

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Strategieverlengende maatregelen KP-ZSS voor de Rijn-Maasmonding

Rapportnummer: PR5157.10



RWS INFORMATIE

Strategieverlengende maatregelen KP-ZSS voor de Rijn-Maasmonding

Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Systeemverkenningen

Datum	31 januari 2025
Versie	3.0
Status	Definitief

Colofon

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

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

Uitgegeven door	Kennisprogramma Zeespiegelstijging
In opdracht van	Rijkswaterstaat WVL
Auteurs	Wouter ter Horst, Bastiaan Kuijper, Ton Botterhuis, Jan Stijnen, David Knops
Informatie	Kennisprogramma Zeespiegelstijging Deltaprogramma
Datum	Januari 2025
Versie	3.0
Status	Definitief

Versiebeheer

1.0	29 nov 2024	Conceptrapportage
2.0	17 jan 2025	Definitieve rapportage, na verwerking commentaar RWS
3.0	31 jan 2025	Definitieve rapportage met enkele laatste verbeteringen



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Samenvatting

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) wordt kennis ontwikkeld om op een beter onderbouwde manier om te kunnen gaan met een onzekere zeespiegelstijging (ZSS) in de toekomst. Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging loopt van 2019 tot 2025 en dient de kennisleemten ten aanzien van de gevolgen van extreme zeespiegelstijging op het huidige waterbeleid te verkleinen. De inzichten uit het Kennisprogramma worden gebruikt voor de 6-jaarlijkse herijking van het Deltaprogramma in 2026 (DP 2027).

Vraagstelling

In 2023 is de Systeemanalyse Waterveiligheid KP ZSS opgeleverd [bron]. Hierin is gekeken naar de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategie van het Deltaprogramma. Als aanvulling op deze systeemanalyse wordt in het rapport dat voor u ligt geanalyseerd wat het effect is van strategieverlengende maatregelen op de huidige voorkeursstrategie. De focus ligt hierbij op de Rijn-Maasmonding en er is gekeken naar drie maatregelpakketten: waterberging op Volkerak-Zoommeer en Grevelingen (1), verbeteren van de Europoortkering (2) en inzet van pompen (3). In de studie is het effect van deze maatregelpakketten op de waterstanden in de Rijn-Maasmonding bepaald.

Hoofdboodschappen

1. Effectiviteit van maatregelen

Het is mogelijk om met (pakketten van) maatregelen de waterstanden in de Rijn-Maasmonding te verlagen ten opzichte van de basissituatie. Dit betekent dat ten opzichte van de basissituatie de voorkeursstrategie langer aangehouden kan worden, maar deze verlenging is niet significant. Met betrekking tot de effectiviteit van maatregelpakketten zijn de volgende opmerkingen te plaatsen:

- Het gemiddelde effect van de maatregelpakketten gezamenlijk is orde 0,5 m bij 1,0 m zeespiegelstijging in 2100 en 0,4 m bij 3,0 m zeespiegelstijging in 2200. Het feit dat bij 3,0 m zeespiegelstijging hogere sluitpeilen worden gehanteerd zorgt ervoor dat de effectiviteit voor 2200 afneemt.
- De effectiviteit van maatregelpakketten wordt beïnvloed door de andere maatregelpakketten. Zo zorgen verbeterde stormvloedkeringen (pakket 2) ervoor dat de effectiviteit van waterberging (pakket 1) effectiever wordt.

2. Dagelijkse omstandigheden doen ertoe

De huidige voorkeursstrategie voor de Rijn-Maasmonding is gebaseerd op een open-afsluitbaar systeem. Dat betekent dat er onder dagelijkse omstandigheden een open verbinding is met de zee en dat het watersysteem bij extreme stormen op zee kan worden afgesloten met stormvloedkeringen. Met deze strategie laten we net als in de huidige situatie ook met een stijgende zeespiegel onder dagelijkse omstandigheden het water van de Noordzee in de delta toe. De toename van de hydraulische belastingen (en daarmee ook de kosten) door klimaatontwikkeling op de waterkeringen en in het buitendijks gebied wordt daardoor voor het grootste deel veroorzaakt door de stijging van die dagelijkse omstandigheden.

3. Maatregelpakketten verlagen hydraulische belastingen

Gegeven het uitgangspunt van een open-afsluitbaar systeem zorgen de strategieverlengende maatregelpakketten ("systeemmaatregelen") wel degelijk voor een verlaging van de hydraulische belastingen in de Rijn-Maasmonding en de daarmee gepaard gaande dijkversterkingskosten. Deze verlaging compenseert in het maximale geval 30-40% van de zeespiegelstijging. Deze reductie komt dicht in de buurt van wat theoretisch maximaal is op basis van een open-afsluitbaar systeem (waar afsluiten enkele keren per jaar optreedt).
4. Ook versterkingskosten zonder zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging is slechts één van de oorzaken waarom in de toekomst dijkversterkingen in het gebied van de Rijn-Maasmonding nodig zullen zijn. Naast vervanging en renovatie van de keringen vanwege onderhoud (einde levensduur), hebben we door klimaatverandering te maken met een toename van de rivierafvoer en een bodemdaling die blijft doorzetten. Met name deze laatste oorzaak draagt in bepaalde delen van de Rijn-Maasmonding zelfs meer bij aan de (toekomstige) versterkingsopgave dan de zeespiegelstijging. En omdat de kosten voor de dijkversterkingen tóch gemaakt moeten worden (ook door de boodschap onder punt 1), blijken de besparingen op de kosten door de uitvoering van de maatregelpakketten (in verhouding) beperkt. Grofweg 80% van de geprognoseerde versterkingskosten bij handhaven van de huidige voorkeursstrategie (fase 1) worden veroorzaakt door het meestijgen met de zeespiegel onder dagelijkse omstandigheden, een toename van de rivierafvoer en verwachte bodemdaling.

Een grove inschatting van de kosten van de maatregelpakketten laat zien dat deze een ordegrootte groter zijn dan de mogelijke kostenreductie die ze opleveren.
5. Geen knikpunten

Met betrekking tot de houdbaarheid van de huidige voorkeursstrategie zien we vanuit technisch- of vanuit kostenperspectief geen knikpunten in noodzakelijke maatregelen voor waterveiligheid. De verwachting is dat de introductie van nieuwe maatregelpakketten, of de verfijning van de hier onderzochte maatregelpakketten daar geen verandering in gaat brengen, tenzij het meestijgen in een open-afsluitbaar watersysteem ter discussie wordt gesteld.

Summary

Within the Sea Level Rise Knowledge Program (in Dutch: Kennisprogramma Zeespiegelstijging; KPZSS), knowledge is being developed to inform decision-making in the face of uncertain future sea level rise (SLR). The Sea Level Rise Knowledge Program runs from 2019 to 2025 and aims to reduce knowledge gaps concerning the impacts of extreme sea level rise upon current water policy. The insights from the Knowledge Program will be used for the 6-yearly review of the Delta Program in 2026 (DP 2027).

Problem statement

The Water System Analysis Flood Risk KP ZSS was completed in 2023 [Zethof, 2023]. It examined the sustainability and extensibility of the Delta Program's current preferred strategy. As a supplement to this system analysis, this report analyses the effectiveness of strategy life-extending measures on the current preferred strategy. The study focuses on the Rhine-Meuse estuary and examines three flood adaptation portfolios: water storage in Volkerak-Zoommeer and Grevelingen (1), improvements to the Europoort barrier (2), and pump deployment (3). The analysis determined these adaptation portfolios' effects on water levels in the Rhine-Meuse estuary.

Key messages

1. Effectiveness of adaptation measures

It is possible to reduce water levels in the Rhine-Meuse estuary compared to the baseline situation using additional flood adaptation measures. Consequently, the preferred strategy can be maintained for a longer period, although this extension in time is not significant. Regarding the effectiveness of adaptation measures the following remarks can be placed:

- The average effect of adaptation measures is in the order of 0.5 m in case of 1.0 m sea level rise in 2100 and 0.4 m in case of 3.0 m sea level rise in 2200. The decrease of effectiveness in 2200 is caused by the fact that closure levels of storm surge barriers are raised in 2200.
- The effectiveness of adaptation measures is influenced by the other adaptation measures. For example, improved storm surge barriers (package 2) ensure that the effectiveness of water storage (package 1) becomes more effective.

2. Daily conditions matter

The current preferred strategy for the Rhine-Meuse estuary is based on an open-closable system, providing an open connection with the sea under daily conditions while allowing closure through storm surge barriers during extreme storms. Similar to the present situation, this strategy maintains tidal exchange with the North Sea under daily conditions, even as sea levels rise. Consequently, the increase in hydraulic loads on flood defences and the unembanked area is primarily driven by changes in daily conditions rather than extreme conditions.

3. Set of adaptation measures reduce hydraulic loads

Given the premise of an open-closable system, the strategy life-extending measures ("system measures") reduce hydraulic loads in the Rhine-Meuse estuary and the associated dike reinforcement costs. This reduction compensates for 30-40% of sea level rise in the maximum case. The

effectiveness approaches the theoretical maximum for an open-closable system (with multiple annual closures).

4. Dike reinforcement necessary even without sea level rise

Sea level rise is only one of several drivers why future dike reinforcements will be necessary in the Rhine-Meuse estuary. Additional drivers include (end-of-life) replacement and renovation of flood defences, increased river discharge due to climate change, and ongoing land subsidence. In certain parts of the Rhine-Meuse estuary, land subsidence contributes more significantly to future reinforcement requirements than sea level rise. Since these reinforcement costs are inevitable (see also the first key message), the potential cost savings from implementing flood adaptation portfolios remain relatively modest. Under the current preferred strategy (phase 1), approximately 80% of projected reinforcement costs are attributed to three factors: mean sea level rise under daily conditions, increased river discharge, and expected land subsidence. A rough estimate of the costs of the packages of measures shows that they are an order of magnitude greater than the potential cost reduction they will yield.

5. No tipping points

Regarding the viability of the current preferred strategy, we see no tipping points from either a technical or cost perspective in necessary measures for flood protection. Neither the introduction of new adaptation portfolios nor refinements to the analysed interventions are expected to alter this conclusion, unless the premise of tidal exchange in an open-closable system is reconsidered.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
Summary	6
Inhoudsopgave	8
1	Introductie
1.1	Algemeen
1.2	Achtergrond project
1.3	Positionering Strategieverlengende maatregelen Rijn-Maasmonding
1.4	Korte gebiedsbeschrijving
1.5	Inhoud van dit rapport
2	Aanpak
2.1	Vertrekpunt: herhaling fase 1
2.2	Modellentrein
2.3	Basissituatie en maatregelpakketten
2.4	Tijdslijnen en referentiesituatie
2.5	Aanvullende analyses
3	Hydraulische effecten van maatregelen
3.1	Inleiding
3.2	Bandbreedte in waterstanden
3.3	Effect van maatregelpakketten 1, 2 en 3
3.4	Gebiedsdekkend beeld hydraulische belastingen
3.5	Effect maatregelen voor Hollandse IJssel
3.6	Conclusies over hydraulische effecten
4	Opgave en dijkversterkingskosten en kosten van maatregelen
4.1	Inleiding
4.2	Dijkversterkingsopgave
4.3	Reductie van dijkversterkingskosten
4.4	Voorbeeldcase dijkversterkingsopgave- en kosten normtraject 16-2
4.5	Inschatting van kosten van maatregelpakketten
5	Conclusies
5.1	Inhoudelijke conclusies maatregelpakketten
5.2	Hoofdboodschappen
6	Referenties
Bijlage A	Statistiek zeewaterstand en rivierafvoer
A.1	Eindige set windsterktes, zeewaterstanden en rivierafvoeren
A.2	Toekomstscenario's
A.3	Waterstandstatistiek Noordzee
A.4	Afvoerstatistiek Rijn en Maas
A.5	Afvoerverdeling splitsingspunten
Bijlage B	Beschrijving maatregelpakketten
B.1	Pakket 1: basissituatie + extra waterberging Zuidwestelijke Delta

B.2	Pakket 2: pakket 1 + verbeteren Europoortkering en Haringvlietdam	56
B.3	Pakket 3: pakket 2 + aanleg van gemalen	57
B.4	Pakket M: theoretisch maximaal effect systeemmaatregelen	58
B.5	Dimensionering maatregelpakketten	60
B.6	Instellingen stormvloedkeringen	62
Bijlage C	Resultaat maatregelpakketten	65
C.1	Resultaat reproductie 'oude' basissituatie	71
C.2	Resultaat 'nieuwe' basissituatie	72
C.3	Resultaat pakket 1: basissituatie + extra waterberging ZW-Delta	75
C.4	Resultaat pakket 2: pakket 1 + verbeteren EPK en Haringvlietdam	81
C.5	Resultaat pakket 3: pakket 2 + aanleg van gemalen	88
C.6	Resultaat pakket M: theoretisch maximum systeemmaatregelen	95
C.7	Effect maatregelen op klimaatopgave	98
Bijlage D	Extra berging op Oosterschelde	106
D.1	Probleemschets	106
D.2	Berekening afgevoerd volume	107
D.3	Beperking werkwijze	109
D.4	Vermeden versterkingskosten	110
D.5	Discussie en conclusies	110
Bijlage E	Gevolgen inzet Grevelingen en Volkerak-Zoommeer	112
E.1	Probleemschets	112
E.2	Berekening toename inzetfrequentie	112
E.3	Berekening toename waterstand bij inzet	115
E.4	Effect op de hydraulische belastingen	117
E.5	Opgave en versterkingskosten	122
E.6	Discussie en conclusies	125
Bijlage F	Gevoeligheidsanalyse aanpassing sluitpeil	126
F.1	Probleemschets	126
F.2	Berekening wijziging sluitfrequentie	127
F.3	Berekening wijziging waterstanden	128
F.4	Discussie en conclusies	132
Bijlage G	Effect maatregelen voor Hollandsche IJssel	137
G.1	Probleemschets	137
G.2	Berekening effect maatregelpakket	137
G.3	Vermeden versterkingskosten	140
G.4	Discussie en conclusies	140
Bijlage H	Uitgangspuntendocument	142
H.1	Inleiding	142
H.2	Uitgangspunten	143
H.3	Waterstandsberekeningen (Sobek)	147
H.4	Golfberekeningen (Bretschneider)	155
H.5	Hydraulische belastingen (Hydra-NL)	155
H.6	Versterkingskosten en -dimensies (OKADER)	156
Bijlage I	Herberekening HB en dijkopgave Oosterschelde	159

1 Introductie

1.1 Algemeen

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) wordt kennis ontwikkeld om op een beter onderbouwde manier om te kunnen gaan met een onzekere zeespiegelstijging (ZSS) in de toekomst. Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging loopt van 2019 tot 2025 en dient de kennisleemten ten aanzien van de gevolgen van extreme zeespiegelstijging op het huidige waterbeleid te verkleinen. De inzichten uit het Kennisprogramma worden gebruikt voor de 6-jaarlijkse herijking van het Deltaprogramma in 2026 (DP 2027). Binnen het programma wordt kennis via verschillende lijnen ontwikkeld.

Zo is onderzoek gedaan naar de onzekerheden rondom het afsmelten van de ijskappen op Antarctica. Ook is onderzocht welke gevolgen ZSS heeft voor onze hoogwaterveiligheid en zoetwaterbeschikbaarheid en vormt daarmee belangrijke input voor de houdbaarheid van de voorkeursstrategie van het Deltaprogramma. Er is ook een methode ontwikkeld om tijdig te kunnen signaleren en de nodige maatregelen hierop te kunnen nemen. Als de voorkeursstrategie niet meer houdbaar is, dan moet deze op termijn aangepast worden. Om de noodzakelijke aanpassingen te kunnen doen, is de medewerking van relevante partners nodig.

Inmiddels is de eerste fase van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging afgerond, wat heeft geresulteerd in de publicatie van de "tussenbalans" in november van 2023 (Ministerie van IenW, 2023). In die eerste fase is met name onderzoek gedaan naar de effecten van zeespiegelstijging op onze primaire waterkeringen, de beschikbaarheid van zoet water, de sedimentbehoefte van de zandige kust en de volhoudbaarheid van de huidige strategie.

Er moet echter rekening mee worden gehouden dat de zeespiegel versneld zou kunnen stijgen en ook op termijn verder stijgt. Dan komen ook andere richtingen in beeld. Eerder heeft Deltares in opdracht van de Deltacommissaris bestaande plannen in kaart gebracht en deze ingedeeld in verschillende strategieën of denkrichtingen (Deltares, 2019). In de afgelopen periode zijn deze denkrichtingen binnen het KP ZSS nader uitgewerkt voor scenario's met twee en vijf meter zeespiegelstijging. Dat is gedaan door drie breed samengestelde consortia van kennisinstellingen, het bedrijfsleven, de Topsector Water en Maritiem en overheden.

In de tweede fase van het KP ZSS komen de resultaten van deze verkenningen samen met de informatie uit de tussenbalans en nog lopende onderzoeken. Aan de hand daarvan worden de volgorde en timing van verschillende toekomstige beslissingen onderzocht. Deze informatie wordt bijeengebracht in een eindrapportage die is voorzien voor 2026. De opbrengst van het KP ZSS wordt meegenomen in de herijking van het Deltaprogramma.

Dit rapport is onderdeel van fase 2 van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, binnen de Systeemverkenningen. Eerder zijn in fase 1 langs drie thema's verkenningen gedaan naar de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma, te weten waterveiligheid, de zandige kust en zoetwater. Voorliggende rapportage is onderdeel van het thema Waterveiligheid en is in opdracht van Rijkswaterstaat (RWS) opgesteld. In deze rapportage staan de resultaten beschreven van het verlengen van de huidige voorkeursstrategie met maatregelpakketten, om zo de te verwachten waterveiligheidsopgave in de Rijn-Maasmonding door zeespiegelstijging in het huidige hoofdwatersysteem zo klein mogelijk te houden.

1.2 Achtergrond project

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

Een stijgende zeespiegel heeft direct invloed op de hydraulische belastingen op de waterkeringen, doordat waterstanden en golven toenemen, maar ook indirect, omdat bijvoorbeeld spuiomogelijkheden onder vrij verval vanuit regionale systemen naar het hoofdwatersysteem, en van daaruit naar zee wijzigen. Ook de sluitfrequenties van stormvloedkeringen nemen toe zolang het sluitpeil niet wordt aangepast. Verhoging van het sluitpeil geeft minder sluitingen, maar leidt tot meer inundatie van buitendijkse gebieden. Door grotere belastingen is versterking van de waterkeringen nodig om aan de vereiste overstromingskans te voldoen. De studie in dit project dient begrip van en inzicht te geven in het effect van zeespiegelstijging op de belastingen en de doorwerking daarvan op de overstromingskans, waarbij aan de hand van verschillende maatregelpakketten de huidige voorkeurs-strategie zoveel mogelijk wordt "opgerekt". Vervolgens wordt de versterkingsopgave (kosten en ruimtebeslag) in beeld gebracht. Het KP ZSS gebruikt de resultaten van deze studie om de impact van zeespiegelstijging op verschillende functies in beeld te brengen, de houdbaarheid van de voorkeurstrategie te duiden en de oprekmogelijkheden te verkennen.

1.3 Positionering Strategieverlengende maatregelen Rijn-Maasmonding

De voorliggende analyse naar de zogenaamde strategieverlengende maatregelen in de Rijn-Maasmonding op het gebied van waterveiligheid is onderdeel van de Systemverkenningen. De kennisontwikkeling voor de systeemverkenningen is gericht op het verkrijgen van inzicht in de vraag:

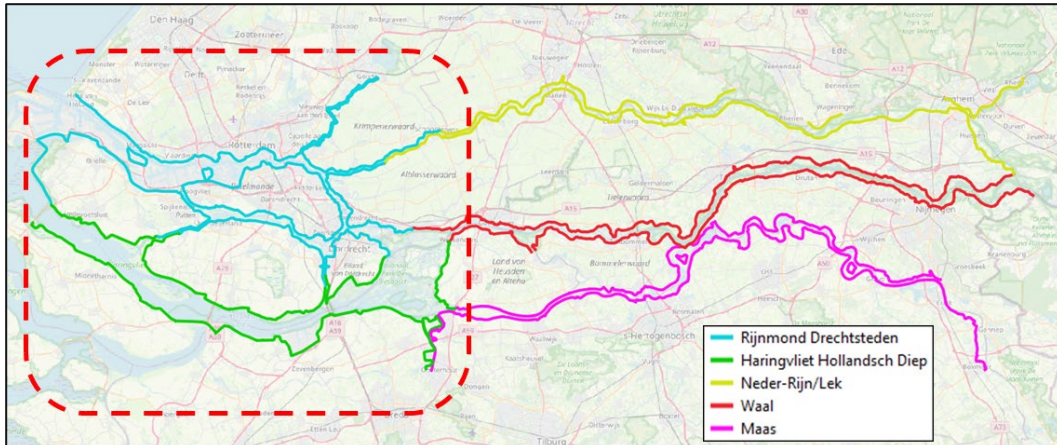
Tot hoeveel stijging volstaan de voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma en zijn aanpassingen mogelijk om deze strategieën langer vol te houden?

Als onderdeel van deze doelstelling is de vraag gesteld wat de mogelijkheden zijn op de huidige voorkeursstrategie op te rekken. Anders geformuleerd: welke maatregelen kunnen bijdragen aan het verlengen van de huidige strategie bij een stijgende zeespiegel? Dit rapport zal ingaan op de beantwoording van bovengenoemde vragen en kan gezien worden als een vervolg op de Systemanalyse Waterveiligheid van fase 1 voor deze zelfde regio (Zethof et al., 2023). De rapportage is opgesteld door HKV lijn in water, in samenwerking met Rijkswaterstaat en Deltares.

1.4 Korte gebiedsbeschrijving

Deze rapportage gaat over het deelgebied Rijn-Maasmonding en een deel van het rivierengebied. In dit gebied is sprake van een grote opgave, waar veel kosten mee gemoeid zijn en waarvoor naar verwachting nog diverse mogelijkheden tot optimaliseren niet gekwantificeerd zijn. De scope omvat de gebieden die onder directe invloed staan van zeespiegelstijging. Daartoe behoren de dijken, dammen en

de meeste kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkeringen in de Rijn-Maasmond en een deel van het Rivierengebied. De focus ligt op de Rijn-Maasmond (gearceerde deel). Deze gebieden behoren tot de scope van dit rapport, zie Figuur 1.



Figuur 1: Studiegebied, Rijn-Maasmond en gedeelte van het Rivierengebied.

1.5 Inhoud van dit rapport

Dit rapport beschrijft de studie naar strategieverlengende maatregelen die in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP-ZSS) is uitgevoerd. We hebben ervoor gekozen om in de hoofdttekst inhoudelijke stappen beknopt toe te lichten. Deze stappen zijn in de bijlagen gedetailleerder beschreven. Hoofdstuk 2 beschrijft de aanpak van de studie, waarbij in wordt gegaan op de rekenmethode, de maatregelpakketten en de verschillende tijdlijnen. In hoofdstuk 3 is de hydraulische effectiviteit van de maatregelpakketten beschreven. Als vervolg hierop is in hoofdstuk 4 het effect van de maatregelen op de versterkingsopgave en de dijkversterkingskosten weergegeven. Tenslotte worden in hoofdstuk 5 vier hoofdboodschappen als conclusies gepresenteerd. Daarna gaan een zestal bijlagen dieper in op de verschillende inhoudelijke aspecten van de studie.

2 Aanpak

2.1 Vertrekpunt: herhaling fase 1

Zoals aangegeven in hoofdstuk 1, is voor de Systeemanalyse Waterveiligheid van het KP-ZSS met een landelijk uniforme aanpak de waterveiligheidsopgave door zeespiegelstijging bepaald (Zethof et al., 2023). We sluiten in de voorliggende analyse naar de strategieverlengende maatregelen voor de Rijn-Maasmonding aan bij die landelijke aanpak, in die zin vormen de analyses uit de voorliggende rapportage een herhaling van fase 1. De analyses zijn uitgevoerd inclusief de maatregelpakketten uit paragraaf 2.5. In het vervolg van dit hoofdstuk schetsen we de gehanteerde methode op hoofdlijnen, voor de details verwijzen we naar de rapportage uit de Systeemanalyse Waterveiligheid uit fase 1.

2.2 Modellentrein

In de Systeemanalyse Waterveiligheid is met behulp van verschillende modellen ingeschat wat het effect van verschillende zeespiegelstijgingen is op de Rijn-Maasmonding. De focus van deze modellen lag op (1) de inschatting van waterstandstijging in het gebied bij verschillende zeespiegelstijgingen, (2) de inschatting van het effect van een hogere waterstand op de veiligheid van de waterkering en (3) de inschatting van extra kosten en ruimtebeslag door benodigde aanpassing van de waterkeringen in het studiegebied.

Voor de uitwerking van de waterveiligheidsopgave is ook in deze studie, conform de Systeemanalyse Waterveiligheid, een modelinstrumentarium gebruikt dat aansluit bij de uitgangspunten van aanpalende beleidsstudies en is een versimpeling van de BOI-systematiek die toegepast wordt bij de landelijke beoordeling zoals vastgelegd in de Waterwet (Figuur 2). De gevolgde methode en de bijbehorende modellentrein is mede totstand gekomen door medewerking en bijdragen van Robert Vos van Rijkswaterstaat.



Figuur 2: Overzicht van de gehanteerde modellentrein

1. In de eerste stap is de waterbeweging geanalyseerd: met een hydraulisch model zijn waterstanden in het studiegebied gesimuleerd.
2. Voor een groot aantal combinaties van verschillende zeewaterstanden en rivierafvoeren zijn de lokale waterstanden voor het huidige en toekomstige klimaat bepaald. Die waterstanden zijn opgeslagen in databases.
3. Deze databases dienen vervolgens als invoer voor een probabilistisch model, waarmee rekening is gehouden met de kansen van voorkomen van de doorgerekende belastingcombinaties. Met het probabilistische model kan ook rekening worden gehouden met de faalkans van het sluiten van enkele stormvloedkeringen. Het resultaat van deze stap zijn de waterstanden en hydraulische belastingniveaus (HBN's) bij de normfrequenties van de dijktrajecten voor verschillende zeespiegelstijgingen en zichtjaren.
4. Als laatste zijn de resultaten uit de vorige stap gekoppeld aan de actuele sterkte van de dijken voor een gegeven zichtjaar op een tijdlijn. Indien nodig volgt hieruit een opgave voor een verbeterd ontwerp van de dijken en de benodigde kosten voor deze dijkversterking. De actuele sterkte van de dijken is beoordeeld. Na een versterking vervangt het nieuwe ontwerp de dijken in het

vervolg van de tijdlijn. Omdat de hydraulische belastingen aanzienlijk toenemen zijn meerdere versterkingsrondes over de periode 2024 – 2200 berekend. Door deze modellentrein te doorlopen voor verschillende maatregelpakketten en voor verschillende tijdlijnen kunnen de resultaten in termen van hydraulische belastingen en kosten met elkaar worden vergeleken. Dit lichten we in het vervolg van dit hoofdstuk nader toe.

2.3 Basissituatie en maatregelpakketten

Hoewel we ons in de voorliggende studie baseren op dezelfde modellentrein als in de Systeemanalyse, onderzoeken we nu iets fundamenteel anders. We zijn niet langer alleen geïnteresseerd in de implicaties van klimaatverandering, maar voegen daar een extra dimensie aan toe door het toevoegen van verschillende maatregelpakketten om de invloed van zeespiegelstijging achter het zeefront te beperken.

Basissituatie

De *basissituatie* heeft betrekking op de inrichting van het huidige watersysteem, dat wil zeggen zonder de strategieverlengende maatregelen in de pakketten zoals hieronder beschreven. Daarbij geldt:

- De noodzakelijke vervanging (en eventuele verbetering) van de huidige stormvloedkeringen (SVK's), zoals voorzien in de huidige Voorkeurstrategie, is beschouwd als een strategieverlengende maatregel en zijn daarom geen onderdeel van de basissituatie.
- De waterkeringen zijn op orde. Alle dijkversterkingen via het reguliere Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) worden in mindering gebracht op de berekende opgave. Omdat deze reguliere versterking nog niet helemaal bekend is, is hiervan een schatting berekend. In 2050 zijn de dijken minimaal op orde, dat wil zeggen dat de overstromingskans minimaal gelijk is aan de ondergrensnorm. Maar omdat dijken in de regel versterkt worden voor 50 jaar kunnen zij in 2050 nog resthoogte (en/of reststerkte) hebben.

Maatregelpakketten

In aanvulling op de basissituatie zijn drie maatregelpakketten onderzocht (Oerlemans et al., 2024). In de analyse wordt er vanuit gegaan dat de maatregelpakketten vanaf 2050 volledig in werking zijn. Tussen het huidige zichtjaar (2023) en 2050 wordt er 'geïnterpoleerd'. Dus stukje bij beetje worden de pakketten meer in werking gesteld.

Het is goed om te dat er geen ontwerp van maatregelen heeft plaatsgevonden. Het detailniveau van de studie is hiervoor niet geschikt. Er zijn wel parameters afgeleid, zoals een benodigde doorstroombopening of een lagere faalkans voor de Europoortkering, maar er is niet bepaald hoe deze maatregelen ontworpen worden.

1. Pakket 1: basissituatie + uitgebreide waterberging in de Zuidwestelijke Delta

Door voldoende doorstroomboppervlak in de Volkerakdam en de Grevelingendam te realiseren, wordt extra waterberging gecreëerd op het Grevelingenmeer bij sluiting van de stormvloedkeringen.



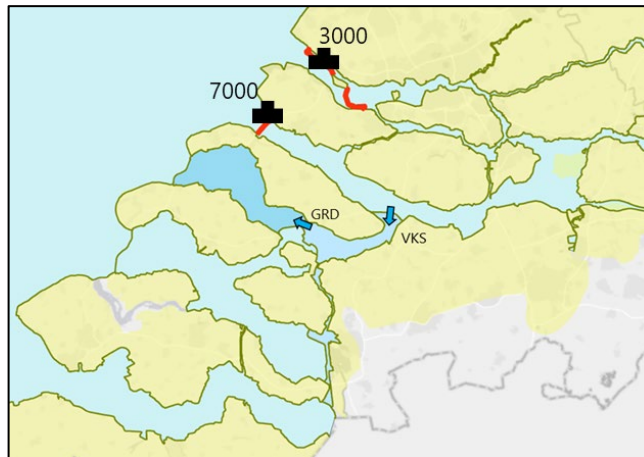
2. Pakket 2: pakket 1 + verbeteren Europoortkering en Haringvlietdam.

Aanvullend op maatregelpakket 1 wordt de faalkans van de Europoortkering (EPK: Maeslant- en Hartelkering) verkleind tot 1x per 5.000 sluitingen en wordt de kerende hoogte van de EPK en de Haringvlietdam aanzienlijk verhoogd.



3. Pakket 3: pakket 2 + aanleg gemalen.

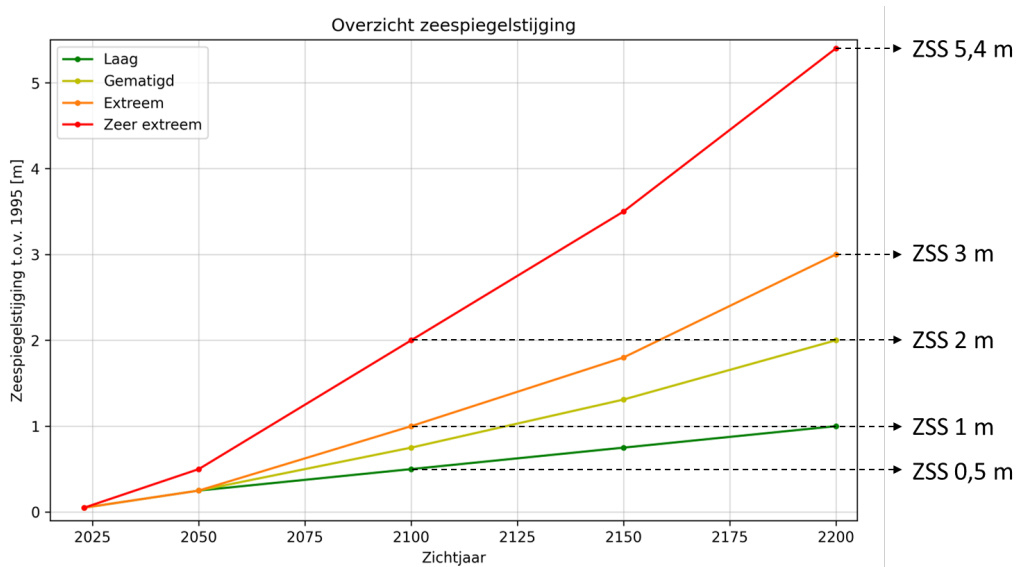
Aanvullend op maatregelpakket 2 worden gemalen geplaatst bij de EPK en bij de Haringvlietdam om tijdens hoogwater extra water uit het systeem te kunnen pompen, zodat de waterstand bij een sluiting van de stormvloedkeringen niet te hoog oploopt (mocht de waterberging onvoldoende zijn).



Nadere details ten aanzien van deze maatregelen (inclusief de precieze dimensionering van de verschillende kunstwerken uit de maatregelpakketten) zijn opgenomen in Bijlage B.

2.4 Tijdlijnen en referentiesituatie

Een tijdlijn beschrijft de mate van zeespiegelstijging (zss) in combinatie met de verwachte ontwikkeling van de rivierafvoer en de riviermorphologie. De bodemdaling is voor ieder specifiek dijkvak vastgesteld op een vaste hoeveelheid per jaar. De waterveiligheidsopgave voor de basissituatie en de verschillende maatregelpakketten is telkens bepaald voor 4 tijdlijnen: Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem. Elke tijdlijn begint met de referentiesituatie in 2023, die voor alle 4 de tijdlijnen gelijk is. De zss en de afvoerstatistiek per tijdlijn en zichtjaar is weergegeven in Tabel 1. De zss is ook grafisch weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3: Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 per tijdlijn en zichtjaar.

Opmerking
 Tijdlijnen zijn niet hetzelfde als KNMI-scenario's, maar wel daarmee afgestemd. Nieuwe KNMI-2023 scenario's zullen naar verwachting in lijn zijn met de tijdlijnen van KP ZSS, afhankelijk van het gekozen onzekerheidspercentiel [Rijkswaterstaat, 2021a].

Net als in de Systemanalyse Waterveiligheid gaat het om het in beeld brengen van *relatieve veranderingen* in de waterveiligheidsopgave t.o.v. de opgave in de basissituatie. Deze veranderingen zijn in beeld gebracht ten opzichte van "systeem op orde". De condities volgens tijdlijn Laag in zichtjaar 2050 komen overeen met de gehanteerde uitgangspunten voor de geprognostiseerde dijkversterkingsmaatregelen die via het HWBP zijn/worden ingepland. Niet alle benodigde versterkingen tot 2050 zijn al in plannen vastgelegd. Er is een berekening gemaakt om vast te leggen welke inspanning nodig is om vanuit de referentiesituatie in 2023 te komen tot een systeem dat in 2050 "op orde" is (voldoet aan de norm voor waterveiligheid) én waarmee in het beleid al rekening wordt gehouden. De berekende waterveiligheidsopgave voor de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem wordt verminderd met deze berekende versterking voor Laag-2050. Dit komt erop neer dat voor de tijdlijn Laag in 2050 geen aanvullende versterkingen nodig zijn en voor tijdlijn Extreem zijn de benodigde versterkingen alleen het gevolg van een toename van de rivierafvoer. In 2050 in de tijdlijn Zeer Extreem ontstaat ook een opgave door de versnelde zeespiegelstijging van 0,25 naar 0,5 m.

Tabel 1: Overzicht zeespiegelstijging t.o.v. 1995 (m) en de rivierafvoerstatistiek voor de verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

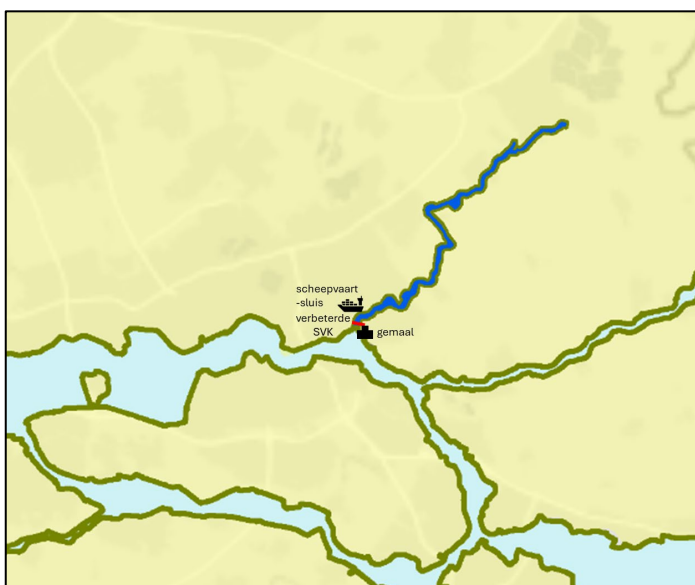
Tijdlijn	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 (m)					Rivierafvoerstatistiek				
	2023	2050	2100	2150	2200	2023	2050	2100	2150	2200
Laag	0,05	0,25	0,5	0,75	1,0	Ref2023	GL2050	GL2050	GL2050	GL2050
Gematigd	0,05	0,25	0,75	1,3	2,0	Ref2023	GL2050	GL2100	GL2150	GL2200
Extreem	0,05	0,25	1,0	1,8	3,0	Ref2023	WH2050	WH2100	WH2150	WH2200
Zeer Extreem	0,05	0,5	2,0	3,5	5,4	Ref2023	WH2050	WH2100	WH2150	WH2200

Zoals te zien in Tabel 1 en Figuur 3, komt dezelfde mate van zeespiegelstijging voor in meerdere tijdlijnen. Een zss van 1 m komt voor in zichtjaar 2200 voor tijdlijn Laag en in zichtjaar 2100 voor Tijdlijn Extreem. Tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem variëren verder niet tussen zichtjaar 2023 en zichtjaar 2050. Alleen tijdlijn Zeer Extreem neemt al direct vanaf 2023 meer toe dan de andere drie tijdlijnen.

Afhankelijk van het zichtjaar wordt ook gebruik gemaakt van een andere verdeling van de afvoer over de splitsingspunten. De kunstwerken Pannerdensch Overlaat en Hondsbroeksche Pleij nabij Nijmegen en Arnhem worden zo ingesteld, dat in de referentiesituatie 2023 voldaan wordt aan de beleidsmatige afvoerverdeling VAST16000 [Schropp en Kok, 2020] en in de zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 aan VAST18000. Voor meer informatie over de waterstandstatistiek van de Noordzee en de afvoerstatistiek van de rivieren verwijzen we naar Bijlage A.

2.5 Aanvullende analyses

Het watersysteem achter de Hollandsche IJsselkering (HIJK) is ook onderdeel van de Rijn-Maasmonding. Het systeem is weliswaar klein, maar de aanwezigheid van twee stormvloedkeringen (de Europoortkering en de HIJK) maakt dit een complex gebied om te analyseren. Daarom is specifiek voor de Hollandsche IJssel een aanvullende analyse uitgevoerd, waarbij is onderzocht wat een combinatie van een verbeterde faalkans van de stormvloedkering (HIJK), een verhoogde stormvloedkering en de aanleg van pompen zou kunnen betekenen voor de waterveiligheidsopgave in dit deelgebied. De resultaten van deze analyse zijn beschreven in paragraaf 3.5 en Bijlage G. Daarbij is ook gekeken naar de aansluiting op de maatregelpakketten uit het hoofdrapport.



Figuur 4: Situatieschets voor aanvullende analyse van de Hollandsche IJssel: realisatie nieuw gemaal, verhoogde scheepvaartsluis en verbeterde stormvloedkering (faalkans + kerende hoogte).

Naast de analyse van de extra maatregelen voor de Hollandsche IJssel zijn nog drie aanvullende analyses uitgevoerd:

1. Onderzocht is wat het effect is op de waterstanden in de RMM van extra berging op de Oosterschelde, aanvullend op de inzet van het Volkerak-Zoommeer en de

Grevelingen als waterberging uit maatregelpakket 1. Dit is beschreven in Bijlage D.

2. Ook is gekeken naar de gevolgen voor de versterkingsopgave van de dijken langs de meren bij de inzet van de Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer als waterberging. Dit is beschreven in Bijlage E.
3. In de berekeningen is het huidige sluitpeil van de Europoortkering gehanteerd tot 1 m zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 2 m is een verhoging van het sluitpeil met 1,25 m toegepast en bij 3 m zeespiegelstijging een verhoging van 2,5 m. In Bijlage F is de gevoeligheid van de sluitfrequentie en de berekende waterstanden in de RMM weergegeven die is onderzocht voor een andere keuze van de aanpassing van het sluitpeil.

Voor de eerste twee aanvullende analyses (berging op de Oosterschelde en gevolgen op de Grevelingen en het VZM) is uitgegaan van maatregelpakket 2, omdat uit de resultaten blijkt dat de extra waterberging in de Zuidwestelijke Delta pas echt effectief is wanneer deze gepaard gaat met het verbeteren van de stormvloedkeringen. De gevoeligheid van de resultaten voor het gehanteerde sluitpeil is voor alle pakketten onderzocht.

3 Hydraulische effecten van maatregelen

3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is op hoofdlijnen beschreven welke maatregelpakketten in deze studie worden onderzocht en welke aanpak we daarbij volgen. Het belangrijkste resultaat daarbij is de waterveiligheid- en versterkingsopgave (zie hoofdstuk 4 voor een definitie) voor elk van deze maatregelpakketten, waarmee ook de kostenreductie ten opzichte van de basissituatie in beeld kan worden gebracht. Dit wordt beschreven in hoofdstuk 4. Voordat we ingaan op deze opgave, beschrijven we in voorliggend hoofdstuk eerst het effect van de maatregelen op de hydraulische belastingen in het gebied. Dit helpt om de opgave (en de kostenreductie) van de maatregelen te kunnen duiden.

Voor alle dijktrajecten in het studiegebied zijn waterstanden en hydraulische belasting niveaus (HBN's) berekend bij de normfrequentie en een vast toegestaan overslagdebiet, voor zowel de basissituatie als de maatregelpakketten en bij alle combinaties van tijdlijn en zichtjaar. Dit betreft een grote hoeveelheid gegevens.

Voor een goed begrip van de resultaten, gaan we allereerst in op een willekeurige voorbeeldlocatie (cq. Dordrecht, omdat deze midden in het gebied ligt) voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem (omdat dit het midden van de onderzochte tijdlijnen is). Zoals in Tabel 1 is aangegeven, is er in die situatie sprake van +3 m zss in 2200. De resultaten bespreken we in twee stappen: eerst laten we de bandbreedte in de maatgevende waterstanden zien, waarbij we ook ingaan op de verandering van de referentiesituatie 2023 naar de situatie in het zichtjaar 2200 in tijdlijn Extreem. Vervolgens tonen we het effect van de drie maatregelpakketten.

Tenslotte geven we een meer gebiedsdekkend beeld van de hydraulische belastingen, waarbij we de bandbreedte en het effect van de maatregelpakketten inzichtelijk maken voor meerdere locaties en zichtjaren binnen de tijdlijn Extreem.

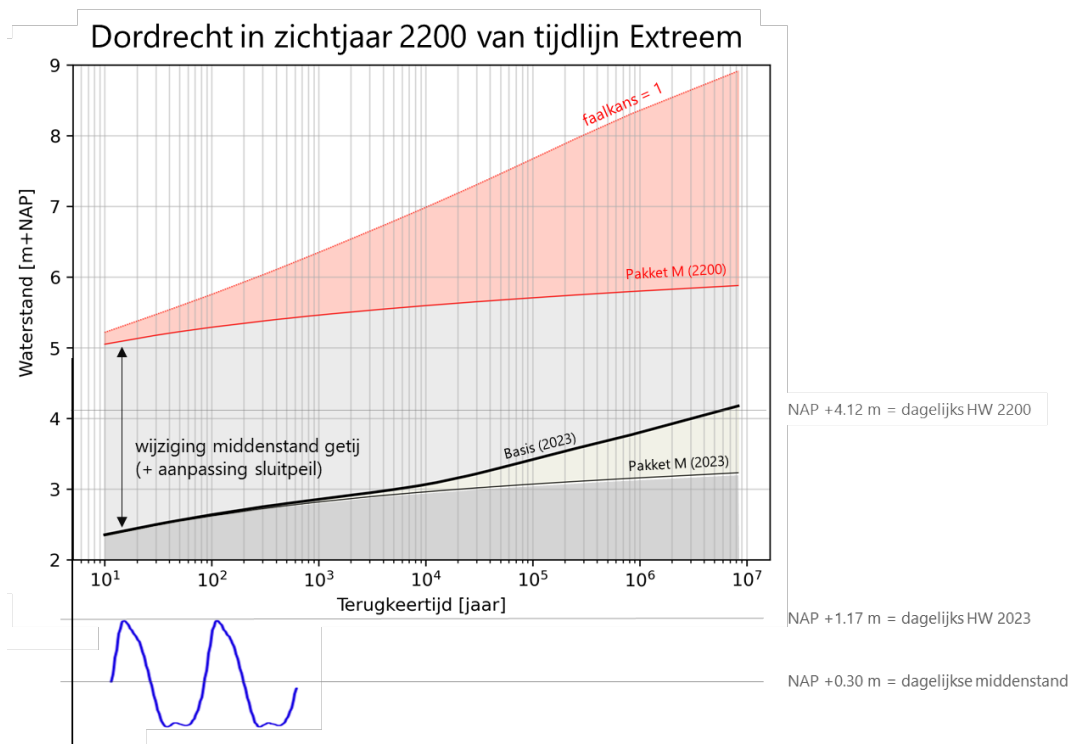
3.2 Bandbreedte in waterstanden

Figuur 5 geeft als voorbeeld waterstandsrequentielijnen voor diverse toestanden van het watersysteem op locatie Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem. Onder de figuur geven we een nadere toelichting op de gepresenteerde informatie, waarbij we voor het bepalen van de bandbreedte van de resultaten ook het maximaal haalbare effect van systeemmaatregelen ("pakket M") introduceren.

Pakket M

Om inzichtelijk te maken wat de bandbreedte van systeemmaatregelen is, hebben we ook een fictief maatregelpakket onderzocht, wat het theoretisch maximale effect van systeemmaatregelen simuleert op de waterstanden bij een gesloten Europoortkering (ongeacht welke maatregelen dat precies zijn en de haalbaarheid daarvan).

Dit fictieve maatregelpakket duiden we aan als "Pakket M", en gaat dus uit van perfect werkende stormvloedkeringen (faalkans 0), die niet overstroombaar zijn, in combinatie met aanvullende maatregelen, die voorkomen dat de waterstand in gesloten toestand verder op blijft lopen (als gevolg van hoge rivierafvoer). Bijlage B.4 geeft details over de rekenwijze voor maatregelpakket M. De resultaten van dit pakket zijn wel afhankelijk van het ingestelde sluitpeil (zie Bijlage F).



Figuur 5: Waterstands-frequentielijnen voor diverse toestanden van het watersysteem op voorbeeldlocatie Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem.

- De **dagelijkse middenstand** betreft de middenstand van het getij in het zichtjaar 2023, wat voor deze locatie overeenkomt met NAP +0,30 m.
- Het **dagelijks HW 2023** betreft het maximum van het dagelijks getij in 2023, wat voor deze locatie nu, wat voor deze locatie overeenkomt met NAP +1,17 m.
- Het **dagelijks HW 2200** betreft het maximum van het dagelijks getij in 2200, zoals dit verwacht wordt uitgaande van tijdlijn Extreem, wat voor deze locatie overeenkomt met NAP +4,12 m (+3 m zeespiegelstijging t.o.v. 1995).
- De dikke zwarte lijn, **Basis (2023)**, geeft de waterstands-frequentielijn in de basissituatie (de huidige voorkeursstrategie, zonder de maatregelpakketten) in 2023. De $T = 10^4$ jaar waterstand komt daarin overeen met NAP +3,07 m.
- De onderste, dunne grijze lijn, **Pakket M (2023)**, is de frequentielijn voor het fictieve maatregelpakket M (zie tekstblok) voor zichtjaar 2023, wat het *theoretisch maximale effect van maatregelen* simuleert. De frequentielijn bevat dus geen klimaatverandering (geen zss of toename van de afvoerstatistiek). De $T = 10^4$ jaar waterstand komt in deze situatie overeen met NAP +2,96 m.
- De onderste, dunne rode lijn, **Pakket M (2200)**, geeft een indicatie van de theoretisch maximale verlaging van de hoogwaterwaterstand in zichtjaar 2200. Daartoe is wederom het fictieve maatregelpakket M beschouwd (zie tekstblok). Omdat we echter uitgaan van een open-afsluitbaar systeem, waarbij het sluitpeil meestijgt met de zeespiegelstijging, kan een significante verhoging van de waterstanden in de Rijn-Maasmonding niet worden voorkomen (grijze gebied). De $T = 10^4$ jaar hoogwaterstand komt in deze situatie overeen met NAP +5,60 m.
- De bovenste, dunne rode stippellijn, **faalkans = 1**, geeft een indicatie voor de waterstands-frequentielijn in het zichtjaar 2200, uitgaande van tijdlijn Extreem, wanneer we géén Europeoortkering zouden hebben (berekend met faalkans = 1). De $T = 10^4$ jaar waterstand komt in deze situatie overeen met NAP +6,99 m.

Met deze figuur krijgen we een goed beeld van de bovengrens (klimaatverandering zonder systeemmaatregelen) en de ondergrens (theoretisch maximale verlaging) die

we mogen verwachten voor de hydraulische belastingen in het zichtjaar 2200 in tijdlijn Extreem, bij +3 m zss (rode gebied in Figuur 5).

In Figuur 5 is te zien dat door de toename van het dagelijks hoogwater gekozen is voor een hoger sluitpeil om het aantal sluitingen per jaar te beperken. De vraag is of het sluitpeil bij verdergaande klimaatverandering van invloed is op de waterstanden na realisatie van een maatregelpakket. Indien het mogelijk is om de sluitfrequentie slechts gering te laten toenemen en de waterstanden te verlagen met een andere sluitstrategie, dan lijkt het wenselijk om een andere sluitstrategie te hanteren. In Bijlage F zijn de resultaten van een gevoeligheidsanalyse naar de invloed van het sluitpeil gerapporteerd. In het tekstblok hieronder volgen de belangrijkste conclusies.

Optimalisatie sluitpeil

De waarde van het sluitpeil in de doorrekening van de maatregelpakketten kan voor zss +2 m en +3 m nog verder worden geoptimaliseerd. Bij zss +1 m is een verdere optimalisatie van het gekozen sluitpeil voor een zo laag mogelijke waterstand nauwelijks mogelijk.

- Bij zss +1 m geeft een verlaging van het sluitpeil ten opzichte van het doorgerekende sluitpeil, geen verlaging van de waterstand voor de resultaten van pakket 2 en 3. Het resultaat van pakket M kan bij Maasluis met ongeveer 0,2 m en bij Dordrecht met ongeveer 0,05 m worden verlaagd als een sluitfrequentie van 30 sluitingen per jaar mogelijk en acceptabel is.
- Bij zss +2 m geeft een verlaging van het sluitpeil (ten opzichte van het doorgerekende sluitpeil) een verlaging van de waterstand voor de resultaten van pakket 2 en 3 van ongeveer 0,75 m bij Maasluis en 0,30 bij Dordrecht. Het resultaat van pakket M kan bij Maasluis met ongeveer 1,0 m en bij Dordrecht met ongeveer 0,7 m worden verlaagd als de sluitfrequentie tot 30x per jaar mogelijk en acceptabel is.
- Bij zss +3 m geeft een verlaging van het sluitpeil een verlaging van de waterstand voor de resultaten van pakket 2 en 3 van ongeveer 0,75 m bij Maasluis en 0,30 bij Dordrecht. Het resultaat van pakket M kan bij Maasluis met ongeveer 1,0 m en bij Dordrecht met ongeveer 0,75 m worden verlaagd als de sluitfrequentie tot 30x per jaar mogelijk en acceptabel is.
- De verwachting is dat gemiddeld 30 sluitingen per jaar (met name in het stormseizoen) te veel hinder voor de scheepvaart veroorzaakt of tot een te grote onderhoudsopgave leidt. Stel dat een 3x per jaar sluitfrequentie wel acceptabel is, dan verwachten wij dat bovenstaande effecten grofweg gehalveerd worden.

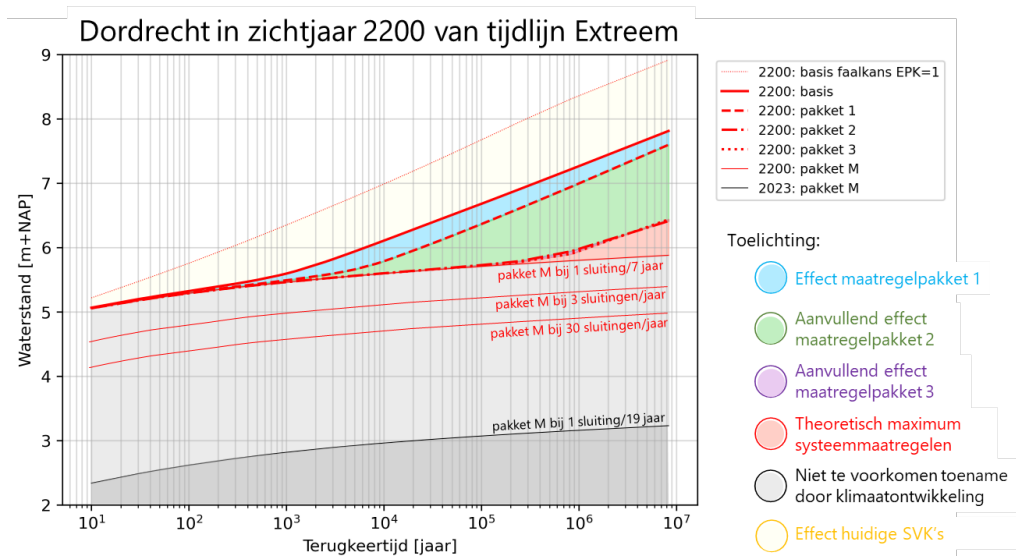
3.3 Effect van maatregelpakketten 1, 2 en 3

In het voorgaande hebben we het voorbeeld Dordrecht voor zichtjaar 2200 in tijdlijn Extreem laten zien wat de bandbreedte is van de hydraulische belastingen, variërend tussen de situatie zonder Europoortkering en de fictieve situatie met maximaal effect van systeemmaatregelen om de waterstanden bij een gesloten Europoortkering optimaal te kunnen beheersen (pakket M, zie tekstblok pagina 19). De overige berekende waterstandsfrequentielijnen voor zichtjaar 2200 in tijdlijn Extreem zullen zich dus ergens in het rode gebied in Figuur 5 bevinden.

Figuur 6 toont de waterstandsfrequentielijnen voor locatie Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem, voor de basissituatie en maatregelpakketten 1, 2 en 3. In de figuur zijn ook de onder- en bovengrens van deze belastingen gegeven, namelijk de frequentielijnen in 2200 voor "pakket M" en de basissituatie met faalkans = 1. Voor meer toelichting op deze frequentielijnen verwijzen we naar paragraaf 3.2. Dat

geldt ook voor de onderste lijn in Figuur 6: de waterstandsfrequentielijn in de huidige situatie bij het maximaal haalbare effect van systeemmaatregelen. In de figuur is de gevoeligheid van de resultaten van pakket M voor het sluitpeil van de EPK aangegeven (zie tekstblok pagina 21). Tussen 2023 en 2200 neemt de waterstand (bij $T = 10^4$ jaar) in de berekeningen met ruim 2,5 meter toe. Door het sluitpeil te optimaliseren naar 3 sluitingen per jaar, kan deze toename worden verkleind met ongeveer 0,3 m.

Onder Figuur 6 geven we een nadere toelichting op de frequentielijnen voor 2200 basis, pakket 1, pakket 2 en pakket 3, en de onderlinge verschillen daartussen.



Figuur 6: Waterstandsfrequentielijnen voor diverse toestanden van het watersysteem op voorbeeldlocatie Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem¹.

- **De basissituatie**

Dit gaat om het resultaat van fase 1 van de Systemanalyse Waterveiligheid van het KP ZSS en is tevens het startpunt van fase 2 van het KP ZSS. De dikke doorgetrokken rode lijn geeft het resultaat van die berekening. De $T = 10^4$ jaar waterstand komt daarin overeen met NAP +6,11 m.

We concluderen:

- De frequentielijn in het hoogfrequente bereik gaat bij $T = 10^4$ jaar met ruim 2,5 m omhoog t.o.v. de dunne grijze lijn ("Pakket M" in 2023), veroorzaakt door de toename van de middenstand van het getij en een aanpassing van het sluitpeil met +2,5 m t.o.v. basissituatie (leidt tot 1 sluiting per 7 jaar i.p.v. 1 per 19 jaar). Zie bijlage B.6.3 voor een overzicht.
- We zien ook dat de lijn grofweg 1 m lager ligt dan de bovengrens (faalkans EPK = 1). Die verlaging is het gevolg van de inzet van de stormvloedkeringen (geel gemarkeerde oppervlak). De stormvloedkeringen geven dus een flinke reductie van de waterstanden, al neemt het effect richting meer frequente situaties af. Dit is logisch, aangezien voor frequentere gebeurtenissen de stormvloedkeringen niet hoeven te sluiten.
- In de frequentielijn zelf zijn twee delen te onderscheiden: een flauwer deel voor ca. $T < 1000$ jaar en een steiler deel voor ca. $T > 1000$ jaar. De locatie van deze "knik" wordt veroorzaakt door de combinatie van de faalkans van de Europoortkering ($1/100^e$ per sluitvraag) en de sluitfrequentie, die voor tijdlijn Extreem zichtjaar 2200 ca. eens in de 7 jaar bedraagt.

¹ De lijnen 'pakket M bij 3 sluitingen/jaar' en 'pakket M bij 30 sluitingen/jaar' zijn ingetekend op basis van de berekende waterstand bij $T=10.000$, de overige lijnen zijn volledig berekend met Hydra-NL.

- **Maatregelpakket 1: basis + extra waterberging**

De dikke gestreepte rode lijn geeft het resultaat als naast de basissituatie ook extra waterberging op de Grevelingen wordt ingezet. De $T = 10^4$ jaar waterstand bij Dordrecht komt daarin overeen met NAP +5,79 m. De verlaging t.o.v. de basissituatie bedraagt orde 0,2 – 0,3 m vanaf een terugkeertijd van ca. $T = 10^3$ jaar (lichtblauwe vlak). Het effect van de waterberging zou echter veel groter kunnen zijn, omdat deze beperkt wordt door de faalkans en de kerende hoogte van de stormvloedkeringen. De waterstanden bij een gesloten Europoortkering gaan door de extra waterberging omlaag. Door het overlopen van de stormvloedkeringen is de verlaging kleiner, immers een deel van het te bergen water komt vanaf zee. De bijdrage van de open keringtoestand (falen) neemt toe², waardoor de verlaging in de probabilistisch berekende waterstanden kleiner is. De waterberging zal effectiever worden naarmate de kerende hoogte van de stormvloedkeringen hoger is, de faalkans van de stormvloedkeringen kleiner wordt en het zeefront vaker correct geheel wordt "gesloten".

In een aanvullende analyse is gekeken naar extra berging op de Oosterschelde, aanvullend op de inzet van het VZM en de Grevelingen als berging (Bijlage D). Dit effect is vergelijkbaar met bergen op het VZM in de basissituatie.

- **Maatregelpakket 2: pakket 1 + verbeterde EPK**

De punt-streep rode lijn laat aanvullend het resultaat van de verbeterde stormvloedkeringen zien (groene vlak). De $T = 10^4$ jaar waterstand bij Dordrecht komt daarin overeen met NAP +5,60 m (extra verlaging van ca 0,2 m). Door het verkleinen van de faalkans EPK en het ophogen van de Europoortkering en de Haringvlietsluizen worden enerzijds extreme stormvloed vanuit zee beter buiten de Rijn-Maasmonding gehouden, en anderzijds wordt ook de extra berging in de Zuidwestelijke Delta effectiever. Na realisatie van dit maatregelpakket hoeft in de gesloten toestand minder water worden geborgen (immers er loopt veel minder water vanaf de Noordzee de delta binnen) en zal door verkleining van de faalkans de bijdrage van de open toestand niet toenemen (waardoor de verlaging ook de doorwerkt in de frequentielijn van de waterstanden). Het verbeteren van de Europoortkering en de Haringvlietsluizen heeft meer effect bij locaties nabij de stormvloedkeringen. Dat de waterberging effectiever wordt heeft effect bij meer oostelijk gelegen locaties (zie ook bijlage C.4).

- **Maatregelpakket 3: pakket 2 + gemalen**

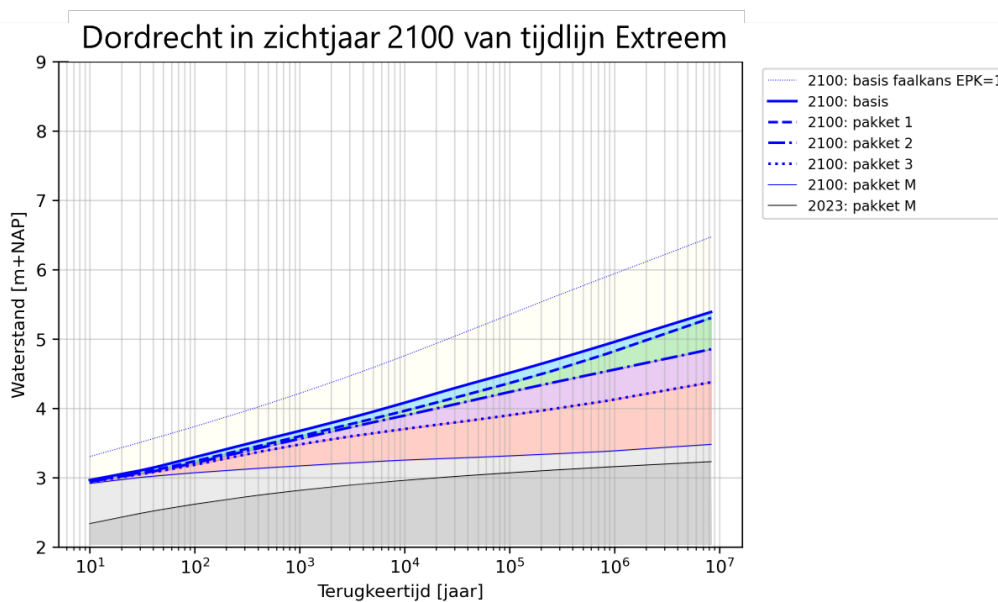
Aanvullend op maatregelpakket 2 wordt in maatregelpakket 3 gemalen geplaatst langs de Europoortkering en langs de Haringvlietdam met een totale capaciteit van 10.000 m³/s. De gestippelde rode lijn laat het resultaat van pakket 3 zien. De $T = 10^4$ jaar waterstand komt daarin eveneens overeen met NAP +5,60 m. Het verschil met pakket 2 is weergegeven met een lichtpaars gekleurd vlak³, maar op de hier getoonde voorbeeldlocatie zien we nauwelijks verschil tussen pakket 2 en pakket 3 voor zichtjaar 2200 (i.e. de gemalen geven hier geen verlaging van de waterstanden). Dit is bijvoorbeeld anders wanneer voor dezelfde locatie en tijdlijn naar zichtjaar 2100 (+1 m zss) wordt gekeken, zie Figuur 7. Deze figuur laat blauwe i.p.v. rode lijnen zien, om te verduidelijken dat het een ander zichtjaar betreft. In dit geval is het lichtpaarse vlak wel zichtbaar, aangezien er een duidelijk verschil is tussen de frequentielijnen bij pakket 2 en pakket 3.

² De frequentielijn van de waterstand in de delta is een weging tussen de frequenties van de waterstanden bij een gesloten en bij een open toestand van de Europoortkering. Als de faalkans niet wijzigt en de waterstand van de gesloten toestand daalt, dan neemt de bijdrage van de open toestand toe in de weging (zie bijlage C.3).

³ Niet te verwarren met het lichtrode vlak dat wel zichtbaar is tussen deze lijn en de lijn van pakket-M.

Aangenomen is dat het streefpeil op het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen tot 2200 niet hoeft te worden aangepast door aanvullende maatregelen te nemen (zoals een gemaal naast de Bathse spuisluis). Doordat de dagelijkse waterstand op het Hollandsch Diep in 2200 hoger ligt dan in 2100, is er een groter verval over de Volkeraksluizen beschikbaar in 2200. Hierdoor is het debiet groter en kan er meer water naar de berging worden afgevoerd (er ontstaat bij inzet ook een hogere waterstand op de meren). Gevolg is dat de aanleg van gemalen bij Europoortkering en Haringvlietdam niet of nauwelijks effect heeft op de waterstand in 2200. Deze gemalen zorgen er in 2200 wel voor dat minder water naar de waterberging stroomt. In 2100 is het beschikbare vervang kleiner (en daarmee het debiet door de Volkeraksluizen), waardoor de aanleg van deze gemalen de waterstand wel verlaagd (zie ook bijlage C.5).

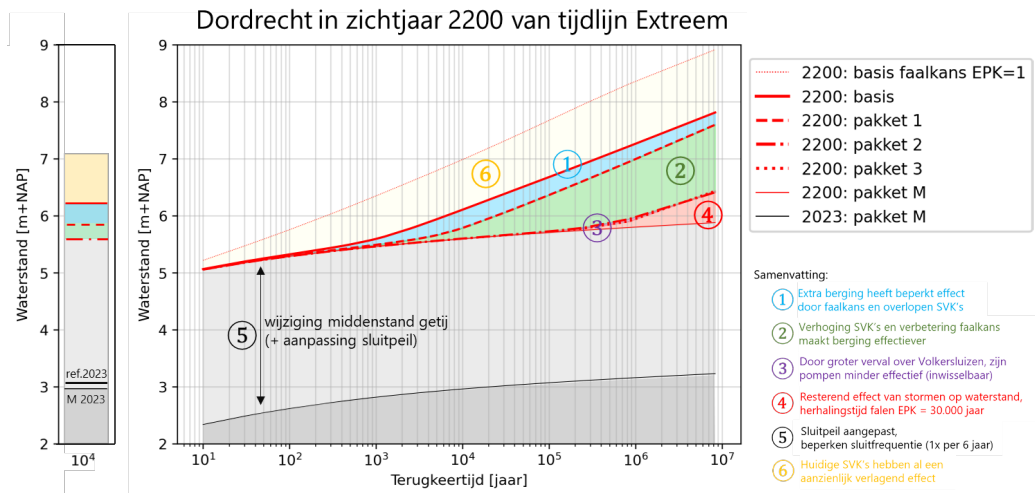
Maatregelpakket 2 en 3 komen in het voorbeeld (locatie Dordrecht bij zichtjaar 2200 in tijdlijn Extreem) al dicht in de buurt van het resultaat uit het fictieve pakket M. Alleen bij terugkeertijden boven $T > 10^5$ ontstaat er verschil met wat (theoretisch) maximaal haalbaar is aan verlaging. Merk op dat de $T = 10^4$ jaar waterstand zowel in pakket 2, pakket 3 als pakket M afgerond overeenkomt met NAP +5,60 m.



Figuur 7: Waterstandsfrequentielijnen voor diverse toestanden van het watersysteem op voorbeeldlocatie Dordrecht voor zichtjaar 2100 van tijdlijn Extreem.

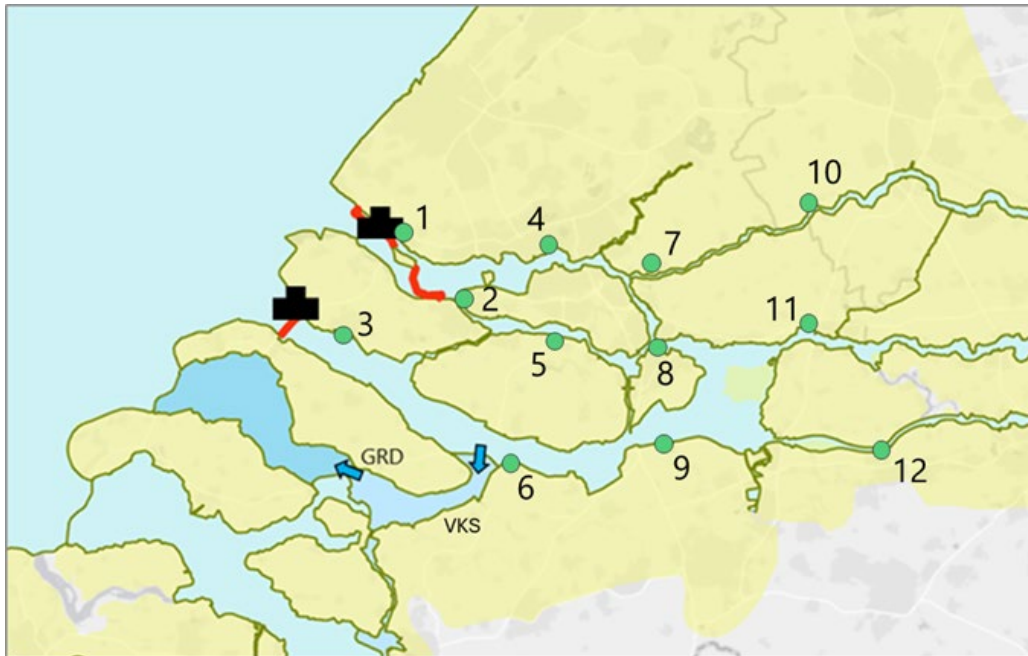
3.4 Gebiedsdekkend beeld hydraulische belastingen

Om de resultaten voor het hele gebied van de Rijn-Maasmonding te kunnen duiden voor alle tijdlijn/zichtjaar combinaties, is ervoor gekozen om de effecten zoals hierboven gepresenteerd samen te vatten in de vorm van een staafdiagram aan de linkerkant (Figuur 8). In het staafdiagram aan de linkerkant van de figuur is de opbouw van de verschillen tussen de frequentielijnen samengevat. De nummers/kleuren komen overeen met de uitleg die eerder in dit hoofdstuk is gegeven (zie de toelichting in de legenda).



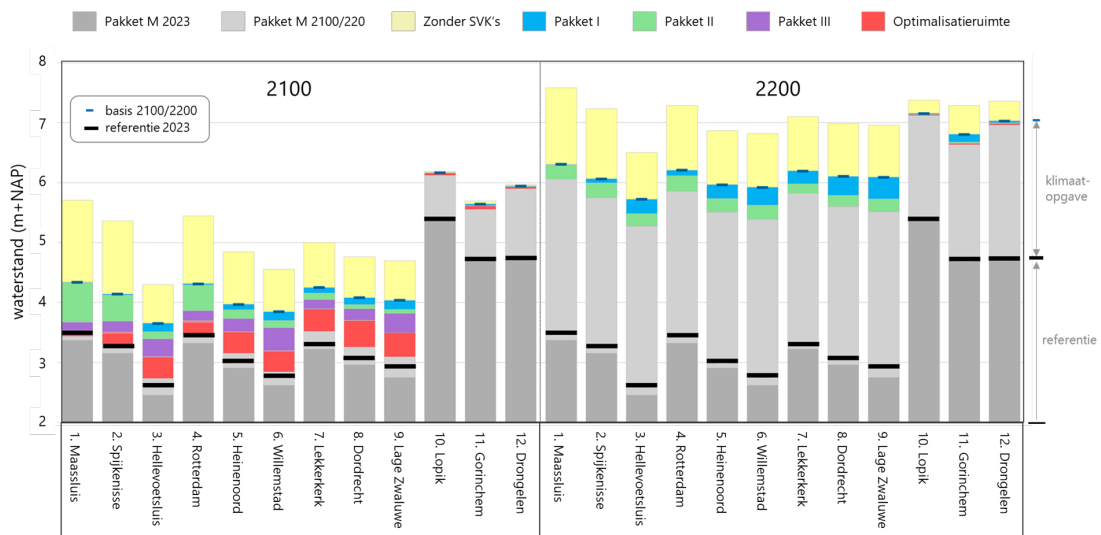
Figuur 8: Resultaten voor Dordrecht voor zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem. Het staafdiagram links bevat de waterstanden bij de norm ($T = 10^4$ jaar voor Dordrecht)

Bovenstaande figuren zijn beschikbaar voor 12 locaties verspreid over Rijnmond-Drechtsteden (Figuur 9).



Figuur 9: Onderzoeklocaties in Rijnmond-Drechtsteden.

De staafdiagrammen voor elk van de onderzochte locaties (zowel voor zichtjaar 2100 als 2200) zijn verzameld in Figuur 10 en geven een overzicht van het gedrag van het watersysteem bij de verschillende maatregelpakketten in tijdlijn Extreem.



Figuur 10: Resultaten voor de onderzochte locaties voor zichtjaren 2100 en 2200 van tijdlijn Extreem voor een terugkeertijd van $T = 10^4$ jaar.

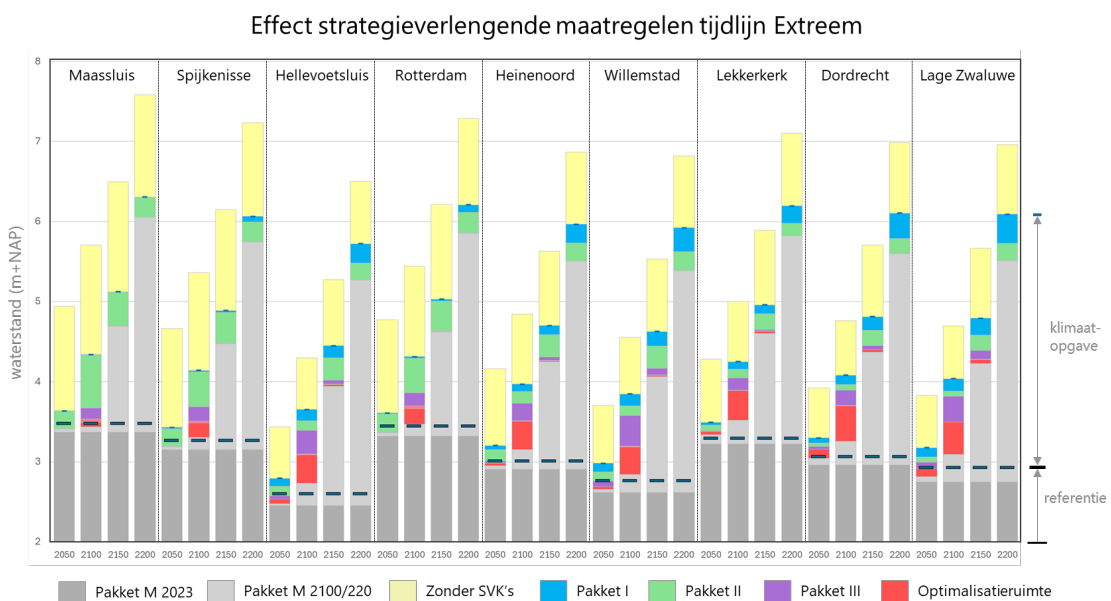
Uit Figuur 10 blijkt dat:

- De dikke zwarte lijntjes in de staafdiagrammen betreffen de waterstanden bij $T = 10^4$ jaar in het zichtjaar 2023 voor de basissituatie (de referentie). Voor een deel van de locaties ligt dit niveau iets hoger dan de onderkant van het donker grijze blok, dat de waterstand in 2023 bij het fictieve "pakket M" aangeeft (zie ook paragraaf 3.2). Bij bovenstroomse locaties (10, 11 en 12) op de riviertakken is er niet of nauwelijks verschil tussen deze niveaus, aangezien de waterstand alleen bepaald wordt door extreme rivierafvoer (tijdens open toestand van de Europoortkering), en maatregelen die de waterstanden bij een gesloten kering beïnvloeden dus niet of nauwelijks effect hebben.
- De bovenkant van het donkergrijze blok geeft het resultaat van pakket M in 2023 en de bovenkant van het lichtgrijze blok geeft het resultaat van pakket M in het betreffende zichtjaar, of – anders gezegd – de waterstand bij $T = 10^4$ jaar uitgaande van het theoretisch maximale effect van de strategieverlengende maatregelen⁴. De lengte van het lichtgrijze vlak komt overeen met de opgave die ontstaat door de ontwikkeling van het klimaat (zeespiegelstijging en toename rivierafvoer). Voor zichtjaar 2100 is deze opgave voor de meeste beperkt (behalve voor de meer bovenstroomse locaties, hetgeen vooral te maken heeft met toename in rivierafvoer), voor 2200 is een toename van de waterstand met meer dan 2 m echter niet te voorkomen, veroorzaakt door stijging van de middenstand van het getij (en - in veel beperktere mate - aanpassing van het sluitpeil).
- Het sluitpeil lijkt invloed te hebben op de effectiviteit van de strategieverlengende maatregelen (zie ook kader aan het eind van paragraaf 3.2). Bij het verschil in de grootte van het grijze blok in 2100 en 2200 moet ook worden opgemerkt, dat in het zichtjaar 2100 het sluitpeil niet is aangepast (ondanks zss +1 m), terwijl voor het zichtjaar 2200 (zss +3 m) is uitgegaan van een sluitpeilverhoging van 2,5 m. De bijbehorende sluitfrequentie is in 2100 dan ook een stuk groter (ca. 7x per jaar) dan in 2200 (ca. eens in de 6 jaar). In een aanvullende analyse is de gevoeligheid van het sluitpeil onderzocht (Bijlage F). Door verlagen van het sluitpeil kan de waterstand omlaag, maar de faalkans zal dit effect verkleinen bij een aanzienlijke verlaging van het sluitpeil (bij vaker sluiten neemt de faalfrequentie evenredig toe).

⁴ De resultaten van pakket M zijn afhankelijk van het gekozen sluitpeil (zie Bijlage F)

- De bovenkant van het lichtgele blok geeft de maximale toename wanneer in het betreffende zichtjaar helemaal geen Europoortkering aanwezig zou zijn. De onderkant van het lichtgele blok geeft de basis zonder maatregelpakketten. De optelsom van het blauwe, groene en paarse blok is het totale verlagende effect van de onderzochte maatregelpakketten. T.o.v. de waterstandstoename die niet is te voorkomen (lichtgrijze blok) is dit relatief groot in 2100 en relatief klein in 2200. In 2100 speelt opnieuw het sluitpeil een belangrijke rol. Doordat deze voor dit zichtjaar (zss +1 m) niet is aangepast, neemt de sluitfrequentie toe tot 6x per jaar, en hebben maatregelen voor de gesloten keringtoestand meer effect⁵.
- Langs de rivieren is het effect van de maatregelpakketten <0,15 m. Ook de toename van de waterstanden is kleiner, omdat de invloed van de zeespiegelstijging in bovenstroomse richting steeds verder afneemt. De toename van de waterstand door een toename van de rivierafvoer geeft minder verhoging. In 2100 gaat het om ongeveer 1 m langs de Maas en ongeveer 0,5 m langs de Waal en de Lek. In 2200 neemt dit toe met respectievelijk 2 m en 1,5 m.

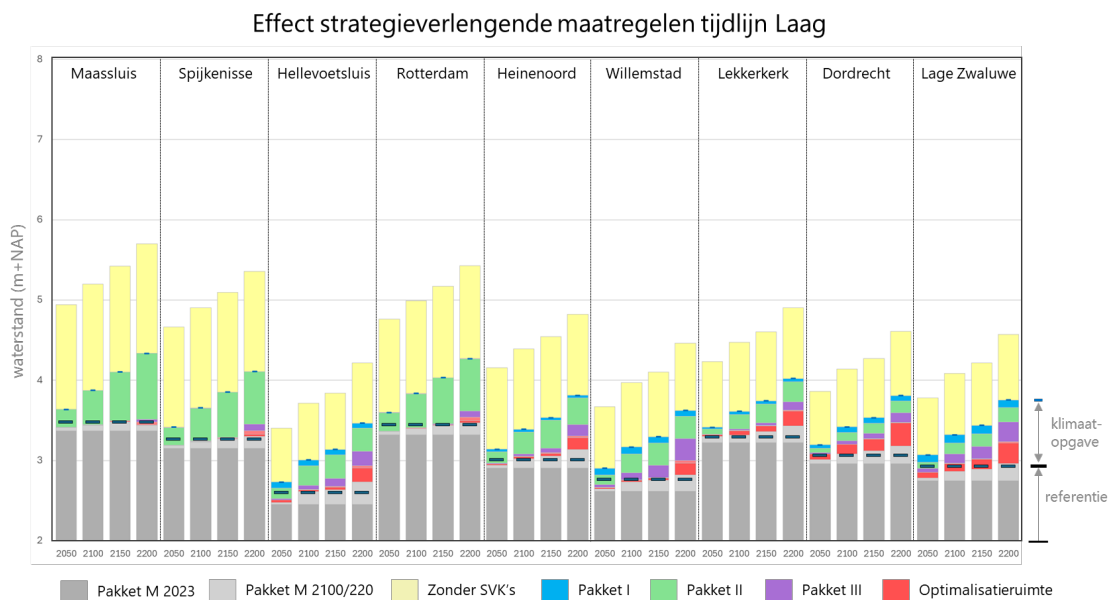
In Figuur 11 is een overzicht gemaakt van de ontwikkeling van de waterstand voor alle zichtjaren van tijdlijn Extreem. Hierbij zoomen we in op de locaties in deelgebieden Rijnmond - Drechtsteden en Haringvliet - Hollands Diep, omdat daar de strategieverlengende maatregelen met name effect hebben. In de figuur is te zien dat tot 2050 de opgave die ontstaat door de klimaatontwikkeling met de onderzochte maatregelen opgevangen kan worden. In 2100 is het resultaat van pakket M gelijk of iets hoger dan de waterstand van de referentie. Door verdere optimalisatie van de maatregelen (lees: uitbreiding van de onderzochte gemaalcapaciteit) is de berekende waterstand te verlagen en de klimaatopgave op te vangen. In 2150 en 2200 van tijdlijn Extreem is de toename van de waterstand bij $T = 10^4$ jaar door klimaatontwikkeling zo groot, dat een toename van 1 tot 2,5 m niet te voorkomen is.



Figuur 11: Resultaten voor de onderzochte locaties in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet – Hollandsch Diep voor zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 van tijdlijn Extreem voor een terugkeertijd van $T = 10^4$ jaar⁶.

⁵ Het effect van het sluitpeil op de extreme waterstanden neemt toe als de betrouwbaarheid van de EPK aanzienlijk wordt verbeterd.

In *Figuur 12* is een overzicht gemaakt van de ontwikkeling van de waterstand voor alle zichtjaren van tijdlijn Laag. In de figuur is te zien dat tot 2150 de opgave die ontstaat door de klimaatontwikkeling met de onderzochte maatregelen opgevangen kan worden. In 2150 is het resultaat van pakket 3 gelijk of iets hoger dan de waterstand van de referentie. Door verdere optimalisatie van de maatregelen (lees: verdere verbetering faalkans EPK en uitbreiding onderzochte gemaalcapaciteit) is mogelijk de berekende waterstand in 2200 te verlagen en de klimaatopgave op te vangen. We merken hierbij op dat niet onderzocht is of deze verdere optimalisatie mogelijk is, sterker we achten een verdere optimalisatie onrealistisch. In pakket 3 zijn de mogelijkheden van systeemmaatregelen wel realistisch maar al (redelijk) maximaal opgerekt.



Figuur 12: Resultaten voor de onderzochte locaties in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet – Hollandsch Diep voor zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 van tijdlijn Laag voor een terugkeertijd van $T = 10^4$ jaar⁶.

3.5 Effect maatregelen voor Hollandsche IJssel

Zoals aangegeven in paragraaf 2.5, is een aanvullende analyse uitgevoerd voor de Hollandsche IJssel. Daarbij is onderzocht wat het gecombineerde effect is van de volgende maatregelen:

- Een verkleining van de faalkans van de HIJK naar $1/10.000^e$ per sluitvraag;
- Een verhoging van de HIJK, zodat overlopen van de kering in de toekomst marginaal is;
- Plaatsing van een gemaal naast de kering dat ingezet kan worden voor het pompen van water vanuit de Hollandsche IJssel naar Nieuwe Maas (als het afvoeren van water onder vrij verval is gestremd).

In tegenstelling tot de analyses voor de maatregelpakketten 1 t/m 3 zijn de waterstanden voor deze gecombineerde maatregelen niet opnieuw berekend met het hydraulisch model, maar zijn de hydraulische belastingen bepaald met een aangepaste probabilistische berekening. Vervolgens zijn met deze hydraulische belastingen dijkversterking(kosten) berekend. Zie Bijlage G voor meer details.

⁶ In bijlage C.7 zijn de resultaten uit Figuur 11 en Figuur 12 weergegeven in een tabel.

De uitgevoerde analyse laat het volgende zien:

1. Met de realisatie van een verbeterde HIJK en de aanleg van een gemaal kan de waterstand achter een gesloten HIJK volledig worden beheerst.
2. De hydraulische belasting bij Gouda zal gemiddeld hoger blijven dan bij Krimpen a/d IJssel (door de wind wordt de waterstand scheef gezet).
3. Door zeespiegelstijging zal de sluitfrequentie van de HIJK aanzienlijk toenemen. Ondanks de verkleining van de faalkans van de HIJK zal het falen van de stormvloedkering dominant blijven voor de beoordeling en het ontwerp van primaire keringen langs de Hollandsche IJssel.
4. Door beheersing van de waterstanden worden de dijkversterkingskosten gereduceerd, oplopend tot een kostenreductie van maximaal 25% (in 2100 voor tijddlijn Laag, of in 2150 voor tijddlijn Extreem).

3.6 Conclusies over hydraulische effecten

Op basis van het uitgevoerde hydraulische en probabilistische onderzoek, trekken we de volgende conclusies:

- Hoe hoger de zeespiegelstijging, hoe minder effectief de strategieverlengende maatregelpakketten. De zeespiegelstijging (die doorwerkt in de dagelijkse omstandigheden) is hiervoor een belangrijke oorzaak. De maatregelpakketten verkleinen de maximale bandbreedte (het rood gemarkeerde gebied uit Figuur 5) aanzienlijk.
- De systeemmaatregelen in de pakketten zijn nagenoeg maximaal opgerekt. De aangenomen hoogte van de stormvloedkeringen, de faalkans en de dimensies van de doorlaatmiddelen naar de waterberging zijn maximaal. De aangenomen gemaalcapaciteit is enorm (vergeleken met bestaande gemalen in Nederland), maar is kleiner dan de rivierafvoer die kan optreden met een kans van voorkomen gelijk aan de normfrequentie van de dijkvakken in de RMM.
- Het sluitpeil in combinatie met de dagelijkse waterstanden, speelt een rol in de effectiviteit van de maatregelpakketten (dit is in een aanvullende analyse onderzocht, zie Bijlage F). Met acceptatie van meerdere sluitingen per jaar kunnen de berekende hydraulische belastingen verder worden verlaagd ($< 0,5$ m). Dan zal het falen van de stormvloedkering (ondanks maximale verbetering) weer dominant worden voor het ontwerp van de dijken.
- Systeemmaatregelen beïnvloeden elkaars effectiviteit. Zo wordt b.v. de inzet van extra berging (pakket 1) effectiever als de Europoortkering (pakket 2) is versterkt. Door een effectieve inzet van de gemalen (pakket 3), zal een kleiner volume naar de waterberging stromen.

4 Opgave en dijkversterkingskosten en kosten van maatregelen

4.1 Inleiding

Het doel van voorliggend hoofdstuk is om de waterveiligheidsopgave en de versterkingsopgave van de dijken en dammen te bepalen voor de verschillende maatregelpakketten, waarbij naast de hydraulische belastingen, ook de kosten en de ruimtelijke dimensies van de benodigde dijkversterkingen van belang zijn. De uitgangspunten van de kostenbepaling zijn weergegeven in Bijlage H.

De *waterveiligheidsopgave* is het tekort (hoogte en sterkte) dat een bestaande dijk of dam heeft om in een bepaald zichtjaar exact te voldoen aan de (ondergrens)-norm. Om deze waterveiligheidsopgave voor de dijken te bepalen, zijn hydraulische belastingen berekend met hulp van het model Hydra-NL en gecombineerd met de sterkte van de keringen. De sterkte van de keringen is in beeld gebracht met de faalmechanismen voor hoogte (Gras Erosie Kruin en Binnentalud), piping en macrostabiliteit.

Met de *versterkingsopgave* worden de (cumulatieve) kosten en het ruimtebeslag aangeduid van alle versterkingen die tót aan een bepaald zichtjaar hebben plaatsgevonden. De levensduur van deze versterkingen kan langer zijn dan het beschouwde zichtjaar, in het ontwerp wordt immers rekening gehouden met een levensduur van 50 jaar uitgaande van de belastingen in het ontwerpzichtjaar. Om de versterkingsopgave te bepalen, zijn de hydraulische belastingen en de sterkte van de keringen binnen de software OKADER met elkaar gecombineerd.

Tot slot is een inschatting van de kosten van de maatregelpakketten toegevoegd.

4.2 Dijkversterkingsopgave

De dijkversterkingsopgave betreft in welke mate de dijk versterkt moet worden in een bepaald zichtjaar (in hoogte en breedte). Dit is een gevolg van toenemende hydraulische belasting en afnemende sterkte (bodemdaling, erosie, verslechtering van materiaal, etc.) in de tijd.

De dijkversterkingsopgave die ontstaat door zeespiegelstijging wordt gereduceerd met de maatregelpakketten t.o.v. de basissituatie. Indien de belastingen toenemen in de toekomst, worden de keringen met een interval van ± 50 jaar versterkt. Naast de toenemende belastingen speelt bodemdaling een rol in de mate van versterken. Voor enkele normtrajecten loopt deze bodemdaling op tot meer dan één meter in 2200.

De hoogteopgave is een een-op-een gevolg van de toenemende hydraulische belastingen (waterstanden en golven) en de bodemdaling, in vergelijking met de aanwezige kruinhoogte in combinatie met een maximaal toelaatbaar overslagdebiet. Bij afnemende hydraulische belastingen door de maatregelpakketten neemt de hoogteopgave ook af in deze mate.

Om de effecten van de maatregelpakketten inzichtelijk te maken kijken we naar de deelgebieden Haringvliet-Hollandsdiep en Rijnmond-Drechtsteden (zie als voorbeeld Tabel 2 voor tijdlijn Extreem).

Tabel 2: Overzicht hoogte- en sterkteopgave reductie voor zichtjaren 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem.

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

* De opgave wordt gepresenteerd als gemiddelde opgave per strekkende km

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

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

Zichtbaar is dat de afname in hoogteopgave significant is, zeker in 2100. De afname in sterkteopgave is echter beperkt. Uit Tabel 2 volgt dat de maatregelen zorgen voor een significante reductie van de totale opgave, maar voorkomen deze niet. Deze opgave blijft met alle maatregelpakket overeind, omdat de in de huidige voorkeursstrategie de 'dagelijkse' waterstanden toenemen in de tijd.

Resultaat hiervan is dat de keringen met een interval van ongeveer 50 jaar versterkt dienen te worden, met of zonder maatregelpakket (uitgangspunt is een versterkingshorizon van 50 jaar). Deze conclusie wordt nader geduid in onderstaande paragraaf 4.3 waarin de opgave is vertaald naar dijkversterkingskosten.

De verwachting is dat als de dijken nú versterkt zouden worden alsof de maatregelpakketten nog niet in beeld waren, conform de uitgangspunten die in het HWBP gehanteerd worden, en in 2050 de systeemmaatregelen getroffen zouden worden, dat er grotere verschillen ontstaan in dijkversterkingskosten tussen de diverse pakketten, door het uitstellen van de toekomstige dijkversterkingen. Dit wijkt echter af van de gehanteerde uitgangspunten binnen dit onderzoek en fase 1 van het KP-ZSS.

4.3 Reductie van dijkversterkingskosten

De doorvertaling van de veranderingen in de hydraulische belastingen zijn voor de verschillende maatregelpakketten ook inzichtelijk gemaakt in termen van dijkversterkingskosten (zie als voorbeeld Tabel 3 voor tijdlijn Extreem).

Tabel 3: Overzicht waterstands- en kostenreductie voor zichtjaren 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem.

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

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

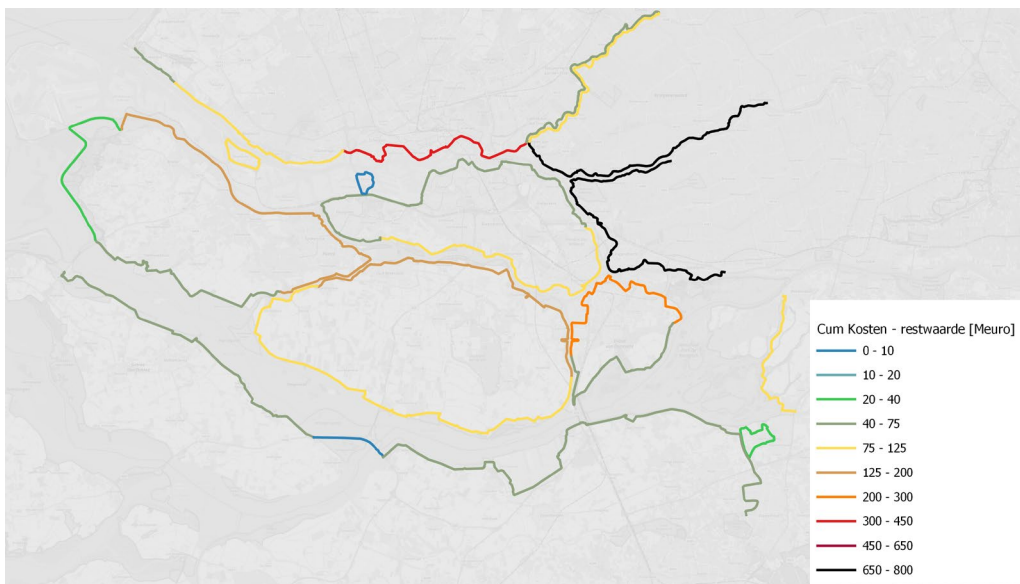
Wat opvalt uit de tabel is dat, ondanks de reductie van de waterstanden met meerdere decimeters (oplopend tot verlagingen van 0,7 m), de reducties in termen van vermeden dijkversterkingskosten procentueel beperkt blijven tot maximaal 4%.

Ten tweede valt op dat de maatregelen vanaf pakket II vooral effect sorteren in 2100. Daarna daalt de effectiviteit door (sterke) verhoging van het sluitpeil van de Europoortkering.

De huidige voorkeursstrategie is gebaseerd op het principe van een open-afsluitbare delta, wat betekent dat we de stijging van de zeespiegel (dagelijkse omstandigheden) toestaan en juist de extreme stormcondities buiten de delta houden. Die keuze brengt echter kosten met zich mee (ook zonder zeespiegelstijging). En het open-afsluitbare principe betekent dat de zeespiegelstijging ook onder 'dagelijkse' waterstanden moet worden gekeerd. Ook om enkel deze 'dagelijkse' waterstanden te kunnen keren, zullen de dijken moeten worden versterkt, ondanks dat de mate van de versterking wordt gereduceerd met de maatregelen.

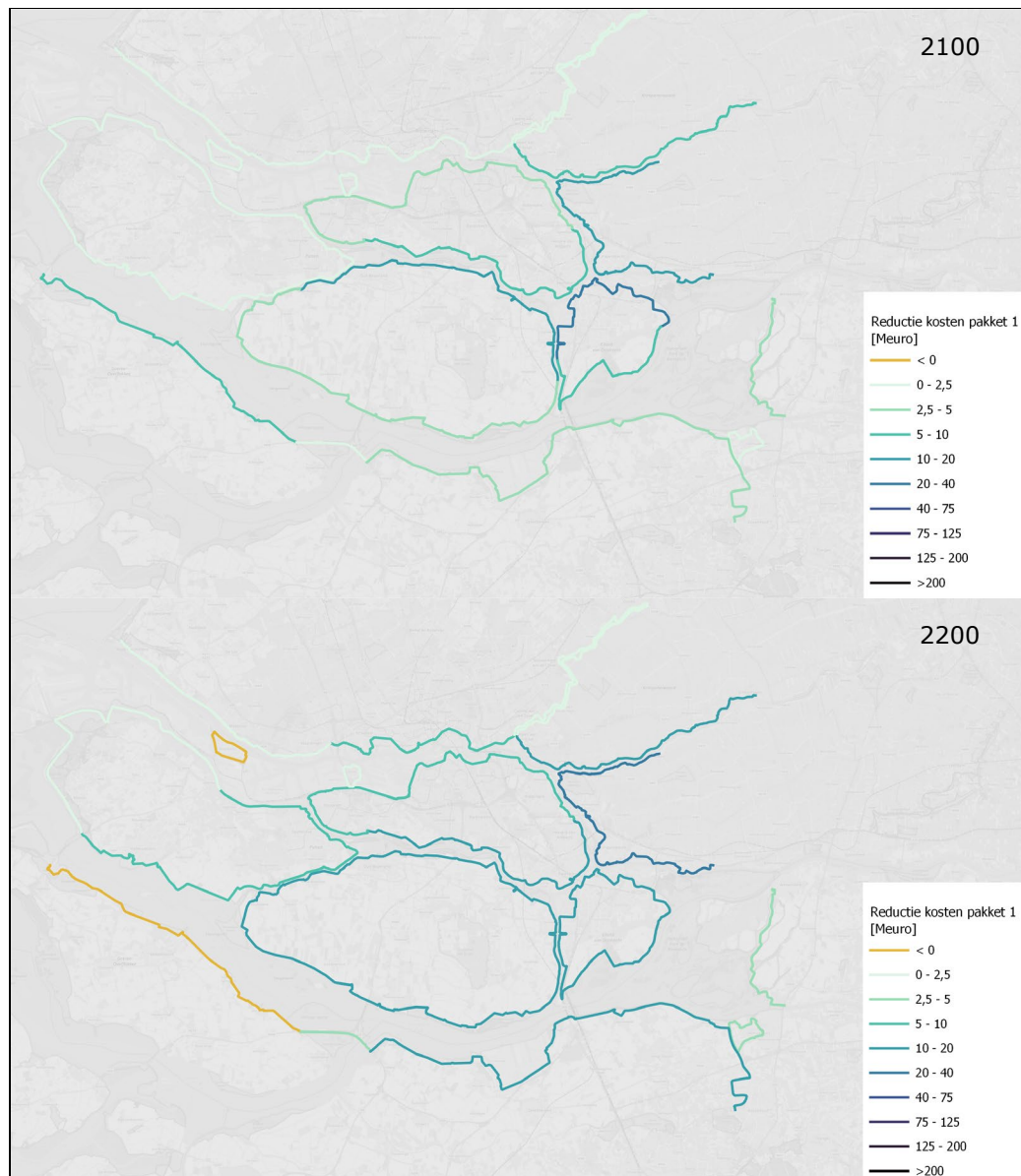
Ruimtelijk beeld

In deze paragraaf wordt een ruimtelijk beeld gegeven van de gemiddelde versterkingskosten en de reductie van de versterkingskosten per normtraject. Figuur 13 geeft de gemiddelde versterkingskosten voor de basissituatie. De figuur laat zien dat gemiddelde kosten sterk variëren en dat met name de versterkingskosten voor de normtrajecten 14-2 (langs de Nieuwe Maas), 15-2 (langs de Lek) en 16-2 (langs de Lek, de Noord en de Merwede) erg hoog zijn. De kosten tot aan 2100 liggen voor normtraject 14-2 tussen 300 en 450 miljoen euro en voor de normtrajecten 15-2 en 16-2 liggen de kosten tussen 650 en 800 miljoen euro. De gemiddelde kosten per kilometer voor de drie normtrajecten liggen tussen 20 en 30 miljoen euro per kilometer.



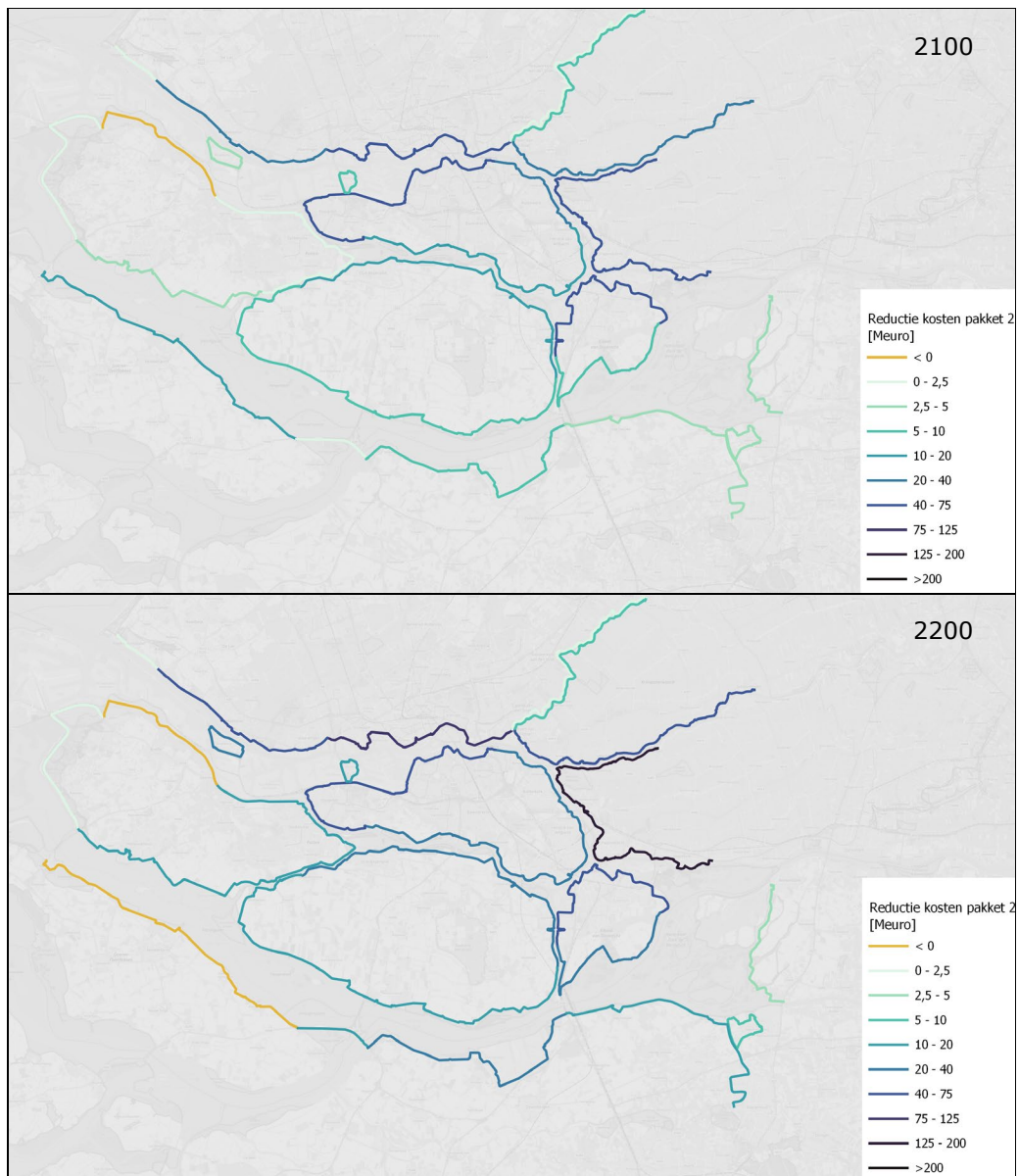
Figuur 13: Kosten per traject voor basissituatie in 2100 (tijdlijn extreem)

Tabel 3 laat zien dat de kostenreductie door maatregelpakket 1 ongeveer 1% is in het jaar 2100 en 2200. Ondanks dit relatief lage percentage gaat is dit een kostenreductie van 130 miljoen euro in 2100 en 260 miljoen euro in 2200. In Figuur 14 is de ruimtelijke verdeling van de kostenreductie voor zowel 2100 als 2200 weergegeven.



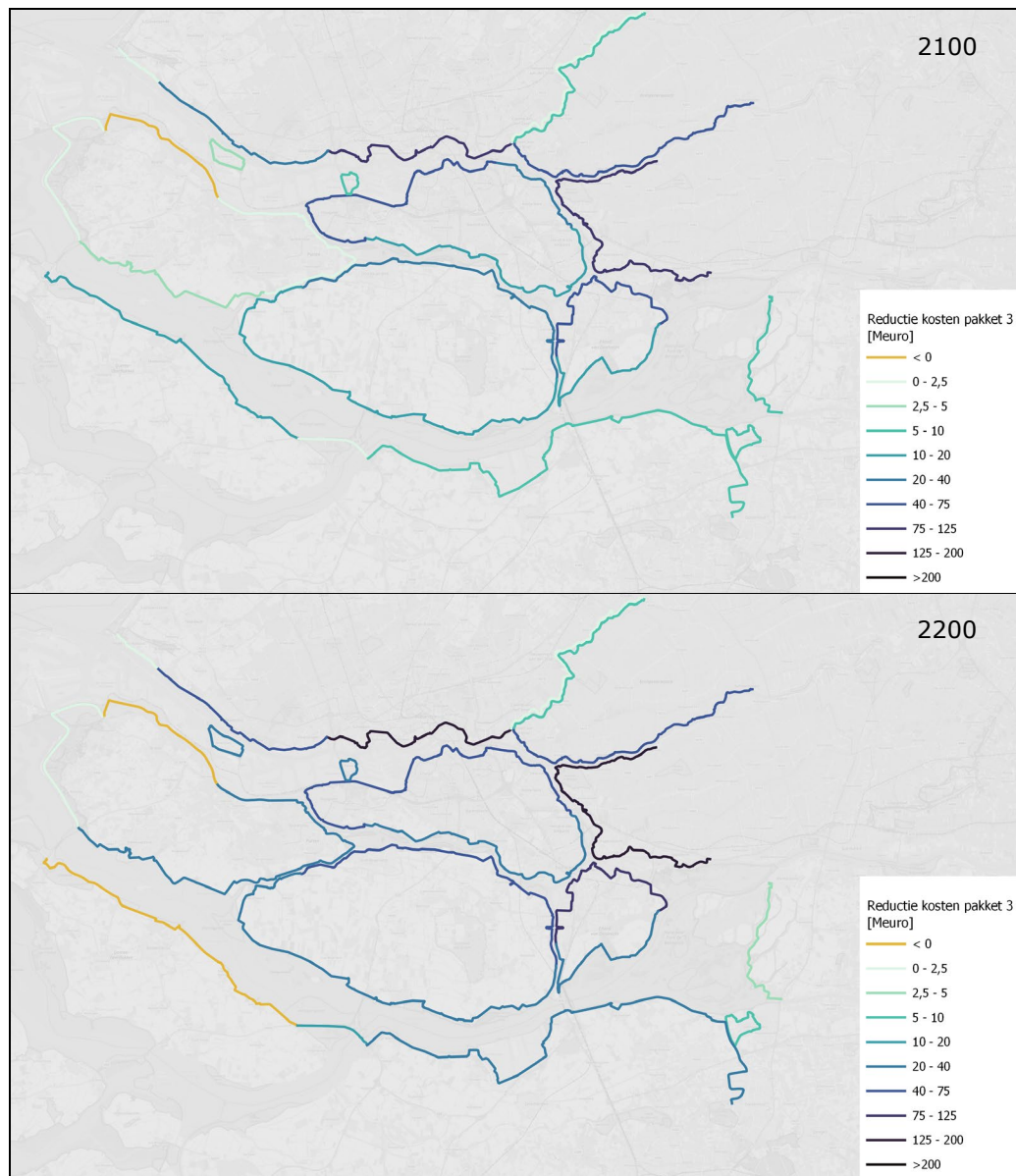
Figuur 14: Kostenreductie voor maatregelpakket 1 in 2100 (tijdlijn Extreem) en 2200 (tijdlijn Extreem)

Tabel 3 laat zien dat de kostenreductie door maatregelpakket 2 ongeveer 3% is in het jaar 2100 en 2200. Dit betekent een kostenreductie van 470 miljoen euro in 2100 en 800 miljoen euro in 2200. In Figuur 15 is de ruimtelijke verdeling van de kostenreductie voor zowel 2100 als 2200 weergegeven.



Figuur 15: Kostenreductie voor maatregelpakket 2 in 2100 (tijdlijn Extreem) en 2200 (tijdlijn Extreem)

Tabel 3 laat zien dat de kostenreductie door maatregelpakket 3 ongeveer 4% is in het jaar 2100 en 2200. Dit betekent een kostenreductie van 570 miljoen euro in 2100 en 1 miljard euro in 2200. In Figuur 15 is de ruimtelijke verdeling van de kostenreductie voor zowel 2100 als 2200 weergegeven.



Figuur 16: Kostenreductie voor maatregelpakket 3 in 2100 (tjdlijn Extreem) en 2200 (tjdlijn Extreem)

De kostenreductie door de maatregelpakketten blijkt relatief beperkt t.o.v. de kosten die toch al gemaakt moeten worden om de 'dagelijkse' waterstanden te keren. In zichtjaar 2200, bij tjdlijn Extreem, zal de Rijn-Maasmonding bij een zeespiegelstijging van 3 m nog steeds een stijging van de waterstanden van rond de 2,4 m te verwerken krijgen. Dit betekent dat grofweg evenveel versterkingsrondes worden uitgevoerd, waarbij de mate van versterking enigszins wordt beperkt, maar niet dusdanig dat een versterkingsronde niet noodzakelijk is.

4.4 Voorbeeldcase dijkversterkingsopgave- en kosten normtraject 16-2

Als toevoeging en duiding op de paragrafen 4.1 t/m 4.3 beschrijft deze paragraaf de totstandkoming van de dijkversterkingsopgave en -kosten voor normtraject 16-2. Normtraject 16-2 is gelegen ten noorden van Dordrecht op de kop van de Alblasserwaard en is een van normtrajecten met de grootste dijkversterkingskosten (o.a. door de sterke bodemdaling en de complexe lintbebouwing). Het traject is grotendeels bebouwd, waardoor veel constructieve maatregelen nodig zijn. We zoomen in dit voorbeeld in op tijdlijn Extreem.

Bij de totstandkoming van de dijkversterkingsopgave, en vervolgens de kosten spelen een aantal zaken een rol: de toename van de hydraulische belastingen, de bodemdaling, de complexe lintbebouwing en de huidige status van de keringen.

Gekeken naar de toename van de hydraulische belastingen, dan zien we (voor tijdlijn Extreem) dat de belastingen (de HBN's) in de basissituatie t/m 2200 toenemen met ongeveer 3 m. In 2100 is dit ongeveer 1 m. Dit komt min of meer overeen met de mate van zeespiegelstijging. In het meest gunstige maatregelpakket (pakket M) zien we dat deze toename in 2200 gereduceerd wordt van 3 m naar ongeveer 2,5 m en in 2100 van 1 m naar ongeveer 0,4 m.

Tabel 4: Hoogteopgave voor normtraject 16-2

Tijdlijn Extreem basisanalyse	Toename HBN (t.o.v. 2023)	Overhoogte in 2023	Hoogteopgave	Bodem daling
Zichtjaar 2100	1,0 m	0,5 m	1,1 m	0,5 m
Zichtjaar 2200	3,0 m	0,5 m	3,9 m	1,2 m

Als we vervolgens kijken naar de gemiddelde hoogteopgave in deze zichtjaren (gemiddeld over het traject), dan zien we dat de hoogteopgave in 2100 ongeveer 1,1 m en 0,2 m bedraagt voor respectievelijk de basisanalyse en pakket M. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de hoogteopgave een stuk kleiner is dan de zeespiegelstijging en dat er in de huidige situatie (2023) een overhoogte aanwezig is op dit deeltraject. Dit past bij de constatering dat de kruinhoogtes in 2023 orde 0,5 m hoger zijn dan het HBN.

Uit de vergelijking tussen de overhoogte en de opgave volgt een inconsistent beeld: er is een bepaalde mate van overhoogte, maar in de basisanalyse is de opgave in 2100 groter dan de te verwachte opgave. De oorzaak hiervan zit in de bodemdaling. Tot 2100 ontstaat er een bodemdaling van 0,5 m, waardoor de toename in "hoogtetoename" voor de basisanalyse niet 1 m bedraagt, maar in totaal 1,5 m. Tot 2200 neemt de bodemdaling zelfs toe tot 1,2 m.

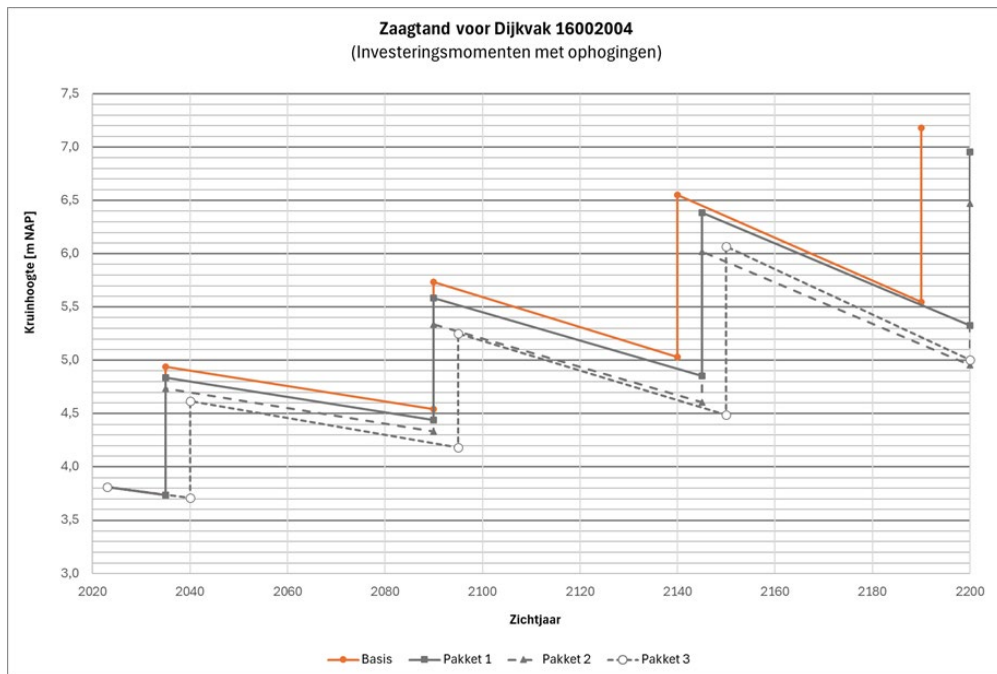
Om de impact van de bodemdaling op de dijkversterkingskosten te bepalen, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij de bodemdaling niet is meegenomen. Wat hieruit volgt, is weergegeven in Tabel 5.

Het resultaat laat zien dat bodemdaling enig effect heeft op de dijkversterkingskosten, maar dat dat effect beperkt is vergeleken met het verschil in hoogteopgave. Gekeken naar de maatregelpakketten, dan zien we hetzelfde beeld verschijnen. De maatregelen hebben een aanzienlijk effect op de belastingen, maar dat effect is beperkt in termen van dijkversterkingskosten. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat het aantal dijkversterkingsrondes niet afneemt (elke 50 jaar wordt er versterkt). De mate van versterken is een belangrijk onderdeel van de kosten, maar het versterken heeft een grotere impact op de kosten. Dit is één van de hoofdboodschappen zoals benoemd in hoofdstuk 5.

Tabel 5: Hoogteopgave met en zonder bodemdaling

Tijdlijn Extreem basisanalyse	Zichtjaar 2100		Zichtjaar 2200	
	Hoogte opgave	Kosten	Hoogte opgave	Kosten
Met Bodemdaling	1,1 m	253 m€	3,9 m	1010 m€
Zonder Bodemdaling	0,6 m	250 m€	2,7 m	831 m€

Ter illustratie is in Figuur 17 voor dijkvak 16002004 uit normtraject 16-2 een zogenaamde zaagtandfunctie weergegeven voor de drie maatregelpakketten en voor de basissituatie. De figuur laat zien dat er bij alle pakketten sprake is van vier versterkingsmomenten. Door de uitvoering van maatregelen kunnen dijkversterkingen (in dit geval verhoging) enigszins verschuiven in de tijd en kan de omvang van de benodigde dijkversterking verschillen. Deze verschillen blijven echter beperkt tot enkele decimeters.



Figuur 17: Versterkingsmomenten voor dijkvak 16002004 in normtraject 16-2 met nieuwe kruinhoogten voor drie maatregelpakketten en de basissituatie

4.5 Inschatting van kosten van maatregelpakketten

Op basis van de uit te voeren aanpassingen is op hoofdlijnen een inschatting gemaakt van de kosten van maatregelpakketten. De kosten die zijn meegenomen in de inschatting zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Maatregel / aanpassing	Bron
Maatregelpakket 1	
Vergroting opening Volkerakdam	Gevoeligheidsanalyse ZW Delta (Slootjes, 2010)
Aanbrengen opening in Grevelingendam	Afgeleid van kosten vergroting opening Volkerakdam (Slootjes, 2010)
Ophogen dijken langs Grevelingen	Dit rapport, bijlage E.
Maatregelpakket 2	
Verkleinen faalkans Europoortkering	Gebaseerd op memo Robert Vos (Vos, 2024)
Verhogen Europoortkering en Haringvlietdam	Kosten Stormvloedkeringen t.b.v. KP-ZSS (Prins, 2024)
Maatregelpakket 3	
Aanleg gemalen langs Europoortkering (7.000 m ³ /s)	Bijlagenrapport Technisch-uitwerking Oplossingsrichtingen Beschermen (KP-ZSS, 2023)
Aanleg gemalen langs Haringvlietdam (3.000 m ³ /s)	Bijlagenrapport Technisch-uitwerking Oplossingsrichtingen Beschermen (KP-ZSS, 2023)

Naast bovenstaande bronnen is gebruik gemaakt door een overall inschatting die door Robert Vos is gedaan (Vos, 2024). In de overall inschatting is mede gebruik gemaakt van bovenstaande bronnen aangevuld met andere getallen en inschattingen. Gezien de aard van de studie en het feit dat het een kosteninschatting op hoofdlijnen is, zijn de totale kosten per maatregelpakket afgerond en voorzien van een bandbreedte van 40%.

4.5.1 Kosten maatregelpakket 1

Op basis van de bronnen zijn voor maatregelpakket de volgende kosten ingeschat.

Maatregel / aanpassing	Gemiddelde kosten (milj euro's)	Bandbreedte (milj euro's)
Vergroting opening Volkerakdam	194	
Aanbrengen opening in Grevelingendam	147	
Ophogen dijken langs VZM en Grevelingen	450	
Totaal (afgerond)	800	480 – 1.120

De kosten van de vergroting van de opening in de Volkerakdam en het aanbrengen van de opening in de Grevelingendam zijn afkomstig uit een studie uit 2010. Om op het prijspeil van 2024 uit te komen is naar het prijsindexcijfer (CPI) van het CBS gekeken. Dit ligt in 2024 44% hoger dan in 2010.

De kosten van de vergroting van de opening van de Volkerakdam met 1350 m² zijn geschat op 135 miljoen euro (prijsniveau 2010). Voor het aanbrengen van een opening in de Grevelingendam is uitgegaan van een oplossing met brug en een opening van 2000 m². De kosten van deze oplossing zijn geschat op 102 miljoen euro (prijspeil 2010).

Op basis van bijlage E waarin de kosten van het ophogen van de dijken langs de Grevelingen en VZM is ingeschat, is aangenomen dat orde 30km dijk moet worden verhoogd. De kosten hiervan zijn ingeschat op 450 miljoen euro. In bijlage E is echter te lezen dat hier een forse bandbreedte omheen zit, afhankelijk van welke tijdlijn wordt gevolgd.

4.5.2 Kosten maatregelpakket 2

Op basis van de bronnen zijn voor maatregelpakket de volgende kosten ingeschat.

Maatregel / aanpassing	Gemiddelde kosten (milj euro's)	Bandbreedte (milj euro's)
Verkleinen faalkans Europoortkering	1.800	
Verhogen Europoortkering	66	
Verhogen Haringvlietdam	187	
Totaal	2.000	1.200 – 2.800

De kosten van verkleinen faalkans Europoortkering zijn ingeschat met het uitgangspunt dat er een dubbel uitgevoerde kering zal moeten komen om kleine toelaatbare faalkans van 1/5.000 te kunnen halen. Hiervoor is een bedrag van 1.800 miljoen euro ingeschat. De verhoging van zowel de Europoortkering als de Haringvlietdam is gebaseerd op een zeespiegelstijging van 1,0 m. Voor alle getallen is een onzekerheidsband van 40% aangehouden, zoals is aangegeven in de Excelsheet met kostenkenticellen (Prins, 2024).

4.5.3 Kosten maatregelpakket 3

Op basis van de bronnen zijn voor maatregelpakket de volgende kosten ingeschat.

Maatregel / aanpassing	Gemiddelde kosten (milj euro's)	Bandbreedte (milj euro's)
Aanleg gemalen langs Europoortkering (7.000 m ³ /s)	5.250	
Aanleg gemalen langs Haringvlietdam (3.000 m ³ /s)	2.250	
Totaal	7.500	4.500 – 10.500

Voor de kosten van gemalen is een kostprijs van 75 miljoen per 100 m³/s aangehouden. Dit bedrag komt uit onderzoek naar aanleiding van de motie Geurts (RWS-WVL, 2015), ingediend naar aanleiding van het Plan Sluizen. Ook Spoor IV van het KP-ZSS is onderzoek gedaan naar de toepassing van gemalen en pompen. In het bijlagenrapport Technisch-uitwerking Oplossingsrichtingen Beschermen (KP-ZSS, 2023) zijn de totale kosten van pompen (aanleg en gebruik) tot 2100 ingeschat op 100 miljoen euro per 100 m³/s. Als bandbreedte is wederom 40% aangehouden.

4.5.4 Samenvatting van kosten maatregelpakketten

In onderstaande tabel zijn de kosten voor de maatregelpakketten samengenomen.

Maatregel / aanpassing	Gemiddelde kosten (milj euro's)	Bandbreedte (milj euro's)
Maatregelpakket 1	800	480 – 1.120
Maatregelpakket 2	2.000	1.200 – 2.800
Maatregelpakket 3	7.500	4.500 – 10.500
Totaal (afgerond)	10.000	6.000 – 14.000

De totale kosten komen uit op ongeveer 10 miljard euro met een bandbreedte van 6 tot 14 miljard euro.

5 Conclusies

Op basis van de uitgewerkte maatregelpakketten, de uitgevoerde berekeningen en de daarop volgende analyses zijn diverse conclusies te trekken. Deze zijn divers van aard en variëren in mate van detail. Om de lezer te helpen met de rode draad door de conclusies heen, benoemen we hieronder eerst de belangrijkste inhoudelijke conclusies van de maatregelpakketten, gevolgd door de hoofdboodschappen die hieruit te trekken zijn.

5.1 Inhoudelijke conclusies maatregelpakketten

Het is mogelijk om met (pakketten van) maatregelen de waterstanden in de Rijn-Maasmonding te verlagen ten opzichte van de basissituatie. Dit betekent dat ten opzichte van de basissituatie de voorkeursstrategie langer aangehouden kan worden. Met betrekking tot de effectiviteit van maatregelpakketten zijn de volgende opmerkingen te plaatsen:

- Het gemiddelde effect van de maatregelpakketten gezamenlijk is orde 0,5 m bij 1,0 m zeespiegelstijging in 2100 en 0,4 m bij 3,0 m zeespiegelstijging in 2200. Het feit dat bij 3,0 m zeespiegelstijging hogere sluitpeilen worden gehanteerd zorgt ervoor dat de effectiviteit voor 2200 afneemt.
- De effectiviteit van maatregelpakketten wordt beïnvloed door de andere maatregelpakketten. Zo zorgen verbeterde stormvloedkeringen (pakket 2) ervoor dat de effectiviteit van waterberging (pakket 1) effectiever wordt.

De inschatting is dat de maatregelenpakketten in totaal in 2100 (tijdlijn extreem) een kostenreductie van orde 570 miljoen euro kunnen realiseren. Hier staat tegenover dat de kosten van de maatregelpakketten gezamenlijk worden ingeschat op 10 miljard euro.

5.2 Hoofdboodschappen

1. Dagelijkse omstandigheden doen ertoe

De huidige voorkeursstrategie voor de Rijn-Maasmonding is gebaseerd op een open-afsluitbaar systeem. Dat betekent dat er onder dagelijkse omstandigheden een open verbinding is met de zee en dat het watersysteem bij extreme stormen op zee kan worden afgesloten met stormvloedkeringen. Met deze strategie laten we net als in de huidige situatie ook met een stijgende zeespiegel onder dagelijkse omstandigheden het water van de Noordzee in de delta toe. De toename van de hydraulische belastingen door klimaatontwikkeling op de waterkeringen wordt daardoor op termijn niet meer veroorzaakt door extreme condities, maar voor het grootste deel door de stijging van die dagelijkse omstandigheden. Die stijging van de dagelijkse omstandigheden heeft ook de grootste invloed op de buitendijkse gebieden. De extreme condities (veroorzaakt door een falende stormvloedkering) dragen relatief veel minder bij aan de benodigde, toekomstige versterkingen van de primaire keringen.

2. Maatregelpakketten verlagen hydraulische belastingen

Gegeven het uitgangspunt van een open-afsluitbaar systeem zorgen de strategieverlengende maatregelpakketten ("systeemmaatregelen") wel degelijk voor een verlaging van de hydraulische belastingen in de Rijn-Maasmonding en de daarmee gepaard gaande dijkversterkingskosten. Een reductie van de uiteindelijke aanvullende hydraulische belastingen met 30-40% ten opzichte van

de huidige voorkeursstrategie lijkt haalbaar met het meest uitgebreide maatregelpakket. Deze reductie komt dicht in de buurt van wat theoretisch maximaal is op basis van een open-afsluitbaar systeem (waar afsluiten enkele keren per jaar optreedt).

3. Ook versterkingskosten zonder zeespiegelstijging

We komen er niet onderuit om bepaalde kosten te maken voor toekomstige dijkversterkingen in het gebied, ook zónder dat sprake is van zeespiegelstijging. Zeespiegelstijging is slechts één van de oorzaken waarom in de toekomst dijkversterkingen in het gebied van de Rijn-Maasmonding nodig zullen zijn. Naast vervanging en renovatie van de keringen vanwege onderhoud (einde levensduur), hebben we door klimaatverandering te maken met een toename van de rivierafvoer en een bodemdaling die blijft doorzetten. Met name deze laatste oorzaak draagt in bepaalde delen van de Rijn-Maasmonding zelfs meer bij aan de (toekomstige) versterkingsopgave dan de zeespiegelstijging. En omdat de kosten voor de dijkversterkingen tóch gemaakt moeten worden (ook door de boodschap onder punt 1), blijken de besparingen op de kosten door de uitvoering van de maatregelpakketten (in verhouding) beperkt. Grofweg 80% van de geprognoseerde versterkingskosten bij handhaven van de huidige voorkeursstrategie (fase 1) worden veroorzaakt door het meestijgen met de zeespiegel onder dagelijkse omstandigheden, een toename van de rivierafvoer en verwachte bodemdaling. De overige 20% van de geprognoseerde kosten kan voorkomen worden door de onderzochte strategieverlengende maatregelen maximaal uit te voeren. Een grotere reductie met systeemmaatregelen bij handhaven van de huidige strategie lijkt niet mogelijk.

4. Geen knikpunten

Met betrekking tot de houdbaarheid van de huidige voorkeursstrategie zien we vanuit technisch- of vanuit kostenperspectief geen knikpunten in noodzakelijke maatregelen voor waterveiligheid. De verwachting is dat de introductie van nieuwe maatregelpakketten, of de verfijning van de hier onderzochte maatregelpakketten daar geen verandering in gaat brengen, tenzij het meestijgen van het waterpeil in een open-afsluitbaar watersysteem ter discussie wordt gesteld, bijvoorbeeld op het moment dat de EPK vervangen dient te worden.

6 Referenties

1. Bamber et al. (2019). Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. Bamber, J.L., M. Oppenheimer, R. E. Kopp, W. P. Aspinall en R. M. Cooke. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(23), pp. 11195-11200 (DOI: 10.1073/pnas.1817205116). may May 2019. Bamber et al., 2019
2. Botterhuis (2013). Nader onderzoek Extra waterberging Zuidwestelijke Delta: MHW- en HBN-berekeningen (incl. aanvullende berekeningen). Ton Botterhuis. In opdracht van Rijkswaterstaat, HKV rapport PR2450.10, januari 2013.
3. Botterhuis en Stijnen (2015). Achtergrondrapportage varianten voor afsluiting Rijnmond: MHW en HBN-berekeningen in de Rijn-Maasmonding. Ton Botterhuis en Jan Stijnen. In opdracht van Rijkswaterstaat, HKV rapport PR3014.20, september 2015.
4. Botterhuis (2022). Analyse bergend oppervlak Rijn-Maasmonding bij toename middenstand zee. Ton Botterhuis. In opdracht van Rijkswaterstaat (Q. Lodder), HKV memo PR4682.10, oktober 2022.
5. Botterhuis et al. (2023). Quicksan tweede stormvloedkering, Systeemanalyse Rijnmond-Drechtsteden t.b.v. een tweede stormvloedkering. Ton Botterhuis, David Knops, Marit Zethof, Jan Stijnen (HKV) en Jarl Kind (de Waterwerkers). In opdracht van Min. I&W, HKV rapport PR4892.10, november 2023.
6. CBS. Grond-, weg- en waterbouw (GWW) inputprijsindex 2015=100 <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/84538NED/table>.
7. Cox et. al., 2021a. Anthropogenic effects on the contemporary sediment budget of the lower Rhine-Meuse Delta channel network. Cox, J. R., Huismans, Y., Knaake, S. M., Leuven, J. R. F. W., Vellinga, N. E., van der Vegt, M., ... & Kleinhans, M. G. *Earth's Future*, 9(7), e2020EF001869.
8. Cox et. al., 2021b. Climate change and human influences on sediment fluxes and the sediment budget of an urban delta: the example of the lower Rhine-Meuse delta distributary network. Cox, J. R., Dunn, F. E., Nienhuis, J. H., van der Perk, M., & Kleinhans, M. G. *Anthropocene Coasts*, 4(1), 251-280.
9. De Conto en Pollard (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531(7596):591-597. DOI:10.1038/nature17145. Mmaart 2016
10. Deltares (2014a). Bodemdaling in het rivierengebied. Technische analyses voor DPR, Asselman, A., O. Levelt en A. van der Kraan. versie 2, 1209392-000. juli 2014.
11. Deltares (2014b). KOSTen voor versterken WATERkeringen KOSWAT systeemdocumentatie versie 2.3.2 revisie 47275. augustus 2015.
12. Deltares (2020). Statistiek extreme hoogwaters Rijn en Maas op basis van geschaalde KNMI'14 scenario's - versie 0.1. Mark Hegnauer. Deltares rapport 11205237-003-ZWS-0014, 4 december 2020.
13. Deltares (2019). Strategieën voor adaptatie aan hoge en versnelde zeespiegelstijging; Een verkenning. M. Haasnoot, F. Diermanse, J. Kwadijk, R. de Winter en G. Winter. In opdracht van het Ministerie van Infrastructuur & Water - staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat - Water Verkeer en Leefomgeving september 2019, Delft.
14. HKV (2016). Invloed onzekerheid op bepalen van waterstandsverlopen. Verandering percentielen van afvoer en meerpeil bij meenemen statistische en modelonzekerheid waterstand. Guus Rongen en Chris Geerse. HKV lijn in water, rapport PR3280.20. oktober 2016.
15. HKV (2021a). Hydra-NL versie 2.8.3 voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging; Uitgangspunten en achtergronden. M. Duits. HKV lijn in water, rapport PR4407.20. juli 2021.
16. HKV (2021b). Productieberekeningen BOI2023; Deelperceel 3: Rijn- en Maasmonding (conceptuitgangspunten). C. Oerlemans, J.W. Stijnen, M. Bénit

- en A. Paarlberg. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV- en Arcadis rapport PR4538.10, Lelystad. 26 oktober 2021.
17. HKV (2022a). Hydraulische belastingen Hollandsche IJssel; voor KP-ZSS en BOI2023. D. Honingh, J.W. Stijnen, T. Botterhuis, C. Oerlemans en G. Rongen. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV-rapport PR4611.10, Lelystad. juni 2022.
 18. HKV (2022b). Analyse bergend oppervlak Rijn-Maasmonding bij toename middenstand zee. T. Botterhuis. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV-memorandum PR4682.10, Lelystad. oktober 2022.
 19. HKV (2022c). Pilotfase RMM. Opdrachtgever Rijkswaterstaat-WVL, C. Oerlemans, T. Botterhuis en B. Thonus. HKV lijn in water rapport PR4423.10. februari 2022.
 20. HKV (2022d). Analyse bergend oppervlak Rijn-Maasmonding bij toename middenstand zee. T. Botterhuis (HKV), Q. Lodder (RWS). HKV lijn in water memo PR4682.10. oktober 2022.
 21. Van Lente et al. (2023). Productieberekeningen BOI2023; Deelrapport perceel 1: Rijntakken. G.J.W. van Lente, B. Kuijper, A.J. Paarlberg, L. Straatsma en E.E. Sirks. HKV lijn in water en Witteveen+Bos, rapport PR4536.10, september 2023.
 22. IPCC (2023). Synthesis report of the IPCC Sixth assessment report (AR6). 20 maart 2023.
 23. Witteveen&Bos, HKV, et al (2023) KP-ZSS Spoor IV Oplossingsrichting Beschermen Bijlagenrapport.
 24. Kuijper en Van der Vegt (2024). Aangepaste RMM databases KP-ZSS. Bastiaan Kuijper en Niels van der Vegt. HKV lijn in water, rapport PR5059.10, februari 2024.
 25. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid primaire waterkeringen. 2016.
 26. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2023). Tussenbalans van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging; Hoe kan Nederland de stijging van de zeespiegel aan? Begeleiding: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat. Tekst en redactie: R. Postma en R. de Wit, november 2023.
 27. Prins (2024), Kosten Stormvloedkeringen: Rivierkeringen en zeekeringen (Excelsheet "20230320 Kosten Stormvloedkeringen v03 voor KP-ZSS).
 28. RHDHV (2021). Duidingskader strategieën zeespiegelstijging. In opdracht van Rijkswaterstaat, WVL. Referentie: BI1832-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001. Status: S0/P01.01. 8 december 2021.
 29. Rijkswaterstaat (2015). Handreiking Ontwerpen met overstromingskansen. Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen. Versie 2.5 juli. 2015.
 30. Rijkswaterstaat (2015). Motie Geurts, Deltaprogramma: onderzoek naar de effecten van sluizen in de Nieuwe Maas en Oude Maas op de waterveiligheid en de zoetwatervoorziening, 19 november 2015.
 31. Rijkswaterstaat GPO (2019). Excelfile behorende bij het rapport GPO RWS, 2019. Bijlage I – Onderbouwing raming vervangingswaarde kunstwerken. 2019.
 32. Rijkswaterstaat (2021a). Tijdenlijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging. RWS memo. 24 maart 2021.
 33. Rijkswaterstaat (2021b). Gewenst sluitpeil Maeslant- en Hartelkering bij Zeespiegelstijging voor eerste verkennende berekeningen. Memo RWS-WVL. 10 juni 2021.
 34. Rijkswaterstaat (2022a). Referentie – Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022.
 35. Rijkswaterstaat (2022b). Aanpak Kunstwerken Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022.
 36. Rijkswaterstaat (2022c). Generieke werkwijze, Systeemanalyse waterveiligheid Kennisprogramma Zeespiegelstijging, versie 1.0. 28 juli 2022.
 37. Rijkswaterstaat (2022d). Toepassingsleidraad OKADER voor KP ZSS spoor II. P. de Grave (Deltares). Februari 2022.

38. Vos, R (2024), Kosten maatregelpakketten KP-ZSS, (Excelsheet: "Kosten_pakketten_RVos_161224_v2").
39. Witteveen+Bos & HKV (2022). Landelijke set fragility curven t.b.v KP-ZSS. In opdracht van Rijkswaterstaat, Referentie: 129320/22-011.011. WVL. 22 juli 2022.
40. Groeneweg et al. (2022). Jacco Groeneweg, Ton Visser, Julius Sumihar (Deltares), Jan Stijnen, Ton Botterhuis en Laura de Vries (HKV). Evaluatie keringenscripts Rijn-Maasmonding. Deltares-rapportage 11208058-038-GEO-0001. juli 2022.
41. Slootjes et al. (2010). Gevoeligheidsanalyse Waterberging Zuidwestelijke Delta - Hoofdrapport, Slootjes, N., M.K. Karelse, Y.J.G. van Kruchten, T. Louters, J. Bulthuis, S. de Goederen, J.W. Slager en R. Slomp. HKV / DHV / Rijkswaterstaat Rotterdam. 2010.
42. Slootjes (2012). Nader onderzoek extra waterberging Zuidwestelijke Delta - Onderdeel van de mogelijke strategieën Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta - Syntheserapport, N. Slootjes, Deltares rapport 206075-001, Delft, 2012.
43. RWS en MinIenW (2020). Notitie actualisatie beleidsuitgangspunt afvoerverdeling Rijntakken (hoogwater), M. Schropp (RWS) en L. Kok (IenW/DGWB). 20 mei 2020.
44. Zethof et al. (2023). Kennisprogramma Zeespiegelstijging spoor II - Systeemanalyse waterveiligheid; Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied. Marit Zethof, Jan Stijnen, Bastiaan Kuijper, David Knops en Bert van den Berg. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV lijn in water, rapport PR4682.10, mei 2023.

Bijlage A Statistiek zeewaterstand en rivierafvoer

In de analyse voor de RMM bepalen we de hydraulische belastingen voor de dijken voor verschillende maten van zeespiegelstijging - gekoppeld aan rivierafvoeren - middels tijdlijnen. Dit resulteert in een waterstand bij de norm (ondergrens), een hydraulisch belastingniveau bij de norm, de sluitfrequentie van de Europoortkering en de Hollandsche IJsselkering, en een inzetfrequentie van de waterberging (en aanvullende pompcapaciteit). Een tijdlijn beschrijft de mate van zeespiegelstijging afgezet tegen de tijd, maar bevat ook informatie over de ontwikkeling van de rivierafvoer. Conform de huidige inzichten van de wetenschap, wordt niet verwacht dat de statistieken van de wind zullen veranderen.

A.1 Eindige set windsterktes, zeewaterstanden en rivierafvoeren

Lokale waterstanden en golven op diverse locaties bij diverse stormen en rivierafvoeren in het studiegebied zijn opgeslagen in een zogenaamde database fysica. Deze database bestaat uit het resultaat van zogenaamde productie-berekeningen: hydraulische berekeningen met SOBEK3 en Bretschneider van alle mogelijke windsterktes, zeewaterstanden en rivierafvoeren vastgelegd in een eindig aantal combinaties. De door te rekenen belastingcombinaties⁷ hebben bij Hoek van Holland een maximum van gemiddeld getij van NAP+1,20 m (bij westelijke windrichtingen in 2035, Tabel 6) en een maximum van springtij van NAP+1,37 m (bij oostelijke windsectoren in 2035, Tabel 7). Voor de RMM is het niet noodzakelijk om alle realisatie van de SVK Hollandsche IJssel door te rekenen. Daarom rekenen we alleen de combinaties EPK-FMz met SVK-HIJ FMo en EPK-CF* met SVK-HIJ CFo door. Hierdoor neemt het aantal SOBEK3 berekeningen af tot 10.812.

Tabel 6: Belastingcombinaties (SOBEK3: 10.368) bij westelijke windrichtingen, met FM = Faal Modus, CF = Correct Functioneren, z = zonder en m = met inzet VZM, q = met en o = zonder regionale afvoer (bron: Honing et al., 2022).

Afvoer Rijn Lobith [m ³ /s]	Afvoer Maas Lith [m ³ /s]	Zeewaterstand ⁸ [m+NAP]	Windsnelheid (U _{pot}) [m/s]	Windrichting [°N]	Europoortkering [functioneren]	Stormvloedkering Hollandsche IJssel [functioneren]
600	55	1,2	0	225,0	FMz	FMo
2000	222	2,0	10	247,5	CFz	CFq
4000	729	3,0	22	270,0	CFm	CFo
6000	1235	4,0	32	292,5		
8000	1742	5,0	42	315,0		
10000	2248	6,0	47	337,5		
13000	3008	7,0		360,0		
16000	3768	8,0				
17000	4022					
18000	4275					
20000	4782					
24000	5769					

⁷ De CF-berekeningen worden alleen doorgerekend indien de sluitpeilen worden overschreden.

⁸ Bij de referentie zijn de zeewaterstanden met 8 cm verhoogd t.o.v. 1995, om consistent te zijn met BOI, waarvan het zichtjaar 2035 is. In Hydra-NL wordt wel zichtjaar 2023 doorgerekend. Dit komt overeen met Honing et al. (2022).

Tabel 7: Belastingcombinaties (SOBEK3: 444) voor de productieberekeningen bij oostelijke windrichtingen (bron: Honing et al., 2022).

Afvoer Rijn Lobith [m ³ /s]	Afvoer Maas Lith [m ³ /s]	Zeewaterstand [m+NAP]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [°N]	Europoortkering [functioneren]	Stormvloedkering Hollandsche IJssel [functioneren]
600	55	1,37	0	22,5	FMz	FMo
2000	222		10	45,0		
4000	729		22	67,5		
6000	1235		32	90,0		
8000	1742		42	112,5		
10000	2248			135,0		
13000	3008			157,5		
16000	3768			180,0		
17000	4022			202,5		
18000	4275					
20000	4782					
24000	5769					

De samenstelling van de combinatie bepaalt de codering van de betreffende berekening. De code van de berekening wordt vervolgens door het MF-keringen script, de golvengenerator en de databasegenerator gebruikt om te interpreteren met welke toestand van de keringen, windsnelheid en -richting, zeewaterstand en rivierafvoer is gerekend. Als voorbeeld de volgende belastingcombinatie:

K1FMzK2FMoZp600Q02000U10D292.5

In het recept voor de codering van berekeningen hanteren we:

- K1 staat voor het functioneren van de Europoortkering (CFm = correct functioneren met inzet waterberging, CFz = correct functioneren zonder inzet waterberging en FMz = faalmodus zonder inzet VZM);
- K2 staat voor het functioneren van de Hollandsche IJsselkering (CFq = correct functioneren met waterbezwaar, CFo = correct functioneren zonder waterbezwaar en FMo = faalmodus zonder waterbezwaar);
- Z staat voor de zeewaterstand te Maasmond in m+NAP (p: plus), het laagste niveau wordt met 1.xx aangegeven, zodat geen onderscheid hoeft te worden gemaakt tussen gemiddeld en springtij (altijd drie karakters);
- Q de rivierafvoer bij Lobith in m³/s (altijd vijf karakters, opvullen met voorlooppnullen);
- U staat voor de potentiële windsnelheid in m/s (altijd twee karakters);
- D staat voor de windrichting in graden t.o.v. Noord (altijd vier karakters).

A.2 Toekomstscenario's

Met Hydra-NL is voor elk zichtjaar van een tijdlijn (paragraaf 2.4) de frequentie van de hydraulische belastingen per dijkvak berekend. De uitgangspunten voor de toegepaste toekomstscenario's zijn conform (Rijkswaterstaat, 2021a). Omdat pas in 2023 nieuwe klimaatscenario's van het KNMI beschikbaar zijn gekomen en KP-ZSS reeds in 2020 is gestart, is in (Rijkswaterstaat, 2021a) zo goed mogelijk gebruik gemaakt van de destijds wel beschikbare zeespiegelstijgingen en rivierafvoeren (KNMI'14). De gemaakte inschatting is geschikt bevonden voor het gebruik in de systeemanalyses van het kennisprogramma, waar ook deze analyse naar de strategieverlengende maatregelen onder valt. Om verwarring met officiële scenario's van het KNMI of het IPCC te voorkomen, spreken we over "tijdlijnen met zichtwaarden". Er is een tijdlijn Laag met een langzame verandering van de zeespiegel en er zijn extreme tijdlijnen met een snelle verandering gemaakt overeenkomstig met een zogenaamde Representative Concentration Pathway (RCP⁹) van het IPCC waarbij voor zeespiegelstijging is uitgegaan van een 83% in de kansverdeling van de RCP. Tijdlijn Zeer Extreem met meer dan 5 m zeespiegelstijging komt niet overeen met de IPCC RCP (de andere gekozen tijdlijnen wel). In de tijdlijnen is naast een toename van de zeespiegel ook een verandering van de rivierafvoeren van Rijn en Maas opgenomen. Daarbij veronderstellen we dat de afvoer te Lobith niet boven 22.000 m³/s uit kan komen, doordat dan bovenstrooms in Duitsland door inundaties een fysisch maximum van de afvoer wordt bereikt.

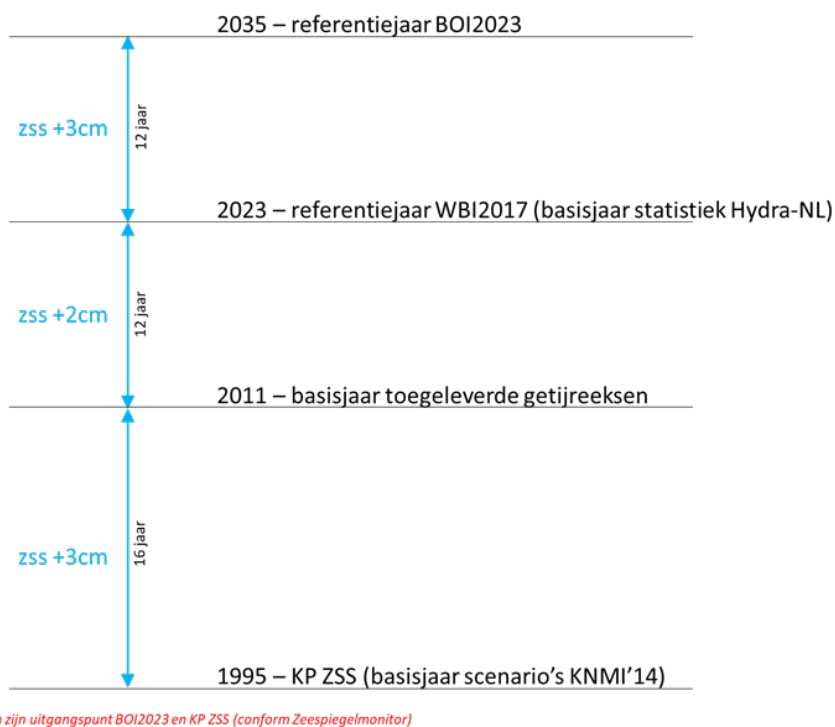
In Honingh et al. (2022) is de referentie met SOBEK3 zo doorgerekend dat deze toepasbaar is voor zowel BOI als voor KP ZSS. Destijds is daarom gekozen om de waterstanden met SOBEK3 in het zichtjaar 2035 door te rekenen. Omwille van consistentie wijken we daar nu niet vanaf. In Figuur 18 geven we in een overzicht de relatie tussen verschillende gegevens en zichtjaren weer. Andere aspecten die van belang zijn voor de interpretatie van de resultaten zijn:

1. Het basisjaar waarop de KNMI'14 scenario's zijn gebaseerd (oorsprong van de tijdlijnen);
2. Het basisjaar van de statistiek in Hydra-NL (zeewaterstand en afvoeren);
3. Het basisjaar van de fysica die dient als invoer voor het SOBEK3-model. In het bijzonder gaat het om de middenstand van het basisgetij. Daar direct aan gekoppeld is het basisjaar van de door RWS toegeleverde getijreeks en de vertaling daarvan naar de gewenste middenstand voor toepassing in KP ZSS en BOI.
4. De instellingen zoals deze voor het referentiejaar en de tijdlijnen beschikbaar zijn binnen het probabilistische model Hydra-NL.

Deze verschillende onderdelen lichten we in onderstaande kopjes toe, waarbij we uitleggen hoe deze verschillende zichtjaren zich tot elkaar verhouden. Figuur 18 geeft grafisch al deze aspecten weer. Deze figuur maakt duidelijk dat de zeespiegelstijging tussen 1995 en 2023 gelijk is aan 5 cm en dat die tussen 1995 en 2035 8 cm bedraagt. In de Hydra-NL en OKADER worden de exacte zichtjaren van de tijdlijnen van KP ZSS doorgerekend, omdat de hydraulische belastingen vergeleken worden met de actuele kruinhoogte van de dijken en omdat gerekend wordt met een autonome bodemdaling.

⁹ De RCP scenario's, of RCP's zijn enkele scenario's die de ontwikkeling van broeikasgassen beschrijven, die gebruikt worden in het vijfde IPCC-rapport.

Niet elk zichtjaar van elke tijdlijn is doorgerekend met SOBEK3. Van combinaties (wind, zeewaterstand en rivierafvoer) bij zeespiegelstijging [0, 0,5; 1; 2 en 3 m] zijn databases gemaakt voor de basissituatie en elk maatregelpakket. In totaal zijn 20 databases (4x5) beschikbaar gemaakt. Een set van 5 databases voor de basissituatie is overgenomen uit fase 1 (Kuijper en Van der Vegt, 2024). Voor de 3 maatregelen pakketten zijn databases (3x5) in deze studie aangemaakt. Hydra-NL gebruikt per zichtjaar van een tijdlijn die database fysica, die gevuld is met condities (zeespiegelstijging) die nagenoeg gelijk is aan de condities van het betreffende zichtjaar. Dat de golf- en waterstand-berekeningen niet exact voor die zichtjaren zijn uitgevoerd, zorgt voor een zeer kleine onnauwkeurigheid die verwaarloosbaar wordt verondersteld t.o.v. de onzekerheden aangaande de inschatting van de hydraulische belastingen en kosten in de betreffende tijdlijnen (scenario's).



Figuur 18: Verschillende jaartallen die binnen KP ZSS RMM, HIJ en BOI HIJ gebruikt worden om databases en statistiek te genereren.

1. Basisjaar KNMI'14 scenario's en KP ZSS

Voor de KNMI'14 klimaatscenario's is de referentie een modeluitkomst van klimaatmodellen over 30 jaar tussen 1981 en 2010. Deze reeks centreert zich rondom 1995 (+/- 15 jaar), wat in deze studie als het basisjaar van de klimaatontwikkeling in de tijdlijnen is aangenomen ten opzichte waarvan toekomstige veranderingen beschouwd zijn.

2. Basisjaar statistiek Hydra-NL

Speciaal voor KP ZSS is modelversie 2.8.4 van Hydra-NL ontwikkeld, welke zowel op de Hollandsche IJssel als in de rest van de Rijn-Maasmonding is gehanteerd. Versie 2.8.4 hanteert zichtjaar 2023 als referentiejaar voor de statistiek van de zeewaterstand en de afvoer (conform WBI2017 en consistent met de uitgangspunten van KP ZSS). De statistiek van de afvoer is overgenomen uit WBI2017 en gebaseerd op uitkomsten van het GRADE-project (Generator of Rainfall and Discharge Extremes)

van Rijkswaterstaat. Voor de afvoer is uitgegaan van aangepaste KNMI2014-scenario's conform (Deltares, 2020), zie hoofdstuk 5 uit (HKV, 2021a).

3. Basisjaar kosten OKADER

De berekening van de versterkingskosten met OKADER hanteert ook zichtjaar 2023 als referentiejaar. In de berekeningen met OKADER gaan we uit van de situatie hoe de dijken er nu (medio 2023) bij liggen en beschouwen we de kosten die we vinden in de tijdelijk "laag" tot het jaar 2050 als HWBP-kosten om het systeem "op orde" te brengen. Hier zit een levensduur in van 50 jaar en een zeespiegelstijging tussen 0,25 m (2050) en 0,5 m (2100). Ook wordt daarin de bodemdaling onder de dijk meegenomen t.o.v. de huidige situatie. In 2050 zijn de dijken minimaal op orde, maar omdat dijken in de regel versterkt worden voor 50 jaar kunnen zij in 2050 nog resthoogte (en/of reststerkte) hebben

3. Basisjaar waterstandberekeningen SOBEK3

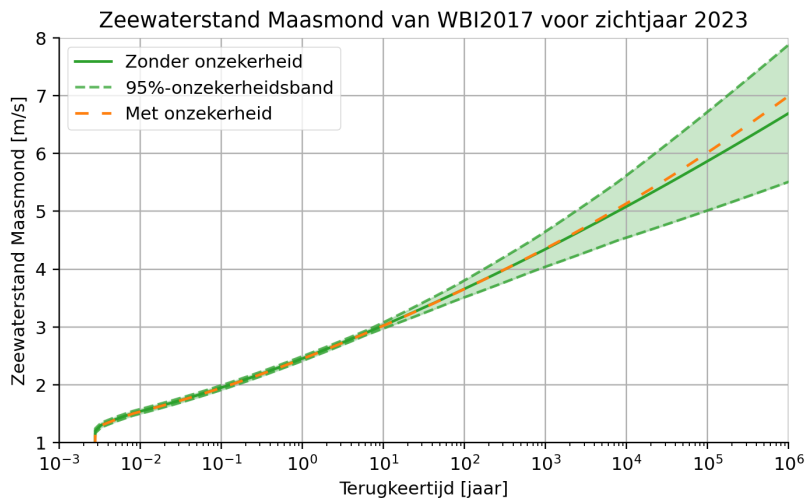
Om het SOBEK3 model voor de RMM te kunnen voeden, is de volgende invoer nodig voor de randvoorwaarde van de Noordzee:

- getij (cyclisch gemiddeld getij en springtij) met een bepaalde middenstand t.o.v. NAP;
- vorm van de stormopzet (vorm trapezium);
- hoogte van de stormopzet;
- mate van zeespiegelstijging.

Omdat we 1995 als de basis hanteren, is de invoer voor het SOBEK3 model ook consistent gemaakt ten opzichte van 1995. Dat betekent ook dat we toenames van de zeespiegelstijging dus in dit project beschouwen ten opzichte van 1995. De door RWS toegeleverde getijreeks gaat uit van slotgemiddelden van het getij uit 2011. Om te zorgen dat we aansluiten bij zichtjaar 1995, is deze reeks gecorrigeerd naar 1995 (door deze met 3 cm te verlagen, zie Figuur 18), om consistentie tussen de fysica en de statistiek te waarborgen. Deze gecorrigeerde reeks is gehanteerd als invoer voor de randvoorwaardengenerator. Met deze generator wordt de middenstand van de zeerand op het juiste niveau gelegd (afhankelijk van het scenario verhoogd met 0,08; 0,5; 1,0; 2,0 en 3,0 m).

A.3 Waterstandstatistiek Noordzee

Voor de Hydra-NL berekeningen is gebruik gemaakt van statistiek van de zeewaterstand bij Maasmond. Voor de referentiesituatie (2023) betreft dit de statistiek conform WBI2017 [Deltares, 2017], voor de statistiek in 2050, 2100, 2150 en 2200 is de frequentielijn verschoven met de aangenomen zeespiegelstijging uit Tabel 1 en Figuur 3. In Figuur 19 is de statistiek van de zeewaterstand voor 2023 weergegeven. Het uitintegreren van de statistische onzekerheid is gedetailleerd beschreven in [HKV, 2021a].



Figuur 19: Waterstandstatistiek Noordzee (Maasmond) voor referentie [Deltares, 2017].

In de onderstaande tabel hebben we de statistiek van Figuur 19 voor 5 herhalings-tijden weergegeven. Het is van belang voor de interpretatie van de probabilistische berekeningen rekening te houden met een onzekerheid van ruim een meter in de waarde bij T10.000 (bovengrens norm te Rotterdam). Deze onzekerheid is meegenomen in de frequenties van de berekende waterstand. Dit staat los van de onzekerheid over de zeespiegelstijging. Die onzekerheid is meegenomen door verschillende tijdlijnen te beschouwen.

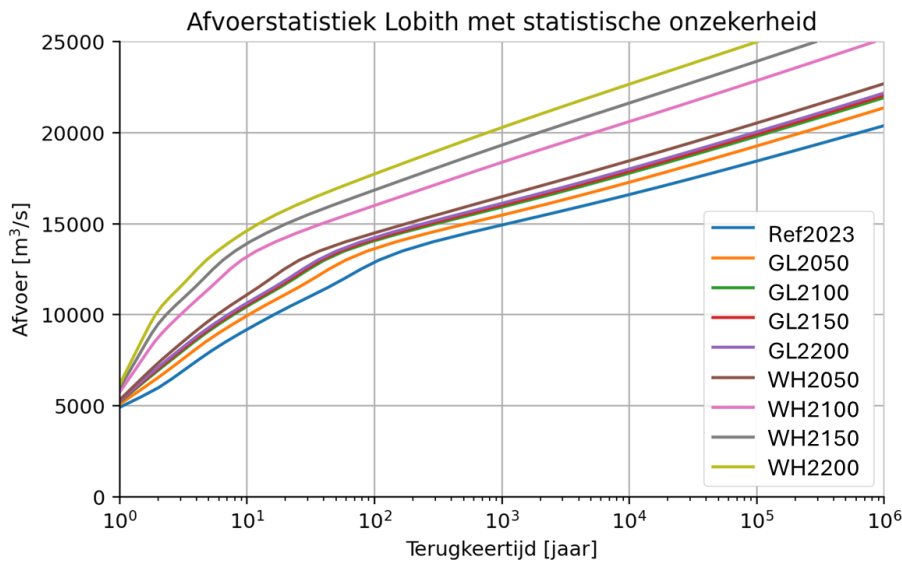
Tabel 8: Zeewaterstanden op de Noordzee te Maasmond voor herhalings-tijden 10, 100, 1000, 10000 en 10000 jaar (inclusief statistische onzekerheid en waarden voor de 2,5 en 97,5 betrouwbaarheidsintervallen).

T [jaar]	Excl. onz.	Incl. onz.	2,5% BI	97,5% BI
10	3,0	3,0	3,0	3,1
100	3,6	3,6	3,5	3,8
1.000	4,3	4,3	4,0	4,6
10.000	5,1	5,1	4,5	5,6
100.000	5,8	6,0	5,0	6,7

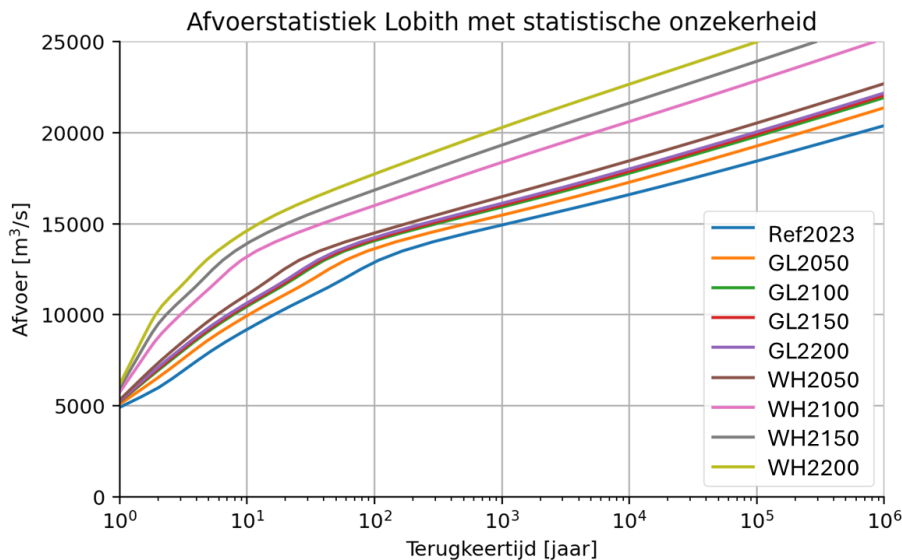
A.4 Afvoerstatistiek Rijn en Maas

Voor de Hydra-NL berekeningen is gebruik gemaakt van afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Lith. Voor de referentiesituatie (2023) betreft dit de statistiek conform WBI2017, voor de statistiek in 2050, 2100, 2150 en 2200 is de afvoerstatistiek afgeleid van de KNMI'14 scenario's (GL en WH) uit GRADE [Deltares, 2020]. De afvoerstatistiek is niet hetzelfde als de KNMI-scenario's, maar wel daarmee afgestemd [Rijkswaterstaat, 2021a]. De nieuwe KNMI-scenario's (KNMI'23) zullen naar verwachting in lijn zijn met de tijdlijnen van KP ZSS, afhankelijk van het gekozen onzekerheidspercentiel. Kort gezegd, is deze afgeleid uit de beschikbare statistiek voor 2050 en 2085 voor Lobith en Borgharen uit KNMI'14. Daarbij is de statistische onzekerheid 'uitgeïntegreerd' en is de afvoer van Borgharen vervolgens vertaald naar Lith d.m.v. een afvoer-afvoer relatie [HKV, 2021a]. Figuur 20 en Figuur 21 geven de resulterende afvoerstatistiek grafisch weer.

De afvoeren in de figuur zijn niet afgetoet voor de Rijn, dit wordt later gedaan in het programma Hydra-NL. Beleidsmatig is op dit moment het aftopniveau 18.000 m³/s. In KP ZSS is gekozen voor een hoger aftopniveau van 22.000 m³/s in 2200 om aan te geven dat ook in Duitsland de dijken in de toekomst zullen worden verhoogd.



Figuur 20: Afvoerstatistiek Rijn (Lobith) voor referentie en tijdlijnen [HKV, 2021a].



Figuur 21: Afvoerstatistiek Maas (Lith) voor referentie en tijdlijnen [HKV, 2021a].

A.5 Afvoerverdeling splitsingspunten

De afvoer op de Waal en Lek is gekoppeld aan de afvoer te Lobith door een afvoerverdeling op de Rijntakken aan te nemen. De kunstwerken Pannerdensche Overlaat en Hondsbroeksche Pleij nabij Nijmegen en Arnhem worden zo ingesteld, dat in de referentie voldaan wordt aan de beleidsmatige afvoerverdeling VAST16000 en in de zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 aan VAST18000 (Schropp en Kok, 2020). Met een simulatie van de waterbeweging wordt dan de verdeling over de

Rijntakken bij verschillende afvoerniveaus uitgerekend. In Tabel 9 staat de koppeling tussen rivierafvoer te Lobith en de afvoer op de Waal en de Lek volgens VAST16000. In Tabel 10 staat de koppeling volgens VAST18000.

De koppeling tussen de afvoer op de Bovenrijn te Lobith en op de Maas te Lith is onderzocht op basis van de correlatie tussen afvoermetingen [Deltares, 2017]. In beide tabellen staat dezelfde correlatie.

Tabel 9: Koppeling afvoeren Rijn, Waal, Lek en Maas bij een instelling van de afvoerverdeling op Rijnafvoer van 16.000 m³/s bij Lobith [Schropp en Kok, 2020].

Vaste instelling afvoerverdeling 16.000 m³/s					
Bovenrijn	Waal	Pan. Kan.	IJssel	Lek	Maas
600	481	119	117	2	55
2.000	1.445	555	324	232	222
4.000	2.757	1.243	527	717	729
6.000	4.112	1.888	812	1.079	1.235
8.000	5.420	2.580	1.080	1.503	1.742
10.000	6.497	3.503	1.426	2.079	2.248
13.000	8.347	4.653	1.938	2.719	3.008
16.000	10.167	5.833	2.501	3.340	3.768
17.000	10.742	6.258	2.718	3.549	4.022
18.000	11.317	6.683	2.935	3.757	4.275
20.000	12.367	7.633	3.459	4.179	4.782
24.000	14.341	9.659	4.742	4.914	5.796

Tabel 10: Koppeling afvoeren Rijn, Waal, Lek en Maas bij een instelling van de afvoerverdeling op Rijnafvoer van 18.000 m³/s bij Lobith [Schropp en Kok, 2020].

Vaste instelling afvoerverdeling 18.000 m³/s					
Bovenrijn	Waal	Pan. Kan.	IJssel	Lek	Maas
600	481	119	117	2	55
2.000	1.445	555	324	232	222
4.000	2.757	1.243	527	717	729
6.000	4.112	1.888	812	1.079	1.235
8.000	5.423	2.577	1.087	1.493	1.742
10.000	6.678	3.322	1.398	1.929	2.248
13.000	8.715	4.286	1.858	2.432	3.008
16.000	10.638	5.362	2.413	2.954	3.768
17.000	11.183	5.817	2.657	3.168	4.022
18.000	11.728	6.272	2.901	3.382	4.275
20.000	12.694	7.306	3.465	3.856	4.782
24.000	14.612	9.388	4.651	4.746	5.796

Bijlage B Beschrijving maatregelpakketten

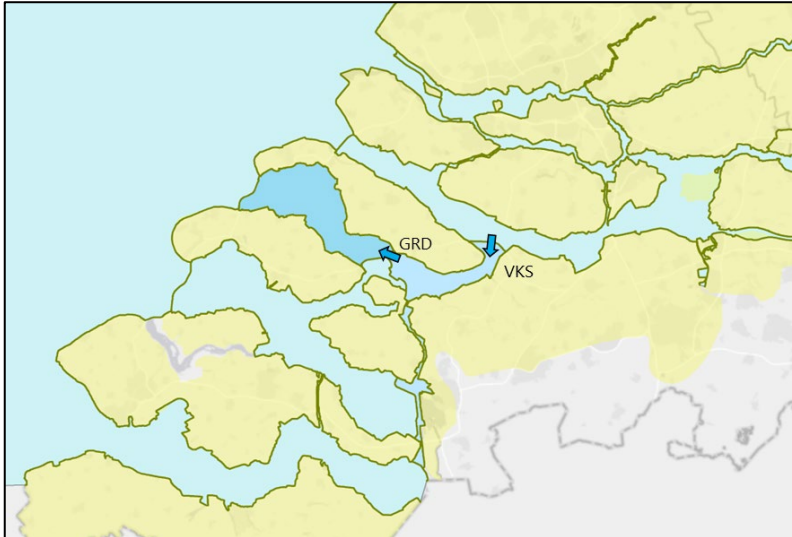
In deze bijlage beschrijven we de onderzochte maatregelpakketten en op welke wijze deze zijn vastgelegd in een hydraulische model. Voor de basissituatie is een hydraulisch model van SOBEK3 (HKV, 2022c) aangeleverd om bij verschillende combinaties van wind, zeewaterstand en rivier-afvoer de lokale waterstand bij elk dijkvak in het studiegebied te berekenen. Met het model kan de getijdebeweging (incl. windopzet) en de rivierafvoer worden gesimuleerd. Bij een storm op zee wordt de RMM in de simulatie afgesloten met stormvloedkeringen en indien nodig wordt de waterberging ingezet. Ook het falen van een sluiting wordt gesimuleerd en de lokale waterstanden bij dergelijke condities zijn weggeschreven in de database fysica. Ook het effect van de maat-regelpakketten op de waterstanden (en golven) in het studiegebied is via hydraulische berekeningen met het SOBEK3 model vastgelegd in een database fysica. Voor de maatregelpakketten is het basismodel aangepast. Per pakket is een model beschikbaar gemaakt.

Via de databases wordt het maatregelpakket meegenomen in de berekening van de hydraulische belastingen voor de tijdlijnen met Hydra-NL en kan het effect van een pakket per dijkvak worden vertaald in een opgave via de sterkteberekening met OKADER en KOSWAT. Hierbij volgen we in algemene zin de werkwijze zoals toegepast bij de het bepalen van de hydraulische belastingen voor de Hollandsche IJssel voor KP-ZSS en BOI2023 (Honingh et al., 2022). Het resultaat van de productie-berekeningen is opgeslagen in 5 databases per maatregelpakket, zo is het effect van de pakketten bij zeespiegelstijging [0; 0,5, 1; 2 en 3] vastgelegd in een eindig aantal combinaties (10.812) van stormen op zee en rivierafvoeren (bijlage A.1). Per combinatie is het maximum van de lokale waterstand per dijkvak met bijbehorende lokale golven opgeslagen in de databases. Het gaat om een aanzienlijke hoeveelheid getallen. Immers het betreft 2236 locaties bij de dijkvakken waarvoor (verdeeld over 15 database) ruim 350.000 waterstanden en golfparameters zijn opgeslagen (namelijk één per gesimuleerde combinatie).

B.1 Pakket 1: basissituatie + extra waterberging Zuidwestelijke Delta

Het doel van maatregelpakket 1 is om met extra waterberging het gebied achter de Europoortkering en de Haringvlietdam beter te beschermen als bij een sluiting van de stormvloedkeringen de waterstand door een verhoogde rivierafvoer oploopt. Het bergend oppervlak van de RMM ligt tussen 440-620 km² (Botterhuis, 2022). Extra waterberging in de Zuidwestelijke Delta wordt gerealiseerd door in zowel de Volkerakdam als in de Grevelingendam doorlaatmiddelen met een totaal doorstroomoppervlak van 2.000 m² te dimensioneren (Figuur 22). Zodoende kan de Grevelingen (140 km²) naast het Volkerak-Zoommeer(80 km²) als berging worden ingezet.

Slootjes et al. (2010) geven aan dat dit het maximaal te realiseren doorstroomoppervlak is en een optimale inzet geeft van de berging op de Grevelingen. In de Volkerakdam worden de bestaande 4 spuikokers vergroot (lagere drempel i.c.m. hogere hefhoogte) en worden de scheepvaartsluizen ingezet om te spuien van Hollandsch Diep naar Volkerak. De waterberging is bedoeld om de waterstand op het Haringvliet/Hollandsch Diep onder het inzetpeil te houden. De berging wordt ingezet als dit peil in de voorspelling (zonder inzet) wordt overschreden. De doorlaatmiddelen worden geopend op het moment dat de Maeslantkering is afgezonken bij een lagere waterstand op het Haringvliet (waardoor overschrijding van het inzetpeil wordt voorkomen). De regelkring van deze kunstwerken is beschreven in paragraaf B.6.



Figuur 22: Situatieschets voor maatregelpakket 1

Twee openingen worden in de Grevelingendijk gecreëerd om water van het Volkerak naar de Grevelingen te spuien. In het model zijn de maatregelen vereenvoudigd tot een kunstwerk in beide dammen¹⁰. Het kunstwerk in de Grevelingendijk is in de berekeningen niet afsluitbaar, overwegingen t.b.v. waterkwaliteit of verschillend peilbeheer van de meren worden in deze studie buiten beschouwing gelaten. In paragraaf B.5 zijn de details over de dimensies van de maatregelen opgenomen.

B.2 Pakket 2: pakket 1 + verbeteren Europoortkering en Haringvlietdam

Het doel van maatregelpakket 2 is om, aanvullend op maatregelpakket 1, het gebied achter de Europoortkering en de Haringvlietdam beter te beschermen tegen stormen vanuit zee (Figuur 23), door het verlagen van de maatgevende belastingen.



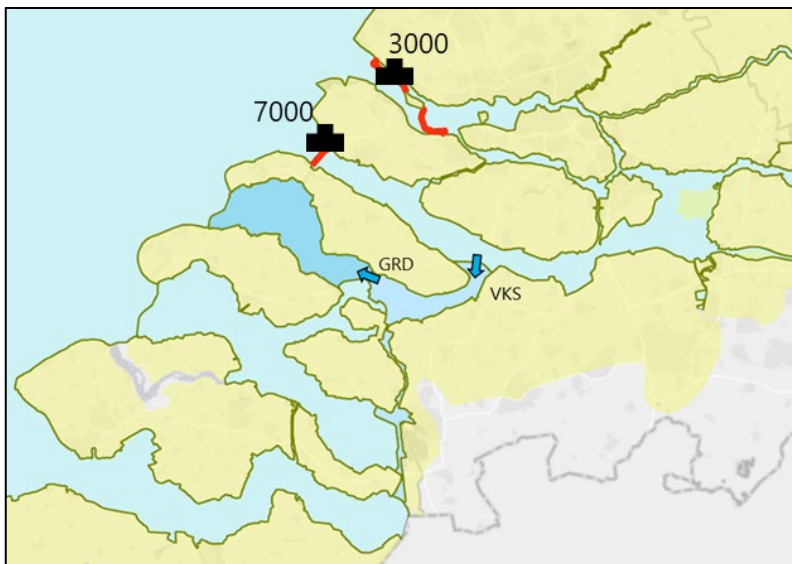
Figuur 23: Situatieschets voor maatregelpakket 2

¹⁰ Met de realisatie van de doorlaatmiddelen, is ook aangenomen dat de kerende hoogte van de Volkerakdam en de Hellegatsdam wordt aangepast. Anders is de berging al gedeeltelijk gevuld in de tijdlijnen tot 2200, door het overlopen van deze dammen.

Hiervoor wordt de faalkans van de Europoortkering aanzienlijk verkleind tot 1x per 5.000 sluitingen (overeenkomstig met de uitgangspunten in de studie naar de Hollandkering: Botterhuis et al., 2023). Daarnaast wordt de kerende hoogte van de kunstwerken¹¹ aanzienlijk verhoogd. Aanpassing van de kerende hoogte is in de modellering verwerkt door een oneindige hoogte toe aan de beweegbare delen van Maeslantkering en Haringvlietsluizen, m.u.v. de Hartelkering. De huidige kerende hoogte van de Hartelkering (NAP+3,0 m) is bewust lager dan de hoogte van de Maeslantkering en Haringvlietsluizen (NAP+5,0 m), anders ontstaan te hoge waterstanden op het Hartelkanaal. Wel is aangenomen dat de hoogte van de Hartelkering kan 'meegroeien' met de zeespiegelstijging. We verwijzen naar paragraaf B.5 voor de precieze dimensies van de maatregelen.

B.3 Pakket 3: pakket 2 + aanleg van gemalen

Het doel van maatregelpakket 3 is om, aanvullend op maatregelpakket 2, gemalen te plaatsen om tijdens hoogwater extra water uit het watersysteem te kunnen pompen (Figuur 24), zodat de waterstand bij een sluiting van de stormvloedkeringen niet te hoog oploopt (mocht de waterberging onvoldoende zijn).



Figuur 24: Situatieschets voor maatregelpakket 3

Het gaat om gemalen ter plekke van de Europoortkering (op de landstrip tussen Rozenburg en de Maeslantkering) en bij de Haringvlietsdam (naast de spuisluizen). Voor het vaststellen van de pompcapaciteit is in Oerlemans et al. (2024) gekeken naar de afvoer van de desbetreffende rivieren (afvoer Lek voor pompcapaciteit bij Europoortkering en afvoer Waal/Merwede/Maas voor pompcapaciteit bij de Haringvlietsdam).

De capaciteit van de gemalen wordt getript ingezet. In eerste instantie wordt de gemaalcapaciteit als aanvullend op de maatregel (extra) waterberging beschouwd, de gemalen worden alleen ingeschakeld als de waterberging al geopend is. De berging wordt geopend op het moment dat de Maeslantkering is afgezonken bij een lagere waterstand dan het inzetpeil op het Haringvliet (waardoor overschrijding van het inzetpeil wordt voorkomen, zie paragraaf B.6). Om de waterstand op het Haringvliet/Hollandsch Diep onder het inzetpeil van de waterberging te houden,

¹¹ De verbindende dijk is in de basissituatie al als oneindig hoog gemodelleerd in het Sobek3-model, omdat dit als reguliere dijkversterking is aangenomen conform BOI2023.

worden gemalen na het openen van de Volkeraksluizen maar voor overschrijding van het inzetpeil aangezet. Het aanslagpeil van de gemalen is 0,35 m lager aangenomen dan het inzetpeil. Bij overschrijding van het aanslagpeil worden bij de Europoortkering en bij de Haringvlietdam 250 m³/s aan pompcapaciteit ingeschakeld (in totaal dus 500 m³/s). Als de waterstand te Rak Noord doorstijgt, wordt een uur later bij overschrijding van 0,025 m van het aanslagpeil nog eens in beide gemalen 500 m³/s bijgeschakeld. Dit bijschakelen wordt herhaald, totdat de waterstand niet meer stijgt (of de maximale capaciteit van 10.000 m³/s wordt bereikt). Als de waterstand daalt met 0,025 m wordt in beide gemalen 250 m³/s afgeschakeld.

Bij een waterstandstijging van 0,275 m (NAP+2.525 m in referentiesituatie) is de volledige pompcapaciteit in de Nieuwe Waterweg ingeschakeld. Bij de Haringvlietdam is de volledige pompcapaciteit ingeschakeld bij een waterstandstijging van 0,675 m (NAP+2.925 m in de referentiesituatie). In paragraaf B.5 is de maximaal geschatte pompcapaciteit per locatie weergegeven. Op grond van de analyse van Consortium Beschermen van het KP ZSS (2023) wordt verondersteld dat er voldoende ruimte is om de maximale pompcapaciteit op de genoemde locaties te realiseren. Door het getrapte bijschakelen kan achteraf beoordeeld worden of deze maximale capaciteit ook noodzakelijk is.

B.4 Pakket M: theoretisch maximaal effect systeemmaatregelen

Om inzichtelijk te maken wat de bandbreedte van systeemmaatregelen is, hebben we met een fictief maatregelpakket onderzocht, wat het theoretisch maximale effect van systeemmaatregelen is op de waterstanden bij een gesloten Europoortkering (ongeacht welke maatregelen dat precies zijn en de haalbaarheid daarvan). Dit *fictieve* maatregelpakket hebben we pakket M genoemd. De berekening van de waterstand en golven van dit pakket bespreken we in deze bijlage. Het pakket gaat uit van perfect werkende stormvloedkeringen (faalkans = 0), die niet overstroombaar zijn, in combinatie met aanvullende maatregelen, die voorkomen dat de waterstand in gesloten toestand verder op blijft lopen (als gevolg van hoge rivierafvoer).

Uitgangspunt is dat de oorzaak van hoge waterstanden in het studiegebied opgedeeld kan worden in 3 categorieën:

1. Als een storm op zee uit blijft (of een geringe storm geeft geen overschrijding van het sluitpeil), wordt een verhoging van de waterstand in het studiegebied veroorzaakt door een verhoogde rivierafvoer die bij gemiddeld of licht verhoogd getij naar zee vrij kan afstromen. De onderzochte strategieverlengende maatregelen hebben geen effect op deze waterstanden.
2. Als een storm op zee opsteekt en het sluitpeil van de EPK wordt overschreden, dan wordt het studiegebied afgesloten. Doordat rivieren naar de afgesloten delta blijven stromen en doordat de gesloten stormvloedkeringen niet hoog genoeg zijn, loopt de waterstand in de *gesloten* situatie nog op. Met de onderzochte strategieverlengende maatregelen proberen we dit oplopen van de waterstand zoveel mogelijk te voorkomen, toch is de resulterende waterstand in de *gesloten* situatie na realisatie van de maatregelen verhoogd t.o.v. de waterstand op moment van sluiten.
3. Als een storm op zee opsteekt en het sluitpeil van de EPK wordt overschreden, is er een kans (de faalkans) dat de stormvloedkeringen falen en de delta niet afgesloten wordt. Het verkleinen van deze faalkans (met factor 50 tot 1x per 5000 sluitingen) is onderdeel van de maatregelpakketten. Daardoor worden de waterstanden in de RMM aanzienlijk verlaagd, maar blijft er nog een kleine kans bestaan dat de delta niet afgesloten wordt door het falen van de stormvloedkeringen.

Als er geen storm op zee opsteekt, wordt het sluitpeil van de EPK niet overschreden en worden de stormvloedkeringen niet gesloten, noch wordt waterberging ingezet of worden (nieuw te bouwen) gemalen ingeschakeld. Met het handhaven van de huidige voorkeurstrategie 'open/afsluitbaar' groeien de waterstanden in studiegebied (a.g.v. categorie 1) gedeeltelijk mee met de klimaatontwikkeling. In de uitgevoerde analyse onderzoeken we maatregelen die de houdbaarheid van deze strategie kunnen verlengen. De kans op waterstanden a.g.v. categorie 1 blijft na realisatie van de onderzochte maatregelen ongewijzigd. De waterstanden a.g.v. oorzaken 2 en 3 kunnen wel door de onderzochte maatregelen worden verlaagd. Het theoretisch maximale effect van de strategieverlengende maatregelen kan worden berekend door in de berekeningen met Hydra-NL de kans op voorkomen van categorie 2 en 3 gelijk aan nul te stellen. Voor categorie 3 moet daarvoor de faalkans van de EPK gelijk aan nul worden ingesteld.

Voor waterstanden a.g.v. categorie 2 is het lastiger om te voorkomen dat deze oplopen in de hydraulische berekeningen. Geredeneerd vanuit de eigenschappen van een probabilistische berekening met Hyda-NL, heeft het geen zin om de waterstanden achter een gesloten Europoortkering te verlagen tot onder het niveau van de waterstand van categorie 1. Immers de kans op het tegelijkertijd optreden van een storm op zee en een verhoogde rivierafvoer (situaties waarin de stormvloedkeringen gesloten worden) is aanzienlijk kleiner, dan de kans van optreden van alleen een verhoogde rivierafvoer (bij gemiddeld getij op zee). Verlagen van categorie 2 waterstanden tot onder die van categorie 1, veroorzaakt alleen maar een verlaging van waterstanden die eens per jaar of vaker optreden. Dergelijke waterstanden hebben geen invloed op beoordeling van de dijken nog op het benodigde ontwerp. Ze zijn voor waterveiligheid van geen belang.

In de probabilistische berekening stellen we het theoretisch maximum van systeemmaatregelen op categorie 2 waterstanden gelijk is aan de waterstanden die ontstaan bij het optreden van categorie 1. Door de faalkans van de Europoortkering gelijk aan nul in te stellen en de waterstanden van categorie 2 te vervangen door waterstanden van categorie 1, kan het theoretisch maximale effect van de strategieverlengde maatregelen probabilistisch worden berekend. Met een aanpassing van het sluitpeil kan dit theoretisch maximale effect nog worden gewijzigd. Immers voor stormen die geen overschrijding van het sluitpeil geven, stroomt de zee met stormopzet nog steeds de delta in. In welke mate het sluitpeil het theoretisch maximum beïnvloedt, is onderzocht in Bijlage F.

B.5 Dimensionering maatregelpakketten

De maatregelpakketten 1 en 2 kunnen worden geschematiseerd door bestaande objecten in de SOBEK3 schematisatie aan te passen. De verbetering van de faalkans van de Europoortkering heeft geen effect op de hydraulische berekeningen (op de databases fysica). Deze kans wordt in de invoer van de Hydra-NL berekening aangepast. Voor maatregelpakket 3 zijn 2 gemalen aan de schematisatie toegevoegd. In Tabel 11 t/m Tabel 13 zijn de aangepaste dimensies van de betreffende dammen en stormvloedkeringen weergegeven uit respectievelijk pakket 1, pakket 2 en pakket 3. Pakket M is vastgelegd door de databases fysica aan te passen (zie B.4).

Tabel 11: Dimensies maatregelen Volkerakdam en Grevelingendam uit maatregelpakket 1 (zonder wijziging overgenomen uit Oerlemans et al., 2024).

Locatie	Onderdeel	Basis	Pakket 1:
Volkerakdam	Uitgangspeil	NAP+0 m – NAP+1,5 m	NAP+0 m
	Verwachting inzetpeil waterberging	NAP+2,6 m (groeit op zelfde manier mee met de zeespiegelstijging als sluitpeil EPK)	NAP+2,6 m (groeit op zelfde manier mee met de zeespiegelstijging als sluitpeil EPK)
	Spuimiddelen	alleen spuien met 4 spuiokers	aanvullend aan 4 spuiokers, ook spuien met scheepvaartsluizen
	Effectief doorstroomoppervlak	570 m ²	2.000 m ²
	Drempels kokers	NAP-4.25 m	NAP-6,25 m
	Aantal schuiven in model	1	1
	Kerende hoogte Volkeraksluizen	NAP+3,5 m	NAP+999 m (niet overstroombaar)
Grevelingendam (Zuid-Holland)	Uitgangspeil	n.v.t.	NAP+0 m
	Inzetpeil	n.v.t.	zelfde als VZM
	"Krammer" breedte doorlaatmiddel Krammer	Geen	3 x 55 m
	"Krammer" doorstroomoppervlak	0 m ²	1350 m ²
	"Krammer" drempel doorlaatmiddel	n.v.t.	NAP-6,00 m
	"Bocht St. Jacob" breedte doorlaatmiddel	Geen	2 x 60 m
	"Bocht St. Jacob" doorstroomoppervlak	0 m ²	650 m ²
	"Bocht St. Jacob" drempel doorlaatmiddel	n.v.t.	NAP-6,00 m
	Aantal kunstwerken in model	n.v.t.	1
	Kerende hoogte Grevelingendam	NAP+999 m (niet overstroombaar)	NAP+999 m (niet overstroombaar)

Tabel 12: Dimensies maatregelen Europoortkering en Haringvlietsluizen uit maatregelpakket 2 (zonder wijziging overgenomen uit Oerlemans et al., 2024).

Locatie / onderdeel	Basis	Pakket 2:
Maeslantkering kerende hoogte	NAP+5 m	NAP+999 m
Faalkans Maeslantkering	1/100 per sluitvraag	1/5.000 per sluitvraag
Europoortkering I – overlaat 1	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Europoortkering II – overlaat 2	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Hartelkering hoogte	NAP+3.0 m	NAP+3.0 m + opgelegde zeespiegelstijging*
Faalkans Hartelkering	1/100 per sluitvraag	1/5.000 per sluitvraag
Europoortkering II – overlaat 1	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Europoortkering II – overlaat 2	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Botlek overlaat	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Petroleumhaven overlaat	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Haringvlietsluizen	NAP+5,0 m	NAP+999 m

Tabel 13: Dimensies maatregelen gemalen bij de Europoortkering en Haringvlietdam uit maatregelpakket 3 (zonder wijziging overgenomen uit Oerlemans et al., 2024).

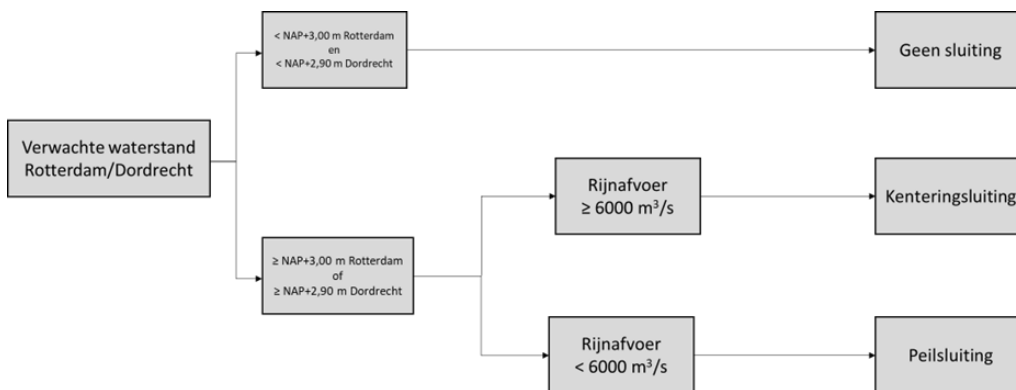
Locatie / Onderdeel	Basis	Pakket 3:
Gemaalcapaciteit Europoortkering I	geen	3.000 m ³ /s
Breedte gemalen Europoortkering I	geen	n.t.b.
Aanslagpeil Rak Noord van gemalen Europoortkering I	n.v.t.	inzetpeil waterberging 0,35m lager dan in basissituatie
Gemaalcapaciteit Haringvlietdam	geen	7.000 m ³ /s
Breedte gemalen Haringvlietdam	geen	n.t.b.
Aanslagpeil Rak Noord van gemalen Haringvlietdam	n.v.t.	inzetpeil waterberging 0,35m lager dan in basissituatie

B.6 Instellingen stormvloedkeringen

In de analyse bepalen we de hydraulische belastingen voor de dijken voor verschillende maten van zeespiegelstijging - gekoppeld aan rivierafvoeren - middels tijdlijnen. Een tijdlijn beschrijft, vergelijkbaar met een KNMI scenario, de mate van zeespiegelstijging afgezet tegen de tijd, maar bevat ook informatie over het sluitpeil van de stormvloedkeringen, en het inzetpeil van de waterberging. Deze informatie is in tekst hieronder opgeschreven.

B.6.1 Huidige sluitstrategie SVK Europoortkering

De Europoortkering, bestaande uit de Maeslantkering en de Hartelkering, dient te sluiten wanneer de voorspelde waterstand bij Rotterdam of Dordrecht hoger is dan respectievelijk NAP+3,0 m en NAP+2,9 m. Het moment van de sluiting (het sluitmoment) hangt vervolgens af van de rivierafvoer van de Rijn bij Lobith en lokale condities ter hoogte van de Maeslant- en Hartelkering. Is de Rijnaflower 6.000 m³/s of hoger, dan sluit de EPK op kentering, zo niet, dan sluit deze op peil (Figuur 25). Beide type sluitingen hebben een ander criterium om het sluitmoment te bepalen. Voor een uitgebreide beschrijving van deze sluitingen wordt verwezen naar (Honingh et al., 2022).

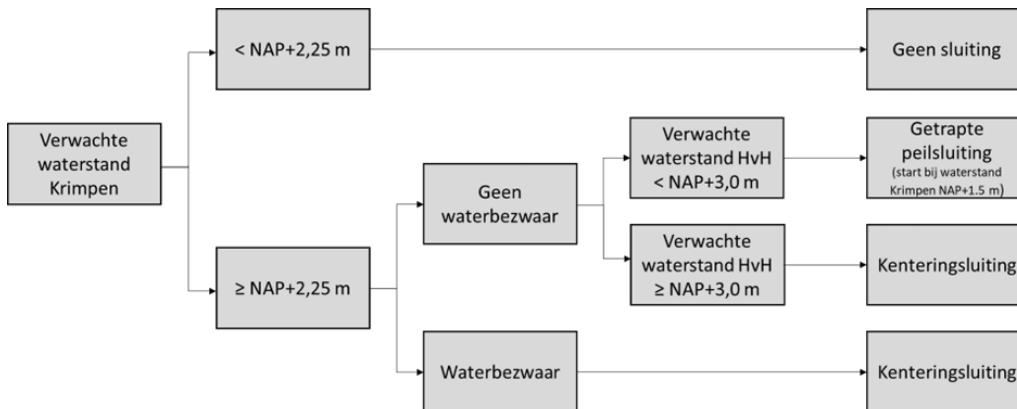


Figuur 25: Beslisboom sluitstrategie Europoortkering.

B.6.2 Huidige sluitstrategie SVK Hollandse IJssel

Figuur 26 geeft de beslisboom voor de sluiting van de SVK-HIJ zoals deze is gehanteerd in de uitgevoerde analyse. De kering sluit wanneer de verwachte waterstand bij Krimpen groter of gelijk is aan NAP+2,25 m. In geval van waterbezwaar, of wanneer de verwachte waterstand bij Hoek van Holland groter of gelijk is aan NAP+3,0 m, sluit de Hollandsche IJsselkering op kentering. In de overige gevallen sluit de kering op peil. De peilsluiting wordt ingezet wanneer in aanloop naar de voorspelde overschrijding van NAP+2,25 m, een waterstand van NAP+1,5 m wordt bereikt ter plaatse van de SVK-HIJ (getrapte peilsluiting). Deze marge dient ervoor dat de kering gesloten is wanneer de waterstand bij Krimpen gelijk is aan NAP+2,25 m. In voorliggende studie hanteren we strikt het draaiboek (RWS-ZH, 2005)¹² en sluit de kering op basis van de waterstand bij Krimpen aan de IJssel.

¹² Inmiddels is er een nieuw draaiboek maar in KP ZSS wordt dit niet gehanteerd. In het nieuwe protocol wordt altijd op kentering gesloten, dit is echter niet mogelijk zonder het model te herzien.



Figuur 26: Beslisboom sluitstrategie SVK-HIJ – figuur aangepast t.o.v. Rongen en Maaskant (2019) o.b.v. afstemming met R. Vos (RWS) en S. de Goederen (RWS).

B.6.3 Sluit- en inzetpeilen kunstwerken

Afhankelijk van het niveau van de zeespiegelstijging zijn de sluitpeilen van de stormvloedkeringen in het gebied aangepast.

Europoortkering

Voor de referentiesituatie (0,08 m zeespiegelstijging t.o.v. 1995), voor 0,5 m en 1,0 m zeespiegelstijging t.o.v. 1995 hanteren we geen verandering van de sluitpeilen. Om de sluitfrequenties bij 2 en 3 m zeespiegelstijging te beperken, zijn de sluitpeilen aangepast conform (Rijkswaterstaat, 2021a). Deze komen respectievelijk overeen met een verhoging van het peil met 1,25 m bij 2,0 m zeespiegelstijging en een verhoging van 2,5 m bij 3,0 m zeespiegelstijging. Deze verhoging hanteren we ook voor het sluitpeil van de SVK-HIJ en het inzetpeil van de waterberging (in de referentie NAP+2,6 m te Rak Noord). Daarmee volgen we de uitgangspunten van KP ZSS Pilot RMM (Oerlemans et al., 2022). Bij de inzet van de 'extra' waterberging van de Grevelingen in pakket 1 wordt het inzetpeil niet aangepast t.o.v. de basissituatie. Ook de sluitpeilen blijven ondanks een verbetering van de EPK in Pakket 2 ongewijzigd. Het aanslagpeil van de gemalen in pakket 3 ligt 0,35 m onder het inzetpeil van de waterberging.

Tabel 14: Overzicht van sluit- en keerpeilen van de Europoortkering.

zeespiegelstijging [m]	Sluitpeil Rotterdam [m+NAP]	Sluitpeil Dordrecht [m+NAP]	Toename sluitpeil [m]	Keerpeil EPK [m+NAP]
0,08	3,00	2,90	n.v.t.	2,00
0,50	3,00	2,90	0,00	2,00
1,00	3,00	2,90	0,00	2,00
2,00	4,25	4,15	1,25	3,25
3,00	5,50	5,40	2,50	4,50

Het keerpeil dat wordt gehanteerd voor het sluiten van de EPK. In het geval van een peilsluiting neemt met dezelfde waarden toe als de sluitpeilen voor Rotterdam en

Dordrecht. De conditie voor het debiet voor de kenteringsluiting van de EPK ($Q_{\text{Lobith}} \geq 6000 \text{ m}^3/\text{s}$) verandert niet.

Stormvloedkering Hollandsche IJssel

We hanteren op verzoek van Rijkswaterstaat dezelfde verhogingen voor de sluitpeilen voor de HIJK als in Oerlemans et al. (2022) en komen overeen met de wijziging van de sluitstrategie van de EPK. Het keerpeil voor het sluiten van de HIJK in het geval van een peilsluiting neemt met dezelfde waarden toe. De conditie voor de kenteringsluiting van de HIJK (waterstand HvH $\geq 3 \text{ m+NAP}$) wijzigt op dezelfde wijze alleen bij zeespiegelstijging 2 en 3 m.

Tabel 15: Overzicht van sluitpeilen van de Hollandsche IJsselkering.

Zeespiegelstijging [m]	Sluitpeil Krimpen a/d IJssel [m+NAP]	Toename sluitpeil [m]
0	2,25	n.v.t.
0,5	2,25	0,00
1	2,25	0,00
2	3,50	1,25
3	4,75	2,50

Volkeraksluizen

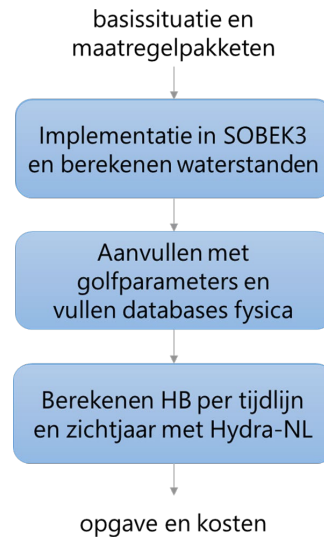
We hanteren conform Oerlemans et al. (2022) de volgende verhogingen voor het inzetpeil bij Rak Noord voor de waterberging. Bij de inzet van extra berging op de Grevelingen of de Oosterschelde is in de analyse niet afgeweken van deze instellingen. De waterberging is bedoeld om de waterstand op het Haringvliet/Hollandsch Diep onder het inzetpeil te houden. De berging wordt ingezet als dit peil in de voorspelling (zonder inzet) wordt overschreden. De Volkeraksluizen worden geopend op het moment dat de Maeslantkering is afgezonken bij een lagere waterstand op het Haringvliet (waardoor overschrijding van het inzetpeil wordt voorkomen).

Tabel 16: Overzicht van het inzetpeil voor de waterberging

Zeespiegelstijging [m]	Inzetpeil VZM Rak Noord [m+NAP]	Toename [m]
0	2,60	n.v.t.
0,5	2,60	0
1	2,60	0
2	3,85	1,25
3	5,10	2,50

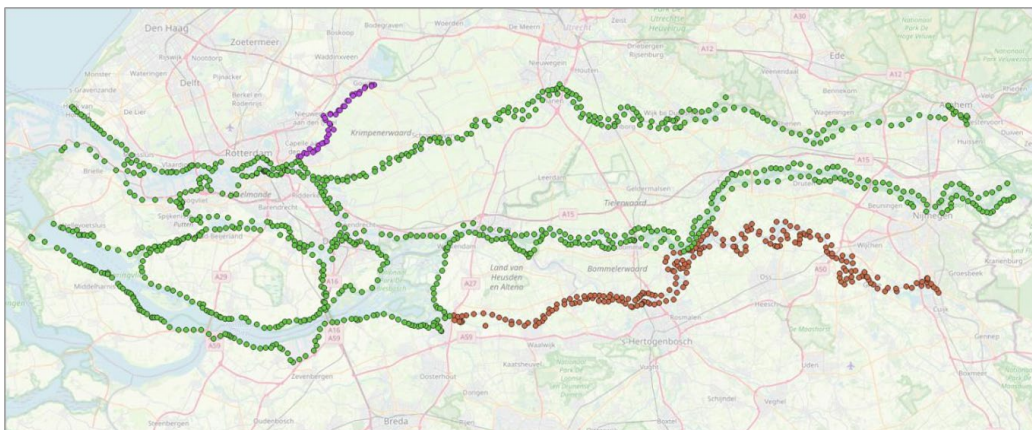
Bijlage C Resultaat maatregelpakketten

In deze bijlage beschrijven we de berekende hydraulische belastingen van de onderzochte maatregelpakketten. Voor berekening van de hydraulische belastingen, de opgave en de kosten sluiten we zoveel mogelijk aan bij de aanpak van de eerste fase (Zethof et al., 2023). Per maatregelpakket wordt het hier links getoonde stroomschema doorlopen. De hydraulische berekeningen met SOBEK3 en het vullen van de databases fysica wijken alleen (noodgedwongen) af van de eerste fase (Kuijper en Van der Vegt (2024)). Daarom is ook de basissituatie (zonder maatregelen) opnieuw berekend met Hydra-NL. De databases van de basissituatie zijn overgenomen van (Kuijper en Van der Vegt (2024)).



In totaal is 3x de waterstand bepaald met SOBEK3 voor een set van 5 zeespiegelstijgingen {0,08; 0,5; 1,0; 2,0 en 3,0} voor maatregelpakket 1, 2 en 3, waarbij per zeespiegelstijging 10.812 belastingcombinaties (Tabel 6 en Tabel 7) met SOBEK3 zijn doorgerekend. In totaal zijn $3 \times 5 \times 10.812 = 162.180$ SOBEK3 berekeningen gemaakt. Het resultaat is per set weggeschreven naar 5 type databases (per zeespiegelstijging). Daarnaast zijn controlefiguren gemaakt van SOBEK3 resultaten en de inhoud van de databases fysica.

In totaal is 5x de waterstand en het hydraulisch belastingniveau bepaald met Hydra-NL voor een set van 17 combinaties van tijdlijn en zichtjaar {referentie en 4 tijdlijnen in 2050, 2100, 2150 en 2200} voor de basissituatie van Zethof et al. (2023), de basissituatie van Kuijper en Van der Vegt, de maatregelpakketten 1, 2 en 3. Per combinatie is de waterstand en het hydraulisch belastingniveau bij 1118 locaties berekend (Figuur 27). In totaal zijn $5 \times 17 \times 2 \times 1118 = 190.060$ Hydra-NL berekeningen gemaakt. Het resultaat is per set weggeschreven naar figuren en tabellen. De basissituatie van Zethof et al. (2023) is opnieuw berekend (reproductie), zodat vastgesteld kan dat de Hydra-NL berekeningen op dezelfde wijze worden uitgevoerd ter voorkoming van procedure fouten.



Figuur 27: Overzicht locaties berekend met Hydra-NL: paars = 40 langs HIJ, bruin = 216 langs Benedenmaas en groen = 862 langs Benedenrijn.

Monitoring voortgang en controle scripts

De invoer van alle SOBEK3 berekeningen is gegenereerd met de SGWM (sommen-generator) en daarnaast wordt ook de voortgang en de controle van de uitvoer met de SGWM gemonitord. In Figuur 28 staat een overzicht de berekening van pakket 1 voor zeespiegelstijging 0 m. De inhoud van de invoer is automatisch (met een script) gecontroleerd op: de hoogte van de zeespiegelstijging, de hoogte van de stormopzet, de waarde van de windsnelheid en -richting, de waarde van afvoeren op de Maas, de Waal en de Neder-Rijn. De uitvoer is automatisch gecontroleerd op de log van SOBEK3 en de volledigheid (aantal bestanden) van de uitvoermappen. Als de controle succesvol is, krijgt de berekening het label 'simulatie gereed'.

Naam	Modi Europortkering	Modi Holl. Disselkering	Zeewaterstand HvH	Afvoer Lobth	Windsnelheid Schiphol	Windrichting Schiphol	Status WC
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U10D225.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	10	225.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U10D247.5	CFm	CFo	p1.xx	00600	10	247.5	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U10D270.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	10	270.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U10D292.5	CFm	CFo	p1.xx	00600	10	292.5	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U10D315.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	10	315.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U10D337.5	CFm	CFo	p1.xx	00600	10	337.5	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U10D360.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	10	360.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U2D225.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	22	225.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U2D247.5	CFm	CFo	p1.xx	00600	22	247.5	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U2D270.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	22	270.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U2D292.5	CFm	CFo	p1.xx	00600	22	292.5	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U2D315.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	22	315.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U2D337.5	CFm	CFo	p1.xx	00600	22	337.5	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U2D360.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	22	360.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U3D225.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	32	225.0	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U3D247.5	CFm	CFo	p1.xx	00600	32	247.5	simulatie
K1CFmK2CFoZp1.xxQ00600U3D270.0	CFm	CFo	p1.xx	00600	32	270.0	simulatie

Figuur 28: Overzicht van voortgang uitvoeren SOBEK3 berekeningen in menu van SGWM.

De invoer van alle Hydra-NL berekeningen is gegenereerd met de SGWM (sommen-generator) en daarnaast wordt ook de voortgang en de controle van de uitvoer met de SGWM gemonitord (Figuur 29).

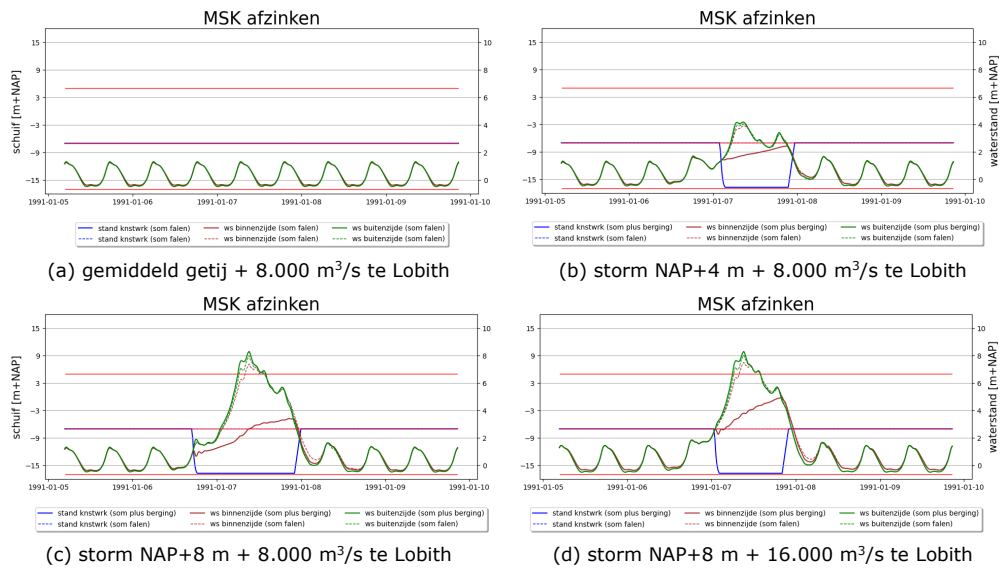
Naam	Berekening	Vakid	Type berekening	Status WGWM	Datum WGWM
21002018_t0_2023_WS	t0_2023	21002018	WS	som gereed	23-04-2024 15:11:00
21002018_t0_2023_HBN_5	t0_2023	21002018	HBN_5	som gereed	23-04-2024 15:11:46
21002019_t0_2023_WS	t0_2023	21002019	WS	som gereed	23-04-2024 15:12:26
21002019_t0_2023_HBN_5	t0_2023	21002019	HBN_5	som gereed	23-04-2024 15:13:28
21002034_t0_2023_WS	t0_2023	21002034	WS	som gereed	23-04-2024 15:14:21
21002034_t0_2023_HBN_5	t0_2023	21002034	HBN_5	som gereed	23-04-2024 15:15:27
21002017_t0_2023_WS	t0_2023	21002017	WS	som gereed	23-04-2024 15:16:22
21002017_t0_2023_HBN_5	t0_2023	21002017	HBN_5	som gereed	23-04-2024 15:17:18
21002032_t0_2023_WS	t0_2023	21002032	WS	som gereed	23-04-2024 15:18:13
21002032_t0_2023_HBN_5	t0_2023	21002032	HBN_5	som gereed	23-04-2024 15:19:11
21002035_t0_2023_WS	t0_2023	21002035	WS	som gereed	23-04-2024 15:20:03
21002035_t0_2023_HBN_5	t0_2023	21002035	HBN_5	som gereed	23-04-2024 15:21:04
21002032_t0_2023_WS	t0_2023	21002032	WS	som gereed	23-04-2024 15:22:11
21002032_t0_2023_HBN_5	t0_2023	21002032	HBN_5	som gereed	23-04-2024 15:23:10
210020331_t0_2023_WS	t0_2023	210020331	WS	som gereed	23-04-2024 15:24:02

Figuur 29: Overzicht van voortgang uitvoeren Hydra-NL berekeningen in menu van SGWM.

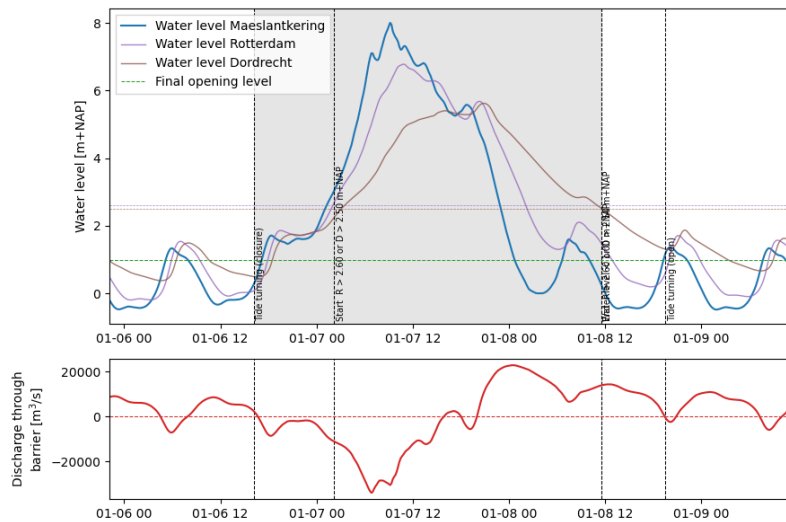
De inhoud van de Hydra-NL invoer is automatisch (met een script) gecontroleerd op: het berekeningstype, de database, de locatie, het bestand van het dijkprofiel, de waarde van de zeespiegelstijging, de statistiek van rivierafvoer en de numerieke instellingen van de berekening. De uitvoer is automatisch gecontroleerd op de log van Hydra-NL en de volledigheid (aantal bestanden) van de uitvoermappen. Als de controle succesvol is, krijgt de berekening het label 'simulatie gereed'.

Monitoring resultaat en controle figuren

Het tijdverloop van de stand van het kunstwerk (schuif, deur of pomp), de beneden- en de bovenstroomse waterstand wordt (automatisch) aangemaakt van alle (belangrijke) kunstwerken in de Rijn-Maasmond: Maeslantkering, Hartelkering, Haringvlietsluizen, Volkeraksluizen en Stormvloedkering Hollandsche IJssel. In Figuur 30 is hiervan een voorbeeld gegeven.



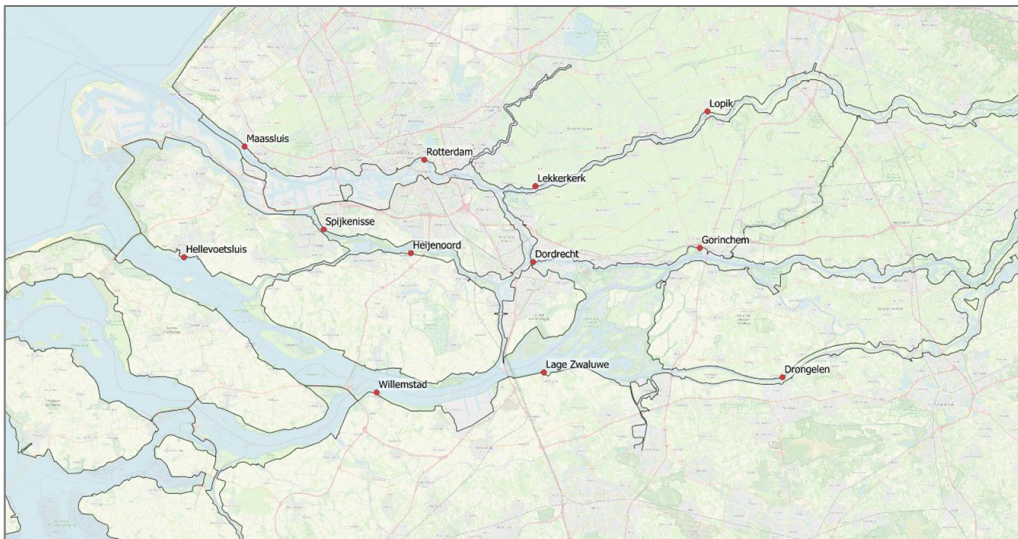
Figuur 30: Voorbeeld van het SOBEK3 tijdverloop van de stand van de Maeslantkering en de waterstand beneden- en bovenstrooms voor gemiddeld getij, zeewaterstand NAP+4 m en +8 m te Hoek van Holland i.c.m. rivierafvoer 8.000 en 16.000 m³/s (en nauwelijks wind).



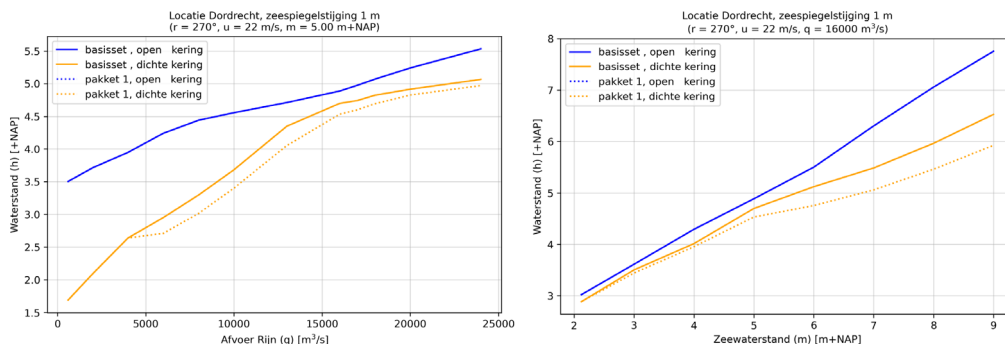
Figuur 31: Voorbeeld van de verwachting van het overschrijden van het sluitpeil te Rotterdam en Dordrecht bij storm NAP+8 m en rivierafvoer 8.000 m³/s (uitvoer SOBEK3 MF-keringscript).

In Figuur 31 staat een voorbeeld van de verwachting van het overschrijden van het sluitpeil te Rotterdam en Dordrecht. Deze figuur wordt aangemaakt door het MF-keringenscript (zie HKV, 2022a), zodat gecontroleerd kan worden of de EPK terecht wordt gesloten en of het moment van sluiten correct is. Vergelijkbare figuren zijn beschikbaar voor de verwachte overschrijding van het inzetpeil van de waterberging VZM en de verwachte overschrijding van het sluitpeil van de SVK-HIJ.

In Figuur 32 is een overzicht gegeven van de 13 controle locaties die gebruikt worden om de SOBEK3 en de Hydra-NL resultaten te controleren. In Figuur 33 staat een voorbeeld van een doorsnede van de database fysica (zeespiegelstijging +1 m). Links in de figuur worden lokale waterstanden te Dordrecht getoond van een doorsnede bij zeewaterstand NAP+5 m, windrichting west (270°) en windsnelheid 22 m/s. Rechts in de figuur worden lokale waterstanden te Dordrecht getoond van een doorsnede bij rivierafvoer 16.000 m³/s (en zelfde wind). Met deze figuren kan het hydraulisch effect van de maatregelen worden weergegeven. Getoond worden de maximale waterstanden berekend te Dordrecht in de betreffende belastingcombinaties (Tabel 6 en Tabel 7). Links wordt de maximale waterstand bij verschillende zeewaterstanden getoond en rechts bij verschillende rivierafvoeren. Omdat de maatregelen geen effect hebben als de EPK niet sluit, liggen de blauwe lijnen in deze doorsnede figuren op elkaar. Het effect van de maatregelen wordt getoond door het verschil tussen de oranje lijnen.

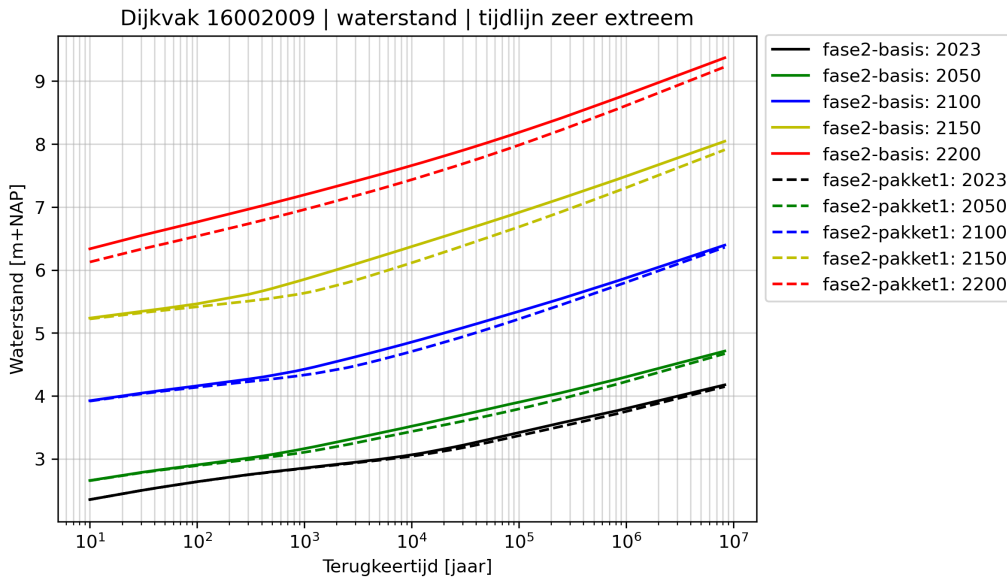


Figuur 32: Overzicht van 13 controle locaties.

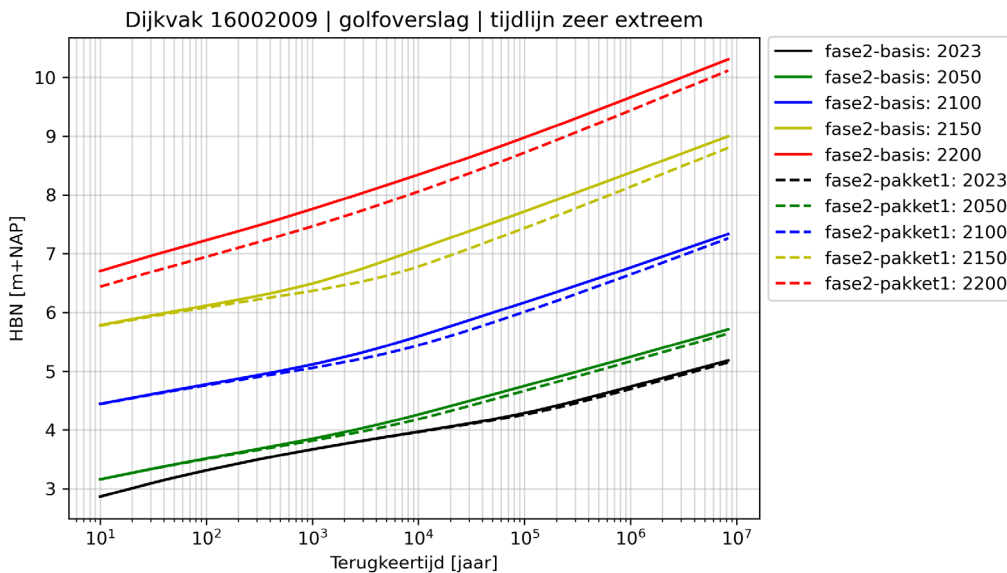


Figuur 33: Voorbeeld van vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie en maatregelen met doorsnedes van de inhoud van de databases: links doorsnede op basis van zeewaterstand en rechts doorsnede op basis van rivierafvoer.

In Figuur 34 en Figuur 35 wordt voor waterstand en hydraulisch belastingniveau, de berekende terugkeertijd voor tijdlijn Zeer extreem getoond. In de figuren is met kleuren de verschillende zichtjaren van de tijdlijn, zodat de ontwikkeling in de tijd kan worden beschouwd. Met het type lijn is aangegeven of het een resultaat van de basissituatie of een maatregelpakket betreft.



Figuur 34: Voorbeeld van vergelijking waterstand (Hydra-NL) van basissituatie en maatregelen pakket 1 van de waterstand te Dordrecht in tijdlijn Zeer extreem.



Figuur 35: Voorbeeld van vergelijking waterstand (Hydra-NL) van basissituatie en maatregelen pakket 1 van het hydraulisch belastingniveau te Dordrecht in tijdlijn Zeer extreem.

In Figuur 36 en Figuur 37 wordt voor het verschil in waterstand en hydraulisch belastingniveau tussen de basissituatie en maatregelen pakket 1 getoond voor terugkeertijd 10.000 jaar, zichtjaar 2100 en tijdlijn Laag. In de figuren is met kleuren het verschil in waterstand en hydraulisch belasting niveau te zien, zodat ruimtelijk het effect van de maatregelen kan worden beschouwd. Met een rode kleur wordt een eventuele verhoging door de maatregelen getoond, met een groene kleur een kleine verlaging, met blauw een grote verlaging en met paars een erg grote verlaging. Met de kleur grijs wordt getoond op welke locaties de maatregelen geen effect hebben bij de betreffende combinatie van tijdlijn, zichtjaar en herhalingsstijd.



Figuur 36: Voorbeeld van geografisch overzicht van het verschil in waterstand (Hydra-NL) tussen basissituatie en maatregelen pakket 1 voor alle berekende locaties in tijdlijn Laag.



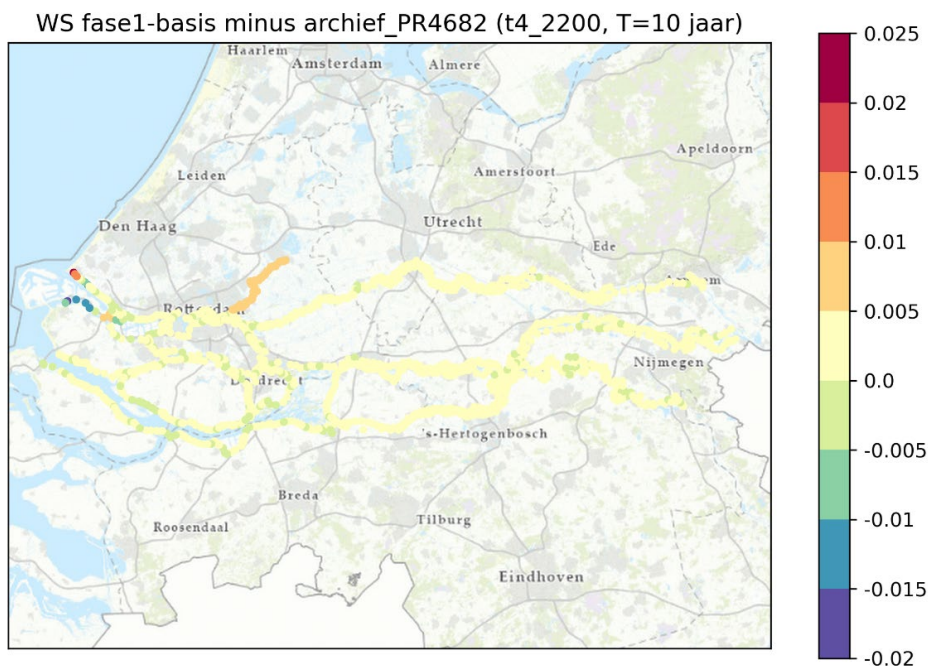
Figuur 37: Voorbeeld van geografisch overzicht van het verschil in hydraulisch belastingniveau (Hydra-NL) tussen basissituatie en maatregelen pakket 1 voor alle berekende locaties in tijdlijn Laag.

C.1 Resultaat reproductie 'oude' basissituatie

Als eerste is de reproductie van de resultaten van Zethof et al. (2023) getoetst. In principe is de invoer van de reproductie volledig gelijk aan de eerder gemaakte berekeningen. Net als in Zethof et al. (2023) zijn de databases met resultaten van de hydraulische berekeningen overgenomen uit HKV (2022c) Om de rekensnelheid en het geheugengebruik te verbeteren is het numeriek rekenrooster van de Hydra-NL berekening aangepast:

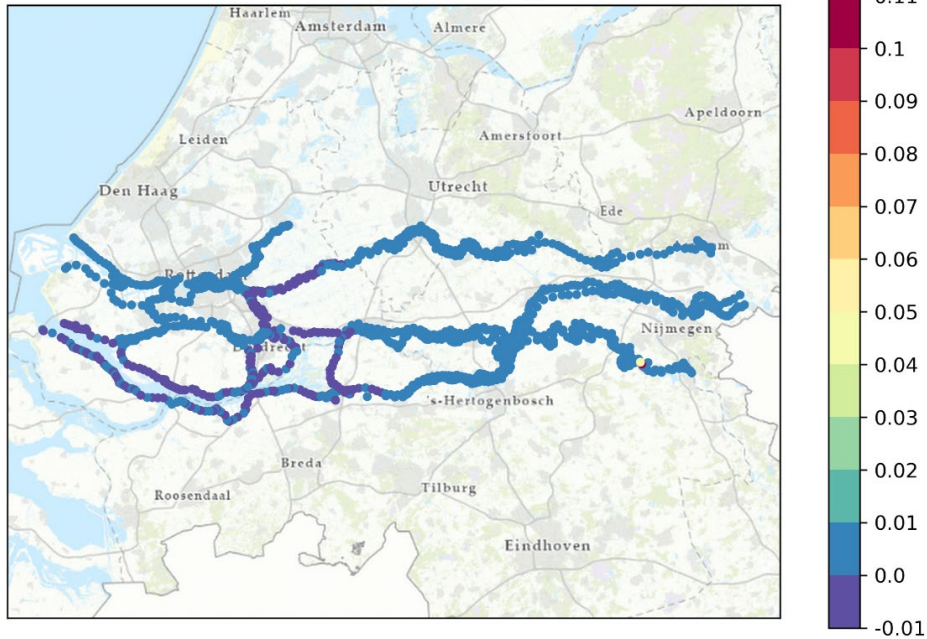
- De minimale zeewaterstand wordt nu net als (ook eerder) de maximale zeewaterstand aangepast aan de zeespiegelstijging van de berekening.
- Het rooster van de rivierafvoer en de zeewaterstand op de HIJ is iets grover gekozen.
- Als laatste is ook het rooster van de rivierafvoer op de Benedenrijn nabij Keizersveer (nabij Benedenmaas) iets grover.

Deze aanpassingen leiden tot zeer kleine verschillen. In tijdlijn Zeer Extreem en zichtjaar 2200 hebben de aanpassingen het meest effect op de berekening van de waterstand bij herhalingstijd 10 jaar (Figuur 38) en op de berekening van het hydraulisch belastingniveau bij herhalingstijd 1000 jaar (Figuur 39). De verschillen voor de waterstandberekening zijn vrijwel overal kleiner dan 0,01 m. Er zitten een paar uitzonderingen in de resultaten, daar is het verschil iets meer dan 0,02 m. In de berekening van het hydraulisch belastingniveau zitten twee uitschieters met een verschil tot iets meer dan 0,1 m. Dit wordt veroorzaakt door eigenschappen van het dijkprofiel op deze locaties. Zonder deze locaties is het verschil in hydraulisch belastingniveau (over alle tijdlijnen, zichtjaren en herhalingstijden) maximaal 0,02 m. Het nieuwe, grovere numerieke rooster is daarmee inderdaad nauwkeurig genoeg.



Figuur 38: Verschil in waterstand T10 jaar tussen reproductie en probabilistisch resultaat Zethof et al. (2023) voor tijdlijn Zeer Extreem en zichtjaar 2200.

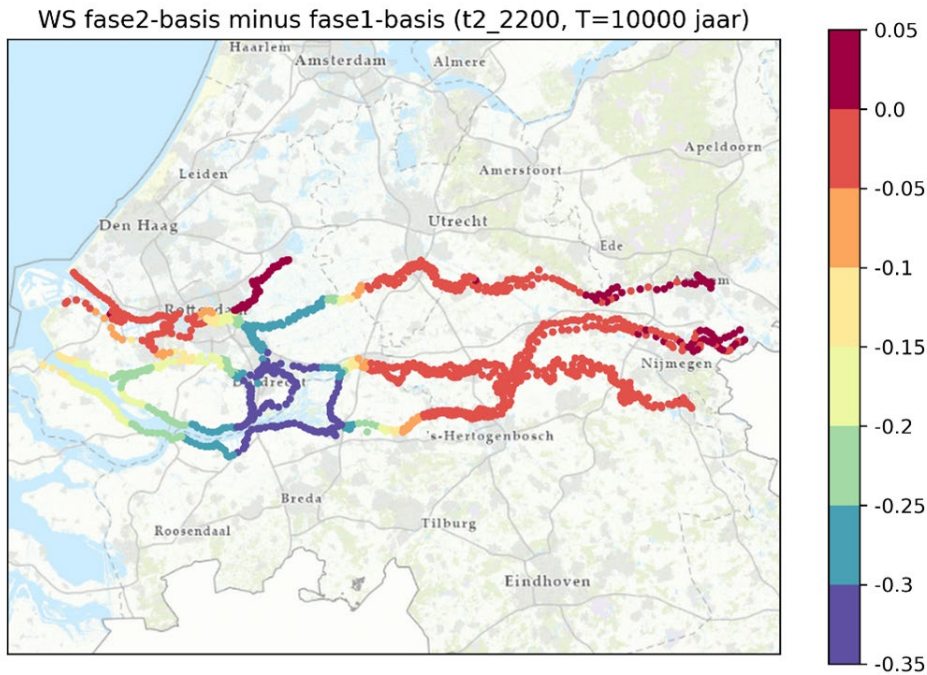
HBN fase1-basis minus archief_PR4682 (t4_2100, T=1000 jaar)



Figuur 39: Verschil in hydraulische belastingniveau T1.000 jaar tussen reproductie en probabilistisch resultaat Zethof et al. (2023) voor tijdlijn Zeer Extreem en zichtjaar 2200.

C.2 Resultaat 'nieuwe' basissituatie

De invoer van de berekende basissituatie is volledig gelijk aan de reproductie berekeningen. Voor de locaties langs Benedenrijn en Benedenmaas (Figuur 27) zijn andere databases met resultaten van de hydraulische berekeningen gebruikt, namelijk die van Kuijper en Van de Vegt (2023). Voor de berekening van de Hollandsche IJssel waren databases van deze hydraulische berekeningen (HKV, 2022a) eerder ook al gebruikt. In de hydraulische berekeningen van de oude database was een verkeerd windverloop gehanteerd. Daarnaast functioneerde het keringenscript niet optimaal: de EPK sloot soms niet, soms werd de waterberging op het VZM niet ingezet. Bij het wegschrijven van de hydraulische resultaten naar de databases was geen droogvalcorrectie toegepast. Door deze verschillen worden in de berekeningen van de 'nieuwe' basissituatie lagere hydraulische belastingen berekend. Deze verschillen komen overeen met de resultaten die eerder zijn gerapporteerd in Kuijper en Van de Vegt (2023). Ter indicatie zijn in Figuur 40 en Figuur 41 de verschillen in de berekening van de waterstand en het hydraulisch belastingniveau voor tijdlijn Gematigd en zichtjaar 2200 getoond.



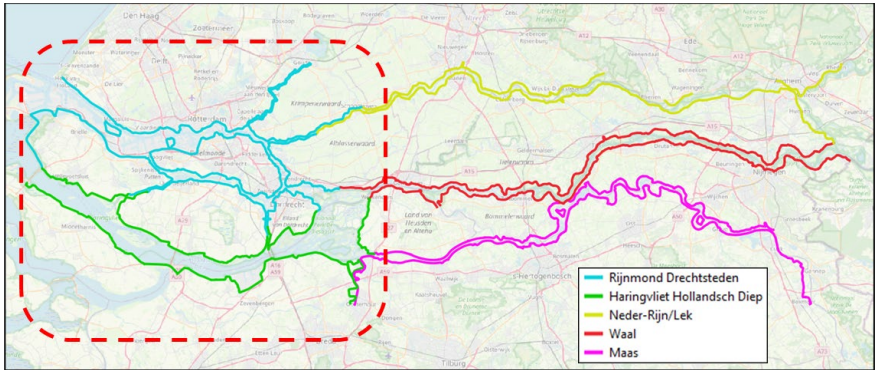
Figuur 40: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen 'nieuwe' basissituatie en reproductie Zethof et al. (2023) voor tijdlijn Gematigd en zichtjaar 2200.



Figuur 41: Verschil in hydraulische belastingniveau T10.000 jaar tussen 'nieuwe' basissituatie en reproductie Zethof et al. (2023) voor tijdlijn Gematigd en zichtjaar 2200.

In Tabel 18 is het Hydra-NL resultaat van de berekening van de 'nieuwe' basissituatie samengevat. Dezelfde indeling (Figuur 42) als in de kostenberekening wordt hierbij gehanteerd. Per deelgebied is de gemiddelde waterstand in m+NAP en het verschil met de referentie in meters berekend. De donker grijs gekleurde kolom

geeft per deelgebied de gemiddelde waterstandverhoging a.g.v. de klimaatontwikkeling. De negatieve waarden in deze kolom worden veroorzaakt door aanpassing van de afvoerverdeling over de Rijntakken (zie bijlage A.5).



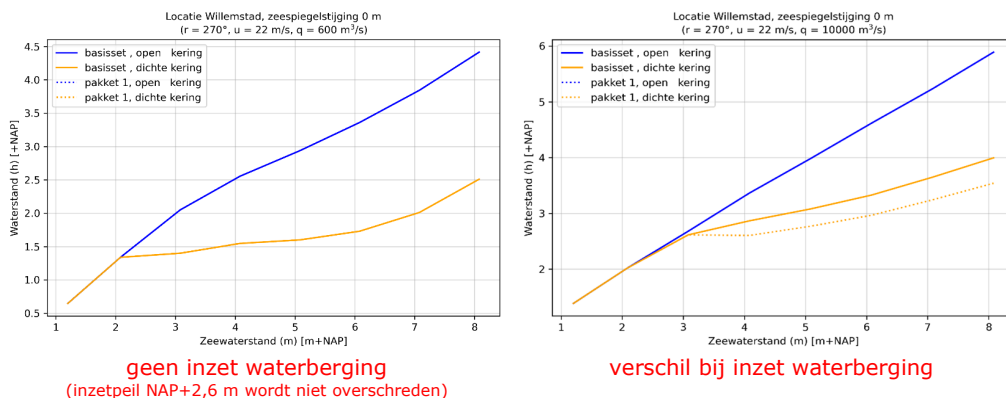
Figuur 42: Opdeling studiegebied in 4 delen.

Tabel 17: Overzicht van resultaat basissituatie: verschil met referentie in waterstand (T100, T1000 en T10000) als gemiddelde per deelgebied RDST, HVHD, Maas, Waal en NRLK.

Tijdlijn	Herh. tijd (jaar)	Rijnmond-Drechtst.		Haringvliet - Hol. Diep		Maas		Waal		Neder Rijn - Lek		
		basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	
referentie	100	2.9	0.0	2.4	0.0	6.9	0.0	9.4	0.0	7.5	0.0	
	2023	1000	3.1	0.0	2.6	0.0	7.5	0.0	10.0	0.0	8.0	0.0
	10000	3.3	0.0	2.8	0.0	8.0	0.0	10.5	0.0	8.4	0.0	
Laag	2050	100	2.9	0.1	2.4	0.1	7.0	0.1	9.6	0.2	7.7	0.2
		1000	3.1	0.1	2.7	0.1	7.6	0.1	10.2	0.2	8.2	0.1
		10000	3.5	0.1	2.9	0.1	8.2	0.2	10.7	0.2	8.6	0.2
	2100	100	3.0	0.2	2.6	0.2	7.1	0.2	9.8	0.5	7.5	-0.1
		1000	3.3	0.2	2.8	0.3	7.7	0.1	10.4	0.4	7.8	-0.2
		10000	3.7	0.3	3.2	0.4	8.2	0.2	10.9	0.4	8.2	-0.2
	2150	100	3.1	0.3	2.7	0.3	7.1	0.2	9.8	0.5	7.5	-0.1
		1000	3.4	0.3	3.0	0.4	7.7	0.2	10.4	0.4	7.8	-0.2
		10000	3.8	0.5	3.3	0.5	8.2	0.2	10.9	0.4	8.2	-0.2
	2200	100	3.2	0.4	2.9	0.5	7.1	0.2	9.9	0.5	7.5	0.0
		1000	3.6	0.6	3.3	0.7	7.7	0.2	10.4	0.4	7.8	-0.2
		10000	4.1	0.7	3.6	0.8	8.3	0.3	10.9	0.4	8.3	-0.2
Gematigd	2050	100	2.9	0.1	2.4	0.1	7.0	0.1	9.6	0.2	7.7	0.2
		1000	3.1	0.1	2.7	0.1	7.6	0.1	10.2	0.2	8.2	0.1
		10000	3.5	0.1	2.9	0.1	8.2	0.2	10.7	0.2	8.6	0.2
	2100	100	3.1	0.3	2.7	0.3	7.2	0.3	10.0	0.6	7.5	0.0
		1000	3.4	0.3	3.0	0.4	7.7	0.2	10.6	0.6	7.9	-0.2
		10000	3.8	0.5	3.4	0.6	8.4	0.4	11.0	0.5	8.3	-0.1
	2150	100	3.4	0.6	3.1	0.7	7.3	0.4	10.0	0.7	7.6	0.1
		1000	3.8	0.8	3.5	0.9	7.8	0.3	10.6	0.6	8.0	-0.1
		10000	4.3	1.0	3.8	1.0	8.5	0.5	11.1	0.6	8.4	0.0
	2200	100	4.3	1.5	3.9	1.5	7.5	0.5	10.2	0.8	7.8	0.3
		1000	4.5	1.5	4.2	1.6	8.0	0.5	10.7	0.7	8.1	0.1
		10000	5.0	1.7	4.6	1.8	8.6	0.6	11.2	0.7	8.6	0.2
Extreem	2050	100	3.0	0.1	2.5	0.1	7.3	0.3	9.9	0.5	7.9	0.4
		1000	3.2	0.1	2.7	0.1	7.9	0.4	10.5	0.5	8.4	0.4
		10000	3.5	0.2	3.0	0.2	8.6	0.6	11.0	0.5	8.9	0.4
	2100	100	3.4	0.5	3.1	0.7	7.6	0.7	10.6	1.2	7.9	0.4
		1000	3.8	0.7	3.5	0.9	8.4	0.9	11.2	1.2	8.5	0.5
		10000	4.2	0.9	3.9	1.1	9.4	1.4	11.7	1.2	9.1	0.7
	2150	100	4.3	1.4	3.9	1.6	7.9	1.0	10.9	1.5	8.3	0.8
		1000	4.5	1.5	4.2	1.6	8.8	1.3	11.5	1.5	8.9	0.9
		10000	5.0	1.7	4.7	1.8	9.8	1.8	11.9	1.4	9.4	1.0
	2200	100	5.5	2.7	5.2	2.8	8.3	1.4	11.3	1.9	8.8	1.2
		1000	5.8	2.7	5.4	2.9	9.3	1.8	11.8	1.8	9.4	1.3
		10000	6.2	2.9	5.9	3.1	10.3	2.4	12.2	1.7	9.8	1.3
Zeer Extreem	2050	100	3.1	0.2	2.6	0.3	7.3	0.4	10.1	0.7	7.6	0.1
		1000	3.3	0.2	2.9	0.3	7.9	0.4	10.7	0.7	8.0	0.0
		10000	3.7	0.4	3.3	0.5	8.6	0.7	11.2	0.7	8.5	0.1
	2100	100	4.3	1.5	4.0	1.6	7.8	0.9	10.7	1.4	8.1	0.6
		1000	4.6	1.5	4.3	1.7	8.6	1.1	11.3	1.3	8.7	0.7
		10000	5.1	1.7	4.7	1.9	9.5	1.5	11.8	1.2	9.2	0.8
	2150	100	5.7	2.8	5.3	2.9	8.3	1.4	11.1	1.8	8.6	1.1
		1000	6.0	2.9	5.7	3.1	9.1	1.6	11.7	1.7	9.2	1.2
		10000	6.6	3.2	6.2	3.4	10.1	2.1	12.2	1.7	9.7	1.3
	2200	100	7.0	4.1	6.6	4.2	8.9	1.9	11.6	2.3	9.2	1.7
		1000	7.5	4.4	7.0	4.4	9.8	2.2	12.2	2.2	9.8	1.8
		10000	8.0	4.6	7.5	4.7	10.7	2.7	12.6	2.0	10.2	1.8

C.3 Resultaat pakket 1: basissituatie + extra waterberging ZW-Delta

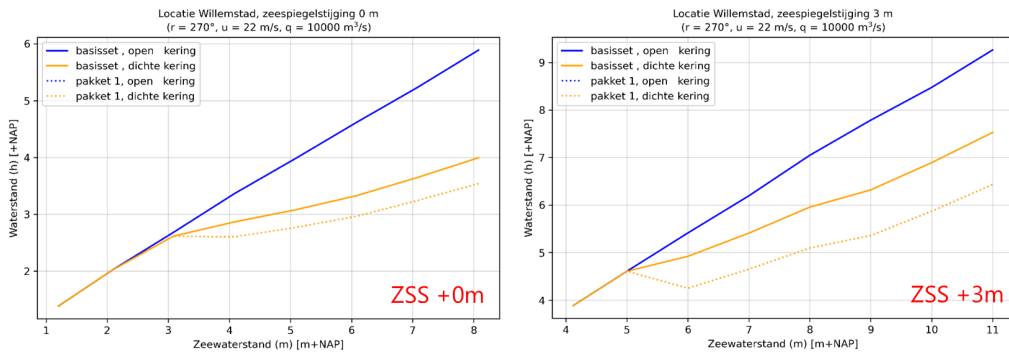
Het doel van maatregelpakket 1 is om met extra waterberging op het Grevelingen het gebied achter de Europoortkering en de Haringvlietdam beter te beschermen als bij een sluiting van de stormvloedkeringen de waterstand door een verhoogde rivierafvoer op loopt. In Figuur 43 (linker grafiek) is aangetoond dat als de waterberging (nog) niet wordt ingezet, er ook geen verschil berekend wordt tussen de waterstand in de basissituatie en de waterstand na realisatie van pakket 1. De berging is niet ingezet, doordat het inzetpeil niet wordt overschreden in de verwachting van de waterstand (zonder inzet). Als de berging wel wordt ingezet bij rivierafvoer 10.000 m³/s (rechter grafiek), daalt de waterstand na realisatie van pakket 1 met 0,1 tot 0,4 m bij respectievelijk NAP+3 m of NAP+8 m op zee te Hoek van Holland. Als de afvoer verder toeneemt neemt het verschil tussen de basissituatie en pakket 1 verder toe, totdat de rivierafvoer zo groot is (> 18.000 m³/s) dat de berging van VZM en Grevelingen ontoereikend is. Dan neemt het verschil weer af.



Figuur 43: Vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie en pakket 1 op locatie Willemstad: links doorsnede zonder inzet van de waterberging en rechts doorsnede met inzet van de waterberging (bij zeespiegelstijging +0 m).

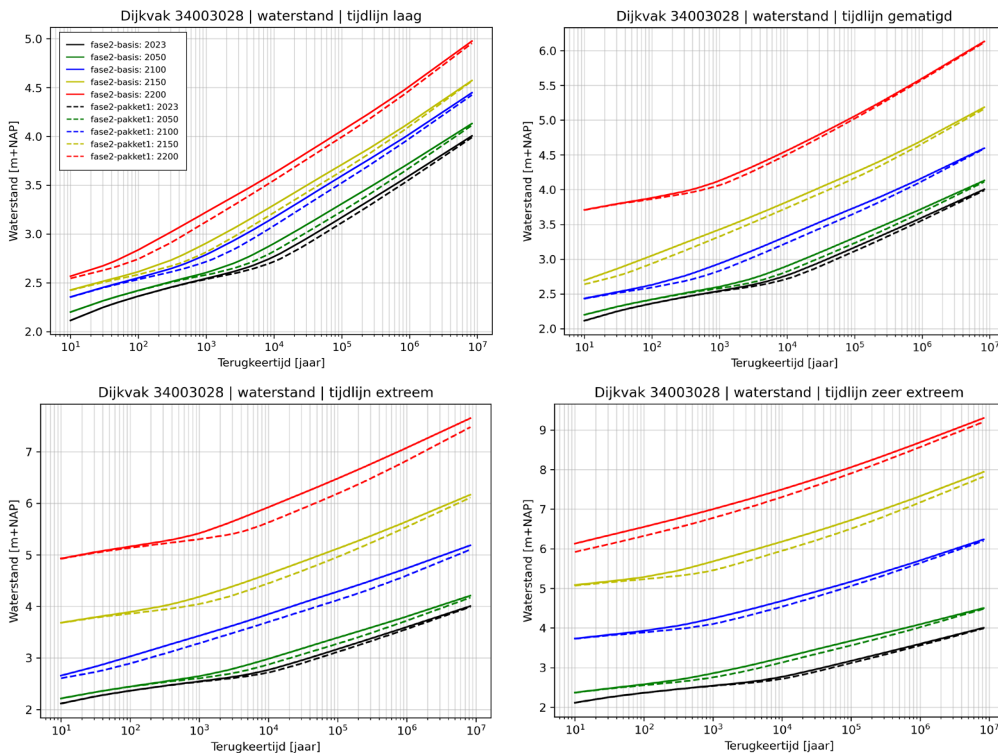
In Figuur 44 is te zien dat het effect van pakket 1 toeneemt als de zeespiegel stijgt, door de linker (zeespiegelstijging +0 m) met de rechter grafiek (+3 m) te vergelijken. Niet alleen de uitbreiding van het bergend oppervlak is hier van belang, ook het vergroten van de Volkeraksluizen en het handhaven van het streefpeil op beide meren (ondanks zeespiegelstijging) is hier van belang. Het stijgen van zeespiegel leidt tot een toename van de dagelijkse waterstand op het Haringvliet/Hollandsch Diep. Onveranderd peilbeheer zorgt ervoor dat de waterstand op de meren (voor en/of zonder inzet) gelijk blijft aan ongeveer NAP+0 m. Hierdoor neemt het verval over de Volkeraksluizen toe. Doordat de sluisen ook vergroot worden, is het mogelijk om een groter debiet naar de berging te laten stromen. Dit grotere debiet houdt langer aan, omdat het oppervlak van de berging met de Grevelingen is vergroot.

In bijlage B.6 is te zien dat tot zeespiegelstijging +1 m het sluitpeil van de EPK en het inzetpeil van de waterberging niet wordt aangepast. Bij zeespiegelstijging +2 en +3 m worden het sluit- en inzetpeil wel verhoogd, maar minder dan de zeespiegelstijging. Bij een kleinere stormopzet, een kleinere verhoging van de dagelijkse waterstand, zal de EPK worden gesloten en de waterberging worden ingezet. Gevolg is dat sluitfrequentie van de kering en de inzetfrequentie van de waterberging toenemen. De waterberging heeft bij inzet niet alleen een groter effect, maar wordt ook vaker ingezet.



Figuur 44: Vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie en pakket 1 op locatie Willemstad: links doorsnede met inzet van de waterberging bij zeespiegelstijging +0 m en rechts bij zeespiegelstijging +3 m.

In Figuur 45 wordt een overzicht getoond van het resultaat van alle waterstand-berekeningen met Hydra-NL voor locatie Willemstad. Linksboven (tijdlijn Laag) is in het verloop van de zwarte (zichtjaar 2023), groene (2050), blauwe (2100), beige (2150) en rode lijn (2200) goed te zien dat vanaf het inzetpeil (NAP+2,6 m) van de waterberging, een verschil in waterstand ontstaat tussen de basissituatie (doorgetrokken lijn) en de pakket 1 (onderbroken lijn). De terugkeertijd van overschrijden van dit peil verschuift van groter dan 1000 jaar in 2023 naar kleiner dan 10 jaar in 2200.

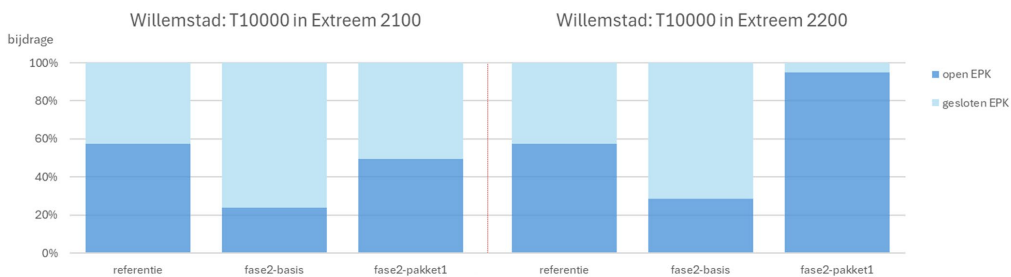


Figuur 45: Vergelijking Hydra-NL resultaat van basissituatie en pakket 1 op locatie Willemstad: frequentielijnen van tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem.

Het effect van het aanpassen van de peilen op de zeespiegelstijging is goed te zien in de resultaten van tijdlijn Extreem in de grafiek linksonder. In 2150 is het inzetpeil

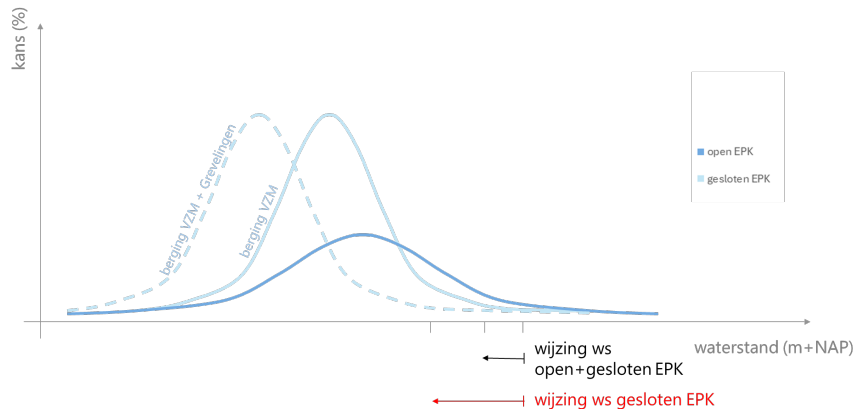
verhoogd naar NAP+3,85 m en in 2200 naar NAP+5,10 m. Dit effect is ook te zien in de resultaten van {2200} in tijdlijn Gematigd en {2100, 2150 en 2200} in tijdlijn Zeer extreem.

In Figuur 46 wordt de bijdrage getoond van belastingcombinaties met een open EPK aan de waterstand bij Willemstad, die eens per 10.000 jaar optreedt in tijdlijn Extreem (zichtjaren 2100 en 2200). In de referentie (2023) is deze bijdrage ongeveer 60% (donkerblauwe kleur). D.w.z. in ongeveer $\frac{3}{5}$ van alle mogelijke combinaties die leiden tot overschrijding van de T10.000 waterstand, is de EPK geopend. In een deel van deze combinaties wordt het sluitpeil bij Rotterdam of Dordrecht niet gehaald en hoeft de kering niet gesloten worden. In een ander deel faalt de kering. Door klimaatontwikkeling stijgt de zeespiegel en neemt de rivierafvoer toe, waardoor in zichtjaar 2100 de bijdrage toe neemt van combinaties waarin de kering sluit (staaf fase2-basis in het diagram). Door uitbreiding van de waterberging daalt de waterstand in combinaties met een gesloten EPK. In combinaties met een open EPK blijft de waterstand gelijk, daarom neemt deze bijdrage toe in het resultaat van pakket 1.



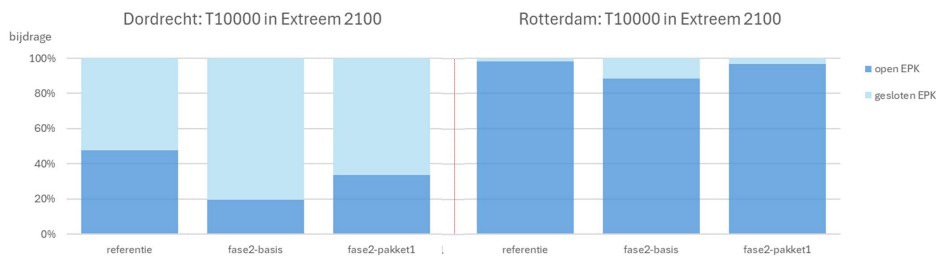
Figuur 46: Vergelijking Hydra-NL resultaat van basissituatie en pakket 1 op locatie Willemstad: bijdrage open/gesloten Europoortkering in de referentie (2023), 2100 en 2200 in tijdlijn Extreem.

In Figuur 47 wordt schematisch het effect van pakket 1 op de kansdichtheid van de waterstand weergegeven. Door inzet van de extra waterberging op de Grevelingen verschuift de kansdichtheid van de waterstand van deelverzameling 'gesloten EPK combinaties' een flink stuk (0,1 tot 0,4 m) op de horizontale as naar links. De kansdichtheid van de waterstand van deelverzameling 'open EPK' wijzigt niet. Hierdoor verschuift de kansdichtheid van samengestelde verzameling 'open + gesloten EPK' veel minder op de horizontale as. Als je dan bij op de horizontale as bij de gewijzigde T10000 waterstand kijkt is de kans (bijdrage) van de 'gesloten deelverzameling' kleiner geworden.



Figuur 47: Schematische weergave kansdichtheid van open en gesloten EPK.

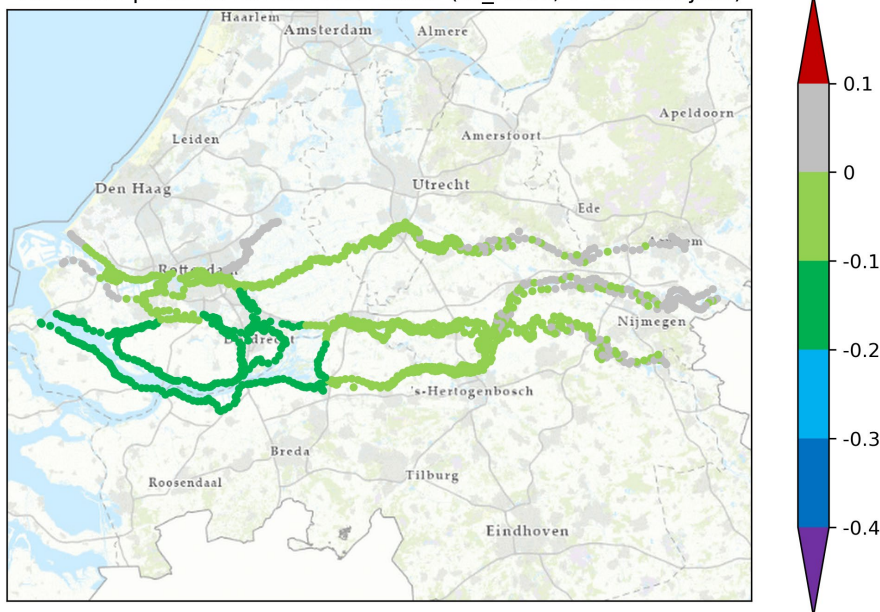
Het effect van pakket 1 is niet overal gelijk in de Rijn-Maasmonding. Dat blijkt ook uit de SOBEK3 resultaten. De waterstand op locaties die nabij de Volkeraksluizen liggen (zoals Willemstad), daalt meer bij de inzet van de vergrote waterberging. Locaties nabij de EPK (westelijk) zullen minder effect hebben, hier is het falen van de kering dominant. Op oostelijk locaties is de rivierafvoer dominant. In Figuur 48 wordt getoond op welke wijze de klimaat-ontwikkeling en op welke wijze pakket 1 de bijdrage beïnvloedt van belasting-combinaties met een open EPK. Alhoewel de bijdrage op beide locaties zeer verschillend is, zie je dat op beide locaties bijdrage van de open EPK toeneemt door klimaatontwikkeling en afneemt door pakket 1.



Figuur 48: Vergelijking Hydra-NL resultaat van basissituatie en pakket 1 op locatie Dordrecht en Rotterdam: bijdrage open/gesloten Europoortkering in de referentie (2023) en 2100 in tijdlijn Extreem.

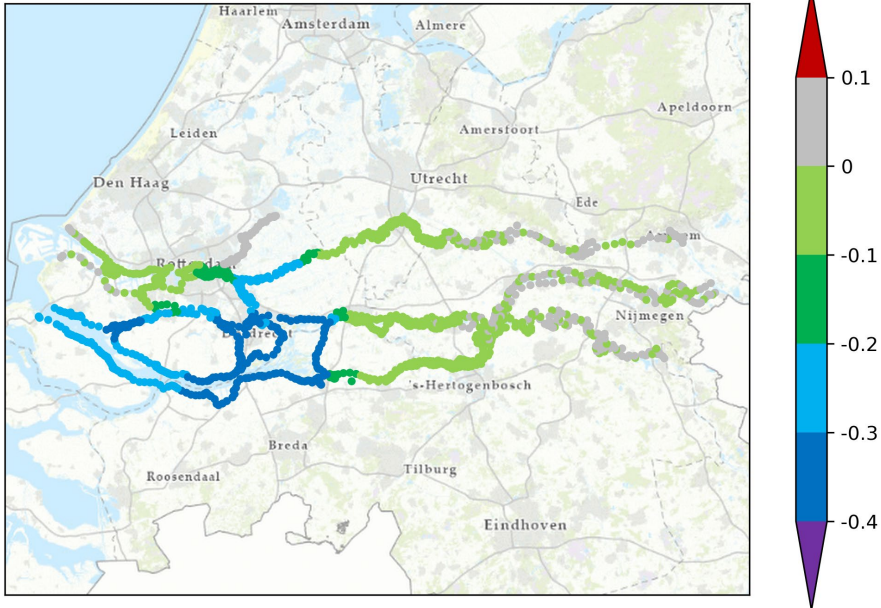
In Figuur 49 en Figuur 50 wordt een ruimtelijk beeld getoond van het verschil in T10000waterstand tussen de basissituatie en na realisatie van pakket 1 in 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem. Het donkergroen gekleurde gebied in het resultaat van 2100 (waterstandsverlaging 0,2 m) komt behoorlijk overeen met het blauwe gebied in 2200. Ten oosten en noordoosten is het blauwe gebied wat groter. Daarmee is het effect van pakket 1 in 2200 ongeveer 1½ tot 2 keer zo groot als in 2100. In 2200 is de waterstandsverlaging 0,3-0,4 m. Bij locaties ten westen (nabij het zeefront) en ten oosten van dit gebied (op de Lek, Waal en Maas) is het effect van pakket 1 in 2100 en 2200 van tijdlijn Extreem vergelijkbaar (verlaging 0,1 m).

WS fase2-pakket1 minus fase2-basis (t3_2100, T=10.000 jaar)



Figuur 49: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 1 en basissituatie voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2100.

WS fase2-pakket1 minus fase2-basis (t3_2200, T=10.000 jaar)



Figuur 50: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 1 en basissituatie voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2200.

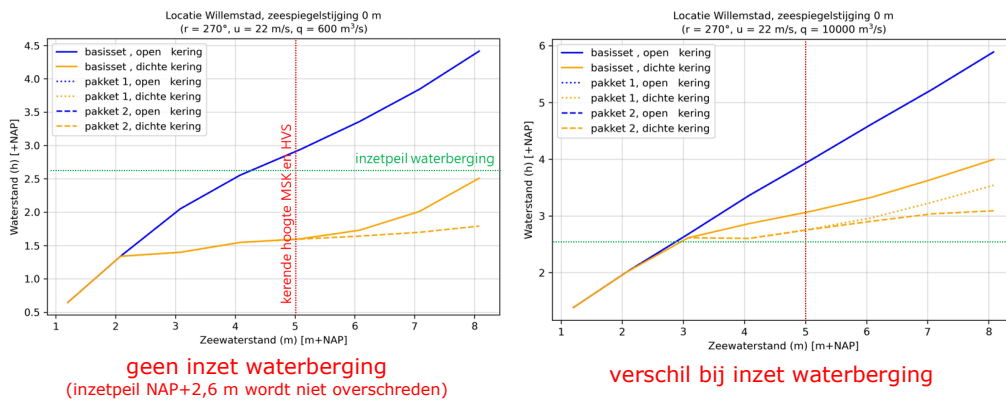
In Tabel 18 is het Hydra-NL resultaat van de berekening van maatregelpakket 1 samengevat. Per deelgebied (indeling uit Figuur 42) is de witte kolom het gemiddelde verschil met de basissituatie in waterstand berekend. De donkergrijs gekleurde kolom geeft per deelgebied de gemiddelde waterstandverhoging a.g.v. de klimaatontwikkeling. Als de waarde in de donkergrijze kolom gelijk is aan de witte kolom zorgt realisatie van het pakket dat de waterstand in het betreffende zichtjaar niet stijgt.

Tabel 18: Overzicht van Hydra-NL resultaat pakket 1: verschil in waterstand (T100, T1000 en T10000) als gemiddelde per deelgebied RDST, HVHD, Maas, Waal en NRLK.

Tijdlijn	Herf. tijd (jaar)	Rijnmond-Drechtsteden			Haringvliet - Hollandsch Diep			Maas			Waal			Neder Rijn - Lek			
		basis	verschil	verschil	basis	verschil	verschil	basis	verschil	verschil	basis	verschil	verschil	basis	verschil	verschil	
		(m+NAP)	basis - ref.	pkt1 - basis	(m+NAP)	basis - ref.	pkt1 - basis	(m+NAP)	basis - ref.	pkt1 - basis	(m+NAP)	basis - ref.	pkt1 - basis	(m+NAP)	basis - ref.	pkt1 - basis	
referentie	100	2.9	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	6.9	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	
	2023	1000	3.1	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0
		10000	3.3	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	8.4	0.0	0.0
Laag	2050	100	2.9	0.1	0.0	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0
		1000	3.1	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0
		10000	3.5	0.1	0.0	2.9	0.1	-0.1	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0
	2100	100	3.0	0.2	0.0	2.6	0.2	0.0	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0
		1000	3.3	0.2	0.0	2.8	0.3	-0.1	7.7	0.1	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
		10000	3.7	0.3	0.0	3.2	0.4	-0.1	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0
	2150	100	3.1	0.3	0.0	2.7	0.3	0.0	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0
		1000	3.4	0.3	0.0	3.0	0.4	-0.1	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
		10000	3.8	0.5	0.0	3.3	0.5	-0.1	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0
	2200	100	3.2	0.4	0.0	2.9	0.5	-0.1	7.1	0.2	0.0	9.9	0.5	0.0	7.5	0.0	0.0
		1000	3.6	0.6	0.0	3.3	0.7	-0.1	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
		10000	4.1	0.7	0.0	3.6	0.8	-0.1	8.3	0.3	0.0	10.9	0.4	0.0	8.3	-0.2	0.0
Gematigd	2050	100	2.9	0.1	0.0	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0
		1000	3.1	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0
		10000	3.5	0.1	0.0	2.9	0.1	-0.1	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0
	2100	100	3.1	0.3	0.0	2.7	0.3	0.0	7.2	0.3	0.0	10.0	0.6	0.0	7.5	0.0	0.0
		1000	3.4	0.3	0.0	3.0	0.4	-0.1	7.7	0.2	0.0	10.6	0.6	0.0	7.9	-0.2	0.0
		10000	3.8	0.5	0.0	3.4	0.6	-0.1	8.4	0.4	0.0	11.0	0.5	0.0	8.3	-0.1	0.0
	2150	100	3.4	0.6	0.0	3.1	0.7	-0.1	7.3	0.4	0.0	10.0	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0
		1000	3.8	0.8	0.0	3.5	0.9	-0.1	7.8	0.3	0.0	10.6	0.6	0.0	8.0	-0.1	0.0
		10000	4.3	1.0	0.0	3.8	1.0	-0.1	8.5	0.5	0.0	11.1	0.6	0.0	8.4	0.0	0.0
	2200	100	4.3	1.5	0.0	3.9	1.5	0.0	7.5	0.5	0.0	10.2	0.8	0.0	7.8	0.3	0.0
		1000	4.5	1.5	0.0	4.2	1.6	-0.1	8.0	0.5	0.0	10.7	0.7	0.0	8.1	0.1	0.0
		10000	5.0	1.7	0.0	4.6	1.8	-0.1	8.6	0.6	0.0	11.2	0.7	0.0	8.6	0.2	0.0
Extreem	2050	100	3.0	0.1	0.0	2.5	0.1	0.0	7.3	0.3	0.0	9.9	0.5	0.0	7.9	0.4	0.0
		1000	3.2	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.9	0.4	0.0	10.5	0.5	0.0	8.4	0.4	0.0
		10000	3.5	0.2	0.0	3.0	0.2	-0.1	8.6	0.6	0.0	11.0	0.5	0.0	8.9	0.4	0.0
	2100	100	3.4	0.5	0.0	3.1	0.7	-0.1	7.6	0.7	0.0	10.6	1.2	0.0	7.9	0.4	0.0
		1000	3.8	0.7	0.0	3.5	0.9	-0.1	8.4	0.9	0.0	11.2	1.2	0.0	8.5	0.5	0.0
		10000	4.2	0.9	-0.1	3.9	1.1	-0.1	9.4	1.4	0.0	11.7	1.2	0.0	9.1	0.7	0.0
	2150	100	4.3	1.4	0.0	3.9	1.6	0.0	7.9	1.0	0.0	10.9	1.5	0.0	8.3	0.8	0.0
		1000	4.5	1.5	0.0	4.2	1.6	-0.1	8.8	1.3	0.0	11.5	1.5	0.0	8.9	0.9	0.0
		10000	5.0	1.7	-0.1	4.7	1.8	-0.2	9.8	1.8	0.0	11.9	1.4	0.0	9.4	1.0	0.0
	2200	100	5.5	2.7	0.0	5.2	2.8	0.0	8.3	1.4	0.0	11.3	1.9	0.0	8.8	1.2	0.0
		1000	5.8	2.7	0.0	5.4	2.9	-0.1	9.3	1.8	0.0	11.8	1.8	0.0	9.4	1.3	0.0
		10000	6.2	2.9	-0.2	5.9	3.1	-0.3	10.3	2.4	0.0	12.2	1.7	0.0	9.8	1.3	0.0
Zeer Extreem	2050	100	3.1	0.2	0.0	2.6	0.3	0.0	7.3	0.4	0.0	10.1	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0
		1000	3.3	0.2	0.0	2.9	0.3	-0.1	7.9	0.4	0.0	10.7	0.7	0.0	8.0	0.0	0.0
		10000	3.7	0.4	0.0	3.3	0.5	-0.1	8.6	0.7	0.0	11.2	0.7	0.0	8.5	0.1	0.0
	2100	100	4.3	1.5	0.0	4.0	1.6	0.0	7.8	0.9	0.0	10.7	1.4	0.0	8.1	0.6	0.0
		1000	4.6	1.5	0.0	4.3	1.7	-0.1	8.6	1.1	0.0	11.3	1.3	0.0	8.7	0.7	0.0
		10000	5.1	1.7	-0.1	4.7	1.9	-0.2	9.5	1.5	0.0	11.8	1.2	0.0	9.2	0.8	0.0
	2150	100	5.7	2.8	0.0	5.3	2.9	-0.1	8.3	1.4	0.0	11.1	1.8	0.0	8.6	1.1	0.0
		1000	6.0	2.9	-0.1	5.7	3.1	-0.2	9.1	1.6	0.0	11.7	1.7	0.0	9.2	1.2	0.0
		10000	6.6	3.2	-0.1	6.2	3.4	-0.3	10.1	2.1	0.0	12.2	1.7	0.0	9.7	1.3	0.0
	2200	100	7.0	4.1	-0.1	6.6	4.2	-0.2	8.9	1.9	-0.2	11.6	2.3	-0.1	9.2	1.7	-0.1
		1000	7.5	4.4	-0.1	7.0	4.4	-0.2	9.8	2.2	-0.1	12.2	2.2	-0.1	9.8	1.8	-0.1
		10000	8.0	4.6	-0.1	7.5	4.7	-0.2	10.7	2.7	-0.1	12.6	2.0	-0.1	10.2	1.8	-0.1

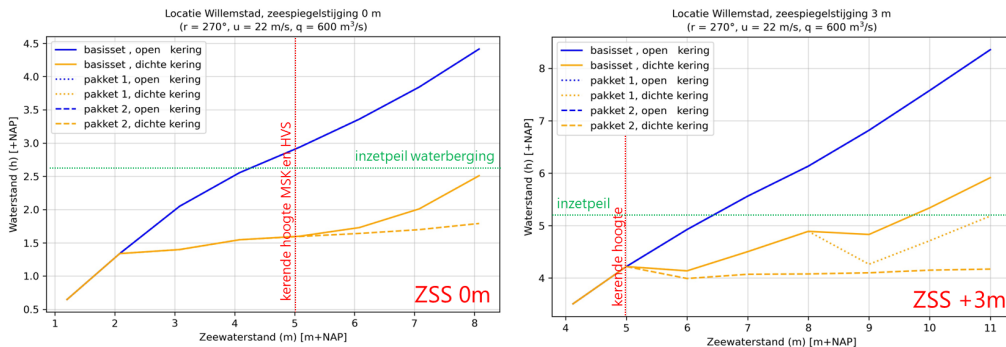
C.4 Resultaat pakket 2: pakket 1 + verbeteren EPK en Haringvlietdam

Het doel van maatregelpakket 2 is om, aanvullend op maatregelpakket 1, het gebied achter de Europoortkering en de Haringvlietdam beter te beschermen tegen stormen vanuit zee, door de faalkans van de Europoortkering aanzienlijk te verkleinen. Daarnaast wordt de kerende hoogte van de Europoortkering en de Haringvlietsluizen aanzienlijk verhoogd. In Figuur 51 (linker grafiek) is aangetoond dat als de waterberging (nog) niet wordt ingezet, er een verschil berekend wordt tussen de waterstand na realisatie van pakket 1 en na realisatie van pakket 2. De berging is niet ingezet, doordat het inzetpeil niet wordt overschreden (zie Figuur 43). In de basissituatie en pakket 1 worden de Maeslantkering en de Haringvlietsluizen overlopen als de zeewaterstand NAP+5 m overschrijdt. In de grafiek is te zien dat vanaf deze waarde op zee het verschil in de oranje lijnen (dichte Europoortkering) ontstaat. Als de berging wel wordt ingezet bij rivierafvoer 10.000 m³/s (rechter grafiek), is verlaging van de waterstand na realisatie van pakket 1 en 2 gelijk tot NAP+5 m te Hoek van Holland. Bij hogere waterstanden is de verlaging na realisatie van pakket 2 groter, doordat er dan geen water meer over Maeslantkering en Haringvlietsluizen loopt. Als de rivierafvoer hoger is dan 10.000 m³/s neemt het verschil tussen de basissituatie en beide pakketten verder toe, totdat de rivierafvoer zo groot is (> 18.000 m³/s) dat de berging van VZM en Grevelingen ontoereikend is. Dan neemt het verschil weer af.



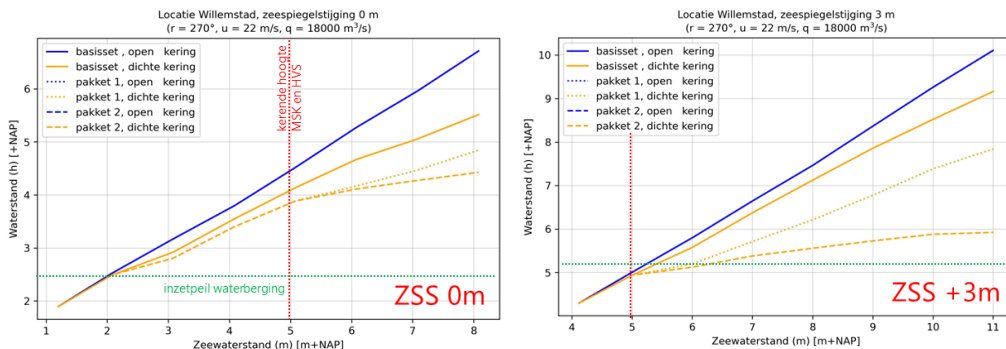
Figuur 51: Vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie, pakket 1 en 2 op locatie Willemstad: links doorsnede zonder inzet van de waterberging en rechts doorsnede met inzet van de waterberging (bij zeespiegelstijging +0 m).

In Figuur 51 is te zien dat het effect van het verhogen van de kerende hoogte van de stormvloedkeringen in pakket 2 toeneemt als de zeespiegel stijgt, door de linker (zeespiegelstijging +0 m) met de rechter grafiek (+3 m) te vergelijken. De waterberging wordt bij een rivierafvoer van 600 m³/s niet ingezet. Het verschil tussen de oranje lijnen in beide grafieken van de figuur wordt veroorzaakt door de verhoging van de kerende hoogte. Bij zeespiegelstijging +3 m wordt de Europoortkering gesloten bij overschrijding van NAP+5,5 te Rotterdam (bijlage B.6). Als er de rivierafvoer beperkt blijft (< 13.000 m³/s) dan neemt de waterstand achter een gesloten Europoortkering nauwelijks toe (na het moment van sluiten). De waterstand op het moment van sluiten is door de zeespiegelstijging natuurlijk wel aanzienlijk hoger (verhoging min of meer gelijk aan stijging zeespiegel).

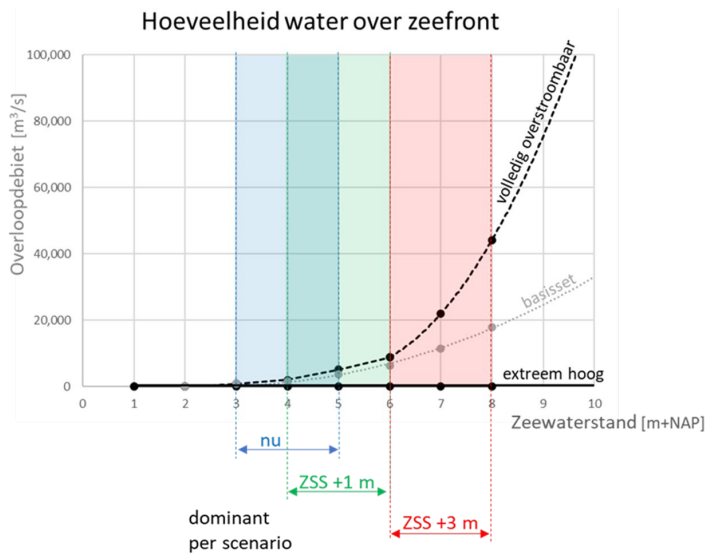


Figuur 52: Vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie, pakket 1 en 2 bij 600 m³/s te Lobith op locatie Willemstad: links doorsnede met inzet van de waterberging bij zeespiegelstijging +0 m en rechts bij zeespiegelstijging +3 m.

In Figuur 53 is te zien dat na verhoging van de stormvloedkeringen de waterstand achter een dichte kering veel minder oploopt, ook als de rivierafvoer vrij extreem is (> 16.000 m³/s). Verschil tussen de oranje stippen en onderbroken lijn wordt veroorzaakt doordat na realisatie van pakket 2 veel minder water in de delta geborgen moet worden. Overloopdebiet vanaf de Noordzee (grijze stippellijn in Figuur 54) is in die situatie afwezig. Bij zeespiegelstijging +2 en +3 m wordt bij een kleinere stormopzet, een kleinere verhoging van de dagelijkse waterstand, de EPK gesloten en de waterberging worden ingezet (door aanpassing van het sluitpeil). Gevolg is dat sluitfrequentie van de kering en de inzetfrequentie van de waterberging toenemen t.o.v. de referentie. De waterberging heeft bij inzet niet alleen een groter effect, maar wordt ook vaker ingezet.

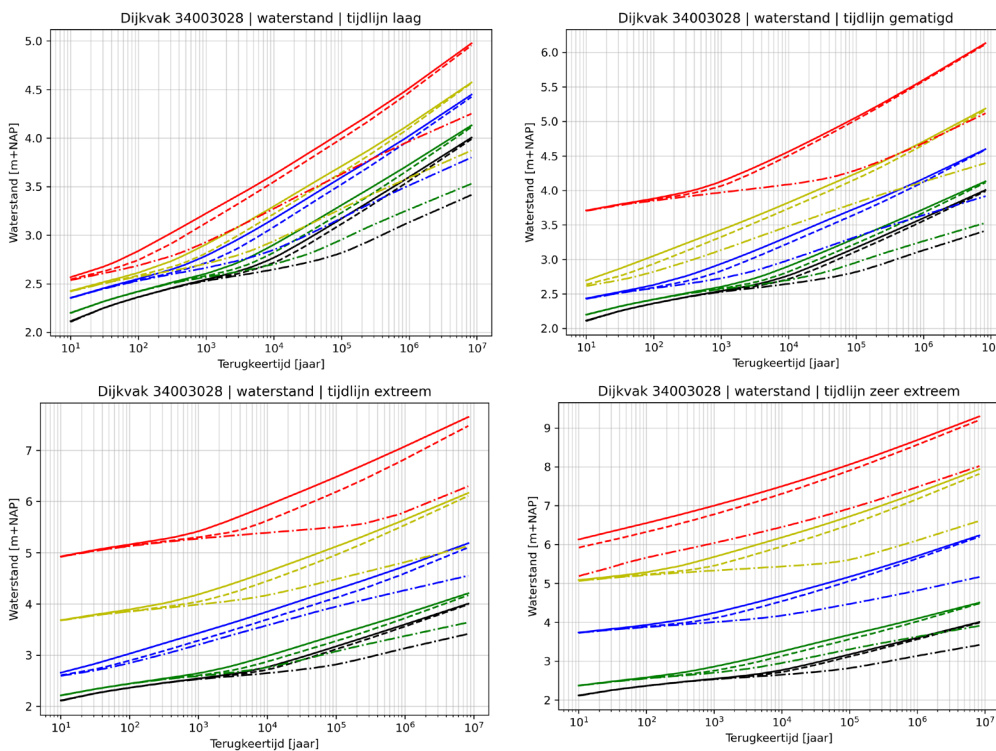


Figuur 53: Vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie, pakket 1 en 2 bij 18.000 m³/s te Lobith op locatie Willemstad: links doorsnede met inzet van de waterberging bij zeespiegelstijging +0 m en rechts bij zeespiegelstijging +3 m.



Figuur 54: Inschatting overloopdebiet bij Europoortkering en Haringvlietsluizen (bron: Zethof et al., 2023).

In Figuur 55 wordt een overzicht getoond van het resultaat van alle waterstandberekeningen met Hydra-NL voor locatie Willemstad (alle tijdlijnen). Vanaf het sluitpeil van de Europoortkering ontstaat een verschil in waterstand tussen pakket 1 (onderbroken lijn) en 2 (streep-stippellijn). Bij {2200} in tijdlijn Gematigd, {2150 en 2200} in tijdlijn Extreem en {2100, 2150 en 2200} in tijdlijn Zeer Extreem is het sluitpeil verhoogd.



Figuur 55: Vergelijking Hydra-NL resultaat van basissituatie, pakket 1 en 2 op locatie Willemstad: frequentielijnen van tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem.

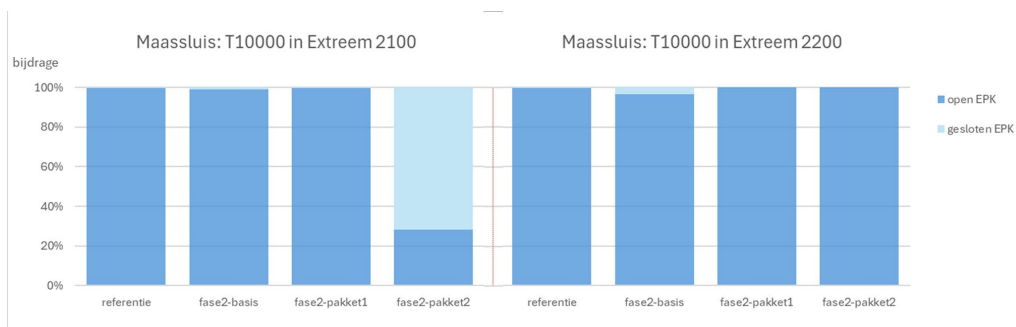
Het resultaat van zichtjaar 2200 in tijdlijn Zeer Extreem is onbetrouwbaar, door de combinatie van doorgerkende belastingcombinaties, wijzigingen in het SOBEK3 model en de statistiek van zeewaterstand en rivierafvoer (bij verhoogde rivierafvoer en gemiddeld getij wordt het sluitpeil bij Dordrecht overschreden).

In Figuur 56 wordt de bijdrage getoond van belastingcombinaties met een open EPK aan de waterstand bij Willemstad, die eens per 10.000 jaar optreedt in tijdlijn Extreem (zichtjaren 2100 en 2200). Deze figuur is vergelijkbaar met Figuur 46 uit paragraaf C.3 (beide staven van pakket 2 zijn toegevoegd). Door klimaatontwikkeling stijgt de zeespiegel en neemt de rivierafvoer toe, waardoor in zichtjaar 2100 en 2200 de bijdrage toe neemt van combinaties waarin de kering sluit (staaf fase2-basis in het diagram). Door uitbreiding van de waterberging daalt de waterstand in combinaties met een gesloten EPK. In combinaties met een open EPK blijft de waterstand gelijk, daarom neemt deze bijdrage toe in het resultaat van pakket 1. Als in pakket 2 de faalkans van de EPK aanzienlijk wordt verkleind neemt de bijdrage van de gesloten EPK ook aanzienlijk toe. De waterstand achter een gesloten EPK domineert in 2100 na realisatie van pakket 2 bij herhalingstijd 10000 jaar.



Figuur 56: Vergelijking Hydra-NL resultaat van basissituatie, pakket 1 en 2 op locatie Willemstad: bijdrage open/gesloten Europoortkering in de referentie (2023), 2100 en 2200 in tijdlijn Extreem.

In 2200 van tijdlijn Extreem bij zeespiegelstijging +3 m is de waterstand op het Haringvliet op het moment van openen van de waterberging aanzienlijk hoger dan in 2100 bij +1 m. Doordat het streefpeil van het VZM niet wordt aangepast, neemt het verval over de Volkeraksluizen evenredig toe met de zeespiegelstijging. Dit verval zorgt ervoor dat er aanzienlijk meer water naar de waterberging stroomt. Door verhoging van de stormvloedkeringen is de totale hoeveelheid water die naar de delta stroomt lager. Na realisatie van pakket 2 is de capaciteit van het inlaatwerk en het bergend oppervlak van de waterberging voldoende om de waterstand in 2200 van tijdlijn Extreem beheersbaar te maken (zie ook Figuur 52 en Figuur 53).

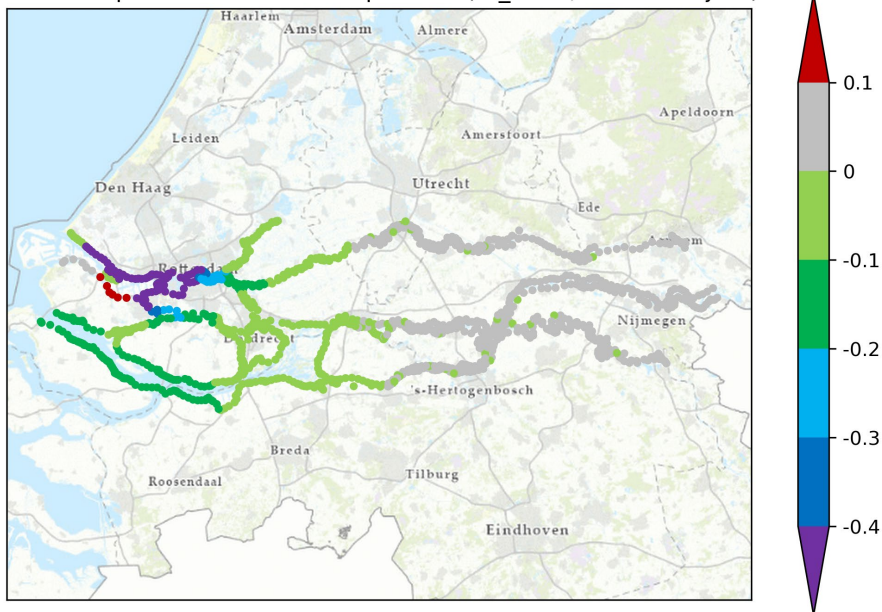


Figuur 57: Vergelijking Hydra-NL resultaat van basissituatie, pakket 1 en 2 op locatie Dordrecht en Rotterdam: bijdrage open/gesloten Europoortkering in de referentie (2023) en 2100 in tijdlijn Extreem.

In Figuur 55 is te zien dat in zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem de berekende waterstand voor pakket 2 tussen T1000 ten T10000 bij gelijk blijft en rond het sluitpeil van de Europoortkering ligt. Als de Europoortkering wordt gesloten is de waterstand op moment van sluiten lager dan het sluitpeil. Door de inzet van de waterberging (en het voorkomen van een overloop debiet) stijgt de waterstand nauwelijks boven het sluitpeil uit. Het is in deze situatie dat de voorspelfout dominant wordt in de bepalen van de waterstand. Daarom zie je in Figuur 56 voor 2200 na realisatie van pakket 2 bij Willemstad dat de bijdrage van de belastingcombinaties met een open Europoortkering weer toenemen tot nagenoeg 100%. In Figuur 57 is te zien dat bij locatie Maassluis (nabij de EPK) de ontwikkeling van de bijdrage van de gesloten EPK vergelijkbaar is.

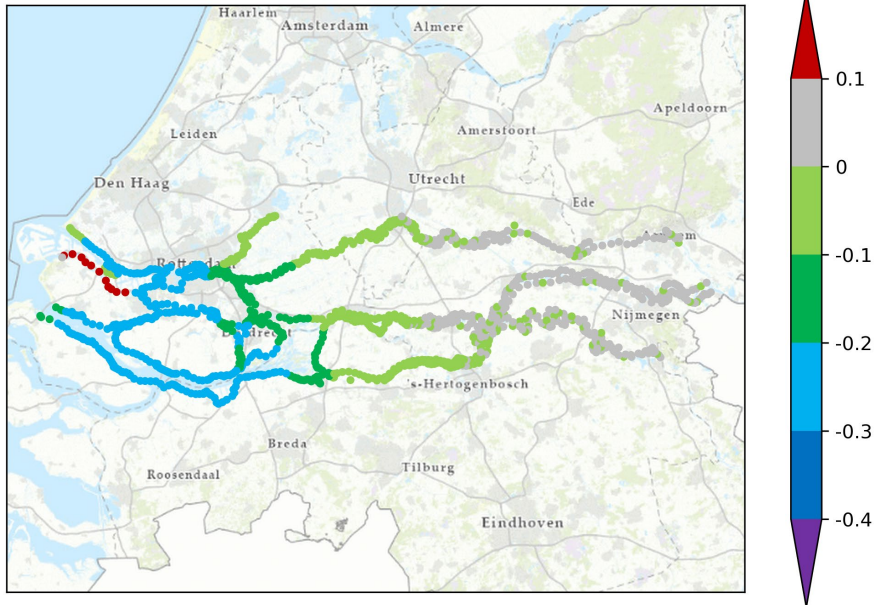
In Figuur 58 en Figuur 59 wordt een ruimtelijk beeld getoond van het verschil in T10000 waterstand tussen de pakket 2 en pakket 1 in 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem. In beide figuren is duidelijk het effect van de verbetering van de Europoortkering te zien. In 2100 is dit effect groter dan in 2200 (zie toelichting bij Figuur 56 en Figuur 57). In de beide figuren is ook te zien dat door de verbetering van de Europoortkering en de Haringvlietsluizen, de waterberging van VZM en Grevelingen beter rendeert. Op het Haringvliet en Hollandsch Diep is de waterstand zo'n 0,2 – 0,3 m lager in pakket 2. Door verhoging van de Hartelkering (zie bijlage B.6) ontstaat een hogere waterstand op het Hartelkanaal. Bij het ontwerp van deze stormvloedkering moet rekening worden gehouden met het effect van een sluiting op de waterstand aan de zeezijde langs het kanaal.

WS fase2-pakket2 minus fase2-pakket1 (t3_2100, T=10.000 jaar)



Figuur 58: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 2 en 1 voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2100.

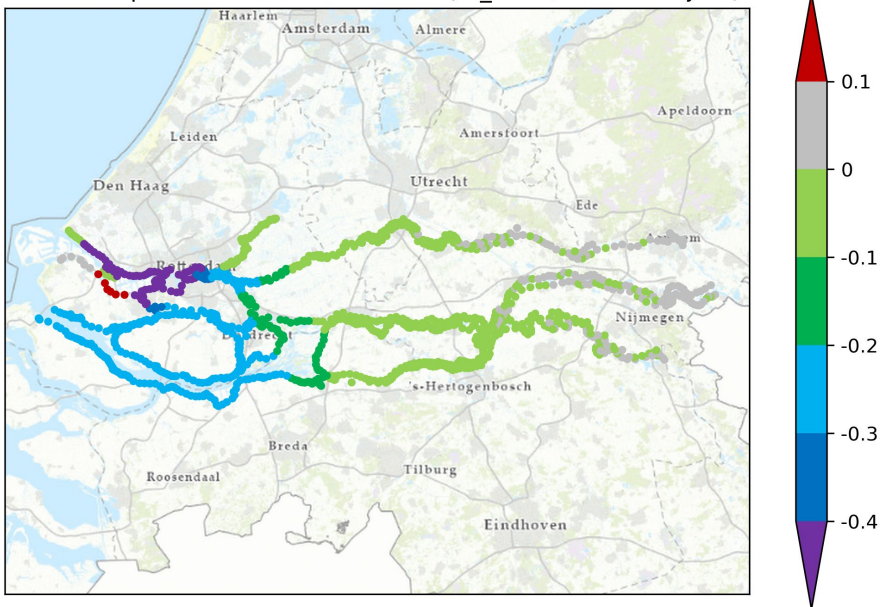
WS fase2-pakket2 minus fase2-pakket1 (t3_2200, T=10.000 jaar)



Figuur 59: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 2 en 1 voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2200.

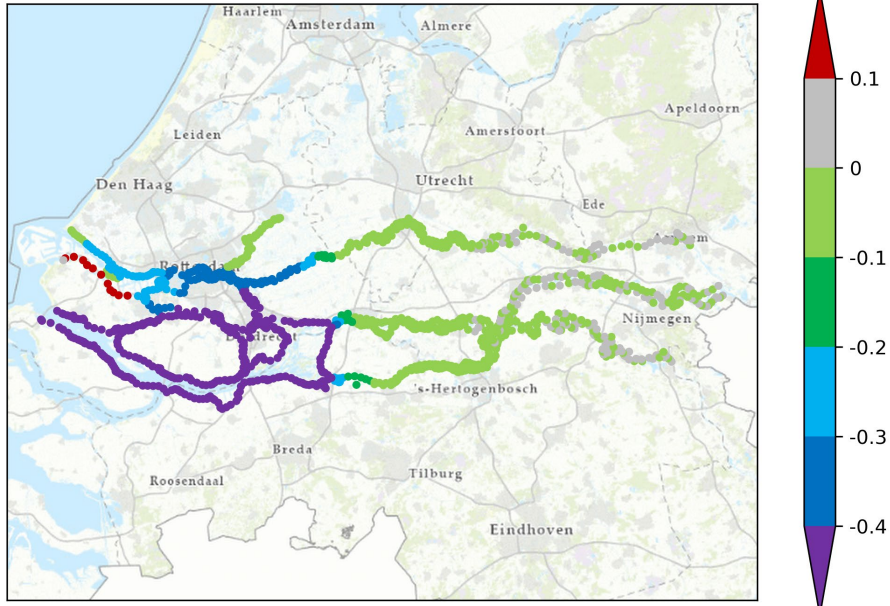
In Figuur 60 en Figuur 61 staan dezelfde resultaten afgebeeld, maar dan als verschil in T10000 waterstand tussen de basissituatie en na realisatie van pakket 2 in 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem. In 2100 is de verlaging ongeveer 0,3 m in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden en 0,2 in deelgebied Haringvliet – Hollandsch Diep. In de 2200 is de verlaging respectievelijk 0,3 m en 0,5 m. In Tabel 18 is het Hydra-NL resultaat van de berekening van maatregelpakket 2 samengevat vergelijkbaar als in Tabel 18. Als de waarde in de donkergrijze kolom gelijk is aan de witte kolom zorgt realisatie van pakket 2 dat de waterstand in het betreffende zichtjaar niet stijgt.

WS fase2-pakket2 minus fase2-basis (t3_2100, T=10.000 jaar)



Figuur 60: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 2 en basissituatie voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2100.

WS fase2-pakket2 minus fase2-basis (t3_2200, T=10.000 jaar)



Figuur 61: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 2 en basissituatie voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2200.

Tabel 19: Overzicht van Hydra-NL resultaat pakket 2: verschil in waterstand (T100, T1000 en T10000) als gem. per deelgebied RDST, HVHD, Maas, Waal en NRLK.

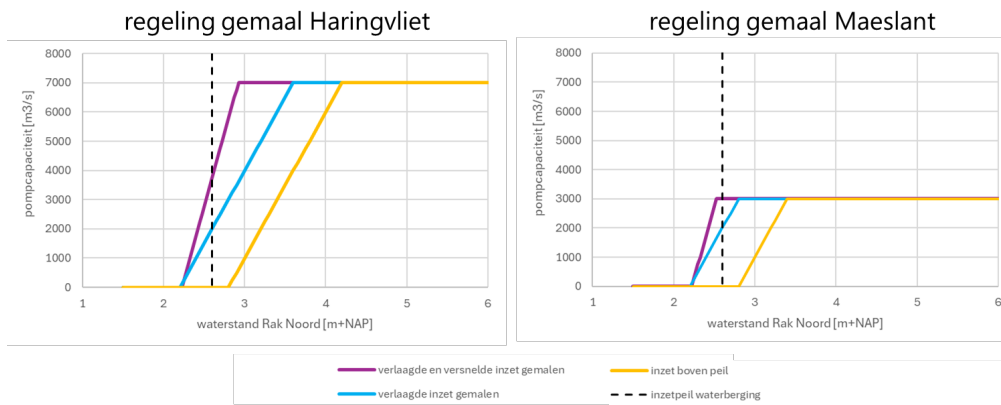
Tijdlijn	Herf. tijd	Rijnmond-Drechtsteden			Haringvliet - Hollandsch Diep			Maas			Waal			Neder Rijn - Lek		
		basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pkt2 - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pkt2 - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pkt2 - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pkt2 - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pkt2 - basis (m)
referentie	100	2.9	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	6.9	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0
	1000	3.1	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0
	10000	3.3	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	8.4	0.0	0.0
2050	100	2.9	0.1	0.0	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0
	1000	3.1	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0
	10000	3.5	0.1	-0.1	2.9	0.1	-0.2	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0
2100	100	3.0	0.2	0.0	2.6	0.2	0.0	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0
	1000	3.3	0.2	-0.1	2.8	0.3	-0.1	7.7	0.1	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
	10000	3.7	0.3	-0.2	3.2	0.4	-0.3	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0
2150	100	3.1	0.3	0.0	2.7	0.3	0.0	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0
	1000	3.4	0.3	-0.1	3.0	0.4	-0.2	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
	10000	3.8	0.5	-0.3	3.3	0.5	-0.3	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0
2200	100	3.2	0.4	0.0	2.9	0.5	-0.1	7.1	0.2	0.0	9.9	0.5	0.0	7.5	0.0	0.0
	1000	3.6	0.6	-0.2	3.3	0.7	-0.3	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
	10000	4.1	0.7	-0.4	3.6	0.8	-0.3	8.3	0.3	0.0	10.9	0.4	0.0	8.3	-0.2	0.0
2050	100	2.9	0.1	0.0	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0
	1000	3.1	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0
	10000	3.5	0.1	-0.1	2.9	0.1	-0.2	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0
2100	100	3.1	0.3	0.0	2.7	0.3	0.0	7.2	0.3	0.0	10.0	0.6	0.0	7.5	0.0	0.0
	1000	3.4	0.3	-0.1	3.0	0.4	-0.2	7.7	0.2	0.0	10.6	0.6	0.0	7.9	-0.2	0.0
	10000	3.8	0.5	-0.3	3.4	0.6	-0.3	8.4	0.4	0.0	11.0	0.5	0.0	8.3	-0.1	0.0
2150	100	3.4	0.6	-0.1	3.1	0.7	-0.2	7.3	0.4	0.0	10.0	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0
	1000	3.8	0.8	-0.3	3.5	0.9	-0.3	7.8	0.3	0.0	10.6	0.6	0.0	8.0	-0.1	0.0
	10000	4.3	1.0	-0.4	3.8	1.0	-0.3	8.5	0.5	0.0	11.1	0.6	0.0	8.4	0.0	0.0
2200	100	4.3	1.5	0.0	3.9	1.5	0.0	7.5	0.5	0.0	10.2	0.8	0.0	7.8	0.3	0.0
	1000	4.5	1.5	-0.1	4.2	1.6	-0.1	8.0	0.5	0.0	10.7	0.7	0.0	8.1	0.1	0.0
	10000	5.0	1.7	-0.3	4.6	1.8	-0.4	8.6	0.6	0.0	11.2	0.7	0.0	8.6	0.2	0.0
2050	100	3.0	0.1	0.0	2.5	0.1	0.0	7.3	0.3	0.0	9.9	0.5	0.0	7.9	0.4	0.0
	1000	3.2	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.9	0.4	0.0	10.5	0.5	0.0	8.4	0.4	0.0
	10000	3.5	0.2	-0.1	3.0	0.2	-0.2	8.6	0.6	0.0	11.0	0.5	0.0	8.9	0.4	0.0
2100	100	3.4	0.5	-0.1	3.1	0.7	-0.2	7.6	0.7	0.0	10.6	1.2	0.0	7.9	0.4	0.0
	1000	3.8	0.7	-0.2	3.5	0.9	-0.2	8.4	0.9	0.0	11.2	1.2	0.0	8.5	0.5	0.0
	10000	4.2	0.9	-0.3	3.9	1.1	-0.2	9.4	1.4	0.0	11.7	1.2	0.0	9.1	0.7	0.0
2150	100	4.3	1.4	0.0	3.9	1.6	0.0	7.9	1.0	0.0	10.9	1.5	0.0	8.3	0.8	0.0
	1000	4.5	1.5	-0.1	4.2	1.6	-0.2	8.8	1.3	0.0	11.5	1.5	0.0	8.9	0.9	0.0
	10000	5.0	1.7	-0.3	4.7	1.8	-0.4	9.8	1.8	0.0	11.9	1.4	0.0	9.4	1.0	0.0
2200	100	5.5	2.7	0.0	5.2	2.8	0.0	8.3	1.4	0.0	11.3	1.9	0.0	8.8	1.2	0.0
	1000	5.8	2.7	-0.1	5.4	2.9	-0.1	9.3	1.8	0.0	11.8	1.8	0.0	9.4	1.3	0.0
	10000	6.2	2.9	-0.3	5.9	3.1	-0.5	10.3	2.4	0.0	12.2	1.7	0.0	9.8	1.3	0.0
2050	100	3.1	0.2	0.0	2.6	0.3	0.0	7.3	0.4	0.0	10.1	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0
	1000	3.3	0.2	-0.1	2.9	0.3	-0.1	7.9	0.4	0.0	10.7	0.7	0.0	8.0	0.0	0.0
	10000	3.7	0.4	-0.2	3.3	0.5	-0.3	8.6	0.7	0.0	11.2	0.7	0.0	8.5	0.1	0.0
2100	100	4.3	1.5	0.0	4.0	1.6	-0.1	7.8	0.9	0.0	10.7	1.4	0.0	8.1	0.6	0.0
	1000	4.6	1.5	-0.1	4.3	1.7	-0.2	8.6	1.1	0.0	11.3	1.3	0.0	8.7	0.7	0.0
	10000	5.1	1.7	-0.4	4.7	1.9	-0.5	9.5	1.5	0.0	11.8	1.2	0.0	9.2	0.8	0.0
2150	100	5.7	2.8	0.0	5.3	2.9	-0.1	8.3	1.4	0.0	11.1	1.8	0.0	8.6	1.1	0.0
	1000	6.0	2.9	-0.2	5.7	3.1	-0.3	9.1	1.6	0.0	11.7	1.7	0.0	9.2	1.2	0.0
	10000	6.6	3.2	-0.5	6.2	3.4	-0.7	10.1	2.1	-0.1	12.2	1.7	0.0	9.7	1.3	0.0
2200	100	7.0	4.1	-0.7	6.6	4.2	-0.9	8.9	1.9	-0.4	11.6	2.3	-0.2	9.2	1.7	-0.3
	1000	7.5	4.4	-0.7	7.0	4.4	-1.0	9.8	2.2	-0.3	12.2	2.2	-0.2	9.8	1.8	-0.2
	10000	8.0	4.6	-0.7	7.5	4.7	-1.0	10.7	2.7	-0.2	12.6	2.0	-0.2	10.2	1.8	-0.2

C.5 Resultaat pakket 3: pakket 2 + aanleg van gemalen

Het doel van maatregelpakket 3 is om, aanvullend op maatregelpakket 2, gemalen te plaatsen bij de Europoortkering en de Haringvlietdam om tijdens hoogwater extra water uit het watersysteem te kunnen pompen, zodat de waterstand bij een sluiting van de stormvloedkeringen niet te hoog oploopt (mocht de waterberging onvoldoende zijn). We bestuderen of de inzet van gemalen aanvullend op de inzet van de waterberging efficiënt kan zijn. Om er zeker van te zijn dat de gemalen voldoende nut hebben (en niet te laat worden ingeschakeld) is een kleine gevoeligheidsanalyse van het inschakelpeil uitgevoerd. Hierbij is in acht genomen dat de gemalen na het openen van de Volkeraksluizen worden ingeschakeld. Daarom is de waterstand bij locatie Rak Noord genomen als parameter om het inschakelen van de gemalen te regelen. Als zowel waterberging op de Grevelingen en de gemalen op termijn zijn gerealiseerd, kan in een operationele situatie de volgorde van inzet (van beiden) eventueel worden omgedraaid.

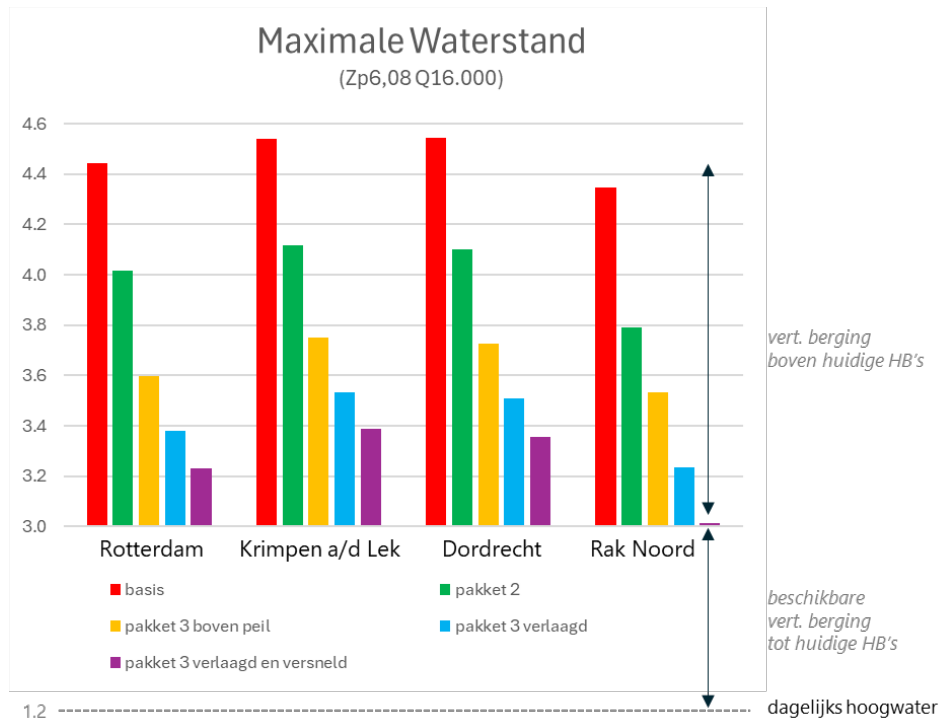
In de analyse hebben we 3 varianten van de regeling onderzocht (Figuur 62):

1. Inzet boven peil (gele lijn): zowel het gemaal bij de Maeslantkering als bij de Haringvlietdam wordt met 250 m³/s ingeschakeld als de waterstand bij Rak Noord (na inzet van de waterberging) nog 0,25 m boven het inzetpeil uit stijgt. Als de waterstand ondanks inzet van de berging en (gezamenlijk) 500 m³/ ingeschakelde pompcapaciteit doorstijgt, dan wordt in stapjes van 0,05 m telkens 250 m³/s bijgeschakeld op beide locaties (totdat de maximale gemaalcapaciteit is bereikt).
2. Verlaagde inzet gemalen (blauwe lijn): Vergelijkbare regeling als (1), maar dan wordt de eerste trede van de pompen ingeschakeld als na inzet van de waterberging de waterstand bij Rak Noord het niveau '0,35 m onder het inzetpeil' overschrijdt. Ter verduidelijking: de waterberging wordt ingezet als in de verwachting het inzetpeil wordt overschreden. Om bij inzet overschrijding van dit peil te voorkomen, worden de Volkeraksluizen geopend zodra de Maeslantkering sluit (dit is ruim voordat het inzetpeil wordt overschreden).
3. Verlaagde en versnelde inzet gemalen (paarse lijn): Vergelijkbare regeling als (2), maar dan is de afstand tussen treden waarop de pompcapaciteit wordt ingeschakeld kleiner. In stapjes van 0,025 m wordt telkens 250 m³/s bijgeschakeld op beide locaties. Hierdoor wordt bij een lagere waterstand te Rak Noord de maximale gemaalcapaciteit ingeschakeld (zie figuur).



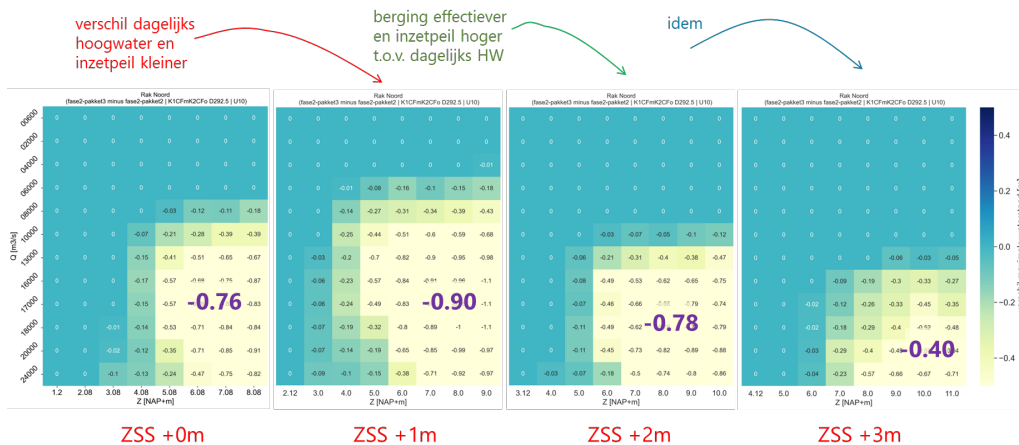
Figuur 62: Weergave van de onderzochte regeling voor de gemalen bij de Haringvlietdam en nabij de Maeslantkering.

Het effect van deze drie optionele regelingen hebben we bepaald voor een belastingcombinatie met een rivierafvoer van 16.000 m³/s en een storm van NAP+6 m op zee (Figuur 63).



Figuur 63: Effect van optionele gemaal regelingen op maximale waterstand bij 4 locaties in de delta (tijdens 16.000 m³/s op rivieren en NAP+6 m op zee).

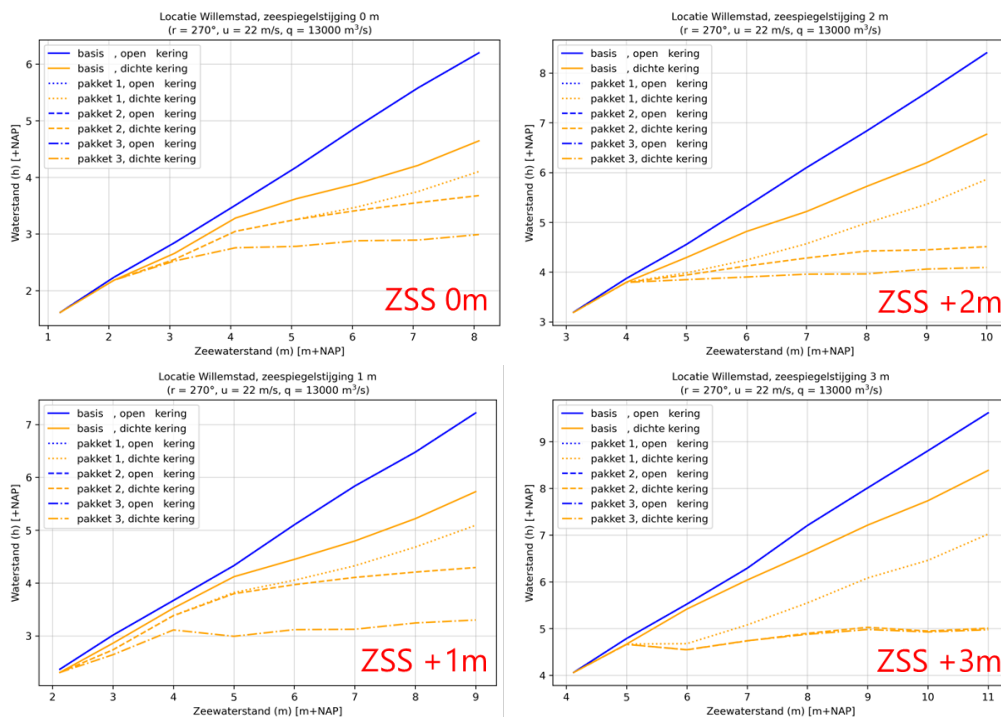
In Figuur 63 zien we dat met de 'versnelde en verlaagde' regeling (optie 3) dat de waterstand bij Rak Noord nagenoeg gelijk is aan NAP+3 m bij deze belasting-combinatie waarin ook de Europoortkering wordt gesloten en de waterberging wordt geopend. Ook bij Rotterdam, Krimpen a/d Lek en Dordrecht wordt een aanzienlijk waterstandverlaging t.o.v. pakket 2 met deze aansturing van de gemalen gerealiseerd (vergelijk groene met paarse staafjes). Dit lijkt al een vrij optimale regeling voor de gemalen, immers de doorgerekende rivierafvoer en zee-waterstand zijn al vrije extreem voor de referentie situatie. Ook is gecontroleerd of met deze regeling bij zeespiegelstijging de gemalen efficiënt worden ingezet. Daartoe zijn bij windsnelheid 10 m/s uit westnoordwest alle combinatie van rivierafvoer en zee-waterstand doorgerekend met SOBEK3 voor zeespiegelstijging 0, +1, +2 en +3 m.



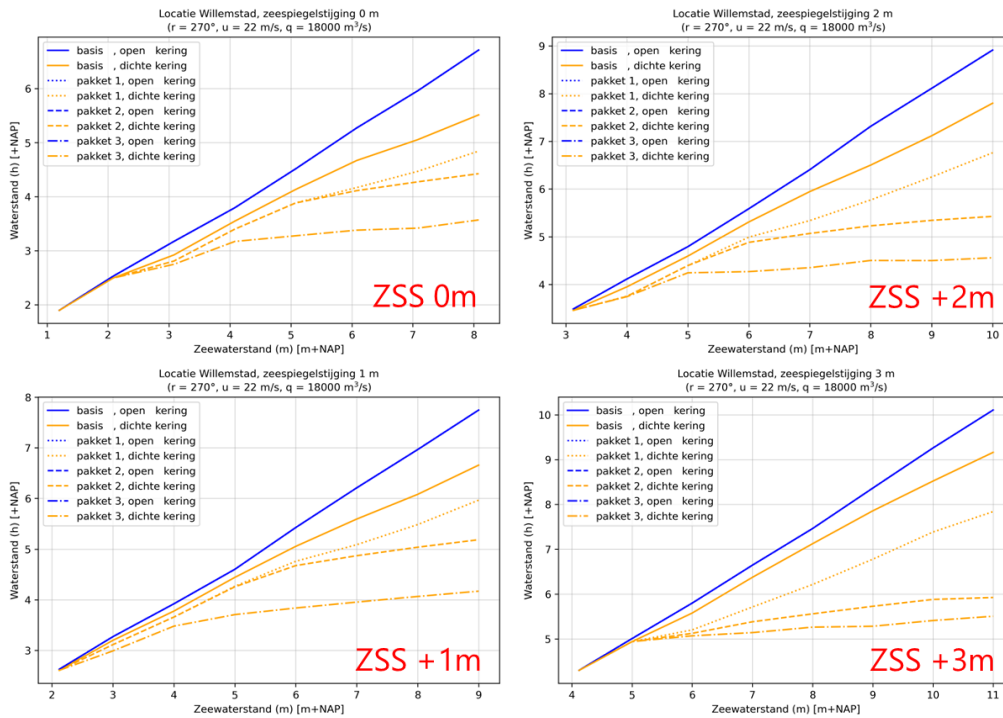
Figuur 64: Effect van gemaal regeling 'verlaagd en versneld' op maximale waterstand bij Rak Noord (bij noordwestenwind en alle rivierafvoeren/zeewaterstand).

In de referentiesituatie (zeespiegelstijging +0 m, 1e matrix) hebben de gemalen een verlagend effect op de waterstand vanaf een rivierafvoer van 8.000 m³/s en een zeewaterstand NAP+4 m. Gemiddeld is de verlaging 0,75 m t.o.v. pakket 2. Bij zeespiegelstijging +1 m hebben de gemalen een effect vanaf rivierafvoer 6.000 m³/s en zeewaterstand NAP+3 m. Logisch, immers het sluitpeil EPK en inzetpeil waterberging worden tot en met stijging +1 m niet aangepast (bijlage B.6). De gemiddelde verlaging door de gemalen is ook groter, namelijk 0,9 bij Rak Noord t.o.v. van pakket 2. Als de zeespiegel verder stijgt (+2 m en +3 m) worden de peilen wel aangepast. Meer rivierwater zal naar de berging stromen, immers het verval over de Volkeraksluizen neemt verder toe. Gevolg is dat de gemalen bij een hogere rivierafvoer en een hogere stormopzet worden ingeschakeld (gele vlak in 3e en 4e matrix). Het effect van de gemalen wordt dan ook kleiner, een gemiddelde verlaging van 0,78 m en 0,40 m bij respectievelijk +2 en +3 m zeespiegelstijging.

In Figuur 65 en Figuur 66 wordt het effect van de gemalen in pakket 3 vergeleken met het effect van pakket 1 en 2 t.o.v. de basissituatie bij 13.000 m³/s en 18.000 m³/s op de rivieren. Te zien is dat de waterstand op het Hollandsch Diep bij Willemstad nauwelijks nog oploopt door een aanzienlijke rivierafvoer als de Europoortkering is gesloten (oranje lijnen). Bij een rivierafvoer van 13.000 m³/s is de maximale waterstand min of meer gelijk aan de waterstand op het moment waarop de stormvloedkering gesloten wordt. De maximale waterstand is ongeveer een halve meter hoger als de rivierafvoer 18.000 m³/s is. Dit is ongeacht de zeespiegelstijging. Hierbij moet wel worden begrepen dat de waterstand op moment van sluiten wel afhankelijk (recht evenredig) is van de zeespiegelstijging.



Figuur 65: Vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie, pakket 1, 2 en 3 bij 13.000 m³/s te Lobith op locatie Willemstad: linksboven zeespiegelstijging +0 m, linksonder + 1 m, rechtsboven +2 m en rechtsonder +3 m.

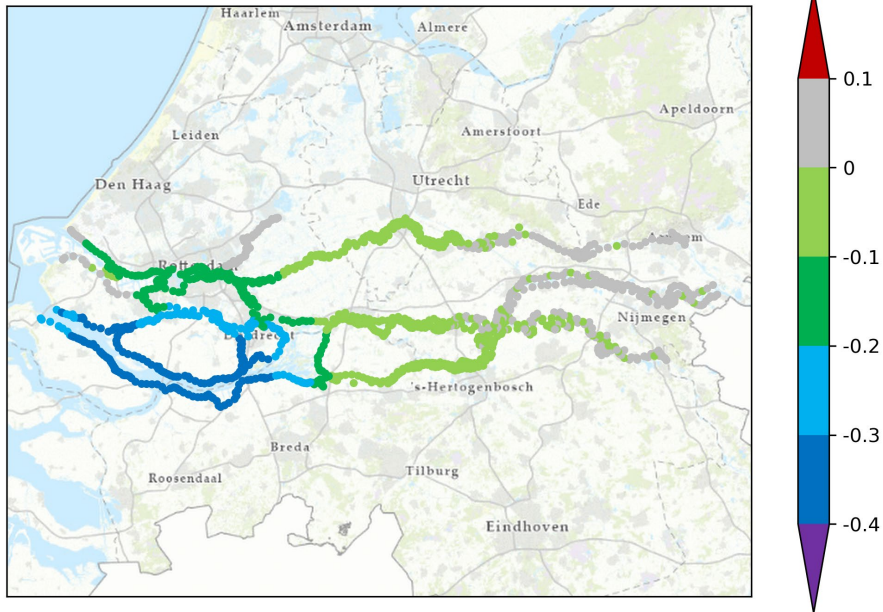


Figuur 66: Vergelijking SOBEK3 resultaat van basissituatie, pakket 1, 2 en 3 bij $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith op locatie Willemstad: linksboven zeespiegelstijging +0 m, linksonder +1 m, rechtsboven +2 m en rechtsonder +3 m.

In Figuur 67 en Figuur 68 wordt een ruimtelijk beeld getoond van het verschil in de T10000 waterstand tussen de pakket 3 en pakket 2 in 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem. In 2100 is dit effect van de gemalen veel groter dan in 2200. Uit Figuur 65 en Figuur 66 bleek al dat het debiet dat naar de waterberging stroomt veel groter is in 2200 dan in 2100. In 2200 is het verval over de Volkeraksluizen veel groter. Als aanvullend de gemalen worden ingezet dan zal dit leiden tot een verlaging van de waterstand op het Hollandsch Diep bij Rak Noord. Hierdoor neemt het debiet door de Volkeraksluizen af. De waterstand wordt niet significant verlaagd. In plaats van dat het rivierwater naar de waterberging wordt afgevoerd, wordt het door de gemalen naar zee gepompt.

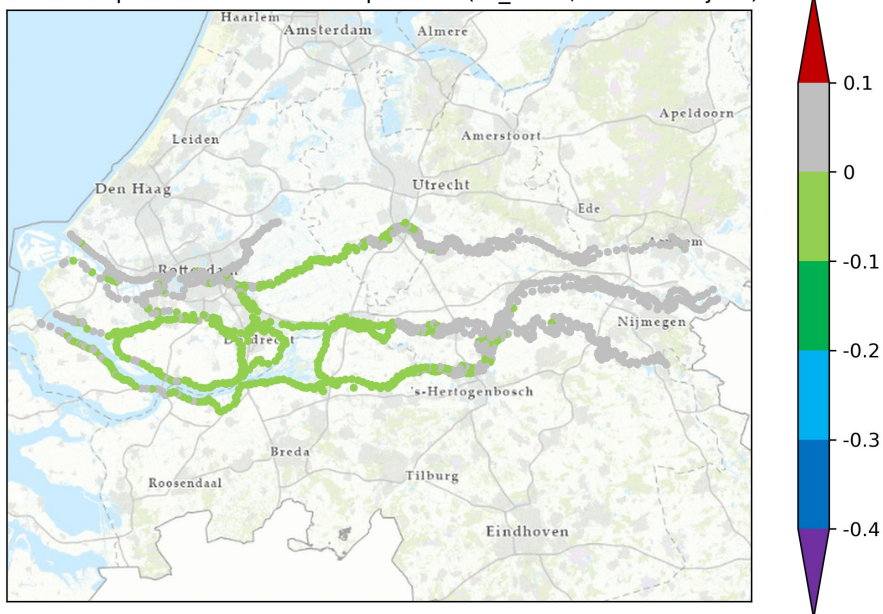
In 2100 is het verval over de Volkeraksluizen veel kleiner op het moment van openen. In 2100 als in 2200 is de waterstand op het VZM bij het openen van de waterberging gelijk. Immers het streefpeil is in beide zichtjaren gelijk (namelijk NAP+0 m). Linksonder in de grafiek van zeespiegelstijging +1 m van Figuur 65 en Figuur 66 is de berekende maximale waterstand ongeveer NAP+3 m en/of NAP+4 m. In de grafiek rechtsonder is de maximale waterstand in beide figuren ongeveer NAP+5 m. Het verval van 5 m is min of meer voldoende, waardoor aanvullend afvoeren via gemalen nauwelijks de maximale waterstand kan verlagen. T.o.v. van de referentie (2023) is de waterstand in 2200 wel een stuk hoger dan in 2100.

WS fase2-pakket3 minus fase2-pakket2 (t3_2100, T=10.000 jaar)



Figuur 67: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 3 en 2 voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2100.

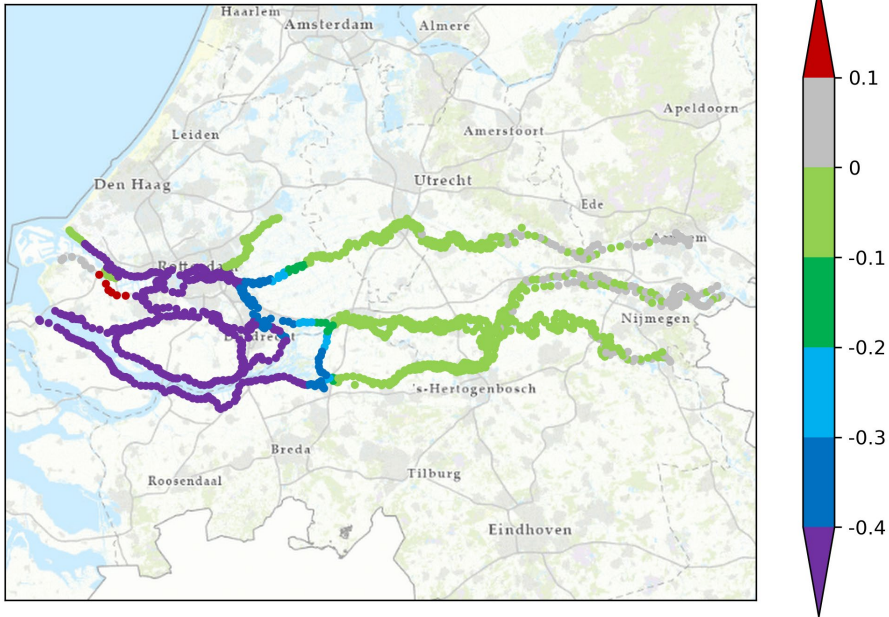
WS fase2-pakket3 minus fase2-pakket2 (t3_2200, T=10.000 jaar)



Figuur 68: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 3 en 2 voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2200.

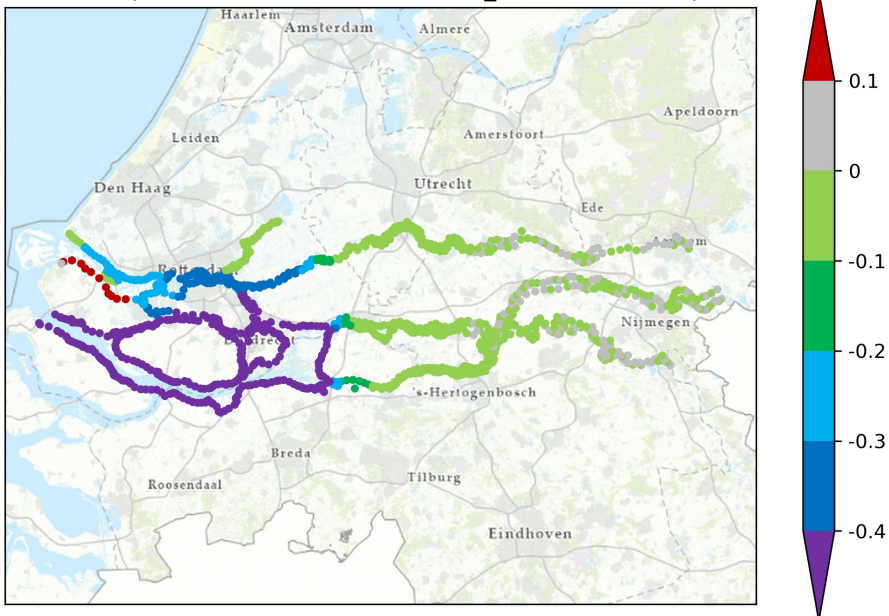
In Figuur 69 en Figuur 70 staan dezelfde resultaten afgebeeld, maar dan als verschil in T10000 waterstand tussen de basissituatie en na realisatie van pakket 3 in 2100 en 2200 voor tijdlijn Extreem. In 2100 is de verlaging ongeveer 0,4 m in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden en 0,6 in deelgebied Haringvliet – Hollandsch Diep. In de 2200 is de verlaging respectievelijk 0,3 m en 0,5 m.

WS fase2-pakket3 minus fase2-basis (t3_2100, T=10.000 jaar)



Figuur 69: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 3 en basissituatie voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2100.

WS fase2-pakket3 minus fase2-basis (t3_2200, T=10.000 jaar)



Figuur 70: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket 3 en basissituatie voor tijdlijn Extreem en zichtjaar 2200.

In Tabel 20 is het Hydra-NL resultaat van de berekening van maatregelpakket 3 samengevat vergelijkbaar als in Tabel 18 en Tabel 19. Door realisatie van alle maatregelen lukt het om in 2050 70% tot 100% van de toename van de T10000 waterstand van de basissituatie in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsch Diep te voorkomen. In tijdlijn Laag is dit percentage het grootst. Realisatie van de maatregelen voorkomt in 2200 10% (tijdlijn Extreem) tot 60% (tijdlijn Laag) van de toename van de T10000 waterstand.

Tabel 20: Overzicht van Hydra-NL resultaat pakket 3: verschil in waterstand (T100, T1000 en T10000) als gem. per deelgebied RDST, HVHD, Maas, Waal en NRLK.

Tijdlijn	Herh. tijd (jaar)	Rijnmond-Drechtsteden			Haringvliet - Hollandsch Diep			Maas			Waal			Neder Rijn - Lek			
		basis	verschil basis - ref.	verschil pkt3 - basis	basis	verschil basis - ref.	verschil pkt3 - basis	basis	verschil basis - ref.	verschil pkt3 - basis	basis	verschil basis - ref.	verschil pkt3 - basis	basis	verschil basis - ref.	verschil pkt3 - basis	
		(m+NAP)	(m)	(m)	(m+NAP)	(m)	(m)	(m+NAP)	(m)	(m)	(m+NAP)	(m)	(m)	(m+NAP)	(m)	(m)	
referentie	100	2.9	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	6.9	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	
	2023	3.1	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	
	10000	3.3	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	8.4	0.0	0.0	
Laag	2050	100	2.9	0.1	0.0	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0
		1000	3.1	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0
		10000	3.5	0.1	-0.1	2.9	0.1	-0.2	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0
	2100	100	3.0	0.2	0.0	2.6	0.2	0.0	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0
		1000	3.3	0.2	-0.1	2.8	0.3	-0.1	7.7	0.1	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
		10000	3.7	0.3	-0.3	3.2	0.4	-0.4	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0
	2150	100	3.1	0.3	0.0	2.7	0.3	0.0	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0
		1000	3.4	0.3	-0.1	3.0	0.4	-0.2	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
		10000	3.8	0.5	-0.3	3.3	0.5	-0.4	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0
	2200	100	3.2	0.4	-0.1	2.9	0.5	-0.2	7.1	0.2	0.0	9.9	0.5	0.0	7.5	0.0	0.0
		1000	3.6	0.6	-0.2	3.3	0.7	-0.4	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0
		10000	4.1	0.7	-0.4	3.6	0.8	-0.5	8.3	0.3	0.0	10.9	0.4	0.0	8.3	-0.2	0.0
Gematigd	2050	100	2.9	0.1	0.0	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0
		1000	3.1	0.1	0.0	2.7	0.1	0.0	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0
		10000	3.5	0.1	-0.1	2.9	0.1	-0.2	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0
	2100	100	3.1	0.3	0.0	2.7	0.3	-0.1	7.2	0.3	0.0	10.0	0.6	0.0	7.5	0.0	0.0
		1000	3.4	0.3	-0.1	3.0	0.4	-0.2	7.7	0.2	0.0	10.6	0.6	0.0	7.9	-0.2	0.0
		10000	3.8	0.5	-0.3	3.4	0.6	-0.4	8.4	0.4	0.0	11.0	0.5	0.0	8.3	-0.1	0.0
	2150	100	3.4	0.6	-0.1	3.1	0.7	-0.3	7.3	0.4	0.0	10.0	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0
		1000	3.8	0.8	-0.3	3.5	0.9	-0.4	7.8	0.3	0.0	10.6	0.6	0.0	8.0	-0.1	0.0
		10000	4.3	1.0	-0.5	3.8	1.0	-0.6	8.5	0.5	0.0	11.1	0.6	0.0	8.4	0.0	0.0
	2200	100	4.3	1.5	0.0	3.9	1.5	0.0	7.5	0.5	0.0	10.2	0.8	0.0	7.8	0.3	0.0
		1000	4.5	1.5	-0.1	4.2	1.6	-0.2	8.0	0.5	0.0	10.7	0.7	0.0	8.1	0.1	0.0
		10000	5.0	1.7	-0.3	4.6	1.8	-0.5	8.6	0.6	0.0	11.2	0.7	0.0	8.6	0.2	0.0
Extreem	2050	100	3.0	0.1	0.0	2.5	0.1	0.0	7.3	0.3	0.0	9.9	0.5	0.0	7.9	0.4	0.0
		1000	3.2	0.1	0.0	2.7	0.1	-0.1	7.9	0.4	0.0	10.5	0.5	0.0	8.4	0.4	0.0
		10000	3.5	0.2	-0.2	3.0	0.2	-0.2	8.6	0.6	0.0	11.0	0.5	0.0	8.9	0.4	0.0
	2100	100	3.4	0.5	-0.1	3.1	0.7	-0.2	7.6	0.7	0.0	10.6	1.2	0.0	7.9	0.4	0.0
		1000	3.8	0.7	-0.2	3.5	0.9	-0.4	8.4	0.9	0.0	11.2	1.2	0.0	8.5	0.5	0.0
		10000	4.2	0.9	-0.4	3.9	1.1	-0.6	9.4	1.4	0.0	11.7	1.2	0.0	9.1	0.7	0.0
	2150	100	4.3	1.4	0.0	3.9	1.6	0.0	7.9	1.0	0.0	10.9	1.5	0.0	8.3	0.8	0.0
		1000	4.5	1.5	-0.1	4.2	1.6	-0.2	8.8	1.3	0.0	11.5	1.5	0.0	8.9	0.9	0.0
		10000	5.0	1.7	-0.3	4.7	1.8	-0.5	9.8	1.8	0.0	11.9	1.4	0.0	9.4	1.0	0.0
	2200	100	5.5	2.7	0.0	5.2	2.8	0.0	8.3	1.4	0.0	11.3	1.9	0.0	8.8	1.2	0.0
		1000	5.8	2.7	-0.1	5.4	2.9	-0.2	9.3	1.8	0.0	11.8	1.8	0.0	9.4	1.3	0.0
		10000	6.2	2.9	-0.3	5.9	3.1	-0.5	10.3	2.4	0.0	12.2	1.7	0.0	9.8	1.3	0.0
Zeer Extreem	2050	100	3.1	0.2	0.0	2.6	0.3	0.0	7.3	0.4	0.0	10.1	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0
		1000	3.3	0.2	-0.1	2.9	0.3	-0.2	7.9	0.4	0.0	10.7	0.7	0.0	8.0	0.0	0.0
		10000	3.7	0.4	-0.3	3.3	0.5	-0.4	8.6	0.7	0.0	11.2	0.7	0.0	8.5	0.1	0.0
	2100	100	4.3	1.5	0.0	4.0	1.6	-0.1	7.8	0.9	0.0	10.7	1.4	0.0	8.1	0.6	0.0
		1000	4.6	1.5	-0.1	4.3	1.7	-0.2	8.6	1.1	0.0	11.3	1.3	0.0	8.7	0.7	0.0
		10000	5.1	1.7	-0.4	4.7	1.9	-0.5	9.5	1.5	0.0	11.8	1.2	0.0	9.2	0.8	0.0
	2150	100	5.7	2.8	0.0	5.3	2.9	-0.1	8.3	1.4	0.0	11.1	1.8	0.0	8.6	1.1	0.0
		1000	6.0	2.9	-0.2	5.7	3.1	-0.3	9.1	1.6	0.0	11.7	1.7	0.0	9.2	1.2	0.0
		10000	6.6	3.2	-0.5	6.2	3.4	-0.7	10.1	2.1	-0.1	12.2	1.7	0.0	9.7	1.3	0.0
	2200	100	7.0	4.1	-0.7	6.6	4.2	-0.9	8.9	1.9	-0.4	11.6	2.3	-0.3	9.2	1.7	-0.3
		1000	7.5	4.4	-0.7	7.0	4.4	-1.0	9.8	2.2	-0.3	12.2	2.2	-0.2	9.8	1.8	-0.3
		10000	8.0	4.6	-0.7	7.5	4.7	-1.0	10.7	2.7	-0.2	12.6	2.0	-0.2	10.2	1.8	-0.3

C.6 Resultaat pakket M: theoretisch maximum systeemmaatregelen

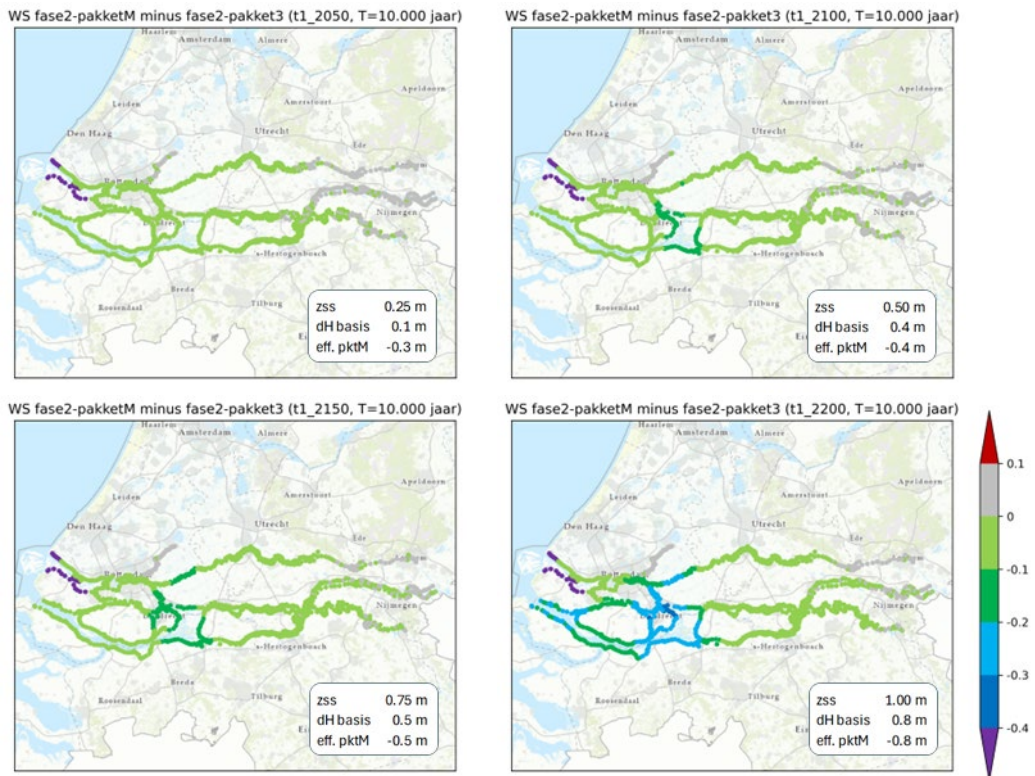
Om inzichtelijk te maken wat de bandbreedte van systeemmaatregelen is, hebben we met een fictief maatregelpakket onderzocht, wat het theoretisch maximale effect van systeemmaatregelen is op de waterstanden bij een gesloten Europoortkering (ongeacht welke maatregelen dat precies zijn en de haalbaarheid daarvan). Dit *fictieve* maatregelpakket hebben we pakket M genoemd en in bijlage B.4 zijn de uitgangspunten van deze berekening toegelicht. In Figuur 71 t/m Figuur 74 wordt een ruimtelijk beeld getoond van het verschil in de T10000 waterstand tussen de pakket M en pakket 3 voor alle tijdlijn en alle zichtjaren. In Tabel 22 is het Hydra-NL resultaat van de berekening van maatregelpakket M samengevat vergelijkbaar als in Tabel 18, Tabel 19 en Tabel 20. Door realisatie van dit fictief maximum van mogelijke maatregelen lukt het om in 2050 100% van de toename van de T10000 waterstand van de basissituatie in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsch Diep te voorkomen. Realisatie van dit fictief maximum voorkomt in 2200 15% (tijdlijn Extreem) tot 100% (tijdlijn Laag) van de toename.

In Tabel 21 wordt ingezoomd op de maximale reductie van de waterstandstoename tussen de referentie en de basis als dit fictieve maatregelenpakket zou kunnen worden gerealiseerd. Op de rivieren hebben de onderzochte maatregelen geen of nauwelijks effect, daarom is in de tabel ingezoomd op deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsch Diep. Het lijkt erop dat van de autonome van de waterstand door klimaatontwikkeling in basissituatie, ongeveer een meter kan worden voorkomen door systeemmaatregelen. Hierbij wordt het berekende effect van zichtjaar 2200 in tijdlijn Zeer Extreem buiten beschouwing gelaten, omdat het resultaat van deze berekening afwijkt van de andere de zichtjaren en dat deze berekening een aanzienlijk geëxtrapoleerde situatie is van de van SOBEK3 berekende situaties.

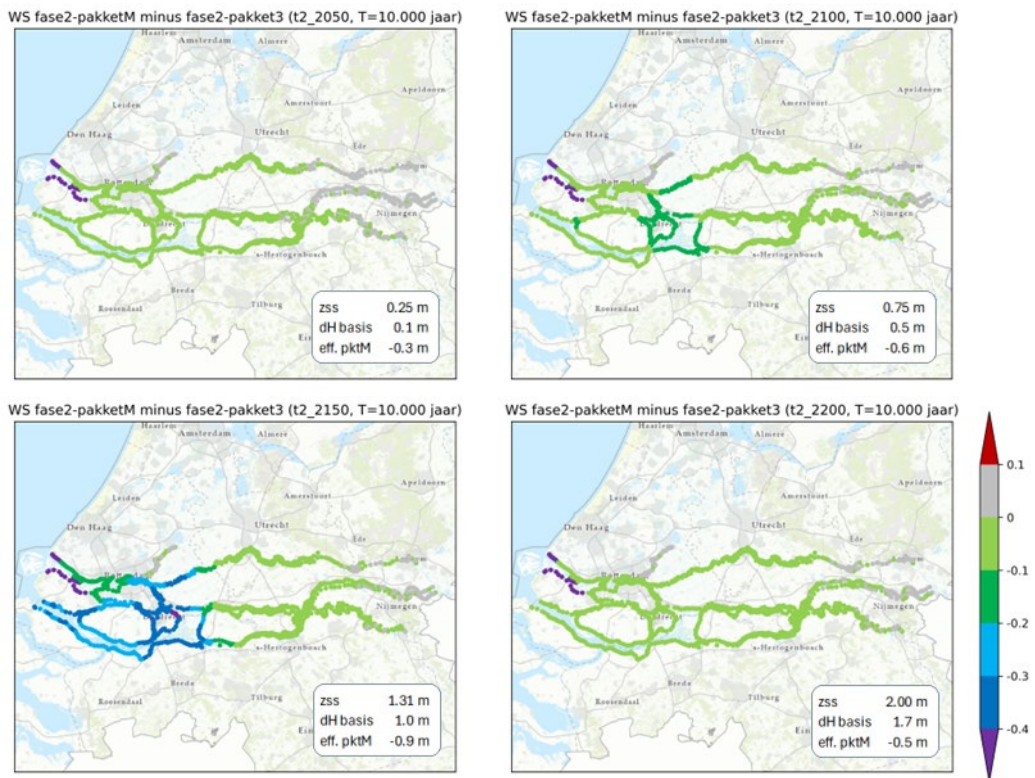
In het kader op de geografische overzichten in Figuur 71 t/m Figuur 74 geeft de zeespiegelstijging opgelegd in de Hydra-NL berekening, de gemiddelde toename in beide deelgebieden voor het gepresenteerd zichtjaar van de basissituatie en reductie van deze toename die berekend is met pakket M. De gevoeligheidsanalyse van het sluitpeil van de EPK toont aan dat de berekende reductie mogelijk met 0,4-0,8 m kan worden vergroot. Hierbij is het van belang de betrouwbaarheid van de EPK aanzienlijk te vergroten en het oplopen van de waterstand achter een gesloten EPK aanzienlijk te voorkomen.

Tabel 21: Samenvatting van Hydra-NL resultaat pakket M: verschil in waterstand (T10000) als gemiddelde per deelgebied RDST en HVHD.

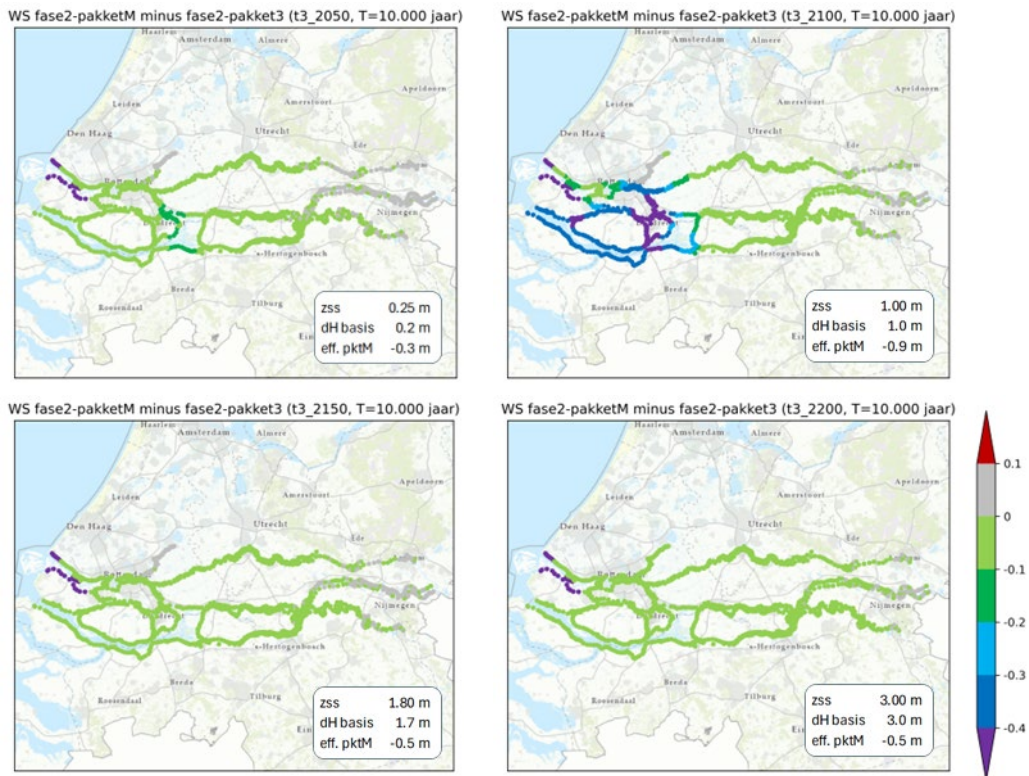
Tijdlijn	Herh. tijd (jaar)	Rijnmond-Drechtsteden			Haringvliet - Hollandsch Diep			
		basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pktM - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pktM - basis (m)	
ref. 2023	10000	3.3	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	
t1	2050	10000	3.5	0.1	-0.3	2.9	0.1	-0.2
	2100	10000	3.7	0.3	-0.5	3.2	0.4	-0.4
	2150	10000	3.8	0.5	-0.6	3.3	0.5	-0.5
	2200	10000	4.1	0.7	-0.8	3.6	0.8	-0.7
t2	2050	10000	3.5	0.1	-0.3	2.9	0.1	-0.2
	2100	10000	3.8	0.5	-0.6	3.4	0.6	-0.5
	2150	10000	4.3	1.0	-0.9	3.8	1.0	-0.9
	2200	10000	5.0	1.7	-0.5	4.6	1.8	-0.5
t3	2050	10000	3.5	0.2	-0.3	3.0	0.2	-0.3
	2100	10000	4.2	0.9	-0.8	3.9	1.1	-0.9
	2150	10000	5.0	1.7	-0.5	4.7	1.8	-0.5
	2200	10000	6.2	2.9	-0.5	5.9	3.1	-0.5
t4	2050	10000	3.7	0.4	-0.5	3.3	0.5	-0.5
	2100	10000	5.1	1.7	-0.6	4.7	1.9	-0.6
	2150	10000	6.6	3.2	-0.7	6.2	3.4	-0.7
	2200	10000	8.0	4.6	-1.8	7.5	4.7	-1.9



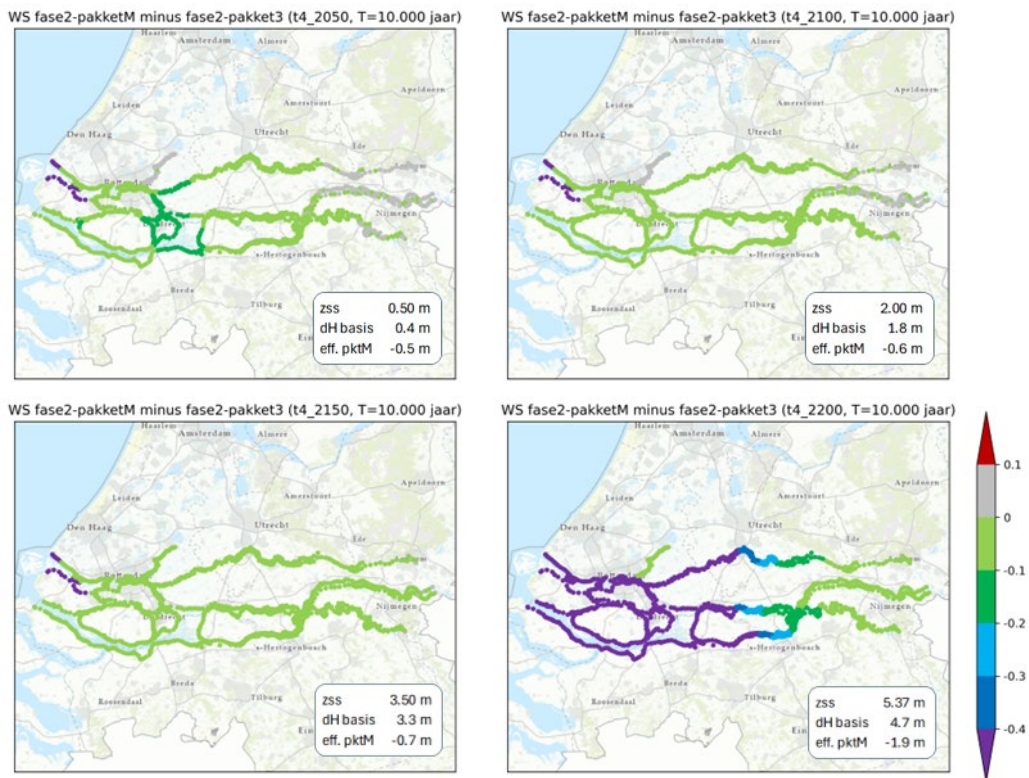
Figuur 71: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket M en 3 voor tijdlijn Laag (zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200) – legenda zie tekst



Figuur 72: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket M en 3 voor tijdlijn Gematigd (zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200) – legenda zie tekst.



Figuur 73: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket M en 3 voor tijdlijn Extreem (zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200) – legenda zie tekst



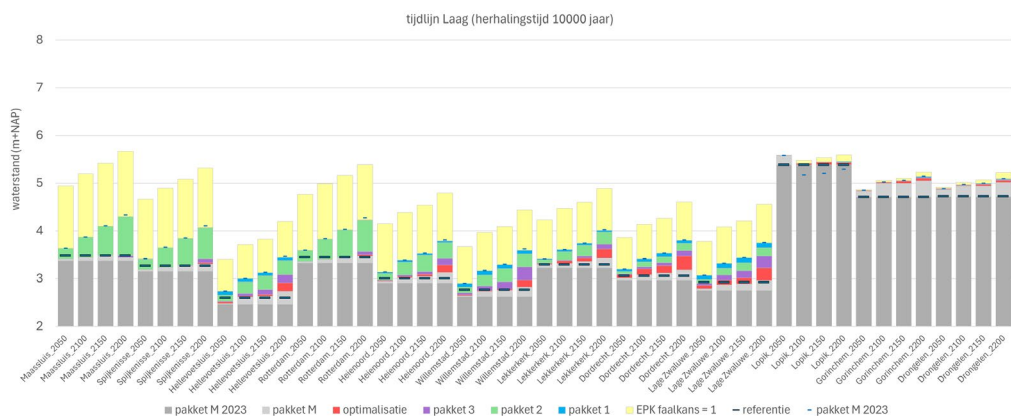
Figuur 74: Verschil in waterstand T10.000 jaar tussen maatregelpakket M en 3 voor tijdlijn Zeer extreem (zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200)

Tabel 22: Overzicht van Hydra-NL resultaat pakket M: verschil in waterstand (T100, T1000 en T10000) als gem. per deelgebied RDST, HVHD, Maas, Waal en NRLK.

Tijdlijn	Herf. tijd	Rijnmond-Drechtsteden			Haringvliet - Hollandsch Diep			Maas			Waal			Neder Rijn - Lek				
		basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pktM - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pktM - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pktM - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pktM - basis (m)	basis (m+NAP)	verschil basis - ref. (m)	verschil pktM - basis (m)		
referentie	100	2.9	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	6.9	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0		
	2023	1000	3.1	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	
	10000	3.3	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	8.4	0.0	0.0		
	Laag	2050	100	2.9	0.1	-0.1	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0
		1000	3.1	0.1	-0.1	2.7	0.1	-0.1	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0	
		10000	3.5	0.1	-0.3	2.9	0.1	-0.2	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0	
		2100	100	3.0	0.2	-0.1	2.6	0.2	0.0	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0
		1000	3.3	0.2	-0.2	2.8	0.3	-0.2	7.7	0.1	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0	
		10000	3.7	0.3	-0.5	3.2	0.4	-0.4	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0	
2150		100	3.1	0.3	-0.1	2.7	0.3	-0.1	7.1	0.2	0.0	9.8	0.5	0.0	7.5	-0.1	0.0	
1000		3.4	0.3	-0.2	3.0	0.4	-0.2	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0		
10000		3.8	0.5	-0.6	3.3	0.5	-0.5	8.2	0.2	0.0	10.9	0.4	0.0	8.2	-0.2	0.0		
2200	100	3.2	0.4	-0.2	2.9	0.5	-0.2	7.1	0.2	0.0	9.9	0.5	0.0	7.5	0.0	0.0		
1000	3.6	0.6	-0.4	3.3	0.7	-0.5	7.7	0.2	0.0	10.4	0.4	0.0	7.8	-0.2	0.0			
10000	4.1	0.7	-0.8	3.6	0.8	-0.7	8.3	0.3	0.0	10.9	0.4	0.0	8.3	-0.2	0.0			
Gematigd	2050	100	2.9	0.1	-0.1	2.4	0.1	0.0	7.0	0.1	0.0	9.6	0.2	0.0	7.7	0.2	0.0	
	1000	3.1	0.1	-0.1	2.7	0.1	-0.1	7.6	0.1	0.0	10.2	0.2	0.0	8.2	0.1	0.0		
	10000	3.5	0.1	-0.3	2.9	0.1	-0.2	8.2	0.2	0.0	10.7	0.2	0.0	8.6	0.2	0.0		
	2100	100	3.1	0.3	-0.1	2.7	0.3	-0.1	7.2	0.3	0.0	10.0	0.6	0.0	7.5	0.0	0.0	
	1000	3.4	0.3	-0.3	3.0	0.4	-0.3	7.7	0.2	0.0	10.6	0.6	0.0	7.9	-0.2	0.0		
	10000	3.8	0.5	-0.6	3.4	0.6	-0.5	8.4	0.4	0.0	11.0	0.5	0.0	8.3	-0.1	0.0		
	2150	100	3.4	0.6	-0.3	3.1	0.7	-0.4	7.3	0.4	-0.1	10.0	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0	
	1000	3.8	0.8	-0.6	3.5	0.9	-0.6	7.8	0.3	-0.1	10.6	0.6	0.0	8.0	-0.1	-0.1		
	10000	4.3	1.0	-0.9	3.8	1.0	-0.9	8.5	0.5	-0.1	11.1	0.6	0.0	8.4	0.0	-0.1		
2200	100	4.3	1.5	-0.1	3.9	1.5	0.0	7.5	0.5	0.0	10.2	0.8	0.0	7.8	0.3	0.0		
1000	4.5	1.5	-0.2	4.2	1.6	-0.2	8.0	0.5	0.0	10.7	0.7	0.0	8.1	0.1	0.0			
10000	5.0	1.7	-0.5	4.6	1.8	-0.5	8.6	0.6	0.0	11.2	0.7	0.0	8.6	0.2	0.0			
Extreem	2050	100	3.0	0.1	-0.1	2.5	0.1	0.0	7.3	0.3	0.0	9.9	0.5	0.0	7.9	0.4	0.0	
	1000	3.2	0.1	-0.1	2.7	0.1	-0.1	7.9	0.4	0.0	10.5	0.5	0.0	8.4	0.4	0.0		
	10000	3.5	0.2	-0.3	3.0	0.2	-0.3	8.6	0.6	0.0	11.0	0.5	0.0	8.9	0.4	0.0		
	2100	100	3.4	0.5	-0.2	3.1	0.7	-0.3	7.6	0.7	0.0	10.6	1.2	0.0	7.9	0.4	0.0	
	1000	3.8	0.7	-0.5	3.5	0.9	-0.6	8.4	0.9	0.0	11.2	1.2	0.0	8.5	0.5	0.0		
	10000	4.2	0.9	-0.8	3.9	1.1	-0.9	9.4	1.4	0.0	11.7	1.2	0.0	9.1	0.7	0.0		
	2150	100	4.3	1.4	-0.1	3.9	1.6	-0.1	7.9	1.0	0.0	10.9	1.5	0.0	8.3	0.8	0.0	
	1000	4.5	1.5	-0.2	4.2	1.6	-0.2	8.8	1.3	0.0	11.5	1.5	0.0	8.9	0.9	0.0		
	10000	5.0	1.7	-0.5	4.7	1.8	-0.5	9.8	1.8	0.0	11.9	1.4	0.0	9.4	1.0	0.0		
2200	100	5.5	2.7	-0.1	5.2	2.8	0.0	8.3	1.4	0.0	11.3	1.9	0.0	8.8	1.2	0.0		
1000	5.8	2.7	-0.2	5.4	2.9	-0.2	9.3	1.8	0.0	11.8	1.8	0.0	9.4	1.3	0.0			
10000	6.2	2.9	-0.5	5.9	3.1	-0.5	10.3	2.4	0.0	12.2	1.7	0.0	9.8	1.3	0.0			
Zeer Extreem	2050	100	3.1	0.2	-0.1	2.6	0.3	-0.1	7.3	0.4	0.0	10.1	0.7	0.0	7.6	0.1	0.0	
	1000	3.3	0.2	-0.2	2.9	0.3	-0.2	7.9	0.4	0.0	10.7	0.7	0.0	8.0	0.0	0.0		
	10000	3.7	0.4	-0.5	3.3	0.5	-0.5	8.6	0.7	0.0	11.2	0.7	0.0	8.5	0.1	0.0		
	2100	100	4.3	1.5	-0.1	4.0	1.6	-0.1	7.8	0.9	0.0	10.7	1.4	0.0	8.1	0.6	0.0	
	1000	4.6	1.5	-0.2	4.3	1.7	-0.2	8.6	1.1	0.0	11.3	1.3	0.0	8.7	0.7	0.0		
	10000	5.1	1.7	-0.6	4.7	1.9	-0.6	9.5	1.5	0.0	11.8	1.2	0.0	9.2	0.8	0.0		
	2150	100	5.7	2.8	-0.1	5.3	2.9	-0.1	8.3	1.4	0.0	11.1	1.8	0.0	8.6	1.1	0.0	
	1000	6.0	2.9	-0.3	5.7	3.1	-0.3	9.1	1.6	-0.1	11.7	1.7	0.0	9.2	1.2	0.0		
	10000	6.6	3.2	-0.7	6.2	3.4	-0.7	10.1	2.1	-0.1	12.2	1.7	-0.1	9.7	1.3	-0.1		
2200	100	7.0	4.1	-1.1	6.6	4.2	-1.3	8.9	1.9	-0.6	11.6	2.3	-0.4	9.2	1.7	-0.5		
1000	7.5	4.4	-1.4	7.0	4.4	-1.6	9.8	2.2	-0.5	12.2	2.2	-0.4	9.8	1.8	-0.5			
10000	8.0	4.6	-1.8	7.5	4.7	-1.9	10.7	2.7	-0.5	12.6	2.0	-0.4	10.2	1.8	-0.5			

C.7 Effect maatregelen op klimaatopgave

In deze paragraaf geven we een overzicht van de berekeningsresultaten op 12 locaties in het studiegebied (Figuur 9) voor de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer extreem. De resultaten zijn in hoofdstuk 3.4 nader toegelicht.



Figuur 75: Resultaten voor de onderzochte locaties in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet – Hollandsch Diep voor zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 van tijdlijn Laag: waterstand T10000.

Tabel 23: Hydra-NL resultaat voor 2050 in tijdlijn Laag: waterstand T10000.

2050	referen- tie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	4.9
Spijkenisse	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.4	3.4	4.7
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.7	2.7	3.4
Rotterdam	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	4.8
Heienoord	3.0	2.9	2.9	3.0	3.0	3.1	3.1	4.2
Willemstad	2.8	2.6	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	3.7
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.3	3.3	3.3	3.4	3.4	4.2
Dordrecht	3.1	3.0	3.0	3.1	3.1	3.2	3.2	3.9
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1	3.8
Lopik	5.4	5.4	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
Gorinchem	4.7	4.7	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9
Drongelen	4.7	4.7	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9

Tabel 24: Hydra-NL resultaat voor 2100 in tijdlijn Laag: waterstand T10000.

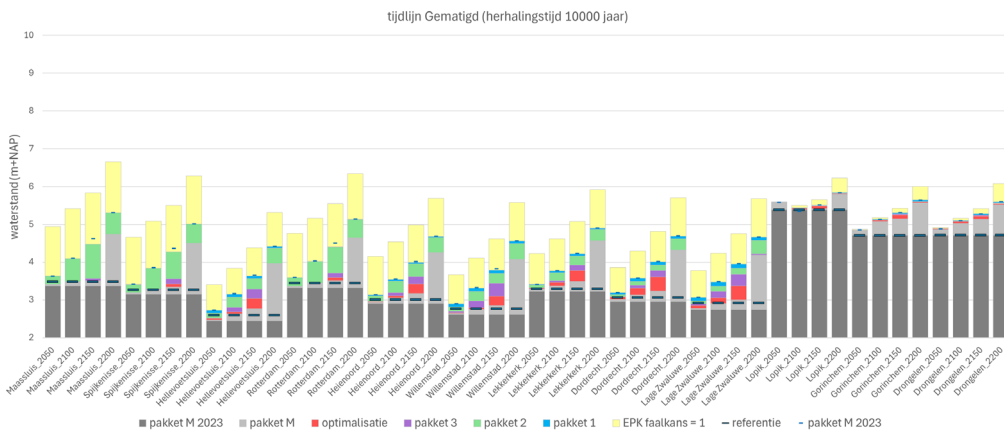
2100	referen- tie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.9	3.9	5.2
Spijkenisse	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.7	3.7	4.9
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.6	2.6	2.7	2.9	3.0	3.7
Rotterdam	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	3.8	3.8	5.0
Heienoord	3.0	2.9	3.0	3.1	3.1	3.4	3.4	4.4
Willemstad	2.8	2.6	2.7	2.8	2.8	3.1	3.2	4.0
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.3	3.4	3.4	3.6	3.6	4.5
Dordrecht	3.1	3.0	3.1	3.2	3.2	3.4	3.4	4.1
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	4.1
Lopik	5.4	5.4	5.1	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
Gorinchem	4.7	4.7	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1
Drongelen	4.7	4.7	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

Tabel 25: Hydra-NL resultaat voor 2150 in tijdlijn Laag: waterstand T10000.

2150	referen- tie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.5	3.5	3.5	4.1	4.1	5.4
Spijkenisse	3.3	3.2	3.3	3.3	3.3	3.9	3.9	5.1
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.6	2.7	2.8	3.1	3.1	3.8
Rotterdam	3.4	3.3	3.4	3.5	3.5	4.0	4.0	5.2
Heienoord	3.0	2.9	3.1	3.1	3.2	3.5	3.5	4.5
Willemstad	2.8	2.6	2.8	2.8	2.9	3.2	3.3	4.1
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.4	3.4	3.5	3.7	3.7	4.6
Dordrecht	3.1	3.0	3.1	3.3	3.3	3.5	3.5	4.3
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	2.9	3.0	3.2	3.3	3.4	4.2
Lopik	5.4	5.4	5.1	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3
Gorinchem	4.7	4.7	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1	5.1
Drongelen	4.7	4.7	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1

Tabel 26: Hydra-NL resultaat voor 2200 in tijdlijn Laag: waterstand T10000.

2200	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.4	3.5	3.5	4.3	4.3	5.7
Spijkensisse	3.3	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.1	5.4
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.7	2.9	3.1	3.4	3.5	4.2
Rotterdam	3.4	3.3	3.5	3.5	3.6	4.3	4.3	5.4
Heienoord	3.0	2.9	3.1	3.3	3.4	3.8	3.8	4.8
Willemstad	2.8	2.6	2.8	3.0	3.3	3.5	3.6	4.5
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.4	3.6	3.7	4.0	4.0	4.9
Dordrecht	3.1	3.0	3.2	3.5	3.6	3.7	3.8	4.6
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	3.0	3.2	3.5	3.7	3.8	4.6
Lopik	5.4	5.4	5.2	5.3	5.3	5.3	5.3	5.4
Gorinchem	4.7	4.7	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.2
Drongelen	4.7	4.7	5.0	5.1	5.1	5.1	5.1	5.2



Figuur 76: Resultaten voor de onderzochte locaties in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet – Hollandsch Diep voor zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 van tijdlijn Gematigd: waterstand T10000.

Tabel 27: Hydra-NL resultaat voor 2050 in tijdlijn Gematigd: waterstand T10000.

2050	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	4.9
Spijkensisse	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.4	3.4	4.7
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.7	2.7	3.4
Rotterdam	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	4.8
Heienoord	3.0	2.9	2.9	3.0	3.0	3.1	3.1	4.2
Willemstad	2.8	2.6	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	3.7
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.3	3.3	3.3	3.4	3.4	4.2
Dordrecht	3.1	3.0	3.0	3.1	3.1	3.2	3.2	3.9
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1	3.8
Lopik	5.4	5.4	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
Gorinchem	4.7	4.7	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9
Drongelen	4.7	4.7	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9

Tabel 28: Hydra-NL resultaat voor 2100 in tijdlijn Gematigd: waterstand T10000.

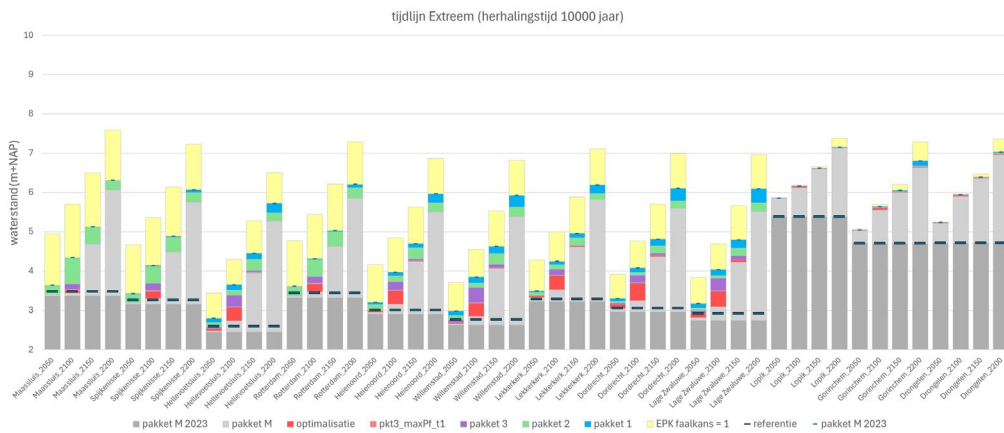
2100	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.5	3.5	3.5	4.1	4.1	5.4
Spijkenisse	3.3	3.2	3.3	3.3	3.3	3.9	3.9	5.1
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.6	2.7	2.8	3.1	3.2	3.9
Rotterdam	3.4	3.3	3.4	3.5	3.5	4.0	4.0	5.2
Heinoord	3.0	2.9	3.1	3.1	3.2	3.5	3.6	4.5
Willemstad	2.8	2.6	2.8	2.8	3.0	3.2	3.3	4.1
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.4	3.5	3.5	3.7	3.8	4.6
Dordrecht	3.1	3.0	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	4.3
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	2.9	3.1	3.2	3.4	3.5	4.2
Lopik	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.4
Gorinchem	4.7	4.7	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.2
Drongelen	4.7	4.7	5.0	5.1	5.1	5.1	5.1	5.2

Tabel 29: Hydra-NL resultaat voor 2150 in tijdlijn Gematigd: waterstand T10000.

2150	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.5	3.7	3.7	4.6	4.6	6.0
Spijkenisse	3.3	3.2	3.3	3.5	3.7	4.4	4.4	5.6
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.8	3.1	3.3	3.6	3.7	4.4
Rotterdam	3.4	3.3	3.5	3.7	3.8	4.5	4.5	5.7
Heinoord	3.0	2.9	3.2	3.5	3.6	4.0	4.0	5.0
Willemstad	2.8	2.6	2.9	3.1	3.5	3.7	3.8	4.7
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.5	3.8	3.9	4.2	4.2	5.1
Dordrecht	3.1	3.0	3.2	3.6	3.8	3.9	4.0	4.8
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	3.0	3.4	3.7	3.9	4.0	4.8
Lopik	5.4	5.4	5.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.7
Gorinchem	4.7	4.7	5.1	5.2	5.3	5.3	5.3	5.4
Drongelen	4.7	4.7	5.1	5.2	5.2	5.2	5.3	5.4

Tabel 30: Hydra-NL resultaat voor 2200 in tijdlijn Gematigd: waterstand T10000.

2200	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	4.7	4.7	4.7	5.3	5.3	6.7
Spijkenisse	3.3	3.2	4.5	4.5	4.5	5.0	5.0	6.3
Hellevoetsluis	2.6	2.5	4.0	4.0	4.0	4.4	4.4	5.3
Rotterdam	3.4	3.3	4.6	4.7	4.7	5.1	5.1	6.3
Heinoord	3.0	2.9	4.2	4.3	4.3	4.7	4.7	5.7
Willemstad	2.8	2.6	4.1	4.1	4.1	4.5	4.6	5.6
Lekkerkerk	3.3	3.2	4.6	4.6	4.6	4.9	4.9	5.9
Dordrecht	3.1	3.0	4.3	4.3	4.3	4.6	4.7	5.7
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	4.2	4.2	4.2	4.6	4.7	5.7
Lopik	5.4	5.4	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	6.2
Gorinchem	4.7	4.7	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	6.0
Drongelen	4.7	4.7	5.5	5.6	5.6	5.6	5.6	6.1



Figuur 77: Resultaten voor de onderzochte locaties in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet – Hollandsch Diep voor zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 van tijdlijn Extreem: waterstand T10000.

Tabel 31: Hydra-NL resultaat voor 2050 in tijdlijn Extreem: waterstand T10000.

2050	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkn = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	4.9
Spijkenisse	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.4	3.4	4.7
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	3.4
Rotterdam	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	4.8
Heinoord	3.0	2.9	3.0	3.0	3.0	3.2	3.2	4.2
Willemstad	2.8	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	3.0	3.7
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.3	3.4	3.4	3.5	3.5	4.3
Dordrecht	3.1	3.0	3.0	3.2	3.2	3.2	3.3	3.9
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.8
Lopik	5.4	5.4	5.8	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
Gorinchem	4.7	4.7	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1
Drongelen	4.7	4.7	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2

Tabel 32: Hydra-NL resultaat voor 2100 in tijdlijn Extreem: waterstand T10000.

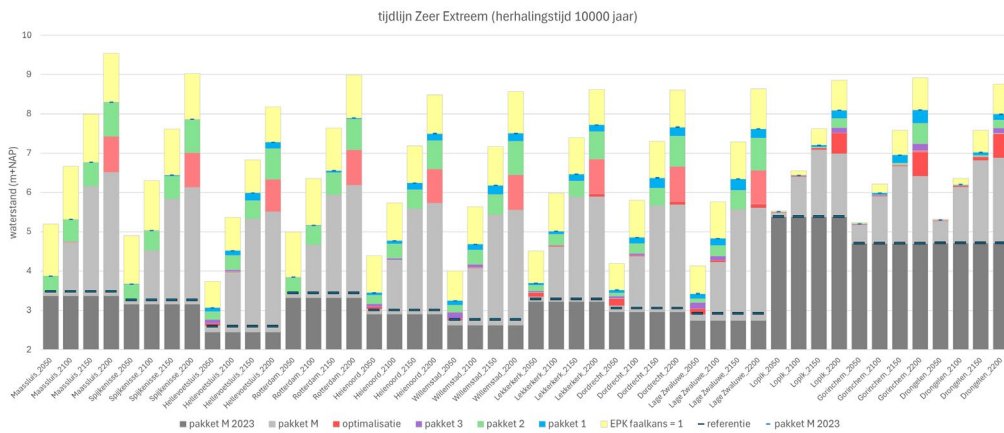
2100	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkn = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.4	3.5	3.7	4.3	4.3	5.7
Spijkenisse	3.3	3.2	3.3	3.5	3.7	4.1	4.1	5.4
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.7	3.1	3.4	3.5	3.7	4.3
Rotterdam	3.4	3.3	3.5	3.7	3.9	4.3	4.3	5.4
Heinoord	3.0	2.9	3.2	3.5	3.7	3.9	4.0	4.8
Willemstad	2.8	2.6	2.8	3.2	3.6	3.7	3.8	4.6
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.5	3.9	4.1	4.2	4.3	5.0
Dordrecht	3.1	3.0	3.3	3.7	3.9	4.0	4.1	4.8
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	3.1	3.5	3.8	3.9	4.0	4.7
Lopik	5.4	5.4	6.1	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
Gorinchem	4.7	4.7	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.7
Drongelen	4.7	4.7	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	6.0

Tabel 33: Hydra-NL resultaat voor 2150 in tijdlijn Extreem: waterstand T10000.

2150	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	4.7	4.7	4.7	5.1	5.1	6.5
Spijkenisse	3.3	3.2	4.5	4.5	4.5	4.9	4.9	6.1
Hellevoetsluis	2.6	2.5	3.9	4.0	4.0	4.3	4.5	5.3
Rotterdam	3.4	3.3	4.6	4.6	4.6	5.0	5.0	6.2
Heinoord	3.0	2.9	4.2	4.3	4.3	4.6	4.7	5.6
Willemstad	2.8	2.6	4.1	4.1	4.2	4.4	4.6	5.5
Lekkerkerk	3.3	3.2	4.6	4.6	4.7	4.9	5.0	5.9
Dordrecht	3.1	3.0	4.4	4.4	4.5	4.6	4.8	5.7
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	4.2	4.3	4.4	4.6	4.8	5.7
Lopik	5.4	5.4	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.7
Gorinchem	4.7	4.7	6.0	6.0	6.0	6.0	6.1	6.2
Drongelen	4.7	4.7	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.5

Tabel 34: Hydra-NL resultaat voor 2200 in tijdlijn Extreem: waterstand T10000.

2200	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	6.1	6.1	6.1	6.3	6.3	7.6
Spijkenisse	3.3	3.2	5.7	5.7	5.7	6.0	6.1	7.2
Hellevoetsluis	2.6	2.5	5.3	5.3	5.3	5.5	5.7	6.5
Rotterdam	3.4	3.3	5.9	5.9	5.9	6.1	6.2	7.3
Heinoord	3.0	2.9	5.5	5.5	5.5	5.7	6.0	6.9
Willemstad	2.8	2.6	5.4	5.4	5.4	5.6	5.9	6.8
Lekkerkerk	3.3	3.2	5.8	5.8	5.8	6.0	6.2	7.1
Dordrecht	3.1	3.0	5.6	5.6	5.6	5.8	6.1	7.0
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	5.5	5.5	5.5	5.7	6.1	7.0
Lopik	5.4	5.4	7.1	7.1	7.1	7.1	7.2	7.4
Gorinchem	4.7	4.7	6.6	6.7	6.7	6.7	6.8	7.3
Drongelen	4.7	4.7	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.4



Figuur 78: Resultaten voor de onderzochte locaties in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet – Hollandsch Diep voor zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 van tijdlijn Zeer extreem: waterstand T10000.

Tabel 35: Hydra-NL resultaat voor 2050 in tijdlijn Zeer extreem: waterstand T10000.

2050	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkn = 1
Maassluis	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.9	3.9	5.2
Spijkenisse	3.3	3.2	3.2	3.2	3.3	3.7	3.7	4.9
Hellevoetsluis	2.6	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1	3.7
Rotterdam	3.4	3.3	3.4	3.4	3.4	3.8	3.8	5.0
Heienoord	3.0	2.9	3.0	3.1	3.2	3.4	3.4	4.4
Willemstad	2.8	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1	3.2	4.0
Lekkerkerk	3.3	3.2	3.3	3.5	3.5	3.6	3.7	4.5
Dordrecht	3.1	3.0	3.1	3.3	3.4	3.4	3.5	4.2
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	2.9	3.0	3.2	3.3	3.4	4.1
Lopik	5.4	5.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
Gorinchem	4.7	4.7	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
Drongelen	4.7	4.7	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3

Tabel 36: Hydra-NL resultaat voor 2100 in tijdlijn Zeer extreem: waterstand T10000.

2100	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkn = 1
Maassluis	3.5	3.4	4.7	4.7	4.7	5.3	5.3	6.7
Spijkenisse	3.3	3.2	4.5	4.5	4.5	5.0	5.0	6.3
Hellevoetsluis	2.6	2.5	4.0	4.0	4.0	4.4	4.5	5.4
Rotterdam	3.4	3.3	4.7	4.7	4.7	5.2	5.2	6.4
Heienoord	3.0	2.9	4.3	4.3	4.3	4.7	4.8	5.7
Willemstad	2.8	2.6	4.1	4.1	4.2	4.5	4.7	5.6
Lekkerkerk	3.3	3.2	4.6	4.6	4.7	4.9	5.0	6.0
Dordrecht	3.1	3.0	4.4	4.4	4.4	4.7	4.9	5.8
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	4.2	4.3	4.4	4.7	4.8	5.8
Lopik	5.4	5.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.6
Gorinchem	4.7	4.7	5.9	5.9	5.9	5.9	6.0	6.2
Drongelen	4.7	4.7	6.1	6.2	6.2	6.2	6.2	6.4

Tabel 37: Hydra-NL resultaat voor 2150 in tijdlijn Zeer extreem: waterstand T10000.

2150	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	6.2	6.2	6.2	6.8	6.8	8.0
Spijkenisse	3.3	3.2	5.8	5.8	5.8	6.4	6.4	7.6
Hellevoetsluis	2.6	2.5	5.3	5.3	5.3	5.8	6.0	6.8
Rotterdam	3.4	3.3	5.9	5.9	5.9	6.5	6.6	7.6
Heienoord	3.0	2.9	5.6	5.6	5.6	6.1	6.2	7.2
Willemstad	2.8	2.6	5.4	5.4	5.4	5.9	6.2	7.2
Lekkerkerk	3.3	3.2	5.9	5.9	5.9	6.3	6.5	7.4
Dordrecht	3.1	3.0	5.7	5.7	5.7	6.1	6.4	7.3
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	5.6	5.6	5.6	6.1	6.3	7.3
Lopik	5.4	5.4	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.6
Gorinchem	4.7	4.7	6.7	6.7	6.7	6.7	7.0	7.6
Drongelen	4.7	4.7	6.8	6.9	6.9	6.9	7.0	7.6

Tabel 38: Hydra-NL resultaat voor 2200 in tijdlijn Zeer extreem: waterstand T10000.

2200	referentie	pakket M 2023	pakket M	pakket 3	pakket 2	pakket 1	basis	EPK fkns = 1
Maassluis	3.5	3.4	6.5	7.4	7.4	8.3	8.3	9.5
Spijkenisse	3.3	3.2	6.1	7.0	7.0	7.8	7.9	9.0
Hellevoetsluis	2.6	2.5	5.5	6.3	6.3	7.1	7.3	8.2
Rotterdam	3.4	3.3	6.2	7.1	7.1	7.9	7.9	9.0
Heienoord	3.0	2.9	5.7	6.6	6.6	7.3	7.5	8.5
Willemstad	2.8	2.6	5.6	6.5	6.5	7.3	7.5	8.6
Lekkerkerk	3.3	3.2	5.9	6.9	6.9	7.5	7.7	8.6
Dordrecht	3.1	3.0	5.7	6.7	6.7	7.4	7.7	8.6
Lage Zwaluwe	2.9	2.7	5.6	6.6	6.6	7.4	7.6	8.6
Lopik	5.4	5.4	7.0	7.5	7.6	7.9	8.1	8.9
Gorinchem	4.7	4.7	6.4	7.1	7.2	7.8	8.1	8.9
Drongelen	4.7	4.7	6.9	7.5	7.6	7.8	8.0	8.8

Bijlage D Extra berging op Oosterschelde

Naast berging op het Volkerak-Zoommeer en extra berging op de Grevelingen (maatregelpakket 1, 2 en 3), is onderzocht wat het effect is van de inzet van nog meer berging in de Zuid-Westelijke Delta, namelijk op de Oosterschelde. De enige logische manier om op de berging op de Oosterschelde af te voeren is via de Krammersluizen (Figuur 79). De benodigde databases fysica voor het uitvoeren van probabilistische berekeningen zijn niet beschikbaar. Wel zijn hydraulische berekeningsresultaten beschikbaar. De complexiteit en omvang van de benodigde controle (om die databases aan te maken) is groot en staat niet in verhouding tot de analyses die voor de rest van de Rijn-Maasmonding zijn uitgevoerd. Daarom is voor de beantwoording van deze onderzoeksvraag gekozen voor een eenvoudige, aanvullende analyse. Op een kwalitatieve manier is onderzocht wat het effect is van extra berging op de waterstanden, kruinhoogten en kosten in het RMM-gebied (daarbij is gebruik gemaakt van de beschikbare, berekende informatie).



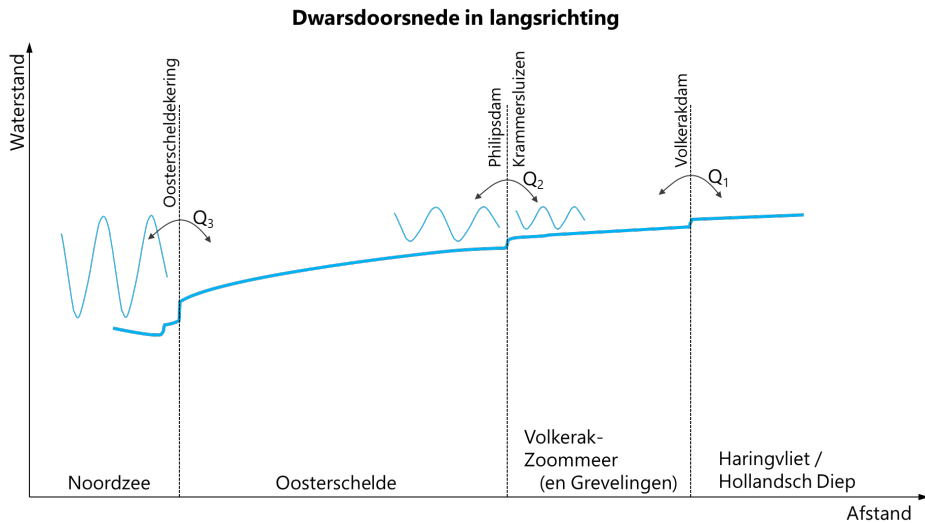
Figuur 79: Situatieschets voor maatregelpakket 2 + berging op Oosterschelde

D.1 Probleemschets

De analyse is opgedeeld in vier deelstappen:

1. Bepaal of er verval is richting Oosterschelde bij maatgevende condities op de RMM (m.a.w. kan er water richting de Oosterschelde worden afgevoerd)?
2. Zo ja, welk volume kan dan worden geborgen op Oosterschelde?
3. Vertaal dit afgevoerd volume naar een inschatting van de te verwachten waterstandsverlaging voor de RMM.
4. Bepaal tot slot de consequenties voor de dijken in de RMM en geef een inschatting van de vermeden versterkingskosten.

Om antwoord te kunnen geven op de vraag in deelstap 1 is in Figuur 80 een situatieschets gegeven met daarin een langsgedraaid profiel van het tracé dat het water aflegt. Naar verwachting zal het grootste knelpunt voor deze afvoerroute zich bevinden ter plaatse van de Krammersluizen, die de verbinding vormen tussen het VZM en de Oosterschelde.



Figuur 80: Schets met het verloop van de maximale waterstand langs het tracé vanaf het Haringvliet, via het VZM richting de Oosterschelde.

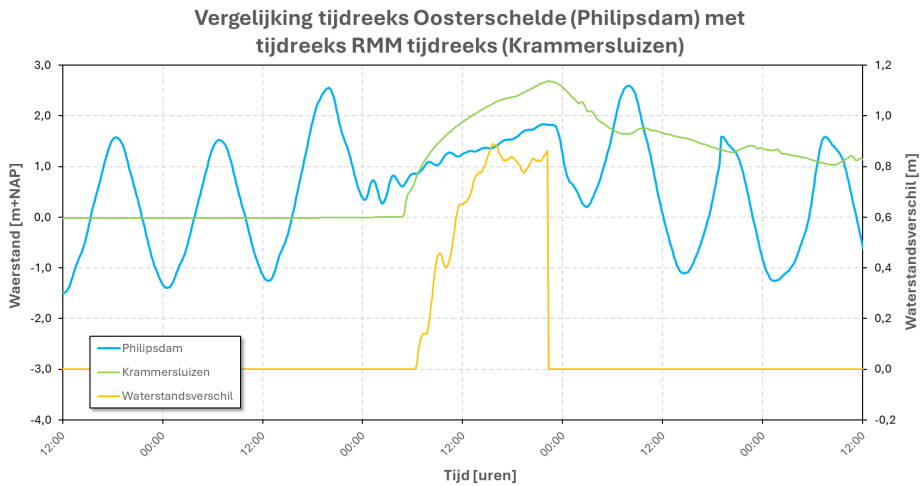
D.2 Berekening afgevoerd volume

Om te weten of water vanuit RMM (via het VZM) richting de Oosterschelde kan stromen, zijn tijdreeksen aan beide zijden van de Krammersluizen nodig:

1. Verlopen van de waterstand op het VZM volgen uit de beschikbare resultaten van de RMM die voor maatregelpakket 2 zijn uitgevoerd binnen deze studie¹³.
2. Het daaraan gekoppelde waterstandsverloop op de Oosterschelde was niet standaard beschikbaar, maar is speciaal voor dit project gegenereerd door Rijkswaterstaat Zee en Delta met het IMPLIC-model van de Oosterschelde.

Beide verlopen zijn (uiteraard) afhankelijk van de belastingcondities. Voor de RMM verstaan we hieronder de rivierafvoer, de zeewaterstand, de wind en de toestand van de Europoortkering. Voor deze aanvullende analyse beschouwen we de maatgevende condities bij Willemstad (op het Haringvliet nabij de Volkeraksluizen). Omdat de waterberging alleen wordt ingezet bij een gesloten Europoortkering, bestuderen we de condities die illustratief zijn voor de overschrijding van het inzetpeil. Hiervoor gebruiken we een aanvullende Hydra-NL berekening met een database waarin berekeningen zonder inzet van de waterberging zijn opgenomen. We nemen aan dat als de Europoortkering gesloten is, dat dan de Oosterscheldekering ook gesloten zal zijn en de stormopzet op de Noordzee bij beide SVK's gelijk is. Voor deze condities zijn door Rijkswaterstaat overeenkomstige waterstandsverlopen op de Oosterschelde bepaald. Omdat sprake is van twee verschillende fysische modellen waarmee de verlopen zijn gegenereerd, was het noodzakelijk om aandacht te besteden aan het faseverschil tussen het getij bij Maasmond en bij de Oosterscheldekering (Roompot Buiten). Dit is overgenomen uit de slotgemiddelden 2011.0 van Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening. Een voorbeeld met beide waterstandsverlopen (voor maatgevende condities te Willemstad), inclusief het waterstandsverschil is gevisualiseerd in Figuur 81.

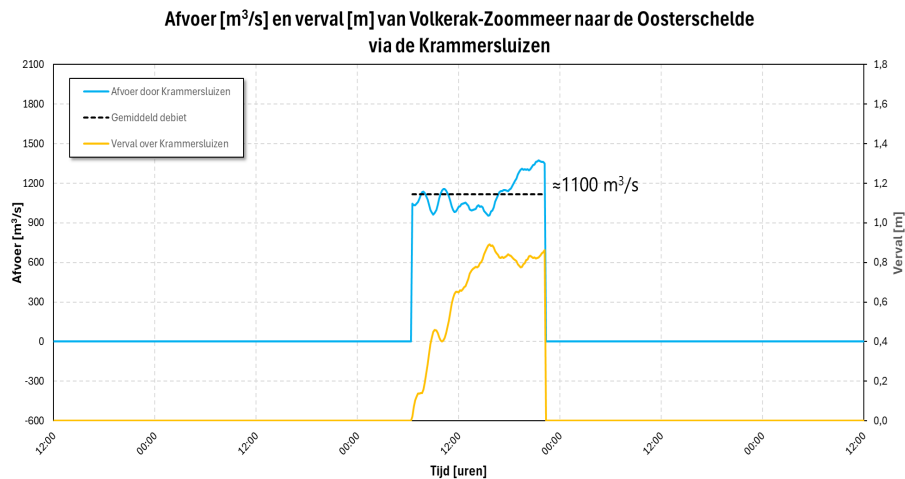
¹³ Voor de resultaten van pakket 2 is gekozen omdat in deze variant de waterberging van de Oosterschelde maximaal benut kan worden. Door de verhoging de SVK's en de verbetering van de faalkans heeft verlaging van de waterstand van de 'gesloten' situatie maximaal effect en wordt het beschikbare verval niet overschat door een te hoge waterstand op het Haringvliet. Inzet van de gemalen in pakket 3 maakt de inzet van de berging minder effectief, door verdere verlaging van de waterstand op het Haringvliet (minder verval).



Figuur 81: Tijdverlopen op het VZM (Krammersluizen) en op de Oosterschelde (Philipsdam), inclusief het waterstandsverschil.

Uit de figuur zien we dat het tijdvenster waarin de groene lijn (VZM) boven de blauwe lijn (OS) in de orde van 12 uur ligt. Onder deze condities is het naar verwachting mogelijk om water vanuit de RMM richting de Oosterschelde te krijgen (er is voldoende verval). Het verloop van het waterstandsverschil is aan de rechterzijde afgekapt nadat de piek op het VZM voorbij is. Verondersteld is dat daarna weer gespuid zal kunnen worden via de Volkeraksluizen naar het Haringvliet (de belasting op het VZM zal nooit hoger worden). Het hier gevisualiseerde waterstandsverschil (oranje lijn) is wel aan de gunstige kant. In deze eenvoudige analyse is geen rekening gehouden met het water dat vanuit het VZM richting de OS stroomt en voor een toename van de waterstanden op de Oosterschelde zal zorgen. Als de waterstand op de Oosterschelde stijgt, wordt het steeds moeilijker om water vanuit het VZM richting de Oosterschelde te krijgen. Het verval over de Krammersluizen neemt immers af. In onze analyse waarin we hiervoor niet corrigeren, wordt het spivolume dus overschat.

Het verval over de Krammersluizen is vertaald naar een volume door gebruik te maken van formules voor een onderspuier (cq. *drowned gate flow*). Een voorbeeld van het berekende afvoerverloop is te zien in Figuur 82.



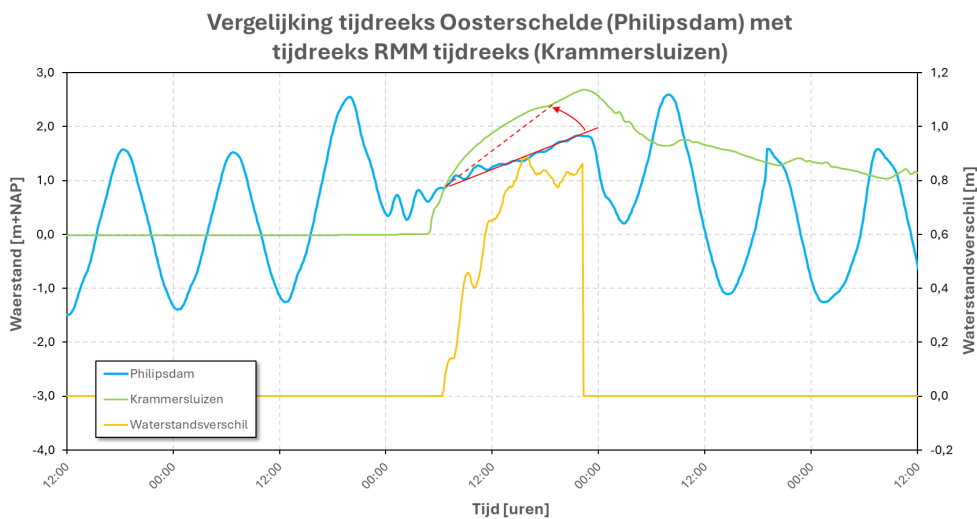
Figuur 82: Tijdverlopen van het waterstandsverschil (geel) tussen het VZM en de Oosterschelde en het daarmee corresponderende afvoerverloop (blauw).

D.3 Beperking werkwijze

Het waterstandsverschil (geel) komt overeen met dat uit Figuur 81 en we zien dat de gemiddelde afvoer die vanuit het VZM richting de Oosterschelde stroomt rond de 1100 m³/s ligt. Dit debiet ligt in dezelfde orde grootte als het bestaande lekdebiet van de Oosterscheldekering (1200 m³/s onder de huidige condities). Als eerste orde benadering van de stijgsnelheid van de (gemiddelde) waterstand op het bekken van de Oosterschelde door het lekdebiet van de Oosterscheldekering houden we rekening met een stijging van ongeveer 7 cm / uur aan ($\approx 1,6$ m/dag). Met de inzet van de Oosterschelde als extra berging verdubbeld dus grofweg de stijgsnelheid op het bekken van de Oosterschelde achter een gesloten stormvloedkering voor deze belastingcombinatie. Dit betekent twee dingen:

- het tijdvenster om te kunnen spuien wordt korter én
- het verval richting de Oosterschelde neemt af (zoals eerder toegelicht).

De gehanteerde uitgangspunten geven dus een positief beeld van de berging.



Figuur 83: Idem aan Figuur 81, maar met een indicatie van de stijgsnelheid (in rood) van de waterstand op de Oosterschelde door de inzet van de extra berging (terugkoppeling).

De voorgaande toelichting bestaat uit een analyse bij één specifieke belastingcombinatie. Deze werkwijze is voor een groot aantal belastingcombinaties herhaald. Daarmee is een goed beeld gekregen op welke wijze het afgevoerd volume wordt beïnvloed door variaties in de zeespiegelstijging, de stormopzet, de windrichting, de windsnelheid en de rivierafvoer. Hoewel variaties optreden in het debiet richting de Oosterschelde in individuele belastingcombinaties en daarmee op het waterstandsverlagende effect in de RMM, is de verwachting dat de doorwerking in een probabilistische waterstandsberekening en de daaruit volgende kostenreductie (zie hieronder) niet veel veranderen van het hier besproken beeld.

Zonder dat dit expliciet is gekwantificeerd, kan op basis van de uitgevoerde analyses wel ingeschat worden dat het effect van de extra berging op de Oosterschelde vergelijkbaar is met dat van de inzet van het VZM (ondanks dat de Oosterschelde een veel groter bergingsgebied is). Het gemiddelde geborgen volume bij inzet van de Oosterschelde is vergelijkbaar met de inzet van alleen het VZM na vergroting van de Volkeraksluizen tot 2000 m² doorstroom-oppervlak. Bij deze afmetingen van de Volkeraksluizen stroomt bij maat-gevende condities ook ongeveer 1.000 m³/s richting de waterberging (Botterhuis, 2013). Het effect van extra berging op de Oosterschelde geeft naar verwachting een verlaging van de waterstanden binnen de RMM van 0,1 – 0,2 m op het Haringvliet / Hollandsch Diep

tot aan Dordrecht bij een zeespiegelstijging van 0,85 m. Dit is een kwalitatieve vertaling van de uitgevoerde analyse (individuele combinaties van stochasten) naar het resultaat van een probabilistische berekening. Bij 2 en 3 m zeespiegelstijging zal het effect van berging op de Oosterschelde kleiner zijn dan bij 1 m zeespiegelstijging. Bij 2 en 3 m zeespiegelstijging zal het beschikbaar verval over de Krammersluizen beperkend zijn, waardoor berging op de Oosterschelde in veel stochastcombinaties niet of nauwelijks mogelijk is. Bij een zeespiegelstijging van + 0,5 m is het effect ongeveer de helft. Er is dan een kleiner verval bij de Volkeraksluizen beschikbaar, waardoor minder water de berging in stroomt.

D.4 Vermeden versterkingskosten

De extra berging op de Oosterschelde zorgt voor een orde 0,1-0,2 m aan waterstandsverlaging in het RMM gebied bij 0,85 m zeespiegelstijging. Een reductie van deze mate resulteert niet in het voorkomen van een dijkversterkingsronde, maar enkel tot een reductie van de mate van versterken. We vertalen de waterstandsval naar de vermeden dijkversterkingskosten door de kosten van tijdlijnen Laag (zeespiegelstijging +0,5 m) en Gematigd (zeespiegelstijging +0,75 m) in zichtjaar 2100 van de basissituatie met elkaar te vergelijken. De verschillen tussen deze twee tijdlijnen in 2100 is orde 0,1-0,2 m en het aantal versterkingsrondes is min of meer gelijk. Deze vergelijking maken we voor een combinatie van deelgebied Rijnmond-Drechtsteden en deelgebied Haringvliet-Hollandsdiep (zie Figuur 42).

Tabel 39: Vermeden dijkversterkingskosten in deelgebieden RDST en HVHD als gevolg van inzet extra berging op de Oosterschelde.

(in mln. euro)	Laag 2100	Gematigd 2100	Vershil
Kosten – restwaarde (RDST)	2602	2836	234
Kosten – restwaarde (HVHD)	334	378	43
		Totaal:	277

De vermeden dijkversterkingskosten door de inzet van extra berging op de Oosterschelde betreft 277 miljoen euro, dit komt overeen met orde 10% van de totale dijkversterkingskosten tot 2100 van tijdlijn Gematigd in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsdiep. In de basissituatie zijn de kosten voor 2100 in tijdlijn Extreem 12,9 mld. Euro en voor 2200 Extreem 36,3 mld. Euro. Tot opzichte van deze versterkingskosten is het effect van de extra berging op de Oosterschelde marginaal (< 3% in 2100 en < 1% in 2200). Dit betreft een inschatting op basis van uitgevoerde aanvullende analyse en een vertaling van de waterstandsval naar de vermeden dijkversterkingskosten. Daar staat tegenover dat de keringen rond de Oosterschelde misschien wel meer versterkt moeten worden door de extra hydraulische belasting door de inzet van de Oosterschelde als bergingsgebied.

D.5 Discussie en conclusies

Op basis van de uitgevoerde aanvullende analyse constateren we het volgende:

1. Het is mogelijk water vanuit de Rijn-Maasmonding richting de Oosterschelde af te voeren onder maatgevende condities op het Haringvliet/Hollandsch Diep.

Extra berging op de Oosterschelde is dus mogelijk op het moment dat de VZM en de Grevelingen worden ingezet.

2. Daar zit echter de kanttekening bij: *hoe groter de zeespiegelstijging, hoe minder effectief de aanvullende berging op de Oosterschelde wordt*. Dit komt omdat door zeespiegelstijging de waterstand op Oosterschelde ook zal stijgen. Aangenomen is dat het peilbeheer op het VZM niet zal veranderen (mogelijk moet hier-voor op termijn een gemaal bij Bath worden gerealiseerd). De waterstand op het Haringvliet/Hollandsch Diep zal stijgen, waardoor het verval over de Volkeraksluizen groter wordt. Het duurt bij zeespiegelstijging langer voordat het VZM is volgestroomd en de waterstand op het VZM hoger is dan die op de Oosterschelde (immers door zeespiegelstijging neemt de waterstand op de Oosterschelde ook toe). Alleen bij een hogere waterstand op het VSM kan water richting de Oosterschelde stromen. Het tijdvenster waarbinnen water richting de Oosterschelde kan worden afgevoerd, zal korter worden naarmate de zeespiegel stijgt (met als gevolg dat een kleiner volume geborgen kan worden op Oosterschelde).
3. Ingeschat is een verlaging van 0,1 – 0,2 m in de Rijn-Maasmonding bij een zeespiegelstijging van 0,85 m. Dit is een bovengrens schatting. Door de gehanteerde aannames verwachten we dat de verlaging waarschijnlijk minder zal zijn. Ter verificatie, in Plan Sluizen (Botterhuis en Stijnen, 2015) en Aanvullende analyse waterberging Zuid-westelijke delta (Botterhuis, 2013) is ook een variant met aanvullende berging op de Oosterschelde onderzocht, met vergelijkbare resultaten.
4. Op basis van het uitgevoerde onderzoek kan worden gesteld dat de gevoeligheid van de uitkomsten voor onzekerheden in timing, faseverschil, ed. beperkt is. Hoewel we variaties zien in effectiviteit tussen individuele belastingcombinaties, is het effect van bergen op de OS vergelijkbaar met bergen op het VZM in de basissituatie. Dit is gering t.o.v. de verwachte opgave.
5. De invloed op de vermeden dijkversterkingskosten binnen de Rijn-Maasmonding is beperkt d.w.z. minder dan 3% in 2100 en minder dan 1% in 2200. Wordt ingezoomd op de deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsch Diep, dan is de reductie 10% in 2100 van tijdlijn Gematigd.

In Plan Sluizen (Botterhuis en Stijnen, 2015) is een variant met aanvullende berging op de Oosterschelde onderzocht in verschillende uitvoeringen. Er zijn daarbij ook analyses uitgevoerd waarbij het sluitpeil van de Oosterscheldekering en het wegnemen van het lekdebiet van de Oosterscheldekering zijn onderzocht. Daaruit bleek dat de inzet van de Oosterschelde als bergingsgebied geoptimaliseerd zou kunnen worden door in te zetten op een hogere kering met minder lek- en overslagdebiet. Dat valt echter voor nu buiten de scope van de huidige studie en wordt actueel op het moment dat sprake is van vervanging of renovatie van de Oosterscheldekering. Als de huidige Oosterscheldekering gehandhaafd blijft tot 2200 in elke tijdlijn, dan zal extra bergen op de Oosterschelde op termijn niet meer mogelijk zijn of nauwelijks leiden tot een waterstandsdeling in de Rijn-Maasmonding.

Bijlage E Gevolgen inzet Grevelingen en Volkerak-Zoommeer

In het KP-ZSS fase 2 wordt voor diverse pakketten strategieverlengende maatregelen (zg. systeemmaatregelen) de versterkingsopgave bepaald voor primaire keringen in de Rijn-Maasmonding. Onderdeel van dit systeem en het te beschouwen gebied zijn het Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer.

E.1 Probleemschets

In fase 1 van het KP-ZSS is de opgave voor keringen langs deze meren niet beschouwd, in deze bijlage wordt deze opgave met een eenvoudige (aanvullende) analyse in kaart gebracht. We beschrijven hoe de opgave voor het Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer is bepaald voor de verschillende tijdlijnen (en zichtjaren). Bij de totstandkoming hiervan zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De opgave wordt berekend als toename tussen de basis en de inzet van het bergingsgebied, hiertoe berekenen we enkel de basissituatie en pakket II (maximale inzet en effect berging¹³);
- De referentiedatabase (bron: ftp WBI2017) is niet volledig dekkend voor het gebied (veel locaties ontbreken), we maken hierom een inschatting van de toename van de hydraulische belasting op de onderstaand beschreven manier;
- Het peilbeheer in de toekomst (eventueel met de realisatie van een gemaal naast de Bathse spuisluis) blijft ongewijzigd, hiermee verandert de frequentielijn zonder inzet van de waterberging niet;

We benadrukken dat het hier om een eenvoudige, aanvullende analyse gaat en dat we met de beschikbare informatie zo goed mogelijk de opgave van het Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer in kaart hebben gebracht

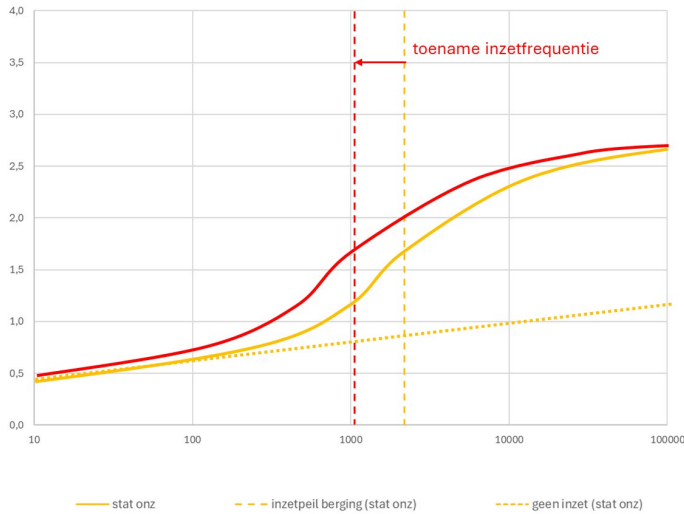
De uitgevoerde analyse beschrijven we in een aantal stappen:

1. Toename van de inzetfrequentie;
2. Toename van de waterstand bij inzet;
3. Effect op de hydraulische belastingen;
4. Doorvertaling effect hydraulische belastingen naar kosten.

E.2 Berekening toename inzetfrequentie

Om een inschatting te maken van de toename van de hydraulische belastingen op het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen, is het noodzakelijk om de toename van de inzetfrequentie van de waterberging te bepalen. In Figuur 84 staat een schets van de wijze waarop de frequentielijn van de waterstand verandert door een wijziging van de inzetfrequentie. Om een inschatting te maken van dit effect op de hydraulische belastingen verschuiven we de frequentielijn van de referentie horizontaal in de grafiek met de toename van de inzetfrequentie. Dit komt overeen met de verschuiving van de oranje naar de rode lijn in Figuur 84.

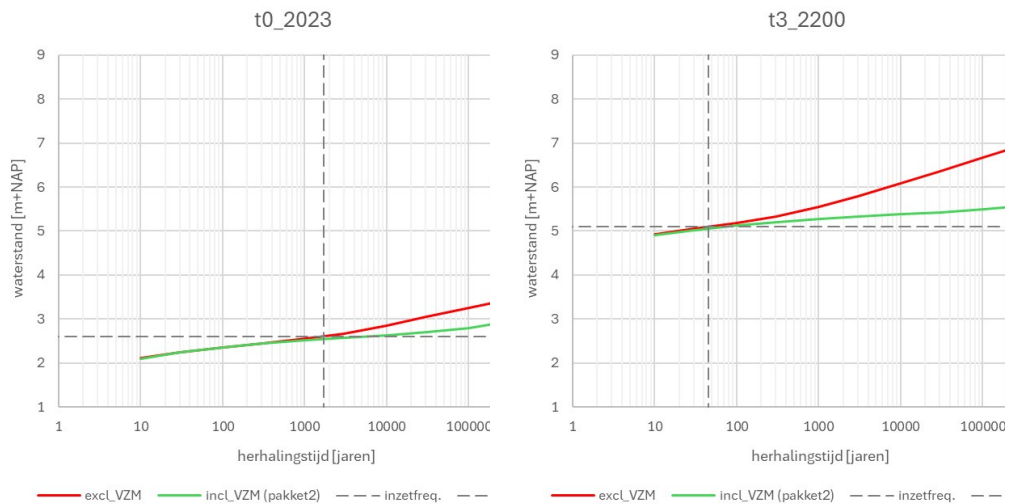
Waterstand Volkerak en/of Grevelingen



Figuur 84: Schets wijziging frequentielijn waterstand op het Volkerak en/of de Grevelingen door een toename van de inzetfrequentie van de waterberging.

De inzetfrequentie van de waterberging stellen we gelijk aan de overschrijdingsfrequentie van het inzetpeil bij Rak Noord. Om deze te berekenen zijn aparte as-databases gemaakt op basis van de productieberekeningen. Bij overschrijding van het inzetpeil in de voorspelling van de waterstand achter een gesloten Europoortkering, wordt de waterberging ingezet. In de standaard databases is de resulterende waterstand na inzet van de waterberging weggeschreven. Met deze databases kan de overschrijdingsfrequentie van het inzetpeil niet worden berekend. Voor de analyse van de inzetfrequentie maken we databases van berekeningen, waarin de Europoortkering wel wordt gesloten maar de berging niet wordt ingezet. Met deze aparte databases fysica voor 0, ½, 1, 2 en 3 m zeespiegelstijging voor de situatie na uitvoering van pakket II, berekenen we de inzetfrequentie voor de verschillende zichtjaren in de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem.

In Figuur 85 zijn met een rode lijn de resultaten van de doorrekening van de overschrijding van het inzetpeil getoond (de groene lijn geeft de overschrijdingsfrequentie met inzet van waterberging). Alle 17 combinaties van zichtjaar en tijdlijn zijn doorgerekend. In de figuur laat de linker grafiek het resultaat van zichtjaar 2023 en de rechter grafiek het resultaat van zichtjaar 2200 in tijdlijn Extreem zien. In 2023 is op het snijpunt van inzetpeil van de berging NAP+2,6 m (horizontale grijze onderbroken lijn) met de rode lijn (waterstand zonder inzet) een verticale grijze onderbroken lijn getrokken. We krijgen de inzetfrequentie door waarde op de horizontale as af te lezen. Voor zichtjaar 2023 is dit 1/1715 jaar. In zichtjaar 2200 van tijdlijn Extreem is het inzetpeil met 2,5 m verhoogd. Ondanks deze verhoging neemt de inzetfrequentie toe tot 1/46 jaar.



Figuur 85: Weergave frequentielijn waterstand in [m+NAP] op het Hollandsch Diep (locatie HD_999.00). De gekleurde lijnen volgen uit de doorrekening van pakket II met en zonder inzet van waterberging op het Volkerak-Zoommeer en Grevelingen. De grijze lijnen maken het aflezen van de inzetfrequentie van de waterberging mogelijk bij het snijpunt van het inzetpeil en de waterstandsfrequentie zonder inzet waterberging.

Op vergelijkbare wijze is voor de andere zichtjaren en tijdlijnen de inzetfrequentie bepaald. Deze zijn in de onderstaande tabel opgenomen.

Tabel 40: Overzicht inzetfrequentie waterberging per zichtjaar en tijdlijn.

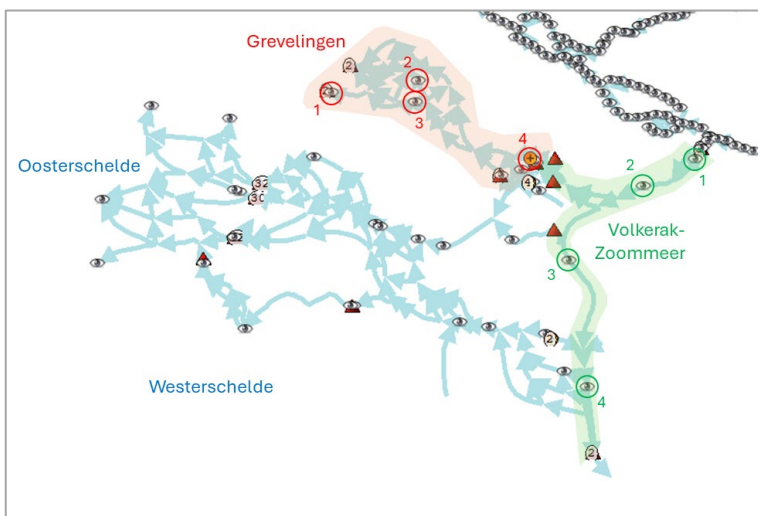
Zichtjaar	Inzetfrequentie	Inzetpeil [m+NAP]
t0_2023	1x per 1715 jaar	2,60
t1_2050	1x per 687 jaar	2,60
t1_2100	1x per 124 jaar	2,60
t1_2150	1x per 56 jaar	2,60
t1_2200	1x per 12 jaar	2,60
t2_2050	1x per 687 jaar	2,60
t2_2100	1x per 46 jaar	2,60
t2_2150	1x per 4 jaar	2,60
t2_2200	1x per 49 jaar	3,85
t3_2050	1x per 425 jaar	2,60
t3_2100	1x per 6 jaar	2,60
t3_2150	1x per 46 jaar	3,85
t3_2200	1x per 46 jaar	5,10
t4_2050	1x per 84 jaar	2,60
t4_2100	1x per 29 jaar	3,85
t4_2150	1x per 11 jaar	5,10
t4_2200	25x per jaar	5,10

E.3 Berekening toename waterstand bij inzet

Om een inschatting te maken van de toename van de hydraulische belastingen op het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen, is het ook noodzakelijk om de toename van de waterstand na inzet van de waterberging te bepalen. We onderscheiden drie effecten:

1. Doordat de opening in de Volkerakdam als maatregel wordt vergroot, kan er bij een zelfde verval meer water richting de berging stromen. Dit heeft een verhogend effect op de maximale waterstand op de meren bij inzet (t.o.v. de resultaten van de basissituatie).
2. Doordat met de opening in de Grevelingendam het bergend oppervlak aanzienlijk wordt uitgebreid, zal er bij een zelfde waterstand een veel groter volume op de meren zijn geborgen. Dit heeft een verlagend effect op de maximale waterstand op de meren bij inzet (t.o.v. de resultaten van de basissituatie).
3. Door klimaatontwikkeling zal de waterstand op het Hollandsch Diep toenemen, daarnaast is aangenomen dat het peilbeheer op het Volkerak-Zoommeer en het Grevelingen meer ongewijzigd is. Gevolg is dat het verval over de Volkerakdam zal toenemen, waardoor meer water richting de berging zal stromen. Dit heeft een verhogend effect op de maximale waterstand op de meren bij inzet (t.o.v. de resultaten van de basissituatie).

Omdat op voorhand niet is in te schatten hoe beide effecten doorwerken in de waterstand-frequentielijn, analyseren we maximale waterstand in de hydraulische berekeningen van de basis en pakket II. We kijken naar de wijziging van de waterstand in de productieberekeningen bij een specifieke windrichting en -snelheid, namelijk WNW (292,5°) en 10 m/s. We kijken naar de maximale waterstand op de meren bij deze windsterkte bij 8 zeewaterstanden en 12 rivierafvoeren voor zeespiegelstijging +0, ½, 1, 2 en 3 m (mogelijk dat bij enkele combinaties de waterberging niet wordt ingezet, dan wordt geen wijziging berekend). Om een robuuste inschatting te maken van de wijziging analyseren we de waterstand-wijziging op 4 locaties op beide meren (zie Figuur 9).



Figuur 86: Overzicht van de uitvoerlocaties in het SOBEK3-model van de Rijn-Maasmonding, in het rood 4 locaties op de Grevelingen en in het groen 4 locaties op het Volkerak-Zoommeer.

In Tabel 3 en Tabel 4 staat het resultaat van de hydraulische berekening van pakket II voor respectievelijk het Volkerak-Zoommeer en het Grevelingen meer. Aan de linker kant staat voor het huidige klimaat de maximale waterstand als gemiddelde van de locaties uit Figuur 86 en aan de rechterkant voor de situatie na een

zeespiegelstijging van +3 m. Voor de andere hoogten van zeespiegelstijgingen zijn deze gegevens ook beschikbaar, maar hier niet getoond. Rood gekleurd zijn de combinaties van rivier-afvoer en zeewaterstand waarbij de waterberging wordt ingezet. Te zien is dat bij inzet van de berging onder het huidige klimaat, de waterstand op het Volkerak-Zoommeer varieert tussen 1,9 en 5,1 m+NAP. Inzet van de berging na 3 m zeespiegelstijging kan tot waterstanden van 3,9 t/m 6,8 m+NAP op het Volkerak-Zoommeer leiden. Bij een lagere combinatie van rivierafvoer en zeewaterstand is het verschil in waterstand groter (namelijk zo'n 2 m) dan bij een hogere combinatie (zo'n 1,7 m).

Tabel 41: Representatieve maximale waterstand op het Volkerak-Zoommeer voor het huidige klimaat (links) en bij zeespiegelstijging 3 m (rechts) als functie van rivierafvoer (Lobith) en zeewaterstand (Hoek van Holland), in het rood de combinatie waarbij de berging is ingezet¹⁴

		zeewaterstand [m+NAP]							zeewaterstand [m+NAP]								
		VKZM_xx	1.20	2.08	3.08	4.08	5.08	6.08	7.08	VKZM_xx	4.12	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.0
rivierafvoer [m³/s]	600	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	2000	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	4000	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	1.93	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	6000	0.00	0.00	0.05	0.05	2.01	2.11	2.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	8000	0.00	0.00	0.05	2.15	2.30	2.43	2.48	0.05	0.05	0.05	3.90	3.90	3.94	4.00	0.05	0.05
	10000	0.00	0.00	0.05	2.39	2.56	2.70	2.82	0.05	0.05	0.05	4.09	4.25	4.20	4.25	0.05	0.05
	13000	0.00	0.05	0.05	2.69	2.96	3.12	3.26	0.05	0.05	0.05	4.22	4.47	4.66	4.82	4.83	0.05
	16000	0.00	0.05	2.26	2.84	3.29	3.50	3.66	0.05	0.05	0.05	4.49	4.81	5.02	5.24	5.42	0.05
	17000	0.00	0.05	2.31	2.87	3.36	3.61	3.77	0.05	0.05	0.05	4.54	4.90	5.14	5.37	5.55	0.05
	18000	0.00	0.05	2.35	2.91	3.42	3.71	3.88	0.05	0.05	0.05	4.58	5.00	5.27	5.50	5.68	0.05
20000	0.00	0.05	2.51	3.06	3.61	4.01	4.19	0.05	0.05	0.05	4.63	5.16	5.48	5.72	5.91	0.05	
24000	0.05	0.05	2.84	3.38	3.94	4.49	4.92	0.05	0.05	0.05	5.18	5.86	6.22	6.44	6.64	0.05	

Tabel 42: Representatieve maximale waterstand op het Grevelingen meer voor het huidige klimaat (links) en bij zeespiegelstijging 3 m (rechts) als functie van rivierafvoer (Lobith) en zeewaterstand (Hoek van Holland), in het rood de combinatie waarbij de berging is ingezet¹⁴.

		zeewaterstand [m+NAP]							zeewaterstand [m+NAP]								
		GRVN_xx	1.20	2.08	3.08	4.08	5.08	6.08	7.08	GRVN_xx	4.12	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.0
rivierafvoer [m³/s]	600	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
	2000	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
	4000	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	1.36	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
	6000	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	1.38	1.51	1.57	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
	8000	-0.01	-0.01	-0.01	1.39	1.56	1.73	1.90	-0.01	-0.01	-0.01	3.52	3.64	3.81	3.84	-0.01	-0.01
	10000	-0.01	-0.01	-0.01	1.51	1.71	1.89	2.05	-0.01	-0.01	-0.01	3.48	3.68	3.85	3.91	-0.01	-0.01
	13000	-0.01	-0.01	-0.01	1.75	2.04	2.26	2.45	-0.01	-0.01	-0.01	3.50	3.76	4.02	4.24	4.45	-0.01
	16000	-0.01	-0.01	1.51	1.93	2.37	2.64	2.81	-0.01	-0.01	-0.01	3.71	4.03	4.34	4.57	4.78	-0.01
	17000	-0.01	-0.01	1.56	1.97	2.44	2.73	2.91	-0.01	-0.01	-0.01	3.75	4.11	4.42	4.66	4.87	-0.01
	18000	-0.01	-0.01	1.61	2.01	2.53	2.82	3.01	-0.01	-0.01	-0.01	3.79	4.20	4.53	4.76	4.98	-0.01
20000	-0.01	-0.01	2.00	2.45	2.90	3.23	3.42	-0.01	-0.01	-0.01	3.86	4.40	4.68	4.93	5.16	-0.01	
24000	-0.01	-0.01	2.62	3.09	3.57	3.99	4.34	-0.01	-0.01	-0.01	4.75	5.35	5.67	5.89	6.08	-0.01	

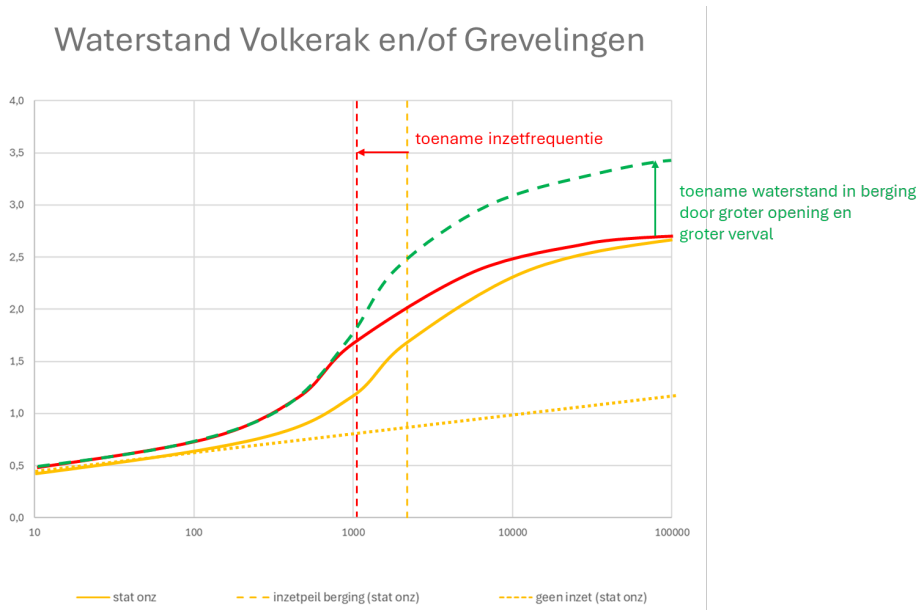
¹⁴ Door een fout bij het uitrekenen van de initiële waarde van de waterstand op de meren, wijkt de waarde enkele centimeters af van 0 m +NAP in combinaties waar de waterberging niet wordt ingezet.

Bij inzet van de berging onder het huidige klimaat varieert de waterstand op het Grevelingen meer tussen 1,4 en 4,5 m+NAP. Inzet van de berging na +3 m zeespiegelstijging leidt tot waterstanden van 3,5 t/m 6,2 m+NAP op het Grevelingen meer. Het verschil in waterstand bij lagere en hogere combinaties van rivierafvoer en zeewaterstand is vergelijkbaar met het Volkerak-Zoommeer. De waterstand op het Volkerak-Zoommeer bereikt een 0,4 tot 0,6 m hogere waterstand dan op het Grevelingen meer (dit wijzigt beperkt als de zeespiegel stijgt).

Let op! In de tabellen is ook te zien dat onder het huidige klimaat de berging bij lagere rivier-afvoeren wordt ingezet (t.o.v. de situatie met 3 m zeespiegelstijging). Het verschil tussen dagelijks hoogwater en het inzetpeil is onder het huidige klimaat groter, namelijk respectievelijk 1,2 en 2,6 m+NAP. Na 3 m zeespiegelstijging zijn deze waarden respectievelijk 4,1 en 5,1 m+NAP. Met andere woorden de 'verticale berging' in de Rijn-Maas monding is (voordat de waterberging wordt ingezet), onder het huidige klimaat 1,4 m en bij zeespiegelstijging van 3 m, gelijk aan 1 m. We veronderstellen dat ondanks de afname van de 'verticale berging', door toename van de 'horizontale berging' er meer water geborgen kan worden in de Rijn-Maasmonding zonder inzet van de berging. Bij een stijging van 4,1 naar 5,1 m+NAP in de Rijn-Maas monding is een groter bergend oppervlak buitendijks van de primaire keringen beschikbaar, dan bij een stijging van 1,2 naar 2,6 m+NAP. Uit HKV (2022d) kan worden geschat dat tussen 4-5 m+NAP het bergend oppervlak 500 km² is en tussen 1-2 m+NAP is het bergend oppervlak 350 km². Hierdoor wordt het inzetpeil na 3 m zeespiegelstijging bij relatief lage rivierafvoeren (4.000 – 6.000 m³/s) niet overschreden en onder het huidige klimaat wel. Ter vergelijking het oppervlak van het Grevelingen meer is 140 km² en van het Volkerak-Zoommeer 80 km².

E.4 Effect op de hydraulische belastingen

Om een inschatting te maken van de toename van de hydraulische belastingen op het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen, combineren we het effect van de toename van de inzetfrequentie (E.2) met het effect van een verhoging van de waterstand in berging (E.3). In Figuur 87 schetsen op welke wijze de frequentielijn van de waterstand verandert door toename van de waterstand op de meren na inzet van de berging.



Figuur 87: Schets wijziging frequentielijn waterstand op het Volkerak en/of de Grevelingen door een toename van inzetfrequentie en een toename van de waterstand na inzet.

We bepalen de mate van de verticale verschuiving door op de herhalingsstijden {10, 30, 100, 300, 1 000, 3.000, 10.000, 30.000, 100.000, 300.000, 1.000.000 jaar} het illustratiepunt uit te lezen van de Hydra-NL berekening van pakket II bij Rak Noord (vk2150 0060_HD_km0999_HRbasis 110m). Alhoewel deze locatie niet op de meren gelegen is, lijkt dit wel de beste indicator voor de maatgevende gebeurtenis voor elke frequentie. De Hydra-NL berekeningen met de databases WBI2017 geven niet de juiste informatie, omdat door klimaatontwikkeling en met name het uitvoeren van pakket II de bijdrage van de stochasten combinaties aanzienlijk zal veranderen. In de berekening met de databases KP ZSS van Rak Noord hebben enkele stochasten een ander effect op de waterstand. Bijvoorbeeld, falen van de Europoortkering heeft bij Rak Noord een verhogend effect. Op de meren zal bij dezelfde combinatie stochasten een lagere waterstand ontstaan als de Europoortkering faalt. Immers de waterberging wordt dan niet ingezet. We zullen een interpretatie van de gegevens moeten maken.

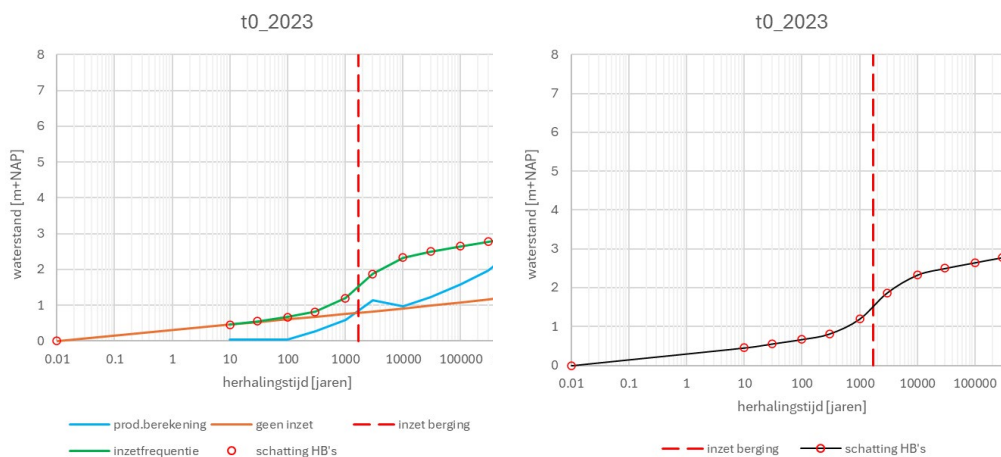
Per frequentie zijn in het illustratiepunt voor de gesloten situatie van de Europoortkering (dan is inzet berging mogelijk) de rivierafvoer en de zeewaterstand bepaald door per windrichting het gewogen gemiddelde te bepalen (Figuur 88). Met deze combinatie is de waterstand op de meren uit Tabel 41 en Tabel 42 opgezocht en gekoppeld aan de frequentie. Op deze wijze kunnen we voor alle tijdlijnen (en zichtjaren) een frequentielijn van de waterstand op de meren bepalen.

22,5	NNO	--	--	--	--	--	0	0
45,0	NO	--	--	--	--	--	0	0
67,5	ONO	--	--	--	--	--	0	0
90,0	O	--	--	--	--	--	0	0
112,5	OZO	--	--	--	--	--	0	0
135,0	ZO	--	--	--	--	--	0	0
157,5	ZZO	--	--	--	--	--	0	0
180,0	Z	--	--	--	--	--	0	0
202,5	ZZW	--	--	--	--	--	0	0
225,0	ZW	4,1	13550	--	32	3,37	0	0
247,5	WZW	4	13000	--	26,5	3,37	0,007	2,2
270,0	W	4,03	13000	--	21,5	3,37	0,062	18,7
292,5	WNW	4,04	12950	--	19,8	3,37	0,104	31,3
315,0	NW	4,08	12950	--	18,8	3,37	0,108	32,4
337,5	NNW	4,13	12950	--	18,4	3,37	0,043	13
360,0	N	4,27	12950	--	18,4	3,37	0,004	1,1
T3.000		301,3	4,06	12961		19,7	3,37	

Figuur 88: Berekening van de rivierafvoer en de zeewaterstand als gewogen gemiddelde per windrichting bij de gesloten situatie van de Europoortkering (als inzet berging mogelijk is).

In de linker grafiek van Figuur 89 staat het resultaat van de overschrijdingsfrequentie van de waterstand op het Volkerak-Zoommeer:

- groene lijn: verschuiving van de referentie Volkerak-Zoommeer met de wijziging van de inzetfrequentie,
- blauwe lijn: waterstand op de meren na inzet (productieberekeningen van pakket II),
- oranje lijn: waterstand zonder inzet berging (referentie Grevelingen verhoogd met 0,3 m).



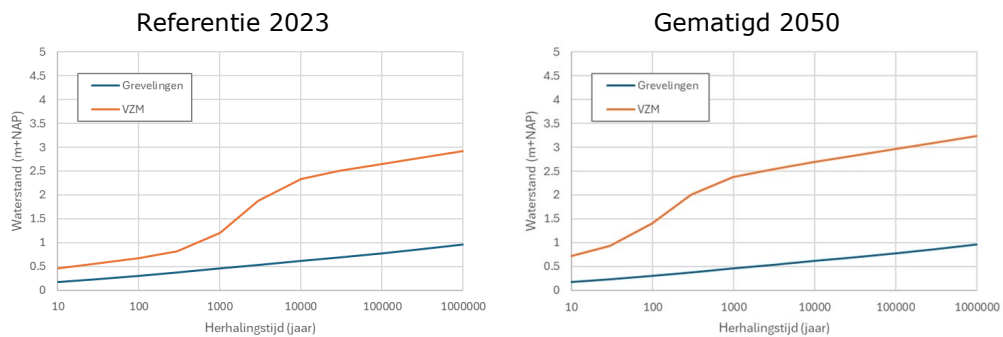
Figuur 89: Wijziging frequentielijn op het Volkerak Zoommeer (oranje o.b.v. geen inzet, groen o.b.v. inzet-frequentie, blauw o.b.v. productieberekeningen):

- links presentatie resultaat van diverse methoden uit voorgaande tekst, en
- rechts definitieve keuze voor referentie (t0_2023).

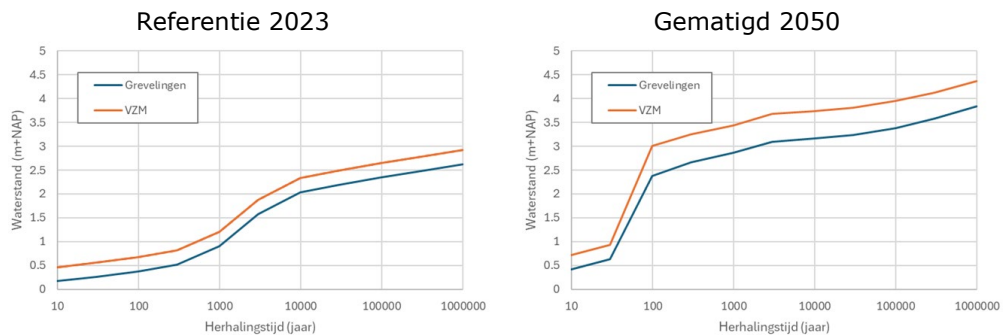
De informatie is in de voorgaande tekst en voorgaande paragrafen toegelicht. We zien dat de frequentielijn op basis van de productieberekeningen van pakket II (blauwe lijn) onder de lijn op basis van de databases WBI2017 ligt. Dit is goed

mogelijk, immers door het grotere oppervlak van de waterberging (in pakket II is ook het Grevelingen beschikbaar) kan bij een lagere waterstand meer worden geborgen. De knik in de blauwe lijn wordt veroorzaakt doordat de productieberekeningen zijn gebruikt voor het tekenen van deze lijn. Het sluiten of openen van de Europoortkering kan net iets anders uitpakken of mogelijk ook het openen van de Volkeraksluizen bij een andere combinatie van rivierafvoer en zeewaterstand. Hierdoor zal de waterstand op de meren niet continu stijgend zijn bij een toename van de randvoorwaarden in de Rijn-Maasmonding. Misschien dat door de beperkte geschiktheid van het illustratiepunt te Rak Noord en dergelijk discontinuïteiten in de productieberekeningen de blauwe lijn minder geschikt is om hard te stellen dat de hydraulische belastingen voor bepaalde zichtjaren in enkele tijdlijnen omlaag gaan.

We kiezen er voor om de opgave langs de meren in kaart te brengen met de omhullende frequentie lijn van beide methoden. Een bovengrens benadering. In grafiek van Figuur 89 is dit aangegeven door een lijn te trekken de rode punten uit de linker grafiek. Deze rode punten zijn geselecteerd door per herhalingsstijd het maximum van de drie lijnen te kiezen. In Figuur 90 en Figuur 91 is het resultaat van de waterstandberekening weergegeven voor tijdlijn gematigd. In Tabel 43 staat een overzicht van de berekende resultaten voor de situatie na realisatie van pakket 2.



Figuur 90: Waterstandfrequentielijn op het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen in de basissituatie voor zichtjaren 2023 en 2050 in tijdlijn gematigd.



Figuur 91: Waterstandfrequentielijn op het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen in de basissituatie voor zichtjaren 2023 en 2050 in tijdlijn gematigd.

Tabel 43: Overzicht van waterstandfrequenties in m+NAP op het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen na realisatie van pakket 2 (extra waterberging). Op de verticale as staat de herhalingstijd in jaar (t1 = tijdlijn Laag, t2 = Gemiddeld, t3 = Extreem en t4 = Zeer extreem).

VKZM	t0_2023	t1_2050	t1_2100	t1_2150	t1_2200	t2_2050	t2_2100	t2_2150	t2_2200
10	0.46	0.52	0.64	0.71	0.92	0.52	0.73	1.17	0.72
30	0.56	0.62	0.77	0.90	1.33	0.62	0.94	1.83	0.93
100	0.67	0.76	1.09	1.35	1.99	0.76	2.01	2.30	3.00
300	0.82	1.03	1.91	2.31	2.36	1.03	2.32	2.55	3.25
1000	1.20	1.62	2.31	2.37	2.54	1.62	2.39	2.89	3.44
3000	1.87	2.13	2.45	2.53	2.77	2.13	2.55	3.05	3.68
10000	2.33	2.43	2.61	2.68	2.99	2.43	2.70	3.21	3.74
30000	2.50	2.58	2.74	2.81	3.14	2.58	2.83	3.39	3.81
100000	2.65	2.73	2.88	2.95	3.32	2.73	2.97	3.59	3.95
300000	2.78	2.86	3.01	3.08	3.51	2.86	3.10	3.70	4.13
1000000	2.92	3.00	3.15	3.22	3.68	3.00	3.24	3.82	4.37

VKZM	t0_2023	t3_2050	t3_2100	t3_2150	t3_2200	t4_2050	t4_2100	t4_2150	t4_2200
10	0.46	0.55	1.08	0.73	0.73	0.67	0.77	0.94	4.90
30	0.56	0.66	1.65	0.94	0.94	0.81	2.35	4.47	5.08
100	0.67	0.81	2.19	2.39	4.65	1.18	2.77	4.83	5.39
300	0.82	1.15	2.54	2.56	4.73	2.26	3.11	4.85	5.61
1000	1.20	1.84	2.91	2.96	4.82	2.33	3.30	4.91	5.73
3000	1.87	2.27	3.09	3.42	4.88	2.49	3.68	4.97	5.80
10000	2.33	2.49	3.28	3.80	4.92	2.64	3.82	5.03	5.89
30000	2.50	2.63	3.46	3.94	4.96	2.77	3.95	5.07	6.02
100000	2.65	2.77	3.62	4.09	5.01	2.92	4.12	5.17	6.18
300000	2.78	2.90	3.76	4.26	5.08	3.04	4.29	5.46	6.25
1000000	2.92	3.04	3.88	4.42	5.35	3.19	4.46	5.80	6.36

GRVN	t0_2023	t1_2050	t1_2100	t1_2150	t1_2200	t2_2050	t2_2100	t2_2150	t2_2200
10	0.17	0.22	0.34	0.41	0.62	0.22	0.43	0.87	0.42
30	0.26	0.32	0.47	0.60	1.03	0.32	0.64	1.53	0.63
100	0.37	0.46	0.79	1.05	1.69	0.46	1.33	2.00	2.38
300	0.52	0.73	1.36	1.67	2.06	0.73	1.72	2.19	2.66
1000	0.90	1.32	1.90	2.07	2.24	1.32	2.09	2.50	2.87
3000	1.57	1.83	2.15	2.23	2.37	1.83	2.25	2.69	3.09
10000	2.03	2.13	2.31	2.38	2.63	2.13	2.40	2.88	3.16
30000	2.20	2.28	2.44	2.51	2.81	2.28	2.53	3.04	3.24
100000	2.35	2.43	2.58	2.65	2.97	2.43	2.67	3.20	3.38
300000	2.48	2.56	2.71	2.78	3.13	2.56	2.80	3.33	3.58
1000000	2.62	2.70	2.85	2.92	3.31	2.70	2.94	3.45	3.84

GRVN	t0_2023	t3_2050	t3_2100	t3_2150	t3_2200	t4_2050	t4_2100	t4_2150	t4_2200
10	0.17	0.25	0.78	0.43	0.43	0.37	0.47	0.64	4.11
30	0.26	0.36	1.35	0.64	0.64	0.51	1.88	3.75	4.31
100	0.37	0.51	1.89	1.84	3.87	0.88	2.26	4.05	4.71
300	0.52	0.85	2.19	2.13	3.94	1.54	2.58	4.06	4.94
1000	0.90	1.54	2.56	2.49	4.03	2.01	2.78	4.12	5.09
3000	1.57	1.97	2.77	2.90	4.09	2.19	3.12	4.18	5.16
10000	2.03	2.19	2.94	3.26	4.13	2.34	3.27	4.25	5.27
30000	2.20	2.33	3.09	3.44	4.18	2.47	3.45	4.30	5.44
100000	2.35	2.47	3.26	3.58	4.24	2.62	3.60	4.42	5.63
300000	2.48	2.60	3.40	3.75	4.32	2.74	3.77	4.81	5.70
1000000	2.62	2.74	3.53	3.89	4.68	2.89	3.93	5.11	5.81

E.5 Opgave en versterkingskosten

Op basis van de in E.4 beschreven toename van de hydraulische belastingen is een inschatting gemaakt van de opgave die daardoor ontstaat. Vervolgens zijn op basis van deze opgave de dijkversterkingskosten bepaald. Bij het bepalen van de opgave zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Voor de opgave is enkel naar de hoogte-opgave gekeken;
- De kruinhoogtes zijn gemiddeld per traject;
- De waterstand bij norm is gebruikt om de hoogteopgave te bepalen:
 - Voor de vertaling naar het HBN is een factor 1,2 aangenomen (voor effect van golven).
- Er is enkel gekeken naar de opgave tot 2200. De opgave die eventueel ontstaat tussen 2200 en 2250 (waarvoor er vóór 2200 versterkt dient te worden), is ingeschat o.b.v. de overhoogte;
- Er is een ritme van 50 jaar per versterkingsronde gehanteerd;
- Voor het Grevelingenmeer is gekeken naar de normtrajecten 25-4 en 26-4;
- Voor het Volkerak-Zoommeer is gekeken naar de normtrajecten 216, 25-3, 27-4, 27-3, 30-1, 31-3, 33-1, 34-3, 34-4 en 34-5.

Gekeken naar de basisanalyse, waarbij de meren niet als waterberging worden meegenomen ontstaat er voor geen enkel traject langs het Grevelingenmeer en Volkerak-Zoommeer een opgave. Voor tijdlijn Zeer Extreem is in 2200 nog een minimale overhoogte van 1,5 m aanwezig. Op basis hiervan kan verwacht worden dat er geen dijkversterking ontstaat t/m zichtjaar 2200, en dat daarmee de dijkversterkingskosten 0 Meuro bedragen.

Bij inzet van de meren als waterberging ontstaat er een verschillend beeld tussen het Grevelingenmeer en het Volkerak-Zoommeer:

Grevelingenmeer

Voor het Grevelingenmeer geldt dat er geen opgave ontstaat tot zichtjaar 2200. Hiermee is er geen dijkversterking nodig om in 2200 te voldoen voor tijdlijn Zeer Extreem. De overhoogte in zichtjaar 2200 is voor normtraject 26-4 nog $\pm 0,5$ m, waar voor traject 25-4 dit enkel $\pm 0,2$ m betreft. Voor traject 25-4 kan daarom verwacht worden dat er voor 2200 nog een versterking benodigd is om te voldoen in 2250. Voor traject 26-4 is met een overhoogte van 0,5 m aangenomen dat er geen versterking benodigd is voor 2200. Voor de overige tijdlijnen treedt er geen opgave op en is de overhoogte in 2200 dusdanig dat hiervoor geen versterkingen benodigd zijn.

Tijdljn Zeer Extreem	Lengte normtraject	Aantal dijkversterkingen benodigd	
		Tot 2100	Tot 2200
Normtraject 25-4	32 km	0	1
Normtraject 26-4	25 km	0	0
Totaal te versterken lengte:		0 km	32 km

Volkerak-Zoommeer

Voor het Volkerak-Zoommeer geldt dat er voor de tijdlijnen Extreem en Zeer-Extreem op enkele trajecten een opgave ontstaat. Voor tijdlijn Laag en Gematigd is er t/m 2200 geen opgave. De overhoogte voor tijdlijn Laag en Gematigd in 2200 is meer dan 1,0 m. Er zullen daarmee voor de tijdlijnen Laag en Gematigd geen dijkversterkingen t/m zichtjaar 2200 optreden.

Voor tijdlijn Extreem ontstaat er in 2200 voor de trajecten 31-3 en 33-1 een opgave. Om deze opgave op te lossen, volgt er een dijkversterking die minimaal 50 jaar voor 2200 wordt uitgevoerd. Hieruit volgt dat voor deze trajecten twee dijkversterkingen worden uitgevoerd voor 2200. Voor de overige trajecten geldt dat er voor tijdlijn Extreem een bepaalde overhoogte geldt in 2200. Gekeken naar de overhoogte, volgt er voor de trajecten 27-4 en 27-3 een versterking voor 2200 om te voldoen in 2250.

Tijdlijn Extreem	Lengte normtraject	Aantal dijkversterkingen benodigd	
		Tot 2100	Tot 2200
Normtraject 216	6 km	0	0
Normtraject 25-3	20 km	0	0
Normtraject 27-4	16 km	0	1
Normtraject 27-3	5 km	0	1
Normtraject 30-1	22 km	0	0
Normtraject 31-3	5 km	0	2
Normtraject 33-1	7 km	0	2
Normtraject 34-3	5 km	0	0
Normtraject 34-4	10 km	0	0
Normtraject 34-5	31 km	0	0
Totaal te versterken lengte:		0 km	45 km

Voor tijdlijn Zeer extreem ontstaat er in 2200 voor alle trajecten een opgave, waardoor er t/m 2200 minimaal 2 versterkingsrondes nodig zijn. Om te bepalen of er voor 2100 ook versterkingen nodig zijn, is gekeken naar de opgave voor 2150 en 2100. Voor 2100 geldt dat er voor geen enkel traject een opgave ontstaat. Voor 2150 betreft dit een opgave voor de trajecten 27-4, 31-3 en 33-1. Voor deze trajecten ontstaat er daarmee tot 2100 één versterkingsronde.

Tijdljn Zeer Extreem	Lengte normtraject	Aantal dijkversterkingen benodigd	
		Tot 2100	Tot 2200
Normtraject 216	6 km	0	2
Normtraject 25-3	20 km	0	2
Normtraject 27-4	16 km	1	3
Normtraject 27-3	5 km	0	2
Normtraject 30-1	22 km	0	2
Normtraject 31-3	5 km	1	3
Normtraject 33-1	7 km	1	3
Normtraject 34-3	5 km	0	2
Normtraject 34-4	10 km	0	2
Normtraject 34-5	31 km	0	2
Totaal te versterken lengte:		28 km	282 km

Voor de dijkversterkingskosten gaan we uit van een kental voor de kosten per kilometer dijkversterking. Hiervoor nemen we de waarde van 15 miljoen per km aan. De correctie voor de restwaarde in de zichtjaren 2100 en 2200 is genegeerd. Voor de dijkversterkingskosten volgt daarmee het beeld zoals weergegeven in XXX.

Tabel 44: Dijkversterkingskosten als gevolg van inzet Grevelingenmeer en Volkerak-Zoommeer als berging

Dijkversterkingskosten (in Meuro)	Lengte dijkv. Opgave 2100 [km]	Kosten t/m 2100 [Meuro]	Lengte dijkv. Opgave 2200 [km]	Kosten t/m 2200 [Meuro]
Tijdljn Laag	0 km	0	0 km	0
Tijdljn Gematigd	0 km	0	0 km	0
Tijdljn Extreem	0 km	0	45 km	675
Tijdljn Zeer-Extreem	28 km	420	314 km	4.710

E.6 Discussie en conclusies

Op basis van de uitgevoerde analyse constateren we het volgende:

1. De analyse is eenvoudig en daarom zijn uitspraken onder voorbehoud hiervan.
2. De stijging van de hydraulische belasting op het VZM en de Grevelingen bij realisatie van maatregelpakket 2 (en waarschijnlijk ook 1 en 3):
 - VZM: door klimaatontwikkeling ontstaat een toename van de waterstand met ruim 1 m, door realisatie van pakket 2 zal de waterstand op het meer met nog eens +1 m toenemen.
 - Grevelingen: door klimaatontwikkeling is er geen toename, door realisatie van pakket 2 is er een toename van de waterstand met ruim +2 m.
3. Door huidige aanwezige oversterkte (zowel sterker als hoger dan noodzakelijk) zijn de benodigde dijkversterkingen beperkt (oude zeedijken).
4. De toename van het overstromingsrisico is niet verwaarloosbaar, maar valt binnen de norm (bovennormatieve gebeurtenis). Mogelijk geeft dit wel aanleiding tot aanpassing van de norm.

Bijlage F Gevoeligheidsanalyse aanpassing sluitpeil

Voor verschillende tijdlijnen hebben we onderzocht in welke mate de sluitfrequentie en de waterstanden veranderen als het sluitpeil van de EPK bij Rotterdam en Dordrecht wordt aangepast. Voor het huidige beheer van de Maeslantkering is de sluitstrategie al regelmatig onderwerp geweest van onderzoek.

F.1 Probleemschets

Door zeespiegelstijging zal bij gelijkblijvende sluitstrategie de Europoortkering vaker sluiten, met als gevolg een grotere onderhoudsopgave (niet alleen meer slijtage, maar ook in een kleiner beschikbaar tijdsvenster kan onderhoud plaatsvinden) en een kleinere levensduur (door slijtage die niet met regulier onderhoud kan worden opgevangen). Daarnaast geeft een hogere sluitfrequentie meer overlast voor de scheepvaart van en naar de Rotterdamse haven. In de basissituatie is het huidige sluitpeil gehanteerd tot 1 m zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 2 m is een verhoging van het sluitpeil met 1,25 m toegepast en bij 3 m zeespiegelstijging een verhoging van 2,5 m. In de voorliggende gevoeligheidsanalyse hebben we voor alle tijdlijnen de sluitfrequentie bepaald voor sluitpeilen bij Rotterdam die variëren tussen 2,5 en 7,0 m+NAP in stapjes van 0,25 m (bij Dordrecht tussen 2,4 en 6,9 m+NAP)¹⁵. Voor een aantal locaties in het gebied hebben we het effect van deze aanpassing op de waterstanden onderzocht. Zodoende wordt duidelijk op welke wijze het sluitpeil kan worden aangepast zonder dat dit grote gevolgen heeft voor de belastingen op de waterkeringen.

De vraag is of het sluitpeil bij verdergaande klimaatverandering van invloed is op de waterstanden na realisatie van een maatregelpakket. Indien het mogelijk is om de sluitfrequentie slechts gering te laten toenemen en de waterstanden gelijk te houden (of zelfs te verlagen) met een andere sluitstrategie, dan lijkt het wenselijk om een andere sluitstrategie te hanteren. Uiteindelijk is de sluitstrategie een afweging tussen de kosten (bijvoorbeeld voor scheepvaart) en baten (met name waterveiligheid).

De invloed van het sluitpeil op de buitendijkse gebieden is hierbij ook van belang. Het effect van deze aanpassing van de sluitstrategie op de waterstanden bij lagere frequenties dan de normfrequentie (1/10, 1/100 of 1/1.000 per jaar), zijn voor de gevolgen voor de buitendijkse gebieden ook van belang. Voor het optimaliseren van het sluitpeil hebben wij de volgende aanpak gevolgd:

- voor de analyse van de basissituatie en de maatregelpakketten zijn hydraulische berekeningen gemaakt voor vijf zeespiegelstijgingen {0,0; 0,5; 1,0; 2,0 en 3,0 m}.
- het resultaat van deze berekeningen is weggeschreven in vijf databases fysica.
- de sluitfunctie¹⁶ in deze databases is gebruikt om uit te zoeken in welke mate de waterstanden en de sluitfrequentie veranderen als het sluitpeil wordt aangepast.

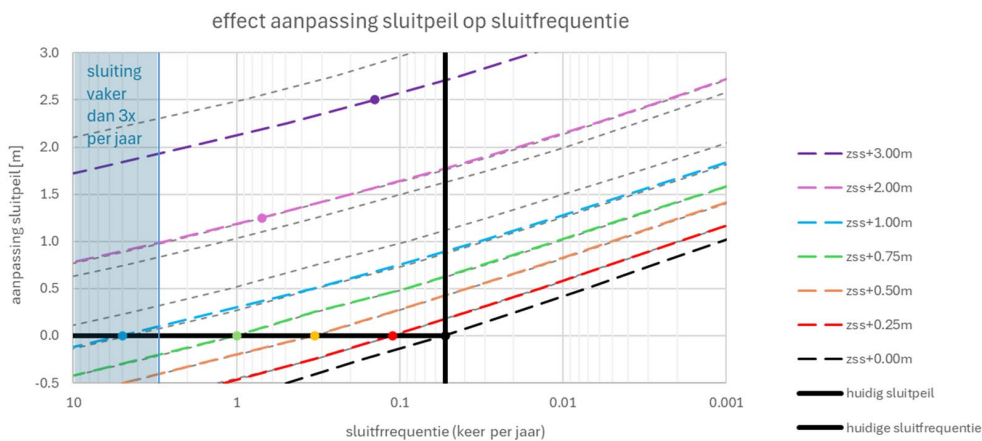
¹⁵ De Europoortkering wordt gesloten op een verwachte overschrijding van peil bij Rotterdam of Dordrecht. De waarde dit sluitpeil bij Dordrecht is 0,1 m lager dan de waarde bij Rotterdam (zie ook bijlage B.6). In de tekst hanteren we de waarde van Rotterdam voor het sluitpeil, in berekening is het peil bij beide locaties in gelijke mate aangepast.

¹⁶ In de sluitfunctie is vastgelegd bij welke combinatie van basisstochasten (wind, zee en rivier) het sluitpeil bij Rotterdam en/of Dordrecht wordt gehaald. In deze functie is vastgelegd of de Europoortkering gesloten moet worden bij een bepaalde combinatie.

F.2 Berekening wijziging sluitfrequentie

In de hydraulische berekeningen wordt rekening gehouden met *geforceerd sluiten*, waardoor standaard met een 0,5 m lager sluitpeil wordt gerekend (zie HKV, 2022a voor een uitgebreide toelichting). In de databases zitten dus resultaten van een sluiting bij een 0,5 m lager sluitpeil. In de probabilistische berekeningen heeft een dergelijke sluiting bij een dergelijk lage waterstand te Rotterdam en/of Dordrecht een verwaarloosbare kans van voorkomen. Door de sluitfunctie tabel aan te passen (door het sluitpeil te verlagen), wordt de kans van voorkomen van deze sluitingen groter. Als we het peil verhogen, wordt de kans op sluitingen verkleind. Zo kunnen we een aanpassing van de sluitstrategie meenemen in de probabilistische berekening en daarmee de gevoeligheid van de sluitfrequentie en de waterstanden voor de keuze van het sluitpeil onderzoeken.

In Figuur 92 is de gevoeligheid van de sluitfrequentie weergegeven. Deze frequentie van de basisstrategie zonder zeespiegelstijging (zss+0,0 m) is (gemiddeld) 1x per 19 jaar. Op de horizontale as van de grafiek is dit omgerekend naar 0,05 keer per jaar. Met de verticale, dikke zwarte lijn is deze sluitfrequentie in de grafiek gemarkeerd. Met de horizontale, dikke zwarte lijn is de hoogte van het ongewijzigde sluitpeil weergegeven. Logisch dat beide lijnen elkaar kruisen op lijn van het resultaat zonder zeespiegelstijging (zwarte onderbroken lijn). Op een logaritmische schaal (horizontale as) lijkt een lineaire relatie te bestaan tussen de frequentie en de aanpassing. Op basis van deze lijnen kan geschat worden welke aanpassing van het sluitpeil nodig is om het (gemiddeld) aantal sluitingen in een willekeurig zichtjaar naar een gewenst aantal te wijzigen. Tevens kan in de figuur worden afgelezen welke sluitfrequentie wordt bereikt als het peil niet wordt gewijzigd. Berekend is het gemiddeld aantal sluitingen per jaar (het ene jaar kan dit meer zijn dan het andere, maar gemiddeld over de jaren gelijk aan deze frequentie).



Figuur 92: Effect van aanpassing van het sluitpeil (verandering voor Rotterdam en Dordrecht gelijk) op de sluitfrequentie van de Europoortkering voor verschillende tijdlijnen (grijze gestreepte lijnen zijn zichtjaren van tijdlijnen, gekleurde gestreepte lijnen zijn een selectie daarvan).

De sluitfrequenties van de doorrekening van de basissituatie en de maatregel-pakketten zijn gelijk. Immers een sluiting van Europoortkering is gebaseerd op een verwachte overschrijding van het peil, als de kering nog niet is gesloten. Geen van maatregel-pakketten wijzigt de waterstand als de kering niet gesloten is. In Tabel 54 staat de stijging van de zeespiegel per tijdlijn en zichtjaar. Met kleuren is een selectie van zichtjaren weergegeven die in de toelichting van deze gevoeligheids-analyse wordt gebruikt. De gekleurde cellen in de tabel komen overeen met de gekleurde lijnen in Figuur 92. Met gekleurde bolletjes is in de figuur de resulterende sluitfrequentie bij de gebruikte instellingen in de doorrekening van basissituatie en maatregel-pakketten (bijlage B.6) weergegeven.

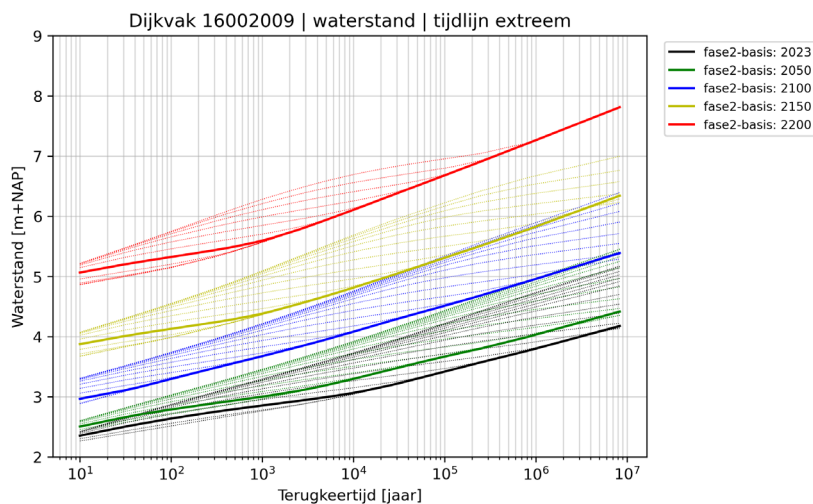
In de berekening van de basissituatie en de pakketten wordt tot en met 1 m zeespiegelstijging vastgehouden aan de basis sluitstrategie (cq. het sluitpeil is niet gewijzigd). De gekleurde bolletjes tot en met 1 m zeespiegelstijging liggen daarom allemaal op de horizontale, dikke, zwarte lijn. Het rode bolletje (tijdlijn Gematigd, zichtjaar 2050 en zeespiegelstijging 0,25 m) ligt op de horizontale as bij 0,11 keer per jaar (ongeveer 1x per 9 jaar). Het gele bolletje (tijdlijn Zeer extreem, zichtjaar 2050 en zeespiegelstijging 0,5 m) ligt op 0,3 j⁻¹ (ongeveer 1x per 3 jaar). Het groene bolletje ligt op 1 j⁻¹ (gelijk 1x per jaar) en het blauwe bolletje op 5 j⁻¹ (elk jaar 5 sluitingen). Het lichtpaarse bolletje ligt op de verticale as bij een aanpassing van het sluitpeil met 1,25 m (zie Tabel 14) en op de horizontale as op 0,7 j⁻¹ (ongeveer 1x per 1½ jaar). Het donkerpaarse bolletje ligt op de verticale as bij 2,5 m (zie Tabel 14) en op de horizontale as bij 0,1 j⁻¹ (ongeveer 1x per 7 jaar).

Tabel 45: Mate van zeespiegelstijging per tijdlijn en zichtjaar (met kleur is selectie van zichtjaren weergegeven die gebruikt voor toelichting van de analyse).

Tijdlijn	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 (m)				
	2023	2050	2100	2150	2200
Laag	0.05	0.25	0.50	0.75	1.00
Gematigd	0.05	0.25	0.75	1.31	2.00
Extreem	0.05	0.25	1.00	1.80	3.00
Zeer extreem	0.05	0.50	2.00	3.50	5.37

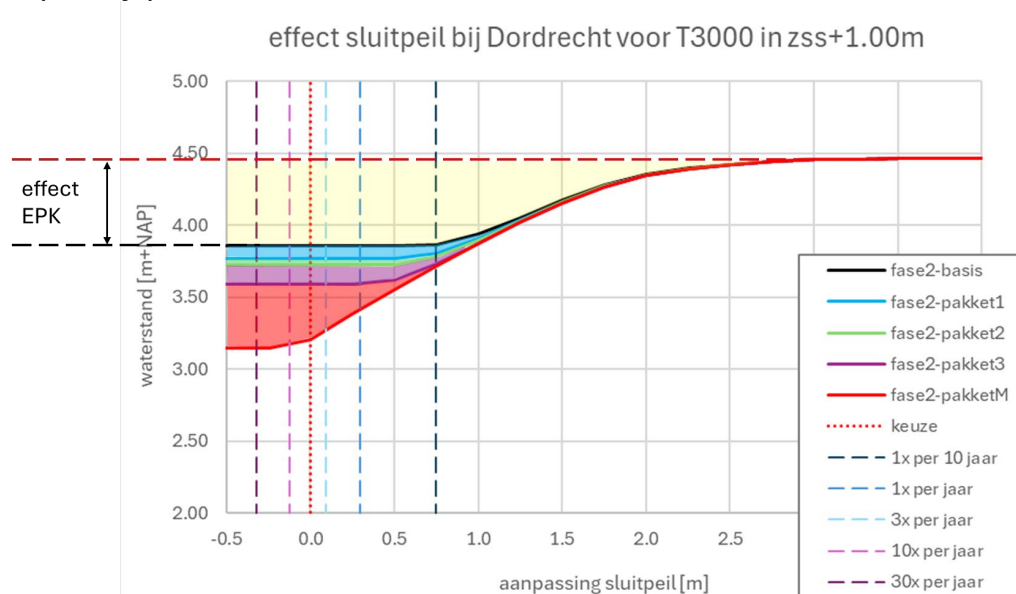
F.3 Berekening wijziging waterstanden

In de gevoeligheidsanalyse is met Hydra-NL de waterstand berekend voor alle tijdlijnen bij aanpassing van het sluitpeil (NAP+3,0 m) tussen NAP+2,5 m en +7,0 m in stappen van 0,25 m. In Figuur 93 is voor tijdlijn Extreem op locatie Rotterdam het resultaat van deze berekening weergegeven. De dikke gekleurde lijn is het resultaat van de basissituatie en de dunne gekleurde lijnen zijn het resultaat van aanpassing van het sluitpeil. Voor een beperkt aantal locaties in het gebied is het effect van de aanpassing van het sluitpeil op de waterstanden onderzocht (zie Figuur 9). Niet alleen voor de basissituatie, maar ook voor situaties na realisatie van pakket 1, 2 of 3 (de sluitfrequentie is gelijk, de resulterende waterstand echter niet).



Figuur 93: Waterstandsfrequentielijnen bij diverse sluitpeilen op voorbeeldlocatie Dordrecht voor zichtjaren 2023, 2050, 2100, 2150 en 2200 van tijdlijn Extreem (dunne lijnen = resultaat aangepast sluitpeil, dikke lijnen = resultaat van basisstrategie uit paragraaf B.6).

In Figuur 94 tonen we voor één herhalingsstijd ($T = 3.000$ jaar) bij één zichtjaar (2100 in tijdlijn Extreem, i.e. de set blauwe lijnen uit Figuur 93) op één locatie (Dordrecht) het effect van de aanpassing van het sluitpeil van de EPK op de lokale waterstand in de basissituatie (zwarte lijn), in de berekening van de drie maatregelpakketten (blauwe, groene en paarse lijn) en in de berekening van pakket M (rode lijn).



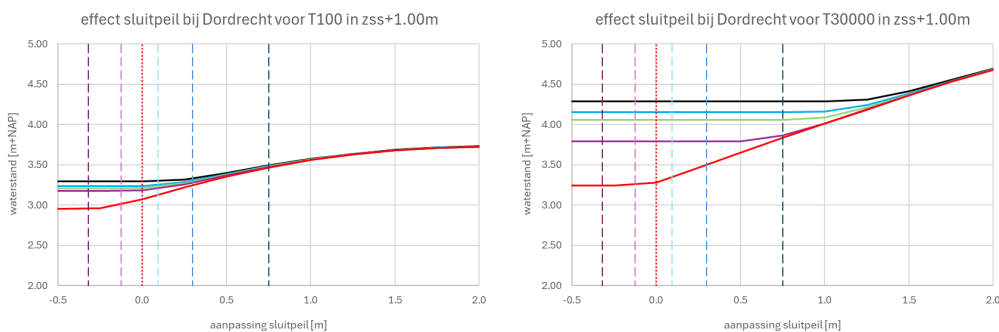
Figuur 94: Effect aanpassing sluitpeil op de T3.000 waterstand te Dordrecht voor het huidige watersysteem, en ook na realisatie van de maatregelpakketten bij een zeespiegelstijging van +1 m.

We lichten de inhoud van Figuur 94 hier puntsgewijs toe:

1. Op de horizontale as staat de aanpassing van het sluitpeil. Bij een verhoging van het sluitpeil met 1,5 m (cq. tot NAP+4,5 m te Rotterdam en 4,4 m+NAP te Dordrecht) hebben de maatregelpakketten (incl. pakket M) in dit zichtjaar geen verlagend effect op de waterstand (bij $T = 3.000$ jaar). Er is bij een dergelijke verhoging van het sluitpeil nauwelijks verschil tussen de zwarte lijn (basissituatie) en de gekleurde lijnen (maatregelpakketten). Het sluiten van de Europoortkering heeft ondanks deze verhoging van het sluitpeil nog wel een verlagend effect op de waterstand bij Dordrecht (zie gele vlak in de figuur).
2. Bij een verhoging van het sluitpeil met 2,5 m (cq. tot NAP+5,5 m te Rotterdam en 5,4 m+NAP te Dordrecht) heeft het sluiten van de EPK nauwelijks nog een verlagend effect op de waterstand (T3.000) in dit zichtjaar. Deze verhoging van het sluitpeil met 2,5 m zorgt ervoor dat de EPK veel later dicht gaat en onder maatgevende omstandigheden eigenlijk niet meer sluit.
3. Als het sluitpeil wijzigt tussen NAP+2,5 m en 3,5 m dan is het effect van een sluiting van het EPK min of meer constant (gekleurde lijnen lopen horizontaal). Tussen deze waarden is het waterstandverschil tussen de drie maatregelpakketten onderling en met de basissituatie min of meer constant. Alleen het effect op de waterstand van pakket M wijzigt nog significant tussen deze waarden. Het verlagend effect op de waterstand (T3.000) van dit pakket wordt constant als het huidige sluitpeil wordt verlaagd tot NAP+2,7 m.
4. Met verticale (onderbroken) lijnen in de grafiek is een bepaalde wijziging van het sluitpeil aangegeven, die leidt tot de sluitfrequentie in de legenda als label aan de betreffende lijn is gekoppeld. De meest rechtse lijn markeert een verhoging van het peil tot 1 sluiting per 10 jaar sluitingen. De meest linkse lijn markeert een verlaging tot 30 sluitingen per jaar. De rode stippellijn markeert het sluitpeil, waarmee de basissituatie en maatregelpakketten zijn doorgerekend (en komt overeen met ongeveer 5 sluitingen per jaar).

Figuur 94 toont dat de waterstand bij $T = 3.000$ jaar te Dordrecht, als de zeespiegel met een meter gestegen is, nauwelijks verandert ($< 0,1$ m) bij 0,25 m verhoging of 0,75 m verlaging van het sluitpeil (cq. aanpassing sluitfrequentie van 30x per jaar naar 1x per 10 jaar). Dit geldt zowel voor de waterstand in de basissituatie als na realisatie van de drie maatregelpakketten (een halve meter naar rechts of links t.o.v. het snijpunt met de rode, verticale stippellijn op de zwarte, blauwe, groene en paarse lijnen, geeft geen andere waterstand). M.a.w. de T3.000 waterstand bij 1 m zeespiegelstijging is niet tot nauwelijks gevoelig voor een wijziging van het sluitpeil.

In Figuur 95 staat het resultaat van dezelfde gevoeligheidsanalyse ook voor $T = 100$ en $T = 30.000$ jaar. De T100 waterstand is (natuurlijk) lager dan de T3.000 waterstand en de T30.000 waterstand is juist hoger. Het onderlinge verschil tussen de basissituatie en de pakketten is voor de T100 waterstand aanzienlijk kleiner (weinig verschil tussen de zwarte en de paarse lijn) dan voor de T30.000 waterstand.



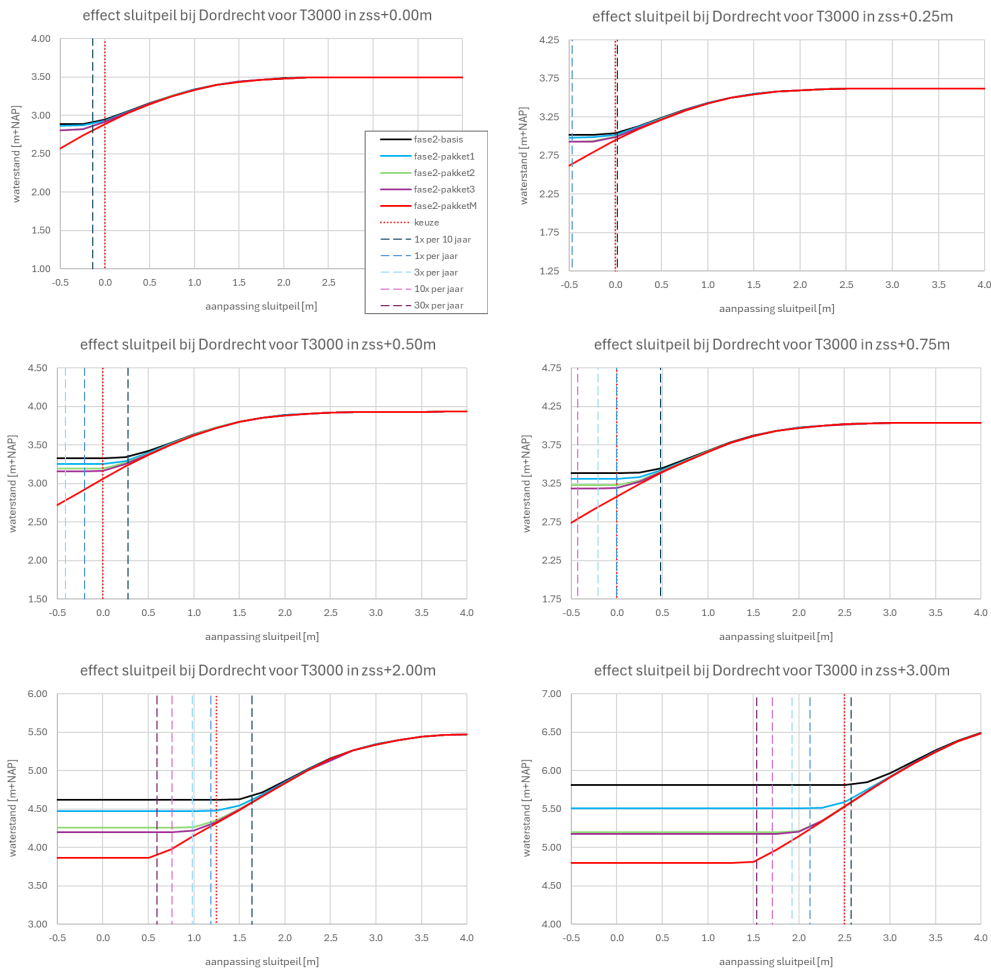
Figuur 95: Effect aanpassing sluitpeil op T100 en T30.000 waterstand te Dordrecht voor het huidige watersysteem en na realisatie van de maatregelpakketten bij zeespiegelstijging van +1 m.

Het sluitpeil heeft een groter effect op de T100 dan op de T30.000 waterstand:

1. De aanpassing van de sluitfrequentie van 30x per jaar naar 1x per 10 jaar (cq. wijziging sluitpeil van -0,5 m naar +0,75 m) heeft nauwelijks effect op de berekende T30.000 waterstand ($< 0,1$ m). Alleen bij de rode lijn van pakket M neemt de T30.000 waterstand toe met 0,6 m bij een afname van het sluitfrequentie van 30 keer per jaar naar 1x per 10 jaar.
2. De aanpassing van de sluitfrequentie van 30x per jaar naar 1x per 10 jaar heeft een verhogend effect op de berekende T100 waterstand. In de doorrekening van de basissituatie neemt de T100 waterstand te Dordrecht met 0,2 m toe, in de doorrekening van pakket 3 met 0,3 m en in pakket M met 0,5 m.

In de voorgaande alinea's is het resultaat van de gevoeligheidsanalyse bij 1 meter zeespiegelstijging besproken. In Figuur 96 staat het resultaat bij een andere stijging van de zeespiegel te zien. Bij een lagere stijging is ook het effect van een wijziging van het sluitpeil kleiner (verticale stippellijnen liggen dicht bij elkaar). Bij een extreme zeespiegelstijging van 2 of 3 m is de waterstand bij Dordrecht gevoeliger voor de keuze van het sluitpeil:

- Bij zeespiegelstijging +2 m is het verschil in T3.000 waterstand tussen sluitfrequenties 1x per 10 jaar en 30x per jaar ongeveer 0,05 m, 0,40 m en 0,65 m voor respectievelijk de basissituatie, pakket 3 en pakket M.
- Bij zeespiegelstijging +3 m is het verschil in waterstand ongeveer 0,0 m, 0,35 m en 0,70 m voor respectievelijk de basissituatie, pakket 3 en pakket M.



Figuur 96: Effect aanpassing sluitpeil op T3.000 waterstand te Dordrecht voor het huidige watersysteem en na realisatie van de maatregelpakketten bij zeespiegelstijging van +0; 0,25; 0,5; 0,75; 2 en 3 m (+1 m zie Figuur 94).

De keuze van het sluitpeil uit de gerapporteerde doorrekening van de maatregelpakketten (rode, verticale stippellijn in de figuren) kan voor zeespiegelstijging +2 m en +3 m nog verder worden geoptimaliseerd.

- Als bij 2 m zeespiegelstijging het sluitpeil met 0,6 m wordt verhoogd (i.p.v. de gekozen 1,25 m verhoging), zal de EPK 30x per jaar worden gesloten. De T3.000 waterstand te Dordrecht van pakket 3 zal dan met 0,4 m en van pakket M 0,4 m lager zijn t.o.v. de basissituatie (i.p.v. de berekende verlaging van 0,3 m).
- Als bij 2 m zeespiegelstijging de sluitfrequentie beperkt moet blijven tot (gemiddeld) 3 sluitingen per jaar, zal de T3.000 waterstand van pakket 3 te Dordrecht ook 0,4 m lager zijn dan de basissituatie en de waterstand van pakket M is dan ongeveer 0,45 m lager. Het verschil tussen pakket 3 en pakket M wordt dan dus kleiner als de sluitfrequentie wordt beperkt tot enkele keren per jaar (cq. 3x).
- Als bij 3 m zeespiegelstijging de sluitfrequentie mag toenemen tot 30x per jaar (i.p.v. de gekozen 1x per 7 jaar), zal de T3.000 waterstand van pakket 3 0,65 m en van pakket M 1,0 m lager zijn dan de basissituatie te Dordrecht (i.p.v. de berekende verlaging van 0,45 m).
- Als bij 3 m zeespiegelstijging de sluitfrequentie beperkt moet blijven tot (gemiddeld) 3 sluitingen per jaar, zal de T3.000 waterstand van pakket 3 te

Dordrecht 0,6 m lager zijn dan de basissituatie en de waterstand van pakket M is dan ongeveer 0,75 m lager.

F.4 Discussie en conclusies

In Figuur 97, Figuur 98 en Figuur 99 is het effect van het sluitpeil op de waterstand (T10.000) getoond bij respectievelijk 1, 2 en 3 m zeespiegelstijging voor meerdere locaties in het studiegebied. In Tabel 46 is hiervan een samenvatting gegeven. In de tabel staat de verlaging in waterstand (T10000) als de EPK 30x per jaar wordt gesloten t.o.v. een sluiting per 10 jaar.

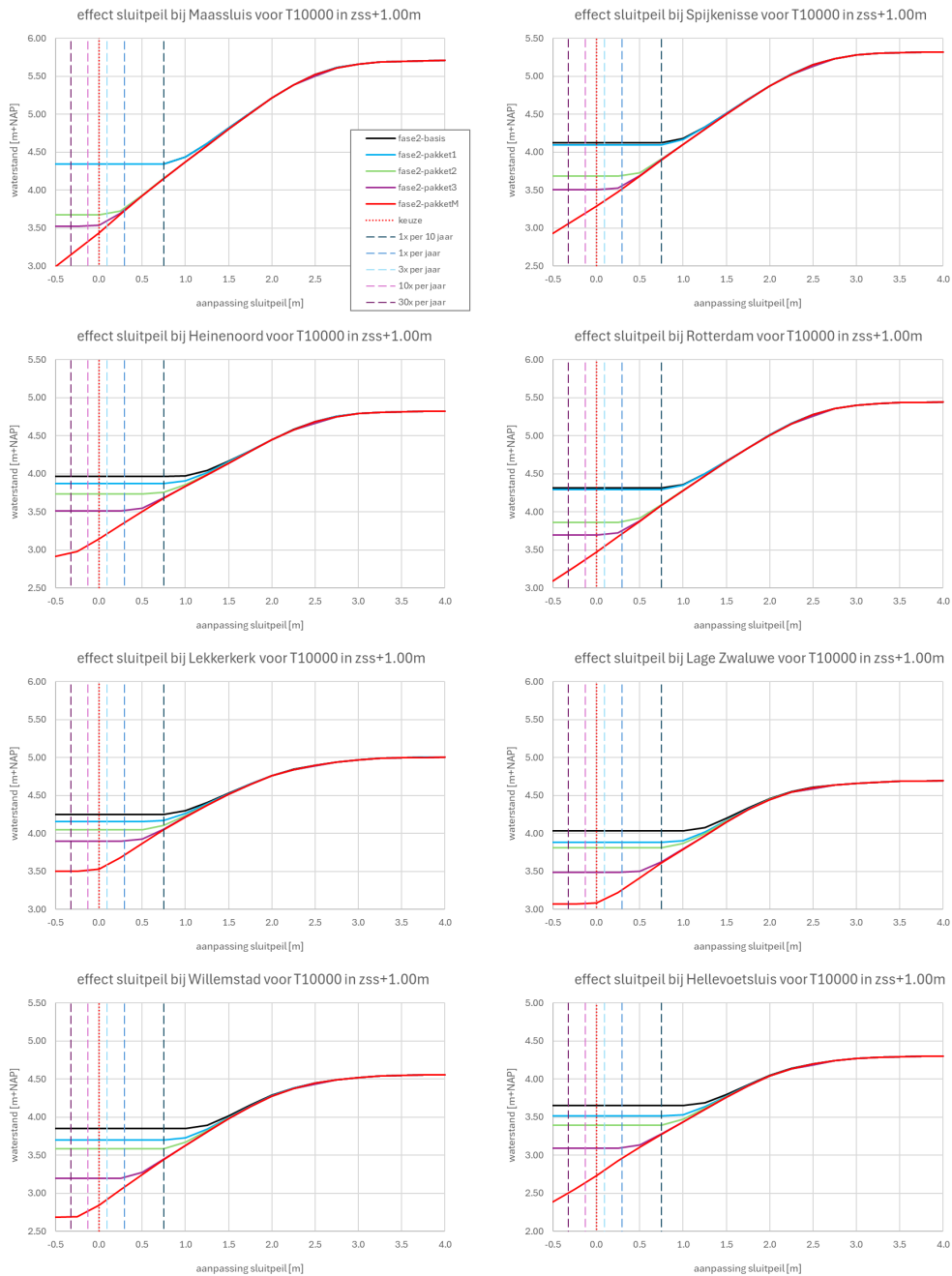
- Zodra de faalkans van de Europoortkering wordt verbeterd (pakket 2, 3 en M), geeft aanpassing van het sluitpeil een significant verschil. Als de zeespiegelstijging groter is, is dit effect groter.
- Als de waterstand achter een gesloten Europoortkering lager is (verschil tussen pakket 2, 3 en M), dan is het effect van een grotere sluitfrequentie ook groter.
- Op locaties nabij de Europoortkering is het effect van de aanpassing van het sluitpeil groter dan op verder weg gelegen locaties.

Tabel 46: Bandbreedte van effect op waterstand bij aanpassing sluitfrequentie tussen 1x per 10 jaar en 30x per jaar.

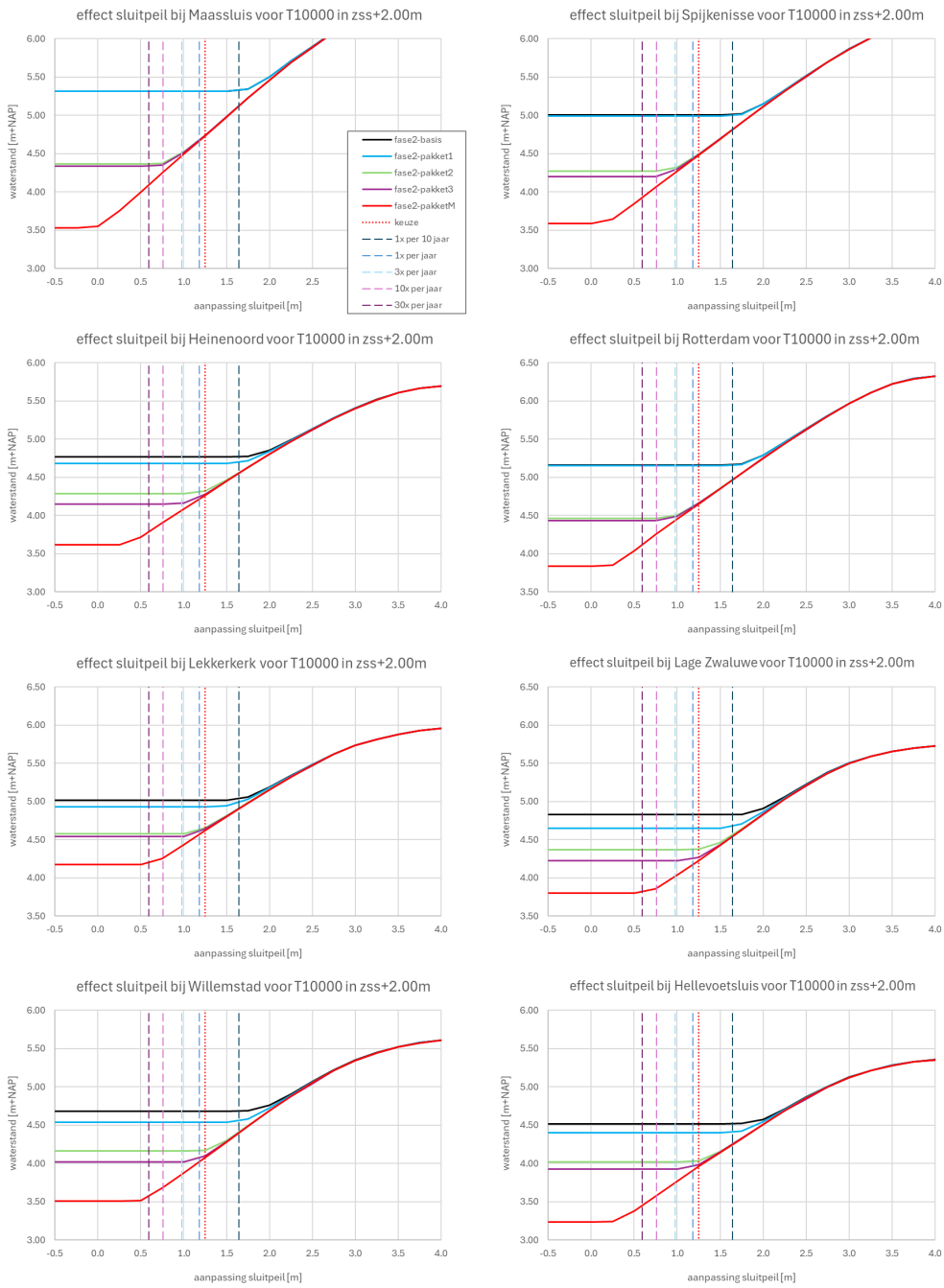
effect sluitpeil op ws T10000 in zss+1.00m (verschil in m tussen sluitfreq. 30x j ⁻¹ en 1x per 10j)					
	fase2-basis	fase2-pakket1	fase2-pakket2	fase2-pakket3	fase2-pakketM
Maassluis	0.00	0.00	0.48	0.63	0.94
Rotterdam	0.00	0.00	0.23	0.39	0.80
Spijkenisse	0.00	0.00	0.22	0.40	0.79
Lekkerkerk	0.00	0.01	0.05	0.16	0.55
Heinenoord	0.00	0.00	0.02	0.17	0.70
Dordrecht	0.00	0.00	0.01	0.10	0.59
Willemstad	0.00	0.00	0.01	0.25	0.75
Hellevoetsluis	0.00	0.00	0.00	0.19	0.72
Lage Zwaluwe	0.00	0.00	0.00	0.14	0.54
effect sluitpeil op ws T10000 in zss+2.00m (verschil in m tussen sluitfreq. 30x j ⁻¹ en 1x per 10j)					
	fase2-basis	fase2-pakket1	fase2-pakket2	fase2-pakket3	fase2-pakketM
Maassluis	0.01	0.01	0.73	0.76	0.98
Rotterdam	0.01	0.01	0.50	0.52	0.81
Spijkenisse	0.01	0.01	0.53	0.60	0.84
Lekkerkerk	0.03	0.05	0.32	0.36	0.68
Heinenoord	0.00	0.02	0.26	0.39	0.73
Dordrecht	0.01	0.05	0.24	0.33	0.68
Willemstad	0.00	0.02	0.24	0.37	0.79
Hellevoetsluis	0.00	0.01	0.23	0.31	0.76
Lage Zwaluwe	0.00	0.03	0.18	0.31	0.70
effect sluitpeil op ws T10000 in zss+3.00m (verschil in m tussen sluitfreq. 30x j ⁻¹ en 1x per 10j)					
	fase2-basis	fase2-pakket1	fase2-pakket2	fase2-pakket3	fase2-pakketM
Maassluis	0.00	0.00	0.76	0.77	1.02
Rotterdam	0.00	0.00	0.52	0.53	0.81
Spijkenisse	0.00	0.00	0.56	0.59	0.88
Lekkerkerk	0.00	0.01	0.37	0.38	0.73
Heinenoord	0.00	0.00	0.36	0.39	0.78
Dordrecht	0.00	0.00	0.31	0.33	0.76
Willemstad	0.00	0.00	0.30	0.31	0.87
Hellevoetsluis	0.00	0.00	0.31	0.33	0.85
Lage Zwaluwe	0.00	0.00	0.26	0.28	0.81

Zoals eerder gesteld kan de waarde van het sluitpeil in de doorrekening van de maatregelpakketten (rode, verticale stippellijn in de figuren) voor zeespiegelstijging +2 m en +3 m nog verder worden geoptimaliseerd. Bij zeespiegelstijging +1 m is een verder optimalisatie van het gekozen sluitpeil voor een zo laag mogelijke waterstand nauwelijks mogelijk.

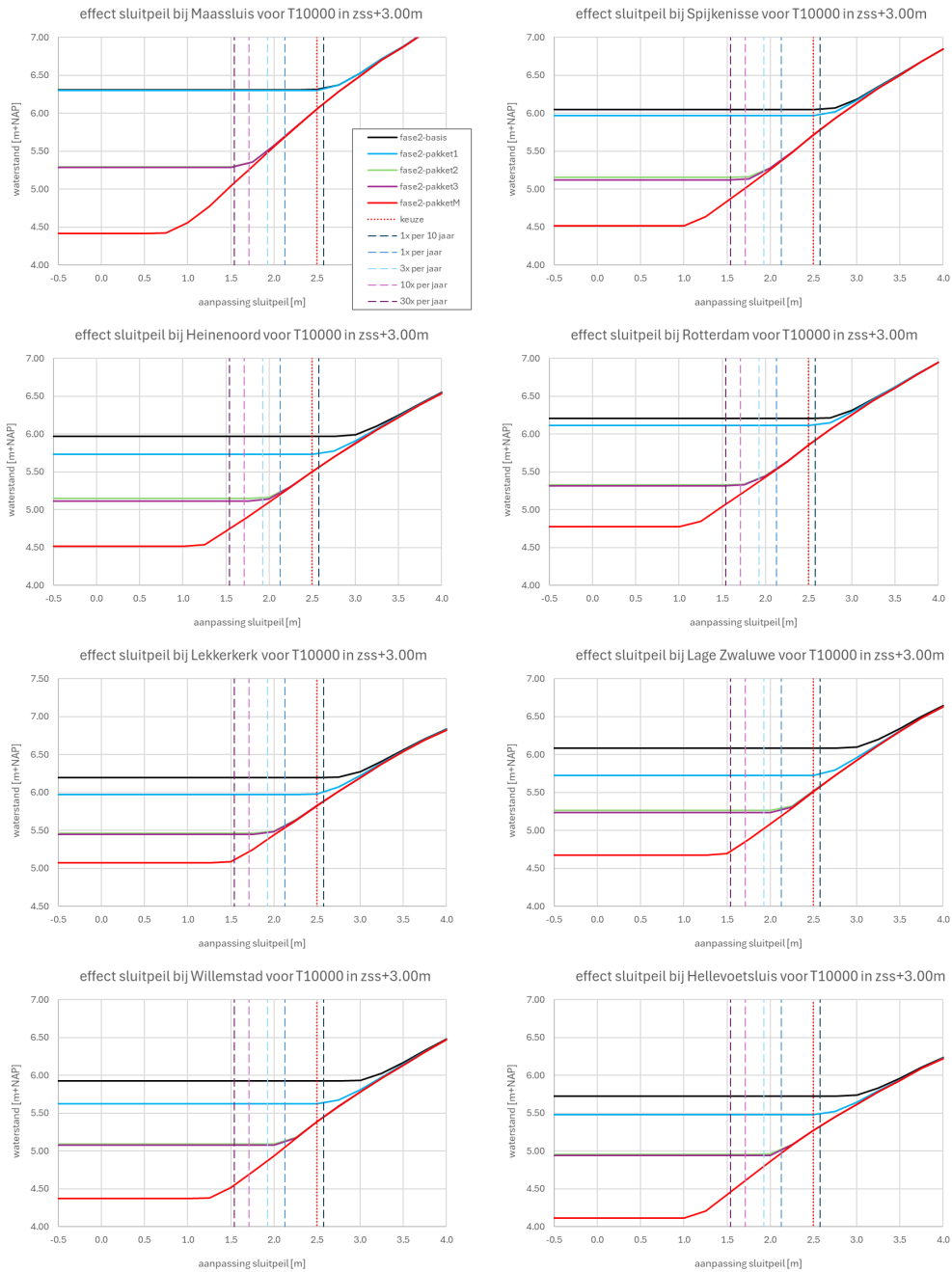
- Bij zeespiegelstijging +1 m geeft een verlaging van het sluitpeil ten opzichte van het doorgerekende sluitpeil (aangegeven met keuze in de figuren), geen verlaging van de waterstand voor de resultaten van pakket 2 en 3. Het resultaat van pakket M kan bij Maasluis met ongeveer 0,2 m en bij Dordrecht met ongeveer 0,05 m worden verlaagd als de sluitfrequentie tot 30x per jaar wordt geaccepteerd.
- Bij zeespiegelstijging +2 m geeft een verlaging van het sluitpeil (ten opzichte van het doorgerekende sluitpeil) een verlaging van de waterstand voor de resultaten van pakket 2 en 3 van ongeveer 0,75 m bij Maasluis en 0,30 bij Dordrecht. Het resultaat van pakket M kan bij Maasluis met ongeveer 1,0 m en bij Dordrecht met ongeveer 0,7 m worden verlaagd als de sluitfrequentie tot 30x per jaar wordt geaccepteerd.
- Bij zeespiegelstijging +3 m geeft een verlaging van het sluitpeil (ten opzichte van het doorgerekende sluitpeil) een verlaging van de waterstand voor de resultaten van pakket 2 en 3 van ongeveer 0,75 m bij Maasluis en 0,30 bij Dordrecht. Het resultaat van pakket M kan bij Maasluis met ongeveer 1,0 m en bij Dordrecht met ongeveer 0,75 m worden verlaagd als de sluitfrequentie tot 30x per jaar wordt geaccepteerd.
- De verwachting dat een sluitfrequentie van 30x jaar te veel hinder voor de scheepvaart veroorzaakt of tot een te grote onderhoudsopgave leidt. Stel dat een 3x per jaar sluitfrequentie wel acceptabel is, dan verwachten wij dat bovenstaande effect grofweg gehalveerd worden.



Figuur 97: Effect aanpassing sluitpeil op T10.000 waterstand bij 8 locaties verspreid in het studiegebied voor het huidige watersysteem en na realisatie van de maatregelpakketten bij zeespiegelstijging van +1 m.



Figuur 98: Effect aanpassing sluitpeil op T10.000 waterstand bij 8 locaties verspreid in het studiegebied voor het huidige watersysteem en na realisatie van de maatregelpakketten bij zeespiegelstijging van +2 m.



Figuur 99: Effect aanpassing sluitpeil op T10.000 waterstand bij 8 locaties verspreid in het studiegebied voor het huidige watersysteem en na realisatie van de maatregelenpakketten bij zeespiegelstijging van +3 m.

Bijlage G Effect maatregelen voor Hollandsche IJssel

In de geanalyseerde maatregelpakketten is de Hollandsche IJssel niet meegenomen. Dit komt omdat de Hollandsche IJssel een relatief klein, maar zeer specifiek onderdeel van het watersysteem van de Rijn-Maasmonding is, door de aanwezigheid van een tweede voorliggende stormvloedkering (naast de Europoortkering). Om die reden is de Hollandsche IJsselkering apart beschouwd.

G.1 Probleemschets

Deze Hollandsche IJsselkering (HIJK) kan de Hollandsche IJssel afsluiten en zo het achterliggende gebied beschermen tegen hoogwaters op de Nieuwe Maas. De complexiteit en omvang van de benodigde rekeninspanning is dusdanig groot, dat deze niet in verhouding staat tot de analyses die voor de rest van de Rijn-Maasmonding zijn uitgevoerd.



Figuur 100: Luchtfoto van de Hollandsche IJsselkering in de richting van de Nieuwe Maas (bron: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/deltawerken/hollandsche-ijsselkering>).

Specifiek voor de Hollandsche IJssel is daarom een aanvullende analyse uitgevoerd, waarbij is onderzocht wat het gecombineerde effect is van de volgende maatregelen:

- Een verkleining van de faalkans van de HIJK naar 1/10.000^e per sluitvraag;
- Een verhoging van de HIJK, zodat overlopen van de kering in de toekomst marginaal is;
- Plaatsing van een gemaal naast de kering dat ingezet kan worden voor het pompen water vanuit de Hollandsche IJssel naar Nieuwe Maas (als het afvoeren van water onder vrij verval is gestremd).

G.2 Berekening effect maatregelpakket

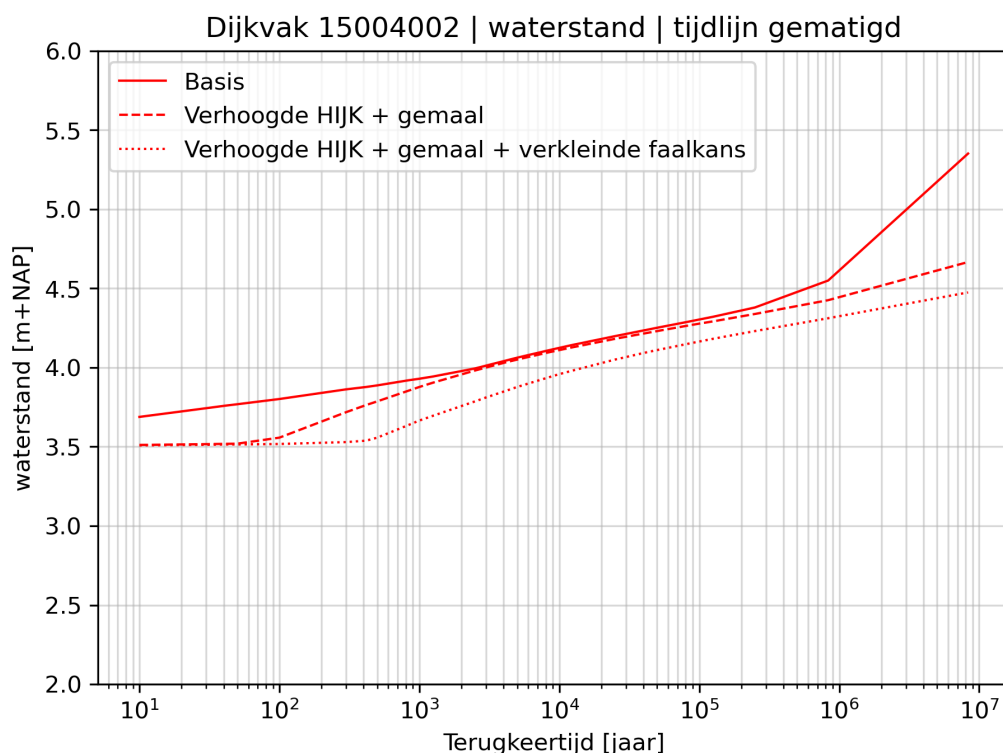
Op basis van beschikbare berekeningsresultaten zijn daarom nieuwe databases gegenereerd met waterstanden die representatief zijn voor de situatie met een

verhoogde HIJK en een gemaal naast de HIJK. Vervolgens zijn met deze databases 2 sets Hydra-NL berekeningen gemaakt voor alle tijdlijnen en zichtjaren:

1. Een set met deze nieuwe databases
2. Een tweede met deze nieuwe databases in combinatie met een verkleinde faalkans van de HIJK.

Tot slot zijn met OKADER de dijkversterking(kost)en berekend voor deze beide sets berekeningen.

De resultaten voor een locatie langs de Hollandsche IJssel zijn gevisualiseerd in Figuur 101 voor tijdlijn gematigd in zichtjaar 2200 (2 m zeespiegelstijging).



Figuur 101: Voorbeeldresultaat van de waterstandsrequentielijnen voor een locatie langs de Hollandsche IJssel voor zichtjaar 2200 (2 m zeespiegelstijging).

In de figuur zijn 3 frequentielijnen te zien:

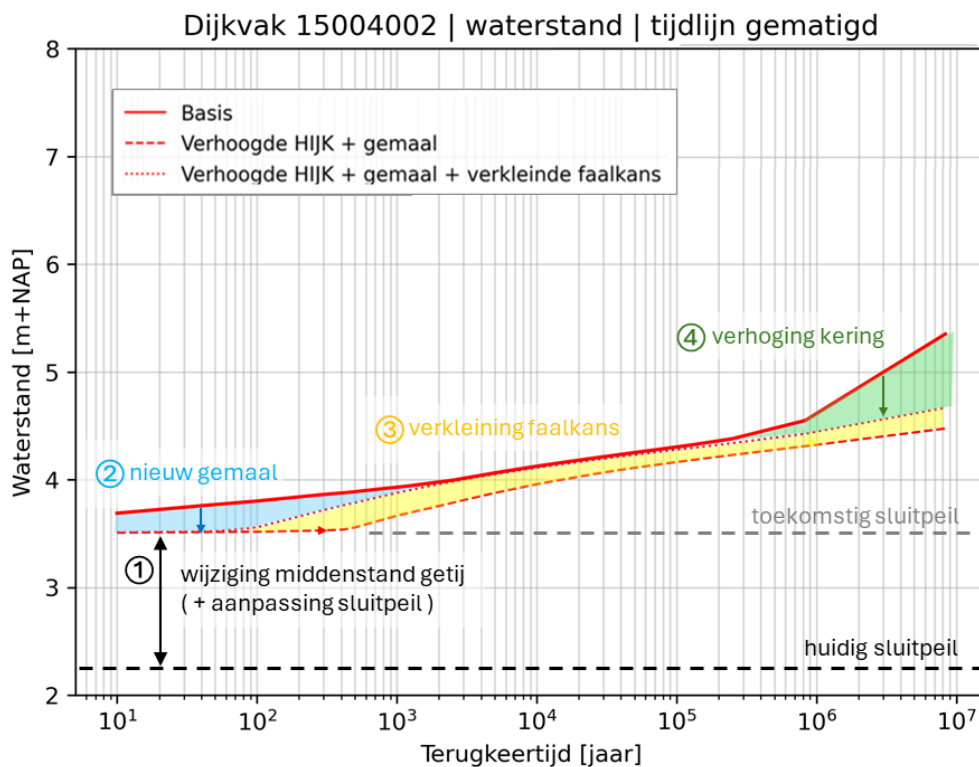
1. De doorgetrokken rode lijn correspondeert met het resultaat uit de basissituatie (startpunt fase 2 van het KP ZSS, zonder maatregelen);
2. De gestreepte rode lijn laat het effect zien van een verhoogde HIJK en de aanleg van een gemaal.
3. De rode stippellijn geeft het resultaat als naast het verhogen van de HIJK en de aanleg van een gemaal, ook de faalkans van de HIJK wordt verkleind van 1/200^e naar 1/10.000^e per sluitvraag.

De toelichting op de resultaten geven we aan de hand van Figuur 102, waarin dezelfde lijnen zijn getekend als in Figuur 101, maar aangevuld met gekleurde vlakken en nadere aanwijzingen:

- De wijziging van de middenstand van het getij en (als gevolg daarvan) de aanpassing van het sluitpeil van NAP+2,25 m naar NAP+3,50 m (verhoging 1,25 m) zien we goed terug in de algehele (verticale) verschuiving van de

frequentielijnen. Dit veroorzaakt veruit de grootste stijging van de waterstanden op de Hollandsche IJssel;

- De vergelijking van de doorgetrokken lijn en de gestreepte lijn laat twee effecten zien: bij de kleine terugkeertijden wordt de frequentielijn voor de basissituatie omlaag getrokken richting het sluitpeil door de aanleg van het gemaal (blauwe vlak). In de basissituatie begint in de waterstand vanaf $T = 10^5$ jaar belastingcombinaties mee te doen waarbij de HIJK overloopt en de Hollandsche IJssel (als afgesloten bak) dus meer en meer volloopt naarmate de terugkeertijd toeneemt. Bij de grote terugkeertijden zien we dat met name het overlopen van de HIJK wordt voorkomen (groene vlak). De bijdrage van het gemaal ligt in de orde van $75 \text{ m}^3/\text{s}$ en is klein t.o.v. de hoeveelheden water die over de HIJK stromen.



Figuur 102: Voorbeeldresultaat van de waterstandsfrequentielijnen voor een locatie langs de Hollandsche IJssel voor zichtjaar 2200 bij 2 m zeespiegelstijging (Gematigd).

- Door gestreepte lijn en de gestippelde lijn met elkaar te vergelijken, zien we het effect van het verkleinen van de faalkans van de HIJK (het geel gemarkeerde gebied). Dit heeft dus effect voor een groot aantal terugkeertijden en bedraagt $0.1 - 0.2 \text{ m}$, afhankelijk van de terugkeertijd. We zien dat voor terugkeertijden rondom de normen van de primaire waterkeringen ($T = 3000$ en $T = 10.000$ jaar) eigenlijk alleen verkleinen van de faalkans een verlaging van de waterstanden geeft.
- Tot slot constateren we dat de frequentielijnen van de gestreepte en de gestippelde lijn een duidelijke "knik" vertonen, grofweg bij respectievelijk $T = 50$ jaar en bij $T = 500$ jaar. Deze worden veroorzaakt door een combinatie van de faalkans van de HIJK met de sluitfrequentie van diezelfde kering. De sluitfrequentie van de HIJK bedraagt grofweg 15x per jaar. Gecombineerd met een faalkans van $1/10.000$ per sluitvraag geeft dit inderdaad grofweg de plek van de knik in de frequentielijn.

G.3 Vermeden versterkingskosten

In termen van vermeden versterkingskosten zien we dat, in algemene zin, de versterkingsmomenten in de tijd ongeveer 10 jaar naar achteren schuiven t.o.v. de basissituatie door de uitvoering van de maatregelen. De grootste (relatieve) verschillen treden op in zichtjaar 2100 voor tijdlijn Extreem en in zichtjaar 2150 voor tijdlijn Laag.

Traject 14-1 Zichtjaar	Tijdelijk Gematigd			
	2050	2100	2150	2200
Basissituatie	291	1.207	5.202	9.821
Aanvullende analyse	291	1.165	4.078	9.072
Verschil (mln. euro)	0	42	1.124	749
Verschil (%)	0%	3%	22%	8%
Tijdelijk gematigd				
Traject 15-3	2050	2100	2150	2200
Basissituatie	111	1.327	6.193	9.732
Aanvullende analyse	37	922	5.308	9.179
Verschil (mln. euro)	74	406	885	553
Verschil (%)	67%	31%	14%	6%

Uit de berekende dijkversterkingskosten langs de Hollandsche IJssel zien we verschillen ontstaan tussen beide oevers:

- In 2050 zien we geen kostenreductie voor traject 14-1, waar we dit wel voor traject 15-3 zien;
- In 2100 zien we juist voor traject 15-3 een kostenreductie van ruim € 400 mln. (ruim 30% reductie t.o.v. de basissituatie), die we bij traject 14-1 eigenlijk niet zien.
- Voor 2150 en 2200 liggen de kostenreducties voor beide normtrajecten dicht bij elkaar, maar is de kostenreductie voor traject 14-1 met ruim € 1,1 mld. Duidelijk groter dan die voor traject 15-3 met bijna € 900 mln.
- De kostenreducties nemen na 2100 duidelijk af.

Een belangrijke oorzaak voor deze verschillen is het verschil in normfrequentie van beide trajecten (1/10.000 per jaar voor traject 14-1 vs. 1/3000 per jaar voor traject 15-3). Omdat de helling van de frequentielijnen niet overal hetzelfde is, maakt het uit bij welke frequentie wordt gekeken bij het bepalen van de verschillen. Dit geeft verschillen in de tijd wanneer bepaalde dijkvakken versterkt worden en dit is terug te zien in de kosten van zowel de basissituatie als de aanvullende analyse.

Opmerking

De kosten voor het ophogen van de HIJK, de aanleg van het gemaal en de reductie van de faalkans van de HIJK zijn nog niet meegenomen in bovenstaande kostenschattingen.

G.4 Discussie en conclusies

Op basis van de uitgevoerde aanvullende analyse concluderen we dat:

1. Met de realisatie van een verbeterde HIJK (verhoging van de kerende hoogte en verkleinde faalkans) en de aanleg van een gemaal de waterstand achter een gesloten HIJK volledig kan worden beheerst.
2. Dit neemt niet weg dat bij wind uit zuidwestelijke richting de hydraulische belasting bij Gouda hoger zal blijven dan bij Krimpen a/d IJssel (door het effect

van scheefstand). Deze belasting gaat wel omlaag door de uitvoering van de maatregelen aan de HIJK en het gemaal.

3. Ondanks dat met de maatregelen een beheerste waterstand kan worden gerealiseerd achter een gesloten HIJK, zal door zeespiegelstijging de sluitfrequentie van de HIJK aanzienlijk toenemen. Ondanks de verkleining van de faalkans van de HIJK zal de bijdrage van de "open situatie" dominant blijven voor de beoordeling en het ontwerp van de primaire waterkeringen van dijkringen 14 en 15.
4. Door beheersing van de waterstanden worden de dijkversterkingskosten gereduceerd. Dit kan oplopen tot een kostenreductie van maximaal 25% t.o.v. de basissituatie in dit gebied (in 2100 voor tijdlijn Laag, of in 2150 voor tijdlijn Extreem). In absolute zin volgt dat door het uitvoeren van de maatregelen uit de aanvullende analyse bij +1 m zeespiegelstijging tussen 1,0 en 1,5 miljard euro kan worden bespaard (in zichtjaar 2200 voor tijdlijn Laag en in zichtjaar 2100 voor tijdlijn Extreem).

Bijlage H Uitgangspuntendocument

H.1 Inleiding

H.1.1 Achtergrond

In fase 1 van Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP-ZSS) spoor II is voor de Rijn-Maasmonding en het rivierengebied (ordegrootte tot de splitsingspunten, hierna simpelweg aangeduid als RMM) probabilistisch bepaald wat de hydraulische belastingen worden bij specifieke combinaties van rivierafvoer en zeespiegelstijging. Daaruit is vervolgens bepaald hoeveel dijkverhoging/-versterking nodig is bij een zeespiegelstijging tot 5 m in 2200 (in combinatie met toenemende rivierafvoeren).¹⁷

Geconcludeerd is dat de kosten die hiermee gemoeid zijn waarschijnlijk in dezelfde orde van grootte liggen als de huidige HWBP-inspanningen. Tevens is middels gevoeligheidsanalyses gekeken hoe het systeem reageert op individuele ingrepen, waaronder het verkleinen van de faalkans van de Europoortkering, het verhogen van het sluitpeil of het verhogen van het zeefront van deze kering. In deze studie is echter niet gekeken naar het gecombineerde effect van dit soort maatregelen.

H.1.2 Doelstelling

In deze opdracht wordt onderzocht wat een afgewogen en realistisch pakket aan maatregelen betekent – in termen van (daling van) waterstanden, dijkhoogtes en kosten – voor de oprekbaarheid van de Voorkeurstrategie, in vergelijking met de resultaten uit fase 1 van KP-ZSS spoor II.

H.1.3 Inhoud van dit rapport

Dit document beschrijft de uitgangspunten voor de analyse van de strategie verlengende maatregelen voor RMM. In algemene zin wordt zoveel mogelijk aangesloten bij de aanpak en uitgangspunten van fase 1. Dat betekent onder meer dat we uitgaan van dezelfde tijdlijnen en zichtjaren, met bijbehorende zeespiegelstijging en afvoerstatistiek. Details daarvan worden beschreven in paragraaf H.2.1.

De belangrijkste wijziging betreft de maatregelpakketten zelf. Deze pakketten betreffen op hoofdlijnen:

- pakket I : uitgebreide waterberging Zuidwestelijke Delta;
- pakket II : pakket I plus verbeterde Europoortkering (EPK);
- pakket III: pakket II plus pompinstallaties.

¹⁷ Zethof et al., 2023.

De precieze dimensionering van deze pakketten wordt besproken in paragraaf H.2.2. Vervolgens worden voor elk pakket waterstandsberekeningen uitgevoerd met Sobek. Hierbij volgen we in algemene zin de werkwijze zoals toegepast bij de het bepalen van de hydraulische belastingen voor de Hollandsche IJssel voor KP-ZSS en BOI2023 (Honingh et al., 2022). Details zijn beschreven in paragraaf H.3, waarbij we ook ingaan op de precieze implementatie van de maatregelpakketten.

De resultaten van de waterstandsberekeningen worden aangevuld met golfparameters (zie paragraaf H.4) en opgeslagen in zogeheten databases fysica. Hierbij volgen we globaal de werkwijze zoals toegepast bij de recent opgestelde databases voor de RMM (Kuijper en Van der Vegt, 2024). De genoemde databases betreffen de basissituatie zonder maatregelpakketten. Deze databases wijken iets af van de databases voor RMM die zijn gebruikt in fase 1 van KP-ZSS spoor II. In de betreffende databases zijn enkele herstelacties doorgevoerd [Kuijper et al., 2023]. Om die reden worden de hydraulische belastingen en versterkingskosten opnieuw berekend voor de basissituatie zonder maatregelpakketten. Deze resultaten worden in deze studie als referentie gebruikt om het effect van de maatregelpakketten te bepalen.

Paragraaf H.5 beschrijft de uitgangspunten voor het berekenen van de hydraulische belastingen (Hydra-NL) en paragraaf H.6 beschrijft de uitgangspunten voor het berekenen van de (dijkopgave en) versterkingskosten (OKADER). Die berekeningen worden uitgevoerd voor zowel de basissituatie als de maatregelpakketten I t/m III.

H.2 Uitgangspunten

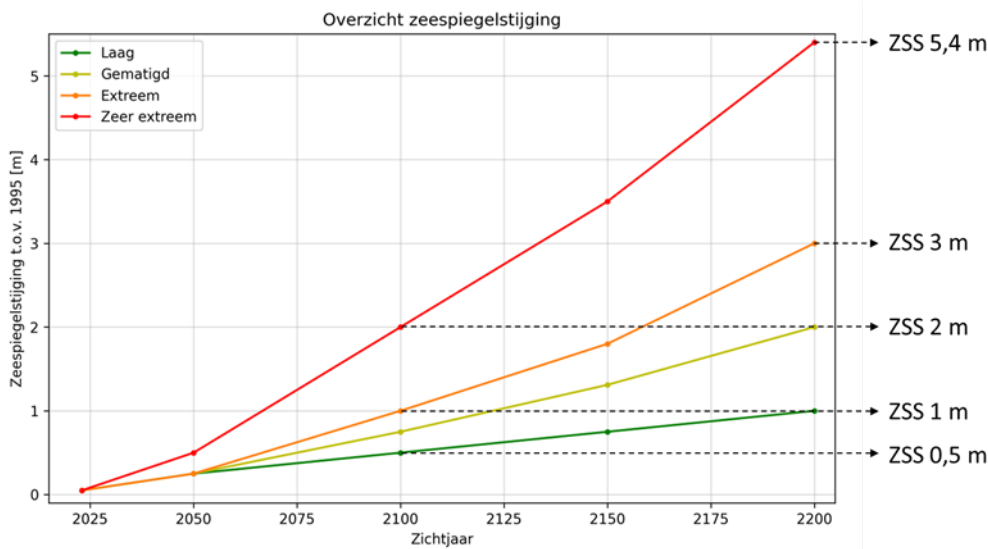
H.2.1 Zichtjaren en tijdlijnen

Per variant (basis en maatregelpakketten) worden berekeningen uitgevoerd voor referentiejaar 2023 en verschillende combinaties van zichtjaren en tijdlijnen. Een tijdlijn beschrijft een mate van zeespiegelstijging en de verandering in afvoerstatistiek in de loop van de tijd. Er worden 4 tijdlijnen beschouwd: Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem. Tabel 47 geeft een overzicht van de hoeveelheid zeespiegelstijging en de afvoerstatistiek per tijdlijn en zichtjaar. Voor meer grafieken en meer details over de afvoerstatistiek verwijzen we naar bijlage B van het RMM-rapport uit fase 1 van KP-ZSS spoor II (Zethof et al., 2023).

Tijdlijn	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 (m)					Afvoerstatistiek				
	2023	2050	2100	2150	2200	2023	2050	2100	2150	2200
n.v.t.	0,05	-	-	-	-	Ref2023	-	-	-	-
Laag	-	0,25	0,50	0,75	1,00	-	GL2050	GL2050	GL2050	GL2050
Gematigd	-	0,25	0,75	1,31	2,00	-	GL2050	GL2100	GL2150	GL2200
Extreem	-	0,25	1,00	1,80	3,00	-	WH2050	WH2100	WH2150	WH2200
Zeer Extreem	-	0,50	2,00	3,50	5,37	-	WH2050	WH2100	WH2150	WH2200

Tabel 47: Overzicht zeespiegelstijging en afvoerstatistiek per tijdlijn en zichtjaar.

Figuur 103 geeft dezelfde informatie als in Tabel 47 grafisch weer.



Figuur 103: Zeespiegelstijging voor verschillende tijdlijnen en zichtjaren

De referentiesituatie die gehanteerd wordt, komt overeen met de huidige inrichting van het watersysteem met daarin meegenomen alle reeds geplande maatregelen in de toekomst. In meer detail betekent dit het volgende:

- De huidige inrichting van het watersysteem komt overeen met die van zichtjaar 2023. De zeespiegelstijging wordt uitgedrukt t.o.v. 1995 en bedraagt in 2023 0,05 m.
- Alle dijkversterkingen via het reguliere Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) om te zorgen dat in 2050 de dijken aan de waterveiligheidsnormen voldoen. Daarbij is in deze studie reeds rekening gehouden met 0,25 – 0,50 m zeespiegelstijging (t.o.v. 1995). Ook wordt daarin de bodemdaling onder de dijk meegenomen t.o.v. de huidige situatie. In 2050 zijn de dijken minimaal op orde, maar omdat dijken in de regel versterkt worden voor 50 jaar kunnen zij in 2050 nog resthoogte (en/of reststerkte) hebben.

H.2.2 Maatregelpakketten

De paragraaf beschrijft de drie maatregelpakketten. De dimensionering van de maatregelen zoals deze in SOBEK zijn gedaan, worden weergegeven. In het document "20240515 Memo pakketten strategieverlengende maatregelen" zijn de maatregelpakketten en de totstandkoming beschreven. Hieronder wordt het pakket beknopt beschreven en worden de afmetingen van de maatregelen per pakket weergegeven.

1. Pakket I: Referentiesituatie + extra waterberging Zuidwestelijke delta
2. Pakket II: Pakket I + verbeteren Europoortkering en Haringvlietdam.

3. Pakket III: Pakket II + aanleg gemalen.

Pakket I: Referentiesituatie + extra waterberging Zuidwestelijke delta

Extra waterberging in de Zuidwestelijke delta wordt gerealiseerd door in zowel de Volkerakdam als de Grevelingendam doorlaatmiddelen met een doorstroomoppervlak van 2.000 m² te dimensioneren. Voor de Volkerakdam worden bestaande openingen verdiept (lagere drempel) en verbreedt. In de Grevelingendam worden twee openingen gecreëerd. In Tabel 11 zijn de dimensies van de maatregelen weergegeven.

Locatie	Onderdeel	Basis	Pakket I:
Volkerakdam	Uitgangspeil	NAP+0 m	NAP+0 m
	Inzetpeil	NAP+2,6 m	NAP+2,6 m
	Effectief doorstroomoppervlak	570 m ²	2.000 m ²
	Drempels kokers	NAP-4,25 m	NAP-6,25 m
	Schuiven model	4	4
Grevelingendam (Zuid-Holland)	"Krammer" breedte doorlaatmiddel Krammer	Geen	3 x 55 m
	"Krammer" doorstroomoppervlak	0 m ²	1350 m ²
	"Krammer" drempel doorlaatmiddel	n.v.t.	NAP-6,00 m
	"Bocht St. Jacob" breedte doorlaatmiddel	Geen	2 x 60 m
	"Bocht St. Jacob" doorstroomoppervlak	0 m ²	650 m ²
	"Bocht St. Jacob" drempel doorlaatmiddel	n.v.t.	NAP-6,00 m

Tabel 48: Dimensies maatregelen Volkerakdam en Grevelingendam

Pakket II: Pakket I + verbeteren Europoortkering en Haringvlietdam

Het doel van maatregelpakket II is om, aanvullend op maatregelpakket I, het gebied achter de Europoortkering en de Haringvlietdam beter te beschermen tegen storm vanuit zee. De dijken worden verhoogd en de faalkans van de Maeslantkering en Hartelkering worden verkleind. Om het effect van versterking van de Europoortkering te bepalen, kennen ook we een oneindige hoogte toe aan de beweegbare keringen, m.u.v. de Hartelkering. De huidige kerende hoogte van de Hartelkering is bewust lager dan de hoogte van de Maeslantkering (NAP+5,0 m), anders ontstaan te hoge waterstanden op het Hartelkanaal. In Tabel 12 zijn de dimensies van de maatregelen weergegeven.

Locatie / onderdeel	Basis	Pakket I:
Maeslantkering hoogte	NAP+5 m	NAP+999 m
Faalkans Maeslantkering	1/100 per sluitvraag	1/5.000 per sluitvraag
Europoortkering I – overlaat 1	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Europoortkering II – overlaat 2	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Rozenburgse sluis hoogte	NAP+5,5 m	NAP+999 m
Hartelkering hoogte	NAP+3.0 m	NAP+3.0 m + opgelegde zeespiegelstijging*
Faalkans Hartelkering	1/100 per sluitvraag	1/5.000 per sluitvraag
Europoortkering II – overlaat 1	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Europoortkering II – overlaat 2	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Botlek overlaat	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Petroleumhaven overlaat	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>	<i>In RMM-model aanwezig, niet overstroombaar</i>
Haringvlietssluisen	NAP+5,0 m	NAP+999 m

Tabel 49: Dimensies maatregelen Europoortkering

Pakket III: Pakket II + aanleg gemalen

Het doel van maatregelpakket III is om, aanvullend op maatregelpakket II, gemalen te plaatsen om tijdens hoogwater extra water uit het systeem te kunnen pompen. Het gaat om pompen ter plekke van de Europoortkering (tussen Rozenburg en de Maeslantkering), in de Haringvlietdam en mogelijk op de Brouwersdam. Voor het vaststellen van de pompcapaciteit is gekeken naar de afvoer van de desbetreffende rivieren (afvoer Lek voor pompcapaciteit bij Europoortkering en afvoer Waal/Merwede/Maas voor pompafvoer bij de Haringvlietdam). In Tabel 13 is de pompcapaciteit per locatie weergegeven.

Locatie / Onderdeel	Basis	Pakket I:
Gemaalcapaciteit Europoortkering I	Geen	3.000 m ³ /s
Breedte gemalen Europoortkering I	Geen	n.t.b.
Aanslagpeil Rak Noord van gemalen Europoortkering I	Nvt	inzetpeil berging +0,25 m
Gemaalcapaciteit Haringvlietdam	Geen	7.000 m ³ /s
Breedte gemalen Haringvlietdam	Geen	n.t.b.
Aanslagpeil Rak Noord van gemalen Haringvlietdam	Nvt	inzetpeil berging +0,25 m

Tabel 50: Dimensies maatregelen Volkerakdam en Grevelingendam

H.3 Waterstandsberekeningen (Sobek)

De maatregelen van de bovengenoemde maatregelpakketten zijn verwerkt in het bestaande SOBEK3-model voor de Rijn-Maasmonding (RMM). In onderstaande subparagrafen zijn de uitgangspunten voor de Sobek-berekeningen puntsgewijs behandeld.

H.3.1 Sluit- en inzetpeilen kunstwerken

Afhankelijk van het niveau van de zeespiegelstijging zijn de sluitpeilen van de stormvloedkeringen in het gebied aangepast.

Europoortkering

Voor de referentiesituatie (0,08 m zeespiegelstijging t.o.v. 1995), voor 0,5 m en 1,0 m zeespiegelstijging hanteren we geen verandering van de huidige sluitpeilen. Om de sluitfrequenties bij 2 m en 3 m zeespiegelstijging te beperken, zijn de sluitpeilen aangepast conform (Vos, 2021). Deze komen respectievelijk overeen met een sluitpeilverhoging van 1,25 m bij 2,0 m zeespiegelstijging en een sluitpeilverhoging van 2,5 m bij 3,0 m zeespiegelstijging. Deze verhoging hanteren we ook voor het inzetpeil (bij zeespiegelstijging NAP+2,6 m te Rak Noord) van de waterberging voor de Volkeraksluizen. Voor de Europoortkering (EPK) en de inzet van het Volkerak-Zoommeer volgen we dus de uitgangspunten van KP ZSS Pilot RMM.

ZSS [m]	Sluitpeil Rotterdam [m+NAP]	Sluitpeil Dordrecht [m+NAP]	Toename sluitpeil [m]	Keerpeil EPK [m+NAP]
0	3,00	2,90	n.v.t.	2,00
0,5	3,00	2,90	0	2,00
1	3,00	2,90	0	2,00
2	4,25	4,15	1,25	3,25
3	5,50	5,40	2,50	4,50

Tabel 51: Overzicht van sluit- en keerpeilen van de Europoortkering

Het keerpeil dat wordt gehanteerd voor het sluiten van de EPK in het geval van een peilsluiting neemt met dezelfde waarden toe als de sluitpeilen voor Rotterdam en Dordrecht. De conditie voor het debiet voor de kenteringsluiting van de EPK ($Q_{Lobith} \geq 6000 \text{ m}^3/\text{s}$) verandert niet.

Stormvloedkering Hollandsche IJssel

Een eenvoudige analyse op basis van het getij van juni 2021 laat zien dat bij 1 m zeespiegelstijging de SVK-HIJ ongeveer 17 keer per maand zal sluiten door het reguliere getij. Door het verhogen van het sluitpeil met 0,25 m naar NAP+2,50 m zakt dit naar ongeveer 1 tot 2 keer per jaar. We hanteren daarom op verzoek van Rijkswaterstaat de volgende verhogingen voor de sluitpeilen voor de HIJK en de maalstoppeilen op de HIJ (toenames komen overeen met EPK):

ZSS [m]	Sluitpeil Krimpen a/d IJssel [m+NAP]	Toename sluitpeil [m]
0	2,25	n.v.t.
0,5	2,25	0
1	2,25	0
2	3,50	1,25
3	4,75	2,50

Tabel 52: Overzicht van sluitpeilen van de Hollandsche IJsselkering

Ook de maalstoppeilen, de conditie voor de kenteringsluiting bij Hoek van Holland en het keerpeil in het geval van een peilsluiting nemen met dezelfde hoeveelheid toe als de sluitpeilen.

ZSS [m]	Maalstoppeil Krimpen a/d IJssel [m+NAP]	Maalstoppeil Gouda [m+NAP]	Conditie peilsluiting HvH [m+NAP]	Keerpeil HIJK [m+NAP]	Toename [m]
0	2,60	2,80	3,00	1,50	n.v.t.
0,5	2,60	2,80	3,00	1,50	0
1	2,60	2,80	3,00	1,50	0
2	3,85	4,05	4,25	2,75	1,25
3	5,10	5,30	5,50	4,00	2,50

Tabel 53: Overzicht van maalstop- en keerpeilen van de Hollandsche IJsselkering

Volkeraksluizen

We hanteren (conform de stormvloedkeringen) de volgende verhogingen voor het inzetpeil bij Rak Noord voor het Volkerak-Zoommeer:

ZSS [m]	Inzetpeil VZM Rak Noord [m+NAP]	Toename [m]
0	2,60	n.v.t.
0,5	2,60	0
1	2,60	0
2	3,85	1,25
3	5,10	2,50

Tabel 54: Overzicht van het inzetpeil voor het Volkerak-Zoommeer

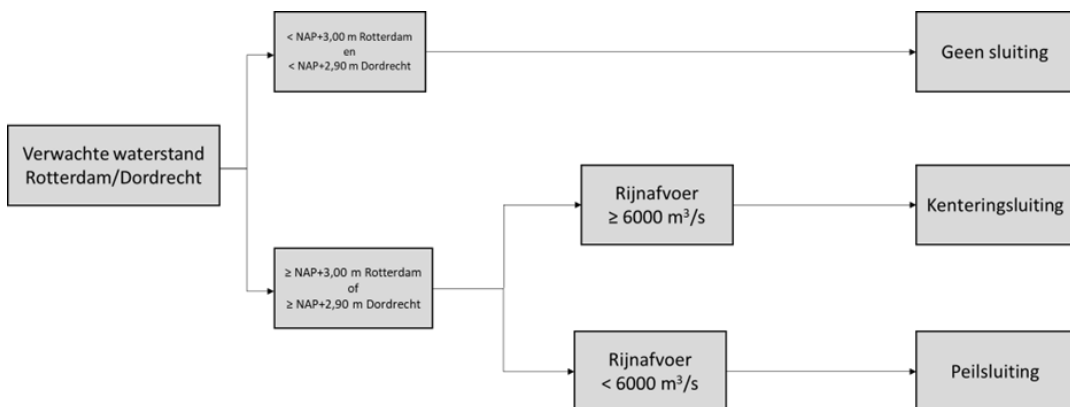
H.3.2 Faalkansen stormvloedkeringen

Voor de faalkansen van de stormvloedkeringen baseren we ons op de bestaande keuzes binnen KP ZSS (Europoortkering 1/1.000 per sluitvraag, HIJK 1/200 per sluitvraag (huidige situatie) en 1/2.000 per sluitvraag (toekomstige scenario's)). De

faalkans van de Haringvlietsluizen en de Volkeraksluizen zijn verwaarloosd in deze studie, omdat die kans zeer klein wordt geacht en/of de gevolgen klein zijn. Het aantal door te rekenen belastingcombinaties wordt hierdoor aanzienlijk beperkt. De faalkansen van de stormvloedkeringen zijn vrij te variëren in Hydra-NL en daarom binnen dit onderzoek alleen gehanteerd in de testberekeningen.

H.3.3 Sluitstrategie SVK Europoortkering

De Europoortkering, bestaande uit de Maeslantkering en de Hartelkering, dient te sluiten wanneer de voorspelde waterstand bij Rotterdam of Dordrecht hoger is dan respectievelijk NAP+3,0 m en NAP+2,9 m. Het moment van de sluiting (sluitmoment) hangt vervolgens af van de rivierafvoer van de Rijn bij Lobith. Is deze 6000 m³/s of hoger, dan sluit de EPK op kentering, zo niet, dan sluit deze op peil (Figuur 104). Beide sluitingen hebben een ander criterium om het sluitmoment te bepalen. Voor een uitgebreide beschrijving van deze sluitingen wordt verwezen naar (Honingh et al., 2022).

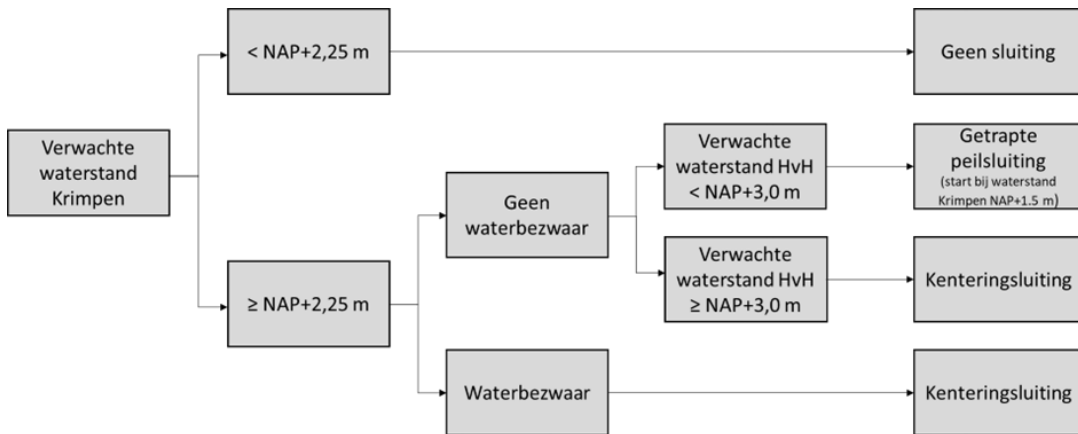


Figuur 104: Beslisboom sluitstrategie Europoortkering

H.3.4 Sluitstrategie SVK Hollandse IJssel

Figuur 105 geeft de beslisboom voor de sluiting van de SVK-HIJ zoals deze is gehanteerd in het huidige project. De kering sluit wanneer de verwachte waterstand bij Krimpen groter of gelijk is aan NAP+2,25 m. In geval van waterbezwaar, of wanneer de verwachte waterstand bij Hoek van Holland groter of gelijk is aan NAP+3,0 m, sluit de Hollandsche IJsselkering op kentering. In de overige gevallen sluit de kering op peil. De peilsluiting wordt ingezet wanneer in aanloop naar de voorspelde overschrijding van NAP+2,25 m, een (momentane) waterstand van NAP+1,5 m wordt bereikt ter plaatse van de HIJK (getrapte peilsluiting). Deze marge dient ervoor dat de kering gesloten is wanneer de waterstand bij Krimpen gelijk is aan NAP+2,25 m.

Deze keuze voor het sluitprotocol wijkt af van de Systemanalyse HIJ. Daar is uitgegaan van een verwachte waterstand van NAP+2,25 m ergens op de HIJ in plaats van Krimpen. Deze afwijking is uitgevoerd op verzoek van het waterschap en de afwijking is afgestemd met BOI en RWS-WNZ. In voorliggende studie hanteren we strikt het draaiboek (RWS-ZH, 2005) en sluit te kering op basis van de waterstand bij Krimpen aan de IJssel.



Figuur 105: Beslisboom sluitstrategie HIJK – figuur aangepast t.o.v. Rongen en Maaskant (2019) o.b.v. afstemming met R. Vos (RWS) en S. de Goederen (RWS).

H.3.5 Belastingcombinaties

De door te rekenen belastingcombinaties¹⁸ hebben bij Hoek van Holland een gemiddeld getijwaarde van NAP+1,15 m (bij westelijke windrichtingen) + 0,05 m (zeespiegelstijging 2035) = NAP+1,20 m (Tabel 55) en een springtijwaarde van NAP+1,32 m (bij oostelijke windsectoren) + 0,05 m (ZSS 2035) = NAP+1,37 m (Tabel 56).

Afvoer Rijn Lobith [m ³ /s]	Afvoer Maas Lith [m ³ /s]	Zeewaterstand ¹⁹ [m+NAP]	Windsnelheid (U _{pot}) [m/s]	Windrichting [°N]	Europaotkering [functioneren]	Stormvloedkering Hollandsche IJssel [functioneren]
600	55	1,2	0	225,0	FMz	FMo
2000	222	2,0	10	247,5	CFz	CFq
4000	729	3,0	22	270,0	CFm	CFo
6000	1235	4,0	32	292,5		
8000	1742	5,0	42	315,0		
10000	2248	6,0	47	337,5		
13000	3008	7,0		360,0		
16000	3768	8,0				
17000	4022					
18000	4275					
20000	4782					

¹⁸ De CF-berekeningen worden alleen doorgerekend indien de sluitpeilen worden overschreden.
¹⁹ Bij de referentie zijn de zeewaterstanden met 8 cm verhoogd, om consistent te zijn met Pilot RMM.

24000	5769				
-------	------	--	--	--	--

Tabel 55: Belastingcombinaties (SOBEK3: 21.312) bij westelijke windrichtingen, met FM = Faal Modus, CF = Correct Functioneren, z = zonder en m = met inzet VZM, q = met en o = zonder regionale afvoer.

Afvoer Rijn Lobith [m ³ /s]	Afvoer Maas Lith [m ³ /s]	Zeewaterstand [m+NAP]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [°N]	Europoortkering [functioneren]	Stormvloedkering Hollandsche IJssel [functioneren]
600	55	1,37	0	22,5	FMz	FMo
2000	222		10	45,0		
4000	729		22	67,5		
6000	1235		32	90,0		
8000	1742		42	112,5		
10000	2248			135,0		
13000	3008			157,5		
16000	3768			180,0		
17000	4022			202,5		
18000	4275					
20000	4782					
24000	5769					

Tabel 56: Belastingcombinaties (SOBEK3: 444) voor de productieberekeningen bij oostelijke windrichtingen.

De samenstelling van de belastingcombinatie bepaalt de codering van de betreffende berekening. De code van de berekening wordt vervolgens door het MF-keringenscript, de golvengenerator en de databasegenerator gebruikt om te interpreteren met welke toestand van de keringen, windsnelheid en -richting, zeewaterstand en rivierafvoer is gerekend. Als voorbeeld een interpretatie van de volgende belastingcombinatie:

K1FMzK2FMoZp600Q02000U10D292.5

In het recept voor de codering van berekeningen hanteren we:

- K1 staat voor het functioneren van de Europoortkering (CFm = correct functioneren met inzet VZM, CFz = correct functioneren zonder inzet VZM en FMz = faalmodus zonder inzet VZM);
- K2 staat voor het functioneren van de Hollandsche IJsselkering (CFq = correct functioneren met waterbezwaar, CFo = correct functioneren zonder waterbezwaar en FMo = faalmodus zonder waterbezwaar);
- Z staat voor de zeewaterstand te Maasmond in m+NAP (p: plus), het laagste niveau wordt met 1.xx aangegeven, zodat geen onderscheid hoeft te worden gemaakt tussen gemiddeld en springtij (altijd drie karakters);
- Q de rivierafvoer bij Lobith in m³/s (altijd vijf karakters, opvullen met voorloopnullen);
- U staat voor de potentiële windsnelheid in m/s (altijd twee karakters);
- D staat voor de windrichting in graden t.o.v. Noord (altijd vier karakters).

H.3.6 Belastingcombinaties

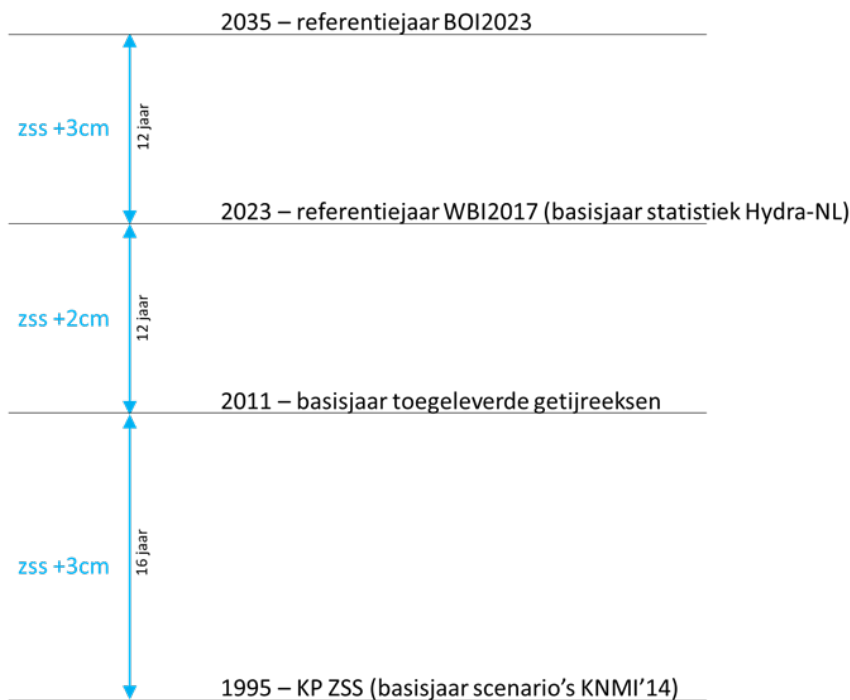
De uitgangspunten voor de toegepaste toekomstscenario's zijn conform (Vos, 2021). Omdat pas in 2023 nieuwe klimaatscenario's van het KNMI beschikbaar komen, is in (Vos, 2021) zo goed mogelijk gebruik gemaakt van wel beschikbare zeespiegelstijgingen en rivierafvoeren. De gemaakte inschatting is geschikt bevonden voor het gebruik in de Gevoeligheidsanalyse van Spoor 2 van KP ZSS. Om verwarring met officiële scenario's van het KNMI of het IPCC te voorkomen, spreken we over "tijdlijnen met zichtwaarden". Er is een tijdlijn laag met een langzame verandering van de zeespiegel en er zijn extreme tijdlijnen met een snelle verandering gemaakt. In deze tijdlijnen is ook de verandering van de rivierafvoeren van Rijn en Maas opgenomen.

De productieberekeningen in deze studie zijn uitgevoerd voor toepassing in zowel KP ZSS als voor BOI2023. Deze beide programma's hebben elk echter een ander referentiejaar ten opzichte waarvan de resultaten worden beschouwd: voor KP ZSS is dit referentiejaar 2023 (conform WBI2017), terwijl dit voor BOI2023 het referentiejaar 2035 is.

Andere aspecten die van belang zijn voor de interpretatie van de resultaten zijn:

1. Het basisjaar waarop de KNMI'14 scenario's zijn gebaseerd;
2. Het basisjaar van de statistiek in Hydra-NL (zeewaterstand en afvoeren);
3. Het basisjaar van de fysica die dient als invoer voor het SOBEK3-model. In het bijzonder gaat het om de middenstand van het basisgetij. Daar direct aan gekoppeld is het basisjaar van de door RWS toegeleverde getijreeks en de vertaling daarvan naar de gewenste middenstand voor toepassing in KP ZSS en BOI.
4. De instellingen zoals deze voor het referentiejaar en de klimaatscenario's beschikbaar zijn binnen het probabilistische model Hydra-NL.

Deze verschillende onderdelen lichten we in onderstaande kopjes toe, waarbij we uitleggen hoe deze verschillende zichtjaren zich tot elkaar verhouden. Figuur 106 geeft grafisch al deze aspecten weer. Deze figuur maakt duidelijk dat de zeespiegelstijging tussen 1995 en 2023 gelijk is aan 5 cm en dat die tussen 1995 en 2035 8 cm bedraagt.



Getallen zijn uitgangspunt BOI2023 en KP ZSS (conform Zeespiegelmonitor)

Figuur 106: Verschillende jaartallen die binnen KP ZSS RMM, HIJ en BOI HIJ gebruikt worden om databases en statistiek te genereren

1. Basisjaar KNMI'14 scenario's

Voor de KNMI'14 klimaatscenario's is een 30-jarige meetreeks tussen 1981 en 2010 gebruikt. Deze meetreeks centreert zich rondom 1995 (+/- 15 jaar), wat in deze studie als het basisjaar van de KNMI'14 klimaatscenario's is aangenomen ten opzichte waarvan toekomstige veranderingen beschouwd zijn.

2. Basisjaar statistiek Hydra-NL

Speciaal voor KP ZSS zijn 2 modelversies van Hydra-NL ontwikkeld: versie 2.8.3 voor toepassing in de Rijn-Maasmonding (zonder de Hollandsche IJssel) en versie 2.8.4 speciaal voor de Hollandsche IJssel²⁰.

Beide versies hanteren zichtjaar 2023 als referentiejaar voor de statistiek van de zeewaterstand en de afvoer (conform WBI2017). De statistiek van de afvoer is overgenomen uit WBI2017 en gebaseerd op uitkomsten van het GRADE-project (Generator of Rainfall and Discharge Extremes) van Rijkswaterstaat. Voor de afvoer wordt uitgegaan van aangepaste KNMI2014-scenario's conform [Hegnauer, 2020], zie hoofdstuk 5 uit [Duits, 2021].

²⁰ Versie 2.8.4 is een verbeterde versie van versie 2.8.3. Voor de Hollandsche IJssel is in versie 2.8.4 een kleine verbetering aangebracht in de berekening van de illustratiepunten op de Hollandsche IJssel. Ook kan versie 2.8.4 in tegenstelling tot 2.8.3 rekenen met de sqlite-database opzet volgens Riskeer.

Versie 2.8.4 van Hydra-NL is consistent met de uitgangspunten van KP ZSS, maar niet helemaal met die voor BOI. Omdat het referentiejaar voor BOI gelijk is aan 2035 (terwijl dat voor KP ZSS gelijk is aan 2023), zijn de standaardinstellingen van het referentiejaar niet bruikbaar voor het referentiejaar van BOI. Een aanpassing hierop is aan te raden. Daar komen we hieronder nog op terug (zie punt 4 hieronder).

3. Basisjaar fysica

Om het SOBEK3 model voor de Hollandsche IJssel te kunnen voeden, is de volgende invoer nodig:

- getij (cyclisch) met een bepaalde middenstand t.o.v. NAP;
- vorm van de stormopzet (vorm trapezium);
- hoogte van de stormopzet;
- mate van zeespiegelstijging.

Als we de KNMI'14 scenario's als de basis hanteren, dan moet de invoer voor het SOBEK3 model ook opgelegd worden ten opzichte van 1995 om consistent te blijven. Aangezien er op dit moment geen nieuwe klimaatscenario's zijn, is in het vervolg van dit project 1995 als basisjaar voor de fysica aangehouden. Dat betekent ook dat we toenames van de zeespiegelstijging dus in dit project beschouwen ten opzichte van 1995.

De door RWS toegeleverde getijreeks gaat uit van slotgemiddelden van het getij uit 2011. Om te zorgen dat we aansluiten bij zichtjaar 1995, is deze reeks gecorrigeerd naar 1995 (door deze met 3 cm te verlagen, zie Figuur 106), om consistentie tussen de fysica en de statistiek te waarborgen.

4. Probabilistische berekeningen in Hydra-NL

Afhankelijk van de toepassing, de beschikbare databases fysica en de beschikbare statistiek, moeten binnen Hydra-NL andere keuzes gemaakt worden om consistent te blijven.

Hieronder geven we voor drie verschillende toepassingen een aantal voorbeelden van instellingen.

Voorbeeld 1: KP ZSS Rijn Maasmonding

De databases in Pilot RMM (fysica) zijn opgesteld ten opzichte van 1995 en de bijbehorende Hydra-NL versie hanteert zichtjaar 2023 voor de statistiek. In de ontwerpmodus van Hydra-NL is hier reeds rekening mee gehouden en is een correctie van 0,05 m doorgevoerd in de zeewaterstandsstatistiek tussen 1995 en 2023.

Voorbeeld 2

Als je met databases van de Pilot RMM wilt rekenen voor het zichtjaar 2023, dan zal met 0,05 m zeespiegelstijging t.o.v. 1995 gerekend moeten worden. Dit zichtjaar 2023 met als tijdlijn "referentie" geeft precies deze instelling in Hydra-NL (welke

reeds is verwerkt in de statistiek van de zeewaterstand). Een gebruiker kan in dit geval dus zonder verdere aanpassing rekenen in de ontwerpmodus.

Voorbeeld 3

Als je met deze databases wilt rekenen voor het zichtjaar 2200 met als tijdlijn "extreem", dan zal met 3,0 m zeespiegelstijging t.o.v. 1995 gerekend moeten worden. Deze instelling is beschikbaar in Hydra-NL en komt overeenkomt met een stijging van 2,95 m t.o.v. 2023 (Figuur 106). Dit is in de ontwerpmodus van Hydra-NL reeds verwerkt en ook in dit geval kan een gebruiker direct rekenen.

H.4 Golfberekeningen (Bretschneider)

De resultaten van de waterstandsberekeningen worden aangevuld met golfparameters, die worden berekend met de golfgroeiformules van Bretschneider. We hanteren dezelfde effectieve strijklengtes en gemiddelde bodemhoogtes per windrichting als bij het opstellen van de reeds beschikbare databases voor de basissituatie, zoals beschreven in (Honingh et al., 2022) en (Kuijper en Van der Vegt, 2024). Conform de werkwijze in BOI2023 is hierbij een droogvalcorrectie toegepast, waarbij de golfparameters op nul zijn gezet voor belastingcombinaties waarbij de waterstand lager ligt dan de lokale bodemhoogte. Voor de volledigheid zijn de effectieve strijklengtes en gemiddelde bodemhoogtes per windrichting opgenomen in de databases, evenals de lokale bodemhoogte per locatie.

Belangrijk aandachtspunt bij de berekening van de golfparameters is de vertaling van de potentiële windsnelheid naar de open-water windsnelheid. Hierbij is bij hogere windsnelheden gecorrigeerd om rekening te houden met de afkapping van de winddragcoëfficiënt volgens de laatste inzichten in (Van Vledder, 2017). Deze correctie is onder andere uitgebreid beschreven in bijlage C van het BOI2023 rapport voor de Rijntakken (Van Lente et al., 2023).

H.5 Hydraulische belastingen (Hydra-NL)

De hydraulische belastingen, die nodig zijn voor de analyses met OKADER (zie paragraaf H.6), bestaan uit frequentielijnen voor de waterstand en het hydraulisch belastingniveau (HBN) voor golfoverslag. Deze frequentielijnen zelf bestaan uit hoogtes (waterstand of HBN) met de bijbehorende overschrijdingsfrequentie.

De hydraulische belastingen worden berekend met Hydra-NL. Hierbij wordt zowel voor de basissituatie als voor elk maatregelpakket gebruik gemaakt van de bijbehorende databases fysica met waterstanden golfparameters, waarin reeds een bepaalde mate van ZSS t.o.v. 1995 is verwerkt (zie paragraaf H.3). Die ZSS komt echter niet voor alle tijdlijnen overeen met de waarden in 2050 t/m 2200. In die situaties is voor de meest representatieve database fysica gekozen bij het uitvoeren

van de berekeningen met Hydra-NL. Tabel 57 geeft deze koppeling, die overeen komt met de koppeling zoals gehanteerd in fase 1 van KP-ZSS spoor II.

Tijdslijn	Zeespiegelstijging in database fysica t.o.v. 1995 (m)				
	2023	2050	2100	2150	2200
n.v.t.	0,05	-	-	-	-
Laag	-	0,05	0,50	0,50	1,00
Gematigd	-	0,05	0,50	1,00	2,00
Extreem	-	0,05	1,00	2,00	3,00
Zeer Extreem	-	0,50	2,00	3,00	3,00

Tabel 57: Overzicht te gebruiken databases fysica per tijdslijn en zichtjaar

In de Hydra-NL berekeningen wordt verder per tijdslijn en zichtjaar uitgegaan van de ZSS t.o.v. 1995 en de afvoerstatistiek zoals in Tabel 47. M.a.w.: in de statistiek is altijd uitgegaan van de ZSS die passend is voor de betreffende tijdslijn en zichtjaar, terwijl de ZSS in de database (d.w.z. in de onderliggende waterstandsberekeningen) soms enigszins afwijkt, omdat daar slechts een beperkt aantal beschikbaar is.

Daarnaast hanteren we de volgende uitgangspunten voor het berekenen van de hydraulische belastingen met Hydra-NL:

- Alle Hydra-NL berekeningen worden uitgevoerd met Hydra-NL versie 2.8.4.
- Hydra-NL berekeningen worden uitgevoerd voor 1 representatieve uitvoerlocatie per OKADER vak (in het midden van het vak). Voor deze dijkvakken en de bijbehorende geschematiseerde dwarsprofielen (.prfl-bestanden) hanteren we dezelfde gegevens als in fase 1 van KP-ZSS spoor II (Zethof et al., 2023).
- Voor de HBN-berekeningen gaan we uit van een kritiek golfoverslagdebiet van 5 l/s/m onder de aanname dat vanaf 2050 alle dijken op orde zijn en voldoen aan dit kritiek golfoverslagdebiet.
- We rekenen zonder modelonzekerheid op de waterstand en golfparameters.
- We rekenen inclusief statistische onzekerheid.
- We rekenen met aftoppen van de Rijnafvoer (Lobith) bij 22.000 m³/s.
- We rekenen zonder aftoppen van de Maasafvoer (Lith).
- De faalkans voor de Europoortkering bedraagt 1/100^e per sluitvraag.
- De faalkans voor de Hollandsche IJsselkering bedraagt 1/2000^e per sluitvraag.

H.6 Versterkingskosten en -dimensies (OKADER)

We hanteren enkele generieke uitgangspunten en rekeninstellingen voor alle OKADER dijkvakken. We beschrijven deze aan de hand van de structuur van OKADER, zie onderstaande figuur.

Algemeen	Dijksterkte	Hydraulische belasting	Dijkversterking	Dijkkosten	Uitvoer en visualisatie
----------	-------------	------------------------	-----------------	------------	-------------------------

H.6.1 Algemene uitgangspunten

We hanteren voor de analyses startjaar 2023 en eindjaar 2200 met een tijdstap van 1 jaar, om te voorkomen dat we op relevante zichtjaren geen uitvoerdata hebben.

We rekenen in de analyses met bodemdaling, waarbij we 2023 als referentiejaar hanteren en de bodemdalingsdatabase gebruiken die is toegeleverd.

H.6.2 Dijksterkte

We gebruiken voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit de fragility curves om de sterkte te beschrijven en voor hoogte de HBN's. We kiezen ervoor om de fragility curves niet af te kappen, om de ruis op het resultaat te beperken.

De dijksterkte en bijbehorende versterkingskosten voor het VZM en de Grevelingen zullen indicatief worden bepaald.

H.6.3 Hydraulische belastingen

We berekenen de belastingen aan de hand van de waterstandsfrequentielijn. Hierdoor passen we het belastingtype "HT" toe. Omdat de zeespiegelstijging al in de frequentielijnen zit verwerkt, passen we geen integrale waterstandsverandering toe. We voeren de hydraulische belastingen per tijdlijn in zijn geheel in OKADER in, op de volgende wijze:

Begintijd [jaar]	HT file 1	HT file 2
2023	Bestandsnaam_2023	Bestandsnaam_2050
2050	Bestandsnaam_2050	Bestandsnaam_2100
2100	Bestandsnaam_2100	Bestandsnaam_2150
2150	Bestandsnaam_2150	Bestandsnaam_2200

We passen geen aanvullende onzekerheidstoeslag op de HT bestanden toe.

H.6.4 Dijkversterking

We gaan in de dijkversterkingen uit van een ontwerplevensduur van 50 jaar. Daartoe geven we geen dijkversterkingsplanning op en geen ontwerplevensduurbestand (standaard is 50 jaar).

H.6.5 Dijkkosten

De dijkkosten in deze analyse zijn gebaseerd op basis van nominale kosten met prijspeil 2022. Om voor de verschillende dijkversterkingsstrategieën de kosten voor

de versterkingen te berekenen, vinken we aan dat de strategieën met amoveren van de bebouwing wordt uitgerekend, de invoerbestanden hiervoor zijn toegeleverd.

H.6.6 Uitvoer en visualisatie

We voeren de resultaten uit in 2050, 2100, 2150 en 2200. Dit kan per watersysteem nog nader worden aangescherpt.

Bijlage I Herberekening HB en dijkopgave Oosterschelde

MEMO

Aan: Astrid Labrujere, Robert Vos
Van: Bastiaan Kuijper
Datum: 28 maart 2025
Projectnummer: PR5157.10
Onderwerp: Herberekening hydraulische belastingen en dijkopgave Oosterschelde

1 Inleiding

Dit memorandum beschrijft de herberekening van de hydraulische belastingen en dijkopgave langs de Oosterschelde, die is uitgevoerd binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) naar aanleiding van nieuw beschikbare databases fysica, uitgaande van 3 m zeespiegelstijging.¹

Dit memorandum is onderdeel van fase 2 van het KP ZSS, binnen spoor II Systeemverkenningen. In spoor II zijn eerder langs drie thema's verkenningen gedaan naar de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma, te weten waterveiligheid, de zandige kust en zoetwater. Voor waterveiligheid zijn in fase 1 van KP ZSS de hydraulische belastingen en bijbehorende dijkopgave berekend voor de Oosterschelde (Zethof et al., 2023). Daarbij is gebruik gemaakt van databases fysica voor 5, 50, 100 en 150 cm zeespiegelstijging, die t.b.v. het KP ZSS zijn opgesteld aan de hand van beschikbare IMPLIC-berekeningen (Duits, 2021).

In de analyse van fase 1 zijn de hydraulische belastingen zoals berekend bij zeespiegelstijgingen van 1 en 1,5 m geëxtrapoleerd naar hogere waarden tot en met 3 m zeespiegelstijging. Voor een betere onderbouwing van de hydraulische belastingen bij hogere zeespiegelstijgingen is het wenselijk om deze rechtstreeks te kunnen berekenen, op basis van daarvoor geschikte databases fysica. Daartoe zijn begin vorig jaar IMPLIC-berekeningen uitgevoerd en databases fysica opgesteld uitgaande van 3 m zeespiegelstijging (Kuijper, 2024).

In fase 2 van het KP ZSS zijn de hydraulische belastingen en dijkopgave langs de Oosterschelde opnieuw bepaald, waarbij gebruik gemaakt is van deze nieuw beschikbare databases bij 3 m zeespiegelstijging. In hoofdstuk 2 van dit memorandum beschrijven we (beknopt) de methode waarmee deze berekeningen zijn uitgevoerd en de aanpassingen daarin met de nieuwe databases. In hoofdstuk 3 beschrijven we het verschil in resultaat t.o.v. de originele berekening uit fase 1.

¹ Overall waar in dit memorandum sprake is van zeespiegelstijging wordt bedoeld: de stijging t.o.v. 1995.

2 Methode

2.1 Hydraulische belastingen fase 1

Voor de Oosterschelde zijn in de waterveiligheidsanalyse van fase 1 hydraulische belastingen berekend met behulp van Hydra-NL voor drie tijdlijnen: laag, gematigd en extreem. Deze tijdlijnen onderscheiden zich van elkaar door het tempo waarmee de zeespiegel stijgt, zie Tabel 1.

Tijdlijn	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 (m)				
	2023	2050	2100	2150	2200
Laag	0,05	0,25	0,50	0,75	1,00
Gematigd	0,05	0,25	0,75	1,31	2,00
Extreem	0,05	0,25	1,00	1,80	3,00

Tabel 1 Tijdlijnen met zeespiegelstijging per zichtjaar

Bij het bepalen van de hydraulische belastingen voor de tijdlijnen en zichtjaren zoals in Tabel 1, zijn alleen Hydra-NL berekeningen uitgevoerd voor zeespiegelstijging waarvoor databases fysica beschikbaar waren, zie Tabel 2. De waterstanden en hydraulische belastingniveaus (HBN's) voor overige situaties zijn bepaald d.m.v. lineaire inter-/extrapolatie tussen deze Hydra-NL resultaten.

Tabel 3 geeft aan op welke manier deze inter-/extrapolatie heeft plaatsgevonden. De resultaten voor tijdlijn laag, zichtjaar 2150 (0,75 m zeespiegelstijging) zijn bijvoorbeeld bepaald door het gemiddelde te nemen van berekening B (0,5 m zeespiegelstijging) en berekening C (1 m zeespiegelstijging). De resultaten voor zeespiegelstijging groter dan 1,5 m zijn allemaal bepaald door lineaire extrapolatie van berekening C (1 m zeespiegelstijging) en berekening D (1,5 m zeespiegelstijging).

Som	Zeespiegelstijging en sluitpeil
A	0,05 m zeespiegelstijging, huidig sluitpeil (3,00 m+NAP)
B	0,50 m zeespiegelstijging, huidig sluitpeil (3,00 m+NAP)
C	1,00 m zeespiegelstijging, huidig sluitpeil (3,00 m+NAP)
D	1,50 m zeespiegelstijging, hoger sluitpeil (3,50 m+NAP)

Tabel 2 Uitgevoerde Hydra-NL berekeningen in fase 1

Zeespiegelstijging (m)	Inter-/extrapolatie Hydra-NL sommen
0,05	= A
0,25	= 0,50 x A + 0,50 x B
0,50	= B
0,75	= 0,50 x B + 0,50 x C
1,00	= C
1,31	= 0,38 x C + 0,62 x D
1,80	= 1,60 x D - 0,60 x C
2,00	= 2,00 x D - 1,00 x C
3,00	= 4,00 x D - 3,00 x C

Tabel 3 Inter-/extrapolatie van Hydra-NL resultaten in fase 1

Voor meer informatie over de Hydra-NL berekeningen in fase 1, bijvoorbeeld t.a.v. de beschouwde locaties en dwarsprofielen verwijzen we naar het fase 1 rapport (Zethof et al., 2023).

2.2 Wijziging o.b.v. databases bij 3 m zeespiegelstijging

Zoals aangegeven zijn begin 2024 databases fysica beschikbaar gekomen voor de Oosterschelde, die uitgaan van 3 m zeespiegelstijging (Kuijper, 2024). Op basis daarvan zijn de hydraulische belastingen opnieuw bepaald. In beginsel is dezelfde aanpak gevolgd, waarbij alleen Hydra-NL berekeningen zijn uitgevoerd voor zeespiegelstijging waarvoor databases fysica beschikbaar zijn. In vergelijking met fase 1 betreft dat dus één extra berekening, namelijk die bij 3 m zeespiegelstijging (zie Tabel 4).

Som	Zeespiegelstijging en sluitpeil
A	0,05 m zeespiegelstijging, huidig sluitpeil (3,00 m+NAP)
B	0,50 m zeespiegelstijging, huidig sluitpeil (3,00 m+NAP)
C	1,00 m zeespiegelstijging, huidig sluitpeil (3,00 m+NAP)
D	1,50 m zeespiegelstijging, hoger sluitpeil (3,50 m+NAP)
E	3,00 m zeespiegelstijging, hoger sluitpeil (5,25 m+NAP)

Tabel 4 Uitgevoerde Hydra-NL berekeningen in fase 2

Net als in fase 1 zijn de waterstanden en HBN's voor overige situaties bepaald met lineaire inter-/extrapolatie tussen deze Hydra-NL resultaten (Tabel 5). Het verschil is, dat voor 3 m zeespiegelstijging niet langer geëxtrapoleerd wordt, maar rechtstreeks Hydra-NL resultaten worden gebruikt. Op aangeven van RWS zijn de hydraulische belastingen bij 1,8 en 2 m zeespiegelstijging niet aangepast. Deze worden dus nog steeds bepaald door lineaire extrapolatie van som C (1 m zeespiegelstijging) en D (1,5 m zeespiegelstijging), en niet door interpolatie tussen som D (1,5 m zeespiegelstijging) en som E (3 m zeespiegelstijging).

Zeespiegelstijging (m)	Inter-/extrapolatie Hydra-NL sommen
0,05	= A
0,25	= 0,50 x A + 0,50 x B
0,50	= B
0,75	= 0,50 x B + 0,50 x C
1,00	= C
1,31	= 0,38 x C + 0,62 x D
1,80	= 1,60 x D - 0,60 x C
2,00	= 2,00 x D - 1,00 x C
3,00	= E

Tabel 5 Inter-/extrapolatie Hydra-NL resultaten in fase 2

Het gevolg van bovenstaande aanpak voor fase 2 is, dat alleen de resultaten bij 3 m zeespiegelstijging wijzigen. M.a.w.: alleen de hydraulische belastingen in tijdlijn extreem en alleen in zichtjaar 2200 (Tabel 1).

Voor de databases bij 3 m zeespiegelstijging zijn verschillende varianten beschikbaar. In Tabel 2 (paragraaf 2.3) van het betreffende rapport (Kuijper, 2024) is aangegeven dat er 4 varianten zijn opgesteld, waarbij zowel met de sluitstrategie als de kerende hoogte van de Oosterscheldekering is gevarieerd. In overleg met RWS is besloten om voor de herberekening in fase 2 zowel variant 2 als variant 4 te beschouwen. Beide varianten gaan ervan uit dat de gewenste binnenpeilen op het Oosterscheldebekken in de sluitstrategie volledig meestijgen met de sluitpeilverhoging (+2,25 m). In variant 2 is uitgegaan van de huidige kerende hoogte van de Oosterscheldekering en in variant 4 is deze met 1 m verhoogd.

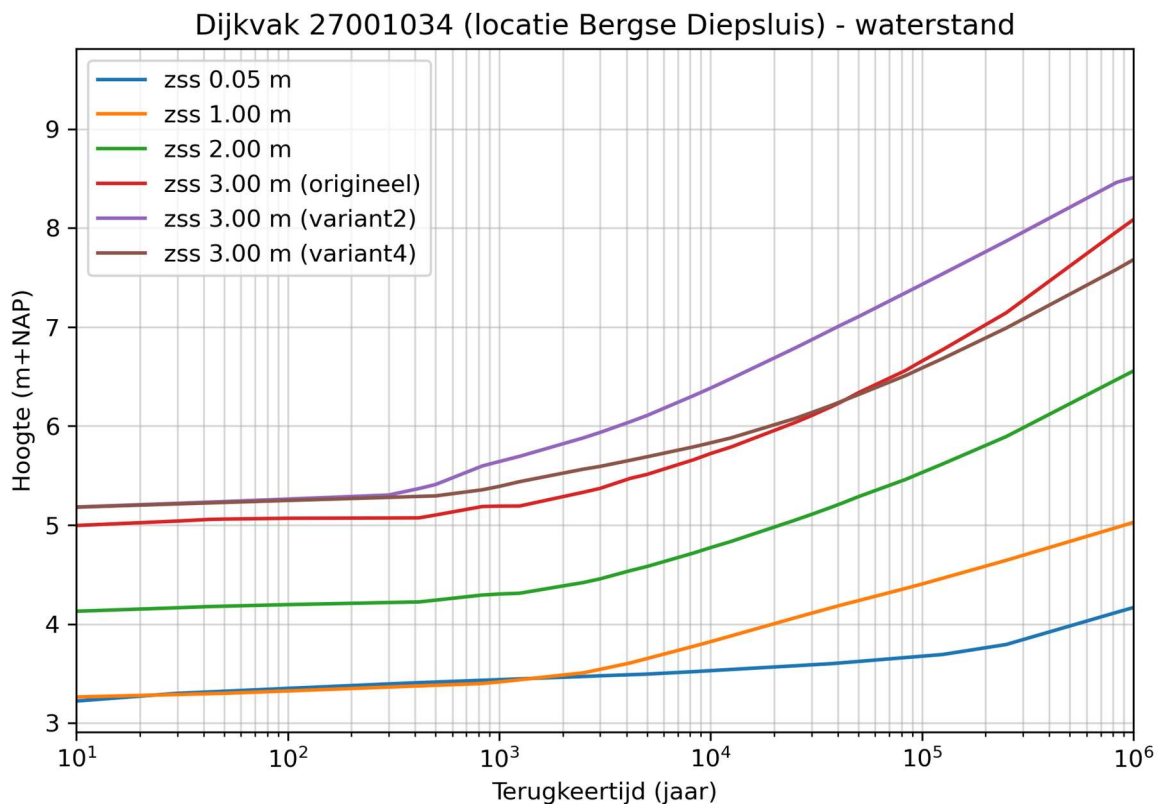
De herberekening van de hydraulische belasting is uitgevoerd voor beide varianten zoals hierboven beschreven. In beide gevallen zijn ook de dijkopgave en de bijbehorende versterkingskosten

berekend met behulp van OKADER, analoog aan de werkwijze in fase 1, zie (Zethof et al., 2023). In alle gevallen is uitgegaan van traditionele versterking met constructieve inpassing. Ook zijn de versterkingskosten bepaald in inclusief restwaarde correctie, conform de werkwijze in fase 2.

3 Resultaat

3.1 Hydraulische belastingen

Figuur 1 geeft een voorbeeld van berekende waterstandsfrequentielijnen voor dijkvak 27001034 langs traject 27-2 (maximale overstromingskans is 1/10.000^e per jaar). Zoals aangegeven in paragraaf 2.2, wijzigen in de herberekening alleen de resultaten bij 3 m zeespiegelstijging. In Figuur 1 is voor deze waarde zowel de originele frequentielijn weergegeven als de frequentielijnen die zijn berekend met behulp van de nieuwe databases, zowel voor variant 2 (originele kerende hoogte Oosterscheldekering) als variant 4 (kerende hoogte +1 m).



Figuur 1 Waterstandsfrequentielijnen dijkvak 27001034 voor een aantal waarden van de zeespiegelstijging

Het voorbeeld van Figuur 1 betreft slechts één locatie (en alleen waterstand, geen HBN). In deze figuur is echter wel een aantal zaken zichtbaar, die representatief blijken te zijn voor alle locaties:

- a) Waterstanden en HBN's nemen toe met de zeespiegelstijging. Bij 0,05 en 1 m zeespiegelstijging is dat effect pas bij hogere terugkeertijden te zien, aangezien in beide situaties met hetzelfde sluitpeil (NAP +3,0 m) is gerekend. Voor de lagere terugkeertijden geldt blijkbaar dat bij gelijkblijvend sluitpeil de sluitfrequentie wel toeneemt, maar de waterstanden

(en HBN's) niet, omdat bij gesloten kering nauwelijks nadelig effect wordt gevonden van de verhoogde zeewaterstanden.

- b) Tussen 1 en 2 m zeespiegelstijging is ook bij lage terugkeertijden een toename te zien, aangezien de resultaten bij 2 m zeespiegelstijging gebaseerd zijn op berekeningen bij zowel 1 m zeespiegelstijging als 1,5 m zeespiegelstijging (Tabel 3), en bij 1,5 m zeespiegelstijging is uitgegaan van 0,5 m sluitpeilverhoging (Tabel 2).
- c) Bij 3 m zeespiegelstijging geldt dat de waterstanden en HBN's in variant 4 (kerende hoogte +1 m) lager liggen dan in variant 2 (huidige kerende hoogte), hetgeen conform verwachting is. Dit verschil kan aanzienlijk zijn, maar is pas zichtbaar vanaf grotere terugkeertijden. Dit heeft pas effect in zeer extreme situaties, waarbij sprake is van significante overloop over de stormvloedkering. Bij herhalingstijd 10.000 jaar (max. overstromingskans traject 27-2) is het waterstandsverschil in Figuur 1 bijvoorbeeld gelijk aan $6,38 - 5,83 = 0,55$ m.
- d) De originele frequentielijn bij 3 m zeespiegelstijging (die is bepaald d.m.v. extrapolatie bij 1 en 1,5 m zeespiegelstijging, Tabel 3) komt over het algemeen beter overeen met de nieuwe frequentielijn voor variant 4 dan voor variant 2. Verder liggen de waterstanden en HBN's daarbij voor lagere terugkeertijden meestal iets onder de nieuw berekende hydraulische belastingen bij 3 m zeespiegelstijging en voor zeer extreme terugkeertijden meestal ergens tussen de nieuw berekende hydraulische belastingen voor variant 2 en 4. In het voorbeeld van Figuur 1 geldt dat de waterstand bij herhalingstijd 10.000 jaar gelijk is aan NAP+5,72 m, wat ca. 10 cm lager is dan de nieuw berekende waterstand bij variant 4 (kerende hoogte +1 m).

3.2 Versterkingskosten dijkopgave (tijdljn extreem)

Tabel 6 t/m Tabel 8 geven de versterkingskosten voor tijdljn extreem, zoals berekend met OKADER, voor achtereenvolgens de originele situatie en de herberekening volgens variant 2 en 4. Gekozen is om alleen de resultaten voor tijdljn extreem te presenteren, aangezien voor tijdljn laag en gematigd geldt, dat er geen verschil in versterkingskosten is voor deze drie varianten. Dat is logisch, omdat (zoals reeds opgemerkt in paragraaf 2.2) in de herberekening alleen de hydraulische belastingen voor tijdljn extreem wijzigen, en alleen voor zichtjaar 2200 bij 3m zeespiegelstijging.

In Tabel 7 en Tabel 8 is telkens met **rood** aangegeven wanneer de versterkingskosten hoger liggen dan in de originele situatie (Tabel 6) en met **groen** wanneer deze versterkingskosten lager liggen. In beide tabellen is in aparte kolommen ook het verschil met de originele berekening gegeven. Zoals aangegeven, wijzigen in de herberekening alleen de hydraulische belastingen voor zichtjaar 2200. Toch heeft dit in de OKADER berekening al impact op eerdere dijkversterkingen in 2150, aangezien voor het ontwerp 50 jaar vooruit wordt gekeken. Voor 2050 en 2100 geldt, dat de dijkopgave over het algemeen niet wijzigt. Uitzondering hierop vormt traject 30-1. Deze afwijking is niet direct verklaarbaar. Gezien de geringe impact op het totaalbeeld is dit echter niet nader onderzocht.

De verschillen zijn over het algemeen niet groot. Bij variant 2 (huidige kerende hoogte OSK) zijn de kosten in de herberekening vrijwel overal hoger, althans voor de zichtjaren 2150 en 2200. Bij variant 4 (kerende hoogte +1 m) is het beeld meer wisselend, waarbij de kosten over het algemeen iets lager liggen in de betreffende zichtjaren. Dit sluit aan bij hetgeen in paragraaf 3.1 is

geconcludeerd, namelijk dat de originele frequentielijn voor 3 m zeespiegelstijging (o.b.v. extrapolatie) over het algemeen meer overeenkomt met de frequentielijn volgens variant 4 dan die volgens variant 2.

Traject	2050	2100	2150	2200
26-2	0,7	7,0	15,8	29,7
26-3	1,4	13,9	27,1	47,8
27-1	1,0	10,0	18,7	32,6
27-2	0,9	8,8	20,4	34,5
28-1	0,0	0,4	1,7	5,5
30-1	0,6	5,6	13,1	21,1
31-2	0,2	2,0	6,2	12,7
216	0,0	0,0	0,0	0,0
217	0,0	0,0	3,6	11,4
219	0,5	5,1	12,5	21,4
221	0,0	0,0	0,0	1,3

Tabel 6 Cumulatieve versterkingskosten (miljoen € / km) - **origineel**

Traject	2050	2100	2150	2200
26-2	0,7	7,0	15,8	30,0
26-3	1,4	13,9	27,2	49,1
27-1	1,0	10,0	18,7	33,7
27-2	0,9	8,8	20,3	35,3
28-1	0,0	0,4	2,1	8,0
30-1	0,7	6,7	15,3	26,4
31-2	0,2	2,0	6,5	16,2
216	0,0	0,0	0,0	2,5
217	0,0	0,0	4,3	13,2
219	0,5	5,1	12,5	21,7
221	0,0	0,0	0,0	2,8

Tabel 7 Cumulatieve versterkingskosten (miljoen € / km) - **variant 2**

2050	2100	2150	2200
			+0,3
		+0,1	+1,3
			+1,1
		-0,1	+0,8
		+0,4	+2,5
+0,1	+1,1	+2,2	+5,3
		+0,3	+3,5
			+2,5
		+0,7	+1,8
			+0,3
			+1,5

Traject	2050	2100	2150	2200
26-2	0,7	7,0	15,7	29,6
26-3	1,4	13,9	27,2	47,7
27-1	1,0	10,0	18,7	32,5
27-2	0,9	8,8	20,4	34,2
28-1	0,0	0,4	1,9	6,7
30-1	0,7	6,7	15,3	24,0
31-2	0,2	2,0	6,3	12,6
216	0,0	0,0	0,0	0,1
217	0,0	0,0	3,3	10,7
219	0,5	5,1	12,5	20,8
221	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 8 Cumulatieve versterkingskosten (miljoen € / km) - **variant 4**

2050	2100	2150	2200
		-0,1	-0,1
		+0,1	-0,1
			-0,1
			-0,3
		+0,2	+1,2
+0,1	+1,1	+2,2	+2,9
		+0,1	-0,1
			+0,1
		-0,3	-0,7
			-0,6
			-1,3

4 Conclusies

De herberekening van de hydraulische belastingen en dijkopgave langs de Oosterschelde is uitgevoerd naar aanleiding van nieuw beschikbare databases fysica bij 3 m zeespiegelstijging. Door de gevolgde aanpak wijzigen alleen de hydraulische belastingen voor tijdelijk extreem en zichtjaar 2200. Daardoor wijzigen ook alleen de dijkopgave en versterkingskosten voor tijdelijk extreem en (in principe) alleen voor de zichtjaren 2150 en 2200 (door de zichtduur voor het ontwerp).

Het verschil in versterkingskosten voor 2150 en 2200 in tijdlijn extreem is afhankelijk van de gekozen variant voor de database fysica bij 3 m zeespiegelstijging. Hiervoor zijn namelijk twee opties beschouwd. Uitgaande van de huidige kerende hoogte van de Oosterscheldekering ('variant 2') zijn de hydraulische belastingen bij 3 m zeespiegelstijging vrijwel altijd hoger dan in de originele berekening en als gevolg daarvan ook de dijkopgave en versterkingskosten. Bij een verhoogde OSK (+1 m, 'variant 4') komen de hydraulische belastingen redelijk goed overeen met de originele waarden, die bepaald waren door extrapolatie bij 1 en 1,5 m zeespiegelstijging. De versterkingskosten liggen in dat geval over het algemeen iets lager, hoewel dit wel varieert per traject. De gepresenteerde versterkingskosten betreffen kosten per km. De verwachting is dat wanneer de kosten worden gesommeerd over alle trajecten, rekening houdend met de lengte van de afzonderlijke trajecten, het verschil t.o.v. de originele berekening verwaarloosbaar klein zal zijn.

Samengevat is het beeld dat de herberekening van de hydraulische belastingen en dijkopgave langs de Oosterschelde er niet toe zal leiden dat de hoofdconclusies uit fase 1 zullen wijzigen, ervan uitgaande dat de Oosterscheldekering bij zeer extreme zeespiegelstijging toch wel verhoogd zal moeten worden en variant 4 dus een beter beeld geeft van de hydraulische belastingen.

5 Referenties

Duits, 2021

Database Hydra-NL Oosterschelde – Omzetten IMPLIC-waterstanden. Matthijs Duits. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV lijn in water, rapport PR4400.10, mei 2021.

Kuijper, 2024

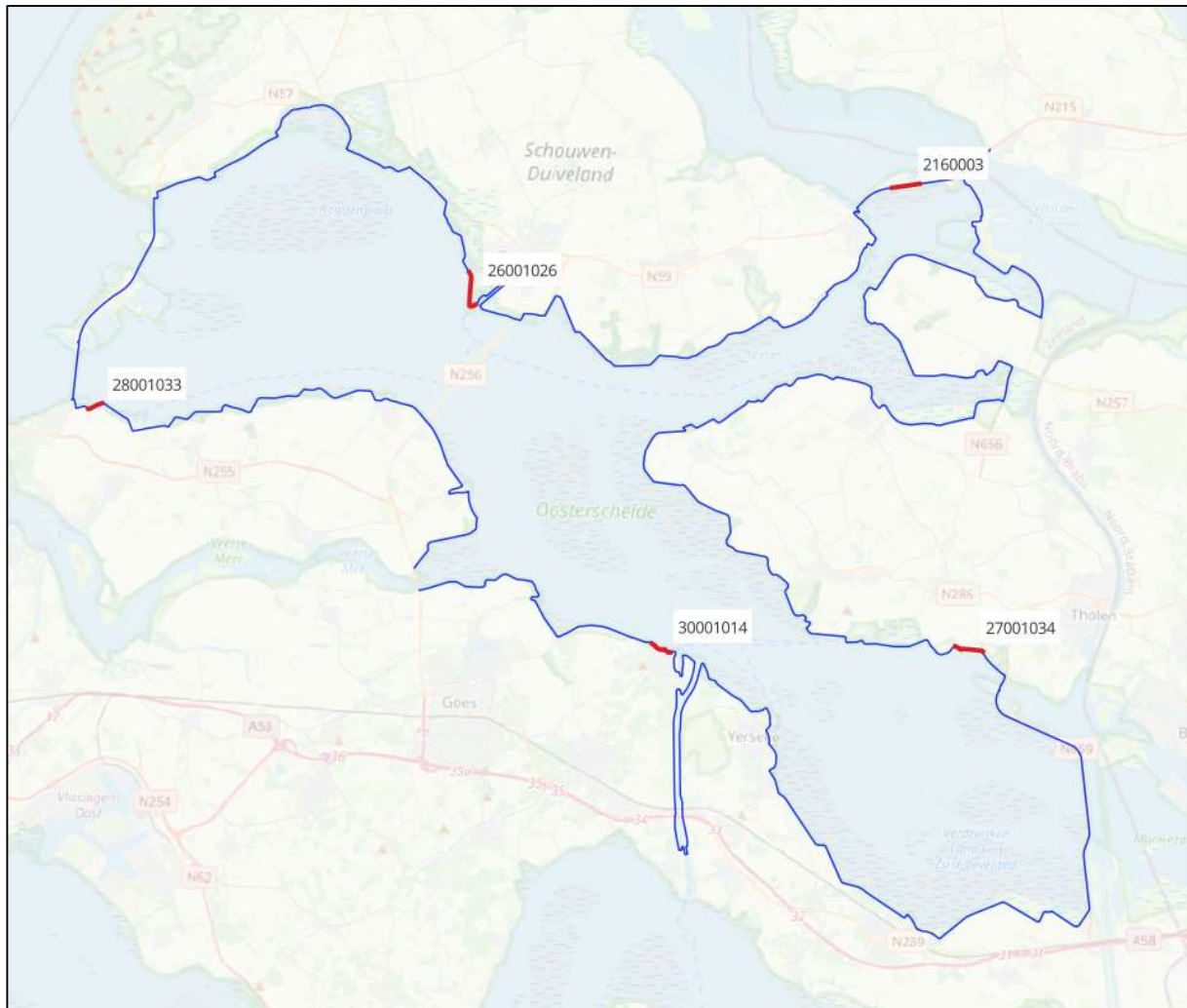
Databases Oosterschelde 3 m zeespiegelstijging. Bastiaan Kuijper. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV lijn in water, rapport PR5023.10, februari 2024.

Zethof et al., 2023

Kennisprogramma Zeespiegelstijging spoor II - Systeemanalyse waterveiligheid; Deelrapport Zuidwestelijke delta. Marit Zethof, Jan Stijnen, Bastiaan Kuijper, Cees Oerlemans, Maarten Jansen, Tim van Engelen, David Knops en Bert van den Bert. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV lijn in water, rapport PR4682.10, mei 2023.

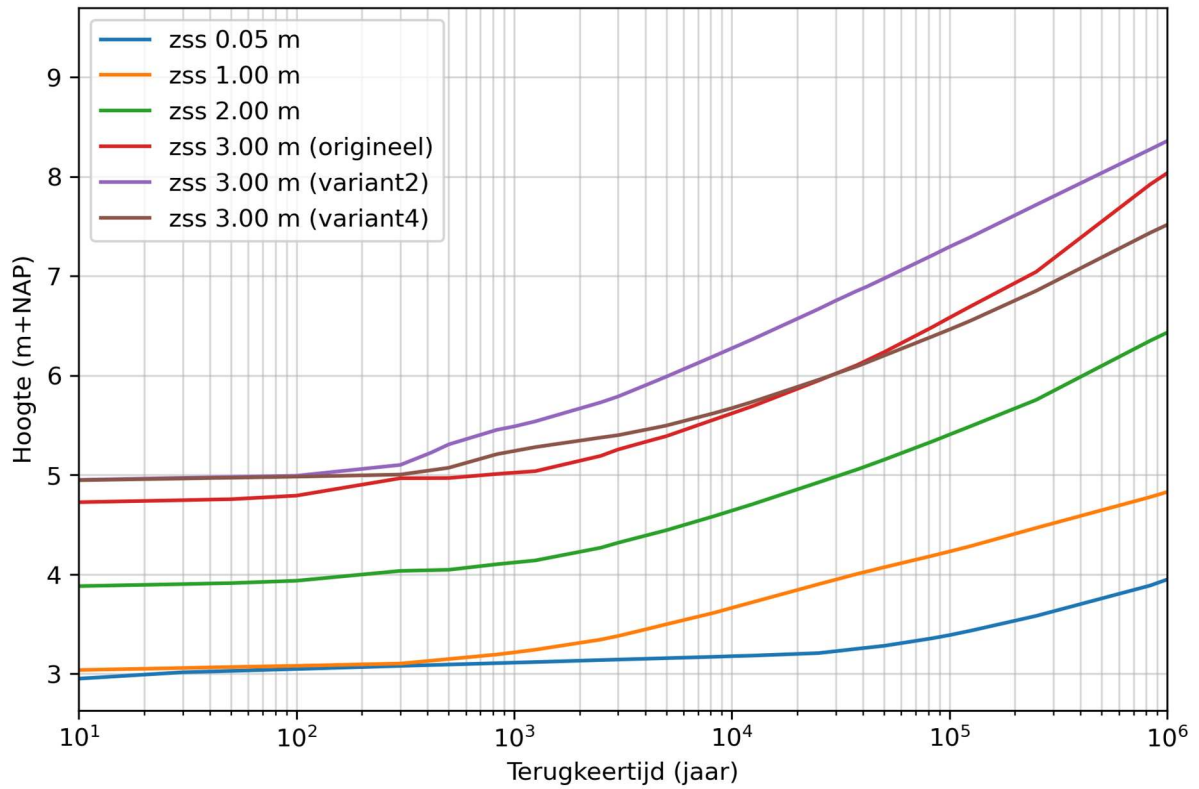
Bijlage: frequentielijnen

In deze bijlage worden voor 5 dijkvakken in de Oosterschelde figuren met overschrijdingsfrequentielijnen gegeven voor waterstand en HBN, zoals in Figuur 1 in paragraaf 3.1. Onderstaande figuur geeft de ligging van deze dijkvakken.

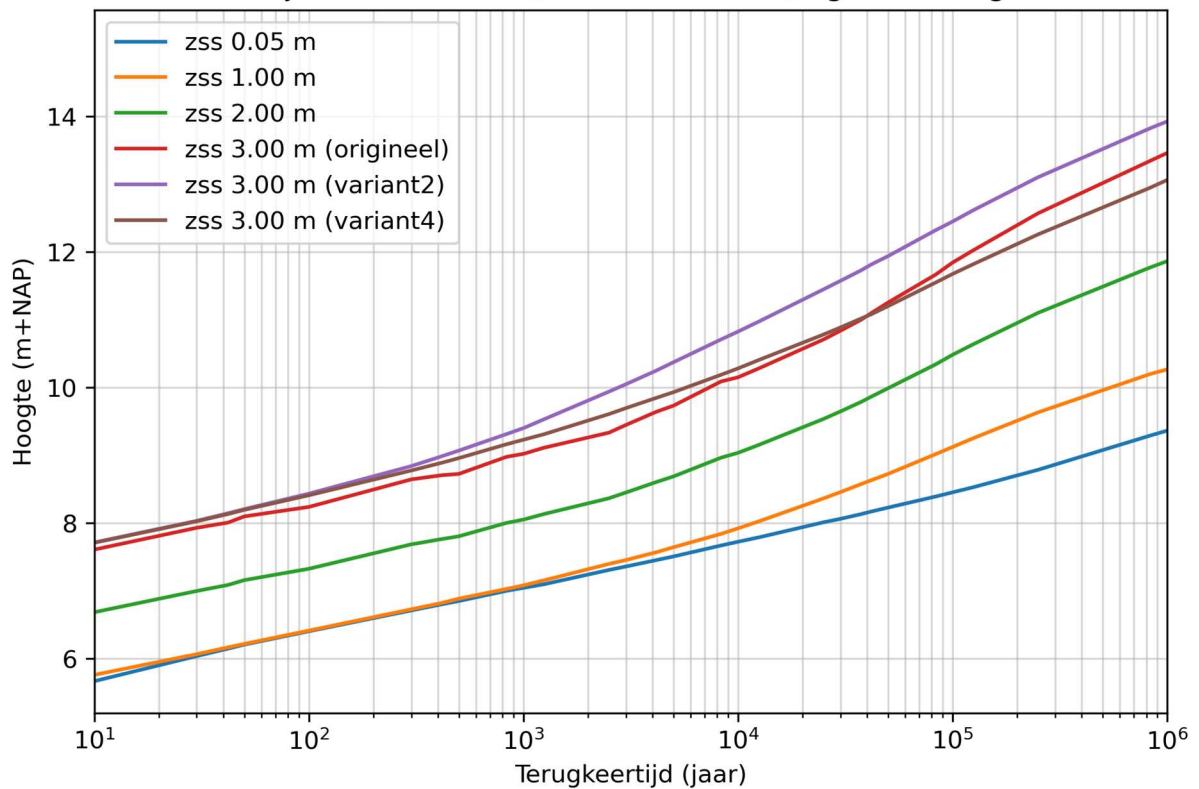


Dijkvak 26001026

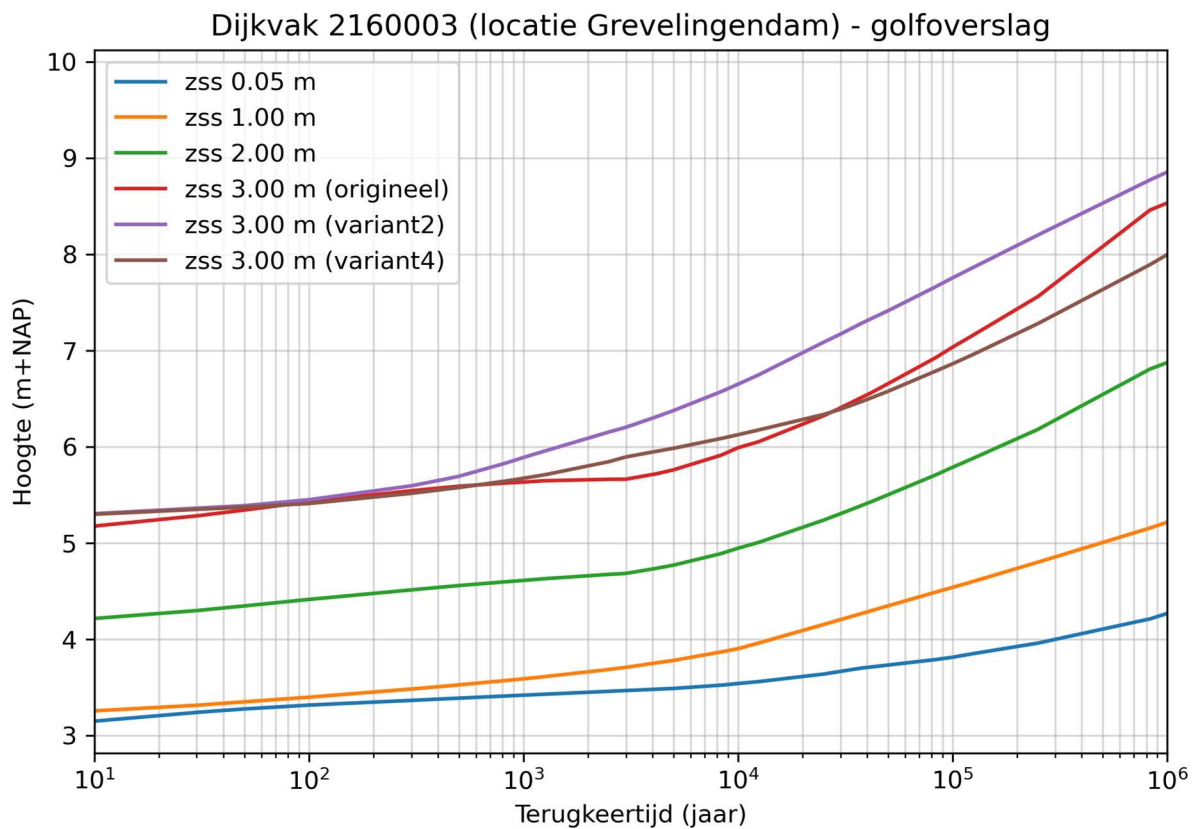
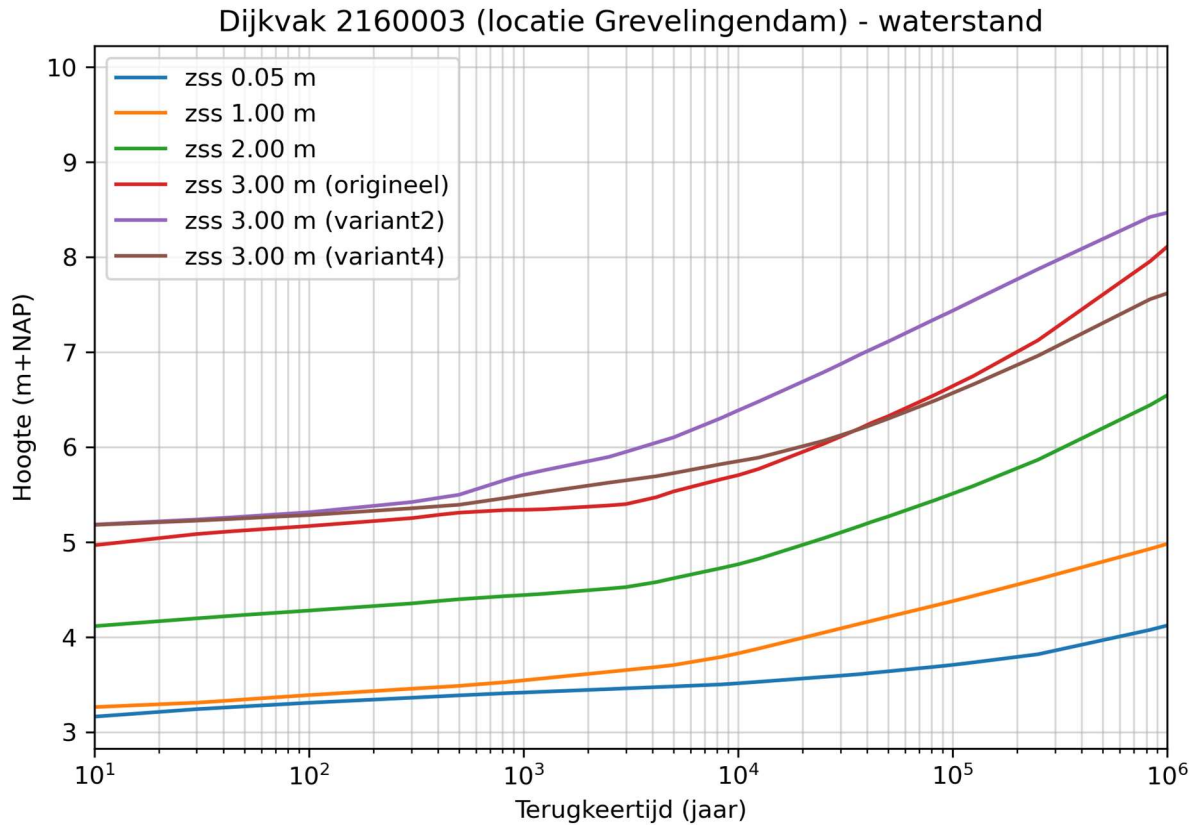
Dijkvak 26001026 (locatie Zierikzee) - waterstand



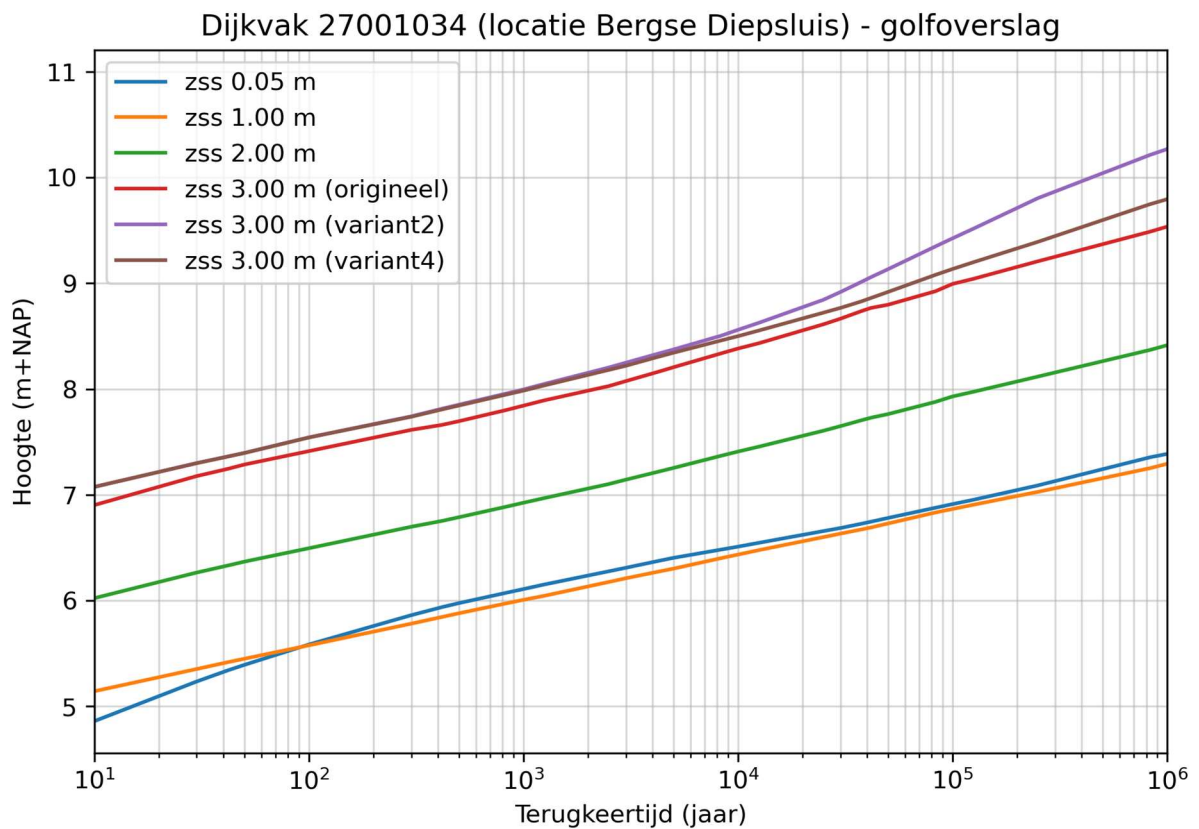
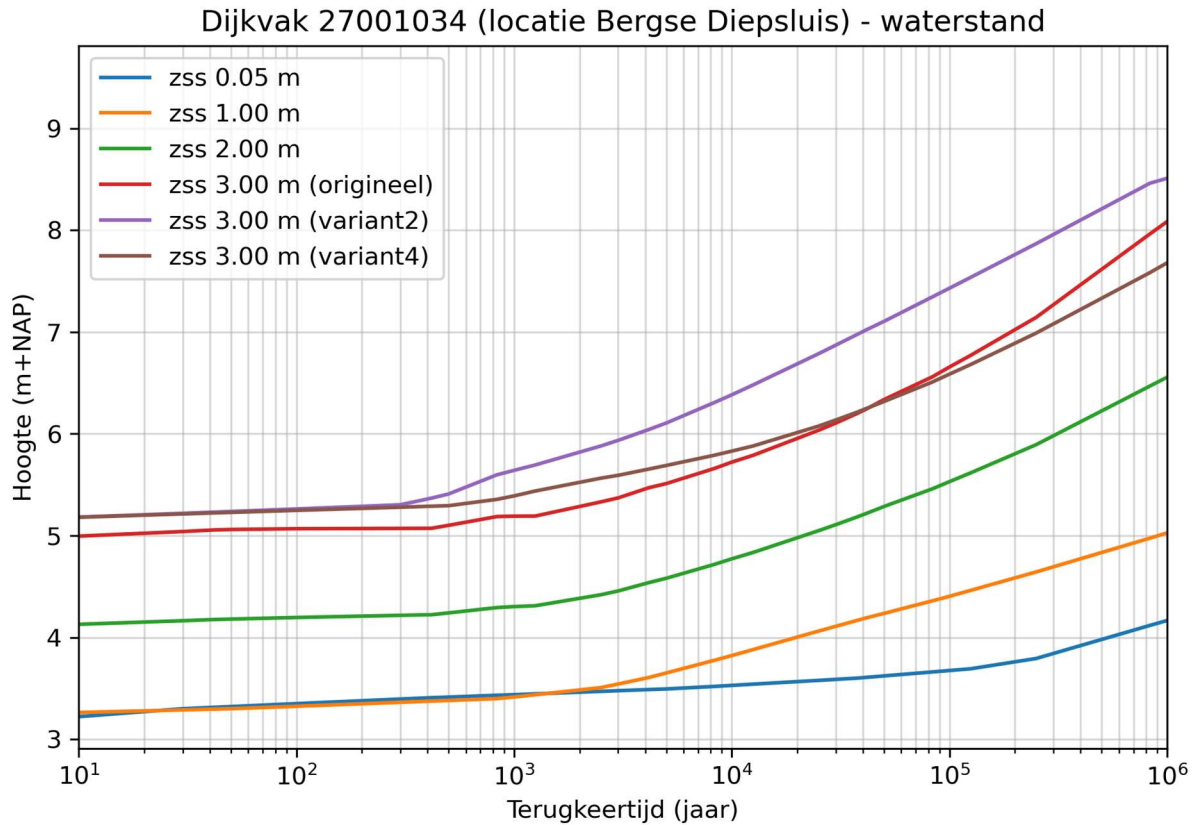
Dijkvak 26001026 (locatie Zierikzee) - golfoverslag



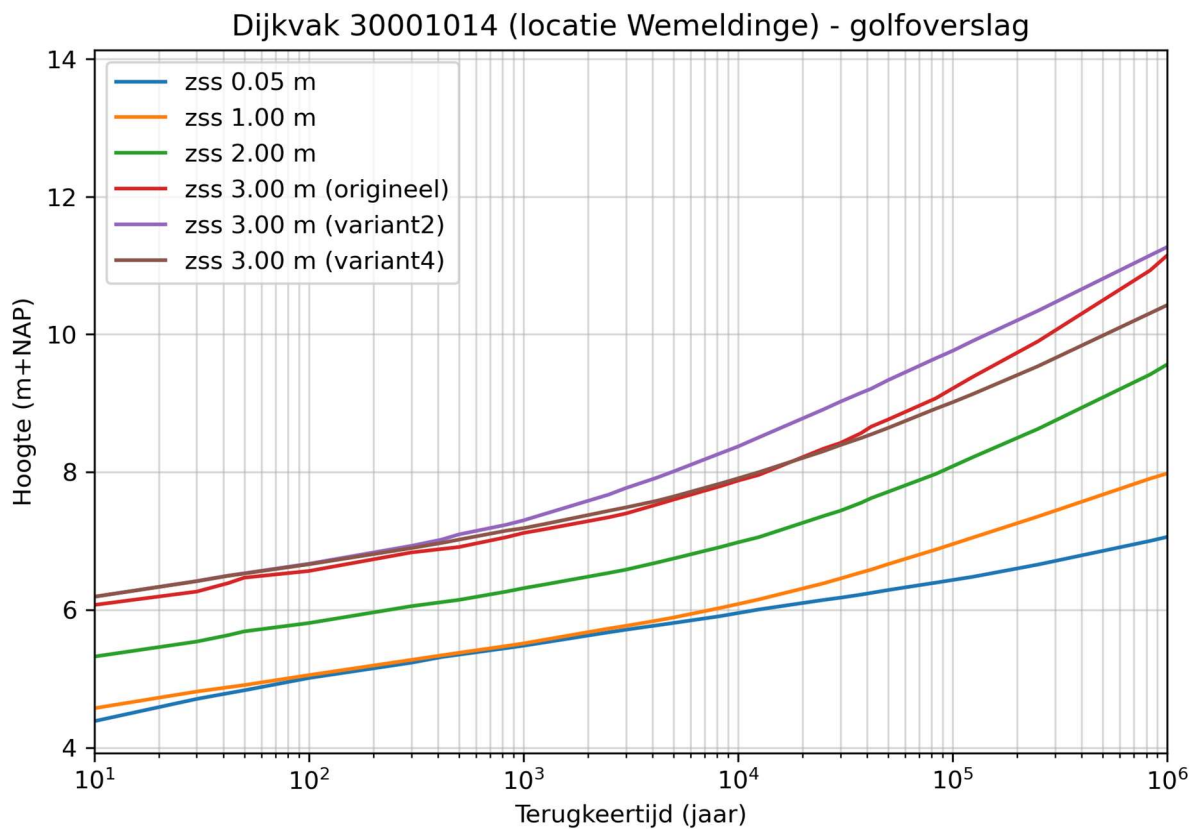
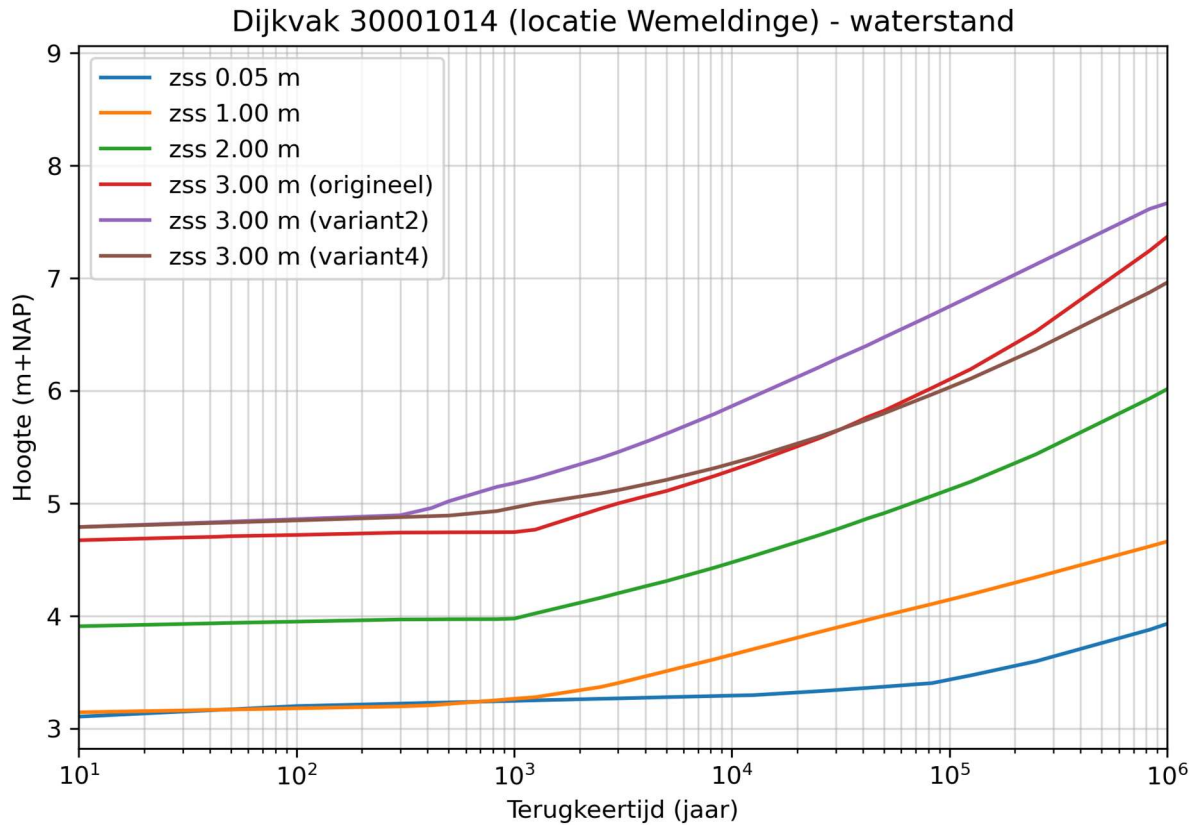
Dijkvak 2160003



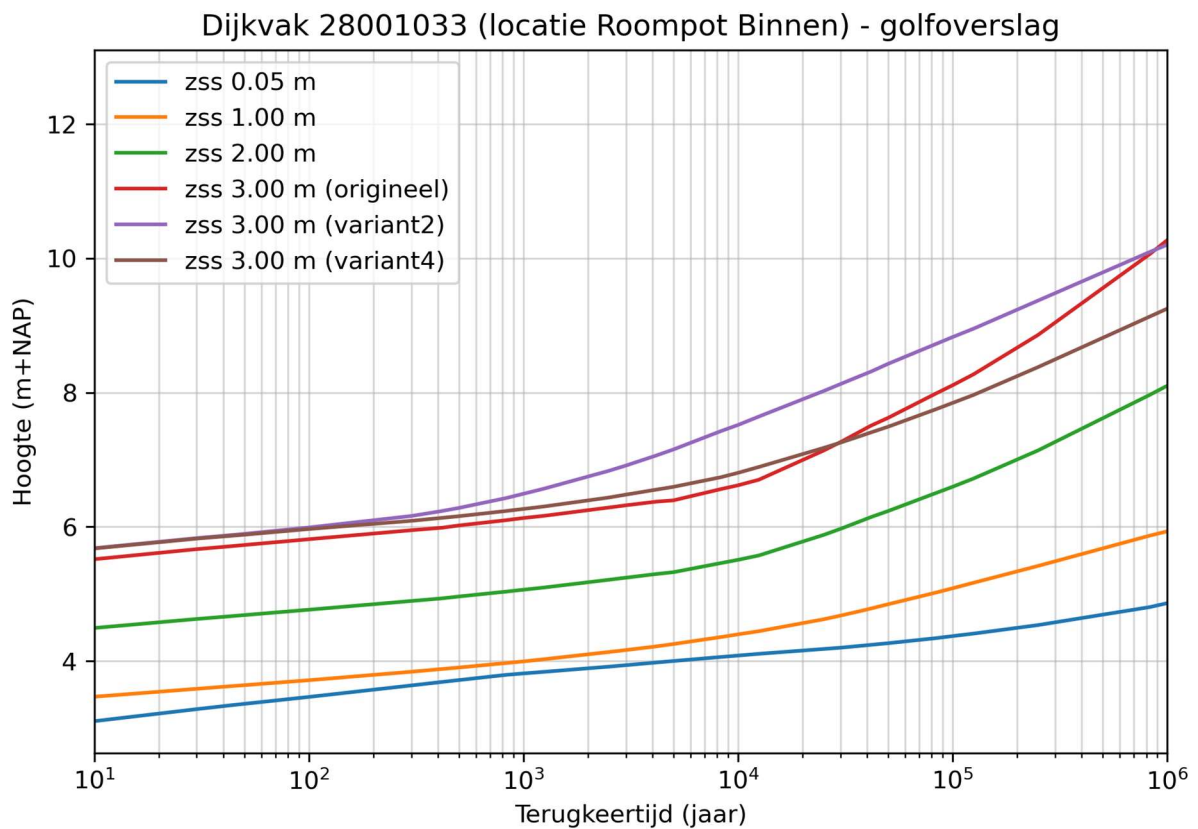
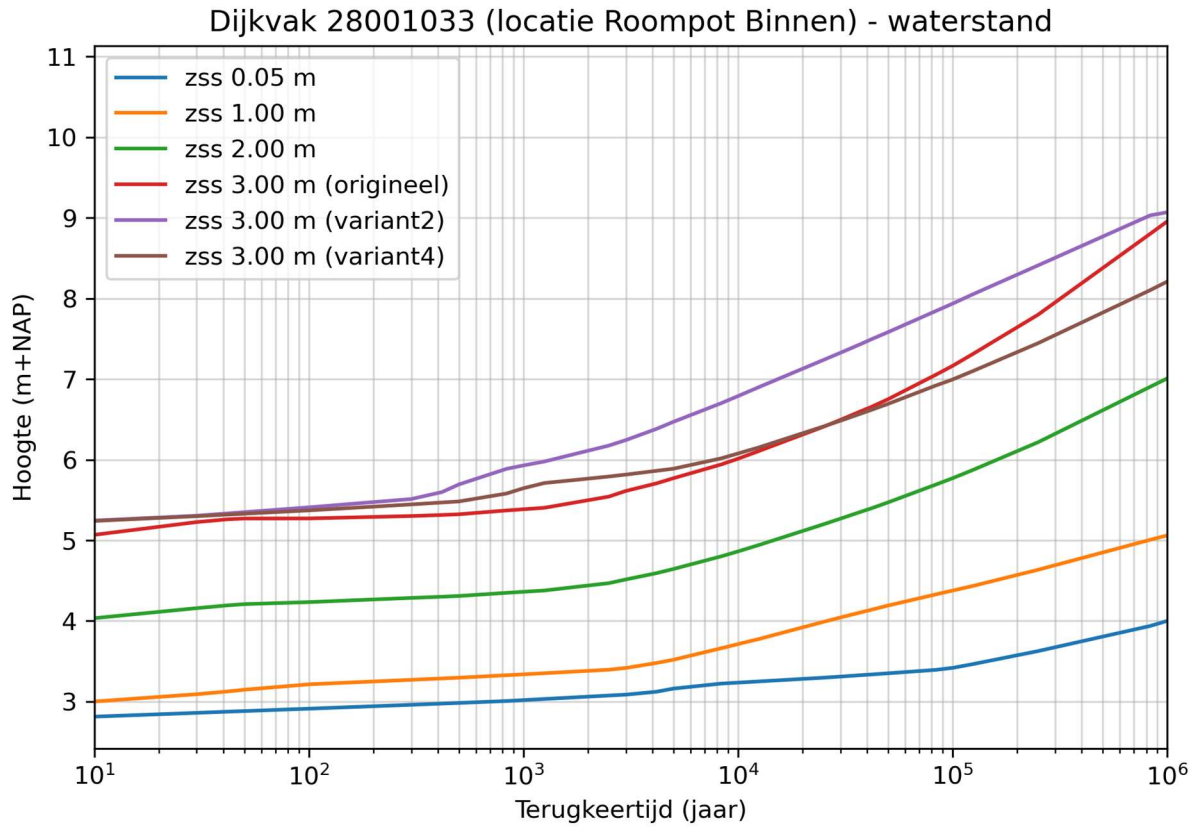
Dijkvak 27001034

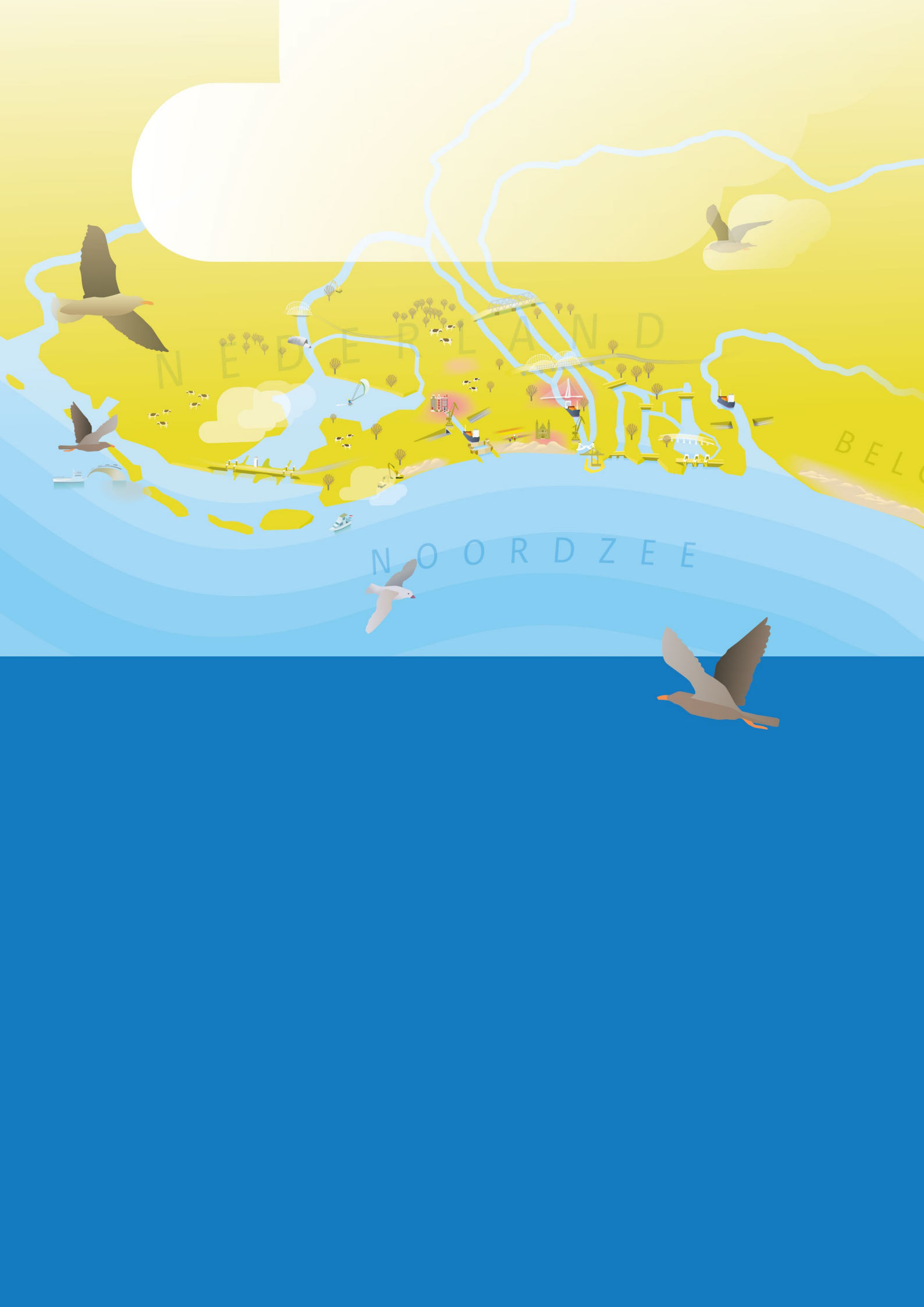


Dijkvak 30001014



Dijkvak 28001033





N E D E R L A N D

N O O R D Z E E

B E L G I E