Strategieën voor adaptatie aan hoge en versnelde zeespiegelstijging. Een verkenning*. Deltares rapport 11203724-004. [Downloaden](#)
- Deltares, (2019a). Invloed Hoge Scenario's voor Zeespiegelstijging voor Rijn-Maas Delta; Herijking VKS DPRD en DB RMD, onderdelen 1 en 2. Deltares in opdracht van het Deltaprogramma Rijnmond Drechtsteden.
- Deltares, (2020) De Bruijn, K. M., Diermanse, F., Haasnoot, M. & De Jong, J. S., (2020). Zeespiegelstijging: Waar mag de rivier nog naar toe?. Deltares 11203773-004.
- Deltares, BoschSlabbers, Sweco, (2021). *Op Waterbasis, Grenzen aan de maakbaarheid van ons water- en bodemsysteem*. [Downloaden](#)
- Dierx, J.R., A. Bomers, B. van der Meulen, et al., (2021). *Modelling early medieval flood-induced breaching of a coversand ridge in the IJssel valley, Rhine delta, the Netherlands*. *Geomorphology*, [10.1016/j.geomorph.2021.107913](#)
- Elias, E., Van der Spek, A., Wang, Z., & De Ronde, J., (2012). *Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century*. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie En Mijnbouw*, 91(3), 293-310. [10.1017/S0016774600000457](#)
- Groeskamp, S. and Kjellsson, J., (2020). *NEED: The Northern European Enclosure Dam for if Climate Change Mitigation Fails*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [10.1175/BAMS-D-19-0145.1](#)
- Haasnoot, M., J.H. Kwakkel, W.E. Walker, J. ter Maat. (2013) *Dynamic Adaptive Policy Pathways: A New Method for Crafting Robust Decisions for a Deeply Uncertain World*, GEC, [10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006](#)
- Haasnoot, M. R. Biesbroek, J. Lawrence, V. Muccione, R. Lempert, B. Glavovic, (2020). *Defining the solution space to accelerate climate change adaptation*. *Regional Environmental Change*. [10.1007/s10113-020-01623-8](#)
- Haasnoot, M., G. Winter, R. Dawson, S. Brown, P. Ward, D. Eilander, (2021). Long-term sea level rise necessitates a commitment to adaptation. *Climate risk management*. [10.1016/j.crm.2021.100355](#)
- Haasnoot, M., J. Lawrence, A. Magnan, (2021). Pathways to retreat. *Science* (80-). 372, 1287–1290, [10.1126/science.abi6594](#)
- Hanger-Kopp, S., Thaler, T., Seebauer, S., Schinko, T. & Clar, C. *Defining and operationalizing path dependency for the development and monitoring of adaptation pathways*. *Glob. Environ. Chang.* 72, 102425 (2022).
- HKV (2020a). B. Kuijper. *DEZY-berekeningen aanvullende pompcapaciteit IJmuiden. HKV lijn in water*, rapport PR4308.
- HKV (2020b). B. Kuijper. *DEZY-berekeningen extreme zeespiegelstijging. HKV lijn in water*, rapport PR4380.10.
- Huismans, Y., A. van der Spek, Q. Lodder, R. Zijlstra, E. Elias, Z. B. Wang, (2022). *Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: Spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise*, *Ocean & Coastal Management, Volume 216*, 2022, [10.1016/j.ocecoaman.2021.105969](#)
- IPCC, (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, [10.1017/9781009157896.001](#)
- IPCC, (2022a). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/](#)
- IPCC, (2022b): *Summary for Policymakers In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/](#)
- Kind, J., Bruijn, de, K., Diermanse, F., Wojciechowska, Klijn, F., Meij, van der, R., Nolte, A., Sloff, K., (2019). *Invloed hoge scenario's zeespiegelstijging voor Rijn-Maas Delta*.
- Kleinhans, M. G., F. Klijn, K.M. Cohen & H.J.H. Middelkoop, (2013). *Wat wil de rivier zelf eigenlijk?* Deltares-rapport 1207829, Universiteit Utrecht & Deltares, Utrecht. 50 pp.
- Klijn, F., (1999). *Afvoerverdeling Rijntakken: een vast gegeven?* WL | Delft Hydraulics, memo R 3294.95, Delft.
- Klijn, F., S.A.M. van Rooij, M. Haasnoot, L.W.G. Higler, B.S.J. Nijhof, (2002). *Ruimte voor de rivier, ruimte voor de natuur? Fasen 2 en 3: Analyse van alternatieven en contouren van een lange-termijnvisie*. Alterra-rapport xxx/ WL-rapport Q2824.10, Wageningen.
- Klijn, F., M. Hegnauer, J. Beersma & F. Sperna Weiland, (2015). *Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?* Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren. KNMI & Deltares-rapport 1220042, Delft. [10.13140/RG.2.1.4399.5601](#)
- Klijn, F., N.E.M. Asselman & E. Mosselman, (2019). *Robust river systems: on assessing the sensitivity of embanked rivers to discharge uncertainties, exemplified for the Netherlands' main rivers*. *Journal of Flood Risk Management* 2019; 12 (Suppl. 2): e12511; [10.1111/jfr3.12511](#)
- KNMI, (2021). *KNMI Klimaat signaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert*, KNMI, De Bilt, 72 pp. [Downloaden](#)
- Kwadijk, J. (ongedateerd) *Rijn op Termijn - Deelproject Nat en Droog*. Intern memo WL | Delft hydraulics, ong. 1997
- Kwadijk, J.C.J., M. Haasnoot, J.P.M. Mulder, M.C. Hoogvliet, A.B.M. Jeuken, R.A.A. van der Krogt, N.G.C. van Oostrom, H.A. Schelfhout, E.H. Velzen, H. van Waveren, M.J.M. de Wit, (2010), *Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands, Water management, marine and fluvial systems*, 2010
- Lodder, Q.L., Huismans, Y., Elias, E., de Looff, H., Wang, Z.B. (2022) *Future sediment exchange between the Dutch Wadden Sea and North Sea Coast - Insights based on ASMITA modelling*, *Ocean & Coastal Management* 219, 2022, 106067, doi 10.1016/j.ocecoaman.2022.106067.
- MinVenW, (1995). *Deltaplan Grote Rivieren, Ministerie van Verkeer en waterstaat – Directoraat-generaal Rijkswaterstaat*.
- Nijhuis, L.W. (2021), *Tidal parks in the Rhine-Meuse estuary; Case study Groene Poort*. MSc thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Oost A., A.C. Alonso, P. Esselink, Z.B. Wang, T. van Kessel, and B. van Maren (2021). *Where Mud Matters: towards a mud balance for the Trilateral Wadden Sea*. Waddenacademie rapport. 127 blz.
- Pelzer, P., (2021). *Verantwoordelijk voor de Toekomst, Op zoek naar een planologie van de lange termijn*, Van Eesteren-Fluck & Van Lohuizen Stichting, stadsessay, 79 blz
- Rijkswaterstaat, (2015). *Motie Geurts, Deltaprogramma: onderzoek naar de effecten van sluizen in de Nieuwe Maas en Oude Maas op de waterveiligheid en zoetwatervoorziening*. 'Nader onderzoek variant afsluiting Nieuwe Waterweg'. 19 november 2015, Definitief concept.
- Rijkswaterstaat WVL, (2017). *Eerste analyse van opties voor waterafvoer en peilbeheer IJsselmeergebied: Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied fase 2*.
- Rijkswaterstaat, (2020). *Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust*.
- RIKZ, (2002). *Effecten van spuilocaties op hydraulische morfologie en ecologie van Waddenzee en IJsselmeer*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Directoraat Generaal Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor kust en zee.
- RIVM, (2004). *Risico's in bedijkte termen, een thematische evaluatie van het Nederlandse veiligheidsbeleid tegen overstromen*. RIVM.

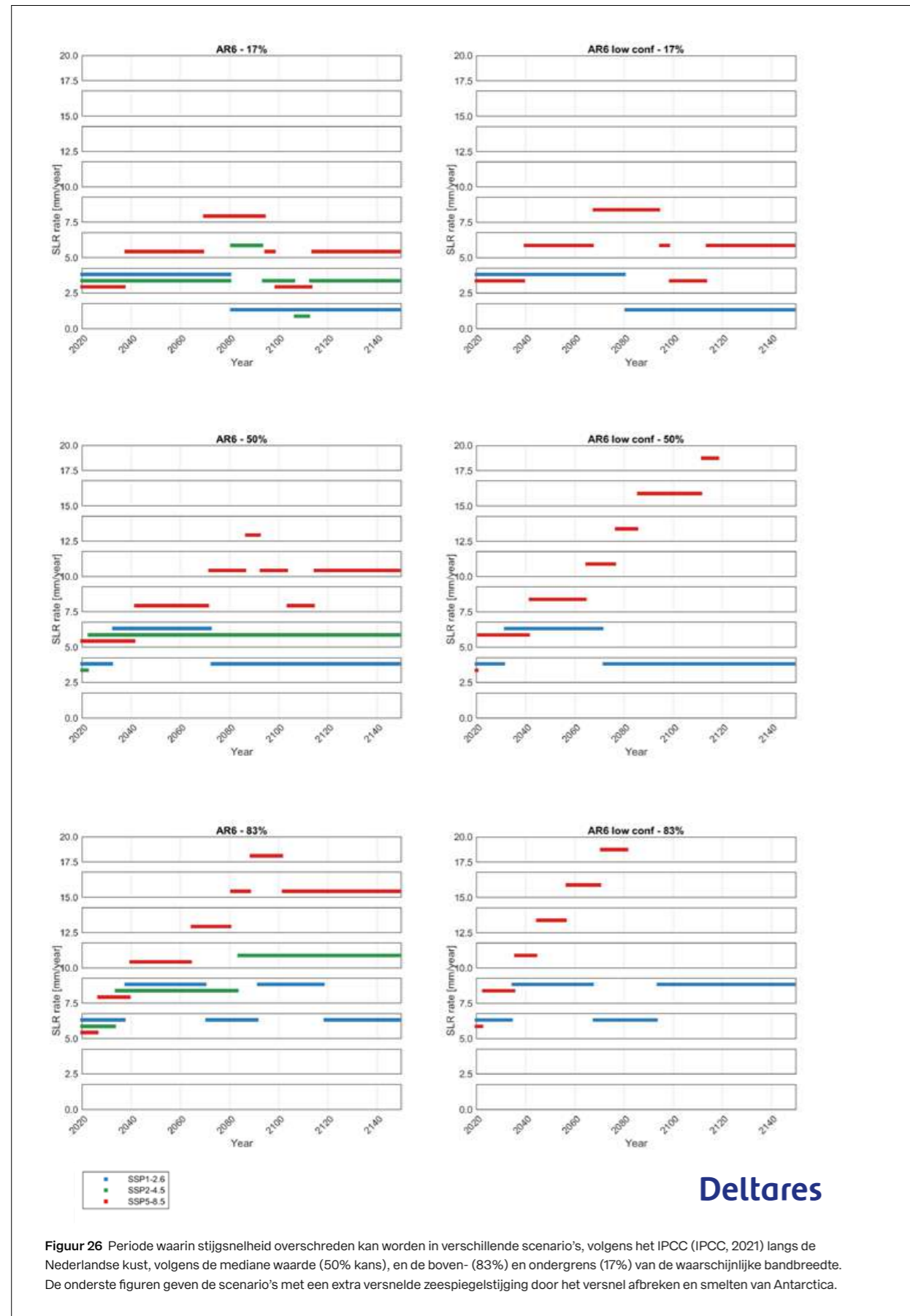
- RIZA, (2006). *Planologische Kernbeslissing – Ruimte voor de Rivier*, Rijkswaterstaat RIZA.
- RWS, (1982). *Policy analysis for the national water management of the Netherlands*.
- RWS, (1992). *Toelichting peilbesluit rijkswateren IJsselmeergebied*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat – Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Silva, W., F. Klijn & J.P.M. Dijkman, 2000. *Ruimte voor Rijntakken; wat het onderzoek ons heeft geleerd*. RIZA nota 2000.026, Arnhem/ WL-rapport R3294, Delft. 162 blz.
- Slangen, A. B. A., Haasnoot, M., & Winter, G. (2022). *Rethinking sea-level projections using families and timing differences*. *Earth's Future*, 10, e2021EF002576. [10.1029/2021EF002576](https://doi.org/10.1029/2021EF002576)
- Sperna Weiland, F., J. Beersma, M. Hegnauer & L. Bouaziz, 2015. *Implications of the KNMI'14 climate scenarios on the future discharge of the Rhine and the Meuse; comparison with earlier scenarios*. Deltares report 1220042.
- Stouthamer, E., K.M. Cohen & W.Z. Hoek, 2015. *De vorming van het land. Geologie en geomorfologie. Perspectief Uitgevers, Utrecht*.
- SWECO, (2021). *De investeringsopgaven in Delta-programma-regio's; adaptief en flexibel investeren. SWECO in opdracht van Staf Deltacommissaris, Kennisprogramma Zeespiegelstijging*.
- Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. et al., (2013). *Ecosystem-based coastal defence in the face of global change*. *Nature* 504, 79–83. [10.1038/nature12859](https://doi.org/10.1038/nature12859)
- TNO, (1998). *Case studies Marsroute*, TNO Bouw in opdracht van Rijkswaterstaat-RIZA.
- Van Belzen, Jim; Rienstra, Gerlof; Bouma, Tjeerd, (2021). *Dubbele dijken als robuuste waterkerende landschappen voor een welvarende Zuidwestelijke Delta*. NIOZ Report 2021-01, [10.25850/nioz/7b.b.kb](https://doi.org/10.25850/nioz/7b.b.kb)
- Van de Lageweg, W. I., J. N. S. de Paiva, P. L. M. de Vet, J. J. van der Werf, P. G. B. de Louw, B. Walles, T. J. Bouma, and T. J. W. Ysebaert. 2019. *Perkpolder tidal restoration: final report*. *Center of expertise delta technology, the Netherlands*, [Downloaden](#)
- Van der Werf, J., J. Reinders, A. van Rooijen, H. Holzhauser, and T. Ysebaert, (2015). *Evaluation of a tidal flat sediment nourishment as estuarine management measure*, *Ocean & Coastal Management*, 114, 77–87, [10.1016/j.ocecoaman.2015.06.006](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.006)
- Van der Werf, J. J., P. L.M. De Vet, M. P. Boersema, T. J. Bouma, A. J. Nolte, R. A. Schrijvershof, L. M. Soissons, J. Stronkhorst, E. Van Zanten, and T. Ysebaert, (2019). *An integral approach to design the Roggenplaat intertidal shoal nourishment*, *Ocean & Coastal Management*, 172, 30–40, [10.1016/J.OCECOAMAN.2019.01.023](https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2019.01.023)
- Van Rooij, S.A.M., F. Klijn & L.W.G. Higler, (2000). *Ruimte voor de rivier, ruimte voor de natuur? Fase 1: Verkenning*. Alterra-rapport 190, Wageningen.
- Van Til, K., (1979). *De Rijntakken van de bovenrivieren sedert 1600*. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Arnhem.
- Van Zelst, V.T.M., Dijkstra, J.T., van Wesenbeeck, B.K. et al., (2021). *Cutting the costs of coastal protection by integrating vegetation in flood defences*. *Nat Commun* 12, 6533. [10.1038/s41467-021-26887-4](https://doi.org/10.1038/s41467-021-26887-4)
- Vis, M., F. Klijn, S.A.M. van Rooij & M. van Buuren (eds.), (2001). *Living with floods. Resilience strategies for flood risk management and multiple land use in the lower Rhine River basin*. Final report. WL-report R3470, Delft.
- Wallis et al 2015; *Demography of the ecosystem engineer Crassostrea gigas, related to vertical reef accretion and reef persistence*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* Volume 154, 5 March 2015, Pages 224-233
- Walles, B., S. van Donk, A. Hamer, J. Wijsman, T. Ysebaert, E. Rurangwa, L. de Vet, J. van der Werf, J. van Dalen, T. Bouma, A. Slager, (2021). *Roggenplaatsuppletie (Oosterschelde): ontwikkelingen voor (T0: 2015-2019) en het eerste jaar na aanleg (T1: 2020) van de suppleties*. Wageningen Marine Research rapport. 168 pp.
- Wang, Z.B., van der Weck, A., (2002). *Sea-level rise and morphological development in the Wadden Sea*. WL-report Z3441, Delft.
- Wang, Z.B., Elias, E., Van der Spek, A., & Lodder, Q., (2018). *Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: Impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100*. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97(3), 183-214. [10.1017/njg.2018.8](https://doi.org/10.1017/njg.2018.8)
- Wang, Z.B. & Lodder, Q.L., (2019). *Sediment exchange between the Wadden Sea and North Sea Coast, Modelling based on ASMITA*, Deltares, Report 1220339-008-ZKS-006.
- Wang, Z.B., Huismans, Y., Van der Spek, A.J.F., (2020) *Morphological development of the tidal inlet systems in the Wadden Sea*. Deltares rapport.
- Witteveen en Bos, (2011). *Toepasbaarheidstoets CR2011, decimeringshoogtes*, Witteveen en Bos in opdracht van Rijkswaterstaat WWL.
- Wolfert, H.P., L.C.P.M. Stuyt, A.G.M. Hermans, J. Kruit, R.J.W. Olde Loohuis & F. Klijn, (2004). *Bergende stroming KAN*. Alterra-rapport 973, Wageningen. 23 pp.
- WUR, 2015. *MER beheer Haringvlietsluizen - over de grens van zout en zoet; Hoofdrapport Milieu-effectrapport over een ander beheer van de Haringvlietsluizen*. Wageningen University & Research.
- WL, 1997. *De Rijn op Termijn*. Brochure, WL | Delft Hydraulics, Delft.
- Zhu, Z., Vuik, V., Visser, P.J. et al., (2020). *Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence*. *Nat Sustain* 3, 853–862. [10.1038/s41893-020-0556-z](https://doi.org/10.1038/s41893-020-0556-z)

Bijlagen



Hoofdstuk 3





Figuur 26 Periode waarin stijgsnelheid overschreden kan worden in verschillende scenario's, volgens het IPCC (IPCC, 2021) langs de Nederlandse kust, volgens de mediane waarde (50% kans), en de boven- (83%) en ondergrens (17%) van de waarschijnlijke bandbreedte. De onderste figuren geven de scenario's met een extra versnelde zeespiegelstijging door het versnel afbreken en smelten van Antarctica.

Hoofdstuk 7



Water keren – Hard (H)

H1	Dijken ophogen/ verbreden/overslagbestendig			
H2	Compartimentering (inc ringdijk stad)			
H3	Dam lokaal/mega			
H4	Stormvloedkering			
H5	Dubbele dijken			
H6	Golfbreker			

Water keren – Zacht (Z)

Z1	Kustsuppletie lokaal/mega			
Z2	Vegetatie / vooroevers kust			
Z3	Zeewaartse landstrook / verbonden eilanden			
Z4	Natuurlijk land ophogen			
Z5	Kunstmatig land ophogen (megaterp)			

Rivieren afvoeren/bergen (R)

R1	Ruimte voor rivier			
R2	Andere afvoerdelingen Rijntakken, Maas en Benedenrivieren			
R3	Bergen IJsselmeer/ kustmeer/Zuidwestelijke delta			
R4	Afsluiten-pompen-spuien			

Aangepast bouwen (A)

A1	Verhoogd (terp/palen)			
A2	Drijvend			
A3	Schade beperkend (wetproof/dryproof)			

Verplaatsen en voorkomen (V)

V1	Bouwvrije zones			
V2	Bouwen met korte levensduur			
V3	Verplaatsen			
V4	Ontwikkelingen hoog Nederland			

Hoofdstuk 6

Deze bijlage bevat resultaten van simulaties van hoogwatergebeurtenissen op het IJsselmeer onder verschillende systeemconfiguraties. In de simulaties zijn de zeespiegel, pompcapaciteit, spuicapaciteit, streefpeil en het afvoerpercentage over de IJssel gevarieerd (zie paragraaf 6.3.2).

De afkortingen in de figuren hebben de volgende betekenis:

- 'pompCap': de totale pompcapaciteit bij de Afsluitdijk (ter referentie: na afronding van de huidige werkzaamheden is de pompcapaciteit ongeveer gelijk aan 400 m³/s);
- 'spuiCap': de totale spuicapaciteit bij de Afsluitdijk (1x betekent: referentiec capaciteit na oplevering van de geplande nieuwe spuinmiddelen bij Den Oever en 2x betekent een verdubbeling van de referentiec capaciteit);
- 'percAvf': de hoeveelheid extra piekafvoer over de IJssel als percentage van de piekafvoer van de Rijn bij Lobith (0% correspondeert met de huidige IJsselpiekafvoer ≈15% van de Rijnaafvoer, 5% correspondeert met 20% van de Rijnaafvoer etc.);
- 'strPeil': (winter-)streefpeil (NAP-0.4m in de huidige toestand in de winter);
- 'zeeStijging': het aantal m zeespiegelstijging ten opzichte van 2023.

