

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Systeemanalyse waterveiligheid

**Deelrapport Zuidwestelijke delta
Hoofdrapport**

Systeemanalyse Waterveiligheid

Deelrapport Zuidwestelijke delta

Kennisprogramma Zeespiegelstijging – Spoor II - Systeemverkenningen

Datum	30 mei 2023
Versie	V1.0
Status	Definitief

Colofon

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

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

Uitgegeven door Kennisprogramma Zeespiegelstijging- Spoor 2

In opdracht van Rijkswaterstaat WVL

Auteurs Marit Zethof (HKV), Jan Stijnen (HKV), Bastiaan Kuijper (HKV), Cees Oerlemans (HKV), Maarten Jansen (Witteveen+Bos), Tim van Engelen (Witteveen+Bos), David Knops (HKV), en Bert van den Berg (Witteveen+Bos).

Informatie
Functie
Telefoon
E-mail

Datum 30 Mei 2023
Versie 1.0
Status Definitief

Versiebeheer

0.1	10 oktober 2022	50% rapportage
0.2	19 oktober 2022	Aanpassing na reviewcommentaar RWS
0.3	23 december 2022	80% rapportage
0.4	13 januari 2023	Reviewcommentaar RWS en waterschap Scheldestromen
0.5	6 maart 2023	99% rapportage
0.6	14 maart 2023	Reviewcommentaar RWS en waterschap Scheldestromen
0.7	5 april 2023	100% rapportage
1.0	30 mei 2023	Publicatieversie



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Samenvatting

Achtergrond

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) wordt kennis ontwikkeld om op een beter onderbouwde manier te kunnen gaan met een onzekere zeespiegelstijging in de toekomst. Het Kennisprogramma 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 onder andere gebruikt voor de 6-jaarlijkse herijking van het Deltaprogramma in 2026 (DP 2027). Binnen het programma wordt kennis via vijf sporen ontwikkeld. In spoor II (Systeemverkenningen) worden langs drie thema's verkenningen gedaan naar de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën van het Deltaprogramma, te weten waterveiligheid, de zandige kust en zoetwater.

Eén van de onderzoeken van spoor II is het uitvoeren van een Systeemanalyse Waterveiligheid. Met deze Systeemanalyse Waterveiligheid willen Rijkswaterstaat en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat meer inzicht krijgen in de eerste orde effecten van verschillende mate van zeespiegelstijging tot 5 m op het hoofdwatersysteem en de primaire waterkeringen in Nederland. Het KP ZSS gebruikt de resultaten van deze studie om samen met de regio's van het Deltaprogramma de impact van zeespiegelstijging op verschillende functies in beeld te brengen en daarmee de houdbaarheid van een voorkeursstrategie te duiden. Daarnaast worden eventuele oprekmogelijkheden verkend die mogelijk de impact van zeespiegelstijging op het hoofdwatersysteem, of de functies, kunnen verkleinen.

Aanpak op hoofdlijnen

Een stijgende zeespiegel heeft direct invloed op de hydraulische belastingen op de (primaire) waterkeringen doordat waterstanden en golven toenemen. Indirect zijn er ook consequenties, omdat bijvoorbeeld spuimogelijkheden onder vrij verval vanuit regionale systemen naar het hoofdwatersysteem en van daaruit naar zee wijzigen. Ook het aantal keren per jaar dat de stormvloedkeringen sluiten, neemt toe. Door grotere hydraulische belastingen is versterking van de waterkeringen nodig om aan de vereiste (wettelijke) overstromingskansen te voldoen. Binnen de studie is onderzoek verricht naar de invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen en de doorwerking daarvan op de overstromingskansen. Vervolgens is in beeld gebracht hoe deze wijzigingen doorwerken op de te verwachten versterkingsopgave van de primaire waterkeringen. Daarbij is aanvullend naar de benodigde kosten als de ruimtelijke knelpunten gekeken. Tot slot is een groot aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om een beeld te krijgen van een aantal mogelijke kansrijke oprekmogelijkheden van de huidige inrichting van het watersysteem.

Scope Zuidwestelijke Delta

Deze rapportage gaat specifiek over het deelgebied Zuidwestelijke Delta. Alle dijken, dammen en kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkeringen langs de Ooster- en Westerschelde behoren tot de scope van deze studie. De zandige waterkeringen langs de kust (duinen) en de harde waterkeringen langs de kust zeewaarts van de lijn Breskens – Vlissingen en zeewaarts van de Oosterscheldekering zijn onderdeel van de regio Kust en worden gerapporteerd in de betreffende rapportages. De Oosterscheldekering vormt een belangrijk onderdeel van de Zuidwestelijke Delta, maar is als kunstwerk niet functioneel-technisch beschouwd in de voorliggende studie. De Oosterscheldekering is een complex kunstwerk, dat niet op eenvoudige wijze te beschouwen is. Voor de Oosterscheldekering zijn in deze studie enkele aannames gedaan aangaande de vervanging en vervangingswaarde van dit kunstwerk ten behoeve van het totaalplaatje van de berekende waterveiligheidsopgave door zeespiegelstijging in dit gebied. In de komende jaren volgt een uitgebreide studie van Rijkswaterstaat Zee

en Delta naar de effecten van zeespiegelstijging op de Oosterscheldekering. Deze resultaten zullen op een later moment aan het KP ZSS worden toegevoegd.

Effecten op hydraulische belastingen

De doorwerking van de zeespiegelstijging op de waterstanden om aan de normen te voldoen, verschilt tussen de Oosterschelde en Westerschelde. Op de Westerschelde wordt aangenomen dat een toename van de zeespiegel grofweg direct door op de waterstanden bij het huidige beleid dat de bodem van de Westerschelde volledig meegroeit met de zeespiegel. Als gevolg hiervan geldt dit ook voor de minimaal benodigde kruinhoogten van de waterkeringen. Het volledig meegroeien van de bodem is conform de voorkeursstrategie van het Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta. De doorwerking van de zeespiegelstijging in waterstanden en minimaal benodigde kruinhoogten op de Oosterschelde is duidelijk minder groot dan op de Westerschelde, doordat de Oosterscheldekering¹ zijn functie vervult – het buitenhouden van stormvloed. De invloed van de zeespiegelstijging is in de Oosterschelde pas goed zichtbaar vanaf een zeespiegelstijging van meer dan 1 m. Daarnaast stijgen de waterstanden in het bekken steeds sneller bij waterstanden zeldzamer dan eens per 1.000 jaar. Vaker voorkomende situaties betreffen voornamelijk een gesloten Oosterscheldekering die het water goed kan keren, waardoor de zeespiegelstijging beperkt invloed heeft. De Oosterscheldekering slaagt er dus in om een deel van de stijging van de zeespiegel tegen te houden, al wordt dit effect minder bij toenemende zeespiegelstijging.

Resultaten opgave

Omdat de doorwerking van de zeespiegelstijging in de Oosterschelde en Westerschelde verschilt, komt dit ook terug in de opgave voor de benodigde hoogte van de waterkeringen. Deze is langs de Oosterschelde duidelijk minder hoog dan langs de Westerschelde, door de aanwezigheid van de Oosterscheldekering. Langs de Westerschelde neemt de hoogteopgave meer toe dan de zeespiegelstijging². Dit wordt veroorzaakt door opstuwing van de waterstanden richting Antwerpen, maar ook door grotere golven die kunnen optreden omdat de waterdiepte toeneemt. Langs de Oosterschelde is dit juist minder dan de zeespiegelstijging. Door grotere variatie van de veiligheidsnormen langs de Oosterschelde in combinatie met lokaal meer aanwezige resthoogte en andere dijkoriëntaties, is de variatie in de hoogteopgave langs de Oosterschelde (met name bij hogere zeespiegelstijging) wat groter dan langs de Westerschelde.

De toename van de waterstanden door de zeespiegelstijging heeft ook consequenties voor de sterkte van de waterkeringen. De waterveiligheidsopgave voor de sterktemechanismen piping en macrostabiliteit betreft een dijkverbreding om te voldoen aan de wettelijk gestelde eisen. De sterktemechanismen zijn minder gevoelig voor verschillen in de waterstand, waardoor de zeespiegelstijging minder variatie in waterveiligheidsopgave voor sterkte geeft. De oplossing voor de sterkteopgave kan een gedeeltelijke grondoplossing zijn (bijv. een taludverflauwing of bermverbreding), eventueel in combinatie met constructieve maatregelen (bijv. een kistdam) en alternatieve maatregelen voor piping (bijv. kwelscherm, verticaal zanddicht geotextiel of grof-zandbarrière). Deze sterkteopgave is in beeld gebracht voor verschillende maten van zeespiegelstijging. Opgemerkt wordt dat weliswaar de waterveiligheidsopgave (gemiddeld per dijktraject) voor piping groter is dan voor macrostabiliteit, maar nog steeds gemiddeld per dijktraject een factor 2 – 3x kleiner is ten opzichte van de opgave in het rivierengebied.

¹ In de hydraulische berekeningen is uitgegaan dat een stormvloedkering aanwezig is die lijkt op de huidige constructie van de Oosterscheldekering met de huidige dimensies. In deze berekeningen wordt verondersteld dat deze stormvloedkering blijft functioneren zoals bedoeld en daarmee voldoet ten aanzien van de eisen van waterveiligheid. Bij hogere zeespiegelstijging is wel gekozen voor een verhoging van het sluitpeil, zodat de kering minder vaak zal sluiten.

² Dit is in tegenstelling met het beleid dat de bodem de stijging van de zeespiegel volgt, maar wordt veroorzaakt door een – binnen de afgegeven acceptabele foutmarge – onnauwkeurigheid van de methode voor de hydraulische belastingen voor de Westerschelde [RWS, 2023a].

Resultaten kosten en ruimtebeslag

Op basis van de voorgaande informatie over de minimaal benodigde hoogte en breedte van potentieel toekomstige waterkeringen zijn inschattingen gemaakt van de kosten die daarmee gemoeid zijn. Daartoe is een knip gelegd bij zichtjaar 2050: het jaar waarin de primaire waterkeringen moeten voldoen aan de normen uit de Waterwet.

De kosten om het "systeem op orde" te krijgen in 2050 zijn van belang om de dijkversterkingskosten na 2050 voor hogere niveaus van zeespiegelstijging (bijvoorbeeld voor een zeespiegelstijging van 1 m) te kunnen relateren aan de huidige investeringskosten van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Daarom zijn eerst de te maken kosten tot en met 2050 bepaald, waarbij rekening is gehouden met 25 tot 50³ cm zeespiegelstijging in dat jaar. Het betreft een globale inschatting die door de waterkeringbeheerders in de toekomst meer gedetailleerd zullen worden opgesteld. Vervolgens zijn zowel de totale nominale kosten per jaar, als de kosten per kilometer dijkversterking bepaald als functie van de zeespiegelstijging ten opzichte van "systeem op orde". Op hoofdlijnen volgt daaruit dat de verwachte versterkingskosten in dezelfde orde grootte liggen als het huidige jaarlijkse budget van het HWBP om het systeem in 2050 op orde te krijgen (zowel het bedrag per jaar als het bedrag per kilometer dijkversterking), ongeacht het deelsysteem en ongeacht de mate van zeespiegelstijging.

De kosten voor de kunstwerken⁴ worden hoofdzakelijk gedomineerd door de vervangingskosten van de Krammersluizen, sluzencomplex Terneuzen en sluzencomplex Hansweert. Daarnaast vormen de kosten voor de installatie, het onderhoud en gebruik van de pompen bij de Bathse spuisluis een significant aandeel van de totale kosten. Hoewel niet beschouwd in de analyses, zal de aanpassing (en op termijn de vervanging) van de Oosterscheldekering een van de grootste kostenposten zijn voor de Zuidwestelijke Delta.

Het uiteindelijke ruimtebeslag dat bij de versterkingsopgave hoort, is afhankelijk van de versterkingsstrategie. Doordat op sommige locaties bebouwing in de versterkingszone aanwezig is, zijn (tijdelijke) ruimtelijke knelpunten in beeld gebracht. Dit zijn locaties waarbij een versterkingsstrategie bijvoorbeeld zou kunnen bestaan uit een combinatie van een grondoplossing, constructieve maatregelen en innovatieve maatregelen. In werkelijkheid bestaat een dijkversterkingstraject uit een mix van versterkingsstrategieën met verschillende oplossingen, zo ook volledige grondoplossingen waarbij de aanwezige bebouwing in de versterkingszone zo nodig tijdelijk of permanent geamoveerd dient te worden. De gekozen strategie is afhankelijk van lokale omstandigheden die leiden tot de "beste" oplossing.

Resultaten gevoeligheidsanalyses

Aanvullend op de hierboven beschreven analyses, zijn diverse analyses uitgevoerd om de gevoeligheid van bepaalde keuzes en uitgangspunten te toetsen.

Zo is op de Oosterschelde een halvering van het lekdebiet van de Oosterscheldekering, een verhoging van het sluitpeil van de Oosterscheldekering en een constante verhoging van de voorlanden in de dwarsprofielen voor de waterkeringen in het Oosterscheldebekken onderzocht. Het effect van het halveren van het lekdebiet van de Oosterscheldekering levert weinig tot geen verandering op in de hydraulische belastingen van de achterliggende keringen, waarmee ook de impact op de opgave voor de waterkeringen langs de Oosterschelde verwaarloosbaar is. Een verhoging van het sluitpeil geeft een duidelijke verhoging

³ Het betreft hier een bandbreedte die kan oplopen tot 0,5 m zeespiegelstijging omdat dijken typisch voor een levensduur van 50 jaar worden ontworpen. Voor een dijkversterking in b.v. 2045 wordt dus rekening gehouden met méér dan de ontwerpbelastingen in 2095 volgens tijdlijn Laag. Hierbij wordt dus uitgegaan van 0,25 – 0,5 m zeespiegelstijging.

⁴ Voor de bepaling van de opgave van de kunstwerken is uitgegaan van globale kenmerken, die kunnen afwijken van gedetailleerdere gegevens die beschikbaar zijn uit de eerste ronde van de Landelijke Beoordeling (LBO1).

van de hydraulische belastingen in het bekken. Het effect van een constante verhoging van de aanwezige voorlanden verdwijnt nagenoeg volledig naarmate de zeespiegelstijging meer en meer toeneemt.

In de Westerschelde is gekeken naar de invloed van de bodemligging en een ander type vegetatie. Voor de Westerschelde is als basisscenario voor de bodem uitgegaan van het Volledig Meegroeien ervan met de zeespiegelstijging. Om het effect van de andere bodemscenario's (het niet meegroeien van de bodem en de voortzetting van de huidige bodemtrend) inzichtelijk te krijgen, zijn de implicaties voor de hydraulische belastingen en de kosten voor de waterveiligheidsopgave bepaald voor de overige bodemscenario's. Het meenemen van een ander type vegetatie geeft een reductie van de resulterende golfhoogte aan de teen van de waterkering. Deze reductie werkt direct door in de benodigde kruinhoogten en daarmee in de kosten.

Summary

Background

Like many countries worldwide, the Netherlands is vulnerable to climate change. For flood-risk management, important impacts of climate change are sea-level rise and increased river discharges. This is particularly relevant to the Netherlands, where 26% of the country lies below sea level, and 29% per cent is susceptible to river flooding.

The Knowledge Programme on the impact of sea-level rise (Dutch acronym: KP ZSS) aims to develop knowledge for proper management of future (uncertain) sea-level rise scenarios. The programme runs from 2019 to 2025, and insights gained will be used for the six-yearly reassessment of the [Delta Programme](#). Knowledge is being developed in five tracks, in which Track II (System Explorations) research is conducted on the sustainability and extensibility of the preferred strategies in the Delta Programme. This research is carried out in three theme's: flood-risk management, the sandy coast, and freshwater supply.

In the [Dutch flood-risk management](#) theme, Rijkswaterstaat (the agency responsible for national infrastructure and water management in the Netherlands) and the Ministry of Infrastructure and Water Management want to learn more about the direct effects of sea-level rise up to 5 m on the primary water system and primary flood defences in the Netherlands. The KP ZSS will use the results of this study to work with regional authorities of the Delta Programme in identifying the impact of sea-level rise and to clarify the sustainability of a preferred strategy for flood-risk management. Additionally, extensions of the current defences that could reduce the impact of sea-level rise on the primary water system are explored.

General approach

Rising sea levels directly affects hydraulic loads on (primary) flood defences due to increased water levels and wave heights. Indirect consequences include the reduced capacity for natural drainage from low-lying areas to the sea. The number of times per year that storm-surge barriers must close will also increase. The larger hydraulic loads require strengthening of the flood defences to ensure they meet the required (legal) flood-risk management standards. Therefore, within this study, research was conducted on the impact of sea level rise on the hydraulic loads and their effects on the probability of flooding. The effects of these changes on the expected reinforcement requirements for flood defences was then examined, as well as the required costs and the spatial constraints. Finally, a large number of sensitivity analyses were conducted to gain insight into potentially viable extensibility options for the current water system design.

Scope

This report focuses on the impact of sea level rise on flood-risk management in the Southwesterly Delta area. This includes all levees, dams and hydraulic structures that are part of the primary water defences along the Eastern and Western Scheldt. Coastal defences are examined in a separate report within KP ZSS, while the effects of sea-level rise on the Eastern Scheldt storm surge barrier will be considered in an extensive study by Rijkswaterstaat in the next phase of KP ZSS.

The effect of sea-level rise on hydraulic loads differs between the Eastern Scheldt and Western Scheldt due to bed level protection methods. This is discussed further in the sensitivity analysis results.

Impact of sea-level rise on flood defences

The different impact of sea-level rise on the Eastern and Western Scheldt is reflected in the height requirements of the flood defences. The increase in height required along the Eastern Scheldt defences is lessened due to the presence of the Eastern Scheldt storm surge barrier. However, the defences along the Western Scheldt need to be increased more than the anticipated sea-level rise. This is caused by the wind set-up in the region, as well as the larger waves that can occur with increased water depths. Along the Eastern Scheldt, the increases in height requirements are less than the anticipated sea-level rise. The increases are also more spatially varied (particularly with higher sea-level rise), due to varying safety standards, as well as existing dike heights and orientations.

As well as height requirements, sea-level rise also has consequences for the strength requirements of the flood defences. In order to meet flood-risk management standards, strength-based failure mechanisms such as piping and macrostability require dike widening or (where space is an issue) additional construction features like screens, pins or geotextiles. The strength failure mechanisms are less sensitive to differences in water levels than height requirements. It should be noted that while the flood-risk management requirements (on average per dike segment) for piping are larger than for macrostability, they are still on average a factor of 2-3 times smaller per dike segment than the requirements in the riverine area.

Impacts on costs and expected reinforcement requirements

Estimates are made for the expected reinforcement requirements and costs for potential future flood defences based on the minimum required height and width. Initially, these estimates are made for the year 2050 when primary flood defences must meet the legal flood-risk management standards set by the Water Act. These estimates take into account a projected sea-level rise of 0.25 to 0.50 m¹ in the year 2050.

The overall cost of both hydraulic structures and flood defences is driven by various replacement, reinforcement and operational costs identified in the study, and roughly coincide with the current annual investment in defences for the region to comply with the standards set in the Water Act in 2050.

The spatial impact for the calculated reinforcements will depend on the selected reinforcement strategy. In some locations, the presence of buildings in the reinforcement zone may create (temporary) spatial constraints that need to be addressed through a combination of ground solutions, structural measures, and innovative solutions. In reality, a flood defence reinforcement project involves a mix of reinforcement strategies with different solutions, including basic widening solutions that may require the temporary or permanent removal of buildings in the reinforcement zone. The chosen strategy will depend on local circumstances that lead to the "best" solution.

Results of the sensitivity analyses

In addition to the above-mentioned analyses, several other scenarios have been examined to assess the impact of various assumptions on the hydraulic loads and costs associated with flood-risk management measures in the Eastern and Western Scheldt areas.

In the Eastern Scheldt, three scenarios are examined in relation to expected loads. The first scenario, reducing the leakage through the storm surge barrier, has little impact on the hydraulic loads on the flood defences. Raising the closing level of the barrier is shown to lead to higher loads, while the effect of increasing the elevation of the foreshore is negligible as sea-level rise also increases.

¹ This range is defined based on the 50-year design lifespan of a dike. For example, a dike built in 2045 must still meet the expected load in 2095. This results in the given range of 0.25 - 0.5 m.

In the Western Scheldt, the impact of different bed-level scenarios (fully adapting to sea-level rise, not adapting, and continuing the current measured trend) and vegetation types on hydraulic loads and costs have been assessed. Using a different type of vegetation resulted in a reduction in wave height at the toe of the flood defences, which in turn led to lower required crest heights and lower costs.

Overall, these sensitivity analyses are important to understand the robustness and limitations of the assumptions made in this study and to identify the key drivers of hydraulic loads and costs.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
Summary	8
1 Inleiding	13
1.1 Algemeen	13
1.2 Achtergrond project	13
1.3 Positionering Spoor II Systeemanalyse Waterveiligheid	14
1.4 Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1	15
1.5 Korte gebiedsbeschrijving	15
1.6 Inhoud van dit rapport	16
2 Aanpak op hoofdlijnen	17
2.1 Gehanteerde methode	17
2.2 Beschrijving tijdlijnen en referentiesituatie	19
3 Hydraulische belastingen Oosterschelde	21
3.1 Doel	21
3.2 Methode	21
3.3 Resultaten hydraulische belastingen	25
3.4 Samenvatting	35
4 Hydraulische belastingen Westerschelde	36
4.1 Doel	36
4.2 Methode	36
4.3 Resultaten hydraulische belastingen	42
4.4 Samenvatting	47
5 Waterveiligheidsopgave kunstwerken	48
5.1 Doel	48
5.2 Methode	49
5.3 Resultaten	53
5.4 Samenvatting	60
6 Waterveiligheidsopgave dijken	62
6.1 Doel	62
6.2 Methode	63
6.3 Resultaten	66
6.4 Samenvatting	78
7 Gevoeligheidsanalyse	79
7.1 Inleiding	79
7.2 Parameter 1: Aanpassing lekdebiet Oosterscheldekering	79
7.3 Parameter 2: Verhoging sluitpeil Oosterscheldekering	80
7.4 Parameter 3: Verhoging voorland Oosterschelde	82
7.5 Parameter 4: Effect bodemligging Westerschelde	83
7.6 Parameter 5: Effect van vegetatie	89
7.7 Samenvatting	92
8 Regionaal beeld en conclusies	94

8.1	Inleiding	94
8.2	Invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen.....	95
8.3	Versterkingsopgave per watersysteem	98
8.4	Kosten voor verschillende niveaus van ZSS.....	100
8.5	Ruimtelijke impact.....	104
8.6	Inschatting onzekerheidsbandbreedte resultaten	106
8.7	Effectiviteit van een aantal mogelijke oprekmogelijkheden.....	110
8.8	Conclusies	111
9	Referenties	114
Bijlage A	Analyse per kunstwerk	116
Bijlage B	Koppeling vakken Oosterschelde	135

1 Inleiding

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 vijf sporen ontwikkeld.

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

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

In deze rapportage staan de resultaten beschreven voor de te verwachten waterveiligheidsopgave van de Zuidwestelijke Delta door zeespiegelstijging in het huidige hoofdwatersysteem. Parallel zijn dergelijke rapportages beschikbaar voor de andere Deltaprogramma deelgebieden.

De wijze (methodes, uitgangspunten en modelkeuzen) waarop deze resultaten zijn verkregen, wordt per watersysteem besproken.

1.2 Achtergrond project

In de komende eeuwen zal de zeespiegel verder stijgen. In het Deltaprogramma zijn de effecten van zeespiegelstijging tot 2100 meegenomen, waarbij geen rekening is gehouden met een mogelijke (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 Systeemanalyse Waterveiligheid binnen het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging willen Rijkswaterstaat en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat meer inzicht krijgen in de eerste orde effecten van verschillende zeespiegelstijgingen op het hoofdwatersysteem en de primaire waterkeringen in Nederland. Binnen het KP ZSS wordt kennis ontwikkeld om op een beter onderbouwde manier om te kunnen gaan met een onzekere ZSS.

Een stijgende zeespiegel heeft direct invloed op de hydraulische belastingen op de waterkeringen, doordat waterstanden en golven toenemen, maar ook indirect, omdat bijvoorbeeld spuiomogelijkheden onder vrij verval vanuit regionale systemen

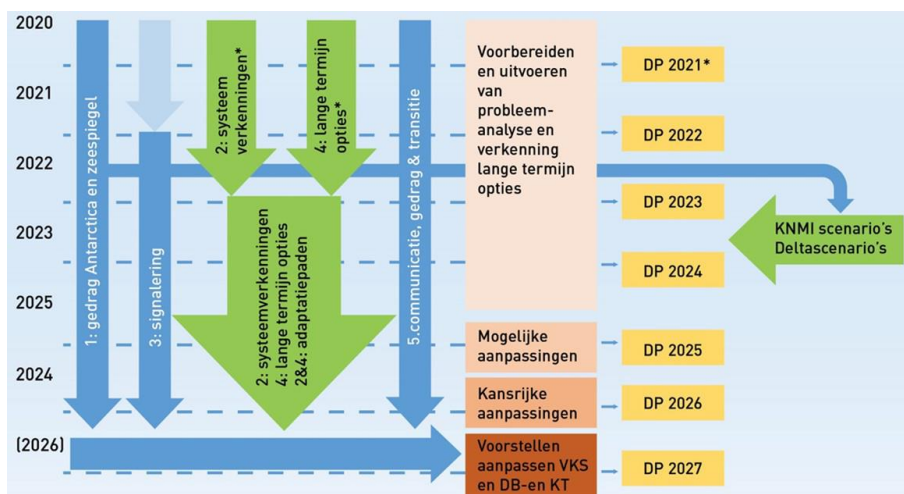
naar het hoofdwatersysteem, en van daaruit naar zee wijzigen. Ook de sluitfrequenties van stormvloedkeringen nemen toe. Door grotere belastingen is versterking van de waterkeringen nodig om aan de vereiste overstromingskans te voldoen. De studie in dit project, zogenaamd 'Systeemanalyse Waterveiligheid', dient begrip van en inzicht te geven in het effect van ZSS op de belastingen en de doorwerking daarvan op de overstromingskans. Vervolgens wordt de versterkingsopgave (kosten en ruimtebeslag) in beeld gebracht en worden overige relevante waterstaatkundige indicatoren ten behoeve van de houdbaarheid van de voorkeursstrategieën (VKS) waterveiligheid van de regionale Deltaprogramma's uitgerekend. Het KP ZSS gebruikt de resultaten van deze studie om samen met de regionale Deltaprogramma's de impact van ZSS op verschillende functies in beeld te brengen, de houdbaarheid van de VKS te duiden en de oprekmogelijkheden te verkennen.

1.3 Positionering Spoor II Systeemanalyse Waterveiligheid

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

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

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



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

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

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

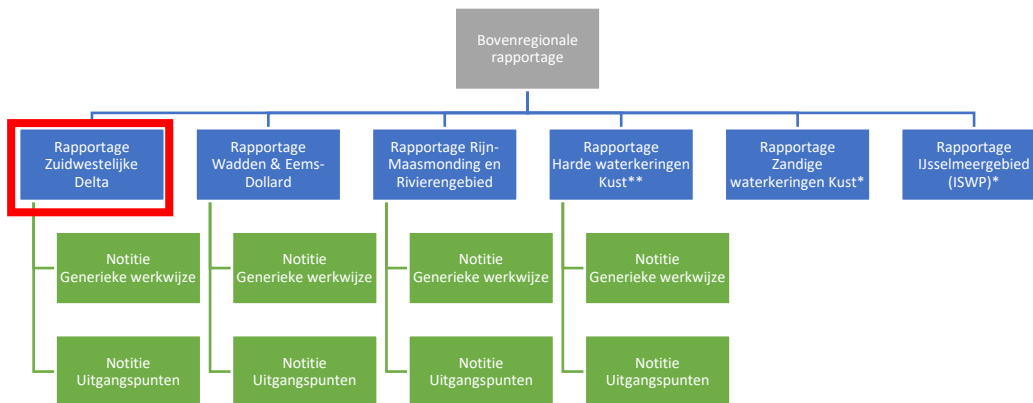
Dit rapport zal enkel het eerste punt behandelen.

1.4 Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1

Voor de Systeemanalyse Waterveiligheid van Spoor II zijn 6 rapportages opgesteld, 1 per DP-regio. Deze rapportage geven een beschouwing op de rekenkundige uitkomsten en de doelstelling van Spoor II van het KP ZSS. Voor 4 regio's Zuidwestelijke Delta, Waddengebied (inclusief Eems-Dollard), Kust (alleen harde waterkeringen kust) en Rijn-Maasmonding en Rivierengebied zijn de rapportages opgesteld door de combinatie HKV, Witteveen+Bos en IV-Infra. De systeemanalyses voor de Zandige waterkeringen Kust en IJsselmeergebied zijn door Rijkswaterstaat gerapporteerd. De Systeemanalyse IJsselmeergebied is ook bekend onder de naam ISWP (2016-2019).

Op basis van deze 6 regio rapportages is een synthese geschreven die in de bovenregionale rapportage is opgenomen. Bij de bovenregionale rapportage hoort het duidingskader [RHDHV,2021] en een opleverdossier.

Systeemanalyse Waterveiligheid Spoor II – fase 1



*) De systeemanalyses voor de Zandige waterkeringen Kust en de Meren en Vecht-IJsseldelta zijn door Rijkswaterstaat uitgevoerd en gerapporteerd. In de bovenregionale rapportage worden de resultaten voor de Zandige waterkeringen Kust, Meren en Vecht-IJsseldelta geïntegreerd met de andere gebieden.

**) De systeemanalyses voor het Flaauwe Werk, Veerse Gatdam en Brouwersdam zijn door Rijkswaterstaat uitgevoerd. De resultaten worden geïntegreerd in de rapportage Harde waterkeringen Kust.

Figuur 2: Positionering rapportage Systeemanalyse Waterveiligheid voor de Zuidwestelijke Delta.

1.5 Korte gebiedsbeschrijving

Deze rapportage gaat over het deelgebied Zuidwestelijke Delta. De scope omvat de gebieden die onder directe invloed staan van zeespiegelstijging. Daarmee behoren de dijken, dammen en de meeste kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkering langs de Oosterschelde en de Westerschelde tot de scope van dit rapport. Voor de Westerschelde geldt dat dit de trajecten zijn ten oosten van de lijn Breskens – Vlissingen. De trajecten 32-1, 29-1 en 29-2 zijn onderdeel van de rapportages Systeemanalyses Waterveiligheid Kust, waarin zowel de zandige waterkeringen kust (duinen) als de harde waterkeringen kust en kunstwerken zijn opgenomen.



Figuur 3: scope dijken, dammen en kunstwerken in de regio Zuidwestelijke delta.

De Oosterscheldekering is een belangrijk onderdeel van de Zuidwestelijke Delta, maar wordt niet functioneel-technisch beschouwd in de voorliggende studie. De Oosterscheldekering is een complex kunstwerk, dat niet op eenvoudige wijze te beschouwen is. In deze studie worden hiervoor enkele grove aannames gedaan m.b.t. de vervanging op basis van de vervangingskosten. Daarnaast volgt de komende jaren een uitgebreide studie van RWS Zee en Delta waarin de effecten van zeespiegelstijging op de Oosterscheldekering worden beschouwd. Deze resultaten zullen op een later moment aan het KP ZSS worden toegevoegd.

1.6 Inhoud van dit rapport

Dit rapport beschrijft resultaten van de Systeemanalyse Waterveiligheid voor de Oosterschelde en Westerschelde (Zuidwestelijke Delta).

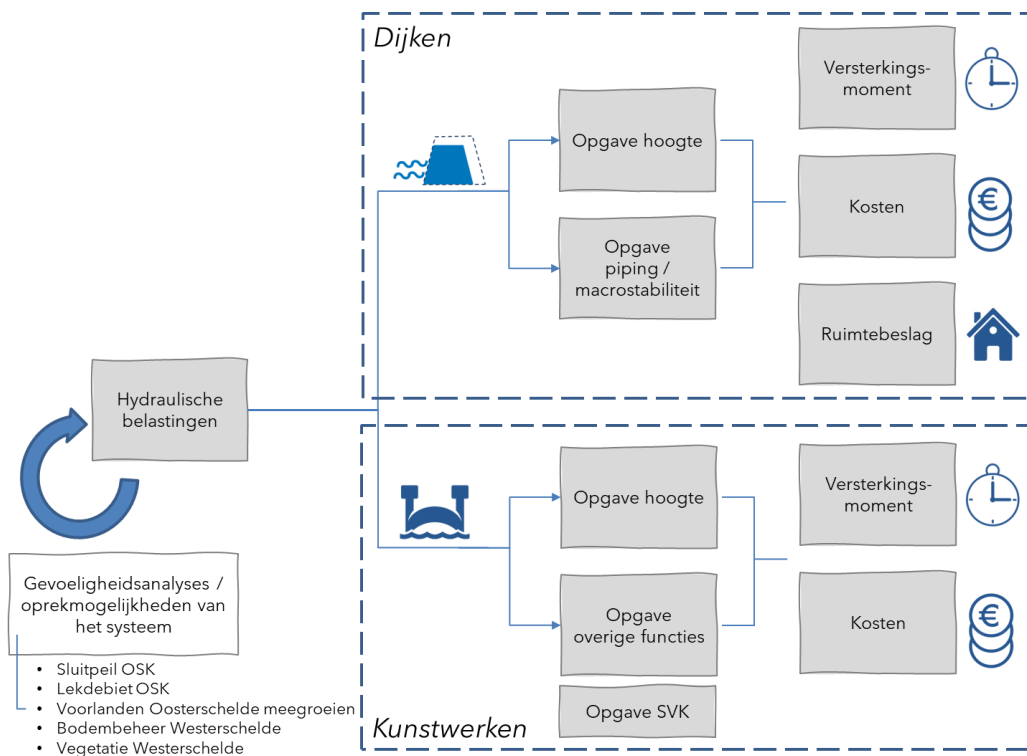
- Hoofdstuk 2: Aanpak op hoofdlijnen.
- Hoofdstuk 3: Hydraulische belastingen voor de Oosterschelde.
- Hoofdstuk 4: Hydraulische belastingen voor de Westerschelde.
- Hoofdstuk 5: Waterveiligheidsopgave voor kunstwerken.
- Hoofdstuk 6: Waterveiligheidsopgave voor dijken.
- Hoofdstuk 7: Gevoeligheidsanalyse.
- Hoofdstuk 8: Regionaal beeld en conclusies.

2 Aanpak op hoofdlijnen

Voor de Systeemanalyse Waterveiligheid van het KP ZSS Spoor II is een aanpak ontwikkeld om op landelijk uniforme analyse de waterveiligheidsopgave door zeespiegelstijging te bepalen. Deze aanpak wordt op hoofdlijnen in dit hoofdstuk beschreven. Een uitgebreide beschrijving van de methode, aannames en uitgangspunten daarin staat beschreven in paragraaf 3.2 en 4.2 voor de hydraulische belastingen op respectievelijke de Oosterschelde en de Westerschelde, paragraaf 5.2 voor de methode voor de waterveiligheidsopgave voor de kunstwerken en paragraaf 6.2 voor de methode voor de waterveiligheidsopgave voor de dijken. Voor de uitwerking van de waterveiligheidsopgave wordt 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. Derhalve kan dit rapport niet worden gezien als een invulling van de landelijke beoordeling waterkeringen.

2.1 Gehanteerde methode

De methode bestaat op hoofdlijnen uit de volgende stappen (Figuur 4):



Figuur 4: Schematische weergave van de gehanteerde werkwijze.

- Het bepalen van **hydraulische belastingen** voor dijken en kunstwerken voor verschillende tijdlijnen, uitgedrukt in een waterstand bij de norm (ondergrens) en een hydraulisch belastingniveau bij de norm op vakniveau¹. Een tijdlijn

¹ Dit is de doorsnede-eis bij de norm (ondergrens) op vakniveau voor een betreffend faalmechanisme.

beschrijft de mate van zeespiegelstijging, maar bevat ook informatie over het sluitpeil van de stormvloedkeringen en over de afvoerstatistiek op de rivieren (voor de Ooster- en Westerschelde² niet relevant). In paragraaf 2.2 wordt hier nader bij stilgestaan. Ook de sluitfrequenties voor de Oosterscheldekering worden afgeleid. De hydraulische belastingen voor de Oosterschelde zijn bepaald met een voor Kennisprogramma Zeespiegelstijging speciaal ontwikkelde versie van Hydra-NL. Voor de details verwijzen we naar paragraaf 3.2. De hydraulische belastingen voor de Westerschelde worden afgeleid volgens de illustratiepuntenmethode, waarbij de waterstand bij de norm met Hydra-NL en het hydraulisch belastingniveau voor golfoverslag met Swan1D/2D zijn bepaald. Voor details verwijzen we naar paragraaf 4.2.

- Het bepalen van de **waterveiligheidsopgave voor dijken** gebeurt o.b.v. de sterktebeschrijving van de waterkeringen voor de faalmechanismen hoogte, piping en macrostabiliteit voor verschillende tijdlijnen, uitgedrukt in ruimtebeslag (dimensies kruinverhoging en dijkverbreding) en de bijbehorende kostenbepaling voor 3 verschillende versterkingsstrategieën: 1) Traditionele versterking met constructieve inpassing; 2) Versterking met groene kering en 3) Versterking met groene kering en innovatieve pipingmaatregelen. De strategie Traditionele versterking met constructieve inpassing is in de systeemanalyse de basisstrategie, omdat deze het beste aansluit met de uitvoering van versterkingen in de huidige ontwerppraktijk in Nederland (business as usual). De waterveiligheidsopgave voor dijken wordt bepaald met een voor het KP ZSS speciaal ontwikkelde versie van OKADER³ [Rijkswaterstaat, 2022c] en KOSWAT [Deltares, 2014]. De sterktebeschrijving van de dijken volgt uit de landelijke set van fragility curven die is opgesteld voor het KP ZSS [Witteveen+Bos & HKV, 2022].
- Het bepalen van de **waterveiligheidsopgave voor kunstwerken**. Dit betekent voor kunstwerken met een waterkerende functie het bepalen van de opgave o.b.v. het faalmechanisme hoogte, uitgedrukt in een kruinverhoging van het kunstwerk en de bijbehorende kostenbepaling. Daarnaast wordt de opgave bepaald voor de kunstwerken m.b.t. een overige functie voor waterveiligheid⁴ en de stormvloedkering⁵, uitgedrukt in het jaar waarin het kunstwerk niet meer aan de ondergrensnorm voldoet.
- Het uitvoeren van **gevoeligheidsanalyses** op de hydraulische belastingen en de waterveiligheidsopgave. Voor de Oosterschelde is de gevoeligheid onderzocht van een aangepast sluitpeil en aangepast lekdebiet van de Oosterscheldekering en meegroeien van de voorlanden met 0,5 m. Voor de Westerschelde is het effect van bodembeheer (verschillende morfologische scenario's) en de impact van vegetatie beschouwd.
- Het duiden van de resultaten aan de hand van de indicatoren in het duidingskader.

² Voor het Nederlandse deel van de Westerschelde is dit niet van belang.

³ OKADER is een instrument ontwikkeld voor beleidsadvies. Dit programma benut andere bouwstenen uit programmatuur zoals DAM voor de bepaling van de benodigde versterking en KOSWAT voor de bepaling van prijzen.

⁴ Voor de Westerschelde is dit de Bathse Spuisluis.

⁵ De Oosterscheldekering valt buiten de scope van deze studie. Een beschouwing op de technische restlevensduur van de Oosterscheldekering wordt door RWS Zee en Delta in 2023 uitgevoerd.

2.2 Beschrijving tijdlijnen en referentiesituatie

Op basis van de geschetste stappen in Figuur 4 is de waterveiligheidsopgave bepaald voor verschillende tijdlijnen ten opzichte van een referentiesituatie. Een tijdlijn beschrijft de mate van ZSS tussen 2023 en 2200 in combinatie met klimaatscenario's t.a.v. rivierafvoer, morfologie van het betreffende watersysteem en bodemdaling onder de dijk. De waterveiligheidsopgave is bepaald voor 4 tijdlijnen: Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem (alleen voor Westerschelde).

Opmerking

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

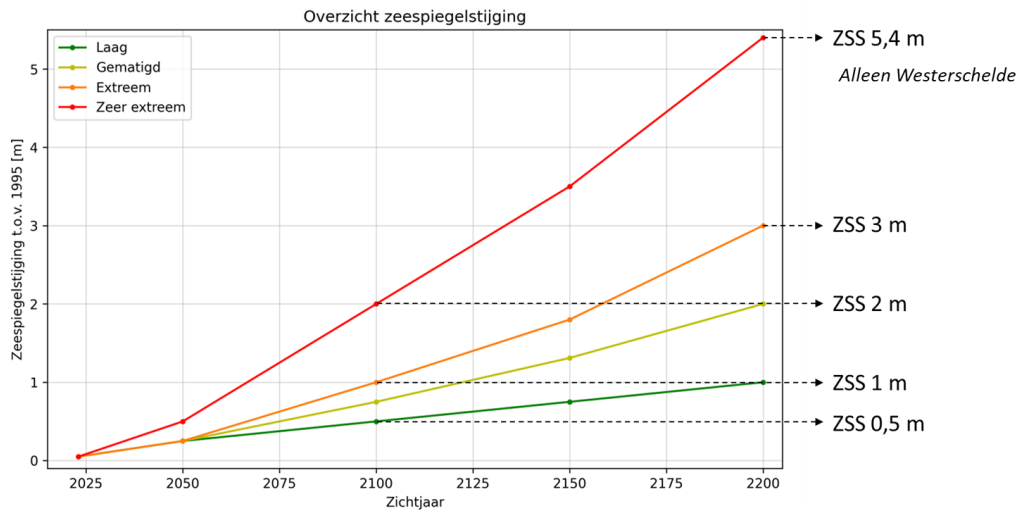
De *referentiesituatie* die gehanteerd wordt komt overeen met de huidige situatie van het watersysteem met daarin meegenomen alle reeds geplande maatregelen in de toekomst. In meer detail betekent dit het volgende:

- De huidige situatie is 2023. Berekeningen beginnen in dit jaar. 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.

In de Systeemanalyse Waterveiligheid gaat het om het in beeld brengen van *relatieve veranderingen* in de waterveiligheidsopgave. Deze veranderingen worden in beeld gebracht ten opzichte van tijdlijn Laag (en dus niet t.o.v. de referentiesituatie). Tijdlijn Laag in zichtjaar 2050 geeft aan wat nog nodig is aan dijkversterkingsmaatregelen om vanuit de huidige (referentie)situatie in 2023 te komen tot een systeem dat in 2050 "op orde" is (voldoet aan de norm voor waterveiligheid) én waarmee vervolgens in het beleid rekening is gehouden. De berekende waterveiligheidsopgave voor de tijdlijnen Gematigd, Extreem en Zeer Extreem worden afgehaald van de opgave voor de tijdlijn Laag in 2050. In Tabel 1 en Tabel 3 is een overzicht gegeven van alle gehanteerde zeespiegelstijgingen voor de 4 tijdlijnen en de beschouwde zichtjaren. De tijdlijnen zijn tot stand gekomen in nauw overleg tussen Rijkswaterstaat en het KNMI [Rijkswaterstaat, 2021b].

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

Tijdlijn	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 (cm)				
	2023	2050	2100	2150	2200
Laag	5	25	50	75	100
Gematigd	5	25	78	131	200
Extreem	5	25	100	180	300
Zeer Extreem	5	50	200	350	540



Figuur 5: Overzicht van gehanteerde tijdlijnen en zichtjaren.

Dezelfde mate van zeespiegelstijging (ZSS) komt dus voor in meerdere tijdlijnen. Tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem variëren nauwelijks tussen zichtjaar 2023 en zichtjaar 2050. Alleen tijdlijn Zeer Extreem neemt al direct vanaf 2023 meer toe dan de andere 3 tijdlijnen.

Voor de Oosterschelde is géén gebruik gemaakt van tijdlijn Zeer Extreem, voor de Westerschelde wel. Het watersysteem van de Oosterschelde is erg complex, wat ook het genereren van de databases met hydraulische randvoorwaarden een kostbare, tijdrovende exercitie maakt. De beschikbare modellen zijn door Rijkswaterstaat nog niet geschikt geacht om tijdlijn Zeer Extreem door te rekenen > 3 m ZSS. Daarom is besloten in deze fase van het KP ZSS om voor de Oosterschelde naar maximaal 3 m ZSS te kijken. In fase 2 van het KP ZSS wordt voor de Oosterschelde een inschatting van de waterveiligheidsopgave bij 5 m zeespiegelstijging uitgewerkt.

Zeespiegelstijging kan gepaard gaan met bodemhoogteveranderingen door allerlei morfologische processen in de estuaria. Voor de Westerschelde is daarom gekozen om het effect van verschillende bodemscenario's in beeld te brengen. Daarbij is gekozen voor het voorkeursstrategie (VKS) uitgangspunt van het huidige beleid dat de bodem meegroeit met de zeespiegelstijging. Doordat de belastingen in 2100 en 2200 bij verschillende bodemscenario's worden berekend, leidt eenzelfde mate van ZSS (bijv. 1 m) toch tot verschillen in hydraulische belastingen. Merk op dat voor de Oosterschelde de conservatieve aanname is gehanteerd dat de zeespiegelstijging een verwaarloosbaar effect heeft op de bodemhoogteverandering.

3 Hydraulische belastingen Oosterschelde

3.1 Doel

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van hoe de hydraulische belastingen voor de Oosterschelde zijn bepaald. Deze bestaan uit frequentielijnen voor de waterstand en het hydraulisch belastingniveau voor golfoverslag ofwel de benodigde kruinhoogte (HBN)⁶, om zo de koppeling te kunnen leggen met de waterveiligheidsopgave en kostenberekeningen voor dijken en kunstwerken. De hydraulische belastingen voor de Oosterschelde zijn bepaald volgens de databasemethode, hieronder beschreven.

Voor het bepalen van de waterveiligheidsopgave voor de dijken en kunstwerken zijn de hydraulische belastingen nodig voor de referentiesituatie in 2023 en voor de zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 bij de tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem (Figuur 5). Tijdlijn Zeer Extreem wordt niet beschouwd op de Oosterschelde.

3.2 Methode

De methode die gehanteerd is voor de Oosterschelde staat op hoofdlijnen beschreven in hoofdstuk 2 (Figuur 4). De methode is gebaseerd op het maken van probabilistische berekeningen met een speciaal voor KP ZSS ontwikkelde versie van Hydra-NL (v2.8.4). Hiertoe zijn specifiek voor KP ZSS nieuwe databases fysica (met waterstanden en golven) gebruikt die zijn toegeleverd door Rijkswaterstaat Zee en Delta. De resulterende frequentielijnen voor waterstand en HBN dienen vervolgens als invoer voor OKADER, waarin de belastingen en sterkte (via fragility curves) aan elkaar worden gekoppeld om tot kostenschattingen te komen. In het vervolg van dit hoofdstuk wordt elk van deze stappen nader toegelicht.

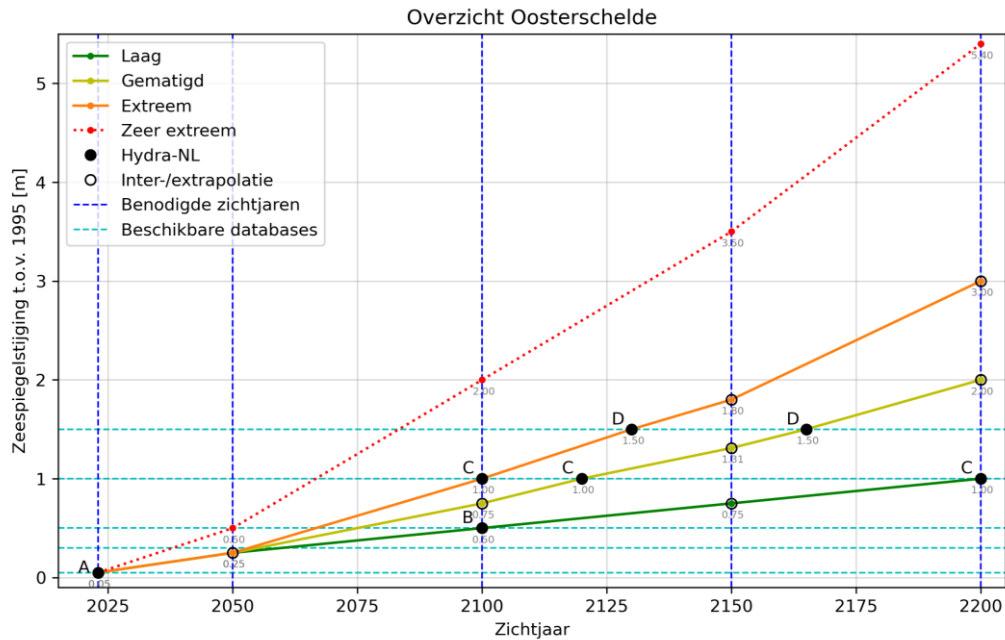
3.2.1 Database fysica

De hydraulische belastingen voor de Oosterschelde zijn berekend met Hydra-NL. Hiervoor zijn databases fysica (ook wel hydraulische belastingen databases genoemd) beschikbaar gesteld, waarin reeds een bepaalde mate van zeespiegelstijging is verwerkt. Deze databases fysica bevatten waterstanden en golfparameters voor verschillende combinaties van zeewaterstand, windcondities en toestanden van de Oosterscheldekering.

Uiteindelijk is de wens om voor alle tijdlijnen en zichtjaren resultaten in de vorm van frequentielijnen van de waterstanden en hydraulische belastingniveaus beschikbaar te krijgen. In Figuur 6 is weergegeven hoe deze gegevens worden afgeleid op basis van de beschikbare databases fysica voor de Oosterschelde. De tijdlijn Zeer Extreem is gestippeld weergegeven, aangezien hiervoor bij de Oosterschelde geen hydraulische belastingen worden bepaald.

Op de snijpunten van de 4 tijdlijnen met de blauw gestreepte verticale lijnen zijn resultaten gewenst. De ZSS die zijn verwerkt in de beschikbare databases fysica komen echter niet altijd overeen met de waarden in de zichtjaren 2050, 2100, 2150 of 2200 volgens de verschillende tijdlijnen (zie hoofdstuk 2). Daarom wordt in een aantal gevallen gebruik gemaakt van inter- of extrapolatie tussen rekenresultaten. Figuur 6 bevat veel informatie, daarom lichten we dit in meer detail toe in paragraaf 3.2.2.

⁶ zie voor een uitleg van het begrip HBN HKV (2020).



Figuur 6: Schema bepaling hydraulische belastingen Oosterschelde (zie Tabel 2 en Tabel 3).

Tabel 2: Hydra-NL berekeningen Oosterschelde.

Som	Database		Hydra-NL
	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995	Aanpassing sluitpeil	Zeespiegelstijging t.o.v. 1995
A	5 cm	0 cm	5 cm
B	50 cm	0 cm	50 cm
C	100 cm	0 cm	100 cm
D	150 cm	50 cm	150 cm

Tabel 2 geeft een overzicht van de basisberekeningen voor de Oosterschelde, waarbij het somnummer in de eerste kolom overeenkomt met de labels in Figuur 6 (zie ook de notitie over de tijdlijnen voor Spoor 2 KP ZSS [Rijkswaterstaat, 2021b]).

In de volgende paragraaf staat toegelicht hoe de vertaling van de resultaten op basis van Tabel 2 naar de benodigde tijdlijnen en zichtjaren plaatsvindt.

3.2.2 Tijdlijnen en zichtjaren met inter- en extrapolatie

De ZSS in de basisberekeningen A t/m D (Tabel 2) komt niet altijd overeen met de waarden in de zichtjaren 2050, 2100, 2150 of 2200 volgens de verschillende tijdlijnen. Daarom wordt in een aantal gevallen gebruik gemaakt van inter- of extrapolatie tussen rekenresultaten van Hydra-NL om de hydraulische belastingen te bepalen.

Tabel 3 geeft aan hoe de belastingen voor de verschillende tijdlijnen/zichtjaren zijn bepaald. Voor scenario's waarbij deze niet rechtstreeks kan worden overgenomen uit de berekeningen met Hydra-NL, wordt gebruik gemaakt van lineaire inter-/extrapolatie gebaseerd op de ZSS in een bepaald zichtjaar voor de betreffende tijdlijn. Zo is bij de tijdlijn Gematigd de hydraulische belasting in het zichtjaar 2150

(ZSS 131 cm) gelijk aan 0,38 maal de waarde bij ZSS 100 cm (C) plus 0,62 maal de waarde bij ZSS 150 cm (D). Voor combinaties met ZSS groter dan 150 cm, wordt op gelijksoortige wijze lineair geëxtrapoleerd.⁷

Tabel 3 geeft een schematische weergave van de hierboven beschreven werkwijze.

Tabel 3: Inter-/ extrapolatie hydraulische belastingen Oosterschelde. Hierbij is ZSS weergegeven t.o.v. 1995, waarbij de ZSS in 2023 t.o.v. 1995 5 cm bedraagt.

Zichtjaar	Laag	Gematigd	Extreem
2023	zss = 5 cm A	zss = 5 cm A	zss = 5 cm A
2050	zss = 25 cm $= 0,50 \times A + 0,50 \times B$	zss = 25 cm $= 0,50 \times A + 0,50 \times B$	zss = 25 cm $= 0,50 \times A + 0,50 \times B$
2100	zss = 50 cm B	zss = 75 cm $= 0,50 \times B + 0,50 \times C$	zss = 100 cm C
2150	zss = 75 cm $= 0,50 \times B + 0,50 \times C$	zss = 131 cm $= 0,38 \times C + 0,62 \times D$	zss = 180 cm $= 1,60 \times D - 0,60 \times C$
2200	zss = 100 cm C	zss = 200 cm $= 2,00 \times D - 1,00 \times C$	zss = 300 cm $= 4,00 \times D - 3,00 \times C$

3.2.3 Uitvoerlocaties en dijkprofielen

Er zijn 217 OKADER dijkvakken langs de Oosterschelde. In de beschikbare databases fysica zijn echter slechts 21 uitvoerlocaties beschikbaar voor de berekeningen met Hydra-NL⁸. Voor de analyses met OKADER zijn alleen dijkvakken geselecteerd waarvoor een representatieve uitvoerlocatie beschikbaar is (dat wil zeggen een locatie die dichtbij genoeg ligt). Dit betreft 36 dijkvakken. In Bijlage B staat beschreven op welke wijze de overige dijkvakken zijn gekoppeld aan de selectie van 36 dijkvakken, ten behoeve van de OKADER-analyse.

De hydraulische belastingen zijn bepaald voor de selectie van 36 dijkvakken. Daarnaast zijn hydraulische belastingen bepaald voor 5 kunstwerken, te weten:

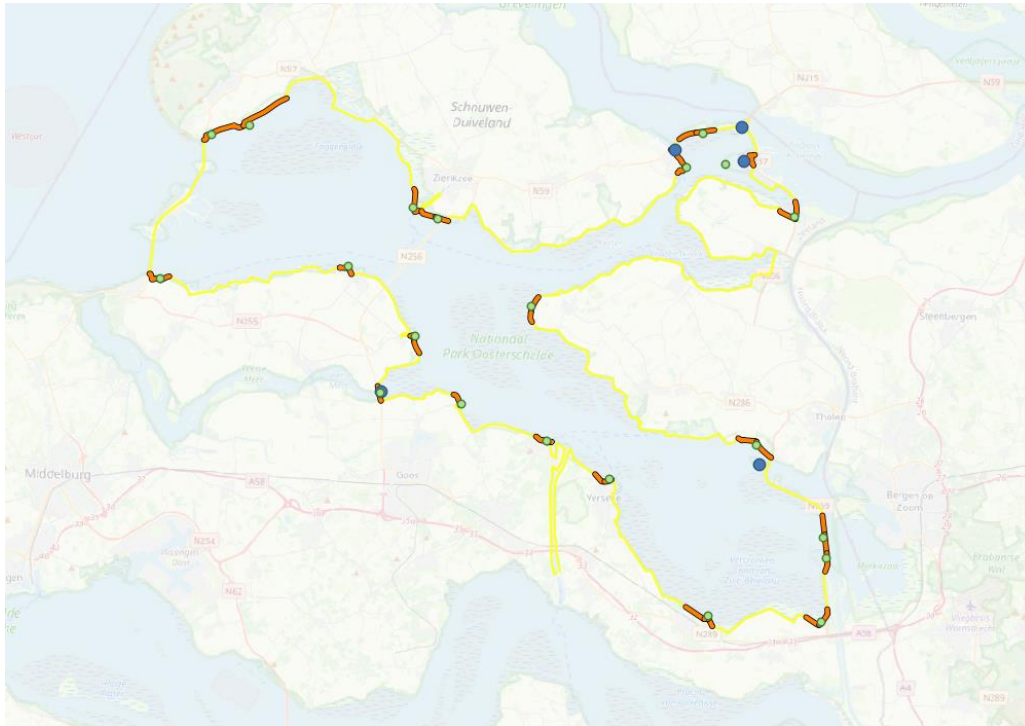
- Grevelingensluis
- Flakkeese spuisluis
- Krammersluizen
- Bergsediepsluis
- Zandkreeksluis

Nadere informatie over de selectie van kunstwerken en de uitwerking is te vinden in Hoofdstuk 5.

⁷ Dit wijkt af van het voorstel van RWS, dat uitgaat van extrapolatie door het fitten van een 2e-graads polynoom.

⁸ In principe bevatten de toegeleverde databases 23 locaties. Van twee locaties (Tholen en Sint Philipsland) is echter bekend dat deze onjuiste resultaten bevatten.

Deze dijkvakken en kunstwerken zijn (evenals de beschikbare uitvoerlocaties voor Hydra-NL) weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7: Overzicht van de uitvoerlocaties, dijkvakken en kunstwerken voor de Oosterschelde (geel=alle OKADER dijkvakken, oranje=geselecteerde dijkvakken, groen=beschikbare uitvoerlocaties databases fysica, blauw=kunstwerken).

3.2.4 Rekeninstellingen

De berekeningen zijn uitgevoerd met Hydra-NL versie 2.8.4. Vanwege de grote hoeveelheid berekeningen is gewerkt in de Testmodus, waarbij zoveel mogelijk de standaardinstellingen van het WBI zijn overgenomen. Wel zijn telkens de database en de zeespiegelstijging aangepast voor de betreffende tijdlijn en zichtjaar op de manier zoals beschreven in paragraaf 3.2.2. Verder is voor de basisberekeningen gerekend:

- zonder modelonzekerheid op de waterstand en golfparameters;
- inclusief statistische onzekerheid;
- met faalkansen voor faalmodi van de Oosterscheldekering zoals deze standaard beschikbaar zijn in Hydra-NL (toegeleverd door de keringbeheerder).

Voor de berekening van het HBN voor golfoverslag is een kritiek golfoverslagdebiëet nodig. Hiervoor is een vaste waarde gehanteerd van 5 l/s/m voor dijken, onder de aanname dat vanaf 2050 alle dijken op orde zijn en voldoen aan dit kritiek golfoverslagdebiëet. Bij het bepalen van de hydraulische belastingen voor kunstwerken is een groter kritiek overslagdebiëet gehanteerd van 10 l/s/m.⁹ Deze debieten zijn enerzijds voor sommige dijken aan de conservatieve kant, maar doen anderzijds recht aan de aanwezigheid van overgangen tussen bekledingen op sommige binnentaluds die als kwetsbare plekken worden gezien. Ook kunnen er objecten op het binnentalud aanwezig zijn. De conclusie is dat het uitgangspunt van 5 l/s/m voor sommige locaties wat aan de veilige kant is en voor andere locaties

⁹ Voor het bepalen van de hoogteopgave van de kunstwerken is uiteindelijk uitgegaan van de waterstand i.p.v. het HBN bij een kritiek overslagdebiëet van 10 l/s/m, omdat het HBN tot zeer grote (onrealistische) kruinhoogtetekorten.

niet. Deze waarden zijn daarnaast gekozen als uniforme, representatieve waarden om resultaten op landelijk niveau vergelijkbaar te maken met elkaar.

Om rekentijd te besparen is gerekend zonder extra uitvoer in de vorm van illustratiepunten en uitsplitsingen.

3.3 Resultaten hydraulische belastingen

De hydraulische belastingen zijn berekend voor 36 dijkvakken en 5 kunstwerken, zoals beschreven in paragraaf 3.2.3 (Figuur 7). Eerst worden de resultaten van de berekeningen voor de waterstanden besproken, gevolgd door de berekeningen voor de hydraulische belastingniveaus (HBN). Voor zowel de waterstand als het HBN laten we de frequentielijnen zien voor een voorbeeldlocatie en geven we enkele observaties. De resultaten voor alle dijkvakken zijn separaat opgeleverd in het opleverdossier. Ze maken geen onderdeel uit van deze rapportage.

Aangezien het gaat om een beleidsstudie is met name het totaal beeld van de Oosterschelde relevant, waarbij het bovendien niet zozeer gaat om de absolute getallen als wel de verschillen tussen de diverse tijdlijnen en zichtjaren. Om een totaalbeeld te verkrijgen van de hydraulische belastingen van de Oosterschelde is het verschil in waterstand bij de norm (WBN)¹⁰ en hydraulisch belastingniveau (HBN) tussen de tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem berekend. Dit beeld wordt toegelicht in respectievelijk paragraaf 3.3.1 en 3.3.2.

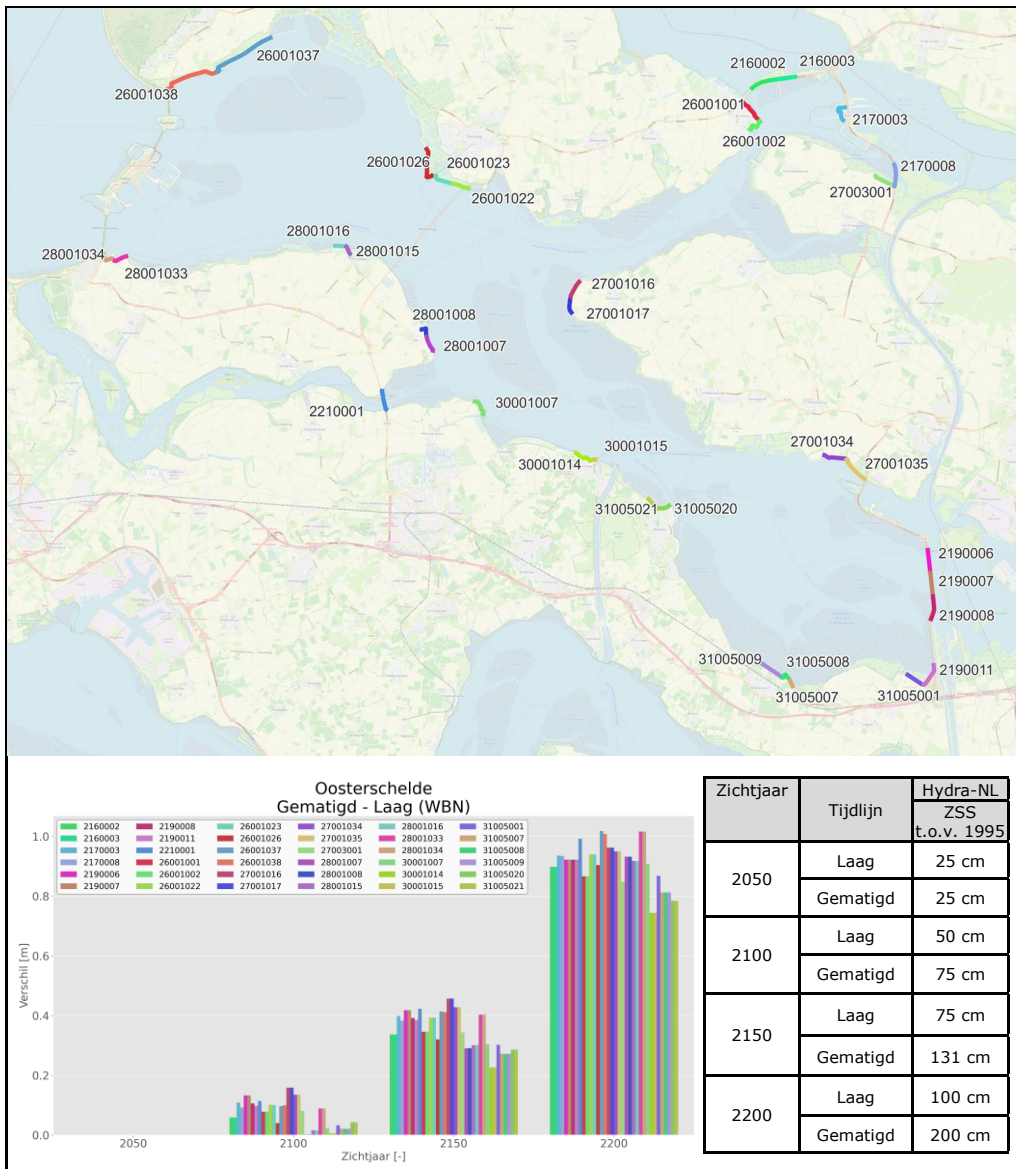
3.3.1 Waterstanden

Totaal beeld waterstand bij de norm

Figuur 8 geeft, per dijkvak, het verschil in waterstand bij de ondergrensnorm weer t.o.v. 2023 tussen de tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren. Voor dijkvak 216002 (Grevelingendam) is bijvoorbeeld het verschil in waterstand tussen beide tijdlijnen voor zichtjaar 2200 ongeveer gelijk aan 0,8 m.

In 2050 is er geen verschil in resultaat tussen beide tijdlijnen. Dat is logisch, aangezien in beide gevallen de ZSS 25 cm bedraagt. In 2150 en 2200 geldt, dat voor de tijdlijn Gematigd gebruik gemaakt is van berekeningsresultaten met een verhoogd sluitpeil van de Oosterscheldekering. Vooruitlopend op de resultaten van de hydraulische belastingniveaus (paragraaf 3.3.2), noemen we dat hier ook het probleem speelt rondom extrapolatie van de waterstandstoename (zie tekst in paragraaf 3.3.1 onder het kopje "frequentielijnen"). Voor de meeste dijkvakken langs de Oosterschelde ligt de norm (ondergrens) echter tussen de 1/300 en 1/10.000 jaar, waarvoor het effect van de overschatting beperkt is. Naar verwachting zijn de getoonde verschillen dus toch redelijk representatief voor het effect van de ZSS op de waterstanden.

¹⁰ Voor de norm is uitgegaan van de ondergrens.



Figuur 8: Verschil in waterstand bij norm (WBN) t.o.v. 2023 per vak tussen tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren (tabel geeft de ZSS per tijdlijn).

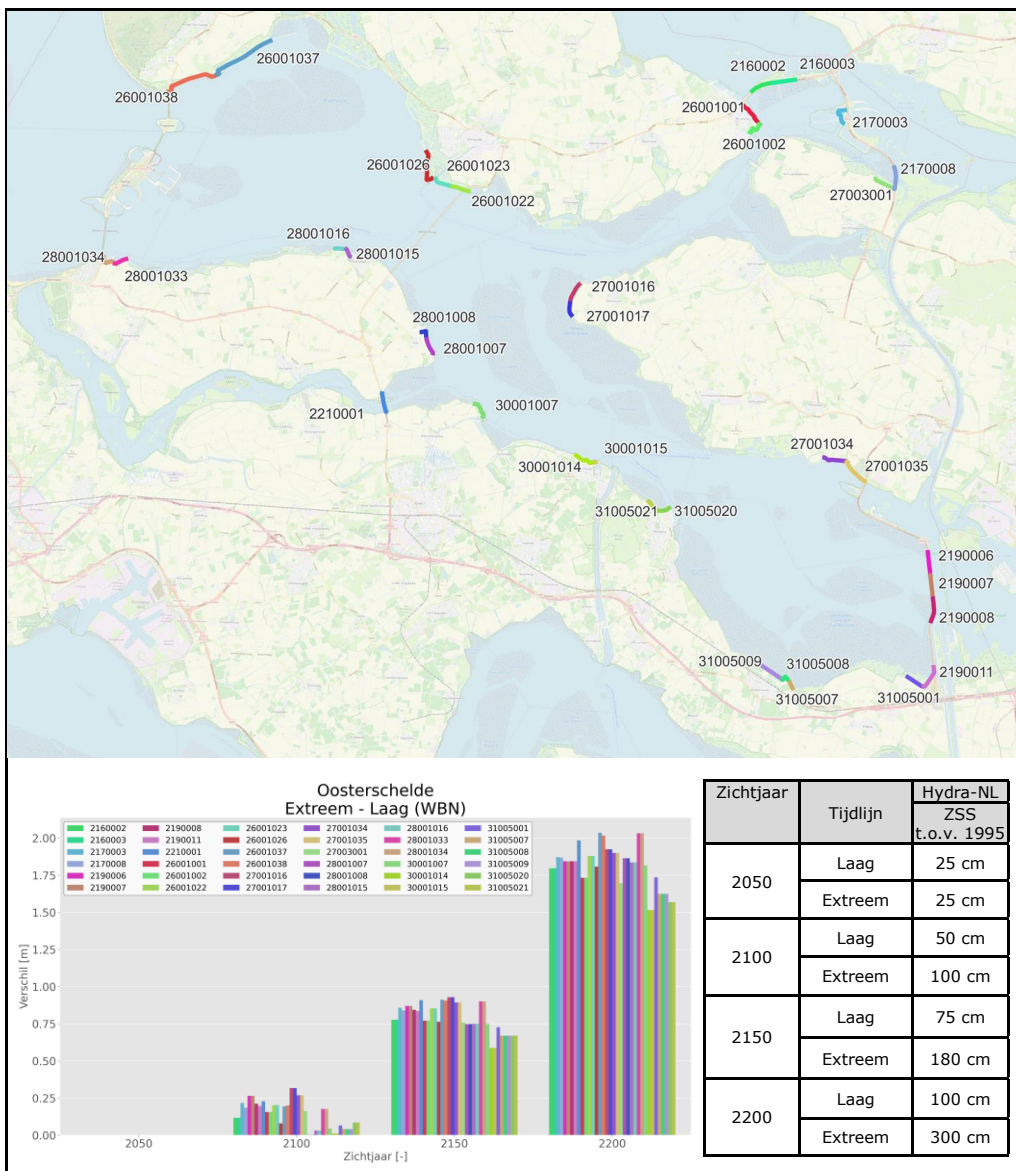
Figuur 9 geeft, per dijkvak, het verschil in WBN weer tussen de tijdlijnen Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren. Voor dijkvak 216002 (Grevelingendam) is bijvoorbeeld het verschil in WBN tussen beide tijdlijnen voor zichtjaar 2200 ongeveer gelijk aan 1,75 m.

In Tabel 4 is het verschil in de toename van het WBN ten opzichte van de tijdlijn Laag weergegeven voor de tijdlijnen Gematigd en Extreem. De toename in ZSS tussen tijdlijn Gematigd en tijdlijn Laag voor zichtjaar 2100 bedraagt 25 cm. Voor dit zichtjaar is het verschil in WBN tussen deze twee tijdlijnen 5 cm, gelijk aan 20% van de ZSS. Hierbij moet wel worden opgemerkt, dat Gematigd in 2100 (75 cm ZSS) een geïnterpoleerd resultaat betreft. Mogelijk wordt de doorwerking van de ZSS hier enigszins onderschat.

Voor hogere ZSS neemt de relatieve toename van de WBN in het bekken toe. De toename in ZSS tussen tijdlijn Gematigd en tijdlijn Laag voor zichtjaar 2200 bedraagt 100 cm. Het verschil in WBN is 90 cm, wat overeenkomt met een 90% van

de ZSS. Dit wijst erop dat voor hogere zeespiegelstijgingen de Oosterscheldekering minder effectief wordt in het voorkomen van waterstandstijging in het bekken.

Tenslotte wijzen we nog op het verschil in waterstandstoename bij Extreem t.o.v. Laag in 2100 (+50 cm ZSS) en Gematigd t.o.v. Laag in 2150 (+56 cm ZSS). Hoewel de toename in ZSS hier vergelijkbaar is, is er een relatief groot verschil in waterstandstoename. Hierbij moet worden opgemerkt dat de +56 cm ZSS het verschil betreft tussen 75 en 131 cm ZSS. De waterstanden bij 131 cm ZSS zijn weer gebaseerd op o.a. een berekening met 150 cm ZSS met sluitpeilverhoging. Mogelijk dat ook de hoeveelheid water over de OSK een rol speelt. Zoals eerder aangegeven, wordt de waterstandstoename daardoor enigszins overschat (zie tekst rondom Figuur 11 in paragraaf 3.3.2).



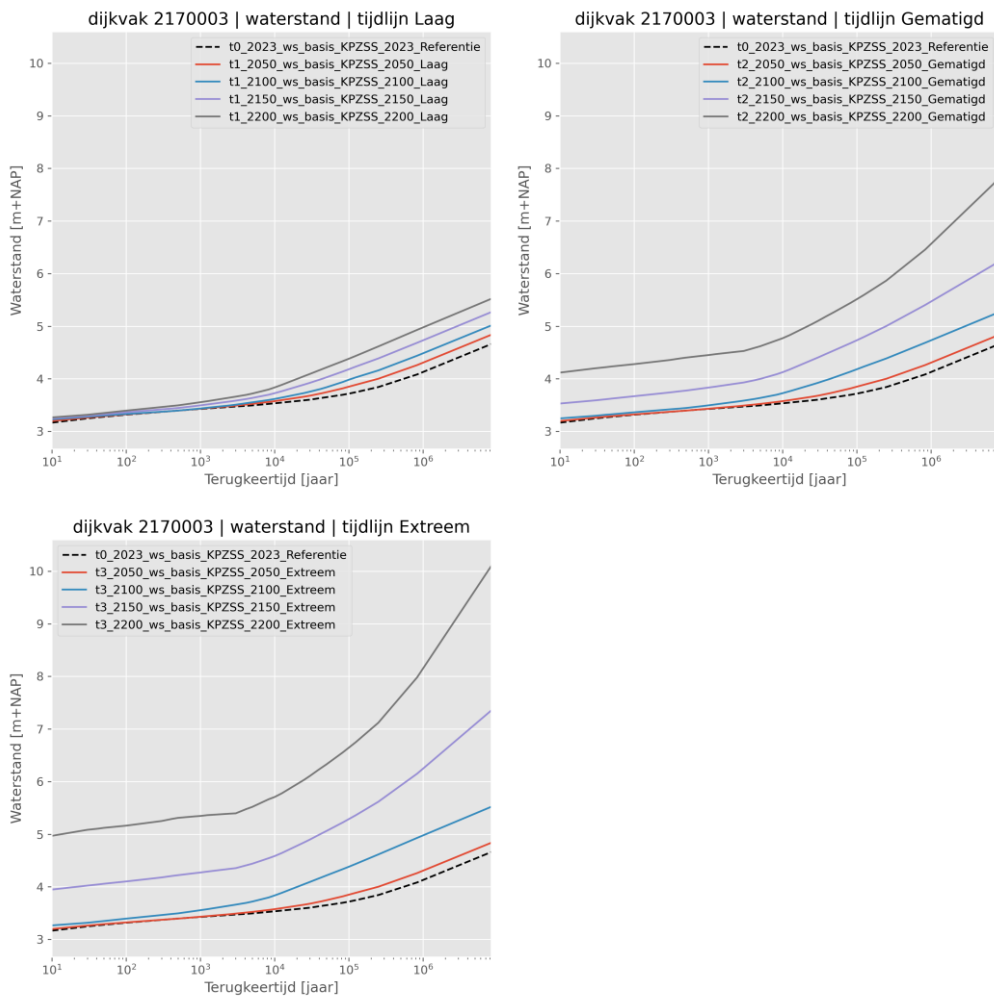
Figuur 9: Verschil in waterstand bij norm (WBN) per vak tussen tijdlijnen Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren (tabel geeft de ZSS per tijdlijn).

Tabel 4: Gemiddelde stijging in waterstand bij norm (WBN) voor tijdlijn Gematigd en tijdlijn Extreem t.o.v. tijdlijn Laag.

Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging WBN langs Oosterschelde t.o.v. tijdlijn Laag			
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	WS OS	ZSS	WS OS
2023	-	-	-	-
2050	-	-	-	-
2100	+25 cm	+5 cm	+50 cm	+15 cm
2150	+56 cm	+35 cm	+105 cm	+80 cm
2200	+100 cm	+90 cm	+200 cm	+180 cm

Frequentielijnen

Voor de drie tijdlijnen – Laag, Gematigd en Extreem – zijn waterstandsfrequentielijnen gemaakt per dijkvak. Figuur 10 geeft als voorbeeld de frequentielijnen voor dijkvak 2170003 langs de Philipsdam.

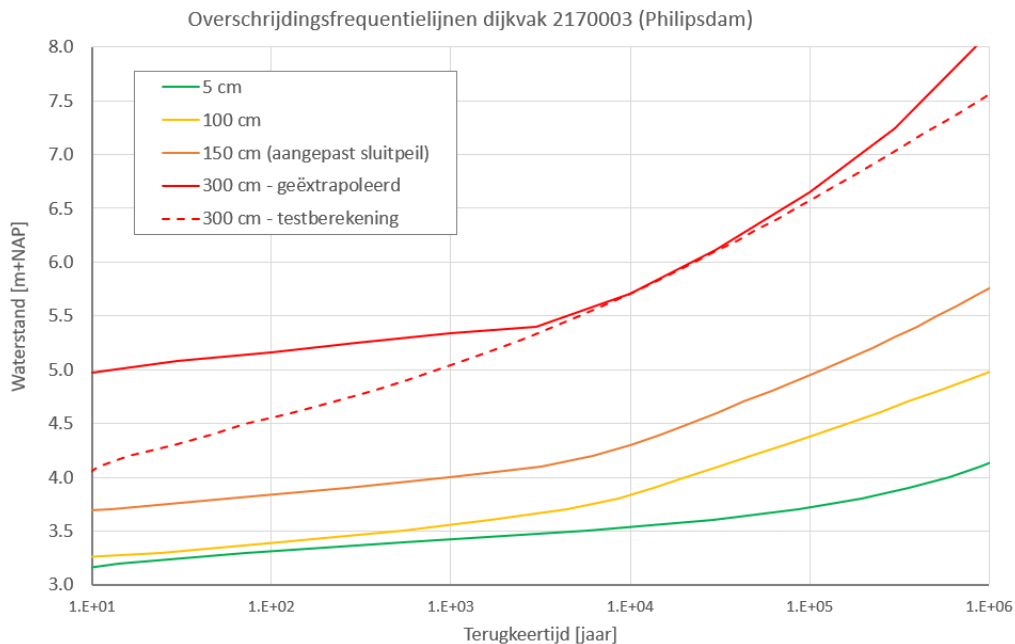


Figuur 10: Frequentielijnen voor waterstand voor dijkvak 2170003 (Philipsdam). In de legenda staat t0 voor zichtjaar 2023 en t1 t/m t3 voor respectievelijk tijdlijn Laag, Gematigd en Extreem.

Bij deze figuur merken we het volgende op:

- Sommige lijnen zijn een rechtstreeks resultaat vanuit Hydra-NL, andere lijnen zijn bepaald door middel van inter-/extrapolatie (als gevolg van de gehanteerde methode zoals beschreven in paragraaf 3.2.1 en 3.2.2). Zo is de referentielijn voor 2023 rechtstreeks berekend en is de lijn voor 2050 bepaald d.m.v. interpolatie. Deze is voor alle tijdlijnen gelijk (zie Tabel 2).
- Zoals ook blijkt uit Tabel 2, zijn de frequentielijnen voor Laag 2200 en Extreem 2100 gelijk (allebei rechtstreeks resultaat van berekening bij 100 cm ZSS). Dit betreft dus de grijze lijn in het subplot linksboven en de blauwe lijn in het subplot linksonder in Figuur 10.
- De frequentielijn voor Extreem 2200 loopt duidelijk wat minder vloeiend dan de overige lijnen, doordat hier het verst wordt geëxtrapoleerd (waarden bij ZSS 300 cm o.b.v. berekeningen bij 100 en 150 cm).
- De waterstandsfrequentielijnen voor dit dijkvak lopen binnen een tijdlijn op bij toenemend zichtjaar en nemen per zichtjaar ook steeds toe in het geval van een extremere tijdlijn t.o.v. een minder extreme tijdlijn. Dit is conform verwachting, aangezien dan altijd sprake is van meer ZSS.
- De invloed van de ZSS is pas goed zichtbaar vanaf een terugkeertijd van circa eens in de 1.000 jaar. Berekeningen t/m 100 cm ZSS liggen in het lagere bereik allemaal dicht in de buurt van de frequentielijn van de referentiesituatie, zie bijvoorbeeld de frequentielijn bij Laag 2200 (subplot linksboven). De waterstanden in dit bereik betreffen voornamelijk situaties met een gesloten kering, waardoor de ZSS (zeer) beperkt invloed heeft. Voor extremere terugkeertijden gaat de faalkans van de OSK domineren (waardoor de helling in de frequentielijn ook toeneemt).
- In het hogere bereik van terugkeertijden is sprake van een falende kering en is de ZSS juist vrijwel één-op-één terug te zien. Zo is bij tijdlijn Laag (subplot linksboven) goed te zien dat de waterstand bij $T=10^6$ jaar in 2200 bijna 100 cm hoger ligt dan in de referentie.
- Bij de tijdlijnen Gematigd en Extreem liggen de bovenste twee frequentielijnen weliswaar ook bij lagere terugkeertijden duidelijk boven de referentielijn, maar daarbij is steeds gebruik gemaakt van de berekening met 150 cm ZSS in combinatie met een aangepast sluitpeil. De sterk verhoogde waterstanden bij de latere terugkeertijden zijn dan ook een rechtstreeks gevolg van dit verhoogde sluitpeil. De waterstandstoename is echter aanmerkelijk groter dan de 50 cm verhoging van het sluitpeil. Dat is een gevolg van extrapolatie, zoals nader toegelicht onder Figuur 10.

Voor dijkvak 2170003 (uitvoerlocatie Philipsdam) is nog wat nader ingezoomd op het effect van ZSS in combinatie met verhoging van het sluitpeil. In Figuur 11 zijn de waterstandsfrequentielijnen weergegeven zoals berekend met Hydra-NL voor 0, 100 en 150 cm (berekeningen A, C en D uit Tabel 2). Zoals eerder geconstateerd ligt het resultaat bij 100 cm dicht bij de referentie (bij lagere terugkeertijden). De berekening met 150 cm ZSS is met een 50 cm verhoogd sluitpeil uitgevoerd en dat is goed terug te zien in de resulterende frequentielijn.



Figuur 11: Nadere analyse effect sluitpeil dijkvak 2170003 (Philipsdam), zie tekst.

In Figuur 11 is ook de frequentielijn weergegeven bij 300 cm ZSS (Extreem in 2200), die wordt berekend door middel van extrapolatie (zie Tabel 3). Het gevolg hiervan is dat de waterstandstoename door de sluitpeilverhoging als het ware ook wordt geëxtrapoleerd. De waterstanden bij 300 cm ZSS worden daardoor overschat.

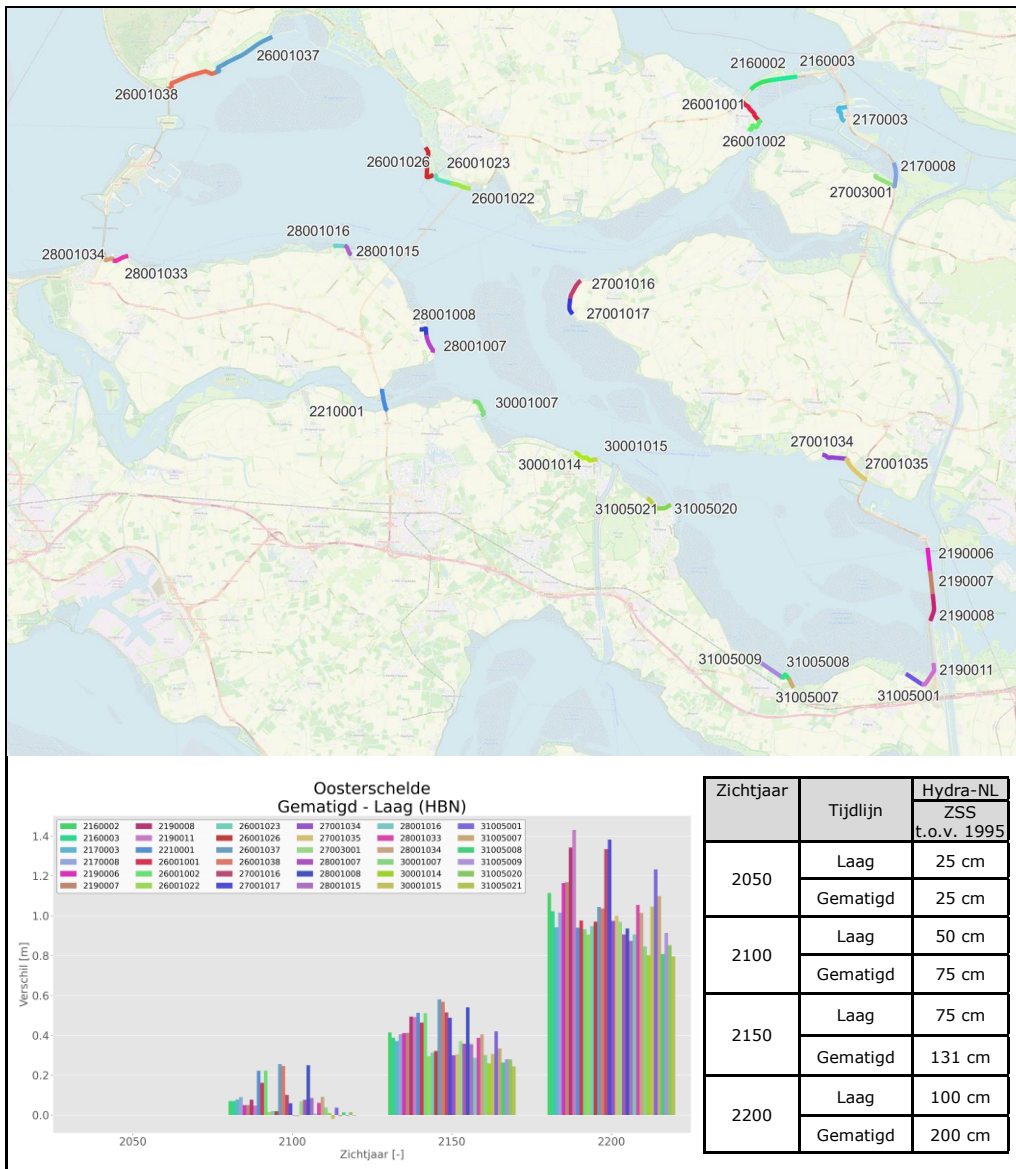
Bij wijze van test is voor dit dijkvak ook een rechtstreekse Hydra-NL berekening gemaakt met 300 cm ZSS, uitgaande van de database fysica met 150 cm ZSS (inclusief verhoogd sluitpeil). Dit geeft de onderbroken lijn in Figuur 11. Dit laat zien dat de overschatting vooral plaatsvindt in het lage bereik van terugkeertijden, hoewel de lijnen vanaf circa $T=10^5$ jaar ook weer uit elkaar lopen. We concluderen dat zolang gekeken wordt binnen het bereik van $T = 10^3 - 10^5$ jaar de gehanteerde aanpak voldoet. Bovenstaande observaties zijn representatief voor de waterstandsfrequentielijnen in heel de Oosterschelde. Bij dijkvakken dicht achter de kering is, bij onaangepast sluitpeil, wel wat meer invloed van ZSS te zien in het lager bereik van terugkeertijden (gesloten kering).

Verder zijn er dijkvakken waarbij de waterstanden bij 50 of 100 cm ZSS in het lagere bereik van terugkeertijden juist iets onder de referentielijn liggen. Die verschillen zijn dan wel relatief klein (centimeters) en vermoedelijk het gevolg van numerieke onnauwkeurigheden en/of een iets ander gedrag van de kering in gebeurtenissen die dicht bij elkaar liggen (bijvoorbeeld net iets eerder of later sluiten).

3.3.2 Hydraulisch belastingniveau

Totaal beeld Hydraulisch Belastingniveaus (HBN's)

Figuur 12 geeft, per dijkvak, het verschil in HBN weer tussen de tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren. Voor dijkvak 216002 (Grevelingendam) is bijvoorbeeld het verschil in HBN tussen beide tijdlijnen voor zichtjaar 2200 ongeveer gelijk aan 1,1 m. Dit komt overeen met de verwachting, omdat de toename van het HBN naar verwachting iets groter is dan de toename van de ZSS door de invloed van iets grotere golven bij een grotere waterdiepte.



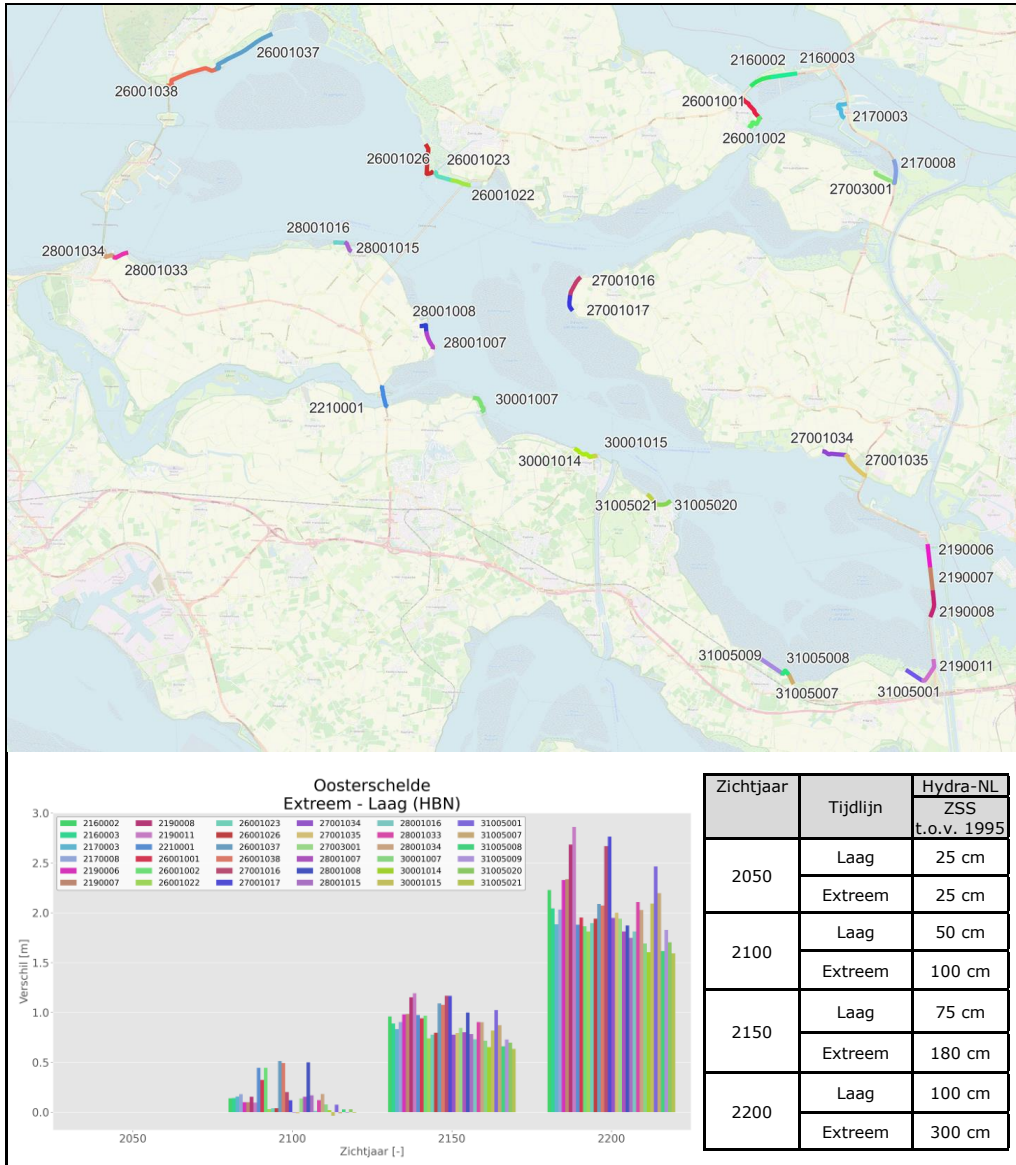
Figuur 12: Verschil in HBN per vak tussen tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren (tabel geeft de ZSS per tijdlijn).

Figuur 13 geeft, per dijkvak, het verschil in HBN weer tussen de tijdlijnen Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren. Bijvoorbeeld, voor vak 216002 is het verschil in HBN tussen beide tijdlijnen voor zichtjaar 2200 ongeveer gelijk aan 2,2 m.

In Tabel 5 is het verschil in HBN-toename weergegeven tussen de verschillende tijdlijnen. De toenames in HBN zijn sterk vergelijkbaar met de waterstandstoenames (Tabel 4). Bij de meest extreme ZSS is de toename in HBN groter dan de waterstandstoename en bij Extreem-2200 t.o.v. Laag-2200 zelfs iets meer dan 100% van de toename in ZSS.

De toename in zeespiegelstijging tussen tijdlijn Gematigd en tijdlijn Laag voor zichtjaar 2100 bedraagt 25 cm. Voor dit zichtjaar is het verschil in HBN tussen deze twee tijdlijnen 5 cm, gelijk aan orde 25% van de ZSS. Voor hogere ZSS neemt de relatieve toename van het HBN in het bekken toe, door het gecombineerde effect van waterstanden en golven. De toename in ZSS tussen tijdlijn Extreem en tijdlijn Laag voor zichtjaar 2200 bedraagt 200 cm. Het verschil in HBN is 205 cm, wat

overeenkomt met iets meer dan 100% van de ZSS. Hier geldt weer, dat het effect van ZSS iets wordt uitvergroot, doordat de waterstandstoename ook effect heeft op de windgolven en daarmee op de hoeveelheid golfoverslag.



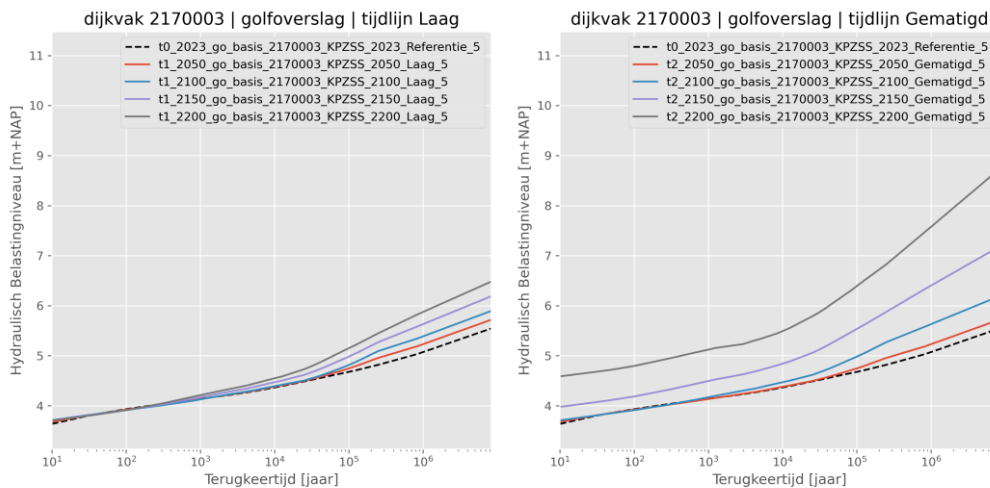
Figuur 13: Verschil in HBN per vak tussen tijdlijnen Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren (tabel geeft de ZSS per tijdlijn).

Tabel 5: Gemiddelde stijging in HBN voor tijdlijn Gematigd en tijdlijn Extreem t.o.v. tijdlijn Laag (bij de norm op vakniveau¹¹).

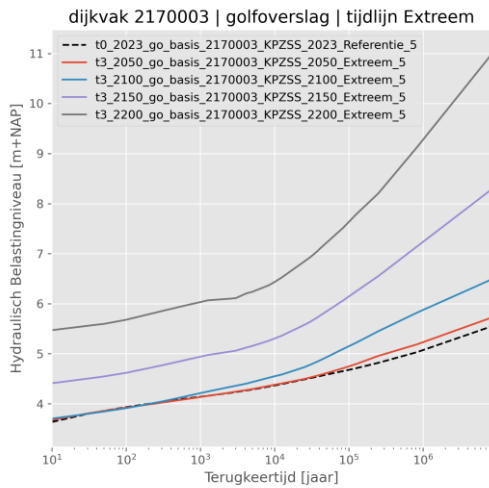
Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging HBN langs Oosterschelde t.o.v. tijdlijn Laag			
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	HBN OS	ZSS	HBN OS
2023	-	-	-	-
2050	-	-	-	-
2100	+25 cm	+5 cm	+50 cm	+15 cm
2150	+56 cm	+40 cm	+105 cm	+90 cm
2200	+100 cm	+100 cm	+200 cm	+205 cm

Frequentielijnen

Voor de drie tijdlijnen – Laag, Gematigd en Extreem – zijn frequentielijnen voor HBN golfoverslag gemaakt (Figuur 14, voorbeeld 2170003 langs de Philipsdam). De HBN's volgen soortgelijke patronen als de waterstanden, zoals beschreven in paragraaf 3.3.1. In sommige gevallen wordt het effect van ZSS iets uitvergroot, doordat de waterstandstoename ook effect heeft op de windgolven en daarmee op de hoeveelheid golfoverslag.



¹¹ De doorsnede-eis bij de norm (ondergrens) op vakniveau voor een betreffend faalmechanisme.



Figuur 14: Frequentielijnen voor het HBN voor dijkvak 2170003 (Philipsdam). In de legenda staat t0 voor zichtjaar 2023 en t1 t/m t3 voor respectievelijk tijdlijn Laag, Gematigd en Extreem.

Wanneer de berekende HBN's vergeleken worden met de waterstanden, dan blijkt dat bij sommige dijkvakken (in bepaalde scenario's) de frequentielijn voor het HBN over een zeker bereik lager ligt dan de frequentielijn voor de waterstand. Die verschillen zijn dan wel relatief klein en vermoedelijk het gevolg van numerieke onnauwkeurigheden en/of het gevolg van de inter-/extrapolatiemethode.

3.3.3 Sluitfrequentie Oosterscheldekering

Bij toename van de gemiddelde zeewaterstand neemt ook de sluitfrequentie van de Oosterscheldekering toe. In HKV (2022a) is deze sluitfrequentie onderzocht op basis van de beschikbare databases fysica bij 0, 30, 50, 100 en 150 cm ZSS. Tabel 6 geeft het resultaat van deze analyse. Deze waarden zijn overgenomen uit paragraaf 3.3 van het genoemde rapport. Merk op, dat in de berekening met 1,0 m ZSS is uitgegaan van de database met verhoogd sluitpeil, in tegenstelling tot de berekeningen zoals eerder in dit hoofdstuk beschreven.

Tabel 6: Sluitfrequenties Oosterscheldekering bij verschillende ZSS [HKV, 2022a].

Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 [m]	Sluitfrequentie [keer/jaar]	Sluitpeil OSK [m+NAP]
0,05*	0,6	3,00
0,3*	2,0	3,00
0,5*	4,6	3,00
1,0**	45	3,00
1,0*	11	3,25
1,5*	46	3,50

*) bron: [HKV, 2022a].

***) bron: berekening voor KP ZSS fase 2 met zelfde uitgangspunten als [HKV, 2022a].

3.4 Samenvatting

De hydraulische belastingen voor de Oosterschelde zijn berekend met Hydra—NL, voor 0, 50, 100 en 150 cm ZSS. Deze waarden zijn vervolgens vertaald naar de benodigde tijdlijnen en zichtjaren voor de waterveiligheidsopgave en versterkingsopgave. Waar nodig is gebruik gemaakt van inter- of extrapolatie tussen rekenresultaten van Hydra-NL om de hydraulische belastingen te bepalen voor andere ZSS dan hierboven genoemd.

Over het algemeen geldt, dat de hydraulische belasting toeneemt met toenemend zichtjaar en bij een extremere tijdlijn t.o.v. een minder extreme tijdlijn. Dit is conform verwachting, aangezien dan altijd sprake is van meer ZSS. De invloed van de ZSS is echter pas goed zichtbaar bij buitenwaterstanden met een overschrijdingsfrequentie van terugkeertijden van circa 1/1.000 per jaar. Daaronder betreft het voornamelijk situaties met een gesloten kering die het water goed kan keren, waardoor de ZSS (zeer) beperkt invloed heeft. Daarboven gaat de faalkans van de OSK een steeds belangrijker rol spelen en wordt zelfs overlopen van de OSK van belang.

Overigens zijn er ook dijkvakken waarbij de waterstanden bij 50 of 100 cm ZSS in het lagere bereik van terugkeertijden juist iets onder de referentielijn liggen. Die verschillen zijn dan wel relatief klein (centimeters) en vermoedelijk het gevolg van numerieke onnauwkeurigheden en/of een iets ander gedrag van de kering in gebeurtenissen die dicht bij elkaar liggen (bijvoorbeeld net iets eerder of later sluiten).

Voor de berekening met 150 cm ZSS is gebruik gemaakt van een database fysica met verhoogd sluitpeil (50 cm). Bij het bepalen van de hydraulische belastingen voor de scenario's met meer dan 150 cm ZSS (Gematigd/Extreem, 2150 en 2200) is bij het extrapoleren gebruik gemaakt van zowel deze resultaten als de resultaten bij 100 cm ZSS zonder verhoogd sluitpeil. Dat leidt tot ongewenste effecten bij het extrapoleren. In het hoogfrequente bereik worden de hydraulische belastingen bij deze scenario's daardoor overschat. Voor de meeste dijkvakken langs de Oosterschelde ligt de norm (ondergrens) echter tussen de 1/300 en 1/10.000 jaar. Het effect van deze overschatting op de waterveiligheidsopgave is daarom vermoedelijk beperkt.

4 Hydraulische belastingen Westerschelde

4.1 Doel

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van hoe de hydraulische belastingen voor de Westerschelde zijn bepaald. Deze bestaan uit frequentielijnen voor de waterstand en het hydraulisch belastingniveau voor golfoverslag (HBN ofwel benodigde kruinhoogte, zie uitleg in HKV (2020)) bij de ondergrensnorm, om zo de koppeling te kunnen leggen met de waterveiligheidsopgave en kostenberekeningen voor dijken en kunstwerken. De hydraulische belastingen voor de Westerschelde zijn bepaald volgens de illustratiepuntenmethode, hieronder beschreven.

Voor het bepalen van de waterveiligheidsopgave voor de dijken en kunstwerken zijn hydraulische belastingen nodig voor de referentiesituatie in 2023 en voor de zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 bij de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem (Figuur 15).

4.2 Methode

Voor het bepalen van de hydraulische belastingen in de Westerschelde is gebruik gemaakt van de illustratiepuntenmethode [Rijkswaterstaat, 2022d]. Deze methode is een verkorte versie van het volledig berekenen van nieuwe databases fysica, wat gegeven de rekenintensiteit van het Westerschelde model en de mogelijke bodemdynamiek in de toekomst, een te kostbare en tijdrovende exercitie is. De illustratiepuntenmethode is in essentie enkel het opnieuw berekenen van de HBN's middels SWAN modellering, gebruik makend van de Waterstanden bij de norm (WBN's) bepaald uit Hydra-NL. Dit wordt hieronder nader uitgelegd.

Zoals in hoofdstuk 2 is aangegeven, kan zeespiegelstijging gepaard gaan met bodemhoogteveranderingen. Daarom zijn door Deltares verschillende scenario's voor bodemhoogteveranderingen met bijbehorende zeespiegelstijgingen voor de Westerschelde en Waddenzee uitgewerkt [Deltares, 2022b]. Deze bodemscenario's zijn gevoeligheidsanalyses om het effect van (en mogelijkheden tot) sedimentbeheer op de waterveiligheidsopgave in kaart te brengen. Ze zijn alleen berekend voor de Westerschelde in de Zuidwestelijke Delta, omdat de morfologische veranderingen op de Oosterschelde klein zijn.

Voor de bodemhoogteveranderingen worden de volgende drie situaties onderscheiden:

1. de bodem blijft constant (NM: Niet Meegroeien);
2. de bodem volgt de huidige trend (VT: Voortzetting Trend). Deze bodems zijn onafhankelijk van de zeespiegelstijging en liggen voor 2100 en 2200 tussen VM Extreem en Zeer Extreem in;
3. De bodem groeit volledig mee met de ZSS (VM: Volledig Meegroeien).

Door Deltares [Deltares 2022b] zijn bodems gegenereerd voor zeespiegelstijgingen van 0,5; 1,0; 2,0 en 3,0 m. Dit geeft de volgende beschikbare scenario's voor bodemhoogteveranderingen:

1. de bodem blijft constant (referentiesituatie, NM: Niet Meegroeien);
 - geen verandering van de huidige bodem.
2. de bodem volgt de huidige trend (VT: Voortzetting Trend);
 - bodem in 2100 (80 jaar voortzetting huidige trends)
 - bodem in 2200 (180 jaar voortzetting huidige trends)

3. de bodem groeit volledig mee met de ZSS (VM: Volledig Meegroeien), wat dus vier scenario's geeft die overeenkomen met de niveaus van ZSS. Ook de voorlanden groeien in dit geval op gelijke wijze mee.

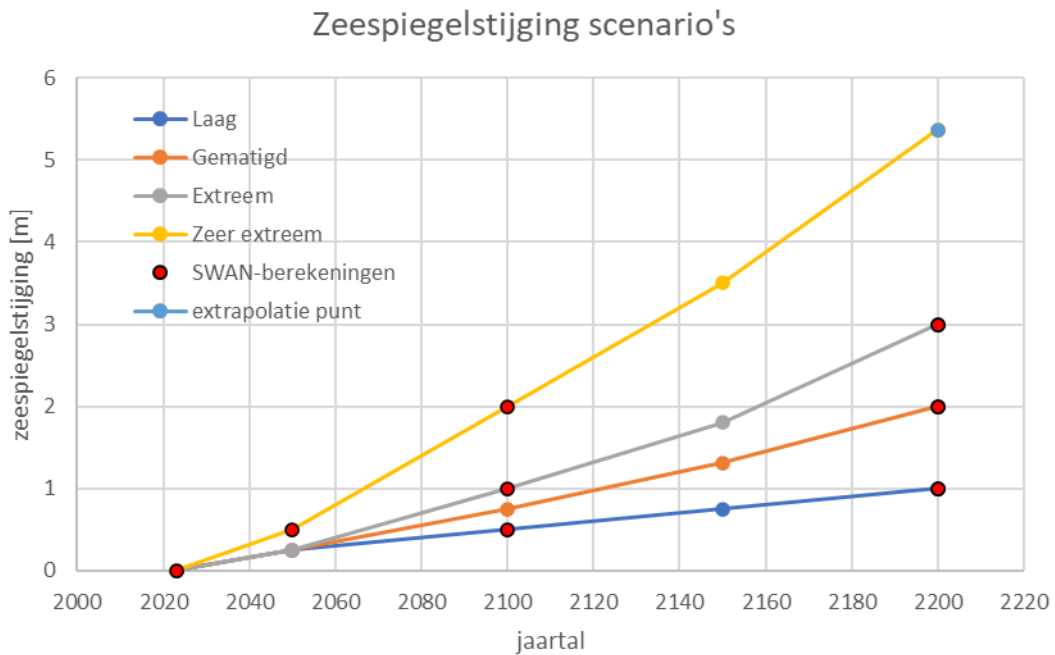
In de voorkeursstrategie wordt uitgegaan van scenario 3: het Volledig Meegroeien van de bodem met de zeespiegelstijging.

In de Westerschelde wordt aangehouden dat de bodem volledig meegroeit met de zeespiegelstijging. Om de invloed van de verschillende bodems op de hydraulische belastingen en de waterveiligheidsopgave in beeld te brengen zijn in paragraaf 7.5 berekeningen uitgevoerd met elk van deze bodems.

Om tot hydraulische belastingen langs de Westerschelde te komen worden de volgende stappen gevolgd [Deltares 2022a]:

1. Stap 1: Selecteren van representatieve locaties (één per OKADER vak);
2. Stap 2: Bepalen van het HBN op de geselecteerde locaties met Hydra-NL voor het referentiescenario (met database fysica van de HR2011/WBI2017);
3. Stap 3: Bepalen van het ontwerppunt (windsnelheid, windrichting en lokale waterstand in het illustratiepunt¹²) voor de geselecteerde locaties met Hydra-NL;
4. Stap 4: Categoriseren van de ontwerppunten naar windsnelheid, windrichting en lokale waterstand. Op deze manier zijn 21 'unieke' condities bepaald waarmee nieuwe golfcondities in de geselecteerde punten bepaald kunnen worden. In Rijkswaterstaat (2022g) is dit nader uitgewerkt;
5. Stap 5: Berekenen met SWAN2D voor alle geselecteerde condities (wind en lokale waterstand) per scenario (zeespiegelstijging in combinatie met bodemhoogteverandering): dit geeft de golfcondities per scenario langs alle HR-locaties per watersysteem. Zie Figuur 15 voor welke waarden van ZSS SWAN berekeningen zijn gemaakt;
6. Stap 6: Bepalen van het effect van voorlanden en haventerreinen op golfcondities met SWAN1D voor representatieve HR-locaties binnen de OKADER-vakken met een voorland. Dit is een extra nauwkeurigheidsslag die nodig is om het effect van voorlanden goed mee te kunnen nemen;
7. Stap 7: Vertalen van combinatie van waterstand en golfconditie naar HBN met de (deterministische) TAW-2002 golfploopformule [TAW, 2002];
8. Stap 8: Inter- en extrapoleren van de HBN-waarden voor zeespiegelstijging volgens de tijdlijnen voor zeespiegelstijgingen anders dan 0,5; 1,0; 2,0 en 3,0 m;
9. Stap 9: Bepalen van de verschillen in het HBN (uit stap 7) per locatie voor de verschillende mate van zeespiegelstijging en bodemverandering. De verschillen vormen een correctie op de oorspronkelijke HBN's uit stap 2;
10. Stap 10: Optellen van correctie uit stap 9 bij het probabilistisch bepaalde HBN (uit Hydra-NL) van het scenario uit stap 2;
11. Stap 11: Bepalen van effect van zeespiegelstijging en bodemverandering uit verschil tussen HBN uit stap 10 en HBN referentie uit stap 2.

¹² Het illustratiepunt is een combinatie van hydraulische belastingen bij de norm, die het meest waarschijnlijk is (grootste kans van voorkomen heeft).



Figuur 15: ZSS tijdlijnen. Bron: [Rijkswaterstaat, 2021b].

4.2.1 Selecteren van representatieve locaties (stap 1)

Langs de Westerschelde zijn 173 OKADER-vakken (Figuur 16). Voor elk vak worden hydraulische randvoorwaarden bepaald. Als uitvoerlocatie wordt het midden van elk vak gekozen. Bij elke uitvoerlocatie wordt het dichtstbijzijnde HR-uitvoerpunt gekozen.



Figuur 16: OKADER vakken Westerschelde en uitvoerpunten (zwart).

4.2.2 Categoriseren van de illustratie-/ontwerpfunten (stap 4)

Met SWAN2D moeten golfcondities voor verschillende zeespiegelstijgingen en bodemscenario's worden bepaald. Het is een te grote opgave om dit voor alle 173 locaties in de Westerschelde te doen. Daarom is voorgesteld om de hydraulische belastingen uit stap 2 te clusteren zodat maar een beperkt aantal SWAN-berekeningen uitgevoerd hoeven te worden. Uitgangspunt is dat zo veel mogelijk de illustratiepunten in elke locatie benaderd worden. Het clusteren is gedaan door de hydraulische belastingen te categoriseren naar windrichting, windsnelheid en

waterstand en de locaties met overeenkomstige HB te bundelen en hiervoor één SWAN berekening uit te voeren per zeespiegelstijging.

In Tabel 7 zijn de 21 (maatgevende) condities getoond waarmee met SWAN2D golfrandvoorwaarden voor alle locaties zijn bepaald. Deze randvoorwaarden voor de SWAN2D berekeningen zijn voor alle bodemscenario's en tijdlijnen gelijk. Voor de verschillende scenario's van zeespiegelstijging is alleen de zeewaterstand verhoogd. Met deze condities (en verschillende waterstanden) zijn de HBN's uit stap 7 bepaald.

Tabel 7: Overzicht randvoorwaarden SWAN2D berekeningen. (wdir: windrichting, h_bottom, h_top: grenzen waterstanden, ws_bottom, ws_top: grenzen windsnelheid, numel: aantal locaties, h_mean, ws_mean: gekozen gemiddelden).

	wdir	h_bottom	h_top	ws_bottom	ws_top	numel	h_mean	ws_mean
0	240	4	5	31	34	5	4.74	33.10
1	270	4	5	34	37	4	4.79	34.85
2	270	5	6	34	37	5	5.35	35.14
3	270	5	6	40	43	2	5.57	40.70
4	270	6	7	37	40	3	6.50	38.53
5	270	6	7	40	43	2	6.57	42.60
6	300	4	5	28	31	2	4.81	30.85
7	300	4	5	31	34	2	4.88	31.35
8	300	5	6	31	34	16	5.76	33.62
9	300	5	6	34	37	18	5.59	34.66
10	300	5	6	37	40	2	5.62	37.55
11	300	6	7	34	37	32	6.52	35.48
12	300	6	7	37	40	6	6.77	38.78
13	300	6	7	40	43	3	6.09	40.47
14	300	7	8	37	40	6	7.43	39.25
15	300	7	8	40	43	15	7.48	41.05
16	330	4	5	25	28	8	4.65	27.48
17	330	4	5	28	31	15	4.77	29.09
18	330	5	6	28	31	6	5.46	30.37
19	330	5	6	31	34	5	5.76	32.04
20	330	6	7	31	34	3	6.20	33.30

4.2.3 Bepalen van het effect van voorlanden (stap 6)

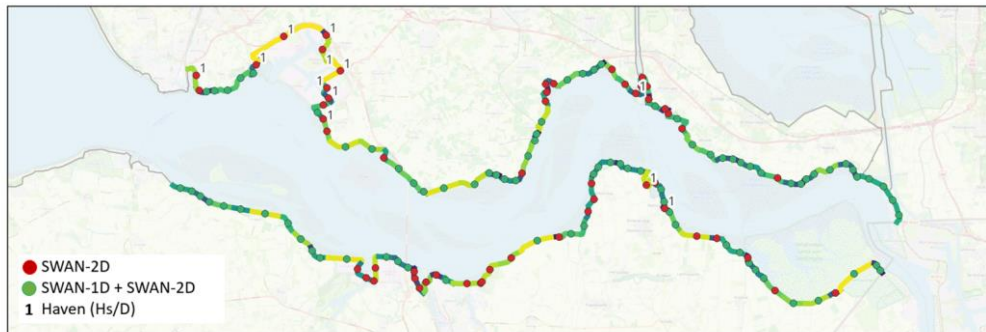
Voor alle uitvoerlocaties wordt bepaald of voorland aanwezig is. Dit levert 3 verschillende types op:

- Geen voorland: uitvoer uit SWAN2D berekening in HR-punt dat het dichtst bij het midden van het OKADER-vak ligt.
- Wel voorland: uitvoer uit SWAN1D berekeningen op $\frac{1}{2}$ L0 van de teen van de dijk met randvoorwaarden uit de SWAN2D berekening.
- Havens: uitvoer uit SWAN2D berekening in HR-punt dat het dichtst bij het midden van het OKADER-vak ligt, waarbij geldt dat $H_s/D < 0,5$.

De selectie van vakken met voorland of havens is deels visueel gedaan en deels ook automatisch. De havens zijn allemaal visueel geselecteerd. Voor de automatische selectie van voorlanden zijn de volgende criteria gehanteerd:

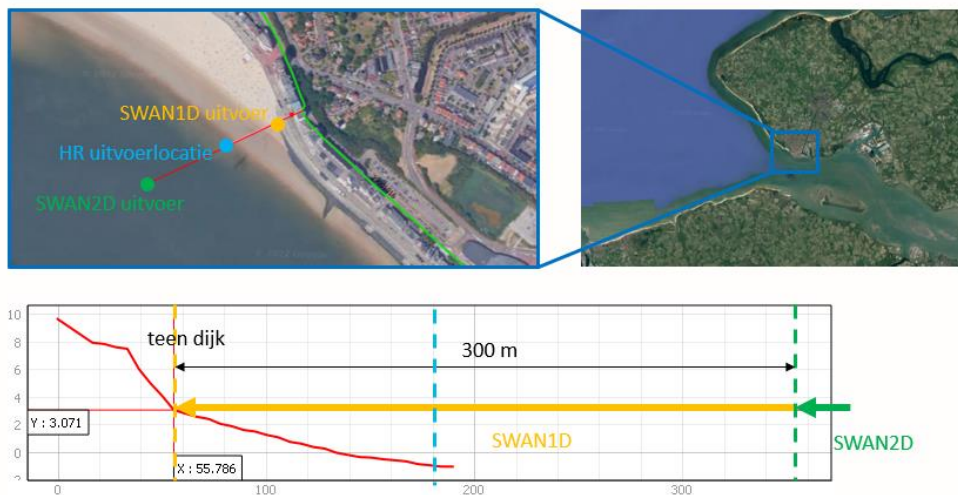
- De golfhoogte neemt minimaal 10% af tussen het 300m punt en $\frac{1}{2}$ L0 van de teen van de dijk;
- Er is in ieder geval voorland als de bodemligging op 300m boven NAP+1m ligt.

Figuur 17 geeft aan welke keuze per dijkvak is gemaakt voor de uitvoer.



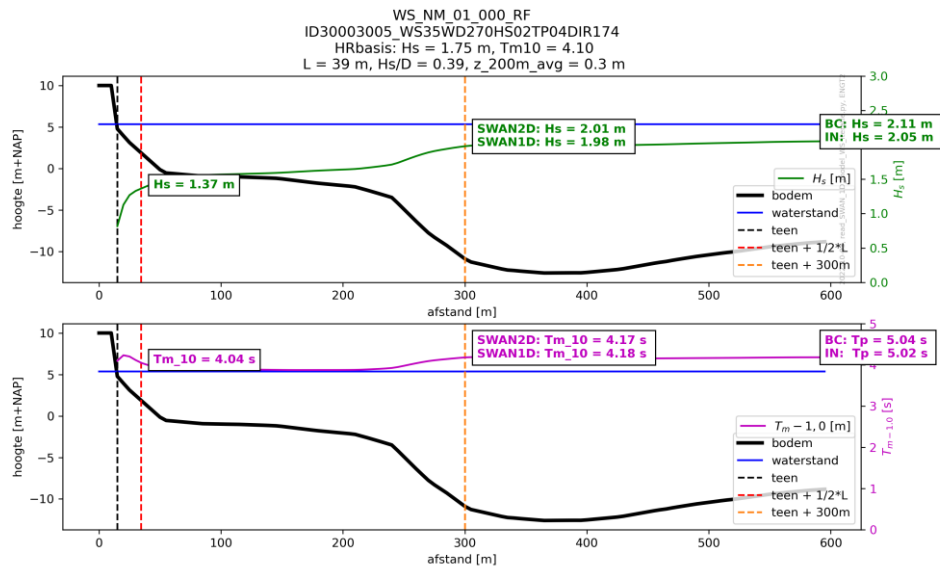
Figuur 17: Keuze voor uitvoer langs de Westerschelde.

Door het geselecteerde HR-uitvoerpunt wordt een raai loodrecht op de dijk gedefinieerd. Op deze raai worden ook een punt op 300m en 600m van de kruin van de dijk bepaald (zie Figuur 18). Deze uitvoerpunten worden gebruikt voor de eventuele SWAN1D-berekeningen.



Figuur 18: Methodiek SWAN1D met aansturing door SWAN2D.

De SWAN1D berekeningen gebruiken een geïnterpoleerde bodem uit SWAN2D over een afstand van 600 m vanaf de kruin van de dijk. Op 600 m worden de randvoorwaarden uit het SWAN2D model opgelegd aan het SWAN 1D model en vervolgens geïtereerd totdat op 300 m het SWAN 1D model de condities uit het SWAN2D reproduceert (zie Figuur 19). Als dat niet lukt (verschil $H_s > 0,2$ m, verschil $T_{m-1,0} > 0,25$ s) dan worden de SWAN2D resultaten gebruikt. Ook zijn na visuele controle foutieve SWAN1D resultaten (zonder dijk of steile gradiënten) vervangen door SWAN2D (dit had betrekking op 8 van de 173 locaties)



Figuur 19: Uitvoer SWAN1D Kapelleplaat (Hansweert).

Toelichting toepasbaarheid illustratiepuntenmethode in het KP ZSS

De illustratiepuntenmethode van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (RWS en Deltares, Witteveen en Bos) is een aangepaste methode die aansluit bij de Hydra-NL methodiek. De meest zuivere methodiek is de Hydra-NL methodiek. Hierin worden de probabilistische effecten volledig meegenomen. Nadeel hiervan is dat hiervoor opnieuw een database bepaald zou moeten worden. Omdat dit erg tijdsintensief en duur is, is er voor gekozen om een methodiek te gebruiken die snel en redelijk betrouwbaar is.

De methodiek om HBN's te bepalen, is een aangepaste methodiek gebruikt die vergelijkbaar is met Deltares (zie paragraaf 4.2). Deze methodiek gaat uit van de bestaande Hydra-NL databases en is voor de situatie waarbij de bodem niet verandert gelijk aan de probabilistische methode.

Bij verandering van de bodem ontstaan echter afwijkingen, omdat slechts gebruik gemaakt wordt van één illustratiepunt en één waarde per dijktraject (niet altijd de hoogste). Ook is in de methode de bermfactor geschat en is de SWAN-versie afwijkend. *Een belangrijk uitgangspunt voor de illustratiepuntmethode is dat een fout in het HBN van 20%-30% van de mate van zeespiegelstijging acceptabel is.* Voor de verschillende watersystemen is de gemiddelde fout kleiner dan deze waarde. In individuele punten kan de fout groter zijn.

Voor het bodemscenario Niet Meegroeien is de fout nul omdat hiervoor de Hydra-NL database is gebruikt. De resultaten van dit bodemscenario zijn het uitgangspunt voor het bepalen van de effecten voor de andere bodemscenario's. Op locaties waar een sterk probabilistisch effect is (bijv. Saefinghe) zijn de afwijkingen het grootst [RWS, 2023a]. Dit heeft de volgende oorzaken:

- **Bermen:** in de illustratiepuntenmethode is gerekend met of zonder berm. Als een berm aanwezig is, is de bermfactor 0,7 aangehouden (maximale werking). Dit omdat niet duidelijk is hoe het talud versterkt wordt in de toekomst. In Hydra-NL wordt zonder berm gerekend.
- **Reparaties:** In Hydra-NL zijn reparaties doorgevoerd voor de berekening van de HBN's. Deze zijn in de eigen programmatuur (gebaseerd op de TAW-leidraad) niet altijd reproduceerbaar.
- **Gebruik van SWAN-berekeningen:** Met SWAN is maar één conditie per locatie doorgerekend. In Hydra-NL wordt volgens de probabilistische methodiek rekening gehouden met alle golfrichtingen. Bovendien is voor de illustratiepuntenmethode slechts naar één punt per dijktraject gekeken en naar één illustratiepunt voor soortgelijke dijktrajecten. Als laatste is een andere versie van SWAN gebruikt waar white-capping, refractie iets anders in zit.

Voorlanden

In de Illustratiemethode zijn de golfcondities op voorlanden apart doorgerekend met SWAN1D om de effecten van voorlanden en vegetatie goed te kunnen inschatten. Hierbij zijn de resultaten van SWAN2D op 300m van de teen van de dijk vertaald naar de teen van de dijk. Hierbij is geen rekening gehouden dat dit niet in de Hydra-NL database is verwerkt. Omdat de SWAN2D resultaten kunnen verschillen met de SWAN1D resultaten ontstaan er verschillen in HBN's. Over het algemeen zijn deze verschillen klein (orde enkele cm's tot 1 dm) ([RWS, 2023a] en [RWS,2023b]). De verschillen worden echter groter bij sterk verhoogde voorlanden. Daarom wordt geadviseerd om in het vervolg een extra term mee te nemen voor het verschillen tussen SWAN2D en SWAN1D voor de bodemscenario Niet Meegroeien.

4.3 Resultaten hydraulische belastingen

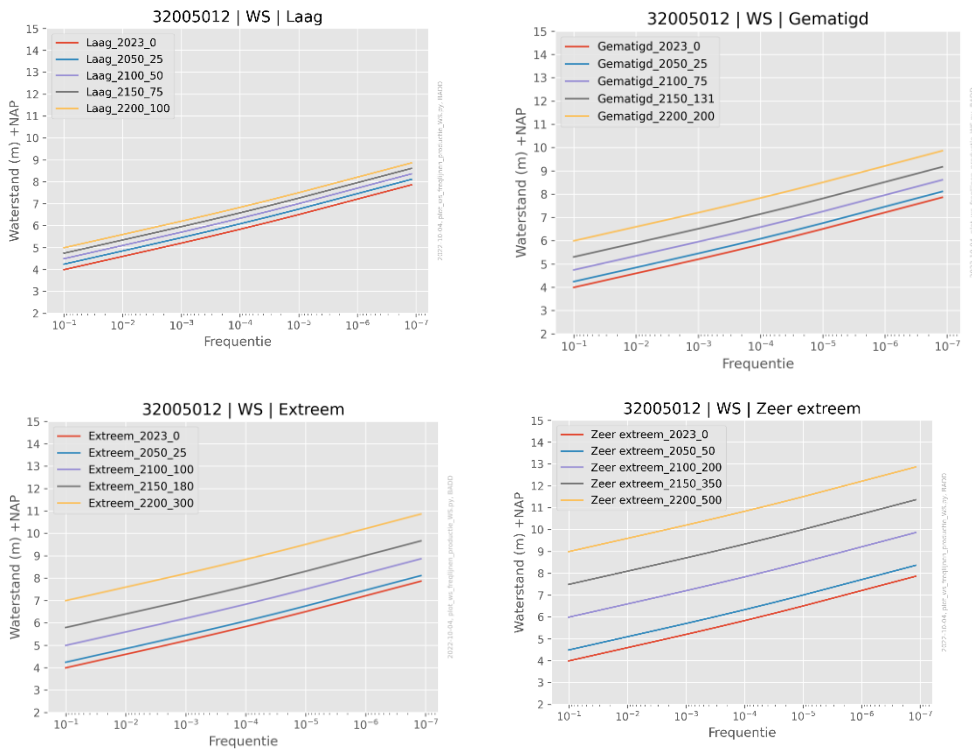
De hydraulische belastingen in de Westerschelde zijn berekend voor 173 dijkvakken en 3 kunstwerken. Daarvoor is gebruik gemaakt van 173 uitvoerlocaties uit de Hydra-NL databases met verschillende mate van zeespiegelstijging. In dit hoofdstuk worden de resultaten voor de voorkeursstrategie met bodemscenario Volledig Meegroeien (VM) besproken. De andere bodemscenario's komen aan bod in de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 7.6.

Eerst worden de resultaten van de berekeningen voor de waterstanden besproken, gevolgd door de resultaten van de HBN-berekeningen. Voor zowel de waterstands- als de HBN-berekeningen laten we de frequentielijnen zien voor een voorbeeldlocatie en bespreken we discussiepunten. De resultaten voor alle dijkvakken worden ontsloten in het opleverdossier en maken geen onderdeel uit van deze rapportage.

Aangezien het gaat om een beleidsstudie en niet om een beoordeling i.h.k.v. BOI is met name het totaal beeld van de Westerschelde relevant en de effecten van bodemligging en zeespiegelstijging. Om een totaal beeld te verkrijgen van de hydraulische belastingen van de Westerschelde is het verschil in de waterstand bij de norm en het HBN tussen de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem berekend. De resultaten van deze vergelijking voor waterstand bij de norm en HBN worden respectievelijk besproken in paragraaf 4.3.1 en 4.3.2.

4.3.1 Waterstanden

In de Westerschelde werkt de zeespiegelstijging direct door in de waterstanden langs de dijk. In deze studie is er daarom van uit gegaan dat de waterstanden langs de dijk evenredig stijgen met de zeespiegelstijging [Deltares, 2022a]. Een voorbeeld is te zien in Figuur 20. Het effect van het opslingeren van de waterstand in het estuarium is niet meegenomen.



Figuur 20: Waterstandfrequentielijnen Hoofdplaat (locatie B in Figuur 21).

In de figuren is te zien dat de waterstandsfrequentielijnen toenemen met de zeespiegelstijging waarbij de toename het kleinst is voor tijdlijn Laag en het grootst voor tijdlijn Zeer Extreem.

Overzicht

Tabel 8 toont de gemiddelde stijging van de waterstand bij de norm ten opzichte van de tijdlijn Laag voor de voorkeursstrategie Volledig Meegroeien.

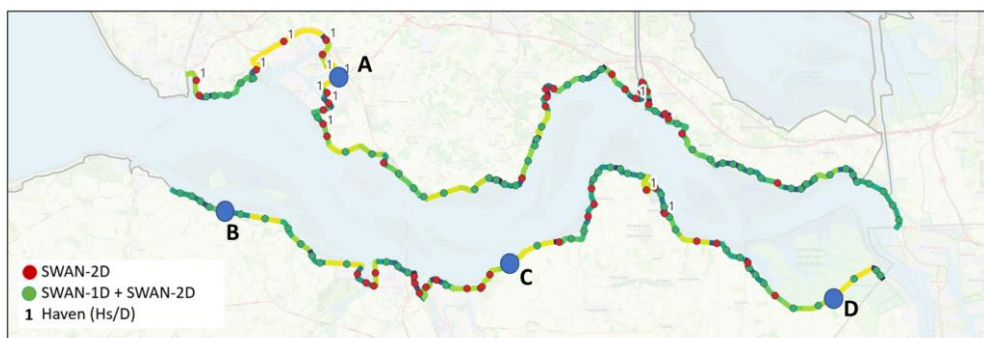
Tabel 8: Gemiddelde stijging in waterstand bij norm voor tijdlijn Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdlijn Laag.

Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging waterstand bij de norm langs Westerschelde t.o.v. tijdlijn Laag					
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag		Zeer Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	WS	ZSS	WS	ZSS	WS
2023	-	-	-	-	-	-
2050	-	-	-	-	+25 cm	+25 cm
2100	+25 cm	+25 cm	+50 cm	+50 cm	+150 cm	+150 cm
2150	+56 cm	+56 cm	+105 cm	+105 cm	+275 cm	+275 cm
2200	+100 cm	+100 cm	+200 cm	+200 cm	+440 cm	+440 cm

4.3.2 Hydraulisch Belastingniveau

Frequentielijnen

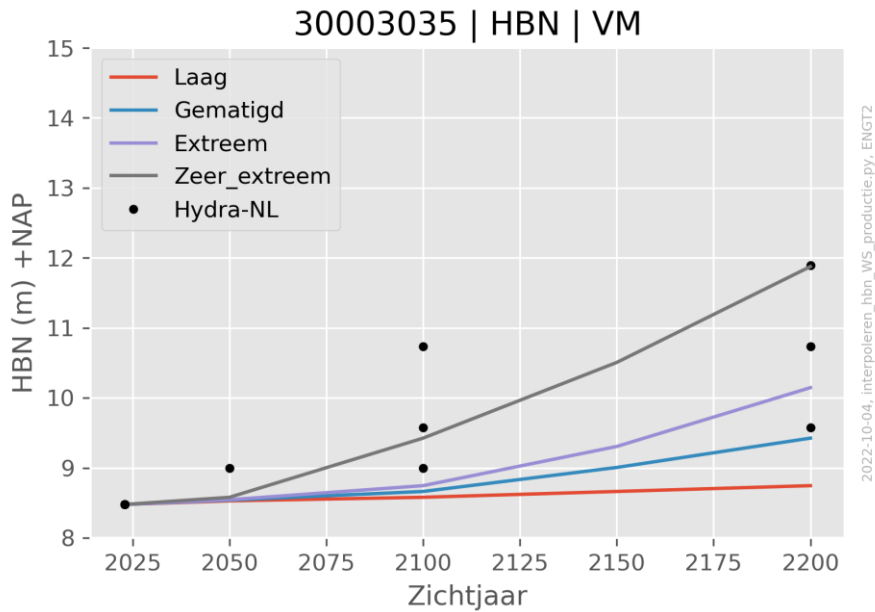
Voor de vier tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem zijn frequentielijnen voor het HBN gemaakt. Een voorbeeld voor Sloehaven Vlissingen (locatie A), Hoofdplaat (locatie B), Griete (locatie C) en Saeftinghe (locatie D) is te zien in Figuur 22 t/m Figuur 25. De locatienummering A t/m D is weergegeven in Figuur 21. De locaties zijn representatief voor de ruimtelijke variatie in het gebied en het type voorland correctie dat is toegepast (haven (A), SWAN1D (B,D) en SWAN2D (C)).



Figuur 21: Overzicht locaties Vlissingen (locatie A), Hoofdplaat (locatie B), Griete (locatie C) en Saeftinghe (locatie D).

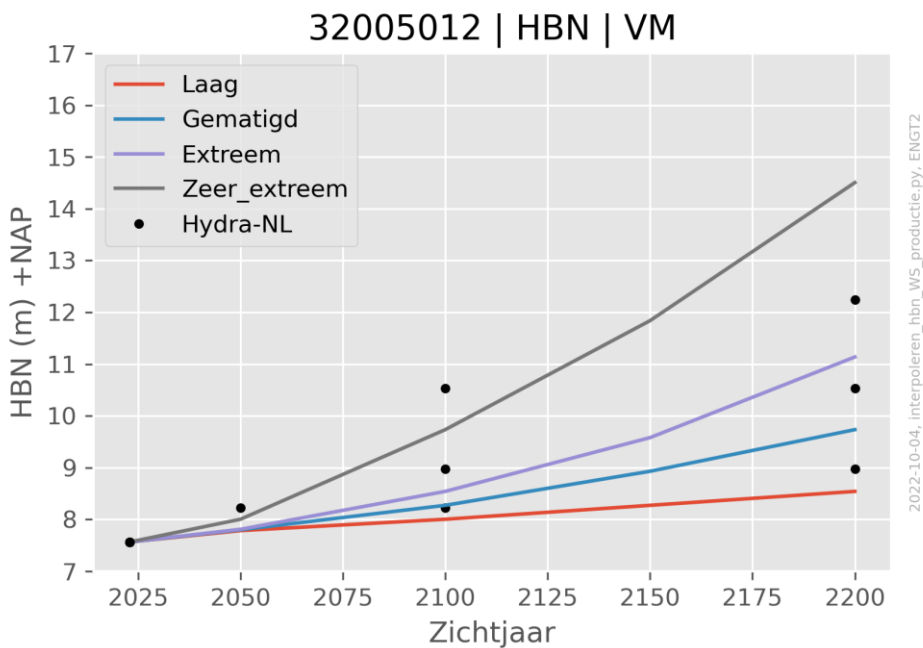
In de frequentielijnen in Figuur 22 t/m Figuur 25 zijn ter illustratie de Hydra-NL resultaten met zwarte punten weergegeven (gelijk aan bodemscenario Niet meegroeien). In Figuur 22 t/m Figuur 25 is te zien is dat de waterstanden oplopen binnen een tijdlijn voor een hoger zichtjaar, en in het geval van een extremere tijdlijn.

Voor Vlissingen Sloehaven, Figuur 22, is te zien dat het ophogen van de haventerreinen een groot effect heeft op het HBN en dat het HBN stijgt van NAP+8,5 m naar bijna NAP+12 m in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem.



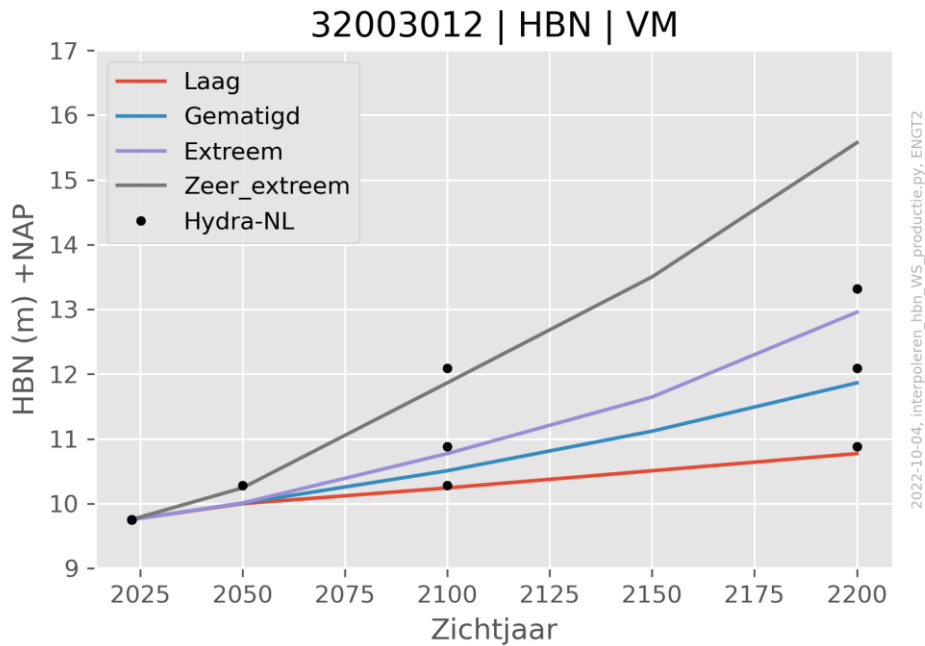
Figuur 22: HBN lijnen Vlissingen Sloehaven (havens $H_s/D < 0,5$) voor het bodemscenario Volledig Meegroeien.

Voor Hoofdplaat, Figuur 23, stijgt het HBN van NAP+7,5 m in 2023 naar NAP+14,5 m in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem (5,4 m ZSS). Dat is ondanks het meegroeien van de bodem.



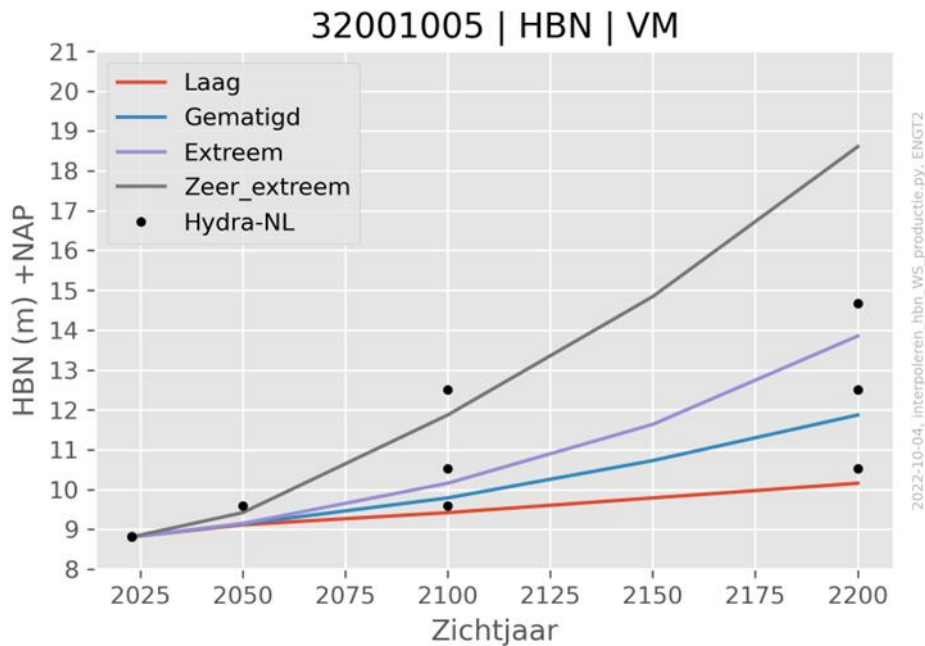
Figuur 23: HBN lijnen Hoofdplaat (SWAN1D) voor het bodemscenario Volledig Meegroeien.

Voor Griete (vak 32003013), Figuur 24, stijgt het HBN van NAP+9,7 m naar NAP+15,8 m in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem. Het verschil van de meegroeïende bodem is ongeveer 1,1 m ten opzichte van een niet meegroeïende bodem (zie paragraaf 7.5).



Figuur 24: HBN lijnen Griete (SWAN2D) voor het bodemscenario Volledig Meegroeien.

Voor Saeftinghe¹³, Figuur 25, stijgt het HBN van NAP+8,8 m naar NAP+18,6m in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem.



Figuur 25: HBN lijnen Saeftinghe (SWAN1D) voor het bodemscenario Volledig Meegroeien.

¹³ Dit punt ligt niet op het traject binnen de versterking Hedwige-Prosperpolder.

4.4 Samenvatting

Tabel 9 toont de gemiddelde stijging van het HBN van alle uitvoerlocaties ten opzichte van tijdlijn Laag voor de voorkeursstrategie voor het bodemscenario Volledig Meegroeien (VM). Opvallend is dat het HBN bij Volledig Meegroeien iets groter is dan de zeespiegelstijging. Theoretisch zouden die gelijk moeten zijn. Reden dat het HBN tussen 12% en 20% toeneemt is dat het HBN is bepaald ten opzichte van het bodemscenario Niet Meegroeien. Vervolgens moet het exacte HBN voor het bodemscenario Volledig Meegroeien worden verkregen door een relatief grote negatieve correctie ($dHBN < 0$) die met SWAN wordt bepaald. Logischerwijs is dan de uitkomst wat minder nauwkeurig dan bij een kleine correctie bij het bodemscenario Voortzetting Trend (VT) of helemaal geen correctie bij het bodemscenario Niet Meegroeien (NM). Het verschil kan verklaard worden doordat voor Niet Meegroeien de resultaten van Hydra-NL zijn gebruikt, waarbij een veel grotere database van golfcondities en waterstanden wordt meegenomen en dat de berekening van HBN's in Hydra-NL net iets anders gaat dan volgens de TAW methodiek [TAW, 2002]. In Deltares (2022b) is aangegeven dat met de illustratiepuntenmethode een foutenmarge van 30% moet worden geaccepteerd. Daar blijven we hier ruim binnen. Uitgebreider is de onnauwkeurigheid van de illustratiepuntenmethode onderzocht in Rijkswaterstaat (2023a). Hieruit komt naar voren dat de lokale verschillen groot kunnen zijn, maar globaal de resultaten binnen de marge liggen. Daarom zijn de HBN's voor het bodemscenario Volledig Meegroeien wel gebruikt voor het bepalen van de waterveiligheidsopgave. In paragraaf 8.6 wordt invloed van deze onzekerheid op de waterveiligheidsopgave beschreven.

Tabel 9: Gemiddelde stijging in waterstand en HBN in de Westerschelde voor tijdlijn Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdlijn Laag voor bodemscenario Volledig Meegroeien.

Zichtjaar	Gemiddelde stijging waterstand en HBN langs Westerschelde t.o.v. tijdlijn Laag voor bodemscenario Volledig Meegroeien					
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag		Zeer Extreem t.o.v. Laag	
	Waterstand (ZSS)	HBN	Waterstand (ZSS)	HBN	Waterstand (ZSS)	HBN
2023	-	-	-	-	-	-
2050	-	+1 cm	-	+2 cm	+25 cm	+25 cm
2100	+25 cm	+28 cm	+50 cm	+57 cm	+150 cm	+172 cm
2150	+56 cm	+65 cm	+105 cm	+123 cm	+275 cm	+327 cm
2200	+100 cm	+116 cm	+200 cm	+237 cm	+437 cm	+530 cm

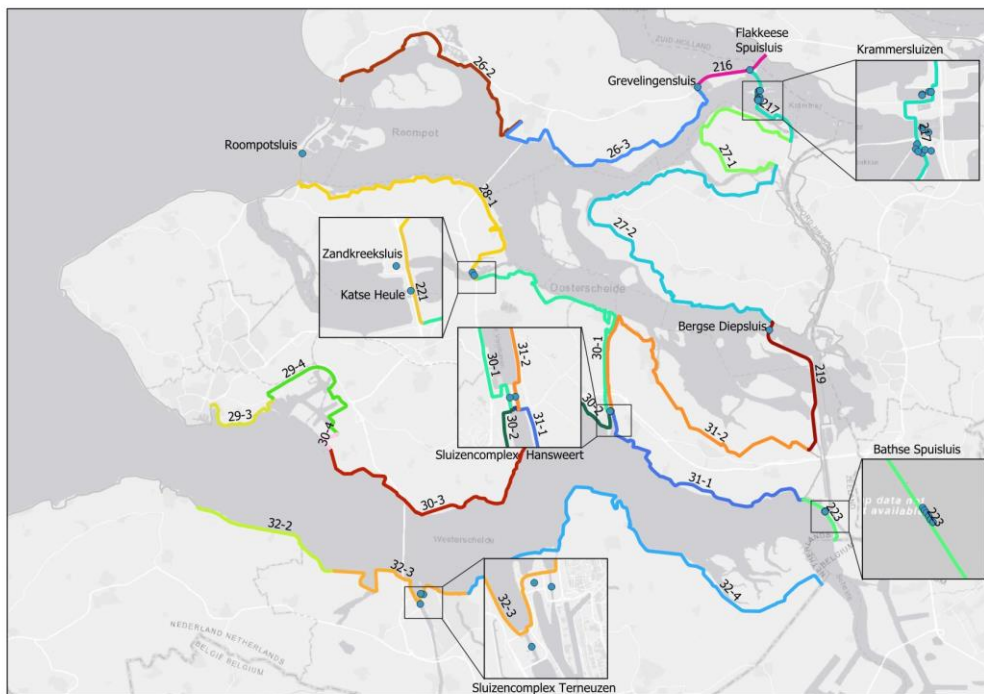
5 Waterveiligheidsopgave kunstwerken

5.1 Doel

Het doel van dit hoofdstuk is het bepalen waterveiligheidsopgave en versterkingsopgave voor de kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkering binnen de Zuidwestelijke Delta. Paragraaf 6.3.1. van de Notitie generieke werkwijze beschrijft welke criteria zijn gebruikt om de selectie van relevante kunstwerken uit de database Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls te verkrijgen. De volgende criteria zijn gehanteerd:

- Het object is opgenomen in de GPO database [Rijkswaterstaat GPO, 2019];
- Het object ligt in het Hoofdwatersysteem (HWS);
- Het object ligt in een primaire kering;
- Het object vormt een onderbreking van de primaire waterkering, maar het object is geen onderdoorgang;
- Het object wordt op functie beschouwd, wanneer deze functie voor waterveiligheid is.

Figuur 26 toont een overzicht van de beschouwde kunstwerken binnen de Zuidwestelijke Delta.



Figuur 26: Overzicht beschouwde kunstwerken (blauwe bolletjes) binnen Zuidwestelijke Delta.

De objecten binnen deze selectie zijn in drie categorieën opgedeeld:

1. Kunstwerken waarvan alleen de hoogte wordt beschouwd;
2. Kunstwerken waar hoogte én overige functies worden beschouwd;
3. Stormvloedkeringen.

Kunstwerken bestaan vaak uit meerdere objecten. Een voorbeeld hiervan is het Sluizencomplex bij Hansweert. Deze bestaat uit de Oostelijke sluis en de Westelijke sluis. Beide objecten worden in de analyse separaat beschouwd. In onderstaande tabel wordt alleen het kunstwerk Sluizencomplex Hansweert genoemd en niet bijbehorende objecten. Dit resulteert in onderstaande verdeling van de kunstwerken over drie categorieën, zie Tabel 10.

Tabel 10: Beschouwde kunstwerken binnen de Zuidwestelijke Delta per categorie.

Categorie 1 Kunstwerken alleen op hoogte (in totaal objecten, hier enkel de namen van de complexen benoemd)	Categorie 2 Kunstwerken waar ook andere functies worden beoordeeld (hier enkel de namen van de complexen benoemd)	Categorie 3 Stormvloedkeringen*
Roompotsluis	Bathse spuisluis	
Grevelingensluis		
Krammersluizen		
Flakkeese spuisluis		
Zandkreeksluis		
Katse Heule		
Sluizencomplex Hansweert		
Bergse Diepsluis		
Sluizencomplex Terneuzen		

* De Oosterscheldekering is onderdeel van de Zuidwestelijke Delta, maar wordt niet functioneel-technisch beschouwd in de voorliggende studie. De Oosterscheldekering is een complex kunstwerk, dat niet op eenvoudige wijze te beschouwen is. Daarnaast volgt de komende jaren een uitgebreide studie van RWS Zee en Delta naar de effecten van zeespiegelstijging op de Oosterscheldekering worden beschouwd. Deze resultaten worden op een later moment toegevoegd aan het KP ZSS.

5.2 Methode

In deze paragraaf wordt de gehanteerde methode nader toegelicht en worden de uitgangspunten en aannames opgesomd.

Voor de categorie 1 kunstwerken zijn twee typen werkzaamheden te onderscheiden:

- Bepalen van het kruinhoogtetekort;
- Maken van een kostenschätzung voor de benodigde versterking.

Voor de categorie 2 kunstwerken (Bathse Spuisluis) dienen daarnaast ook de overige functies (waterafvoer) beoordeeld te worden.

5.2.1 Categorie 1. Methodiek beoordelen hoogtetekort en kosten van versterkings- en vervangingsopgave

Bepalen kruinhoogtetekort

Tussen 2023 en 2200 is per zichtjaar het kruinhoogtetekort ten opzichte van de huidige kerende hoogte van het object bepaald. Voor de zichtjaren 2023, 2050, 2100, 2150 en 2200 is de waterstand aangeleverd.

Het hoogtetekort is via een vereenvoudigde methode beoordeeld door de kerende hoogte van het object te vergelijken met de waterstand bij de overschrijdingskans bij een doorsnede van het kunstwerk.¹⁴ Een beoordeling van de kerende hoogte van

¹⁴ Dit is de doorsnede-eis bij de norm (ondergrens) per kunstwerk voor een betreffend faalmechanisme.

het kunstwerk op basis van het HBN voor golfoverslag leidt bij 10 l/s/m tot zeer grote (onrealistische) kruinhoogtetekorten.¹⁵

De kerende hoogte van het object volgt uit de database - Natte kunstwerken (toegeleverd document "Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls"). De gegevens in deze database komen uit project VONK en hebben soms een onnauwkeurigheid in zich. Het exacte moment van het ontstaan van het hoogtetekort dient daarom niet absoluut geïnterpreteerd te worden in deze studie.

De waterstand is afhankelijk van het beschouwde zeespiegelscenario en volgt uit hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4. De eis voor de overschrijdingskans bij de doorsnede is als volgt bepaald:

$$P_{eis;dsn} = \frac{\omega P_{eis}}{D_{dsn}}$$

Waarin:

$P_{eis;dsn}$	Faalkanseis per doorsnede of kunstwerk [1/ jaar].
P_{eis}	Norm van het dijktraject [1/jaar].
ω	Faalkansruimtefactor voor het betreffende toetspooor [-].
N_{dsn}	Lengte-effectfactor voor een doorsnede of kunstwerk [-].

De norm, faalkansruimtefactor en lengte-effectfactor volgen per object uit Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen [Rijkswaterstaat, 2015]. Voor de objecten zijn dezelfde parameters gehanteerd als voor het betreffende dijktraject waar het object in ligt, zoals aangegeven in paragraaf 17.2 van Bijlage III Sterkte en Veiligheid [Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017].

De kerende hoogte wordt vergeleken met de waterstand bij doorsnede-eis. Wanneer een hoogtetekort ontstaat bij een object dient het object aangepast of vervangen te worden. Daarnaast dient bij einde levensduur het object vervangen te worden. Na vervanging heeft het object een levensduur van 100 jaar.

Kostenschatting

In de versterkings- en vervangingsopgave wordt beschouwd wanneer objecten aangepast of vervangen dienen te worden en wat de bijbehorende kosten van deze maatregelen zijn. Er worden twee strategieën vergeleken:

1. Strategie 1) Bij een hoogtetekort wordt het object aangepast, zodat deze voldoet tot einde levensduur. Bij einde levensduur wordt deze vervangen.
2. Strategie 2) Bij een hoogtetekort wordt het object direct vervangen. Bij vervanging wordt de kerende hoogte verhoogd, zodat deze weer voldoet voor een periode van 100 jaar.

De strategie welke in het jaar 2200 resulteert in de laagste nominale cumulatieve kosten minus de restwaarde, heeft de voorkeur. Deze wordt gepresenteerd in paragraaf 5.3 van deze rapportage. De gehanteerde versterkingsstrategie is per object gepresenteerd in Bijlage A.

Het maken van de kostenschatting bestaat uit drie stappen.

- Bepalen van de nominale kosten voor beide strategieën;
- Bepalen van de nominale kosten met correctie voor restwaarde, ook voor beide strategieën;
- Bepalen versterkings- en vervangingsstrategie met de laagste kosten.

Bij het bepalen van de kosten wordt onderscheid gemaakt in de kosten voor aanpassing en de kosten voor vervanging. De kosten voor vervanging zijn onafhankelijk verondersteld van het hoogtetekort. De vervangingskosten van de

¹⁵ Een beoordeling op basis van de komberegingbenadering valt buiten de scope van deze beleidsstudie. Daarom zijn de in deze studie berekende hoogtetekorten voor kunstwerken mogelijk conservatief.

objecten volgen uit de database Natte Kunstwerken. Voor de vervangingskosten is het prijspeil van 2022 gehanteerd. Het prijspeil voor 2022 volgt uit de GWW prijsindices van het CBS (2022).

Indien voor een object de vervangingskosten niet opgenomen zijn in de database, zijn de kosten bepaald op basis van het KostenType. De vervangingskosten zijn per KostenType opgenomen in Kostencurves Kunstwerken KOSWAT [Rijkswaterstaat GPO, 2019]. Indien het KostenType onbekend is van een object, is een vergelijkbaar Kostentype aangenomen als voor de overige objecten binnen het kunstwerk. Indien van alle objecten het KostenType niet opgenomen is, hanteren we het KostenType op basis van de vervangingskosten.

De kosten voor aanpassing zijn kleiner of gelijk aan de kosten voor vervanging. De kosten voor aanpassing zijn afhankelijk van het kruinhoogtetekort en het type object. Het percentage van de vervangingskosten volgt uit Kostencurves Kunstwerken KOSWAT [Rijkswaterstaat GPO, 2019].

De resultaten zijn gepresenteerd in paragraaf 5.3 voor de zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 voor de verschillende tijdlijnen. Hier worden de nominale kosten tot het betreffende zichtjaar ten opzichte van de huidige situatie gepresenteerd én de nominale kosten minus de restwaarde van het kunstwerk tot het betreffende zichtjaar. In hoofdstuk 8 worden ook de kosten ten opzichte van "systeem op orde" gepresenteerd. Een toelichting hierop wordt gegeven in paragraaf 6.2 onder Figuur 32.

Voor het bepalen van de restwaarde wordt dezelfde vergelijking toegepast als in paragraaf 6.2. Enige afwijking hierop is de periode waarover wordt afgeschreven. Deze periode bedraagt geen 50 jaar zoals bij dijken, maar is afhankelijk van het vervangingsmoment. De restwaarde wordt bepaald door de versterkingskosten of de vervangingskosten lineair af te schrijven tot aan het volgende vervangingsmoment. Een object wordt versterkt waarna de kruinhoogte weer voldoet tot einde levensduur. Wanneer een object wordt vervangen heeft deze weer een levensduur van 100 jaar.

5.2.2 Categorie 2. Methodiek beoordelen hoogtetekort, overige functies en kosten van versterkings- en vervangingsopgave

Het hoogtetekort en de kosten voor de versterkingsopgave worden op gelijke wijze afgeleid voor categorie 2 kunstwerken als voor de categorie 1 kunstwerken, zie paragraaf 5.2.1.

Aanvullend worden voor categorie 2 kunstwerken ook overige functies beoordeeld. Voor de Zuidwestelijke Delta betreft dit enkel de Bathse Spuisluis. Voor de Bathse Spuisluis wordt de functie waterafvoer (spuien onder vrij verval) beschouwd. Wanneer het niet meer mogelijk is om voldoende water af te voeren door middel van spuien onder vrij verval dienen pompen geïnstalleerd te worden. De benodigde pompcapaciteit en kosten voor het installeren van de pompen, het pompen en het onderhoud gedurende de levensduur van de pompen worden bepaald. De pompcapaciteit en de kosten voor de scenario's waarin gepompt wordt zijn bepaald met het spreadsheetmodel KOWIJS met de uitgangspunten uit ISWP-studie-fase I [Rijkswaterstaat WVL, 2015].

5.2.3 Categorie 3. Methodiek beoordelen stormvloedkeringen en kosten van versterkings- en vervangingsopgave

De Oosterscheldekering ligt binnen de Zuidwestelijke Delta, maar wordt niet functioneel-technisch beschouwd in deze rapportage. De methodiek voor stormvloedkeringen wordt daarom niet nader toegelicht.

5.2.4 Overige uitgangspunten en aannames

Voor de berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd. Tevens zijn er diverse aannames gedaan wanneer onvoldoende informatie beschikbaar is. Deze zijn hieronder opgesomd.

Kruinhoogtetekort

- Voor het beoordelen van het hoogtetekort van de kunstwerken is uitgegaan van de waterstand bij de ondergrensnorm op doorsnedeniveau. Dit betekent dat het HBN voor golfoverslag niet is beschouwd, omdat dit tot onrealistisch hoge hoogteopgaves leidt. Doordat golfoverslag niet wordt beschouwd, is ook de invloed van de bodemscenario's niet meegenomen. In deze studie is verondersteld dat het bodemscenario geen invloed heeft op de optredende waterstand.
- De kerende hoogte is overgenomen uit de database van het project VONK. De gegevens in deze database hebben soms een onnauwkeurigheid in zich. De veronderstelde kerende hoogte kan daardoor enigszins afwijken van de werkelijke kerende hoogte in de huidige situatie, zoals ook als uitgangspunt in LBO 1 is gehanteerd.
- Wanneer de kerende hoogte van één specifiek object niet is opgenomen in de database - Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls wordt de kerende hoogte van andere objecten binnen het kunstwerk voor het object gehanteerd. Als de kerende hoogte van andere objecten binnen het kunstwerk ook niet bekend is, dan wordt de kerende hoogte gelijkgesteld aan het waterstandsniveau in 2050 bij de tijdlijn Laag.

Versterking- en vervangingskosten

- Indien einde levensduur van het object niet opgenomen is in de database - Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls is, wordt de restlevensduur van een ander object binnen het kunstwerk overgenomen. Wanneer van het gehele kunstwerk de levensduur niet opgenomen is in database - Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls, wordt aangenomen dat einde levensduur in zichtjaar 2050 ligt.

Waterafvoer

Voor de beoordeling van de Bathse Spuisluis op de functie waterafvoer zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd en aannames gedaan:

- Gemiddeld benodigd afvoervolume bepaald op basis van neerslag en afvoervolume uit Model DEVO Eindrapport [Rijkswaterstaat Zee en Delta et al., 2016]
- Toekomstige toename van waterafvoer gebaseerd op ISWP-studie-fase I [Rijkswaterstaat WVL, 2015]: neerslag: +10% (2050), +15% (2100) en +20% (2150) en voor de afvoer +6,25% (2050), +12,5% (2100) en +20% (2150).
- Peiloverschrijding op Volkerak-Zoommeer wanneer de waterstand hoger dan NAP+0,50m is of bij een waterstand bij NAP+0,15m in combinatie met een peil van NAP+1,70 m bij het meetpunt Trambrug in Breda, zie Waterakkoord Volkerak-Zoommeer [Rijkswaterstaat Zee en Delta et al., 2016]. De maatgevende waterstand voor waterafvoer door middel van pompen is de situatie waarbij de maximale waterstand op het Volkerak-Zoommeer (NAP+0,5m) dreigt te worden overschreden.
- Vergelijking voor spuidebiet van Bathse Spuisluis bij verschillende buitenwaterstanden volgt uit paragraaf 4.2 van Model DEVO eindrapport [Rijkswaterstaat Zee en Delta et al., 2016].
- Buitenwaterstand is combinatie van gemiddeld getij + buitenwaterstand (slotgemiddelde) + zeespiegelstijging.
- Vergelijken van het maximale afvoervolume met het benodigde afvoervolume bepaalt het moment dat alleen spuien onvoldoende is en gepompt moet worden.
- De kosten voor pompen worden bepaald met de getallen genoemd in ISWP-studie-fase I [Rijkswaterstaat WVL, 2015] in het programma KOWIJS. Hierbij

wordt aangenomen dat de pompen slechts op 80% van de maximale capaciteit pompen. Daarnaast wordt uitgegaan dat een totale benodigde pompcapaciteit van 100 m³/s bestaat uit 10 pompen met een capaciteit van 10 m³/s. De kosten voor deze pompen bedragen 11 miljoen per stuk.

- Voor beheer en onderhoud bedragen de kosten jaarlijks 2% van de investeringskosten. Voor de kosten voor vervanging van de civiele onderdelen bedragen 60% van de investeringskosten per 100 jaar, de kosten van werktuigbouwkundige onderdelen bedragen 30% van de investeringskosten per 80 jaar en de kosten voor I/A en E (industriële automatisering + elektra) bedragen 10% van de investeringskosten per 30 jaar. Deze verdeling van kosten is ook gehanteerd in ISWP-studie-fase I [Rijkswaterstaat WVL, 2015] in het spreadsheetmodel KOWIJS.
- De kosten voor beheer en onderhoud en vervanging worden uitgedrukt als percentage van de investeringskosten van de pompen. De kosten voor energie zijn afhankelijk van de opvoerhoogte.
- De opvoerhoogte voor pompen is geschematiseerd als het verschil tussen het maximale peil op het Volkerak-Zoommeer waarbij nog geen wateroverlast optreedt en de gemiddelde buitenwaterstand bij de Bathse Spuisluis over het getij.

5.3 Resultaten

Voor de kunstwerken in de Ooster- en Westerschelde en Noordzee is het hoogtetekort beoordeeld en is de versterkings- en vervangingsopgave met de laagste kosten bepaald. De volgende kunstwerken binnen de Oosterschelde worden beschouwd:

- Grevelingensluis
- Krammersluis
- Flakkeese spuisluis
- Zandkreeksdam
- Bergsediepsluis

De volgende kunstwerken binnen de Westerschelde en Noordzee worden beschouwd:

- Sluizencomplex Hansweert
- Sluizencomplex Terneuzen
- Bathse Spuisluis
- Roompotsluis

Voor de bepaling van de opgave van de kunstwerken is uitgegaan van globale kenmerken, die kunnen afwijken van de gedetailleerdere gegevens die beschikbaar zijn uit de eerste ronde van de Landelijke Beoordeling (LBO1).

5.3.1 Oosterschelde

Kruinhoogtetekort

Het kruinhoogtetekort ten opzichte van de huidige kerende hoogte zijn per zichtjaar bepaald, gegeven een tijdlijn. Het kruinhoogtetekort is bepaald zoals beschreven in paragraaf 5.2. Opgemerkt dient te worden dat uit de meest recente beoordeling volgt dat geen van de onderstaande kunstwerken een kruinhoogtetekort heeft. Het verschil tussen de recent uitgevoerde beoordeling (LBO1) en de resultaten in onderstaande tabel komt door de gehanteerde aanpak. Dat betekent dat in deze beleidsstudie uitgegaan is van globale kenmerken van een kunstwerk, geen rekening is gehouden met de kombergingsbenadering en rekening is gehouden met een bepaald niveau van zeespiegelstijging (25 – 50 cm tot zichtjaar 2050). In LBO1 is een nauwkeurigere inschatting van de aanwezige kerende hoogte gehanteerd, wel rekening gehouden met de kombergingsbenadering en niet gerekend met zeespiegelstijging.

Tabel 11: Kruinhoogtetekort per object in de Oosterschelde t.o.v. huidige kerende hoogte, per zichtjaar en tijdlijn.

Naam kunstwerk	Laag				Gematigd				Extreem			
	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200
Grevelingensluis	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	1,0	0,0	0,1	0,8	2,0
Krammersluizen*	0,1	0,3	0,4	0,6	0,1	0,4	1,0	1,8	0,1	0,6	1,5	2,9
Flakkeese spuisluis	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	1,0	0,0	0,1	0,8	2,0
Zandkreeksluis	0,0	0,1	0,3	0,5	0,0	0,3	0,9	1,6	0,0	0,5	1,4	2,7
Katse Heule	0,0	0,1	0,3	0,5	0,0	0,3	0,9	1,6	0,0	0,5	1,4	2,7
Bergsediepsluis	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,2	0,7	1,5	0,0	0,4	1,3	2,6

* Dit betreft de individuele kunstwerken: Jachtensluis noord Duwvaartsluis noord 1^e, Duwvaartsluis zuid 2^e, Jachtensluis zuid (2), Gemaal duwvaartsluizen, Gemaal jachtensluis, Inlaatwerk Hoogbekken, Doorlaatwerk kanaal Slaak, Uitlaatwerk Laagbekken, Hoogbekken, Uitlaatwerk gemaal Slaak, Doorlaatwerk Jachtensluis

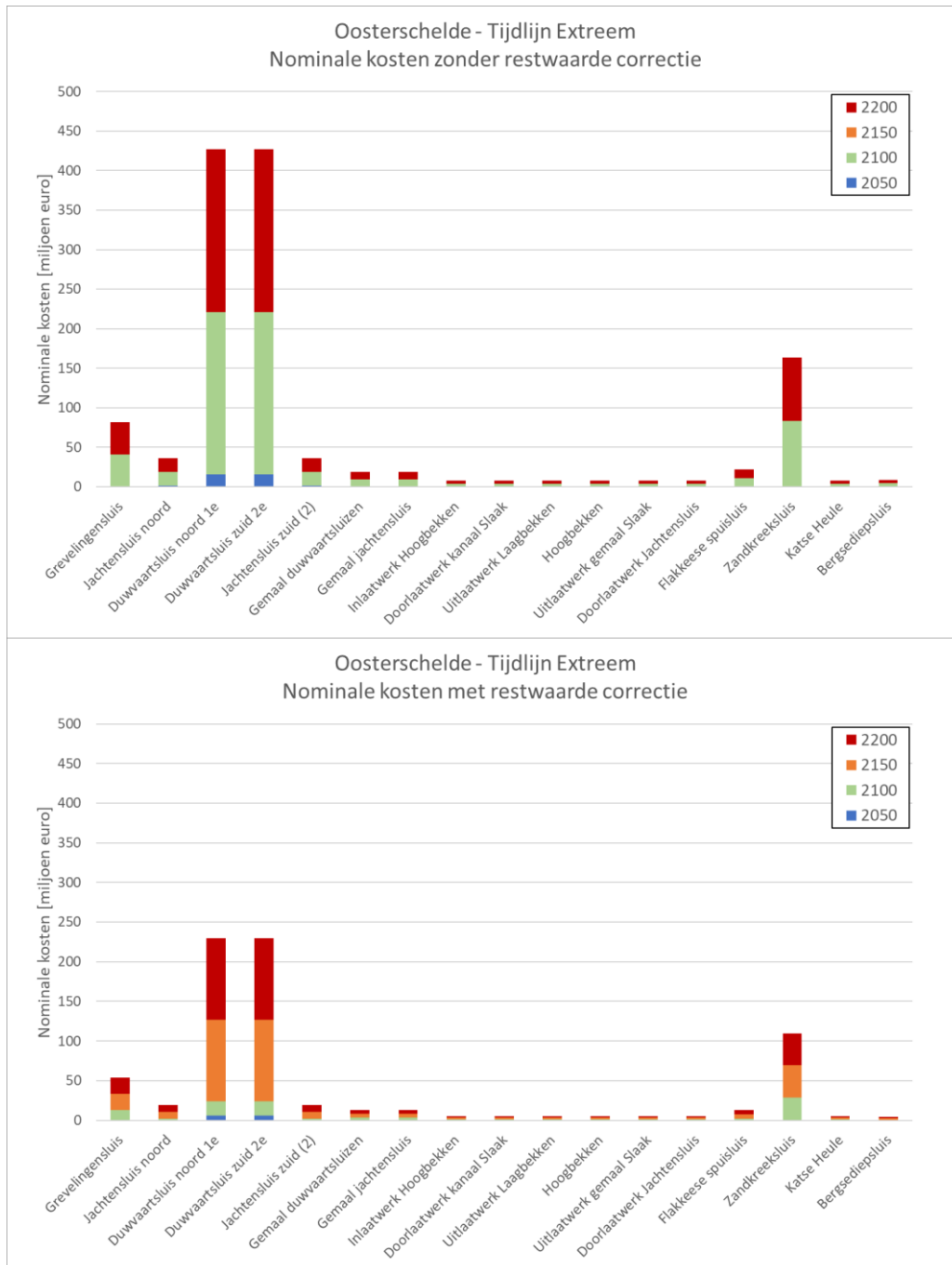
Totale kosten kunstwerken

De totale kosten van de objecten in de Oosterschelde is per tijdlijn en per zichtjaar gepresenteerd in Tabel 12. De kolom "nominale kosten" toont de nominale kosten welke gemaakt worden tot en met het betreffende zichtjaar. In de kolom "nominale kosten met correctie restwaarde" worden de nominale kosten in het betreffende zichtjaar gepresenteerd. De nominale kosten worden gecorrigeerd met de restwaarde van het object in dat zichtjaar. Hieruit kunnen de kosten per aantal meter zeespiegelstijging worden afgeleid.

Tabel 12: Cumulatieve nominale kosten kunstwerken tot en met een bepaald zichtjaar (kolom "Nominale kosten") en de cumulatieve nominale kosten kunstwerken in een bepaald zichtjaar waarbij is gecorrigeerd voor de restwaarde (kolom "Met correctie"), per tijdlijn voor de Oosterschelde.

Zichtjaar	Nominale kosten [mln. euro]. Met en zonder correctie restwaarde					
	Laag		Gematigd		Extreem	
	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie
2050	21	9	29	12	38	15
2100	106	94	122	105	137	114
2150	419	407	435	417	450	427
2200	1045	720	1060	730	1075	740

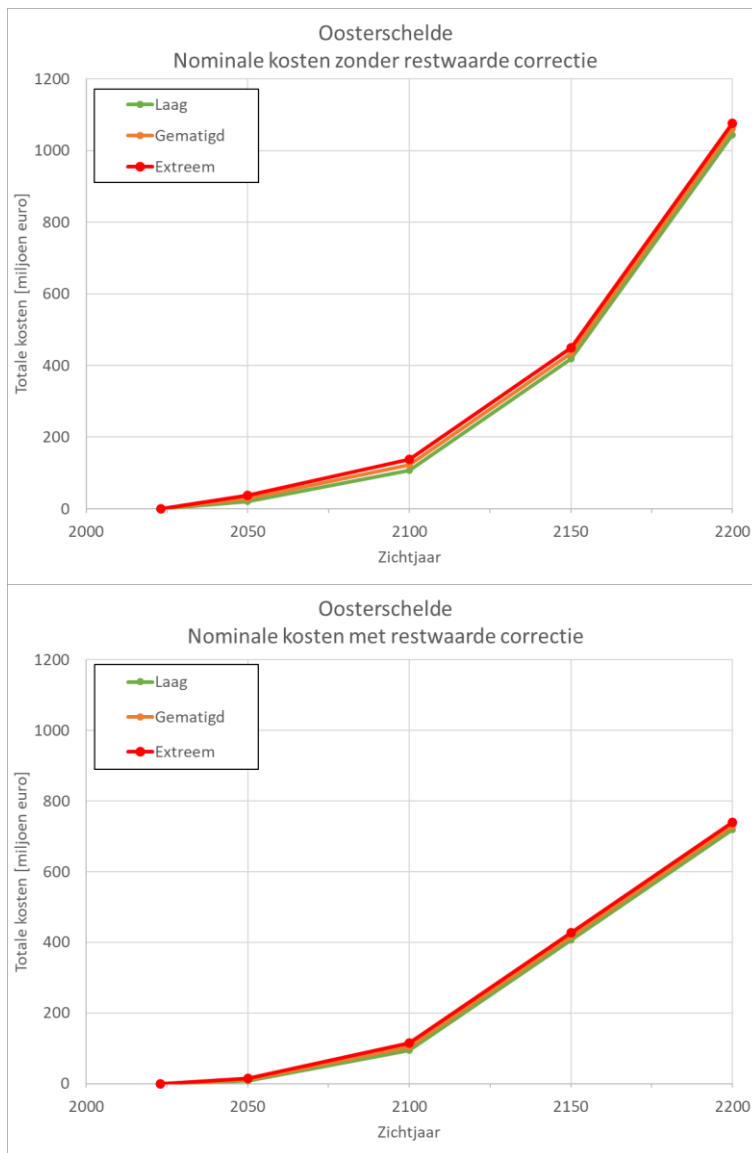
Uit Figuur 27 valt op dat de twee duwvaartsluizen bij de Krammersluizen een grote invloed hebben op de nominale kosten. Deze zijn samen goed voor ruwweg 80% van de kosten in de Oosterschelde.



Figuur 27: Cumulatieve nominale kosten voor tijdljn Extreem tot 2200 Oosterschelde: boven cumulatieve kosten inclusief restwaarde, onder cumulatieve kosten minus restwaarde.

Figuur 28 toont dat de kosten tussen de verschillende tijdlijnen dichtbij elkaar liggen. Dit komt doordat de vervangingskosten van kunstwerken onafhankelijk zijn verondersteld van het hoogtetekort. Alleen wanneer het kunstwerk versterkt wordt, heeft het kruinhoogtetekort invloed op de kosten. De totale kosten worden daardoor minder sterk beïnvloed door het aantal meter zeespiegelstijging, maar meer door het aantal vervangingen van de objecten.

Vanaf het jaar 2100 toont de onderste grafiek van Figuur 28 een lineair verloop. Dit komt doordat op dit moment bij alle kunstwerken einde levensduur is overschreden en de objecten zijn vervangen. Na vervanging heeft het kunstwerk weer een levensduur van 100 jaar. Door het corrigeren van de nominale kosten met de restwaarde ontstaat een lineair verloop.



Figuur 28: Cumulatieve nominale kosten tot 2200 Oosterschelde: boven cumulatieve kosten inclusief restwaarde, onder cumulatieve kosten minus restwaarde.

5.3.2 Westerschelde en Noordzee

Het kruinhoogtetekort ten opzichte van de huidige kerende hoogte is per zichtjaar bepaald, gegeven een tijdlijn. Het kruinhoogtetekort is bepaald zoals beschreven in paragraaf 5.2. Opgemerkt dient te worden dat uit de meest recente beoordeling volgt dat geen van de onderstaande kunstwerken een kruinhoogtetekort heeft. Het verschil tussen de recent uitgevoerde beoordeling (LBO1) en de resultaten in onderstaande tabel komt door de gehanteerde aanpak. In paragraaf 5.3.1 staan de belangrijkste verschillen tussen beide aanpakken toegelicht.

Tabel 13: Kruinhoogtetekort per object Westerschelde en Noordzee t.o.v. huidige kerende per zichtjaar en tijdlijn.

Naam kunstwerk	Laag				Gematigd				Extreem				Zeer Extreem			
	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200
Oostsluis**	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	1,1	0,0	0,1	0,9	2,1	0,0	1,1	2,6	4,5
Middensluis**	0,3	0,6	0,8	1,1	0,4	0,8	1,4	2,1	0,4	1,1	1,9	3,1	0,6	2,1	3,6	5,5
Westsluis**	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	1,1	0,0	0,1	0,9	2,1	0,0	1,1	2,6	4,5
Roompotsluis	1,0	1,3	1,5	1,8	1,0	1,5	2,1	2,8	1,0	1,8	2,6	3,8	1,3	2,8	4,3	6,2
Sluizencomplex Hansweert*	1,2	1,5	1,7	2,0	1,2	1,7	2,3	3,0	1,2	2,0	2,8	4,0	1,5	3,0	4,5	6,4
Bathse spuisluis 1 t/m 6	1,3	1,6	1,8	2,1	1,3	1,8	2,4	3,1	1,4	2,1	2,9	4,1	1,6	3,1	4,6	6,5

*) Sluizencomplex Hansweert bestaat uit Oostelijke sluis en Westelijk sluis.

***) Dit zijn objecten van Sluizencomplex Terneuzen. De Middensluis bij Terneuzen is recent verwijderd. Van de nieuwe Zeesluis is nog geen informatie beschikbaar. Daarom is in deze studie uitgegaan van de oude Middensluis.

Totale kosten kunstwerken

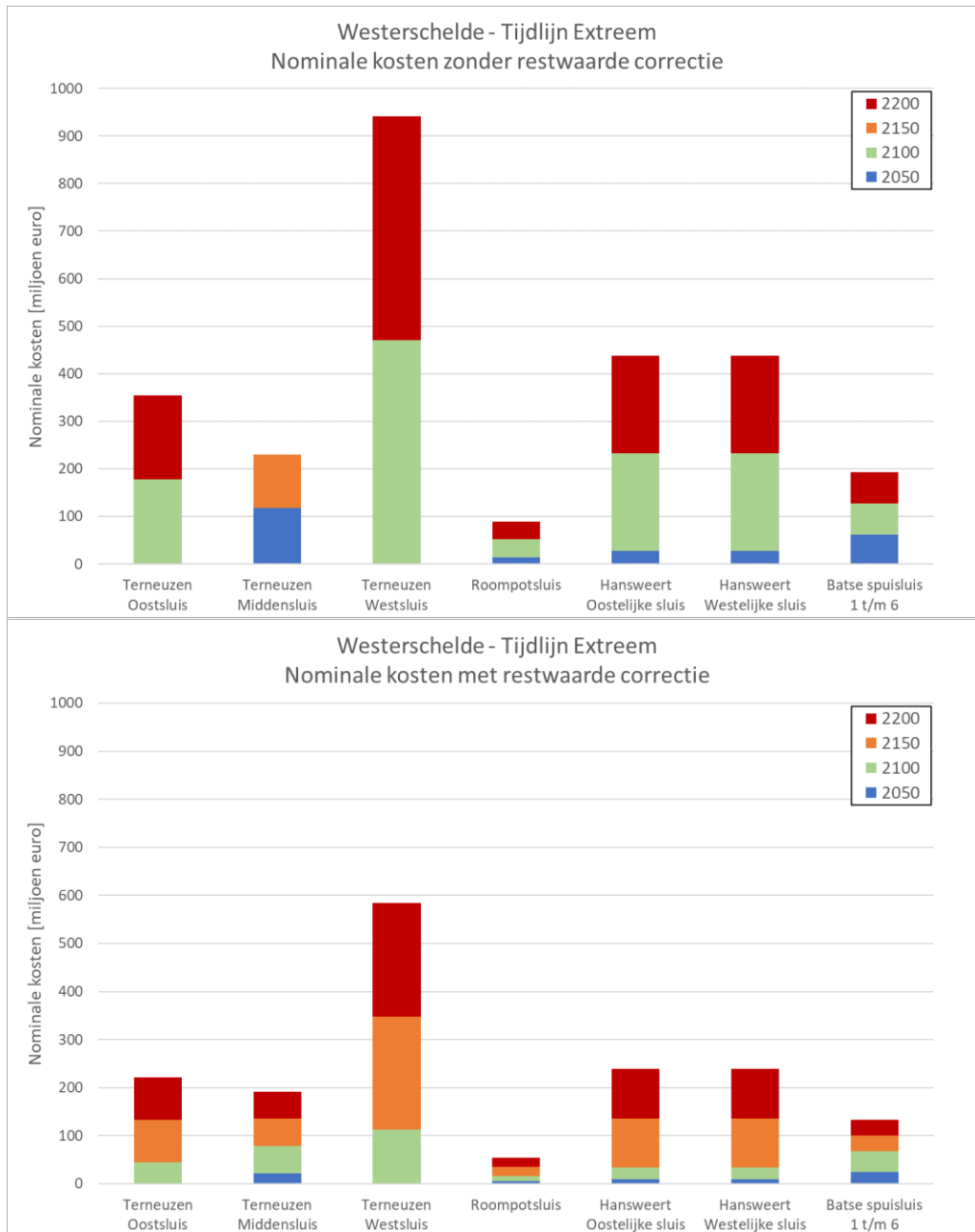
De totale kosten van de objecten in de Westerschelde en de Noordzee zijn per tijdlijn en per zichtjaar gepresenteerd in Tabel 14. De kolom "nominale kosten" toont de nominale kosten welke gemaakt worden tot en met het betreffende zichtjaar. In de kolom "nominale kosten met correctie restwaarde" worden de nominale kosten in het betreffende zichtjaar gepresenteerd. De nominale kosten worden gecorrigeerd met de restwaarde van het object in dat zichtjaar. Hieruit kunnen de kosten per aantal meter zeespiegelstijging worden afgeleid.

Tabel 14: Cumulatieve nominale kosten kunstwerken tot en met een bepaald zichtjaar (kolom "Nominale kosten") en de cumulatieve nominale kosten kunstwerken in een bepaald zichtjaar waarbij is gecorrigeerd voor de restwaarde (kolom "Met correctie"), per tijdlijn Westerschelde en Noordzee.

Zichtjaar	Nominale kosten [mln. euro]. Met en zonder correctie restwaarde							
	Laag		Gematigd		Extreem		Zeer Extreem	
	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie
2050	203	55	220	62	247	72	442	144
2100	492	344	512	354	563	388	909	610
2150	1131	982	1151	993	1202	1026	1547	1249
2200	2294	1621	2314	1631	2365	1665	2711	1888

* De kosten zijn gebaseerd op de Oude Middensluis bij Terneuzen. De Oude Middensluis is recent verwijderd. Op dit moment is de nieuwe Zeesluis in Terneuzen in aanbouw. Van dit object is geen informatie beschikbaar. De versterkings- en vervangingskosten voor de Zeesluis zijn daarom niet meegenomen in de totale kosten.

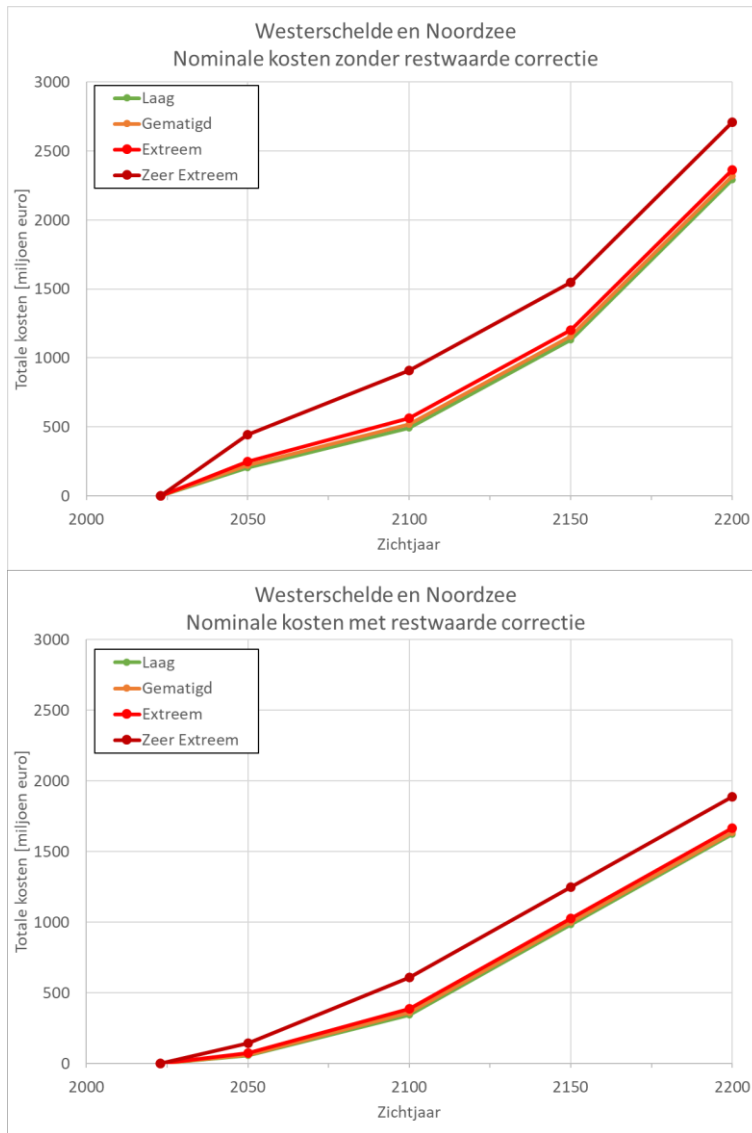
Uit de grafieken in Figuur 29 wordt duidelijk dat de kosten van het kunstwerk de Roompotsluis een relatief kleine bijdrage leveren aan de totale kosten van de Westerschelde en de Noordzee.



Figuur 29: Cumulatieve nominale kosten voor tijdljn Extreem tijdljn tot 2200 Westerschelde en Noordzee: boven cumulatieve kosten inclusief restwaarde, onder cumulatieve kosten minus restwaarde.

Figuur 30 toont dat de kosten tussen de tijdljnen Laag, Gematigd en Extreem dichtbij elkaar liggen. De kosten bij de tijdljn Zeer Extreem liggen hoger dan bij de overige tijdljnen. Dit komt met name doordat de kosten voor versterking van de Oostelijke en Westelijke sluis van Hansweert tot 2050 bij de tijdljn Zeer Extreem hoger zijn dan bij de overige tijdljnen.

Ook bij de kosten binnen de Westerschelde en de Noordzee toont de onderste grafiek in Figuur 30 een lineair verloop. Dit heeft dezelfde oorzaak als bij de kosten voor de Oosterschelde. Vanaf 2100 hebben alle kunstwerken einde levensduur overschreden en zijn de objecten vervangen. Door de nominale kosten te corrigeren voor de restwaarde ontstaat een lineair verloop.



Figuur 30: Cumulatieve nominale kosten tot 2200 Westerschelde: boven cumulatieve kosten inclusief restwaarde, onder cumulatieve kosten minus restwaarde.

Overige functies Bathse Spuisluis

Voor de Bathse Spuisluis wordt de waterafvoer onder dagelijkse omstandigheden beschouwd. Tijdens deze condities dient het maximale peil van NAP+0,5m op het Volkerak Zoommeer niet overschreden te worden. De ontwerpomstandigheden worden niet beschouwd, omdat het dan mogelijk is het Volkerak Zoommeer te legen op het Hollandsch Diep.

Het is tot circa 1,75 meter zeespiegelstijging is het mogelijk het peil op het Volkerak Zoommeer te handhaven door middel van spuien onder vrij verval. Wanneer de zeespiegelstijging hoger is, is het niet meer mogelijk om het benodigde afvoerdebit te behalen door middel van spuien en dienen pompen gerealiseerd te worden. Het afvoeren van water door middel van pompen resulteert in extra kosten. Deze kosten bestaan uit investeringen, beheer en onderhoud, vervanging en energiekosten. Om inzicht te krijgen in de pompkosten voor verschillende tijdlijnen en zichtjaren is het spreadsheetmodel KOWIJS gebruikt behorende bij ISWP-studie-fase I [Rijkswaterstaat WVL, 2015].

Dit resulteert in de volgende totale kosten (investering, beheer en onderhoud, vervanging en energiekosten), zie Tabel 15.

Tabel 15: Cumulatieve nominale kosten waterafvoer door middel van pompen per zichtjaar en tijdlijn.

Zichtjaar	Nominale kosten in mln. euro minus restwaarde			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	0	0	0	0
2100	0	0	0	345
2150	0	0	337	611
2200	0	348	599	999

5.4 Samenvatting

In deze paragraaf worden de kosten voor alle objecten in de Oosterschelde, Westerschelde en Noordzee opgesomd, met uitzondering van de Oosterscheldekering. Dit betreft de totale versterkings- en vervangingsopgave en daarnaast ook de kosten voor pompen bij de Bathse Spuisluis. Er dient gepompt te worden wanneer het afvoeren van water door middel van spuien onder vrij verval niet meer mogelijk is. Dit punt ligt rond circa 1,75 meter zeespiegelstijging.

Tabel 16: Cumulatieve nominale kosten (minus restwaarde) voor alle kunstwerken in de Oosterschelde en Westerschelde per zichtjaar en tijdlijn, exclusief de kosten voor de Oosterscheldekering en inclusief de kosten voor het pompen via de Bathse Spuisluis.

Zichtjaar	Nominale kosten per km in mln. euro minus restwaarde			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	64	73	87	144*
2100	438	459	502	956*
2150	1389	1410	1790	1860*
2200	2340	2709	3004	2887*

*Kosten voor tijdlijn Zeer Extreem zijn enkel bepaald voor de Westerschelde. De kosten voor de Oosterschelde zijn in tijdlijn Zeer Extreem dus geheel niet meegenomen in deze tabel.

De kosten voor de Oosterscheldekering zijn niet opgenomen Tabel 16. De Oosterscheldekering voldoet in de huidige situatie aan de gestelde eisen (ondergrensnorm), maar zal naar verwachting binnen 50 jaar niet meer hieraan voldoen. Daarom zijn de kosten in deze studie voor de Oosterscheldekering tot 2200 gezet op circa 9 miljard, bestaande uit één keer gedeeltelijk vervangen (circa 3 miljard euro) en één keer volledig vervangen (circa 6 miljard euro).

Uit de resultaten van de Oosterschelde, Westerschelde en Noordzee volgt dat de opgave voor de Westerschelde en Noordzee circa twee keer zo groot is als voor de Oosterschelde, als de Oosterscheldekering buiten beschouwing wordt gelaten. Een aantal objecten binnen de Zuidwestelijke Delta hebben een grote invloed op de totale versterkings- en vervangingskosten. Dit zijn:

- Twee duwvaartsluizen bij Krammersluizen
- Sluizencomplex Terneuzen
- Sluizencomplex Hansweert

Daarnaast vormen de kosten voor installatie, onderhoud en gebruik van de pompen bij de Bathse spuisluis een significant aandeel van de totale kosten van de Zuidwestelijke Delta bij de tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem. De toename in nominale kosten is beperkt tussen de verschillende tijdlijnen. Dit komt doordat in de vervangingskosten van objecten geen toename in kosten wordt meegenomen

wanneer een hogere kruinhoogte benodigd is. De verschillen tussen tijdlijnen worden voornamelijk veroorzaakt door de pompen bij de Bathse spuisluis.

6 Waterveiligheidsopgave dijken

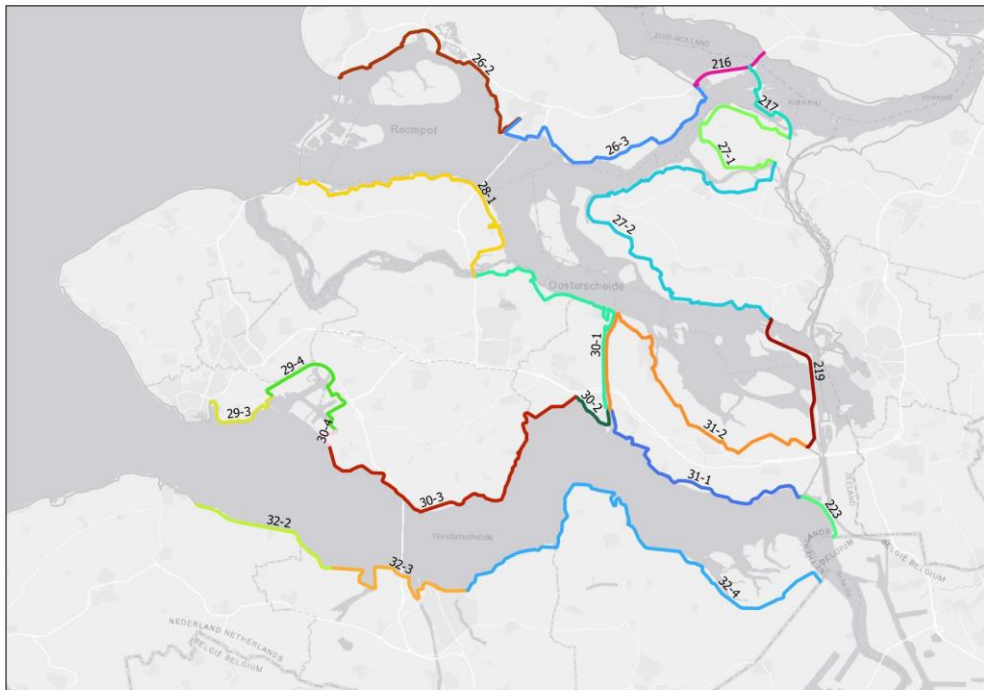
6.1 Doel

Het doel van dit hoofdstuk is het bepalen van de waterveiligheidsopgave en de versterkingsopgave van de dijken en dammen, waarbij met name de kosten en de ruimtelijke dimensies van deze versterkingen van belang zijn.

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.

Met de versterkingsopgave worden de (cumulatieve) kosten en het ruimtebeslag aangeduid van alle versterking die tót een bepaald zichtjaar worden berekend. 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.

Tot de scope behoren alle dijken en dammen langs de Oosterschelde achter de Oosterscheldekering en langs de Westerschelde ten oosten van lijn Vlissingen – Breskens die onderdeel zijn van de primaire waterkering. In Figuur 31 zijn deze dijkvakken weergegeven.



Figuur 31: Overzicht beschouwde dijken binnen Zuidwestelijke Delta.

Binnen dit hoofdstuk is uitgegaan van het bodemscenario Volledig meegroeien voor de Westerschelde aansluitend op de huidige voorkeursstrategie. Omdat de bodemligging varieert in de tijd en de bodem zich per tijdlijn anders ontwikkelt, is de keuze van het basisscenario voor de bodem enigszins arbitrair. Een beschrijving van het bodemscenario wordt gegeven in paragraaf 6.2 en [Deltares 2022b].

6.2 Methode

6.2.1 Samenvatting methode

Om de waterveiligheidsopgave voor de dijken te bepalen, zijn de hydraulische belastingen, zoals in hoofdstuk 3 en 4 beschreven, gecombineerd met de sterkte van de keringen. Vervolgens zijn de kosten en dimensies van te verwachten dijkversterkingen bepaald. Daartoe zijn de hydraulische belastingen, zoals in hoofdstuk 3 en 4 beschreven, gecombineerd met de sterkte van de keringen. De sterkte van de keringen is in beeld gebracht voor de faalmechanismen hoogte (Gras Erosie Kruin en Binnentalud - GEKB), piping en macrostabiliteit.

De waterveiligheidsopgave is de totale opgave (hoogte- en sterktetekort) van dijken en dammen die niet voldoen aan de (ondergrens)norm in een bepaald zichtjaar. De versterkingsopgave zijn de kosten en het ruimtebeslag om aan de norm te voldoen in een bepaald zichtjaar.

Om de waterveiligheidsopgave te bepalen zijn de hydraulische belastingen en de sterkte van de keringen binnen de software OKADER versie 2021.01 met elkaar gecombineerd:

- Als invoer van OKADER zijn verder hydraulische belastingen nodig. Dit betreffen waterstandsfrequentielijnen om de waterveiligheidsopgave voor de sterkte te kunnen bepalen en HBN's om de waterveiligheidsopgave voor hoogte te kunnen bepalen. Deze hydraulische belastingen zijn binnen OKADER per tijdlijn (Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem) en per zichtjaar (referentiejaar 2023, 2050, 2100, 2150 en 2200) ingevoerd.
- De sterkte van de keringen is binnen OKADER beschreven met zogenaamde fragility curves [Witteveen+Bos en HKV, 2022] (voor de sterkteopgave) en kruinhoogtes (voor de hoogteopgave). Fragility curves beschrijven de sterkte van de kering aan de hand van faalkansen per waterstand (conditionele faalkansen). Het sterktetekort wordt berekend door het combineren van de fragility curves met de waterstandsfrequentielijnen voor piping en macrostabiliteit. Hieruit volgt een faalkans, welke vervolgens getoetst wordt aan de doorsnede-eis (ofwel faalkanseis) per faalmechanisme van het betreffende traject. Voor het hoogtetekort is het HBN bij een overslagdebiet van 5 l/s/m bepaald op basis van de doorsnede-eis bij de ondergrens van de norm. Dit HBN wordt vergeleken met de werkelijk aanwezige kruinhoogte. Hieruit volgt of de kering wel of niet voldoet aan de eis.

De vergelijking van de berekende faalkansen met de faalkanseis resulteert in het moment (jaar) waarin de waterkering niet meer aan de norm voldoet en de mate waarin de kering versterkt dient te worden: dimensies en dijkversterkingskosten. Uit een database met eenheidsprijzen voor dijkversterkingskosten volgen de kosten die gemaakt moeten worden om de kering te laten voldoen aan de eis voor waterveiligheid.

Binnen OKADER kan gerekend worden met drie verschillende typen versterkingsstrategieën:

- Traditionele versterking met constructieve inpassing (strategie 3B). Binnen deze versterking wordt met een groene oplossing versterkt waar mogelijk, maar wordt gekozen voor een constructieve oplossing als ruimtelijke knelpunten ontstaan. Deze strategie is in de systeemanalyse de basisstrategie, omdat deze het beste aansluit met de uitvoering van versterkingen in de huidige ontwerp-praktijk (business as usual).
- Versterking met groene kering. Binnen deze versterking wordt, onafhankelijk van de ruimtelijke knelpunten, versterkt met een groene oplossing (taludverflauwing of bermverbreding). Deze strategie wordt ook gebruikt om de

ruimtelijke inpassing te analyseren. Als indicator hiervoor wordt het aantal te amoveren gebouwen in de versterkingszone gebruikt.¹⁶

- Versterking met groene kering en innovatieve pipingmaatregelen. Binnen deze versterking wordt, onafhankelijk van de ruimtelijke knelpunten versterkt met een groene oplossing (verbreding van de dijkbasis). Deze verbreding van de dijkbasis wordt gereduceerd in afmeting door het toepassen van een alternatieve pipingmaatregel (bijv. een kwelscherm, verticaal zanddicht geotextiel (VZG) of grof-zandbarrière (GZB). Deze strategie dient als vergelijkingsstrategie voor de bovengenoemde twee strategieën.

Uit OKADER volgt in welk jaar versterkt wordt, hoeveel deze versterking kost en wat de dimensies van de versterkingen zijn (hoogtetoename, benodigde verbreding van de dijkbasis door taludverflauwing of een berm en eventueel tijdelijk of permanent aantal te amoveren gebouwen in de versterkingszone en bijbehorende kosten). Op basis van deze resultaten wordt voor de relevante zichtjaren (2050, 2100, 2150 en 2200) bepaald wat de kosten zijn, wat de hoogte- en sterkteopgave is en hoeveel gebouwen in de versterkingszone geamoveerd dienen te worden.

6.2.2 Kostenberekening

Zoals in paragraaf 6.2.1 is beschreven worden de kosten en het tijdstip waarop een versterking moet plaatsvinden berekend. Voor de toepassing binnen de systeemanalyse zijn we geïnteresseerd in de volgende kosten:

- (Nominale) (cumulatieve) Kosten tot en met een bepaald zichtjaar, per tijdlijn;
- (Nominale) Kosten per meter zeespiegelstijging.

Uit OKADER volgt per tijdlijn welke versterkingskosten er nodig zijn in het jaar dat een kering versterkt moet worden (deze jaartallen komen niet overeen met de relevante zichtjaren). Om deze toe te passen in de systeemanalyse verwerken we deze kosten naar de kosten per tijdlijn in een relevant zichtjaar (2050, 2100, 2150, 2200). Hierin onderscheiden we twee kostenvarianten, zie bovenstaand.

Voor de *(nominale) kosten tot en met een bepaald zichtjaar, per tijdlijn* bepalen we de kosten per tijdlijn die tot en met een van de relevante zichtjaren zijn berekend. Hierbinnen vallen de investeringen voor een bepaald zichtjaar die gedaan worden om 50 jaar vooruit te voldoen.

Voorbeeld (nominale) kosten t/m een bepaald zichtjaar, per tijdlijn.

Voor tijdlijn Laag is voor een bepaald dijkvak berekend dat er in het jaar 2045 een versterking uitgevoerd moet worden van 1,2 miljoen euro, in het jaar 2095 een versterking van 2,6 en in 2155 een versterking van 1,2 miljoen euro. De nominale kosten voor deze tijdlijn betreffen t/m: zichtjaar 2050 1,2 miljoen euro, zichtjaar 2100 3,8 miljoen euro, tot zichtjaar 2150 3,8 miljoen euro en tot 2200 5,0 miljoen euro.

Voor de *(nominale) kosten per meter zeespiegelstijging* wordt bekeken per tijdlijn, per zichtjaar hoeveel kosten er in dat jaar gemaakt zijn. Dit betekent dat investeringen voor dat zichtjaar worden aangepast naar de restwaarde die deze investeringen in dat zichtjaar hebben. De restwaarde wordt bepaald met onderstaande berekening:

$$Restwaarde_{\text{zichtjaar}} = \frac{\max([\text{versterkingsjaar} - (\text{zichtjaar} - 50)], [0])}{50} * \text{investeringskosten}$$

¹⁶ Deze strategie zegt niets of overwogen wordt om gebouwen in de versterkingszone te amoveren. Naast amoveren bestaan verschillende alternatieven, zoals een andere versterkingsstrategie (bijv. constructieve maatregelen – business as usual) of bijv. het opvijzelen van gebouwen.

Voorbeeld (nominale) kosten in een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, t.b.v. kosten per m ZSS.

Voor tijdlijn Laag is berekend dat er in het jaar 2045 een versterking uitgevoerd moet worden van 1,2 miljoen euro, in het jaar 2095 een versterking van 2,6 en in 2155 een versterking van 1,2. De kosten zijn dan:

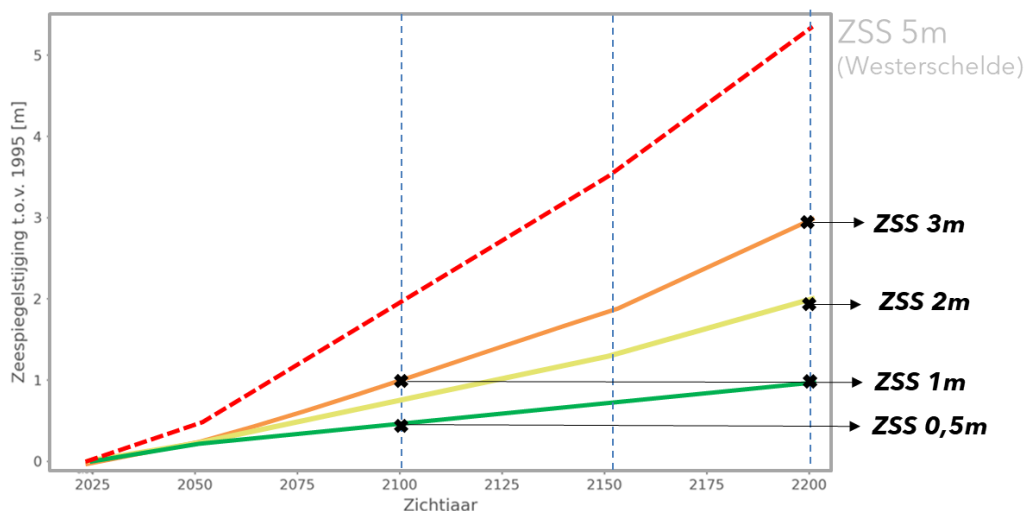
Zichtjaar	Kosten t/m zichtjaar [mln. euro]	Restwaarde in zichtjaar [mln. euro]	Kosten in zichtjaar, gecorrigeerd met de restwaarde [mln. euro]
2050	1,2	1,08	0,12
2100	3,8	2,34	1,46
2150	3,8	0	3,8
2200	5,0	0,12	4,88

Om deze kosten te vertalen naar de kosten per meter zeespiegelstijging kijken we naar de tijdlijn/zichtjaarcombinaties die bij een bepaalde mate van zeespiegelstijging horen, zie Tabel 17 voor de Oosterschelde als voorbeeld.

Tabel 17: Mate van zeespiegelstijging gekoppeld aan tijdlijn/zichtjaarcombinaties.

Zeespiegelstijging	Tijdlijn/zichtjaarcombinaties
0,5 meter	Laag 2100
1,0 meter	Laag 2200, Extreem 2100
2,0 meter	Gematigd 2200
3,0 meter	Extreem 2200

Als een mate van zeespiegelstijging met meerdere tijdlijn/zichtjaar combinaties wordt beschreven, dan betreft dit een bandbreedte van de kosten.



Figuur 32: Overzicht gehanteerde mate van zeespiegelstijging per zichtjaar.

In dit hoofdstuk worden de cumulatieve nominale kosten ten opzichte van de huidige situatie gepresenteerd. Dit betekent dus inclusief de kosten tot en met 2050 voor "systeem op orde", waarbij rekening wordt gehouden met 25 – 50 cm zeespiegelstijging. In hoofdstuk 8 worden de kosten ten opzichte van "systeem op orde" gepresenteerd. "Systeem op orde" zijn alle versterkingen tot en met zichtjaar 2050 (referentie). Een versterking voor "systeem op orde" kan nog in 2050 worden

afgerond, waarbij ontworpen wordt op de hydraulische belastingen, morfologie en bodemdaling in 2100 (ontwerplevensduur van 50 jaar). Daarom is de hoogte- en sterkteopgave voor "systeem op orde" niet gelijk aan de hoogte- en sterkteopgave in zichtjaar 2050, maar groter omdat er nog resthoogte/-sterkte aanwezig is. De bijbehorende nominale kosten voor "systeem op orde" zijn de nominale kosten tot en met 2050.

Vertaling kosten Oosterschelde

In paragraaf 3.2 is beschreven dat voor de Oosterschelde niet voor alle vakken de hydraulische belastingen zijn berekend, maar enkel voor een selectie (zie Figuur 7). Voor de waterveiligheidsopgave wordt deze selectie aan locaties uitgerold over het gehele gebied. Hiervoor wordt een koppeling gemaakt op basis van:

- Locatie in het gebied;
- Oriëntatie van de kering (van belang voor de HBN berekening);
- Aanwezigheid van bebouwing achter de kering (van belang voor de kostenberekening);
- Aanwezigheid van sterktecurves (voor macrostabiliteit en piping).

Uit deze overweging volgt een koppeling van de vakken in de Oosterschelde aan de berekende vakken uit het Hydraulische belastingen-spoor. Deze koppeling is opgenomen in Koppeling vakken Oosterschelde.

6.2.3 Rekeninstellingen

Binnen OKADER zijn voor analyses enkele rekeninstellingen en uitgangspunten gehanteerd, deze zijn onderstaand beschreven en waar nodig toegelicht.

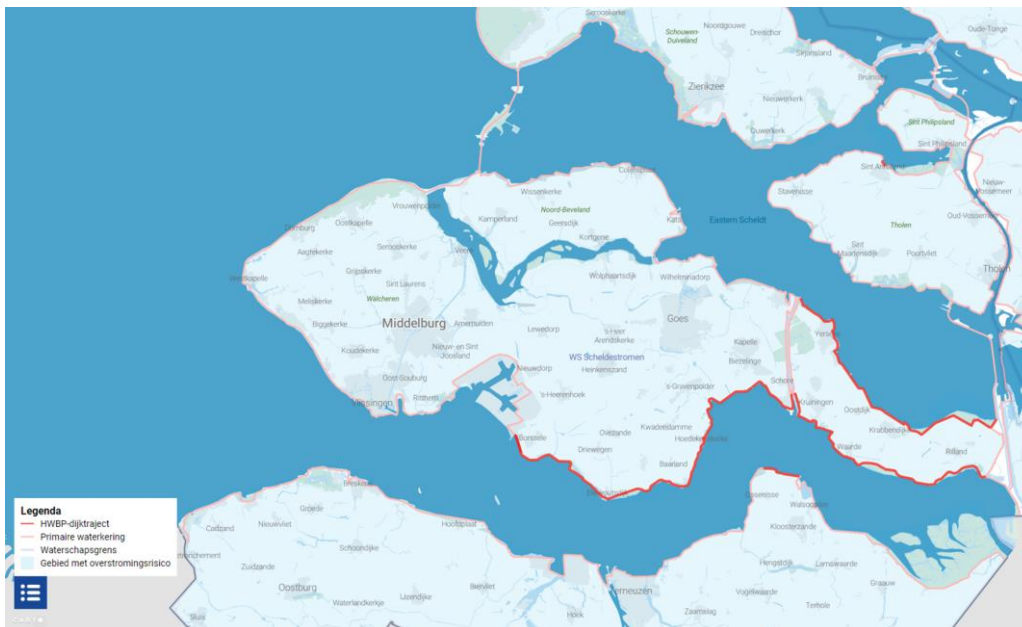
- We hanteren voor de analyses startjaar 2025 en als eindjaar 2200 met een tijdstap van 5 jaar.
- We rekenen in de analyses met bodemdaling, waarbij we 2023 als referentiejaar hanteren en de bodemdaling-database die binnen het KP ZSS is toegeleverd (o.b.v. de studie WV21 [Deltares, 2011]). Het verschil tussen 2023 en 2025, à hoogstens enkele centimeters, wordt genegeerd.
- We gebruiken voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit de fragility curves om de sterkte te beschrijven en voor hoogte de kruinhoogtes.
- We berekenen de belastingen voor de sterktesporen aan de hand van de waterstandsfrequentielijn. Hierdoor passen we het belastingtype "HT" (waterstand) toe. Omdat de zeespiegelstijging al in de frequentielijnen zit verwerkt, tellen we hier verder geen integrale waterstandsverandering bij op.
- We gaan uit van de binnen het KP ZSS toegeleverde dijkversterkingsplanning tot 2035, die afgeregeld is op de HWBP-planning tot 2035 (Bron: definitief programmavoorstel 2023-2034). Hiermee wordt voorkomen dat alle dijken tegelijkertijd op $t=0$ versterkt dienen te worden als deze niet meer voldoen.
- Voor de dijkversterkingen wordt uitgegaan van een ontwerplevensduur van 50 jaar. Voor de constructieve elementen (damwand, kwelscherm, etc) wordt ontworpen met een levensduur van 100 jaar.
- De kosten voor de dijkversterkingen worden berekend op basis van de binnen het KP ZSS toegeleverde KOSWAT-databases voor de verschillende dijkversterkingsstrategieën.

6.3 Resultaten

6.3.1 Systeem op orde tot 2050

Tot het zichtjaar 2050 is de mate van zeespiegelstijging voor de meeste tijdlijnen gelijk (behalve Zeer Extreem), namelijk 0,25 m. De kosten om alle dijken minimaal te laten voldoen aan de ondergrensnorm tot 2050 ("systeem op orde") zijn van

belang om de dijkversterkingskosten na 2050 voor hogere niveaus van zeespiegelstijging (bijv. voor ZSS van 1 m) te relateren aan de huidige investeringskosten van het HWBP. Hiertoe bekijken we de kosten die binnen tijdlijn Laag zijn berekend tot 2050. In Figuur 33 zijn de dijkvakken opgenomen die op HWBP-programmering 2023 – 2034 staan. In de periode tot 2050 zullen extra dijkvakken worden aangemeld, zoals bijvoorbeeld de dijkvakken die in LBO1 niet voldoen aan de ondergrensnorm.



Figuur 33: Programmering HWBP-vakken tot 2035 (Bron: definitief programmavoorstel 2023-2034; <https://hwbp.cartonext.nl/> geraadpleegd 06 april 2023).

Voor de Zuidwestelijke Delta betreffen de kosten om in 2050 te voldoen 2,3 miljard euro. Hiervan is 1,2 miljard euro voor de Westerschelde (lengte 142 km) en 1,1 miljard euro voor de Oosterschelde (lengte 196 km)¹⁷. Tot 2050 wordt maar een enkele versterkingsronde uitgevoerd. De kosten, omgerekend naar kosten per km per dijkversterkingsronde zijn voor de gehele Zuidwestelijke Delta 6,8 miljoen euro per km. Opgesplitst is dit 8,4 miljoen euro per km voor de Westerschelde en 5,6 miljoen euro per km voor de Oosterschelde. Opgemerkt wordt dat per versterkingsronde niet het totale areaal aan keringen wordt versterkt, maar enkel de keringen die niet voldoen aan de norm. De kosten per km zijn bepaald op het totaal aantal km's binnen het gebied (142 km voor de Westerschelde en 196 km voor de Oosterschelde), en niet van het totaal aantal km versterkte kering. Hierdoor kan het beeld afwijken van de verwachte kosten per km dijkversterking.

6.3.2 Waterveiligheidsopgave

De waterveiligheidsopgave beschrijft het sterktekort in een bepaald jaar gegeven een tijdlijn. In onderstaande paragrafen wordt de waterveiligheidsopgave voor hoogte (het hoogtekort) en voor sterkte (het tekort aan dijkbasis/bermlengte) beschreven voor 1 m en 3 m zeespiegelstijging. Voor 1 m kijken we naar de opgave voor tijdlijn Laag in 2200 en voor 3 m kijken we naar tijdlijn Extreem in 2200. De

¹⁷ De kosten die binnen het KP ZSS zijn berekend voor "systeem op orde" zullen afwijken van de kosten binnen het HWBP. Binnen de systeemanalyse zijn diverse (globale) inschattingen gemaakt op basis waarvan de kosten zijn bepaald. De kosten dienen dus niet 1-op-1 vergeleken te worden met de kosten voor het HWBP maar gezien te worden als plausibiliteitscheck.

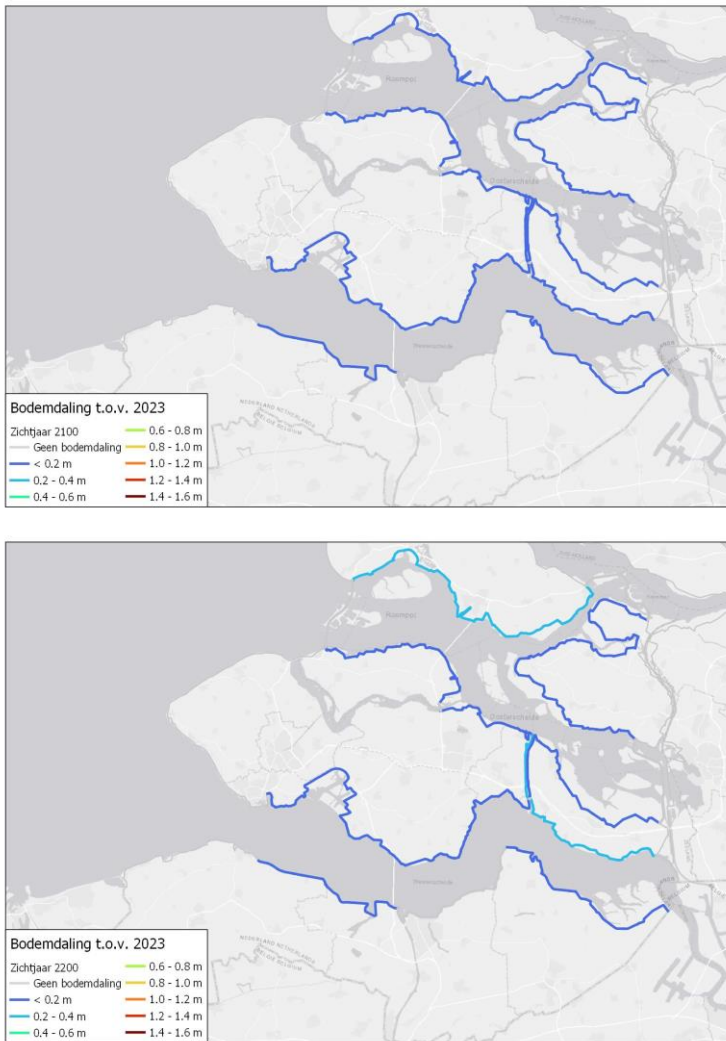
gepresenteerde waterveiligheidsopgave beschrijft de opgave ten opzichte van 2023. Specifiek wordt opgemerkt dat de dijkversterking van traject 30-2 (Hansweert) met start van de uitvoering in 2023 nog niet is meegenomen.

Voor traject 30-4 (Borsele) geldt dat deze niet is opgenomen in de opgave, omdat hiervoor geen separate OKADER analyses uitgevoerd zijn. Voor de kosten is er voor gekozen om het naastgelegen vak van traject 30-3 te koppelen. In de overzichtsfiguren voor de opgave binnen deze paragraaf wordt traject 30-4 daarom niet weergegeven.

Waterveiligheidsopgave hoogte

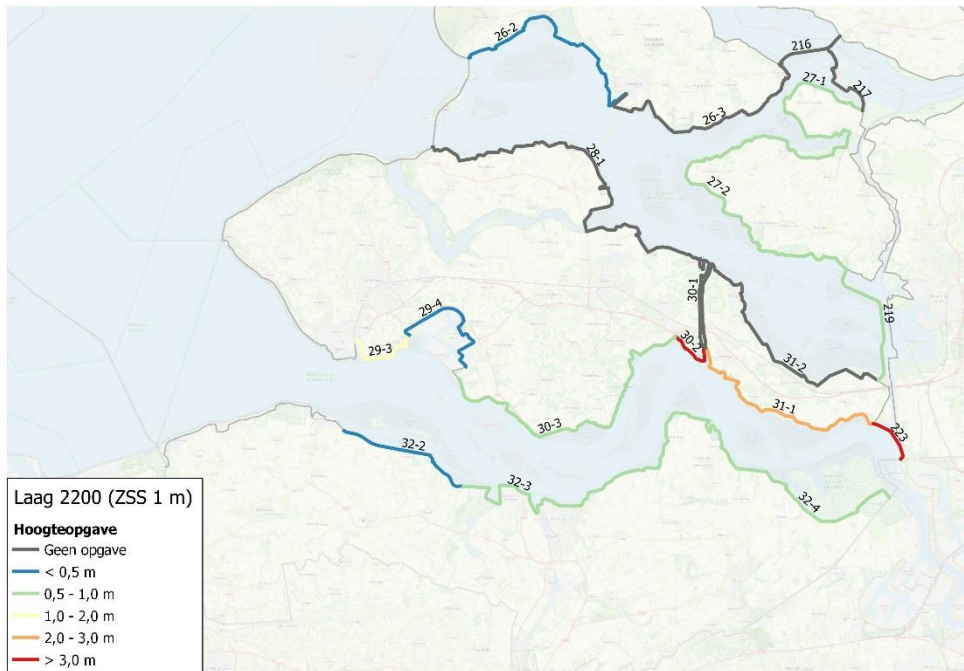
Figuur 35 en Figuur 36 geven de waterveiligheidsopgave voor hoogte weer voor respectievelijk 1 m en 3 m zeespiegelstijging.

Een belangrijk onderdeel van de hoogteopgave is de mate van bodemdaling. Binnen de beschouwde dijktrajecten zitten er weinig verschillen tussen de mate van bodemdaling. In 2200 is de mate van bodemdaling in het referentiejaar voor de Zuidwestelijke Delta klein ten opzichte van de mate van ZSS. In Figuur 34 staat boven de in deze beleidsstudie aangenomen bodemdaling in m in 2100 t.o.v. 2023 en onder de bodemdaling in 2200 t.o.v. 2023.



Figuur 34: Mate van bodemdaling in m, met boven de bodemdaling in 2100 t.o.v. 2023 en onder de bodemdaling in 2200 t.o.v. 2023.

Figuur 35 waarin de hoogteopgave voor 1 m zeespiegelstijging is weergegeven, laat zien dat er grote verschillen in opgave zijn tussen de Westerschelde en de Oosterschelde. De oorzaak hiervan is de aanwezigheid van de Oosterscheldekering, waardoor de zeespiegelstijging niet 1-op-1 doorwerkt in de Oosterschelde, maar veelal gekeerd wordt door de stormvloedkering. Daarnaast zijn veel keringen langs de Oosterschelde aangelegd als zeekeringen (open verbinding met de zee) in de tijd dat de Oosterscheldekering nog niet gebouwd of in gebruik was.

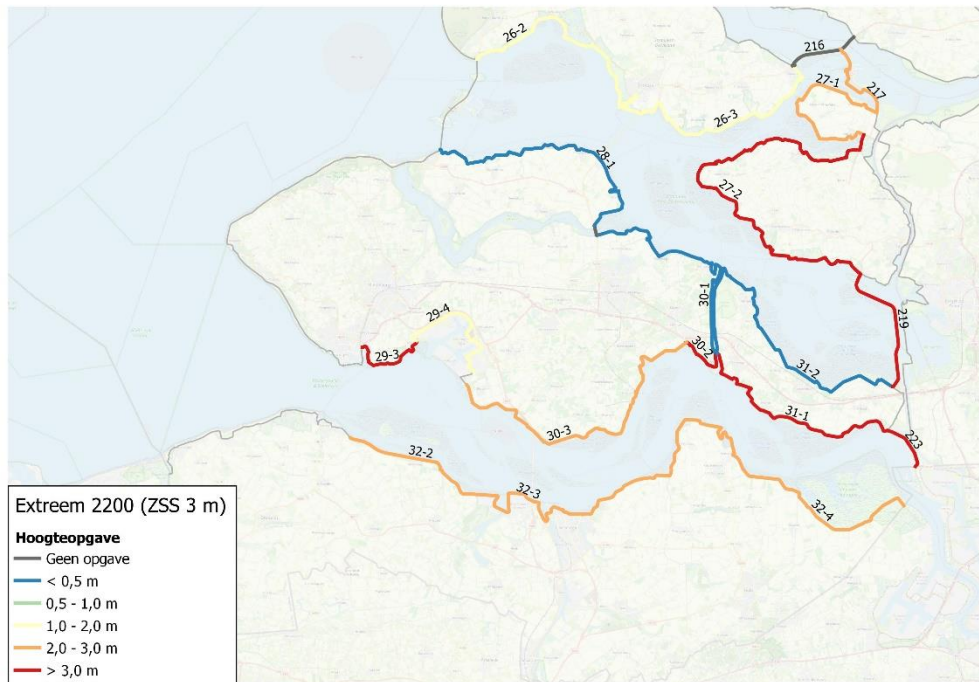


Figuur 35: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdelijk Laag 2200) bij het bodemscenario Volledig Meegroeien in de Westerschelde.

Langs de Westerschelde is het hoogtetekort bij een ZSS van 1 m groter dan bij de Oosterschelde (Figuur 35). Het gemiddelde hoogtetekort in de Westerschelde is 1,4 m. Het verschil met 1 m zeespiegelstijging is dat het HBN in de Westerschelde meer toeneemt dan de waterstand.

Het hoogtetekort bij 3 m zeespiegelstijging laat eenzelfde beeld zien als 1m zeespiegelstijging. Het hoogtetekort in de Oosterschelde is aanzienlijk kleiner dan in de Westerschelde. Het verschil met 1m zeespiegelstijging is vooral zichtbaar op de westelijk gelegen trajecten in de Oosterschelde. Bij een toenemende waterstand nemen ook de golven meer toe, waardoor het effect van zeespiegelstijging bij westelijk gelegen trajecten meer zichtbaar is.

We zien in de Oosterschelde grote verschillen terug in het hoogtetekort bij 3m zeespiegelstijging. Dit heeft te maken met (1) de normverschillen in het gebied: trajecten 219 en 27-2 hebben een ondergrensnorm van 1/10.000 per jaar, (2) de oriëntatie van het traject: het HBN is door golfopzet hoger op de westelijk georiënteerde trajecten en (3) kan een gevolg zijn van het koppelen van vakken aan berekende hydraulische belastingen locaties (zie paragraaf 6.2.3). De maximale hoogteopgave bij 3 m ZSS in 2200 betreft voor de Oosterschelde 2,2 m en voor de Westerschelde 6,4 m.



Figuur 36: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) bij het bodemscenario Volledig Meegroeien in de Westerschelde.

Opgave piping en macrostabiliteit

Figuur 37 en Figuur 38 geven de waterveiligheidsopgave voor de sterktesporen (piping en macrostabiliteit) weer voor respectievelijk 1 m en 3 m zeespiegelstijging. De waterveiligheidsopgave voor sterkte betreft de aan te leggen profielverbreding door een piping- of stabiliteitsberm of taludverflauwing om te voldoen aan de eisen. Een verbreding van de dijkbasis kan het gevolg zijn van een dijkophoging. Als op een traject een beperkte verbreding van de dijkbasis nodig aanwezig is (< 10m), dan is dit hoogstwaarschijnlijk het resultaat van een dijkverbreding t.b.v. kruinverhoging.

Binnen de sterktesporen wordt uitgegaan van fragility curves om de sterkte te beschrijven. In de afleiding van de fragility curves is aangenomen dat indien een locatie nu (referentiejaar 2025) ongevoelig is voor een mechanisme (piping of macrostabiliteit) dat dit in de toekomst ook zo zal zijn. Hierdoor kunnen de berekende opgaves enigszins onderschat worden. Hiervoor wordt verwezen naar Witteveen+Bos & HKV (2022).

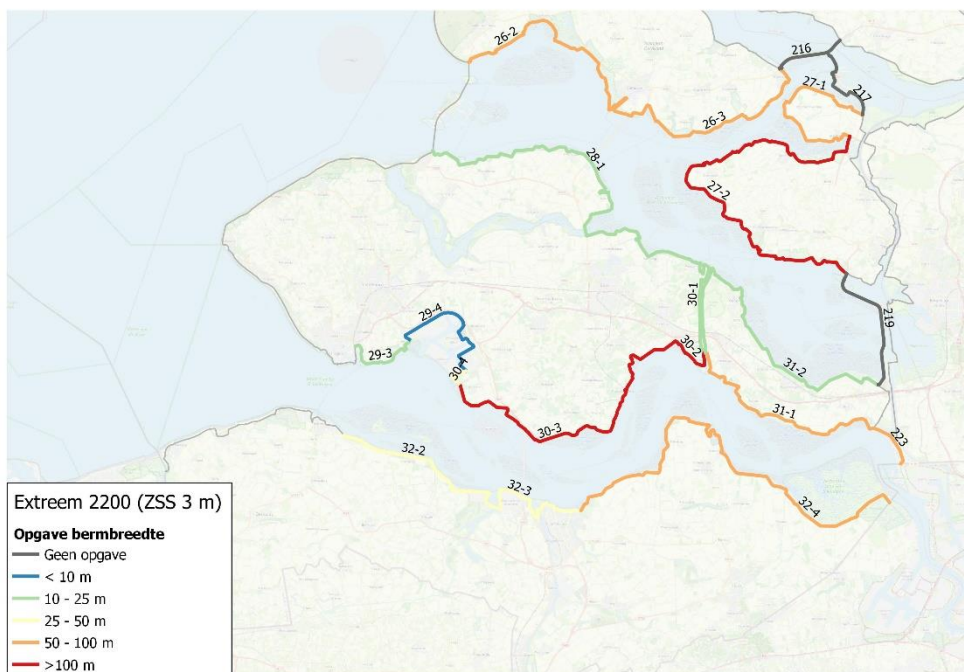
In Figuur 37 waarin de sterkteopgave voor 1 m zeespiegelstijging is weergegeven, laat zien dat er voor enkele trajecten in de Oosterschelde geen opgave berekend is. De oorzaak hiervan is te vinden in de afwezigheid van sterktebeschrijvingen (fragility curves) van deze keringen, omdat het vooral dammen betreffen.

De sterkteopgave in de Westerschelde is gering, met enkel traject 30-2 waar een significant sterktetekort is. Dit traject zit momenteel in de versterking, de uitvoering begint in 2023. In de volgende figuren is dit nog niet meegenomen. Voor de overige trajecten geldt dat niet overal sterktebeschrijvingen (fragility curves) beschikbaar zijn.



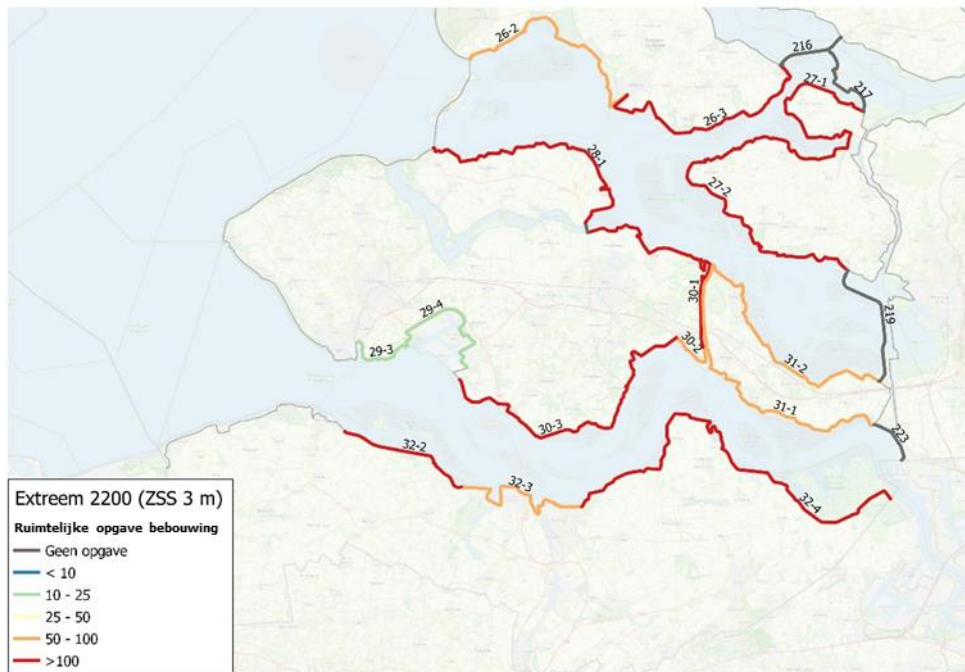
Figuur 37: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdlijn Laag 2200) bij het bodemscenario Volledig Meegroeien in de Westerschelde.

Bij 3 m zeespiegelstijging (Figuur 38) zien we voor enkele trajecten geen opgave (216, 217 en 219). De grootste opgave ontstaat in het noordelijke deel van de Westerschelde en het oostelijke deel van de Oosterschelde. Daarnaast vallen trajecten met een strengere norm op.



Figuur 38: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) bij het bodemscenario Volledig Meegroeien in de Westerschelde.

Het aanleggen of verbreden van de dijkbasis, zoals deze volgt uit de opgave voor de sterktesporen kan leiden tot ruimtelijke knelpunten (plaatsen waar bebouwing aanwezig is in de versterkingszone). Om hier nader inzicht in te krijgen zijn de OKADER-analyses ook uitgevoerd voor dijkversterkingsstrategieën waarbij er ondanks deze knelpunten toch versterkt wordt in een "groene kering". Hieruit volgt het aantal gebouwen dat geamoveerd dient te worden om de dijkversterking uit te kunnen voeren. Voor 3 m zeespiegelstijging resulteert dit in het tijdelijk of permanent amoveren van ongeveer 700 gebouwen in de Westerschelde en 1.000 in de Oosterschelde. Het ruimtelijke beeld dat hierbij hoort is weergegeven in Figuur 39.



Figuur 39: Ruimtelijke knelpunten bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) voor het bodemscenario Volledig Meegroeien in de Westerschelde.

Het aanduiden van de ruimtelijke knelpunten is mogelijk door de benodigde verbreding van de dijkbasis (Figuur 38) te vergelijken met het aantal tijdelijk of permanent te amoveren gebouwen in de versterkingszone (Figuur 39). Omdat voor beide figuren geldt dat de resultaten geaggregeerd zijn naar trajectniveau, is het op basis hiervan enkel mogelijk om op trajectniveau duiding te geven aan het feit of er op het traject (veel) ruimtelijke knelpunten zijn.

6.3.3 Cumulatieve nominale kosten t/m een bepaald zichtjaar, per tijdlijn

De cumulatieve nominale kosten t/m een bepaald zichtjaar, gegeven een tijdlijn, zijn bepaald zoals beschreven in paragraaf 6.2.2. Dit zijn de kosten zonder restwaarde correctie. In Tabel 18 zijn de kosten per kilometer voor de gehele Zuidwestelijke Delta opgenomen.

Tabel 18: Cumulatieve nominale kosten per km t/m een bepaald zichtjaar per tijdlijn, zonder restwaarde correctie, bij het bodemscenario Volledig Meegroeien in de Westerschelde.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten per km in mln. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem*
2050	6,8	7,7	8,6	16,2
2100	11,2	15,7	18,0	35,9

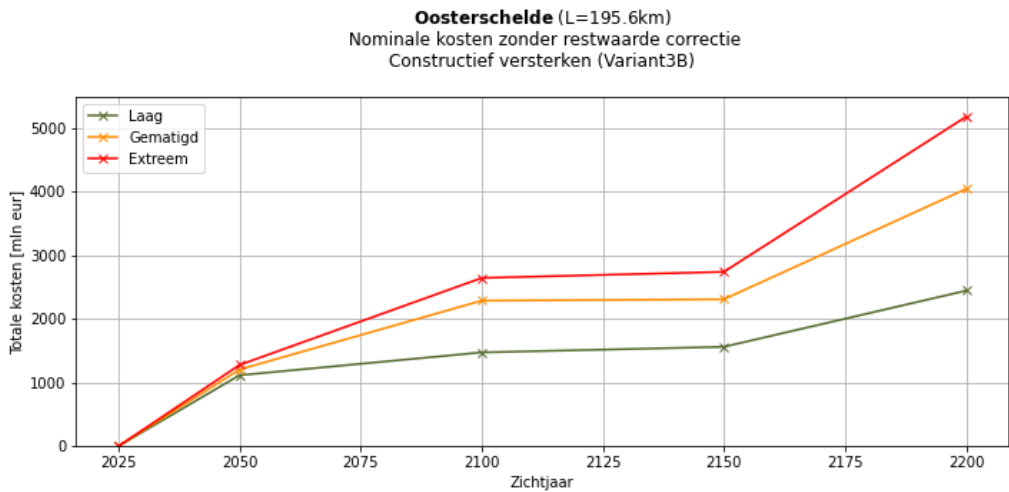
2150	12,4	18,3	22,5	47,1
2200	20,4	30,5	38,5	69,7

*Kosten voor tijdlijn Zeer Extreem zijn enkel bepaald voor de Westerschelde

Als basis hiervoor dienen de analyses die voor de Oosterschelde en Westerschelde zijn uitgevoerd. De resultaten van deze twee deelgebieden zijn beschreven in respectievelijk paragraaf 6.3.2. De optelsom naar de totale kosten per watersysteem staat in hoofdstuk 8 beschreven.

Oosterschelde

De totale kosten om de dijken en dammen langs de Oosterschelde te versterken volgens de versterkingsstrategie constructieve versterking (business as usual) tot en met een bepaald zichtjaar is weergegeven in Figuur 40.



Figuur 40: Nominale kosten tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn voor de Oosterschelde.

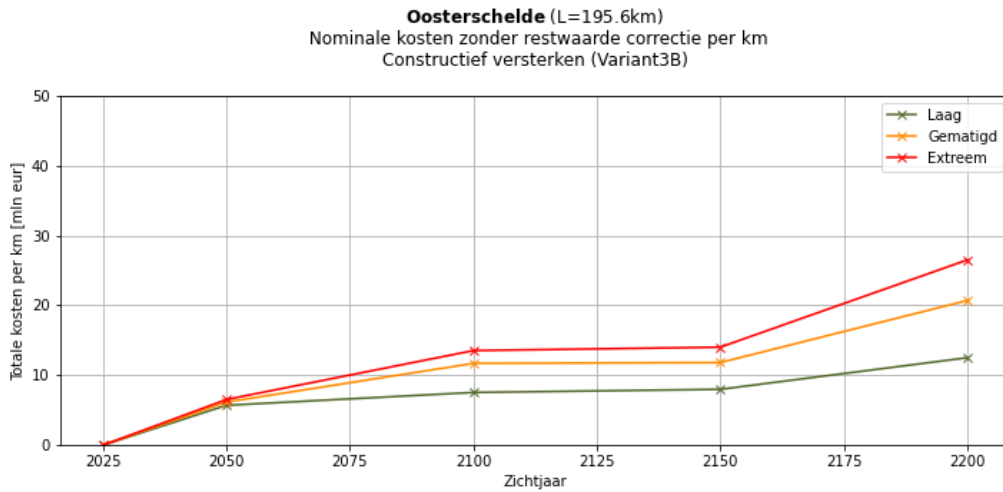
In Figuur 40 zijn de kosten voor de Oosterschelde weergegeven. Zo is te zien dat de totale kosten t/m 2200 voor tijdlijn Laag +/-2.500 miljoen euro voor tijdlijn Extreem +/-5.000 miljoen euro bedragen.

De resultaten van de kosten voor de hele Oosterschelde tot en met een bepaald zichtjaar zijn weergegeven in Tabel 19.

Tabel 19: Cumulatieve nominale kosten per km t/m een bepaald zichtjaar per tijdlijn, zonder restwaarde correctie voor de Oosterschelde.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten in mld. euro]		
	Laag	Gematigd	Extreem
2050	1,1	1,2	1,3
2100	1,5	2,3	2,6
2150	1,6	2,3	2,7
2200	2,5	4,0	5,2

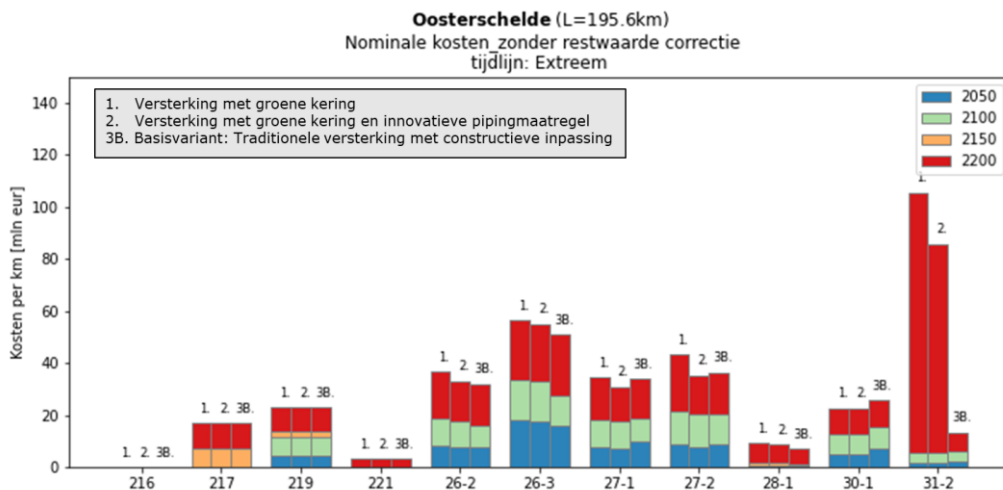
Wat opvalt is het horizontale verloop tussen 2100 en 2150. Oorzaak hiervan is te vinden in de uitvoerstappen. Er is gekozen om per 5 jaar de uitvoer te berekenen en een dijkversterkingshorizon van 50 jaar aan te houden. Gevolg hiervan is dat het feit kan ontstaan dat een versterking plaats vindt in 2100 en de volgende versterking plaats vindt in 2155. Resultaat hiervan is een vlak verloop van de kosten tussen 2100 en 2150, met een sterke stijging na 2150. Dit is ook te zien in Figuur 41.



Figuur 41: Cumulatieve nominale kosten per km zonder restwaarde correctie tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn voor de Oosterschelde.

In Figuur 41 zijn de kosten per kilometer weergegeven. De kosten per kilometer voor zichtjaar 2200 bedragen voor tijdlijn Laag +/-12 miljoen euro, voor tijdlijn Extreem +/- 27 miljoen euro. Voor de meeste vakken/trajecten langs de Oosterschelde vinden er tot 2200 3 versterkingsrondes plaats. Platgeslagen resulteert dit in kosten per versterkingsronde tussen de 4 en 9 miljoen euro per kilometer.

Om duiding te geven aan de opbouw van de kosten tot een bepaald zichtjaar en hierbij inzicht te krijgen in de ruimtelijk verdeling zijn in Figuur 42 de kosten per traject per kilometer, tot een bepaald zichtjaar weergegeven. Als indicatie zijn de kosten voor tijdlijn Extreem weergegeven. Voor alle trajecten zijn de kosten voor de drie dijkversterkingsstrategieën, zoals beschreven in 6.2.1, weergegeven. Hieruit zijn de ruimtelijke knelpunten met het oog op het tijdelijk of permanent amoveren van de aanwezige bebouwing in de versterkingszone te duiden.



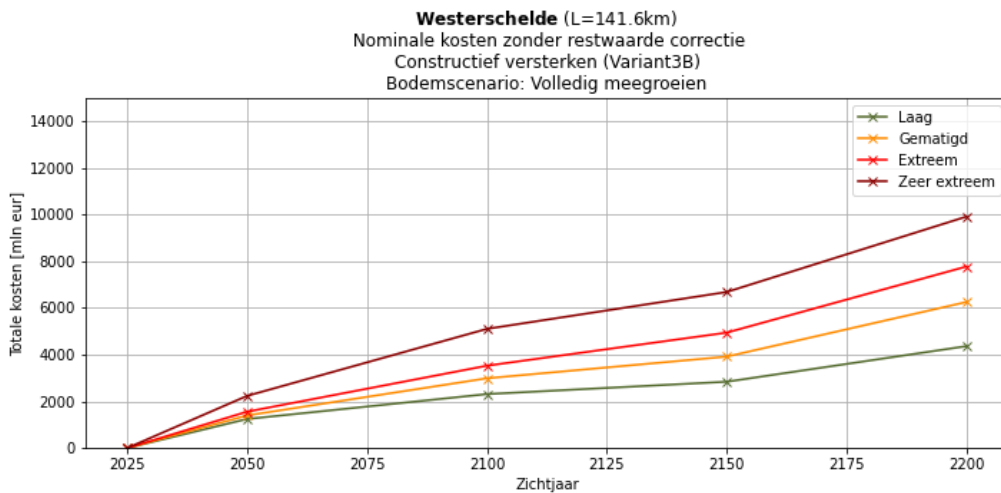
Figuur 42: Cumulatieve nominale kosten per km per traject voor de Oosterschelde (zonder restwaarde correctie), met strategie 1: versterking in groene kering (inclusief amoveren), strategie 2: versterking in groene kering (inclusief amoveren) met toepassing van innovatieve pipingmaatregel en strategie 3b: traditionele inpassing met constructieve versterking bij ruimtegebrek.

Opvallend aan Figuur 42 is het uitblijven van kosten voor traject 216 en de lage kosten voor traject 221. Dit volgt uit het feit dat voor de dammen in de Zuidwestelijke Delta enkel naar de hoogte gekeken wordt. Voor traject 216 (Grevelingendam langs de Oosterschelde) is het verschil tussen de huidige aanwezige kruinhoogte en het HBN meer dan 3 m, waardoor geen kosten ontstaan voor tijdlijn Extreem tot 2200. Ook valt op dat de opgave voor de trajecten 217 (Philipsdam), 28-1 (Noord-Beveland) en 31-2 (traject Yerseke-Krabbendijke) tot 2050 beperkt of afwezig is.

Ook vallen de extreem hoge kosten voor strategie 1 en 2 op voor traject 31-2. Hiervan ligt de oorzaak in de aanwezigheid bebouwing in de versterkingszone. Rondom de kering van traject 31-2 staat industriële bebouwing die, als deze tijdelijk of permanent geamoveerd dienen te worden, leiden tot hoge amoveringskosten (orde 1 miljard).

Westerschelde

De totale kosten om de dijken en dammen langs de Westerschelde te versterken volgens de versterkingsstrategie constructieve versterking (business as usual) tot en met een bepaald zichtjaar is weergegeven in Figuur 43.



Figuur 43: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaarde correctie tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn voor de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien.

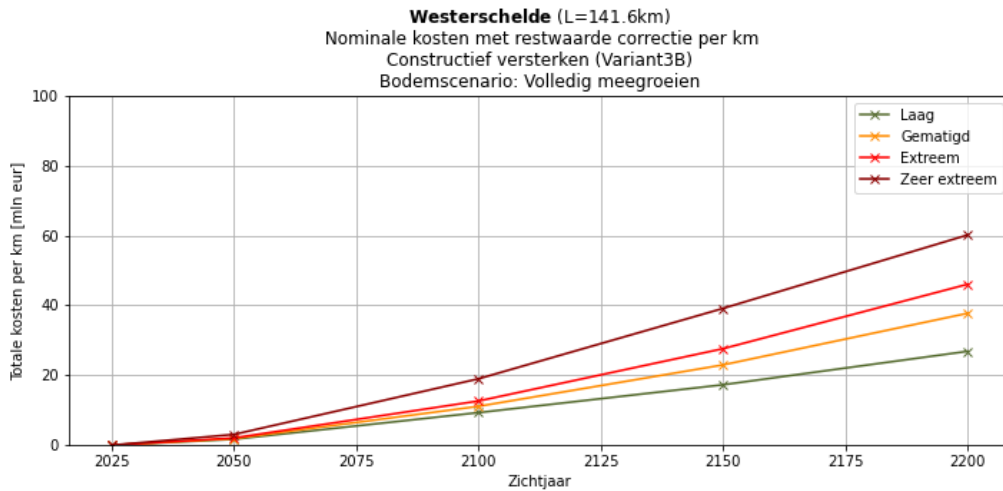
In Figuur 44 zijn de kosten voor de Westerschelde weergegeven. Zo is te zien dat de totale kosten t/m 2200 voor tijdlijn Laag +/- 4.000 miljoen euro en voor tijdlijn Zeer Extreem +/- 10.000 miljoen euro bedragen.

De bandbreedte van de kosten voor de hele Westerschelde tot en met een bepaald zichtjaar zijn weergegeven in Tabel 20.

Tabel 20: Cumulatieve nominale Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien tot een bepaald zichtjaar, per tijdlijn.

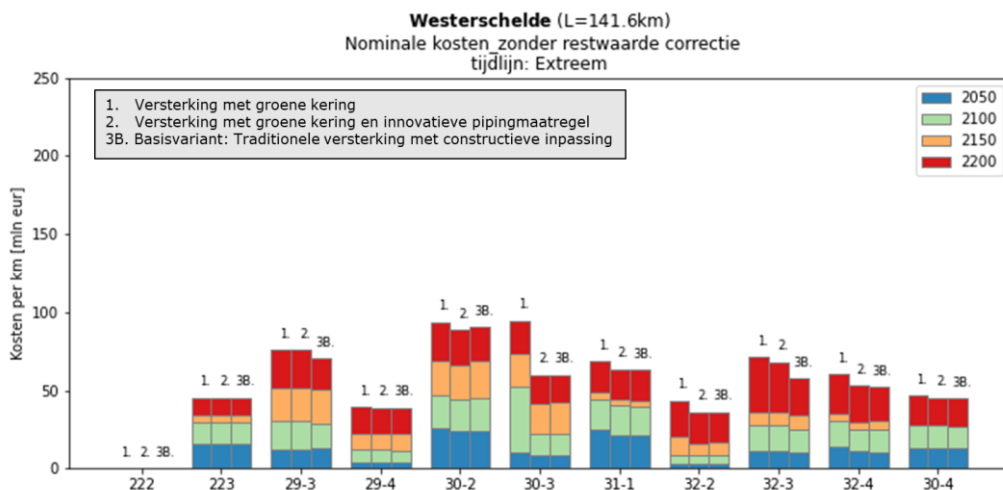
Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten in mld. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	1,2	1,4	1,6	2,2
2100	2,3	3,0	3,5	5,1
2150	2,8	3,9	4,9	6,7
2200	4,4	6,3	7,8	9,9

Uit Figuur 44 valt af te lezen dat de kosten redelijk constant stijgen in de tijd. Er valt een klein knikpunt te herkennen na 2150. Oorzaak hiervan is te vinden in de uitvoerstappen. Er is gekozen om per 5 jaar de uitvoer te berekenen en een dijkversterkingshorizon van 50 jaar aan te houden. Gevolg hiervan is dat het feit kan ontstaan dat een versterking plaats vindt in 2100 en de volgende versterking plaats vindt in 2155.



Figuur 44: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaarde correctie per km tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn voor de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien.

In Figuur 45 zijn de kosten per kilometer weergegeven. Hierin is hetzelfde verloop zichtbaar als in Figuur 43.



Figuur 45: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaarde correctie per km per traject voor de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien, met strategie 1: versterking in groene kering (inclusief amoveren), strategie 2: versterking in groene kering (inclusief amoveren) met toepassing van innovatieve pipingmaatregel en strategie 3b: traditionele inpassing met constructieve versterking bij ruimtegebrek.

De kosten per kilometer voor zichtjaar 2200 bedragen voor tijdlijn Laag +/- 15 miljoen euro, voor tijdlijn Zeer Extreem +/- 70 miljoen euro. Voor de meeste vakken/trajecten langs de Westerschelde vinden er tot 2200 4 versterkingsrondes plaats, al komt het ook voor dat er maar 3 versterkingsrondes plaats vinden.

Platgeslagen resulteren 3 versterkingsrondes in kosten per versterkingsronde tussen de 5 en 23 miljoen euro per kilometer en 4 versterkingsrondes in kosten per versterkingsronde tussen de 3,75 en 17,5 miljoen euro per kilometer.

Om duiding te geven aan het ontstaan van de kosten en hierbij een ruimtelijk idee te krijgen zijn in Figuur 45 de kosten per traject per kilometer, tot een bepaald zichtjaar weergegeven. Als indicatie zijn de kosten voor tijdlijn Extreem weergegeven. Voor alle trajecten zijn de kosten voor de drie dijkversterkingsstrategieën, zoals beschreven in 6.2.1, weergegeven. Hieruit zijn de ruimtelijke knelpunten met het oog op het aantal tijdelijk of permanent te amoveren gebouwen in de versterkingszone te duiden.

Voor de Westerschelde volgt uit Figuur 43 een logisch verloop van de kosten, hier en daar is te zien dat de verschillen in kosten tussen 2100 en 2150 minimaal zijn, dat heeft de oorzaak zoals beschreven in de paragraaf volgend op Tabel 20. Voor de Westerschelde is veelal strategie 3B het goedkoopst, al scheelt dit niet veel met strategieën 1 en 2. Als strategie 1 veel duurder is dan strategie 3B, dan is dat een indicatie dat veel bebouwing in de versterkingszone aanwezig is (amoveren is relatief duur). Voor de Westerschelde blijkt het verschil tussen de strategieën beperkt, waaruit geconcludeerd kan worden dat de ruimtelijke knelpunten en het aantal gebouwen in de versterkingszone beperkt is.

6.4 Samenvatting

Het resultaat van de Waterveiligheidsopgave van de dijken voor de Zuidwestelijke Delta is opgenomen in Tabel 21. In deze tabel zijn de kosten tot en met een bepaald zichtjaar (nominale kosten) gepresenteerd.

Tabel 21: Cumulatieve nominale kosten per km tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn zonder restwaarde correctie. Voor de Westerschelde is dit bij het bodemscenario Volledig Meegroeien.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten per km in mln. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem*
	Nom. Kosten	Nom. Kosten	Nom. Kosten	Nom. Kosten
2050	6,8	7,7	8,6	16,2
2100	11,2	15,7	18,0	35,9
2150	12,4	18,3	22,5	47,1
2200	20,4	30,5	38,5	69,7

*Kosten voor tijdlijn Zeer Extreem zijn enkel bepaald voor de Westerschelde

Uit de resultaten van de Oosterschelde en Westerschelde blijkt dat de opgave voor de Westerschelde groter is dan voor de Oosterschelde. Logische verklaring hiervoor is te vinden in de aanwezigheid van de Oosterscheldekering¹⁸, terwijl de keringen langs de Oosterschelde toentertijd ontworpen zijn als zeekeringen. Hierdoor is de aanwezige kruinhoogte in de Oosterschelde relatief hoog en zijn de dijkversterkingskosten bij zeespiegelstijging relatief gering. Ook werkt zeespiegelstijging niet 1-op-1 door op de waterstanden binnen de Oosterschelde zoals op de Westerschelde. Dit beeld volgt ook uit de sterkte- en hoogteopgave, zoals beschreven in paragraaf 6.3.

Tabel 21 laat zien dat de dijkversterkingskosten voor de Zuidwestelijke Delta toenemen in de tijd en per tijdlijn, ook valt op dat de toename "versneld" per tijdstap per tijdlijn. De relatieve verschillen tussen bijvoorbeeld tijdlijn Laag en Extreem in 2100 zijn kleiner dan in 2200 (factor 1,6 om 1,9). Het effect van tijdlijn Zeer Extreem is op systeemniveau moeilijk te duiden, aangezien deze enkel voor de Westerschelde is bepaald.

¹⁸ De kosten voor het vervangen of versterken van de Oosterscheldekering zijn niet meegenomen in deze getallen.

7 Gevoeligheidsanalyse

7.1 Inleiding

Naast de basisberekeningen is ook een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze zijn uitgevoerd om een indicatie te krijgen van de invloed van bepaalde uitgangspunten op de uiteindelijke conclusies van het onderzoek en bieden soms mogelijkheden om de impact of de waterveiligheidsopgave te verkleinen (als oprekmaatregel). Als uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de invloed van de parameter op de hydraulische belastingen een significant effect heeft, dan wordt ook het effect op de waterveiligheidsopgave inzichtelijk gemaakt. Dit gebeurt via een onderbouwde schatting of een OKADER analyse.

Daarbij is voor de Oosterschelde gekeken naar de invloed van:

1. Halvering van het lekdebiet;
2. Verhoging van het sluitpeil van de Oosterscheldekering met 25 cm of 50 cm;
3. Verhoging van het voorland.

Voor de Westerschelde is gekeken naar de invloed van:

4. Effect van bodemligging op de resultaten;
5. Effect van vegetatie op het voorland.

Merk op dat voor elke parameter is gekeken naar de invloed bij elke mate van ZSS. Een parameter kan dus van belang zijn voor de waterveiligheidsopgave (andere kosten), maar dit is dan aanwezig bij alle waarden voor de ZSS. Het is b.v. niet zo dat vegetatie een significant ander effect heeft bij een ZSS van 1 m dan bij 2 m.

7.2 Parameter 1: Aanpassing lekdebiet Oosterscheldekering

7.2.1 Hydraulische belastingen

In deze gevoeligheidsanalyse is de referentieberekening (A) vervangen door een berekening met een database met 0 m ZSS en een gehalveerd lekdebiet door de Oosterscheldekering (600 m³/s). De frequentielijnen van de basisberekening (A) en de gevoeligheidsberekening (A_lek) zijn vrijwel gelijk (ordegrootte 1 cm verschil). Het lekdebiet heeft, op basis van deze resultaten, nauwelijks invloed op waterstanden en HBN's in het Oosterscheldebekken. Rijkswaterstaat Z&D heeft aangegeven dat deze conclusie in lijn is in met eerdere analyses die door de beheerder van de Oosterscheldekering zelf zijn uitgevoerd. Het halveren van het lekdebiet lijkt derhalve geen zinvolle oprekmaatregel.

7.2.2 Waterveiligheidsopgave dijken en kunstwerken

Doordat uit de analyses volgt dat een gehalveerd lekdebiet van 600 m³/s vrijwel geen effect heeft op de hydraulische belastingen op de achterliggende waterkeringen, heeft dit ook geen effect op de waterveiligheidsopgave. Hiervoor zijn dus ook geen aanvullende OKADER-berekeningen gemaakt.

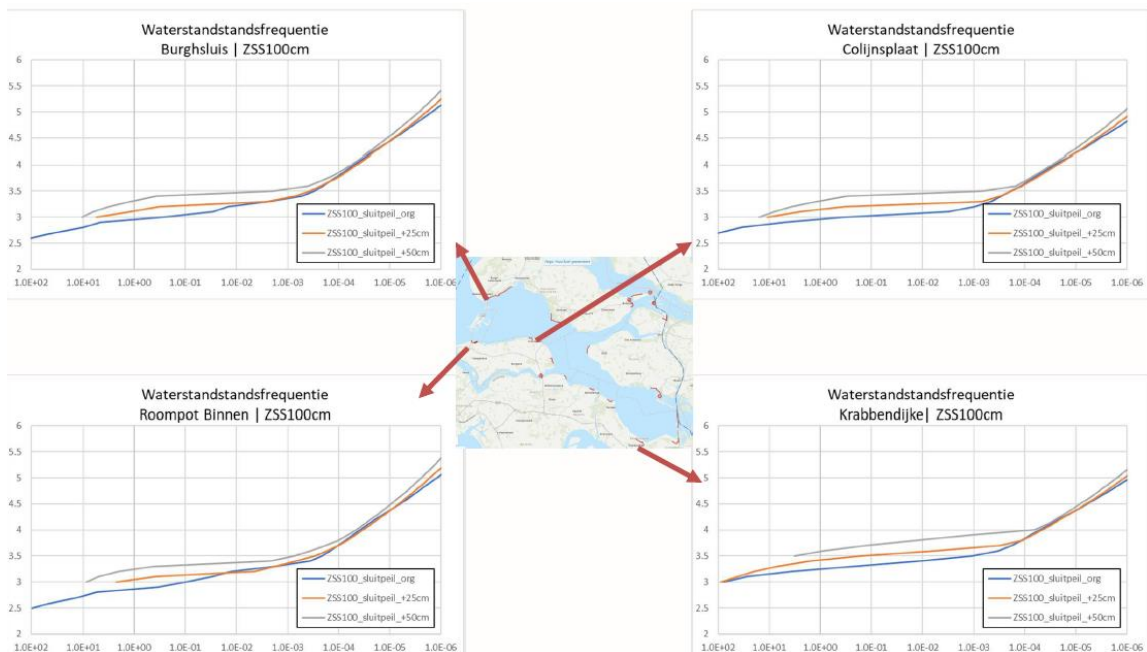
7.3 Parameter 2: Verhoging sluitpeil Oosterscheldekering

7.3.1 Hydraulische belastingen

Voor de gevoeligheidsanalyse van het sluitpeil is de basisberekening bij 1 m ZSS (C) vervangen. Er zijn twee gevoeligheidsberekeningen gemaakt, elk met een nieuwe database fysica:

- Database met 1,0 m zeespiegelstijging en verhoging sluitpeil van 25 cm.
- Database met 1,5 m zeespiegelstijging en verhoging sluitpeil van 50 cm.¹⁹

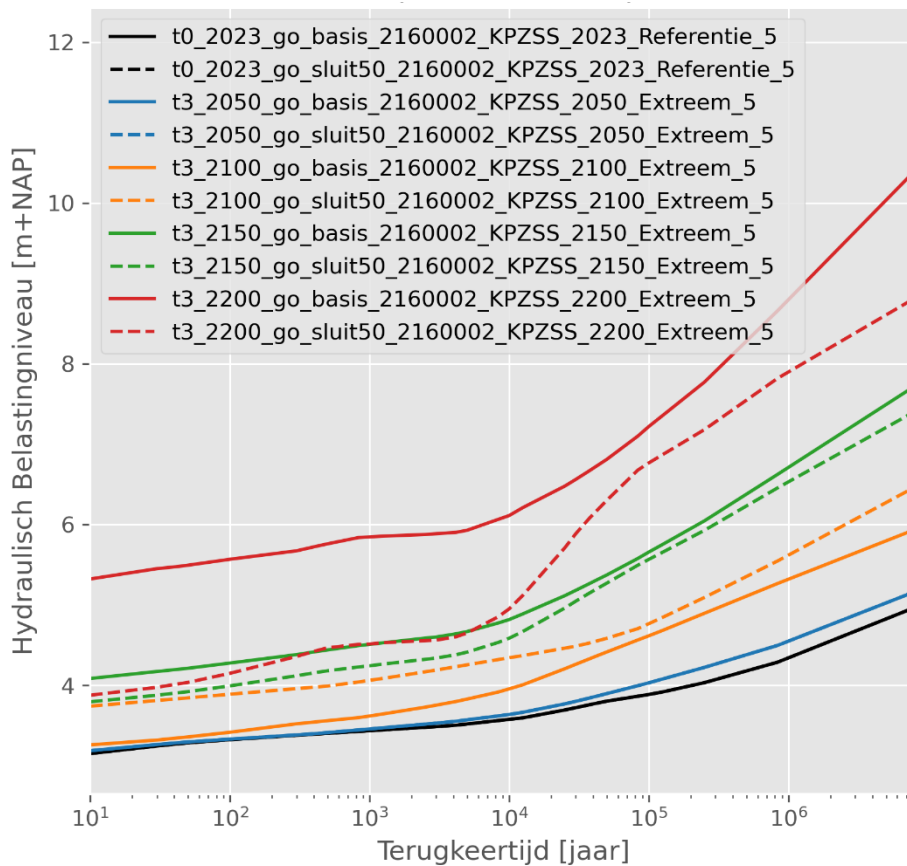
In Figuur 46 zijn waterstandsfrequentielijnen weergegeven voor vier locaties met wisselende afstanden tot de Oosterscheldekering (Burghsluis, Colijnspaat, Roompot Binnen en Krabbendijke). Te zien is dat een verhoging van het sluitpeil invloed heeft op het hele bekken, met name voor terugkeertijden kleiner dan 1.000 jaar. Dit is in lijn met eerdere resultaten in hoofdstuk 3. Bij hogere terugkeertijden nemen de waterstanden flink toe omdat het falen (niet sluiten / overlopen / overstromen) van de OSK een steeds belangrijkere rol gaat spelen. Voor die situaties is de invloed van het sluitpeil logischerwijs beperkt.



Figuur 46: Gevoeligheidsanalyse voor 4 locaties met sluitpeilverhogingen van 25 (oranje) en 50 cm (grijs) afgezet tegen de basisberekening met origineel sluitpeil (blauw).

Figuur 47 geeft een voorbeeld met frequentielijnen voor het HBN (dijkvak 2160002 Grevelingendam) voor tijdlijn Extreem voor zowel de basisberekening als de gevoeligheidsanalyse met sluitpeilverhoging van 50 cm (bij 100 cm ZSS).

¹⁹ In de invoer van Hydra-NL is in beide gevallen 'gewoon' een zeespiegelstijging van 1 m opgegeven. In het tweede geval (sluitpeil +50 cm) is dit minder zuiver, aangezien de waarden in de database zijn afgeleid met een zeespiegelstijging van 1,5 m i.p.v. 1 m. Er is gekozen voor deze database, omdat geen database fysica beschikbaar was voor het scenario met een zeespiegelstijging van 1 m en een verhoging van het sluitpeil met 50 cm.



Figuur 47: Gevoeligheidsanalyse sluitpeilverhoging 50 cm bij 100 cm ZSS: frequentielijnen HBN voor dijkvak 2160002 (Grevelingendam) tijdlijn Extreem.

De lijnen voor de referentiesituatie (zwart) en voor zichtjaar 2050 met 25 cm ZSS (blauw) veranderen niet. De lijn voor 2100 met 100 cm ZSS (oranje) gaat conform verwachting omhoog door de sluitpeilverhoging. De toename ligt tot terugkeertijden van $T = 10.000$ jaar in dezelfde orde grootte als de sluitpeilverhoging (+50cm). De lijnen voor 2150 met 180 cm ZSS (groen) en 2200 met 300 cm ZSS (rood) komen onder de resultaten uit de oorspronkelijke berekening te liggen. Dit komt doordat deze bepaald worden via extrapolatie o.b.v. 100 en 150 cm ZSS. De resultaten bij 150 cm ZSS veranderen in deze gevoeligheidsanalyse niet, waardoor de sprong tussen 100 en 150 cm in de gevoeligheidsanalyse kleiner wordt. Dat leidt tot lagere frequentielijnen in 2150 en 2200 dan in de basisberekening. Deze resultaten (groene en rode lijnen) achten we dan ook niet betrouwbaar.

7.3.2 Waterveiligheidsopgave dijken en kunstwerken

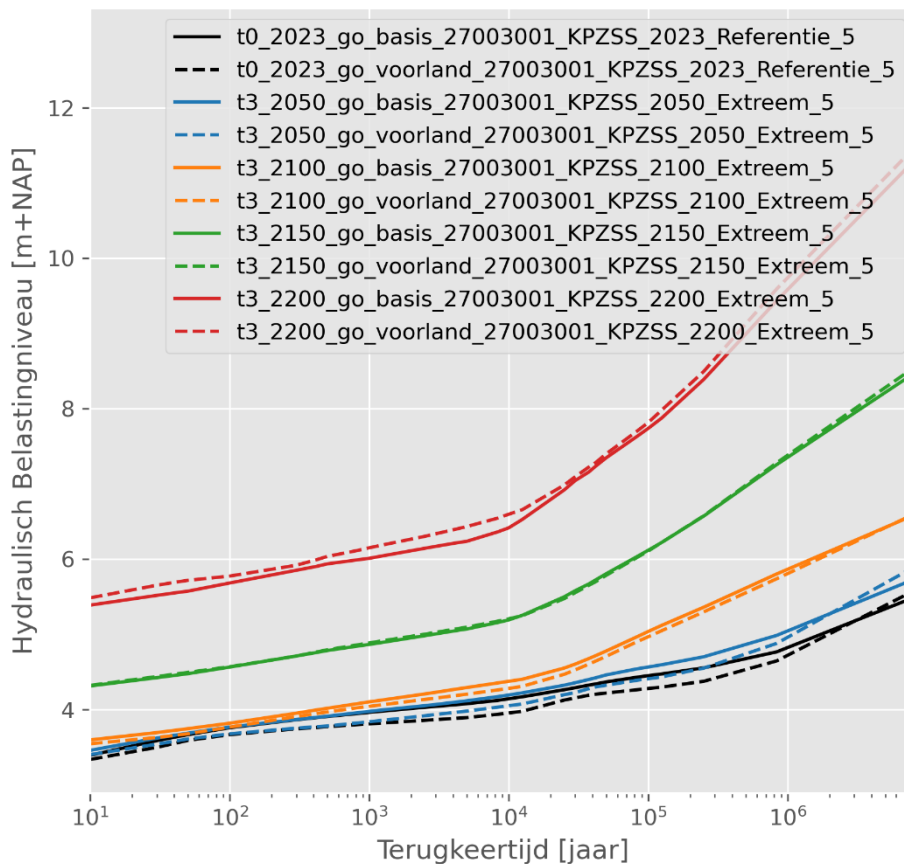
Het maken van databases fysica is een bijzonder kostbare zaak voor dit watersysteem en wordt daarom voor het doel van grootschalige studie niet rendabel geacht. Daarom is teruggevallen op het gebruik van extrapolatie, zoals beschreven in hoofdstuk 3. Het effect van verhoging van het sluitpeil op de waterveiligheidsopgave is niet kwantitatief bepaald, omdat dit niet zinnig wordt geacht voor alle tijdlijnen/zichtjaren (daarvoor is een schatting nodig van een database bij 1,50 m ZSS met sluitpeilverhoging). Dit wordt veroorzaakt door de genoemde extrapolatiemethode voor de Oosterschelde.

7.4 Parameter 3: Verhoging voorland Oosterschelde

7.4.1 Hydraulische belastingen

In deze gevoeligheidsanalyse is het effect van een verhoging van het voorland onderzocht door de voorlandprofielen met 0,5 m te verhogen. Dit is alleen gedaan bij dijkvakken waarvoor in de basisberekening daadwerkelijk met een voorland is gerekend. In totaal gaat het om 27 van de 36 OKADER vakken in de Oosterschelde.

De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd voor de tijdlijn Extreem. Figuur 48 geeft een voorbeeld met frequentielijnen voor het HBN voor dijkvak 27003001 (locatie Slaak West, noordzijde Sint Philipsland) in zowel de basisberekening als in de gevoeligheidsanalyse met een verhoogd voorland.



Figuur 48: Gevoeligheidsanalyse verhoging van het voorland met 50 cm: frequentielijnen HBN voor dijkvak 27003001 (Slaak West) tijdlijn Extreem.

De frequentielijnen voor de referentie, zichtjaar 2050 (25 cm ZSS) en zichtjaar 2100 (100 cm ZSS) nemen iets af door de verhoging van het voorland. Naarmate de ZSS toeneemt, is het effect kleiner. In 2150 (180 cm ZSS) is het effect vrijwel verdwenen en in 2200 (300 cm ZSS) neemt het HBN zelfs toe. Dat laatste is weer een gevolg van de gehanteerde extrapolatiemethode op de Oosterschelde. In werkelijkheid verwachten we hier een verwaarloosbaar effect.

Voor ongeveer 75% van de locaties constateren we dat de HBN's niet of nauwelijks wijzigen en dat bij de overige dijkvakken het effect beperkt blijft tot orde 0,1 – 0,2 m. De resultaten zijn conform verwachting, aangezien de golfremmende werking van het voorland steeds minder wordt naarmate de waterdiepte toeneemt. Het effect van een voorland dat weliswaar verhoogd is (maar niet op dezelfde

manier meegroeit als de ZSS) op de hydraulische belastingen neemt af naarmate de ZSS groter is.

7.4.2 Waterveiligheidsopgave dijken en kunstwerken

De dijkvakken waarvoor geldt dat de verhoging van het voorland met 0,5 m effect heeft op de berekende HBN's (orde 0,1 – 0,2 m) betreffen allemaal dijkvakken zonder hoogteopgave in de basisberekening. Daarom is besloten om voor deze gevoeligheidsanalyse geen OKADER-berekeningen te maken. Op voorhand is immers al duidelijk dat ook met een verhoogd voorland geen dijkversterkingen nodig zijn. De uitgevoerde gevoeligheidsanalyse heeft naar verwachting geen of nauwelijks effect op de waterveiligheidsopgave voor dijken.

Deze gevoeligheidsanalyse heeft geen effect op de hydraulische belastingen van de kunstwerken, en daarmee ook niet op de bijbehorende waterveiligheidsopgave.

7.5 Parameter 4: Effect bodemligging Westerschelde

7.5.1 Hydraulische belastingen

In paragraaf 4.3 zijn de resultaten beschreven voor de situatie dat de bodem van de Westerschelde volledig meegroeit met de zeespiegel tot 2200. Daarbij is dus géén rekening gehouden met de huidige trends in de bodemligging, of dat de bodem niet meegroeit met de zeespiegelstijging. Of dit gebeurt is onzeker en hangt ook af van (toekomstige) beleidskeuzes. Om de gevoeligheid van het veranderen van de bodem inzichtelijk te maken zijn drie scenario's doorgerekend:

1. De bodem groeit niet mee en blijft gelijk aan de huidige ligging (Niet Meegroeien, NM)
2. De bodem volgt de huidige trends (Voortzetting Trend, VT)
3. Voorkeursstrategie: De bodem groeit volledig mee met de zeespiegelstijging (Volledig Meegroeien, VM)

Uitleg bodemscenario's

Scenario 1. bodem groeit niet mee met de zeespiegelstijging en blijft gelijk (Niet Meegroeien, NM)

Voor dit scenario is de bodem gelijk gehouden aan de referentiebodembodem uit 2023. Alle SWAN-berekeningen voor verschillende zeespiegelstijgingen zijn dus met dezelfde bodem doorgerekend.

Scenario 2. bodem volgt de huidige trend (VT)

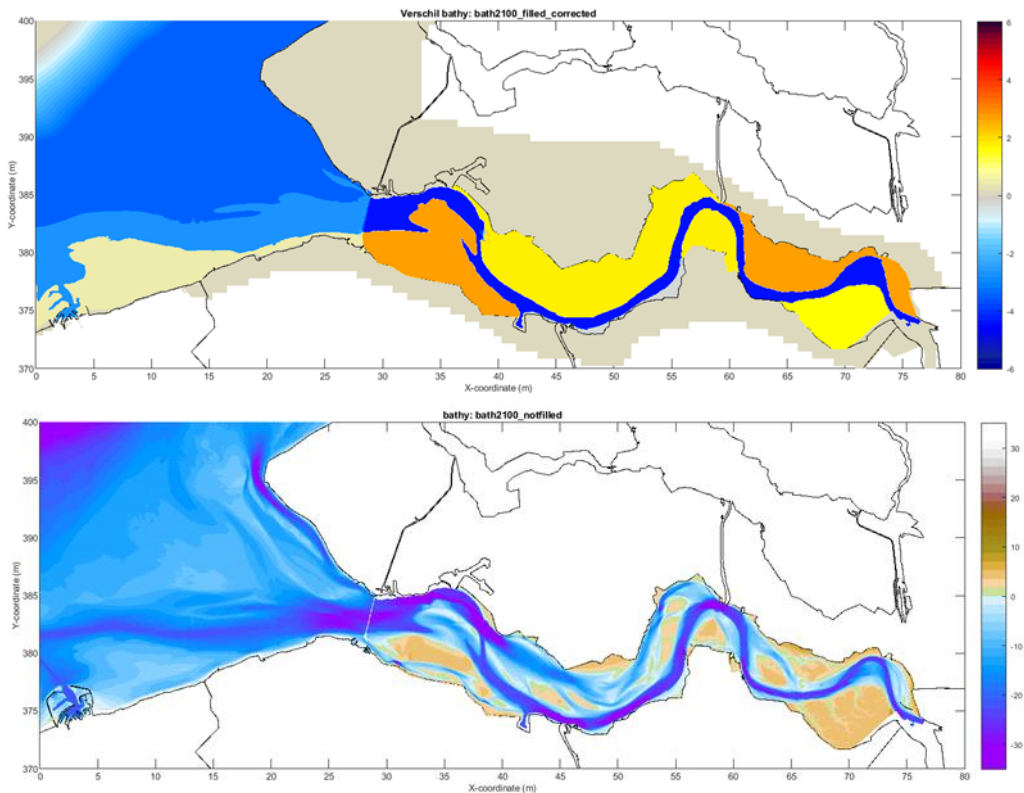
Door Deltares (2022b) zijn de huidige bodemtrends bepaald. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen het mondingsgebied (ten westen van Vlissingen-Breskens) en het oostelijk en westelijke deel van het estuarium (grens bij Hansweert). In de analyse is gebruik gemaakt van de sedimentbalansanalyse voor zowel het estuarium als voor het monding gebied [Elias et al., 2016]. Verder zijn de effecten van toekomstige zeespiegelstijging op de morfologische ontwikkelingen onderzocht aan de hand van Delft3D modellering. Een probleem hierbij is dat de inzichten uit de sedimentbalansanalyse en uit de modellering niet goed overeen komen Deltares (2022b). Ook geeft de recente stopzetting van de zandwinning een extra onzekerheid, omdat niet duidelijk is hoe het systeem hier op gaat reageren.

Voor de interne verdeling van het sediment heeft het sedimentbeheer een belangrijke invloed. Behalve de stortstrategie van gebaggerd sediment kan ook het beheer van de vaargeul zelf anders zijn in de toekomst (wel of geen verdere verruiming van de vaargeul). De volgende uitgangspunten voor de verdeling worden door Deltares voorgesteld:

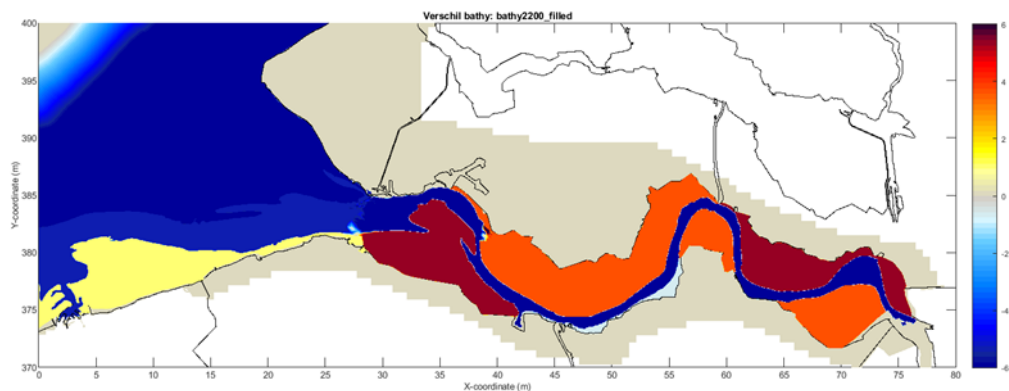
- De huidige hoofd plaat-geul structuur in het estuarium blijft in stand.

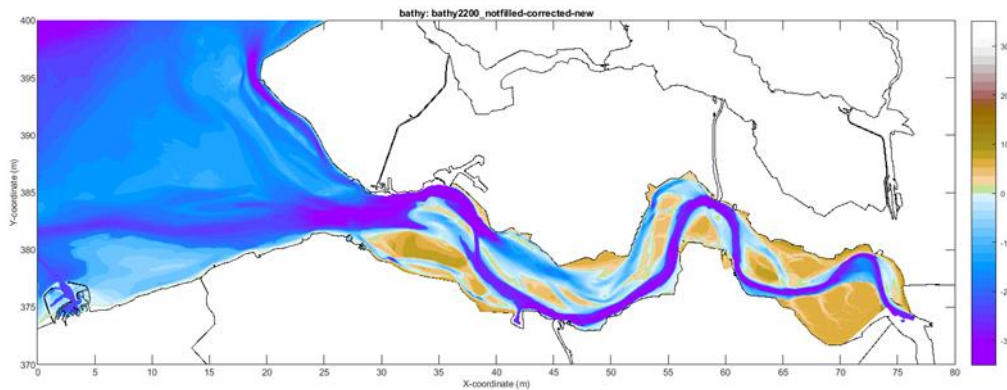
- Sedimentatie in de hoofdgeul is niet groter dan de zeespiegelstijging (vaargeuldiepte neemt niet af).
- De schorren / voorlanden van de dijken worden apart beschouwd: Volledig Meegroeien of gedeeltelijk meegroeien (nabij gelegen intergetijdengebied volgend).
- Het netto in het gebied gekomen sediment wordt gelijkmatig verdeeld over de intergetijdengebieden, de slikken en de platen. De geulen worden niet opgevuld. Hierbij wordt er van uitgegaan dat de platen niet sneller omhoog gaat dan het volledig met zeespiegelstijging groeien).

Op basis van bovenstaande beschouwing zijn nieuwe bodems gemaakt voor 2100 en 2200 (zie Figuur 49 en Figuur 50).



Figuur 49: Bodemligging Westerschelde bij Voortzetting Trend (VT) in 2100. Bovenste deel van Figuur 49 geeft de verandering weer: geel; 1,6 m, oranje; 2,4 m. Onderste deel van de figuur de bodem in 2100.





Figuur 50: Bodemligging Westerschelde bij Voortzetting Trends (VT) in 2200. Bovenste deel van Figuur 50 geeft de verandering weer en onderste deel van de figuur de bodem in 2200.

Scenario 3. Voorkeursstrategie: Volledig meegroeien bodem Westerschelde (VM)

Naast de bodem waarin uitgegaan wordt van voortzetten van de trends wordt ook berekend wat het effect is van het Volledig Meegroeien van de bodem. Resultaten van scenario 3 VM zijn reeds gepresenteerd in Hoofdstuk 4.

Voor scenario 3 zijn de volgende scenario's doorgerekend:

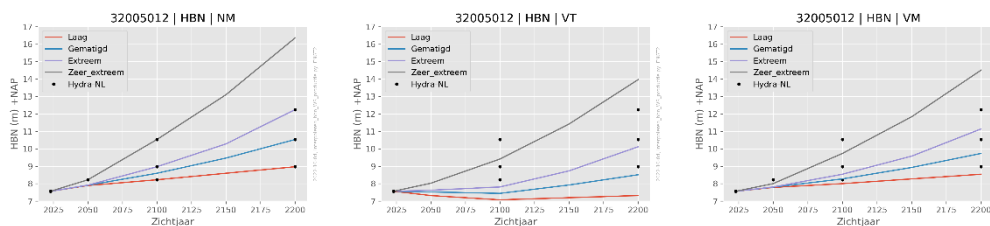
1. Gehele bodem stijgt met 0,5 m
2. Gehele bodem stijgt met 1,0 m
3. Gehele bodem stijgt met 2,0 m
4. Gehele bodem stijgt met 3,0 m

Resultaten

Met de geleverde bodems zijn SWAN2D en SWAN1D berekeningen uitgevoerd om het effect van bodemverandering op het HBN te bepalen. Voor de havens is alleen de hoogte van de haventerreinen voor het scenario Volledig Meegroeien (VM) aangepast.

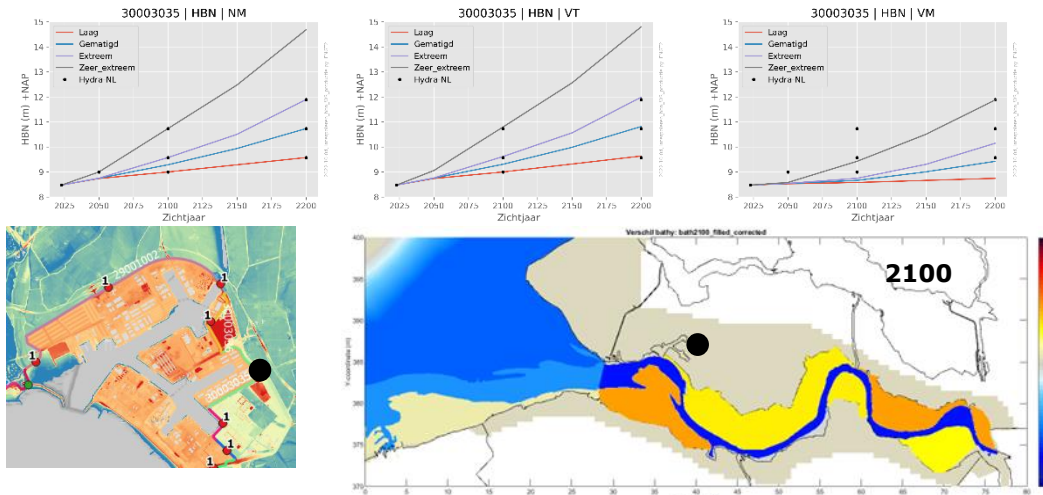
In Figuur 51 t/m Figuur 54 zijn de resultaten van alle bodemscenario's gepresenteerd.

In Figuur 51 is voor de locatie Hoofdplaat te zien dat de HBN's bij het bodemscenario Voortzetting Trends (VT) dalen ten opzichte van het bodemscenario waarbij de bodem niet verandert (NM). Dit komt omdat de trend op deze locatie positief is (sedimenterend) waardoor de toekomstige bodem aangroeit. De trend is groter dan de zeespiegelstijging bij tijdelijk Laag waardoor de HBN's zelfs afnemen ten opzichte van situatie 2023. Bij het Volledig Meegroeien nemen de HBN's af omdat de bodem meegroeit en dus de golfbelasting afneemt. De waterstandsfrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging.



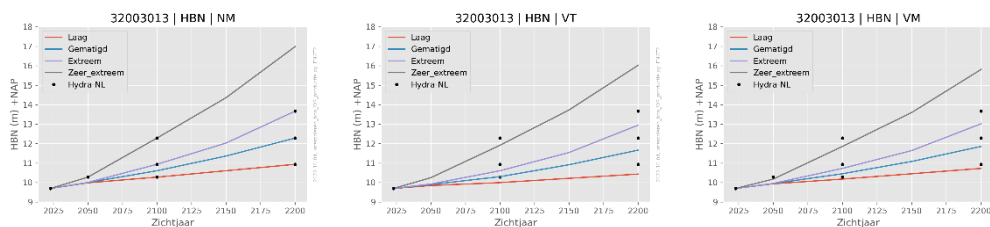
Figuur 51: HBN lijnen Hoofdplaat (SWAN1D) voor bodemscenario's: links Niet Meegroeien, midden Voortzetting Trend en rechts Volledig Meegroeien.

In Figuur 52 is te zien dat de HBN's voor de Sloehaven Vlissingen bij het bodemscenario Voortzetting Trends (VT) gelijk blijven ten opzichte van het bodemscenario waarbij de bodem niet verandert. Dit komt omdat aangenomen is dat de haventerreinen niet opgehoogd worden. Bij het Volledig Meegroeien nemen de HBN's af omdat de haventerreinen meegroeien en dus de golfbelasting afneemt. De waterstandsfrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging.



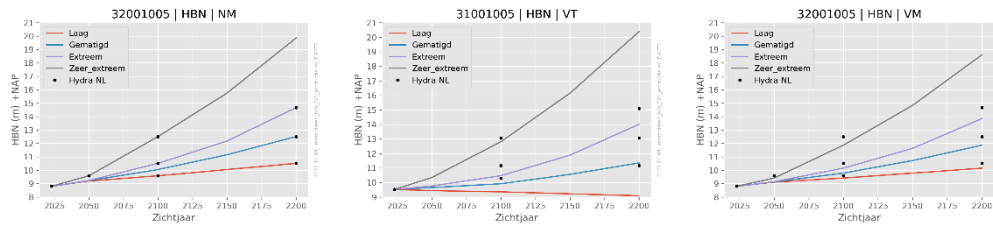
Figuur 52: HBN lijnen Vlissingen Sloehaven (havens $H_s/D < 0,5$) voor bodemscenario's: links Niet Meegroeien, midden Voortzetting Trend en rechts Volledig Meegroeien.

In Figuur 53 is te zien dat de HBN's voor locatie Griete bij het scenario Voortzetting Trends (VT) dalen ten opzichte van het bodemscenario waarbij de bodem niet verandert. Dit komt omdat de trend op deze locatie positief is (sedimenterend) waardoor de toekomstige bodem aangroeit. Bij het Volledig Meegroeien nemen de HBN's af omdat de bodem meegroeit en dus de golfbelasting afneemt. Scenario VT is ongeveer gelijk aan de zeespiegelstijging. De waterstandsfrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging.



Figuur 53: HBN lijnen Griete (SWAN2D) voor bodemscenario's links Niet Meegroeien, midden Voortzetting Trend en rechts Volledig Meegroeien.

In Figuur 54 is te zien dat de HBN's voor de locatie Saeftinge bij het scenario Voortzetting Trends (VT) dalen ten opzichte van het bodemscenario waarbij de bodem niet verandert. Dit komt omdat de trend op deze locatie positief is (sedimenterend) waardoor de toekomstige bodem aangroeit. De trend is groter dan scenario Laag waardoor de HBN's zelfs afnemen ten opzichte van situatie 2023. Bij het Volledig Meegroeien nemen de HBN's af omdat de bodem meegroeit en dus de golfbelasting afneemt. De waterstandsfrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging.



Figuur 54: HBN lijnen Saeftinghe (SWAN1D) voor bodemsenario's : links Niet Meegroeien, midden Voortzetting Trend en rechts Volledig Meegroeien.

Overzicht

Tabel 22 toont de gemiddelde stijging van het HBN ten opzichte van tijdlijn Laag voor bodemsenario Niet Meegroeien. Opvallend is dat het HBN voor Voortzetting trend groter is dan voor Niet Meegroeien. Dat komt omdat in de Westerschelde de geulen een trend hebben om verder te verdiepen. Daardoor worden de dijktrajecten die aan een geul liggen zwaarder belast dan met de huidige bodemligging. Een extra onzekerheid is dat geen rekening is gehouden met de effecten op de waterstanden.

Tabel 22: Gemiddelde stijging in HBN voor tijdlijn Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdlijn Laag voor bodemsenario Niet Meegroeien.

Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging HBN langs Westerschelde t.o.v. tijdlijn Laag voor het bodemsenario Niet Meegroeien					
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag		Zeer Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	HBN	ZSS	HBN	ZSS	HBN
2023	-	-	-	-	-	-
2050	-	+1 cm	-	+2cm	+25 cm	+29 cm
2100	+25 cm	+33 cm	+50 cm	+65 cm	+150 cm	+197 cm
2150	+56 cm	+74 cm	+105 cm	+140 cm	+275 cm	+369 cm
2200	+100 cm	+132 cm	+200 cm	+268 cm	+437 cm	+595 cm

Tabel 23 toont de gemiddelde stijging van het HBN ten opzichte van tijdlijn Laag voor bodemsenario Voortzetting Trend.

Tabel 23: Gemiddelde stijging in HBN voor tijdelijk Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdelijk Laag voor bodemscenario Voortzetting Trend.

Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging HBN langs Westerschelde t.o.v. tijdelijk Laag voor het bodemscenario Voortzetting Trend					
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag		Zeer Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	HBN	ZSS	HBN	ZSS	HBN
2023	-	-	-	-	-	-
2050	-	+7 cm	-	+10 cm	+25 cm	+45 cm
2100	+25 cm	+34 cm	+50 cm	+68 cm	+150 cm	+205 cm
2150	+56 cm	+79 cm	+105 cm	+150 cm	+275 cm	+391 cm
2200	+100 cm	+137 cm	+200 cm	+282 cm	+437 cm	+631 cm

7.5.2 Waterveiligheidsopgave dijken

De waterveiligheidsopgave (zie paragraaf 5.1) voor de Westerschelde is bepaald op basis van een vast uitgangspunt voor het bodemscenario. Voor de Westerschelde is als basisscenario Volledig Meegroeien gekozen. Om het effect van de andere bodemscenario's (Niet Meegroeien en Voortzetting Trend) inzichtelijk te krijgen, zijn de kosten voor de waterveiligheidsopgave per tijdelijk bepaald voor de overige bodemscenario's. Hieruit volgt het beeld in Figuur 55. Voor de tijdelijken Laag, Gematigd en Extreem zien we min of meer hetzelfde beeld terugkomen: bodemscenario Niet Meegroeien resulteert in de hoogste kosten en bodemscenario Voortzetting Trend de laagste kosten.

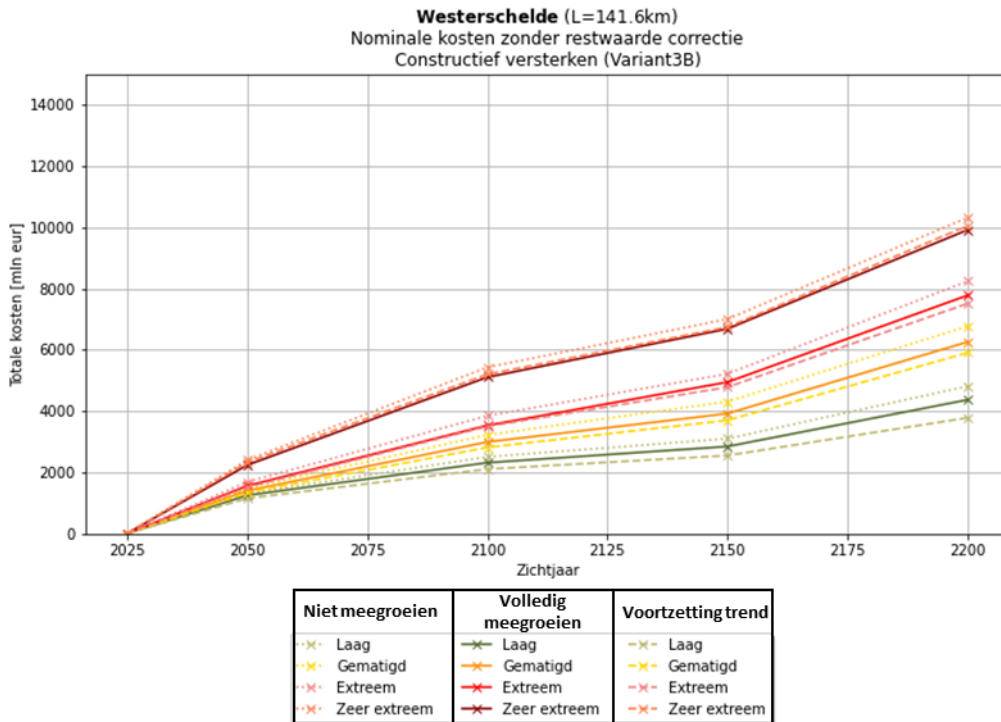
Voor tijdelijk Zeer Extreem valt op dat het scenario Volledig Meegroeien resulteert in de laagste kosten. Dit is mogelijk te verklaren door wisselende trends in scenario voortzetten trend per dijkvak, waardoor de kosten ook wisselen. Dit is verder niet onderzocht.

Gekeken naar de verschillende zichtjaren en tijdelijken resulteren de verschillende bodemscenario's in Tabel 24. Dat het verschil in nominale kosten niet 1-op-1 gelijk is aan het verschil in hydraulisch belastingniveau tussen verschillende bodemscenario's heeft verschillende redenen. Een belangrijke reden hiervoor is dat de vaste kosten van een dijkversterking gelijk blijven voor verschillende bodemscenario's en alleen de variabele kosten nemen iets afnemen.²⁰

Tabel 24: Nominale kosten in miljard euro voor de Westerschelde per tijdelijk, per zichtjaar, per bodemscenario: NM: Niet Meegroeien, VM: Volledig Meegroeien en VT: Voortzetting Trend.

Zicht-jaar	Laag			Gematigd			Extreem			Zeer Extreem		
	NM	VM	VT	NM	VM	VT	NM	VM	VT	NM	VM	VT
2050	1,3	1,2	1,1	1,5	1,4	1,3	1,7	1,6	1,5	2,4	2,2	2,3
2100	2,5	2,3	2,1	3,2	3,0	2,8	3,8	3,5	3,5	5,4	5,1	5,2
2150	3,1	2,8	2,5	4,3	3,9	3,7	5,2	4,9	4,8	7,0	6,7	6,7
2200	4,8	4,4	3,8	6,8	6,3	5,9	8,2	7,8	7,5	10,3	9,9	10,0

²⁰ Opgemerkt wordt dat de investeringskosten voor een kruinverhoging in OKADER zijn begrensd op maximaal 2 m. Dit betekent dat bij een benodigde kruinverhoging van bijv. 3,5 m, gerekend wordt met de kosten die horen bij een kruinverhoging van 2 m.



Figuur 55: (Nominale) Versterkingskosten per tijdlijn per bodemscenario in een bepaald zichtjaar.

Doordat de waterveiligheidsopgave voor de kunstwerken in de Westerschelde is gebaseerd op het mechanisme overloop, is enkel de waterstand van belang. De verandering van de bodemligging heeft geen effect op de waterstand en daarmee ook niet op de waterveiligheidsopgave van de kunstwerken.

7.6 Parameter 5: Effect van vegetatie

7.6.1 Hydraulische belastingen

In paragraaf 4.3 zijn de resultaten beschreven voor de hydraulische belastingen van de Westerschelde en het effect daarvan op de versterkingsopgave in de toekomst. Daarbij is geen rekening gehouden met de aanwezigheid van vegetatie op de voorlanden. De aanwezigheid van vegetatie op het voorland hangt af van (toekomstige) beleidskeuzes en onderhoud. Om de gevoeligheid van de aanwezigheid van vegetatie inzichtelijk te maken zijn voor verschillende locaties vegetatiescenario's doorgerekend.



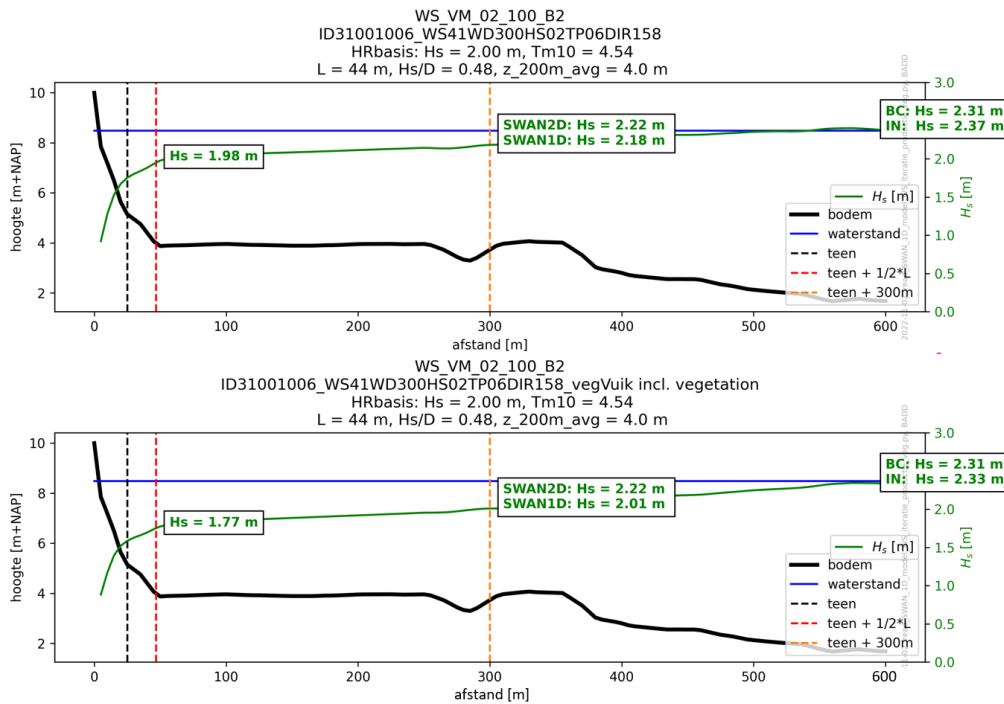
Figuur 56: Locaties in de Westerschelde waar op basis van de ecotopenkaart Westerschelde 2020 wel (groen) of geen (rood) vegetatie op het voorland aanwezig is. In geel de beschouwde locaties voor de gevoeligheidsanalyse. Platen van Valkenisse (zie cirkel) is een beschouwde locatie waarbij vegetatie op het voorland een reductie heeft van 10% op de significante golfhoogte bij de buitenteen.

Op basis van de ecotopenkaart Westerschelde 2020 [Rijkswaterstaat, 2021c] is verkend waar in de huidige situatie vegetatie aanwezig is (Figuur 53). Voor drie representatieve profielen is vervolgens voor één bodemscenario (Volledig meegroeien bij een ZSS van 1,0 m) een SWAN1D berekening gemaakt mét vegetatie. Deze berekening is vergeleken met de berekening zonder vegetatie om de impact te kunnen kwantificeren.

De vegetatieparameters zijn bepaald op basis van [Vuik et al., 2018]. Hierin is aangenomen dat vegetatie aan het begin van de storm al is afgebroken en dat dus alleen afgebroken stengels over zijn:

- Vegetatietype: *Spartina Anglica* (een zeer dicht groeiende taaie grassoort die goed tegen zout kan);
- Vegetatiehoogte: 0,05 m (gebroken vegetatie);
- Diameter van de stengels van de vegetatie: 0,0035 m;
- Aantal stengels per m²: 1190;
- Drag-coëfficiënt: 0,70.

De impact van vegetatie op de resulterende golfhoogte bij de teen van het dijklichaam is in de orde grootte van tien procent. Figuur 57 laat voor de locatie bij de Platen van Valkenisse (omcirkeld in Figuur 56) zien dat er een verschil in uitvoer in de SWAN1D berekening zit (boven: berekening zonder vegetatie, onder: berekening mét vegetatie). De reductie van ca. 10% in significante golfhoogte bij de buitenteen van de dijk is voor de verschillende onderzochte locaties terug te zien.



Figuur 57: Golfontwikkeling op locatie C zonder (boven) en met (onder) vegetatie.

Op basis van deze gevoeligheidsanalyse voor representatieve locaties in het gebied Westerschelde kan gesteld worden dat het effect van vegetatie op de golfhoogte (en daarmee het HBN) significant is. Dit komt door het type vegetatie (*Spartina Anglica*) dat een reducerende werking heeft. Naast directe invloed op de golven heeft vegetatie nog een andere belangrijke functie namelijk dat het sediment invangt (ophogen voorland) waardoor de hydraulische belastingen ook beïnvloed worden. Dit laatste effect is niet meegenomen in de berekeningen.

7.6.2 Waterveiligheidsopgave dijken en kunstwerken

De vegetatie op het voorland heeft alleen invloed op de waterveiligheidsopgave van dijken. Om de invloed inzichtelijk te maken is aangenomen dat de reductie van de significante golfhoogte van ongeveer 10% geldt voor alle mate van zeespiegelstijgingen. Als dit wordt vertaald naar de impact op het hydraulisch belastingniveau voor golfoverslag heeft dit een reducerend effect van orde 25 cm.

De invloed van de waterveiligheidsopgave maken we inzichtelijk door de opgave voor tijdlijn Extreem en tijdlijn Zeer Extreem in 2050 te vergelijken. Het verschil in zeespiegelstijging is voor deze tijdlijnen 25cm, dit geeft daarom een goede indicatie van het verschil in opgave als het HBN met 25 cm gereduceerd wordt. Hierbij is aangenomen dat de kostenverschillen puur ontstaan door het verschil in hoogteopgave, wat niet het geval is. De reductie van de opgave wordt daarmee te optimistisch ingeschat. Om hiervoor te corrigeren, passen we een factor 0,5 op de kostenreductie toe. Dit wil zeggen dat de aanname wordt gedaan dat de hoogteopgave voor 50% de kosten beïnvloedt.

De vegetatie op het voorland heeft maar effect op ongeveer 30% van de lengte van drie trajecten, namelijk 32-4, 32-2 en 31-1. Het verschil in nominale kosten in 2050 tussen tijdlijn Extreem en Zeer Extreem voor deze drie trajecten bedraagt orde 30 miljoen euro. Rekening houdend dat vegetatie slechts op 30% van de lengte een effect heeft, resulteert dit in een kostenreductie van 10 miljoen euro. Na toepassing

van de correctiefactor van 0,5 (zie bovenstaande alinea) voor het feit dat vegetatie geen invloed heeft op de piping- en macrostabiliteitsopgave blijft hier een reductie van 5 miljoen euro over. Dit is procentueel een reductie van min of meer 5%. Deze 5% reductie betreft dus de kostenreductie op 30% van de dijktrajecten 32-4, 32-2 en 31-1. Voor tijdljn Laag betreft dit een kostenreductie van 25 miljoen euro en 65 miljoen euro voor tijdljn Zeer Extreem.

Tabel 25: Invloed van vegetatie op het voorland op de nominale kosten in miljoen euro voor de gehele Westerschelde in 2200, waarbij enkel de reductie op trajecten 32-4, 32-2 en 31-1 relevant is.

	Nominale kosten in 2200 in mln. euro			
	Laag 2200 (1m ZSS)	Gematigd 2200 (2m ZSS)	Extreem 2200 (3m ZSS)	Zeer Extreem 2200 (5.4m ZSS)
Basisberekening	3.800	5.350	6.520	8.515
Voorland met vegetatie	3.775	5.305	6.470	8.450
Reductie kosten	25	45	50	65

7.7 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn diverse gevoeligheidsanalyses uitgevoerd, om de gevoeligheid van bepaalde keuzes en uitgangspunten te toetsen.

Oosterschelde

Voor de Oosterschelde is gekeken naar een aanpassing van het lekdebiet van de OSK, een verhoging van het sluitpeil van de OSK en een constante verhoging van de voorlanden. Uiteindelijk zijn voor geen van deze drie gevoeligheidsanalyses aanvullende berekeningen met OKADER gemaakt om de impact op de waterveiligheidsanalyse in beeld te brengen, aangezien:

- Het effect van het *lekdebiet* van de OSK levert weinig tot geen verandering in de hydraulische belastingen, waarmee ook de impact op de opgave voor de keringen langs de Oosterschelde verwaarloosbaar is.
- Een *verhoging van het sluitpeil* heeft juist wel een duidelijke invloed op de hoogte van de hydraulische belastingen in het bekken en verlaagd de sluitfrequentie van de stormvloedkering (positief). Helaas levert de gehanteerde extrapolatiemethode (naar 2, 3 en 5,4 m zeespiegelstijging) in dit specifieke geval onvoldoende betrouwbare resultaten om een kostenanalyse mee uit te voeren.
- Het effect van een *verhoging van de aanwezige voorlanden* met een vaste waarde van +0,5 m verdwijnt nagenoeg volledig naarmate de ZSS meer en meer toeneemt. Op de meeste plekken met een voorland is geen sprake van een opgave, waardoor de impact van deze gevoeligheidsanalyse op de waterveiligheidsopgave nauwelijks zichtbaar zal zijn. Deze is dan ook niet verder uitgevoerd.

Westerschelde

In de Westerschelde is gekeken naar de invloed van de bodemligging en een ander type vegetatie. Voor de verandering van de bodemligging is het effect op versterkingsopgave en kosten berekend met OKADER. Voor het effect van vegetatie op de versterkingsopgave en kosten bij 1 m ZSS en het bodemscenario Volledig Meegroeien is een schatting gemaakt o.b.v. de resultaten voor de verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

- Voor de Westerschelde is als basisscenario voor de bodem uitgegaan van het Volledig Meegroeien ervan met de ZSS. Om het effect van de andere bodemscenario's (Niet Meegroeien en Voortzetting Trend) inzichtelijk te krijgen, zijn de kosten voor de waterveiligheidsopgave per tijdljn bepaald voor de

- overige bodemscenario's. In alle gevallen geldt dat het effect van een ander bodemscenario veel kleiner is dan het effect van een andere tijdlijn. Het bodemscenario Niet Meegroeien levert in alle gevallen een toename in de orde van 10% van de kosten. Voortzetting Trend t.o.v. het bodemscenario Volledig Meegroeien levert een verlaging op in de kosten voor tijdlijn Laag van orde 10%. Deze verlaging wordt steeds minder naarmate de tijdlijnen extremer worden. Bij tijdlijn Zeer Extreem geeft het bodemscenario Voortzetting Trend zelfs een verhoging van de kosten t.o.v. de basisberekening van orde 1%.
- Het meenemen van vegetatie geeft een reductie van de resulterende golfhoogte aan de teen van de waterkering in de orde van 10% voor Volledig Meegroeien. Deze reductie werkt direct door in de berekende HBN's. De impact op de waterveiligheidsopgave betreft een (indicatie van de) reductie van de kosten in zichtjaar 2200: 25 miljoen euro voor tijdlijn Laag, 45 miljoen euro voor tijdlijn Gematigd, 50 miljoen euro voor tijdlijn Extreem en 65 miljoen euro voor tijdlijn Zeer Extreem. Daarnaast is er een 2^e orde effect wat de kostenreductie verder kan verhogen. Vegetatie zorgt namelijk voor ophoging van de voorlanden voor de dijk. Laatst genoemde is niet meegenomen in deze gevoeligheidsberekening.

8 Regionaal beeld en conclusies

8.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een regionaal beeld van de resultaten van de systeemanalyse voor de Zuidwestelijke delta, waarin onderzocht is wat de impact is van diverse niveaus van de zeespiegelstijging op de houdbaarheid van het huidige hoofdwatersysteem voor waterveiligheid. De consequenties daarvan zijn inzichtelijk gemaakt op de:

1. Hydraulische belastingen;
2. Versterkingsopgave en potentiële ruimtelijke knelpunten;
3. Kosten voor versterking van dijken en kunstwerken.

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

Voor vijf verschillende waarden van zeespiegelstijging (0,5, 1, 2, 3, 5,4 m) ten opzichte van 1995 volgen indicaties voor de te verwachten waterstanden en minimaal benodigde kruinhoogten in het gebied. Op basis van die informatie, gecombineerd met specifieke informatie over de aanwezige hoogte en opbouw van de waterkeringen en kunstwerken, worden uitspraken gedaan over de te verwachten versterkings- c.q. vervangingskosten. De kosten worden gepresenteerd als nominale kosten met prijspeil 2021 en rekening houdend met een constante economische groei.²¹

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

De morfologie en de bodemdaling onder de waterkering zijn twee andere factoren die variëren in de tijd. Ook zonder zeespiegelstijging zullen deze twee factoren zorgen voor een waterveiligheidsopgave. Op basis van bovenstaande constatering wordt het beeld voor de kosten besproken aan de hand van een bepaalde mate van zeespiegelstijging, morfologie en bodemdaling onder de waterkering passend bij het zichtjaar 2200. We merken op dat de kosten in deze studie zijn bepaald op basis van een perfecte voorspelling van de zeespiegelstijging. In werkelijkheid is de

²¹ De recente kostenstijgingen die hoger zijn dan de gemiddelde prijspeilontwikkeling waarvan is uitgegaan, zijn hier niet in meegenomen.

snelheid waarmee de zeespiegel stijgt onzeker en wordt geprobeerd die binnen een ontwerpproject zo goed mogelijk in te schatten voor een periode van 50 jaar (levensduur ontwerp).

Op dit moment voldoen nog niet alle waterkeringen aan de norm uit de Waterwet en zijn ook nog niet alle waterkeringen aangemeld voor een versterkingsronde binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma. Om op een landelijk consistente manier verschillende watersystemen met elkaar te kunnen vergelijken, is aangenomen dat alle dijken en kunstwerken in 2050 minimaal voldoen aan de norm in de Waterwet ("systeem op orde"). Zo wordt een knip gelegd tussen de kosten die gemaakt moeten worden om aan de nieuwe normen te voldoen en de kosten die gemaakt moeten worden door zeespiegelstijging.

8.2 Invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen

In deze paragraaf beschouwen we de invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen (golven en waterstanden) voor de Oosterschelde en Westerschelde. Deze beschouwing is gebaseerd op de (lengte-)gemiddelde waterstand of hydraulische belastingniveau voor golfoverslag voor een dijktraject en vervolgens voor de hele Oosterschelde en Westerschelde.

8.2.1 Impact op de waterstanden

Door de beleidskeuze om de bodem mee te laten groeien met de zeespiegelstijging, nemen de waterstanden voor de Westerschelde evenveel toe als de zeespiegelstijging. Voor de Oosterschelde zorgt de werking van de Oosterscheldekering ervoor dat de waterstand bij de norm minder toeneemt dan de zeespiegelstijging. De stijging van de waterstanden op de Oosterschelde is dus lager ten opzichte van de Westerschelde maar met toenemende zeespiegelstijging wordt dit verschil kleiner, omdat bij hogere zeespiegelniveaus de faalkans van de Oosterscheldekering en het overlopen ervan een steeds belangrijkere rol gaan spelen.

8.2.2 Impact op de hydraulische belastingniveaus voor golfoverslag

In Tabel 26 is de gemiddelde stijging van de hydraulische belastingniveaus voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging uiteengezet voor de Oosterschelde en de Westerschelde. Daarbij is de zeespiegelstijging telkens gekoppeld aan het resultaat voor een bepaalde tijdlijn en zichtjaar 2200 (zie Figuur 32). De resultaten zijn steeds relatief beschouwd ten opzichte van tijdlijn Laag in 2050. De resultaten voor een zeespiegelstijging van 0,5 m zijn ook beschikbaar, maar derhalve niet gerapporteerd omdat deze zijn afgeleid voor zichtjaar 2100.

Tabel 26: Gemiddelde stijging van het hydraulisch belastingniveau voor golfoverslag (HBN) ten opzichte van het hydraulisch belastingniveau in 2050 (met daarin een zeespiegelstijging van 0,25 m ten opzichte van 1995) voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging (ZSS) ten opzichte van 1995 voor de Oosterschelde en bij bodemscenario Volledig Meegroeien voor de Westerschelde. De morfologie van de Westerschelde en de bodemdaling in de zuidwestelijke delta passen bij zichtjaar 2200. Aanpassing van het sluitpeil van de Oosterscheldekering is hierin meegenomen, zie paragraaf 3.2.

		Gemiddelde stijging HBN in 2200 ten opzichte van het HBN voor tijdlijn Laag in 2050 (ZSS 0,25 m)
--	--	--

ZSS ten opzichte van 1995	ZSS ten opzichte van 2050	Oosterschelde	Westerschelde (Volledig Meegroeien)
1,0 m	0,75 m	0,35	0,8
2,0 m	1,75 m	1,5	2,0
3,0 m	2,75 m	2,65	3,2
5,4 m	5,15 m	Niet bepaald	6,0

Ter illustratie beschouwen we een zeespiegelstijging van +2 m ten opzichte van 1995. Dit komt overeen met een zeespiegelstijging van +1,75 m ten opzichte van 2050. Een zeespiegelstijging van +1,75 m ten opzichte van 2050 geeft een toename van het hydraulisch belastingniveau van ongeveer 1,5 m op de Oosterschelde en bij het bodemscenario Volledig Meegroeien op de Westerschelde van ongeveer 2,0 m. Zoals opgemerkt zouden bij het bodemscenario Volledig Meegroeien de waterstanden en hydraulisch belastingniveaus voor de Westerschelde even hard meegroeien met de zeespiegelstijging. We zien dat de hydraulisch belastingniveaus voor de Westerschelde uit Tabel 26 hoger zijn dan alleen de mate van zeespiegelstijging, vanwege de toepassing van de illustratiepuntenmethode. In paragraaf 4.4 en notitie van Rijkswaterstaat (2023a) wordt dit nader toegelicht.

Bij een niet te grote mate van zeespiegelstijging zien we dat de hydraulische belastingniveaus op de Oosterschelde duidelijk lager zijn dan de stijging van de zeespiegelstijging. Dat komt door de aanwezigheid van de Oosterscheldekering. Dit effect neemt af naarmate de zeespiegelstijging verder toeneemt, omdat de effectiviteit van de Oosterscheldekering afneemt. De afname van de kerende effectiviteit van de stormvloedkering wordt onder andere veroorzaakt doordat deze gaat overlopen en niet zal sluiten wanneer dat wel zou moeten (vaker een kans op niet-sluiten door een verhoogde sluitvraag). Op de Westerschelde nemen de hydraulische belastingniveaus (en bij lagere zeespiegelstijging veel meer) meer toe dan op de Oosterschelde: de toename van de hydraulische belastingniveaus op de Westerschelde liggen vaak in de orde van meerdere decimeters boven de zeespiegelstijging, wat komt door de onnauwkeurigheid²² in de illustratiepuntenmethode bij het bodemscenario Volledig Meegroeien. De belangrijkste oorzaak voor het verschil in doorwerking van de zeespiegelstijging tussen de Ooster- en Westerschelde wordt veroorzaakt door de Oosterscheldekering. Deze neemt nog een deel van de consequenties van een stijgende zeespiegelstijging weg. Dat de hydraulische belastingniveaus op de Oosterschelde méér toenemen dan de zeespiegelstijging zelf is niet verwonderlijk, omdat niet alleen de waterstanden, maar ook de golfcondities toenemen als de zeespiegelstijging stijgt. Merk op dat de resultaten op de Oosterschelde nog vertekend worden door aanpassingen aan het sluitpeil van de Oosterscheldekering.

8.2.3 Werking van de Oosterscheldekering

In deze studie is een hydraulisch model gehanteerd waarin is uitgegaan van de Oosterscheldekering in de huidige situatie en daarmee voldoet aan de huidige overstromingskansnorm. Door zeespiegelstijging zal de Oosterscheldekering bij waterstanden vanaf ongeveer 5,6 – 5,8 m+NAP beginnen met overlopen en daarmee zijn functie om de hydraulische belastingen in het achterliggend gebied te beperken, verliezen. De aanname dat de Oosterscheldekering nog kan functioneren ten tijden dat deze overstroomt dient verder onderzocht te worden, evenals de

²² De hydraulische belastingniveaus voor de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien worden met circa 20% worden overschat door de illustratiepuntenmethode. In werkelijkheid is dit niet het geval: als de bodem volledig meegroeit met de zeespiegelstijging veranderen de waterstanden en de golven niet.

constructieve sterkte in deze situaties. Verder is in het model rekening gehouden met het lekdebiet (water dat door de kering stroomt) en water dat door golfoverslag over de kering slaat.

De Oosterscheldekering zal door zeespiegelstijging bij handhaving van het huidige sluitpeil van NAP+3,0 m vaker moeten sluiten. Door het sluitpeil te verhogen zal de Oosterscheldekering bij eenzelfde mate van zeespiegelstijging minder vaak hoeven te sluiten wat de natuurlijke dynamiek in het estuarium ten goede komt alsmede de slijtage van de kering beperkt. Het nadelige effect van een verhoogd sluitpeil is de toename van de hydraulische belastingen op de achterliggende keringen.

Het aantal keren dat de stormvloedkering van de Oosterschelde sluit per jaar (en daarmee het aantal keren dat de stormvloedkering faalt) speelt onder andere een rol voor de veiligheid van de achterliggende primaire waterkeringen. De sluiting van de Oosterscheldekering is gekoppeld aan het overschrijden van een bepaald sluitpeil. Hoe hoger dit sluitpeil, hoe later (en hoe minder vaak) de kering sluit. Als de zeespiegel maar ver genoeg stijgt, zal de Oosterscheldekering steeds vaker moeten sluiten en uiteindelijk permanent gesloten zijn als het sluitpeil niet wordt aangepast.

Er zijn diverse onderzoeken gedaan naar de toename van het aantal sluitingen van de Oosterscheldekering als functie van een toename van de zeewaterstand, zie bijvoorbeeld [Tauw, Altenburg & Wymenga en HKV, 2019] en [HKV, 2022a]. De gehanteerde gegevens en de manier waarop het aantal sluitingen is bepaald, verschilt per studie. De algemene conclusie is dat de Oosterscheldekering meerdere keren per jaar (oplopend naar tientallen keren per jaar bij 1,5 m zeespiegelstijging) gesloten zal moeten worden bij gelijkblijvend sluitpeil.

Tabel 27 geeft een indicatie van het aantal sluitingen als functie van de zeespiegelstijging, zoals bepaald in [HKV, 2022a]. Merk op dat de berekening met 1,0 m zeespiegelstijging tweemaal is weergegeven. Eenmaal is uitgegaan van een verhoogd sluitpeil, in tegenstelling tot variant eerder in dit rapport beschreven.

Tabel 27: Sluitfrequenties Oosterscheldekering bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging.

Zeespiegelstijging [m]	Sluitfrequentie [keer/jaar]	Sluitpeil OSK [m+NAP]
0,0*	0,6	3,00
0,3*	2,0	3,00
0,5*	4,6	3,00
1,0**	45	3,00
1,0*	11	3,25
1,5*	46	3,50

*) bron: [HKV, 2022a].

***) bron: berekening voor KP ZSS fase 2 met zelfde uitgangspunten als [HKV, 2022a].

De sluitfrequentie zal nog verder toenemen voor een zeespiegelstijging van 3 of 5 m, hiervoor zijn op dit moment geen databases met hydraulische gegevens beschikbaar om dit te berekenen. Het is daarmee ook niet te stellen hoeveel impact de sluitfrequentie bij hogere mate van zeespiegelstijging heeft op de hydraulische belastingen bij de normfrequentie en daarmee op de waterveiligheidsopgave. Opgemerkt wordt dat het vaker sluiten van de Oosterscheldekering met name effect heeft op andere functies, zoals het beheer en onderhoud van de

Oosterscheldekering, natuur/ecologie en morfologie. Deze effecten zijn in deze studie niet onderzocht.

8.3 Versterkingsopgave per watersysteem

De impact van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave voor de dijken en kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkering langs de Oosterschelde en Westerschelde is bepaald. Het vertrekpunt voor het bepalen van het effect van zeespiegelstijging op de kosten is de situatie dat alle dijken en kunstwerken minimaal voldoen aan de huidige overstromingskans in 2050. In deze paragraaf wordt de versterkingsopgave ten opzichte van de huidige situatie (zichtjaar 2023) toegelicht, waarbij dus geldt dat alleen de extra versterkingsopgave ten opzichte van "systeem op orde" relevant is voor het bepalen van de kosten

In Tabel 28 is de gemiddelde hoogteopgave ten opzichte van de huidige situatie (zichtjaar 2023)²³ weergegeven, waarbij is gemiddeld over alleen de te versterken dijkvakken per dijktraject en vervolgens over alle dijktrajecten langs de Oosterschelde en Westerschelde.

Voor de Oosterschelde is de gemiddelde hoogteopgave kleiner dan de mate van de zeespiegelstijging, door het functioneren van de Oosterscheldekering. Voor de Westerschelde zou de gemiddelde hoogteopgave bij het bodemscenario Volledig Meegroeien gelijk moeten toenemen met de mate van zeespiegelstijging als er geen resthoogte meer in het watersysteem zit. Daarbij hoort ook de constatering dat voor de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien de hydraulische belastingniveaus met circa 20% worden overschat, waardoor de – in deze studie berekende – hoogteopgave bij het bodemscenario Volledig Meegroeien, dus groter zal zijn dan de zeespiegelstijging als de dijken geen resthoogte meer hebben.

Voor zowel de Oosterschelde als de Westerschelde geldt dat een deel van de dijken - uitgaande van de huidige kruinhoogte - wel resthoogte hebben. Zo zorgt een zeespiegelstijging van 1 m voor een hoogteopgave langs de Oosterschelde slechts bij 4 dijktrajecten (219, 26-2, 27-1 en 27-2). Langs de Westerschelde wordt voor bijna alle dijktrajecten een hoogteopgave berekend bij een zeespiegelstijging van 1 m, maar is de hoogteopgave voor de helft van de dijktrajecten wel kleiner dan 1 m.

Bij een zeespiegelstijging van 3 m wordt een hoogteopgave berekend voor vrijwel alle dijktrajecten langs de Oosterschelde (behalve 216 en 221) en Westerschelde, (behalve 222). Voor de meeste dijktrajecten langs de Oosterschelde is de hoogteopgave ook bij een zeespiegelstijging van 3 m nog kleiner dan 3 m, door de effectiviteit van de Oosterscheldekering en de aanwezige resthoogte in het systeem. Voor de dijktrajecten langs de Westerschelde varieert de hoogteopgave bij een zeespiegelstijging van 3 m tussen circa 1,6 – 6,4 m, waarbij de grootste hoogteopgaves worden berekend voor de trajecten 30-2, 31-1 en 223 vanwege de hogere golven en strengere normen voor deze dijktrajecten.

Gemiddeld over alle dijktrajecten per watersysteem is de – in deze berekende studie - hoogteopgave voor de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien circa 2x zo groot als voor de Oosterschelde. Hierbij inachtneming de overschatting

²³ Opgemerkt wordt dat de versterkingsopgave is bepaald ten opzichte van zichtjaar 2023, terwijl de zeespiegelstijging is uitgedrukt ten opzichte van 1995. De zeespiegelstijging van 2023 ten opzichte van 1995 is ongeveer +5 cm.

van de hydraulische belastingniveaus langs de Westerschelde voor het bodemscenario Volledig Meegroeien.

Tabel 28: Gemiddelde hoogteopgave voor de Oosterschelde en Westerschelde op basis van alleen de versterken trajecten per watersysteem voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van 1995.

ZSS t.o.v. 1995 [m]	Gemiddelde hoogteopgave ten opzichte van 2023 over alleen te versterken trajecten per watersysteem					
	Oosterschelde			Westerschelde		
	minimum*	gemiddeld	maximum	minimum	gemiddeld	maximum
1,0 m	0,2	0,7	0,9	0,2	1,6	3,9
2,0 m	0,5	1,3	2,2	0,8	2,5	5,2
3,0 m	0,1	1,7	3,7	1,6	3,6	6,4
5,4 m		-		2,8	6,2	9,8

*Met het minimum wordt de kleinste opgave voor een traject bepaald. Hierdoor kan het zijn dat de opgave voor 3,0 m zeespiegelstijging lager uitvalt dan voor 2,0 m, aangezien een ander traject (die nog niet versterkt werd bij 2,0 m zeespiegelstijging) zorgt voor het minimum.

De versterkingsopgave voor piping en macrostabiliteit is vergeleken met bijv. het rivierengebied beperkt²⁴. Bij een zeespiegelstijging van 1,0 m wordt langs de Oosterschelde maar voor enkele dijktrajecten een versterkingsopgave voor piping en/of macrostabiliteit berekend en langs de Westerschelde voor de meeste dijktrajecten voor bijna alle dijktrajecten. De benodigde taludverflauwing voor het faalmechanisme macrostabiliteit leidt gemiddeld over alleen de te versterken trajecten tot een verbreding van de dijkbasis van circa 10 - 15 m bij een zeespiegelstijging van 1 en 3 m ten opzichte van 1995. De maximale opgave voor macrostabiliteit is circa 20 m.

De benodigde verbreding van de dijkbasis (extra kwelweglengte) voor het faalmechanisme piping leidt tot grotere opgaven, met name voor dijktrajecten 26-2, 27-1- en 27-2 langs de Oosterschelde²⁵ en dijktrajecten 30-2 en 30-3 langs de Westerschelde. Bij een zeespiegelstijging van 1 m en 3 m is de gemiddelde opgave over alle te versterken trajecten voor de verbreding van de dijkbasis langs de Oosterschelde respectievelijk 15 m en 45 m, met een maximum van meer dan 100 m. Langs de Westerschelde betreft de gemiddelde opgave over alle te versterken trajecten bij een zeespiegelstijging van 1 m en 3 m respectievelijk 30 en 50 m, met een maximum van minder dan 100 m. Het ruimtebeslag dat bij de versterkingsopgave hoort is afhankelijk van de versterkingsstrategie (volledige grondoplossing of een combinatie met constructieve maatregelen).

De hoogteopgave voor de kunstwerken is gebaseerd op globale kenmerken, die kunnen afwijken van de gedetailleerdere gegevens die beschikbaar zijn uit de eerste ronde van de Landelijke Beoordeling (LBO1).

²⁴ Dit is het gevolg van het gekozen uitgangspunt binnen KP ZSS dat de waterkeringen die nu niet gevoelig zijn t.a.v. macrostabiliteit of piping dat ook niet in de toekomst ook niet zijn. Dit is niet nader onderzocht.

²⁵ Door de beperkte set met uitvoerlocaties, kent de opgave langs de Oosterschelde wel een grote mate van onzekerheid.

8.4 Kosten voor verschillende niveaus van ZSS

De kosten voor de waterveiligheidsopgave voor de dijken en kunstwerken in het Waddengebied zijn bepaald voor drie situaties:

1. Kosten tot en met 2050 voor tijdelijk Laag waarbij alle dijken en kunstwerken tenminste voldoen aan de norm ("systeem op orde"); zie Tabel 29 in paragraaf 8.4.1.
2. Kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van 2023; zie Tabel 30 in paragraaf 8.4.2. Dit zijn de kosten die horen bij de opgave in Tabel 28.
3. Kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van de situatie "systeem op orde" tot en met 2050; zie Tabel 31 in paragraaf 8.4.3.

De kosten gelden voor de basisversterkingsstrategie voor de dijken: traditionele versterking (business as usual), dat wil zeggen een grondoplossing zo lang het ruimtelijk past en anders constructieve maatregelen. Voor de kunstwerken zijn de kosten gepresenteerd voor de strategie die tot de laagste kosten leidt: aanpassing van object bij hoogtetekort zodat deze voldoet tot einde levensduur of volledige vervanging bij een hoogtetekort.

8.4.1 Kosten tot en met 2050 voor Systeem op orde

De kosten voor Systeem op orde zijn opgenomen in Tabel 29. Deze zijn ongeveer 1,1 miljard euro voor de Oosterschelde en 1,4 miljard euro voor de Westerschelde voor alle primaire waterkeringen van dijken en kunstwerken. Deze kosten worden voor meer dan 90% bepaald door de dijken (en dammen). De kosten voor de versterking van de Oosterscheldekering zijn hierin nog niet meegenomen. De huidige vervangingswaarde wordt orde grootte geraamd op 6 miljard euro. De kosten worden niet gecorrigeerd voor reststerkte, om ervoor te zorgen dat de kosten voor het 'op orde' komen buiten de analyses van het KP ZSS blijven. De tijdlijnen worden immers met deze kosten gecorrigeerd (zie paragraaf 8.4.3).

Een duidelijke kanttekening is dat de kosten voor 'Systeem op orde' per definitie afwijken van de werkelijke kosten van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), omdat hier een grovere aanpak wordt gehanteerd voor het bepalen van de veiligheidsopgave met landelijk uniforme uitgangspunten en kostenramingen op basis van KOSWAT. De ramingen kunnen op dijkvakken afwijken van de werkelijke kosten vanwege lokale complexiteit, of omdat bijvoorbeeld in de praktijk in (locatie)specifieke gevallen andere ontwerpkeuzes gemaakt worden.

Tabel 29: Nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor Oosterschelde en Westerschelde voor "systeem op orde" tot en met 2050. Voor Systeem op orde zijn dit de kosten tot en met 2050, waarbij gecorrigeerd is voor de reststerkte na 2050. De kosten voor de Oosterschelde zijn exclusief de huidige vervangingswaarde van de Oosterscheldekering die geschat zijn op 6 miljard euro.

ZSS ten opzichte van 1995 (0,25 – 0,5 m)	Nominale kosten in miljard euro				
	Totaal OS+WS dijken en kunstwerken	Oosterschelde		Westerschelde	
		Dijken	Kunstwerken	Dijken	Kunstwerken
Systeem op orde	2,5	1,1	< 0,05	1,2	0,2

8.4.2 Kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van de huidige situatie in zichtjaar 2023

De kosten voor het versterken van de dijken en kunstwerken van de Oosterschelde en Westerschelde zijn bepaald voor een zeespiegelstijging van 1 m, 2 m, 3 m, en 5,4 m. In Tabel 30 zijn de kosten passend bij zichtjaar 2200 opgenomen ten opzichte van 2023, waarbij de dijken en kunstwerken uiteindelijk precies voldoen aan de norm in zichtjaar 2200 bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging.

Dit betekent dat de waterkeringen in 2200 geen reststerkte hebben (alleen de kosten zijn hiervoor gecorrigeerd, niet de hoogte- en sterkteopgaves). De kosten lopen uiteen van orde 8 miljard euro voor 1 m zeespiegelstijging tot bijna 14 miljard euro voor 3 m zeespiegelstijging. Als de zeespiegel sneller stijgt wil dat zeggen dat hetzelfde niveau van zeespiegelstijging eerder optreedt (bijv. 2 m in zichtjaar 2100 i.p.v. 2 m in zichtjaar 2200). Hierdoor zullen de absolute nominale kosten voor dezelfde mate van zeespiegelstijging lager zijn, omdat minder versterkingsrondes nodig zijn. Minder versterkingsrondes betekent een minder grote bijdrage aan de vaste kosten (wat de belangrijkste kostenpost is) en dus lagere vaste kosten. Bij snellere zeespiegelstijging zijn de kosten per versterkingsronde (iedere 50 jaar) wel hoger (en dus je kosten in de tijd), omdat de opgave per versterkingsronde groter is.

Tabel 30: Nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor Oosterschelde en Westerschelde voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging met uitgangspunt zichtjaar 2200 (ten behoeve van bodemdaling en een vijftigjarige versterkingscyclus) ten opzichte van de huidige situatie 2023 voor het bodemscenario Volledig Meegroeien voor de Westerschelde. Hierbij geldt dat alle keringen precies voldoen in 2200 bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging en waarbij geen rekening is gehouden met de reststerkte na 2200.

ZSS ten opzichte van 1995	Nominale kosten in miljard euro				
	Totaal OS+WS dijken en kunstwerken	Oosterschelde		Westerschelde	
		Dijken	Kunstwerken	Dijken	Kunstwerken
1,0 m	8,3	2,2	0,7	3,8	1,6
2,0 m	11,6	3,9	0,7	5,3	1,6
3,0 m	13,8	4,9	0,7	6,5	1,7
5,4 m	Niet bepaald	Niet bepaald	Niet bepaald	8,5	1,9

De kosten worden voornamelijk bepaald door versterking van de dijken (70 – 90%) en in mindere mate door de kunstwerken (10 – 30%, waarbij geldt dat de kosten voor het vervangen van de Oosterscheldekering met een huidige vervangingswaarde van 6 miljard euro niet zijn meegenomen). Wanneer de vervanging van de Oosterscheldekering buiten beschouwing gelaten wordt, hebben de kunstwerken Krammersluizen, Sluizencomplex Hansweert en Sluizencomplex Terneuzen de grootste bijdrage aan de totale kosten. Daarnaast vormen de kosten voor de installatie, het onderhoud en gebruik van de pompen bij de Bathse spuisluis een significant aandeel van de totale kosten. Opgemerkt wordt dat de kosten voor het versterken en vervanging van de kunstwerken zeer beperkt toenemen met een toenemende zeespiegelstijging. Dit komt doordat de meeste kunstwerken gelijktijdig het einde van hun levensduur hebben bereikt en de vervangingskosten onafhankelijk van de kerende hoogte is verondersteld.

Als wel rekening wordt gehouden met de vervangingskosten voor de Oosterscheldekering van circa 9 miljard euro tot 2200 die voor deze studie zijn geraamd (bestaande uit één keer gedeeltelijk vervangen van circa 3 miljard euro

en één keer volledig vervangen van circa 6 miljard euro), dan zijn de totale kosten te verdelen over de Oosterschelde en Westerschelde via respectievelijk 60% en 40%. Hierbij geldt dat de versterkingskosten voor de dijken langs de Oosterschelde lager zijn dan voor de Westerschelde, doordat de Oosterscheldekering een belangrijke dempende functie heeft op de hydraulische belastingen in de Oosterschelde.

8.4.3 Kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van het Systeem op orde tot en met zichtjaar 2050

Gevraagd is om ook inzicht te bieden in de bijdrage van alleen zeespiegelstijging op de versterkingskosten. In Tabel 31 staan de nominale kosten in zichtjaar 2200 voor het versterken van de dijken en kunstwerken. Daarbij voldoen deze precies aan de norm bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging en verminderd met de totale (niet gecorrigeerde) kosten die vóór 2050 gemaakt worden (tijdlijn Laag) om het systeem op orde te brengen. Opgemerkt wordt dat de opgave voor de dijken - naast zeespiegelstijging - ook wordt veroorzaakt door autonome bodemdaling. Dat betekent dat alleen bodemdaling ook tot een opgave zal leiden.

Tabel 31: Toename van de nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor Oosterschelde en Westerschelde voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200 ten opzichte van de nominale kosten voor systeem op orde met zichtjaar 2050 voor het bodemscenario Volledig Meegroeien voor de Westerschelde.

ZSS t.o.v. 1995	ZSS t.o.v. 2050	Nominale kosten in miljard euro				
		Totaal OS+WS dijken en kunstwerken	Oosterschelde		Westerschelde	
			Dijken	Kunstwerk en	Dijken	Kunstwer ken
1,0 m	0,75 m	5,8	1,1	0,7	2,6	1,4
2,0 m	1,75 m	9,0	2,8	0,7	4,1	1,4
3,0 m	2,75 m	11,3	3,8	0,7	5,3	1,5
5,4 m	5,15 m	Niet bepaald	Niet bepaald	Niet bepaald	7,3	1,7

8.4.4 Kosten per te versterken km dijk

De kosten per kilometer te versterken dijk zijn een goede parameter om de orde grootte kosten voor zeespiegelstijging in perspectief te plaatsen. De kosten per kilometer geven ook inzicht hoe deze zich verhouden tot de - in deze studie berekende - dijkversterkingskosten binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (anno 2022), gegeven het huidige prijspeil. In Tabel 32 staat voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging het aantal te versterken kilometers²⁶ en de nominale kosten per km op basis van het totaal aantal te versterken km gesommeerd over meerdere versterkingsrondes.

Tabel 32: Nominale cumulatieve kosten in miljoen euro per kilometer te versterken dijk o.b.v. de lengte van het te versterken aantal kilometer dijk langs de Oosterschelde en Westerschelde voor "systeem op orde" tot en met 2050 en voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200 ten opzichte van de huidige situatie in 2023. Voor de Westerschelde is dit voor het bodemscenario Volledig Meegroeien.

²⁶ Hierbij is gesommeerd over de vaklengte voor alle te versterken dijkvakken langs de Oosterschelde en Westerschelde.

ZSS t.o.v. 1995	Aantal km te versterken			Nominale kosten per km te versterken dijk in miljoen euro		
	Ooster- schelde (195 km)	Wester- schelde (165 km)	Totaal	Ooster- schelde	Wester- schelde	Gemiddeld
T/m 2050 Systeem op orde	155	122	277	7	10	8
1,0 m	180	148	328	12	26	19
2,0 m	190	159	349	20	34	27
3,0 m	191	161	352	26	40	33
5,4 m	-	161	-	-	53	-

De gemiddelde kosten per te versterken km zijn langs de Oosterschelde 12 miljoen euro voor 1,0 m zeespiegelstijging (meerdere versterkingsrondes) tot ongeveer 26 miljoen euro voor 3,0 m zeespiegelstijging en langs de Westerschelde voor 26 miljoen euro voor 1,0 m zeespiegelstijging tot ruim 50 miljoen euro voor 5,4 m zeespiegelstijging. De gemiddelde kosten per te versterken km zijn voor de Westerschelde ongeveer 1,5 – 2,0x zo hoog als voor de Oosterschelde. De lagere kosten voor de Oosterschelde worden verklaard door de aanwezigheid van de Oosterscheldekering en de versterkingsopgave (hoogte en verbreding van de dijkbasis) die kleiner is langs de Oosterschelde dan langs de Westerschelde. Tot slot speelt hier ook dat de hydraulisch belastingniveaus langs de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien – en daarmee ook de hoogteopgave - met circa 20% worden overschat, maar dit heeft naar verwachting een beperkt effect op de kosten. De Oosterscheldekering zorgt ervoor dat de hydraulische belastingen bij een zelfde mate van zeespiegelstijging langs de Oosterschelde lager dan bij de Westerschelde.

Hieruit volgt dat de gemiddelde kosten per te versterken km dijk minder dan evenredig toenemen met de zeespiegelstijging. Dit komt doordat de vaste kosten van een dijkversterking een groot aandeel hebben ten opzichte van de variabele kosten. Met de vaste kosten bedoelen we de kosten die onafhankelijk zijn van de omvang van de dijkversterking (bijv. engineering, inrichting van de bouwplaats) en de variabele kosten de kosten die afhankelijk zijn van de omvang van de dijkversterking (bijv. grondvolume). De variabele kosten zijn bij een zeespiegelstijging van 1 m lager dan 3 m, doordat bijvoorbeeld minder grond en materiaal nodig is.

Een notie bij bovenstaande tabel is dat de kosten in de gebruikte kostendatabase gemaximaliseerd zijn op een maximale verhogingsstap van 2 m, waardoor de kosten (m.n. voor de tijdlijn Zeer Extreem) iets afvlakken. Dit is een modelartefact

8.4.5 Gemiddelde jaarlijkse kosten per m zeespiegelstijging

De totale nominale kosten om alle dijken en kunstwerken te versterken zodat deze voldoen bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging zijn verspreid over de periode 2050 – 2200. Naast de totale kosten die geïnvesteerd moeten worden in de dijken en kunstwerken bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging, zijn ook de jaarlijkse kosten als maatstaf genomen, waarbij de vergelijking kan worden gemaakt met de

jaarlijkse kosten om het systeem op orde te brengen tot en met 2050. De totale kosten voor "systeem op orde" van de Zuidwestelijke delta bedragen ongeveer 2,5 miljard euro. Dat is omgerekend ongeveer 93 miljoen euro per jaar, zie Tabel 33. De jaarlijkse kosten om alle dijken en kunstwerken te laten voldoen aan een bepaald niveau van zeespiegelstijging zijn berekend o.b.v. de periode 2050 tot en met 2200. De jaarlijkse kosten na 2050 bij 1 m zeespiegelstijging zijn gemiddeld 39 miljoen euro per jaar, wat overeenkomt met ongeveer 40% van de jaarlijkse kosten voor "systeem op orde" tot 2050. De jaarlijkse kosten voor een zeespiegelstijging van 2,0 en 3,0 m zijn respectievelijk 65% en 80% van de jaarlijkse kosten van "systeem op orde". Voor een zeespiegelstijging van 5,4 m zijn alleen de jaarlijkse kosten voor de Westerschelde te vergelijken, waaruit volgt dat de jaarlijkse kosten voor het versterken van alle dijken en kunstwerken om te voldoen aan een zeespiegelstijging van 5,4 m ongeveer 130% bedragen van de jaarlijkse kosten van "systeem op orde". Gegeven alle onzekerheden van de verdere toekomst concluderen we dat de – in deze beleidsstudie berekende - jaarlijkse kosten op eenzelfde orde grootte liggen als in de periode 2023-2050.

Tabel 33: Totale nominale kosten in miljard euro en jaarlijkse nominale kosten in miljoen euro per jaar voor alle dijken en kunstwerken langs de Oosterschelde en Westerschelde voor "systeem op orde" tot en met 2050 en bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200. Voor de Westerschelde is dit voor het bodemscenario Volledig Meegroeien.

ZSS ten opzichte van 1995	Totale nominale kosten en jaarlijkse kosten voor Oosterschelde en Westerschelde voor dijken en kunstwerken			
	Totale nominale kosten voor systeem op orde tot en met 2050 [miljard euro]	Jaarlijkse nominale kosten voor systeem op orde tot en met 2050 gemiddeld over periode 2023 – 2050. [miljoen euro per jaar]	Totale nominale kosten voor verschillende niveaus van ZSS vanaf moment systeem op orde. [miljard euro]	Jaarlijkse nominale kosten voor verschillende niveaus van ZSS vanaf moment systeem op orde periode 2050 – 2200. [miljoen euro per jaar]
Tot en met 2050 Systeem op orde	2,5	93		
1,0 m			5,8	39
2,0 m			9,0	60
3,0 m			11,3	75
5,4 m			-	-

8.5 Ruimtelijke impact

De kostengetallen zijn gepresenteerd voor de strategie 'business as usual': een grondoplossing zolang het ruimtelijk past en anders constructieve maatregelen om de dijkversterking te realiseren. De strategie 'volledige grondoplossing' geeft inzicht in het benodigde ruimtebeslag als geen constructieve maatregelen genomen worden. Dit geeft ook inzicht in de mate dat een bepaald niveau van zeespiegelstijging tot ruimtelijke knelpunten leidt. De strategie 'volledige

grondoplossing met innovatieve pipingmaatregel' (bijv. verticaal zanddicht geotextiel of grof-zandbarrière) levert minder ruimtelijke knelpunten op, mits de opgave voor de dijkverbreding door piping wordt veroorzaakt. Het aantal tijdelijk of permanent te amoveren gebouwen in de versterkingszone bij strategieën 'volledige grondoplossing' en 'volledige grondoplossing met innovatieve pipingmaatregel' is een indicator voor de mate van ruimtelijke knelpunten, zie Tabel 34. Een vergelijking van het totaal aantal gebouwen in de versterkingszone tussen de Oosterschelde en Westerschelde laat zien dat dit aantal langs de Oosterschelde hoger is. Dit geldt ook als je het totaal aantal gebouwen in de versterkingszone per kilometer dijk als maat neemt²⁷. Buitendijkse versterkingen zijn nu niet meegenomen in OKADER, maar bij meerdere meters zeespiegelstijging kunnen die ook overwogen worden. Ze zijn vaak ook goedkoper dan technische oplossingen als damwanden of innovatie piping oplossingen.

Mix van verschillende versterkingsstrategieën

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

In Tabel 34 is de bandbreedte van het aantal gebouwen in de versterkingszone bij twee strategieën met meer ruimtelijke impact weergegeven, waarbij is uitgegaan van de gebouwen in het Basis Administratie Gebouwen (BAG) met peildatum 1 oktober 2021.²⁸ Bij de strategie "business as usual" zijn dit ordegruotte²⁹ het aantal gebouwen in de versterkingszone, waardoor constructieve maatregelen getroffen worden in plaats van een grondoplossing aan de binnenwaartse zijde. Naast constructieve maatregelen, zoals kistdammen en damwanden, is ook buitenwaartse versterking in grond een mogelijk alternatief bij een ruimtelijk knelpunt aan de binnenwaartse zijde.

²⁷ Belangrijk punt hierbij is dat voor de Oosterschelde niet voor alle OKADER-vakken berekeningen zijn gemaakt, omdat slechts voor een beperkte set uitvoerpunten beschikbaar waren. Voor de OKADER-vakken waarvoor geen hydraulische belastingen beschikbaar waren, zijn zo goed mogelijk de resultaten van een representatief OKADER-vak overgenomen waarvoor wel een OKADER-berekening beschikbaar was.

²⁸ Het aantal gebouwen in de versterkingszone is ingedeeld in klassen van 500 gebouwen. Het aantal gebouwen in de versterkingszone valt voor beide versterkingsstrategieën binnen één klasse van 500 gebouwen.

²⁹ Officieel maakt KOSWAT gebruik van een verouderde bebouwingsdatabases o.b.v. de TOP10NL 2013/2014.

Tabel 34: Gemiddelde ruimtelijke opgave en totaal aantal gebouwen in de versterkingszone bij een volledige grondoplossing op basis van alleen te versterken trajecten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging.

Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 [m]	Gemiddelde ruimtelijke opgave en totaal aantal gebouwen in de versterkingszone bij een volledige grondoplossing per watersysteem			
	Bandbreedte voor de strategieën volledige grondoplossing incl. innovatieve pipingmaatregelen volledige grondoplossing excl. innovatieve pipingmaatregelen			
	Oosterschelde		Westerschelde	
	Toename opgave dijkbreedte [m]	Totaal aantal gebouwen	Toename opgave dijkbreedte [m]	Totaal aantal gebouwen
1,0 m	15	0 – 500	30	0 – 500
2,0 m	35	500 – 1.000	40	0 – 500
3,0 m	55	500 – 1.000	55	0 – 1.000
5,4 m	-	-	115	500 – 1.000

In deze beleidsstudie is het uitgangspunt gehanteerd dat bij de strategie “business as usual” geen bebouwing tijdelijk of permanent geamoveerd dient te worden. In de daadwerkelijke uitvoering van deze strategie kan hiervan worden afgeweken.

Het tijdelijk of permanent aantal “te amoveren” bebouwing hangt dus af van de te volgen strategie. In de huidige ontwerppraktijk worden soms ook huizen geamoveerd, net zoals dat in de toekomst het geval zal zijn. Welke strategie de “beste” is, zal in werkelijkheid per project worden geoptimaliseerd, net zoals dat nu het geval is. De strategie “business as usual” geeft weliswaar het minste aantal te amoveren bebouwing, (nl nul) maar afhankelijk van de lokale omstandigheden van een specifiek versterkingsproject, zullen de twee andere strategieën ook een plek hebben. De toekomstige werkelijkheid over het aantal te amoveren bebouwing zal zich naar alle waarschijnlijkheid ergens tussen de verschillende strategieën in bevinden.

8.6 Inschatting onzekerheidsbandbreedte resultaten

Voor deze analyse is een vooraf door Rijkswaterstaat vastgestelde landelijk uniforme aanpak gevolgd. Omdat de materie complex is en we op landelijk niveau op een consistente manier uitspraken willen kunnen doen, zijn bepaalde uitgangspunten gehanteerd. Deze uitgangspunten, met achterliggende keuzes aannames, modellen en onzekerheden zijn zodanig gekozen dat de nauwkeurigheid en diepgang van de analyses zo goed mogelijk passen bij de scope van een beleidsanalyse op landelijk niveau. Voor regionale of lokale studies zouden deze keuzes mogelijk anders gemaakt zijn.

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de belangrijkste onzekerheden in de gehanteerde aanpak en de consequenties daarvan op de resultaten en conclusies.

In zijn algemeenheid geldt dat hoe lager de zeespiegelstijging, hoe “zekerder” de uitkomsten van de analyses zullen zijn. Dit hangt samen met o.a. de betrouwbaarheid van de uitgangspunten (korte termijn is zekerder dan lange

termijn), de betrouwbaarheid van de modellen en de mate van extrapolatie richting de toekomst. De onzekerheden richting de toekomst worden steeds groter, niet alleen op het gebied van de hydraulica, maar ook wat betreft landgebruik, statistiek, kosten en de modelonzekerheden zelf.

Om uitspraken te doen over de onzekerheden in de aanpak en de uitgangspunten maken we gebruik van expert judgement, wat we vertalen naar onzekerheidsklassen: klein, middel en groot (zie Tabel 35).

Tabel 35: Matrix voor onzekerheidsbandbreedte.

Klasse	Invloed op:		
	Hydraulische belastingen [m]	Versterkingsopgave [%]	Kosten [%]
Klein	< 0,3	10	10
Middel	0,3 – 0,5	25	25
Groot	> 0,5	40	40

In het vervolg bespreken we voor elk van de drie bouwstenen van de aanpak (hydraulische belastingen, versterkingsopgave voor dijken en kunstwerken en de doorvertaling naar de kosten) de belangrijkste onzekerheden en hun impact.

8.6.1 Hydraulische belastingen

- Voor de Ooster- en Westerschelde is in de basis een andere aanpak gehanteerd (databasemethode vs. illustratiepuntenmethode). De inschatting is dat de invloed van deze keuze voor de Oosterschelde klein is op de hydraulische belastingen. Voor de Westerschelde is de verwachting dat het effect op het hydraulisch belastingniveau voor het bodemscenario Volledig Meegroeien orde 15 tot 20% is. Daarmee wordt het effect op de hydraulische belastingen voor de Westerschelde als gemiddeld geschat. *Effect: Oosterschelde: klein en Westerschelde: middel.*
- Voor de Oosterschelde is weliswaar gewerkt met speciaal voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging gegenereerde databases met waterstanden, maar deze zijn slechts beschikbaar op een beperkte set uitvoerlocaties. De consequentie is dat de locatie met hydraulische belastingen gekoppeld zijn aan dijkvakken³⁰ die meerdere kilometers uit elkaar kunnen liggen. De invloed op de waterstanden achten we klein, die op de minimaal benodigde kruinhoogten (Hydraulische belastingniveaus) middelgroot: lokale golfcondities kunnen sterk van elkaar verschillen. *Effect: middel.*
- De beschikbare database met hydraulische belastingen voor de Oosterschelde stopt bij een zeespiegelstijging van 1,5 m. De resultaten voor de hogere zeespiegelstijging volgen uit extrapolatie van de beschikbare gegevens. De verwachting is dat dit een grote bron van onzekerheid is, die bij de hogere zeespiegelstijging van grote invloed is op de waterstanden en de minimaal benodigde kruinhoogten. *Effect: groot.*
- In alle kruinhoogteberekeningen is gekozen voor een constant golfoverslagdebiet van 5 l/s/m. Deze aanpak wijkt af van de binnen de gehanteerde aanpak van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017). Voor sommige locaties zal deze keuze conservatief zijn, voor andere juist niet (zoals bijvoorbeeld locaties met overgangen op het binnentalud). Met name voor locaties met grote golven is deze keuze van belang. Plaatselijk kunnen hydraulische belastingniveaus naar verwachting dan ook meer dan 0,5 m toe- of

³⁰ Dijkvakken zoals gedefinieerd in de OKADER-database.

afnemen. *Effect: klein – groot, afhankelijk van de golfhoogte en dus van een tijdlijn.*

- De onderzochte gevoeligheden (sluitpeil Oosterscheldekering, meegroeien voorlanden langs de Oosterschelde met een zeespiegelstijging van 0,5 m, sedimentbeheer langs de Westerschelde en vegetatie op de voorlanden langs de Westerschelde) hebben allen een beperkte invloed op de hydraulische belastingen. *Effect: klein.*
- De onzekerheid van de informatie in de databases fysica. De gegevens in de databases (waterstanden en golfcondities) zijn afkomstig uit modelsimulaties, die elk eigen uitgangspunten hebben en ook benaderingen zijn van de werkelijkheid. Het vertrouwen in de kwaliteit van deze modellen is hoog: RWS Zee en Delta werkt al tientallen jaren met deze modellen en heeft deze in hoge mate afgestemd op het gebruik voor de keringbeheerders. De ontwikkeling van het fysische systeem bij grotere meters zeespiegelstijging is daarbij een grote onbekende. Deze onzekerheid neemt toe met een grotere mate van zeespiegelstijging. Desondanks zal een ander fysisch model voor andere resultaten zorgen, die ook door zullen werken in de uiteindelijke waterstanden en hydraulische belastingniveaus. *Effect: middel.*
- De betrouwbaarheid van de illustratiepuntenmethode voor de bodemscenario's Voortzetting Trend en Volledig Meegroeien is onzeker. De resultaten vallen binnen de door Deltares afgegeven bandbreedte van 30%. *Effect: Voortzetting Trend is klein en Volledig Meegroeien is middel.*

8.6.2 Waterveiligheidsopgave dijken en kunstwerken

- Voor de dijken is binnen OKADER gebruik gemaakt van 2 typen fragility curves: macrostabiliteit en voor piping. De resultaten voor de hoogteopgave door golfoverslag (minimaal benodigde kruinhoogte) volgt direct uit de vergelijking van de aanwezige kruinhoogte en het hydraulische belastingniveau door golfoverslag. In deze landelijke set voor piping en macrostabiliteit is gewerkt met verschillende typologieën die de dijken beschrijven. Het gebruik van deze fragility curves is een versimpeling van de werkwijze die binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI2017) is gehanteerd voor de beoordeling of het ontwerp van waterkeringen. Per dijkvak is het onzeker in hoeverre de werkelijke situatie (dijkprofiel, grondopbouw en sterkte van de grondlagen) overeenkomt met de uitgangspunten die horen bij fragility curve. De verwachting is dat het effect gemiddeld is, omdat de effecten van onderschatting en overschatting van de waterveiligheidsopgave binnen een watersysteem uitmiddelen. *Effect: middel.*
- Voor de kustgebieden die sterk worden beïnvloed door een storm speelt de invloed van de korte duur van het hoogwater een belangrijke rol in de faalkans van piping en macrostabiliteit. De tijdsafhankelijke effecten in de faalbeschrijving van piping en macrostabiliteit wordt nu niet meegenomen in de fragility curves. De verwachting is dat de invloed hiervan klein is, omdat de gemiddelde opgave per dijktraject voor de Zuidwestelijke delta beperkt is. doordat enerzijds de opgaves gemiddeld worden over alle dijkvakken langs een dijktraject en anderzijds niet alle dijkvakken gevoelig zijn piping of macrostabiliteit. De gemiddelde bermbreedtes ten gevolge van de pipingopgave zijn in de Zuidwestelijke delta factor 2-3 kleiner dan in het rivierengebied. Bij hogere niveaus van zeespiegelstijging is de gemiddelde bermbreedte voor de pipingopgave ordegrrootte vergelijkbaar. *Effect: klein - middel.*
- Voor de dijken langs de Oosterschelde waren slechts voor een beperkte set uitvoerpunten de hydraulische belastingen beschikbaar en konden voor de betreffende dijkvakken de versterkingsopgave en kosten worden bepaald. Voor

de overige dijkvakken is een koppeling gelegd met de resultaten voor de beschikbare dijkvakken, rekening houdend met oriëntatie van het dijkvak, wel of niet gevoelig voor piping- of macrostabiliteitsopgave en wel of niet aanwezigheid van bebouwing. De invloed hiervan op de versterkingsopgave en kosten is groot. *Effect: groot.*

- De hoogteopgave voor de versterking van de dijken langs de Westerschelde wordt bij het bodemscenario Volledig Meegroeien naar verwachting overschat. Bij grotere mate van zeespiegelstijging is de overschatting van de hoogteopgave absoluut gezien hoger. De verwachting is dat het effect op de kosten beperkt is (zie 4^e bullet in paragraaf 8.6.3). *Effect: middel.*
- De versterkingsopgave voor kunstwerken is voor de meeste kunstwerken alleen bepaald voor het faalmechanisme hoogte, omdat dit faalmechanisme bij kunstwerken met name wordt beïnvloed door zeespiegelstijging. Er is geen inzicht in welke mate andere faalmechanismen bij kunstwerken leidend zijn voor het moment voor het versterken of vervangen van het betreffende kunstwerk en daarmee maatgevend zijn boven de versterkingsopgave voor hoogte door zeespiegelstijging. Daarnaast geldt ook dat sommige kunstwerken niet gedeeltelijk te versterken (op te hogen) zijn en dus direct vervangen moeten worden. *Effect: klein.*

8.6.3 Kosten

- KOSWAT hanteert een maximale kruinverhoging van 2 m per versterkingsronde. Dit heeft als gevolg dat verhogingen van meer dan 2m niet resulteren in hogere kosten dan een verhoging van 2m per versterkingsmoment. Indien een verhoging van meer dan 2m benodigd is, resulteert dit in een onderschatting van de dijkversterkingskosten. Voor de Westerschelde geldt dit bij Zeer Extreem voor ongeveer 75% van de versterkingsmomenten. Het effect is dus onafhankelijk van de mate van zeespiegelstijging en wordt daarom als gemiddeld geschat. *Effect: middel.*
- De kosten worden gepresenteerd voor 1 uniforme versterkingsstrategie voor het hele gebied, terwijl in werkelijkheid een combinatie van constructieve versterking en volledige grondoplossing zal worden gerealiseerd. Deze combinatie leidt tot lagere versterkingskosten. Het effect hiervan op de kosten is ongeveer 10 – 15%. *Effect: middel.*
- Het effect van de foutmarge van de illustratiepuntenmethode voor de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien op de kosten wordt geschat op maximaal 10%. Dit effect is kleiner dan het effect op de hoogteopgave, omdat het alleen de variabele kosten beïnvloed en niet de vaste kosten. De vaste kosten hebben een groot aandeel in de totale kosten van een dijkversterking. Deze fout heeft geen effect op de vervangingskosten van de kunstwerken langs de Westerschelde, omdat het versterkingsmoment is bepaald op basis van de waterstanden (overloop) en niet het hydraulisch belastingniveau bij golfoverslag. *Effect: klein.*
- Het versterken of vervangen van een kunstwerk is maatwerk en dat betekent ook dat de bijbehorende kosten voor de versterkings- en vervangingsopgave objectspecifiek zijn. De verwachting is dat de kosten voor de kunstwerken nu worden onderschat. De gehanteerde kostenkanten zijn onafhankelijk verondersteld van de omvang van de versterking (bijv. hoogteopgave) en dat betekent dat alleen zeespiegelstijging invloed heeft op het moment van versterken van de kunstwerken. De invloed op de kosten voor kunstwerken is naar verwachting groot, maar de invloed op de totale kosten is kleiner omdat de kosten voor het versterken en vervangen van kunstwerken ongeveer 20% is van de totale kosten voor het versterken van alle dijken en kunstwerken langs

de Oosterschelde en Westerschelde. Stel dat de kosten een factor 2x zo hoog zijn, dan leidt dit niet tot een andere conclusie. Effect: *middel*.

- In de versterkingsstrategie business as usual wordt ervanuit gegaan dat dijken 'tot in het oneindige' constructief versterkt kunnen worden op het moment dat bebouwing in de versterkingszone aanwezig is. Dit door gebruik te maken van een kistdam of iets dergelijks. In praktijk zal dit niet oneindig hoog kunnen worden uitgevoerd en zal gedwongen overgestapt moeten worden naar een strategie waarbij bebouwing wordt geamoveerd. De grens hiervan is niet nader onderzocht.

8.7 Effectiviteit van een aantal mogelijke oprekmogelijkheden

Oosterschelde

Voor de Oosterschelde is gekeken naar een aanpassing van het lekdebiet van de Oosterscheldekering, een verhoging van het sluitpeil van de Oosterscheldekering en een constante verhoging van de voorlanden. Uiteindelijk zijn voor geen van deze drie gevoeligheidsanalyses aanvullende berekeningen uitgevoerd om de impact op de waterveiligheidsanalyse in beeld te brengen:

- Het effect van het lekdebiet van de Oosterscheldekering levert weinig tot geen verandering in de hydraulische belastingen, waarmee ook de impact op de opgave voor de keringen langs de Oosterschelde verwaarloosbaar is.
- Een verhoging van het sluitpeil zorgt voor een toename van de hydraulische belastingen in het bekken. Dit geldt voor situaties waarin de kering bij een verhoogd sluitpeil niet dicht hoeft en bij het huidige sluitpeil wel, maar ook voor extremere omstandigheden, waarbij de kering bij het verhoogde sluitpeil dicht moet, aangezien de waterstand op het bekken dan al verhoogd is op het moment van de sluitvraag.
 - De gehanteerde extrapolatiemethode levert in dit specifieke geval onvoldoende betrouwbare resultaten om een kostenanalyse mee uit te voeren.
- Het effect van een verhoging van de aanwezige voorlanden met een vaste waarde van +0,5 m verdwijnt nagenoeg volledig naarmate de zeespiegelstijging meer en meer toeneemt. Op de meeste plekken met een voorland is geen sprake van een opgave, waardoor de impact van deze gevoeligheidsanalyse op de waterveiligheidsopgave nauwelijks zichtbaar zal zijn. Deze is dan ook niet verder uitgevoerd.

Westerschelde

In de Westerschelde is gekeken naar de invloed van de bodemligging en een ander type vegetatie. Voor de verandering van de bodemligging is het effect op versterkingsopgave en kosten berekend. Voor het effect van vegetatie op de versterkingsopgave en kosten bij 1 m zeespiegelstijging en het bodemscenario Volledig Meegroeien is een schatting gemaakt o.b.v. de resultaten voor de verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

- Voor de Westerschelde is als basisscenario voor de bodem uitgegaan van het Volledig Meegroeien ervan met de zeespiegelstijging – in lijn met het huidige beleid. Om het effect van de andere bodemscenario's (Niet Meegroeien en Voortzetting Trend) inzichtelijk te krijgen, zijn de kosten voor de waterveiligheidsopgave per tijdlijn bepaald voor de overige bodemscenario's. In alle gevallen geldt dat het effect van een ander bodemscenario veel kleiner is dan het effect van een andere tijdlijn. Het effect van een ander bodemscenario op de kosten is beschouwd, waarbij opgemerkt wordt dat de hoogteopgave en daarmee de kosten voor Volledig Meegroeien overschat worden. Het

bodemscenario Niet Meegroeien levert in alle gevallen een toename in de orde van 10% van de kosten³¹. Voortzetting trend levert een verlaging op in de kosten voor tijdlijn Laag van orde 10%. Deze verlaging wordt steeds minder naarmate de tijdlijnen extremer worden. Bij tijdlijn Zeer Extreem geeft het bodemscenario Voortzetting Trend zelfs een zeer kleine verhoging van de kosten ten opzichte van de basisberekening van orde 1%.

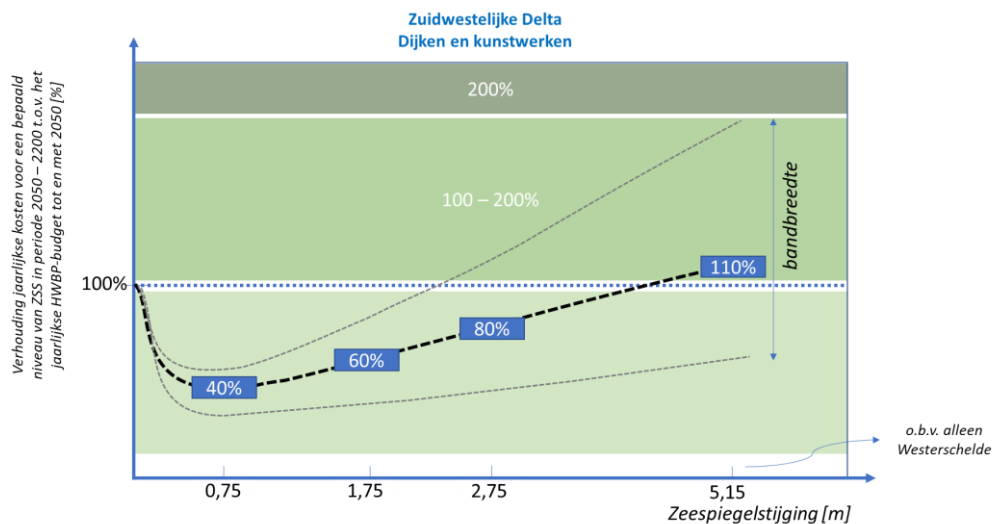
- Het meenemen van vegetatie geeft een reductie van de resulterende golfhoogte aan de teen van de waterkering in de orde van 10%. Deze reductie werkt direct door in de berekende hydraulische belastingniveaus. De impact op de waterveiligheidsopgave betreft een (indicatie van de) reductie van de kosten in zichtjaar 2200: 25 miljoen euro voor tijdlijn Laag, 45 miljoen euro voor tijdlijn Gematigd, 50 miljoen euro voor tijdlijn Extreem en 65 miljoen euro voor tijdlijn Zeer Extreem. Daarnaast is er een 2e orde effect wat de kostenreductie verder kan verhogen. Vegetatie zorgt namelijk voor ophoging van de voorlanden voor de dijk door het vasthouden van slib. Laatst genoemde is niet meegenomen in deze gevoeligheidsberekening.

8.8 Conclusies

Op basis van deze Systeemanalyse waterveiligheid voor de Ooster- en Westerschelde kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De jaarlijkse kosten tussen 2050 en 2200 om de dijken en kunstwerken (exclusief de Oosterscheldekering) langs Oosterschelde en Westerschelde te laten voldoen bij een zeespiegelstijging tot 3 m zijn lager dan of ordegrootte gelijk aan de - in deze beleidsstudie berekende - jaarlijkse kosten tussen 2023 en 2050 om beide watersystemen te laten voldoen aan de norm in 2050 (zie Figuur 58). Hierbij wordt uitgegaan dat het niveau van zeespiegelstijging van 3 m pas in 2200 zal optreden. Voor een zeespiegelstijging van 5,4 m zijn alleen de jaarlijkse kosten voor de Westerschelde te staven aan de - in deze beleidsstudie berekende - jaarlijkse kosten tot en met 2050. Hierbij blijkt dat de jaarlijkse kosten voor een zeespiegelstijging van 5,4 m 30% hoger zijn dan de - in deze beleidsstudie berekende - jaarlijkse kosten tot en met 2050 (zie Figuur 58).
- Op basis van een vergelijking van de jaarlijkse kosten voor een bepaalde mate van zeespiegelstijging in de periode 2050 – 2200 ten opzichte van het jaarlijkse budget van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) voor het laten voldoen van de dijken en kunstwerken aan de norm tot en met 2050 is te concluderen dat het versterken van dijken en kunstwerken voor zeespiegelstijging een gelijke orde grootte heeft als het huidige budget van het HWBP.

³¹ Als voor het bodemscenario Volledig Meegroeien de fout in de berekende hoogteopgave ten gevolge van de toepasbaarheid van de illustratiepuntenmethode wordt gecorrigeerd, dan zijn de kosten van Niet Meegroeien procentueel hoger dan 10% ten opzichte van Volledig Meegroeien.



Figuur 58: Schematische weergave van de verhouding van de jaarlijkse nominale kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging in de periode 2050 – 2200 ten opzichte van de jaarlijkse nominale kosten voor "systeem op orde" tot en met 2050 inclusief 25 – 50 cm zeespiegelstijging. De zwarte gestippelde lijn zijn de berekende kosten. De lichtgrijze lijn is geeft schematisch de bandbreedte weer, maar is niet berekend.

- Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat de Oosterscheldekering blijft functioneren zoals in het huidige systeem. Door zeespiegelstijging zal de Oosterscheldekering vaker sluiten. Bij een zeespiegelstijging van 1 m is dit ongeveer 11x per jaar. In dit project is de veiligheidsopgave van de Oosterscheldekering verder niet beschouwd. De huidige vervangingswaarde van de Oosterscheldekering wordt geschat in de orde van 6 miljard euro (bron: Rijkswaterstaat GPO).
- De versterkingsopgave als functie van de zeespiegelstijging langs de Westerschelde is groter dan langs de Oosterschelde, doordat de Oosterscheldekering functioneert volgens de huidige eisen (uitgangspunt van deze studie). Hierdoor zijn de totale kosten voor de Westerschelde ook hoger, dan voor de Oosterschelde. Daarentegen levert zeespiegelstijging relatief op meer locaties ruimtelijke knelpunten langs de Oosterschelde dan langs de Westerschelde, indien voor een volledige grondoplossing wordt gekozen. Ook moeten de kosten van de Oosterscheldekering hier worden meegewogen voor een eerlijker vergelijk. Als de kosten voor het (gedeeltelijk) vervangen van de Oosterscheldekering meeneemt, dan zijn de totale kosten voor de Oosterschelde hoger dan voor de Westerschelde.
 - De – in deze beleidsstudie berekende - stijging van de gemiddelde hoogteopgave als functie van de zeespiegelstijging is langs de Westerschelde bij het bodemscenario Volledig Meegroeien groter dan de stijging van de zeespiegelstijging. Volgens de fysica zou de stijging van de gemiddelde hoogteopgave de stijging van de zeespiegel moeten volgen bij een volledig meegroeiende bodem. Gegeven de fout van de illustratiepuntenmethode van naar verwachting circa 20%, is bij een zeespiegelstijging van 5,4 m de gemiddelde hoogteopgave langs de Westerschelde 6,2 m, met een maximum van 9,8 m voor traject 223. Ook trajecten 30-2 en 31-1 hebben een hoogteopgave van rond de 9 m bij een zeespiegelstijging van 5,4 m. Al deze trajecten zijn meest oostelijk gelegen op de Westerschelde. Hier is een grote strijklengte voor de wind aanwezig.

- De meest effectieve maatregel van de binnen deze beleidsstudie beschouwde maatregelen voor het verlengen van de houdbaarheid van het huidige systeem is een actief bodembeheer van de Westerschelde: beheer gericht op een bodem die meegroeit met de stijging van de zeespiegel. Opgemerkt wordt dat er niet naar de kosten voor het uitvoeren van deze maatregel is gekeken en ook niet naar effecten op andere functies dan waterveiligheid.
- Voor de Oosterschelde geldt dat het effect van sluitpeilverhoging op de hydraulische belastingen bij de norm mogelijk beperkt is. Daarmee is het mogelijk een kansrijke maatregel vanuit andere invalshoeken dan waterveiligheid. Dat is echter niet verder onderzocht binnen de scope van deze studie, maar hiervoor is een onderzoek gestart door RWS Zee en Delta.

Geconcludeerd mag worden dat de waterveiligheidskosten ten gevolge van zeespiegelstijging voor de dijken en kunstwerken, zelfs tot zeespiegelstijgingen van 5 m dezelfde bandbreedte vallen als die van de huidige benodigde versterkingen om aan de nieuwe normen te voldoen. Gezamenlijk zijn de totale kosten Oosterschelde en Westerschelde bij een zeespiegelstijging van 3 meter ongeveer 14 miljard euro, exclusief de kosten voor aanpassing/vervanging van de Oosterscheldekering. De totale kosten voor Oosterschelde en Westerschelde – inclusief een nieuwe Oosterscheldekering – zijn circa 20 tot 25 miljard euro (grove schatting).

9 Referenties

- | Auteur | Titel |
|---|---|
| 1. CBS (2022). | Grond-, weg- en waterbouw (GWW) inputprijsindex 2015=100
https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/84538NED/table . 2022. |
| 2. Bamber et al. (2019). | Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. Bamber, J.L., M. Oppenheimer, R. E. Kopp, W. P. Aspinall en R. M. Cooke. Proceedings of the National Academy of Sciences 116(23), pp. 11195-11200 (DOI: 10.1073/pnas.1817205116). May 2019. |
| 3. Deltares (2011). | Maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21 ^e eeuw. J. Kind. Maart 2011. |
| 4. Deltares (2014). | KOSTen voor versterken WATERkeringen KOSWAT systeemdocumentatie versie 2.3.2 revisie 47275. Augustus 2015. |
| 5. Deltares (2022a). | Verificatiemethode effectbepaling zeespiegelstijging. 2022. |
| 6. Deltares (2022b). | Bodemsценario's Waddenzee en Eems-Dollard en Westerschelde t.b.v. SWAN sommen KP ZSS spoor 2. 2022. |
| 7. De Conto en Pollard (2016). | Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. Nature 531(7596):591-597. DOI:10.1038/nature17145. Maart 2016. |
| 8. Elias, E., Van der Spek, A., & Lazar, M. (2016). | The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: large-scale morphological changes and sediment budget 1965- 2013; impacts of large-scale engineering. Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw, 1-27. doi:10.1017/njg.2016.37 |
| 9. HKV (2010). | Diepwaterrandvoorwaarden WTI-2011 (ELD, EUR, YM6, SCW, SON). Stijnen, J.W. en M.J. Kallen. HKV rapport, PR1759.10. Februari 2010. |
| 10. HKV (2015). | Probabilistisch model meerpeilstatistiek Volkerak-Zoommeer Hoofdrapport model DEVO. Geerse, C. en Van Haaren D. HKV rapport, PR3015.10. Augustus 2015. |
| 11. HKV (2020). | Hydra-NL; Gebruikershandleiding versie 2.8. Matthijs Duits. HKV lijn in water, rapport PR4315.10. Oktober 2020. |
| 12. HKV (2022a). | Invloed extreme zeespiegelstijgingen op Oosterschelde; Deskundigenoordeel. Matthijs Duits, HKV lijn in water, rapport PR4400.10. April 2022. |
| 13. IPCC (2023). | Synthesis report of the IPCC Sixth assessment report (AR6). 20 maart 2023. |
| 14. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). | Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid primaire waterkeringen. 2016 |
| 15. 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. |
| 16. Rijkswaterstaat (2015). | Handreiking Ontwerpen met overstromingskansen. Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansen. Versie 2.5. Juli 2015. |
| 17. Rijkswaterstaat WVL (2015). | Meerpeilen en waterveiligheid IJsselmeergebied. Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied fase 1. Remmelzwaal, A. Kors, A. Tanczos, I. Hebbink, A. en Helmer, J. September 2015. |
| 18. Rijkswaterstaat GPO (2019). | Excellfile behorende bij het rapport GPO RWS, 2019. Bijlage I - Onderbouwing raming vervangingswaarde kunstwerken. 2019. |
| 19. Rijkswaterstaat (2021a). | Modellentrein harde kust, opzet modelketen en keuze bodemsценario's. RWS memo versie 0.5, d.d. 29 november 2021, concept (R. Vos). 2021. |
| 20. Rijkswaterstaat (2021b). | Tijddijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging. RWS memo. 24 maart 2021. |

21. Rijkswaterstaat (2021c). Toelichting op de zoute ecotopenkaart Westerschelde 2020, Biologische monitoring zoute rijkswateren. Status definitief, 26 mei 2021.
22. Rijkswaterstaat (2022a). Referentie - Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022.
23. Rijkswaterstaat (2022b). Aanpak Kunstwerken Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022.
24. Rijkswaterstaat (2022c). Toepassingsleidraad OKADER voor KP ZSS spoor II. P. de Grave (Deltares). Februari 2022.
25. Rijkswaterstaat (2022d). Generieke werkwijze, Systeemanalyse waterveiligheid Kennisprogramma Zeespiegelstijging, versie 1.0, 28 juli 2022.
26. Rijkswaterstaat (2022f). Leidraad Bolwerken kust. 2022.
27. Rijkswaterstaat (2023a). Illustratiepunten methode in de praktijk (analyse diverse varianten). RWS-WVL, versie 1.0, 02-03-2023.
28. Rijkswaterstaat (2023b). Systeemanalyse Waterveiligheid KP ZSS. Deelrapportage Waddenzee en Eems-Dollard. Het gebruik van het G4 rooster ten behoeve van HBN resultaten in het Friesche Zeegat. RWS-WVL, 27-02-2023.
29. Rijkswaterstaat Directie Zeeland (1982) nz350-357 Verbetering boulevard de Ruyter nr. NXT822059.
30. Rijkswaterstaat Zee en Delta et al. (2016). Waterakkoord Volkerak-Zoommeer, actualisatie 1 januari 2016. Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Hollandse Delta, Waterschap Scheldestromen, Rijkswaterstaat West-Nederland Zuid, Rijkswaterstaat Zuid Nederland. 1 januari 2016.
31. TAW (2002). Technisch rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2002.
32. Tauw BV, Altenburg & Wymenga en HKV Lijn in Water (2019). De effecten van zeespiegelstijging en zandhonger op de Oosterschelde. Eindrapport van de studie EZZO. Zandvoort M, van der Zee E & Vuik V (2019): Tauw BV, Altenburg & Wymenga. In opdracht van Rijkswaterstaat Zee en Delta. December 2019.
33. Vuik et al. (2018). Assessing safety of nature-based flood defences: Dealing with extremes and uncertainties, V. Vuik, S. van Vuren, B.W. Borsje, B.K. van Wesenbeeck, S.N. Jonkman, 2018.
34. Waterschap Walcheren Westwatering (1983). nz335-350 30 m Zone Boulevard Bankert en Evertsen nr. 142 B7 401.
35. Waterschap Walcheren Westwatering (1976). nz335-350 Verbetering zeewering te Vlissingen Boulevard Bankert en Evertsen nr. 112 B7 401.
36. 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.

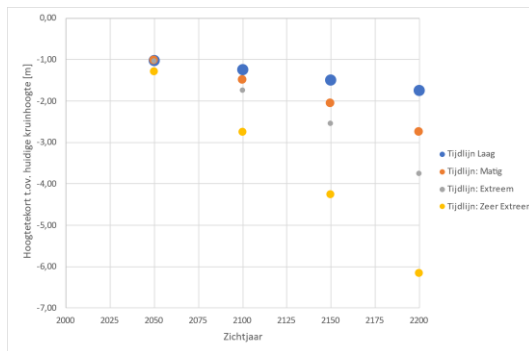
Bijlage A Analyse per kunstwerk

A.1 Roompotsluis

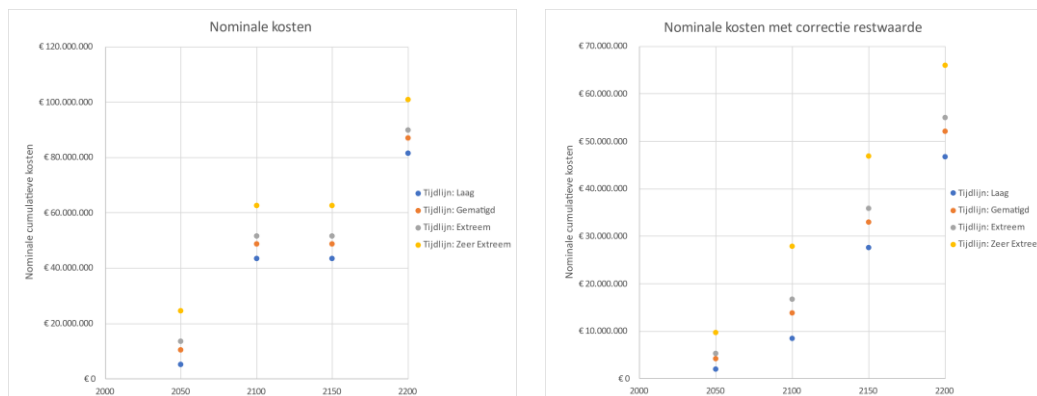
De Roompotsluis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem is strategie 1 het goedkoopst. Het kunstwerk wordt eerst versterkt tot aan einde levensduur en daarna pas vervangen. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen. Dit komt met name door de hogere versterkingskosten welke benodigd zijn om het object te versterken tot einde levensduur.

Roompotsluis		
Kosten vervanging 2022	[€]	38.174.722
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,2
Einde levensduur	[-]	2091
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000012

Tabel 36: Kenmerken Roompotsluis



Figuur 59: Hoogtetekort Roompotsluis



Figuur 60: Nominale kosten cumulatief Roompotsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijddlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 5.076.898	€ 2.015.827
2100	€ 43.251.620	€ 8.512.623
2150	€ 43.251.620	€ 27.599.984
2200	€ 81.426.341	€ 46.687.344
Tijddlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 10.434.726	€ 4.143.200
2100	€ 48.609.448	€ 13.870.451
2150	€ 48.609.448	€ 32.957.812
2200	€ 86.784.170	€ 52.045.173
Tijddlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 13.320.064	€ 5.288.849
2100	€ 51.494.786	€ 16.755.789
2150	€ 51.494.786	€ 35.843.150
2200	€ 89.669.507	€ 54.930.511
Tijddlijn: Zeer Extreem	Spoor 1	
2050	€ 24.366.579	€ 9.674.965
2100	€ 62.541.300	€ 27.802.304
2150	€ 62.541.300	€ 46.889.664
2200	€ 100.716.022	€ 65.977.025

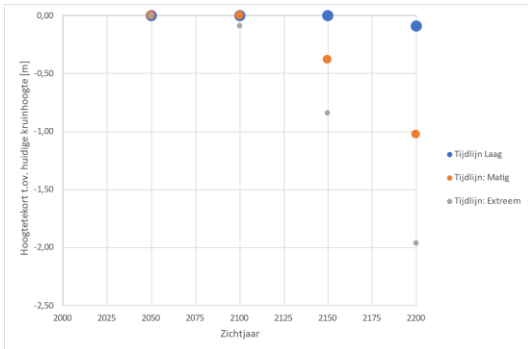
Tabel 37: Nominale kosten Roompotsluis per tijddlijn en zichtjaar

A.2 Grevelingensluis

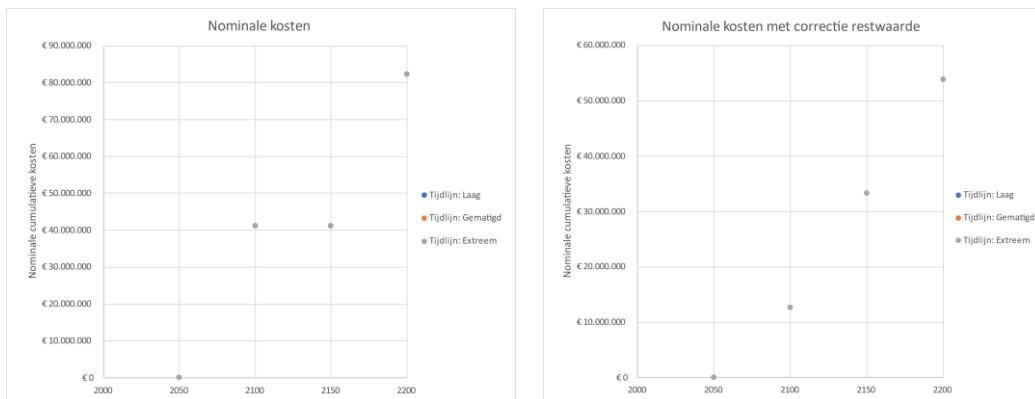
De Grevelingensluis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijddlijnen en zichtjaren. Het kunstwerk hoeft niet aangepast te worden tot einde levensduur waardoor er geen verschil is tussen strategie 1 en 2. Het kunstwerk wordt bij einde levensduur vervangen. Hierdoor is er geen verschil in kosten tussen de verschillende tijddlijnen, omdat het moment van vervanging in hetzelfde jaar ligt.

		Grevelingensluis
Kosten vervanging 2022	[€]	41.059.049
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	3,7
Einde levensduur	[-]	2069
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00012

Tabel 38: Kenmerken Grevelingensluis



Figuur 61: Hoogtetekort Grevelingensluis



Figuur 62: Nominale kosten cumulatief Grevelingensluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 41.059.049	€ 12.728.305
2150	€ 41.059.049	€ 33.257.830
2200	€ 82.118.098	€ 53.787.354
Tijdlijn: Gematigd		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 41.059.049	€ 12.728.305
2150	€ 41.059.049	€ 33.257.830
2200	€ 82.118.098	€ 53.787.354
Tijdlijn: Extreem		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 41.059.049	€ 12.728.305
2150	€ 41.059.049	€ 33.257.830
2200	€ 82.118.098	€ 53.787.354

Tabel 39: Nominale kosten Grevelingensluis per tijdlijn en zichtjaar

A.3 Krammersluizen

De Krammersluizen bestaat uit 12 objecten. Binnen deze 12 objecten is een onderscheid te maken in twee soorten schutsluizen, één type gemaal en één soort reguleringswerk. Van beide type schutsluizen zijn er twee aanwezig. Er zijn twee gemalen aanwezig en zes reguleringswerken. De vier soorten objecten worden hieronder behandeld. De overige objecten worden niet beschouwd in de rapportage, omdat deze identiek zijn aan de beschouwde objecten.

Het kruinhoogtetekort voor de verschillende objecten is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor alle vier de soorten objecten is de strategie 1 het goedkoopst. Voor einde levensduur ontstaat een kruinhoogtetekort bij alle objecten. De objecten worden eerst versterkt tot einde levensduur en vervolgens pas vervangen. Opgemerkt dient te worden dat de vervangingskosten van de duwvaartsluizen veel hoger zijn dan de vervangingskosten van de overige objecten binnen het kunstwerk.

		Schutsluis ¹	Schutsluis ²	Gemaal ³	Reguleringswerk ⁴
Kosten vervanging 2022	[€]	17.321.786	205.462.115	8.920.620	3.582.784
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel	Schutsluis - Middel	Gemaal - Middel	Gemaal - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	3,7	3,7	3,7	3,7
Einde levensduur	[-]	2096	2096	2067	2067
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012

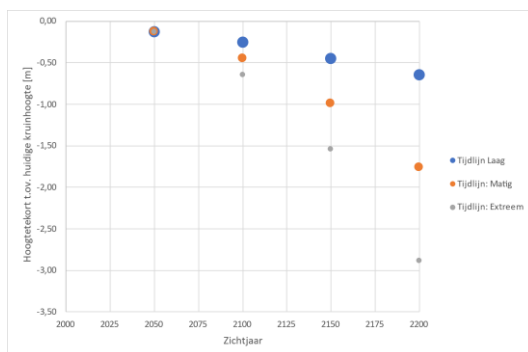
¹ Jachtensluis Noord en Jachtensluis Zuid

² Duwvaartsluis Noord en Duwvaartsluis Zuid

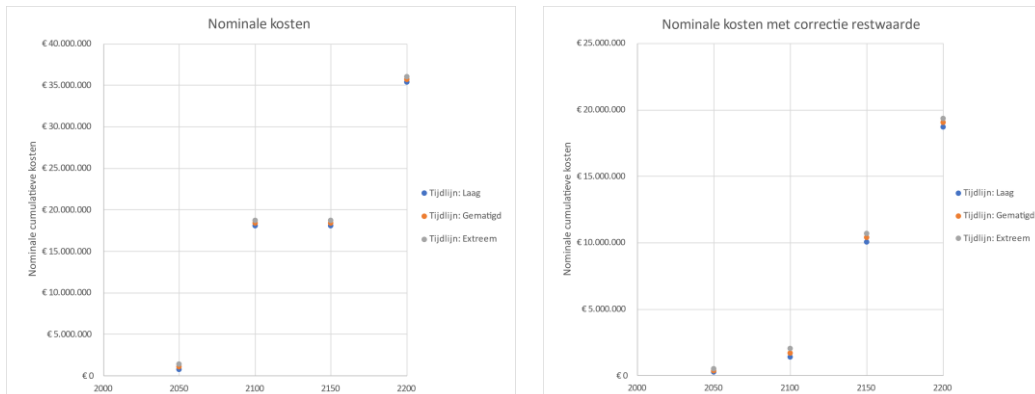
³ Gemaal duwvaartsluis en gemaal jachtensluizen

⁴ Inlaatwerk Hoogbekken, Doorlaatwerk kanaal Slaak, Uitlaatwerk Laagbekken, Uitlaatwerk gemaal, Uitlaatwerk gemaal Slaak en Doorlaatwerk Jachtensluis

Tabel 40: Kenmerken Grevelingensluis



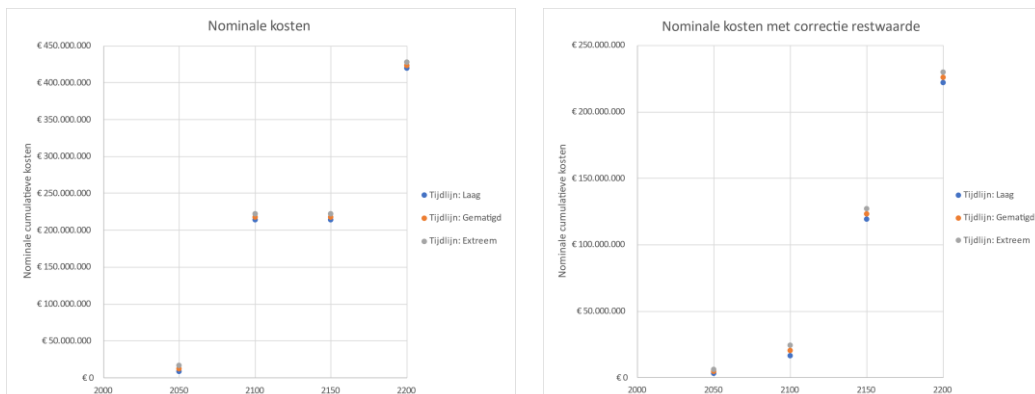
Figuur 63: Hoogtetekort Krammersluizen



Figuur 64: Nominale kosten cumulatief Jachtensluis Krammersluizen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 698.130	€ 258.212
2100	€ 18.019.916	€ 1.391.002
2150	€ 18.019.916	€ 10.051.894
2200	€ 35.341.702	€ 18.712.787
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 1.019.233	€ 376.976
2100	€ 18.341.019	€ 1.712.104
2150	€ 18.341.019	€ 10.372.997
2200	€ 35.662.805	€ 19.033.890
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 1.340.335	€ 495.740
2100	€ 18.662.121	€ 2.033.207
2150	€ 18.662.121	€ 10.694.100
2200	€ 35.983.907	€ 19.354.993

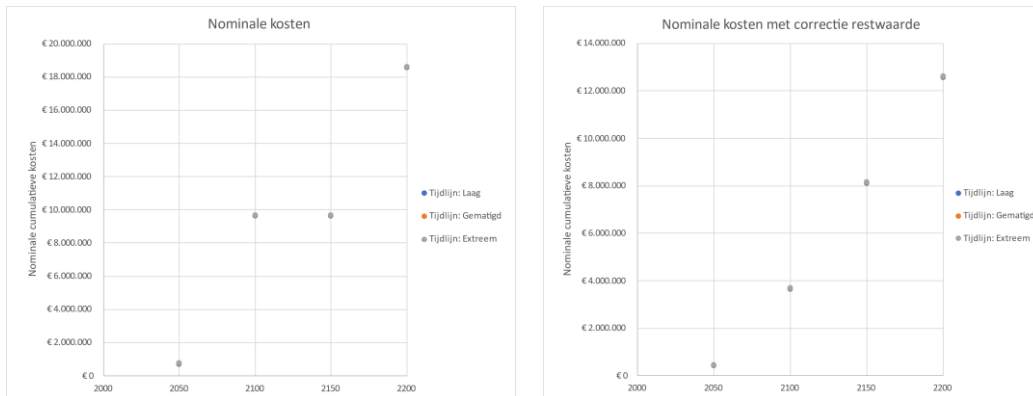
Tabel 41: Nominale kosten Jachtensluis Krammersluizen per tijdlijn en zichtjaar



Figuur 65: Nominale kosten cumulatief Duwvaartsluis Krammersluizen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 8.280.860	€ 3.062.784
2100	€ 213.742.975	€ 16.499.344
2150	€ 213.742.975	€ 119.230.402
2200	€ 419.205.090	€ 221.961.459
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 12.089.614	€ 4.471.501
2100	€ 217.551.729	€ 20.308.099
2150	€ 217.551.729	€ 123.039.156
2200	€ 423.013.844	€ 225.770.214
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 15.898.368	€ 5.880.218
2100	€ 221.360.483	€ 24.116.853
2150	€ 221.360.483	€ 126.847.910
2200	€ 426.822.598	€ 229.578.968

Tabel 42: Nominale kosten Duwvaartsluis Krammersluizen per tijdlijn en zichtjaar

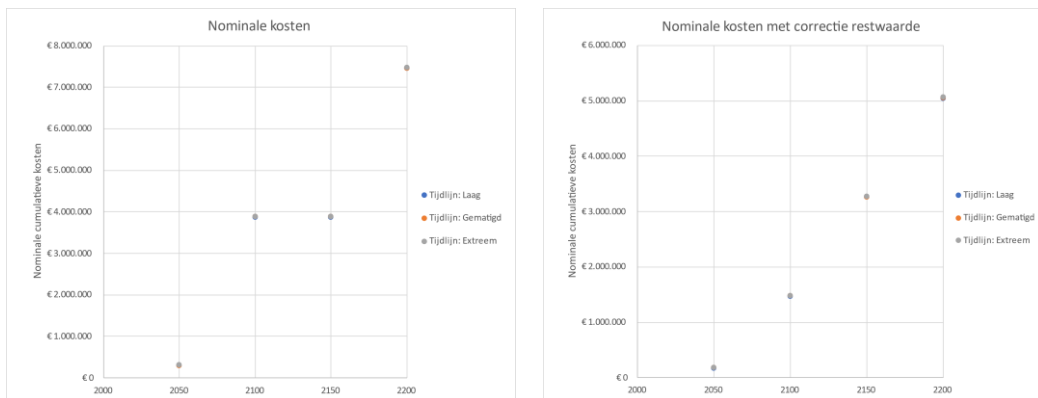


Figuur 66: Nominale kosten cumulatief Gemaal Krammersluizen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 700.331	€ 429.748
2100	€ 9.620.951	€ 3.644.135
2150	€ 9.620.951	€ 8.104.445
2200	€ 18.541.571	€ 12.564.755
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 726.975	€ 446.098

2100	€ 9.647.595	€ 3.670.779
2150	€ 9.647.595	€ 8.131.089
2200	€ 18.568.215	€ 12.591.399
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 750.954	€ 460.813
2100	€ 9.671.574	€ 3.694.759
2150	€ 9.671.574	€ 8.155.069
2200	€ 18.592.194	€ 12.615.379

Tabel 43: Nominale kosten Gemaal Krammersluizen per tijdlijn en zichtjaar



Figuur 67: Nominale kosten cumulatief Inlaatwerk, Uitlaatwerk en Doorlaatwerk Krammersluizen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 281.273	€ 172.600
2100	€ 3.864.057	€ 1.463.592
2150	€ 3.864.057	€ 3.254.984
2200	€ 7.446.841	€ 5.046.376
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 291.974	€ 179.166
2100	€ 3.874.758	€ 1.474.293
2150	€ 3.874.758	€ 3.265.685
2200	€ 7.457.542	€ 5.057.077
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 301.605	€ 185.076
2100	€ 3.884.389	€ 1.483.924
2150	€ 3.884.389	€ 3.275.316
2200	€ 7.467.173	€ 5.066.708

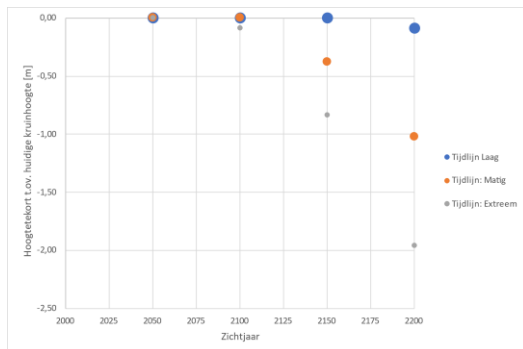
Tabel 44: Nominale kosten Inlaatwerk, Uitlaatwerk en Doorlaatwerk Krammersluizen per tijdlijn en zichtjaar

A.4 Flakkeese spuisluis

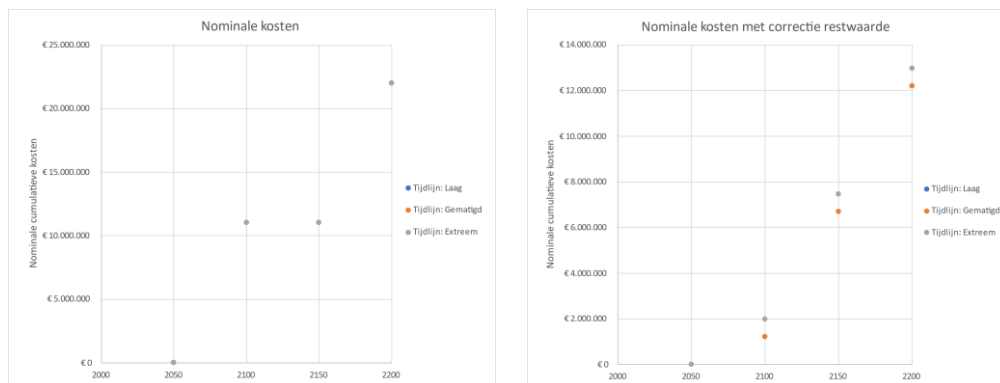
De Flakkeese spuisluis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor de tijdlijnen Laag en Gematigd en Extreem hoeft het kunstwerk niet aangepast te worden voor einde levensduur waardoor geen verschil is tussen strategie 1 en 2. Bij de tijdlijn Extreem dient de Flakkeese spuisluis net voor einde levensduur (2082) aangepast te worden. Het is goedkoper om het kunstwerk direct te vervangen in plaats van deze eerst te versterken en daarna te vervangen. De kosten voor de tijdlijn Extreem zijn daardoor hoger dan voor de tijdlijnen Laag en Gematigd. De restwaarde in 2200 is namelijk lager voor de tijdlijn Extreem dan voor de tijdlijnen Laag en Gematigd.

Flakkeese spuisluis		
Kosten vervanging 2022	[€]	11.002.450
KostenType	[-]	Gemaal - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	3,7
Einde levensduur	[-]	2089
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00012

Tabel 45: Kenmerken Flakkeese spuisluis



Figuur 68: Hoogtetekort Flakkeese spuisluis



Figuur 69: Nominale kosten cumulatief Flakkeese spuisluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 2	

2050	€ 0	€ 0
2100	€ 11.002.450	€ 1.210.270
2150	€ 11.002.450	€ 6.711.495
2200	€ 22.004.900	€ 12.212.720
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 11.002.450	€ 1.210.270
2150	€ 11.002.450	€ 6.711.495
2200	€ 22.004.900	€ 12.212.720
Tijdlijn: Extreem	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 11.002.450	€ 1.980.441
2150	€ 11.002.450	€ 7.481.666
2200	€ 22.004.900	€ 12.982.891

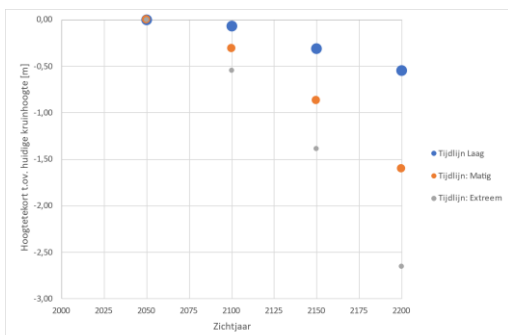
Tabel 46: Nominale kosten Flakkeese spuisluis per tijdlijn en zichtjaar

A.5 Zandkreekdam

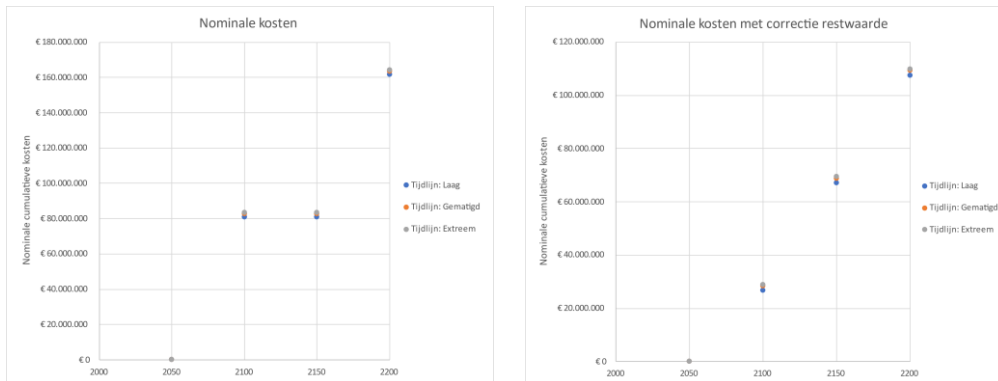
In het kunstwerk de Zandkreekdam zijn twee objecten aanwezig. Dit zijn de "Zandkreeksluis" en de "Katse Heule". Dit zijn respectievelijk een schutsluis en een doorlaatwerk. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Bij de tijdlijn Laag hoeven de Zandkreeksluis en de Katse Heule beide niet versterkt te worden voor einde levensduur. Er is geen verschil tussen de strategie 1 en strategie. Bij de tijdlijnen Gematigd en Extreem is strategie 2 het goedkoopst voor beide objecten. De objecten worden versterkt in zichtjaar 2060 bij de tijdlijn Gematigd en in 2056 bij de tijdlijn Extreem en pas vervangen bij einde levensduur. De kosten nemen toe bij het extremer worden van de tijdlijnen.

		Zandkreeksluis	Katse Heule
Kosten vervanging 2022	[€]	80.798.342	3.582.784
KostenType	[-]	Schutsluis - Groot	Gemaal - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	3,5	3,5
Einde levensduur	[-]	2067	2067
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00004	0,00004

Tabel 47: Kenmerken objecten Zandkreekdam



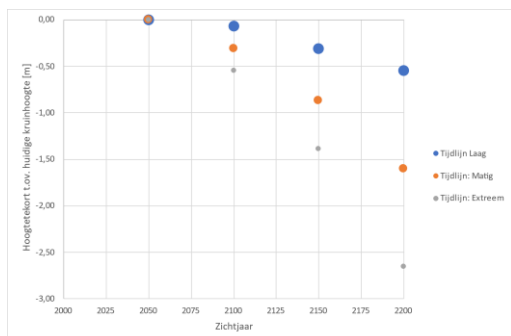
Figuur 70: Hoogtetekort Zandkreeksluis



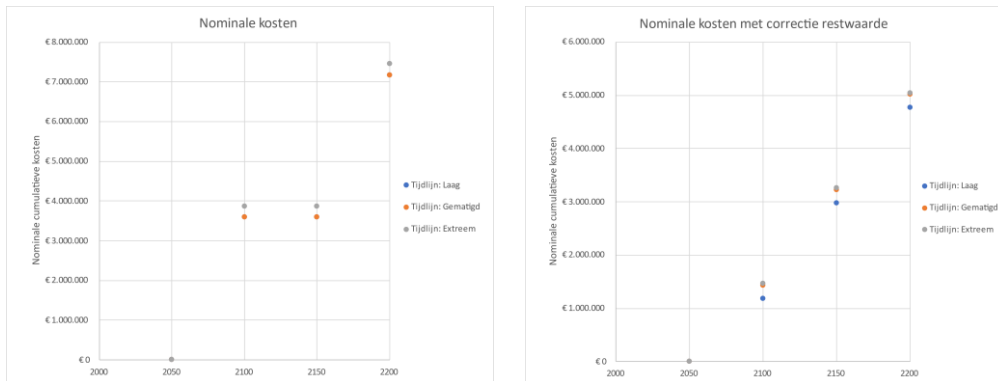
Figuur 71: Nominale kosten cumulatief Zandkreeksluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 80.798.342	€ 26.663.453
2150	€ 80.798.342	€ 67.062.624
2200	€ 161.596.685	€ 107.461.795
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 82.557.006	€ 28.422.116
2150	€ 82.557.006	€ 68.821.288
2200	€ 163.355.348	€ 109.220.459
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 83.132.920	€ 28.998.030
2150	€ 83.132.920	€ 69.397.201
2200	€ 163.931.262	€ 109.796.373

Tabel 48: Nominale kosten Zandkreeksluis per tijdlijn en zichtjaar



Figuur 72: Hoogtetekort Katse Heule



Figuur 73: Nominale kosten cumulatief Katse Heule: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.582.784	€ 1.182.319
2150	€ 3.582.784	€ 2.973.711
2200	€ 7.165.568	€ 4.765.103
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.582.784	€ 1.433.114
2150	€ 3.582.784	€ 3.224.506
2200	€ 7.165.568	€ 5.015.898
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.864.057	€ 1.463.592
2150	€ 3.864.057	€ 3.254.984
2200	€ 7.446.841	€ 5.046.376

Tabel 49: Nominale kosten Katse Heule per tijdlijn en zichtjaar

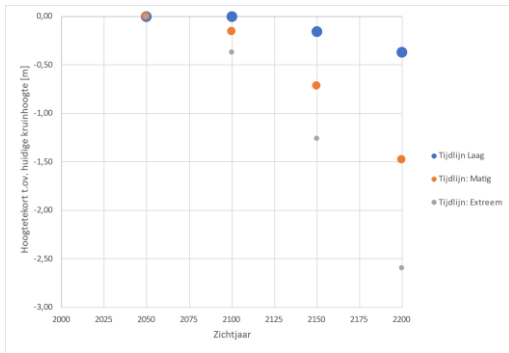
A.6 Bergsediepsuis

De Bergsediepsuis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kunstwerk hoeft niet aangepast te worden voor einde levensduur voor de tijdlijn Laag. Voor de tijdlijn Laag is er geen verschil in kosten tussen strategie 1 en strategie 2. Bij de tijdlijnen Gematigd en Extreem is het goedkoper om de constructie te versterken tot einde levensduur en daarna te vervangen (strategie 1). Het kunstwerk dient versterkt te worden in zichtjaar 2078 bij de tijdlijn Gematigd en in 2068 bij de tijdlijn Extreem. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijn.

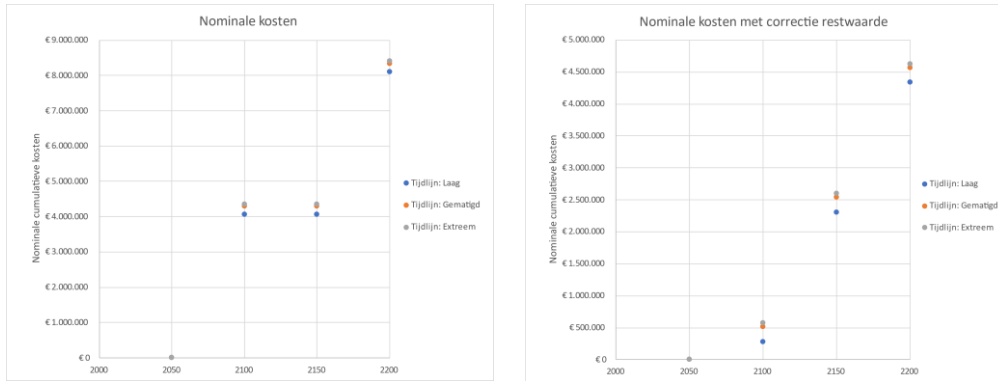
	Bergsediepsuis
--	----------------

Kosten vervanging 2022	[€]	4.050.916
KostenType	[-]	Schutsluis - Zeer klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,0
Einde levensduur	[-]	2093
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000012

Tabel 50: Kenmerken Bergsediepsluis



Figuur 74: Hoogtetekort Bergsediepsluis



Figuur 75: Nominale kosten cumulatief Berge Diepsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 4.050.916	€ 283.564
2150	€ 4.050.916	€ 2.309.022
2200	€ 8.101.831	€ 4.334.480
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 4.285.009	€ 517.657
2150	€ 4.285.009	€ 2.543.115
2200	€ 8.335.924	€ 4.568.573
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	

2050	€ 0	€ 0
2100	€ 4.342.757	€ 575.406
2150	€ 4.342.757	€ 2.600.863
2200	€ 8.393.673	€ 4.626.321

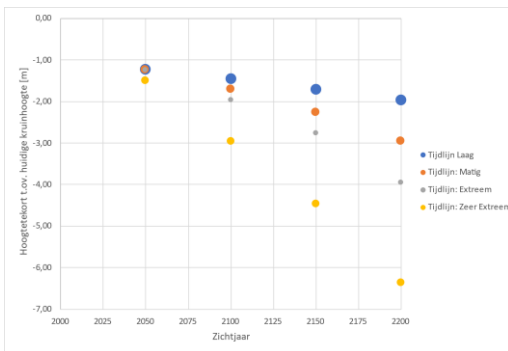
Tabel 51: Nominale kosten Bergse Diepsluis per tijdlijn en zichtjaar

A.7 Sluizencomplex Hansweert

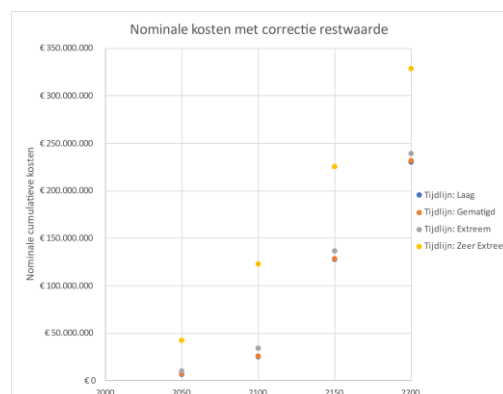
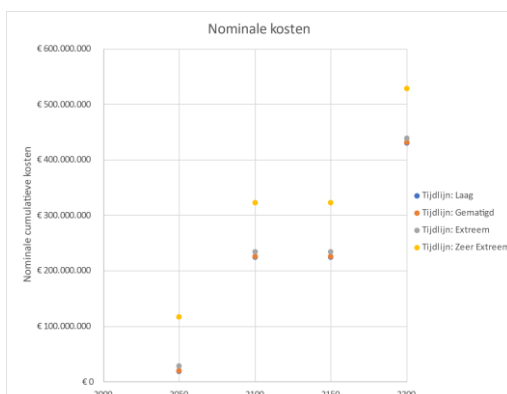
In het kunstwerk de Hansweert zijn twee identieke schutsluizen aanwezig. Dit zijn de Oostelijke sluis en de Westelijke sluis. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor de alle vier tijdlijnen is het goedkoper om het kunstwerk aan te passen tot einde levensduur en dan te vervangen (strategie 1). De constructie dient bij alle vier de tijdlijnen vervangen te worden in zichtjaar 2023. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen. De versterking in 2023 is namelijk zwaarder bij extremere tijdlijnen.

		Oostelijke sluis en Westelijke sluis
Kosten vervanging 2022	[€]	205.462.115
KostenType	[-]	Schutsluis - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	6,1
Einde levensduur	[-]	2097
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000012

Tabel 52: Kenmerken Hansweert



Figuur 76: Hoogtetekort Hansweert



Figuur 77: Nominale kosten cumulatief Oostelijke of Westelijke sluis Hansweert: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 18.622.738	€ 6.794.783
2100	€ 224.084.853	€ 24.786.601
2150	€ 224.084.853	€ 127.517.659
2200	€ 429.546.968	€ 230.248.716
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 19.690.440	€ 7.184.350
2100	€ 225.152.555	€ 25.854.303
2150	€ 225.152.555	€ 128.585.361
2200	€ 430.614.670	€ 231.316.418
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 27.546.043	€ 10.050.583
2100	€ 233.008.158	€ 33.709.907
2150	€ 233.008.158	€ 136.440.964
2200	€ 438.470.273	€ 239.172.022
Tijdlijn: Zeer Extreem	Spoor 1	
2050	€ 116.724.047	€ 42.588.504
2100	€ 322.186.162	€ 122.887.910
2150	€ 322.186.162	€ 225.618.968
2200	€ 527.648.277	€ 328.350.025

Tabel 53: Nominale kosten Oostelijke of Westelijke sluis Hansweert per tijdlijn en zichtjaar

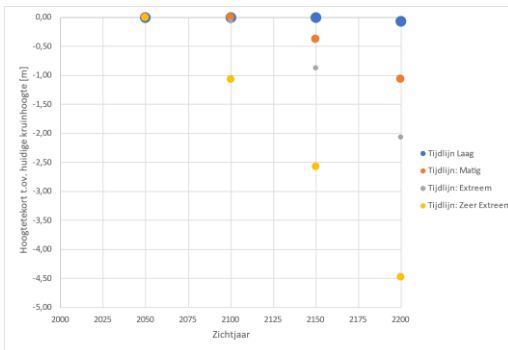
A.8 Sluizencomplex Terneuzen

In het kunstwerk Terneuzen zijn drie objecten aanwezig. Dit zijn drie verschillende schutsluizen, de "Oostsluis", "Middensluis" en de "Westsluis". De kruinhoogte van de Middensluis is lager dan van de Oostsluis en de Westsluis. Dit resulteert in verschillende strategieën. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De strategie voor de Oostsluis en de Westsluis is identiek. Bij de tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem wordt het kunstwerk direct vervangen wanneer een kruinhoogtetekort ontstaat. Er is geen verschil in kosten tussen de drie tijdlijnen. Bij de tijdlijn Zeer Extreem wordt het object eerst versterkt en daarna pas vervangen. Deze tijdlijn is duurder dan de tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem. Bij de Middensluis is strategie 1 het goedkoopst. Het object wordt eerst versterkt en daarna pas vervangen. De tijdlijn Zeer Extreem is duurder dan de tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem. Tussen laatstgenoemde drie tijdlijnen is geen verschil in kosten.

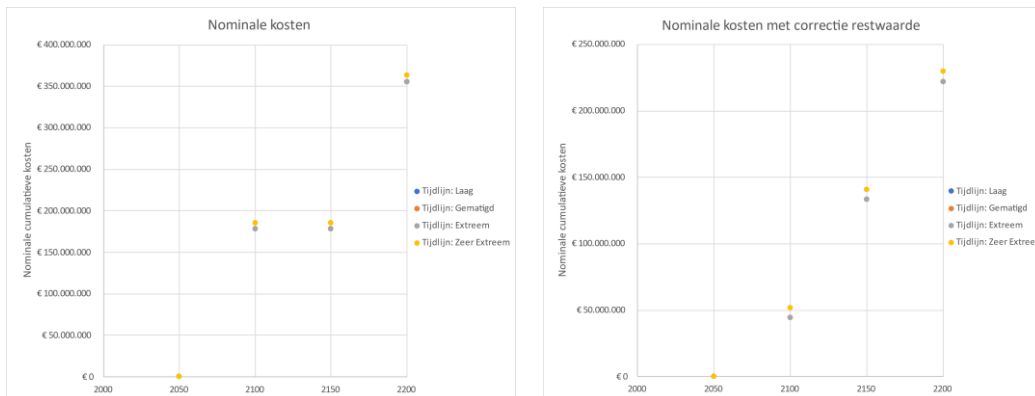
		Oostsluis	Middensluis	Westsluis
Kosten vervanging 2022	[€]	177.566.248	113.302.568	470.883.512

KostenType	[-]	Schutsluis - Groot	Schutsluis - Groot	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	7,0	6,0	7,0
Einde levensduur	[-]	2075	2034	2076
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00012	0,00012	0,00012

Tabel 54: Kenmerken Terneuzen



Figuur 78: Hoogtetekort Oostsluis

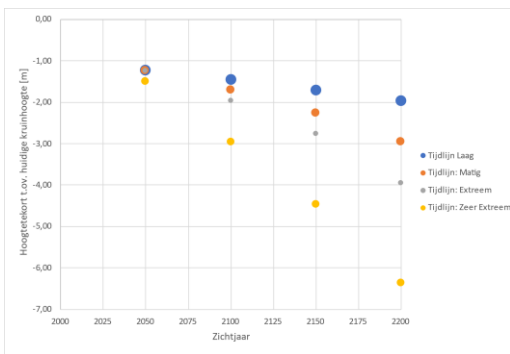


Figuur 79: Nominale kosten cumulatief Oostsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023.

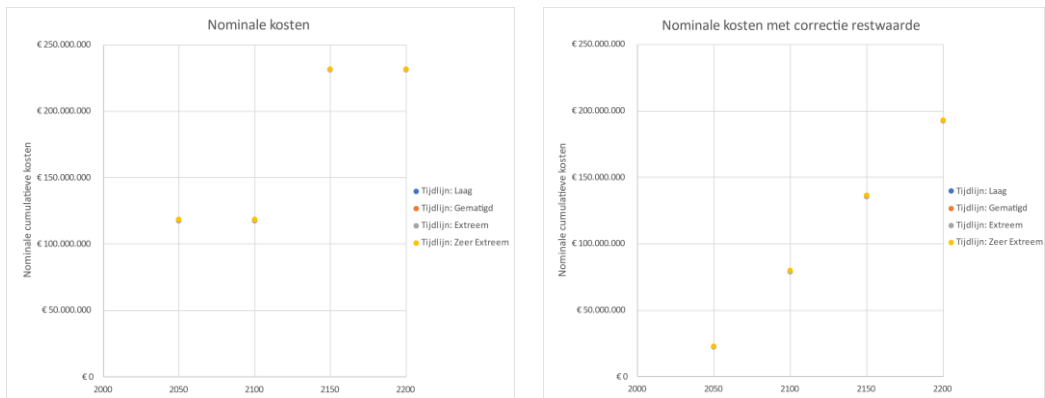
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 177.566.248	€ 44.391.562
2150	€ 177.566.248	€ 133.174.686
2200	€ 355.132.497	€ 221.957.811
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 177.566.248	€ 44.391.562
2150	€ 177.566.248	€ 133.174.686
2200	€ 355.132.497	€ 221.957.811
Tijdlijn: Extreem	Spoor 2	

2050	€ 0	€ 0
2100	€ 177.566.248	€ 44.391.562
2150	€ 177.566.248	€ 133.174.686
2200	€ 355.132.497	€ 221.957.811
Tijdlijn: Zeer Extreem	Spoor 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 185.228.136	€ 52.053.449
2150	€ 185.228.136	€ 140.836.574
2200	€ 362.794.384	€ 229.619.698

Tabel 55: Nominale kosten Oostsluis Terneuzen per tijdlijn en zichtjaar



Figuur 80: Hoogtetekort Middelsluis

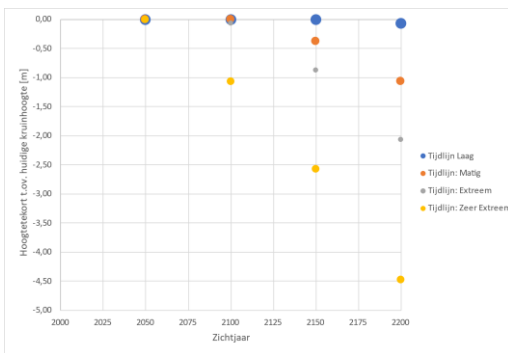


Figuur 81: Nominale kosten cumulatief Middelsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

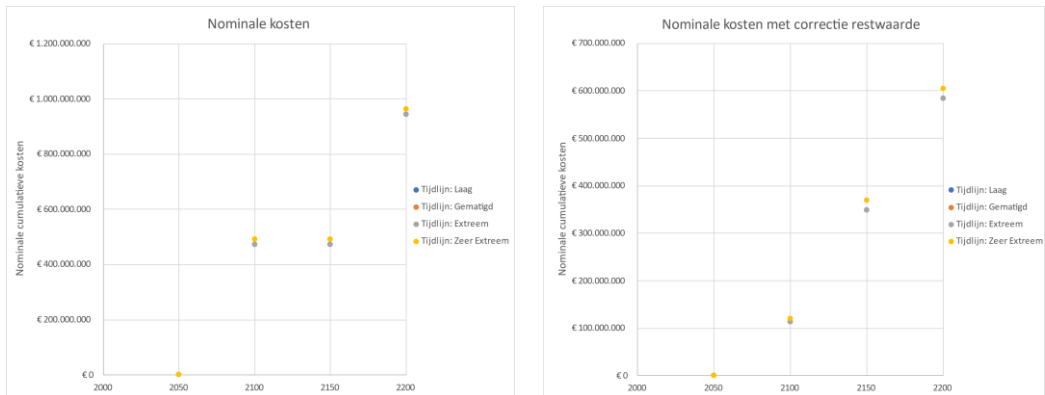
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 117.383.915	€ 22.209.758
2100	€ 117.383.915	€ 78.861.042
2150	€ 230.686.483	€ 135.512.326
2200	€ 230.686.483	€ 192.163.610
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 117.383.915	€ 22.209.758

2100	€ 117.383.915	€ 78.861.042
2150	€ 230.686.483	€ 135.512.326
2200	€ 230.686.483	€ 192.163.610
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 117.383.915	€ 22.209.758
2100	€ 117.383.915	€ 78.861.042
2150	€ 230.686.483	€ 135.512.326
2200	€ 230.686.483	€ 192.163.610
Tijdlijn: Zeer Extreem	Spoor 1	
2050	€ 118.191.512	€ 23.017.355
2100	€ 118.191.512	€ 79.668.639
2150	€ 231.494.080	€ 136.319.923
2200	€ 231.494.080	€ 192.971.207

Tabel 56: Nominale kosten Middensluis Terneuzen per tijdlijn en zichtjaar



Figuur 82: Hoogtetekort Westsluis



Figuur 83: Nominale kosten cumulatief Westsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 470.883.512	€ 113.012.043

2150	€ 470.883.512	€ 348.453.799
2200	€ 941.767.024	€ 583.895.555
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 470.883.512	€ 113.012.043
2150	€ 470.883.512	€ 348.453.799
2200	€ 941.767.024	€ 583.895.555
Tijdlijn: Extreem	Spoor 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 470.883.512	€ 113.012.043
2150	€ 470.883.512	€ 348.453.799
2200	€ 941.767.024	€ 583.895.555
Tijdlijn: Zeer Extreem	Spoor 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 491.201.880	€ 133.330.411
2150	€ 491.201.880	€ 368.772.167
2200	€ 962.085.392	€ 604.213.923

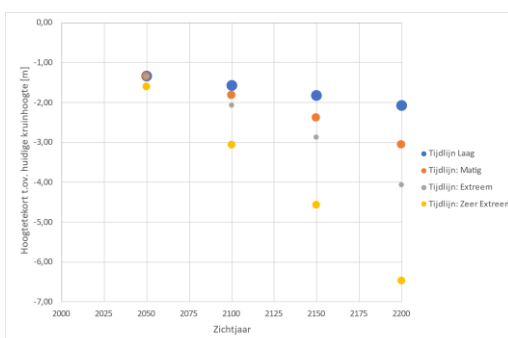
Tabel 57: Nominale kosten West sluis Terneuzen per tijdlijn en zichtjaar

A.9 Bathse spuisluis

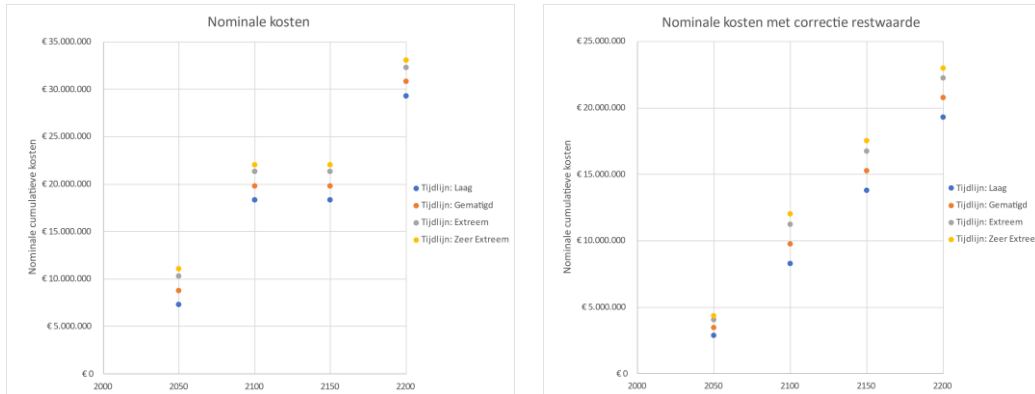
In het kunstwerk Bathse Spuisluis zijn zes objecten aanwezig. Dit zijn zes identieke spui/uitwateringssluizen. In Tabel 58 zijn voor één object de kenmerken gepresenteerd. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem is het goedkoper om het kunstwerk aan te passen tot einde levensduur en dan te vervangen. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen.

Spuisluis		
Kosten vervanging 2022	[€]	11.002.450
KostenType	[-]	Uitwateringssluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	6,6
Einde levensduur	[-]	2091
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000012

Tabel 58: Kenmerken Bathse Spuisluis.



Figuur 84: Hoogtetekort Bathse Spuisluis.



Figuur 85 Nominale kosten cumulatief Bathse Spuisluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde en verdisconteren kosten voor 2023

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Spoor 1	
2050	€ 7.275.643	€ 2.888.858
2100	€ 18.278.093	€ 8.265.864
2150	€ 18.278.093	€ 13.767.089
2200	€ 29.280.543	€ 19.268.314
Tijdlijn: Gematigd	Spoor 1	
2050	€ 8.766.366	€ 3.480.763
2100	€ 19.768.816	€ 9.756.586
2150	€ 19.768.816	€ 15.257.811
2200	€ 30.771.266	€ 20.759.036
Tijdlijn: Extreem	Spoor 1	
2050	€ 10.257.089	€ 4.072.668
2100	€ 21.259.539	€ 11.247.309
2150	€ 21.259.539	€ 16.748.534
2200	€ 32.261.989	€ 22.249.759
Tijdlijn: Zeer Extreem	Spoor 1	
2050	€ 11.002.450	€ 4.368.620
2100	€ 22.004.900	€ 11.992.671
2150	€ 22.004.900	€ 17.493.896
2200	€ 33.007.350	€ 22.995.121

Tabel 59: Nominale kosten Bathse Spuisluis per tijdlijn en zichtjaar

Berekende vakken + gekoppelde vakken								
<u>26001001</u>	<u>26001002</u>	<u>26001022</u>	<u>26001023</u>	<u>26001026</u>	<u>26001037</u>	<u>26001038</u>	<u>27001016</u>	<u>27001017</u>
26001001	26001002	26001005	26001023	26001026	26001034	26001031	27001011	27001013
27001006	26001003	26001006	26001024	26001027	26001035	26001032	27001012	27001017
	26001004	26001007	26001025	26001028	26001036	26001033	27001015	27001018
		26001008		26001029	26001037	26001038	27001016	27001019
		26001009		26001030			27001022	27001020
		26001010					27001023	27001021
		26001011					27001024	27001027
		26001012					27001025	27003006
		26001013					27001026	27003007
		26001014					27003008	
		26001015					270010141	
		26001016					270010142	
		26001017						
		26001018						
		26001019						
		26001020						
		26001021						
		26001022						

