

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Systeemanalyse waterveiligheid

Deelrapport Waddenzee en Eems-Dollard Hoofdrapport

Systeemanalyse waterveiligheid

Deelrapport Waddenzee en Eems-Dollard

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), Maarten Jansen (Witteveen+Bos), Tim van Engelen (Witteveen+Bos), David Knops (HKV), Jan Stijnen (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 november	50% rapportage
0.2	24 november	Aanpassing na reviewcommentaar RWS
0.3	23 januari	80% rapportage
0.4	31 januari	Aanpassing na reviewcommentaar RWS
0.5	29 maart	99% rapportage
0.6	5 april	Aanpassing na reviewcommentaar RWS
0.7	26 april	100% rapportage
1.0	30 mei	Publicatieversie



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Samenvatting

Achtergrond

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) wordt kennis ontwikkeld om op een beter onderbouwde manier om 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 voorkeurstrategie 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 spuiomogelijkheden onder vrij verval vanuit regionale systemen naar het hoofdwatersysteem en van daaruit naar zee wijzigen. Door grotere hydraulische belastingen is versterking van de keringen 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 keringen. Daarbij is zowel 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 Waddenzee

Deze rapportage gaat specifiek over het deelgebied Waddenzee en Eems-Dollard. Alle dijken en kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkeringen langs de Noord-Hollandse, Friese en Groningse Waddenzee en Eems-Dollard behoren tot de scope van deze studie. De zandige waterkeringen langs de Noordzee- en Waddenkust (duinen) zijn onderdeel van de regio Kust¹ en zijn gerapporteerd in de betreffende rapportage [RWS,2023c].

De Afsluitdijk is een belangrijke dam die momenteel in versterking is, waarbij de veronderstelling is dat deze tot ongeveer 2 tot 3 meter zeespiegelstijging veiligheid

¹ Voor dijktraject 13-4 betekent dit dat zandige waterkeringen tussen Den Helder en Huisduinen en ook de harde waterkering bij Den Helder onderdeel zijn van de rapportage Kust.

zal bieden². De Afsluitdijk als zijnde een dam valt buiten de scope van deze studie, maar de spuisluizen Stevinssluisen en Lorentzsluisen zijn wel beschouwd.

Effecten op hydraulische belastingen

Conform het huidige beleid (voorkeursstrategie van het Deltaprogramma Wadden) is er geen actief sturende strategie op het wel of niet meegroeien van de bodem met zeespiegelstijging (zoals langs de kust wel het geval is). Daarom wordt in deze studie de huidige geobserveerde bodemtrend als beleidsuitgangspunt gehanteerd en doorgetrokken naar de toekomst. Voor een groot deel van de Waddenzee is de huidige trend dat de bodem (licht) aangroeit ten opzichte van een bodem die niet zou meegroeien met de zeespiegelstijging. De geulbodem bij de Eems-Dollard groeit vrijwel niet aan. De platen en kwelders groeien wel aan.

In de gehanteerde methode is de veronderstelling dat de toename van de zeespiegelstijging 1-op-1 doorwerkt op de toename van de waterstanden. De doorwerking van de zeespiegelstijging op de minimaal benodigde kruinhoogten van de waterkeringen om aan de normen te voldoen is afhankelijk van de golven en de verandering van de bodemliging. Doordat de golven het hoogste zijn tussen het Lauwersmeer en de Eems-Dollard, is de minimaal benodigde kruinhoogte daar ook het hoogst. De minimaal benodigde kruinhoogte stijgt sneller stijgt dan de zeespiegelstijging. Dit komt omdat de golfbelasting toeneemt door de hogere waterstanden en de bodem de zeespiegelstijging niet kan volgen in het bodemscenario Voortzetting Trend.

Resultaten opgave

Omdat de doorwerking van de zeespiegelstijging op de minimaal benodigde kruinhoogte van de waterkeringen langs de Waddenzee en Eems-Dollard verschilt komt dit ook terug in de opgave voor de hoogte van de waterkeringen. Dit komt door de mate van beschutting en de oriëntatie van de waterkering. De hoogteopgave is het grootst aan de oostkant van de Waddenzee en de Eems-Dollard, vanwege de grotere golven die kunnen optreden in combinatie met de lokale (autonome) bodemdaling. Het verschil in lokaal aanwezige resthoogte hedendaags en de dijkoriëntatie zorgen daarnaast voor een verschil in de berekende hoogteopgave door zeespiegelstijging. De variatie in veiligheidsnormen is binnen dit gebied beperkt en heeft daardoor weinig effect op de variatie in hoogteopgave.

De toename van de waterstanden door 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 zeespiegelstijging minder variatie in waterveiligheidsopgave geeft dan het faalmechanisme hoogte. 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). Dit is in beeld gebracht voor verschillende maten van zeespiegelstijging. De waterveiligheidsopgave voor macrostabiliteit is het grootst bij de dijktrajecten bij Den Helder (13-4), Texel (5-2), Oostelijk van Lauwersmeer tot de grens met Duitsland (6-6 en 6-7) en voor piping bij de dijktrajecten Schiermonnikoog (1-2), Terschelling (3-2), Wieringen (12-1), Lauwersmeer (6-5) en oostelijk van Eemshaven tot de grens met Duitsland (6-7). Opgemerkt wordt dat weliswaar de waterveiligheidsopgave (gemiddeld per dijktraject) voor piping op groter is dan voor

² Het ontwerp van de Afsluitdijk is gebaseerd op een relatief laag kritisch overslagdebiet van 10 l/s/m. Nieuwe dijken kunnen over het algemeen weerstand bieden tegen 100 l/s/m. De onderbouwing hiervan wordt gegeven in een onderzoeksrapport van Daneshi (2023) dat is begeleid door RWS.

macrostabiliteit, maar nog steeds gemiddeld per dijktraject een factor 2 – 4x kleiner is ten opzichte van de opgave in het rivierengebied³.

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 50⁴ cm zeespiegelstijging in dat jaar. Het betreft een globale inschatting, die in andere programma's in de komende tijd meer nauwkeurig zal worden berekend. Aanvullend zijn zowel de totale nominale kosten per jaar, als de kosten per kilometer dijkversterking bepaald als functie van de zeespiegelstijging ten opzichte van het "systeem op orde". Op hoofdlijnen volgt daaruit dat de verwachte versterkingskosten voor de opgave na 2050 in dezelfde orde grootte liggen als het huidige jaarlijkse budget van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (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 kunstwerken⁵ worden hoofdzakelijk gedomineerd door de vervangingskosten van de Stevinsluizen en Lorentzsluizen.

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 potentiële oprekmogelijkheden

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

Voor de Waddenzee en Eems-Dollard is de invloed van de bodemligging en een ander type vegetatie op de voorlanden onderzocht. Voor de Waddenzee en Eems-Dollard is het basisscenario dat de bodem gedeeltelijk meegroeit met de zeespiegelstijging (voorkeursstrategie betreft voortzetting van de huidige

³ De waterveiligheidsopgave is gemiddeld per dijktraject o.b.v. alle dijkvakken langs een dijktraject. Hierbij wordt opgemerkt dat voor sommige dijkvakken binnen een dijktraject geldt dat deze niet gevoelig zijn piping en/of macrostabiliteit, waardoor de gemiddelde opgave per dijktraject lager wordt. Dit speelt in het Rivierengebied veel minder. Voor kustgebieden speelt ook dat door de korte stormduur piping en macrostabiliteit minder snel tot een opgave zullen leiden dan in het rivierengebied. Dit laatste effect is niet in deze beleidsstudie onderzocht.

⁴ Het betreft hier een bandbreedte die kan oplopen tot 50 cm 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 25 cm zeespiegelstijging volgens tijdlijn Laag in 2050.

⁵ 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).

bodemtrend). Om het effect van de andere bodemscenario's (niet meegroeien en volledig meegroeien van de bodem met de zeespiegelstijging) inzichtelijk te krijgen, zijn de implicaties voor de hydraulische belastingen en de kosten voor de waterveiligheidsopgave bepaald voor de deze bodemscenario's. Het volledig meegroeien van de bodem van de Waddenzee met de zeespiegelstijging geeft de grootste verlaging van de minimaal benodigde kruinhoogte (golven). Dit effect is het grootste voor de locaties waar de golfdoordringing het groot is, zoals bij Den Helder en Pieterburen. Het bodemscenario waarbij de bodem niet mee groeit met de zeespiegelstijging geeft verreweg de grootste toenames van de minimaal benodigde kruinhoogtes.

Het effect van een ander type vegetatie op het voorland van de dijk heeft een nihil effect op de golfhoogte in de Waddenzee en Eems-Dollard bij de normcondities. Een ander aspect van vegetatie is het invangen van sediment. Hierdoor stijgt het voorland en dat heeft een gunstig effect op de HBN's. De haalbaarheid van het invangen van sediment is niet beschouwd.

Summary

Background

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 affect 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 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 spatial constraints. Finally, a number of sensitivity analyses were conducted to gain insight into potentially viable extensibility options for the current water system design.

Scope

This report specifically focuses on the Wadden sea and Eems-Dollard delta region. This includes all primary dikes and structures along the North-Holland, Frisian and Groningen coastlines of the Wadden sea, as well as the Ems-Dollard delta. The sandy coastal defences (dunes) in this region are considered in the report on the coastal region¹ [RWS,2022d].

The Afsluitdijk is an important dam on the IJsselmeer lake that is currently being reinforced. It is assumed that the reinforcement will provide protection for 2-3 meters of sea level rise². Being a dam, the Afsluitdijk falls outside the scope of this study, however, the discharge sluices at Stevin sluizen and Lorentzsluizen have been considered.

Effects of hydraulic loads

Unlike the North-sea coast, the current policy of the Wadden Delta program does not include a strategy for the seabed level to grow at the same rate as sea level rise. Therefore, in the present study, the current observed bed level trend is used

¹ For dike section 13-4 this means that the dunes between Den Helder en Huisduinen are part of the coastal report, as well as the structures around Den Helder.

² The design of the Afsluitdijk is based on a relatively low critical overtopping flow rate of 10 l/s/m. New dikes can generally withstand 100 l/s/m. This is substantiated in a research report by Daneshi (2023).

and extended into the future. For most of the Wadden Sea, as well as the flats and salt marshes, this trend results in minor bed level growth over time. The channel bed of the Eems-Dollard delta is not observed to be growing at all.

The applied method assumes that sea level rise has a 1-to-1 effect on the increase in water levels. Sea level rise also impacts the required flood defence heights through its effects on waves and changes in sea bed level. The highest flood defence heights are between Lauwersmeer and Eems-Dollard, where the waves are the highest. The minimum required defence height must rise faster than sea level rise, because a) the wave load increases with water level and b) the bed level does not keep pace with sea level rise in the current strategy.

Impact of sea-level rise on flood defences

The effect of sea level rise on flood defences along the Wadden Sea and Eems-Dollard delta differs, which is reflected in the required heights of their respective defences. This is due to the degree of shelter and orientation of the flood defences. The height requirement is greatest on the east side of the Wadden Sea and the Eems-Dollard delta, due to the larger waves that can occur, in combination with (uncontrolled) local subsidence. Variability in existing defence heights and dike orientations also cause a difference in the required height increases needed due to sea level rise. The variation in safety standards is limited within this area, and therefore has little effect on the variation in required heights.

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, and the sections where the greatest reinforcement is needed have been identified. It should be noted that while the flood-risk management requirements (on average per dike segment) for piping are larger than those for macrostability, on average they are still a factor 2-4 times smaller per dike segment than the requirements in the riverine area³.

Impacts on costs and expected reinforcement requirements

Based on the above analyses, estimates have been made of the costs for the minimum required heightening and widening of the flood defence profiles. For this, a cut-off point was set at the year 2050: the year in which the primary flood defences must comply with the safety standards in the Water Act.

Estimating the costs of getting the defences up to standard by 2050 is necessary in order to relate the dike reinforcement costs after 2050 (for higher values of sea level rise, e.g. 1 m) to the current investment costs of the High Water Protection Program (Dutch acronym: HWBP). Therefore, the costs to be incurred up to 2050 have been determined taking into account a sea-level rise of 0.25 to 0.50m⁴ by that year. This is a rough estimate; Rijkswaterstaat and local water authorities will be working on a more detailed estimate of these costs in the near future. In addition, the total nominal costs of bringing the defences up to standard, per year and per kilometre of dike reinforcement, have been determined as a function of sea-level rise.

³ Unlike riverine areas, sensitivity to strength mechanisms can vary considerably along a dike section. Due to the shorter storm durations associated with coastal areas, piping and macrostability are less of an issue than riverine areas, however this has not been considered in this present study.

⁴ 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.

The costs for the structures⁵ are dominated by the replacement costs for Stevinsluizen and Lorentzsluizen.

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.

Potentially viable extensibility options

In addition to the above analyses, various scenarios have been explored to test the sensitivity of certain choices and assumptions. For the Wadden Sea and the Eems-Dollard delta, the influence of the seabed level and the foreshore vegetation have been investigated. In the baseline scenario, some areas of the seabed level grow at the same rate as sea level rise (i.e. the preferred strategy in which the current seabed level trend continues). The implications for two other bed level scenarios (i.e. the entire bed grows at a slower rate, or grows at the same rate as sea level rise) have been investigated in terms of the hydraulic loads and flood defence costs. Allowing the bed of the Wadden Sea to grow at the same rate as sea level rise results in the greatest reduction in the required flood defence heights. This effect is greatest in locations with significant wave penetration, such as at Den Helder and Pieterburen. The scenario in which the seabed does not grow in line with the sea level rise gives by far the largest increases in the required flood defence heights.

The effect of a different vegetation type on the foreshore of the dike has no effect on the wave height in the Wadden Sea and Eems-Dollard delta under extreme conditions. Another relevant characteristic of vegetation is that it can trap and build up sediments in the foreshore. As a result, the foreshore rises, which has a favourable effect on the water levels under extreme conditions. The feasibility of sediment capture has not been considered.

⁵ To determine the reinforcement requirements for the hydraulic structures, general characteristics have been used which may differ from the more detailed data available from the first round of the National Assessment (LBO1).

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Summary	7
Inhoudsopgave	10
1 Inleiding	12
1.1 Algemeen	12
1.2 Achtergrond project	12
1.3 Positie rapport Spoor II – Systeemanalyse waterveiligheid.....	13
1.4 Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1	14
1.5 Korte gebiedsbeschrijving	14
1.6 Inhoud van dit rapport	15
2 Aanpak op hoofdlijnen	16
2.1 Gehanteerde methode.....	16
2.2 Beschrijving tijdlijnen en referentiesituatie.....	17
3 Hydraulische belastingen Waddenzee en Eems-Dollard	20
3.1 Doel.....	20
3.2 Methode	20
3.3 Resultaten hydraulische belastingen.....	27
3.4 Samenvatting.....	33
4 Waterveiligheidsopgave kunstwerken	35
4.1 Doel.....	35
4.2 Methode	36
4.3 Resultaten	39
4.4 Samenvatting.....	42
5 Waterveiligheidsopgave dijken	43
5.1 Doel.....	43
5.2 Methode	44
5.3 Resultaten	47
5.4 Samenvatting.....	56
6 Gevoeligheidsanalyse	57
6.1 Inleiding	57
6.2 Parameter 1: Effect bodemligging	57
6.3 Parameter 2: Effect van vegetatie op voorland	69
6.4 Parameter 3: Effect van gebruikte SWAN-versie en instellingen	71
6.5 Samenvatting.....	73
7 Regionaal beeld en conclusies	75
7.1 Inleiding	75
7.2 Invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen.....	76
7.3 Versterkingsopgave per watersysteem	78
7.4 Kosten voor verschillende niveaus van ZSS.....	79
7.5 Ruimtelijke impact.....	83
7.6 Inschatting onzekerheidsbandbreedte resultaten	85

7.7	Effectiviteit van een aantal mogelijke oprekmogelijkheden.....	87
7.8	Conclusies	88
8	Referenties	91
Bijlage A	Kruinhoogtetekort en nominale kosten per kunstwerk.....	93

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) wordt kennis ontwikkeld om op een juiste 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 houdbaar 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 Waddenzee en Eems-Dollard beïnvloedt door zeespiegelstijging in het huidige hoofdwatersysteem. Parallel zijn dergelijke rapportages beschikbaar voor de andere Deltaprogramma deelgebieden.

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, het Ministerie van IenW en Staf Deltacommissaris 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

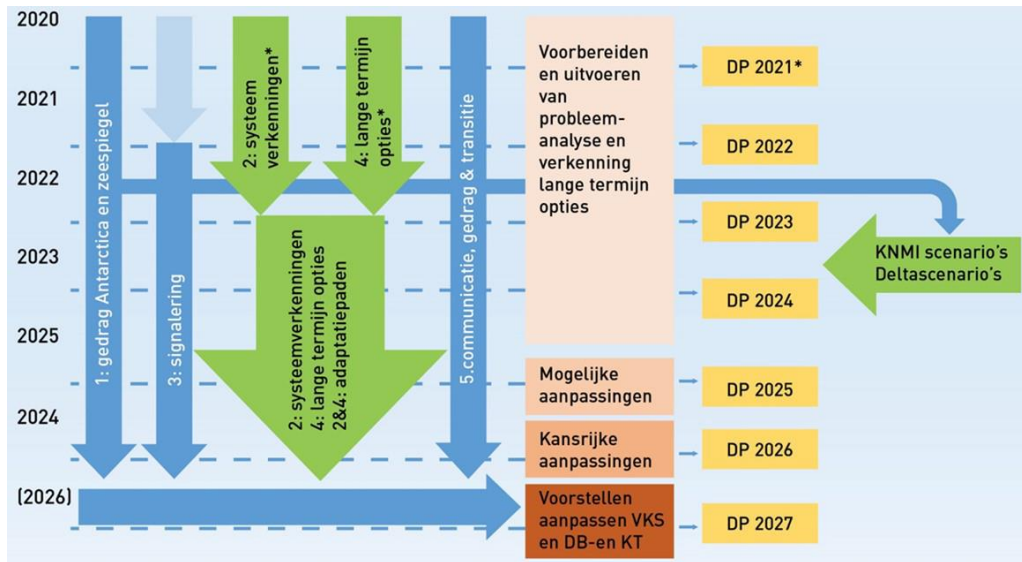
voldoen. De studie in dit project, zogenaamd 'Systeemanalyse Waterveiligheid', dient begrip van en inzicht te geven in het effect van ZSS op de belastingen en de doorwerking daarvan op de overstromingskans. Vervolgens wordt de versterkingsopgave (kosten en ruimtebeslag) in beeld gebracht en worden overige 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 DP-regio'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 Positie rapport Spoor II – Systeemanalyse waterveiligheid

De systeemanalyse waterveiligheid is onderdeel van Spoor II - Systemverkenningen. 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 (2022c) - Ketenaanpak WV KP ZSS spoor 2 - Samenvatting modelaanpak WV bij ZSS).

De doelstelling van spoor II Systemverkenningen 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.

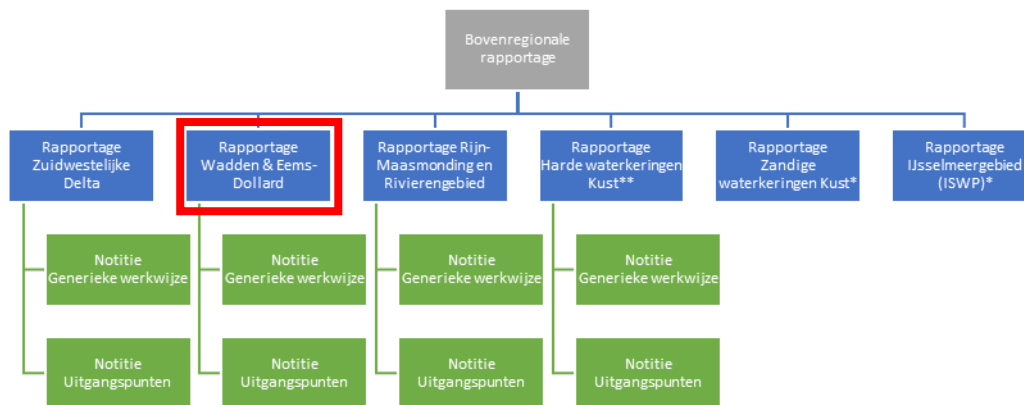
Dit rapport zal enkel het eerste punt behandelen.

1.4 Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1

Voor de systeemanalyse waterveiligheid van Spoor II zijn 6 rapportages per DP-regio opgesteld. Deze rapportages 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 riviereengebied 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].

Systeemanalyse waterveiligheid Spoor II – fase 1



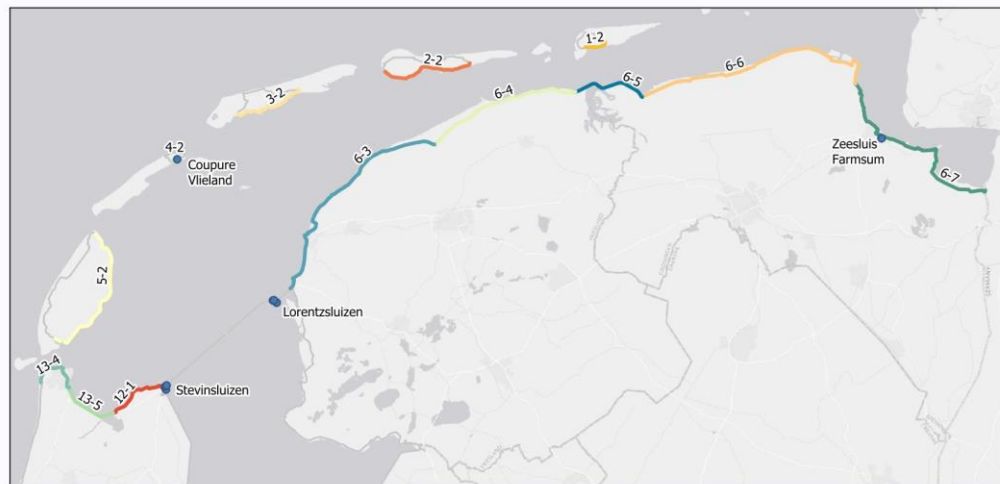
*) De systeemanalyses voor de Zandige waterkeringen Kust en de Meren en Vecht-IJsseldelta zijn door Rijkswaterstaat uitgevoerd en gerapporteerd. In de bovenregionale rapportage worden de resultaten voor deze Zandige waterkeringen Kust, Meren en Vecht-IJsseldelta geïntegreerd met de andere gebieden.

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

Figuur 2: Positionering rapportage Systeemanalyse Waddenzee en Eems-Dollard.

1.5 Korte gebiedsbeschrijving

Deze rapportage gaat over het deelgebied Waddenzee en Eems-Dollard. De scope omvat de gebieden die onder directe invloed staan van zeespiegelstijging. Daarmee behoren alle dijken, dammen en kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkeringen langs de Waddenzee en Eems-Dollard, exclusief de Afsluitdijk. Deze gebieden behoren tot de scope van dit rapport, zie figuur 3.



Figuur 3: scope dijken, dammen en kunstwerken in de regio Waddenzee en Eems-Dollard.

De Afsluitdijk valt buiten de scope van deze beleidsstudie. De Afsluitdijk wordt momenteel versterkt, waarbij in deze beleidsstudie wordt aangenomen dat deze tot 2 – 3 meter zeespiegelstijging zal voldoen aan de gestelde eisen. Het ontwerp van de Afsluitdijk gaat uit van een relatief laag kritisch overslagdebiët van 10 l/s/m. Nieuwe dijken kunnen over het algemeen weerstand bieden tegen 100 l/s/m. De onderbouwing hiervoor wordt gegeven in een onderzoek van een student dat beschikbaar is bij Rijkswaterstaat [Daneshi, 2023].

De Lorentzsluizen en Stevinsluizen zijn wel onderdeel van de scope, waarbij het uitgangspunt is de situatie voor de versterking het vertrekpunt is.

1.6 Inhoud van dit rapport

Dit rapport beschrijft resultaten van de systeemanalyse waterveiligheid voor de Waddenzee en Eems-Dollard.

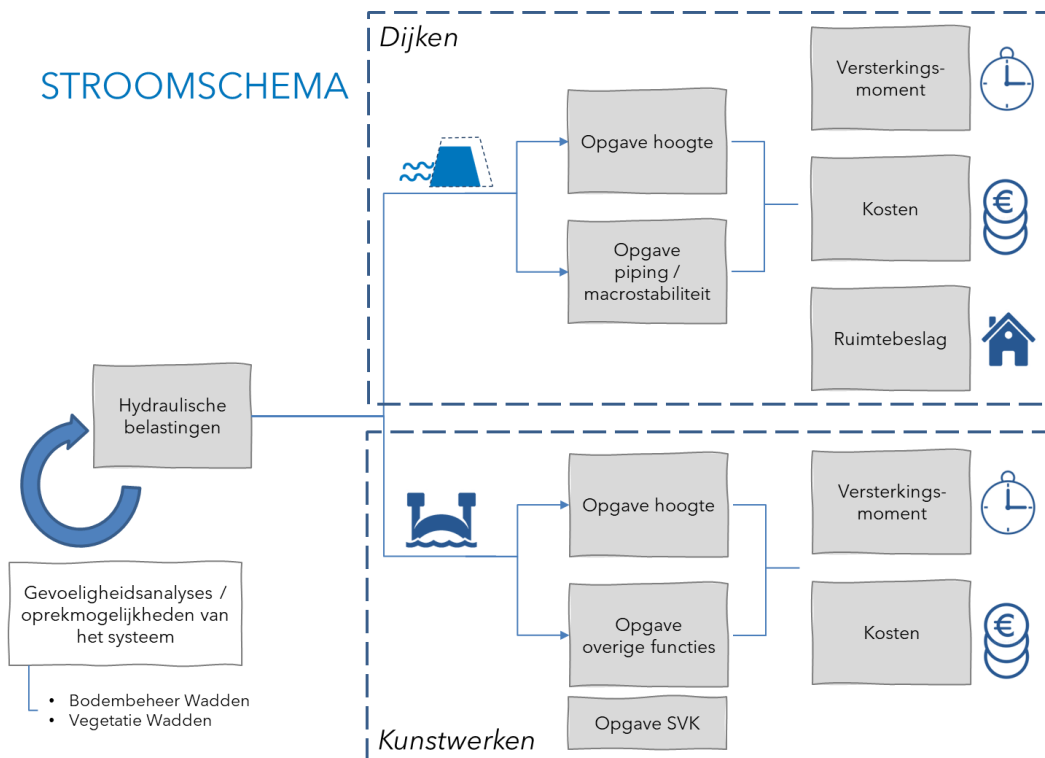
- Hoofdstuk 2: Aanpak op hoofdlijnen.
- Hoofdstuk 3: Hydraulische belastingen.
- Hoofdstuk 4: Waterveiligheidsopgave voor kunstwerken.
- Hoofdstuk 5: Waterveiligheidsopgave voor dijken.
- Hoofdstuk 6: Gevoeligheidsanalyses.
- Hoofdstuk 7: Regionaal beeld en conclusies.

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 voor de hydraulische belastingen, paragraaf 4.2 voor de methode voor de veiligheidsopgave voor de kunstwerken en paragraaf 5.2 voor de methode voor de veiligheidsopgave 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 beschrijft de mate van zeespiegelstijging, afgezet tegen de tijd, maar bevat ook informatie over het sluitpeil van de stormvloedkeringen en over de

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

afvoerstatistiek op de rivieren (voor de Waddenzee en Eems-Dollard niet relevant). In paragraaf 2.2 wordt hier nader bij stilgestaan. De hydraulische belastingen voor de Waddenzee en Eems-Dollard 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 3.2.

- 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 ontwerp praktijk (business as usual). De waterveiligheidsopgave voor dijken wordt bepaald met een voor het KP-ZSS speciaal ontwikkelde versie van OKADER² [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 en 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 voor de kunstwerken met een overige functie voor waterveiligheid, naast dat het een onderbreking van de waterkering betreft, de werking beoordeeld³. Dit geldt ook voor de stormvloedkeringen⁴, uitgedrukt in het afkeurjaar waarin het kunstwerk niet meer aan de ondergrens van de norm voldoet.
- Het uitvoeren van **gevoeligheidsanalyses** op de hydraulische belastingen. Voor de Waddenzee en Eems-Dollard is het effect van bodemligging en vegetatie op het voorland op de hydraulische belastingen onderzocht. Het effect op de waterveiligheid is enkel beschouwd voor het effect van bodemligging.
- Het duiden van de resultaten aan de hand van de indicatoren in het duidingskader.

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 de Waddenzee en Eems-Dollard en bodemdaling onder de dijk. De waterveiligheidsopgave is bepaald voor 4 tijdlijnen: Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem.

² 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.

³ Voor de Waddenzee en Eems-Dollard zijn dit alleen de Lorentzsluizen en de Stevinssluisen. De invloed van zeespiegelstijging op de spuicapaciteit van de Lorentzsluizen en Stevinssluisen is beschouwd in de Systeemanalyse IJsselmeergebied [RWS,2019].

⁴ In de Waddenzee en Eems-Dollard zijn geen stormvloedkeringen aanwezig.

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.

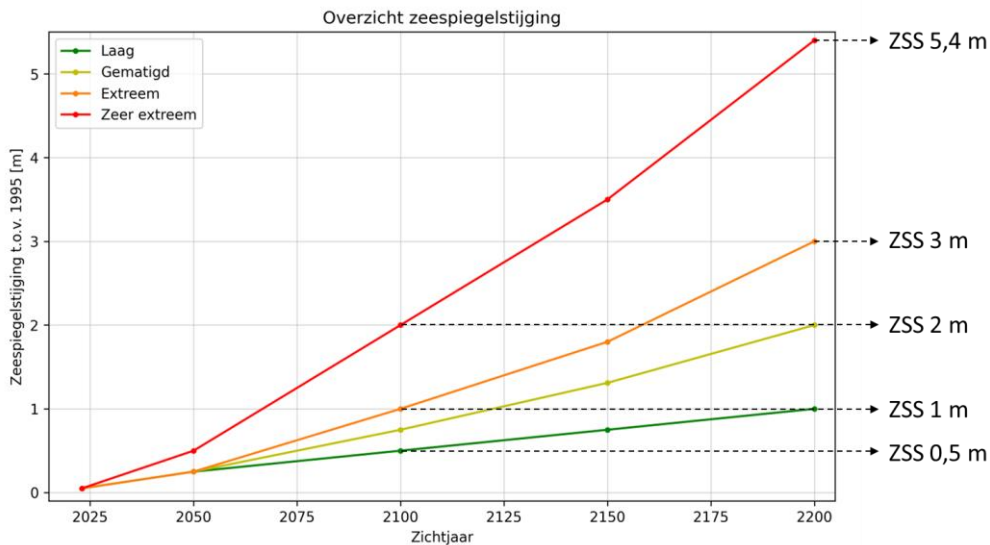
De *referentiesituatie* die gehanteerd wordt komt overeen met de huidige situatie van het watersysteem met daarin meegenomen alle reeds geplande maatregelen in de toekomst. In meer detail betekent dit het volgende:

- 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 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 Figuur 5 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.

Zeespiegelstijging kan gepaard gaan met bodemhoogteveranderingen door allerlei morfologische processen. Voor de Waddenzee en Eems-Dollard 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 de huidige (niet actief gestuurde) trend volgt. 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 in de Westerschelde en langs de kust – in lijn met de VKS in die gebieden - is gekozen voor een bodem die volledig meegroeit met de zeespiegelstijging.

3 Hydraulische belastingen Waddenzee en Eems-Dollard

3.1 Doel

Dit hoofdstuk beschrijft hoe de hydraulische belastingen voor de Waddenzee en Eems-Dollard zijn bepaald. Deze bestaan uit frequentielijnen voor de waterstand en het hydraulisch belastingniveau voor golfoploop en golfoverslag ofwel de benodigde kruinhoogte (HBN)⁵, om zo de koppeling te kunnen leggen met de waterveiligheidsopgave en kostenberekeningen voor dijken en kunstwerken. De hydraulische belastingen voor de Waddenzee en Eems-Dollard zijn bepaald volgens de illustratiepuntenmethode, hieronder beschreven ([Deltares, 2022a]; zie ook [Rijkswaterstaat, 2022c]).

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 5).

3.2 Methode

Voor het bepalen van de hydraulische belastingen in de Waddenzee en Eems-Dollard is gebruik gemaakt van de illustratiepuntenmethode ([Deltares, 2022a] en [Rijkswaterstaat, 2022c]). Deze methode is een verkorte versie van het volledig berekenen van nieuwe databases fysica, wat gegeven de rekenintensiteit van het Waddenzee 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 waterstand windsnelheid en windrichting in het zgn. illustratiepunt, dat is bepaald met een voor Kennisprogramma Zeespiegelstijging speciaal ontwikkelde versie van Hydra-NL (versie 2.8.4), op basis van zeespiegelstijging. Getijvorming nemen we niet mee. De methode wordt hieronder nader uitgelegd.

Zoals in hoofdstuk 2 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 sedimentbeheer op de waterveiligheidsopgave in kaart te brengen.

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: Voorzetting Trend). Haventerreinen groeien niet mee. 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 (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 (zie ook paragraaf 6.2):

1. de bodem blijft constant (NM: Niet Meegroeien);
 - geen verandering van de huidige bodem.
2. de bodem volgt de huidige trend (VT: Voorzetting Trend);

⁵ zie voor een uitleg van het begrip HBN HKV (2020).

- bodem in 2100 (80 jaar voortzetting huidige trends)
 - bodem in 2200 (180 jaar voortzetting huidige trends)
3. de bodem groeit volledig mee met 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.

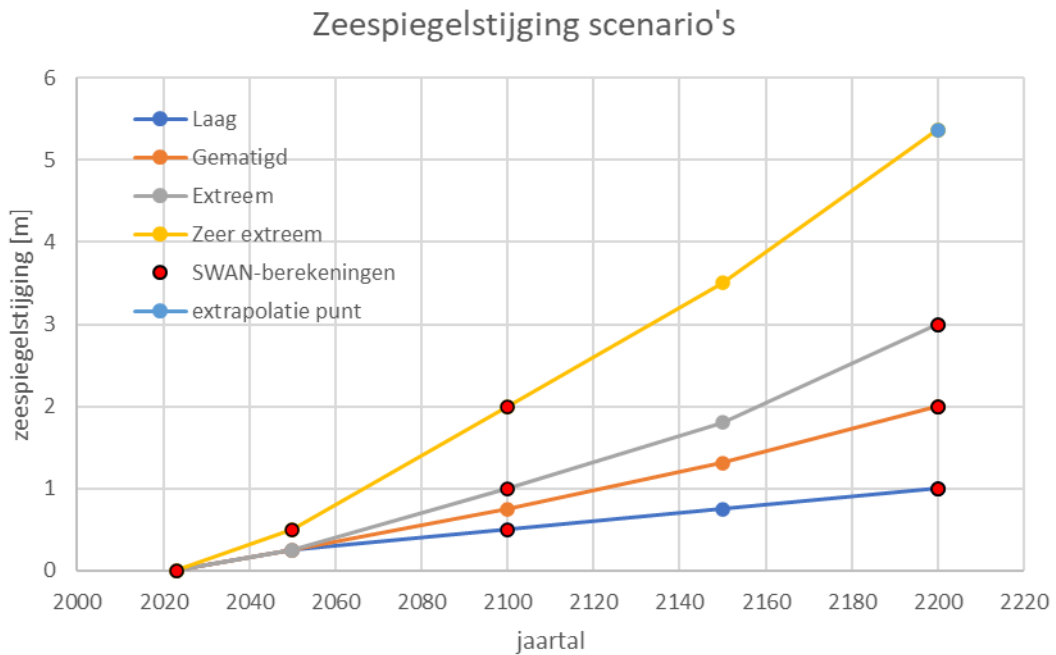
In de voorkeursstrategie wordt uitgegaan van scenario 2: het volgen van de trend van de bodem met de zeespiegelstijging.

In de Waddenzee en Eems-Dollard wordt dus aangehouden dat de bodem in de basis met de huidige trend meegroeit. Om de invloed van de verschillende bodems op de hydraulische belastingen en de waterveiligheidsopgave in beeld te brengen zijn in paragraaf 6.2 berekeningen uitgevoerd met elk van deze bodems.

Om tot hydraulische belastingen langs de Waddenzee en Eems-Dollard te komen worden de volgende stappen uitgevoerd:

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 bodemscenario Niet Meegroeien voor de verschillende tijdlijnen (met database fysica van de HR2011/WBI2017);
3. Stap 3: Bepalen van het ontwerppunt (windsnelheid, windrichting en lokale waterstand in het illustratiepunt⁶) voor de geselecteerde locaties met Hydra-NL;
4. Stap 4: Categoriseren van de ontwerppunten naar windsnelheid, windrichting en lokale waterstand. Op deze manier zijn 19 'unieke' condities bepaald waarmee nieuwe golfcondities in de geselecteerde punten bepaald kunnen worden. In Rijkswaterstaat (2022c) is dit nader uitgewerkt;
5. Stap 5: Berekenen met SWAN-2D voor de geselecteerde condities uit stap 4 (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 6 voor welke waarden van ZSS SWAN berekeningen zijn gemaakt;
6. Stap 6: Bepalen van het effect van voorlanden en haventerreinen op golfcondities met SWAN-1D voor representatieve HR-locaties binnen de OKADER-vakken met een voorland. Dit is een extra nauwkeurigheids slag 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 HBNs 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 het HBN uit stap 10 en HBN referentie uit stap 2.

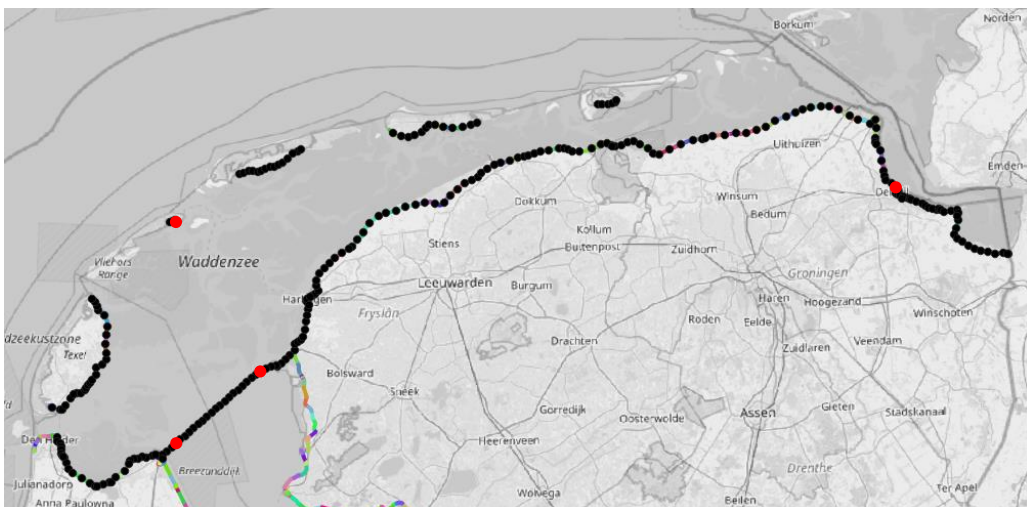
⁶ Het illustratiepunt is een combinatie van hydraulische belastingen bij de norm, die het meest waarschijnlijk is (grootste kans van voorkomen heeft).



Figuur 6: ZSS tijdlijnen. Bron: [Rijkswaterstaat, 2021b].

3.2.1 Selecteren van representatieve locaties (stap 1)

Langs de Waddenzee en Eems-Dollard zijn 277 OKADER-vakken (Figuur 7). Voor elk vak worden hydraulische belastingen bepaald. Als uitvoerlocatie wordt het midden van elk vak gekozen. Bij elke uitvoerlocatie wordt het dichtstbijzijnde HR-uitvoerpunt gekozen.

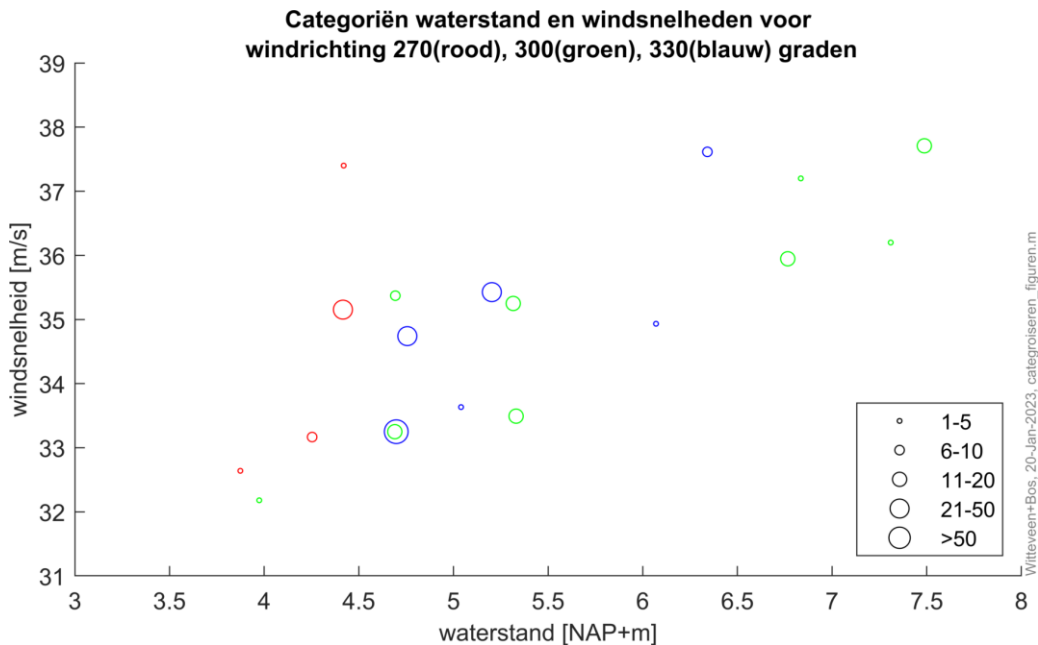


Figuur 7: OKADER vakken Waddenzee en Eems-Dollard en uitvoerpunten (zwart), kunstwerken (rode punten).

3.2.2 Categoriseren van de illustratie-/ontwerppunten (stap 4)

Met SWAN2D moeten golfcondities voor verschillende zeespiegelstijgingen en bodemscenario's worden bepaald. Het is een te grote opgave om dit voor alle 277 locaties in de Waddenzee en Eems-Dollard 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 de illustratiepunten in elke locatie zo goed mogelijk benaderd worden. Het clusteren is gedaan door de hydraulische belastingen te categoriseren naar windrichting, windsnelheid en waterstand en de locaties met overeenkomstige hydraulische belastingen te bundelen en hiervoor één SWAN berekening uit te voeren per zeespiegelstijging.

In Tabel 2 zijn de 19 (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.



Figuur 8: Condities van SWAN2D golfrandvoorwaarden.

Tabel 2: 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	270	3	4	31	34	5	3.87	32.64
1	270	4	5	31	34	6	4.25	33.17
2	270	4	5	34	37	28	4.42	35.15
3	270	4	5	37	40	3	4.42	37.40
4	300	3	4	31	34	5	3.97	32.18
5	300	4	5	31	34	14	4.69	33.25
6	300	4	5	34	37	7	4.69	35.37
7	300	5	6	31	34	13	5.33	33.49
8	300	5	6	34	37	16	5.32	35.25
9	300	6	7	34	37	15	6.77	35.95
10	300	6	7	37	40	2	6.84	37.20
11	300	7	8	34	37	3	7.31	36.20
12	300	7	8	37	40	12	7.49	37.71
13	330	4	5	31	34	64	4.70	33.25
14	330	4	5	34	37	32	4.76	34.74
15	330	5	6	31	34	3	5.04	33.63
16	330	5	6	34	37	30	5.20	35.43
17	330	6	7	34	37	3	6.07	34.93
18	330	6	7	37	40	7	6.34	37.61

Het SWAN2D model op het zgn. G2-rooster berekent de golfindringing door het Friesche Zeegat niet goed (geen golfdoordringing)⁷. Daarom zijn de HBN's achter dit zeegat ingeschat op basis van het verloop van HBN's bij het Amelandse Zeegat. Door RWS [Rijkswaterstaat, 2023b] zijn later controle berekeningen uitgevoerd. Een vergelijking tussen de methodiek die hier is toegepast en die door RWS is gebruikt, toont aan dat de HBN's voor Voortzetting Trend en Volledig Meegroeien in deze studie conservatief zijn ingeschat.

3.2.3 Bepalen van het effect van voorlanden (stap 6)

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

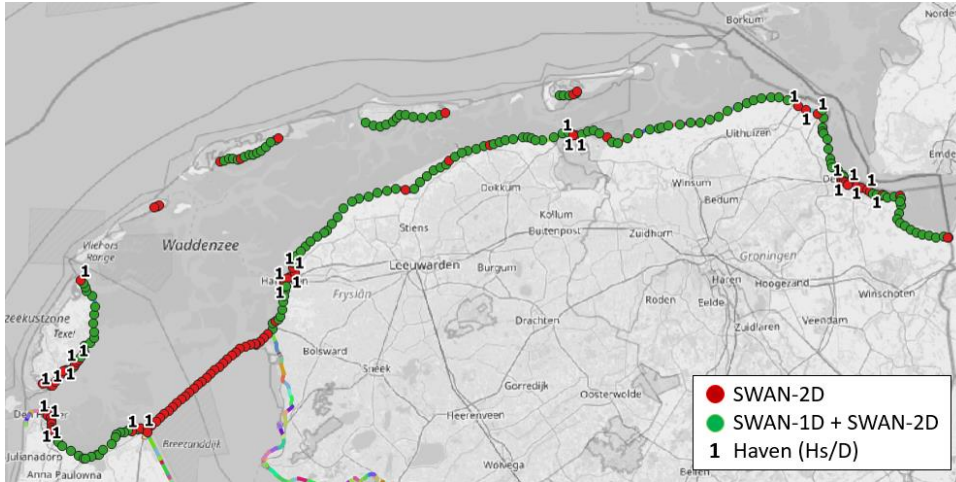
- Geen voorland: uitvoer uit SWAN2D berekening in HR-punt dat het dichtst bij het midden van het OKADER-vak ligt.
- Wel voorland: uitvoer uit SWAN1D berekeningen op $\frac{1}{2}$ L0 (halve golflengte) van de teen van de dijk, met randvoorwaarden uit SWAN2D berekening (op 600m van teen van dijk).
- Havens: 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 in SWAN1D neemt minimaal 10% af tussen het punt 300m van teen van dijk en $\frac{1}{2}$ L0 van de teen van de dijk
- Alle locaties waar de bodemligging op 300m van teen van dijk boven NAP+1 m ligt.

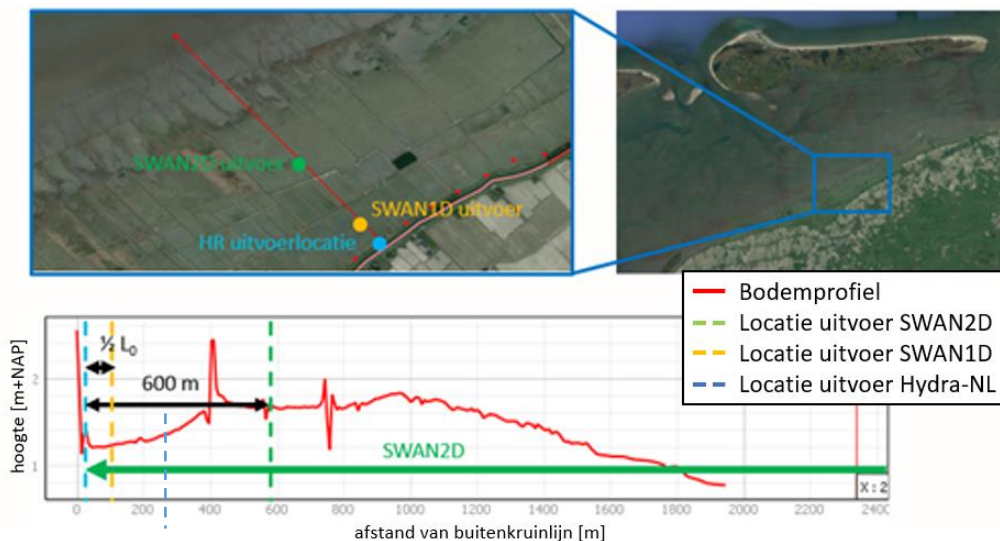
⁷ Het G2-model is gebruikt omdat dit veel rekenvoordelen oplevert t.o.v. andere modellen. Er is ook een G4-rooster waarin de golven in het Friesche Zeegat goed doordringen. Dit rooster heeft echter ook andere nadelen (beperkt gebied).

Figuur 9 geeft aan welke keuze per dijkvak is gemaakt voor de uitvoer.



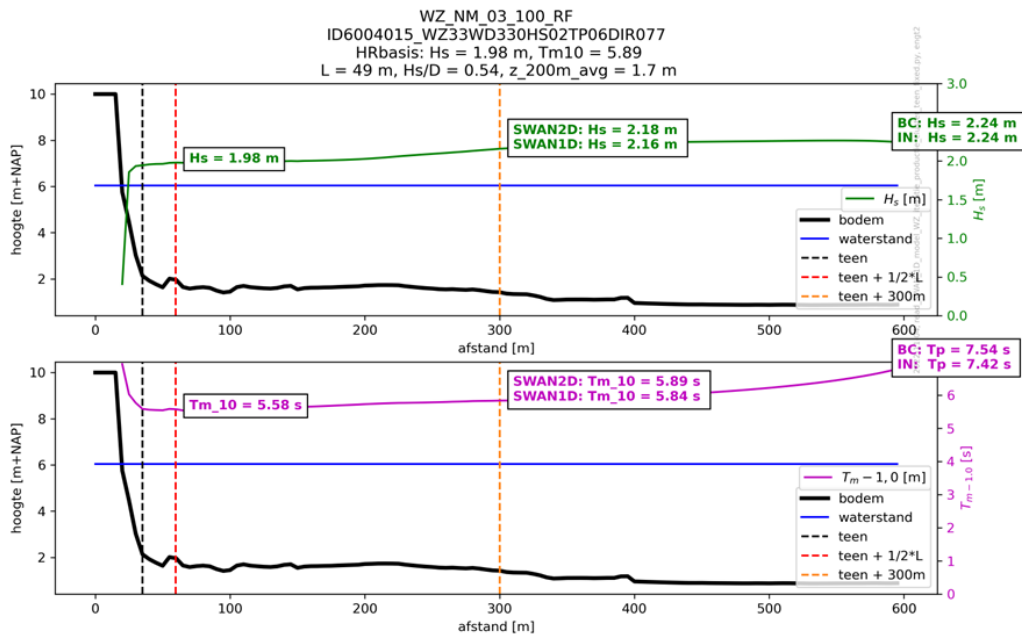
Figuur 9: Keuze voor uitvoer langs de Waddenzee en Eems-Dollard.

Door het geselecteerde HR-uitvoerpunt is een raai loodrecht op de dijk gedefinieerd. Op deze raai worden op 300m en 600m van de kruin van de dijk twee punten bepaald (zie Figuur 10). Deze uitvoerpunten zijn gebruikt voor de eventuele aanvullende SWAN1D-berekeningen.



Figuur 10: Methodiek SWAN1D met aansturing door SWAN2D.

De SWAN1D berekeningen gebruiken een geïnterpoleerde bodem uit SWAN2D over een afstand van 600m vanaf de kruin van de dijk aangevuld met AHN data waar dit beschikbaar was. Op 600m worden de randvoorwaarden uit het SWAN2D model opgelegd aan het SWAN 1D model en vervolgens wordt geïtereerd totdat op 300m het model de condities uit het SWAN2D reproduceert (zie Figuur 10 en Figuur 11). Als dat niet lukt (verschil $H_s > 0,2$ m, verschil $T_{m-1,0} > 0,25$ s) dan zijn de SWAN2D resultaten gebruikt. Ook zijn na visuele controle foutieve SWAN1D resultaten (zonder dijk of steile gradiënten) vervangen door SWAN2D (dit gold voor 8 van de 277 locaties).



Figuur 11: Uitvoer SWAN1D (Pieterburen).

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 3.2). 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 probabilistische effect is (bijv. Ameland) 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.

3.3 Resultaten hydraulische belastingen

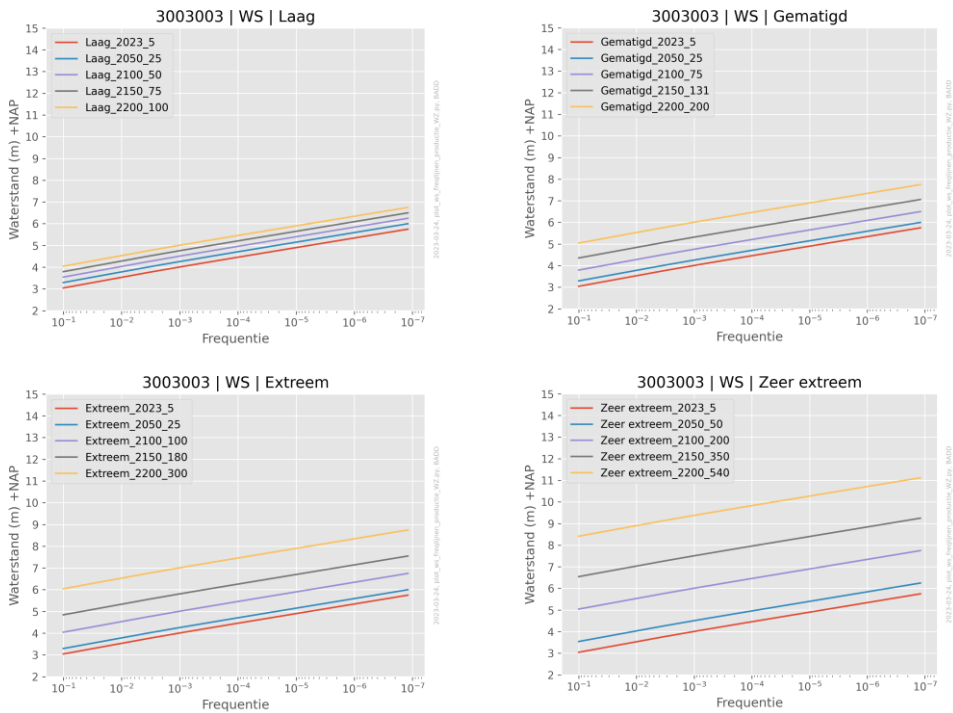
De hydraulische belastingen in de Waddenzee en Eems-Dollard zijn berekend voor 277 dijkvakken en 4 kunstwerken (zie Figuur 7). Daarvoor is gebruik gemaakt van 277 uitvoerlocaties uit de Hydra-NL WBI2017 - databases met verschillende mate van zeespiegelstijging. In dit hoofdstuk worden de resultaten voor de voorkeursstrategie met bodemscenario Voortzetting Trend (VT) besproken. De andere bodemscenario's komen aan bod in de gevoeligheidsanalyse in paragraaf 6.2.

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 aantal voorbeeldlocaties 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 (BOI) of ontwerp, is met name het totaal beeld van de Waddenzee en Eems-Dollard relevant en de effecten van bodemligging en zeespiegelstijging. Om een totaal beeld te verkrijgen van de hydraulische belastingen van de Waddenzee en Eems-Dollard 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 onder het kopje waterstanden en HBN.

3.3.1 Waterstanden

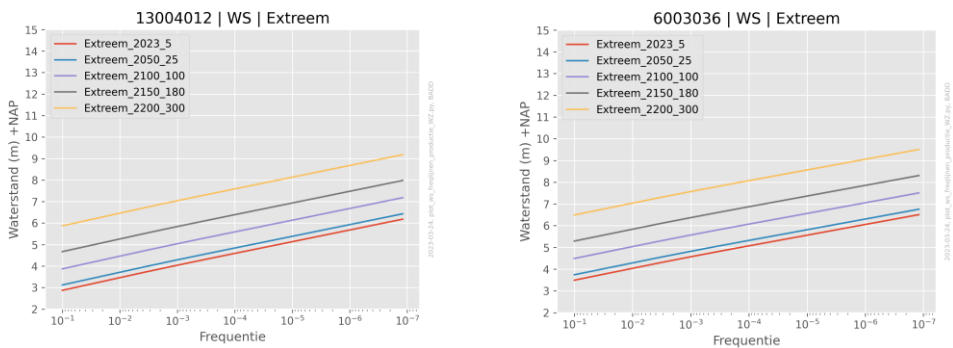
In de Waddenzee en Eems-Dollard werkt de zeespiegelstijging direct door in de waterstanden langs de dijk. In deze studie is er daarom van uit gegaan dat de waterstanden langs de dijk evenredig stijgen met de zeespiegelstijging [Deltares, 2022a]. Een voorbeeld is te zien in Figuur 12. Het effect van het opslingeren van de waterstand in het estuarium is niet meegenomen.

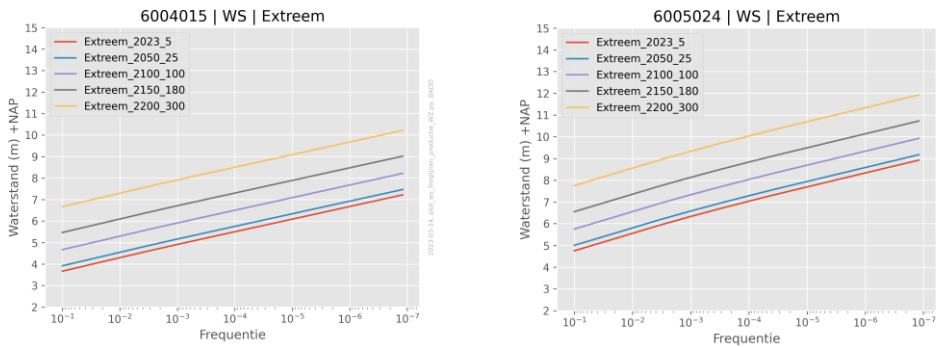


Figuur 12: Waterstandfrequentielijnen Terschelling.

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.

Ter illustratie zijn in Figuur 13 ook de waterstandsfrequentielijnen voor tijdlijn Extreem in Den Helder, Ferwert, Pieterburen en Hoogeplaat gepresenteerd. De locatie van deze punten is gegeven in Figuur 14.





Figuur 13: Waterstandfrequentielijnen tijdlijn Extreem voor Den Helder (13004012), Ferwert (6003036), Pieterburen (6004015) en Hoogeplaat (6005024).

Overzicht

Tabel 3 toont de gemiddelde stijging van de waterstand bij de norm ten opzichte van de tijdlijn Laag voor alle bodemstrategieën. Voor de Waddenzee is de toename van de waterstand gelijk aan die van de ZSS.

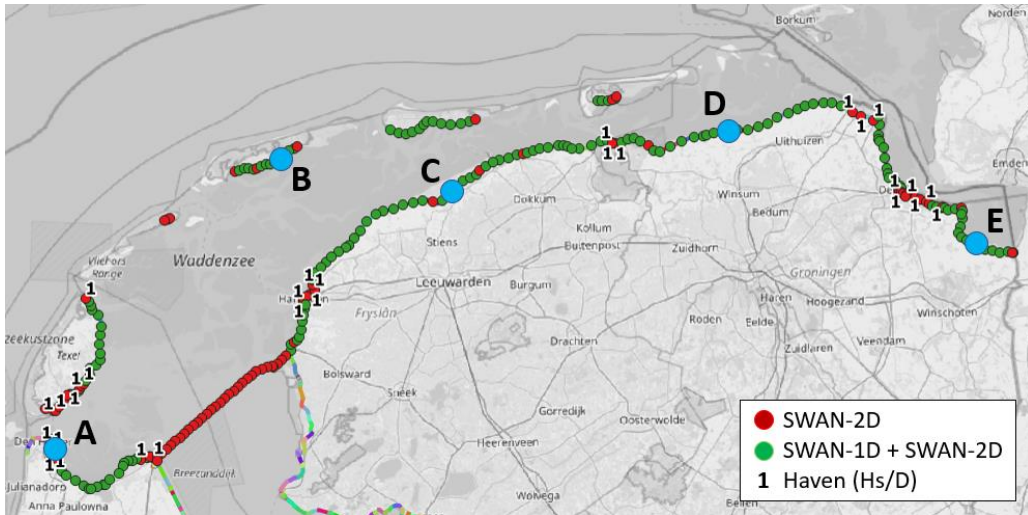
Tabel 3: Gemiddelde stijging in waterstand bij norm voor tijdlijn Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdlijn Laag.

Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging waterstand bij de norm langs Waddenzee en Eems-Dollard t.o.v. tijdlijn Laag					
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag		Zeer Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	WS Waddenzee en Eems-Dollard	ZSS	WS Waddenzee en Eems-Dollard	ZSS	WS Waddenzee en Eems-Dollard
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	+437 cm	+437 cm

3.3.2 Hydraulische belastingniveaus (HBN)

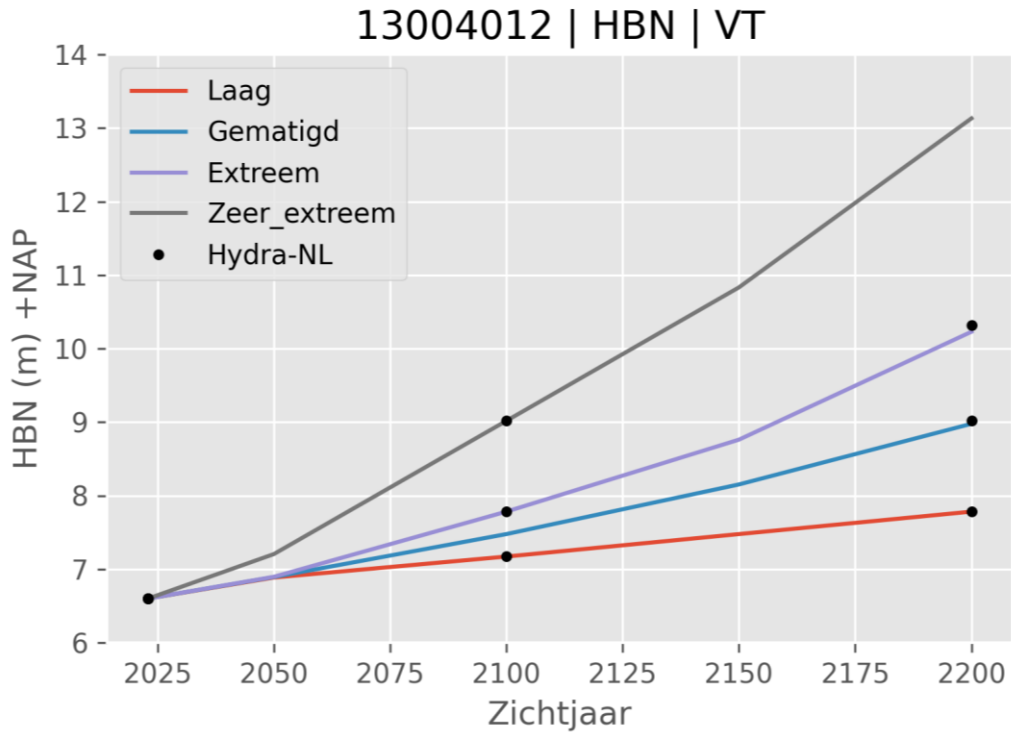
Frequentielijnen

Voor de vier tijdlijnen – Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem – zijn frequentielijnen voor het HBN bij het bodemscenario Voortzetting Trend gemaakt. Een voorbeeld voor Den Helder (Locatie A), Terschelling (Locatie B), Ferwert (Locatie C), Pieterburen (Locatie D) en Hoogeplaat/Eems-Dollard (Locatie E) is te zien in Figuur 15 t/m Figuur 19. De locatienummering A t/m E is weergegeven in Figuur 14. De figuren met de frequentielijnen geven de HBN's weer voor bodemscenario Voortzetting Trend (voor tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem), de zwarte punten geven ter illustratie de Hydra-NL resultaten weer (gelijk aan bodemscenario Niet Meegroeien). Te zien is dat de HBN's toenemen binnen een tijdlijn voor een hoger zichtjaar, en in het geval van een extremere tijdlijn.



Figuur 14: Overzicht locaties Den Helder (A), Terschelling (B), Ferwerd (C), Pieterburen (D) en Hogeplaat (E).

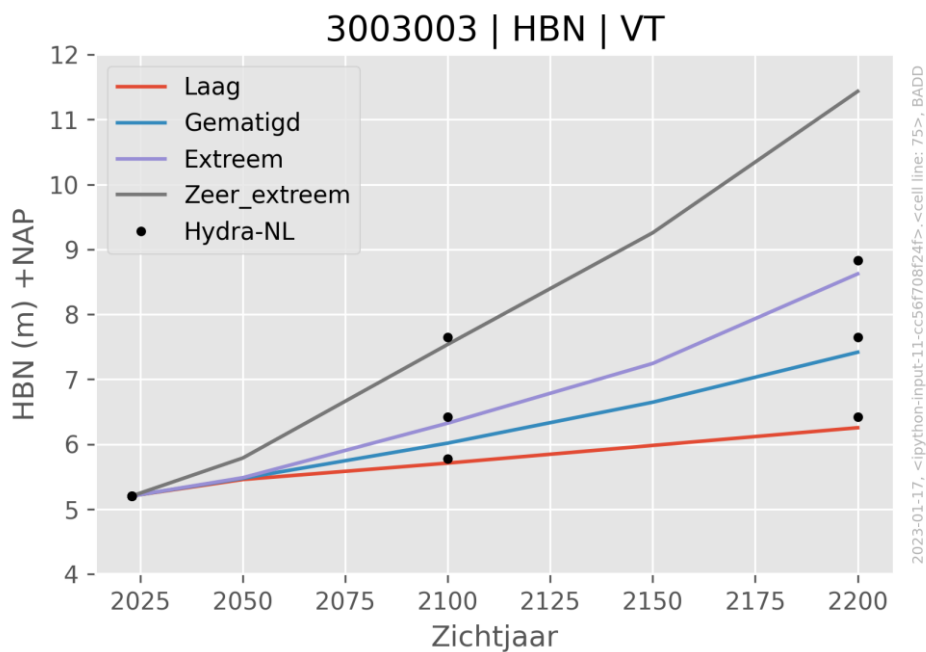
Voor de haven van Den Helder is te zien dat het HBN stijgt van 6,6 m naar 13,1 m in 2200 voor de tijdlijn Zeer Extreem. De haventerreinen worden niet opgehoogd in het bodemscenario Voortzetting Trend.





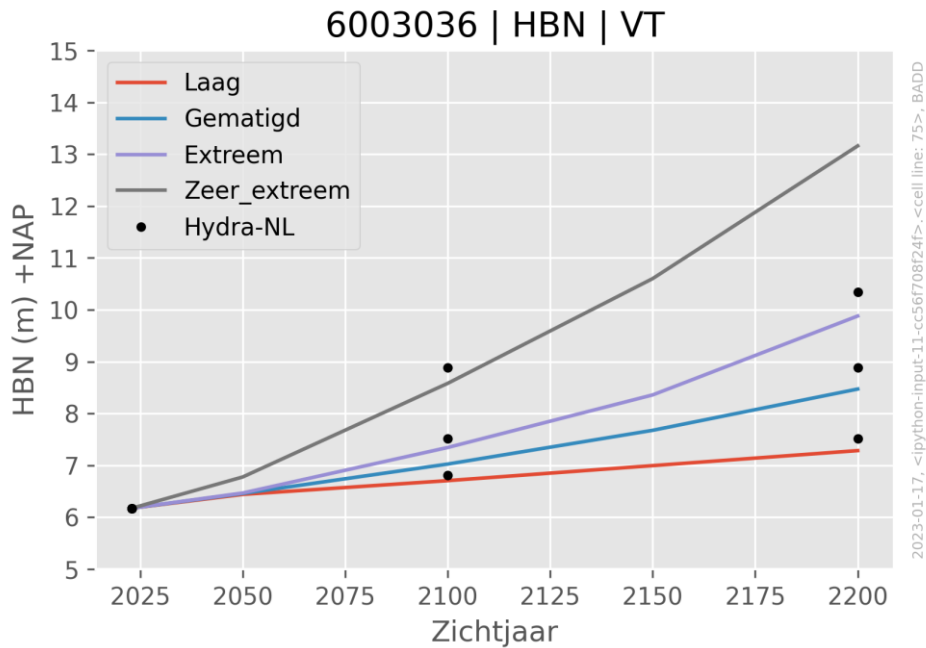
Figuur 15: HBN lijnen Den Helder (havens $H_s/D < 0,5$) voor een niet meegroeiende bodem die de trend volgt.

Voor Terschelling stijgt het HBN van NAP+5,2 m in 2023 naar NAP+8,6m in 2200 voor tijdljn Extreem (en voor Zeer Extreem NAP+11,4 m (5,4 m ZSS)). Dat is ondanks het gedeeltelijk meegroeien van de bodem (orde 2,0m voor tijdljn Extreem).



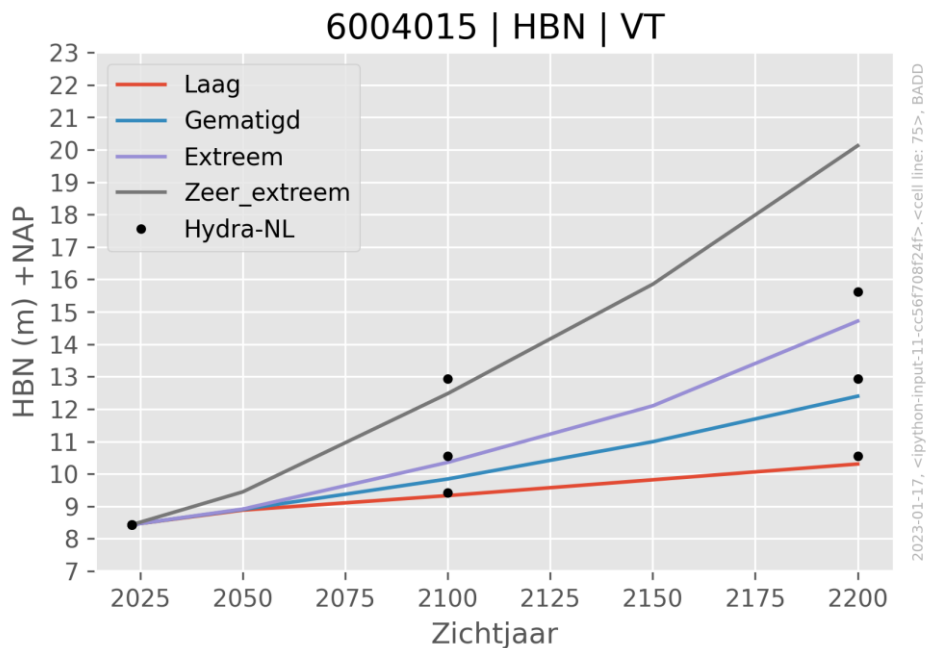
Figuur 16: HBN lijnen Terschelling (SWAN2D) voor een bodem die de trend volgt.

Voor Ferwerd (vak 6003036) stijgt het HBN van NAP+6,2 m in 2025 naar NAP+13,2 m in 2200 voor tijdljn Zeer Extreem (Figuur 17). Het verschil van de bodem die de trend volgt is ongeveer 0,5 m ten opzichte van een Niet meegroeiende bodem (zie Figuur 43 in paragraaf 6.2).



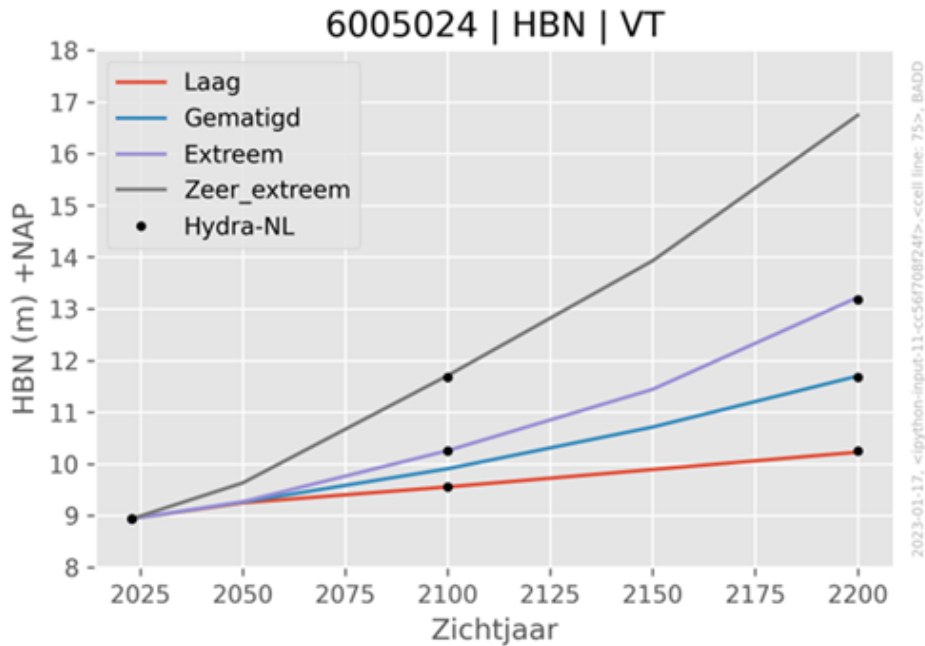
Figuur 17: HBN lijnen Ferwert, Friese Kust (SWAN2D) voor een bodem die de trend volgt.

Voor Pieterburen stijgt het HBN van NAP+8,4 m naar NAP+20,2 m in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem. Het HBN stijgt hier flink omdat Pieterburen vrij dicht bij een geul ligt die in het bodemscenario Voortzetting Trend nauwelijks verandert bij toenemende ZSS.



Figuur 18: HBN lijnen Pieterburen (SWAN1D) voor een bodem die de trend volgt.

Voor Hoogeplaat (vak 6005024) stijgt de HBN van NAP+8,9 m naar NAP+16,8 m in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem.



Figuur 19: HBN lijnen Hoogeplaat, Dollard (SWAN1D), voor een bodem die de trend volgt.

3.4 Samenvatting

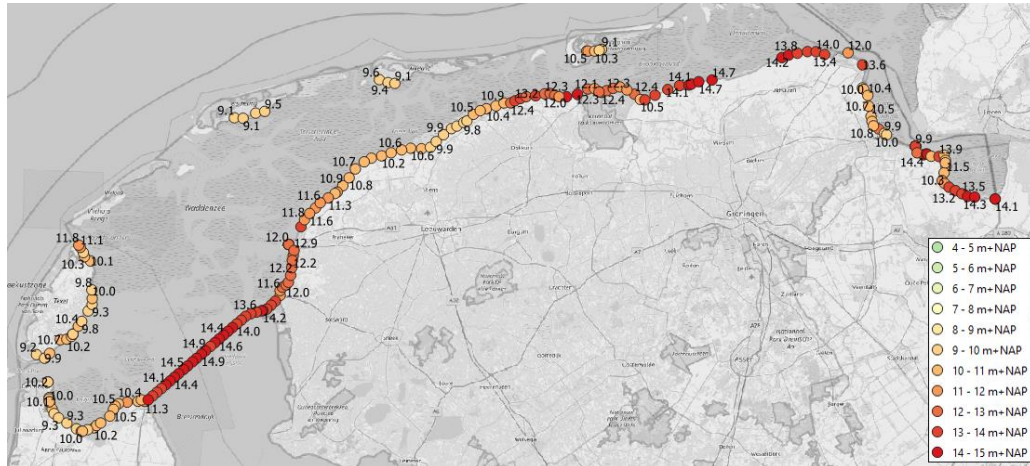
Tabel 4 toont de gemiddelde stijging van het HBN van alle uitvoerlocaties ten opzichte van de tijdlijn Laag voor de voorkeursstrategie Voortzetting Trend (VT). In de tabel is te zien dat het HBN sneller stijgt dan de waterstand. Dit komt omdat de golfbelasting toeneemt door de hogere waterstanden en de bodem de zeespiegelstijging niet kan volgen in het bodemscenario Voortzetting Trend. De waarden voor 2050 en 2150 zijn geïnterpoleerd uit de andere waarden.

Tabel 4: Gemiddelde stijging in waterstand en HBN in de Waddenzee en voor tijdlijn Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdlijn Laag voor bodemscenario Voortzetting Trend.

Zichtjaar	Gemiddelde stijging waterstand en HBN langs Waddenzee en Eems-Dollard t.o.v. tijdlijn Laag voor bodemscenario Voortzetting Trend					
	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	-	+2 cm	-	+4 cm	+25 cm	+39 cm
2100	+25 cm	+35 cm	+50 cm	+69 cm	+150 cm	+212 cm
2150	+56 cm	+78 cm	+105 cm	+151 cm	+275 cm	+396 cm
2200	+100 cm	+137 cm	+200 cm	+287 cm	+437 cm	+636 cm

Effect bodemscenario's

Figuur 20 toont het verloop van HBN voor het bodemscenario Voortzetting trend (VT) voor Extreem in 2200. Het HBN is lager achter de eilanden en aan de Waddenzee kant van de eilanden. Dat komt omdat deze delen beschut liggen voor rechtstreekse golfaanval vanaf de Noordzee. In Figuur 21 wordt het verschil in het HBN voor tijdlijn Extreem in 2200



Figuur 20: HBN voor tijdlijn Extreem in 2200 (ZSS 3 m) voor bodemscenario Voortzetting Trend.



Figuur 21: Het verschil in het HBN voor tijdlijn Extreem in 2200 (ZSS 3 m) voor bodemscenario Voortzetting Trend t.o.v. het bodemscenario Niet Meegroeien. Een negatieve waarde betekent dus een verlaging van HBN t.o.v. het bodemscenario Niet Meegroeien).

In Figuur 20 is te zien dat de HBN's het hoogst zijn bij Uithuizerwad/Noordkaap, Eems-Dollard en langs de Afsluitdijk. Het meegroeien van de bodem levert de grootste reductie van de HBN's op en zorgt vooral achter de zeegaten voor lagere HBN's langs de Friese en Groningse kust. Plaatselijk kan daarmee het HBN tot 3 m lager worden.

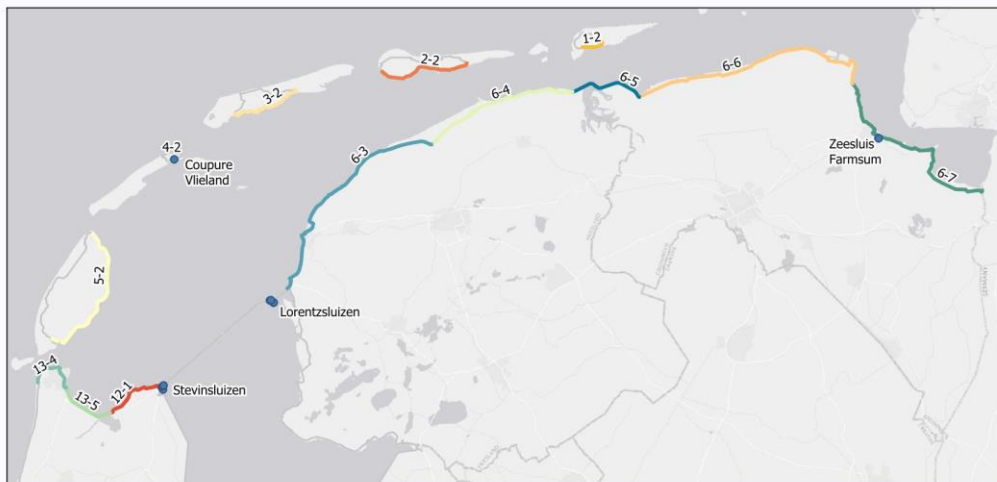
4 Waterveiligheidsopgave kunstwerken

4.1 Doel

Het doel is het bepalen waterveiligheidsopgave en versterkingsopgave voor de kunstwerken binnen de Waddenzee en Eems-Dollard. Paragraaf 6.3.1 van de Notitie generieke werkwijze [Rijkswaterstaat, 2022c] 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 22 toont een overzicht van de beschouwde kunstwerken binnen de Waddenzee en Eems-Dollard.



Figuur 22: Overzicht locatie beschouwde kunstwerken (blauwe bolletjes) binnen de Waddenzee en Eems-Dollard.

Binnen het gebied Waddenzee en Eems-Dollard beschouwen we vier kunstwerken:

- Lorentzsluizen;
- Stevinsluizen;
- Zeesluizen Farmsum;
- Coupure Dorpsstraat Vlieland.

Binnen KP ZSS zijn kunstwerken in drie categorieën ingedeeld:

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

De vier kunstwerken binnen de Waddenzee en Eems-Dollard vallen in deze rapportage allemaal onder categorie 1. In de rapportage over het IJsselmeergebied

(ISWP) zijn de Lorentzsluizen en Stevinsluizen als categorie 2 kunstwerk beschouwd, waarbij ook de overige functies staan beschreven.

De kunstwerken Lorentzsluizen(Afsluitdijk), Stevinsluizen (Afsluitdijk) en Zeesluizen Farmsum (Delfzijl) bestaan uit meerdere objecten. De Lorentzsluizen bestaan bijvoorbeeld uit een combinatie van één grote schutsluis, één kleine schutsluis en tien spuisluizen. Alle objecten zijn separaat beschouwd. De resultaten per object zijn gepresenteerd in Bijlage A. In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de kunstwerken in de gehele Waddenzee en Eems-Dollard samengevat.

4.2 Methode

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

Voor de categorie 1 kunstwerken zijn twee typen werkzaamheden te onderscheiden: bepaling van het kruinhoogtetekort en maken van een kostenschattning voor de benodigde versterking.

4.2.1 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, 2100 en 2200 zijn de waterstand bepaald, zie paragraaf 3.3. De waterstand en het HBN zijn voor tussenliggende zichtjaren lineair geïnterpoleerd.

Het hoogtetekort is via een vereenvoudigde methode door de kerende hoogte van het object te vergelijken met de waterstand bij de overschrijdingskans bij een doorsnede van het kunstwerk. Een beoordeling van de kerende hoogte van het kunstwerk op basis van het HBN voor golfoverslag leidt bij 10 l/s/m tot zeer grote (onrealistische) kruinhoogtetekorten⁸.

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. De waterstand is voor ieder object opgenomen in het opleverdossier xxxx. De eis voor de overschrijdingskans bij de doorsnede is als volgt bepaald:

$$P_{eis,dsn} = \frac{\omega P_{eis}}{N_{dsn}}$$

Waarin:

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

De norm, faalkansruimtefactor en lengte-effectfactor volgen per object uit de Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen [Rijkswaterstaat, 2015]. Voor de objecten zijn dezelfde parameters gehanteerd als voor het betreffende dijktraject

⁸ Een beoordeling op basis van de kombergingsbenadering valt buiten de scope van deze beleidsstudie.

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 de 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.

4.2.2 Kostenschatting

In de versterkings- en vervangingsopgave is beschouwd wanneer objecten aangepast of vervangen dienen te worden en wat de bijbehorende kosten van deze maatregelen zijn. Als basis voor de kostenschatting hanteren we het minimum van twee strategieën:

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 die in het jaar 2200 resulteert in de laagste nominale cumulatieve kosten minus de restwaarde, heeft de voorkeur. De kosten staan gepresenteerd in paragraaf 4.3. 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 de restwaarde, ook voor beide strategieën;
- Bepalen versterkings- en vervangingsstrategie met de laagste kosten.

Bij het bepalen van de kosten is onderscheid gemaakt in de kosten voor aanpassing/versterking en de kosten voor vervanging.

Kosten vervanging

De kosten voor vervanging zijn onafhankelijk verondersteld van het hoogtetekort. De vervangingskosten van de 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.

Kosten aanpassing

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

Totale kosten

De totale kosten worden gepresenteerd in paragraaf 4.3 voor de zichtjaren 2050, 2100, 2150 en 2200 voor de verschillende tijdlijnen. Hier zijn 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 7 worden ook de kosten ten opzichte van systeem op orde gepresenteerd. Een toelichting hierop wordt gegeven in paragraaf 5.2 onder Figuur 28.

Voor het bepalen van de restwaarde wordt dezelfde vergelijking toegepast als in paragraaf 5.2. 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 is 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. Na vervanging heeft een object weer een levensduur van 100 jaar.

4.2.3 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. Het bodemscenario heeft geen invloed op de optredende waterstand. De hydraulische belastingen staan beschreven in hoofdstuk 3.
- De kerende hoogte is overgenomen uit de database van het project VONK (database - Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls). 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.
- De kerende hoogte van de kunstwerken Zeesluizen Farmsum en Coupure Dorpsstraat Vlieland zijn niet opgenomen in de database - Natte Kunstwerken. Voor de objecten binnen deze kunstwerken is de kerende hoogte gelijkgesteld aan het waterstandsniveau bij de ondergrensnorm op doorsnedeniveau in 2050 bij tijdlijn Laag.

Versterking- en vervangingskosten

- Voor Zeesluizen Farmsum is einde levensduur niet opgenomen in de database Natte Kunstwerken. Hier is einde levensduur gebaseerd op het stichtingsjaar en de gemiddelde levensduur die wel zijn gegeven in de database.
- Bij Coupure Dorpsstraat Vlieland is einde levensduur, stichtingsjaar en gemiddelde levensduur onbekend in de database Natte kunstwerken. Voor dit object is einde levensduur zichtjaar 2050 aangenomen.

4.3 Resultaten

4.3.1 Kruinhoogtetekort

Het kruinhoogtetekort ten opzichte van de huidige kerende hoogte is voor de verschillende objecten per zichtjaar voor iedere tijdlijn bepaald. Het kruinhoogtetekort is bepaald, zoals beschreven in paragraaf 4.2.

Tabel 5: Kruinhoogtetekort per object Waddenzee en Eems-Dollard ten opzichte van de huidige kerende hoogte, per zichtjaar en tijdlijn.

	Laag				Gematigd				Extreem				Zeer Extreem			
	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200
Lorentzsluis groot (keersluis)	0,6	0,8	1,1	1,3	0,6	1,1	1,6	2,3	0,6	1,3	2,1	3,3	0,9	2,3	3,8	5,7
Lorentzsluis klein (keersluis)	0,7	0,9	1,2	1,4	0,7	1,2	1,7	2,4	0,7	1,4	2,2	3,4	1,0	2,4	3,9	5,8
Lorentzsluis* west en oost (spuisluizen)	1,5	1,7	2,0	2,2	1,5	2,0	2,5	3,2	1,5	2,2	3,0	4,2	1,7	3,2	4,7	6,6
Stevinsluis (keersluis)	0,6	0,8	1,1	1,3	0,6	1,1	1,6	2,3	0,6	1,3	2,1	3,3	0,9	2,3	3,8	5,7
Stevinsluis ** (spuisluizen)	1,3	1,5	1,8	2,0	1,3	1,8	2,3	3,0	1,3	2,0	2,8	4,0	1,6	3,0	4,5	6,4
Coupure vlieland	0,0	0,2	0,5	0,7	0,0	0,5	1,0	1,7	0,0	0,7	1,5	2,7	0,3	1,7	3,2	5,1
Zeesluizen Farmsum ***	0,0	0,2	0,5	0,7	0,0	0,5	1,0	1,7	0,0	0,7	1,5	2,7	0,3	1,7	3,2	5,1

* Dit betreft de individuele kunstwerken: Lorentzsluis west en Lorentzsluis oost.

** Dit betreft de individuele kunstwerken: Stevinsluis west, Stevinsluis centraal en Stevinsluis oost.

*** Dit betreft de individuele kunstwerken: Zeesluizen Farmsum groot en Zeesluizen Farmsum klein.

Het kruinhoogtetekort neemt voor alle kunstwerken toe met het extremer worden van de tijdlijnen en het toenemen van de zichtjaren.

De resultaten in Tabel 5 tonen dat voor 2050 al een kruinhoogtetekort aanwezig is bij de tijdlijn laag bij alle objecten binnen de kunstwerken Lorentzsluizen en Stevinsluizen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de Afsluitdijk momenteel versterkt wordt. Onderdeel hiervan is de renovatie van de spuisluizen en het plaatsen van nieuwe keerdeuren aan de Waddenzeezijde van de keersluizen. Bij het bepalen van het kruinhoogtetekort is uitgegaan van de kerende hoogte van deze objecten vóór renovatie. Het kruinhoogtetekort varieert tussen de 0,6 m en 1,5 m bij de Lorentzsluizen en tussen de 0,6 m en 1,3 m bij de Stevinsluizen bij tijdlijn laag in 2050.

Bij de kunstwerken Zeesluizen Farmsum en Coupure Vlieland ontstaat een kruinhoogtetekort in de periode 2050-2100 tijdlijn laag. Bij deze twee kunstwerken is de kerende hoogte gelijkgesteld aan het waterstandsniveau bij de ondergrensnorm op doorsnedeniveau in zichtjaar 2050 bij tijdlijn Laag. De kerende hoogte was voor deze kunstwerken niet opgenomen in de database Natte Kunstwerken.

4.3.2 Totale kosten

In Tabel 6 zijn de kosten voor de individuele objecten gepresenteerd voor alle tijdlijnen en zichtjaren. In deze paragraaf zijn de totale kosten van de objecten in de Waddenzee en Eems-Dollard per tijdlijn en zichtjaar gepresenteerd in Tabel 6. De kolom "nominale kosten" toont de nominale kosten die gemaakt worden tot het betreffende zichtjaar. In de kolom "nominale kosten met correctie restwaarde" zijn de nominale kosten tot het betreffende zichtjaar gepresenteerd. De nominale kosten zijn gecorrigeerd met de restwaarde van het object in dat zichtjaar. Hieruit kunnen de kosten per aantal meter zeespiegelstijging worden afgeleid.

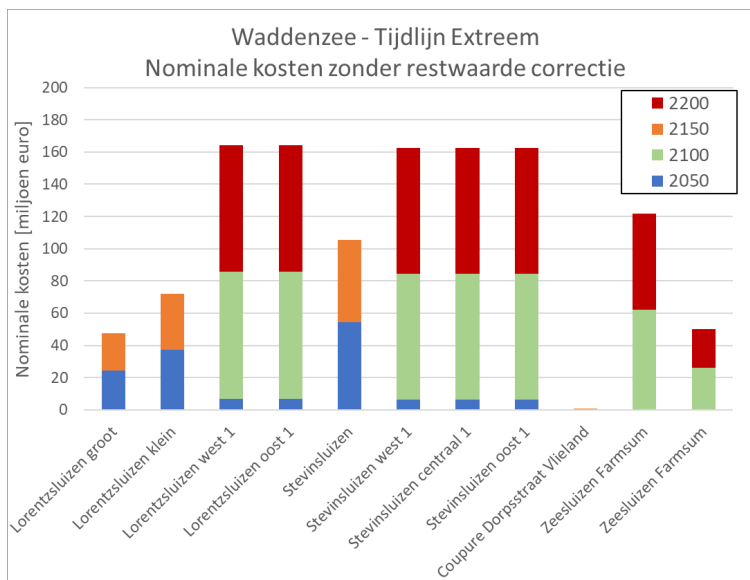
Tabel 6: Cumulatieve nominale kunstwerken per zichtjaar en tijdlijn.

Zichtjaar	Tijdlijnen en nominale kosten in mln. euro: met en zonder correctie van de restwaarde							
	Laag		Gematigd		Extreem		Zeer Extreem	
	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie
2050	149	51	149	51	150	51	162	58
2100	627	328	628	329	629	331	637	339
2150	736	620	737	621	738	623	746	630
2200	1211	912	1212	913	1213	915	1221	923

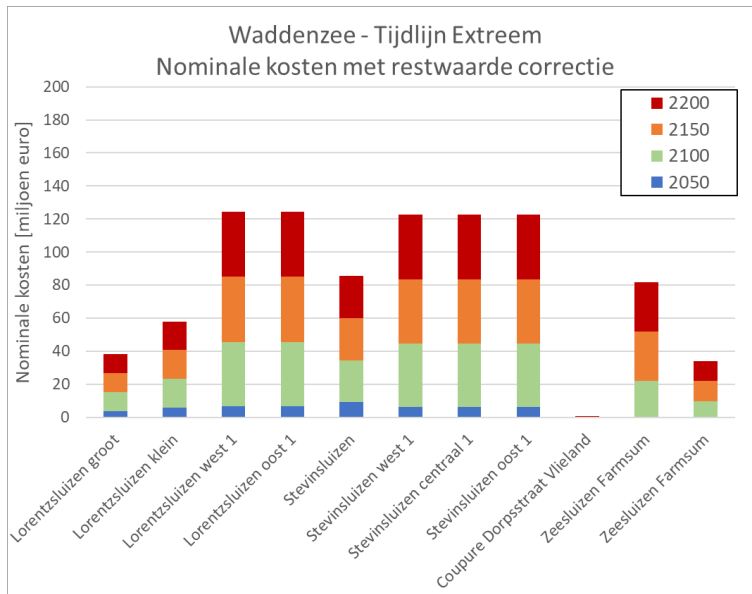
De kosten worden gedomineerd door de Stevinsluizen en de Lorentzsluizen. In Figuur 23 en Figuur 24 zijn de kosten gebundeld van alle spuisluizen bij Lorentzsluis Oost, Lorentzsluis West, Stevinsluis Oost, Stevinsluis Centraal en Stevinsluis West. Op iedere locatie zijn namelijk vijf spuisluizen aanwezig.

De kosten van de kunstwerken Zeesluizen Farmsum en Coupure Vlieland zijn beperkt. Daarnaast worden de totale kosten gedomineerd door de vervangingskosten en het aantal vervangingen van de objecten en minder door het kruinhoogtetekort dat ontstaat.

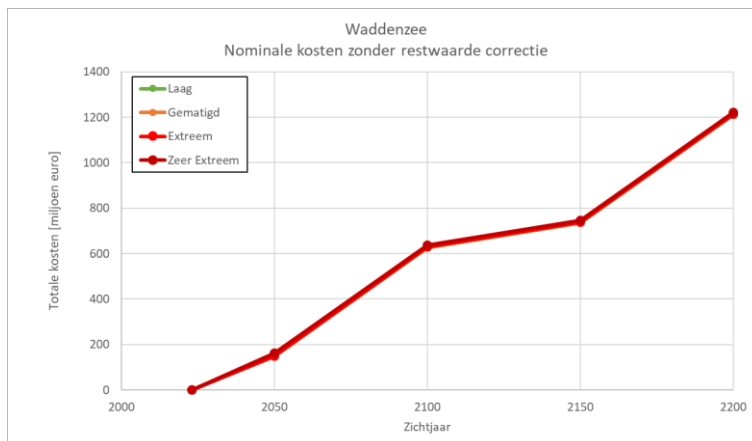
Tabel 6 en Figuur 25 en Figuur 26 tonen een logisch verband voor de cumulatieve nominale kosten. De cumulatieve nominale kosten stijgen met het toenemen van de zichtjaren en met het extremer worden van de tijdlijnen.



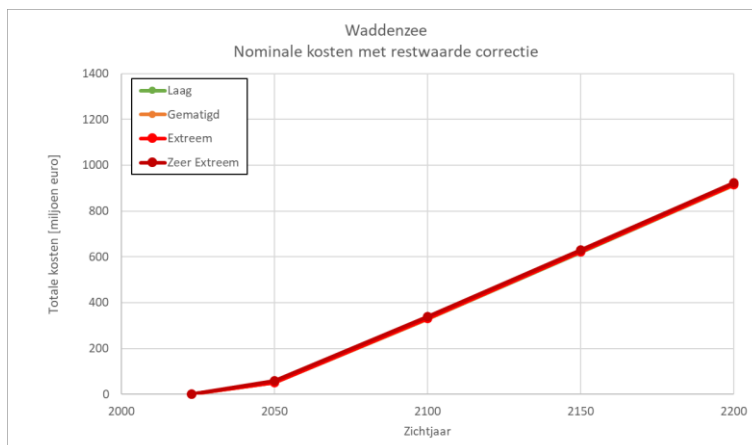
Figuur 23: Cumulatieve nominale kosten per object voor tijdlijn Extreem tot 2200.



Figuur 24: Cumulatieve nominale kosten met correctie restwaarde per object voor tijdljn Extreem tot 2200.



Figuur 25: Cumulatieve nominale kosten tot 2200: cumulatieve nominale kosten inclusief restwaarde.



Figuur 26: Cumulatieve nominale kosten tot 2200: cumulatieve nominale kosten minus restwaarde.

4.4 Samenvatting

De resultaten laten zien dat bij de Lorentzsluizen en de Stevinsluizen voor alle tijdlijnen in zichtjaar 2050 een significant kruinhoogtetekort ontstaat. Momenteel wordt de Afsluitdijk versterkt. Onderdeel van de versterking is de renovatie van de spuisluisen en het plaatsen van nieuwe keerdeuren aan de Waddenzeezijde van de keersluizen. Bij het bepalen van het kruinhoogtetekort is uitgegaan van de kerende hoogte van deze objecten vóór renovatie. Voor deze objecten heeft bij alle tijdlijnen versterkingsstrategie 1 de voorkeur. De objecten worden eerst versterkt tot einde levensduur en daarna vervangen.

Daarnaast tonen de resultaten dat de versterkings- en vervangingsopgave van het object Coupure Dorpstraat Vlieland verwaarloosbaar is ten opzichte van de andere kunstwerken binnen de Waddenzee en Eems-Dollard.

De toename in kosten met het extremer worden van de tijdlijnen is beperkt. Dit heeft verschillende oorzaken:

- In de vervangingskosten is geen toename van de kosten opgenomen voor het toenemen van de kruinhoogte.
- De toename in versterkingskosten bij het extremer worden van de tijdlijnen is relatief klein.
- Einde levensduur van de meeste objecten ligt rond 2050. Daardoor worden na 2050 de kosten bepaald door het aantal vervangingen/levensduur van de objecten en niet meer door het kruinhoogtetekort.

Tabel 7: Nominale kosten minus restwaarde per zichtjaar en tijdlijn.

Zichtjaar	Tijdlijnen [nominale kosten in mln. euro minus restwaarde]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	51	51	51	58
2100	328	329	331	339
2150	620	621	623	630
2200	912	913	915	923

5 Waterveiligheidsopgave dijken

5.1 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 Waddenzee en Eems-Dollard, exclusief de Afsluitdijk. In Figuur 27 zijn deze trajecten weergegeven. De Afsluitdijk (dam) is geen onderdeel van de scope.



Figuur 27: Overzicht beschouwde dijken binnen de regio Waddenzee en Eems-Dollard.

Binnen dit hoofdstuk is uitgegaan van één bodemscenario in de beschrijving van de resultaten. 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. Zo zal, naar verwachting, het bodemscenario Voortzetting Trend het best aansluiten als de mate van ZSS beperkt is en het bodemscenario Niet Meegroeien het best aansluiten bij extremere ZSS. In dit hoofdstuk is daarom uitgegaan van het bodemscenario Voortzetting Trend als basisscenario, waarbij we de kanttekening plaatsen dat dit bij een extreme mate van ZSS naar verwachting niet het meest waarschijnlijke scenario betreft.

In paragraaf 6.2.1 is het effect van de bodemligging op het resultaat van de Hydraulische belastingen beschreven. In paragraaf 6.2.2 is ingegaan op het effect van de bodemligging op de waterveiligheidsopgave.

5.2 Methode

5.2.1 Samenvatting methode

Om de waterveiligheidsopgave voor de dijken te bepalen, zijn de hydraulische belastingen, zoals in hoofdstuk 3 beschreven, gecombineerd met de sterkte van de keringen. Vervolgens zijn kosten en dimensies van te verwachten dijkversterkingen bepaald. 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. Daarbij zijn kosten en dimensies van te verwachten dijkversterkingen bepaald, om aan de norm te voldoen in een bepaald zichtjaar. Dit wordt de versterkingsopgave genoemd.

Om de waterveiligheidsopgave te bepalen zijn de hydraulische belastingen en de sterkte van de keringen binnen de software OKADER (v2022.4) met elkaar gecombineerd:

- Als invoer van OKADER zijn 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 faalkans 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 faalkans met de faalkans-eis resulteert in het moment (jaar) waarin de waterkering niet meer aan de norm voldoet en de mate waarin de kering versterkt dient te worden met een ontwerplevensduur van 50 jaar: dimensies en dijkversterkingskosten. Uit een KOSWAT-database met vooraf klaargezette kostenberekeningen bij verschillende combinaties van versterkingsdimensies 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:

1. 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). De constructieve maatregel (damwand, kwelscherm, etc.) wordt ontworpen met een levensduur van 100 jaar.
2. Versterking met groene kering (strategie 1). Binnen deze versterking wordt, onafhankelijk van de ruimtelijke knelpunten, versterkt met een groene oplossing in grond (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 gebruikt⁹.

3. Versterking met groene kering in combinatie met innovatieve pipingmaatregelen (strategie 2). Binnen deze versterking wordt, onafhankelijk van de ruimtelijke knelpunten, versterkt met een groene oplossing in grond. De benodigde taludverflauwing of bermverbreiding wordt gereduceerd in afmeting door het toepassen van een alternatieve pipingmaatregel (bijv. een kwelscherm, verticaal zanddicht geotextiel of grof-zandbarrière). 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, breedte benodigde berm en eventueel aantal gebouwen in de versterkingszone en de 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 tijdelijk of permanent geamoveerd dienen te worden.

5.2.2 Kostenberekening

Zoals in paragraaf 5.2.1 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 nodig zijn in het jaar dat een kering versterkt moet worden (deze jaartallen komen niet overeen met de relevante zichtjaren). Om deze informatie toe te kunnen 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) (cumulatieve) 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 is per tijdlijn en per zichtjaar gekeken hoeveel kosten 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 formule:

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

⁹ 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. Het al dan niet amoveren van bebouwing betreft daarnaast altijd een politieke afweging die binnen deze analyses niet beschouwd is.

Voorbeeld (nominale) (cumulatieve) kosten in een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, t.b.v. kosten per m ZSS.
 Voor tijdlijn Laag is berekend dat in het jaar 2045 een versterking uitgevoerd moet worden van 1,2 miljoen euro, in het jaar 2095 een versterking van 2,6 miljoen euro en in 2155 een versterking van 1,2 miljoen euro. De kosten per zichtjaar zijn dan:

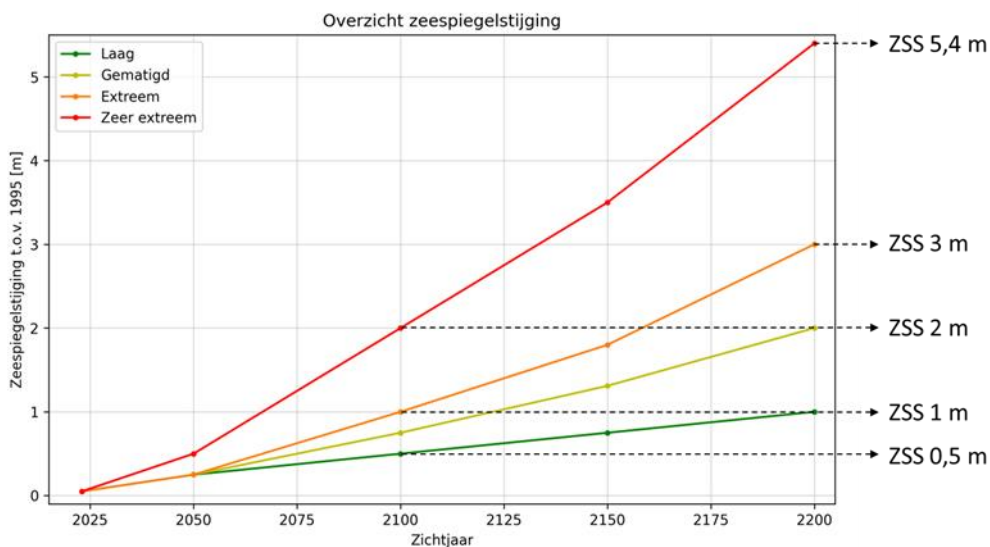
Zichtjaar	Kosten t/m zichtjaar [mln. euro]	Restwaarde in zichtjaar [mln. euro]	Kosten in zichtjaar, gecorrigeerd met de restwaarde [mln. euro]
2050	1,2	1,08	0,12
2100	3,8	2,34	1,46
2150	3,8	0	3,8
2200	5,0	0,12	4,88

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 8 en Figuur 28 voor het Waddengebied als voorbeeld.

Tabel 8: Mate van zeespiegelstijging gekoppeld aan tijdlijn/zichtjaarcombinaties.

Zeespiegelstijging	Tijdlijn/zichtjaarcombinaties
0,5 m	Laag 2100, Zeer Extreem 2050.
1,0 m	Laag 2200, Extreem 2100
2,0 m	Gematigd 2200, Zeer Extreem 2100
3,0 m	Extreem 2200
5,4 m	Zeer Extreem 2200

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



Figuur 28: 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 7 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 ook 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.

5.2.3 Rekeninstellingen

Binnen OKADER zijn voor de analyses diverse rekeninstellingen en uitgangspunten gehanteerd, die onderstaand zijn beschreven.

- 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 gebruiken die binnen het KP-ZSS is toegeleverd. (o.b.v. de studie WV21 [Deltares, 2011]). 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, die afgeregeld is op de HWBP-planning tot 2050. 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.

5.3 Resultaten

5.3.1 Systeem op orde tot 2050

Tot het zichtjaar 2050 is de mate van zeespiegelstijging voor de meeste tijdlijnen (behalve Zeer Extreem) gelijk, 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 29 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 29: Programmering HWBP-vakken tot 2035 (Bron: definitief programmvorstel 2023-2034; <https://hwbp.cartonext.nl/> geraadpleegd 18 april 2023).

Voor de dijken (zonder de kunstwerken) in het Waddengebied betreffen de kosten om in 2050 te voldoen 2,6 miljard euro. Deze kosten worden niet gecorrigeerd voor eventuele reststerkte na 2050, zodat in de analyses voor het KP ZSS (die worden gecorrigeerd met deze post) de kosten van het "op orde komen" er volledig uit vallen.

De lengte aan keringen binnen het Waddengebied is 262,5 km. Tot 2050 wordt maar een enkele versterkingsronde uitgevoerd. De kosten, omgerekend naar kosten per km per dijkversterkingsronde, zijn circa 9,7 miljoen euro per km. Opgemerkt wordt dat per versterkingsronde niet het totale areaal aan keringen versterkt wordt, maar alleen de keringen die niet voldoen aan de norm. De kosten per km zijn bepaald op basis van het totaal aantal km's binnen het gebied (totale kosten/totaal aantal km's aan dijken). Er is dus niet uitgegaan van alleen het totaal aantal km's te versterken kering. Hierdoor kan het beeld afwijken van de verwachte kosten per km dijkversterking.

5.3.2 Waterveiligheidsopgave

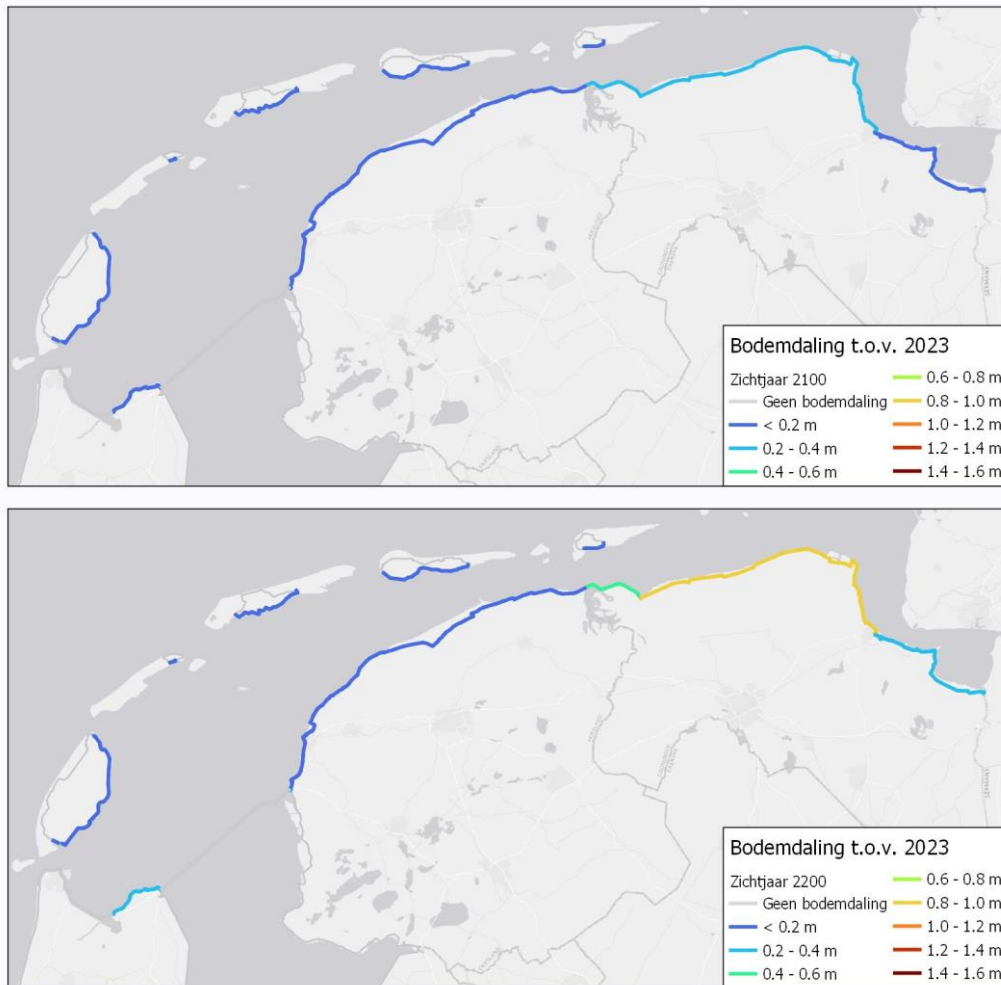
De waterveiligheidsopgave beschrijft het sterktekort in een bepaald jaar gegeven een tijdlijn. In onderstaande paragrafen is de waterveiligheidsopgave voor hoogte (het hoogtekort) en voor sterkte (het tekort aan dijkbasis/bermlengte) beschreven voor 1 m en 3 m zeespiegelstijging. Voor 1 m kijken we naar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

5.3.2.1 Waterveiligheidsopgave hoogte

Figuur 31 en Figuur 32 geven de waterveiligheidsopgave voor hoogte bij respectievelijk 1 m en 3 m zeespiegelstijging weer.

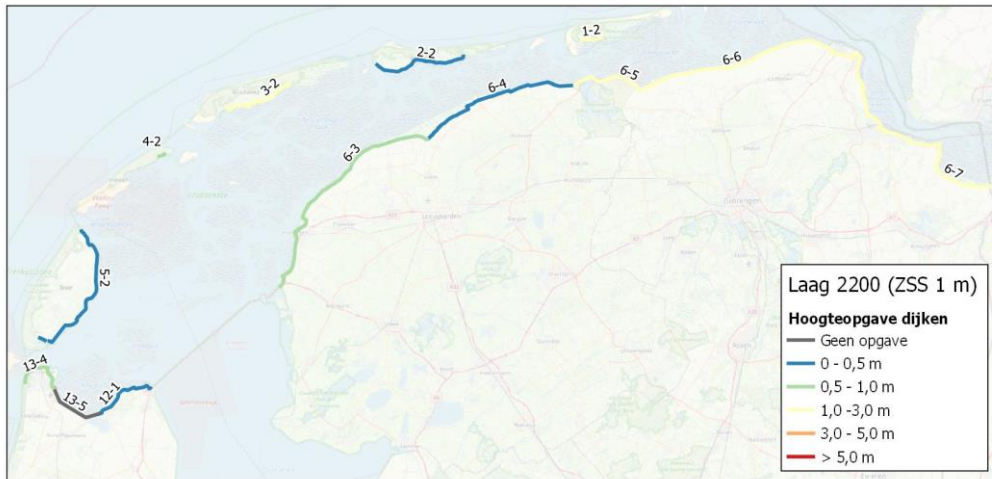
Een belangrijk onderdeel van de hoogteopgave is de mate van bodemdaling. De mate van bodemdaling wissel echter per traject. In Figuur 30 boven de in deze

beleidsstudie aangenomen bodemdaling in m in 2100 t.o.v. 2023 en onder de bodemdaling in 2200 t.o.v. 2023.



Figuur 30: Mate van bodemdaling, met boven de bodemdaling in 2100 t.o.v. 2023 en onder de bodemdaling in 2200 t.o.v. 2023. Bodemdaling o.b.v. de bodemdaling-database die binnen het KP ZSS is toegeleverd (o.b.v. de studie WV21 [Deltares, 2011]).

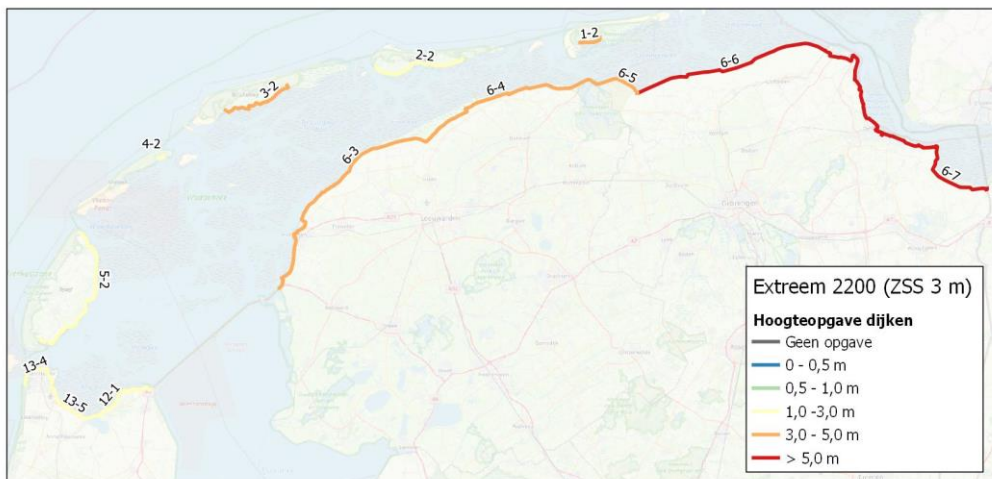
Figuur 31 voor de tijdelijk Laag (ZSS 1m in 2200) laat zien dat er grote verschillen in de hoogteopgave zijn in het gebied. Zo zien we voor traject 13-5 geen hoogteopgave (door aanwezige resthoogte) en voor de trajecten 6-6 en 6-7 een hoogteopgave van meer van 2 m. De maximale hoogteopgave bij 1m ZSS in 2200 betreft 2,8 m bij het bodemscenario Voortzetting Trend (voor traject 6-6).



Figuur 31: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdlijn Laag 2200 bij het bodemscenario Voortzetting Trend).

De hoogteopgave bij 3 m zeespiegelstijging (Figuur 32) laat een vergelijkbaar beeld zien als bij 1 m zeespiegelstijging. De hoogteopgave op de trajecten die voor 1 m ZSS het grootst was, is bij 3 m ook het grootst. Voor traject 6-6 betreft het hoogtetekort bij 3 m ZSS zelfs meer dan 6 m.

Vergeleken met 1 m ZSS resulteert 3 m ZSS in een gemiddelde toename van het hoogtetekort van 2,5 m, terwijl het verschil in ZSS slechts 2 m is. De gemiddelde hoogteopgave voor 1 m ZSS betreft 1,1 m en voor 3 m ZSS betreft het gemiddelde hoogtetekort 3,5 m. De maximale hoogteopgave bij 3m ZSS in 2200 betreft 6,5 m bij het bodemscenario Voortzetting Trend (voor traject 6-6).



Figuur 32: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200 bij het bodemscenario Voortzetting Trend).

5.3.2.2 Opgave piping en macrostabiliteit

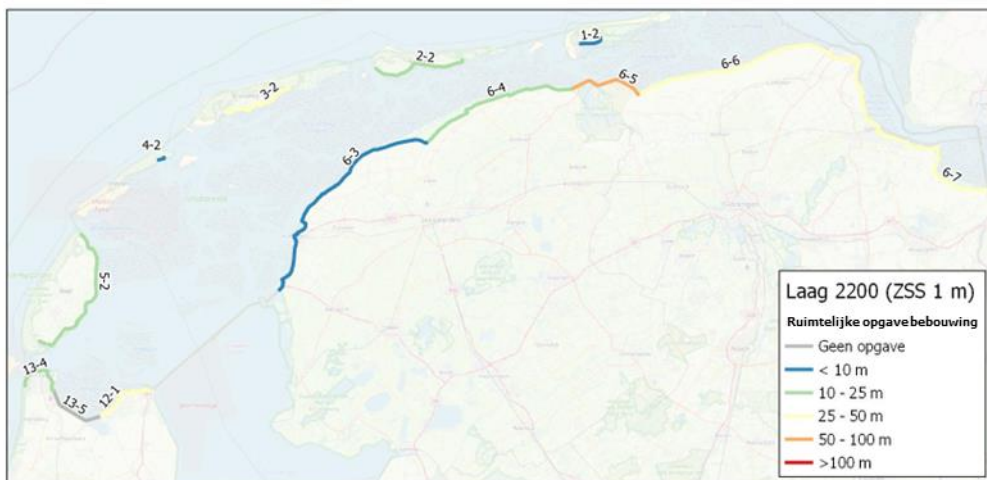
Figuur 33 en Figuur 34 geven de waterveiligheidsopgave voor de sterktesporen (piping en macrostabiliteit) weer bij respectievelijk 1 en 3 m zeespiegelstijging. De waterveiligheidsopgave voor sterkte betreft de aan te leggen profielverbreding door een piping- of stabiliteitsberm of taludverflauwing om te voldoen aan de normen. Een verbreding van de dijkbasis kan het gevolg zijn van dijkophoging. Als op een

traject een beperkte verbreding van de dijkbasis nodig is (<10 m), dan is dit hoogstwaarschijnlijk het resultaat van een dijkverbreding t.b.v. kruinverhoging.

Binnen de sterktesporen is 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 onderschat worden. Met name voor het mechanisme piping zullen de opgaves significant onderschat worden, omdat hiervoor de meeste curves ontbreken. Voor de afleiding en keuzes in de fragility curves wordt verwezen naar Witteveen+Bos & HKV (2022).

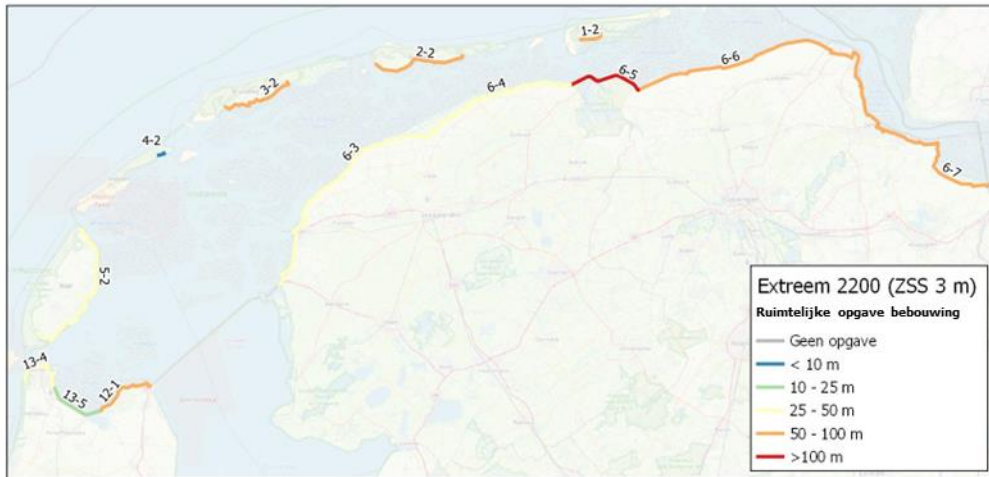
Figuur 33 laat zien dat de benodigde toename van de dijkbasis door de opgave voor piping en/of macrostabiliteit binnen heel het Waddengebied minder significant is dan het hoogtekort, mede door het ontbreken van enkele curves (zie voorgaande paragrafen). Daarnaast ontstaat een deel van de sterkteopgave door het hoogtetekort (de dijk wordt verbreed indien een kruinverhoging is toegepast).

Voor de trajecten 6-5 en 6-7 is sprake van een significante sterkteopgave, waarvoor een verbreding van de dijkbasis van ongeveer 50 m benodigd is. Voor de overige trajecten is dit minder dan 50 m.



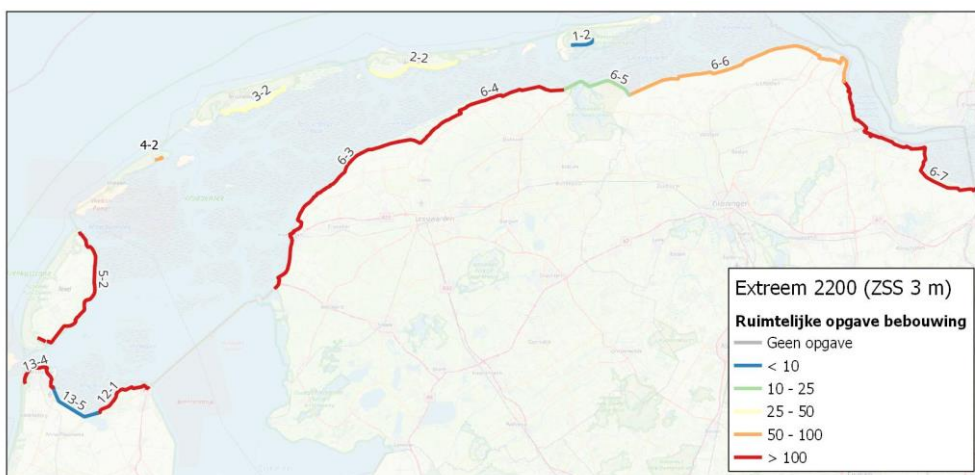
Figuur 33: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdlijn Laag 2200 bij het bodemscenario Voortzetting Trend).

Bij 3 m zeespiegelstijging (Figuur 34) zien we een vergelijkbaar beeld met dat bij 1 m ZSS: voor traject 6-5 is de grootste breedte benodigd (> 100 m), terwijl voor traject 13-5 nauwelijks extra verbreding van de dijkbasis benodigd is (< 20 m). Kanttekening bij de grote benodigde verbreding van de dijkbasis is dat het hoogtetekort voor bijvoorbeeld traject 6-7 6,5 m betreft bij 3 m ZSS. Dit betreft een verbreding van de dijkbasis van ongeveer 20 m door kruinverhoging. Dit kan het beeld van de opgave voor de sterktesporen enigszins vertekenen.



Figuur 34: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200 bij het bodemscenario Voortzetting Trend).

Het aanleggen of verbreden van de dijkbasis, zoals deze volgt uit de opgave voor de sterktesporen kan leiden tot ruimtelijke knelpunten indien gekozen wordt voor een niet-constructieve oplossing. Dit zijn plaatsen waar bebouwing in de versterkingszone aanwezig is. 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 in de versterkingszone dat tijdelijk of permanent geamoveerd dient te worden om de dijkversterking uit te kunnen voeren. Voor 1 m ZSS betreft het aantal te amoveren gebouwen in de versterkingszone ongeveer 800. Bij 3 m ZSS betreft dit ongeveer 1900 gebouwen.



Figuur 35: Ruimtelijke knelpunten (aantal gebouwen in de versterkingszone) bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200 bij het bodemscenario Voortzetting Trend).

Het aanduiden van de ruimtelijke knelpunten is mogelijk door de benodigde verbreding van de dijkbasis (Figuur 34) te vergelijken met het tijdelijk of permanent aantal te amoveren gebouwen in de versterkingszone (Figuur 35). Omdat voor beide figuren geldt dat de resultaten geaggregeerd zijn naar trajectniveau, is het op basis hiervan alleen mogelijk om op trajectniveau duiding te geven aan het feit of er op het traject (veel) ruimtelijke knelpunten zijn.

Zo is zichtbaar dat er voor bijvoorbeeld traject 6-5 nauwelijks gebouwen in de versterkingszone aanwezig zijn, maar wel een grote verbreding van de dijkbasis nodig is voor de opgave van piping en/of macrostabiliteit. Hier volgt uit dat voor dit traject nauwelijks ruimtelijke knelpunten zijn. Andersom is voor traject 4-2 (Vlieland) zichtbaar dat de bermbreedte opgave erg beperkt is, maar wel een significante hoeveelheid bebouwing in de versterkingszone aanwezig is.

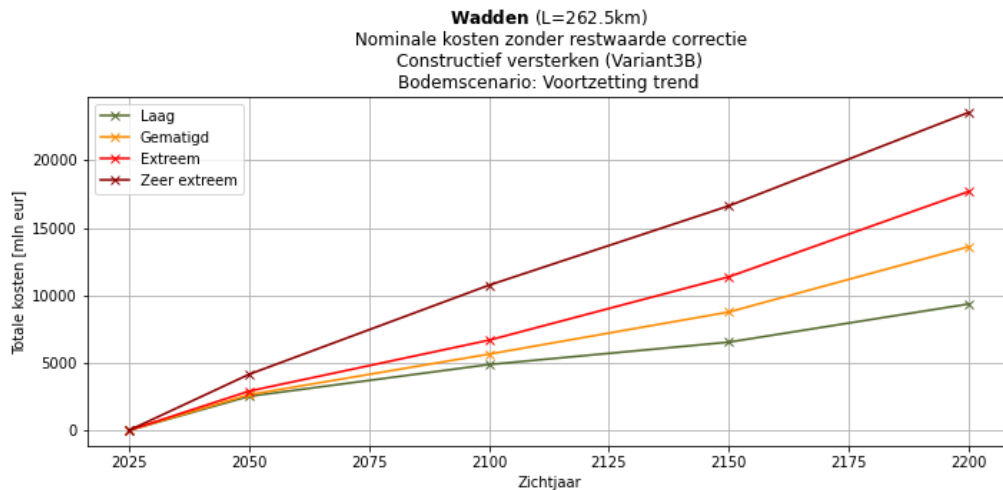
5.3.3 Nominale kosten tot en met een bepaald zichtjaar, per tijdlijn zonder restwaarde correctie

De nominale kosten t/m een bepaald zichtjaar, gegeven een tijdlijn zijn bepaald zoals beschreven in paragraaf 5.2.2. In Tabel 9 en Figuur 36 zijn de kosten voor het hele Waddengebied opgenomen.

Tabel 9: Cumulatieve nominale kosten Waddengebied tot en met een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, zonder restwaarde correctie, bij het bodemscenario Voortzetting Trend.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten per km in mld. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	2,6	2,6	2,9	4,1
2100	4,9	5,6	6,7	10,8
2150	6,5	8,8	11,3	16,6
2200	9,4	13,6	17,7	23,6

De totale kosten om de dijken in het Waddengebied te versterken volgens traditionele versterkingsstrategie met constructieve maatregelen (strategie 3B (traditioneel versterken) tot en met een bepaald zichtjaar zijn weergegeven in Figuur 36.



Figuur 36: Cumulatieve nominale kosten tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn voor het Waddengebied, zonder restwaarde correctie, bij het bodemscenario Voortzetting Trend.

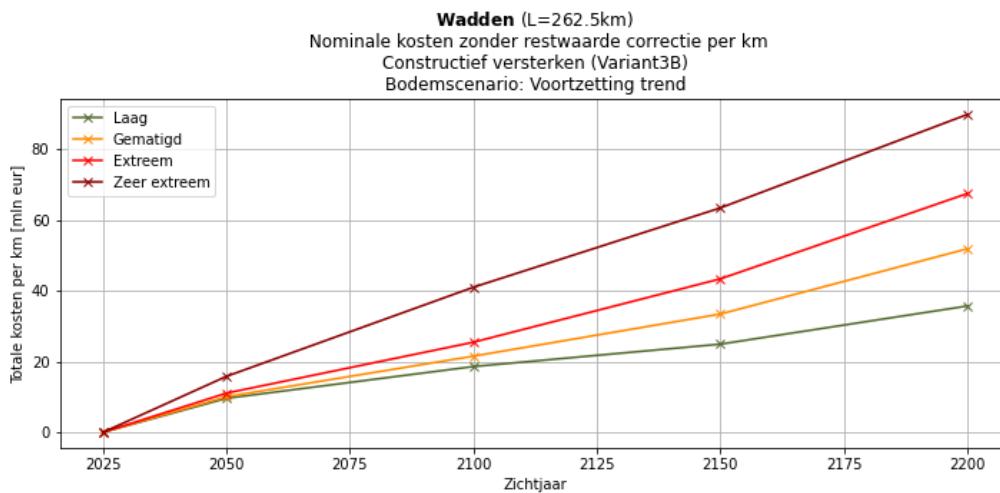
In Figuur 36 zijn de kosten voor het Waddengebied en Eems-Dollard weergegeven. Zo is te zien dat de totale kosten tot en met 2200 voor tijdlijn Laag +/-9,4 mld. Euro voor tijdlijn Zeer Extreem +/-23,6 mld. Euro bedragen.

De bandbreedte van de kosten met betrekking tot zeespiegelstijging per km voor het Waddengebied tot en met een bepaald zichtjaar zijn weergegeven in Tabel 10. In de bandbreedte zijn geen andere onzekerheden opgenomen.

Tabel 10: Cumulatieve nominale kosten per km Waddengebied tot een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, zonder restwaarde correctie, bij het bodemscenario Voortzetting Trend.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten in mln. Euro per km waterkering]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	9,6	10,1	11,1	15,8
2100	18,6	21,5	25,4	41,0
2150	24,9	33,4	43,3	63,4
2200	35,7	51,8	67,4	89,7

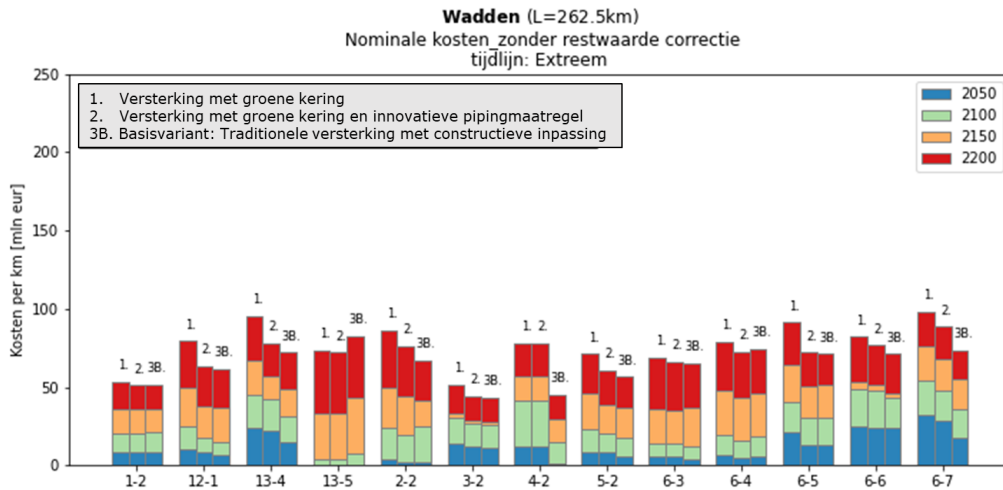
Wat opvalt is het geleidelijke verloop van de toename van de kosten per tijdlijn. Hieruit valt te concluderen dat er geen periodes zijn zonder versterking, maar dat consequent in een 50-jaar periode versterkt wordt. Figuur 37 geeft hetzelfde beeld, maar dan in kosten per km.



Figuur 37: Cumulatieve nominale kosten per km tot en met een bepaald zichtjaar, zonder restwaardecorrectie, per tijdlijn voor het bodemscenario voortzetting huidige trend.

In Figuur 37 zijn de kosten per kilometer over het gehele Waddengebied weergegeven (cumulatief over meerdere versterkingsrondes tot 2200). De kosten per kilometer voor zichtjaar 2200 bedragen voor tijdlijn Laag ongeveer 35,3 miljoen euro en voor tijdlijn Zeer Extreem ongeveer 93,9 miljoen euro. Voor de meeste vakken/trajecten langs het Waddengebied en de Eems-Dollard vinden tot 2200 vier versterkingsrondes plaats. Dit resulteert in kosten per versterkingsronde tussen de 8,9 en 22,4 miljoen euro per kilometer per versterkingsronde. Kanttekening hierbij is het feit dat de kosten per km zijn bepaald aan de hand van het totaal aantal kilometers in het gebied en niet de te versterken kilometers.

Om duiding te geven aan de opbouw van de kosten tot een bepaald zichtjaar en inzicht te krijgen in de ruimtelijk verdeling, zijn in Figuur 38 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 weergegeven, zoals beschreven in 5.2.1. Hieruit zijn de ruimtelijke knelpunten met het oog op amoveringskosten voor de trajecten te duiden. De kosten voor het amoveren van gebouwen in de versterkingszone zijn alleen aanwezig bij de strategie versterking in groene kering (inclusief amoveren) en de strategie versterking in groene kering (inclusief amoveren) met toepassing van innovatieve pipingmaatregel. In paragraaf 5.3.2.2 is nader ingegaan op de ruimtelijke knelpunten.



Figuur 38: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaardecorrectie per km per traject voor tijdlijn Extreem bij het bodemscenario voortzetting huidige trend in het Waddengebied, (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 38 is het uitblijven van kosten tot 2050 voor traject 13-5. Uit de overzichten van de hoogte- en sterkteopgave blijkt dat sprake is van een kleine opgave in 2050 voor traject 13-5. De relatief hoge kosten voor traject 13-5 volgen uit het feit dat bij de strategie "traditionele inpassing met constructieve versterking bij ruimtegebrek" (strategie 3B) snel overgegaan wordt (richting 2100) op een constructieve oplossing, terwijl de overige trajecten relatief meer in groen versterkt kunnen worden. Voor de overige trajecten zien we voor de verschillende dijkversterkingsstrategieën geen opvallende uitschieters.

Over het algemeen is de strategie "traditionele inpassing met constructieve versterking bij ruimtegebrek" (strategie 3B) de meest voordelige strategie en de strategie "versterking in groene kering (inclusief amoveren)" (strategie 1) het minst voordelig. Dit blijkt ook uit paragraaf 5.3.2 waarin beschreven staat dat binnen het Waddengebied een significante hoeveelheid bebouwing in de versterkingszone tijdelijk of permanent geamoveerd dient te worden bij de strategie "versterking in groene kering (inclusief amoveren)"(strategie 1). Op lokaal niveau kan deze balans, afhankelijk van de dichtheid van de bebouwing op een locatie, anders uitvallen. Dat is niet nader bekeken in deze studie.

5.4 Samenvatting

Het resultaat van de Waterveiligheidsopgave van de dijken voor het Waddengebied is opgenomen in Tabel 11. In deze tabel zijn zowel de kosten tot een bepaald zichtjaar (nominale kosten) als de kosten in een bepaald zichtjaar opgenomen, waarbij gecorrigeerd is voor de restwaarde.

Tabel 11: Cumulatieve Nominale kosten per km per tijdlijn, zonder restwaarde correctie (kolom "nom. kosten") en met restwaarde correctie (kolom "met corr."), bij het bodemscenario Voortzetting Trend.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten per km in mln. euro]							
	Laag		Gematigd		Extreem		Zeer Extreem	
	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.
2050	9,6	2,4	10,0	2,5	11,0	2,7	15,8	4,0
2100	18,6	11,0	21,5	12,4	25,4	14,5	41,0	23,6
2150	24,9	19,9	33,4	24,3	43,3	31,0	63,4	47,1
2200	36,7	29,9	51,8	41,0	67,4	53,1	89,7	73,4

Het algemene beeld voor de waterveiligheidsopgave in het Waddengebied is dat met name de hoogteopgave belangrijk is. Het effect van ZSS zorgt in het Waddengebied voor grote hoogtetekorten, oplopend tot meer dan 10 m bij 5 m ZSS.

Ook valt op dat de verschillen in versterkingskosten per km tussen de trajecten beperkt zijn. Voor alle trajecten geldt dat de opgave in 2200 significant is en regulier versterkt moet worden per 50 jaar. Ook valt het op dat de kosten t/m 2050 inclusief restwaarde relatief laag zijn, hieruit valt te concluderen dat de eerste versterkingsronde pas richting 2050 plaatsvindt.

6 Gevoeligheidsanalyse

6.1 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.

Voor de Waddenzee en Eems-Dollard is gekeken naar de invloed van:

1. Effect van bodemligging op de resultaten;
2. Effect van vegetatie op het voorland;
3. Effect van gebruikte SWAN-versie en instellingen.

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.

6.2 Parameter 1: Effect bodemligging

6.2.1 Hydraulische belastingen

In paragraaf 3.3 zijn de resultaten beschreven voor de situatie dat de bodem van de Waddenzee en Eems-Dollard meegroeit volgens de huidige trend tot 2200. Daarbij is dus geen rekening gehouden met andere bodemscenario's zoals bijvoorbeeld dat de bodem volledig of geheel niet meegroeit met de zeespiegelstijging. Of dit gebeurt is onzeker en hangt ook af van (toekomstige) beleidskeuzes. Om de gevoeligheid 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. Voorkeursstrategie: De bodem volgt de huidige trends (Voorzetting Trend, VT);
3. De bodem groeit volledig mee met de zeespiegelstijging (Volledig Meegroeien, VM).

De resultaten van de voorkeursstrategie (scenario 2: Voortzetting Trend) zijn reeds gepresenteerd in hoofdstuk 3.

In bovengenoemde drie scenario's blijft de bodemligging van de Noordzee (hier grofweg gedefinieerd als het gebied zeewaarts van de 20 m dieptecontour) constant. Aan het eind van deze paragraaf wordt ook stilgestaan bij het effect van het volledig meegroeien van de Noordzeebodem op de hydraulische belastingen.

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 referentiebodem uit 2023. De effecten van zeespiegelstijging zijn daarom berekend met Hydra-NL en de database fysica uit WBI2017 (HR2011).

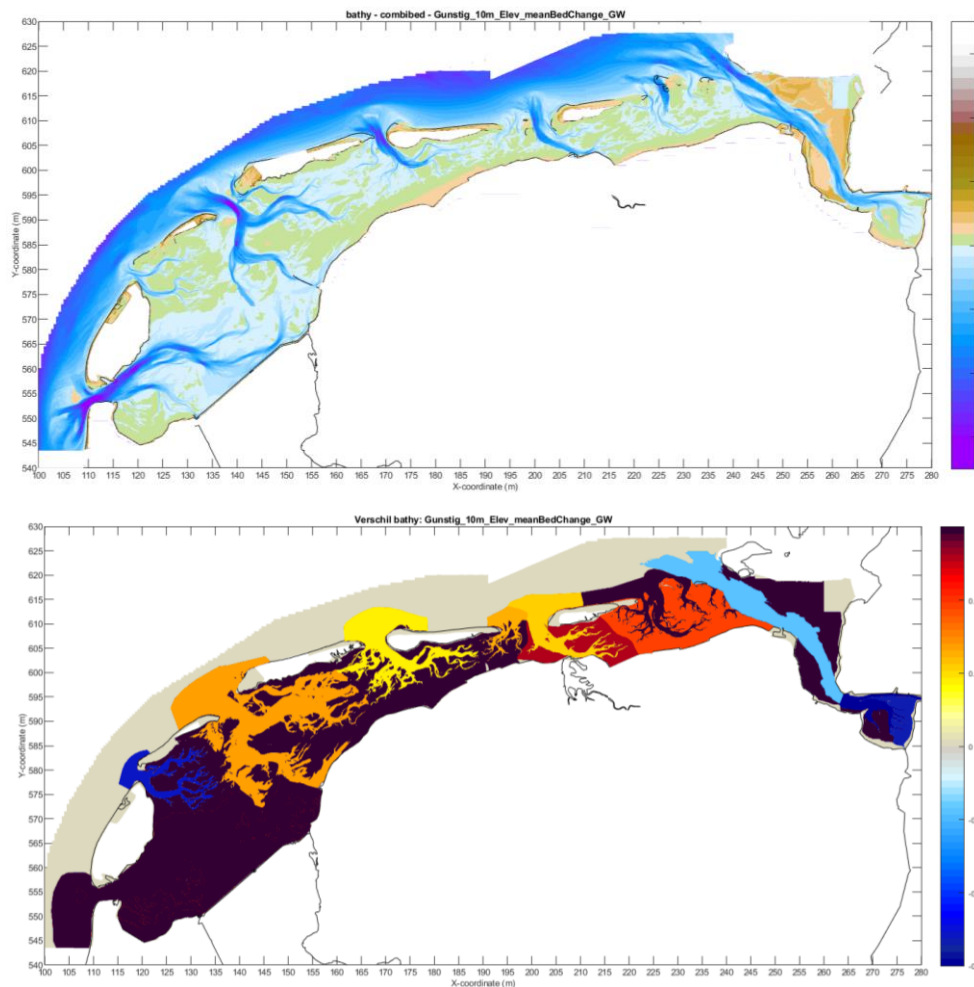
Scenario 2. bodem groeit gedeeltelijk mee (Voorzetting Trend, VT)

Door Deltares (2022b) zijn de huidige bodemtrends bepaald. Hierbij is voor ieder zeegatsysteem een onderscheid gemaakt tussen het buitengebied (de buitendelta) en het binnengebied (het bekken), met de keel van het zeegat als grens ertussen. Uitgangspunt is dat de huidige plaat-geulligging in de Waddenzee gelijk blijft. Voor de buitendelta geldt dat niet omdat de hoofdgeul hier veel dynamischer is.

Voor verschillende zeespiegelscenario's is met ASMITA modellen [Rossington et al., 2011] de hoeveelheid extra sediment in de binnendelta's berekend voor een gunstig en ongunstig scenario. Het sediment is gelijkmatig verdeeld over het gebied. Voor de Eems-Dollard is een andere methodiek toegepast waarbij voor drie gebieden een sedimentbalans is opgesteld. De vaargeul is hierbij apart beschouwd.

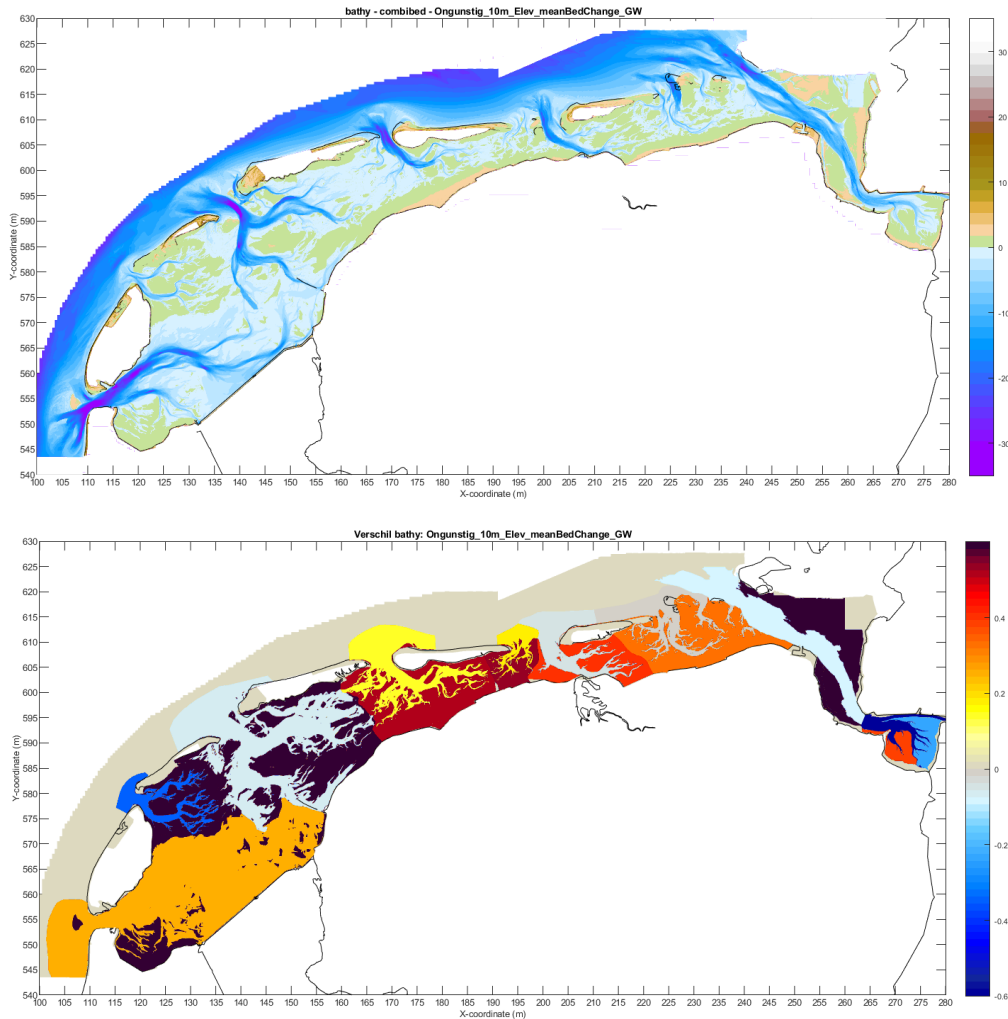
Voor de buitendelta's is een andere methodiek toegepast. Omdat deze morfologisch zeer actief zijn is er voor gekozen om op basis van historische metingen per punt de historisch minimale ligging te hanteren als basis en vervolgens de scenario's van Niet Meegroeiën, Voortzetting trend (op basis van ASMITA) en Volledig Meegroeiën erbij op te tellen.

Op basis van bovenstaande beschouwing zijn potentiële bodems gemaakt voor 0,5 m, 1 m, 2 m en 3 m zeespiegelstijging, waarvan hieronder een aantal getoond worden (zie Figuur 39 en Figuur 40).



Figuur 39: Bodemligging Waddenzee en Eems-Dollard bij Voortzetting trend (VT) voor 1 m zeespiegelstijging voor gunstig (tijdlijn Laag in zichtjaar 2200). Bovenste

figuur geeft de bodem voor tijdlijn Laag in zichtjaar 2200 weer en onderste figuur de verandering t.o.v. het jaar 2023.



Figuur 40: Bodemligging Waddenzee en Eems-Dollard bij Voortzetting trend (VT) voor 1 m zeespiegelstijging voor ongunstig (tijdlijn Extreem in zichtjaar 2100). Bovenste figuur geeft de bodem voor tijdlijn Extreem in zichtjaar 2100 weer en onderste figuur de verandering t.o.v. het jaar 2023.

Scenario 3. Volledig meegroeien bodem Waddenzee en Eems-Dollard (Volledig Meegroeien, 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.

Hierbij worden de volgende scenario's doorgerekend:

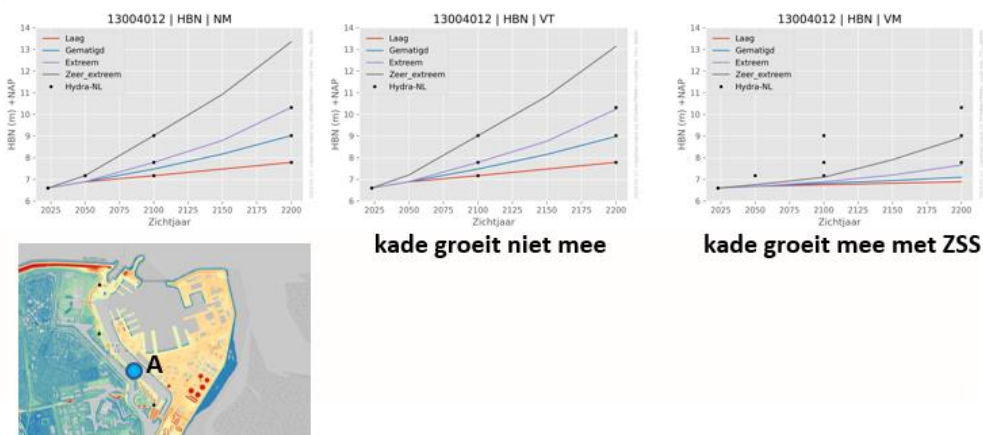
1. Gehele bodem stijgt met 0,5 m;
2. Gehele bodem stijgt met 1,0 m;
3. Gehele bodem stijgt met 2,0 m;
4. Gehele bodem stijgt met 3,0 m.

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 41 tot en met Figuur 45 zijn de resultaten voor een aantal voorbeeldlocaties in Figuur 14 voor alle bodemscenario's gepresenteerd. De resultaten voor alle andere locaties zijn beschikbaar in het opleverdossier. De zwarte punten geven ter illustratie de Hydra-NL resultaten weer voor het bodemscenario Niet Meegroeien.

In Figuur 41 is te zien dat voor de locatie Den Helder de HBN's bij het bodemscenario Voortzetting trend (VT) gelijk blijven ten opzichte van het bodemscenario Niet Meegroeien (NM) waarbij de bodem niet verandert. Dit komt omdat aangenomen is dat de haventerreinen niet opgehoogd worden (voor NM en VT). Bij het bodemscenario Volledig Meegroeien (VM) nemen de HBN's minder snel toe t.o.v. het basisscenario Voortzetting Trend, omdat de haventerreinen volledig meegroeien met de zeespiegelstijging en dus de golfbelasting afneemt¹⁰ bij het bodemscenario Volledig Meegroeien ten opzichte van Voortzetting Trend. Het HBN voor de tijdlijn Zeer Extreem in het zichtjaar 2200 daalt van NAP+13,3 m voor het bodemscenario Niet Meegroeien naar NAP+8,9m voor het bodemscenario Volledig meegroeien. De waterstandsfrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging.

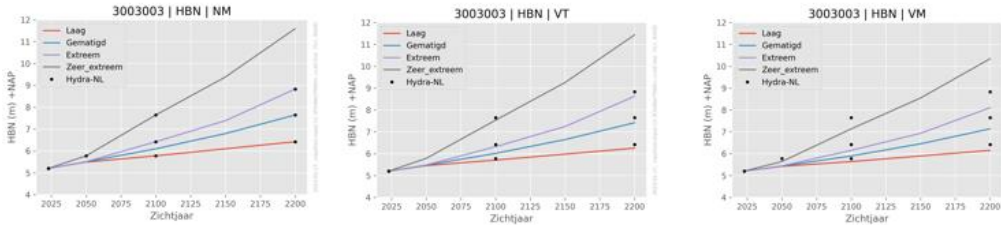


Figuur 41: HBN lijnen Den Helder (havens Hs/D<0,5) voor alle bodemscenario's. Links: Niet Meegroeien, midden: Voortzetting Trend en rechts: Volledig Meegroeien.

In Figuur 42 is voor de locatie Terschelling te zien dat de HBN's bij het bodemscenario Voortzetting trend (VT) iets dalen (10 tot 15 cm) ten opzichte van het bodemscenario Niet Meegroeien (NM) waarbij de bodem niet verandert. Dit komt omdat de trend op deze locatie positief is (licht sedimentierend) waardoor de toekomstige bodem iets ondieper komt te liggen. De golfbelasting neemt dus iets af wat resulteert in lagere HBN's. Bij het bodemscenario Volledig meegroeien (VM) nemen de HBN's minder snel toe dan bij de andere bodemscenario's, omdat de bodem meegroeit en dus de golfbelasting afneemt in het bodemscenario Volledig Meegroeien ten opzichte van Niet Meegroeien en Voortzetting Trend. De waterstandsfrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging. Merk op dat het bodemscenario Voortzetting Trend maar weinig verschilt van het

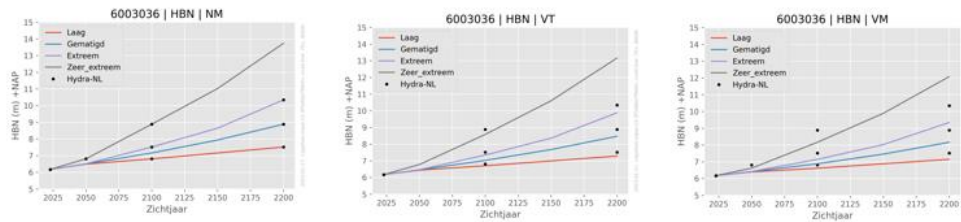
¹⁰ In feite zouden de HBN's voor het bodemscenario Volledig Meegroeien enkel de zeespiegelstijging moeten laten zien. In de berekeningen is de stijging minder dan de zeespiegelstijging. Dat komt doordat de HBN's zijn bepaald via de relatieve verandering t.o.v. het bodemscenario Niet Meegroeien.

bodemsценario Niet Meegroeien. Het bodemsценario Volledig Meegroeien geeft wel duidelijk lagere HBN's dan de bodemsценario's Niet Meegroeien of Voortzetting Trend.



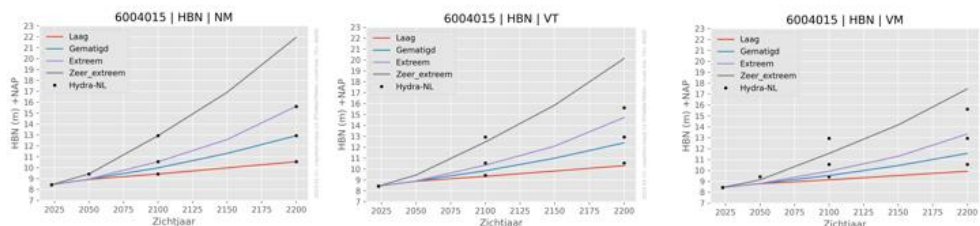
Figuur 42: HBN lijnen Terschelling (SWAN2D) voor alle bodemsценario's. Links: Niet Meegroeien, midden: Voortzetting Trend en rechts: Volledig Meegroeien.

In Figuur 43 is voor de locatie Ferwert te zien dat de HBN's bij het bodemsценario Voortzetting trend (VT) dalen ten opzichte van het bodemsценario Niet Meegroeien (NM) waarbij de bodem niet verandert. Dit komt omdat de trend op deze locatie positief is (sedimenterend) waardoor de toekomstige bodem aangroeit. Bij het bodemsценario Volledig Meegroeien (VM) nemen de HBN's af omdat de bodem meegroeit en dus de golfbelasting afneemt in het bodemsценario Volledig Meegroeien ten opzichte van de bodemsценario's Niet Meegroeien en Voortzetting Trend. De waterstandsrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging.



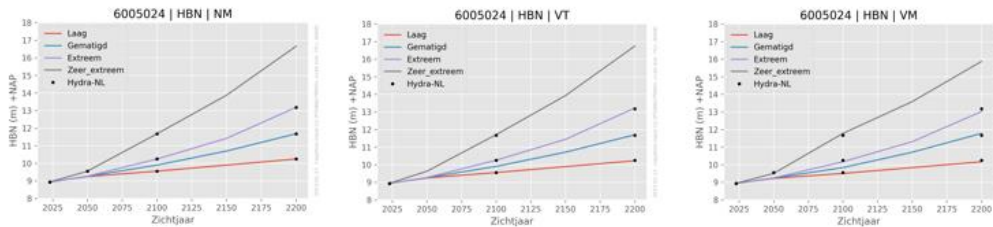
Figuur 43: HBN lijnen Ferwert (SWAN2D) voor alle bodemsценario's. Links: Niet Meegroeien, midden: Voortzetting Trend en rechts: Volledig Meegroeien.

In Figuur 44 is te zien dat bij Pieterburen de HBN's bij het scenario Voortzetting trend (VT) dalen ten opzichte van het bodemsценario Niet Meegroeien (NM) waarbij de bodem niet verandert. Dit komt omdat de trend op deze locatie positief is (sedimenterend) waardoor de toekomstige bodem aangroeit. Bij het bodemsценario Volledig Meegroeien (VM) nemen de HBN's af omdat de bodem meegroeit en dus de golfbelasting afneemt in het bodemsценario Volledig Meegroeien ten opzichte van de bodemsценario's Niet Meegroeien en Voortzetting Trend. De waterstandsrequentielijnen veranderen niet door een andere bodemligging.



Figuur 44: HBN lijnen Pieterburen (SWAN1D) voor alle bodemsценario's. Links: Niet Meegroeien, midden: Voortzetting Trend en rechts: Volledig Meegroeien.

Voor de Hoogeplaat (Eems-Dollard) is in Figuur 45 is te zien dat de HBN's bij het bodemscenario Voortzetting trend (VT) gelijk blijven aan het bodemscenario Niet Meegroeien (NM). Dit komt omdat de trend op deze locatie zeer klein is waardoor de toekomstige bodem niet veel aangroeit. Bij het bodemscenario Volledig Meegroeien (VM) nemen de HBN's iets af omdat de bodem meegroeit en dus de golfbelasting afneemt in het bodemscenario Volledig Meegroeien ten opzichte van de bodemscenario's Niet Meegroeien en Voortzetting Trend.



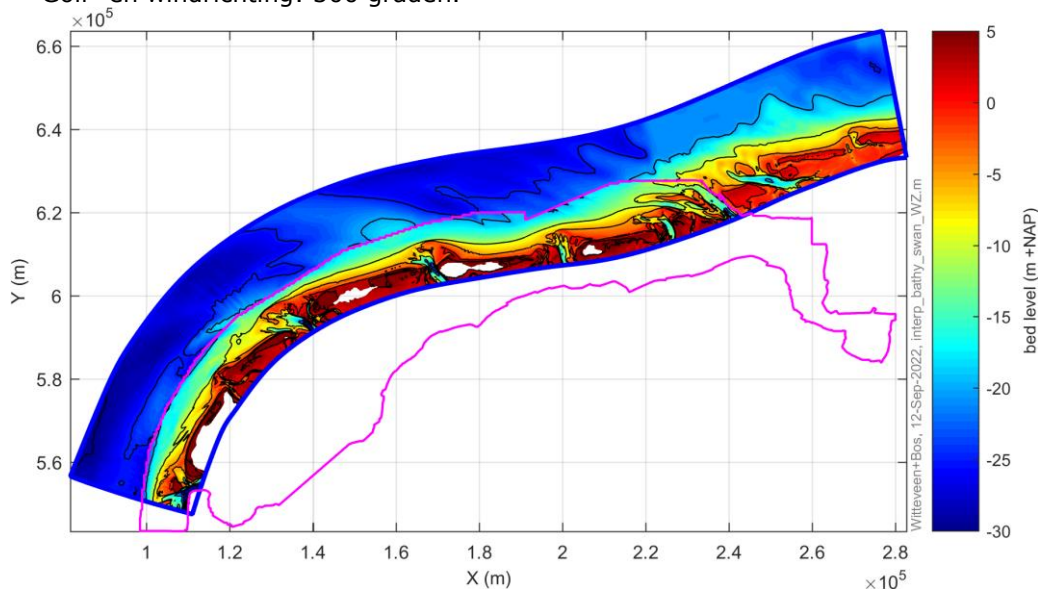
Figuur 45: HBN lijnen Hoogeplaat, Eems-Dollard (SWAN1D) voor alle bodemscenario's. Links: Niet Meegroeien, midden: Voortzetting Trend en rechts: Volledig Meegroeien.

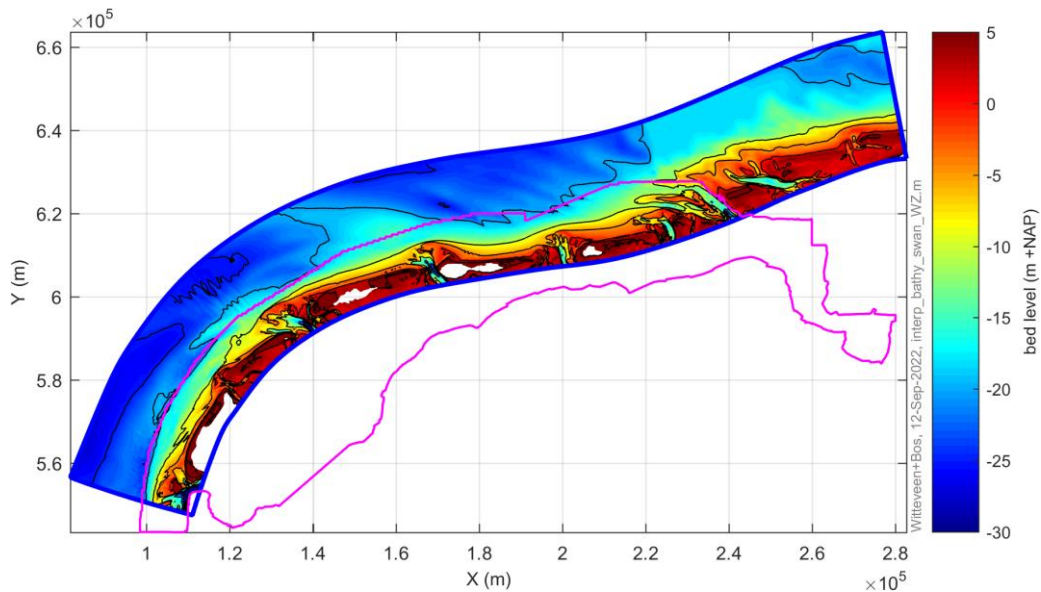
De grootste verschillen tussen de bodemscenario's zijn er bij Den Helder (haven) en Pieterburen. Dit komt omdat op beide locaties de golfdoordringing groot is en sterk afneemt als de bodem meebeweegt.

Effect meegroeien bodem Noordzee

Bij scenario's in het bovenstaande stuk is uitgegaan van een constante bodemligging van de Noordzee, hier grofweg gedefinieerd als het gebied ten noorden van de 20 m dieptecontour. Voor scenario Volledig Meegroeien (bij 3 m zeespiegelstijging) is onderzocht wat het effect is van het volledig meegroeien van de Noordzeebodem op de hydraulische belastingen. Hierbij is één representatieve testconditie gebruikt (illustratiepunt van OKADER-vak 6004026):

- Significante golfhoogte offshore: 8,7 m;
- Piekgolperiode: 15,3 s;
- Golf- en windrichting: 300 graden.

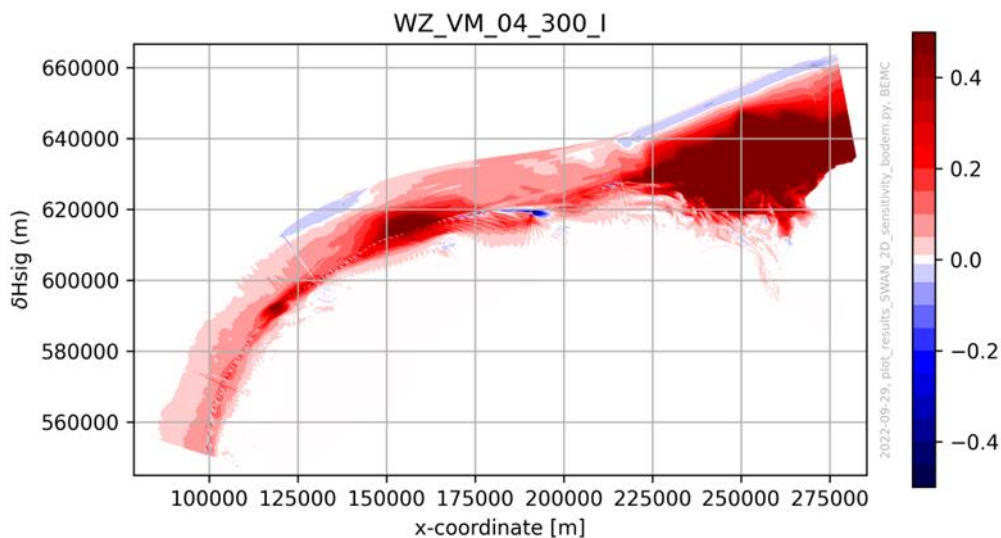




Figuur 46: Bodemligging in het G1 rekendomein (SWAN), bodems scenario Niet Meegroeien (bovenste figuur), bodems scenario Volledig Meegroeien (onderste figuur). Het gebied dat is omkaderd met de roze lijn is het gebied waar in beide gevallen het scenario Volledig Meegroeien is gebruikt.

Met het SWAN model van de Waddenzee en Eems-Dollard zijn voor de beschouwde testconditie dus twee verschillende bodems doorgerekend:

- Scenario waarbij bij 3 m ZSS met een constante ligging van de Noordzeebodem en Volledig Meegroeien in de Waddenzee en Eems-Dollard;
- Scenario waarbij bij 3 m ZSS met een volledig meegroeïende Noordzeebodem (3 m) en Waddenzeebodem en Eems-Dollardbodem (3m).



Figuur 47: Verschillen in golfhoogte tussen het bodems scenario Volledig Meegroeïende en het bodems scenario Niet Meegroeïende van de bodem op de Noordzee bij 3m ZSS.

Vergelijking van de resultaten (Figuur 47) laat zien dat het meegroeien van de Noordzeebodem een significant effect heeft op de golfhoogte buiten de Waddenzee en op de buitendelta's, maar geen significant effect op de golfhoogte op de Hydra-NL uitvoerlocaties in het Waddenzeegebied en Eems-Dollard. De verschillen in

golfhoogte nabij de teen van de dijk liggen in de orde van enkele centimeters voor de beschouwde testconditie.

Samenvatting

Tabel 12 toont de gemiddelde stijging van het HBN ten opzichte van tijdelijk Laag voor het bodemsценario Niet Meegroeien. In de tabel is te zien dat het HBN gemiddeld sneller stijgt dan de zeespiegelstijging. Dit komt omdat ook de golven toenemen. Voor dit bodemsценario wordt de grootste stijging van de HBN's gevonden. Dat komt omdat bij de twee andere scenario's de bodem (deels) meegroeit, waardoor de invloed van golven afneemt. Voor tijdelijk Extreem in 2200 stijgt voor het bodemsценario Niet Meegroeien het HBN met 316 cm t.o.v. tijdelijk Laag, terwijl dat bij het bodemsценario Voortzetting Trend en Volledig Meegroeien respectievelijk 287 cm en 231 cm is.

Tabel 12: Gemiddelde stijging in HBN voor tijdelijk Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdelijk Laag voor het bodemsценario Niet Meegroeien (NM).

Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging HBN langs Waddenzee en Eems-Dollard t.o.v. tijdelijk Laag voor het bodemsценario Niet Meegroeien					
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag		Zeer Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	HBN Waddenzee en Eems-Dollard	ZSS	HBN Waddenzee en Eems-Dollard	ZSS	HBN Waddenzee en Eems-Dollard
2023	-	-	-	-	-	-
2050	-	+1 cm	-	+2cm	+25 cm	+34 cm
2100	+25 cm	+38 cm	+50 cm	+75 cm	+150 cm	+228 cm
2150	+56 cm	+86 cm	+105 cm	+164 cm	+275 cm	+429 cm
2200	+100 cm	+153 cm	+200 cm	+316 cm	+437 cm	+694 cm

In principe zou 2050 voor Gematigd, Extreem dezelfde resultaten moeten geven (ZSS = 25 cm)¹¹. Deze waarden zijn echter bepaald door interpolatie van HBN's tussen 2023 en 2100, waarbij de scenario's voor 2100 verschillen. Verder is voor Zeer Extreem in 2050 een snellere ZSS aangenomen, te weten +25 cm t.o.v. tijdelijk Laag in 2050.

Tabel 13 toont de gemiddelde stijging van het HBN ten opzichte van tijdelijk Laag voor het bodemsценario Volledig Meegroeien. Ten opzichte van het bodemsценario Niet meegroeien (Tabel 12) is te zien dat het HBN minder hard stijgt voor het bodemsценario Volledig Meegroeien. Dat is ook logisch want de bodem neemt het meeste toe.

Opvallend is dat het HBN bij het bodemsценario Volledig Meegroeien iets groter is dan de zeespiegelstijging. Theoretisch zouden die gelijk moeten zijn. Reden dat het HBN tussen 5% en 16% toeneemt is dat het HBN is bepaald ten opzichte van het scenario Niet Meegroeien. Vervolgens moet het exacte HBN voor VM 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 (VT) of helemaal geen correctie (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

¹¹ Het verschil is 1 cm.

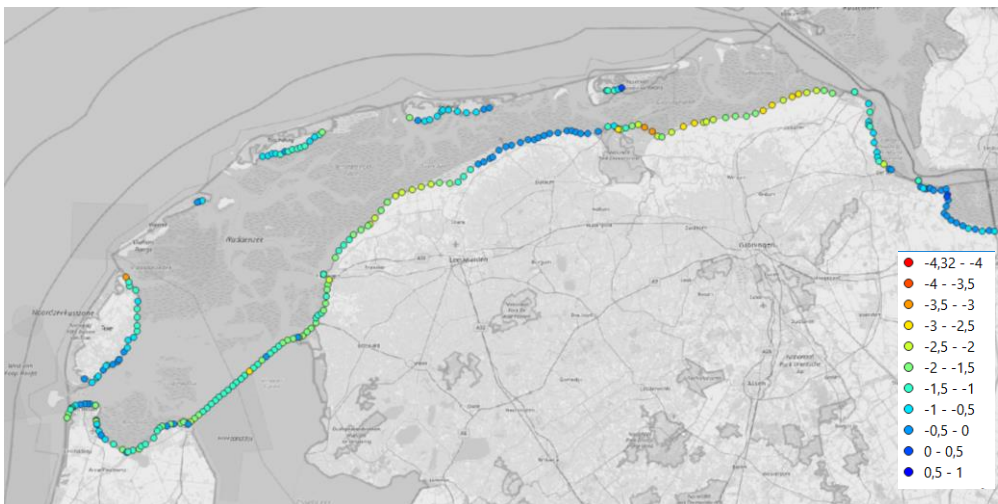
volgens de TAW methodiek (ref. 24). In Deltares (2022b) is aangegeven dat met de Illustratiepuntenmethode een foutenmarge van 30% moet worden geaccepteerd. Daar vallen de resultaten ruim binnen. Dit is verder geanalyseerd en uitgewerkt in Rijkswaterstaat (2023a).

Tabel 13: Gemiddelde stijging in HBN voor tijdelijk Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdelijk Laag voor bodemscenario Volledig Meegroeien

Zichtjaar	Gemiddelde stijging ZSS en gemiddelde stijging HBN langs Waddenzee en Eems-Dollard t.o.v. tijdelijk Laag voor het bodemscenario Volledig Meegroeien					
	Gematigd t.o.v. Laag		Extreem t.o.v. Laag		Zeer Extreem t.o.v. Laag	
	ZSS	HBN Waddenzee en Eems-Dollard	ZSS	HBN Waddenzee en Eems-Dollard	ZSS	HBN Waddenzee en Eems-Dollard
2023	-	-	-	-	-	-
2050	-	+1 cm	-	+2 cm	+25 cm	+23 cm
2100	+25 cm	+27 cm	+50 cm	+54 cm	+150 cm	+165 cm
2150	+56 cm	+62 cm	+105 cm	+120 cm	+275 cm	+314 cm
2200	+100 cm	+111 cm	+200 cm	+231 cm	+437 cm	+509 cm

Gevoeligheidsberekeningen laten zien dat het wel of niet meegroeien van de Noordzeebodem bij het bodemscenario Volledig Meegroeien geen significant effect heeft op de golfhoogte nabij de teen van de keringen in het Waddenzeegebied en Eems-Dollard.

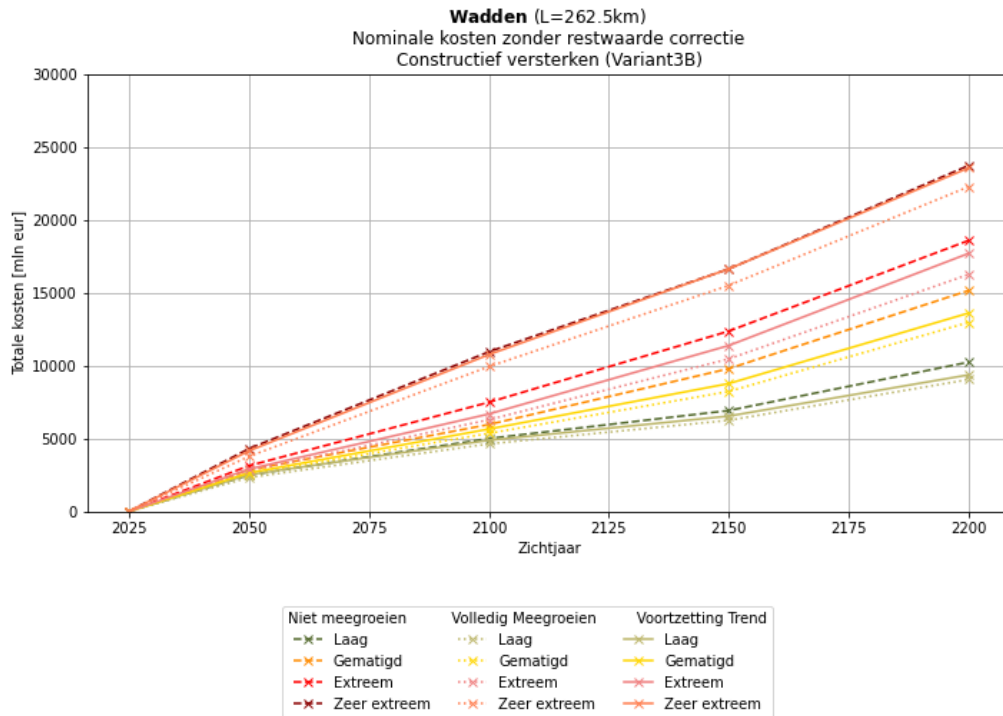
Figuur 48 toont het ruimtelijk verschil voor het bodemscenario Volledig Meegroeien (VM) ten opzichte van Niet Meegroeien (NM) voor tijdelijk Extreem in 2200. Het HBN is lager achter de eilanden en aan de Waddenzee kant van de eilanden. Dat komt omdat deze delen beschut liggen voor rechtstreekse golfaanval vanaf de Noordzee.



Figuur 48: HBN voor tijdelijk Extreem in 2200 (ZSS 3 m) voor bodemscenario Volledig Meegroeien.

6.2.2 Waterveiligheidsopgave dijken

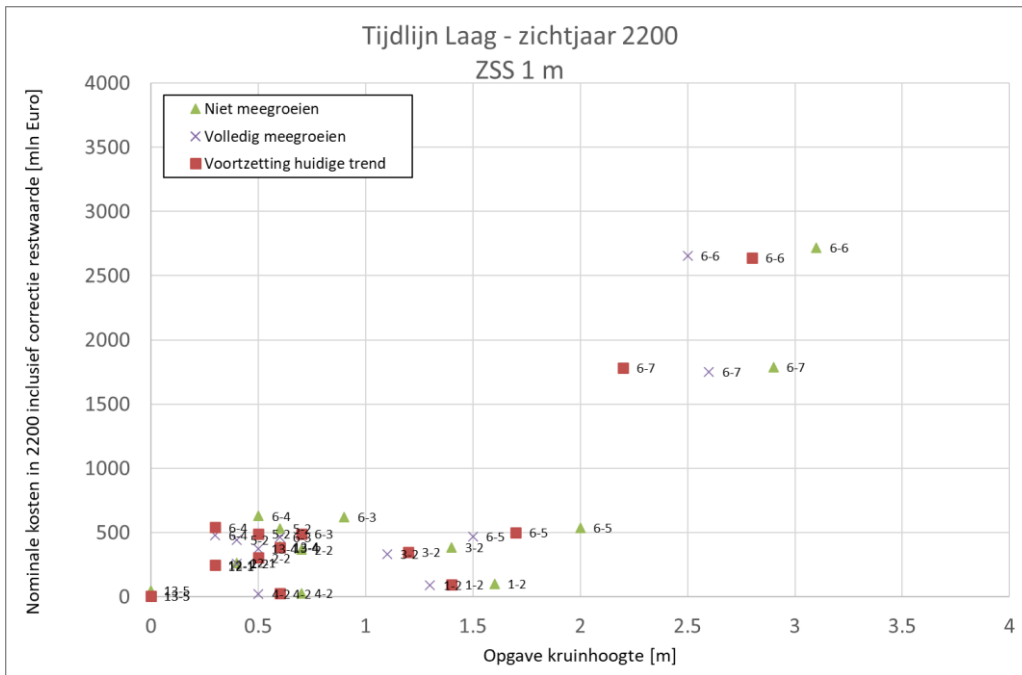
De waterveiligheidsopgave (zie hoofdstuk 5) voor de Wadden is bepaald op basis van een vast uitgangspunt voor het bodemscenario. Voor de Wadden is als basisscenario Voortzetting Trend gekozen. Om het effect van de andere bodemscenario's Niet Meegroeien en Volledig Meegroeien inzichtelijk te krijgen, zijn de kosten voor de waterveiligheidsopgave per tijdlijn bepaald voor de overige bodemscenario's. Hieruit volgt het beeld in Figuur 49.



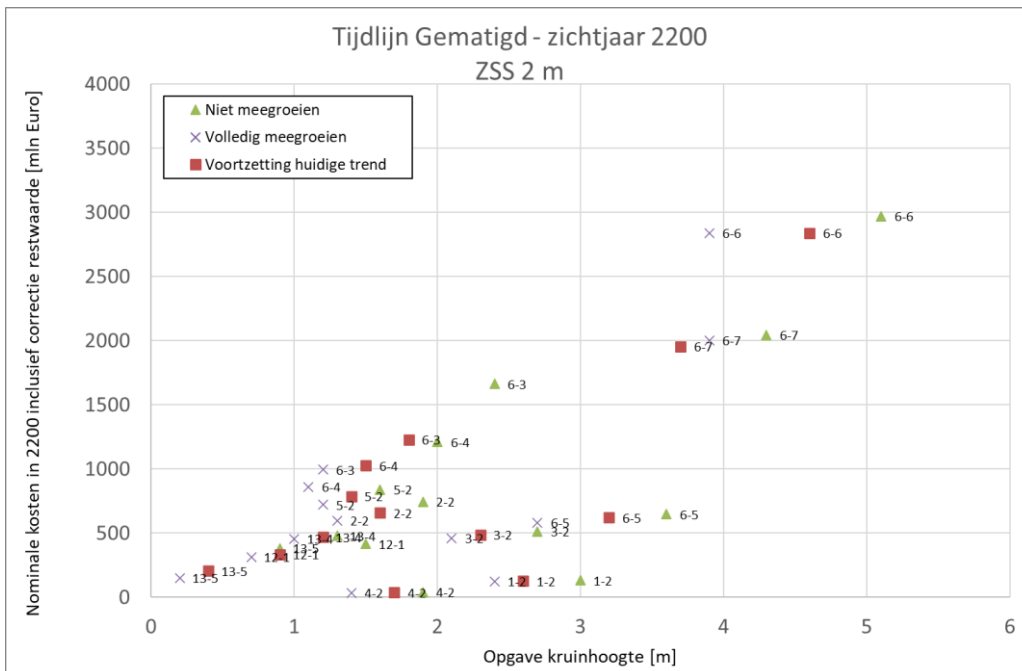
Figuur 49: (Nominale) Versterkingskosten per tijdlijn per bodemscenario en per zichtjaar.

We zien voor alle tijdlijnen hetzelfde beeld: bodemscenario Niet Meegroeien geeft hierin de hoogste kosten (zoals verwacht) en bodemscenario Volledig Meegroeien de laagste kosten. Wat wel opvalt is het verschil tussen de verschillende bodemscenario's per tijdlijn. Zo laten tijdlijn Gematigd en Extreem de grootste variatie zien tussen de bodemscenario's; voor zichtjaar 2200 is dit ongeveer 10 - 15%. Het effect van de bodemscenario's op de hydraulische belastingen is groter dan op de kosten. Een belangrijke reden hiervoor is dat bij dijkversterkingen de vaste kosten erg belangrijk en die drukken de verschillen naar beneden¹². Daarnaast kan een mogelijke reden zijn dat de kosten voor de dijkversterking voornamelijk door de veiligheidsopgave voor piping en macrostabiliteit (constructieve maatregelen) wordt veroorzaakt en in mindere mate door de hoogteopgave. In Figuur 50 tot en met Figuur 53 is de relatie weergegeven tussen de hoogteopgave en de nominale kosten met restwaarde correctie voor de drie bodemscenario's voor achtereenvolgens tijdlijn Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem. Voor het merendeel van de trajecten is te zien dat voor verschillende hoogteopgave, de kosten weinig verschillen. Voor deze trajecten is de verwachting dat de kosten gedomineerd worden door de opgave voor piping en macrostabiliteit.

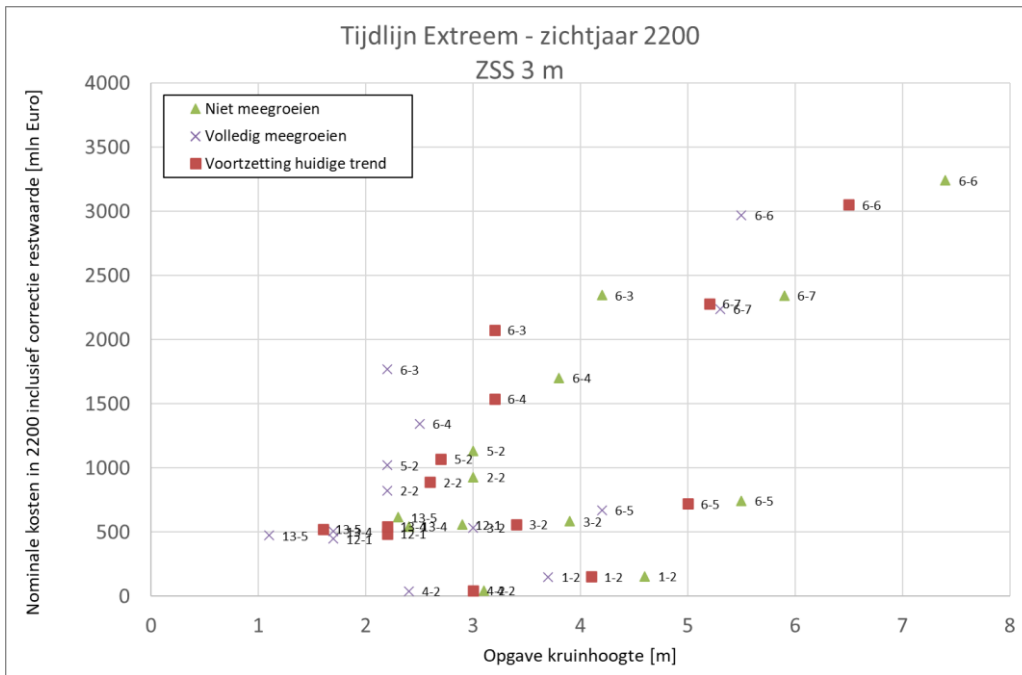
¹² Opgemerkt wordt dat de investeringskosten voor een kruinverhoging in OKADER zijn begrensd op maximaal 2 m. Dit betekent dat bij een benodigde kruinverhoging van bijv. 3,5 m, gerekend wordt met de kosten die horen bij een kruinverhoging van 2 m.



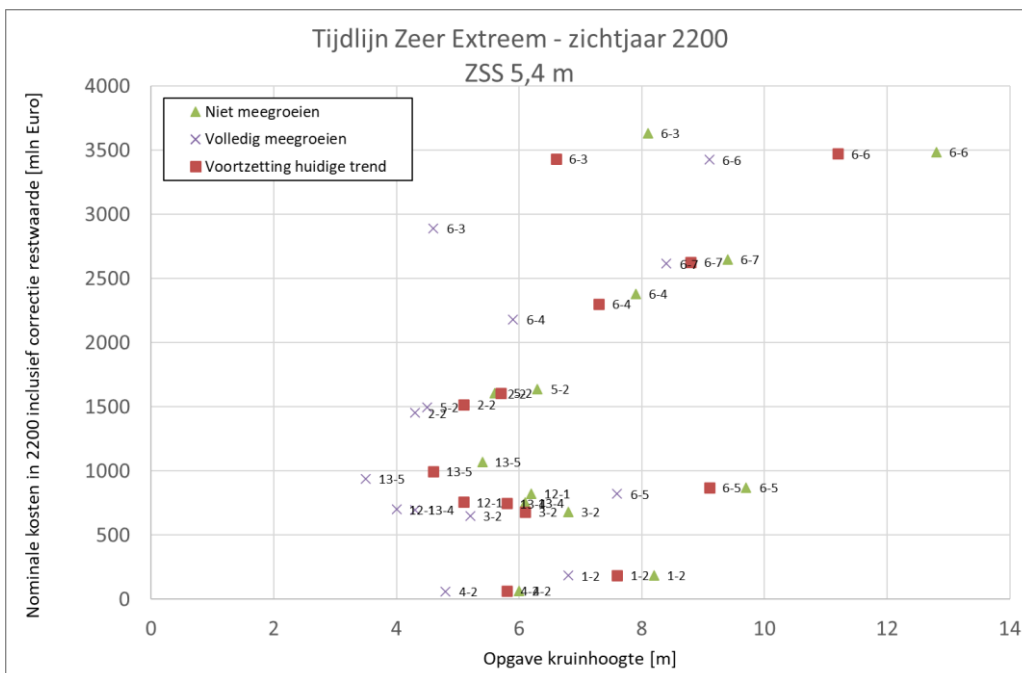
Figuur 50: (Nominale) Kosten na restwaarde correctie per normtraject als functie van de hoogteopgave voor tijdljn Laag in zichtjaar 2200 voor bodemscenario Niet Meegroeien (driehoek), Volledig Meegroeien (kruisje) en Voortzetting huidige trend (vierkant).



Figuur 51: (Nominale) Kosten na restwaarde correctie per normtraject als functie van de hoogteopgave voor tijdljn Gematigd in zichtjaar 2200 voor bodemscenario Niet Meegroeien (driehoek), Volledig Meegroeien (kruisje) en Voortzetting huidige trend (vierkant).



Figuur 52: (Nominale) Kosten na restwaarde correctie per normtraject als functie van de hoogteopgave voor tijdljn Extreem in zichtjaar 2200 voor bodemscenario Niet Meegroeien (driehoek), Volledig Meegroeien (kruisje) en Voortzetting huidige trend (vierkant).



Figuur 53: (Nominale) Kosten na restwaarde correctie per normtraject als functie van de hoogteopgave voor tijdljn Zeer Extreem in zichtjaar 2200 voor bodemscenario Niet Meegroeien (driehoek), Volledig Meegroeien (kruisje) en Voortzetting huidige trend (vierkant).

In Tabel 14 zijn de versterkingskosten van de dijken (nominale kosten zonder restwaarde correctie) van de verschillende bodemscenario's weergegeven. 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. De belangrijkste reden is dat de vaste kosten van een dijkversterking gelijk blijven voor verschillende bodemscenario's en alleen de variabele kosten nemen iets afnemen.

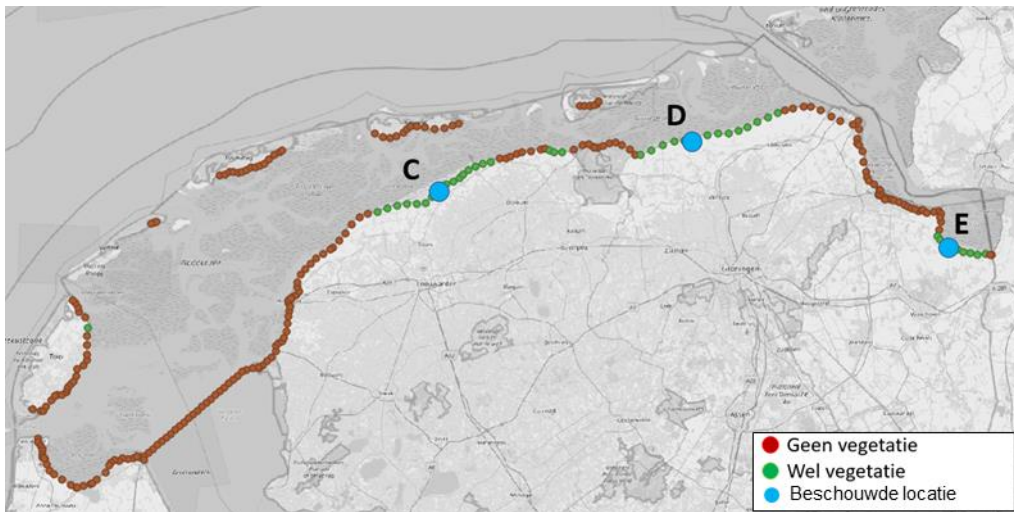
Tabel 14: Cumulatieve (Nominale) kosten zonder restwaarde correctie in mld Euro voor Wadden en Eems-Dollard per tijdlijn, per zichtjaar, per bodemscenario. NM = Niet Meegroeien, VM = Volledig Meegroeien en VT = Voortzetting huidige trend.

Zichtjaar	Nominale kosten in mld. euro											
	Laag			Gematigd			Extreem			Zeer Extreem		
	NM	VM	VT	NM	VM	VT	NM	VM	VT	NM	VM	VT
2050	2,5	2,4	2,6	2,9	2,6	2,7	3,2	2,8	2,9	4,3	3,8	4,2
2100	4,9	4,9	4,8	5,9	5,3	5,6	7,4	6,1	6,7	11,0	9,9	10,8
2150	6,9	6,2	6,5	9,7	8,2	8,8	12,3	10,3	11,4	16,7	15,6	16,6
2200	10,1	9,0	9,3	14,9	12,8	13,4	18,3	15,9	17,5	25,0	23,6	24,6

6.3 Parameter 2: Effect van vegetatie op voorland

6.3.1 Hydraulische belastingen

In paragraaf 3.3 zijn de resultaten beschreven voor de hydraulische belastingen van de Waddenzee en Eems-Dollard en het effect daarvan op de versterkingsopgave in de toekomst. Daarbij is geen rekening gehouden met de aanwezigheid van vegetatie. De aanwezigheid van vegetatie 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 54: Locaties in de Waddenzee en Eems-Dollard waar op basis van de ecotopenkaart Waddenzee 2017 wel (groen) of geen (rood) vegetatie op het voorland aanwezig is. De blauwe punten geven de locaties waar het effect van vegetatie is onderzocht.

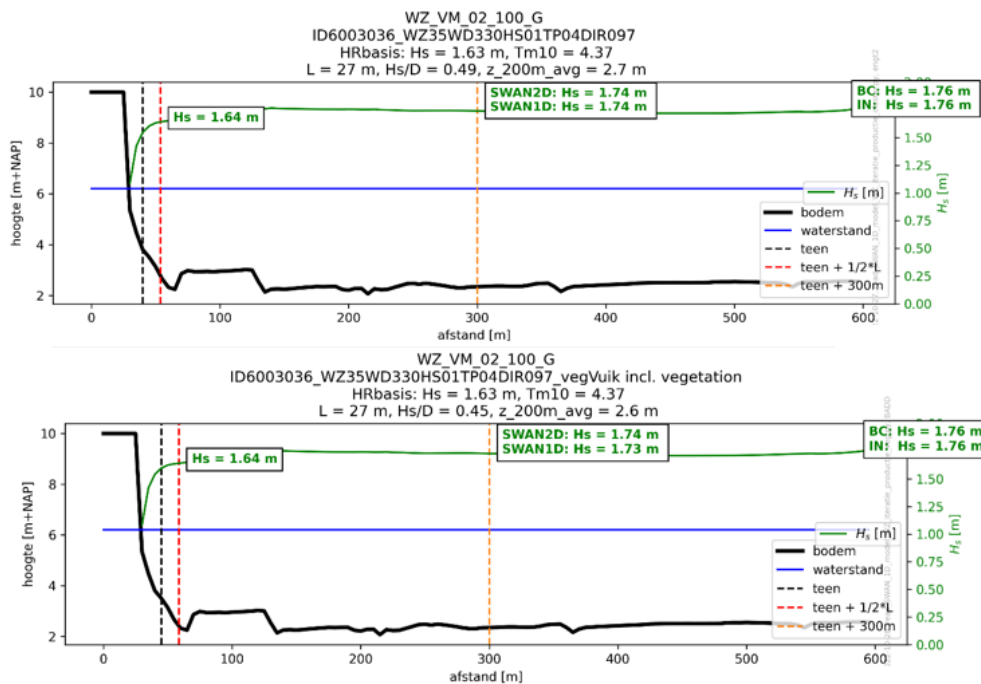
Op basis van de ecotopenkaart Waddenzee 2017 [Rijkswaterstaat, 2021c] is verkend waar in de huidige situatie vegetatie aanwezig is (Figuur 54). Voor drie representatieve profielen is vervolgens voor één bodemscenario (Volledig meegroeien), 1,0 m zeespiegelstijging) een SWAN1D berekening gemaakt mét

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: Elymus Athericus (zeekweek, een hoog, taai en flexibel kweldergras);
- Vegetatiehoogte: 0,05 m (gebroken vegetatie);
- Diameter van de stengels van de vegetatie: 0,0017 m;
- Aantal stengels per m²: 520;
- Drag-coëfficiënt: 0,22.

De impact van vegetatie op de resulterende golfhoogte bij de teen van het dijklichaam is verwaarloosbaar klein. Figuur 55 laat voor locatie C zien dat er geen verschil in uitvoer in de SWAN1D berekening zit (boven: berekening zonder vegetatie, onder: berekening mét vegetatie). Dit beeld is voor alle drie de proeflocaties identiek.



Figuur 55: Golfontwikkeling op locatie C zonder (boven) en met (onder) vegetatie.

Een gevoeligheidsanalyse op de vegetatieparameters van Vuik et al. (2018) laat zien dat ook bij het verdubbelen van de hoogte, diameter en drag coëfficiënt de resultaten hetzelfde beeld geven. De invloed van de vegetatie op de golfhoogte bij de teen van het dijklichaam (en daarmee het HBN) is verwaarloosbaar. Andere typen vegetatie die steviger zijn, kunnen wel een groot effect hebben. Het kan waardevol zijn vegetatietypes te onderzoeken, zoals *Spartina Anglica*, die wel potentieel effect kunnen hebben. Deze bevindingen zijn in lijn met de uitkomsten in Vuik et al. (2018) waar wordt gevonden dat voor hoge ontwerpcondities (strengere normen, hoge waterstanden en hoge dijken) als in Nederland de vegetatie

nauwelijks een directe invloed heeft (maar wel indirect via het vasthouden van de bodem tijdens een storm).

Binnen SWAN wordt gebruik gemaakt van een formulering van relatieve dissipatie door vegetatie per meter voorland (bron: SWAN documentatie):

$$\frac{1}{2\sqrt{\pi}} \tilde{C}_d b_v N_v \alpha \frac{H_{rms}}{h} L_{vl} [\%]$$

Het invullen van deze formulering voor bovenstaande locatie met de dragcoëfficiënt (C_d), diameter (b_v), aantal stengels per m^2 (N_v) en de relatieve hoogte van de vegetatie (α) op basis van Vuik et al. (2018) in combinatie met de root-mean-square golfhoogte (H_{rms}), de waterdiepte (h) en het lengte van het voorland (L_{vl}) leidt tot een reductie in golfenergie van ca. 24% en daarmee een 12% reductie in golfhoogte door vegetatie. Dit suggereert dat de dissipatie door vegetatie niet verwaarloosbaar klein is.

Hierbij speelt echter ook een rol dat in het Waddenzee en Eems-Dollard gebied ook windgroei is. Door de lange voorlanden zal de windgroei nagenoeg in evenwicht zijn met dissipatie door golfbreking en bodemwrijving (en vegetatie). Om deze reden is de golfhoogte vrijwel constant over de lengte van het voorland (zoals te zien is in Figuur 55).

Op basis van deze gevoeligheidsanalyse voor representatieve locaties in het gebied Waddenzee en Eems-Dollard kan gesteld worden dat het effect van vegetatie op het HBN verwaarloosbaar klein is door de hoge waterstanden en de strenge normen die we hanteren in Nederland. Een ander aspect van vegetatie is het invangen van sediment. Hierdoor stijgt het voorland en dat heeft een gunstig effect op de HBN's. Het kan zelfs voorkomen dat het voorland hierdoor harder stijgt dan de zeespiegelstijging (zie ook Vuik et al. (2018)). Laatst genoemde is niet meegenomen in deze analyse.

6.3.2 Waterveiligheidsopgave dijken

Het effect van vegetatie op het HBN voor representatieve locaties in het gebied Waddenzee en Eems-Dollard is verwaarloosbaar klein. Zonder kostenberekeningen met OKADER kan gesteld worden dat vegetatie op het voorland onder normcondities geen effect heeft op de waterveiligheidsopgave. Een ander steviger vegetatietype, zoals *Spartina Anglica*, zou wel effect kunnen hebben. Echter, het meeste effect wordt verwacht van een sterk opgehoogd voorland wat bijeen gehouden wordt door een stevig gewortelde vegetatie (bio-morfologie) alsmede het invangen van sediment door vegetatie waardoor het voorland ophooft.

6.4 Parameter 3: Effect van gebruikte SWAN-versie en instellingen

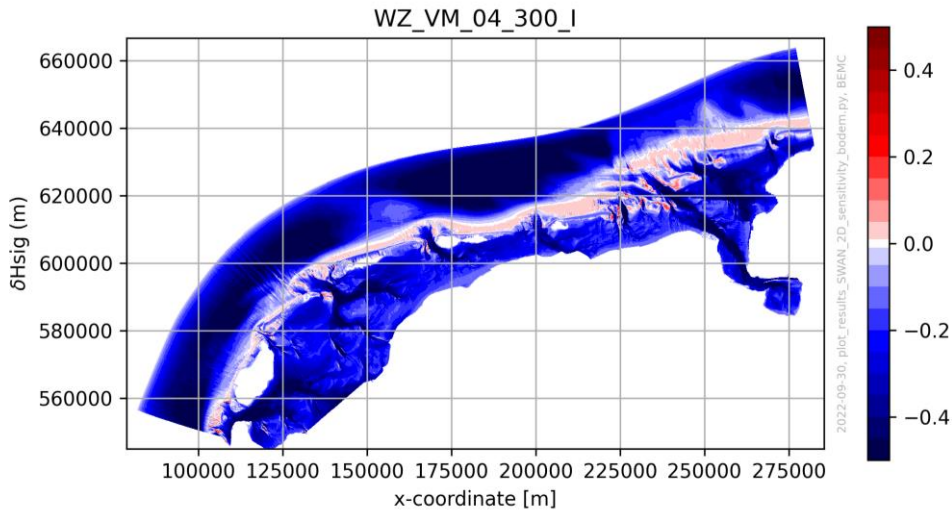
6.4.1 Hydraulische belastingen

In deze systeemanalyse is gebruik gemaakt van de recente SWAN-versie 41.31A.1 (incl. Westhuysen golfbreking en generieke BOI-instellingen, zonder refractielimiter). In het WTI2011 is gebruik gemaakt van SWAN-versie CR2011 met refractielimiter (versie 40.72ABCDE). Om de effecten van de SWAN versie op de hydraulische belastingen te onderzoeken zijn de resultaten van simulaties met beide versies zonder refractielimiter vergeleken voor het scenario Volledig Meegroeien (3 m ZSS) en één testconditie (illustratiepunt van OKADER-vak 6004026):

- Significante golfhoogte offshore: 8,7 m;
- Piek golfperiode: 15,3 s;
- Golf- en windrichting: 300 graden.

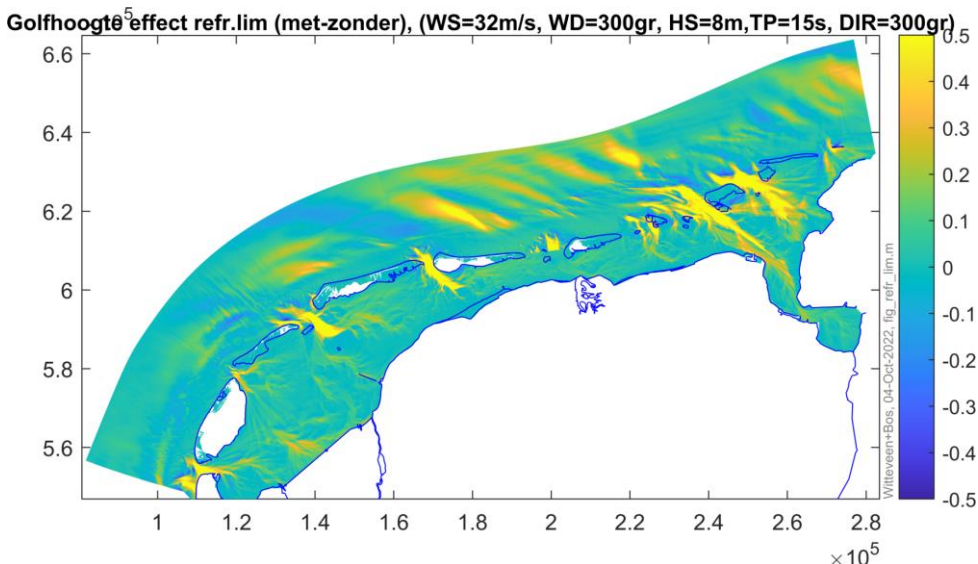
Voor beide SWAN versies zijn dezelfde generieke BOI-instellingen gebruikt (inclusief triad-instellingen en zonder de refractielimiter).

De vergelijking tussen beiden SWAN versies (Figuur 56) laat zien de nieuwe SWAN versie 41.31A.1 lagere golfhoogtes geeft dan versie 40.72ABCDE op de Hydra-NL uitvoerpunten in de Waddenzee en Eems-Dollard, met verschillen tot ca. 0,5 m voor de beschouwde testconditie.

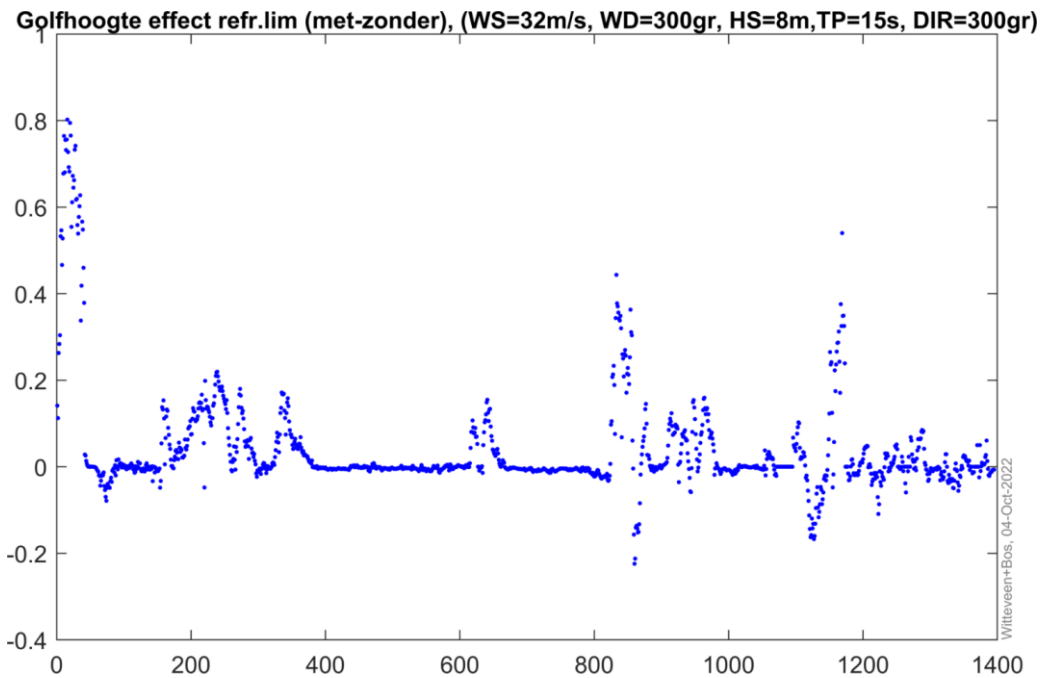


Figuur 56: Verschil in golfhoogte tussen SWAN-versie CR2011 en SWAN-versie 41.31A.1 (CR2011/SWAN40.72ABCDE geeft hogere Hs).

Vervolgens is met SWAN-versie 40.72ABCDE het effect onderzocht van het wel of niet toepassen van een refractielimiter (REFRL 0.2 2) voor het scenario Volledig Meegroeien (3 m ZSS) en de bovengenoemde testconditie. Daaruit volgt dat het toepassen van een refractielimiter leidt tot significant hogere golven in de Waddenzee en Eems-Dollard, met verschillen tot 0,8 m op de Hydra-NL uitvoerlocaties (Figuur 57 en Figuur 58). Bekend is dat SWAN de golfdoordringing vanuit de Noordzee onderschat. Mogelijk is het gebruik van een refractielimiter dus een verbetering.



Figuur 57: Verschil in golfhoogte met en zonder refractielimiter in het Waddenzeegebied



Figuur 58: Verschil in golfhoogte met en zonder refractielimiter op de Hydra-NL uitvoerlocaties in het Waddenzeegebied

6.4.2 Waterveiligheidsopgave dijken en kunstwerken

Het effect van een andere SWAN-versie en instellingen is alleen onderzocht voor de hydraulische belastingen. Dit is gedaan om de overgang van de CR2011 versie naar de voorgeschreven SWAN 41.31A.1 versie inzichtelijk te maken.

6.5 Samenvatting

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

Het effect van een al dan niet meegroeiende bodem is groot op de HBN's langs de Waddenzee kust. De grootste verschillen tussen de bodemscenario's zijn gevonden bij Den Helder (haven) en Pieterburen. Dit komt omdat op beide locaties de golfdoordringing groot is en sterk afneemt als de bodem meegroeit. Het effect van een meegroeiende bodem op de Noordzee is klein en vooral aan de Noordzeekant van de Waddeneilanden merkbaar. Dit heeft dus voor de Waddenzeedijken weinig effect, maar wel voor de Noordzeekust (duinen) van de eilanden (zie ook de deelrapportage Zandige waterkeringen kust hiervoor). Het effect van een al dan niet meegroeiende bodem op de kosten voor de veiligheidsopgave voor de dijken is beperkt, orde 10 - 15% reductie. Een nadere analyse is nodig om hiervoor een goede verklaring te geven. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de kosten voor de dijkversterking in het Waddengebied voornamelijk door de veiligheidsopgave voor piping en macrostabiliteit (constructieve maatregelen) wordt veroorzaakt en in mindere mate door hoogte. Daarnaast zullen de grote mate van vaste kosten van het totale kostenplaatje in belangrijke mate de verschillen in kosten drukken.

Het effect van vegetatie op het HBN is verwaarloosbaar klein. Wat wel een grote rol kan zijn is dat vegetatie sediment vasthoudt en dat het voorland hierdoor harder stijgt dan de zeespiegelstijging.

De gebruikte SWAN-versie geeft ook verschillende resultaten. Bij een vergelijking tussen SWAN-versie CR2011 en SWAN-versie 41.31A.1, geeft CR2011/SWAN40.72ABCDE een hogere H_{m0} . De gebruikte SWAN-versie voor deze studie is dus niet conservatief.

Het gebruik van refractielimiter heeft ook invloed op de golfhoogte: met gebruik van de refractielimiter zijn de golven meestal hoger in de Waddenzee. Omdat SWAN over het algemeen de golfdoordringing vanaf de Noordzee onderschat is het gebruik van de refractielimiter aan te bevelen. Beter is het om te wachten op de resultaten van de nieuwste SWAN-versie waar ook triads beter worden meegenomen en daarna pas een keuze te maken.

7 Regionaal beeld en conclusies

7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een regionaal beeld van de resultaten van de systeemanalyse voor de Waddenzee en Eems-Dollard, waarin is onderzocht 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, en 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.¹³

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 van de Waddenzee en de bodemdaling onder de waterkering zijn twee andere factoren die variëren in de tijd. Ook zonder zeespiegelstijging zullen deze twee factoren zorgen voor waterveiligheidsopgave. Op basis van bovenstaande constatering wordt het beeld voor de kosten besproken aan de hand van een bepaalde mate van zeespiegelstijging (morfologie van de Waddenzee 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

¹³ De recente kostenstijgingen die hoger zijn dan de gemiddelde prijspeilontwikkeling waarvan is uitgegaan, zijn hier niet in meegenomen.

de zeespiegelstijging. In werkelijkheid is de 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 van het 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.

7.2 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 Waddenzee en Eems-Dollard. Deze beschouwing is gebaseerd op de (lengte-)gemiddelde waterstand of hydraulische belastingniveau voor golfoverslag voor een dijktraject en vervolgens voor het hele Waddengebied.

De huidige beleidskeuze voor het bodemscenario betreft het voortzetten van de huidige trend. Door dit uitgangspunt kunnen de hydraulische belastingen meer of minder toenemen dan de zeespiegelstijging. In deze beleidsstudie is verondersteld dat de variatie in de bodemscenario's alleen invloed heeft op de golfhoogte en daarmee alleen op de hydraulische belastingniveaus en niet op andere processen zoals bijvoorbeeld getij. De huidige trend van de bodem is op de meeste locaties sedimentierend ten opzichte van het scenario dat de bodem van de Waddenzee niet meegroeit met de zeespiegelstijging. Dit leidt tot lagere hydraulische belastingniveaus ten opzichte van het bodemscenario Niet Meegroeien. Ten opzichte van de volledig meegroeien vallen de hydraulische belastingniveaus juist hoger uit, omdat de sedimentatie van de bodem achterblijft op de stijging van de zeespiegelstijging. Op enkele locaties in het Waddengebied resulteert het bodemscenario voortzetting van de huidige trend in erosie van de bodem ten opzichte van het bodemscenario Niet Meegroeien (Eems-Dollard), waardoor de waterstanden licht toenemen.

7.2.1 Impact op de waterstanden

Door de aanname in deze beleidsstudie dat de variatie in de bodemscenario's geen invloed heeft op de waterstanden in de Waddenzee en Eems-Dollard, nemen de waterstanden met dezelfde snelheid toe als de stijging van de zeespiegel. Dit betekent dus dat een zeespiegelstijging van 2 m leidt tot 2 m hogere waterstanden bij de teen van de dijk.

7.2.2 Impact op de hydraulische belastingniveaus voor golfoverslag

In Tabel 15 is de gemiddelde stijging van de hydraulische belastingniveaus voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging uiteengezet voor de Waddenzee en Eems-Dollard. Daarbij is de zeespiegelstijging telkens gekoppeld aan het resultaat voor een bepaalde tijdlijn en zichtjaar 2200 (zie Figuur 28). 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 15: 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 Waddenzee en Eems-Dollard en bij bodemscenario Voortzetting Trend. De morfologie en de bodemdaling in het Waddengebied passen bij zichtjaar 2200.

ZSS ten opzichte van 1995	ZSS ten opzichte van 2050	Gemiddelde stijging HBN in 2200 ten opzichte van het HBN voor tijdlijn Laag in 2050 (ZSS 0,25 m)
1,0 m	0,75 m	0,85
2,0 m	1,75 m	2,20
3,0 m	2,75 m	3,70
5,4 m	5,15 m	7,20

We zien dat de hydraulisch belastingniveaus voor de Waddenzee en Eems-Dollard in Tabel 15 hoger zijn dan de mate van zeespiegelstijging. Dat de hydraulische belastingniveaus méér toenemen dan de zeespiegelstijging is niet verwonderlijk, omdat niet alleen de waterstanden, maar ook de golfcondities toenemen als de zeespiegelstijging stijgt. 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 2,20 m bij het bodemscenario Voortzetting Trend.

De hydraulisch belastingniveaus zijn het hoogst bij Uithuizerwad/Noordkaap, Eems-Dollard en langs de Afsluitdijk. De hydraulisch belastingniveaus zijn het laagst aan de Waddenzeekant van de Waddeneilanden en in mindere mate ook langs de Friese en Groningse Kust in de luwte van de Waddeneilanden. Dit treedt op doordat daar geen rechtstreekse golfaanval vanuit de Noordzee is.

Als de bodem van de Waddenzee volledig meegroeit met de zeespiegel, dan zouden de hydraulisch belastingniveaus ongeveer even veel toenemen als de zeespiegelstijging (waterdiepten en golven veranderen niet). Als de bodem van de Waddenzee niet meegroeit met de zeespiegelstijging, leidt dit tot de hoogste hydraulisch belastingniveaus. Het absolute verschil in hydraulisch belastingniveau tussen de bodemscenario's Niet Meegroeien en Volledig Meegroeien is, afhankelijk van de mate van zeespiegelstijging, ongeveer gelijk aan 50% van de zeespiegelstijging. Dus bij een zeespiegelstijging van 1 m is het hydraulisch belastingniveau bij bodemscenario Niet Meegroeien ongeveer 0,5 m hoger ten opzichte van het bodemscenario Volledig Meegroeien. De verschillen zijn het grootste langs de Friese en Groningse kust vooral achter de zeegaten (openingen tussen de Waddeneilanden).

Het uitgangspunt voor de beleidsstudie is dat de bodem van de Noordzee niet meegroeit met de zeespiegelstijging. In een gevoeligheidsanalyse is onderzocht als de Noordzeebodem volledig meegroeit met een zeespiegelstijging van 3 m. Dit heeft een nihil effect op de golfhoogte bij de teen van de dijk en daarmee geen invloed op de hydraulisch belastingniveaus.

7.2.3 Werking van de Afsluitdijk en spuilsuizen

De Afsluitdijk als dam valt buiten de scope van deze studie. De Afsluitdijk is momenteel in versterking en zal na oplevering veiligheid bieden tot ongeveer 2 tot 3

meter zeespiegelstijging¹⁴. De Stevin- en Lorentzsluizen zijn wel onderdeel van de scope van deze studie. De spuisluisen in de Afsluitdijk zorgen ervoor dat bij een hoog peil op het IJsselmeer (door een hoge IJssel- en/of Vechtafvoer) kan worden gespuid op de Waddenzee. Voor de huidige spuicapaciteit van de spuisluisen in de Afsluitdijk is aangesloten bij de uitgangspunten uit de ISWP studie [RWS, 2019]. Door zeespiegelstijging is het minder vaak mogelijk om te spuien onder vrij verval en zal extra pompcapaciteit nodig zijn.

7.3 Versterkingsopgave per watersysteem

De impact van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave voor de dijken en kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkering langs de Waddenzee en de Eems-Dollard 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 16 is de gemiddelde hoogteopgave ten opzichte van de huidige situatie (zichtjaar 2023)¹⁵ voor het hele Waddengebied weergegeven, waarbij is gemiddeld over alleen de te versterken dijkvakken per dijktraject en vervolgens over alle dijktrajecten in het Waddengebied.

De gemiddelde hoogteopgave bij het bodemscenario Voortzetting Trend is hoger dan de mate van zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 1 m is de gemiddelde hoogteopgave 1,1 m en bij een zeespiegelstijging van 3 m is de gemiddelde hoogteopgave 3,5 m. Bij zowel een zeespiegelstijging van 1 m als 3 m is voor alle trajecten een hoogteopgave berekend, behalve voor traject 13-5 waarvoor bij een zeespiegelstijging van 1 m nog een zekere resthoogte aanwezig is.

Tabel 16: Gemiddelde hoogteopgave ten opzichte van 2023 op basis van alleen de te versterken trajecten per watersysteem voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 voor bodemscenario Voortzetting Trend.

Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 [m]	hoogteopgave [m] ten opzichte van 2023 over alleen te versterken trajecten voor hele Waddengebied		
	minimum	gemiddeld	maximum
1,0 m	0,3	1,1	2,8
2,0 m	0,4	2,1	4,6
3,0 m	1,6	3,5	6,5
5,4 m	4,6	6,8	11,2

De versterkingsopgave voor piping en macrostabiliteit is vergeleken met bijvoorbeeld het rivierengebied beperkt¹⁶. De benodigde taludverflauwing voor het

¹⁴ Het ontwerp van de Afsluitdijk is gebaseerd op een relatief laag kritisch overslagdebiet van 10 l/s/m. Nieuwe dijken kunnen over het algemeen weerstand bieden tegen 100 l/s/m. De onderbouwing hiervan wordt gegeven in een onderzoeksrapport van Daneshi (2023) dat is begeleid door RWS.

¹⁵ 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.

¹⁶ De beperkte opgave volgt onder andere uit het uitgangspunt voor de sterkte van de keringen (fragility curves). Voor meer informatie wordt verwezen naar paragraaf 5.3.2.2.

faalmechanisme macrostabiliteit leidt gemiddeld over alleen de te versterken trajecten tot een verbreding van de dijkbasis van minder dan 10 m bij een zeespiegelstijging van 1 en 3 m ten opzichte van 1995. De maximale opgave is circa 20 m voor een aantal trajecten bij een zeespiegelstijging van 5,4 m ten opzichte van 1995. Macrostabiliteit speelt met name bij trajecten 13-4, 5-2, 6-6 en 6-7. De benodigde verbreding van de dijkbasis (extra kwelweglengte) voor het faalmechanisme piping leidt tot grotere opgaven, met name voor trajecten 1-2, 3-2, 12-1, 6-5 en 6-7. Bij een zeespiegelstijging van 1 m en 3 m is de gemiddelde opgave over alle te versterken trajecten voor de verbreding van de dijkbasis respectievelijk 20 m en 60 m, met een maximum van meer dan 100 m. Het ruimtebeslag dat bij de versterkingsopgave hoort is afhankelijk van de gekozen versterkingsstrategie (volledige grondoplossing of een combinatie met constructieve of innovatieve maatregelen).

7.4 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 tijdlijn Laag waarbij alle dijken en kunstwerken tenminste voldoen aan de norm ("systeem op orde"); zie Tabel 17 in paragraaf 7.4.1.
2. Kosten ten opzichte van 2023 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging; zie Tabel 18 in paragraaf 7.4.2. Dit zijn de kosten die horen bij de opgave in Tabel 16.
3. Kosten ten opzichte van de situatie met het "systeem op orde" tot en met zichtjaar 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging; zie Tabel 19 in paragraaf 7.4.3.

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 het object bij een hoogtetekort zodat deze voldoet tot einde levensduur of volledige vervanging bij een hoogtetekort.

7.4.1 Kosten tot en met 2050 voor Systeem op orde

De kosten voor Systeem op orde zijn opgenomen in Tabel 17. Deze zijn ongeveer 2,7 miljard euro voor alle primaire waterkeringen aan dijken en de beschouwde kunstwerken in het Waddengebied. Deze kosten worden voor circa 95% bepaald door de dijken. De kosten voor de versterking van de Afsluitdijk zijn daarbij niet meegenomen. De kosten voor de renovatie van de Stevin sluizen en Lorentzsluizen zijn wel bepaald in deze beleidsstudie, waarbij uitgegaan is van de kerende hoogte van deze objecten vóór renovatie. In de huidige versterking worden naast de renovatie van de spuisluizen, ook nieuwe keerdeuren aan de Waddenzeezijde van de keersluizen geplaatst. 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 7.4.3).

Een duidelijke kanttekening is dat de kosten voor 'Systeem op orde' per definitie afwijken van de werkelijke kosten van het Hoogwaterbeschermings-programma (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 17: Nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor de Waddenzee en Eems-Dollard voor systeem op orde tot en met 2050 voor bodemscenario Voortzetting Trend. Voor Systeem op orde zijn dit de kosten tot en met 2050, waarbij gecorrigeerd is voor reststerkte na 2050. De kosten voor de Afsluitdijk zijn niet meegenomen. De kosten voor de Stevinsluizen en Lorentzsluizen zijn wel meegenomen.

ZSS ten opzichte van 1995 (0,25 – 0,5 m)	Nominale kosten in miljard euro		
	Totaal dijken en kunstwerken	Dijken	Kunstwerken
Systeem op orde	2,7	2,5	0,15

7.4.2 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 Waddenzee en Eems-Dollard zijn bepaald voor een zeespiegelstijging van 1 m, 2 m, 3 m en 5,4 m. In Tabel 18 zijn de kosten passend bij zichtjaar 2200 opgenomen ten opzichte van 2023, waarbij de dijken en kunstwerken uiteindelijk precies voldoen aan de norm 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 8,8 miljard euro voor 1 m zeespiegelstijging tot bijna 14,9 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 18: Nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor de Waddenzee en Eems-Dollard 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 bodemscenario Voortzetting Trend. 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 dijken en kunstwerken	Dijken	Kunstwerken
1,0 m	8,8	7,9	0,9
2,0 m	11,7	10,8	0,9
3,0 m	14,9	13,9	0,9
5,4 m	20,2	19,3	0,9

De kosten worden voornamelijk bepaald door versterking van de dijken (90 - 95%) en in mindere mate door de kunstwerken (5 - 10%). De Stevinsluizen en Lorentzsluizen bepalen voor het grootste deel van de totale kosten voor kunstwerken. De kosten voor kunstwerken nemen niet toe bij toenemende mate van

zeespiegelstijging, dit heeft als oorzaak dat deze in 2200 over hun levensduur zijn en vervangen moeten worden. De vervangingskosten van de kunstwerken nemen we onafhankelijk van de aan te leggen hoogte aan, daarom nemen deze kosten niet toe bij toenemende zeespiegelstijgingen.

7.4.3 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 19 staan de nominale kosten passend bij 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 (tijdelijk 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 19: Toename van de nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor Waddenzee en Eems-Dollard voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200 ten opzichte van de nominale kosten voor Systeem op orde met zichtjaar 2050 voor bodemscenario Voortzetting Trend.

ZSS t.o.v. 1995	ZSS t.o.v. 2050	Nominale kosten in miljard euro		
		Totaal dijken en kunstwerken	Dijken	Kunstwerken
1,0 m	0,75 m	6,1	5,3	0,75
2,0 m	1,75 m	9,0	8,3	0,75
3,0 m	2,75 m	12,2	11,4	0,75
5,4 m	5,15 m	17,5	16,7	0,75

7.4.4 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 huidige dijkversterkingskosten binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (anno 2022), gegeven het huidige prijspeil. In Tabel 20 staat bepaald niveau van zeespiegelstijging het aantal te versterken kilometers¹⁷ en de nominale kosten per km op basis van het totaal aantal te versterken km gesommeerd over meerdere versterkingsrondes.

¹⁷ Hierbij is gesommeerd over de vaklengte voor alle te versterken dijkvakken.

Tabel 20: 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 Waddenzee en Eems-Dollard voor systeem op orde tot en met 2050 en voor een bepaald niveau van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200 ten opzichte van de huidige situatie 2023 voor bodemscenario Voortzetting Trend.

ZSS t.o.v. 1995	Aantal km te versterken (totaal areaal 263 km)	Nominale kosten in mln. euro per km te versterken dijk
T/m 2050 Systeem op orde	178	14
1,0 m	210	37
2,0 m	259	42
3,0 m	262	53
5,4 m	263	73

De gemiddelde kosten per te versterken km dijk zijn 37 miljoen euro voor 1,0 m zeespiegelstijging (meerdere versterkingsrondes) tot ongeveer 53 miljoen euro voor 3,0 m zeespiegelstijging. 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 vaste kosten blijven min of meer gelijk bij verschillende mate van zeespiegelstijging en deze geven verreweg de grootste bijdrage aan de totale kosten. De variabele kosten zijn bij een zeespiegelstijging van 1 meter lager dan 3 meter, 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 artefact van de gebruikte databases en het instrument.

7.4.5 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 het Waddengebied bedragen ongeveer 2,7 miljard euro. Dat is omgerekend vanaf 2023 gemiddeld 100 miljoen euro per jaar, zie Tabel 21. De jaarlijkse kosten na 2050 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 vanaf 2050 zijn gemiddeld 41 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, 3,0 en 5,4 m vanaf 2050 zijn respectievelijk 60%, 80% en 120% 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 in eenzelfde orde grootte liggen als in de periode 2023 – 2050.

Tabel 21: Totale nominale kosten in miljard euro en jaarlijkse nominale kosten in miljoen euro per jaar voor alle dijken en kunstwerken langs de Waddenzee en Eems-Dollard voor systeem op orde tot en met 2050 en bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200, voor bodemscenario Voortzetting Trend.

ZSS ten opzichte van 1995	Totale nominale kosten en jaarlijkse kosten voor het Waddengebied voor alle 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	2,7	100		
1,0 m			6,1	41
2,0 m			9,0	60
3,0 m			12,2	81
5,4 m			17,5	117

7.5 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 bij strategieën 'volledige grondoplossing' en 'volledige grondoplossing met innovatieve pipingmaatregel' is een indicator voor de mate van ruimtelijke knelpunten, zie Tabel 22. Buitendijkse versterkingen zijn nu niet meegenomen in deze beleidsstudie, maar bij meerdere meters zeespiegelstijging kunnen die ook overwogen worden. Ze zijn vaak ook goedkoper dan technische oplossingen als damwanden of innovatieve 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 22 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 oktober 2021¹⁸. Bij de strategie "business as usual" zijn dit ordegröte¹⁹ 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.

Tabel 22: Gemiddelde ruimtelijke opgave en totaal aantal te amoveren gebouwen 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 te amoveren gebouwen bij een volledige grondoplossing	
	Bandbreedte voor de strategieën volledige grondoplossing incl. innovatieve pipingmaatregelen volledige grondoplossing excl. innovatieve pipingmaatregelen.	
	Toename opgave dijkbreedte [m]	Totaal aantal gebouwen
1,0 m	20	500 - 1.000
2,0 m	30 - 40	1.000 - 1.500
3,0 m	50 - 60	1.500 - 2.000
5,4 m	> 100	2.000 - 2.500

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 ontwerp praktijk 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.

¹⁸ 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.

¹⁹ Officieel maakt KOSWAT gebruik van een verouderde bebouwingsdatabases o.b.v. de TOP10NL 2013/2014.

7.6 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 onzekerheid van de zeespiegelstijging 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 23).

Tabel 23: 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.

7.6.1 Hydraulische belastingen

- 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 afnemen. *Effect: klein – groot, afhankelijk van de golfhoogte en dus van een tijdlijn.*
- Het bodemscenario heeft een grote invloed op de hydraulische belastingen. De invloed op vegetatie heeft een kleine invloed op de hydraulische belastingen door de grote waterdieptes bij hoge mate zeespiegelstijging. *Effect: klein (vegetatie) – groot (bodemscenario).*
- 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. 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: klein*

7.6.2 Waterveiligheidsopgave dijken en kunstwerken

- Voor de dijken is binnen OKADER gebruik gemaakt van 2 soorten fragility curves: macrostabiliteit en piping. De resultaten voor de hoogteopgave door golfoverslag (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 het Waddengebied beperkt zijn, doordat enerzijds de opgaves gemiddeld worden over alle dijkvakken langs een dijktraject en anderzijds niet alle dijkvakken gevoelig zijn piping of macrostabiliteit. Tot een zeespiegelstijging van circa 3 m zijn de gemiddelde opgaves voor de verbreding van de dijkbasis per dijktraject ten gevolge van piping in het Waddengebied een factor 2-4 kleiner dan in het rivierengebied. Bij hogere niveaus van zeespiegelstijging is de gemiddeld benodigde verbreding van de dijkbasis voor de pipingopgave ordegrrootte vergelijkbaar. *Effect: klein.*
- De versterkingsopgave voor kunstwerken is voor de meeste kunstwerken alleen bepaald voor het faalmechanismen hoogte (zie volgende bullet), 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.*
- Voor kunstwerkwerken is de huidige kerende hoogte van het object overgenomen 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. *Effect: klein.*

7.6.3 Kosten

- KOSWAT hanteert een maximale verhogingsstap van 2 m per versterkingsmoment. Dit heeft als gevolg dat verhogingen van meer dan 2 m niet resulteren in hogere kosten dan een verhoging van 2 m per versterkingsmoment. Indien een verhoging van meer dan 2 m benodigd is, resulteert dit in een onderschatting van de dijkversterkingskosten. Dit is voor het Waddengebied het geval voor 75% van de versterkingsmomenten voor tijdlijn Zeer Extreem. *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 15 – 20%. *Effect: middel.*
- Het versterken of vervangen van een kunstwerk is maatwerk en dat betekent ook dat de bijbehorende kosten voor de versterkings- en vervangingsopgave heel erg objectspecifiek zijn. De verwachting is dat de kosten voor de kunstwerken nu worden onderschat. De gehanteerde kostenkennallen zijn onafhankelijk verondersteld van de omvang van de versterking (bv. 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 5-10% is van de totale kosten. Stel dat de kosten een factor 2x zo hoog zijn, dan leidt dit niet tot een andere conclusie. *Effect: klein.*
- 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.

7.7 Effectiviteit van een aantal mogelijke oprekmogelijkheden

In de Waddenzee is gekeken naar de invloed van de bodemligging en een ander type vegetatie op het voorland. Voor de verandering van de bodemligging is het effect op versterkingsopgave en kosten berekend. De invloed van vegetatie is enkel op de hydraulische belastingen onderzocht. Vegetatie heeft geen significant effect op de versterkingsopgave en kosten bij 1 m zeespiegelstijging bij het bodemscenario Volledig Meegroeien.

- Voor de Waddenzee en Eems-Dollard is als basisscenario voor de bodem uitgegaan van het voortzetten van de huidige (niet actief gestuurde) trend – in lijn met het huidige beleid. Om het effect van de andere bodemscenario's (niet meegroeien en volledig meegroeien van de bodem) inzichtelijk te krijgen, zijn de kosten voor de waterveiligheidsopgave per tijdlijn bepaald voor de overige bodemscenario's. Het effect van een ander bodemscenario op de kosten is beschouwd, waarbij opgemerkt wordt dat de hoogteopgave en daarmee de kosten voor het bodemscenario Volledig Meegroeien overschat worden ten opzichte van Niet Meegroeien. Het bodemscenario Niet Meegroeien levert in alle gevallen een toename in de orde van 7 – 12 % van de kosten ten opzichte van het bodemscenario Voortzetting trend. Het bodemscenario Volledig Meegroeien

levert een verlaging op in de kosten voor alle tijdlijnen van orde 5% ten opzichte van het bodemscenario Voortzetting trend.²⁰

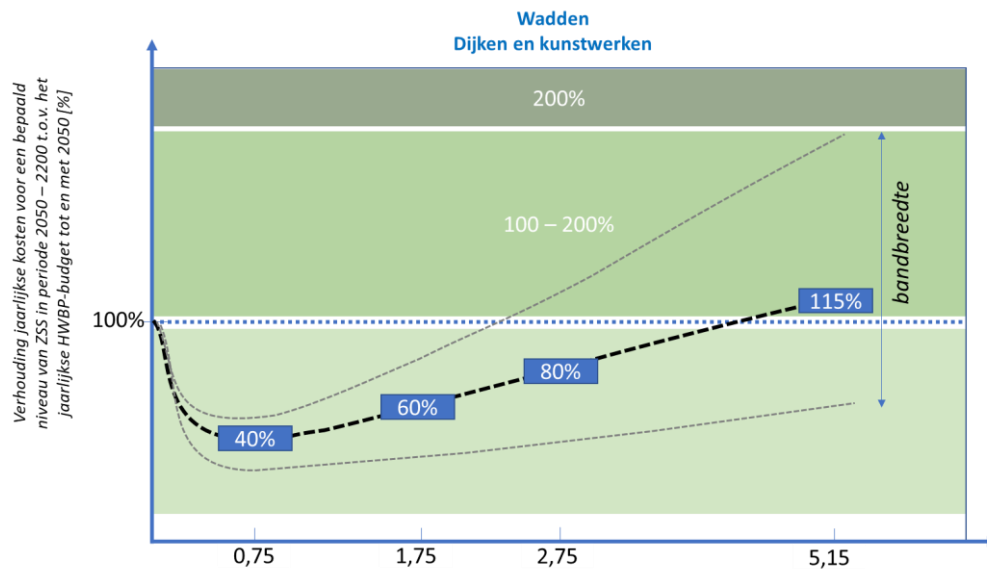
- Het meenemen van vegetatie heeft een verwaarloosbaar klein effect op de resulterende golfhoogte aan de teen van de waterkering en de berekende hydraulische belastingniveaus. Zonder kostenberekeningen kan gesteld worden dat vegetatie op het voorland onder normcondities geen effect heeft. Een ander steviger vegetatietype, zoals *Spartina Anglica* (Engels slijkgras), zou wel effect kunnen hebben. Echter, het meeste effect wordt verwacht van een sterk opgehoogd voorland wat bijeen gehouden wordt door een stevig gewortelde vegetatie (bio-morfologie). Daarnaast is er een 2^e orde effect, namelijk dat vegetatie zorgt voor ophoging van de voorlanden voor de dijk door het vasthouden van slib. Het beleid is nu niet gericht op het invangen van sediment, waardoor het geen 1^e orde effect betreft. Laatst genoemde is niet meegenomen in deze gevoeligheidsberekening.

7.8 Conclusies

Op basis van deze Systeemanalyse Waterveiligheid voor de Waddenzee en Eems-Dollard kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De jaarlijkse kosten tussen 2050 en 2200 om de dijken en kunstwerken langs de Waddenzee en Eems-Dollard te laten voldoen aan de eisen 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 alle dijken en kunstwerken te laten voldoen aan de norm in 2050 (zie Figuur 58). Hierbij geldt de veronderstelling dat de zeespiegelstijging van 3 m pas in 2200 zal optreden. De kosten zijn exclusief de kosten voor versterken van de Afsluitdijk als dam, inclusief de Stevin sluizen en Lorentzsluizen.
- 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 eenzelfde ordegrootte heeft als het huidige budget van het Hoogwaterbeschermingsprogramma.

²⁰ Hier geldt wel dat de fout in de berekende hoogteopgave bij het bodemscenario Volledig meegroeien ten gevolge van de toepasbaarheid van de illustratiepuntenmethode leidt tot te hoge kosten bij het bodemscenario Volledig Meegroeien



Figuur 59: 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.

- De versterkingsopgave als functie van de zeespiegelstijging is het grootst in het oostelijk deel van de dijken langs de Waddenzee, doordat de lange strijklengte hier zorgt voor de sterkste toename van de hydraulische belastingen bij zeespiegelstijging. Daarnaast is ook de autonome bodemdaling in het oostelijk deel van het gebied het grootst.
- Zeespiegelstijging levert op relatief weinig locaties grote ruimtelijke knelpunten. Dit komt omdat de er relatief weinig bebouwing in de versterkingszone aanwezig is.
- De toename van de gemiddelde hoogteopgave als functie van de zeespiegelstijging is groter dan de toename van de zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 5,4 m is de gemiddelde hoogteopgave 6,8 m, met een maximum van meer dan 11 m voor traject 6-6. Ook trajecten 6-5 en 6-7 hebben een hoogteopgave van rond de 9 m bij een zeespiegelstijging van 5,4 m. Al deze trajecten zijn meest oostelijk gelegen langs de Waddenzee. Hier is een grote strijklengte voor de wind aanwezig.
- De meest kansrijke maatregelen voor het verlengen van de houdbaarheid van het huidige systeem is een actief (meegroeiend) bodembeheer van de Waddenzee en Eems-Dollard. Het voortzetten van de huidige trend is een natuurlijk proces, bij hogere mate van zeespiegelstijging verandert het natuurlijke proces van het huidige systeem. Opgemerkt wordt daarom dat bij hogere mate van zeespiegelstijging de bodem van de Waddenzee niet op een natuurlijke wijze de huidige trend voort kan zetten. De reductie van de kosten bij het voortzetten van de huidige trend of volledig meegroeien van de bodem ten opzichte van het bodemscenario Niet Meegroeien is mogelijk hoger dan de berekende 10 – 15 %, vanwege de gemaximaliseerde verhoging in de kostendatabase. Gegeven de overschatting van de hydraulische belastingen door een geaccepteerde onnauwkeurigheid in de methode voor de bepaling van de hydraulische belastingen, wordt de genoemde reductie van 10 – 15% mogelijk lager. Dit is niet exact onderzocht.

Geconcludeerd mag worden dat de waterveiligheidskosten ten gevolge van zeespiegelstijging voor de dijken en kunstwerken, zelfs tot zeespiegelstijgingen van

5 m in dezelfde bandbreedte vallen als die van de huidige benodigde investeringen om aan de nieuwe normen te voldoen. De totale kosten om alle dijken en kunstwerken langs de Waddenzee en Eems-Dollard te laten voldoen aan de eisen bij een zeespiegelstijging van 5 meter bedragen circa 17,5 miljard Euro vanaf 2050 ("systeem op orde").

8 Referenties

- | Auteur | titel |
|---|--|
| 1. CBS (2022). | Grond-, weg- en waterbouw (GWW) inputprijsindex 2015=100
https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/84538NED/table . |
| 2. Daneshi (2023). | Hoelang kan de Afsluitdijk mee met de huidige kenmerken en hoe robuust is die aangelegd aan de waddenzeezijde! M. Daneshi. Afstudeeronderzoek. Begeleid door Rijkswaterstaat, WVl. Van Hall Larenstein. Februari 2023. |
| 3. Deltares (2011). | Kosten van maatregelen. Informatie ten behoeve van het project Waterveiligheid 21e eeuw. P. de Grave en G. Baarse (BB&C). maart 2011. |
| 4. Deltares (2014). | KOSTen voor versterken WATERkeringen KOSWAT systeemdocumentatie versie 2.3.2. revisie 47275. Augustus 2015. |
| 5. Deltares (2022 a). | Verificatiemethode effectbepaling zeespiegelstijging. 2022. |
| 6. Deltares (2022 b). | Bodemsценario's Waddenzee en Eems-Dollard en Westerschelde t.b.v. SWAN sommen KP-ZSS spoor 2. 2022. |
| 7. 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 |
| 8. HKV (2010). | Diepwaterrandvoorwaarden WTI-2011 (ELD, EUR, YM6, SCW, SON). Stijnen, J.W. en M.J. Kallen. HKV rapport, PR1759.10. februari 2010. |
| 9. IPCC (2023). | Synthesis report of the IPCC Sixth assessment report (AR6). 20 maart 2023. |
| 10. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). | Regeling Veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid primaire waterkeringen. (2016) |
| 11. RHDHV (2021). | Duidingskader strategieën zeespiegelstijging. In opdracht van Rijkswaterstaat, WVl. Referentie: BI1832-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001. Status: S0/P01.01. Datum: 8 december 2021. |
| 12. Rijkswaterstaat (2015). | Handreiking Ontwerpen met overstromingskansen. Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansenormen. Versie 2.5 juli 2015. |
| 13. Rijkswaterstaat GPO (2019). | Excelfile behorende bij het rapport GPO RWS, 2019. Bijlage I - Onderbouwing raming vervangingswaarde kunstwerken. 2019. |
| 14. 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. |
| 15. Rijkswaterstaat (2021b). | Tijdlijnen voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging. RWS memo. 24 maart 2021. |
| 16. Rijkswaterstaat (2021c) | . Toelichting op de zoute ecotopenkaart Waddenzee 2017, Biologische monitoring zoute rijkswateren, versie 1.1, 30 september 2021. |
| 17. Rijkswaterstaat (2022a). | Referentie - Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022. |
| 18. Rijkswaterstaat (2022b). | Aanpak Kunstwerken Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022. |
| 19. Rijkswaterstaat (2022c). | Generieke werkwijze, Systeemanalyse waterveiligheid Kennisprogramma Zeespiegelstijging, versie 1.0, 28 juli 2022. |
| 20. Rijkswaterstaat (2023a). | Illustratiepunten methode in de praktijk (analyse diverse varianten). RWS-WVl, versie 1.0, 02-02-2023. |

21. Rijkswaterstaat (2023b). Deelrapportage Waddenzee en Eems-Dollard, Het gebruik van het G4 rooster ten behoeve van HBN resultaten in het Friesche Zeegat, status Definitief, 27 februari 2023.
22. Rijkswaterstaat (2023c). Systeemanalyse Waterveiligheid. Systeemanalyse Waterveiligheid. Deelrapportage Zandige waterkeringen kust, status Definitief, april 2023.
23. Rossington, S.K., et al., R.J. Nicholls, M.J. F. Stive, Z.B. Wang, Estuary schematization in behaviour-oriented modelling, in: Marine Geology. - Vol. 281 (2011), no. 1-4 ; p. 27-34.
24. TAW (2002). Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken.
25. 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.
26. Witteveen+Bos & HKV (2022). Landelijke set fragility curven t.b.v. KP-ZSS. In opdracht van Rijkswaterstaat, Referentie: 129320/22-011.011. WV. 22 juli 2022.

Bijlage A Kruinhoogtetekort en nominale kosten per kunstwerk

In deze bijlage wordt per kunstwerk een toelichting gegeven op de waterveiligheidsopgave o.b.v. het hoogtetekort en de versterkings- en vervangingsopgave. Een kunstwerk kan uit meerdere objecten bestaan.

De kosten voor de versterkings- en vervangingsopgave zijn beschouwd wanneer objecten aangepast of vervangen dienen te worden. Als basis voor de kostenschatting hanteren we het minimum van twee strategieën:

- Strategie 1: bij een hoogtetekort wordt het object aangepast, zodat deze voldoet tot einde levensduur. Bij einde levensduur wordt deze vervangen.
- 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.

A.1 Lorentzsluizen

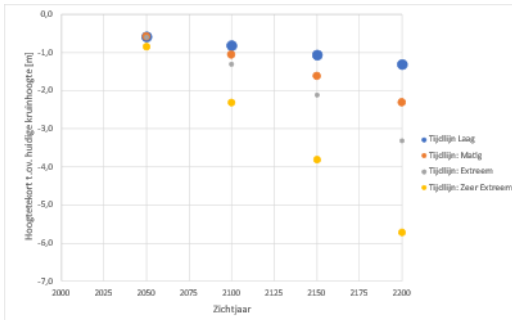
De Lorentzsluizen bestaan uit 12 objecten. Binnen deze objecten is onderscheid gemaakt in twee typen schutsluizen en een type spuisluis. Van beide type schutsluis is er één aanwezig (Lorentzsluis Groot en Lorentzsluis Klein). Er zijn tien spuisluizen aanwezig, vijf aan de oostzijde en vijf aan de westzijde.

Het kruinhoogtetekort voor de verschillende objecten is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor alle drie de type objecten is de strategie 1 het goedkoopst. Voor het einde van de levensduur ontstaat al een kruinhoogtetekort bij alle objecten die dan worden verhoogd, maar niet worden vervangen. De objecten worden eerst versterkt tot einde levensduur en vervolgens pas vervangen. Opgemerkt dient te worden dat in onderstaande tabel slechts de kosten voor één spuisluis zijn gepresenteerd. Binnen het kunstwerk zijn er tien identieke spuisluizen aanwezig.

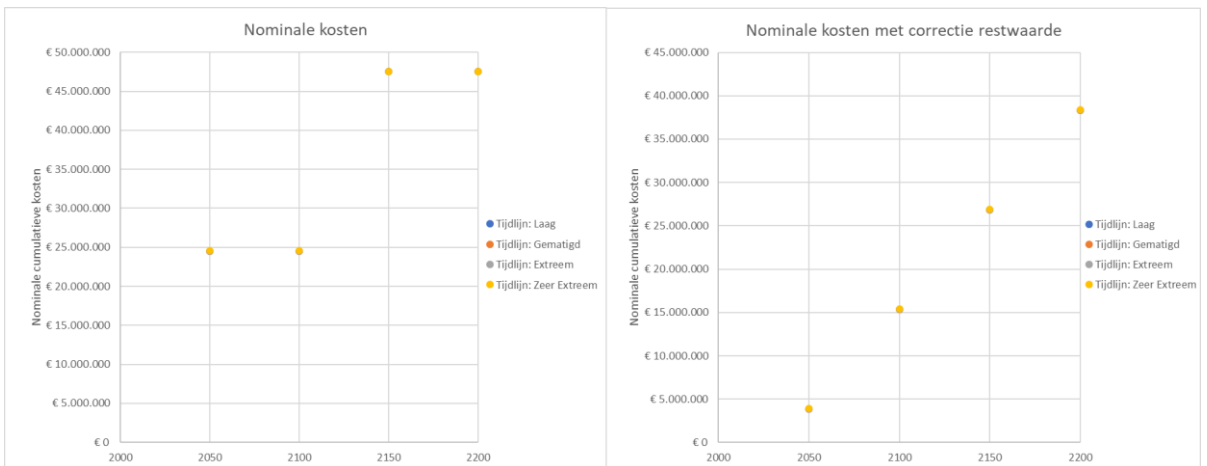
Tabel 24: Kenmerken Lorentzsluizen.

		Lorentzsluis Groot	Lorentzsluis Klein	Spuisluis ¹
Kosten vervanging 2022	[€]	22.979.478	34.718.725	15.738.530
KostenType	[-]	Schutsluis - Special	Schutsluis - Special	Uitwateringssluis - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,1	5,0	4,2
Einde levensduur	[-]	2040	2040	2051
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00004	0,00004	0,00004

¹ Slechts de kosten kenmerken van één spuisluis gepresenteerd.



Figuur 60: Hoogtetekort Lorentzsluis Groot.

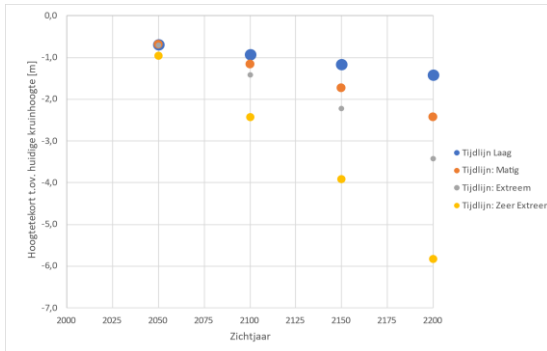


Figuur 61: Nominale cumulatieve kosten Lorentzsluis Groot: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

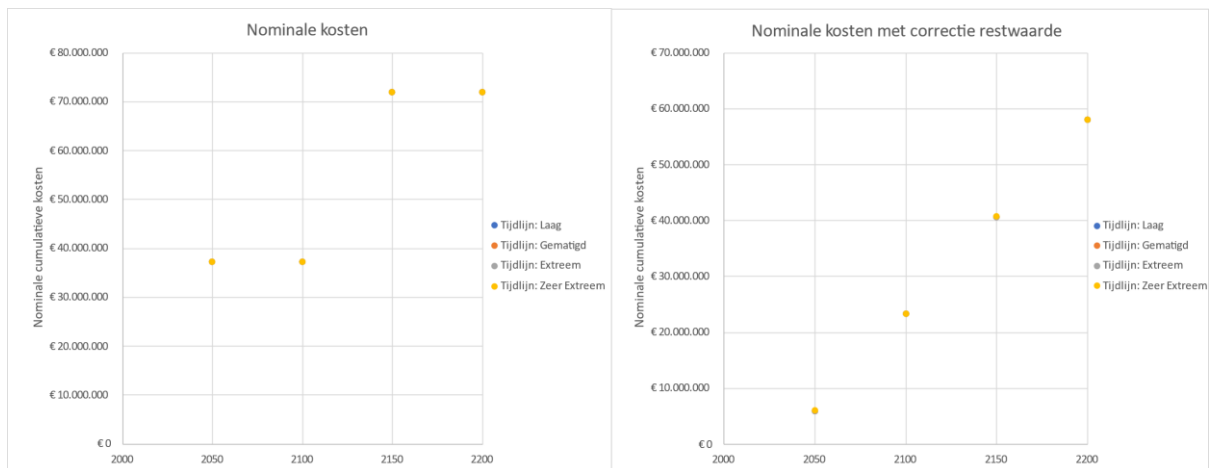
Tabel 25: Nominale kosten Lorentzsluis Groot per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Strategie 1	
2050	€ 24.524.932	€ 3.843.402
2100	€ 24.524.932	€ 15.333.141
2150	€ 47.504.410	€ 26.822.880
2200	€ 47.504.410	€ 38.312.619
Tijdlijn: Gematigd	Strategie 1	
2050	€ 24.524.932	€ 3.843.402
2100	€ 24.524.932	€ 15.333.141
2150	€ 47.504.410	€ 26.822.880
2200	€ 47.504.410	€ 38.312.619
Tijdlijn: Extreem	Strategie 1	
2050	€ 24.524.932	€ 3.843.402
2100	€ 24.524.932	€ 15.333.141
2150	€ 47.504.410	€ 26.822.880
2200	€ 47.504.410	€ 38.312.619
Tijdlijn: Zeer Extreem	Strategie 1	
2050	€ 24.584.639	€ 3.903.109
2100	€ 24.584.639	€ 15.392.848
2150	€ 47.564.118	€ 26.882.587

2200	€ 47.564.118	€ 38.372.326
------	--------------	--------------



Figuur 62: Hoogtetekort Lorentzsluis Klein.

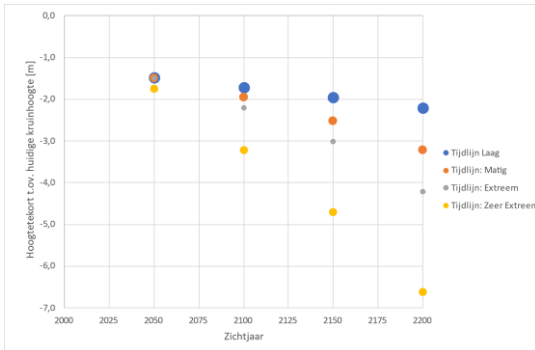


Figuur 63: Nominale cumulatieve kosten Lorentzsluis Klein: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

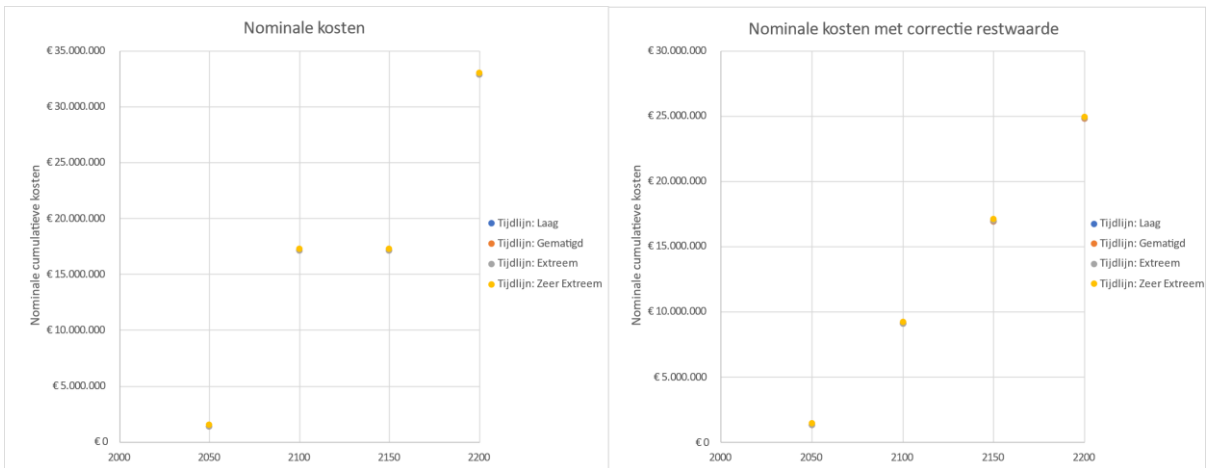
Tabel 26: Nominale kosten Lorentzsluis Klein per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Strategie 1	
2050	€ 37.143.895	€ 5.897.043
2100	€ 37.143.895	€ 23.256.406
2150	€ 71.862.620	€ 40.615.768
2200	€ 71.862.620	€ 57.975.130
Tijdlijn: Gematigd	Strategie 1	
2050	€ 37.143.895	€ 5.897.043
2100	€ 37.143.895	€ 23.256.406
2150	€ 71.862.620	€ 40.615.768
2200	€ 71.862.620	€ 57.975.130
Tijdlijn: Extreem	Strategie 1	
2050	€ 37.143.895	€ 5.897.043
2100	€ 37.143.895	€ 23.256.406
2150	€ 71.862.620	€ 40.615.768
2200	€ 71.862.620	€ 57.975.130
Tijdlijn: Zeer Extreem	Strategie 1	

2050	€ 37.234.105	€ 5.987.253
2100	€ 37.234.105	€ 23.346.615
2150	€ 71.952.830	€ 40.705.977
2200	€ 71.952.830	€ 58.065.340



Figuur 64: Hoogtetekort Lorentzspuisluis.



Figuur 65: Nominale cumulatieve kosten Lorentz spuisluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 27: Nominale kosten Lorentz spuisluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijddlijn: Laag		
Strategie 1		
2050	€ 1.358.249	€ 1.309.740
2100	€ 17.096.779	€ 9.070.128
2150	€ 17.096.779	€ 16.939.393
2200	€ 32.835.309	€ 24.808.658
Tijddlijn: Gematigd		
Strategie 1		
2050	€ 1.358.249	€ 1.309.740
2100	€ 17.096.779	€ 9.070.128
2150	€ 17.096.779	€ 16.939.393
2200	€ 32.835.309	€ 24.808.658
Tijddlijn: Extreem		
Strategie 1		
2050	€ 1.406.611	€ 1.356.375
2100	€ 17.145.141	€ 9.118.491

2150	€ 17.145.141	€ 16.987.756
2200	€ 32.883.671	€ 24.857.021
Tijdlijn: Zeer Extreem	Strategie 1	
2050	€ 1.503.337	€ 1.449.646
2100	€ 17.241.867	€ 9.215.216
2150	€ 17.241.867	€ 17.084.481
2200	€ 32.980.397	€ 24.953.746

A.2 Stevinsluizen

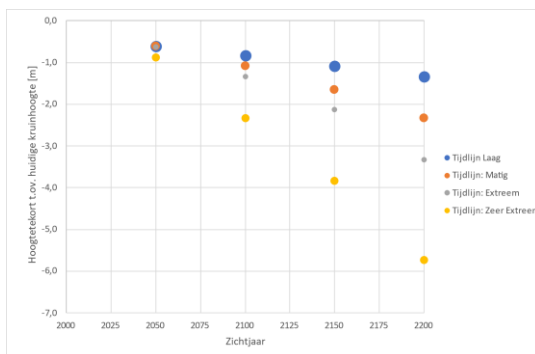
De Stevinsluizen bestaan uit 16 objecten. Binnen deze objecten is onderscheid gemaakt in één type schutsluis en een type spuisluis. Er is een schutsluis aanwezig en er zijn 15 spuisluisen. De spuisluisen zijn verdeeld over drie locaties (west, centraal en oost) binnen het kunstwerk. Op elke locatie zijn vijf spuisluisen aanwezig.

Het kruinhoogtetekort voor de verschillende objecten is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor allebei de type 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 in onderstaande tabel slechts de kosten voor één spuisluis zijn gepresenteerd. Binnen het kunstwerk zijn er 15 identieke spuisluisen aanwezig.

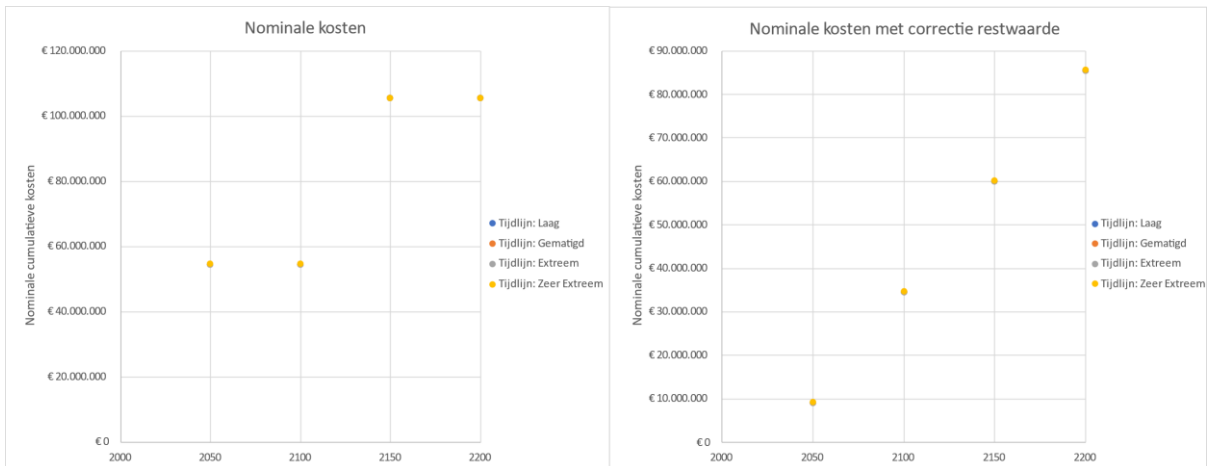
Tabel 28: Kenmerken Stevinsluizen.

		Schutsluis	Spuisluis ¹
Kosten vervanging 2022	[€]	50.984.967	15.585.873
KostenType	[-]	Schutsluis - Special	Uitwateringssluis - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,9	4,2
Einde levensduur	[-]	2039	2051
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00004	0,00004

¹ Slechts de kosten kenmerken van één spuisluis gepresenteerd.



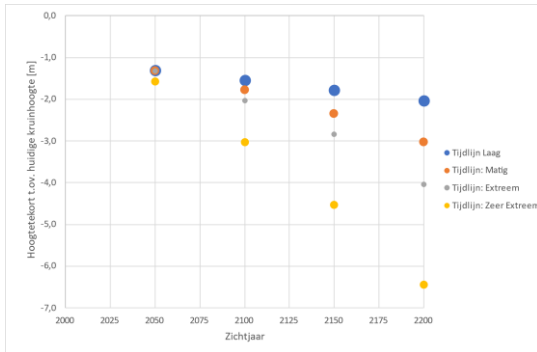
Figuur 66: Hoogtetekort Stevinsluis.



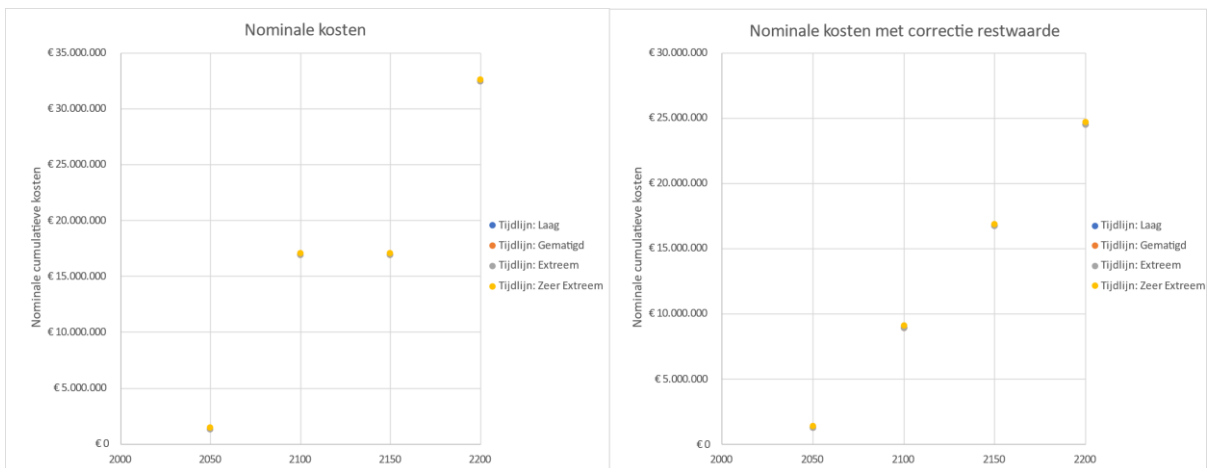
Figuur 67: Nominale cumulatieve kosten Stevinschutsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 29: Nominale kosten Stevinschutsluis per tijdslijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdslijn: Laag	Strategie 1	
2050	€ 54.413.892	€ 9.037.272
2100	€ 54.413.892	€ 34.529.755
2150	€ 105.398.859	€ 60.022.239
2200	€ 105.398.859	€ 85.514.722
Tijdslijn: Gematigd	Strategie 1	
2050	€ 54.413.892	€ 9.037.272
2100	€ 54.413.892	€ 34.529.755
2150	€ 105.398.859	€ 60.022.239
2200	€ 105.398.859	€ 85.514.722
Tijdslijn: Extreem	Strategie 1	
2050	€ 54.413.892	€ 9.037.272
2100	€ 54.413.892	€ 34.529.755
2150	€ 105.398.859	€ 60.022.239
2200	€ 105.398.859	€ 85.514.722
Tijdslijn: Zeer Extreem	Strategie 1	
2050	€ 54.546.366	€ 9.169.746
2100	€ 54.546.366	€ 34.662.229
2150	€ 105.531.333	€ 60.154.713
2200	€ 105.531.333	€ 85.647.196



Figuur 68: Hoogtetekort Stevinspuisluis.



Figuur 69: Nominale cumulatieve kosten Stevinspuisluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 30: Nominale kosten Stevinspuisluis per tijdljn en zichtjaar

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdljn: Laag		
2050	€ 1.297.181	€ 1.250.853
2100	€ 16.883.054	€ 8.934.258
2150	€ 16.883.054	€ 16.727.195
2200	€ 32.468.927	€ 24.520.131
Tijdljn: Gematigd		
2050	€ 1.297.181	€ 1.250.853
2100	€ 16.883.054	€ 8.934.258
2150	€ 16.883.054	€ 16.727.195
2200	€ 32.468.927	€ 24.520.131
Tijdljn: Extreem		
2050	€ 1.297.181	€ 1.250.853
2100	€ 16.883.054	€ 8.934.258
2150	€ 16.883.054	€ 16.727.195
2200	€ 32.468.927	€ 24.520.131
Tijdljn: Zeer Extreem		
2050	€ 1.440.861	€ 1.389.402
2100	€ 17.026.734	€ 9.077.939

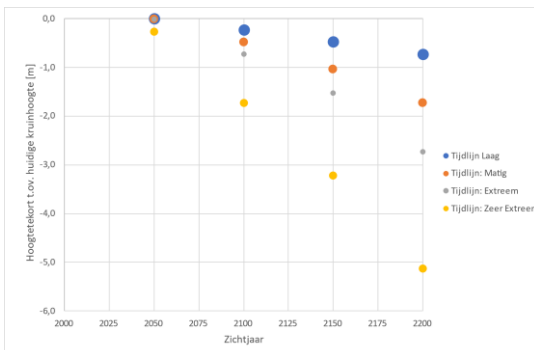
2150	€ 17.026.734	€ 16.870.875
2200	€ 32.612.607	€ 24.663.812

A.3 Coupure Dorpsstraat Vlieland

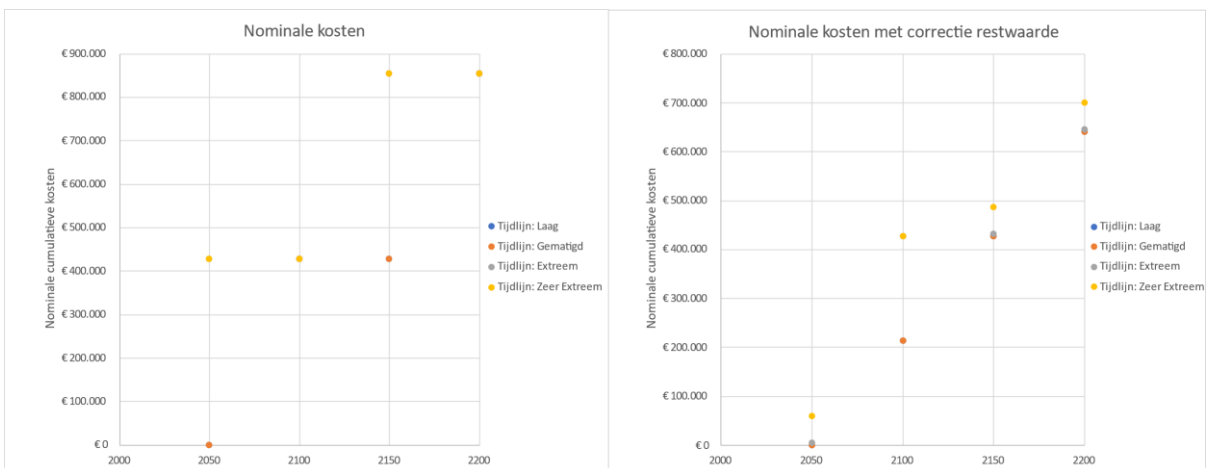
De Coupure Dorpsstraat Vlieland bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen. Dit komt met name door de hogere versterkingskosten welke benodigd zijn om het object te versterken tot einde levensduur.

Tabel 31: Kenmerken Coupure Dorpsstraat Vlieland.

		Coupure
Kosten vervanging 2022	[€]	427.200
KostenType	[-]	Coupure - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,31
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,0004



Figuur 70: Hoogtetekort Coupure Vlieland.



Figuur 71: Nominale cumulatieve kosten Coupure Vlieland: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 32: Nominale kosten Coupure Vlieland per tijdlijn en zichtjaar.

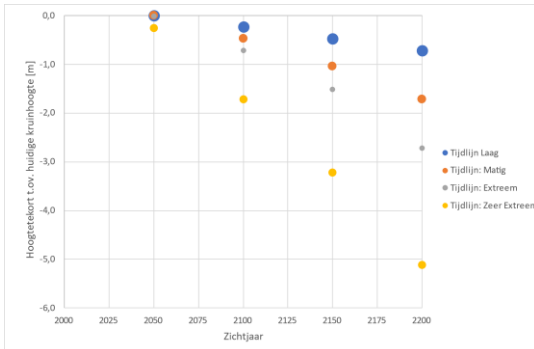
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Strategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 427.200	€ 213.600
2150	€ 427.200	€ 427.200
2200	€ 854.400	€ 640.800
Tijdlijn: Gematigd	Strategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 427.200	€ 213.600
2150	€ 427.200	€ 427.200
2200	€ 854.400	€ 640.800
Tijdlijn: Extreem	Strategie 2	
2050	€ 427.200	€ 4.272
2100	€ 427.200	€ 427.200
2150	€ 854.400	€ 431.472
2200	€ 854.400	€ 645.072
Tijdlijn: Zeer Extreem	Strategie 2	
2050	€ 427.200	€ 59.808
2100	€ 427.200	€ 427.200
2150	€ 854.400	€ 487.008
2200	€ 854.400	€ 700.608

A.4 Zeesluizen Farmsum

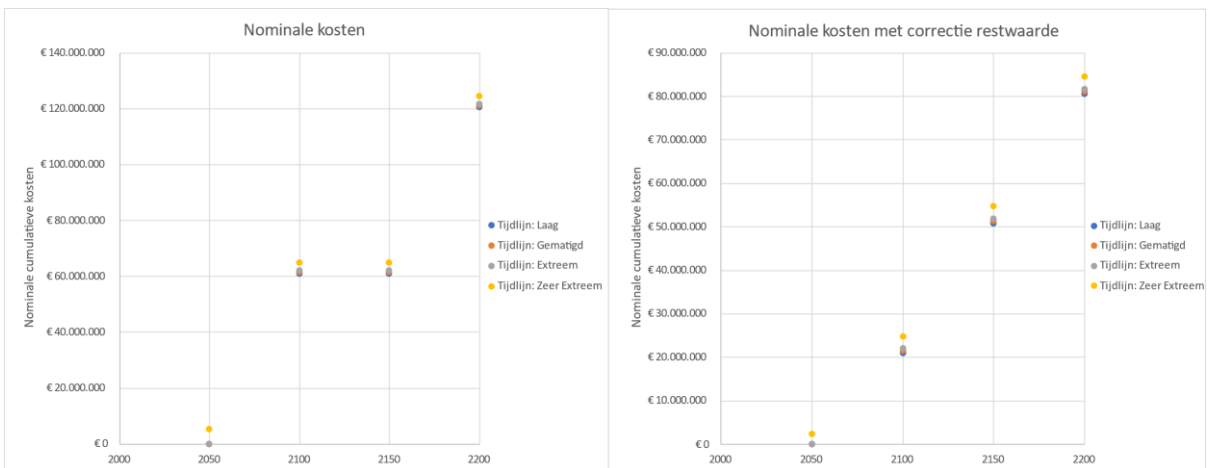
In het kunstwerk Zeesluizen Farmsum zijn twee objecten aanwezig. Dit zijn een grote en een kleine schutsluis. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor beide objecten wordt dezelfde versterkingsstrategie toegepast. Het object wordt eerst versterkt tot einde levensduur en daarna vervangen. Dit is voor alle tijdlijnen het geval.

Tabel 33: Kenmerken Zeesluizen Farmsum.

		Zeesluis Farmsum Groot	Zeesluis Farmsum Klein
Kosten vervanging 2022	[€]	59.609.200	24.272.022
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel	Schutsluis - Klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	7,1	7,1
Einde levensduur	[-]	2067	2067
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000027	0,000027



Figuur 72: Hoogtetekort Zeesluis Farmsum Groot.

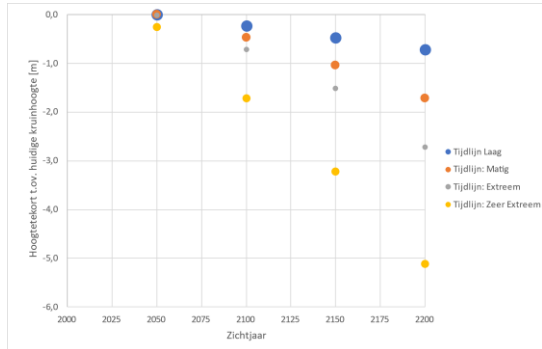


Figuur 73: Nominale cumulatieve kosten Zeesluis Farmsum Groot: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

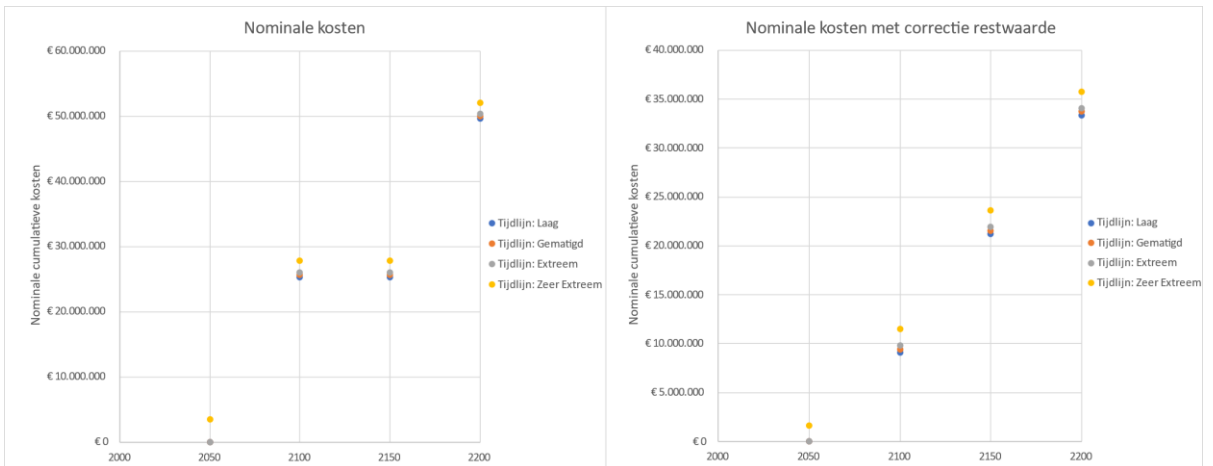
Tabel 34: Nominale kosten Zeesluis Farmsum Groot per tijdljn en zichtjaar

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdljn: Laag	Strategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 60.906.659	€ 20.968.495
2150	€ 60.906.659	€ 50.773.095
2200	€ 120.515.858	€ 80.577.695
Tijdljn: Gematigd	Strategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 61.459.161	€ 21.520.998
2150	€ 61.459.161	€ 51.325.598
2200	€ 121.068.361	€ 81.130.197
Tijdljn: Extreem	Strategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 62.011.664	€ 22.073.500
2150	€ 62.011.664	€ 51.878.100
2200	€ 121.620.864	€ 81.682.700
Tijdljn: Zeer Extreem	Strategie 1	
2050	€ 5.164.979	€ 2.332.571
2100	€ 64.774.178	€ 24.836.015

2150	€ 64.774.178	€ 54.640.614
2200	€ 124.383.378	€ 84.445.214



Figuur 74: Hoogtetekort Zeesluis Farmsum Klein.



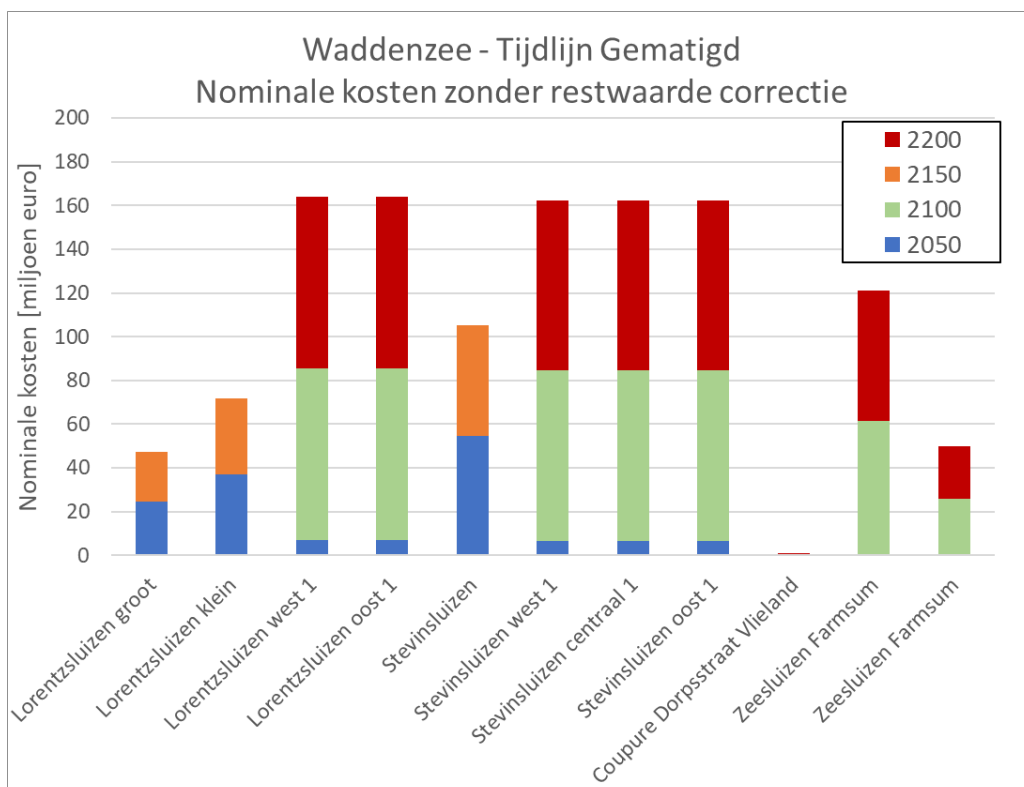
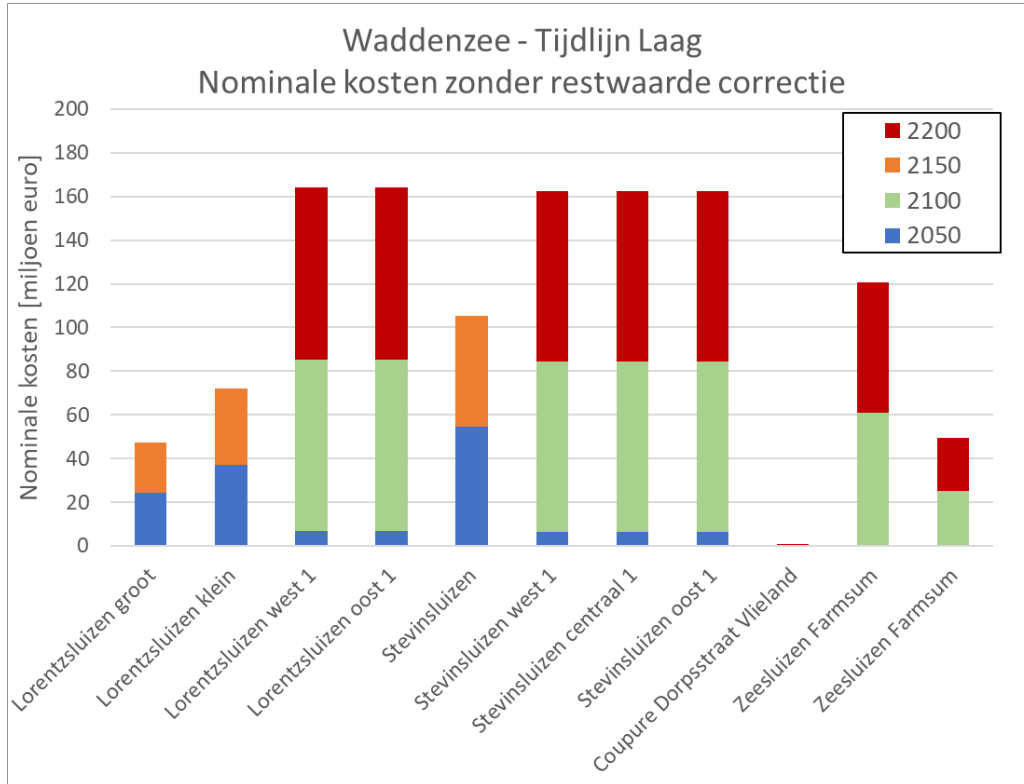
Figuur 75: Nominale cumulatieve kosten Coupure Vlieland: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

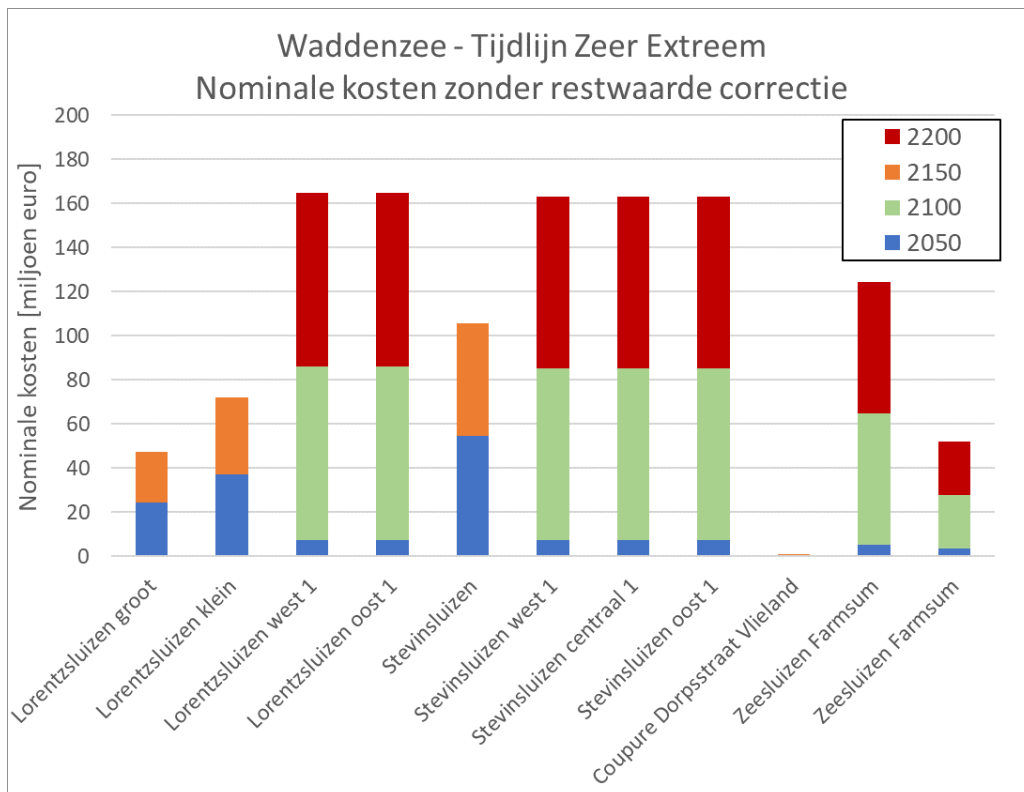
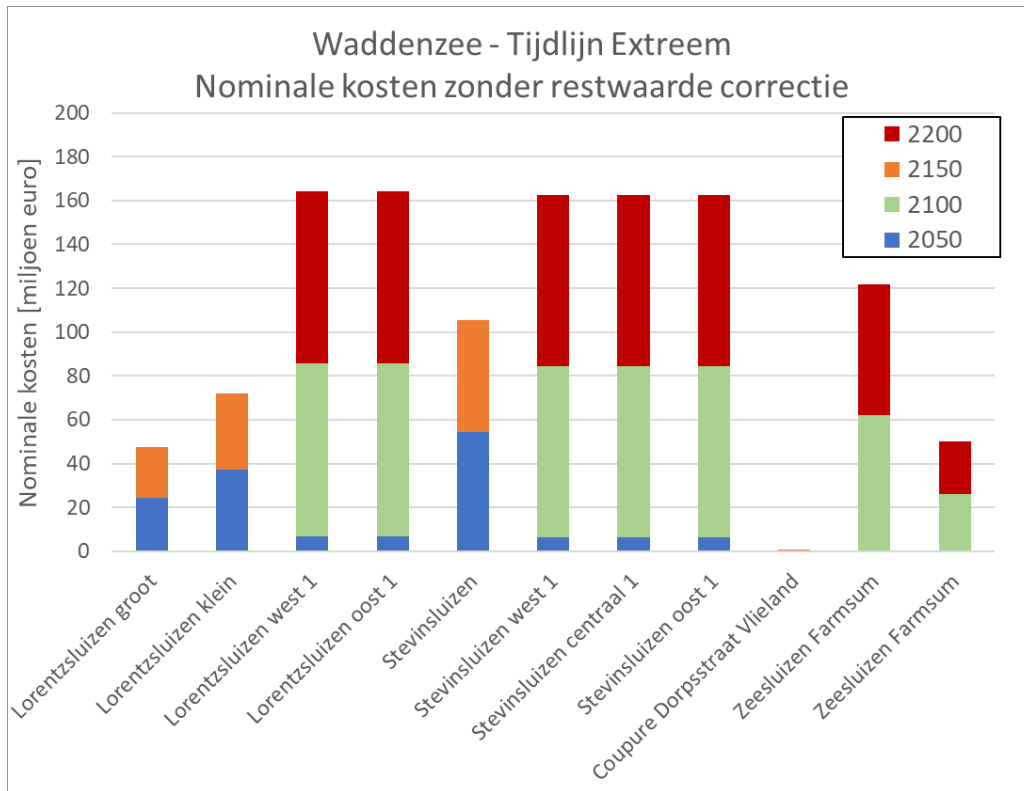
Tabel 35: Nominale kosten Coupure Vlieland per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdljn: Laag		
Strategie 1		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 25.328.636	€ 9.066.381
2150	€ 25.328.636	€ 21.202.392
2200	€ 49.600.659	€ 33.338.404
Tijdljn: Gematigd		
Strategie 1		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 25.674.648	€ 9.412.393
2150	€ 25.674.648	€ 21.548.404
2200	€ 49.946.670	€ 33.684.415
Tijdljn: Extreem		
Strategie 1		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 26.020.660	€ 9.758.405
2150	€ 26.020.660	€ 21.894.416
2200	€ 50.292.682	€ 34.030.427

Tijdlijn: Zeer Extreem	Strategie 1	
2050	€ 3.478.697	€ 1.571.024
2100	€ 27.750.719	€ 11.488.464
2150	€ 27.750.719	€ 23.624.475
2200	€ 52.022.741	€ 35.760.486

A.5 Nominale cumulatieve kosten Waddenzee en Eems-Dollard per object en tijdlijn





A.6 Nominale cumulatieve kosten met correctie restwaarde Waddenzee en Eems-Dollard per object en tijdlijn

