

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

# **Systeemanalyse waterveiligheid**

## **Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied Hoofdrapport**

# **Systeemanalyse waterveiligheid**

## **Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied**

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](https://kennisprogrammazeespiegelstijging.nl).

Uitgegeven door           Kennisprogramma Zeespiegelstijging - Spoor 2

In opdracht van         Rijkswaterstaat WVL

Auteurs                    Marit Zethof (HKV), Jan Stijnen (HKV), Bastiaan Kuijper (HKV), David Knops (HKV) en Bert van den Berg (Witteveen+Bos)

### Informatie

Functie

Telefoon

E-mail

Datum                     30 mei 2023  
 Versie                    1.0  
 Status                    Definitief

### Versiebeheer

0.1	9 november	50% rapportage
0.2	24 november	Update na verwerking reviewcommentaren
0.3	23 januari	80% rapportage
0.4	31 januari	Update na verwerking reviewcommentaren
0.5	14 april	99% rapportage
0.6	25 april	Review Rijkswaterstaat
0.7	9 mei	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 spui­mogelijkheden onder vrij verval vanuit regionale systemen naar het hoofdwatersysteem en van daaruit naar zee wijzigen. Ook het aantal keren per jaar dat de stormvloedkeringen sluiten, neemt toe. Door grotere hydraulische belastingen is versterking van de waterkeringen nodig om aan de vereiste (wettelijke) overstromingskansen te voldoen. Binnen de studie is onderzoek verricht naar de invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen en de doorwerking daarvan op de overstromingskansen. Vervolgens is in beeld gebracht hoe deze wijzigingen doorwerken op de te verwachten versterkingsopgave van de primaire waterkeringen. Daarbij is aanvullend naar de benodigde kosten als de ruimtelijke knelpunten gekeken. Tot slot is een groot aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om een beeld te krijgen van een aantal mogelijke kansrijke oprekmogelijkheden van de huidige inrichting van het watersysteem.

### Scope Rijn-Maasmonding en rivierengebied

Deze rapportage gaat specifiek over het de Rijn-Maasmonding en een deel van het rivierengebied. Alle dijken, dammen en kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkeringen in dit gebied behoren tot de scope van deze studie. De Diefdijk valt buiten de scope, evenals de zandige waterkeringen (duinen). Langs de Maas loopt de scope tot aan Mook, langs de Waal tot aan de Pannerdensch Kop en langs de Nederrijn-Lek tot aan de IJsselkop.

### Effecten op hydraulische belastingen

De doorwerking van de zeespiegelstijging op de waterstanden om aan de normen te voldoen, verschilt per deelgebied binnen de Rijn-Maasmonding en Rivierengebied. De drie hoofdoorzaken die bepalen hoe hoog de waterstanden en de golven in het gebied worden, zijn de zeespiegelstijging, de stormvloedkeringen en de afvoer van de rivieren. Afhankelijk van de locatie in het gebied, is het vaak één van deze drie

hoofdoorzaken die bepalend is voor de hydraulische belastingen, maar er zijn locaties waar het juist het samenspel van die drie factoren belangrijk is. Uiteraard spelen op lokaal niveau ook de windrichting en de windsnelheid een rol (maar minder op systeemniveau).

De stormvloedkeringen aan de noordzijde van het gebied (achter de Maeslant-, Hartel- en Hollandsche IJsselkering) slagen er in om een deel van de stijging van de zeespiegel tegen te houden, al wordt dit effect minder bij toenemende zeespiegelstijging. Waterstanden in de directe nabijheid van de stormvloedkeringen worden het meest beïnvloed door het gedrag van deze stormvloedkeringen (o.a. door de faalkans en het sluitpeil). Bij zeewaterstanden die hoger worden dan de kerende hoogte van deze kunstwerken lopen ze over en vult het achterliggende gebied zich sneller met water. Als de stormvloedkeringen gesloten zijn, ontstaat een gebied dat hoofdzakelijk gevuld wordt met water vanaf de rivieren. Hoe hoger die afvoeren, hoe eerder het gebied achter de stormvloedkeringen volloopt. Naast de stijging van de zeespiegel en het sluitgedrag van de stormvloedkeringen speelt dus ook de verdeling van de afvoer op de Pannerdensche- en IJsselkop een rol. Voor meer bovenstreams gelegen locaties in het gebied is deze afvoer (verdeling over de splitsingspunten en het aftopniveau) belangrijker dan de zeespiegelstijging. Hoe groter het debiet van de betreffende riviertak, hoe minder gevoelig de lokale waterstand is voor de zeespiegelstijging. Ook het "ontzien van de Nederrijn/Lek" speelt een rol, zeker langs die specifieke riviertak: omdat de afvoer over deze tak niet toeneemt richting de toekomst, nemen de waterstanden langs die tak duidelijk minder toe dan die langs de Waal en de Maas.

De waterstanden op locaties langs de zuidzijde van het gebied (achter de Haringvlietsluizen) reageren iets minder direct op de zeespiegelstijging dan die aan de noordzijde van het gebied. Ten eerste liggen deze locaties verder weg van de Europoortkering (de zeespiegelstijging werkt minder direct door) en ten tweede is het beschikbare volume om water op te vangen op het Haringvliet en Hollandsch Diep een stuk groter dan de Nieuwe Maas, waardoor het watersysteem daar trager reageert. Net als de Europoortkering en de Hollandsche IJsselkering, gaan ook de Haringvlietdam met de Haringvlietsluizen vanaf een bepaalde zeewaterstand overlopen, waardoor extra water het achterliggende gebied in zal stromen.

In zijn algemeenheid is het beeld dat de verschillen in de minimaal benodigde kruinhoogten (ook wel hydraulische belastingniveaus genoemd) niet heel anders zijn de verschillen in de waterstanden. De gemiddelde verschillen in de minimaal benodigde kruinhoogten zijn wat groter dan de verschillen in de waterstanden en ze vertonen ook wat meer variatie. De grootste verschillen tussen de minimaal benodigde kruinhoogten en de waterstanden treden op voor het deelgebied Rijnmond-Drechtsteden, waar de invloed van de zeespiegelstijging (toenemende waterdiepten) i.c.m. wind zorgt voor grotere golven en daarmee hogere minimaal benodigde kruinhoogten. Ook op de Maas zien we bij de hoogste zeespiegelstijgingen nog verschillen tussen de toenames van de minimaal benodigde kruinhoogten en de toenames van de waterstand van enkele decimeters.

### **Resultaten opgave**

Omdat de doorwerking van de zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen in de deelgebieden binnen de Rijn-Maasmonding en het rivierengebied van elkaar verschilt, komt dit ook terug in de opgave voor de minimaal benodigde hoogte van de waterkeringen in verschillende deelgebieden. Een belangrijk onderdeel van de hoogteopgave is de mate van bodemdaling. Binnen de beschouwde dijktrajecten is de bodemdaling het grootste langs de Hollandsche IJssel en de benedenloop van de Lek.

De toename van de waterstanden door de zeespiegelstijging heeft niet alleen consequenties voor de hoogte van de keringen, maar ook voor de sterkte. De waterveiligheidsopgave voor de sterktemechanismen piping en macrostabiliteit

betreft een dijkverbreding om te voldoen aan de wettelijk gestelde eisen. De sterktemechanismen zijn minder gevoelig voor verschillen in de waterstand, waardoor de zeespiegelstijging minder variatie in waterveiligheidsopgave geeft. De oplossing voor de sterkteopgave kan een gedeeltelijke grondoplossing (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). Ook dit is in beeld gebracht voor verschillende maten van zeespiegelstijging.

### **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 50 cm zeespiegelstijging in dat jaar. Het betreft een globale inschatting, de waterschappen werken de komende tijd aan een gedetailleerdere inschatting van deze kosten. 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 in dezelfde orde grootte liggen als het huidige jaarlijkse budget van het HWBP om het systeem in 2050 op orde te krijgen (zowel het bedrag per jaar als het bedrag per kilometer dijkversterking), ongeacht het deelsysteem en ongeacht de mate van zeespiegelstijging.

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.

Bij stormvloedkeringen zijn zowel de versterkingskosten als de vervangingskosten gekoppeld aan de mate van zeespiegelstijging. De toename in kosten van de stormvloedkeringen blijft echter beperkt bij het extremer worden van de tijdlijnen. De kosten voor de kunstwerken worden voor ruim de helft gedomineerd door de vervangingskosten van de Maeslantkering en de Haringvlietstuizen.

### **Gevoeligheidsanalyses**

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. Daarbij hebben we gekeken naar de invloed van een aangepaste faalkans van de Europoortkering, een aangepast sluitpeil van de Europoortkering, het aftoppen van de Rijnafvoer en de invloed van modelonzekerheden. In alle gevoeligheidsanalyses geldt dat ze van invloed zijn op de waterstanden, vaak het meest in het gebied waar de gevoeligheid een rol speelt. Zo is het effect van de aanpassing van de faalkans het grootst voor locaties direct achter de stormvloedkeringen en is het effect van

het aftoppen van de rivierafvoer juist het grootst in het rivierendeel van het gebied. De doorwerking op waterveiligheidsopgave is voor alle uitgevoerde gevoeligheidsanalyses beperkt en leiden op systeemniveau niet tot significant andere conclusies.

### **Aanvullende analyses**

Naast de gevoeligheidsanalyses is onderzocht wat de invloed is van diverse aanvullende maatregelen die mogelijk interessant kunnen zijn voor deze regio:

1. Overstroombaarheid van "het zeefront". In hoeverre is het wel of niet volledig overstroombaar zijn van de gehele linie aan dammen en stormvloedkeringen langs de kust van invloed op de waterstanden in het achterliggende gebied?
2. Waterberging in de Zuidwestelijke Delta. Wat is het effect van het inzetten van een extra gebied als de Grevelingen om water te bergen (naast het Volkerak-Zoommeer)?;
3. Waterberging door systeemwerking. Zelfs als de primaire waterkeringen aan de norm voldoen, is sprake van verschillen in hoogte door variaties in de normen. In werkelijkheid zal het gebied met de laagste norm daarom vermoedelijk als eerste vollopen. Wat is het effect van deze aanname op de waterstanden in het gebied?
4. Invloed van rivierverruimende maatregelen. Binnen het project Integraal Riviermanagement (IRM) is nagedacht over diverse rivierverruimende maatregelen in het rivierengebied. Wat is de invloed daarvan op de waterstanden op het gebied van de Rijn-Maasmonding?
5. Invloed van zeespiegelstijging bovenstrooms van de splitsingspunten. Hoe hoger de zeespiegel, hoe de invloed daarvan doorwerkt in de waterstanden stroomopwaarts. Tot waar reikt de invloed van een (extreme) zeespiegelstijging op de rivieren?
6. Invloed van zeespiegelstijging op de morfologie van de rivierbodem. Daarbij is gekeken naar de invloed van toekomstige bodemveranderingen van de Rijntakken en de Maas en de daarbij horende hoogwaterstanden door veranderingen in de afvoerfrequentie en de zeespiegelstijging.

Voor de aanvullende analyses is een redeneerlijn opgesteld, waarbij voornamelijk gebruik is gemaakt van reeds beschikbare resultaten uit deze Systeemanalyse Waterveiligheid van het KP ZSS, of andere studies. De analyses zijn dan ook minder gebaseerd op modeluitkomsten en bevatten diverse versimpelingen en aannames. Desalniettemin kunnen de resultaten gebruikt worden voor eerste inzichten en indicaties. Op basis van de ingeschatte waterstandsverschillen in de aanvullende analyses is vervolgens ook een doorvertaling gemaakt naar de te verwachten invloed op de vermeden dijkversterkingskosten.



## Summary

### Summary

#### Background

The Knowledge Programme on the impact of sea-level rise (Dutch acronym: KP ZSS) aims to develop knowledge for the 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 number of times per year that storm-surge barriers must close will also increase. 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 focuses on the Rhine-Meuse delta and part of the riverine region, including all dikes, dams and structures that make up the primary flood defences. Using the Volkerak-Zoommeer lake as a water storage measure has also been included in the analysis. Sandy flood defences (dunes) are outside the scope of this report. The areas along the Meuse river up to Mook, along the Waal river to the Pannerdensch Kop and along the Nederrijn-Lek river to the IJsselkop are included, except the "Diefdijk".

#### Effect on hydraulic loads

The effect of sea level rise on flood defences differs per sub-region within this study. The three main sources of high water levels and waves in the area are sea level rise, the storm surge barriers and the discharge of the rivers. While in some locations the hydraulic load will be determined by only one of these factors, at other locations it will be due to a combination. The wind direction and wind speed also play a role at a local level, but less at a system level.

The storm surge barriers on the northwest side of the considered region can partly protect against sea level rise, however their effectiveness reduces for more extreme cases. High water levels in the vicinity of the storm surge barriers are mostly dependent on the behaviour/characteristics of these barriers, such as their probability of failure and closing levels. When the storm surge barriers are closed, the area behind them is mostly filled with water from the rivers. However, in the case of extreme sea level rise, water will overtop the storm surge barriers into these areas. In addition to sea level rise and the behaviour of the storm surge barriers, the distribution of extreme discharges from the Rhine to the Waal and Nederrijn-Lek river branches is also important.

For upstream locations, the river discharge is more important than sea level rise. The greater the flow on the river branch, the less sensitive the local water level is to sea level rise. An existing policy to protect the Nederrijn/Lek river from extreme discharges is also relevant to the analysis. As the discharge over this branch will not increase (and may even reduce) in the future, water levels along this branch will increase less than those along the Waal and the Maas.

Water levels at locations on the southwest side of the considered region (behind the Haringvliet sluices) respond less directly to sea level rise compared to the northwest side. These locations are at a larger distance from the Europoort storm surge barrier. The water storage available in this area (Haringvliet and Hollandsch Diep) is significantly larger than the corresponding storage up in the northern area of the Delta (Nieuwe Maas). All storm surge barriers will overtop above a certain sea water level, causing extra water to flow into the area behind.

In general, the increases in required defence heights do not differ significantly from the increases in water levels. They are on average slightly larger and more variable. An important notion here is that the increase in water levels is less than the sea level rise. The largest differences are at Drechtsteden, where sea level rise (and therefore increased water depths) and wind leads to larger waves resulting in larger required defence heights. For extreme sea level rise, the required increases in defence heights on the Meuse are a few decimetres higher than the increase in expected water levels.

#### **Impact of sea-level rise on flood defences**

As the effects of sea level rise on the hydraulic loads within this region vary, so do the required flood defence heights. An important aspect determining the required height increase is the degree of subsidence. Within the dike sections considered, subsidence is largest along the Hollandsche IJssel and Lek river branches.

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.

#### **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 0.50<sup>1</sup> m 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. The expected reinforcement costs are in the same order of magnitude as the current annual budget provided by HWBP to get the defences up to standard by 2050 (both per year and per kilometre of dike reinforcement), regardless of the sub-region or degree of sea-level rise.

The space required for the reinforcement depends on the reinforcement strategy. Due to the presence of buildings in the reinforcement zone at some locations, (temporary) spatial bottlenecks have been mapped out. These are locations where a reinforcement strategy could, for example, consist of a combination of a soil solution, constructive measures and innovative measures. In reality, a dyke improvement project consists of a mix of reinforcement strategies with different solutions, including complete ground solutions whereby the existing buildings in the reinforcement zone must be temporarily or permanently demolished if necessary. The chosen strategy depends on local circumstances leading to the 'best' solution.

For storm surge barriers, both the renovation costs and the replacement costs are linked to the degree of sea level rise. However, these costs are more uncertain for more extreme cases of sea level rise. It should be noted that the calculations assume that the storm surge barriers will continue to function as they do currently. More than half the costs for the structures are to replace the Maeslant storm surge barrier and the Haringvliet sluices. For extreme sea level rise, these costs have a larger proportion to the total cost.

### **Results of sensitivity analyses**

In addition to the above analyses, scenarios have been evaluated to test certain assumptions, and perhaps provide options to reduce the impact of sea level rise. Four aspects were assessed; 1) an adjusted failure probability for the Europoort barrier, 2) an adjusted closing level of the Europoort barrier, 3) capping the Rhine discharge and 4) the influence of model uncertainties. All aspects had an influence on the water levels, generally at the location of the change. For example, the effect of adjusting the barrier failure probability is greatest for locations directly behind the barrier, whilst the effect of capping the river discharge is greatest in the riverine area. The effect on the flood defence requirements is limited for all analyses, and does not lead to significantly different conclusions at the system level. There are consequences for the flood plain, but such considerations are outside the scope of the current study.

### **Additional analyses**

In addition to the sensitivity analyses, the influence of various additional measures relevant to this region have been investigated:

1. Inundation of the sea front. To what extent does the complete inundation of the dams and storm surge barriers along the coast influence the water levels in the areas behind them?
2. Water storage in the Southwest Delta. What is the effect of using an area (such as Grevelingen) to store water?
3. Water storage through system behaviour. Even if the primary flood defences meet the required standards, there are differences in height due to variations in the standards. In reality, therefore, the area with the lowest standard will probably fill up first. How does this effect the water levels in the area?

---

<sup>1</sup> 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.

4. Influence of river-widening measures. Within the Integral River Management project, various river-widening measures have been considered. What is the influence of sea level rise on the effectiveness of such river-widening measures?
5. Influence of sea level rise upstream of the bifurcation points. The higher the sea level rise, the more upstream its influence is observed. How far upstream does an (extreme) rise in sea level affect the rivers?
6. Influence of sea level rise on river bed morphology. The influence of future changes to the channel bed and resulting water levels in the Rhine branches and the Meuse was examined, due to changes in river discharge and sea level rise.

Conclusions have been made for these additional analyses, based on existing results within this KP ZSS flood risk management analysis and other studies. The analyses contain various simplifications and assumptions and are less based on modelling results. Nevertheless, they can be useful for insights and indications. Based on the estimated water level differences in the additional analyses, the expected reductions in dike reinforcement costs have also been calculated.

## Inhoudsopgave

<b>Samenvatting .....</b>	<b>3</b>
<b>Summary .....</b>	<b>8</b>
<b>1            Inleiding en leeswijzer .....</b>	<b>12</b>
1.1          Algemeen .....	14
1.2          Achtergrond project .....	14
1.3          Positionering Spoor II Systeemanalyse waterveiligheid .....	15
1.4          Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1 .....	16
1.5          Korte gebiedsbeschrijving .....	16
1.6          Inhoud van dit rapport .....	17
<b>2            Aanpak op hoofdlijnen .....</b>	<b>18</b>
2.1          Gehanteerde methode .....	18
2.2          Beschrijving tijdlijnen en referentiesituatie .....	19
<b>3            Hydraulische belastingen Rijn-Maasmonding en Rivierengebied .....</b>	<b>22</b>
3.1          Doel .....	22
3.2          Methode .....	22
3.3          Resultaten hydraulische belastingen .....	26
3.4          Samenvatting .....	56
<b>4            Waterveiligheidsopgave kunstwerken .....</b>	<b>61</b>
4.1          Doel .....	61
4.2          Methode .....	62
4.3          Resultaten .....	66
4.4          Samenvatting .....	73
<b>5            Waterveiligheidsopgave dijken .....</b>	<b>75</b>
5.1          Doel .....	75
5.2          Methode .....	75
5.3          Resultaten .....	79
5.4          Samenvatting .....	97
<b>6            Gevoeligheidsanalyses .....</b>	<b>99</b>
6.1          Inleiding .....	99
6.2          Parameter 1: Aangepaste faalkans Europoortkering .....	99
6.3          Parameter 2: Aangepast sluitpeil Europoortkering .....	106
6.4          Parameter 3: Aftoppen van de Rijnafoer .....	109
6.5          Parameter 4: Modelonzekerheden .....	117
6.6          Samenvatting .....	123
<b>7            Aanvullende analyses .....</b>	<b>125</b>
7.1          Inleiding .....	125
7.2          Methode .....	125
7.3          Overstroombaarheid zeefront stormvloedkeringen .....	127
7.4          Berging Zuidwestelijke Delta .....	135
7.5          Berging door systeemwerking .....	139
7.6          Invloed rivierverruimende maatregelen .....	141

7.7	Invloed zeespiegelstijging bovenstrooms splitsingspunten .....	146
7.8	Invloed zeespiegelstijging op morfologie .....	147
<b>8</b>	<b>Regionaal beeld en conclusies .....</b>	<b>153</b>
8.1	Inleiding .....	153
8.2	Invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen .....	154
8.3	Versterkingsopgave per watersysteem .....	158
8.4	Kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging .....	159
8.5	Ruimtelijke impact.....	163
8.6	Inschatting onzekerheidsbandbreedte resultaten .....	164
8.7	Effectiviteit van een aantal mogelijke oprekmaatregelen.....	166
8.8	Conclusies .....	168
	<b>Referenties .....</b>	<b>171</b>
	<b>Bijlage A afvoerdeling splitsingspunten .....</b>	<b>174</b>
	<b>Bijlage B afvoerstatistiek Rijn en Maas .....</b>	<b>175</b>
	<b>Bijlage C Analyse per kunstwerk.....</b>	<b>177</b>
	<b>Bijlage D Tabellen met kostenreducties aanvullende analyses .....</b>	<b>231</b>
	<b>Bijlage E Vervangingskosten Stormvloedkeringen .....</b>	<b>236</b>
	<b>Bijlage F Betrouwbaarheid Sluiten en Civiel Falen van SVK's .....</b>	<b>237</b>

# 1 Inleiding en leeswijzer

## 1.1 Algemeen

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

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

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

In deze rapportage staan de resultaten beschreven voor de te verwachten waterveiligheidsopgave van de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied door zeespiegelstijging in het huidige hoofdwatersysteem. Parallel zijn dergelijke rapportages beschikbaar voor de andere Deltaprogramma deelgebieden.

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

## 1.2 Achtergrond project

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

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

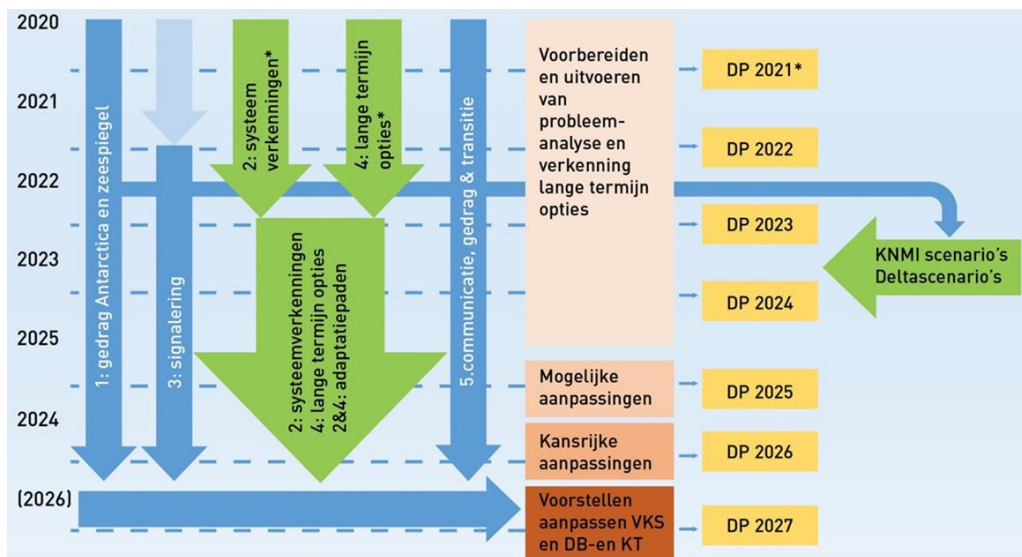
naar het hoofdwatersysteem, en van daaruit naar zee wijzigen. Ook de sluitfrequenties van stormvloedkeringen nemen toe. Door grotere belastingen is versterking van de waterkeringen nodig om aan de vereiste overstromingskans te voldoen. De studie in dit project, zogenaamd 'Systeemanalyse Waterveiligheid',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

### 1.3 Positionering Spoor II Systeemanalyse waterveiligheid

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

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

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



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

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

- De waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging op de huidige watersystemen te bepalen (inclusief consistente veranderingen zoals afvoeren);
- De mate van houdbaarheid van de voorkeursstrategieën (VKS) te duiden door waterstaatkundige effecten en andere effecten op gebiedsfuncties in beeld te brengen;
- Te verkennen en in beeld brengen:
  - wat de mogelijkheden voor het oprekken van de huidige VKS zijn;



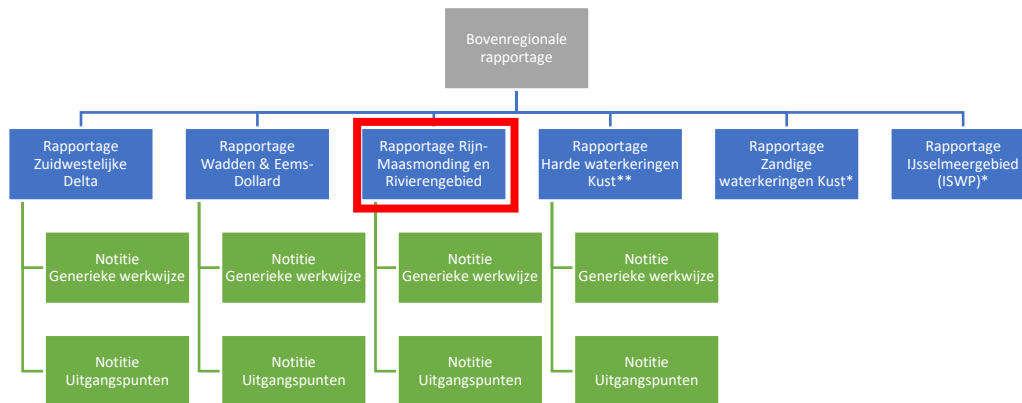
- o wat de kansrijkheid van lange-termijn oplossingsrichtingen is; de lange-termijn oplossingsrichtingen worden veelal in Spoor IV geagendeerd. Dit rapport zal enkel het eerste punt behandelen.

### 1.4 Positionering van de rapportage binnen Spoor II – fase 1

Voor de Systeemanalyse Waterveiligheid van Spoor II zijn 6 rapportages opgesteld, 1 per DP-regio. Deze 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 Rivierengebied zijn de rapportages opgesteld door de combinatie HKV, Witteveen+Bos en IV-Infra. De systeemanalyses voor de Zandige waterkeringen Kust en IJsselmeergebied zijn door Rijkswaterstaat gerapporteerd. De Systeemanalyse IJsselmeergebied is ook bekend onder de naam ISWP (2016-2019).

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

### Systeemanalyse waterveiligheid Spoor II – fase 1



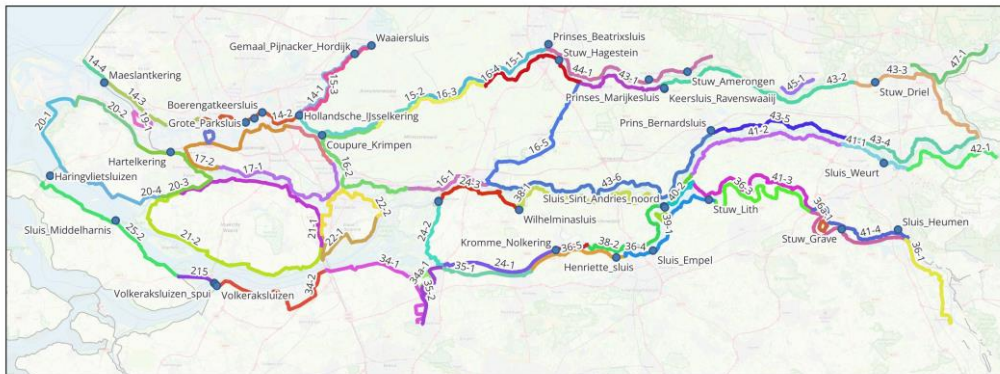
\*) De systeemanalyses voor de Zandige Kust en het IJsselmeergebied zijn door Rijkswaterstaat uitgevoerd en gerapporteerd. In de bovenregionale rapportage worden de resultaten voor deze Zandige Kust en het IJsselmeergebied geïntegreerd met de andere gebieden.

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

Figuur 2: Positionering rapportage Systeemanalyse Rijn-Maasmondingen het Rivierengebied.

### 1.5 Korte gebiedsbeschrijving

Deze rapportage gaat over het deelgebied Rijn-Maasmonding en een deel van het rivierengebied. De scope omvat de gebieden die onder directe invloed staan van zeespiegelstijging. Daartoe behoren de dijken, dammen en de meeste kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkeringen in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied. Deze gebieden behoren tot de scope van dit rapport, zie Figuur 3.



Figuur 3: Scope dijken, dammen en kunstwerken in de regio Rijn Maasmonding, Hollandsche IJssel en het rivierengebied. Nummers betreffen dijktrajecten conform de Waterwet (Omgevingswet). Elk dijktraject kent een eigen overstromingskansnorm. \* Traject 16-5 (Diefdijk) valt buiten de scope. De scope voor traject langs de Maas loopt tot Mook en de scope voor traject 47-1 langs de Nederrijn-Lek tot splitsing met Pannerdens Kanaal. De zandige waterkeringen (duinen) van traject 20-1 vallen buiten de scope van deze rapportage.

## 1.6 Inhoud van dit rapport

Dit rapport beschrijft resultaten van de Systeemanalyse Waterveiligheid voor de Rijn-Maasmonding en het rivierengebied.

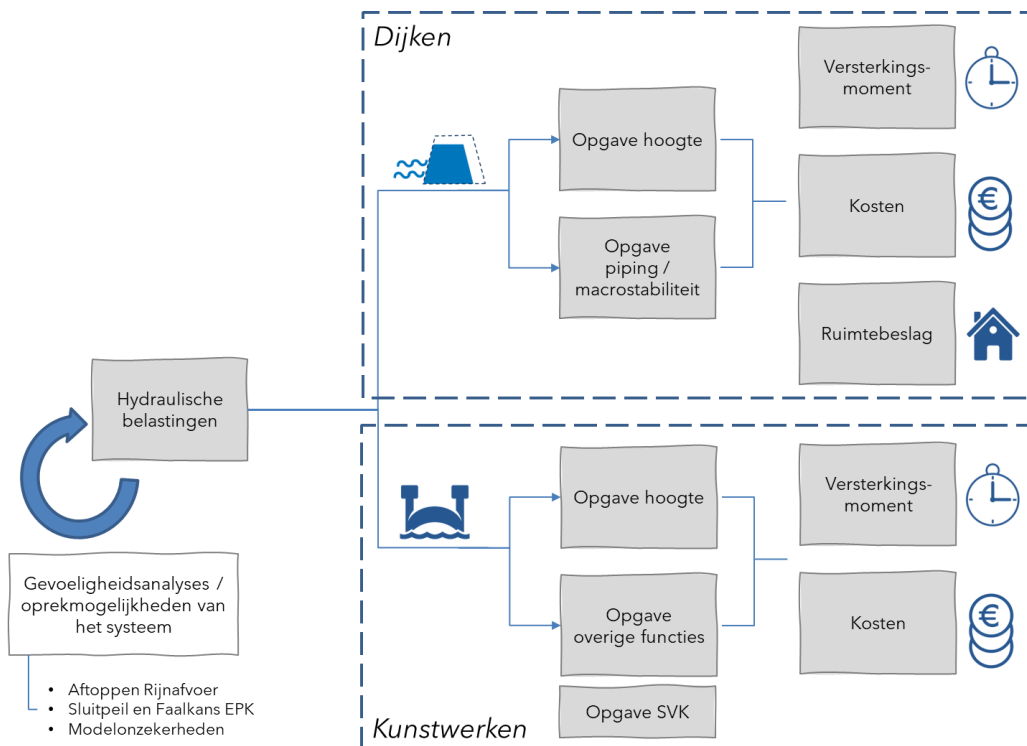
- Hoofdstuk 2: Aanpak op hoofdlijnen.
- Hoofdstuk 3: Hydraulische belastingen.
- Hoofdstuk 4: Waterveiligheidsopgave voor kunstwerken.
- Hoofdstuk 5: Waterveiligheidsopgave voor dijken.
- Hoofdstuk 6: Gevoeligheidsanalyses.
- Hoofdstuk 7: Aanvullende analyses.
- Hoofdstuk 8: Regionale beeld en conclusies.

## 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.

De aanpak op hoofdlijnen bestaat uit de volgende stappen:

- Het bepalen van **hydraulische belastingen** voor dijken en kunstwerken voor verschillende mate van zeespiegelstijging - gekoppeld aan rivierafvoeren - middels tijdlijnen. Dit resulteert in een waterstand bij de norm (ondergrens), en een hydraulisch belastingniveau bij de norm op vakniveau<sup>2</sup> en de sluitfrequentie

<sup>2</sup> Dit is de doorsnede-eis bij de norm (ondergrens) op vakniveau voor een betreffend faalmechanisme.

van de Europoortkeringen en de Hollandsche IJsselkering. Een tijdlijn beschrijft de mate van zeespiegelstijging afgezet tegen de tijd, maar bevat ook informatie over het sluitpeil van de stormvloedkeringen en over de afvoerstatistiek op de rivieren. In paragraaf 2.2 wordt hier nader bij stilgestaan. De hydraulische belastingen voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zijn bepaald met een voor Kennisprogramma Zeespiegelstijging speciaal ontwikkelde versie van Hydra-NL, op basis van zeespiegelstijging en consistente andere processen zoals verandering van de afvoer. Voor de details verwijzen we naar paragraaf 3.2. Achtergrond over de hydraulische databases staat beschreven in HKV (2022a) en (2022c).

- Het bepalen van de **waterveiligheidsopgave voor dijken** o.b.v. de sterktebeschrijving van de waterkeringen voor de faalmechanismen hoogte, piping en macrostabiliteit voor verschillende tijdlijnen, uitgedrukt in ruimtebeslag (dimensies voor kruinverhoging en dijkverbreding) en de bijbehorende kostenbepaling voor drie verschillende versterkingsstrategieën: 1) Traditionele versterking met constructieve inpassing; 2) Versterking met groene kering en 3) Versterking met groene kering en innovatieve pipingmaatregelen. De strategie Traditionele versterking met constructieve inpassing is in de systeemanalyse de basisstrategie, omdat deze het beste aansluit met de uitvoering van versterkingen in de huidige ontwerppraktijk in Nederland (business as usual). De waterveiligheidsopgave voor dijken wordt bepaald met een voor het KP ZSS speciaal ontwikkelde versie van OKADER [Rijkswaterstaat, 2022d] en KOSWAT [Deltares, 2014b]. De sterktebeschrijving van de dijken volgt uit de landelijke set van fragility curven die is opgesteld voor het KP ZSS [Witteveen+Bos & HKV, 2022].
- Het bepalen van de **waterveiligheidsopgave voor kunstwerken**. Dit betekent voor kunstwerken met een waterkerende functie het bepalen van de opgave o.b.v. het faalmechanisme hoogte, uitgedrukt in een kruinverhoging van het kunstwerk en de bijbehorende kostenbepaling. Daarnaast is voor de kunstwerken met een overige functie voor waterveiligheid, naast dat het een onderbreking van de waterkering betreft, de werking beoordeeld<sup>3</sup>. Dit geldt ook voor de stormvloedkeringen<sup>4</sup>, uitgedrukt in het jaar waarin het kunstwerk niet meer aan de ondergrensnorm voldoet.
- Het uitvoeren van **gevoeligheidsanalyses** op de hydraulische belastingen (aangepast sluitpeil, aangepaste faalkans van de Europoortkering, aftoppen van de Rijnafvoer en invloed van modelonzekerheden) en de implicaties daarvan op de waterveiligheidsopgave.
- Het duiden van de resultaten aan de hand van kenmerkende 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 een mate van ZSS in combinatie met klimaatscenario's tussen 2023 en 2200 t.a.v. de rivierafvoer, morfologie van het betreffende watersysteem

<sup>3</sup> Voor Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zijn er geen kunstwerken in deze categorie. De Haringvlietsluizen zijn niet opgenomen als categorie 2 kunstwerk, omdat de functie van het kunstwerk niet verandert bij zeespiegelstijging. De verwachting is dat het peil op het Haringvliet meestijgt met de zeespiegel. Hiermee blijft de spuifunctie gehandhaafd en blijft de doorvoerfunctie hetzelfde bij geopende sluisen.

<sup>4</sup> Voor Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zijn dit de Maeslantkering, Hartelkering, Haringvlietsluizen en de Hollandsche IJsselkering.

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

Tabel 1 geeft hiervan een overzicht. De ZSS per tijdlijn en zichtjaar is ook grafisch weergegeven in Figuur 5. Voor grafieken en meer informatie over de rivierafvoerstatistiek verwijzen we naar bijlage B.

#### Opmerking

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

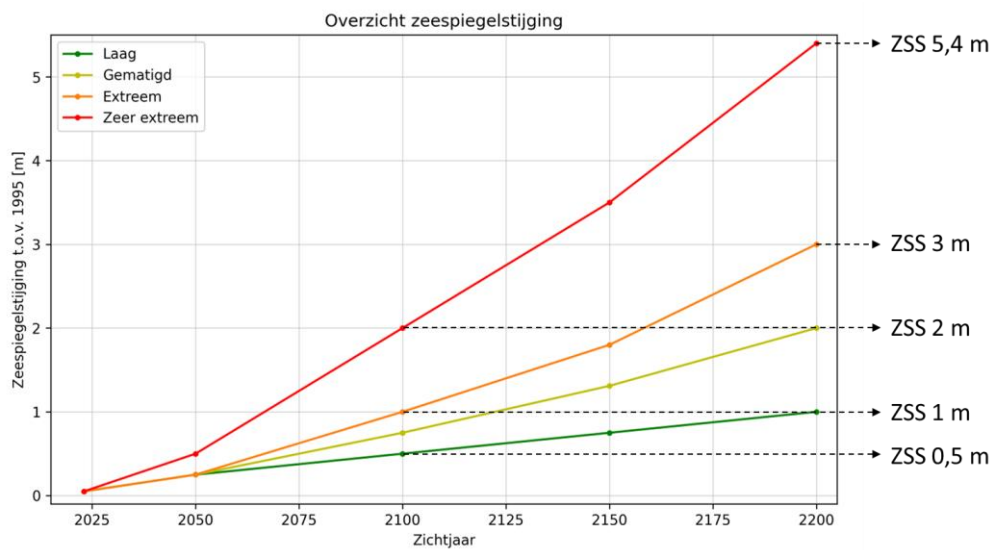
De *referentiesituatie* die gehanteerd wordt komt overeen met de huidige situatie van het watersysteem met daarin meegenomen alle reeds geplande maatregelen in de toekomst. In meer detail betekent dit het volgende:

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

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

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

In de Systeemanalyse Waterveiligheid gaat het om het in beeld brengen van relatieve veranderingen in de waterveiligheidsopgave. Deze veranderingen zijn 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 wordt 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, 2021a].



Figuur 5: Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 per tijdlijn en zichtjaar.

Dezelfde mate van zeespiegelstijging (ZSS) komt dus voor in meerdere tijdlijnen. Een ZSS van 1 m komt dus voor in zichtjaar 2200 voor tijdlijn Laag en in zichtjaar 2100 voor Tijdlijn Extreem. Tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem variëren nauwelijks tussen zichtjaar 2023 en zichtjaar 2050. Tijdlijn Zeer Extreem neemt al direct vanaf 2023 meer toe dan de andere 3 tijdlijnen.

## 3 Hydraulische belastingen Rijn-Maasmonding en Rivierengebied

### 3.1 Doel

Dit hoofdstuk beschrijft hoe de hydraulische belastingen voor de Rijn-Maasmonding (RMM) en het rivierengebied zijn bepaald. Binnen dit project zijn analyses uitgevoerd met OKADER om de benodigde (toekomstige) dijkversterkingen te bepalen, afhankelijk van de manier waarop het klimaat zich ontwikkelt. Voor de analyses met OKADER 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 (zie hoofdstuk 2). De hydraulische belastingen bestaan uit frequentielijnen voor de waterstand en het hydraulisch belastingniveau (HBN) voor golfoverslag. Deze frequentielijnen zelf bestaan uit hoogtes (waterstand of HBN) met de bijbehorende overschrijdingsfrequentie. De hydraulische belastingen zijn ook de basis voor de gevoeligheidsanalyses (hoofdstuk 6) en de aanvullende analyses (hoofdstuk 7).

### 3.2 Methode

#### 3.2.1 Databases fysica

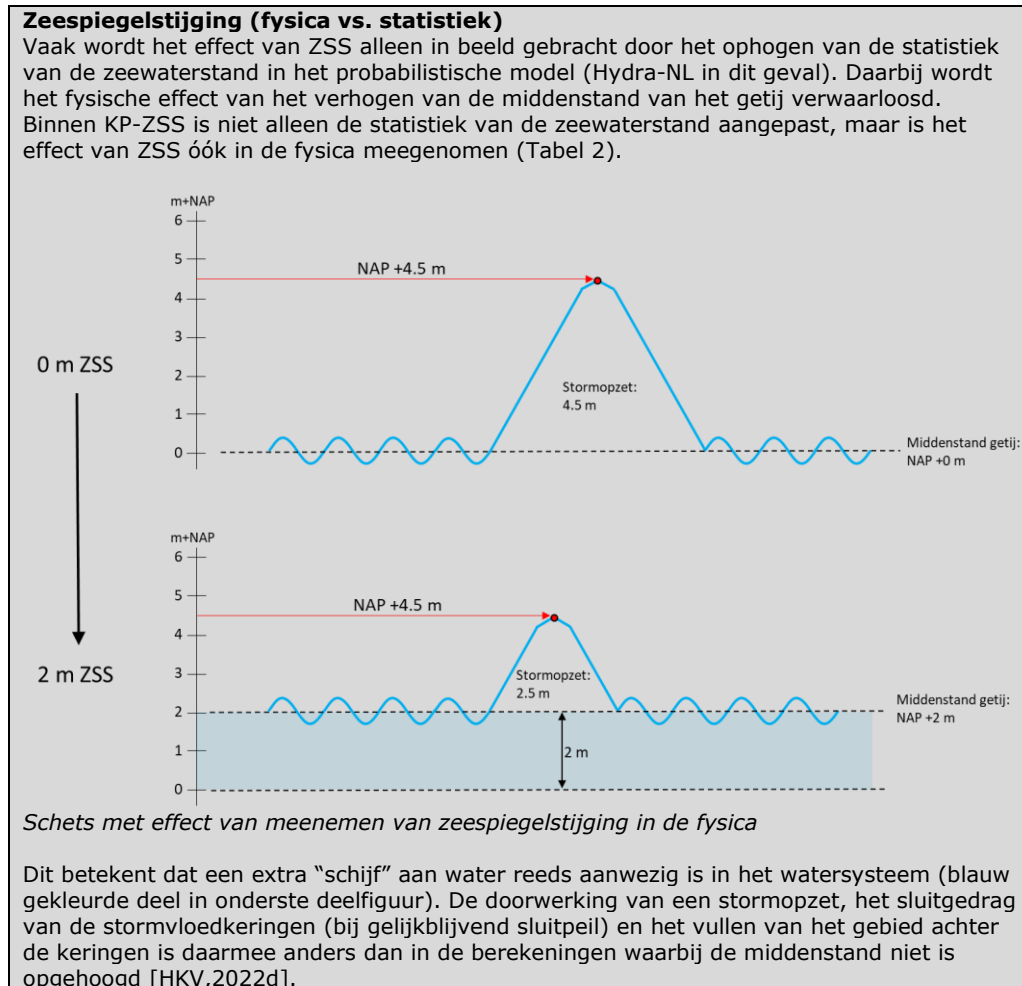
De hydraulische belastingen voor de RMM, HIJ en het rivierengebied zijn berekend met Hydra-NL. Hiervoor zijn databases fysica beschikbaar gesteld, waarin reeds een bepaalde mate van zeespiegelstijging is verwerkt. Deze databases fysica bevatten waterstanden en golfparameters voor verschillende combinaties van rivierafvoer, zeewaterstanden, windcondities en toestanden van de stormvloedkeringen (open of dicht).

De beschikbare databases fysica voor RMM, HIJ en rivieren bevatten resultaten van waterstands- en golfberekeningen bij 5, 50, 100, 200 en 300 cm zeespiegelstijging (t.o.v. 1995) [HKV,2022c]. De databases met 200 en 300 cm zijn gebaseerd op berekeningen met een verhoogd sluitpeil van de Europoortkering van 125 cm en 250 cm respectievelijk (t.o.v. de waarden van NAP +3 m bij Rotterdam en NAP +2,9m bij Dordrecht in de huidige situatie). In die berekeningen is ook het waterstandsniveau bij Rak Noord voor berging op het Volkerak-Zoommeer (standaard NAP +2,6 m) verhoogd met dezelfde toename van het sluitpeil (125 cm of 250 cm). Hetzelfde geldt voor het sluitpeil van de Hollandsche IJsselkering (zie HKV, 2022).

De genoemde zeespiegelstijgingen in deze databases komen niet voor alle tijdlijnen overeen met de waarden in 2050 t/m 2200. In die situaties is voor de meest representatieve database fysica gekozen bij het uitvoeren van de berekeningen met Hydra-NL (zie het tekstkader in Figuur 6 paragraaf 3.2.2 voor details).

De waterstandsberekeningen voor de databases fysica gaan uit van een bepaalde afvoerverdeling. Dat wil zeggen dat de regelwerken op de splitsingspunten (Pannerdensch Kop en IJsselkop) zo zijn ingesteld dat bij een vastgesteld afvoerniveau de beleidsmatige afvoerverdeling wordt verkregen. Dat heeft als doel dat bij die afvoer de Nederrijn-Lek zoveel mogelijk wordt ontzien. Voor de database bij 5 cm ZSS (Referentie 2023) is hierbij uitgegaan van een vaste afvoerverdeling die ingesteld is op 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith (afvoerverdeling "Vast16000"). Bij de overige databases is hierbij uitgegaan van een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s (afvoerverdeling "Vast18000"). De afvoerverdeling, dat wil zeggen de instelling van de regelwerken, heeft echter ook invloed op andere afvoerniveaus. Zie bijlage A voor de precieze

afvoerverdeling over de verschillende takken. In de praktijk geldt dat bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en de instelling Vast18000 minder water over de Nederrijn-Lek stroomt dan bij diezelfde 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith in combinatie met de instelling Vast16000 [RWS en MinIenW,2020].



Figuur 6: Tekstkader met toelichting op meenemen ZSS in de fysica vs. in de statistiek.

### 3.2.2 Tijdlijnen en zichtjaren

Hydra-NL combineert de databases fysica zoals hierboven beschreven met de statistiek van (de kans van voorkomen van bepaalde) rivierafvoeren, zeewaterstanden, windcondities en toestanden van de stormvloedkeringen. Zodoende kan de kans worden berekend dat bepaalde hydraulische belastingen (als gevolg van waterstanden en golven) optreden. Met andere woorden, door het combineren van de databases fysica met de statistiek berekent Hydra-NL de frequentielijnen voor waterstand en HBN (golfoverslag).

Bij de Hydra-NL berekeningen is steeds, naast de database fysica, ook de statistiek aangepast voor de betreffende combinatie van tijdlijn en zichtjaar. Dit betreft de afvoerstatistiek voor de Rijn en de Maas en de zeewaterstandsstatistiek. Deze laatste is aangepast door uit te gaan van de zeespiegelstijging bij die tijdlijn en zichtjaar. Een en ander is samengevat in Tabel 2 hieronder.



Tabel 2: Overzicht gebruikte databases fysica en statistiek [HKV, 2021a] per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Tijdlijn	Database fysica			Statistiek	
		Zeespiegelstijging	Aanpassing sluitpeil	Afvoer-verdeling	Zeespiegelstijging	Afvoer-statistiek
2023	n.v.t.	5 cm	-	Vast16000	5 cm	Ref2023
2050	Laag	5 cm	-	Vast16000	25 cm	GL2050
	Gematigd	5 cm	-	Vast16000	25 cm	GL2050
	Extreem	5 cm	-	Vast16000	25 cm	WH2050
	Zeer Extreem	50 cm	-	Vast18000	50 cm	WH2050
2100	Laag	50 cm	-	Vast18000	50 cm	GL2050
	Gematigd	50 cm	-	Vast18000	75 cm	GL2100
	Extreem	100 cm	-	Vast18000	100 cm	WH2100
	Zeer Extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	WH2100
2150	Laag	50 cm	-	Vast18000	75 cm	GL2050
	Gematigd	100 cm	-	Vast18000	131 cm	GL2150
	Extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	180 cm	WH2150
	Zeer Extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	350 cm	WH2150
2200	Laag	100 cm	-	Vast18000	100 cm	GL2050
	Gematigd	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	GL2200
	Extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	300 cm	WH2200
	Zeer Extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	540 cm	WH2200

Bij Tabel 2 merken we het volgende op:

- De zeespiegelstijging die binnen Hydra-NL is gehanteerd voor het aanpassen van de zeewaterstandstatistiek (één na laatste kolom) komt in alle gevallen overeen met de zeespiegelstijging voor de betreffende tijdlijn en zichtjaar volgens de uitgangspunten binnen dit project.
- De zeespiegelstijging in de database fysica (derde kolom) komt niet in alle gevallen exact overeen met deze waarde. Telkens is de meest representatieve database gekozen door de dichtstbijzijnde zeespiegelstijging te nemen. Voor 2150 – Extreem geldt bijvoorbeeld een zeespiegelstijging van 180 cm, waarbij uitgegaan is van de database fysica met 200 cm zeespiegelstijging (meest representatieve beschikbare database). Daar waar de zeespiegelstijging precies tussen twee beschikbare databases in ligt, is naar beneden afgerond. Voorbeeld: voor 2100 – Gematigd (75 cm) is uitgegaan van de database fysica met 50 cm zeespiegelstijging. Aangezien in de statistiek wel met de juiste ZSS is gerekend, is de fout die hierdoor wordt gemaakt naar verwachting klein. In elk geval (veel) kleiner dan het verschil tussen de ZSS in de database en de ZSS in de tijdlijn.
- In het bijzonder merken we op dat géén database fysica beschikbaar is met een ZSS van 540 cm, zoals benodigd voor zichtjaar 2200 in tijdlijn Extreem. Bij de interpretatie van de bijbehorende resultaten dient hier rekening mee te worden gehouden. Specifiek voor een ZSS van 5,40 m mist dus een deel van het volume aan water in het gebied, omdat "slechts" 3 m van de ZSS is meegenomen in de bijbehorende database met fysica (zie ook het tekstkader op pagina 23). In de statistiek is wél rekening gehouden met een ZSS van 5,40 m. Zoals hierboven opgemerkt, is de fout die hierdoor wordt gemaakt naar verwachting (veel) kleiner dan het verschil tussen de ZSS in de database en de ZSS in de tijdlijn (in dit geval 2,4 m). De fout zal hier echter wel groter zijn dan bij de overige

situaties, aangezien het verschil tussen ZSS database en ZSS tijdlijn groter is. Naar schatting zal de fout in lokale waterstanden maximaal orde grootte enkele decimeters zijn (dat is echter niet verder onderzocht). Voor dit extreme geval wordt dit als een voldoende nauwkeurige afschatting gezien binnen KP-ZSS en accepteren we deze benadering.

Overigens is het gevolg van deze keuze ook, dat in de berekening voor 5,40 m met een lager sluitpeil is gerekend dan passend zou zijn bij deze situatie. In het bereik van relevante terugkeertijden is het effect daarvan naar verwachting wel beperkt (zie ook de gevoeligheidsanalyse t.a.v. het sluitpeil in paragraaf 6.3). Het leidt echter wel tot een te hoge sluitfrequentie voor 2200 Zeer Extreem, en geeft ook ongewenste effecten in de gevoeligheidsanalyse voor de faalkans (hetgeen wordt beschreven in paragraaf 6.2).

- Zoals reeds aangegeven in paragraaf 3.2.1, zijn de databases met 200 en 300 cm zeespiegelstijging gebaseerd op berekeningen met een aangepast (verhoogd) sluitpeil. Verder geldt dat alleen de database met 5 cm zeespiegelstijging ten opzichte van 1995 uitgaat van de afvoerverdeling Vast16000, alle overige databases gaan uit van de afvoerverdeling Vast18000.
- De rivierafvoerstatistiek voor 2023, 2100 en 2200 (GL en WH) was reeds beschikbaar bij aanvang van dit project [HKV, 2021a]. De afvoerstatistiek voor 2050 en 2150 is binnen dit project afgeleid voor de berekeningen met Hydra-NL. Dit is beschreven in bijlage B. Merk op dat de afvoerstatistiek voor de tijdlijnen Gematigd en Extreem altijd de afvoerstatistiek voor het betreffende zichtjaar betreft volgens scenario GL (bij Gematigd) of WH (bij Extreem). De afvoerstatistiek voor tijdlijn Laag is in alle zichtjaren GL2050, de afvoerstatistiek voor tijdlijn Zeer Extreem is in alle zichtjaren gelijk genomen aan die voor tijdlijn Extreem. Een direct gevolg hiervan is dat in 2050 de tijdlijnen Laag en Gematigd exact dezelfde instellingen hebben en in alle gevallen dus dezelfde hydraulische belastingen opleveren.

### 3.2.3 Rekeninstellingen

De berekeningen zijn uitgevoerd met Hydra-NL versie 2.8.4. In principe is gebruik gemaakt van de standaardinstellingen voor WBI2017, waarbij echter de database, de zeespiegelstijging en de afvoerstatistiek telkens zijn aangepast voor de betreffende tijdlijn en zichtjaar op de manier zoals beschreven in paragraaf 3.2.2. Verder is voor de basisberekeningen gerekend:

- zonder modelonzekerheid op de waterstand en golfparameters;
- inclusief statistische onzekerheid;
- met aftoppen van de Rijnafvoer (Lobith) bij 22.000 m<sup>3</sup>/s;
- zonder aftoppen van de Maasafvoer. De keringen in de Maasvallei zijn als overstroombaar beschouwd en komen overeen met de uitgangspunten van het OI2014. Dit gaat via het gebruik van de statistiek bij Lith op het Maasgedomineerde deel van de Rijn-Maasmonding (deze is afgeleid op basis van de koppeling tussen Borgharen en Lith waarin deze aanname is verwerkt);
- met een faalkans voor de Europoortkering van 1/100<sup>e</sup> per sluitvraag; en
- met een faalkans voor de Hollandsche IJsselkering van 1/2000<sup>e</sup> per sluitvraag.

Hierbij geldt dat het rekenen zonder modelonzekerheid, het aftoppen van de Rijnafvoer en de faalkans voor de Hollandsche IJsselkering afwijkt van de standaardinstellingen van het BOI2023.

Voor de berekening van het HBN voor golfoverslag is een kritiek golfoverslagdebiet nodig. Hiervoor is een vaste waarde gehanteerd van 5 l/s/m, onder de aanname dat vanaf 2050 alle dijken op orde zijn en voldoen aan dit kritiek golfoverslagdebiet. Bij het bepalen van de hydraulische belastingen voor kunstwerken is een groter kritiek

overslagdebiet gehanteerd van 10 l/s/m. Het betreft hier uniform landelijk gemiddelde waarden, die voor de scope van deze studie acceptabel zijn.

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

### 3.3 Resultaten hydraulische belastingen

De hydraulische belastingen zijn berekend voor in totaal 1132 dijkvakken en 35 kunstwerken. Het midden van elk OKADER-dijkvak is gekoppeld aan de dichtstbijzijnde Hydra-NL locatie uit de beschikbare databases fysica, die een hoge locatie-dichtheid hebben (elke 100 m). Het gebied is opgedeeld in drie deelgebieden, omdat de hydraulische belastingmodellen in deze gebieden van elkaar verschillen. Zo is in het gebied BER-RIJN de afvoer van de Rijntakken dominant (boven die van de Maas), terwijl dit in het gebied BER-MAAS juist omgekeerd is.<sup>5</sup> Het deelgebied van de Hollandsche IJssel (HIJ) is het meest complex, omdat deze tak achter twee stormvloedkeringen ligt (de Maeslantkering en de Hollandsche IJsselkering) en omdat hier aanvullend rekening gehouden wordt met het effect van waterbezwaar<sup>6</sup>. Het waterbezwaar is in de productieberekeningen verwerkt als een extra modus van de Hollandsche IJsselkering (alle belastingcombinaties worden doorgerekend voor een falende kering, een kering die correct functioneert zonder waterbezwaar en een kering die correct functioneert waarbij waterbezwaar optreedt). Bij een correct functionerende kering is er in het probabilistisch model dus sprake van een bepaalde kans op waterbezwaar (namelijk 1/3), aangezien het niet altijd hoeft te regenen bij storm op zee. In de berekeningen met waterbezwaar wordt rekening gehouden met een mogelijke afkondiging van een maalstop. Voor deze afkondiging wordt de waterstand op de Hollandsche IJssel bij Gouda en bij Krimpen geëvalueerd. Het voert hier te ver om alle details over het probabilistische model van de HIJ te benoemen, hierover is een uitgebreide rapportage beschikbaar ([HKV, 2022] en [Groeneweg et. al., 2022]).

De verdeling van de OKADER-dijkvakken en kunstwerken over de drie deelgebieden is samengevat in Tabel 3 en gevisualiseerd in Figuur 7 en Figuur 8.

Tabel 3: Aantal dijkvakken en kunstwerken per watersysteem.

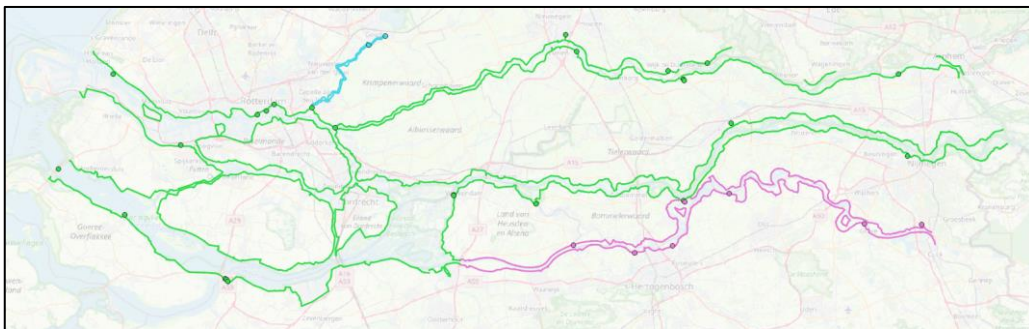
Watersysteem	Dijkvakken	Kunstwerken
BER-RIJN (groen)	877	25
BER-MAAS (paars)	215	7
HIJ (blauw)	40	2

<sup>5</sup> In het Rijndominante deel wordt gerekend met de Rijn als afvoerstochast. De databases fysica bevatten waterstanden en golven als functie van (o.a.) de Rijnafoer. In de onderliggende waterstandsberekeningen met SOBEK is per Rijnafoer een bijbehorende Maasafvoer gekozen. In het Maasdominante deel is dat precies andersom: daar is de Maas de afvoerstochast en zijn de onderliggende waterstandsberekeningen uitgevoerd voor een aantal Maasafvoeren met telkens een bijbehorende Rijnafoer. Reden daarvoor is dat in het Rijndominante deel de waterstanden voornamelijk worden bepaald door de Rijnafoer en in mindere mate door de Maasafvoer (en in het Maasdominante deel uiteraard andersom).

<sup>6</sup> Water dat door diverse oorzaken de polder instroomt en door spuien, of bemaling geloosd moet worden naar de Hollandsche IJssel.



Figuur 7: Overzicht van de OKADER dijkvakken (centroïde van een dijkvak): Groen zijn de OKADER-dijkvakken die zijn gekoppeld aan de BER-Rijn databases, Blauwe vakken aan de HIJ databases en paarse dijkvakken aan de BER-Maas databases.



Figuur 8: Overzicht van de locaties van de kunstwerken (zwarte omcirkelde punten).

De kunstwerken betreffen de stormvloedkeringen (zoals de Maeslantkering en de Hollandsche IJsselkering) en de sluisen (bijv. de Haringvlietssluis, de Volkeraksluis en de Waaiersluis).

Eerst bespreken we de resultaten van de berekeningen voor de waterstanden (paragraaf 3.3.1), gevolgd door de resultaten met de hydraulische belastingniveaus (HBN) in paragraaf 3.3.2. Voor zowel de waterstand als het HBN laten we diverse typen (voorbeeld)figuren zien. De figuren en resultaten voor alle dijkvakken zijn beschikbaar in het opleverdossier en worden ontsloten in een webviewer.

Aangezien het gaat om een beleidsstudie, is met name het totaalbeeld van de Rijn-Maasmonding, de Hollandsche IJssel en het Rivierengebied relevant. Daarbij zijn niet zozeer de absolute uitkomsten van belang (het komt binnen de scope van deze studie niet op een centimeter nauwkeurig), maar met name de relatieve verschillen. Die verschillen ontstaan door andere keuzes in de uitgangspunten voor de verschillende tijdlijnen en zichtjaren (ZSS, afvoerscenario, sluitpeil). Om het totaalbeeld te krijgen, is daarom gekeken naar de (relatieve) verschillen in "waterstand bij de norm (WBN)" en in het "hydraulisch belastingniveau (HBN)"<sup>7</sup> tussen de tijdlijnen door deze steeds te vergelijken met tijdlijn Laag. De resultaten van deze vergelijking voor WBN en HBN worden in het vervolg respectievelijk besproken onder het kopje waterstanden en onder het kopje hydraulisch belastingniveau.

<sup>7</sup> Voor het verschil in waterstand kijken we bij de ondergrens van het normtraject waartoe een locatie behoort. Voor het verschil in hydraulisch belastingniveau (golfoverslag) hanteren we ook de ondergrens, maar houden we aanvullend rekening met de factor voor de faalkansbegroting (24% voor golfoverslag) en de lengte-effect factor (N).

### 3.3.1 Waterstanden

In dit hoofdstuk gaan we nader in op de resultaten voor de waterstanden bij de overstromingskansnorm en andere herhalingstijden. De resultaten voor het hydraulisch belastingniveau (HBN), waarbij zowel overloop en golfoverslag is meegenomen, bespreken we later in dit hoofdstuk (zie paragraaf 3.3.2). De resultaten met de impact van de verschillende tijdlijnen en zichtjaren bespreken we aan de hand van verschillende typen figuren: langsfiguren voor het globale ruimtelijke beeld, frequentielijnen voor individuele dijkvakken en staafdiagrammen voor het kunnen trekken van conclusies op hoofdlijnen.

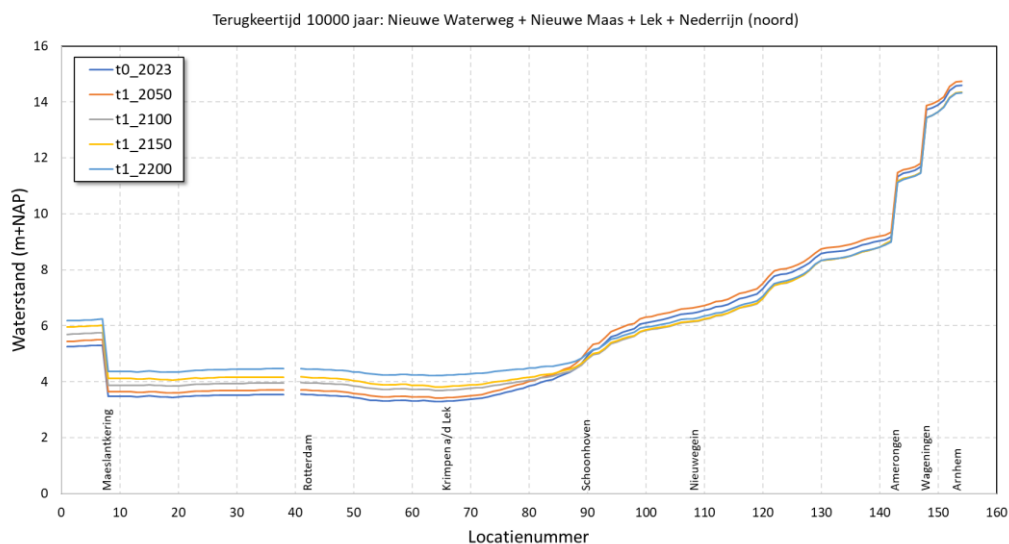
#### Langsverlopen

Om te verifiëren of de juiste berekeningen zijn gemaakt en of de resultaten logische verlopen laten zien, is gekozen om zogenaamde langsfiguren te presenteren. In elke langsfiguur zijn resultaten gevisualiseerd voor een logische aaneenschakeling van locaties van bovenstroomse naar benedenstroomse richting. In totaal zijn dergelijke langsfiguren gemaakt voor verschillende tracés (zie Figuur 9).



Figuur 9: Tracés die zijn gebruikt voor de visualisering van de langsfiguren.

Een langsfiguur bevat de resultaten voor één tijdlijn voor 5 zichtjaren (inclusief de referentiesituatie), bij een vaste herhalingstijd. Een voorbeeld is te zien in Figuur 10.



Figuur 10: Langsfiguur voor rechteroever van Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek – Nederrijn, met waterstanden voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Laag, plus de referentiesituatie (2023) voor  $T = 10^4$  jaar.

De langfiguren zijn gebruikt om de resultaten *op hoofdlijnen* te controleren en dienen vooral als plausibiliteitscontrole. Ze zijn gemaakt bij een vaste terugkeertijd om sprongen door overgangen in de normen te vermijden en ze corresponderen dus niet altijd met de ondergrensnorm van een bepaalde locatie. Zaken die direct duidelijk worden uit deze figuren zijn b.v. missende resultaten (berekeningen die mislukt zijn), of er sprake is van een logisch verloop van boven- naar benedenstroomse richting, de locatie van de stormvloedkeringen, de juiste mate van ZSS, etc. Voor de paar berekeningen die geen uitkomst geven, zijn de hydraulische belastingen voor gebruik in OKADER overgenomen uit de dichtstbijzijnde bovenstroomse locatie.

De twee "sprongen" die bovenstrooms op de Nederrijn-Lek zichtbaar zijn, worden veroorzaakt door normtrajecten die van elkaar gescheiden zijn door tussenliggende hoge gronden. De locaties zijn opeenvolgend, maar op deze plekken zitten er in werkelijkheid meerdere kilometers tussen.

Uit Figuur 10 is bijvoorbeeld goed te zien dat benedenstrooms (links) de invloed van een toenemende ZSS in de verschillende jaren evident zichtbaar is. Hoe verder in de toekomst, hoe meer ZSS en ook hoe hoger de waterstanden. Verder is de invloed van de Maeslantkering goed zichtbaar. De waterstanden daar vlak achter liggen beduidend lager dan de buitenwaterstanden bij  $T = 10^4$  jaar.

Aan de bovenstroomse zijde, waar juist de afvoer de belangrijkste rol speelt, is niet langer sprake van een duidelijke toename van de waterstand als het zichtjaar groter wordt. Dit wordt veroorzaakt door het beleidsuitgangspunt van het ontzien van de Nederrijn-Lek in combinatie met een andere verdeling van de afvoer over de splitsingspunten in de verschillende zichtjaren. Zo zijn de waterstanden voor zichtjaar 2050 uiteindelijk hoger dan die in de referentiesituatie van 2023, maar ook hoger dan die voor zichtjaar 2200. Kortgezegd: de afvoeren nemen weliswaar toe met de zichtjaren, maar de gehanteerde afvoerverdeling voor de referentie en 2050 is voor dit traject ongunstiger dan de afvoerverdeling voor zichtjaar 2100 en verder. In het vervolg van dit hoofdstuk gaan we nader in op de resultaten voor individuele locaties in de vorm van frequentielijnen, waar we dit gedrag ook in de frequentielijnen duidelijk terug zien komen (zie de bespreking van Figuur 18).

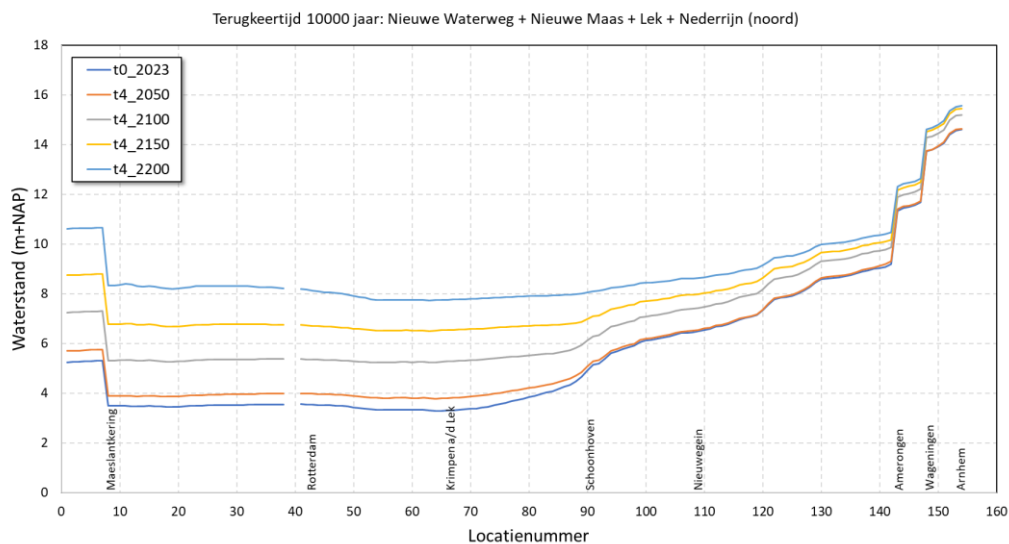
De mate van ZSS is te verifiëren door helemaal links in de figuur de waterstandstoenames na te gaan. Omdat deze locaties buiten de Europoortkering liggen, is de verwachting dat deze locaties vrijwel direct de ZSS volgen. De ZSS tussen de referentiesituatie 2023 en zichtjaar 2200 voor tijdlijn Laag bedraagt 1 m, wat we ook terug zien in de waterstanden voor die locaties. Dit komt dus goed overeen.

Tot slot zien we dat de afstand tussen de verschillende lijnen (i.e. zichtjaren) min of meer hetzelfde is voor alle locaties ten westen van Krimpen a/d Lek. Vanaf het begin van de Lek begint de invloed van de ZSS uit te dempen en worden de afvoeren steeds belangrijker. Deze overgang tussen de invloed van de zee en de afvoer schuift steeds verder op naar het oosten hoe extremer het scenario waarnaar wordt gekeken.

In Figuur 11 staan de resultaten voor hetzelfde tracé, maar dan voor tijdlijn Zeer Extreem. De verschillen tussen de zichtjaren nemen aanzienlijk toe, wat ook logisch is, aangezien de stappen in de ZSS groter zijn voor deze tijdlijn. Voor de locaties aan de linkerzijde van de figuur zien we de ZSS één op één doorwerken: 0,5 m tussen 2023 en 2050; 2,0 m tussen de 2023 en zichtjaar 2100; 3,50 m tussen 2023 en zichtjaar 2150 en 5,4 m tussen 2023 en zichtjaar 2200. De invloed van de Maeslantkering is wederom goed zichtbaar. Zoals eerder aangegeven is voor tijdlijn Zeer Extreem in 2100 gerekend met een sluitpeilverhoging van 1,25 m en in 2150 en 2200 met een sluitpeilverhoging van 2,50 m. Vlak achter de kering is de invloed daarvan echter zeer beperkt op de waterstanden bij  $T = 10^4$  jaar (zie ook de

gevoeligheidsanalyse van het sluitpeil in paragraaf 6.3). De sluitpeilverhoging heeft dus nauwelijks effect op de sprong bij de Maeslantkering (links in de figuur).

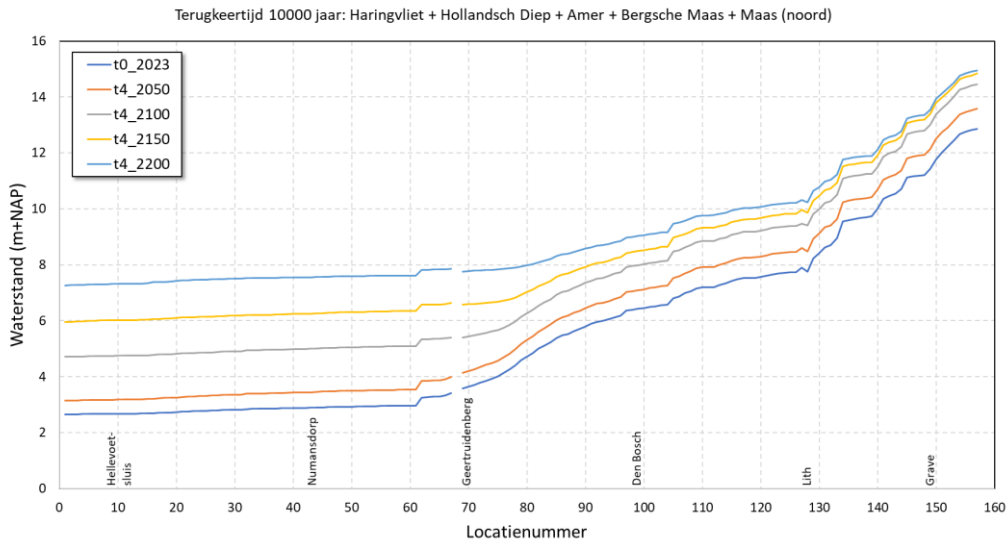
Uit de figuur is verder goed te zien dat de invloed van ZSS tot bovenstrooms op de Nederrijn-Lek bij Amerongen doordringt. Waar de waterstanden voor alle zichtjaren in tijdlijn Laag bij Schoonhoven nog min of meer gelijk zijn (Figuur 10), is de spreiding in de waterstanden in tijdlijn Zeer Extreem bij Schoonhoven duidelijk zichtbaar. Verder nemen de waterstanden nu ook bovenstrooms (rechts) altijd toe met het zichtjaar (i.t.t. tijdlijn Laag (Figuur 10)). Hier is namelijk wel voor alle zichtjaren dezelfde afvoerverdeling gehanteerd.



Figuur 11: Langsfiguur voor rechteroever van Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek – Nederrijn, met waterstanden voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Zeer Extreem, plus de referentiesituatie (2023) voor  $T = 10^4$  jaar.

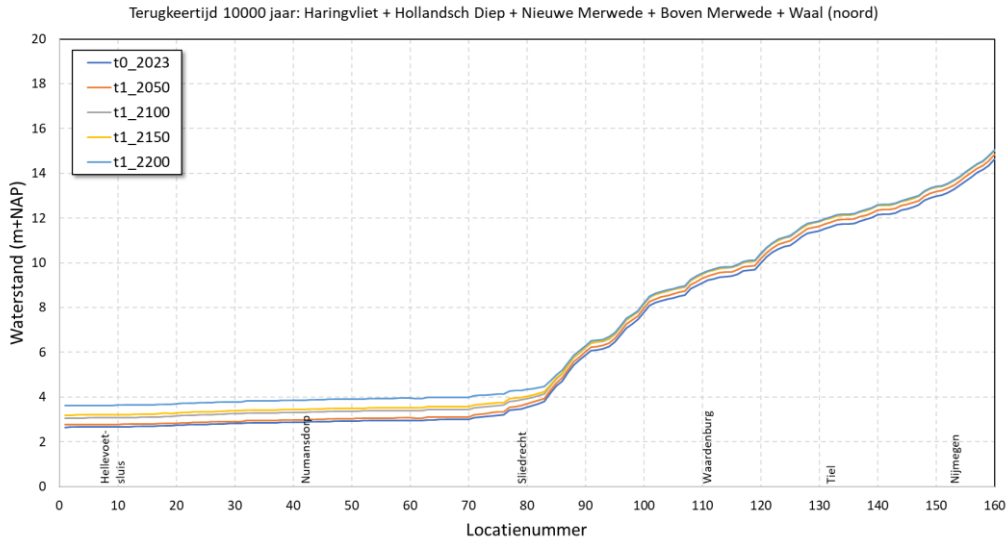
In Figuur 12 is het tracé via het Haringvliet in bovenstroomse richting via de Maas gevisualiseerd voor tijdlijn Zeer Extreem. Net als op de Waal is zichtbaar tot hoe ver bovenstrooms de invloed van de ZSS reikt. Tot aan Geertruidenberg werkt het effect van ZSS<sup>8</sup> nagenoeg rechtstreeks door in een toename van de waterstanden. Dit effect dempt vervolgens richting Den Bosch behoorlijk uit, met name voor de hogere ZSS (de verticale afstand tussen de lijnen neemt af). Tussen Den Bosch en Lith neemt de invloed van de zee langzaam af, met name voor de latere zichtjaren. Bovenstrooms van Lith is het met name de verandering van de afvoerstatistiek die nog voor verhoging zorgt, het is immers het enige overblijvende verschil tussen de berekeningen en dit verschil blijft over dit deel van de Maas ook vrij constant.

<sup>8</sup> Merk op dat ook de afvoer op het Haringvliet/Hollandsch Diep een belangrijke rol speelt: het is één van de redenen waarom dit gebied volloopt als de stormvloedkeringen gesloten zijn.



Figuur 12: Langsfiguur voor rechteroever van Haringvliet – Hollandsch Diep – Amer – Bergsche Maas – Maas, met waterstanden voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Zeer Extreem, plus de referentiesituatie (2023) voor  $T = 10^4$  jaar.

In Figuur 13 is een voorbeeld te zien van tijdlijn Laag, maar ditmaal voor een tracé via het Hollandsch Diep richting de Waal.

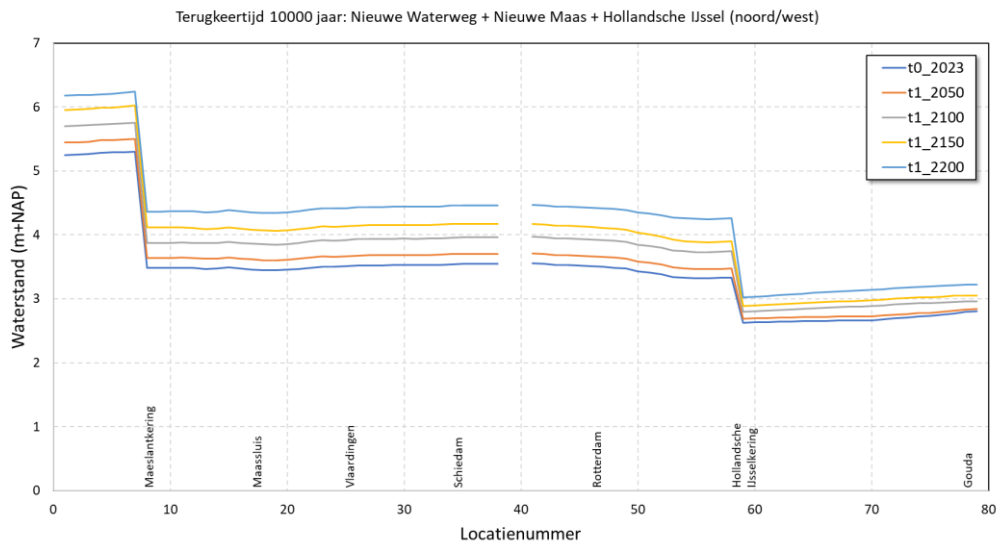


Figuur 13: Langsfiguur voor rechteroever van Haringvliet – Hollandsch Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede – Waal, met waterstanden voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Laag, plus de referentiesituatie (2023) voor  $T = 10^4$  jaar.

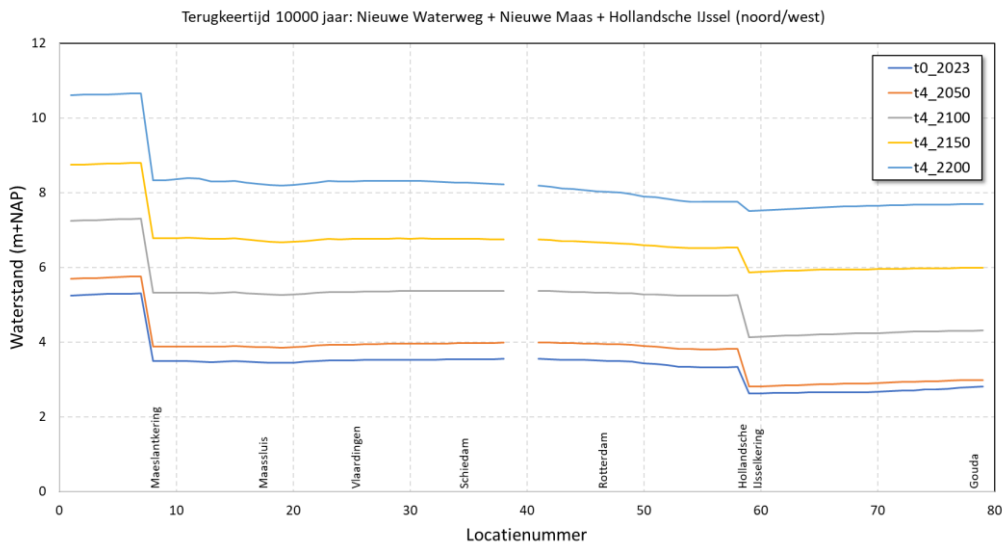
Het gedrag voor de bovenstroomse locaties blijft hier in de verschillende zichtjaren hetzelfde patroon volgen en elkaar niet kruisen (in tegenstelling tot de Nederrijn-Lek). Een groter zichtjaar betekent langs het hele traject ook hogere waterstanden.

Ook voor het tracé van Hoek van Holland naar de Hollandsche IJssel tot aan Gouda zijn langsfiguren beschikbaar (Figuur 14 voor tijdlijn Laag en Figuur 15 voor tijdlijn Zeer Extreem).





Figuur 14: Langsfiguur voor rechtoever van de Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Hollandsche IJssel, met waterstanden voor de 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Laag, plus de referentiesituatie (2023) voor  $T = 10^4$  jaar.



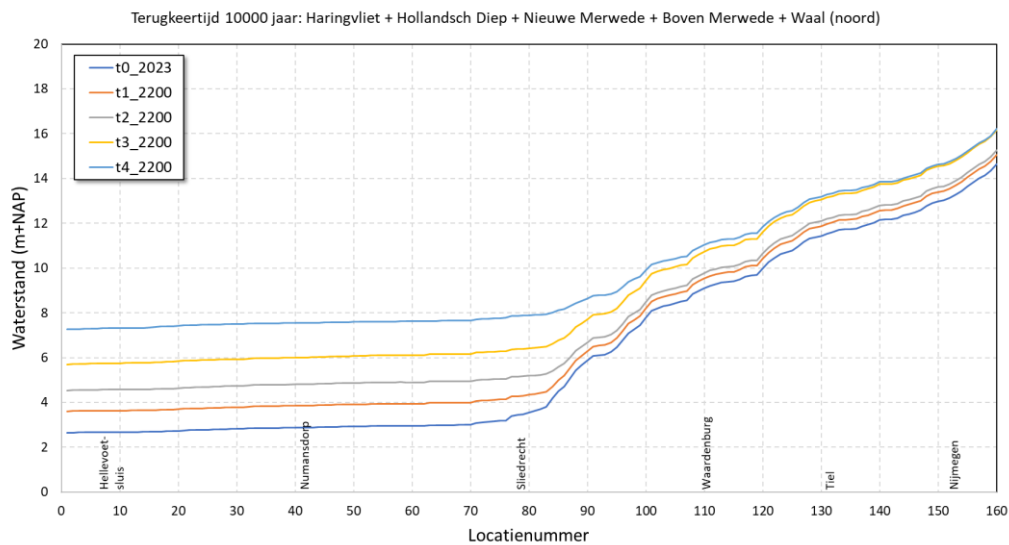
Figuur 15: Langsfiguur voor rechtoever van de Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Hollandsche IJssel, met waterstanden voor de 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Zeer Extreem, plus de referentiesituatie (2023) voor  $T = 10^4$  jaar.

Uit Figuur 14 zien we dat de Hollandsche IJsselkering (HIJK) in tijdlijn Laag nog zorgt voor aanzienlijke verlaging van de waterstanden bij de norm ( $T = 10^4$  jaar). De verlaging is groter naarmate de ZSS groter is: in zichtjaar 2023 ongeveer 0,5 m en toenemend tot ongeveer 1,3 m in zichtjaar 2200. De waterstanden op de Hollandsche IJssel nemen in de richting van Gouda nog een klein beetje toe onder invloed van de wind.

In tijdlijn Zeer Extreem (Figuur 15) zien we dat het effect van de HIJK afneemt, zeker in zichtjaar 2200. De waterstanden zijn dan dusdanig hoog dat de HIJK overloopt met zulke grote hoeveelheden water, dat de Hollandsche IJssel als een badkuip volloopt tot bijna het niveau buiten de HIJK. Het verlagende effect van de HIJK is het grootst in zichtjaar 2100 bij deze terugkeertijd, wanneer de stormvloedkering nog niet overloopt. Het tijdig "afkoppelen" van het watersysteem van de

Hollandsche IJssel is dus een belangrijk aandachtspunt voor KP-ZSS en het vervolg. De Europoortkering is net als de HIJK overstroombaar in het model: zodra de zeewaterstand boven de hoogte van de kering komt, loopt het erover<sup>9</sup>. Bij de EPK is het effect van het overstromen minder goed zichtbaar in de figuur. Waar bij de HIJK de sprong in Figuur 15 duidelijk kleiner wordt bij toenemende ZSS is dat bij de EPK niet het geval. Vermoedelijk heeft dat te maken met het feit dat het overlopen bij de EPK over een kortere duur plaatsvindt en het bergend oppervlak achter de stormvloedkering veel groter is dan bij de HIJK. Dat is verder niet nader onderzocht.

In onderstaande figuren is het zichtjaar vastgezet en de invloed van de tijdlijn gevisualiseerd. In Figuur 16 is hiervan een voorbeeld voor het traject richting de Waal opgenomen bij een terugkeertijd van  $T = 10^4$  jaar voor zichtjaar 2200. De benaming van de tijdlijnen in de legenda (t0 t/m t4) komen overeen met respectievelijk de referentiesituatie en de tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem.



Figuur 16: Langsfiguur voor rechteroever van Haringvliet – Hollandsch Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede – Waal, met waterstanden voor de 4 verschillende tijdlijnen in zichtjaar 2200, plus de referentiesituatie (2023) voor  $T = 10^4$  jaar.

Aan de zeezijde zien we de onderlinge verschillen in de ZSS tussen de tijdlijnen terug. De verschillen nemen elke keer met 1 m toe (wat overeenkomt met de ZSS). De toename tussen Extreem en Zeer Extreem is groter, omdat de sprong in ZSS dan 2,4m is. Dat laatste verschil van 2,4 m is minder direct te koppelen aan de toename van de ZSS, omdat in de berekeningen dezelfde databases fysica (met ZSS 3 m) is gehanteerd en alleen in Hydra-NL een waarde van 5,40 m in de statistiek is gebruikt om naar 5,40 m ZSS te komen (zie ook de toelichting bij de uitgangspunten in hoofdstuk 3.2.2. o.a. Figuur 6).

Samenvattend laat de analyse van deze langsfiguren (waarvan we in deze rapportage slechts enkele voorbeelden laten zien) geen onregelmatigheden, of onlogische resultaten zien. De geconstateerde patronen zijn goed verklaarbaar van uit de verschillen tussen tijdlijnen en zichtjaren (effect van o.a. ZSS en afvoer). Dit geeft vertrouwen in de resultaten van de uitgevoerde berekeningen.

<sup>9</sup> De Europoortkering bestaat uit de Hartelkering (in het Hartelkanaal met een kerende hoogte van NAP+3 m), de Maeslantkering (in de Nieuwe Waterweg met een kerende hoogte van NAP+5 m) en de verbindende kering (EPK I tussen Maeslantkering en Rozenburg en EPK II tussen Rozenburg en Hartelkering, die beiden niet overstroombaar zijn gemodelleerd).

## Frequentielijnen

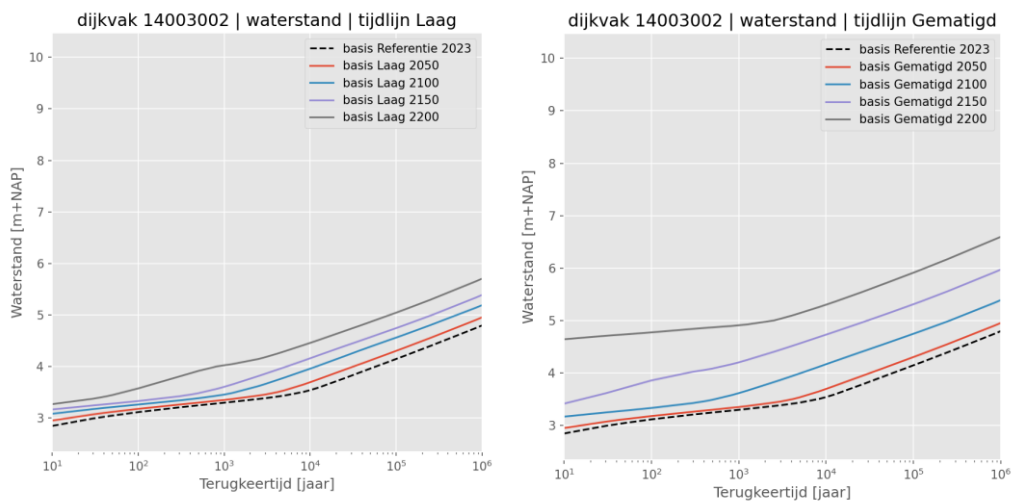
Voor de tijdlijnen – Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem – zijn waterstands-frequentielijnen gemaakt, die vooral als plausibiliteitscontrole voor de resultaten dienen. Enkele algemene observaties over de figuren met waterstandsfrequentielijnen in de Rijn-Maasmonding zijn:

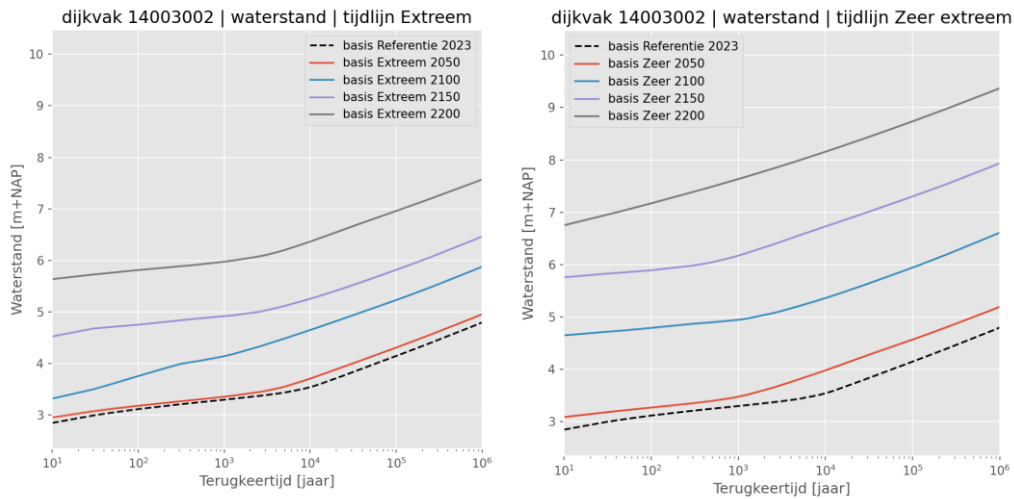
- Typisch bestaan de frequentielijnen in de buurt van de Europoortkering/Maeslantkering en Hartelkering, plus de dijken/verhogingen ertussen (EPK) uit twee delen: bij de lagere terugkeertijden (grootweg voor  $<T = 10^3$  jaar) loopt de helling wat vlakker (de EPK doet zijn werk en geeft verlaging van de waterstanden) en bij de hogere terugkeertijden (grootweg voor  $>T = 10^3$  jaar) neemt de helling toe, omdat dan de faalkans van de EPK (en daarmee de open keringtoestand) gaat domineren in de resultaten. De locatie van de knik tussen beide delen van de frequentielijn hangt af van de tijdlijn, het zichtjaar, de faalkans en of naar waterstand of HBN wordt gekeken (zie ook paragraaf 6.2 voor aanvullende analyses). Hoe extremer de situatie, hoe vaker de SVK-en moeten sluiten, hoe vaker sprake zal zijn van falen ervan en dus hoe vaker de waterstanden bij een open-kering situatie een rol gaan spelen.
- De waterstanden lopen binnen een tijdlijn eigenlijk altijd op voor een hoger zichtjaar, conform wat we ook al geconstateerd hadden op basis van de langfiguren.
- In verreweg de meeste situaties liggen voor hetzelfde zichtjaar de resultaten voor een extremere tijdlijn hoger dan die van een minder extreme tijdlijn.
- Voor bovenstrooms in het gebied gelegen locaties op de Nederrijn-Lek is het effect van een andere afvoerverdeling en het aftoppen goed terug te zien, zie bijvoorbeeld Figuur 18.

In het vervolg bespreken we de resultaten voor enkele karakteristieke locaties. Dit zijn slechts voorbeelden, maar deze figuren zijn beschikbaar voor alle locaties in het gebied.

## Enkele voorbeeldlocaties

Voor voorbeeldlocatie Rotterdam (normtraject 14-2 langs de oostzijde van de Nieuwe Maas bij de Erasmusbrug) zijn frequentielijnen gevisualiseerd in Figuur 17. Deze resultaten komen goed overeen met wat we verwachten op basis van de langfiguren (zie Figuur 10).



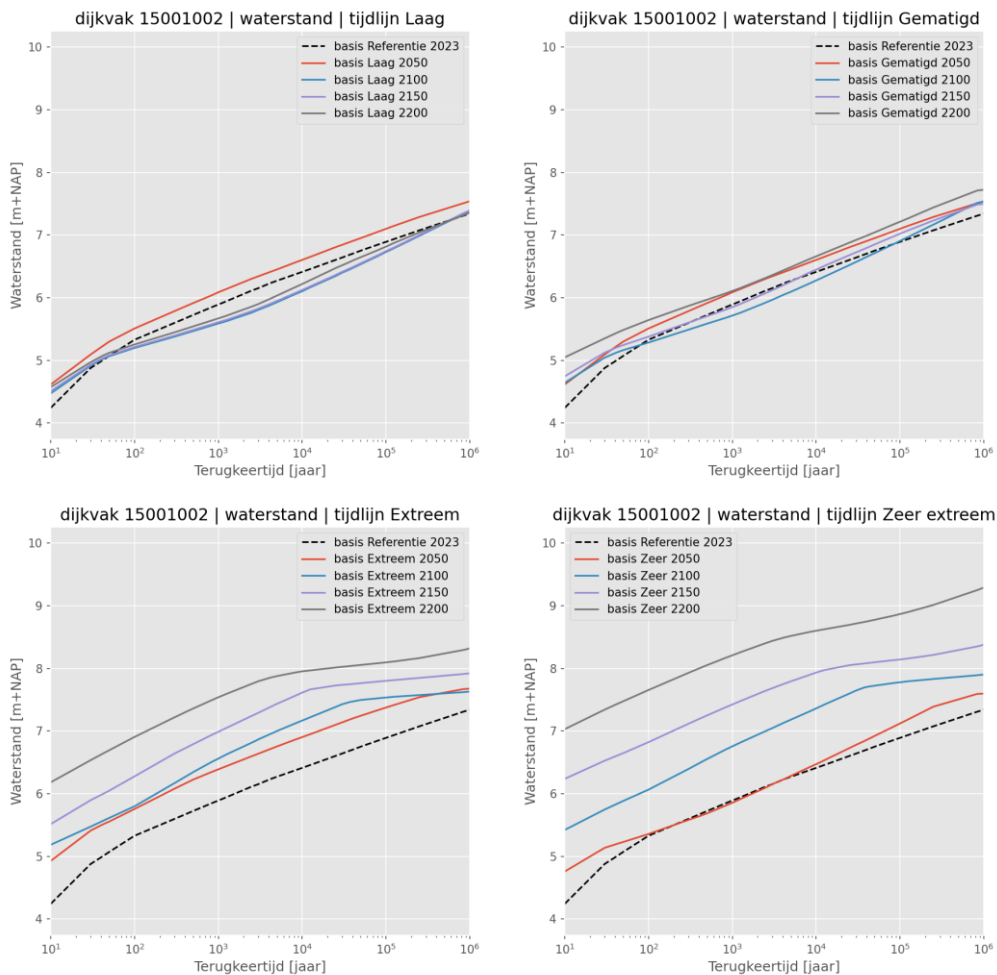


Figuur 17: Frequentielijnen voor waterstand voor dijkvak 14003002 (Rotterdam).

Het interpreteren van de figuren is in zijn algemeenheid niet eenvoudig, omdat de effecten van diverse aanpassingen door elkaar heen spelen. Aspecten die van belang zijn bij de interpretatie van de figuren zijn:

1. Wat is de hoeveelheid ZSS?
2. Tot hoever werkt de ZSS door?
3. Wat is het (aangepaste) sluitpeil van de stormvloedkeringen (zit in database fysica)?
4. Van welke afvoerstatistiek is sprake? (en hoe groot is het belang van de afvoer in een bepaald gebied, dit veranderd door de zeespiegelstijging)
5. Met welke afvoerverdeling hebben we te maken (zit in de fysica van de onderliggende database)?
6. Wat is het gehanteerde aftopniveau voor de afvoer?

Een ander voorbeeld voor een locatie op de Lek bij Nieuwegein is te zien in Figuur 18. Te zien is dat de hierboven beschreven algemene observaties in de resultaten niet langer opgaan en dat met name bij zichtjaren 2100 t/m 2200 de resultaten lager uitkomen dan voor zichtjaar 2050. Dit wordt veroorzaakt door de aannames over de verdeling van de afvoer over de splitsingspunten in combinatie met het ontzien van de Nederrijn-Lek, zie tijdlijn Laag in Figuur 18 linksboven. Aan zichtjaar 2050 hangt in tijdlijn Laag de afvoerverdeling Vast16000, terwijl dit in zichtjaren 2100 en 2200 voor dezelfde tijdlijn Vast18000 is (zie paragraaf 3.2.2 en bijlage A). Er gaat enkele honderden  $m^3/s$  minder over de Lek in Vast18000 dan in Vast16000, wat waterstanden geeft op de Lek die enkele dm's lager liggen. Dit hebben we ook geconstateerd in de langsfiguren (zie Figuur 10).



Figuur 18: Frequentielijnen voor waterstand voor een dijkvak bij Nieuwegein (traject 15-1 langs de Lek).

In meer detail zien we onder andere het volgende:

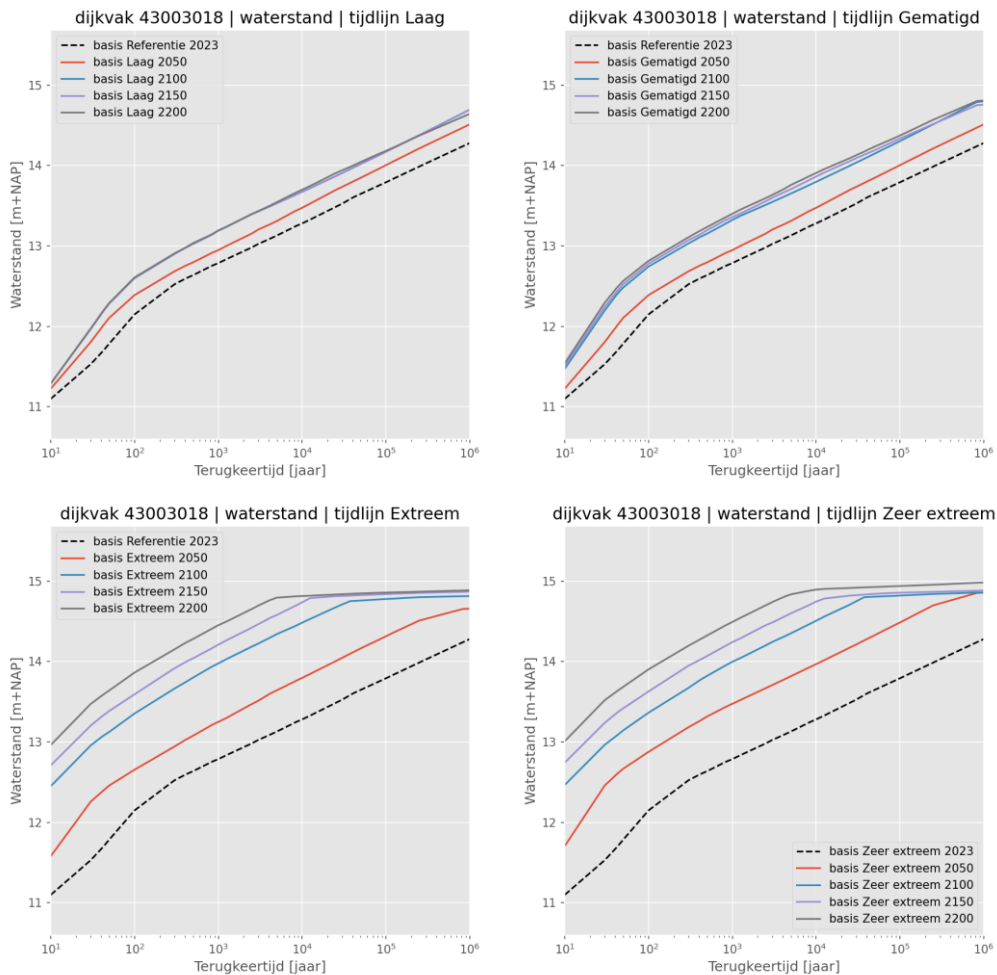
- Bij vergelijking van de referentiesituatie en zichtjaar 2050 voor tijdlijn Laag (figuur linksboven) zien we alleen het effect van de afvoerstatistiek terug, want de overige aspecten spelen voor die specifieke vergelijking geen rol. Ze zijn immers gemaakt met dezelfde database, de ZSS speelt geen rol en de afvoerniveaus liggen onder het aftopniveau.
- Bij vergelijking van de referentiesituatie en zichtjaar 2100 voor tijdlijn Laag (figuur linksboven) zien we de combinatie van twee effecten: niet alleen de afvoerstatistiek verandert, maar ook de afvoerverdeling over de splitsingspunten (andere database fysica). Doordat het ontzien van de Nederrijn-Lek<sup>10</sup> tussen beide afvoerverdelingen anders uitpakt, stroomt minder water over deze riviertak en dit fysische effect geeft meer verlaging van de waterstand dan dat de statistiek voor een verhoging zorgt.
- In de figuur rechtsboven (tijdlijn Gematigd) zien we dat de rode lijn identiek is met de rode lijn uit de figuur linksboven (tijdlijn Laag). Dit is logisch, omdat ze beiden gebruik maken van dezelfde statistiek en database. Ook de ZSS is voor beiden lijnen gelijk (zie ook Tabel 2 in paragraaf 3.2.2).
- Voor dezelfde tijdlijn Gematigd (figuur rechtsboven) constateren we dat het effect van het Ontzien van de Nederrijn-Lek minder wordt voor zichtjaren 2100,

<sup>10</sup> Het ontzien van de Neder-Rijn/Lek houdt in dat de regelwerken op de splitsingspunten (eenmalig) vast worden ingesteld om bij een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith minder water richting de NR/Lek te sturen en meer richting IJssel en met name de Waal.

2150 en 2200 in vergelijking met tijdlijn Laag (figuur linksboven). Dit wordt enerzijds veroorzaakt door het effect van een andere afvoerverdeling (Vast18000 i.p.v. Vast16000), maar ook door een andere ZSS (en verdere doorwerking ervan in bovenstroomse richting).

- Bij tijdlijnen Extreem (linksonder) en Zeer Extreem (rechtsonder) zien we het verlagende effect door het ontzien van de Nederrijn-Lek niet meer. De resultaten bij die tijdlijnen worden meer en meer bepaald door de invloed van de ZSS en de doordringing ervan in bovenstroomse richting.
- Bij tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem zien we tot slot ook de invloed van het aftopniveau terug. Vanaf 22.000 m<sup>3</sup>/s neemt de afvoer niet meer toe in deze berekeningen. De waterstand op een locatie kan dus niet langer stijgen door de afvoer, maar nog wel door de invloed van de wind en de ZSS. Normtraject 15-1 ligt dusdanig ver benedenstrooms in het rivierengebied dat de invloed van de zeewaterstand en het doordringen van de ZSS in bovenstroomse richting nog van invloed zijn. De afstand tussen de lijnen (zichtjaren) heeft dan ook nog een sterke correlatie met de toename van de zeespiegel.

Voor locaties nog verder bovenstrooms is te zien dat de invloed van de ZSS steeds minder wordt en dat de waterstandstoename vooral door de afvoer (statistiek en verdeling) bepaald wordt. In Figuur 19 staan de frequentielijnen voor een locatie enkele kilometers benedenstrooms van Nijmegen (normtraject 43-4 langs de Waal).



Figuur 19: Frequentielijnen voor waterstand voor een dijkvak een paar kilometer benedenstrooms van Nijmegen (normtraject 43-4 langs de Waal).

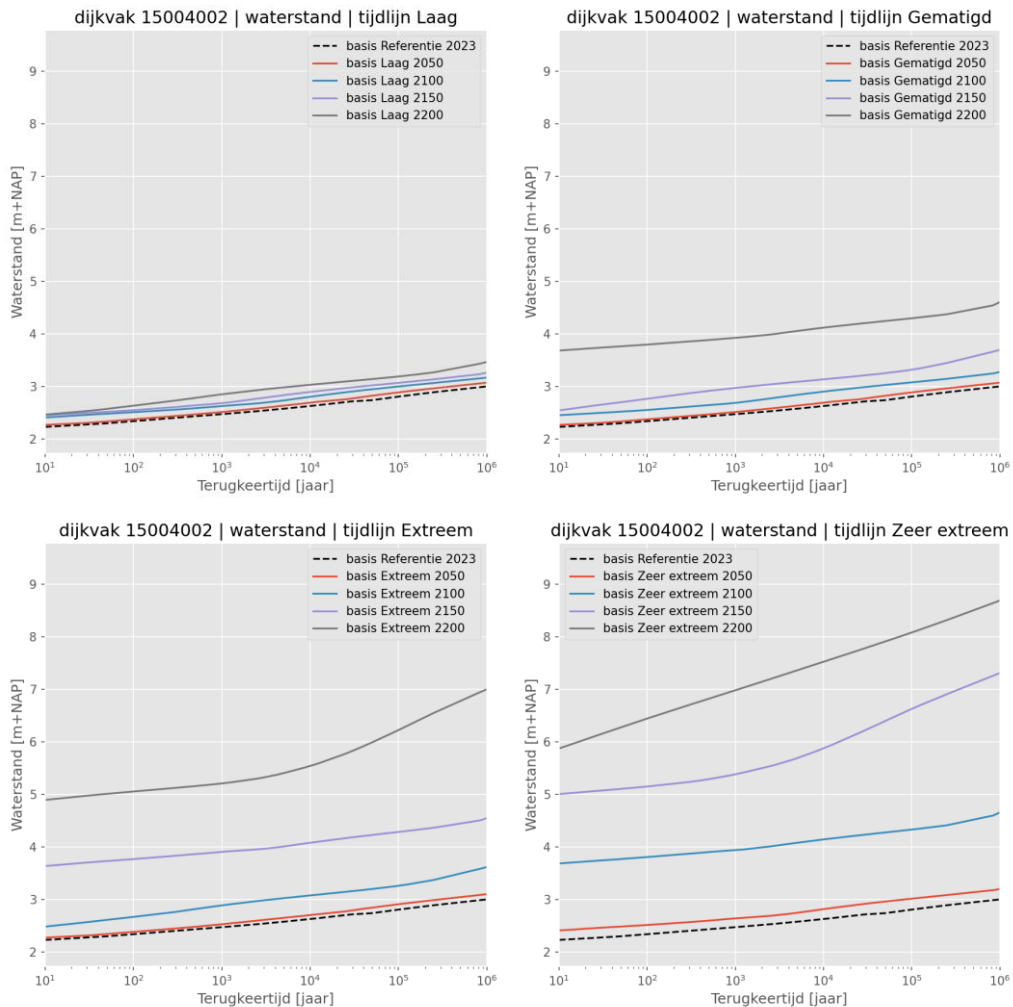
Uit de figuur zien we:

- Bij vergelijking van de referentiesituatie en zichtjaar 2050 voor tijdlijn Laag (figuur linksboven) zien we alleen het effect van de afvoerstatistiek terug, want de overige aspecten spelen voor die specifieke vergelijking geen rol. Ze zijn immers gemaakt met dezelfde database, de ZSS speelt geen rol en de afvoerniveaus liggen onder het aftopniveau.
- Bij vergelijking van de referentiesituatie en zichtjaar 2100, 2150 en 2200 voor tijdlijn Laag (figuur linksboven) zien we de combinatie van twee effecten: niet alleen de afvoerstatistiek verandert, maar ook de afvoerverdeling over de splitsingspunten (andere database fysica). Door de keuze van een andere afvoerverdeling (voor het ontzien van de Nederrijn-Lek) stroomt meer water over de Waal en dit fysische effect geeft een verhoging van de waterstand. Aangezien de afvoerverdeling voor deze drie zichtjaren hetzelfde is (Vast18000) én de afvoerstatistiek hetzelfde is (GL2050), veranderen de resultaten nauwelijks.
- Voor tijdlijn Gematigd (figuur rechtsboven) verandert het resultaat een klein beetje t.o.v. tijdlijn Laag (figuur linksboven). Voor zichtjaar 2050 verandert niets (rode lijnen zijn identiek). Voor zichtjaren 2100, 2150 en 2200 verandert de afvoerverdeling weliswaar niet (Vast18000), maar wel de ZSS en de afvoerstatistiek. De invloed van de ZSS zal zover bovenstrooms voor deze tijdlijn heel beperkt zijn, dus de verschillen in de frequentielijnen ontstaan door een wijziging van de afvoerstatistiek.
- Voor tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem zijn de verschillen tussen de zichtjaren een stuk groter. De afvoerstatistiek verandert hier namelijk meer per zichtjaar (de WH-scenario's worden gevolgd i.p.v. de GL-scenario's, zie Figuur 20). Bij de overgang van 2050 naar 2100 voor tijdlijn Extreem speelt ook de andere afvoerverdeling. Vandaar dat deze sprong daar groter is dan bij tijdlijn Zeer Extreem.  
Dat met name de bovenste drie lijnen (2100, 2150 en 2200) voor Extreem en Zeer Extreem vrijwel op elkaar liggen, laat zien dat de ZSS (die toch aanzienlijk anders is in beide tijdlijnen) weinig invloed heeft zover bovenstrooms.
- De rol van het aftopniveau is met name zichtbaar voor tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem. Een waterstand van 14.80 m+NAP in de figuur linksonder komt voor deze locatie (kennelijk) grofweg overeen met een afvoer van 22.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Dat is het niveau waarop de waterstanden nauwelijks meer stijgen, niet door de afvoer, maar ook niet door de wind en de ZSS. Dat laatste klopt met wat eerder is vastgesteld: de ZSS heeft weinig invloed zover bovenstrooms.

Zichtjaar	Tijdlijn	Database fysica			Statistiek	
		Zeespiegelstijging	Aanpassing sluitpeil	Afvoerverdeling	Zeespiegelstijging	Afvoerstatistiek
2023	n.v.t.	0 cm	-	Vast16000	0 cm	Ref2023
2050	Laag	0 cm	-	Vast16000	25 cm	GL2050
	Gematigd	0 cm	-	Vast16000	25 cm	GL2050
	Extreem	0 cm	-	Vast16000	25 cm	WH2050
	Zeer extreem	50 cm	-	Vast18000	50 cm	WH2050
2100	Laag	50 cm	-	Vast18000	50 cm	GL2050
	Gematigd	50 cm	-	Vast18000	75 cm	GL2100
	Extreem	100 cm	-	Vast18000	100 cm	WH2100
	Zeer extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	WH2100

Figuur 20: Uitsnede van Tabel 2 (paragraaf 3.2.2) met in rood omkaderd de onderlinge verschillen tussen zichtjaar 2050 en 2100 voor tijdlijn Extreem.

In Figuur 23 zijn frequentielijnen gevisualiseerd voor een locatie net achter de Hollandsche IJsselkering (Krimpen a/d IJssel).



Figuur 21: Frequentielijnen voor waterstand voor een dijkvak net achter de Hollandsche IJsselkering (Krimpen a/d IJssel, langs normtraject 15-3).

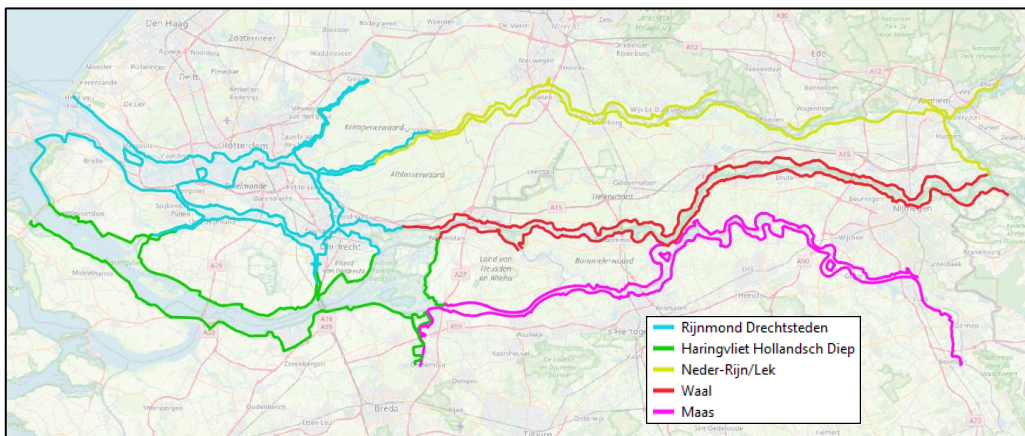
De resultaten uit Figuur 23 komen goed overeen met de resultaten zoals we die in de langsfiguren met de Hollandsche IJssel ook gezien hebben (Figuur 14 en Figuur 15). In tijdlijn Laag liggen alle frequentielijnen dicht bij elkaar, omdat de HIIK een kleine faalkans heeft (1/2000 per sluitvraag) en daardoor de waterstanden goed buiten de Hollandsche IJssel kan houden. Naarmate de tijdlijn en het zichtjaar extremer worden, lukt dit steeds minder goed. Op een gegeven moment komt dit door overloop van de HIIK en nemen de waterstanden snel toe op de Hollandsche IJssel.

Op basis van de door ons geanalyseerde figuren met frequentielijnen hebben we alleen zaken geconstateerd die kunnen worden verklaard aan de hand van de gehanteerde uitgangspunten. Net als bij de langsfiguren geldt, dat de geconstateerde patronen goed verklaarbaar zijn van uit de verschillen tussen tijdlijnen en zichtjaren. Dit geeft vertrouwen in de uitgevoerde berekeningen.



### Beeld waterstand bij de norm (WBN) voor hele regio

Binnen het project zijn grote hoeveelheden berekeningen uitgevoerd, die veel data hebben opgeleverd. Om tot een eindbeeld voor de gehele regio te komen, is de regio opgedeeld in 5 deelgebieden (Figuur 22). De definitie van de regio Rijnmond-Drechtsteden wijkt af van het gebied van het regionale Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden.



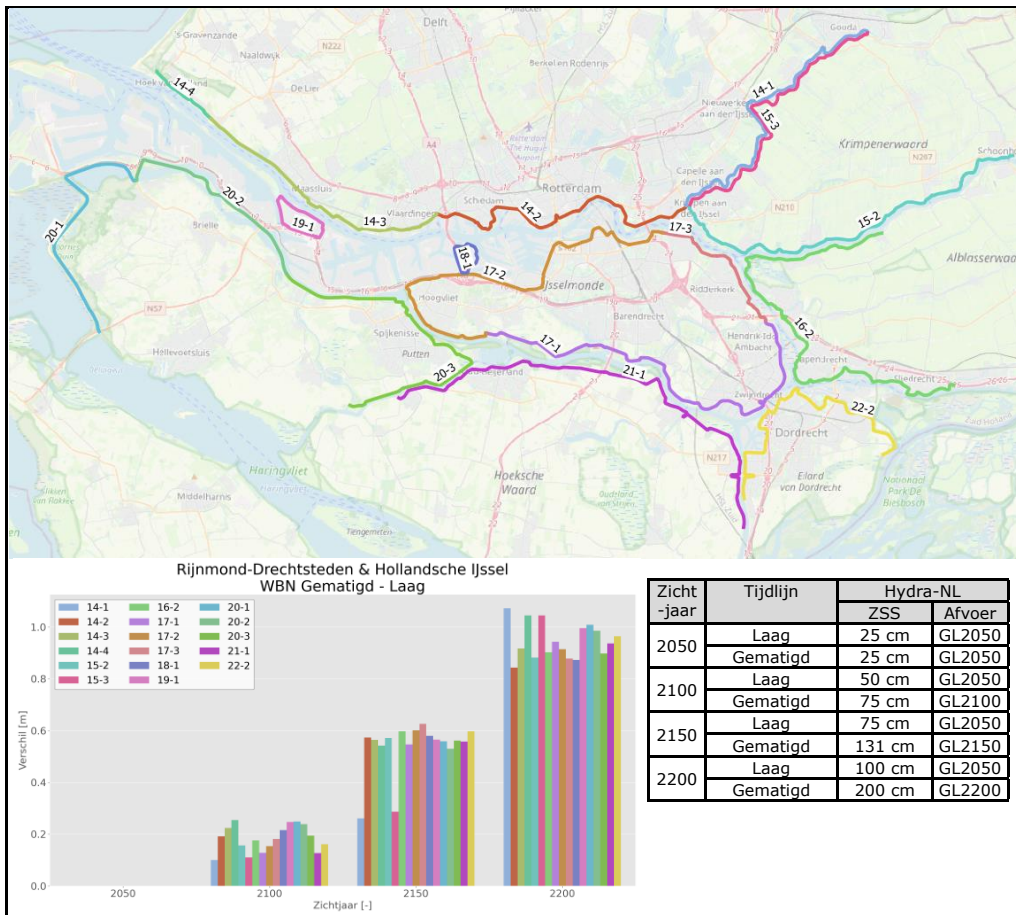
Figuur 22: Indeling in deelgebieden voor eindbeeld van hele regio.

Per normtraject binnen een deelgebied is steeds de gemiddelde waterstand bij de norm<sup>11</sup> beschouwd over alle dijkvakken binnen het betreffende traject. Dit levert per normtraject dus 1 gemiddelde waarde. De norm verschilt per traject, maar omdat we met name kijken naar de verschillen tussen berekeningen, is deze grootte een goede keuze. Dit zal ook blijken uit de hierna gepresenteerde resultaten, die over de normtrajecten heen een behoorlijk stabiel beeld laten zien dat niet afhankelijk is van de exacte norm van een traject. Samengevat middelen we dus de resultaten over de dijkvakken binnen een normtraject. We presenteren in de hierna volgende figuren de resultaten per normtraject voor twee deelgebieden: Rijnmond-Drechtsteden en Waal.

#### Deelgebied Rijnmond-Drechtsteden

Figuur 23 geeft, per normtraject, het verschil in waterstand bij de norm (WBN) weer tussen de tijdlijnen Gematigd en Laag voor de verschillende zichtjaren voor het deelgebied Rijnmond-Drechtsteden en Hollandsche IJssel. Eén van de redenen voor de onderlinge variatie tussen de balkjes is het verschil in normfrequentie van de trajecten. De berekende frequentielijnen voor de waterstanden zijn niet recht, maar zijn vaak gekromd, of hebben de vorm van een "S-curve" (zeker in de nabijheid van een stormvloedkering). Dat betekent dat het verschil tussen twee frequentielijnen onderling wat zal verschillen afhankelijk van de terugkeertijd waarbij het verschil is bepaald. Andere redenen voor variaties tussen de balkjes zijn b.v. de ligging van de trajecten in het watersysteem (binnen/buiten een stormvloedkering), maar natuurlijk ook de fysische invloed van de zee en/of de afvoer.

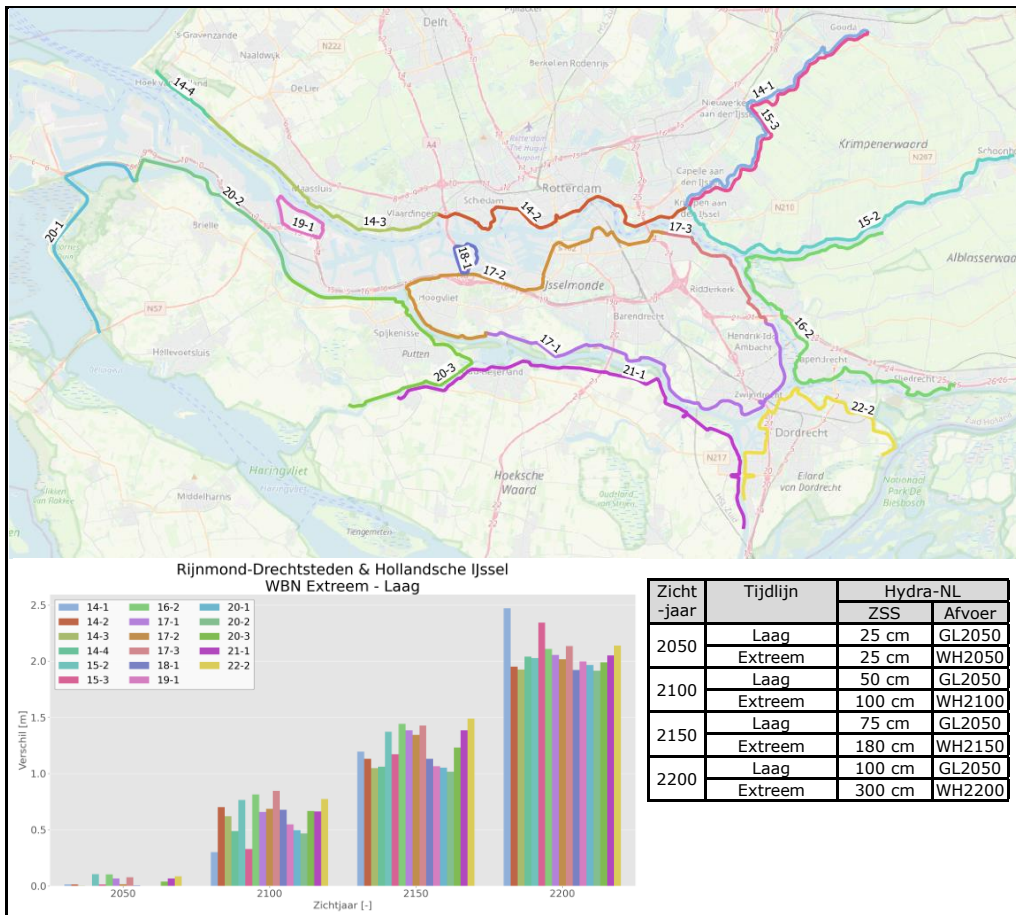
<sup>11</sup> <https://waterveiligheidsportaal.nl/#!/nss/nss/norm>



Figuur 23: Verschil in de waterstand bij de norm (WBN) per normtraject tussen tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden. \* Traject 20-1 is exclusief de zandige waterkeringen (duinen).

Figuur 23 bevat 4 groepen (de normtrajecten) met balken: steeds één groep per zichtjaar. In 2050 zien we geen enkel verschil tussen beide tijdlijnen (dit moet ook omdat de ZSS en het afvoerscenario in beide tijdlijnen hetzelfde is). In 2100 variëren de waterstandsverschillen grofweg tussen de 0,05 en 0,25 m. De toename in de ZSS is 0,25 m en gemiddeld genomen blijft daar ongeveer 0,2 m (80%) van over in de normtrajecten binnen dit deelgebied. Verder zien we een duidelijk verschil tussen de normtrajecten die zich voor en achter de Hollandsche IJsselkering bevinden. Tussen Gematigd en Laag zit 0,56 m ZSS in zichtjaar 2150, wat we bijna volledig terug zien in de waterstandsverschillen voor dat jaar. Twee normtrajecten vallen op: 14-1 en 15-3. Dit zijn de twee normtrajecten die zich achter de Hollandsche IJsselkering (HIJK) bevinden. Deze stormvloedkering doet voor deze tijdlijn en dit zichtjaar dus goed werk om de ZSS buiten te houden. In 2200 is dit onderscheid voor de Hollandsche IJssel niet langer zichtbaar, naar alle waarschijnlijkheid omdat de waterstanden dan zoveel zijn toegenomen dat het water over de HIJK heen stroomt. Daarnaast zal het verschil in sluitpeil tussen Gematigd en Laag in 2200 ook een rol spelen (zie Tabel 2). Alle normtrajecten krijgen in 2200 grofweg te maken met een waterstandsstijging van 0,9 m door een toename van de zeespiegel met 1 m (waar dus ongeveer 90% van over blijft).

De waterstandsverschillen tussen tijdlijn Extreem en Laag zijn gevisualiseerd in Figuur 24.

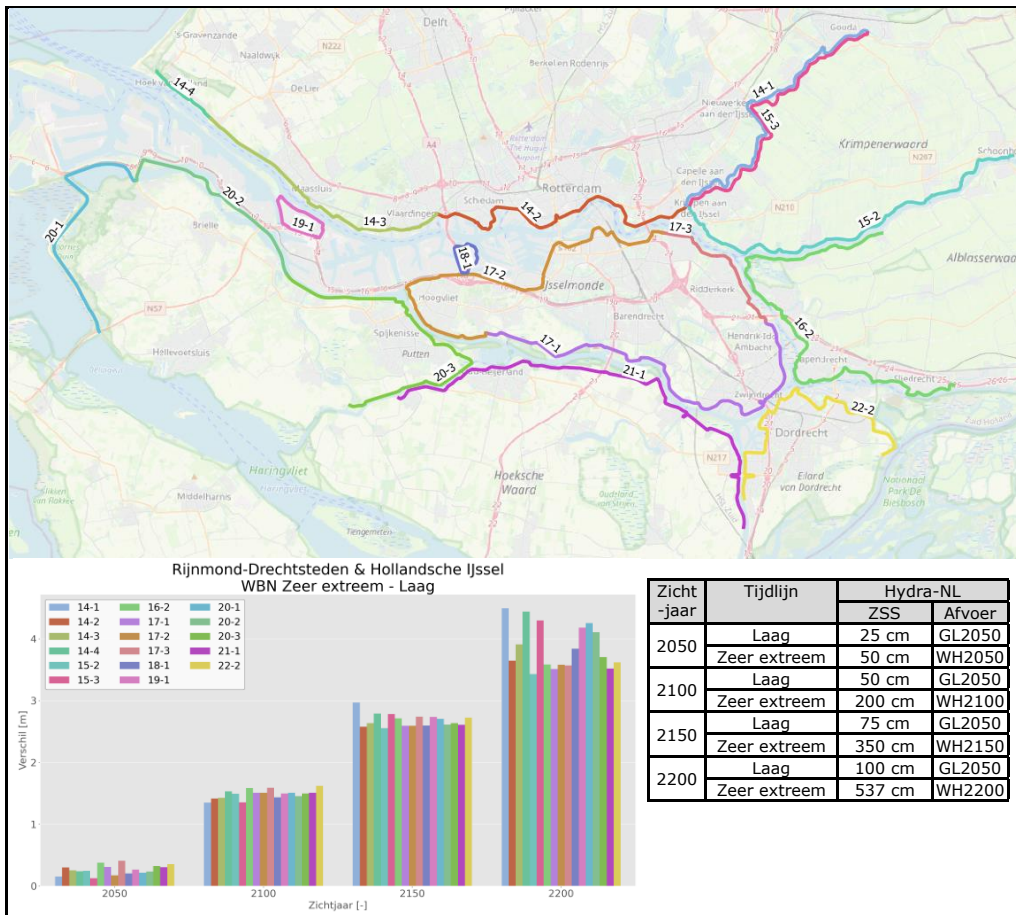


Figuur 24: Verschil in de waterstand bij de norm (WBN) per normtraject tussen tijdlijnen Extremum en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden. \* Traject 20-1 is exclusief de zandige waterkeringen (duinen).

Ditmaal zien we in 2050 wel kleine verschillen, ondanks dat de mate van ZSS in beide tijdlijnen gelijk is. Dit verschil wordt veroorzaakt door het verschil in de afvoerstatistiek, maar is beperkt (logisch, omdat de afvoer op de normtrajecten een ondergeschikte rol speelt). In 2100 herkennen we weer de afwijkende trajecten 14-1 en 15-3 achter de Hollandsche IJsselkering terug. Grofweg zien we in zichtjaren 2100, 2150 en 2200 respectievelijk waterstandsstijgingen terug van 0,5, 1,1 en 2 m. De verschillen in ZSS voor dezelfde zichtjaren bedragen 0,5, 1,05 en 2 m. Omdat we weten dat dit deelgebied het meest beïnvloed wordt door de zeewaterstand, achten we dit plausible resultaten. Voor enkele trajecten vinden we toenames die groter zijn dan de ZSS. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in afvoerstatistiek en sluitpeilen tussen de zichtjaren/tijdlijnen. Het verlagende effect van de HIJK is in 2150 al wat minder. De hoogte van de HIJK bedraagt NAP +5,0 m en waterstanden die boven dat niveau komen lopen over de kering. Die waterstanden worden dus ook beïnvloed door de faalkans van de EPK.

De ZSS vinden we nagenoeg volledig terug in de toename van de waterstanden voor deze trajecten. Traject 14-4 (vierde balkje) is daarvoor de beste indicator, omdat dit traject buiten de Europoortkering ligt en dus direct door de zeewaterstand wordt beïnvloed. De waterstandsverschillen voor dit traject komen perfect overeen met de toename in de zeespiegel.

Figuur 25 laat tot slot voor hetzelfde deelgebied ook de verschillen zien tussen tijdlijnen Zeer Extremum en Laag.



Figuur 25: Verschil in de waterstand bij de norm (WBN) per normtraject tussen tijdlijnen Zeer Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden. \* Traject 20-1 is exclusief de zandige waterkeringen (duinen).

De stormvloedkeringen blijven, wanneer ze correct sluiten, ook in de toekomst in staat om hoge zeewaterstanden buiten te houden. De extreme waterstanden achter de stormvloedkering worden in belangrijke mate bepaald door de situaties waarbij de kering niet correct sluit. En dat zal steeds vaker gebeuren, omdat het aantal keren dat de stormvloedkeringen moeten sluiten, toeneemt als de zeespiegel stijgt.

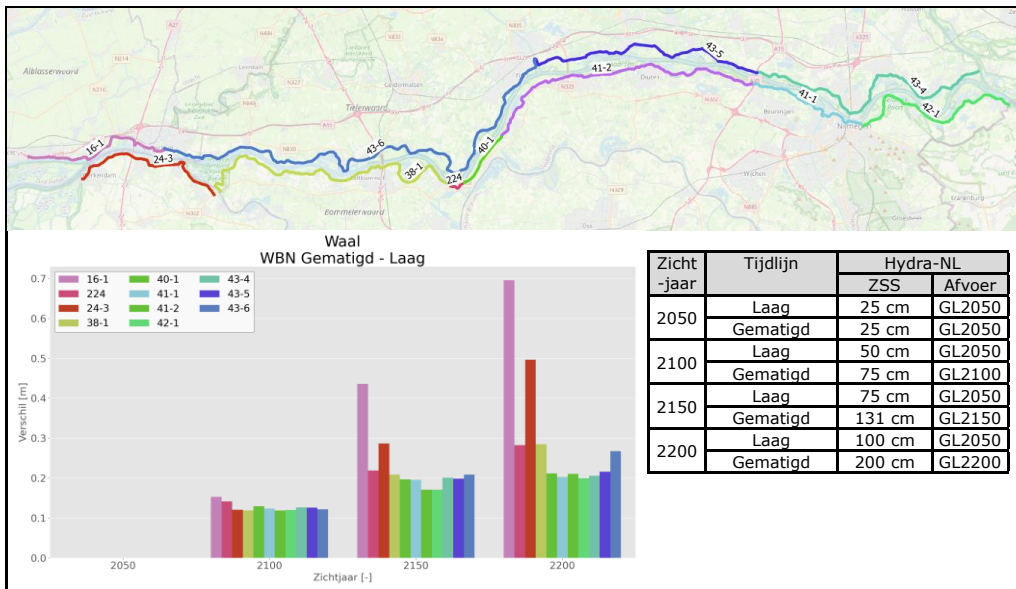
Dat de EPK nog wel effect heeft is bijvoorbeeld te zien aan de sprong in de waterstanden in Figuur 11. Wel volgt hieruit dat de ZSS eigenlijk direct is terug te zien in de toenames van de waterstanden (in Figuur 11 is bijvoorbeeld te zien is dat de invloed van de ZSS langs het hele tracé ver landinwaarts reikt). Dit wordt bevestigd uit de balkjes in de figuur. We zien toenames van waterstanden in de orde van 0,25, 1,50, 2,75 en 3,50 m voor de verschillende zichtjaren. Deze komen in dit deelgebied zoals verwacht nagenoeg volledig overeen met de ZSS, alleen de resultaten in zichtjaar 2200 vallen voor de meeste normtrajecten tussen de 5% en 20% lager uit dan het verwachte extra ZSS verschil van 4,4 m tussen de tijdlijn Laag en Zeer Extreem. Dit wordt (vermoedelijk) veroorzaakt doordat in de berekening voor Zeer Extreem in 2200 niet alle ZSS in de database fysica is verwerkt (zie ook de uitleg bij Figuur 6 in paragraaf 3.2.1).

Al met al zien we dat de ZSS eigenlijk in het hele deelgebied nagenoeg direct doorwerkt op de waterstanden. Alleen in de tijdlijnen Gematigd en Laag zorgt de aanwezigheid van de stormvloedkeringen nog voor een geringe reductie van de

ZSS, maar ook daar werkt nog steeds grofweg 90% van de ZSS door in de waterstanden.

**Deelgebied Waal**

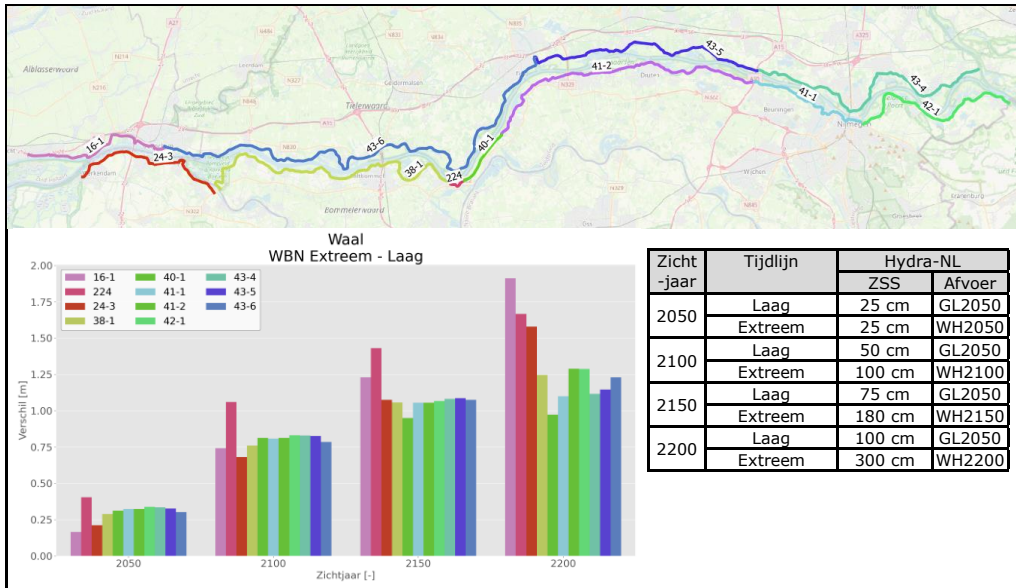
Een vergelijkbare analyse is gedaan voor de andere deelgebieden, zoals de Waal (rode deelgebied uit Figuur 22). De resultaten voor dat deelgebied zijn verzameld in Figuur 26 t/m Figuur 28. In dit gebied zien we een veel minder directe koppeling tussen de toename in waterstanden en de ZSS, omdat in dit gebied ook de afvoer een belangrijke rol speelt. De invloed van de zee zal naar verwachting wel toenemen naarmate de ZSS toeneemt, omdat deze verder landinwaarts zal dringen.



Figuur 26: Verschil in de waterstand bij de norm (WBN) per normtraject tussen tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Waal.

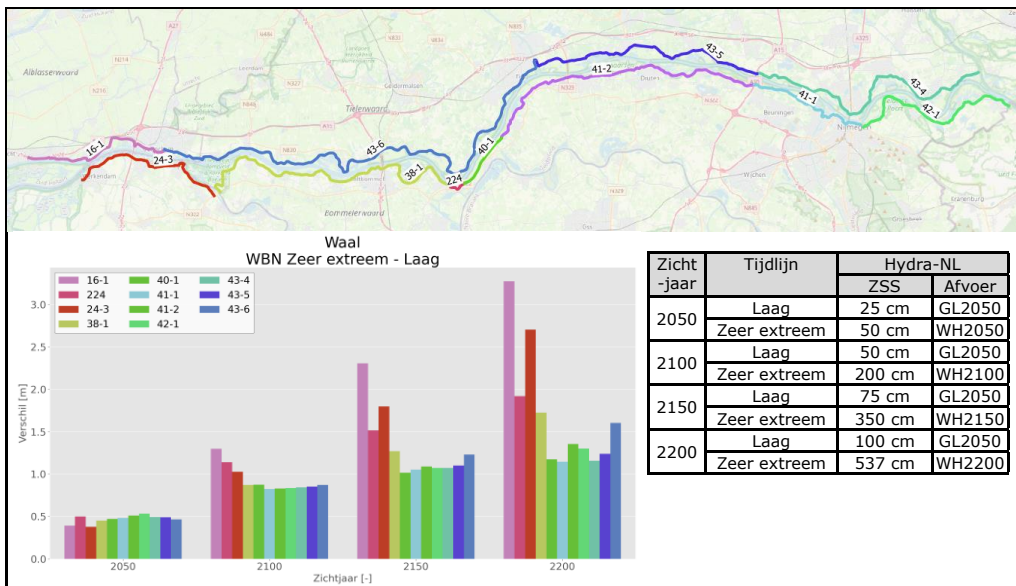
Uit Figuur 26 constateren we dat de toenames voor de verschillende zichtjaren voor de meeste trajecten respectievelijk circa 0,10, 0,20 en ruim 0,20 m zijn, wat beduidend minder is dan de ZSS, maar voor bepaalde trajecten significant hoger. In de resultaten onderscheiden we daarom twee "clusters" van trajecten. We zien een cluster van trajecten die duidelijk afwijkend gedrag laten zien t.o.v. de overige normtrajecten in dit deelgebied, te weten trajecten 16-1 en 24-3. Deze trajecten liggen erg aan de benedenstroomse zijde van het deelgebied en worden duidelijk sterker beïnvloed door de zeewaterstand. Achteraf bezien passen deze normtrajecten beter in het hiervoor gepresenteerde deelgebied van Rijnmond-Drechtsteden. Het andere cluster bestaat uit de overige normtrajecten die achter de stormvloedkeringen liggen.

De verschillen tussen tijdlijn Extreem en Laag zijn gevisualiseerd in Figuur 27. De toenames in waterstanden per zichtjaar zijn grofweg 0,25, 0,75, 1,10 en 1,25 m. De toename in zichtjaar 2050 wordt niet door de ZSS veroorzaakt, maar door een verschil in afvoerstatistiek tussen beide tijdlijnen.



Figuur 27: Verschil in de waterstand bij de norm (WBN) per normtraject tussen tijdlijnen Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Waal.

Hoewel er minder direct een relatie is te leggen met de ZSS als in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden, zien we wel dat naarmate de tijdlijn extremer wordt, dat de invloed van de ZSS verder doordringt. Dit beeld wordt deels verder versterkt als we kijken naar de verschillen tussen tijdlijnen Zeer Extreem en Laag (Figuur 28).



Figuur 28: Verschil in de waterstand bij de norm (WBN) per normtraject tussen tijdlijnen Zeer Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Waal.

De toenames voor de bovenstrooms in het deelgebied gelegen normtrajecten blijven beperkt in verhouding tot de ZSS. Kennelijk ontstaat een bepaalde balans in het watersysteem tussen het doordringen van de ZSS in bovenstroomse richting aan de ene kant en het toenemen van de afvoeren in benedenstroomse richting. Een belangrijke oorzaak voor het niet verder toenemen van de waterstandsverschillen is het afvlakken van de werklijnen van de afvoer en het aftoppen ervan. Dit zorgt ervoor dat waterstanden langs de afvoergedomineerde normtrajecten niet of nauwelijks stijgen in de meest extreme tijdlijnen/zichtjaren. Dit effect hebben we

eerder ook al geconstateerd bij het analyseren van de frequentielijnen (zie Figuur 19).

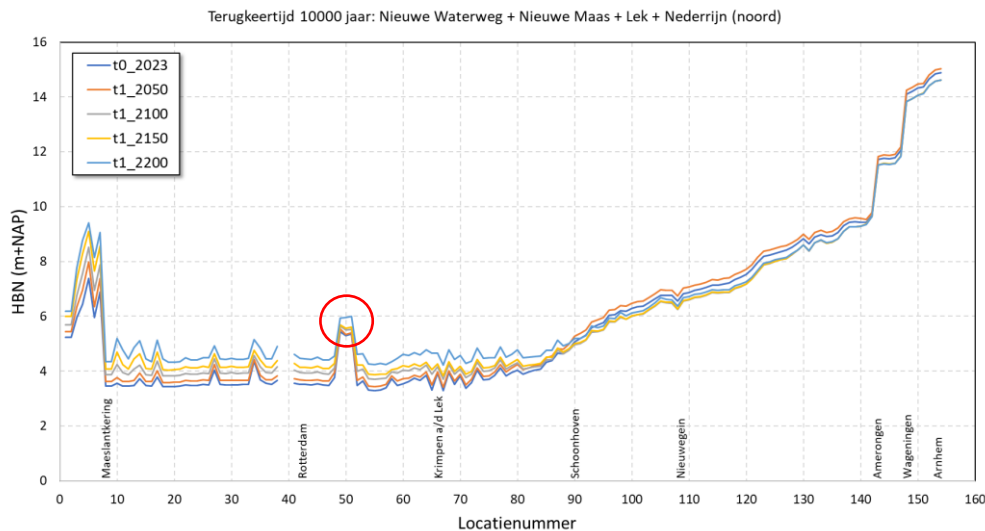
Trajecten 16-1 en 24-3 volgen ook hier (net als bij andere tijdlijnen) veel directer de ZSS en zijn duidelijke uitschieters naar boven in dit deelgebied.

### 3.3.2 Hydraulisch belastingniveau (HBN)

Nu we een goed beeld hebben van de consequenties op de waterstanden, is het zaak om ook de invloed op toekomstige dijkhoogten in beeld te brengen. Dat doen we door ook de invloed van golven (golfoverslag) in het probabilistische model mee te nemen en het HBN te gebruiken als maat voor toekomstige, indicatieve kruinhoogten van de waterkeringen. Net als voor de waterstanden laten we de impact van de verschillende tijdlijnen en zichtjaren zien aan de hand van verschillende typen figuren: langsfiguren voor het globale ruimtelijke beeld, frequentielijnen voor individuele dijkvakken en staafdiagrammen voor het kunnen trekken van conclusies op hoofdlijnen.

#### Langsfiguren

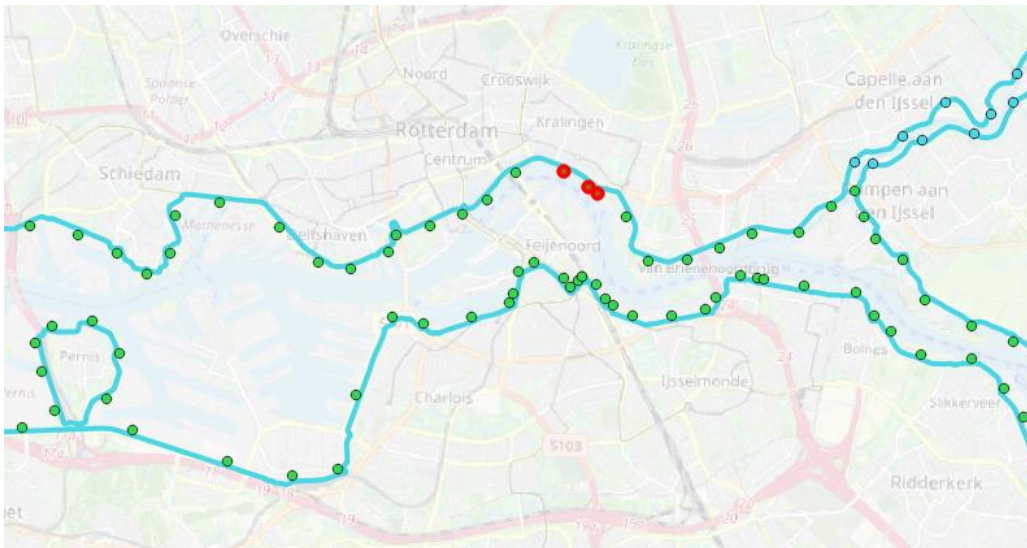
De langsfiguren voor de HBN's volgen grotendeels het patroon van de waterstanden, maar zijn iets grilliger. Een voorbeeld is te zien in Figuur 29.



Figuur 29: Langsfiguur voor rechteroever van Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek – Nederrijn, met HBN's (overslagdebiet 5 l/s/m) voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Laag, inclusief de referentiesituatie voor T = 10.000 jaar.

De HBN's in Figuur 29 liggen hoger dan de waterstanden in Figuur 14, maar de onderlinge afstand tussen de zichtjaren is vergelijkbaar met die van de waterstanden voor tijdlijn Laag. Naarmate de tijdlijnen extremer worden, nemen de afstanden tussen de lijnen wel steeds meer toe (wat logisch is, omdat ook de effecten van de golven worden meegenomen in het HBN en niet alleen waterstanden). Bij hogere waterstanden worden golfhoogtes hoger omdat er minder dieptelimitatie is, dus neemt het HBN meer toe dan de waterstand. In het bovenstroomse deel, waar zowel de waterstanden als de HBN's voornamelijk door de afvoeren worden bepaald, ligt de lijn voor 2050 het hoogst. Zoals ook al opgemerkt bij de waterstanden speelt hier zowel de toename van de afvoeren door klimaatverandering een rol als de verschillen in afvoerverdeling ("Vast16000" voor referentie en 2050 en "Vast18000" voor zichtjaren 2100 en verder). Zie paragraaf 3.2.1 en Tabel 2. Voor 2100 en verder geldt weliswaar extremere afvoerstatiek, maar een gunstigere afvoerverdeling (voor dit traject).

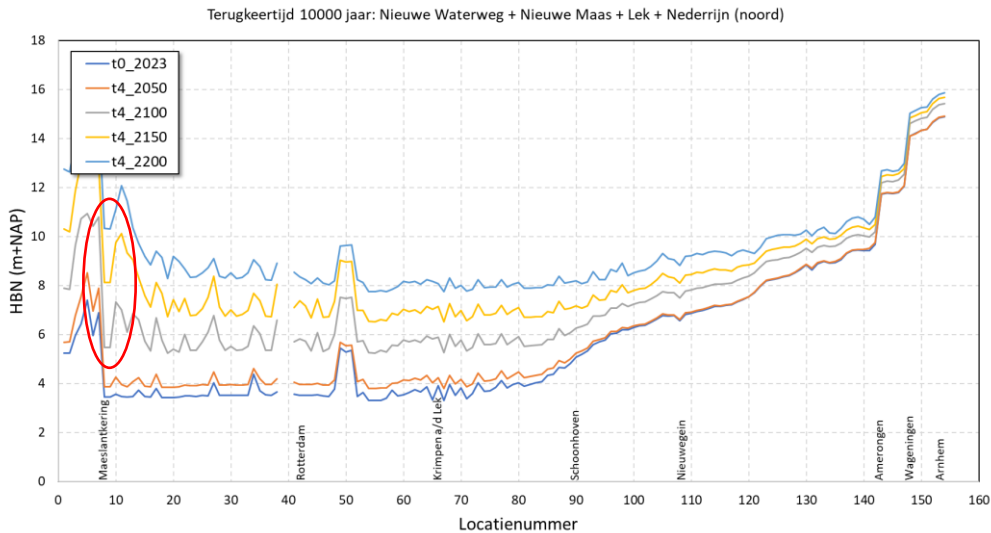
In Figuur 29 valt met name één ding op en dat zijn de locaties die rood omcirkeld zijn. Hier is het HBN in alle zichtjaren een stuk hoger dan dat voor de omliggende locaties, terwijl dit in de figuur met waterstanden niet zichtbaar is (Figuur 10). De geografische ligging van deze locaties is te zien in Figuur 30. Gegeven de oriëntatie van deze locaties (grote strijk lengten in WZW-richting) mag inderdaad verwacht worden dat de HBN's voor deze locaties hoger zijn dan die van omliggende locaties. De locatie met een vergelijkbare oriëntatie die iets verder bovenstrooms ligt, heeft geen hoger HBN. Dit komt omdat deze locatie gekenmerkt wordt door een voorland en de locatie heeft een teenhoogte die op NAP +3,23 m ligt (terwijl de drie rood omcirkelde locaties een teenhoogte van NAP -0,06 m hebben). Dit lijkt daarmee een plausible verklaring voor de verhoging van het HBN's rondom locatie 50. Ook het precieze verloop (talud) van de locaties kan nog een oorzaak zijn van de verschillen, maar dit is verder niet onderzocht.



Figuur 30: Ligging van de 3 locaties die rood omcirkeld zijn in Figuur 29.

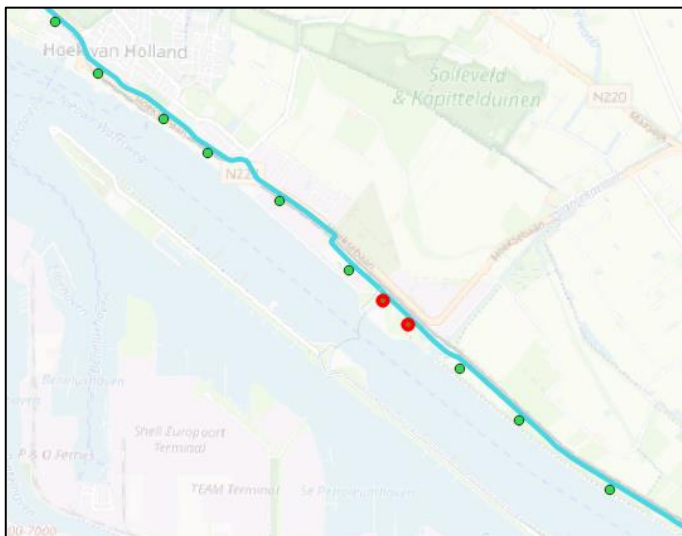
Voor hetzelfde tracé zijn ook de resultaten getekend voor tijdelijk Zeer Extreem (Figuur 31). We zien dat de HBN's een stuk hoger zijn dan de eerder getoonde waterstanden (Figuur 11) en dat de onderliggende spreiding tussen de lijnen (conform verwachting) ook is toegenomen t.o.v. die bij de waterstanden. Net als eerder benoemd, zien we dat hogere waterstanden ook hogere golfhoogten geven, omdat er minder dieptelimitatie is. Verder geldt, dat de HBN's bovenstrooms nu wel altijd toenemen met het zichtjaar (i.t.t. Figuur 29). Voor deze tijdelijk is namelijk voor alle zichtjaren dezelfde afvoerverdeling gehanteerd, waardoor alleen de extremere afvoerstatistiek nog een rol speelt.





Figuur 31: Langsfiguur voor rechteroever van Nieuwe Waterweg – Nieuwe Maas – Lek – Nederrijn, met HBN's (overslagdebiet 5 l/s/m) voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Zeer Extreem, inclusief de referentiesituatie voor T = 10.000 jaar.

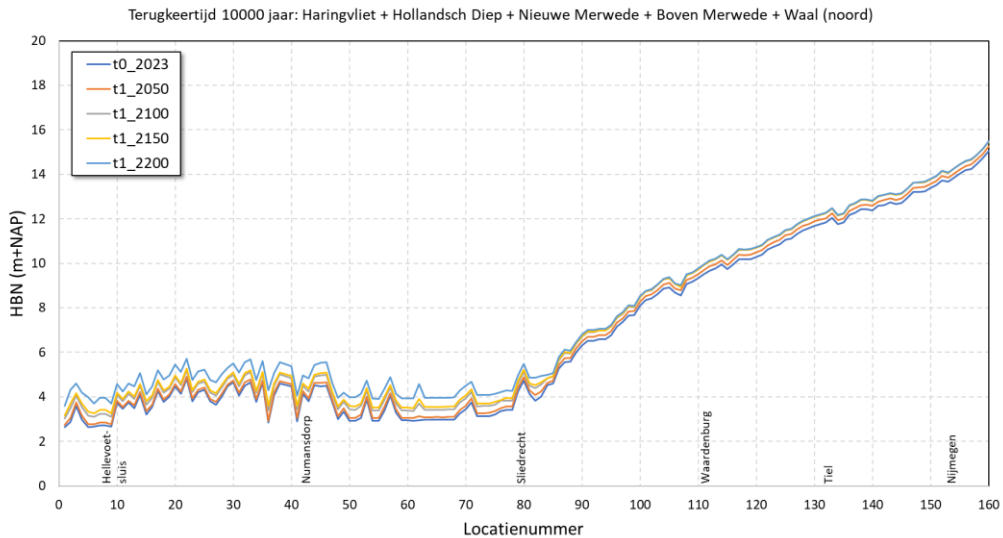
Ook zien we weer dezelfde verhoging terug in de HBN's rondom locatie 50. Een ander opvallend resultaat is de dip in de HBN's ter plaatse van de Maeslantkering (rood omcirkeld). In Figuur 32 is de ligging van deze twee locaties uitgelicht.



Figuur 32: Ligging van de 2 locaties die rood omcirkeld zijn in Figuur 31.

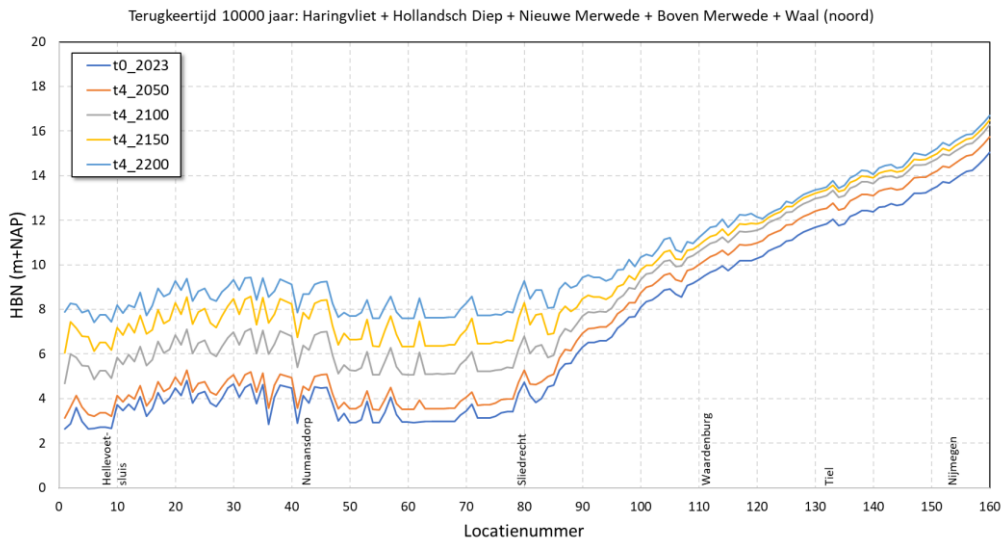
Het gaat om twee locaties in de directe nabijheid van de stormvloedkering. Bij nadere inspectie van de eigenschappen voor deze twee locaties zien we dat de teenhoogte in het gehanteerde talud van deze twee locaties rond de NAP +5,3 m ligt, terwijl de teen bij de buurlocaties stroomop- en stroomafwaarts ruim 1,5 m lager liggen. Deze verhoogde teen zorgt voor een flinke reductie op de golfhoogten en daarmee op het HBN.

In Figuur 33 en Figuur 34 zijn de HBN's te zien langs een traject over het Haringvliet richting de Waal voor respectievelijk tijdlijn Laag en tijdlijn Zeer Extreem.



Figuur 33: Langsfiguur voor rechteroever van Haringvliet – Hollandsch Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede – Waal, met HBN's (overslagdebiet 5 l/s/m) voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Laag, inclusief de referentiesituatie voor T = 10.000 jaar.

We zien weer dat de HBN's op hoofdlijnen het patroon volgen van de waterstanden, maar dat lokale eigenschappen zorgen voor meer variatie in het verloop dan bij de waterstanden.

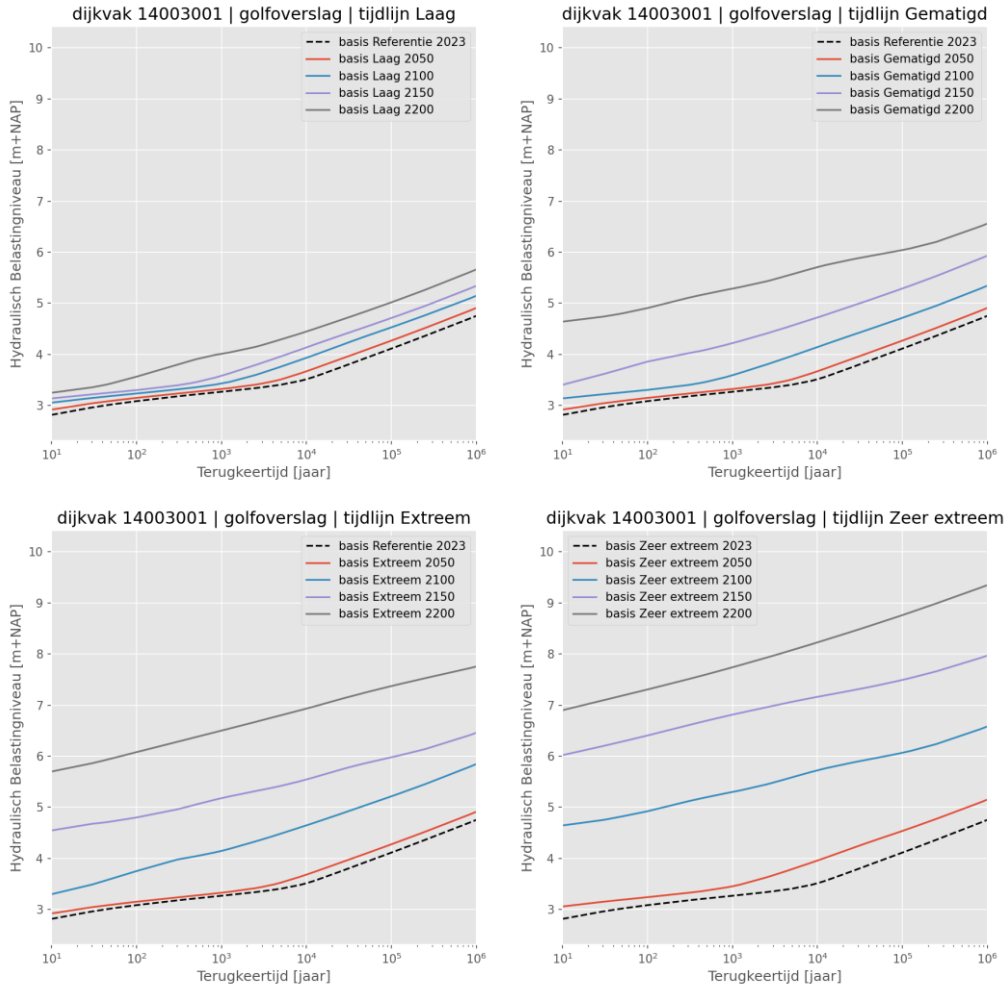


Figuur 34: Langsfiguur voor rechteroever van Haringvliet – Hollandsch Diep – Nieuwe Merwede – Boven Merwede – Waal, met HBN's (overslagdebiet 5 l/s/m) voor 4 verschillende zichtjaren uit tijdlijn Zeer Extreem, inclusief de referentiesituatie voor T = 10.000 jaar.

Uit de figuren is ook te zien dat de invloed van de wind (effect op golven) afneemt in bovenstroomse richting wat komt door wisseling in profielen en strijklengten bij de door de wind geïnduceerde golfoploop. Tot aan Sliedrecht variëren de HBN's aanzienlijk meer dan bovenstrooms ervan. Bovenstrooms van Sliedrecht neemt deze variatie in HBN af, neemt het verhang toe en zijn we meer in het afvoergedomineerde deel van het rivierengebied beland.

### Enkele voorbeeldlocaties

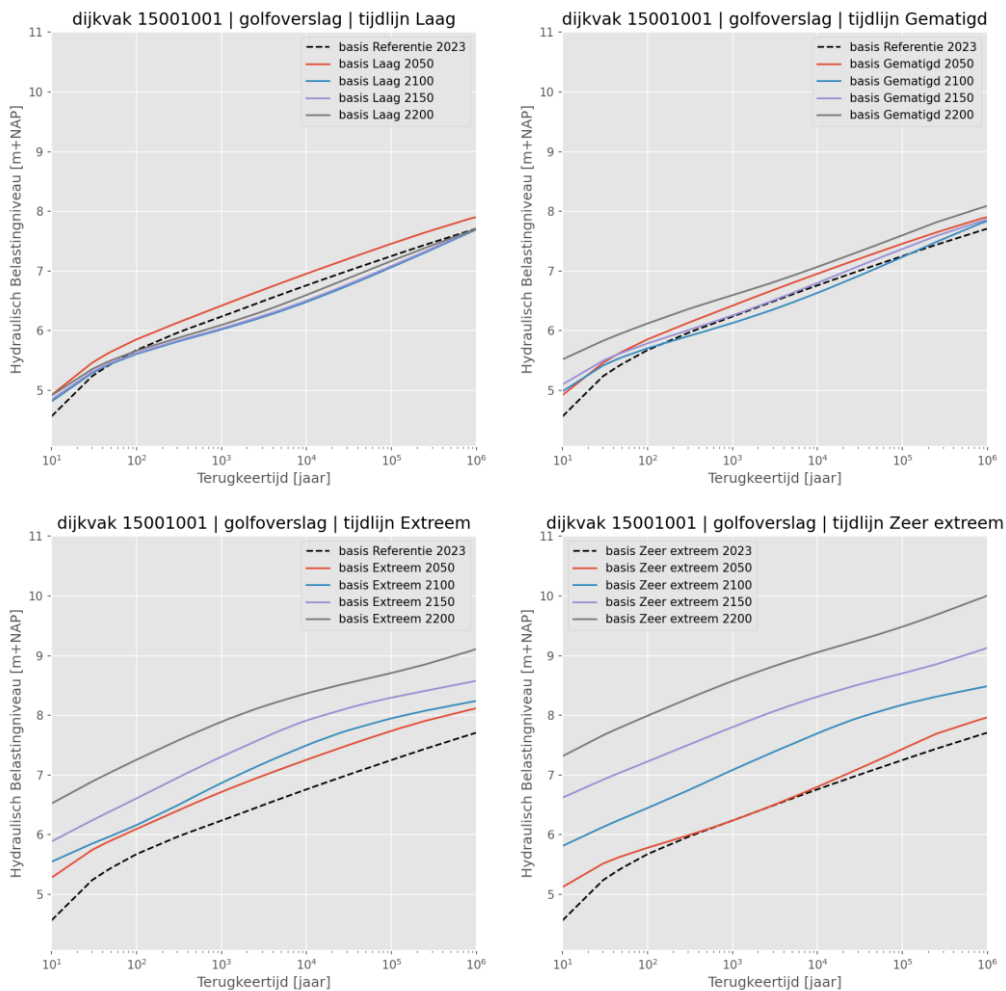
Voor de drie tijdlijnen – Laag, Gematigd en Extreem – zijn frequentielijnen voor HBN gemaakt (Figuur 35, Rotterdam). Te zien is dat de HBN's oplopen, zowel binnen een tijdlijn voor een hoger zichtjaar als bij extremere tijdlijnen.



Figuur 35: Frequentielijnen voor het HBN voor dijkvak 14003002 (Rotterdam).

De verschillen met de frequentielijnen van de waterstanden blijken voor deze locatie minimaal te zijn, zeker voor tijdlijn Laag (vergelijk de resultaten met Figuur 17). We vermoeden dat dit komt door de oriëntatie van het betreffende dijkvak en dat overlopen het dominante faalmechanisme is (afwaaiing).

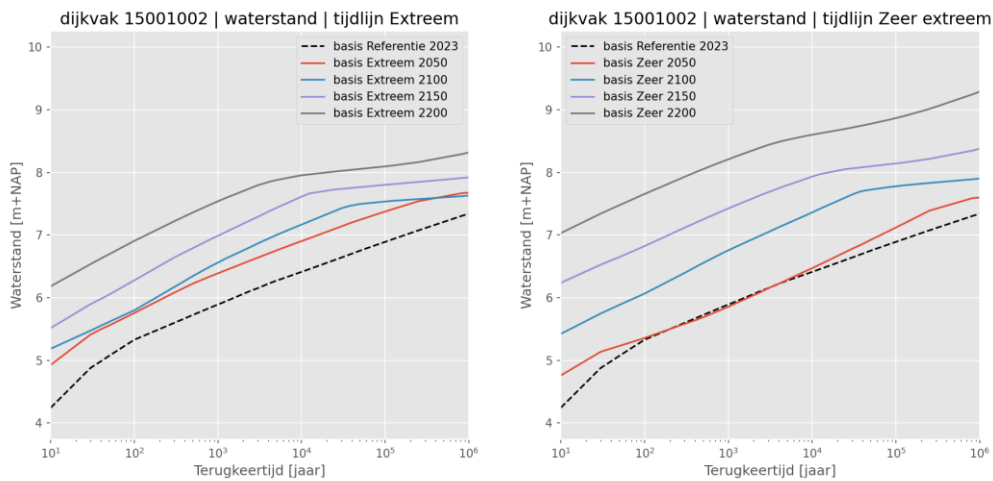
Een ander voorbeeld voor een locatie op de Lek bij Nieuwegein is te zien in Figuur 36. We zien een vergelijkbaar beeld als bij de waterstanden (Figuur 18), alleen liggen de HBN's (zeker in tijdlijn Extreem en Zeer Extreem) hoger dan de waterstanden.



Figuur 36: Frequentielijnen voor het HBN voor een dijkvak bij Nieuwegein (traject 15-1 langs de Lek).

Voor het gemak van de lezer zijn in Figuur 37 (identiek aan Figuur 18) de resultaten voor de waterstanden in tijdlijn Extreem en Zeer Extreem gevisualiseerd voor dezelfde locatie.

Waar we in de frequentielijnen van de waterstanden nog een hele duidelijke bovengrens zagen in tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem door het aftopniveau van de afvoeren, zien we dat eigenlijk niet meer terug in de frequentielijnen voor de HBN's. Ondanks dat de afvoer niet verder kan stijgen door het aftopniveau, kan het HBN nog steeds omhoog onder invloed van golven (deze nemen toe omdat de windsnelheid nog kan toenemen).



Figuur 37: Frequentielijnen voor de waterstand voor een dijkvak bij Nieuwegein (traject 15-1 langs de Lek), specifiek voor tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem.

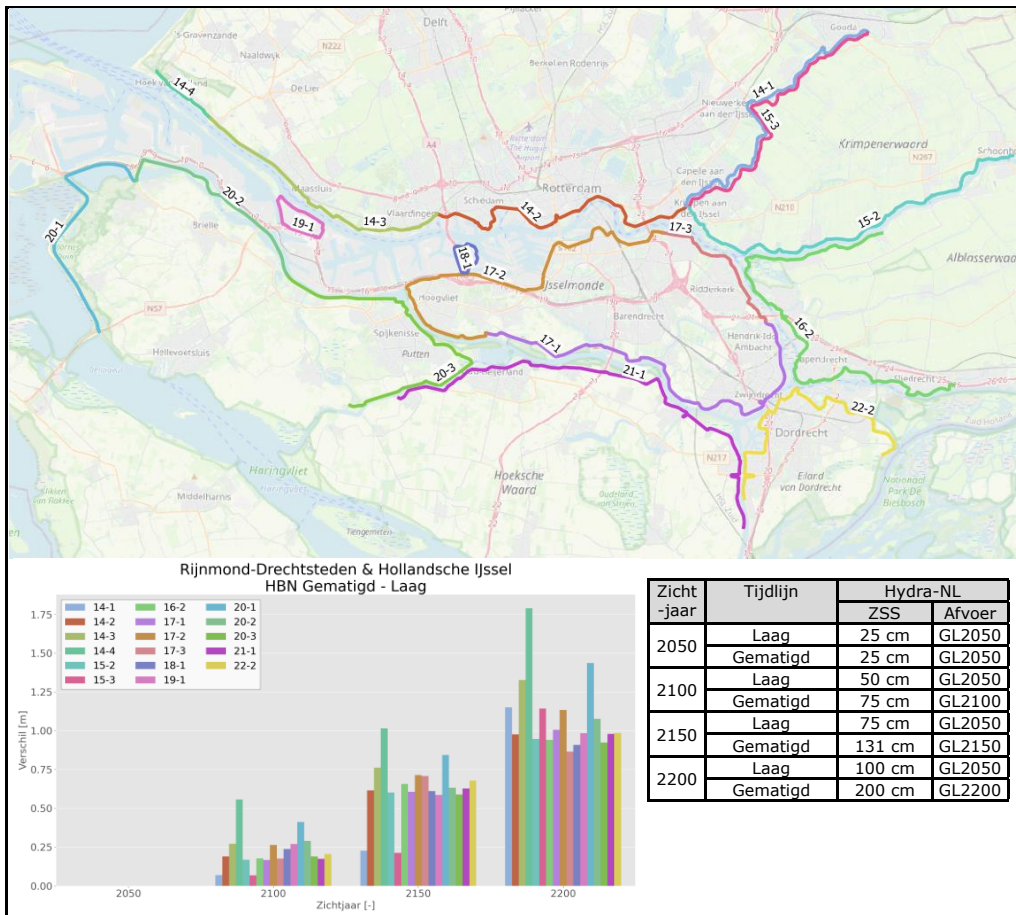
### Totaal beeld Hydraulisch Belastingniveaus (HBN's) voor hele regio

Op dezelfde manier als dit voor de waterstanden is gedaan, is de regio opgedeeld in 5 deelgebieden (Figuur 22). Per normtraject binnen een deelgebied is (net als bij de waterstanden) het gemiddelde HBN bij de norm van het betreffende traject beschouwd in de analyses. De resultaten over de dijkvakken binnen een normtraject zijn dus gemiddeld en geven één waarde per normtraject.

### Deelgebied Rijnmond-Drechtsteden

Figuur 38 geeft, per dijkvak, het verschil in HBN weer tussen de tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren. De figuur bevat 4 groepen (de normtrajecten) met balken: steeds één groep per zichtjaar. In 2050 zien we geen enkel verschil tussen beide tijdlijnen (dit moet ook omdat de ZSS en het afvoerscenario in beide tijdlijnen hetzelfde is). In 2100 variëren de HBN-verschillen grofweg tussen de 0,05 en 0,50 m, wat iets meer variatie is dan bij de waterstanden. De toename in de ZSS is 0,25 m sinds 2050 en gemiddeld genomen blijft daar in het HBN ongeveer 0,2 m (80%) van over in de normtrajecten binnen dit deelgebied, wat overeenkomt met de toename in de waterstanden. Dat de waterstanden niet 100% toenemen met de ZSS is eerder al geconstateerd, dat komt grotendeels door aanwezigheid van de EPK.

Tussen Gematigd en Laag zit 0,56 m ZSS in zichtjaar 2150, wat we (net als in de waterstanden) bijna volledig terug zien in de HBN-verschillen voor dat zichtjaar. Ook hier vallen weer de twee normtrajecten 14-1 en 15-3 op. Dit zijn de twee normtrajecten die zich achter de Hollandse IJsselkering (HIJK) bevinden. Deze stormvloedkering doet voor deze tijdlijn en dit zichtjaar dus goed werk om de ZSS buiten te houden. In 2200 is dit onderscheid voor de Hollandse IJssel niet langer zichtbaar, naar alle waarschijnlijkheid omdat de waterstanden dan zoveel zijn toegenomen dat het water over de HIJK heen stroomt (daarbij is overigens alleen overloop over de HIJK meegenomen, geen golfoverslag). Alle normtrajecten krijgen grofweg te maken met een HBN-stijging van 0,9 m door een toename van de zeespiegel met 1 m.

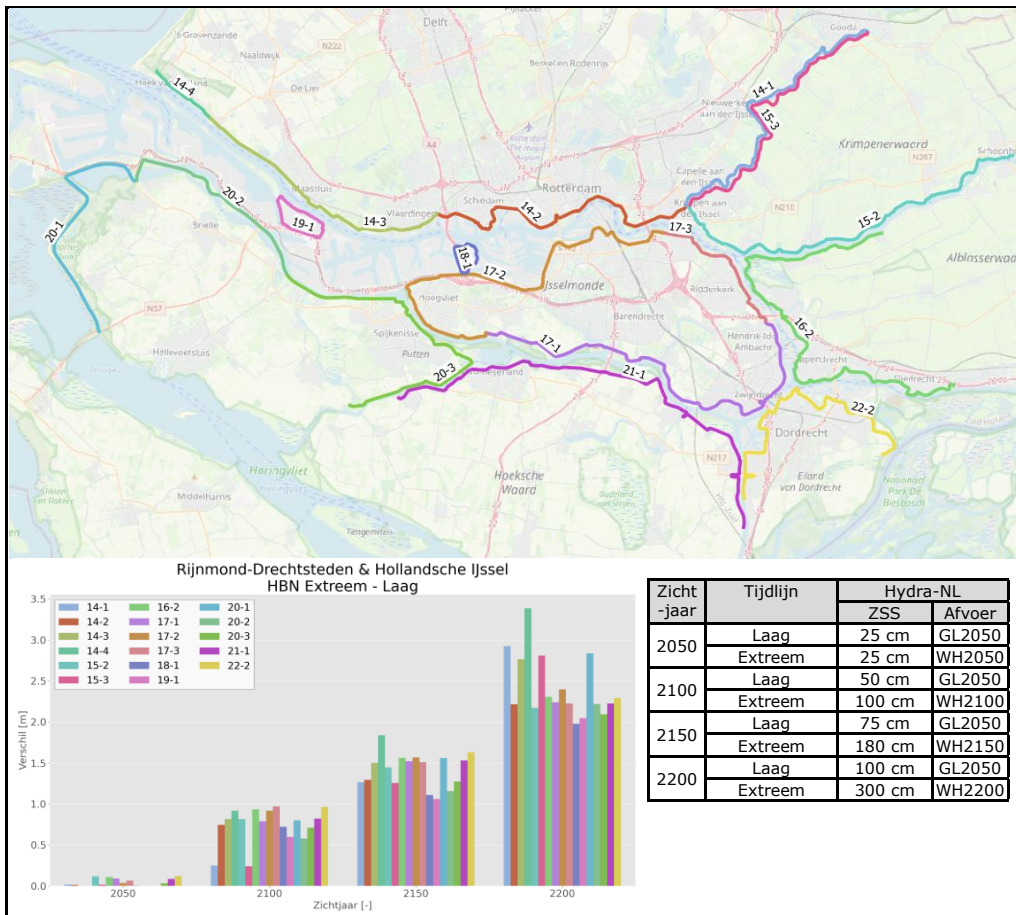


Figuur 38: Verschil in het HBN bij de norm per normtraject tussen tijdlijnen Gematigd en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden & Hollandsche IJssel.

Het algemene beeld voor de HBN's in dit gebied is dat de verschillen tussen de tijdlijn Gematigd en Laag goed overeenkomen met de verschillen voor de waterstanden in Figuur 23. In absolute zin zijn de HBN's wel degelijk hoger dan de waterstanden door toename van de golfhoogte, maar de verschillen die ontstaan onder invloed van ZSS liggen in dezelfde ordegrootte als die van de waterstanden en de toename van de ZSS zelf.

Eigenlijk alleen normtraject 14-4 (vierde balkje) is afwijkend, omdat dit traject buiten de Europoortkering ligt en dus direct door de zeewaterstand wordt beïnvloed. De HBN-verschillen voor dit traject zijn beduidend groter dan de ZSS zelf door de invloed van golven.

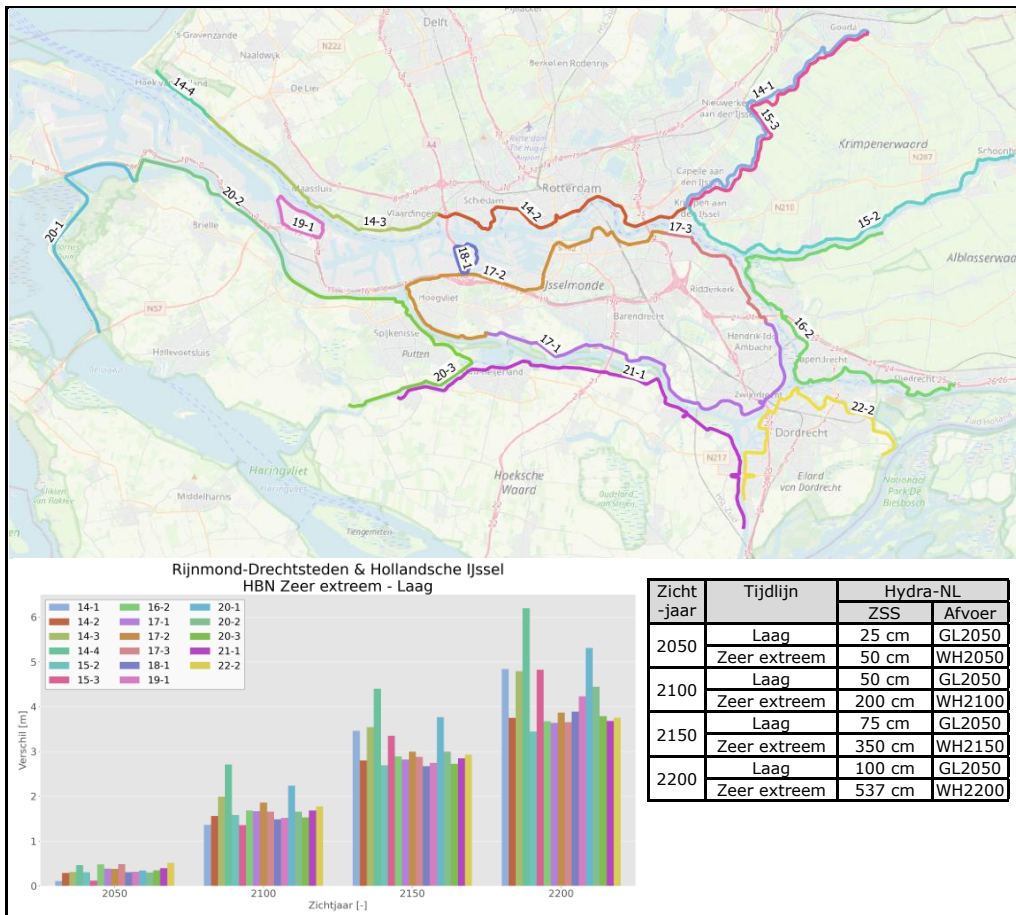
De verschillen tussen tijdlijn Extreem en tijdlijn Laag zijn te zien in Figuur 39.



Figuur 39: Verschil in het HBN bij de norm per normtraject tussen tijdslijnen Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden & Hollandsche IJssel.

Ditmaal zien we in 2050 wel kleine verschillen, ondanks dat de mate van ZSS in beide tijdslijnen gelijk is. Dit verschil wordt veroorzaakt door het verschil in de afvoerstatistiek, maar is beperkt (logisch, omdat de afvoer op de normtrajecten een ondergeschikte rol speelt). In 2100 herkennen we weer de afwijkende trajecten 14-1 en 15-3 achter de Hollandsche IJsselkering terug. Grofweg zien we in zichtjaren 2100, 2150 en 2200 respectievelijk waterstandsstijgingen terug van 0,75, 1,25 en 2,10 m. De verschillen in ZSS voor dezelfde zichtjaren bedragen 0,5, 1,05 en 2,0 m. De toenames in het HBN zijn dus voor tijdslijn Extreem groter dan alleen de ZSS. Omdat we weten dat dit deelgebied het meest beïnvloed wordt door de zee-waterstand en de wind achten we dit plausible resultaten. Een toename van de waterstand door ZSS geeft immers een grote waterdiepte en daarmee ook grotere golven. Merk op dat ook de afvoerstatistiek, het sluitpeil en de onderlinge verschillen in normfrequenties een rol spelen in de variaties die ontstaan in de HBN's.

Figuur 40 geeft de verschillen in het HBN tussen tijdslijn Zeer Extreem en tijdslijn Laag.



Figuur 40: Verschil in het HBN bij de norm per normtraject tussen tijdlijnen Zeer Extreem en Laag voor verschillende zichtjaren in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden & Hollandsche IJssel.

De stormvloedkeringen blijven, wanneer ze correct sluiten, ook in de toekomst in staat om hoge zeewaterstanden buiten te houden. De extreme waterstanden achter de stormvloedkering worden in belangrijke mate bepaald door de situaties waarbij de kering niet correct sluit. En dat zal steeds vaker gebeuren, omdat het aantal keren dat de stormvloedkeringen moeten sluiten, toeneemt als de zeespiegel stijgt.

Ook hier verwachten we meer dan de ZSS terug te vinden in de toenames van de HBN's (zie bijvoorbeeld ook Figuur 31 waar langs een heel tracé te zien is dat de invloed van de ZSS ver landinwaarts reikt). Dit wordt bevestigd uit de balkjes in de figuur. We zien toenames van HBN's in de orde van 0,40, 1,50, 2,90 en 3,75 m voor de verschillende zichtjaren. Deze komen voor dit deelgebied grotendeels overeen met de ZSS en liggen eigenlijk niet veel hoger dan de toenames in de waterstanden voor deze tijdlijn.

Alleen de resultaten in zichtjaar 2200 vallen voor de meeste normtrajecten duidelijk iets lager uit dan de toename van de ZSS van 4,4 m (Zeer Extreem t.o.v. Laag in 2200). Vermoedelijk komt dit doordat de ZSS voor dit scenario (5,40 m) wel in de statistiek is verwerkt, maar niet in de gebruikte database fysica (die gebaseerd is op waterstandsberekeningen met een ZSS van 300 cm). Dit verschil is in de meeste scenario's beperkt tot maximaal ca. 0,5 m (zie Tabel 2 in paragraaf 3.2.2), maar is bij tijdlijn Zeer Extreem in zichtjaar 2200 dus gelijk aan 2,4 m.



### 3.4 Samenvatting

In de voorliggende paragraaf geven we een globale samenvatting van de resultaten uit dit hoofdstuk.

#### Waterstanden

In Tabel 4 is een overzicht gegeven van de *gemiddelde waterstandsveranderingen* per deelgebied, waarbij:

- NRLK = Nederrijn & Lek
- WAAL = Waal
- MAAS = Maas
- RDST = Rijnmond-Drechtsteden
- HVHD = Haringvliet & Hollandsch Diep

Uit de tabel kunnen we een aantal conclusies op hoofdlijnen trekken:

#### Tijdelijk Gematigd (bovenste blok in de tabel)

- Met name bij deelgebieden RDST en HVHD werkt de ZSS nagenoeg volledig door in de waterstanden.
- In de overige drie deelgebieden (NRLK, WAAL en MAAS) nemen de waterstanden met toe met grofweg 30-40% van de ZSS. Dit is logisch omdat de afstand tot de zee groter is en de invloed van de afvoer groter wordt naarmate locaties meer in bovenstroomse richting liggen.

Tabel 4: Gemiddelde stijging in de waterstand bij de norm (WBN) voor de 5 deelgebieden voor tijdelijnen Gematigd, Extreem en Zeer Extreem t.o.v. tijdelijn Laag.

		Afvoerscenario		Gematigd t.o.v Laag (WBN)				
Zichtjaar	ZSS	Laag	Gematigd	NRLK	WAAL	MAAS	RDST	HVHD
2050	-	GL2050	GL2050	-	-	-	-	-
2100	+25 cm	GL2050	GL2100	+15 cm	+15 cm	+15 cm	+20 cm	+15 cm
2150	+55 cm	GL2050	GL2150	+25 cm	+25 cm	+25 cm	+55 cm	+55 cm
2200	+100 cm	GL2050	GL2200	+35 cm	+30 cm	+35 cm	+95 cm	+100 cm

		Afvoerscenario		Extreem t.o.v Laag (WBN)				
Zichtjaar	ZSS	Laag	Extreem	NRLK	WAAL	MAAS	RDST	HVHD
2050	-	GL2050	WH2050	+25 cm	+30 cm	+35 cm	+5 cm	+10 cm
2100	+50 cm	GL2050	WH2100	+85 cm	+80 cm	+100 cm	+60 cm	+70 cm
2150	+105 cm	GL2050	WH2150	+115 cm	+110 cm	+145 cm	+125 cm	+145 cm
2200	+200 cm	GL2050	WH2200	+140 cm	+130 cm	+185 cm	+205 cm	+215 cm

		Afvoerscenario		Zeer extreem tov Laag (WBN)				
Zichtjaar	ZSS	Laag	Zeer extreem	NRLK	WAAL	MAAS	RDST	HVHD
2050	+25 cm	GL2050	WH2050	-5 cm	+50 cm	+40 cm	+25 cm	+35 cm
2100	+150 cm	GL2050	WH2100	+100 cm	+95 cm	+120 cm	+150 cm	+155 cm
2150	+275 cm	GL2050	WH2150	+145 cm	+130 cm	+175 cm	+265 cm	+265 cm
2200	+437 cm	GL2050	WH2200	+190 cm	+170 cm	+235 cm	+385 cm	+355 cm

#### Tijdelijk Extreem (middelste blok in de tabel)

- In alle deelgebieden speelt zowel de ZSS als de toename van de afvoer een rol.
- De toenames in zichtjaar 2050 worden volledig veroorzaakt door toenames van de afvoeren. In vergelijking met tijdelijn Gematigd (bovenste blok) komt dit goed terug, omdat de ZSS in beide tijdelijnen niet aanwezig is.

- In de overige zichtjaren vinden we in alle deelgebieden stijgingen in de waterstand die vaak hoger liggen dan alleen de ZSS. Dit komt omdat de verandering van de afvoer voor de verschillende zichtjaren zorgen voor een extra toename t.o.v. de toename door de ZSS.
- In de deelgebieden waar de invloed van de zee minder is (NRLK, WAAL en MAAS) zijn de toenames in zichtjaar 2200 duidelijk minder dan in de andere twee deelgebieden (RDST en HVHD).

*Tijdljn Zeer Extreem (onderste blok in de tabel)*

- Ook voor deze tijdljn worden de deelgebieden RDST en HVHD gedomineerd door de ZSS. Tot aan zichtjaar 2150 zien we de ZSS nagenoeg volledig terug komen in de toename van de waterstanden. Alleen in zichtjaar 2200 is de ZSS duidelijk groter dan de toename van de waterstanden. Hierbij zal meespelen dat voor de berekeningen met 5,40 m ZSS een database fysica is gehanteerd met slechts 3 m ZSS (in de statistiek is wel uitgegaan van 5,40 m ZSS).
- Bij kleine ZSS (zichtjaar 2050) spelen de afvoeren nog duidelijk een rol, omdat de toenames in de waterstanden groter zijn dan alleen die van de ZSS. Op de Nederrijn-Lek is zelfs sprake van een daling, door het ontzien van de Nederrijn-Lek in combinatie met een aangepaste afvoerverdeling gebaseerd op Vast18000. Zie paragraaf 3.2.1.
- In vergelijking met tijdljn Extreem is voor zichtjaar 2200 de invloed van ZSS (i.c.m. aanpassing van het sluitpeil) te zien, omdat de afvoerstatistiek en de afvoerverdeling in beide tijdlijnen en voor dat zichtjaar gelijk zijn.

### Hydraulisch belasting niveau

In Tabel 5 is het gemiddeld verschil in *HBN-toename* weergegeven per deelgebied voor de verschillende tijdlijnen.

Tabel 5: Gemiddelde stijging in HBN voor tijdljn Gematigd, tijdljn Extreem en tijdljn Zeer Extreem t.o.v. tijdljn Laag.

		Afvoerscenario		Gematigd tov Laag (HBN)				
Zichtjaar	ZSS	Laag	Gematigd	NRLK	WAAL	MAAS	RDST	HVHD
2050	-	GL2050	GL2050	-	-	-	-	-
2100	+25 cm	GL2050	GL2100	+15 cm	+15 cm	+15 cm	+25 cm	+15 cm
2150	+55 cm	GL2050	GL2150	+25 cm	+25 cm	+30 cm	+65 cm	+65 cm
2200	+100 cm	GL2050	GL2200	+35 cm	+35 cm	+45 cm	+110 cm	+120 cm

		Afvoerscenario		Extreem tov Laag (HBN)				
Zichtjaar	ZSS	Laag	Extreem	NRLK	WAAL	MAAS	RDST	HVHD
2050	-	GL2050	WH2050	+25 cm	+30 cm	+45 cm	+5 cm	+10 cm
2100	+50 cm	GL2050	WH2100	+80 cm	+80 cm	+120 cm	+75 cm	+85 cm
2150	+105 cm	GL2050	WH2150	+110 cm	+110 cm	+165 cm	+140 cm	+175 cm
2200	+200 cm	GL2050	WH2200	+140 cm	+135 cm	+210 cm	+240 cm	+255 cm

		Afvoerscenario		Zeer extreem tov Laag (HBN)				
Zichtjaar	ZSS	Laag	Zeer extreem	NRLK	WAAL	MAAS	RDST	HVHD
2050	+25 cm	GL2050	WH2050	-5 cm	+50 cm	+50 cm	+35 cm	+40 cm
2100	+150 cm	GL2050	WH2100	+95 cm	+95 cm	+140 cm	+170 cm	+185 cm
2150	+275 cm	GL2050	WH2150	+140 cm	+140 cm	+200 cm	+305 cm	+310 cm
2200	+437 cm	GL2050	WH2200	+190 cm	+185 cm	+255 cm	+420 cm	+375 cm

Het is lastig om de toenames in het HBN voor alle deelgebieden direct te koppelen aan de ZSS, omdat ook andere factoren zoals de afvoerstatistiek, de afvoerverdeling en het sluitpeil een rol spelen, evenals de windgolven. Wat wel te zien is, is dat

RDST en HVHD vergelijkbare resultaten laten zien. Deze beide deelgebieden worden beiden gedomineerd door de invloed van de ZSS. Voor RDST en HVHD zijn dus wel koppelingen te leggen met de ZSS. De andere drie deelgebieden (NRLK, WAAL en MAAS) worden daarnaast door de afvoer beïnvloed. De deelgebieden NRLK en WAAL geven vergelijkbare resultaten (al heeft een andere afvoerverdeling (voor het ontzien van de Nederrijn-Lek) op de Nederrijn-Lek een verlagend effect en op de Waal een verhogend effect). De Maas gedraagt zich duidelijk anders dan de andere twee andere afvoergedomineerde gebieden en is gevoeliger voor de invloed van de afvoer in extremere tijdslijnen en hogere zichtjaren (in de zin dat je grotere verschillen krijgt als gevolg van andere afvoerstatistiek voor een bepaald scenario). Verder worden de resultaten met meer dan 3 m ZSS gekleurd doordat niet de volledige ZSS is verwerkt in de fysica, maar met name via de statistiek. Dit leidt tot enige onderschatting van WBN's en HBN's bij 5 m ZSS. Ook het aftoppen van de afvoeren maakt het lastig de resultaten voor de bovenstrooms gelegen gebieden te duiden in termen van ZSS alleen.

#### *Tijdslijn Gematigd*

De toename in zeespiegelstijging tussen tijdslijn Gematigd en tijdslijn Laag voor zichtjaar 2100 bedraagt in vier van de vijf deelgebieden 0,15 m (alleen in RDST is dit 0,25 m), wat overeenkomt met ongeveer 60% van de ZSS. Dit patroon zien we voor tijdslijn Gematigd eigenlijk in alle zichtjaren terug. In de afvoergedomineerde deelgebieden komt ongeveer 60% van de ZSS terug in het HBN, in de zeegeedomineerde deelgebieden komt ongeveer 110-120% van de ZSS terug in de HBN's.

#### *Voor tijdslijn Extreem*

Voor zichtjaar 2050 zien we vooral toenames in de HBN's in de afvoergedomineerde deelgebieden. Dit is logisch, omdat voor dit zichtjaar er geen verschil is in de ZSS tussen tijdslijn Extreem en tijdslijn Laag. In de deelgebieden RDST en HVHD werkt de ZSS grofweg 110-120% door in het HBN voor zichtjaren 2100 en 2150. In zichtjaar 2200 vlakt deze doorwerking wat af tot iets onder de 100%. In de andere drie deelgebieden (NRLK, WAAL en MAAS) speelt de afvoer een grote rol en is geen eenduidige relatie meer te leggen met de ZSS. De toenames op de Maas zijn groter dan die op de Nederrijn-Lek en de Waal.

#### *Voor tijdslijn Zeer Extreem*

In deze tijdslijn zien we eigenlijk voor alle zichtjaren dat de toenames in het HBN duidelijk achter blijven t.o.v. de ZSS.. Voor RDST komt weer naar voren dat de ZSS nagenoeg 100% terug komt in de toenames van het HBN, net als bij andere tijdslijnen.

In zijn algemeenheid is het beeld dat de verschillen in de HBN's (Tabel 4) niet heel anders zijn de verschillen in de waterstanden (Tabel 5). We constateren dat de gemiddelde verschillen in de HBN's wat groter zijn dan de verschillen in de waterstanden en dat de HBN's ook wat meer variatie vertonen. De grootste verschillen tussen de HBN's en de waterstanden treden op voor RDST, waar de invloed van de ZSS (toenemende waterdiepten) i.c.m. wind zorgt voor grotere golven en daarmee hogere HBN's. Ook op de Maas zien we in zichtjaar 2150 en 2200 nog verschillen tussen de toenames van het HBN en de toenames van de waterstand van enkele decimeters.

Met name in de deelgebieden RDST en HVHD zagen we bij de waterstanden al dat de stormvloedkeringen een grote mate van ZSS gedeeltelijk buiten kunnen houden. De stormvloed blijft deels buiten de stormvloedkeringen en dringt deels naar het achterliggend gebied.

Dat geldt dus ook voor de HBN's, aangezien deze een redelijk vergelijkbaar beeld geven. Zoals eerder al opgemerkt, wil dat niet zeggen dat de EPK geen effect meer heeft (zie bijvoorbeeld de sprong in de HBN's in Figuur 29 en Figuur 31), maar wel dat de ZSS eigenlijk direct is terug te zien in de toenames van de HBN's.

### Sluitfrequentie Europoortkering en Hollandsche IJsselkering

In Tabel 6 is een overzicht gegeven van het aantal keren dat de Europoortkering sluit per jaar. Net als alle overige berekeningen uit dit rapport, zijn de sluitfrequenties bepaald met Hydra-NL versie 2.8.4 (voor KPZSS).

Tabel 6: Sluitfrequenties Europoortkering als functie van tijdlijn en zichtjaar in keren per jaar.

Zichtjaar / Tijdlijn		Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2023	1/18	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
2050		1/7	1/7	1/7	1/2
2100		1/2	1	7	1
2150		1	27	1/2	1
2200		6	1	1/6	161
Legenda					
	Geen aangepast sluitpeil				
	Sluitpeil + 125 cm				
	Sluitpeil + 250 cm				

Bij de interpretatie van deze resultaten is het belangrijk om Tabel 2 bij te hand te houden, waarin alle gekozen instellingen en sluitpeilen voor de berekeningen zijn samengevat. Het aantal keren dat een stormvloedkering sluit, hangt logischerwijs af van de tijdlijn en het zichtjaar. Hoe extremer die zijn, hoe vaker de SVK-en sluiten. Door verhoging van het sluitpeil gaan de stormvloedkeringen minder vaak dicht, maar ontstaan wel hogere waterstanden achter de keringen. Merk op dat de sluitfrequentie van de EPK in 2023 niet overeenkomt met de verwachte eens per 10 of 11 jaar. Dit komt omdat in KP ZSS gewerkt is met andere uitgangspunten (andere modellen, databases en statistiek), waardoor uit de probabilistische berekening een sluitfrequentie van 1/18 per jaar volgt.

#### Sluitfrequentie Europoortkering

De sluitfrequentie van de EPK voor zichtjaar 2050 verandert alleen voor tijdlijn Zeer Extreem. Hoewel in 2050 voor tijdlijn Extreem de afvoerstatistiek verandert t.o.v. tijdlijn Gematigd, heeft dit geen invloed op het aantal keren sluiten van de EPK. De ZSS van 0,5 m in tijdlijn Zeer Extreem heeft wel direct effect: de verwachting is dat de EPK dan gemiddeld elke twee jaar zal moeten sluiten.

Voor zichtjaar 2100 zien we een afname van het aantal sluitingen in tijdlijn Zeer Extreem t.o.v. Extreem, ondanks dat de ZSS met 1,0 m toeneemt tussen beide scenario's. De reden dat de kering niet vaker dicht gaat wordt veroorzaakt door de verhoging van het sluitpeil in tijdlijn Zeer Extreem waar voor Extreem dit in 2100 nog niet gebeurt (later wel).

Tijdlijn Zeer Extreem voor zichtjaar 2200 geeft door de extremiteit van deze combinatie verreweg het grootste verwachte aantal sluitingen per jaar: 161 in een winterhalfjaar, ongeveer een dagelijkse sluiting. Hierbij moet worden opgemerkt, dat in de berekening voor 5,40 m ZSS met een lager sluitpeil is gerekend dan passend zou zijn bij deze situatie, zoals reeds opgemerkt in paragraaf 3.2.2. Ook Tijdlijn Gematigd zichtjaar 2150 geeft veel sluitingen in een winterhalfjaar. Gekozen is namelijk om bij ZSS 131 cm uit te gaan van de database fysica met 100 cm ZSS, waarin het sluitpeil niet is aangepast (zie Tabel 2). Achteraf gezien sluit dit niet goed aan bij het vooraf door RWS gedefinieerde uitgangspunt, dat het sluitpeil dusdanig zou moeten worden aangepast, dat tot 3 m ZSS sprake is van maximaal 10 sluitingen per jaar [Rijkswaterstaat, 2021b]. In het bereik van relevante

terugkeertijden is het effect daarvan naar verwachting wel beperkt (zie ook de gevoeligheidsanalyse t.a.v. het sluitpeil in paragraaf 6.3).

#### *Sluitfrequentie Hollandsche IJsselkering*

De sluitfrequentie voor de Hollandsche IJsselkering is niet berekend met behulp van Hydra-NL, aangezien de betreffende rekenoptie niet aanwezig is voor dit watersysteem. In plaats daarvan is een inschatting gemaakt aan de hand van de overschrijdingsfrequentie van het sluitpeil voor de Hollandsche IJsselkering. In de referentiesituatie bedraagt deze 1/2 keer per jaar (gemiddeld eens in de 2 jaar). Voor de klimaatscenario's is deze overschrijdingsfrequentie niet (altijd) goed te berekenen, aangezien de overschrijdingsfrequentie dan regelmatig groter is dan de maximale waarde die Hydra-NL kan berekenen (namelijk 6 keer per jaar). De beste inschatting op dit moment is dat de sluitfrequentie in alle situaties ongeveer 10x zo groot is als de sluitfrequentie van de Europoortkering. In bepaalde scenario's zal dat echter niet houdbaar zijn. Een sluitfrequentie van 1600 keer per jaar voor tijdlijn Zeer Extreem in 2200 achten we bijvoorbeeld niet meer realistisch. Maar zoals hierboven al aangegeven, is de berekende sluitfrequentie voor de EPK voor dit scenario ook al niet realistisch, aangezien het bijbehorende sluitpeil niet passend is. Bovenstaande schatting van de sluitfrequentie voor de HIJK achten we dan ook alleen bruikbaar voor situaties waarin de sluitfrequentie van de EPK voldoet aan het vooraf door RWS gedefinieerde uitgangspunt van maximaal 10 sluitingen per jaar.

#### **Indringing ZSS in bovenstroomse richting**

Het is niet eenvoudig om per tijdlijn/zichtjaar uitspraken te doen over de indringing van de ZSS in bovenstroomse richting. In de berekeningen veranderen meerdere aspecten tegelijkertijd, die elkaar allemaal beïnvloeden. Voor een zuiver beeld over de invloed van ZSS, zijn gegevens nodig waarin alleen de ZSS verandert. Uit de visualisatie van de resultaten in dit hoofdstuk concluderen we dat de invloed van de zee op de verschillende riviertakken doorloopt tot minimaal:

- Krimpen a/d Lek voor de Nederrijn-Lek
- Werkendam op het Haringvliet/Hollandsch Diep richting de Waal
- Den Bosch op het Haringvliet/Hollandsch Diep richting de Maas

Meer bovenstrooms van deze locaties vormt de invloed van de afvoerstatistiek en afvoerverdeling een steeds belangrijkere rol in de toenames van de waterstanden. De invloed van de ZSS dringt steeds verder in bovenstroomse richting door naarmate het debiet over een riviertak minder is en de rivier minder steil is. Tenslotte zien we meer doordringing op de Nederrijn-Lek en de Maas dan op de Waal.

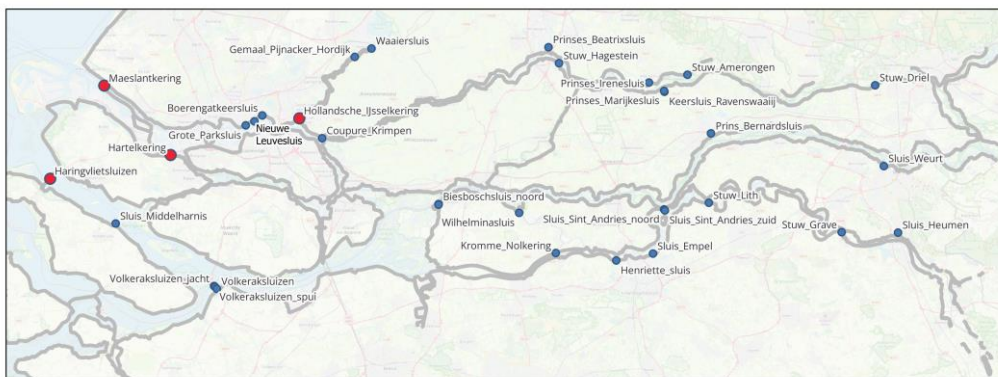
## 4 Waterveiligheidsopgave kunstwerken

### 4.1 Doel

Het doel van dit hoofdstuk is het bepalen waterveiligheidsopgave en versterkingsopgave voor de kunstwerken binnen het beschouwde gebied van dit rapport. 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 (toegeleverd bestand "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 t.b.v. waterveiligheid beschouwd, wanneer dit kunstwerk naast het zijn van een onderbreking van de reguliere waterkering, een dergelijke functie heeft.

Figuur 41 toont een overzicht van de beschouwde kunstwerken.



Figuur 41: Overzicht objecten in Rijn- Maasmond en Rivierengebied: categorie 1 kunstwerken in blauw, stormvloedkeringen in rood.

De objecten zijn in drie categorieën opgedeeld:

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

Binnen de scope van deze studie zijn alleen objecten uit categorie 1 en 3 aanwezig. Kunstwerken bestaan vaak uit meerdere objecten. Een voorbeeld hiervan is het kunstwerk Prinses Irenesluis. Dit kunstwerk bestaat uit twee schutsluizen (de duwvaartsluis en de oude sluis). Deze twee objecten worden separaat beschouwd, omdat einde levensduur, kerende hoogte en vervangingswaarde verschilt. De resultaten per object zijn gepresenteerd in Bijlage C.

In onderstaande tabel wordt alleen de naam van het kunstwerk genoemd. In dit geval Prinses Irenesluis en niet de namen van bijbehorende objecten. Dit resulteert in onderstaande verdeling van de kunstwerken over drie categorieën, zie Tabel 7. In totaal zijn 73 objecten beschouwd verdeeld over 31 kunstwerken.

Tabel 7: Beschouwde kunstwerken binnen de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied per categorie.

1) Kunstwerken alleen op hoogte (in totaal objecten, hier enkel de namen van de complexen benoemd)	2) Kunstwerken waar ook andere functies worden beoordeeld (hier enkel de namen van de complexen benoemd)	3) Stormvloedkeringen
Algerasluis		Haringvlietsluizen
Waaiersluis		Hollandsche IJsselkering
Stuw en sluis Hagestein		Maeslantkering
Prinses Beatrixsluis		Hartelkering
Prinses Marijkesluis		
Prinses Irenesluis		
Stuw en sluis Amerongen		
Pr. Bernhardsluis		
Stuw en sluis Driel		
Sluiscomplex Weurt		
Volkeraksluizen		
Biesboschsluis		
Wilhelminasluis		
Sluis Engelen		
Sluizencomplex St. Andries		
Prinses Maxima sluizen		
Stuw en sluiscomplex Grave		
Sluiscomplex Heumen		
Parksluizen		
Boezemgemaal Gouda		
Keersluis Spuikanaal Gouda		
Leuvekolk		
Schilthuis		
Coupure Krimpen a/d Lek		
Keersluis Middelharnis		
Spuimiddel sluis Empel		
Kromme Nel kering		

De Haringvlietsluizen zijn niet opgenomen als categorie 2 kunstwerk, omdat de functie van het kunstwerk niet verandert bij zeespiegelstijging. De verwachting is dat het peil op het Haringvliet meestijgt met de zeespiegel. Hiermee blijft de spuifunctie gehandhaafd en blijft de doorvoerfunctie hetzelfde bij geopende sluizen.

## 4.2 Methode

In deze paragraaf is de gehanteerde methode nader toegelicht voor categorie 1 en categorie 3 kunstwerken. Hier zijn de uitgangspunten en aannames opgesomd welke zijn gehanteerd in de analyse.

### 4.2.1 Categorie 1 (enkel hoogtetekort)

Voor categorie 1 kunstwerken zijn twee typen werkzaamheden te onderscheiden:

- Bepalen van het kruinhoogtetekort;
- Maken van een kostenschatting voor de benodigde versterking. Ook wordt rekening gehouden met einde levensduur (volgens bouwspecificaties) waarna voor 100 jaar wordt versterkt.

De werkzaamheden worden hieronder nader uitgewerkt.

### Bepalen kruinhoogtetekort

Tussen 2023 en 2200 is per zichtjaar het kruinhoogtetekort ten opzichte van de huidige kerende hoogte van het object bepaald. Voor de zichtjaren 2023, 2050, 2100, 2150 en 2200 is de waterstand bepaald, zie paragraaf 3.3.

Het hoogtetekort is via een vereenvoudigde methode beoordeeld door de kerende hoogte van het object te vergelijken met de waterstand bij de overschrijdingskans bij een doorsnede van het kunstwerk. 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) kruinhoogtetekorten<sup>12</sup>.

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. De waterstand is voor de objecten opgenomen in het opleverdossier. 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].
$\omega$	Faalkansruimtefactor voor het betreffende toetsspoor [-].
$N_{dsn}$	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 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.

### 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 C.

<sup>12</sup> Een beoordeling op basis van de kombergingsbenadering valt buiten de scope van deze beleidsstudie. Daarom zijn de in deze studie berekende hoogtetekorten voor kunstwerken mogelijk conservatief.



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.

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 [CBS, 2022].

Indien voor een object de vervangingskosten niet opgenomen zijn in de database, zijn de kosten bepaald op basis van het KostenType. Het KostenType is een combinatie van type kunstwerk en de grootteklasse. De vervangingskosten zijn per KostenType opgenomen in Kostencurves Kunstwerken KOSWAT [Rijkswaterstaat GPO, 2019]. Indien het KostenType onbekend is van een object, wordt een vergelijkbare grootteklasse aangenomen als voor de overige objecten binnen het kunstwerk. Indien van alle objecten in het kunstwerk het KostenType ontbreekt in de database, is het KostenType bepaald op basis van de vervangingskosten.

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].

De totale kosten zijn 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 object tot het betreffende zichtjaar. In hoofdstuk 8 worden ook de kosten ten opzichte van systeem op orde gepresenteerd. Een toelichting hierop wordt gegeven in paragraaf 5.2 onder Figuur 50.

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.

### **Uitgangspunten en aannames**

Voor de berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd. Tevens zijn 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.
- De kerende hoogte is overgenomen uit de database van het project VONK. De gegevens in deze database hebben soms een onnauwkeurigheid in zich. De veronderstelde kerende hoogte kan daardoor enigszins afwijken van de werkelijke kerende hoogte in de huidige situatie zoals gebruikt in LBO 1.
- Wanneer de kerende hoogte van één specifiek object niet is opgenomen in de database - Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls wordt de kerende hoogte van andere objecten binnen het kunstwerk voor het object gehanteerd. Als de kerende hoogte van andere objecten binnen het kunstwerk ook niet bekend is, dan wordt de kerende hoogte gelijkgesteld aan het waterstandsniveau in 2050 bij de tijdlijn Laag.

Versterking- en vervangingskosten:

- Indien einde levensduur van het object niet opgenomen is in de database - Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls is, wordt de restlevensduur van een ander object binnen het kunstwerk overgenomen. Wanneer van het gehele kunstwerk de levensduur niet opgenomen is in database - Natte kunstwerken KP-ZSS-v-jan2021.xls, wordt aangenomen dat einde levensduur in zichtjaar 2050 ligt.
- De kunstwerken bij Hagestein, Amerongen, Driel, Lith en Grave zijn allemaal stuwten. Deze hebben niet de functie hoogwaterkeren. Voor deze kunstwerken zijn geen versterkings- en vervangingskosten bepaald.

#### *4.2.2 Categorie 3 (stormvloedkeringen)*

Er worden vier stormvloedkeringen beschouwd: De Europoortkering bestaande uit de Maeslantkering en de Hartelkering, de Haringvlietsluizen en de Hollandsche IJsselkering. De stormvloedkeringen worden beschouwd op drie aspecten:

- Kruinhoogtetekort
- Betrouwbaarheid sluiten
- Civiel falen

Het kruinhoogtetekort en de kosten zijn voor stormvloedkeringen met dezelfde methode bepaald als de categorie 1 kunstwerken. Enige verschil in methodiek tussen de categorie 1 kunstwerken en de stormvloedkeringen is de vervangingswaarde welke bij stormvloedkeringen afhankelijk is van de kruinhoogtetekort, zie Bijlage E. Voor de stormvloedkeringen zijn verder dezelfde uitgangspunten en aannames gehanteerd als voor categorie 1 kunstwerken. Deze zijn beschreven in paragraaf 4.2.1.

De analyses van betrouwbaarheid sluiten en civiel falen zijn opgenomen in Bijlage D. Belangrijk uitgangspunt in deze analyse is dat niet verder wordt gekeken dan de ontwerplevensduur van de kering. Uitgangspunt is dat na einde ontwerplevensduur een nieuwe kering kan worden gerealiseerd die voldoet. Dat wil zeggen een kering die voldoende sterk is, maar ook haar overige functies kan vervullen.

### Betrouwbaarheid Sluiten

De veiligheid tegen overstromen wordt voor een belangrijk deel bepaald door de faalkansen per jaar van de waterkeringen. Voor elk van de beweegbare stormvloedkeringen wordt dit berekend door de jaarlijkse overschrijdingskans van het sluitpeil van de kering (de kans per jaar op een zogeheten "vraag") te vermenigvuldigen met de kans per vraag op het niet sluiten, niet keren of (voor een deel van de keringen tevens) niet openen van de kering.

De faalkans per vraag (de zogeheten niet-beschikbaarheid) van de kering wordt op zijn beurt berekend door een combinatie van faalkansen per vraag, faalfrequenties per uur en reparatieduren van de voor de waterkerende functie relevante onderdelen van de kering. Voor de analyse is aangenomen dat de reparatieduren van de onderdelen geen significante invloed ondervinden van een stijgende zeespiegel en dat de beschikbaarheid van de kering alleen wijzigt door een verandering van de faalkansen per vraag en/of de faalfrequenties per uur (ofwel, door een verandering van de betrouwbaarheid) van de relevante onderdelen.

Voor "betrouwbaarheid sluiten" is het effect van zeespiegelstijging op de betrouwbaarheid van (het sluiten van) de kering onderzocht door de zogenoemde minimale deelverzamelingen uit de foutenboomanalyse van de stormvloedkeringen te analyseren. Een minimale deelverzameling is een kleinste mogelijke combinatie van falende onderdelen die leidt tot het falen van de waterkerende functie van de stormvloedkering. Voor elke deelverzameling is per zeespiegelstijging de procentuele toename van de faalkans ingeschat aan de hand van onderstaande tabel.

Tabel 8: Semi-kwantitatieve beoordeling Betrouwbaarheid Sluiten en Civiel falen stormvloedkeringen.

	Effect	Beschrijving
4	Kering faalt	Zeer grote kanstoename waardoor technische faalkans van het subsysteem nagenoeg 1 is
3	Groot effect	Grote kanstoename technische faalkans subsysteem (21% - 99% toename faalkans)
2	Middel effect	Middel kanstoename technische faalkans subsysteem (6% - 20% toename faalkans)
1	Klein effect	Kleine kanstoename technische faalkans subsysteem (0% - 5% toename faalkans)
0	Geen effect	Geen kanstoename technische faalkans subsysteem

### Civiel falen

Voor de "civiele betrouwbaarheid" is het effect van zeespiegelstijging op de civiele faalkans geanalyseerd. Het effect van de verhoogde waterstand en de verhoogde golfbelasting op de civiele faalkans is vastgesteld. Dit is gedaan door kwalitatief te beoordelen in welke mate de toename in hydraulische condities invloed hebben op de civiele faalmechanismen. De semi-kwantitatieve beoordelingscriteria - zoals opgenomen in Tabel 8 - zijn gehanteerd.

## 4.3 Resultaten

De resultaten voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zijn voor categorie 1 en categorie 3 los gepresenteerd. De totale kosten (categorie 1 en categorie 3) zijn in paragraaf 4.3 getoond. Een separate analyse van hoogtetekort en de kosten per object is opgenomen in Bijlage C en Bijlage E.

## 4.3.1 Categorie 1

**Hoogtetekort**

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 4.2.1.

Tabel 9: Kruinhoogtetekort in meters per object (categorie 1) ten opzichte van de huidige kerende hoogte, per zichtjaar en tijdlijn

Kunstwerk	Laag				Gematigd				Extreem				Zeer Extreem			
	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200
Algerasluis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,2	2,4
Waaiersluis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,3	1,7	0,0	0,3	2,0	3,7
Stuw en sluis Hagestein	2,7	2,3	2,3	2,4	2,7	2,4	2,6	2,7	3,0	3,2	3,5	3,8	2,6	3,5	3,8	4,4
Prinses Beatrixsluis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0	0,4	1,1
Prinses Marijkesluis (oostelijke sluis, westelijke sluis en dieselgemaal)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	0,7	0,0	0,3	0,7	1,0
Prinses Marijkesluis (keerschuij Ravenswaaij)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,7	0,0	0,3	0,6	0,9
Prinses Irenesluis Duwvaartsluis (sluis 1)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,0	0,5	0,6	0,9
Prinses Irenesluis Oude sluis (sluis 2)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	0,6	0,7	0,1	0,6	0,7	1,0
Stuw en sluis Amerongen	2,0	1,6	1,6	1,6	2,0	1,7	1,8	1,8	2,2	2,4	2,6	2,7	1,9	2,5	2,7	2,9
Pr. Bernhardsluis	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,3	0,3	0,4	0,3	0,9	1,0	1,1	0,5	1,0	1,1	1,2
Stuw en sluis Driel	2,4	2,1	2,1	2,1	2,4	2,2	2,2	2,3	2,7	2,8	2,9	2,9	2,4	2,9	2,9	3,0
Sluiscomplex Weurt	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	1,1	1,2	1,2	0,6	1,1	1,2	1,2
Biesboschsluis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,5	1,5	0,0	0,6	1,7	3,0
Wilhelminasluis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
Sluis Engelen	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	0,5	1,3	1,7	2,2	0,5	1,4	1,9	2,6
Sluizencomplex St. Andries	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Prinses Maxima sluizen	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,5	2,5	2,7	2,8	3,6	4,1	4,5	2,8	3,7	4,2	4,7
Stuw en sluiscomplex Grave (sluis noord en stuw)	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,9	3,0	3,0	3,3	4,2	4,7	5,0	3,3	4,3	4,7	5,1
Stuw en sluiscomplex Grave (sluis zuid)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,2	4,3	4,3	4,6	5,5	6,0	6,3	4,6	5,6	6,0	6,4
Sluiscomplex Heumen (sluis)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	1,5	1,9	0,2	1,1	1,5	1,9
Sluiscomplex Heumen (gemaal)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,7	1,5	2,0	2,4	0,7	1,6	2,0	2,4
Sluiscomplex Heumen (Keersluis oost)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,5	1,3	1,8	2,2	0,5	1,4	1,8	2,2
Parksluizen	0,0	0,0	0,2	0,5	0,0	0,2	0,7	1,3	0,0	0,7	1,2	2,4	0,0	1,4	2,7	4,1

Boezemgemaal Gouda	0,0	0,1	0,2	0,3	0,0	0,2	0,5	1,4	0,0	0,4	1,4	3,3	0,1	1,5	3,7	5,2
Keersluis Spuikanaal Gouda	0,0	0,1	0,2	0,3	0,0	0,2	0,5	1,4	0,0	0,4	1,4	3,3	0,1	1,5	3,7	5,2
Leuvekolk	0,0	0,3	0,5	0,8	0,0	0,5	1,0	1,6	0,0	1,0	1,6	2,7	0,3	1,7	3,0	4,4
Schilthuis	0,0	0,3	0,4	0,8	0,0	0,5	1,1	1,7	0,0	1,2	1,9	3,0	0,4	1,9	3,2	4,4
Coupure Krimpen a/d Lek	0,0	0,3	0,5	0,9	0,0	0,5	1,1	1,8	0,1	1,2	2,0	3,0	0,5	2,0	3,3	4,6
Keersluis Middelharnis	0,0	0,3	0,5	0,9	0,0	0,5	1,1	1,8	0,1	1,2	2,0	3,0	0,5	2,0	3,3	4,6
Spuimiddel sluis Empel	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,3	0,5	0,6	1,4	1,9	2,4	0,6	1,6	2,1	2,7
Kromme Nel kering	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,4	1,2	1,6	2,1	0,5	1,4	2,0	2,9
Sluizencomplex Volkerak	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,3	2,6

De kunstwerken bij Hagestein, Amerongen, Driel, Lith en Grave zijn stuwen aanwezig. Deze hebben niet de functie hoogwaterkeren. Bij hoge afvoer zullen de stuwen gestreken worden. Daarom is bij deze kunstwerken het kruinhoogtetekort niet relevant voor waterveiligheid. Bij het bepalen van de kosten worden deze kunstwerken buiten beschouwing gelaten. De kosten voor de Algerasluis zijn opgenomen als onderdeel van de totale kosten van de Hollandsche IJsselkering.

Bij het kruinhoogtetekort valt op dat de deze niet per definitie toeneemt bij het extremer worden van de tijdlijnen voor de objecten op de Nederrijn-Lek. Bij de Prinses Irenesluis en Prinses Marijkesluis bijvoorbeeld neemt het kruinhoogtetekort af bij de tijdlijn Zeer Extreem ten opzichte van de tijdlijn Extreem in zichtjaar 2050. Dit heeft te maken met het beleidsuitgangspunt 'Lek ontzien' in combinatie met een andere afvoerverdeling: Vast16000 voor Extreem en Vast1800 voor Zeer Extreem, zie Tabel 2 en paragraaf 3.3.1.

### Kostenschatting

In Bijlage C zijn de kosten voor individuele objecten gepresenteerd voor alle tijdlijnen en zichtjaren. In deze paragraaf zijn de totale kosten van de categorie 1 kunstwerken per tijdlijn en per zichtjaar in Tabel 10 gepresenteerd. De kolom "nominale kosten" toont de nominale kosten welke gemaakt worden tot het betreffende zichtjaar. In de kolom "nominale kosten met correctie restwaarde" worden de nominale kosten tot het betreffende zichtjaar gepresenteerd. De nominale kosten worden gecorrigeerd met de restwaarde van het object in dat zichtjaar. Hieruit kunnen de kosten per aantal meter zeespiegelstijging worden afgeleid.

Tabel 10: Cumulatieve nominale kosten kunstwerken (categorie 1) per zichtjaar en tijdlijn.

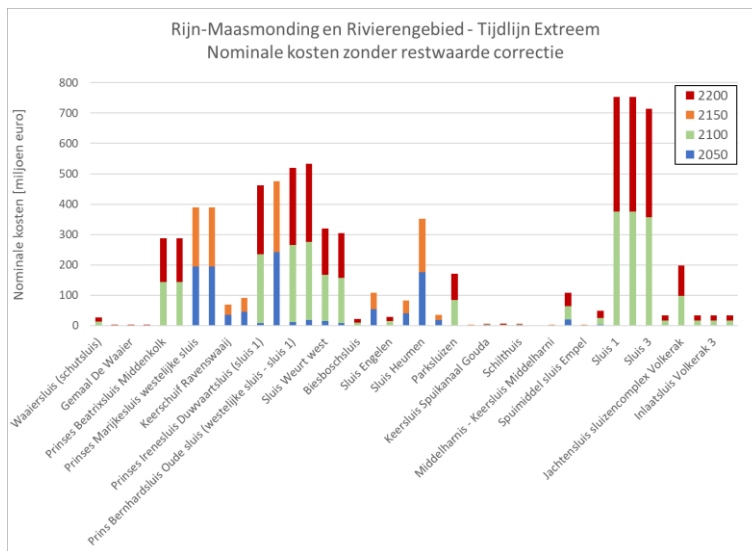
Zichtjaar	Tijdlijnen en Nominale kosten [mln. eur]: met en zonder correctie restwaarde							
	Laag		Gematigd		Extreem		Zeer Extreem	
	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie
2050	988	86	990	87	1101	127	1048	125
2100	3827	1377	3836	1386	3902	1455	3901	1451
2150	4806	3280	4814	3289	4907	3358	4863	3354
2200	7633	5184	7642	5192	7708	5262	7708	5257

In Tabel 10 valt op dat de kosten voor de tijdlijn Zeer Extreem lager zijn dan de kosten voor de tijdlijn Extreem. Dit verschil wordt veroorzaakt door de kosten voor het object Keersluis Ravenswaaij. Dit object ligt aan de Nederrijn-Lek. Door de verschillende afvoerverdeling voor de verschillende tijdlijnen (Vast16000 bij tijdlijn Extreem en Vast18000 bij tijdlijn Zeer Extreem) verschilt het hoogtetekort. De

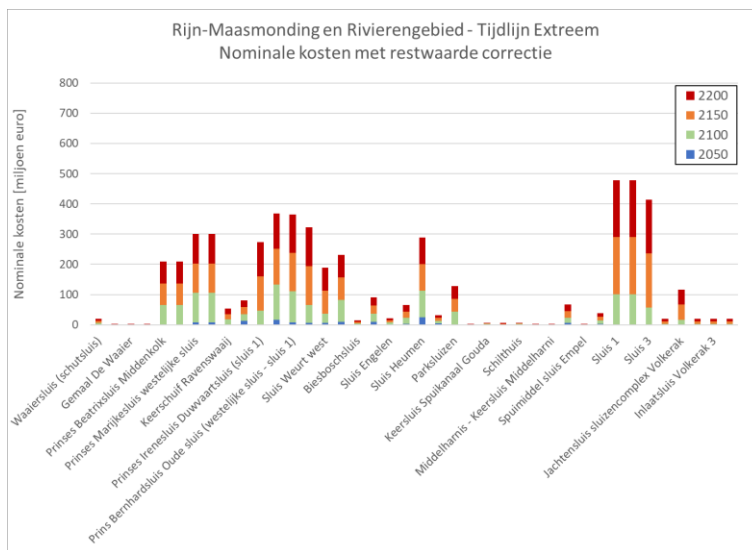
waterstand bij de tijdlijn Zeer Extreem voor zichtjaar 2050 is lager dan voor de tijdlijn Extreem, zie paragraaf 3.3.1. Hierdoor ontstaat pas later een kruinhoogtetekort, dat resulteert in lagere kosten.

De resultaten per object in Figuur 42 en Figuur 43 laten zien dat de kosten voor de sluisen (sluis 1, sluis 2 en sluis 3) aanwezig in het kunstwerk Sluiscomplex Volkerak een grote invloed hebben op de kosten. Daarnaast tonen Figuur 42 en Figuur 43 ook dat een groot aantal objecten een minimale invloed hebben op de totale kosten.

In de kosten voor de Hollandsche IJsselkering (categorie 3 kunstwerk) zijn ook de kosten voor de Algerasluis (categorie 1 kunstwerk) opgenomen. De kosten voor de Algerasluis zijn daarom niet opgenomen in Figuur 42 en Figuur 43.



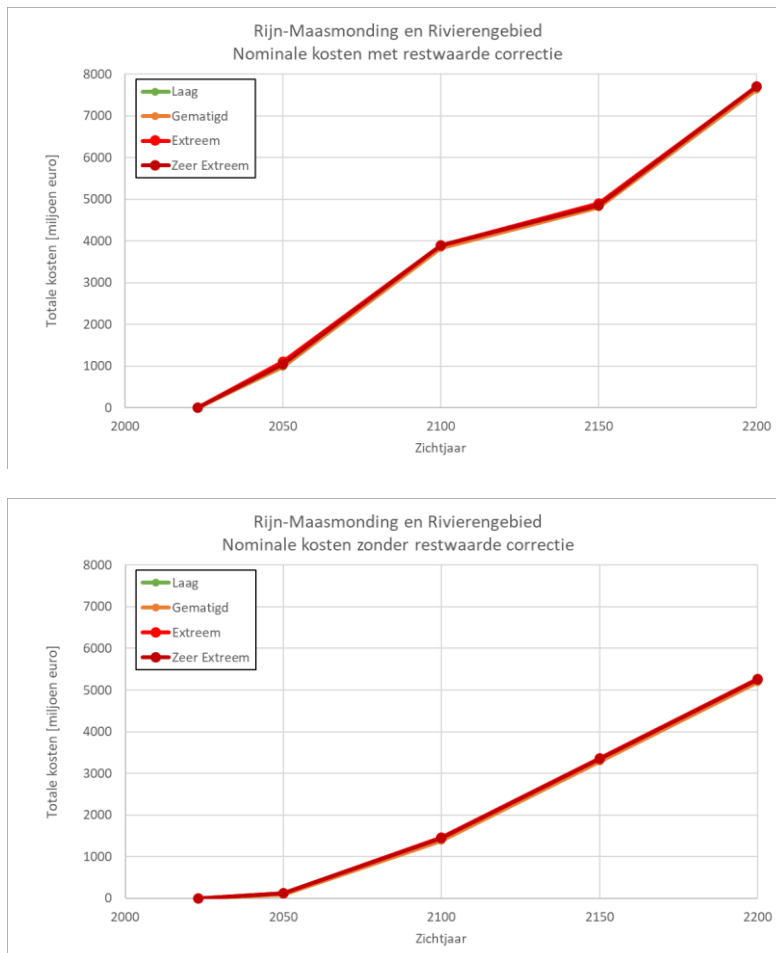
Figuur 42: Cumulatieve nominale kosten per object voor tijdlijn Extreem tot 2200.



Figuur 43: Cumulatieve nominale kosten met correctie restwaarde per object voor tijdlijn Extreem tot 2200.

Figuur 44 toont dat de kosten tussen de verschillende tijdlijnen dichtbij elkaar liggen. Dit komt doordat in de gehanteerde methode de vervangingskosten van categorie1 kunstwerken onafhankelijk verondersteld zijn van het hoogtetekort. Alleen wanneer het kunstwerk versterkt wordt, heeft het kruinhoogtetekort invloed

op de kosten. Daarnaast zijn voor gemalen ook de hogere kosten voor waterafvoer door hogere benodigde debieten en grotere opvoerhoogtes buiten beschouwing gelaten. De totale kosten worden daardoor minder sterk beïnvloed door het aantal meter zeespiegelstijging, maar meer door het aantal vervangingen van de objecten. Vanaf het jaar 2100 toont de onderste grafiek in Figuur 44 een lineair verloop. Dit komt doordat op dit moment bij bijna alle kunstwerken einde levensduur is overschreden en de objecten zijn vervangen. Na vervanging heeft het kunstwerk weer een levensduur van 100 jaar. Door het corrigeren van de nominale kosten met de restwaarde ontstaat een lineair verloop.



Figuur 44: Totale cumulatieve nominale kosten categorie 1: boven cumulatieve kosten inclusief restwaarde, onder cumulatieve kosten minus restwaarde.

#### 4.3.2 Categorie 3

##### Hoogtetekort

Het kruinhoogtetekort ten opzichte van de huidige kerende hoogte is voor de vier stormvloedkeringen per zichtjaar voor iedere tijdlijn bepaald. Het kruinhoogtetekort is bepaald op dezelfde wijze als voor de categorie 1 kunstwerken, zie paragraaf 4.2.1.

Een uitzondering op deze aanpak is de Hartelkering. Voor de Hartelkering is in de database Natte Kunstwerken een kerende hoogte van NAP+3,0 m opgenomen. Dit zou in de huidige situatie resulteren in een kruinhoogtetekort van circa 2,5 m. Deze

methode lijkt daarom niet betrouwbaar. Daarom is de kerende hoogte van de Hartelkering gelijkgesteld aan het waterstandsniveau bij norm op doorsnedeniveau in 2050 bij de tijdlijn Laag. Dit betekent dat de mate van overstromen van de Hartelkering gelijk blijft met zeespiegelstijging.

De resultaten van het kruinhoogtetekort zijn gepresenteerd in Tabel 11. Bij de Maeslantkering en de Haringvlietsluizen ontstaat in de periode tot aan zichtjaar 2050 bij de tijdlijn Laag een kruinhoogtetekort.

Tabel 11: Kruinhoogtetekort categorie 3 (stormvloedkeringen).

Kunstwerk	Laag				Gematigd				Extreem				Zeer Extreem			
	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200	2050	2100	2150	2200
Maeslantkering	0,6	0,8	1,1	1,3	0,6	1,1	1,7	2,4	0,6	1,3	2,2	3,4	0,8	2,4	3,9	5,7
Hartelkering	0,0	0,2	0,4	0,7	0,0	0,4	0,9	1,5	0,0	0,7	1,4	2,4	0,2	1,5	2,8	4,3
Hollandsche IJsselkering	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,6	1,8
Haringvlietsluizen	0,3	0,6	0,8	1,1	0,3	0,8	1,4	2,1	0,3	1,1	1,9	3,1	0,6	2,1	3,5	5,5

### Betrouwbaarheid Sluiten en Civiel Falen

De analyses van betrouwbaarheid sluiten en civiel falen zijn opgenomen in Bijlage F. In deze paragraaf staan enkel de samengevatte resultaten gepresenteerd. Figuur 45 geeft de resultaten van de semi-kwantitatieve beoordeling. Dit is het gecombineerde resultaat van de analyses voor Betrouwbaarheid Sluiten en Civiel Falen.

	0,25m	0,5m	0,75m	1,0m	2,0m	3,0m	5,0m
Hollandsche IJsselkering	Klein effect	Klein effect	Klein effect	Groot effect	Groot effect	Kering faalt	Kering faalt
Maeslantkering	Klein effect	Klein effect	Middel effect	Groot effect	Groot effect	Kering faalt	Kering faalt
Hartelkering	Klein effect	Klein effect	Middel effect	Groot effect	Groot effect	Kering faalt	Kering faalt
Haringvlietdam	Geen effect	Geen effect	Geen effect	Groot effect	Groot effect	Kering faalt	Kering faalt

Figuur 45: Semi-kwantitatieve beoordeling Betrouwbaarheid Sluiten en Civiel falen stormvloedkeringen voor zeespiegelstijging tussen 0,25 m en 5,0 m.

Voor alle stormvloedkeringen geldt dat pas bij een zeespiegelstijging van 1,0 m een significant effect op de faalkans wordt verwacht. Bij Betrouwbaarheid Sluiten wordt dit met name veroorzaakt door de verhoogde sluitfrequentie. Het effect op Civiel Falen is steeds zeer beperkt, doordat enerzijds de golfhoogten slechts zeer beperkt toenemen en anderzijds doordat het verval over de keringen niet toeneemt omdat deze in de huidige situatie al maximaal is.

Einde ontwerplevensduur is het jaar 2097 voor de Europoortkering (Maeslantkering en Hartelkering), het jaar 2071 voor de Haringvlietsluizen en 2067 voor de Hollandsche IJsselkering. Voor de Hollandsche IJsselkering en de Haringvlietsluizen geldt daardoor dat het effect van zeespiegelstijging gedurende de levensduur zeer beperkt is. Merk op dat er van uit is gegaan dat de keringen in de huidige situatie voldoen en dat alleen het relatieve verschil is beschouwd.

Voor de Europoortkering zien we een significant effect voor tijdlijn Zeer Extreem richting het einde van de levensduur. Voor de overige tijdlijnen is het effect beperkt.

### Kostenschatting

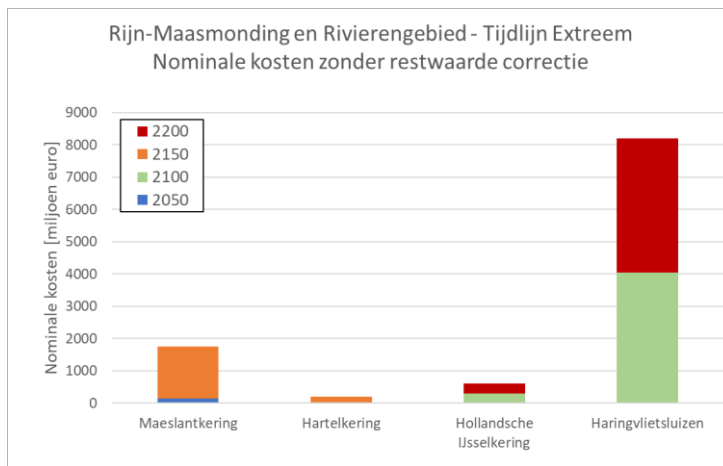
De totale nominale kosten van de stormvloedkeringen zijn per tijdlijn en per zichtjaar gepresenteerd in Tabel 12.



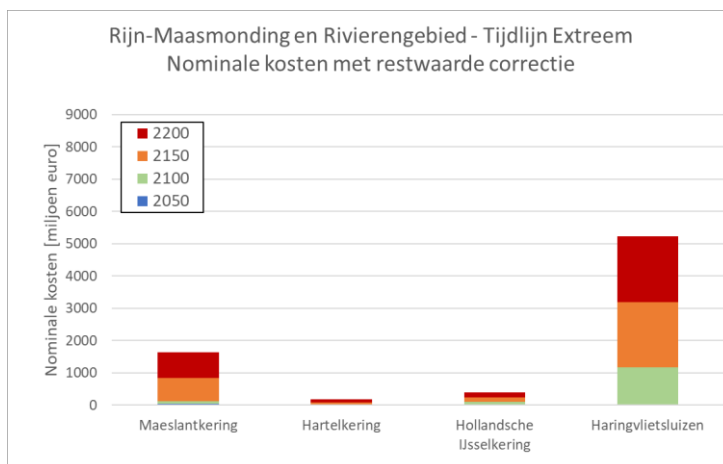
Tabel 12: Cumulatieve nominale kosten stormvloedkeringen tot 2200.

Zichtjaar	Tijdslijnen en Nominale kosten [mln. eur]: met en zonder correctie restwaarde							
	Laag		Gematigd		Extreem		Zeer Extreem	
	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie	Nominale kosten	Met correctie
2050	110	36	122	40	135	44	935	299
2100	4415	1363	4431	1376	4474	1398	5581	2227
2150	6061	4250	6150	4298	6264	4367	7538	5481
2200	10361	7222	10451	7308	10725	7464	12365	8836

Tabel 12 toont toenemende kosten in tijd en bij het extremer worden van de tijdslijnen. De kosten voor de tijdslijnen Laag, Gematigd en Extreem zijn vrijwel gelijk. De kosten voor de tijdlijn Zeer Extreem zijn hoger. Dit komt door het toenemende kruinhoogtetekort van de Maeslantkering en de daarbij horende hogere versterkingskosten.



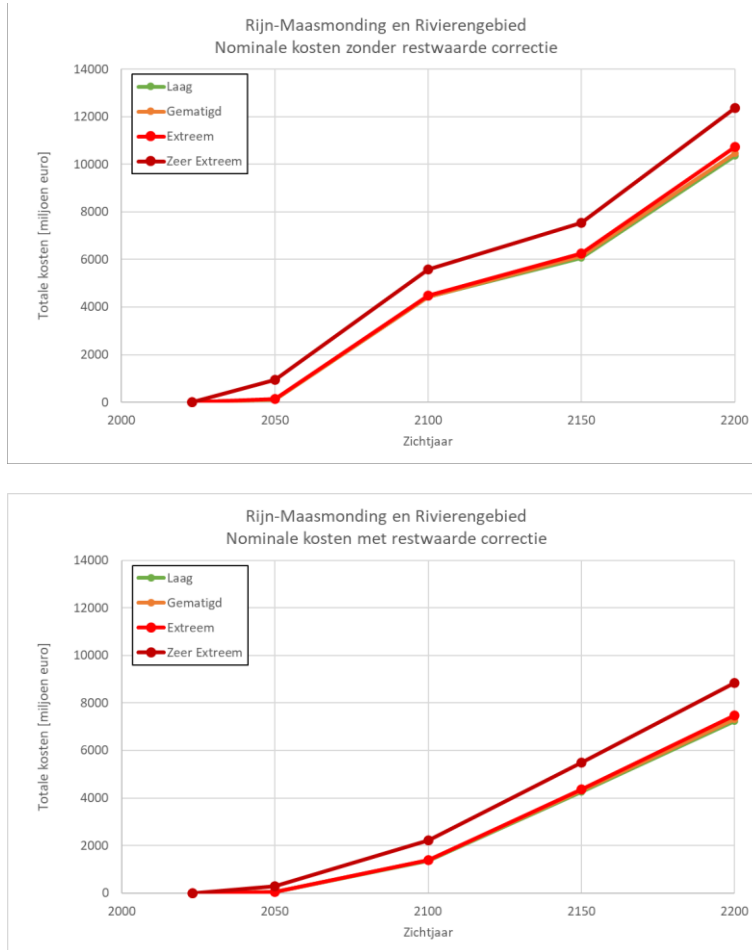
Figuur 46: Cumulatieve nominale kosten per stormvloedkering voor tijdlijn Extreem tot 2200.



Figuur 47: Cumulatieve nominale kosten met correctie restwaarde per stormvloedkering voor tijdlijn Extreem tot 2200.

De Maeslantkering en de Haringvlietsluizen bepalen grotendeels de kosten van de vier stormvloedkeringen in de Rijn- Maasmonding, zie Figuur 46 en Figuur 47. De kosten van de Haringvlietsluizen bedragen circa 75-80% van de totale kosten van de stormvloedkeringen. Aannahme hierbij is wel dat het mogelijk is om de Maeslantkering en de Hartelkering te versterken (verhogen), waarna deze pas

vervangen hoeft te worden bij einde levensduur. Wanneer het versterken niet mogelijk blijkt, zullen de kosten voor de Maeslantkering en de Hartelkering hoger zijn.



Figuur 48: Totale cumulatieve nominale kosten stormvloedkeringen. Boven: cumulatieve kosten inclusief restwaarde. Onder: cumulatieve kosten minus restwaarde.

#### 4.4 Samenvatting

In deze paragraaf zijn de totale kosten van alle beschouwde objecten in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied samengevoegd. Dit geeft een beeld van de totale kosten bij de verschillende tijdlijnen.

Tabel 13: Nominale kosten (minus restwaarde per zichtjaar) in miljoen euro voor de gehele Rijn- Maasmonding en het Rivierengebied

Zichtjaar	Tijdlijnen [nominale kosten in mln. euro minus restwaarde]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	121	126	171	423
2100	2741	2762	2853	3678
2150	7530	7586	7725	8835
2200	12406	12500	12726	14093

Uit de resultaten volgt dat de opgave van de stormvloedkeringen, met name de Maeslantkering en de Haringvlietssluisen, vanaf 2100 circa 50 tot 65% van de kosten

bepalen. Daarnaast heeft sluiscomplex Volkerak een groot aandeel in de totale kosten van de categorie 1 kunstwerken. Op de totale kosten van de kunstwerken in de Rijn-Maasmonding bedragen deze kosten minder dan 5%. Het overige deel van de kosten is verspreid over de andere kunstwerken.

De toename in nominale kosten is beperkt tussen de verschillende tijdlijnen. Dit komt doordat in de gehanteerde methodiek bij de vervangingskosten van de categorie 1 kunstwerken geen toename in kosten wordt meegenomen wanneer een hogere kruinhoogte benodigd is. De toename in kosten tussen de tijdlijnen wordt veroorzaakt doordat kunstwerken eerder vervangen moeten worden wanneer de kerende hoogte onvoldoende is. Eerder vervangen resulteert in een lagere restwaarde. Ook de kosten voor versterkingen zijn hoger bij een groter kruinhoogtetekort.

Bij stormvloedkeringen zijn zowel de versterkingskosten als de vervangingskosten gekoppeld aan de mate van zeespiegelstijging. De toename in kosten van de stormvloedkeringen blijft echter beperkt bij het extremer worden van de tijdlijnen.

## 5 Waterveiligheidsopgave dijken

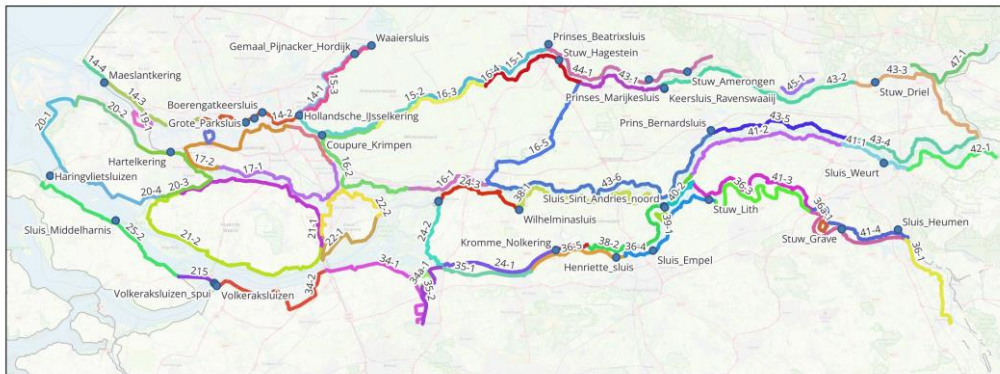
### 5.1 Doel

Het doel 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 hebben plaatsgevonden. De levensduur van deze versterkingen kan langer zijn dan het beschouwde zichtjaar, in het ontwerp wordt immers rekening gehouden met een levensduur van 50 jaar uitgaande van de belastingen in het ontwerpzichtjaar.

Tot de scope behoren alle dijken langs de verschillende riviertakken (Maas, Waal en Nederrijn-Lek) en het benedenstroomse deltagebied (Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsdiep) die onderdeel zijn van de primaire waterkering. In Figuur 49 zijn deze deelgebieden weergegeven. Voor een overzicht van alle trajecten wordt verwezen naar Figuur 3.



Figuur 49: Scope dijken en kunstwerken in de regio Rijn-Maasmonding en het rivierengebied. Nummers betreffen dijktrajecten conform de Waterwet (Omgevingswet). Elk dijktraject kent een eigen overstromingskansnorm. \* Traject 16-5 (Diefdijk) valt buiten de scope. De scope voor traject langs de Maas loopt tot Mook en de scope voor traject 47-1 langs de Nederrijn-Lek tot splitsing met Pannerdens Kanaal. De zandige waterkeringen (duinen) van traject 20-1 vallen buiten de scope.

### 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. De sterkte van de keringen is in beeld gebracht met de faalmechanismen voor 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 (v2022.04) 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 gebruikt<sup>13</sup>.
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

<sup>13</sup> 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.

taludverflauwing of bermverbreeding 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 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:

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

**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:

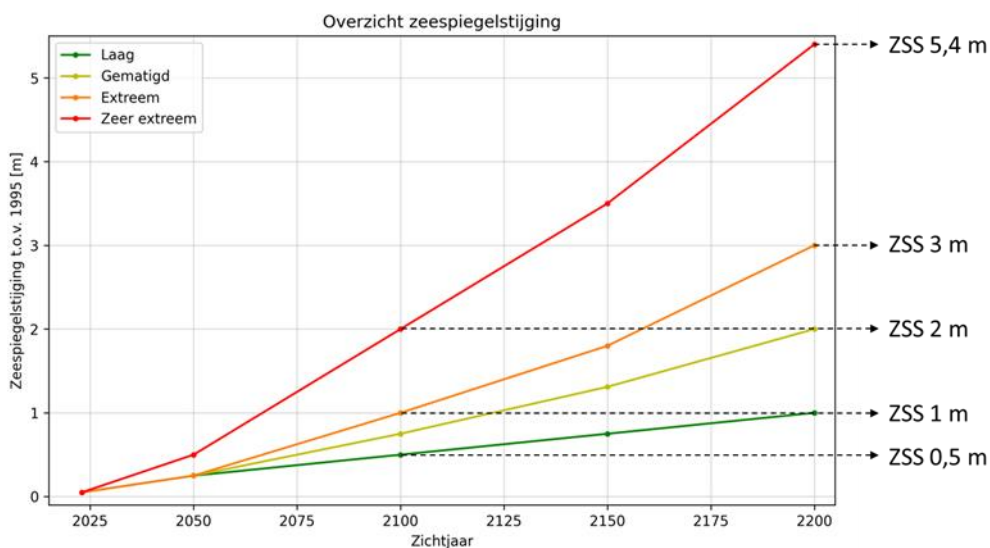
Zichtjaar	Kosten t/m zichtjaar [mln. euro]	Restwaarde in zichtjaar [mln. euro]	Kosten in zichtjaar, gecorrigeerd met de restwaarde [mln. euro]
2050	1,2	1,08	0,12
2100	3,8	2,34	1,46
2150	3,8	0	3,8
2200	5,0	0,12	4,88

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 14 en Figuur 50.

Tabel 14: 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 50: Overzicht gehanteerde mate van zeespiegelstijging per zichtjaar.

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

2050 (referentie). Een versterking voor systeem op orde kan 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. een studie voor het Rivierengebied van Deltares (2014a) en een studie voor Rijnmond-Drechtsteden van Van der Kraan (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 tot 2035, die afgeregeld is op de HWBP-planning tot 2035 (Bron: definitief programmavoorstel 2023-2034). Hiermee wordt voorkomen dat alle dijken tegelijkertijd op  $t=0$  versterkt dienen te worden als deze niet meer voldoen.
- Voor de dijkversterkingen wordt uitgegaan van een ontwerplevensduur van 50 jaar. Voor de constructieve elementen (damwand, kwelscherm, etc.) wordt ontworpen met een levensduur van 100 jaar.
- De kosten voor de dijkversterkingen worden berekend op basis van de binnen het KP ZSS toegeleverde KOSWAT-databases voor de verschillende dijkversterkingsstrategieën.

## 5.3 Resultaten

### 5.3.1 Systeem op orde tot 2050

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 51 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 51: Programmering HWBP-vakken tot 2035 (Bron: definitief programmavoorstel 2023-2034; <https://hwbp.cartonext.nl/> geraadpleegd 14 april 2023).

Voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied betreffen de kosten die vóór 2050 gemaakt worden om in 2050 te voldoen aan de wettelijk gestelde normen (ondergrens) 9,5 miljard euro.<sup>14</sup> 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 uitsplitsing per deelgebied is weergegeven in Tabel 15.

Tabel 15: Nominale kosten om het “systeem op orde” te krijgen in 2050 per deelgebied.

	Systeem op orde [nominale kosten in mld. euro]	Systeem op orde [nominale kosten in mln. euro/km]
Rijnmond Drechtsteden (L=296 km)	2,4	8,3
Haringvliet Hollandsdiep (L=159 km)	0,3	2,3
Nederrijn-Lek (L=170 km)	1,9	9,8
Waal (L=214 km)	3,3	15,4
Maas (L=207 km)	1,6	7,4
<b>TOTAAL</b>	<b>9,5</b>	<b>9,0 (gemiddeld)</b>

Tot 2050 is maar één enkele versterking uitgevoerd. De kosten, omgerekend naar kosten per km per dijkversterkingsronde, bedragen voor het hele gebied van de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied in de scope circa 9,0 miljoen euro per km (totaal aantal km in hele gebied). Opgemerkt wordt dat per versterkingsronde niet het totale areaal aan keringen versterkt, maar alleen de keringen die (in de periode tot 2050) niet voldoen aan de norm. De kosten per km zijn bepaald op het totaal aantal km's binnen het gebied en niet van het totaal aantal km versterkte kering. Hierdoor kan het beeld afwijken van de verwachte kosten per km dijkversterking.

### 5.3.2 Waterveiligheidsopgave

De waterveiligheidsopgave beschrijft het sterktetekort in een bepaald jaar gegeven een tijdlijn. In onderstaande paragrafen is de waterveiligheidsopgave voor hoogte (het hoogtetekort) en voor sterkte (het tekort aan dijkbasis/bermlengte) beschreven

<sup>14</sup> De kosten die binnen het KP ZSS zijn berekend voor “systeem op orde” zullen afwijken van de kosten binnen het HWBP. Binnen de systeemanalyse zijn diverse (globale) inschattingen gemaakt op basis waarvan de kosten zijn bepaald. De kosten dienen dus niet 1-op-1 vergeleken te worden met de kosten voor het HWBP maar gezien te worden als plausibiliteitscheck.

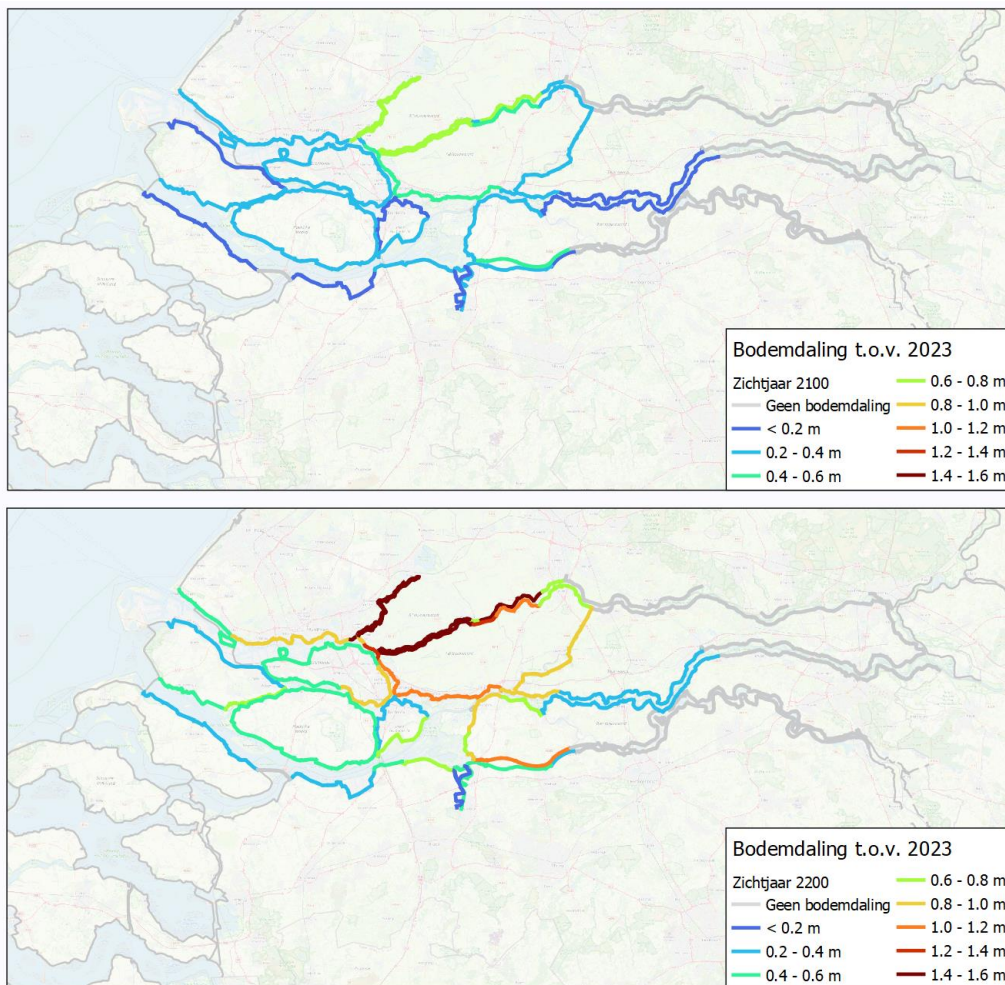
voor 1 m en 3 m zeespiegelstijging. Voor 1 m kijken we naar de opgave voor tijdlijn Laag in 2200 en voor 3 m kijken we naar tijdlijn Extreem in 2200. De gepresenteerde waterveiligheidsopgave beschrijft de opgave ten opzichte van 2023.

### 5.3.2.1 Rijnmond-Drechtsteden

#### Waterveiligheidsopgave hoogte

Figuur 53 en Figuur 54 geven de waterveiligheidsopgave voor hoogte weer voor Rijnmond-Drechtsteden respectievelijk 1 m en 3 m zeespiegelstijging (per traject, gemiddeld over de trajectlengte).

Een belangrijk onderdeel van de hoogteopgave is de mate van bodemdaling. Binnen de beschouwde dijktrajecten is de bodemdaling het grootste langs de Hollandsche IJssel. In Figuur 52 staat boven de in deze beleidsstudie aangenomen bodemdaling in m in 2100 t.o.v. 2023 en onder de bodemdaling in 2200 t.o.v. 2023.



Figuur 52: Mate van bodemdaling in m, met boven de bodemdaling in 2100 t.o.v. 2023 en onder de bodemdaling in 2200 t.o.v. 2023.

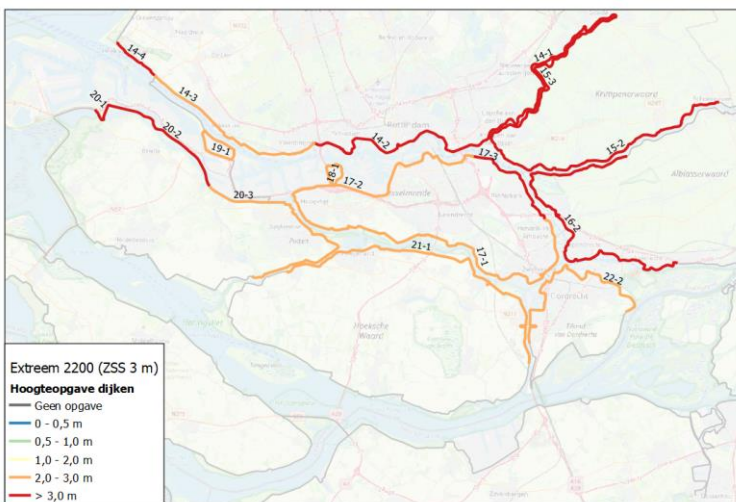
Figuur 53, waarin de hoogteopgave voor 1 m zeespiegelstijging is weergegeven, laat zien dat er grote verschillen zijn in opgave in het gebied. Zo is er een aanzienlijke hoogteopgave voor de trajecten 14-4, 15-2, 15-3, 16-2 en 20-1 (>1 m) en een kleine opgave voor de trajecten 17-1, 18-1 en 21-1 (<0,5 m). De gemiddelde

opgave betreft 1 m. De grote opgave voor traject 20-2 (2,5 m) sluit aan bij het bestaande hoogtetekort (conform de beoordelingsresultaten van LBO1).



Figuur 53: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdlijn Laag 2200) voor deelgebied Rijnmond-Drechtsteden.

Figuur 54, waarin de hoogteopgave voor 3 m zeespiegelstijging is weergegeven, laat een minder divers beeld zien dan bij 1 m zeespiegelstijging. De gemiddelde opgave betreft 3,4m. Uitschieters zijn de trajecten 14-4, 16-2, 20-1 en 20-2 waar de opgave meer dan 4m betreft. De kleinste opgave betreft traject 18-1, waar de opgave 2,4m betreft.



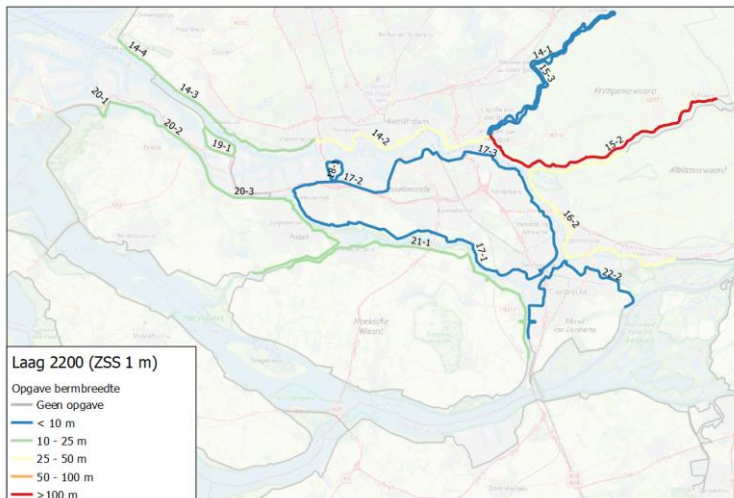
Figuur 54: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) voor deelgebied Rijnmond-Drechtsteden.

**Opgave piping en macrostabiliteit**

Figuur 55 en Figuur 56 geven de waterveiligheidsopgave voor de sterktesporen (piping en macrostabiliteit) weer voor respectievelijk 1 m en 3 m zeespiegelstijging. De waterveiligheidsopgave voor sterkte betreft de aan te leggen berm lengte om te voldoen aan de eisen. Dit kan een pipingberm, een stabiliteitsberm of de verbreding van de dijkbasis als gevolg van ophoging betreffen. Als op een traject een klein sterktetekort (<10 m) volgt, 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 enigszins onderschat worden.

Figuur 55, waarin de sterkteopgave voor 1 m zeespiegelstijging is weergegeven, laat zien dat het sterktetekort binnen Rijnmond Drechtsteden erg varieert per traject. De bermtekorten betreffen maximaal 30 m, met een gemiddelde rond de 20 m. Uitzonderingen hierop zijn de trajecten 16-2 met een benodigde breedte van 45 m en traject 15-2 met 110 m. Daarnaast ontstaat een deel van de sterkteopgave door het hoogtetekort (de dijk wordt verbreed indien een kruinverhoging wordt toegepast). De grote verschillen tussen bijvoorbeeld traject 16-2 en 15-2 (aan weerszijde van de Lek) ontstaan door de sterkteopgave van beide trajecten. Deze is voor traject 15-2 significant groter dan voor 16-2, waar ook strekkingen zijn waar geen of nauwelijks een sterkteopgave aanwezig is.



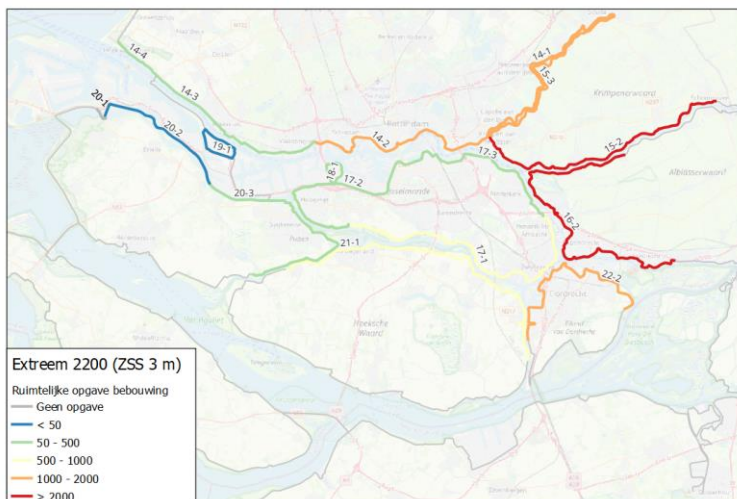
Figuur 55: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdelijk Laag 2200) voor deelgebied Rijnmond-Drechtsteden.

Bij 3 m zeespiegelstijging (Figuur 56) zien we dezelfde uitschieter als bij 1 m zeespiegelstijging: traject 15-2. Hier betreft het kwelweglengtetekort meer dan 200m, waar het gemiddelde rond de 50 m tekort ligt. Voor enkele trajecten geldt dat het bermtekort ontstaat door het hoogtetekort (een voorbeeld hiervan is traject 18-1, waarvan geen fragility curves beschikbaar zijn).



Figuur 56: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) voor deelgebied Rijnmond-Drechtsteden.

Het aanleggen of verbreden van een berm, 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 tijdelijk of permanent te amoveren gebouwen in de versterkingszone. Voor 1 m ZSS betreft het aantal tijdelijk of permanent te amoveren gebouwen in de versterkingszone ongeveer 8.000, bij 3 m ZSS zijn dit ongeveer 11.000 gebouwen.



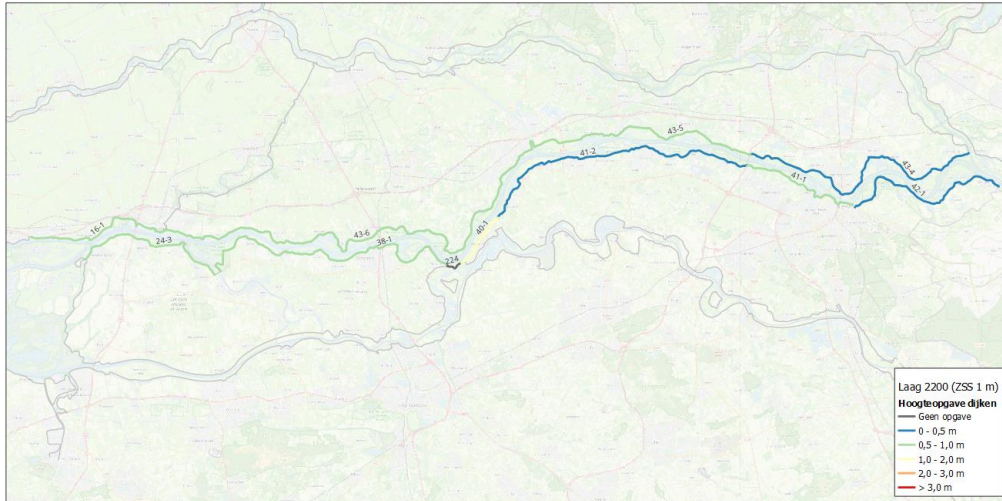
Figuur 57: Ruimtelijke knelpunten bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) voor deelgebied Rijnmond-Drechtsteden.

### 5.3.2.2 Waal

#### Waterveiligheidsopgave hoogte

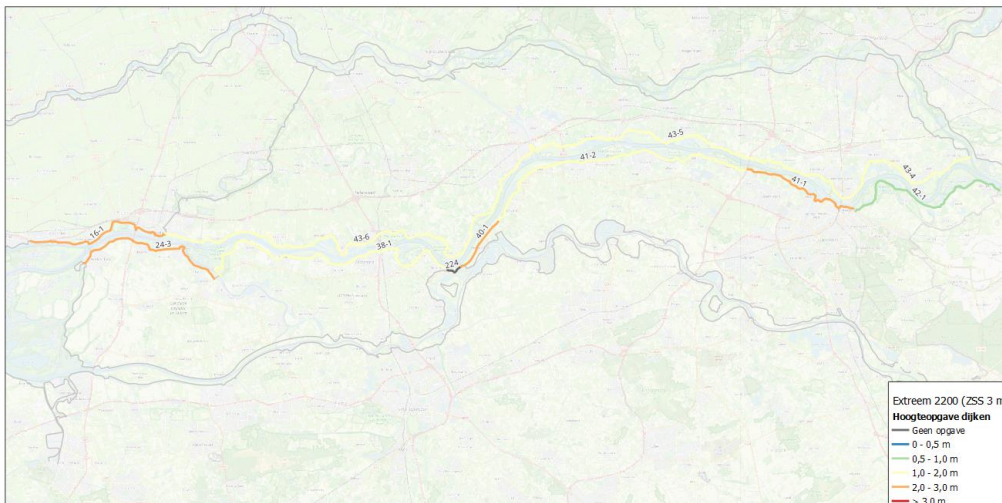
Figuur 58 en Figuur 59 geven de waterveiligheidsopgave voor hoogte weer voor de Waal voor respectievelijk 1 m en 3 m zeespiegelstijging (per traject, gemiddeld over de trajectlengte).

Figuur 58, waarin de hoogteopgave voor 1 m zeespiegelstijging is weergegeven, laat zien dat het hoogtetekort in het gebied zeer beperkt is (gemiddeld 0,65m bij 1m ZSS). Ook volgt ook dat de zeespiegelstijging minder invloed heeft hoe verder bovenstrooms er gekeken wordt. Enkel voor traject 40-1 wordt een hoogtetekort van meer dan 1 m berekend. Voor de rest van de trajecten geldt dat het hoogtetekort tussen de 0 en 1 m ligt. Voor de meest bovenstrooms gelegen trajecten 42-1 en 43-4 betreft het hoogtetekort minder dan 0,5m.



Figuur 58: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdlijn Laag 2200) voor deelgebied Waal.

Figuur 59, waarin de hoogteopgave voor 3 m zeespiegelstijging is weergegeven, geeft eenzelfde beeld als bij 1 m zeespiegelstijging. Hoe verder bovenstrooms, hoe kleiner de opgave. Wel zien we grotere verschillen tussen de trajecten onderling: het traject met het grootste hoogtetekort (16-1) heeft een tekort van 2,9m, maar er zijn ook enkele trajecten met een hoogtetekort van minder dan 1,5m (trajecten 41-1 en 43-4). De benedenstroomse trajecten 16-1 en 24-3 geven de grootste opgave, waar de meest bovenstroomse trajecten 42-1 en 43-4 de kleinste opgave hebben.



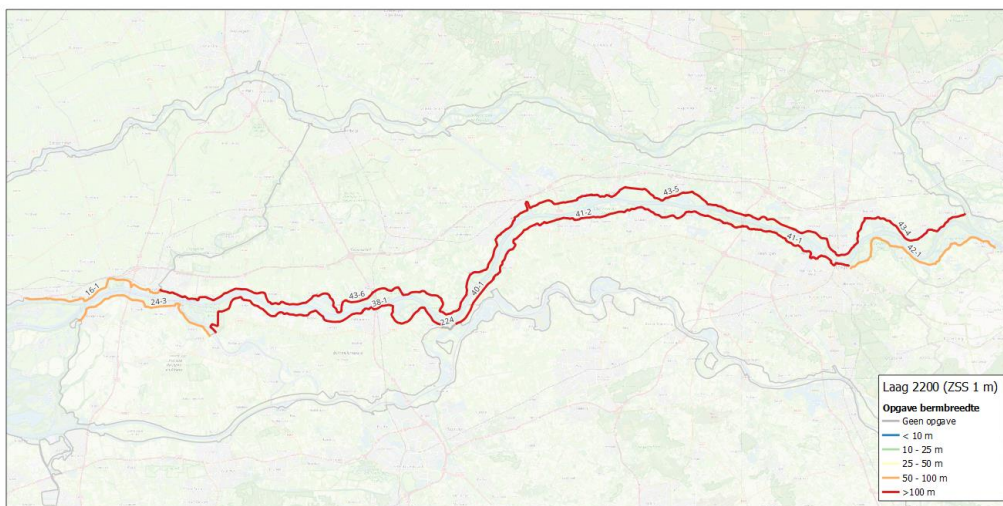
Figuur 59: Waterveiligheidsopgave voor hoogte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) voor deelgebied Waal.

**Opgave piping en macrostabiliteit**

Figuur 60 en Figuur 61 geven de waterveiligheidsopgave voor de sterktesporen (piping en macrostabiliteit) weer voor respectievelijk 1 m en 3 m zeespiegelstijging. De waterveiligheidsopgave voor sterkte betreft de aan te leggen berm lengte om te voldoen aan de eisen. Dit kan een pipingberm, een stabiliteitsberm of de verbreding van de dijkbasis als gevolg van ophoging betreffen. Als op een traject een klein sterktetekort (<10 m) volgt dan is dit hoogstwaarschijnlijk het resultaat van een dijkverbreding t.b.v. kruinverhoging.

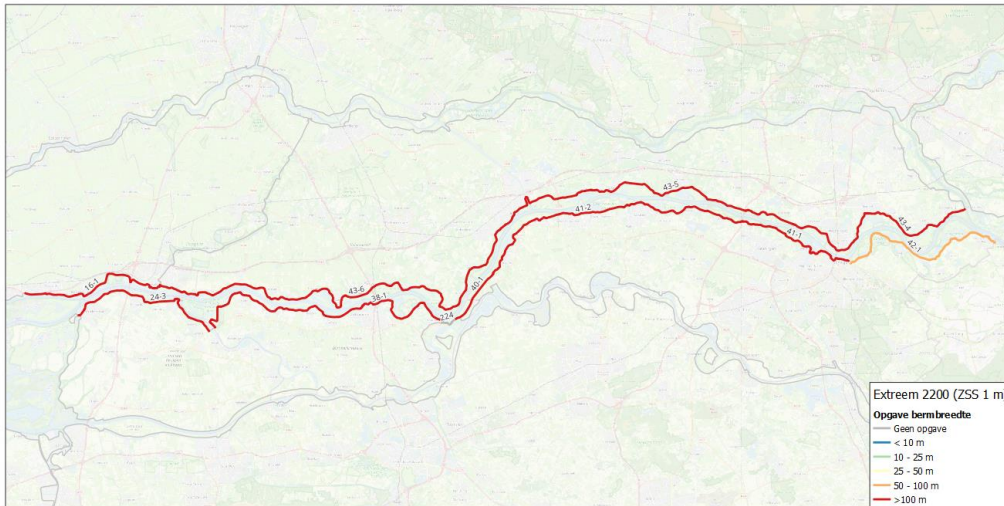
Binnen de sterktesporen wordt uitgegaan van fragility curves om de sterkte te beschrijven. In de afleiding van de fragility curves is aangenomen dat indien een locatie nu (referentiejaar 2025) ongevoelig is voor een mechanisme (piping of macrostabiliteit) dat dit in de toekomst ook zo zal zijn. Hierdoor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

Figuur 60, waarin de sterkteopgave voor 1 m zeespiegelstijging is weergegeven, laat zien dat het sterktetekort langs de Waal belangrijker is dan het hoogtetekort. De bermtekorten betreffen voor meerdere trajecten meer dan 100 m. Alleen voor traject 16-1, 24-3 en 42-1 betreft het berm lengtetekort minder dan 100m. De grootste opgave vinden we voor traject 41-1.



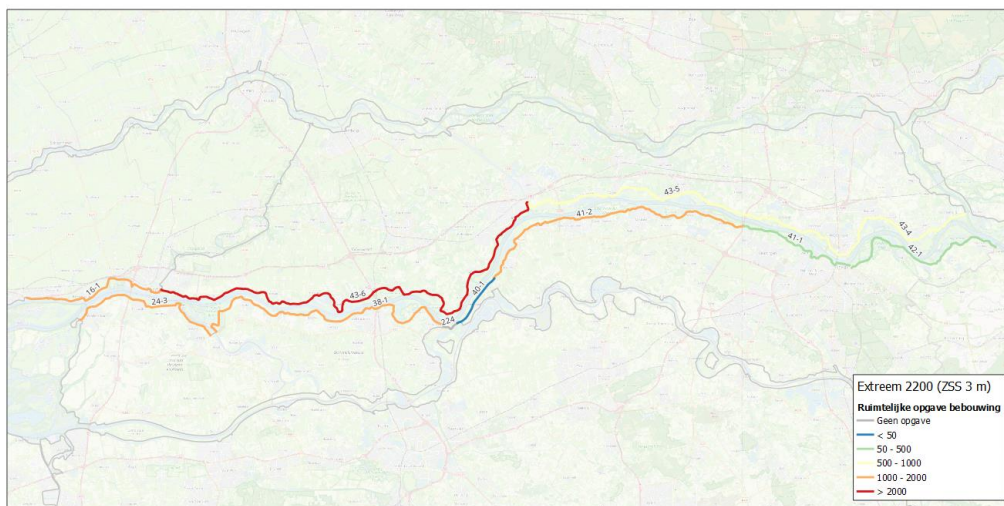
Figuur 60: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 1 m zeespiegelstijging (tijdlijn Laag 2200) voor deelgebied Waal.

Bij 3 m zeespiegelstijging (Figuur 61) zien we dezelfde lage uitschieters als bij 1 m zeespiegelstijging: trajecten 16-1, 24-3 en 42-1. Voor de overige trajecten is het bermtekort aanzienlijk, met een gemiddeld bermtekort van 150 m en een uitschieter naar 200 m (traject 41-1).



Figuur 61: Waterveiligheidsopgave voor sterkte bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) voor deelgebied Waal.

Het aanleggen of verbreden van een berm, 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 dat geamoveerd dient te worden om de dijkversterking uit te voeren. Voor 1 m ZSS betreft het aantal te amoveren gebouwen ongeveer 8.400, bij 3 m ZSS gaat het om ongeveer 9.700 gebouwen.



Figuur 62: Ruimtelijke knelpunten bij 3 m zeespiegelstijging (tijdlijn Extreem 2200) voor deelgebied Waal.

### 5.3.3 Nominale kosten t/m een bepaald zichtjaar, per tijdlijn

De nominale kosten t/m een bepaald zichtjaar, gegeven een tijdlijn zijn bepaald zoals beschreven in paragraaf 5.2.1. In Tabel 16 zijn de kosten voor dijkversterkingskosten voor het gehele gebied van Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied opgenomen.

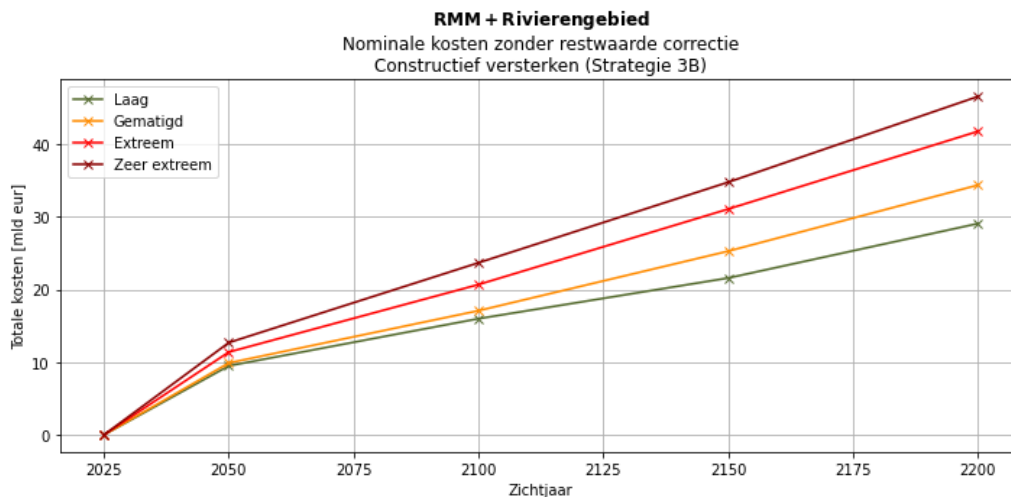


Tabel 16: Cumulatieve nominale kosten Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn, zonder restwaarde correctie.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten in mld. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	9,5	9,9	11,4	12,7
2100	16,0	17,1	20,7	23,7
2150	21,6	25,3	31,1	34,8
2200	29,1	34,4	41,8	46,6

Wat opvalt aan de resultaten in

Tabel 16 is dat met name het verschil in kosten voor zichtjaar 2200 tussen tijdlijn Extreem en Zeer Extreem relatief beperkt zijn, gegeven dat het verschil in ZSS meer dan 2 m is. Dit kan (1) als oorzaak hebben dat de restwaarde niet meegerekend is, (2) het deelgebied Nederrijn-Lek een minimale invloed ondervindt van zeespiegelstijging en worden er met name kosten gemaakt tot 2050 en (3) bij deze grote maten van zeespiegelstijging lopen we tegen de randen van het instrumentarium aan. Zo worden er bijvoorbeeld geen langere (dam)wandlengtes berekend dan 25m bij een constructieve versterking, waardoor de kosten bij extreme mate van versterkingen niet meer evenredig toenemen.



Figuur 63: Cumulatieve nominale kosten tot en met een bepaald zichtjaar per tijdlijn voor het RMM-gebied, zonder restwaarde correctie.

In Figuur 63 is het verloop van de kosten per tijdlijn weergegeven. Hier zien we voor vrijwel alle tijdlijnen een enigszins regelmatig verloop van de kosten in de tijd vanaf zichtjaar 2050. De investeringskosten tot 2050 zijn relatief groot. Hierbij inachtneming dat deze investeringen in 2050 nog wel restwaarde hebben, waarvoor hier niet gecorrigeerd is.

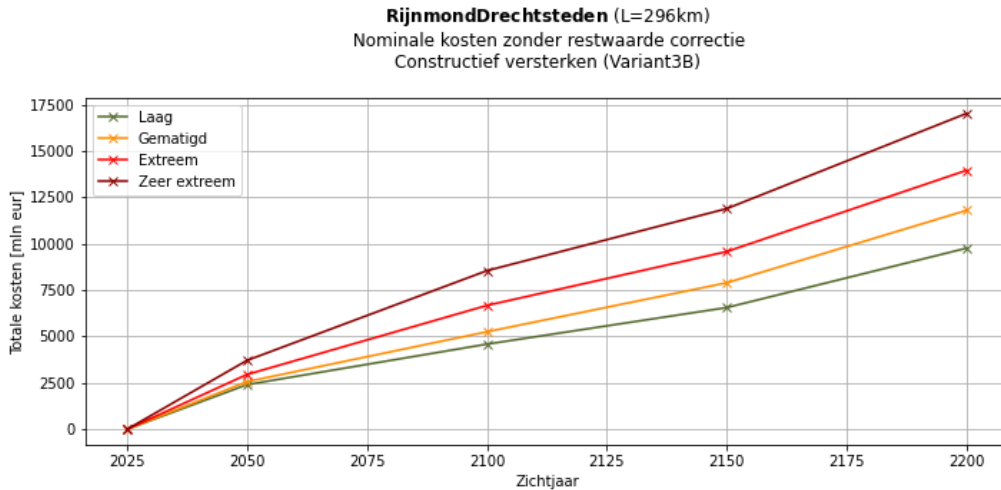
### 5.3.3.1 Rijnmond-Drechtsteden

De nominale kosten t/m een bepaald zichtjaar, gegeven een tijdlijn zijn bepaald zoals beschreven in paragraaf 5.2.1. In Tabel 17 zijn de kosten voor het Rijnmond-Drechtsteden deelgebied opgenomen.

Tabel 17: Cumulatieve nominale kosten voor Rijnmond Drechtsteden in mld. eur tot en met een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, zonder restwaarde correctie.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten in mld. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	2,4	2,6	3,0	3,7
2100	4,6	5,3	6,7	8,6
2150	6,6	7,9	9,6	11,9
2200	9,8	11,8	14,0	17,0

De totale kosten om de dijken in deelgebied Rijnmond-Drechtsteden te versterken volgens versterkingsstrategie 3B (traditionele versterking) tot een bepaald zichtjaar is weergegeven in Figuur 64.



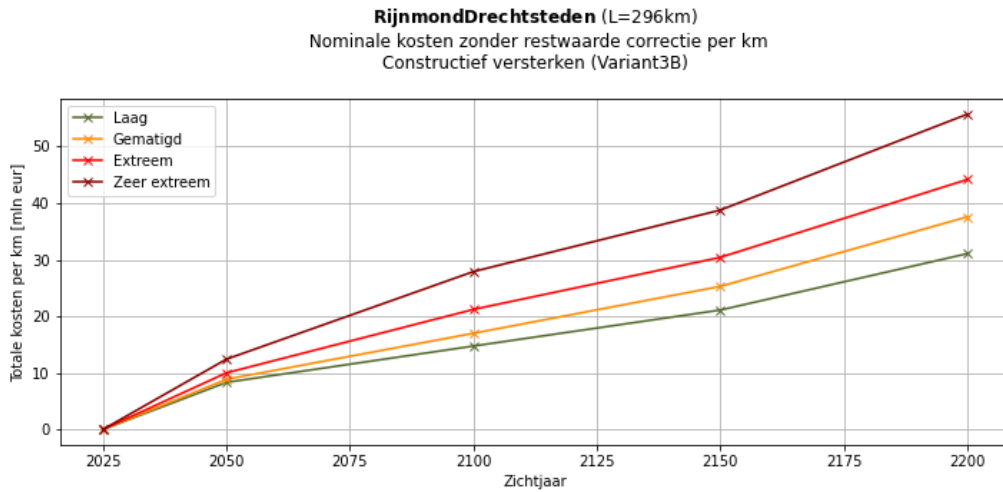
Figuur 64: Cumulatieve nominale kosten tot en met een bepaald zichtjaar, zonder restwaarde correctie, per tijdlijn voor Rijnmond-Drechtsteden

In Figuur 64 zijn de kosten voor Rijnmond-Drechtsteden weergegeven. Zo is te zien dat de totale kosten tot en met 2200 voor tijdlijn Laag +/-9,8 mld. euro voor tijdlijn Zeer Extreem +/-17,0 mld. euro bedragen.

De bandbreedte van de kosten met betrekking tot zeespiegelstijging per km voor Rijnmond-Drechtsteden tot en met een bepaald zichtjaar zijn weergegeven in Tabel 18. In de bandbreedte zijn geen andere onzekerheden opgenomen.

Tabel 18: Cumulatieve nominale kosten in mln. euro per km voor Rijnmond-Drechtsteden tot en met een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, zonder restwaarde correctie.

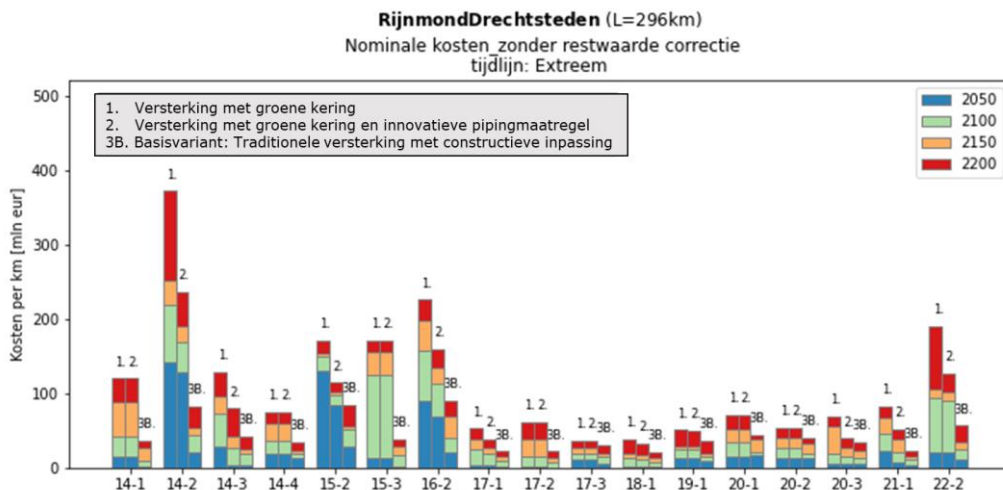
Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten per km in mln. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	8,3	8,9	10,0	12,4
2100	17,4	17,0	21,2	27,9
2150	21,1	25,3	30,4	38,8
2200	31,1	35,6	44,2	55,7



Figuur 65: Cumulatieve nominale kosten per km tot en met een bepaald zichtjaar, zonder restwaarde correctie, per tijdlijn.

In Figuur 65 zijn de kosten per kilometer weergegeven (cumulatief over meerdere versterkingsrondes tot 2200). De kosten per kilometer voor zichtjaar 2200 bedragen voor tijdlijn Laag ongeveer 31 miljoen euro per km en voor tijdlijn Zeer Extreem ongeveer 56 miljoen euro per km. Voor de meeste vakken/trajecten betreft dit tot het jaar 2200 vier versterkingsrondes. Platgeslagen resulteert dit in kosten per versterkingsronde tussen de 7,8 en 14,0 miljoen euro per kilometer per versterkingsronde.

Om duiding te geven aan de opbouw van de kosten tot een bepaald zichtjaar en hierbij inzicht te krijgen in de ruimtelijke verdeling zijn in Figuur 66 de kosten per traject per kilometer, tot een bepaald zichtjaar weergegeven. Als indicatie zijn de kosten voor tijdlijn Extreem weergegeven. Voor alle trajecten zijn de kosten voor de drie dijkversterkingsstrategieën, zoals beschreven in paragraaf 5.2.1, weergegeven. Hieruit zijn de ruimtelijke knelpunten met het oog op amoveringskosten voor de trajecten te duiden.



Figuur 66: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaardecorrectie per km per traject voor tijdlijn extreem voor Rijnmond-Drechtsteden, (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.

In lijn met de overige deltaprogramma deelgebieden geeft strategie 1 (groene dijken) meestal de hoogste kosten. Dit heeft als oorzaak dat gebouwen geamoveerd worden indien deze de versterking in groen belemmeren, wat resulteert in hoge kosten. Dit is niet overal het geval: indien strategie 1 het even gunstig is als strategie 3B qua kosten, dan betekent dit dat er geen of nauwelijks ruimtelijke knelpunten zijn en er daarom geen verschillen tussen de strategieën is (omdat bij strategie 3B enkel overgegaan wordt op constructies als er ruimtelijke knelpunten zijn). Over het algemeen zien we dat strategie 3B (traditionele inpassing met constructies) het meest voordelig is. We merken op dat in de analyses gekozen is om een vaste strategie te hanteren over alle trajecten heen. In de praktijk wordt echter een combinatie van strategieën toegepast, op een traject zal op dichtbebouwde locaties een constructieve oplossing gekozen worden, op locaties met minder objecten in de versterkingszone kan de afweging gemaakt worden om meer bebouwing te amoveren.

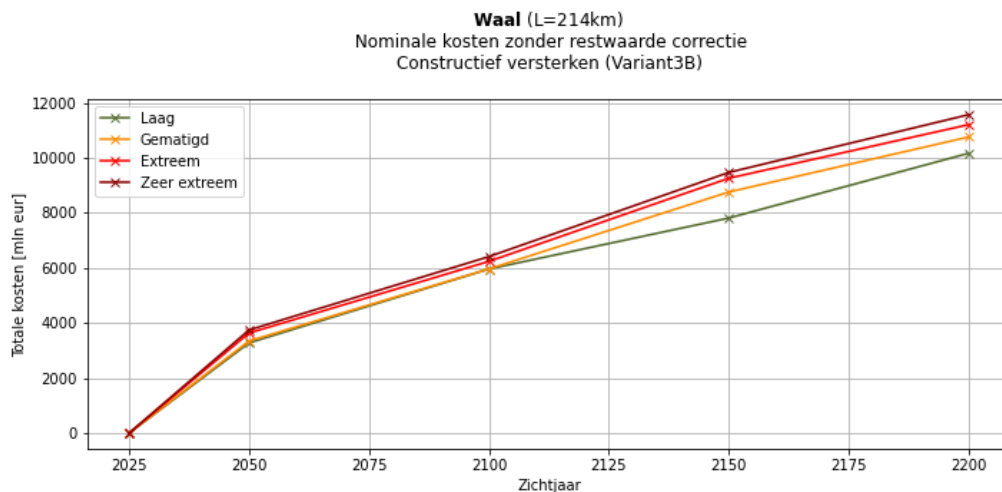
### 5.3.3.2 Waal

De nominale kosten t/m een bepaald zichtjaar, gegeven een tijdlijn zijn bepaald zoals beschreven in paragraaf 5.2.1. In Tabel 19 zijn de kosten voor het deelgebied Waal opgenomen.

Tabel 19: Cumulatieve nominale kosten voor de Waal in mld. euro tot een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, zonder restwaarde correctie.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten in mld. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	3,3	3,3	3,6	3,7
2100	6,0	6,0	6,2	6,4
2150	7,8	8,8	9,3	9,5
2200	10,2	10,8	11,2	11,6

De totale kosten om de dijken in deelgebied Waal te versterken volgens versterkingsstrategie 3B (traditionele versterking) tot en met een bepaald zichtjaar is weergegeven in Figuur 67.



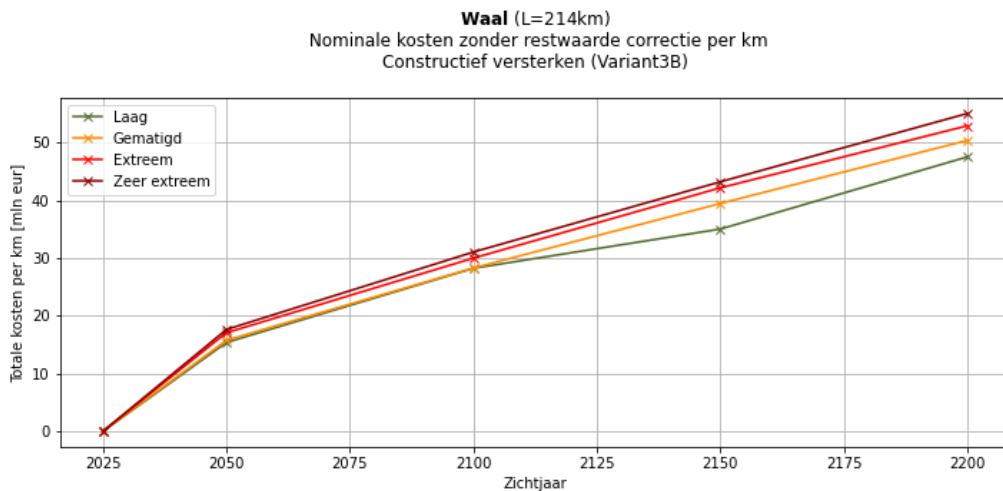
Figuur 67: Cumulatieve nominale kosten in mld. euro tot en met een bepaald zichtjaar, zonder restwaarde correctie, per tijdlijn voor deelgebied Waal

In Figuur 67 zijn de kosten voor deelgebied Waal weergegeven. Zo is te zien dat de totale kosten tot en met 2200 voor tijdlijn Laag +/-10,2 mld. euro voor tijdlijn Zeer Extreem +/-11,6 mld. euro bedragen.

De bandbreedte van de kosten met betrekking tot zeespiegelstijging per km voor het deelgebied Waal tot en met een bepaald zichtjaar zijn weergegeven in Tabel 20. In de bandbreedte zijn geen andere onzekerheden opgenomen.

Tabel 20: Cumulatieve nominale kosten voor het deelgebied Waal per km tot een bepaald zichtjaar, per tijdlijn, zonder restwaarde correctie.

Zichtjaar	Tijdlijnen [kosten per km in mln. euro]			
	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
2050	15,4	15,8	17,1	17,6
2100	28,3	28,3	30,0	31,1
2150	35,1	39,5	42,2	43,2
2200	47,6	50,4	53,0	55,1

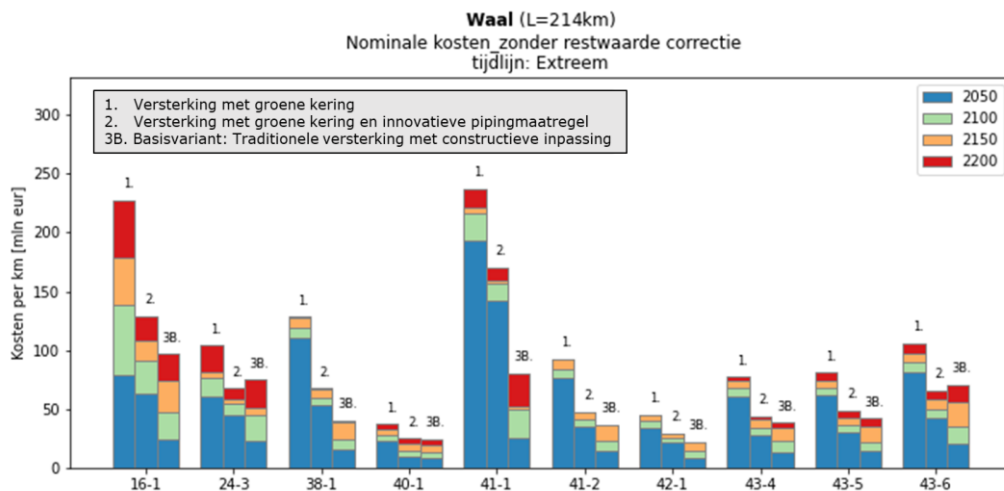


Figuur 68: Totale nominale kosten (miljoen euro, zonder restwaarde correctie) per km dijk om de keringen in deelgebied Waal te versterken.

De kosten per kilometer voor zichtjaar 2200 bedragen voor tijdlijn Laag ongeveer 47,6 miljoen euro en voor tijdlijn Zeer Extreem ongeveer 55,1 miljoen euro. Voor de meeste vakken/trajecten betreft dit tot het jaar 2200 vier versterkingsrondes. Platgeslagen resulteert dit in kosten per versterkingsronde tussen de 11,9 en 14,7 miljoen euro per kilometer per versterkingsronde.

We zien langs de Waal dat het zwaartepunt van de kosten ligt tot 2050, daarna zien we een knippunt en een geleidelijk verloop tot 2200. Ook zien we dat de spreiding tussen de tijdlijnen, ondanks grote verschillen in de mate van ZSS enigszins beperkt is. Dit komt met name door de afnemende invloed van ZSS richting bovenstroomse trajecten.

Om duiding te geven aan de opbouw van de kosten tot een bepaald zichtjaar en hierbij inzicht te krijgen in de ruimtelijk verdeling zijn in Figuur 69 de kosten per traject per kilometer, tot een bepaald zichtjaar weergegeven. Als indicatie zijn de kosten voor tijdlijn Extreem weergegeven. Voor alle trajecten zijn de kosten voor de drie dijkversterkingsstrategieën, zoals beschreven in paragraaf 5.2.1, weergegeven. Hieruit zijn de ruimtelijke knelpunten met het oog op amoveringskosten voor de trajecten te duiden (strategie 1).



Figuur 69: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaardecorrectie per km per traject voor tijdlijn extreem voor de Waal, (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.

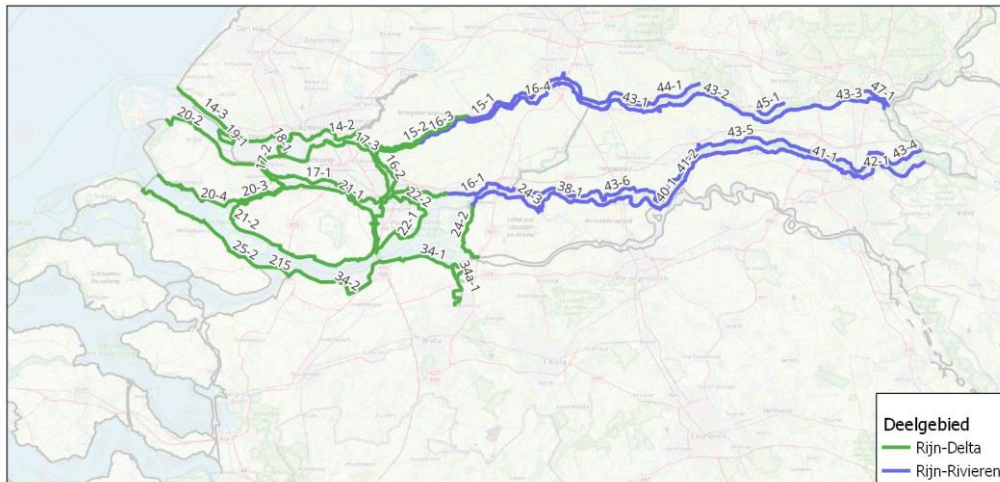
Net als bij Rijnmond-Drechtsteden geeft strategie 1 ook langs de Waal meestal de hoogste kosten. Dit komt omdat gebouwen geamoveerd worden indien deze de versterking in groen belemmeren, wat resulteert in hoge kosten. Over het algemeen zien we dat strategie 3B (traditionele inpassing) het meest voordelig is. Voor enkele trajecten geldt dat strategie 2 (groene inpassing met innovatieve pipingmaatregelen) de goedkoopste strategie is. Dit heeft als oorzaak dat hier wel ruimtelijke knelpunten zijn (zie strategie 1), maar dat deze beperkt zijn en met een reductie van de bermbreedte verholpen kunnen worden. Opgemerkt moet worden dat in de analyses gekozen is om een vaste strategie te hanteren. In de praktijk wordt echter een combinatie van strategieën toegepast.

#### 5.3.4 Gevoeligheidsanalyse ontwerplevensduur en versterkingsstrategie

Om de invloed van een andere ontwerplevensduur in kaart te brengen is een nadere analyse uitgevoerd met een ontwerplevensduur van 75 jaar. In de basisanalyses is default ontwerplevensduur van dijken van 50 jaar toegepast. Daarnaast is er in de gevoeligheidsanalyse gekeken naar de invloed van een variatie in versterkingsstrategie 3. In de basisanalyse is strategie 3B toegepast, waar aanvullend hierop ook strategie 3A in deze gevoeligheidsanalyse is beschouwd, waarbij:

- Versterkingsstrategie 3A: Constructieve elementen worden iedere versterkingsronde vervangen;
- Versterkingsstrategie 3B: Constructieve elementen worden ontworpen met een levensduur van 100 jaar.

De analyses zijn uitgevoerd voor de trajecten gelegen langs het *Rijn* systeem voor de tijdlijnen Laag en Extreem. Om de resultaten inzichtelijk te krijgen zijn de trajecten langs de Rijn opgedeeld in twee gebieden: Rijn-Delta en Rijn-Rivieren. In Figuur 70 is deze indeling weergegeven.



Figuur 70: Indeling trajecten Rijn-Delta en Rijn-Rivieren voor gevoeligheidsanalyse voor ontwerplevensduur van 75 jaar i.p.v. 50 jaar.

### Resultaten gevoeligheidsanalyses Rijn-Delta

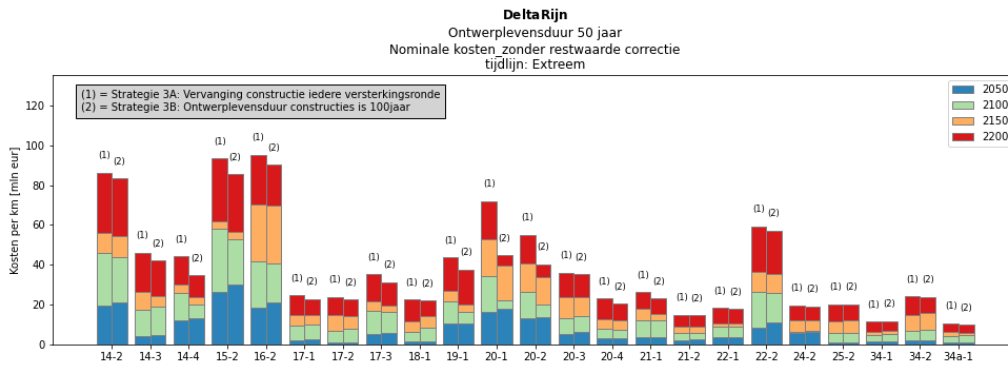
In Tabel 21 zijn de resultaten van de verschillende analyses weergegeven voor gebied Delta-Rijn.

Tabel 21: Cumulatieve nominale kosten voor het deelgebied Rijn-Delta per km tot en met zichtjaar 2200 in mln. eur voor tijdlijn Laag en Extreem.

Ontwerplevensduur	Versterkingsstrategie [gemiddelde kosten per km in mln. eur]	
	Strategie 3B	Strategie 3A
Tijdlijn Laag 2200		
• 50 jaar	23,4	26,4
• 75 jaar	19,0	20,5
Tijdlijn Extreem 2200		
• 50 jaar	35,4	39,5
• 75 jaar	29,4	31,0

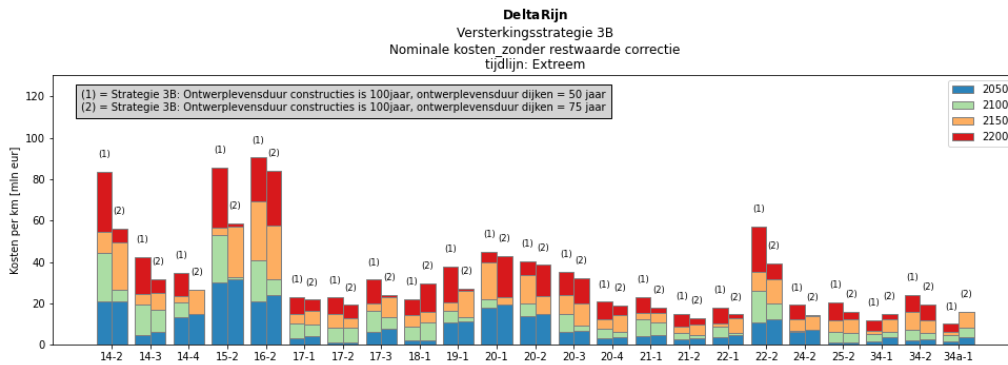
Omdat de resultaten per traject verschillen, zijn de kosten per traject opgesplitst in onderstaande figuren. De verschillen per gevoeligheidsanalyse zijn geduid. Om de resultaten overzichtelijk te houden zijn enkel de figuren voor tijdlijn Extreem weergegeven.

In Figuur 71 zijn de verschillen in cumulatieve nominale kosten per km voor de strategieën 3A en 3B inzichtelijk gemaakt per traject, gegeven een ontwerplevensduur van 50 jaar. De resultaten laten zien dat strategie 3A over het algemeen resulteert in hogere kosten dan strategie 3B. Voor enkele trajecten zijn deze kosten gelijk. Voor deze trajecten zijn de kosten voor de constructieve maatregelen erg klein of te verwaarlozen, waardoor er geen verschil optreedt tussen de strategieën. Voor de trajecten waar grote verschillen gevonden worden, moet relatief veel constructief versterkt worden, waardoor de verschillen in strategie meer tot uiting komen in de kosten.



Figuur 71: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaardecorrectie per km per traject voor gebied Rijn-Delta, vergelijking tussen versterkingsstrategie 3A en 3B.

In Figuur 72 zijn de verschillen voor strategie 3B voor een ontwerplevensduur van 50 en 75 jaar inzichtelijk gemaakt. Hieruit volgt dat er voor enkele trajecten erg grote verschillen te zien zijn. Oorzaak hiervan ligt in het feit dat er voor deze trajecten voor de meeste vakken 2 keer versterkt wordt bij een 75-jarige versterking en 4 keer versterkt wordt bij een versterking voor 50 jaar. Voor de trajecten waar met een ontwerplevensduur van 50 jaar 4 keer versterkt wordt, maar met een ontwerplevensduur van 75 jaar enkel 3 keer, zijn de kosten vergelijkbaar.



Figuur 72: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaardecorrectie per km per traject voor gebied Rijn-Delta, vergelijking tussen ontwerplevensduur 75 en 50 jaar

### Resultaten gevoeligheidsanalyses Rijn-Rivieren

In Tabel 22 zijn de resultaten van de verschillende analyses weergegeven voor gebied Rijn-Rivieren.

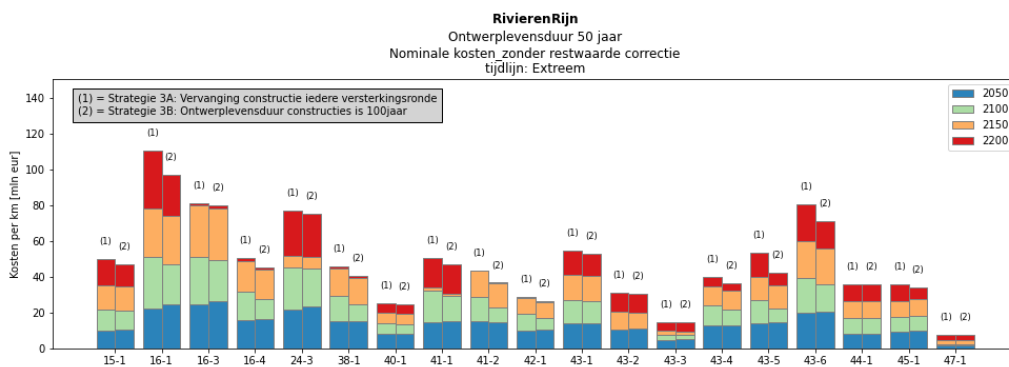
Tabel 22: Cumulatieve nominale kosten voor het deelgebied Rijn-Rivieren per km tot en met zichtjaar 2200 in mln. eur voor tijdlijn Laag en Extreem.

Ontwerplevensduur	Versterkingsstrategie [gemiddelde kosten per km in mln. euro]	
	Strategie 3B	Strategie 3A
Tijdlijn Laag 2200		
• 50 jaar	33,5	34,5
• 75 jaar	29,4	30,2
Tijdlijn Extreem 2200		
• 50 jaar	44,5	48,3
• 75 jaar	39,6	42,4

Omdat de resultaten per traject verschillen, zijn de kosten per traject opgesplitst in onderstaande figuren. De verschillen per gevoeligheidsanalyse zijn geduid. Om de resultaten overzichtelijk te houden zijn enkel de figuren voor tijdlijn Extreem weergegeven.

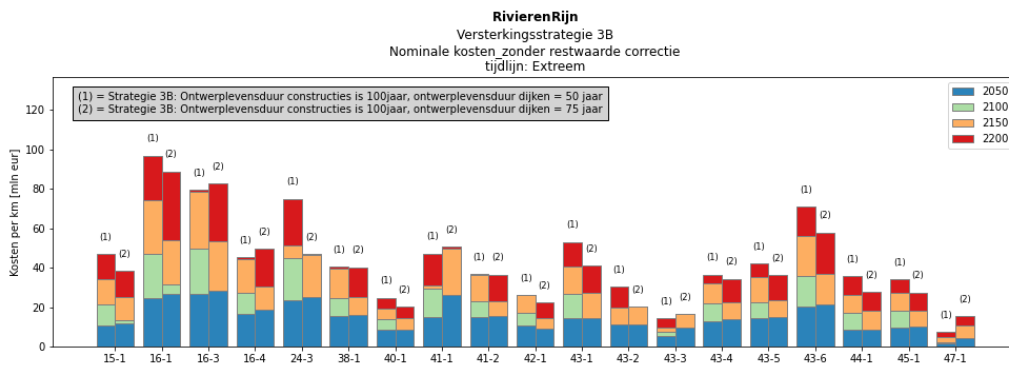


In Figuur 73 zijn de verschillen in cumulatieve nominale kosten per km voor de strategieën 3A en 3B inzichtelijk gemaakt per traject, gegeven een ontwerplevensduur van 50 jaar. De resultaten laten zien dat strategie 3A over het algemeen resulteert in hogere kosten dan strategie 3B. Voor enkele trajecten zijn deze kosten gelijk. Voor deze trajecten zijn de kosten voor de constructieve maatregelen erg klein of te verwaarlozen, waardoor er geen verschil optreedt tussen de strategieën. Voor de trajecten waar grote verschillen gevonden worden, moet relatief veel constructief versterkt worden, waardoor de verschillen in strategie meer tot uiting komen in de kosten. Dit geldt voor het gebied langs de rivieren voor maar enkele trajecten, waaruit geconcludeerd kan worden dat de ruimtelijke knelpunten relatief beperkt zijn voor deze trajecten.



Figuur 73: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaardecorrectie per km per traject voor gebied Rijn-Rivieren, vergelijking tussen versterkingsstrategie 3A en 3B.

In Figuur 74 zijn de verschillen voor strategie 3B voor een ontwerplevensduur van 50 en 75 jaar inzichtelijk gemaakt. Hieruit volgt dat er relatief kleine verschillen zijn. Voor maar enkele trajecten wordt er in het geval van een ontwerplevensduur van 75 jaar 2 keer versterkt. Voor deze trajecten zien we hier en daar dan ook grotere verschillen, maar deze zijn over het algemeen relatief beperkt. Wat opvalt voor bijvoorbeeld traject 47-1 is dat de kosten voor 75 jaar ontwerplevensduur hoger zijn. Dit komt omdat er voor zowel 50 als 75 jaar maar 3 versterkingen plaats vinden en de versterkingen met 75 jaar ontwerplevensduur logischerwijs groter zijn. Hierbij wordt wel opgemerkt dat de restwaarde van de versterkingen in 2200 voor de 75-jarige versterking groter is dan bij de 50-jarige versterking. Dit wordt echter niet geïllustreerd in Figuur 74.



Figuur 74: Cumulatieve nominale kosten zonder restwaardecorrectie per km per traject voor gebied Rijn-Delta, vergelijking tussen ontwerplevensduur 75 en 50 jaar

## 5.4 Samenvatting

In Tabel 23 zijn de resultaten van de deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Waal samengevat. Daarnaast zijn ook de resultaten van de overige deelgebieden opgenomen. In deze tabel zijn zowel de kosten tot een bepaald zichtjaar (nominale kosten per km kering) als de kosten in een bepaald zichtjaar waarbij gecorrigeerd is voor de restwaarde opgenomen.

Tabel 23: Samenvatting kosten per deelgebied van RMM en rivieren. Met zowel de kosten zonder restwaarde correctie (Nom. Kosten) als de kosten met restwaarde correctie (Met corr.).

Zichtjaar	Tijdelijnen [kosten in mld. eur]							
	Laag		Gematigd		Extreem		Zeer Extreem	
	<b><u>Rijnmond-Drechtsteden</u></b>							
	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.
2050	2,4	0,4	2,6	0,4	3,0	0,5	3,7	0,6
2100	4,6	2,7	5,3	3,0	6,7	3,7	8,6	5,1
2150	6,6	5,1	7,9	6,3	9,6	7,6	11,9	9,7
2200	9,8	8,5	11,8	10,4	14,0	12,1	17,0	14,9
	<b><u>Waal</u></b>							
	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.
2050	3,3	0,9	3,3	0,9	3,6	1,0	3,7	1,0
2100	6,0	3,7	6,0	3,8	6,2	4,1	6,4	4,2
2150	7,8	6,2	8,8	6,3	9,3	6,6	9,5	6,8
2200	10,2	9,0	10,8	9,5	11,2	9,9	11,6	10,2
	<b><u>Haringvliet / Hollandsch Diep</u></b>							
	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.
2050	0,3	0,0	0,4	0,0	0,5	0,1	0,6	0,1
2100	0,5	0,4	0,7	0,4	1,1	0,6	1,7	1,0
2150	0,7	0,6	1,1	0,9	1,9	1,5	2,6	2,1
2200	1,2	1,0	2,1	1,7	3,0	2,6	3,7	3,3
	<b><u>Nederrijn / Lek</u></b>							
	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.
2050	1,9	0,4	1,9	0,4	2,1	0,5	2,2	0,5
2100	2,6	2,0	2,7	2,0	3,5	2,4	3,8	2,5
2150	3,6	2,7	3,8	2,8	5,6	4,0	5,8	4,2
2200	3,9	3,7	4,4	3,9	6,9	6,1	7,2	6,3
	<b><u>Maas</u></b>							
	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.
2050	1,6	0,2	1,7	0,2	2,3	0,3	2,4	0,3
2100	2,3	0,2	2,5	1,9	3,1	2,4	3,3	2,6
2150	2,9	2,6	3,8	3,2	4,8	4,0	5,0	4,2
2200	4,0	3,7	5,4	4,8	6,7	6,0	7,1	6,3
	<b><u>Totaal</u></b>							
	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.	Nom. Kosten	Met corr.
2050	9,5	2,0	9,9	2,1	11,4	2,3	12,7	2,5
2100	16,0	8,9	17,1	11,1	20,7	13,2	23,7	15,3
2150	21,6	17,3	25,3	19,4	31,1	23,6	34,8	26,9
2200	29,1	25,9	34,4	30,2	41,8	36,6	46,6	41,0

In het gebied van de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zien we grote verschillen tussen de verschillende deelgebieden. Hoe meer benedenstrooms een traject gelegen is, hoe groter het effect is van de zeespiegelstijging, wat we ook verwachten. Doordat de afvoerstatistiek wisselt per tijdelijn is puur het effect van zeespiegelstijging moeilijk te duiden. Hiervoor kan het beste naar een benedenstroomse gebied als Haringvliet/Hollandsch Diep gekeken worden. Daar zien we een constant toenemend verloop van de kosten met de tijdelijnen.

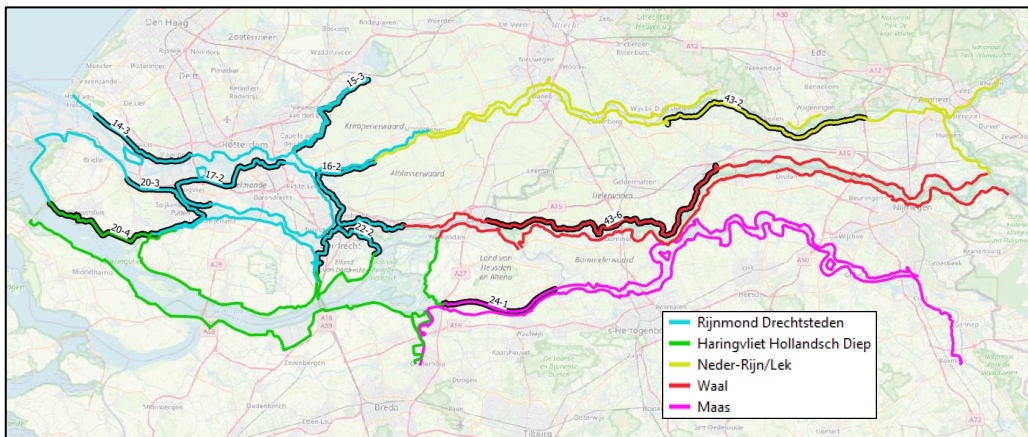
## 6 Gevoeligheidsanalyses

### 6.1 Inleiding

Naast de basisberekeningen uit hoofdstuk 3 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. Daarbij hebben we gekeken naar de invloed van:

1. Een aangepaste faalkans van de Europoortkering;
2. Een aangepast sluitpeil van de Europoortkering;
3. Het aftoppen van de Rijnafvoer;
4. Modelonzekerheden.

Omdat de hoeveelheid rekenwerk buiten proportioneel groot zou worden als alle tijdlijnen, zichtjaren en locaties doorgerekend worden, zijn hierin per gevoeligheidsanalyse specifieke keuzes gemaakt. Voor elk van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses zijn de berekeningen uitgevoerd voor 10 normtrajecten die zijn verspreid over de hele regio (Figuur 75). Binnen een normtraject zijn de berekeningen steeds uitgevoerd voor alle dijkvakken (locaties), zodat ook analyses met OKADER (kosten) uitgevoerd kunnen worden.



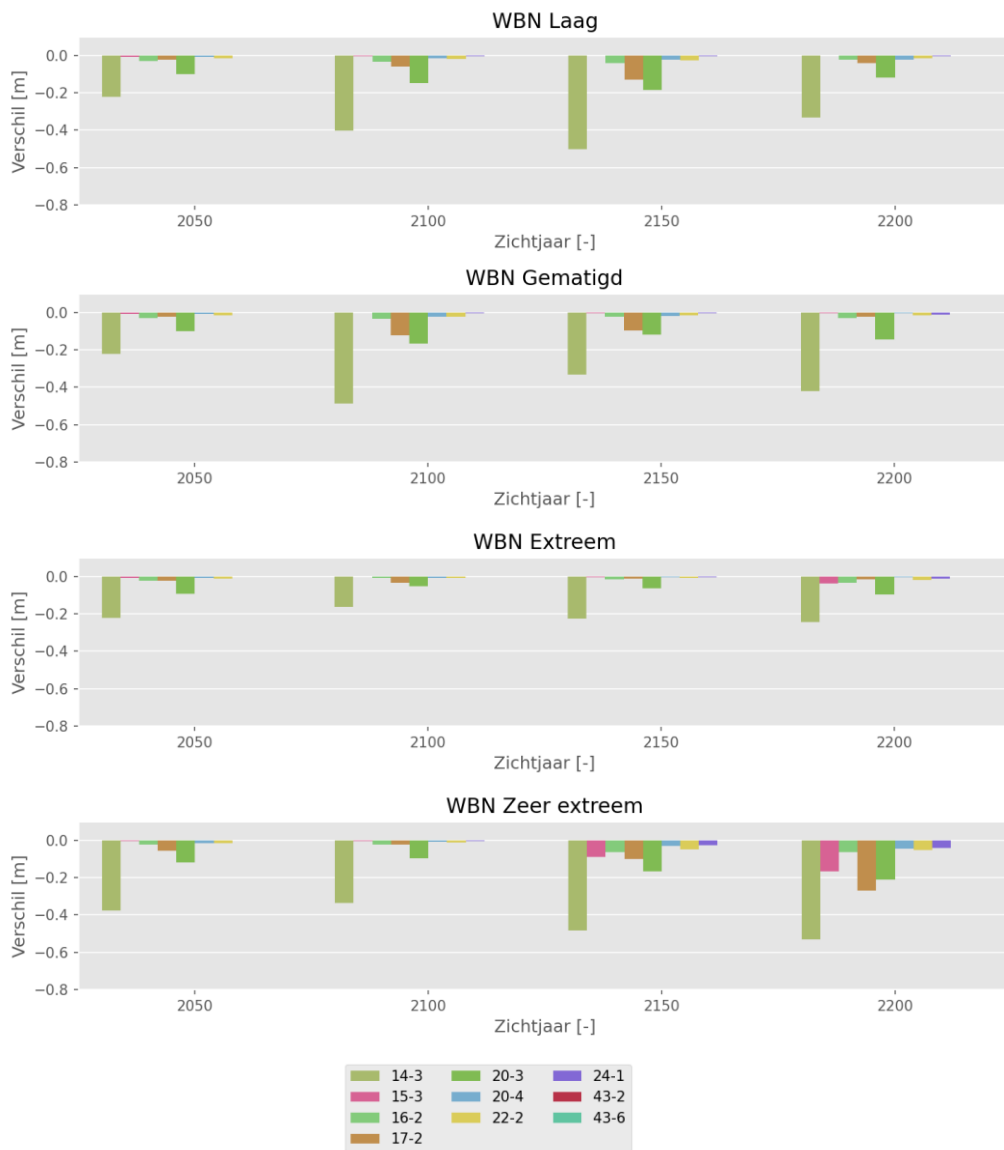
Figuur 75: Geselecteerde normtrajecten voor de gevoeligheidsanalyses (zwart).

### 6.2 Parameter 1: Aangepaste faalkans Europoortkering

#### 6.2.1 Hydraulische belastingen

In deze gevoeligheidsanalyse is de faalkans van de Europoortkering van 1/100 per sluitvraag verkleind naar 1/1.000 per sluitvraag. Alle overige uitgangspunten zijn gelijk aan die uit de basisberekeningen zoals beschreven in hoofdstuk 3. De berekeningen zijn uitgevoerd voor alle tijdlijnen en alle zichtjaren, waarbij zowel de consequenties op de waterstanden als op de HBN's in beeld zijn gebracht.

In Figuur 76 zijn de resultaten voor het deelgebied RDST in beeld gebracht. Per tijdlijn is een deelfiguur gemaakt met daarin voor elk van de zichtjaren het verschil in waterstand (per normtraject) door het verkleinen van de faalkans van de Europoortkering.



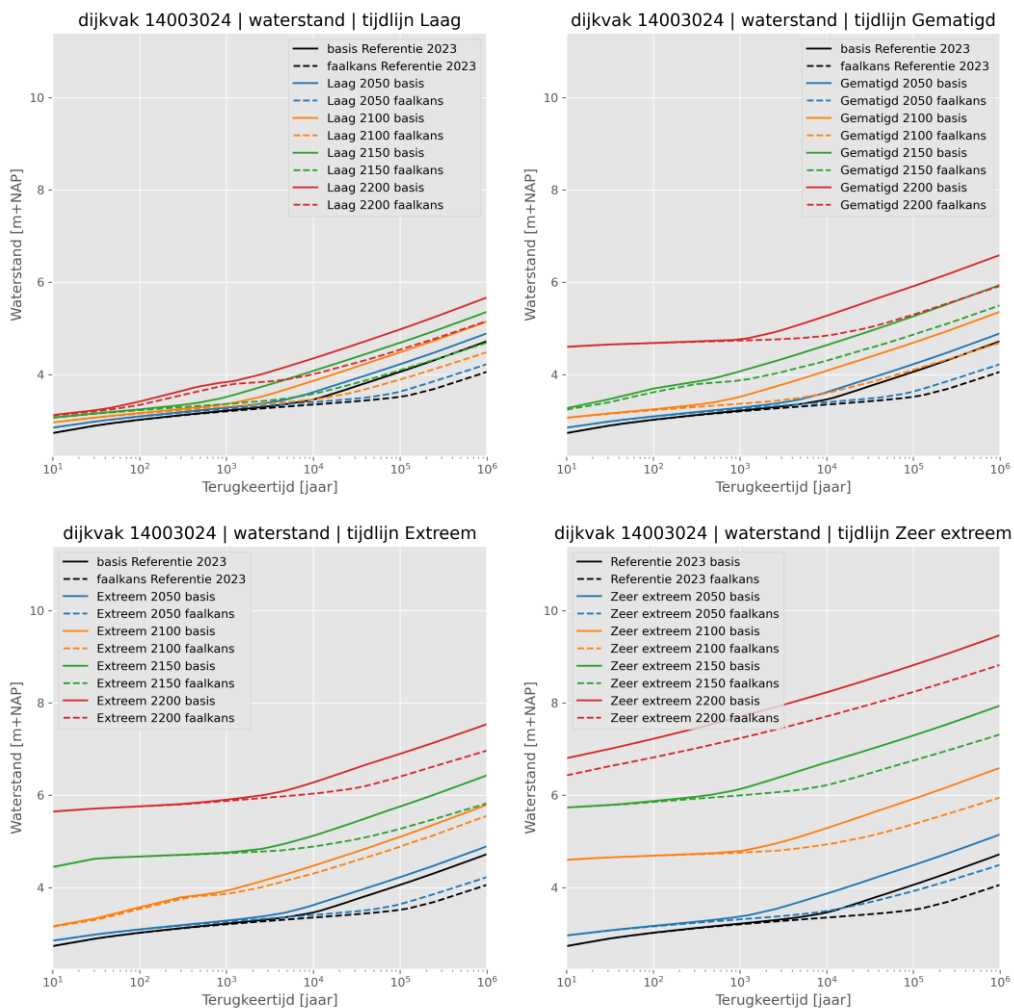
Figuur 76: Verschillen in waterstand bij de norm (WBN) voor de 10 geselecteerde normtrajecten door een 10x verkleinde faalkans van de Europoortkering.

Normtraject 14-3 (lichtgroen) springt eruit als het traject waarvoor de impact van het verkleinen van de faalkans het grootst is. Dit is niet vreemd, aangezien dit traject het dichtst bij de Maeslantkering ligt. De invloed van een verkleinde faalkans in de waterstanden op de overige trajecten blijft beperkt tot 0,2 m.

Het valt op dat afhankelijk van tijdlijn en zichtjaar de invloed van de faalkans anders kan zijn, maar dat het niet eenvoudig is om hier een logica in te ontdekken. Vergelijk bijvoorbeeld de rode balk (traject 14-3) in tijdlijn Laag met die uit tijdlijn Gematigd voor zichtjaar 2150. We zien dat de waterstand in tijdlijn Laag 0,5 m lager uitvalt door het verkleinen van de faalkans. In tijdlijn Gematigd is dit 0,35 m. In tijdlijn Extreem is het effect nog kleiner (0,22 m), terwijl dit in tijdlijn Zeer Extreem weer toeneemt tot een afname van bijna 0,5 m.

Zonder het in detail bekijken van frequentielijnen op het niveau van individuele locaties is het lastig om de resultaten te interpreteren. Dit komt o.a. omdat afhankelijk van de tijdlijn en het zichtjaar ook andere parameters veranderen dan de verkleining van de faalkans, zoals de mate van ZSS en het sluitpeil van de Europoortkering.

In Figuur 77 is een voorbeeld gegeven voor locatie Maassluis, waarin zowel de resultaten staan voor de waterstandsberoeeningen met een faalkans van de Europoortkering (EPK) van 1/100 per sluitvraag (doorgetrokken lijnen) als met een faalkans van de EPK van 1/1000 per sluitvraag (gestreepte lijnen).



Figuur 77: Frequentielijnen van de waterstand voor dijkvak 14003024 (Maassluis). De doorgetrokken lijnen komen overeen met een faalkans van de EPK van 1/100 per sluitvraag, de gestreepte lijnen met een faalkans van 1/1000 per sluitvraag.

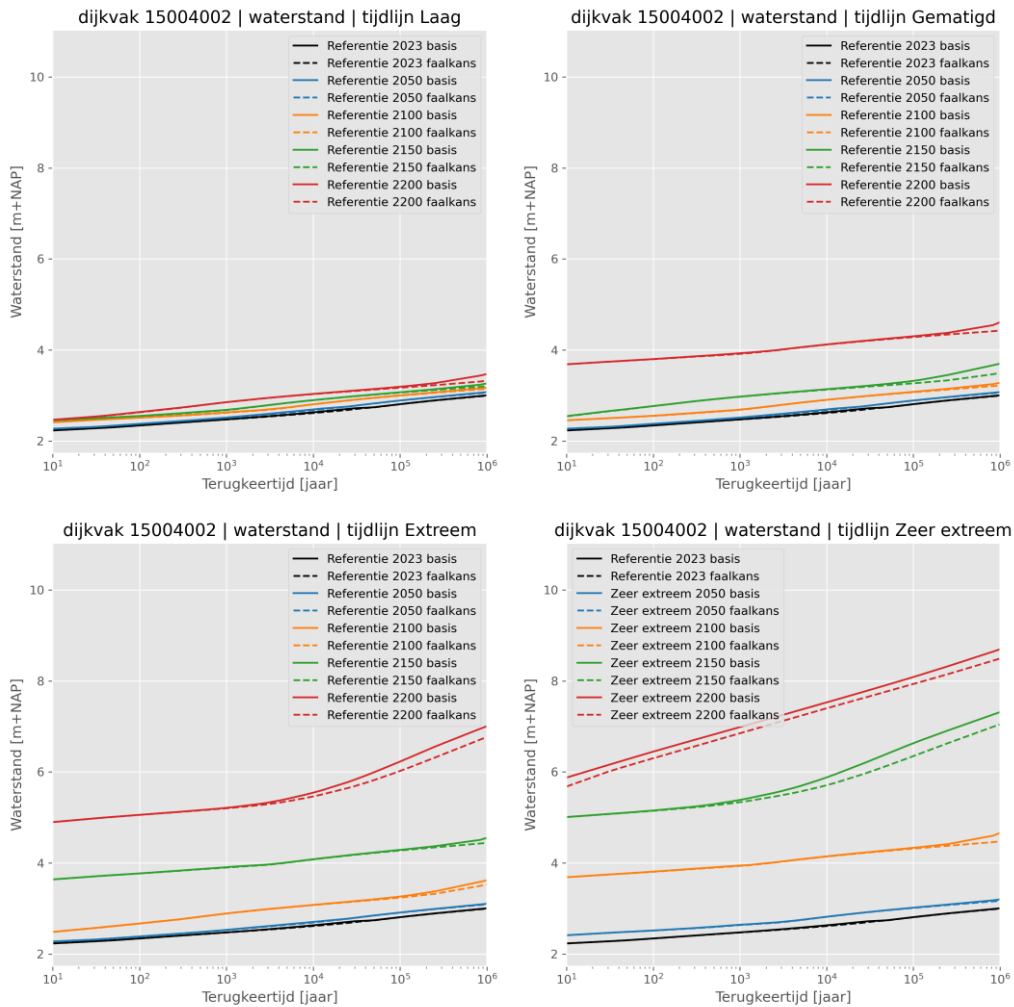
We zien dat voor de hoogfrequente waterstanden (vaker dan 1/100 per jaar) het verkleinen van de faalkans niks of zeer weinig effect heeft. In nagenoeg alle berekeningen beginnen de lijnen gelijk en gaan ze vanaf een bepaalde terugkeertijd uit elkaar lopen. Dat komt doordat in het hoogfrequente bereik de gesloten kering-toestand dominant is. Bij de faalkans van 1/100 per sluitvraag heeft falen in dat bereik nog beperkt invloed. Verkleining van de faalkans heeft daardoor nauwelijks effect. De enige uitzondering is zichtjaar 2200 in tijdlijn Zeer Extreem (figuur rechtsonder): daar lopen de frequentielijnen al vanaf  $T = 10$  jaar uit elkaar. Daarbij speelt mee, dat in die berekening het sluitpeil eigenlijk onvoldoende is verhoogd. In de berekening met 540 cm ZSS is gebruik gemaakt van dezelfde database fysica (met dezelfde sluitpeilverhoging) als in de berekening met 300 cm ZSS (zie Tabel 2). Bij een hoger sluitpeil zou de frequentielijn voor 2200 Zeer Extreem naar verwachting ook een duidelijke knik vertonen in het weergegeven bereik, waarbij de frequentielijnen in het begin op elkaar zouden liggen en pas vanaf die knik uit elkaar zouden gaan lopen.

Merk op dat als het sluitpeil bij Rotterdam en/of Dordrecht niet wordt overschreden, dat we geen verschil verwachten in het resultaat van de berekeningen. De EPK wordt dan immers niet gesloten en de faalkans van de EPK heeft dan geen invloed.

We constateren dat de terugkeertijd waarvoor de lijnen uit elkaar gaan lopen (i.e. waar het verkleinen van de faalkans voor een zichtbare verlaging zorgt) verschilt per tijdlijn en per zichtjaar. Ook de afstanden tussen de doorgetrokken en gestreepte lijnen (=effect verkleinen faalkans) verschillen per tijdlijn en zichtjaar. Dit betekent dat het vergelijken van de resultaten bij  $T = 10.000$  jaar (norm van het corresponderende normtraject) een gevarieerd beeld laat zien van het effect van het verkleinen van de faalkans: soms zal dit meer zijn, soms minder, afhankelijk van tijdlijn en zichtjaar. Dit komt dus inderdaad overeen met het beeld dat naar voren kwam uit de staafdiagrammen in Figuur 76. Het voert binnen de huidige studie te ver om te analyseren waarom de frequentielijnen precies lopen zoals ze lopen.

Wat in deze resultaten verder veel meer opvalt dan in hoofdstuk 3.3.1, is dat de resultaten die overeenkomen met de database met 1 m ZSS zonder aanpassing van het sluitpeil "afwijkend" zijn. In het bijzonder gaat het om de rode lijnen in tijdlijn Laag (zichtjaar 2200, linksboven), de groene lijnen in tijdlijn Gematigd (zichtjaar 2150, rechtsboven) en de oranje lijnen in tijdlijn Extreem (zichtjaar 2100, linksonder). Typisch bevatten de frequentielijnen in de buurt van de EPK een "knik" die een vlakker deel met een wat steiler deel verbindt (hoofdstuk 3.3.1). In de database met 1 m ZSS is géén aanpassing gedaan aan het sluitpeil van de EPK, wat betekent dat deze vaak dicht gaat, denk aan orde 50x per winterhalfjaar. Dat betekent dat de genoemde "knik" in de frequentielijn eigenlijk niet meer aanwezig is en dat alleen het tweede, steilere, deel van de frequentielijn nog zichtbaar is, omdat de faalkans van de EPK overheerst. Het verkleinen van de faalkans helpt, maar als door de ZSS het aantal sluitingen per jaar flink toeneemt, pakt het netto effect nog steeds ongunstig uit. In de databases met een hogere ZSS zien we dit niet terug, omdat daar wél de sluitpeilen zijn aangepast. Hoewel dit ook al zichtbaar was, is het daar minder opgevallen dan in de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse.

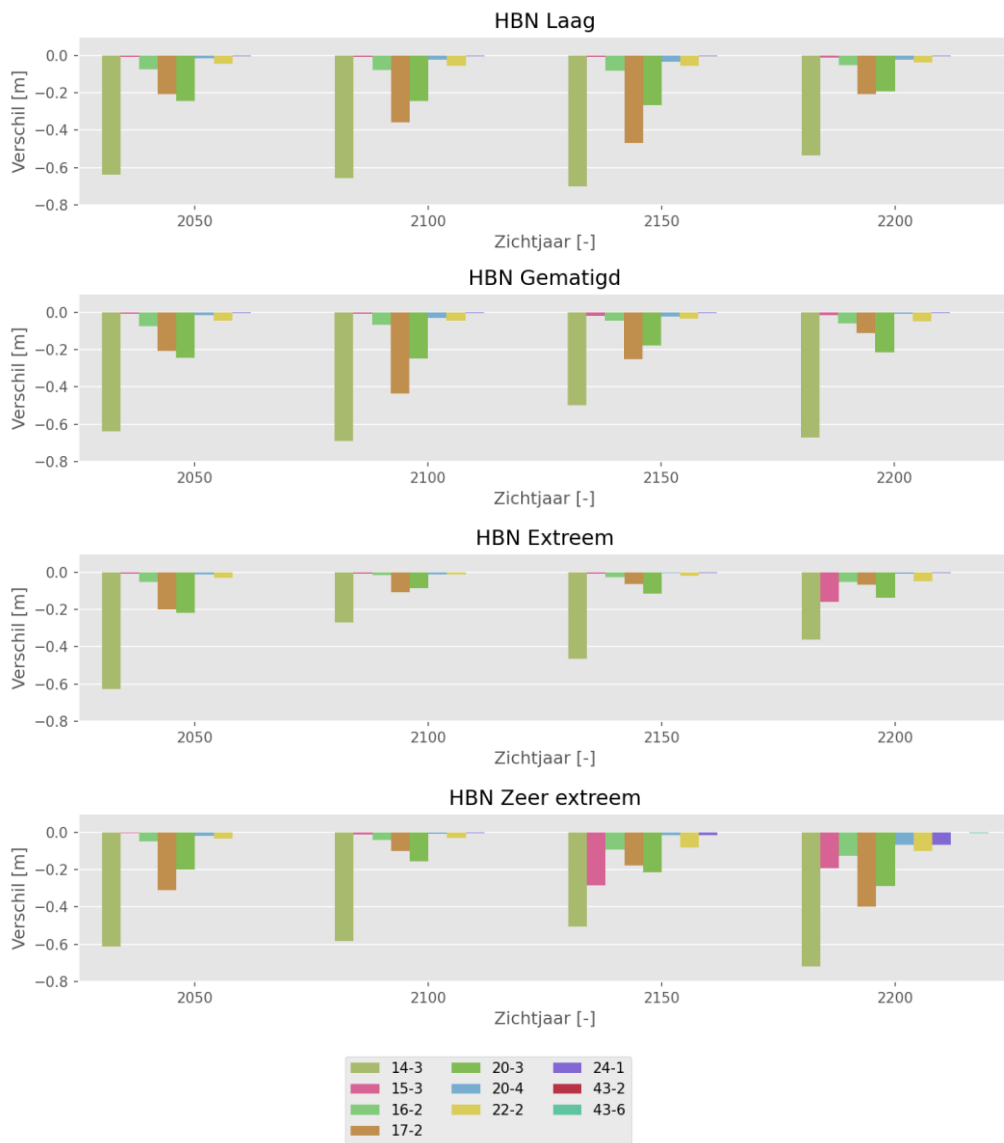
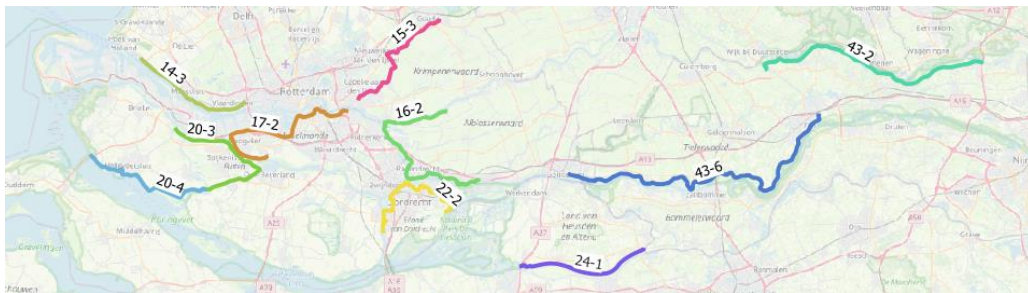
Het verkleinen van de faalkans van de EPK heeft ook effect op de Hollandsche IJssel, maar het effect beperkt zich tot centimeters en in tijdlijn Zeer Extreem tot 0,1 – 0,2 m (Figuur 78). De HIJK blijft zijn werk doen als stormvloedkering tot het moment dat deze gaat overstromen. Verkleinen van de faalkans van de EPK geeft aan de stroomafwaartse kant van de HIJK een verlaging van de waterstanden vanaf terugkeertijden van  $T = 10^3$  jaar. Deze verlaging werkt een klein beetje door op de trajecten achter de HIJK.



Figuur 78: Frequentielijnen van de waterstand voor dijkvak 15004002 (Krimpen a/d IJssel). De doorgetrokken lijnen komen overeen met een faalkans van de EPK van 1/100 per sluitvraag, de gestreepte lijnen met een faalkans van 1/1000 per sluitvraag.

Naast de implicaties voor de waterstanden, is ook gekeken naar de invloed op de HBN's. In Figuur 79 is een voorbeeld gegeven voor hetzelfde deelgebied (RDST) als voor de waterstanden.





Figuur 79: Verschillen in HBN voor de normtrajecten uit deelgebied RDST door een verkleinde faalkans van de Europoortkering.

Op hoofdlijnen zijn de verschillen in HBN voor wat betreft het patroon tussen de verschillende normtrajecten vergelijkbaar met die van de waterstanden, maar zeker niet helemaal. Dit wordt o.a. veroorzaakt door de normfrequentie waarbij de resultaten worden bekeken. Voor de waterstanden is de trajectnorm gehanteerd (ondergrens), terwijl voor de HBN's ook rekening is gehouden met de faalkansbegroting voor golfoverslag (24%) en de lengte-effectfactor (N) van het

betreffende traject<sup>15</sup>. Op het moment dat bij een andere frequentie wordt gekeken in de frequentielijnen, ontstaat een ander beeld (de helling van de frequentielijnen varieert als functie van de frequentie). Daarnaast werkt het effect van het verkleinen van de faalkans van de Europoortkering anders door in het HBN dan in de waterstand, omdat met name de waterstanden worden beïnvloed door de faalkans en de golven in mindere mate. Daarbij is van belang of een locatie waterstand- of windgedomineerd is, hetgeen weer afhangt van bijvoorbeeld de oriëntatie, de bodemhoogte en strijklengtes en het dwarsprofiel.

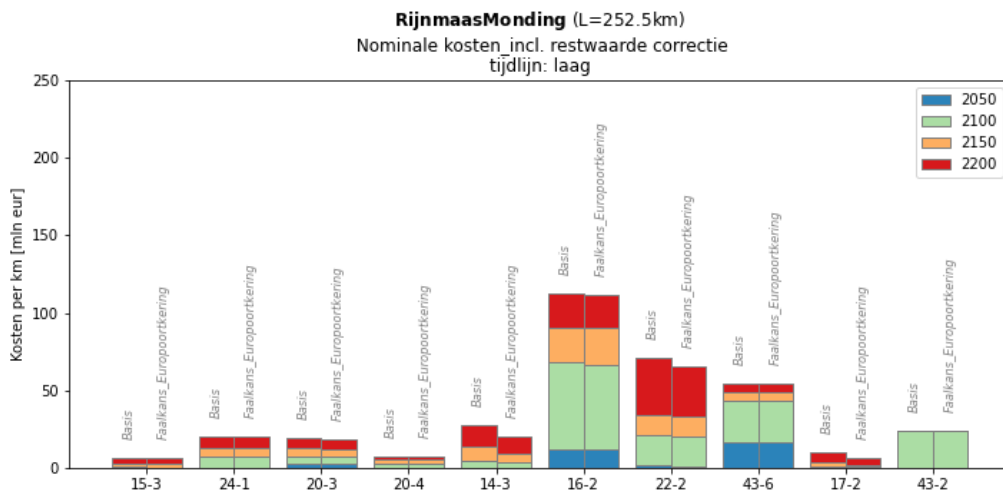
In zijn algemeenheid is het effect van het verkleinen van de faalkans van de EPK groter bij de HBN's dan bij de waterstanden; maar niet altijd. De verlagingen in het HBN zijn orde 50 – 100% groter dan bij de waterstanden. Dit verschilt weer per tijdlijn en per zichtjaar. Ook zien we tussen opeenvolgende zichtjaren dat het effect in het HBN een ander patroon kan volgen dan bij de waterstanden. Vergelijk de groene balkjes van traject 14-3 voor tijdlijn Zeer Extreem uit Figuur 79 (zichtjaar 2150 geeft minder verlaging dan 2100) met die uit Figuur 76 (zichtjaar 2150 geeft meer verlaging dan 2100).

Over het algemeen is het effect van het verlagen van de faalkans beperkt tot maximaal circa 2 dm, met uitzondering van traject 14-3 en (in mindere mate) 17-2. De invloed op de kosten is daarmee naar verwachting beperkt, hetgeen overigens ook blijkt uit de resultaten uit de volgende paragraaf.

### 6.2.2 Waterveiligheidsopgave dijken

De invloed van het aanpassen van de faalkans van de Europoortkering op de nominale kosten is weergegeven in Figuur 80 en Figuur 81.

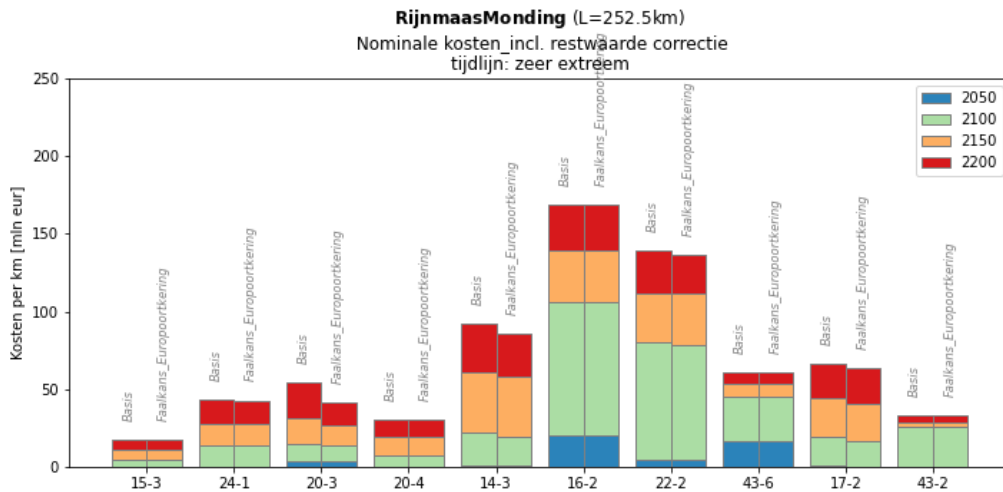
Figuur 80 laat zien dat er maar een beperkte invloed is op de kosten van enkele trajecten, zo zien we een minimale afname van de kosten voor trajecten 14-3, 22-2 en 17-2. Voor de overige trajecten zijn de verschillen in kosten verwaarloosbaar klein voor tijdlijn Laag.



Figuur 80: Nominale kosten incl. correctie restwaarde voor basisberekening en aangepaste faalkans Europoortkering voor tijdlijn Laag.

<sup>15</sup> Merk op dat deze werkwijze in het nieuwe BOI2023 gaat veranderen.

Voor tijdlijn Zeer Extreem zien we eenzelfde invloed als voor tijdlijn Laag, maar dan meer uitvergroet. De invloed op de kosten is gering, alleen voor traject 20-3 is het verschil duidelijk zichtbaar.



Figuur 81: Nominale kosten zonder correctie restwaarde voor basisberekening en aangepaste faalkans Europoortkering voor tijdlijn Zeer Extreem.

De invloed van de aanname in de faalkans van de Europoortkering voor de systeemanalyse zal op systeemniveau weinig of nauwelijks van invloed zijn, gezien de minimale invloed op de individuele trajecten in de gevoeligheidsanalyse.

## 6.3 Parameter 2: Aangepast sluitpeil Europoortkering

### 6.3.1 Hydraulische belastingen

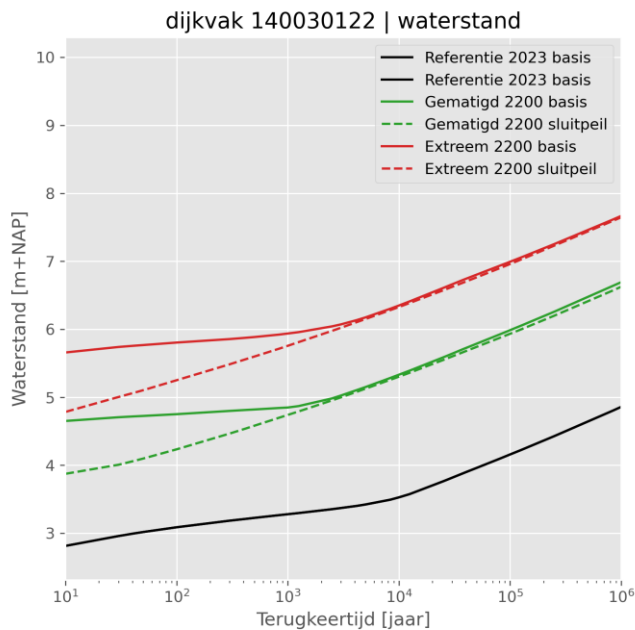
In de basisberekeningen zoals beschreven in hoofdstuk 3 is in een aantal combinaties van tijdlijnen en zichtjaren het sluitpeil verhoogd, soms met 1,25 m en soms met 2,50 m (zie Tabel 2 in paragraaf 3.2.2). De afweging die gemaakt wordt bij het verhogen van het sluitpeil is het minder vaak hoeven sluiten van de stormvloedkeringen (gunstig voor functies als scheepvaart en natuur) met als consequentie dat de waterstanden in het achterliggende gebied omhoog gaan.

Als gevoeligheidsanalyse is ervoor gekozen om de invloed van deze verhoging(en) van het sluitpeil in beeld te brengen voor zichtjaar 2200 in tijdlijnen Gematigd en Extreem. Daartoe zijn databases gebruikt waarbij het sluitpeil niet is verhoogd (Tabel 24). De vergelijking wordt dus niet helemaal zuiver, omdat in de databases met onaangepast sluitpeil ook een lagere ZSS is gehanteerd (namelijk 100 cm i.p.v. 200 of 300 cm). In de statistiek is hiervoor gecorrigeerd, maar de fysica blijft deels onnauwkeurig. Zo zal bij Dordrecht de waterstand bij aanvang van een storm hoger zijn in een scenario met meer ZSS. De "vulling" van het gebied met water tijdens de storm is dan sneller, waardoor de hoogste waterstand in de storm wat hoger uit zal komen in een "correcte" berekening. De waterstanden en HBN's bij het huidige niet verhoogde sluitpeil zullen dus wat onderschat worden.

Zichtjaar 2200	Tijddlijn	Database fysica			Statistiek	
		Zeespiegelstijging	Aanpassing sluitpeil	Afvoer-verdeling	Zeespiegelstijging	Afvoer-statistiek
Basis	Gematigd	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	GL2200
	Extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	300 cm	WH2200
Gevoeligheid	Gematigd	100 cm	-	Vast18000	200 cm	GL2200
	Extreem	100 cm	-	Vast18000	300 cm	WH2200

Tabel 24: Overzicht gebruikte databases fysica en statistiek per tijddlijn en zichtjaar voor de gevoeligheidsanalyse van het sluitpeil

Voor de locaties Maassluis, Maurik en Alblasterdam zijn de consequenties van een aangepast sluitpeil te zien in respectievelijk Figuur 82 t/m Figuur 84.

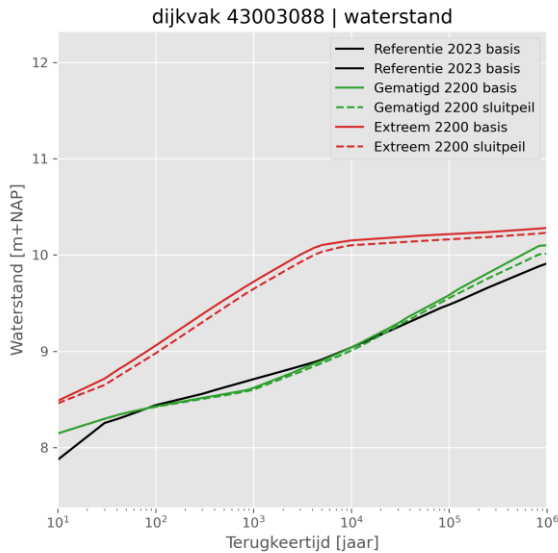


Figuur 82: Verschillen in waterstandsfrequentielijnen voor Maassluis (Nieuwe Maas) door een verhoogd sluitpeil in tijddlijnen Gematigd en Extreem voor zichtjaar 2200. "Basis" = uitgangspunt voor KP ZSS met verhoogd sluitpeil, "sluitpeil" = gevoeligheidsanalyse waarbij het sluitpeil niet is verhoogd.

De resultaten voor Maassluis laten zien dat het effect van het niet verhogen van het sluitpeil met name gunstig is bij de kleine terugkeertijden (die vanuit waterveiligheid minder relevant zijn). In dat bereik is bij het verhoogde sluitpeil de open keringtoestand dominant (de kering hoeft dan immers nog niet dicht), maar bij niet verhoogd sluitpeil de gesloten keringtoestand (de faalkans heeft in dat bereik nog beperkt invloed). Het effect van het aangepaste sluitpeil op de waterstand is bij  $T = 10$  jaar net iets minder dan de aanpassing van het sluitpeil zelf (+125 cm). Bij zeer hoge terugkeertijden ligt dat anders, aangezien daar in beide situaties de open keringtoestand dominant is als gevolg van een falende EPK. Het sluitpeil maakt daarbij niet meer uit, vandaar dat de lijnen vanaf zeker moment nagenoeg op elkaar liggen. Het verschil, dat bij  $T = 10$  jaar nog bijna overeenkomt met de aanpassing van het sluitpeil zelf, neemt dus langzaam af tot vrijwel nul op het moment dat in beide gevallen de situatie met een falende EPK dominant is. De resultaten komen overeen met onze verwachtingen. Verder merken we nog op dat de waterstanden bij de kleine terugkeertijden weliswaar omlaag gaan door het niet verhogen van het

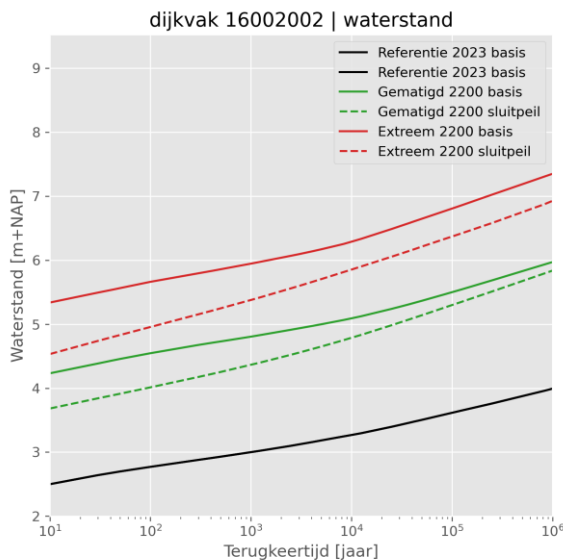
sluitpeil, maar dat de sluitfrequentie daardoor natuurlijk wel toeneemt (hetgeen ongunstig kan zijn voor andere aspecten dan waterveiligheid).

De resultaten in Maurik komen ook overeen met de verwachtingen. Omdat deze locatie ver verwijderd is van de EPK en een heel stuk bovenstrooms op de Nederrijn ligt, is de invloed van de stormvloedkering, het sluitpeil (en daarmee de sluitfrequentie en de kans op niet sluiten - faalkans) beperkt.



Figuur 83: Verschillen in waterstandsfrequentielijnen voor Maurik (Nederrijn) door een aangepast sluitpeil in tijdlijnen Gematigd en Extreem voor zichtjaar 2200.

Voor alle locaties geldt dat de waterstandsfrequentielijn een combinatie is van waterstanden bij een geopende en van een gesloten EPK. Dicht bij zee is er een groot verschil in waterstanden tussen de geopende en gesloten EPK en dit verschil wordt kleiner naarmate een locatie zich meer bovenstrooms bevindt. Bij een locatie als Maurik zien we eigenlijk geen verschil meer in de waterstand met geopende of gesloten EPK. Het vaker sluiten van de EPK heeft weinig tot geen invloed op de waterstand en dus ook bijna niet zichtbaar in de waterstandsfrequentielijn.



j

Figuur 84: Verschillen in waterstandsfrequentielijnen voor Alblasserdam (Noord) door een aangepast sluitpeil in tijdlijnen Gematigd en Extreem voor zichtjaar 2200.

Het vaker sluiten van de EPK wordt alleen zichtbaar als er een duidelijk verschil is tussen de waterstanden bij een geopende en een gesloten EPK. Dit geldt bijvoorbeeld bij Maassluis (Figuur 82), maar ook bij een locatie als Alblasserdam (Figuur 84). Het verschil bij Maassluis is groter dan dat bij Alblasserdam, waardoor de waterstandsfrequentielijn bij Maassluis zelfs volledig bepaald wordt door de faalkans van de EPK. De resulterende waterstandsfrequentielijn komt bij goede benadering voor grote terugkeertijden overeen met het product van de waterstandsfrequentielijn van de geopende EPK en de faalkans van de EPK.

Bij Alblasserdam is het waterstandsverschil tussen de geopende EPK en de gesloten EPK minder groot dan bij Maassluis. In tegenstelling tot Maassluis hebben dus ook de waterstanden bij een gesloten EPK invloed op de resulterende waterstandsfrequentielijn (en niet alleen de waterstanden bij een open EPK). Als de waterstanden van de gesloten EPK verlaagd worden door het sluitpeil te verlagen, heeft dit daarmee direct invloed op de resulterende waterstandsfrequentielijn. Vandaar dat verlaging van het sluitpeil effect heeft op de waterstandsfrequentielijn bij Alblasserdam, en in tegenstelling tot bij Maassluis ook bij hoge terugkeertijden, die meer relevant zijn voor waterveiligheid

We concluderen dat het effect van een aangepast sluitpeil het grootst is voor locaties die dicht bij de EPK liggen, maar alleen bij kleine terugkeertijden. De toename in waterstanden bij kleine terugkeertijden ligt in dezelfde ordegrootte als de toename van het sluitpeil, wat overeenkomt met de verwachting. Bij locaties in het overgangsgedebied is het effect van een aangepast sluitpeil kleiner, maar wel over een groter bereik van terugkeertijden zichtbaar, aangezien hier ook in het extreme bereik nog situaties met een gesloten kering een significante kansbijdrage hebben. Verder bovenstrooms neemt het effect van het sluitpeil op de waterstanden af, totdat dit nagenoeg geheel verdwijnt bij afvoergedomineerde locaties, waarbij de keringtoestand (en dus ook het sluitpeil) vrijwel geen rol meer speelt.

### 6.3.2 Waterveiligheidsopgave dijken

Voor deze gevoeligheidsanalyse is het niet goed mogelijk om het effect van een aangepast sluitpeil op de kosten te bepalen, omdat de OKADER-berekeningen alleen uitgevoerd kunnen worden voor een hele tijdlijn. Voor het aangepast sluitpeil was het enkel mogelijk om het effect op de hydraulische belastingen te bepalen voor tijdlijn Gematigd in 2200 en Extreem in 2200, omdat voor deze twee tijdlijnen en zichtjaren de hydraulische databases met aangepast sluitpeil beschikbaar zijn.

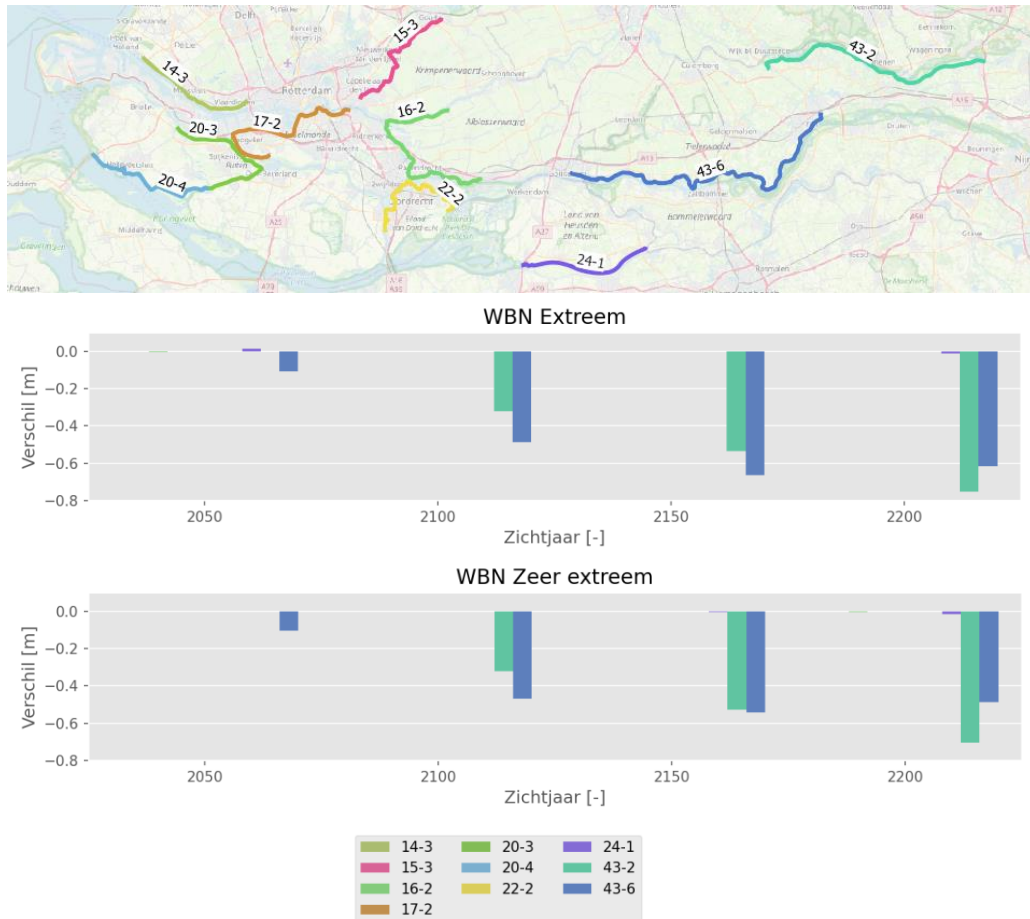
## 6.4 Parameter 3: Aftoppen van de Rijnafvoer

### 6.4.1 Hydraulische belastingen

In de gevoeligheidsberekening naar de invloed van het aftopniveau is het aftopniveau verlaagd van 22.000 m<sup>3</sup>/s naar 18.000 m<sup>3</sup>/s.<sup>16</sup> De analyse is uitgevoerd voor alle tijdlijnen en voor alle zichtjaren, maar alleen voor het Rijndominante deel van het RMM-gebied (dus niet voor het Maasdominante deel en niet voor de HIJ).

<sup>16</sup> Het achterliggende idee hierbij is dat hogere piekafvoeren niet kunnen plaatsvinden, omdat in dergelijke extreme situaties al sprake zal zijn van overstromingen in Duitsland. Dat water zal echter via negatieve systeemwerking achterlangs toch ook richting Nederland komen, zij het met flinke vertraging. Dat zou betekenen dat de piekafvoer wel afneemt, maar dat de afvoergolf significant langer kan worden. Dit effect is hier echter niet meegenomen.

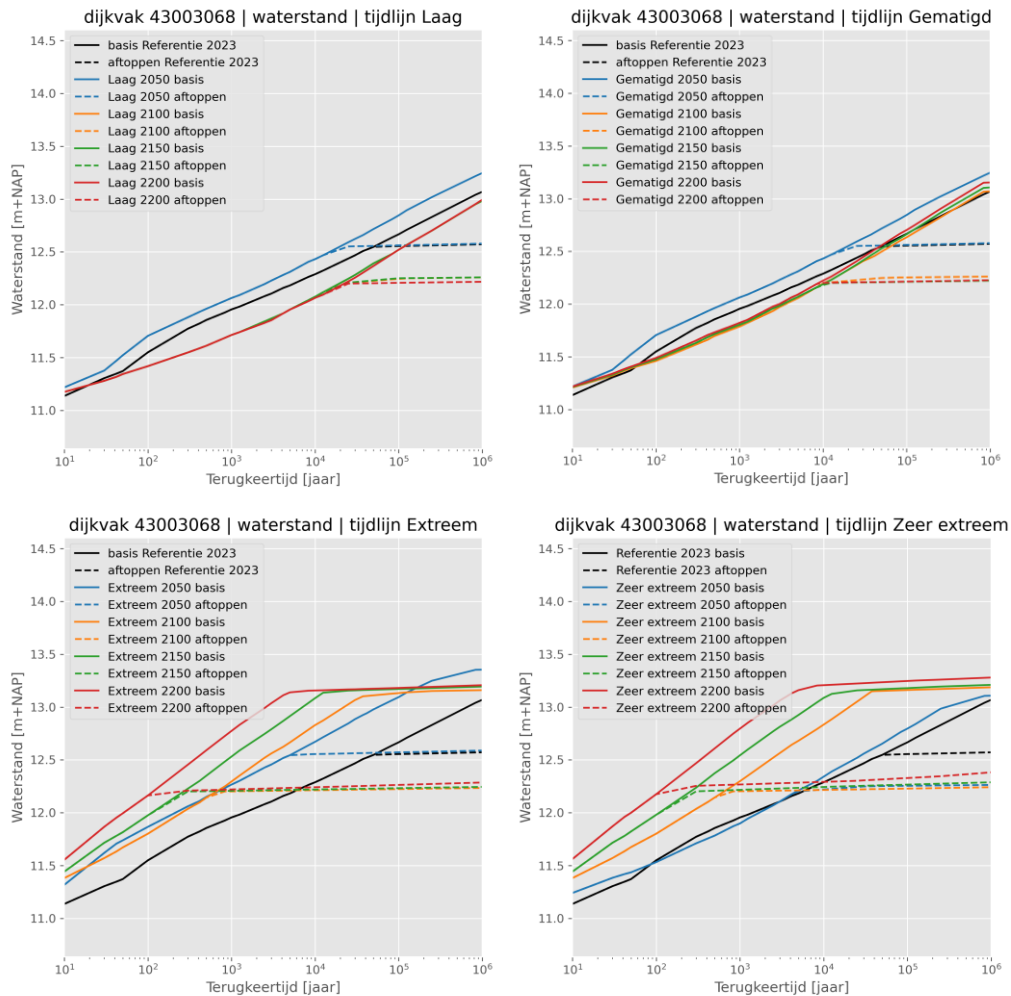
Het globale beeld over 8 normtrajecten voor tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem is te vinden in Figuur 85 (de verschillen in tijdlijn Laag zijn verwaarloosbaar en de maximale verlaging in tijdlijn Gematigd is 0,02 m voor trajecten 43-2 en 43-6). De normtrajecten langs de Maas en de Hollandsche IJssel zijn niet meegenomen in deze figuren, omdat de gevoeligheidsanalyse met het aftoppen alleen is uitgevoerd voor het Rijndominante deel van het RMM-gebied.



Figuur 85: Effect van aangepast aftopniveau op de gemiddelde waterstanden bij de norm (WBN) voor de 10 geselecteerde normtrajecten.

Het effect van het aftoppen is het grootst op de Waal en de Nederrijn-Lek, wat ook te verwachten is, omdat dit de afvoergedomineerde trajecten zijn. Het effect van het aftoppen is veelal meerdere decimeters en kan oplopen tot 0,6 – 0,7 m in zichtjaren 2150 en 2200. We merken op dat de verschillen bij individuele dijkvakken groter of kleiner kunnen zijn, omdat de balkjes een gemiddelde weergeven over alle dijkvakken in het betreffende normtraject.

In Figuur 86 is de invloed van het aangepaste aftopniveau zichtbaar gemaakt in de vorm van frequentielijnen voor de meest bovenstroomse locatie van normtraject 43-2 (Heteren) langs de Waal. Deze locatie is naar verwachting volledig gedomineerd door de afvoer, ongeacht de tijdlijn of het zichtjaar. Dit zien we ook terug in de resultaten.

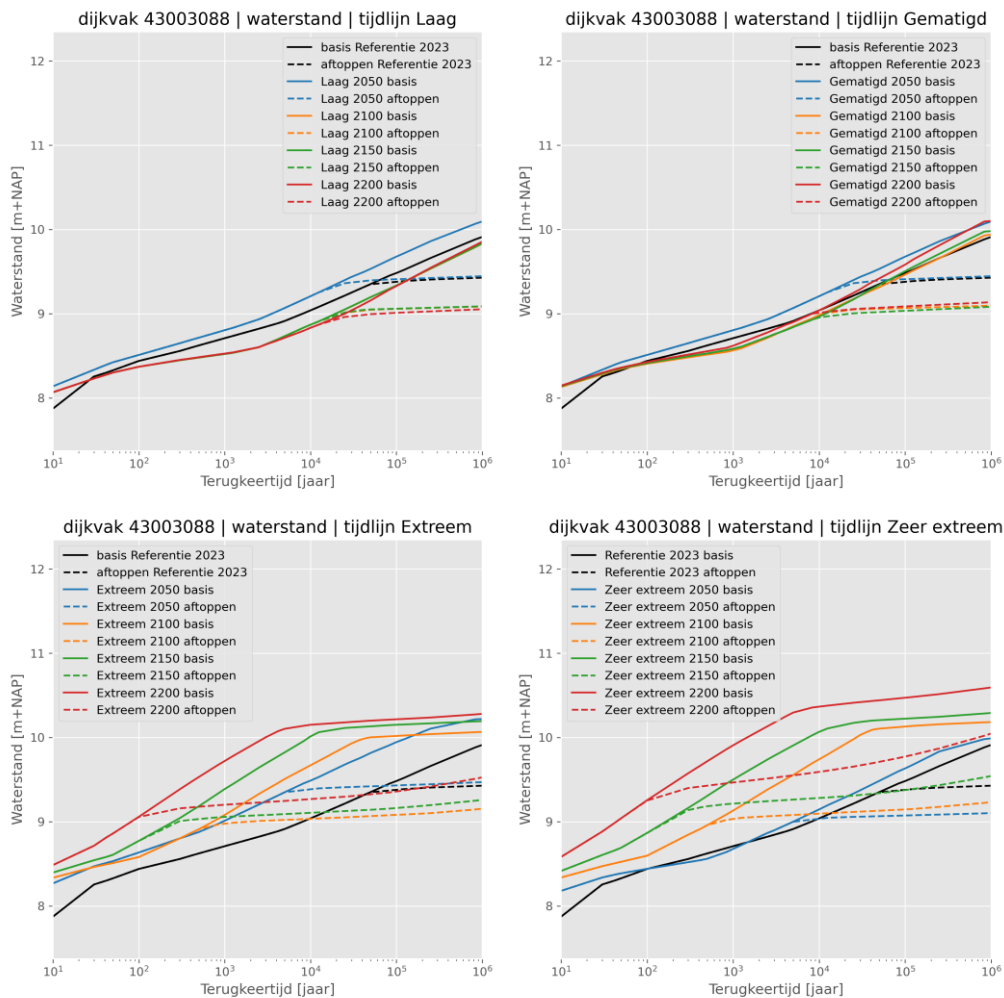


Figuur 86: Effect van aangepast aftopniveau op de waterstandsfrequentielijnen bij Heteren langs de Waal (bovenstrooms van Nijmegen).

Wat we goed terug zien, is het effect van een andere afvoerverdeling: Vast16000 is gehanteerd in de referentiesituatie en in zichtjaar 2050 en Vast18000 in de overige drie zichtjaren. Alleen in tijdlijn Zeer Extreem wordt ook in 2050 al Vast18000 gehanteerd (zie Tabel 2), waardoor de blauwe lijn in de figuur rechtsonder niet langer aftopt op het niveau van de zwarte streepjeslijn, maar op het niveau van de oranje, groene en rode streepjeslijnen. Bij Vast18000 stroomt minder water over de Nederrijn-Lek dan bij Vast16000, wat betekent dat aftoppen bij Lobith een lagere "maximale" waterstand geeft op de Nederrijn-Lek. Omdat verder alleen de afvoer van belang is, kan de waterstand vanaf een bepaald niveau niet verder stijgen. Alleen in tijdlijn Zeer Extreem in zichtjaar 2200 (rode stippellijn in de figuur rechtsonder) zien we nog een geringe stijging die vermoedelijk wordt veroorzaakt door de invloed van de ZSS.

Bij locaties die meer benedenstrooms liggen zal de invloed van de ZSS steeds duidelijker worden, omdat de waterstanden blijven stijgen, zelfs als de afvoer niet verder toeneemt. Dit zien we b.v. terug in de resultaten in Figuur 87 bij Maurik (benedenstrooms van Amerongen langs de Nederrijn).





Figuur 87: Effect van aangepast aftopniveau op de waterstandsfrequentielijnen bij Maurik langs de Nederrijn (benedenstrooms van Amerongen).

Voor tijdlijnen Laag en Gematigd zien we nog steeds duidelijke aftopniveaus terug in alle zichtjaren. Voor tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem gaat de lijnen verder uit elkaar lopen en zijn de terugkeertijden waarbij het aftopniveau bereikt wordt ook afhankelijk van het zichtjaar. Hoe verder het zichtjaar, hoe extremer de ZSS (en hoe verder deze in bovenstroomse richting doordringt), dus hoe eerder een bepaald waterstandsniveau wordt gehaald. Uiteraard speelt ook de keuze voor de afvoer-verdeling hierbij weer een rol (zie de toelichting na Figuur 86).

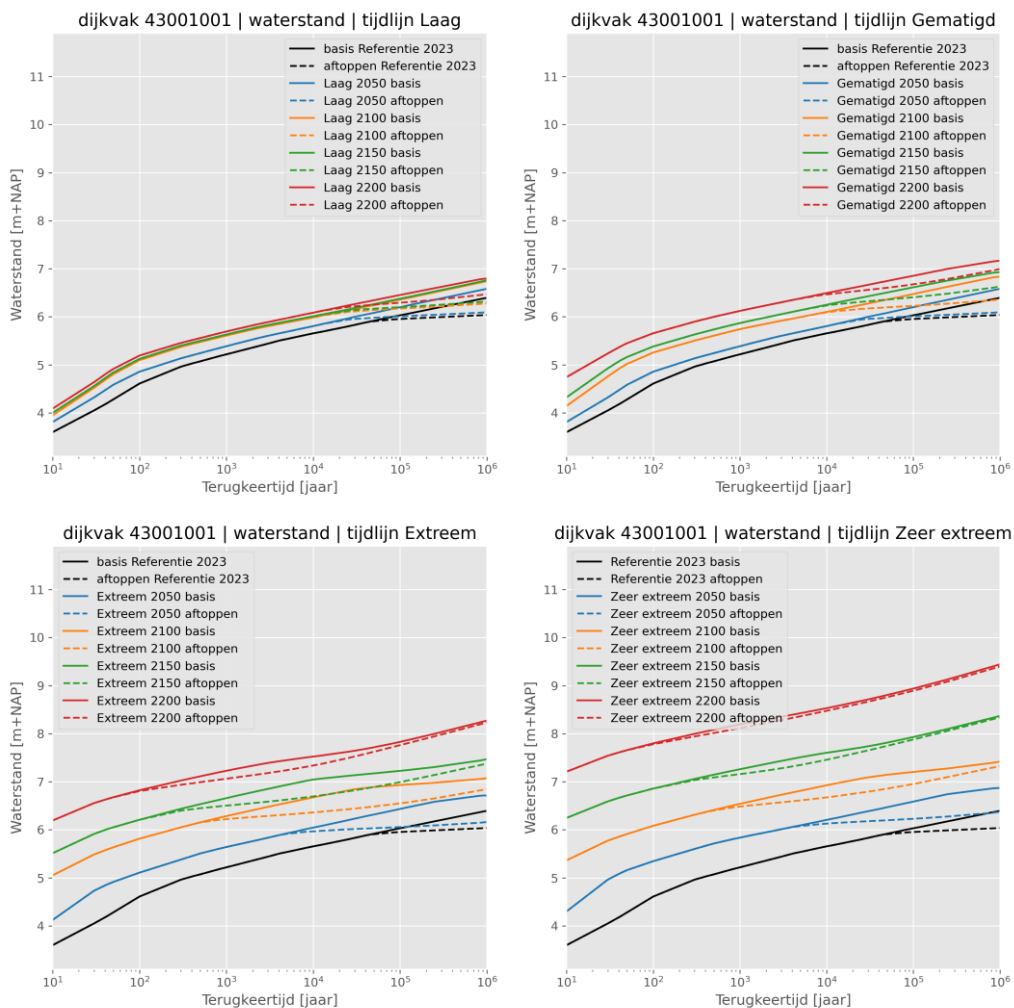
Voor locatie Maurik wordt de waterstand opgebouwd uit een combinatie van afvoer, zeewaterstand en wind<sup>17</sup>. Hoe extremer de tijdlijn en hoe groter het zichtjaar, hoe meer de invloed van de zee(spiegelstijging) zal doorwerken. Dit betekent ook dat zelfs als de afvoer niet verder kan toenemen door het aftoppen, dat de waterstand nog kan toenemen onder invloed van de zee en de wind. Met name in tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem (onderste twee figuren) is dit te zien, doordat de lijnen niet horizontaal gaan lopen, maar blijven stijgen.

<sup>17</sup> Binnen het BOI2023 wordt in het bovenriviereengebied gerekend zonder invloed van de wind. Omdat in deze studie gebruik gemaakt is van een model van de benedenrivieren dat in bovenstroomse richting is verlengd, zijn de effecten van de wind ook meegenomen op het gedeelte van de bovenrivieren van dit model.

De invloed van de zee en de wind zorgen er mede voor dat de terugkeertijd en het waterstandsniveau waarbij het aftopniveau zichtbaar wordt (stijging van de waterstanden vlakt sterk af tot bijna horizontaal) verschilt per tijdlijn en per zichtjaar.

We lichten één voorbeeld toe. De rode lijn (zichtjaar 2200) in tijdlijn Laag (figuur linksboven) vlakt af vanaf T = 2000 jaar tot een niveau van iets meer dan NAP +9 m. In tijdlijn Extreem (figuur linksonder) vlakt de rode gestreepte lijn al af vanaf T = 100 jaar, maar blijft de waterstand toenemen vanaf ruim NAP +9 m als functie van de terugkeertijd. Tijdlijn Zeer Extreem (figuur rechtsonder) laat zien dat ook dan de rode gestreepte lijn afvlakt vanaf T = 100 jaar, maar pas vanaf NAP +9,3 m en met een grotere helling dan bij tijdlijn Extreem. Op basis van de afvoerverdeling Vast18000 blijft nog steeds een vaste debiet over de Nederrijn-Lek stromen, ondanks dat de waterstand bij Maurik al verhoogd is door de ZSS.

Hoe verder locaties benedenstrooms liggen, hoe minder de invloed van het aftopniveau zichtbaar is in de frequentielijnen, zie Figuur 87 voor locatie Culemborg langs de Nederrijn.

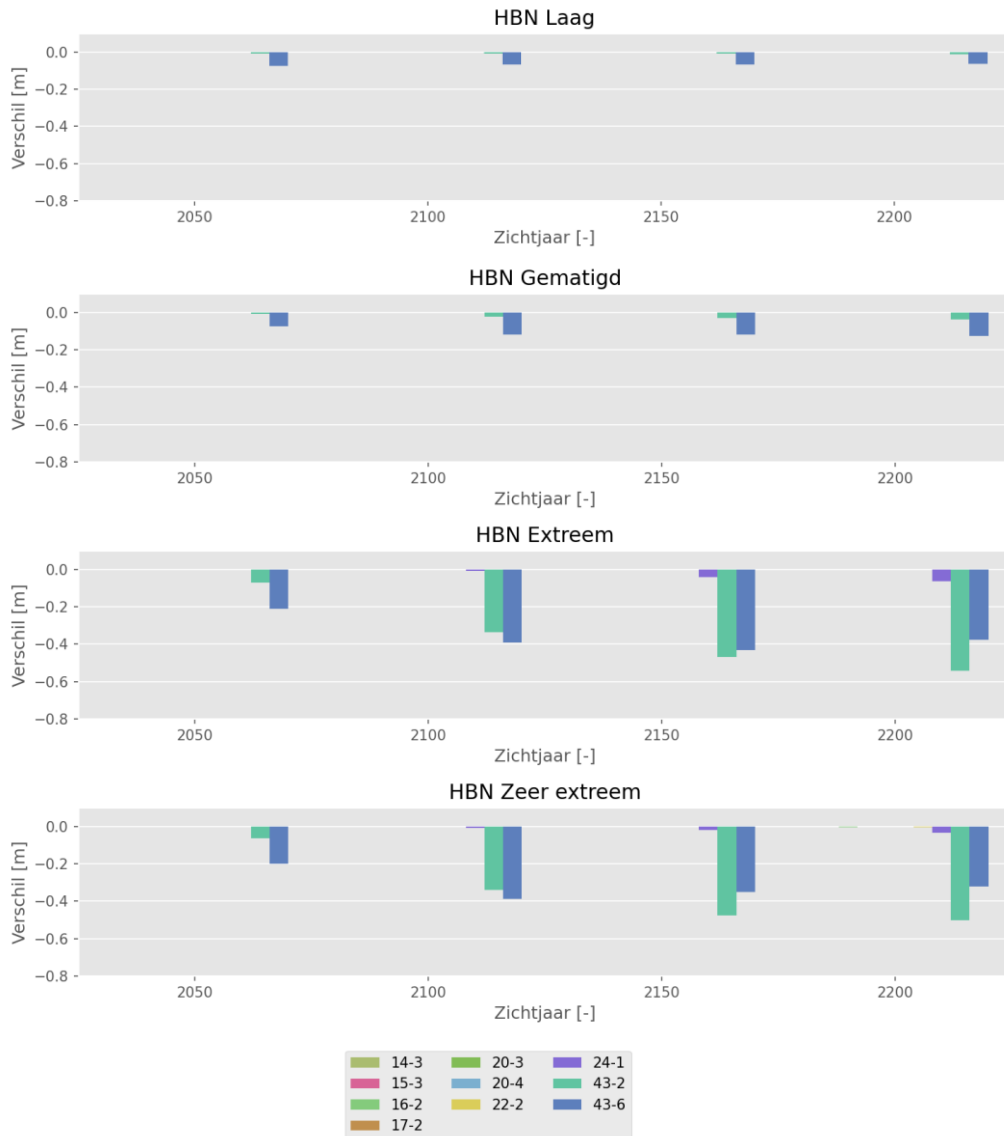


Figuur 88: Effect van aangepast aftopniveau op de waterstandsfrequentielijnen bij Maurik langs de Nederrijn (Culemborg).

Het effect van het aftoppen is het grootst in de referentiesituatie en in zichtjaar 2050. Voor de andere zichtjaren is de invloed van de zee zo groot, dat de

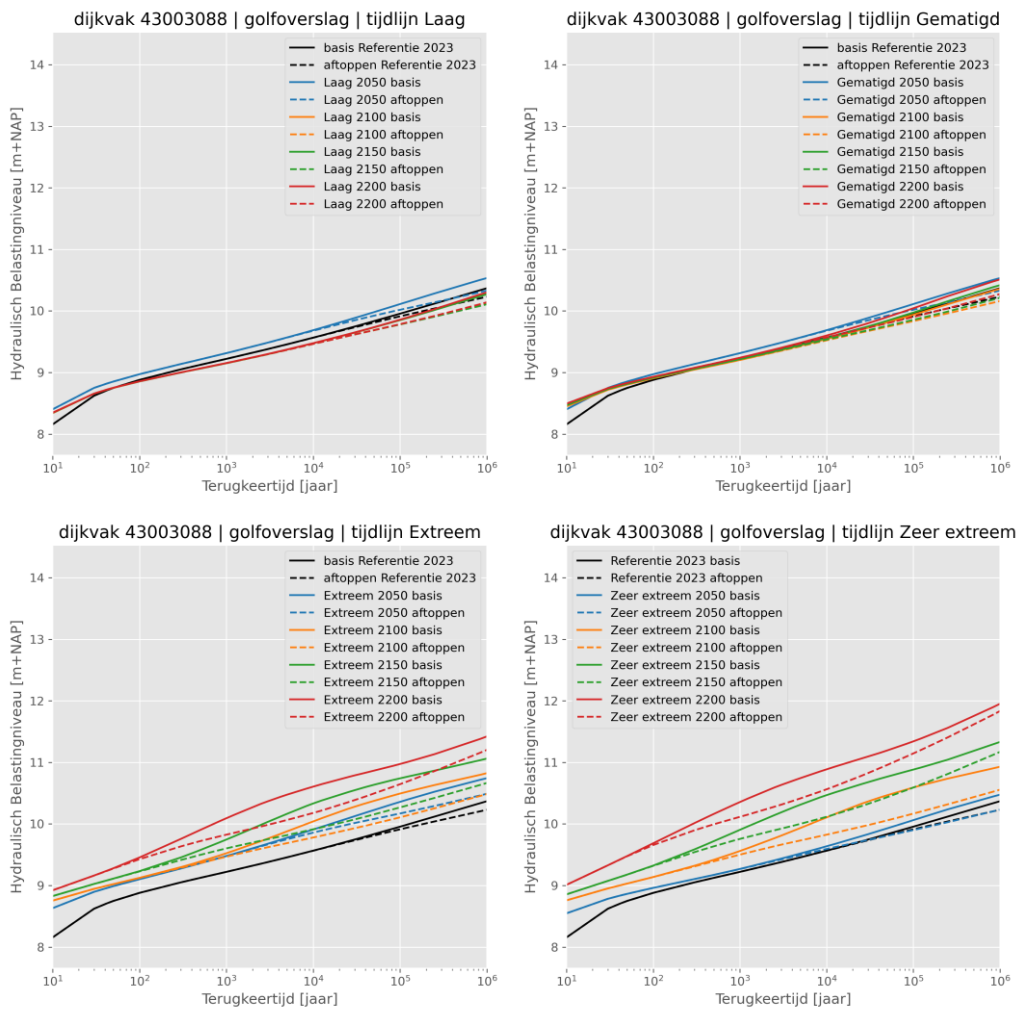
waterstanden blijven doorstijgen en verdwijnt bij grotere terugkeertijden het effect van het verlagen van het aftoppen zelfs volledig. Voor locaties nog verder benedenstrooms verdwijnt de invloed van het aftopniveau volledig, zoals bij locaties als Rotterdam of Dordrecht.

De invloed op de HBN's is vergelijkbaar met die op de waterstanden (Figuur 89).



Figuur 89: Effect van aangepast aftopniveau op de gemiddelde HBN's voor de 10 geselecteerde normtrajecten.

Algemeen geldt dat de invloed van de aanpassing van het aftopniveau op het HBN iets groter is dan bij de waterstanden in tijdlijnen Laag en Gematigd. Het gaat om centimeters tot maximaal 0,1 m verlaging in het HBN, waar die bij de waterstanden eigenlijk niet aanwezig was. Voor tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem zijn de verlagingen door het aftoppen in de HBN's echter juist kleiner dan bij de waterstanden, wat in eerste instantie wellicht tegenintuïtief is. Het HBN is echter veel minder gevoelig voor het aftopniveau dan de waterstand. We lichten dit nader toe aan de hand van Figuur 95 met daarin de frequentielijnen voor het HBN bij Maurik langs de Nederrijn (vergelijk deze met de waterstands-frequentielijnen uit Figuur 87).



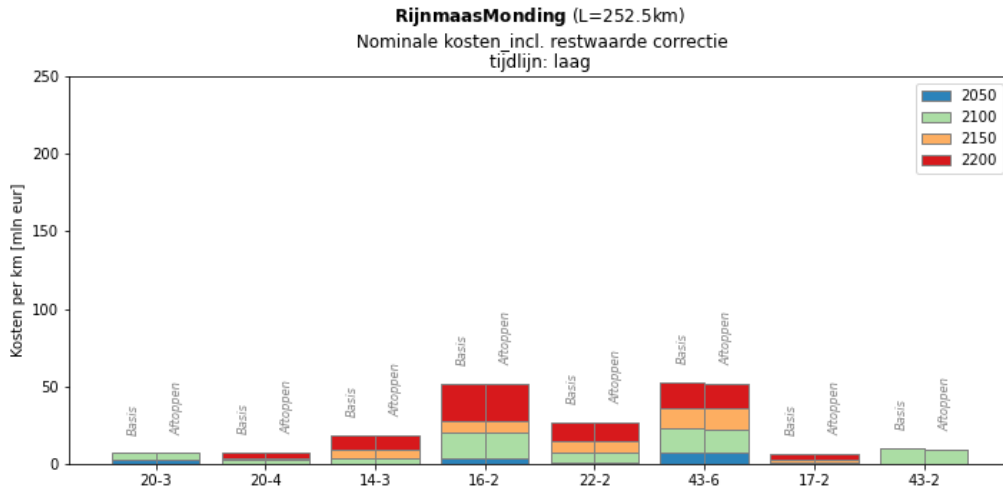
Figuur 90: Effect van aangepast aftopniveau op de frequentielijnen van het HBN bij Maurik langs de Nederrijn (benedenstrooms van Amerongen).

Uit de figuur valt direct op dat de frequentielijnen van de HBN's blijven stijgen, ongeacht de keuze voor het aftopniveau, waar bij de frequentielijnen van de waterstanden nog een duidelijke knik naar een (min of meer) horizontaal deel zichtbaar was. Als de enige manier om de waterstand nog te laten stijgen wordt veroorzaakt door de afvoer, dan zorgt het aftoppen van de afvoer ervoor dat de waterstand niet langer kan stijgen. Onder invloed van de ZSS en de wind nemen de waterstanden toch nog wat toe, ondanks het aftopniveau. Het HBN kan makkelijker blijven stijgen onder invloed van door de wind geïnduceerde golven: als het HBN niet meer omhoog kan door een afgetopte afvoer, dan neemt het HBN toe onder invloed van met name de wind die een groter aandeel gaat innemen (effect golven). We zien dus dat het aftoppen van de afvoer wel degelijk effect heeft, maar bij lange na niet zoveel als op de waterstanden. Net als elders in het rapport geldt dat de keuze voor de terugkeertijd waarbij wordt gekeken van invloed is op het effect van het aftoppen en deze is bij het HBN een stuk strenger dan bij de waterstand.

#### 6.4.2 Waterveiligheidsopgave dijken

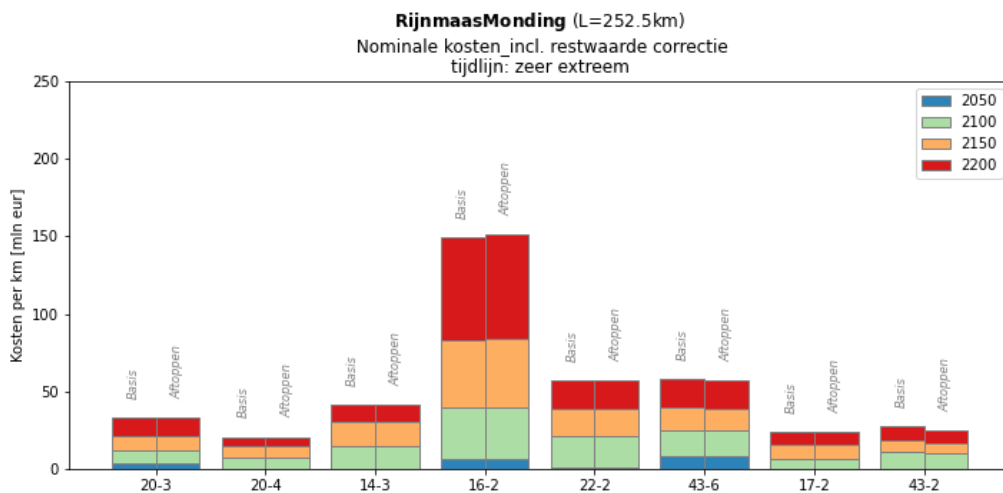
De invloed van het aftoppen van de rivierafvoeren op de nominale kosten is weergegeven in Figuur 91 en Figuur 92.

Figuur 91 laat zien dat er maar een beperkte invloed is op de kosten van enkele trajecten, zo zien we een minimale afname van de kosten voor trajecten 43-6 en 43-2, deze is echter niet significant.



Figuur 91: Nominale kosten incl. correctie restwaarde voor basisberekening en aftoppen Rijnafvoer voor tijdlijn Laag.

Figuur 92 laat voor tijdlijn Zeer Extreem eenzelfde effect zien. De kosten zijn voor alle trajecten min of meer gelijk aan de basisberekening. We zien we voor traject 16-2 een toename in kosten. Dit sluit niet aan bij de resultaten uit de HR-analyse. Oorzaak hiervan zit in het feit dat OKADER meer "korte" versterkingsmomenten uitrekent voor gevoeligheidsanalyse, wat leidt tot meer kosten, omdat de startkosten voor een versterking relatief duur zijn.



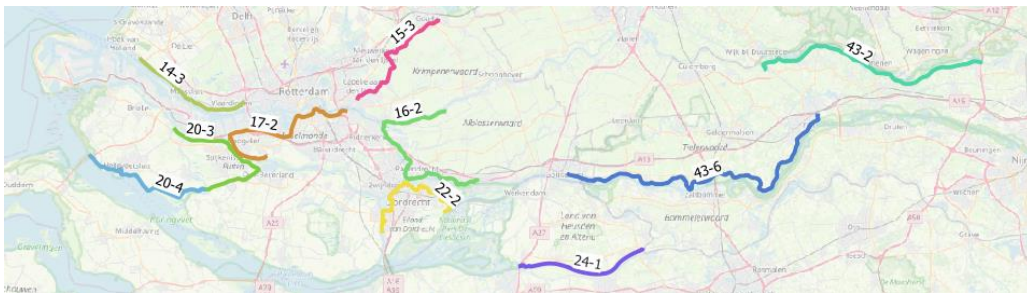
Figuur 92: Nominale kosten incl. correctie restwaarde voor basisberekening en aftoppen Rijnafvoer voor tijdlijn Zeer Extreem.

De aanpassing aan het aftoppen van de Rijnafvoer heeft minimale invloed op de kosten. De invloed is beperkt en zal op systeemniveau niet leiden tot andere conclusies.

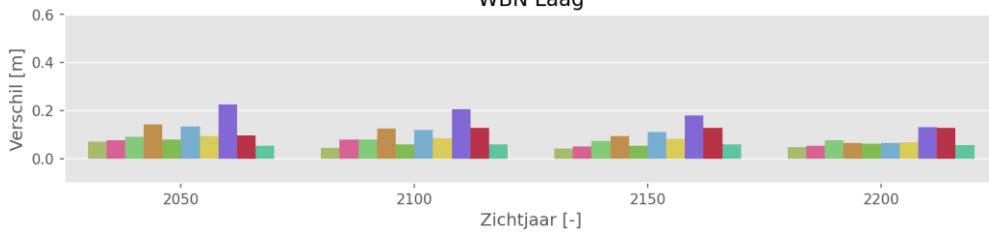
## 6.5 Parameter 4: Modelonzekerheden

### 6.5.1 Hydraulische belastingen

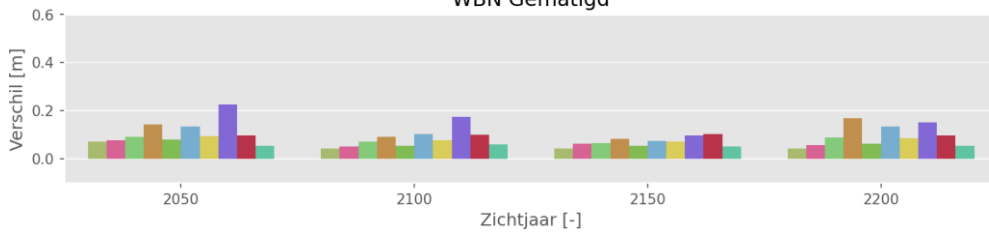
In de basisberekeningen zoals beschreven in hoofdstuk 3 is standaard géén rekening gehouden met modelonzekerheden in de waterstand en golfparameters. Om te verifiëren dat deze aanname de conclusies op hoofdlijnen niet beïnvloed, zijn de berekeningen voor de 10 geselecteerde normtrajecten herhaald inclusief de modelonzekerheid. De gekozen modelonzekerheden komen overeen met de waarden zoals deze zijn gehanteerd in het BOI2023 [HKV, 2021a].

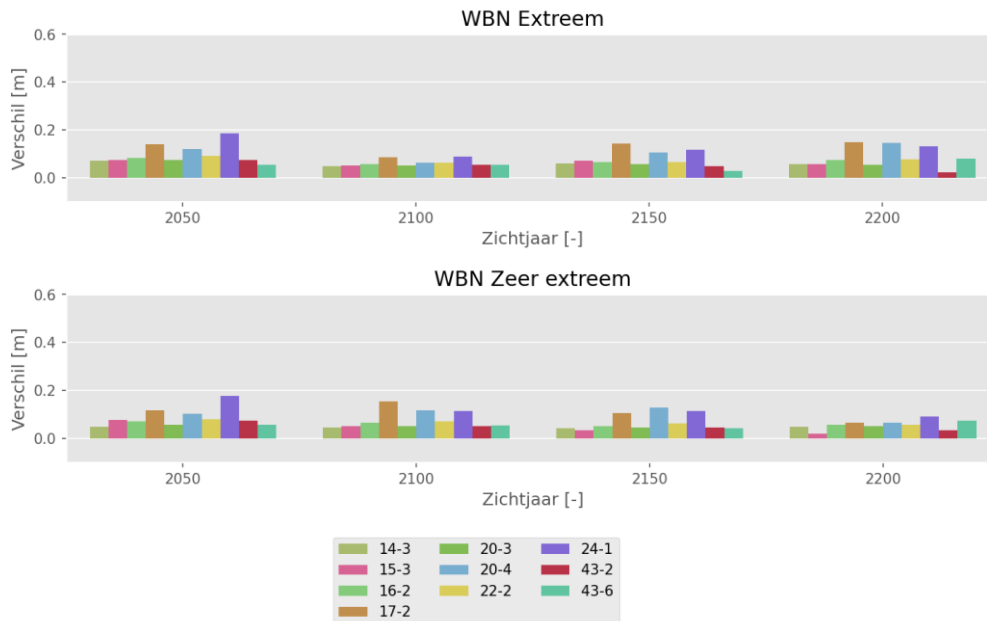


WBN Laag



WBN Gematigd



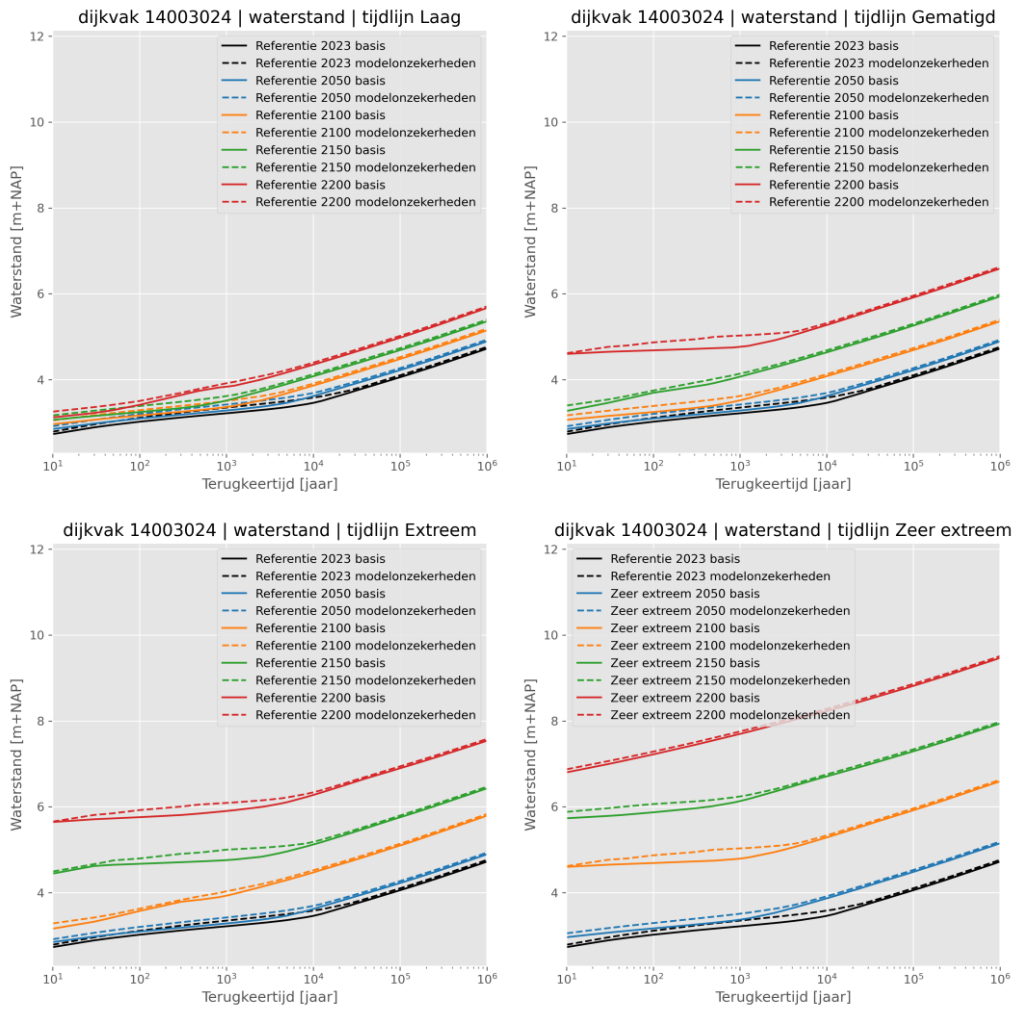


Figuur 93: Effect van modelonzekerheden op de gemiddelde waterstanden bij de norm (WBN) voor de 10 geselecteerde normtrajecten.

De effecten van de modelonzekerheden op de waterstanden liggen veelal in de orde van 0,05 – 0,1 m, met her en der een wat groter effect.

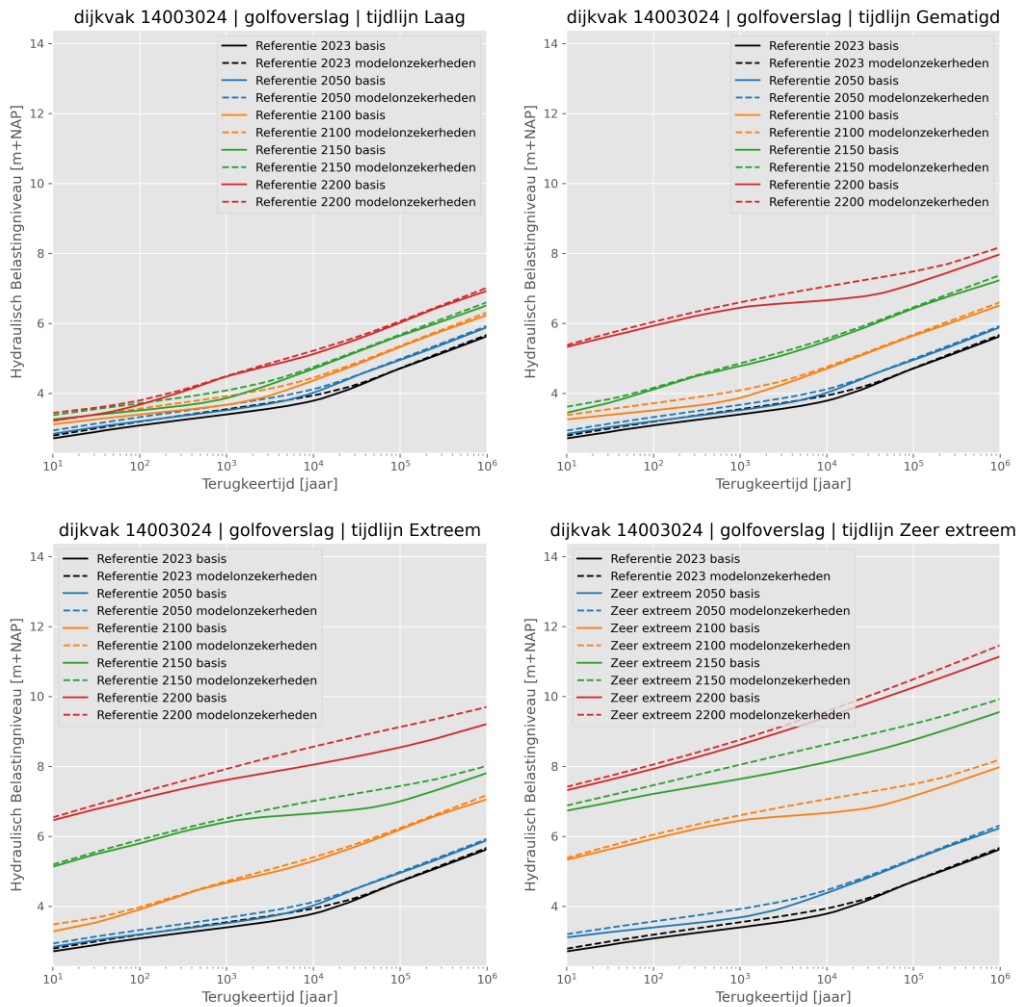
Uit eerdere onderzoeken [HKV, 2016] is bekend dat het effect van modelonzekerheden afhangt van de helling van de frequentielijn. Hoe flauwer het verloop van de frequentielijn, hoe groter de doorwerking van modelonzekerheid. Dit zien we inderdaad terug in de resultaten. Voor de locatie Maassluis is dit gedrag te zien in zowel de resultaten van de waterstanden (Figuur 94) als de HBN's (Figuur 95). De bekende knik in de helling die wordt veroorzaakt door de faalkans van de Europoortkering zien we in praktisch alle (deel)figuren terug. Alleen de precieze ligging van de knik (als functie van de terugkeertijd) in de grafieken verschilt, afhankelijk van de tijdlijn, het zichtjaar en of het om de waterstand of het HBN gaat. Uiteraard verschilt de ligging van de knik ook per locatie. Op de flauwere delen van de frequentielijnen zien we dat het effect van de modelonzekerheid het grootst is. Zolang de helling van de frequentielijn niet verandert, ligt het resultaat inclusief modelonzekerheid op een vaste afstand boven de frequentielijn zonder modelonzekerheid.

Omdat in de HBN's ook rekening gehouden wordt met golven (en de onzekerheid op een groter aantal parameters dan bij de waterstand), liggen de frequentielijnen van het HBN standaard hoger dan die van de waterstanden. In de extreme tijdlijnen en zichtjaren kan hier al gauw 1,0 – 1,5 m tussen liggen.



Figuur 94: Frequentielijnen van de waterstand voor dijkvak 14003024 (Maassluis). De doorgetrokken lijnen komen overeen met berekening zonder modelonzekerheid, de gestreepte lijnen zijn inclusief modelonzekerheid.

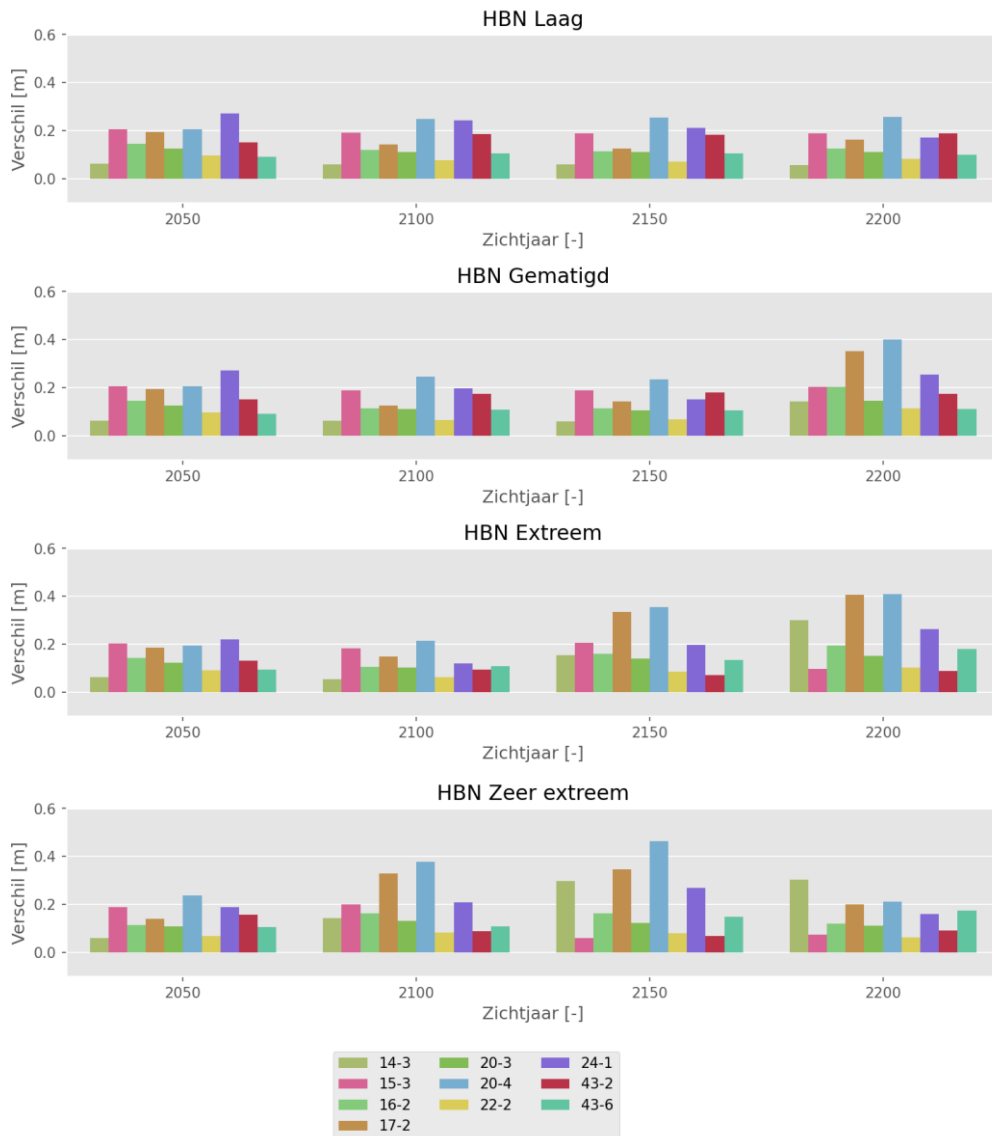
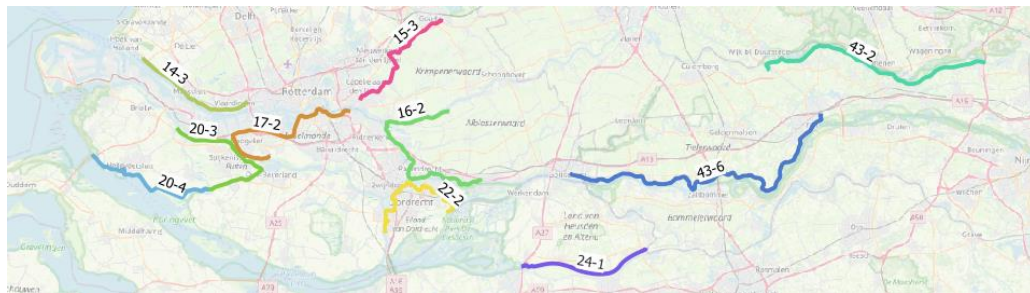




Figuur 95: Frequentielijnen van de HBN's voor dijkvak 14003024 (Maassluis). De doorgetrokken lijnen komen overeen met berekening zonder modelonzekerheid, de gestreepte lijnen zijn inclusief modelonzekerheid.

Ook hier zien we weer goed dat het effect van de helling in de frequentielijnen. Uit eerdere onderzoeken [HKV, 2016] is bekend dat het effect van modelonzekerheden afhangt van de helling van de frequentielijn. Hoe flauwer het verloop van de frequentielijn, hoe groter de doorwerking van modelonzekerheid.

In Figuur 96 zien we de effecten van de verschillende tijdlijnen en zichtjaren op de HBN's voor de 10 normtrajecten. Het effect van modelonzekerheid is op het HBN grofweg een factor 2 groter dan bij de waterstanden en liggen vaak in de orde van 0,1 – 0,2 m. Er zijn echter ook een aantal normtrajecten die richting een effect van 0,4 m gaan. In het bijzonder normtrajecten 17-2 en 20-4 geven uitschieters naar boven. Voor traject 20-4 kan het stuk normtraject dat buiten de Hartelkering ligt een rol spelen, maar dit valt buiten de scope van deze studie. Dat de verschillen in de HBN's groter zijn dan bij de waterstanden is niet raar: niet alleen de onzekerheid in de waterstand speelt een rol, maar ook die in de golfhoogten en golfperiode.



Figuur 96: Effect van modelonzekerheden op de HBN's voor de 10 geselecteerde normtrajecten.

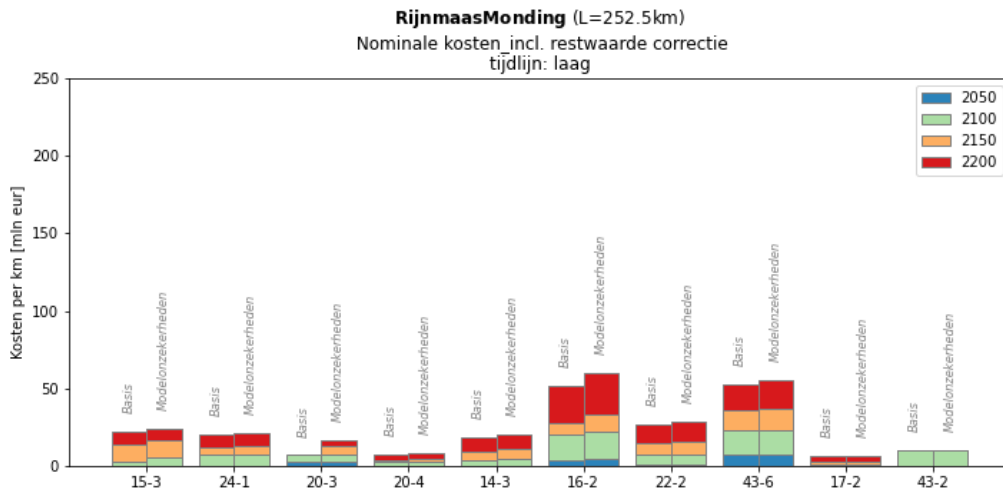
Op voorhand was de verwachting dat alle berekende frequentielijnen hoger uit zouden vallen dan in de situatie zonder modelonzekerheden. Dat blijkt ook inderdaad het geval te zijn. We zien ook dat de verschillen tussen de berekeningen met en zonder modelonzekerheden voor de waterstanden beperkt blijven (orde 0,1 m). De verschillen in de HBN's tussen de berekeningen met en zonder modelonzekerheden zijn groter (orde 0,10 – 0,35 m), omdat meer onzekerheden worden

meegenomen dan bij de waterstanden. Trajecten 17-2 en 20-4 zijn uitschieters voor het effect van de modelonzekerheden, zeker in tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem.

### 6.5.2 Waterveiligheidsopgave dijken

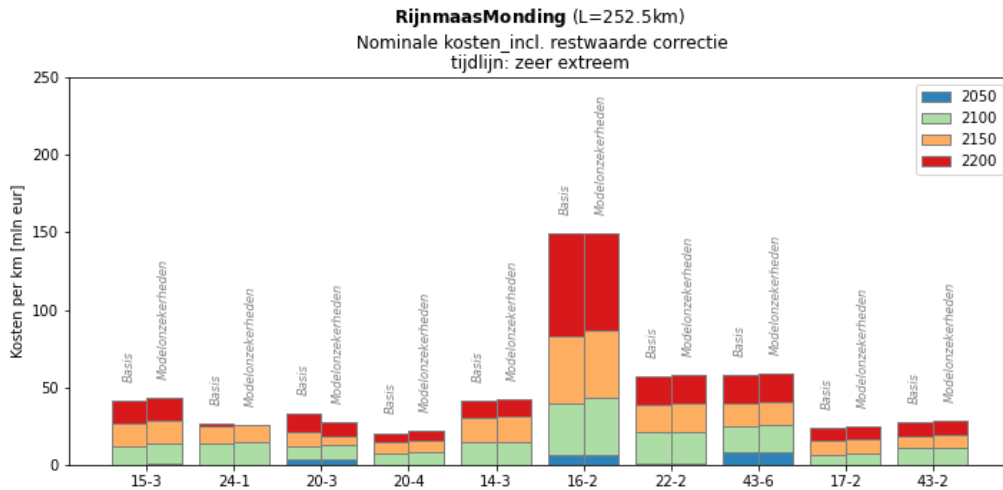
De invloed van het aanpassen van de modelonzekerheid op de nominale kosten is weergegeven in Figuur 97 en Figuur 98.

Figuur 97 laat zien dat de modelonzekerheden invloed hebben op de kosten van de meeste trajecten, zo zien we een minimale toename van de kosten voor de meeste trajecten. Voor de trajecten 20-3 en traject 16-2 is de invloed duidelijker zichtbaar. Voor zichtjaar 2200 betekent dit bijvoorbeeld voor traject 16-2 een verschil in kosten van orde 10 mln. euro per km (orde 20% toename in kosten).



Figuur 97: Nominale kosten incl. correctie restwaarde voor basisberekening en modelonzekerheden voor tijdlijn Laag.

Figuur 98 laat een ander beeld zien voor tijdlijn Zeer Extreem. Voor tijdlijn Zeer Extreem valt het op dat er nauwelijks effect is van de modelonzekerheden op de kosten. We zien wel een bijzonder effect. Zo zien we een afname van de kosten voor de trajecten 20-3 en 24-1 terwijl de belastingen toenemen. De oorzaak hiervan zit in de uitvoer van de OKADER-analyses. Hierin zien we terug dat in de uitvoer de kosten voor enkele versterkingen NaN waardes bevatten, deze worden niet meegerekend in onderstaand overzicht, waardoor er een foutief resultaat ontstaat. Gekeken naar de basisberekening zal dit orde 40 miljoen euro per km schelen voor traject 20-3, waardoor voor traject 20-3 volgt dat de kosten met aangepaste modelonzekerheden hoger zijn dan de basisberekening, wat aansluit bij de toenemende belastingen.



Figuur 98: Nominale kosten incl. correctie restwaarde voor basisberekening en modelonzekerheden voor tijdlijn Zeer Extreem.

De modelonzekerheden hebben, afhankelijk van tijdlijn en zichtjaar, een invloed op de kosten. De invloed is echter beperkt en zal op systeemniveau niet leiden tot significant andere conclusies.

## 6.6 Samenvatting

Deze paragraaf geeft een beknopt overzicht van de belangrijkste conclusies op basis van de gevoeligheidsanalyses. Net als elders in het rapport geldt dat de keuze voor de terugkeertijd waarbij wordt gekeken van invloed is op het effect van het onderzochte gevoeligheden.

### *Aangepaste faalkans Europortkering*

Verkleinen van de faalkans van de EPK zorgt voor lagere waterstanden en HBN's. De doorwerking verschilt per tijdlijn en per zichtjaar. Normtraject 14-3 springt er bij de waterstanden uit als het traject waarvoor de impact van het verkleinen van de faalkans het grootst is. Dit is niet vreemd, aangezien dit traject het dichtst bij de Maeslantkering ligt. De invloed van een verkleinde faalkans in de waterstanden op de overige trajecten blijft beperkt tot 0,2 m. De verlagingen in het HBN zijn orde 50 – 100% groter dan bij de waterstanden. Tussen opeenvolgende zichtjaren kan het effect in het HBN een ander patroon volgen dan bij de waterstanden.

### *Aangepast sluitpeil*

Het effect van een aangepast sluitpeil is het grootst voor locaties die dicht bij de EPK liggen, echter alleen voor lagere herhalingstijden die nauwelijks relevant zijn voor de waterveiligheid (maar wel voor buitendijks gebied). De toename in waterstanden bij kleine terugkeertijden ligt in dezelfde orde grootte als de toename van het sluitpeil, wat overeenkomt met de verwachting. Bij grote terugkeertijden is de invloed van het sluitpeil nagenoeg verdwenen (de open toestand is dominant, ongeacht het sluitpeil). In het overgangsgebied (bv. Alblasserdam, zie Figuur 84) is er wel een invloed van sluitpeil bij voor de Waterveiligheid relevante herhalingstijden te zien (orde 10.000 jaar). Naarmate de afstand tot de EPK vervolgens verder afneemt, neemt ook het effect van het sluitpeil op de waterstanden af, totdat dit nagenoeg geheel verdwijnt bij afvoergedomineerde locaties. Een hoger sluitpeil is wel gunstig om het aantal sluitingen beperkt te houden.

### *Aftoppen Rijnafvoer*

Het extra aftoppen van de Rijnafvoer op 18000 m<sup>3</sup>/s zorgt vooral op de afvoergedomineerde trajecten (43-2 en 43-6) in het gebied voor een verlaging. Dit zien we vooral goed terug in de resultaten voor de waterstanden, waarbij het aftopniveau terug te zien is in de frequentielijnen, omdat deze vanaf een bepaald niveau horizontaal gaan lopen. Naarmate de invloed van de zee belangrijker wordt (locaties liggen meer benedenstrooms, of tijdelijk is extremer, of later zichtjaar), neemt het effect van het aftoppen af. Onder invloed van de ZSS en de wind nemen de waterstanden dan nog toe, ondanks het aftopniveau. Het HBN blijft stijgen onder invloed van golven: als het HBN niet meer omhoog kan door een afgetopte afvoer, dan neemt het HBN nog wel toe onder invloed van met name de wind (effect golven). Het aftoppen van de afvoer heeft wel degelijk effect op de HBN's, maar bij lange na niet zoveel als op de waterstanden. De verlaging door een aangepast aftopniveau liggen zowel voor de waterstanden als de HBN's in de orde van 0,5 m. Dat geldt dus alleen voor het afvoergedomineerde gebied, in de rest van het gebied is het effect op waterstanden en HBN's zeer beperkt (maximaal orde grootte 0,1 m).

### *Modelonzekerheden*

Door het meenemen van de modelonzekerheden vallen alle waterstanden en HBN's hoger uit dan in de situatie zonder modelonzekerheden. De verschillen tussen de berekeningen met en zonder modelonzekerheden blijven voor de waterstanden beperkt tot orde 0,1 m. De verschillen in de HBN's tussen de berekeningen met en zonder modelonzekerheden zijn groter en kunnen oplopen tot orde 0,4 m, omdat niet alleen de onzekerheid in de waterstand, maar ook in de golfcondities wordt meegenomen. Trajecten 17-2 en 20-4 zijn uitschieters met een groot effect van de modelonzekerheden, zeker in tijdelijnen Extreem en Zeer Extreem.

### *Waterveiligheidsopgave*

De effecten van de diverse gevoeligheidsanalyses op de resultaten van de waterveiligheidsopgave lijken beperkt. De gevoeligheidsanalyses naar de faalkans van de Europoortkering en het Aftoppen van de Rijnafvoer hebben niet of nauwelijks effect op de resultaten van de waterveiligheidsopgave. De modelonzekerheden hebben enig effect op het resultaat. Echter zijn deze effecten relatief nog erg gering en zullen op systeemniveau niet leiden tot significant andere conclusies. Het valt op dat een hoger sluitpeil in de regel minder effect heeft op de waterveiligheidsopgave, uitgezonderd het overgangsgebied waar wel een effect is van orde 0,5 m. We verwachten wel een groot effect op de buitendijkse gebieden.

## 7 Aanvullende analyses

### 7.1 Inleiding

Naast de gevoeligheidsanalyses die zijn uitgevoerd met het KP ZSS instrumentarium is onderzocht wat de invloed is van diverse aanvullende maatregelen die mogelijk interessant kunnen zijn voor deze regio:

1. Overstroombaarheid van het zeefront van stormvloedkeringen (paragraaf 7.3);
2. Waterberging in de Zuidwestelijke Delta (paragraaf 7.4);
3. Waterberging door systeemwerking (paragraaf 7.5);
4. Invloed van rivierverruimende maatregelen (paragraaf 7.6);
5. Invloed van zeespiegelstijging bovenstrooms van de splitsingspunten (paragraaf 7.7);
6. Invloed van zeespiegelstijging op de morfologie van de rivierbodem (paragraaf 7.8).

Opgemerkt wordt dat de selectie van uitgevoerde analyses in hoofdstukken 6 en 7 geen uitputtende lijst van mogelijke maatregelen is die de te onderzoeken oprek-mogelijkheden beschrijft.

Voor de analyses in dit hoofdstuk is een redeneerlijn opgesteld waarbij voornamelijk gebruik is gemaakt van reeds beschikbare resultaten uit deze Systeemanalyse Waterveiligheid van het KP ZSS, of andere studies. De analyses zijn dan ook minder gebaseerd op modeluitkomsten en bevatten diverse versimpelingen en aannames. Desalniettemin kunnen de resultaten gebruikt worden voor eerste inzichten en indicaties. In paragraaf 7.2 staat de methode verder beschreven.

Daarnaast is een quickscan uitgevoerd naar de invloed van zeespiegelstijging op de normstelling van enkele trajecten en de inundatie van buitendijkse gebieden.

### 7.2 Methode

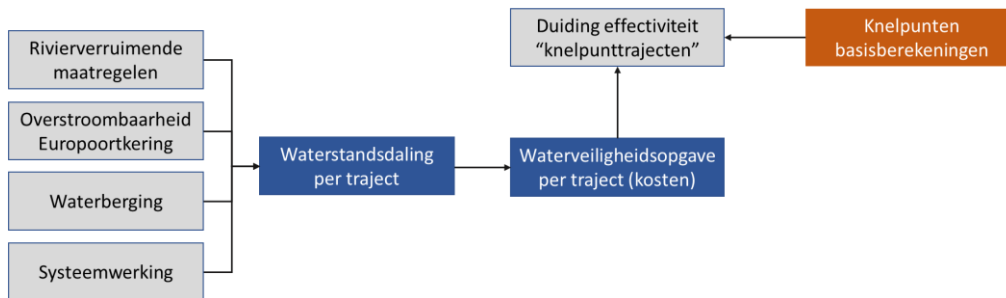
Voor de aanvullende analyses 1 t/m 4 uit paragraaf 7.1 staat de generieke methode voor het vertalen van de invloed van de maatregel op de waterstanden beschreven in paragraaf 7.2.1. De invloed op de waterveiligheidsopgave en de bijbehorende kosten staan in paragraaf 7.2.2 beschreven.

Voor de overige aanvullende analyses is de gehanteerde methode en bijbehorende uitgangspunten en aannames in de desbetreffende paragraaf beschreven.

#### *7.2.1 Methode voor invloed op waterstanden voor de aanvullende analyses 1 t/m 4*

De aanvullende analyses 1 t/m 3 uit paragraaf 7.1 beschouwen we voor tijdelijk Zeer Extreem. Het effect van rivierverruimende maatregelen is beschouwd voor tijdelijk Extreem. Beide tijdelijnen bevatten een ruime bandbreedte in de zeespiegelstijging en toename in afvoerscenario's en geeft daarmee een goede afspiegeling van de variaties (Tabel 2).

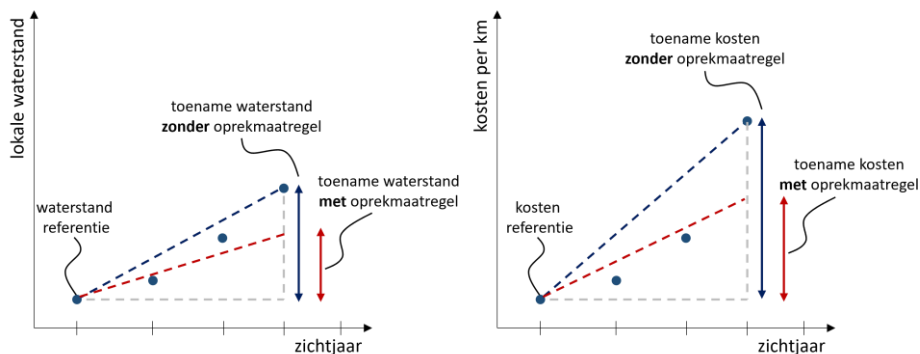
Voor elke aanvullende analyse is de waterstandsdeling bepaald, per normtraject en per zichtjaar (2050 t/m 2200) van tijdelijk Zeer Extreem. Aan de hand van deze waterstandsdeling schatten we wat de bijbehorende vermeden dijkversterkingskosten zijn voor elk normtraject en elk zichtjaar (Figuur 99). De resultaten voor de normtrajecten bossen we op naar elk deelgebied om per deelgebied te kunnen duiden welke mogelijke oprekmaatregelen interessant zijn om verder te onderzoeken.



Figuur 99: Aanpak om waterstandsdeling en vermeden dijkversterkingskosten te bepalen.

### 7.2.2 Methode voor invloed op waterveiligheidsopgave en kosten voor de aanvullende analyses 1 t/m 4

Om de invloed van een maatregel te vertalen naar de kosten maken we gebruik van het absolute verschil in de waterstand bij de normfrequentie ten opzicht van de referentiesituatie (2023). Op basis van een grote hoeveelheid beschikbare resultaten van de basisberekeningen kunnen we een verband leggen tussen een bepaalde verandering van de waterstand en het effect dat dit heeft op de kosten, zie Figuur 100. Dit is een benadering die voldoende nauwkeurig wordt geacht en die we toepasbaar achten voor meerdere in dit voorstel beschreven aanvullende analyses. Onderstaand tekstblok bevat een voorbeelduitwerking.



Figuur 100: Illustratie voor de bepaling van de kosten door interpolatie van de basisberekeningen.

Een belangrijk voordeel is dat deze aanpak naar verwachting robuust is. Het fitten van bijv. een trendlijn (door de resultaten met kosten vs. waterstandstoename) kan leiden tot plaatselijk sterke (of juist hele flauwe) hellingen, waardoor het effect van een maatregel sterk overschat kan worden. Door uit te gaan van het verschil met de referentie, hanteren we een conservatieve aanpak. Het nadeel van de aanpak is dat de marginale vermeden dijkversterkingskosten onderschat worden. Vaak nemen de versterkingskosten sterk toe wanneer er al eerdere versterkingen zijn geweest.

**Voorbeeld waterveiligheidsopgave en -kosten voor oprekmaatregelen**

Onderstaande (fictieve) berekening dient ter illustratie van de methode voor het bepalen van de dijkversterkingskosten met oprekmaatregelen. Stel dat de waterstandstoename t.o.v. referentie, voor tijdelijk Extreem en zichtjaar 2100, zonder oprekmaatregel 1,0 m bedraagt en de bijbehorende dijkversterkingskosten gelijk zijn aan 2000 miljoen euro. Een oprekmaatregel beperkt de waterstandstoename t.o.v. de referentie tot 0,2 m. Dit is 20% van 1,0 m. De bijbehorende dijkversterkingskosten voor de situatie met oprekmaatregel zijn dan gelijk gesteld aan 400 miljoen euro (dat is 20% van 200 miljoen euro).

Tabel 25: Waterstandstoename en dijkversterkingskosten voor tijdelijk Extreem met en zonder oprekmaatregel (fictief voorbeeld).

Tijdelijk	Zichtjaar	Waterstandstoename t.o.v. referentie [m]		Nominale kosten - restwaarde [mln. eur]		Vermeden dijkversterkingskosten
		Zonder maatregel	Met maatregel	Zonder maatregel	Met maatregel	[%]
Extreem	2100	1,0	0,2	2000	400	80

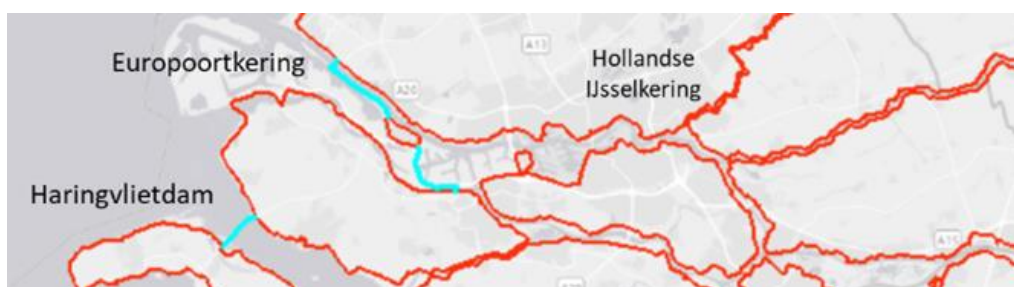
We geven een bandbreedte van de kostenreductie die aangeeft wat de minimale en maximale kostenbesparing is binnen een deelgebied. De uitgangspunten en werkwijze zijn in onderstaande paragrafen beschreven voor elke oprekmaatregel.

Voor alle maatregelen geldt dat de kosten voor het realiseren van de maatregelen zelf (bijv. versterking Europoortkering) niet worden beschouwd. Ook de vermeden versterkingskosten voor de kunstwerken zijn niet beschouwd.

### 7.3 Overstroombaarheid zeefront stormvloedkeringen

#### 7.3.1 Werking van de maatregel

Onder het "zeefront" verstaan we de aaneenschakeling van dammen en stormvloedkeringen langs de kust tussen Hoek van Holland en Stellingdam (Figuur 101). De mate van overstroombaarheid van dit zeefront heeft mogelijk effect op de waterstanden in het achterliggende gebied. Daarom is een analyse uitgevoerd om het effect vast te stellen van variaties op de overstroombaarheid van het zeefront.



Figuur 101: Overzicht verbindende keringen (in blauw) waarvoor de overstroombaarheid van invloed kan zijn op de hydraulische belastingen in de Rijn-Maasmonding.



We richten ons hoofdzakelijk op de overstroombaarheid van de Europoortkering als oprekmaatregel, maar doen ook aannames over de overstroombaarheid van de overige dammen en stormvloedkeringen.

De analyse is uitgevoerd in drie stappen:

1. eerst is een eenvoudige "vingeroefening" uitgevoerd, waarbij gekeken is naar enkele losse representatieve hydraulische berekeningen. Deze analyse staat beschreven in paragraaf 7.3.2.
2. daarna is een gedetailleerdere analyse uitgevoerd met een grotere hoeveelheid hydraulische berekeningen (paragraaf 7.3.3)
3. tot slot zijn de hydraulische berekeningen in een probabilistische context geplaatst, waarbij ook rekening is gehouden met de kans op voorkomen van een situatie (paragraaf 7.3.4).

### 7.3.2 Eerste eenvoudige analyse

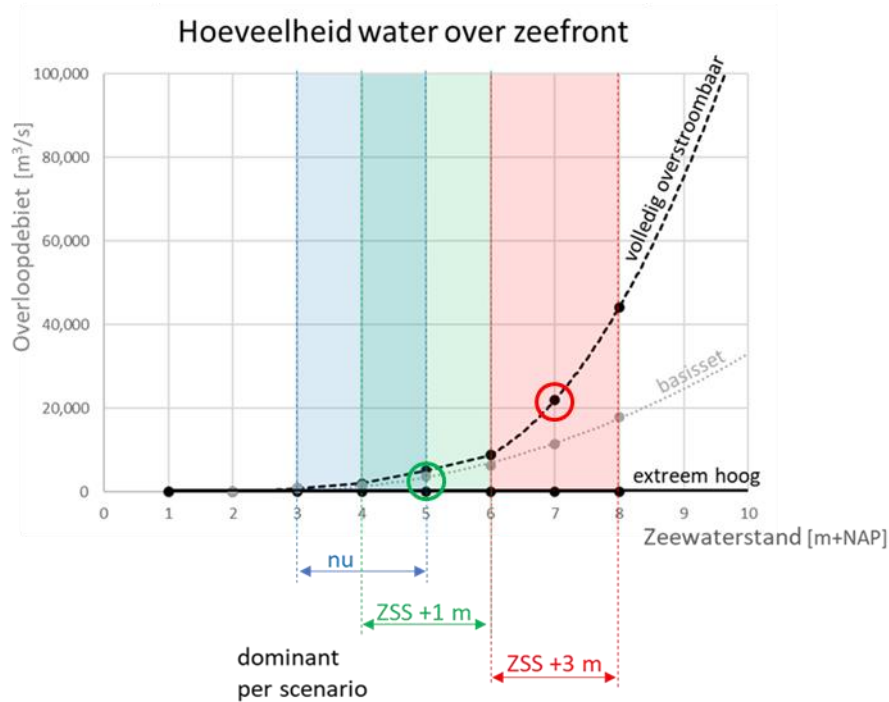
Om een eerste gevoel te krijgen bij het effect van een wel of niet overstroombaar "zeefront", zijn voor 3 varianten enkele hydraulische berekeningen met elkaar vergeleken:

1. De huidige, reeds beschikbare, berekeningen ("basisset"). In deze variant zijn de stormvloedkeringen (Maeslant- en Hartelkering en Haringvlietsluizen) overstroombaar. De overige delen van de verbindende keringen (de dijklichamen) zijn niet overstroombaar (EPK-I, EPK-II en Haringvlietdam).
2. Berekeningen waarbij het gehele zeefront niet overstroombaar is beschouwd (variant "extreem hoog"). Alle overige uitgangspunten in de berekeningen zijn identiek aan de "basisset" uit berekening 1, inclusief de sluiting van de stormvloedkeringen.
3. Berekeningen waarbij het gehele zeefront<sup>18</sup> wel overstroombaar is (variant "volledig overstroombaar"). Voor de dijklichamen die in variant 1 niet overstroombaar zijn, is in deze berekening een inschatting gemaakt van de huidige kerende hoogte o.b.v. het AHN4 en de legger. Alle overige uitgangspunten in de berekeningen zijn identiek aan de "basisset" uit berekening 1, inclusief de sluiting van de stormvloedkeringen.

Op basis van de hydraulische berekeningen zijn schattingen gemaakt van het volume water dat over het zeefront stroomt voor de 3 beschouwde varianten (Figuur 102).

---

<sup>18</sup> M.u.v. de primaire keringen rond Rozenburg en Voorne.



Figuur 102: Overloopdebiet voor het gehele zeefront.

De grijze gestippelde lijn geeft een inschatting van het volume dat overloopt/overslaat over het zeefront in de berekeningen van variant 1 (basisset). De zwarte doorgetrokken lijn hoort bij de berekeningen waarin het zeefront oneindig hoog is gemaakt ("extreem hoog") en de zwarte gestreepte lijn hoort bij de berekeningen waarin het gehele zeefront overstroombaar is ("volledig overstroombaar"). In de figuur is ook aangegeven welke zeewaterstanden grofweg dominant zijn per niveau van de ZSS voor de hydraulische belastingen van de primaire keringen achter de stormvloedkeringen:

- Voor de huidige situatie zijn met name zeewaterstanden in het blauwe gebied van belang (tussen NAP +3 en +5 m)
- Met 1 m ZSS spelen waterstanden in het groene gemarkeerde gebied (tussen NAP +4 en +5 m) een rol
- Bij 3 m ZSS zijn het de waterstanden in het rode gebied (tussen NAP +6 en +7 m) die belangrijk zijn.

In [HKV, 2022] is bepaald dat het bergend oppervlak in de delta tussen de 470 en 600 km<sup>2</sup> ligt. Hiermee wordt het mogelijk een eerste, indicatieve inschatting te geven van het effect van het overlopen van het zeefront op de waterstanden in het achterliggende gebied. Als gedurende een storm van 30 uur tijdens de piek gedurende bijv. 6 uur water over het zeefront loopt met een debiet van 3.500 m<sup>3</sup>/s (groene cirkel in Figuur 102), dan zal naar verwachting de waterstand achter het zeefront (gemiddeld) met 0,10 – 0,15 m stijgen. Als gedurende die 6 uur het gemiddelde overloopdebiet 20.000 m<sup>3</sup>/s bedraagt (rode cirkel in Figuur 102), dan zal de achterliggende waterstand met ongeveer 0,75 – 1,10 m stijgen.

Merk op dat het hier steeds individuele belastingcombinaties betreft, waarbij geen rekening is gehouden met de kans van voorkomen (geen probabilistische berekening). De eerste inzichten in Figuur 102 geven aanleiding om de bijdrage van het overloopdebiet op de - probabilistisch met Hydra-NL bepaalde - hydraulische belastingen verder te onderzoeken. Dit gebeurt in de volgende paragraaf.

### 7.3.3 Gedetailleerdere analyse van de hydraulische belastingen

Het overloopdebiet over het zeefront is geanalyseerd in verschillende combinaties van zeewaterstand en rivierafvoeren bij een vaste windrichting en vaste windsnelheid. De duur van het overlopen (de periode dat water over het zeefront stroomt) volgt uit de doorgerekende combinatie. Het effect op de maximale waterstand wordt groter naarmate de zeewaterstand stijgt en juist kleiner als de rivierafvoer toeneemt (immers bij een grote rivierafvoer stijgt de waterstand achter een gesloten stormvloedkering al zonder dat er water over de stormvloedkering stroomt).

In totaal zijn 96 belastingcombinaties doorgerekend (12 rivierafvoeren gecombineerd met 8 zeewaterstanden). Voor de berekeningen is voor de "basisset" (paragraaf 7.3.2) gebruik gemaakt van de reeds beschikbare databases uit KP ZSS. Voor de variant "extreem hoog" zijn nieuwe berekeningen gemaakt (met precies hetzelfde model) waarbij het zeefront heel hoog is gemaakt en voor de variant "volledig overstroombaar" zijn nieuwe berekeningen gemaakt waarbij het zeefront overstroombaar is gemaakt. Deze combinaties zijn doorgerekend voor een zeespiegelstijging van 1 m en 3 m. Hiermee kan een goede inschatting worden gemaakt van het waterstandsverschil dat door overlopen van het zeefront ontstaat bij verschillende zeewaterstanden en rivierafvoeren als functie van de zeespiegelstijging.

We veronderstellen dat het overlopen van het zeefront met name effect heeft op de hydraulische belastingen in belastingcombinaties waarbij de Maeslant- en Hartelkering correct gesloten zijn. Als deze falen (d.w.z. moeten sluiten, maar dit niet correct doen) is het debiet dat vanaf zee de delta instroomt immers zo groot, dat de bijdrage van het overloopdebiet (over de verbindende kering tussen de Maeslant- en Hartelkering)) aan de maximale waterstanden veel kleiner is. Daarom zijn alléén belastingcombinaties verder beschouwd waarbij de stormvloedkeringen correct sluiten (gesloten keringtoestand).

Op basis van deze 96 doorgerekende belastingcombinaties concluderen we dat de invloed van het niet meer overstroomen van het zeefront ("extreem hoog") bij een ZSS van 1 m in de orde van enkele centimeters verlaging ligt en is deze verlaging het grootst (-0,05 m) direct achter de EPK. Bij een ZSS van 3 m ontstaat een verlaging van grofweg -0,3 m in het gebied direct achter de EPK. Deze grotere verlaging is logisch, omdat bij een hogere zeespiegelstijging het effect van het overstroombaar zijn van sommige keringen in de "basisset" groter zal zijn dan bij een lagere zeespiegelstijging.

Eenzelfde vergelijking is ook gemaakt tussen de "basisset" en de variant "volledig overstroombaar". Bij een ZSS van 1 m ligt het effect in de orde van maximaal +0,02 m. Bij een zeespiegelstijging van +3 m neemt het effect toe tot orde +0,2 m in een gesloten keringtoestand.

Deze verschillen zeggen echter nog weinig over de uiteindelijke doorwerking op de waterstanden of HBN's bij de norm. Daarvoor zijn ook de kansen van voorkomen van de verschillende belastingsituaties nodig en is een inschatting nodig van het gecombineerde, probabilistische effect.

Een volledige probabilistische analyse is te diepgaand voor de scope van deze aanvullende analyse. Daarom is een aanpak bedacht die op basis van de resultaten van de hiervoor genoemde 96 belastingcombinaties toch een inschatting geeft van het probabilistische effect. Deze aanpak is uitgewerkt voor 9 locaties, zie Figuur 103. Daarvoor is gebruik gemaakt van de resultaten uit de illustratiepunten van de wél volledige (beschikbare) basisset uit de huidige situatie van het KP ZSS. Uit deze illustratiepunten is een inschatting gemaakt (per locatie) van de kansbijdrage van een open- en een gesloten keringtoestand.



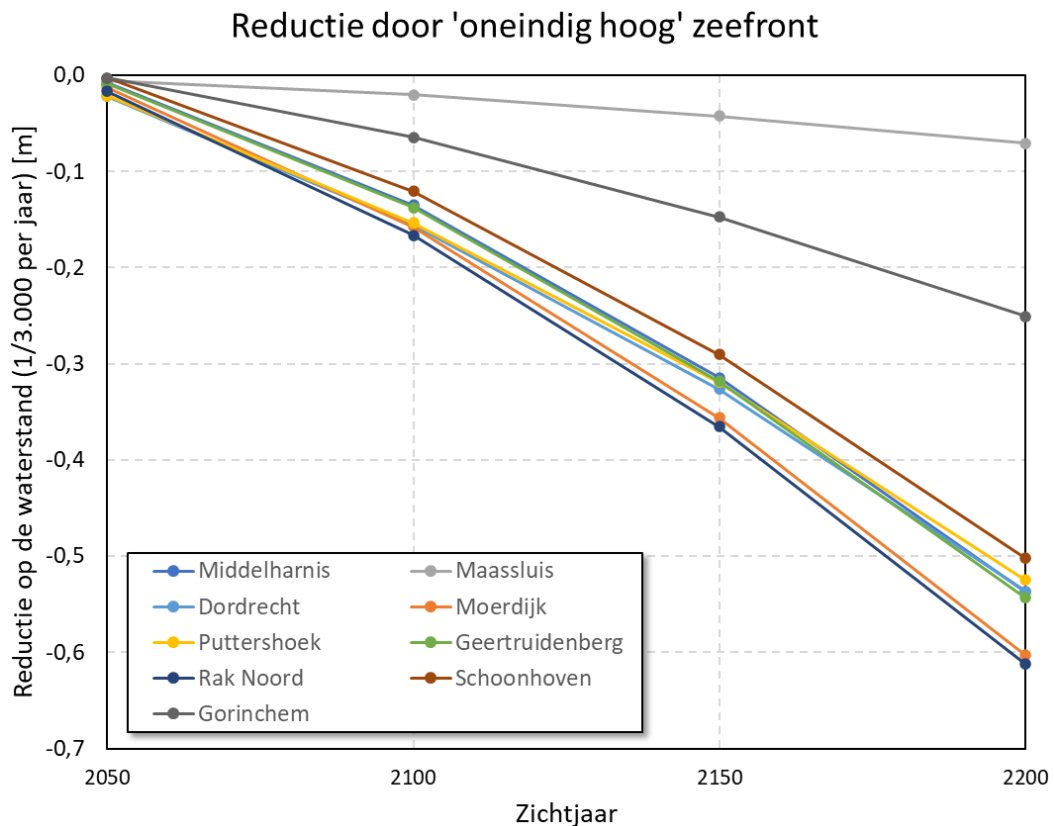
Figuur 103: Overzicht locaties waarvoor een inschatting is gemaakt van de impact op de waterstanden in de varianten "extreem hoog" en "volledig overstroombaar" zeefront t.o.v. de "basisset".

#### 7.3.4 Probabilistische analyse

In de vorige paragraaf is in een gedetailleerdere analyse het effect bekeken op de waterstanden van een heel aantal individuele belastingcombinaties (96 in totaal). Daaruit volgt dat de effecten van de verschillende varianten van overstroombaarheid van het zeefront het grootst zijn voor locaties direct achter het zeefront. In deze derde en laatste stap zijn de individuele hydraulische berekeningen beschouwd in een probabilistische context, waarbij rekening is gehouden met hun kans op voorkomen.

#### Analyse voor "oneindig hoog" zeefront

In Figuur 104 is de waterstandsreductie bij de normfrequentie voor de variant een "oneindig hoog" zeefront ten opzichte van de "basisset" per locatie uitgezet in de verschillende zichtjaren.



Figuur 104: Waterstandreducties door een "oneindig hoog" zeefront voor tijdlijn Zeer Extreem.

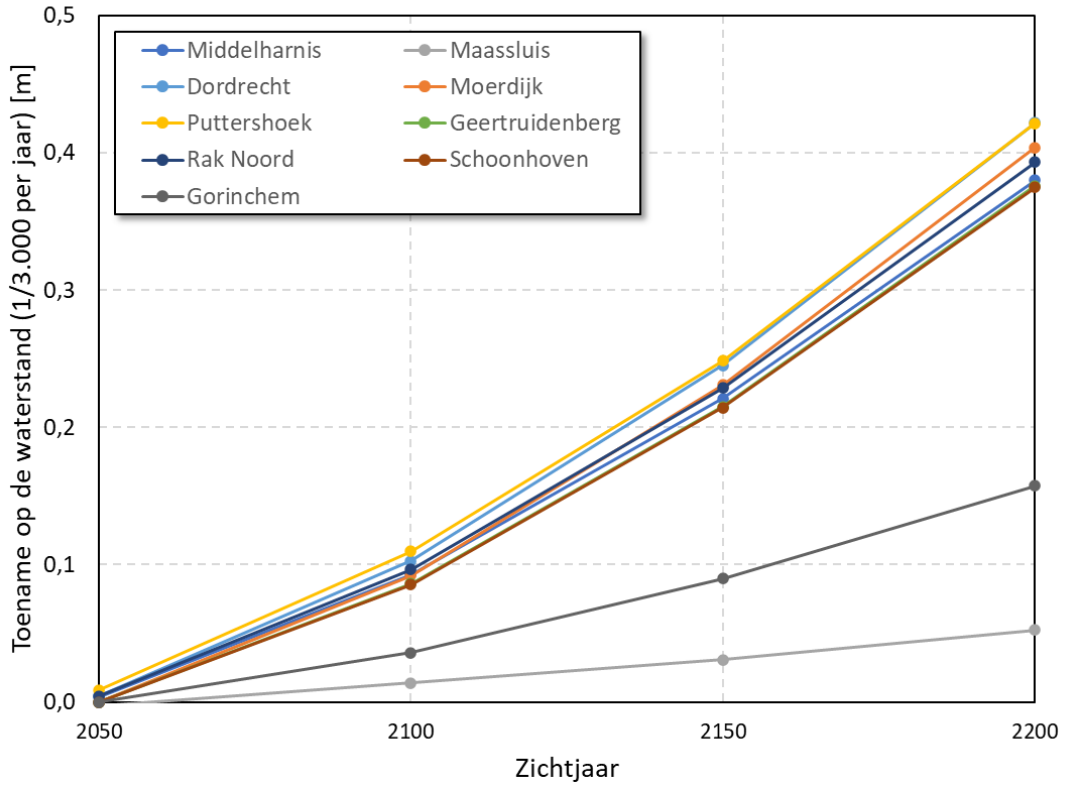
Uit de figuur identificeren we 3 clusters van locaties:

1. Voor locaties direct achter de Europoortkering (Maassluis) is de reductie beperkt, omdat de faalgebeurtenis van de Europoortkering dominant is in de berekening van de hydraulische belastingen. Hoewel Middelharnis ook dicht achter het zeefront ligt, geeft het bergend volume van het Haringvliet/Hollandsch diep voor een kleiner effect dan achter de Europoortkering.
2. Voor locaties ver weg van het zeefront (Gorinchem) is de reductie ook beperkt, omdat de rivierafvoer dominant is.
3. Voor de locaties in het tussenliggende gebied varieert de reductie door een "extreem hoog" zeefront van enkele cm's in 2050 tot 0,5 – 0,6 m in 2200.

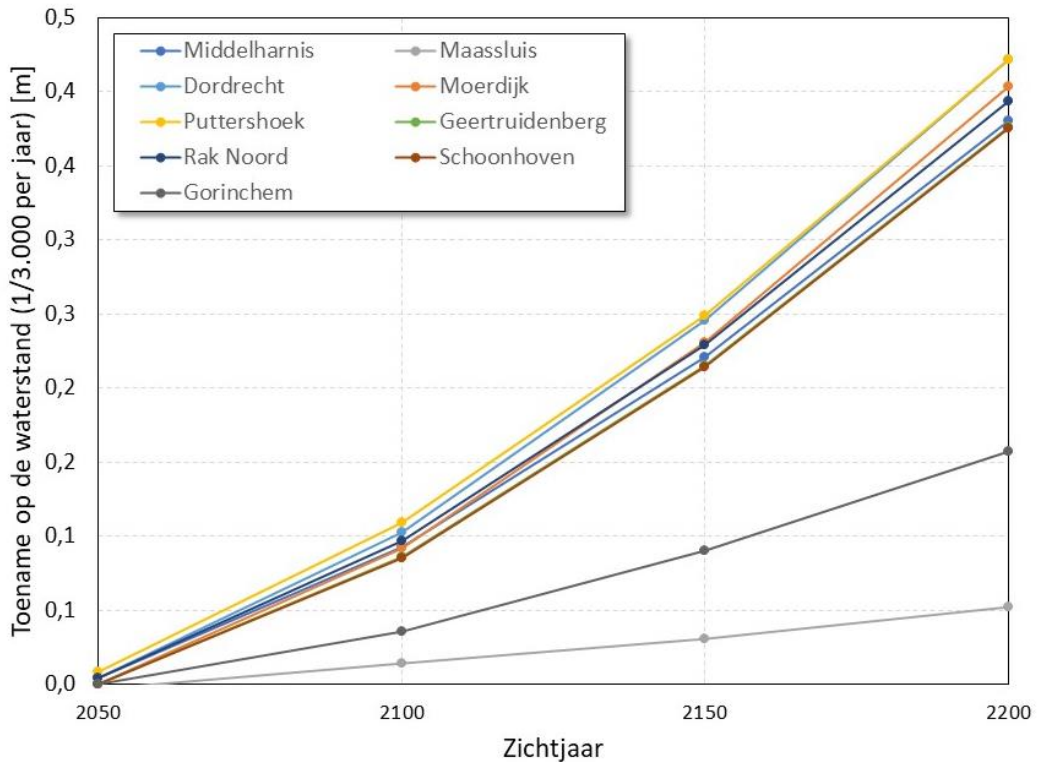
#### **Analyse voor "geheel overstroombaar" zeefront**

In Figuur 105 is de reductie door een "volledig overstroombaar" zeefront ten opzichte van de "basisset" per locatie uitgezet in de verschillende zichtjaren.

### Toename door 'volledig overstroombaar' zeefront



### Toename door 'volledig overstroombaar' zeefront



Figuur 105 Waterstandstijgingen door een geheel overstroombaar zeefront voor tijdlijn Zeer Extreem.

Ook hier zien we weer dezelfde 3 "clusters" van locaties:

1. Voor locaties nabij het zeefront (Maassluis) blijft de stijging van de waterstanden beperkt tot enkele centimeters, omdat de bijdrage van het falen van de Europoortkering dominant is.
2. Voor locaties ver bij het zeefront vandaan in bovenstroomse richting (Gorinchem) is de stijging maximaal 0,15 m, omdat de rivierafvoer dominant is t.o.v. het overloopdebiet over het zeefront.
3. Voor de locaties tussen deze uitersten varieert de stijging door een 'overstroombaar' zeefront van enkele cm's in 2050 tot ongeveer 0,4 m in 2200.

### **Conclusie invloed op waterstanden**

In de overgangsgebieden tussen zee- en rivierdominantie kunnen andere aannames over de wijze van overlopen van het zeefront zorgen voor meerdere decimeters verhoging of verlaging van de waterstanden t.o.v. de "basisset" uit KP ZSS. Het verhogen van de kerende hoogte van de kunstwerken in het zeefront kan zorgen voor 0,5 – 0,6 m reductie van de hydraulische belastingen in 2200 bij tijdelijk Zeer Extreem. Het niet ophogen van de kerende hoogte van de aardelichamen van de voorliggende keringen geeft mogelijk een verhoging van de hydraulische belastingen met 0,4 m in 2200 bij tijdelijk Zeer Extreem. Het verschil tussen een zeefront dat volledig overstroombaar is en een zeefront dat oneindig hoog ligt, komt neer op de optelsom van de resultaten uit Figuur 104 en Figuur 105.

Op de riviertakken ligt het effect (voor beide varianten van overstroombaarheid) tussen de 0,15 – 0,25 m in 2200 bij tijdelijk Zeer Extreem, omdat deze gebieden verder weg liggen van het zeefront en hier extremere rivierafvoeren dominant zijn t.o.v. de hoeveelheid overslaand zeewater.

In paragraaf 7.3.5 brengen we in beeld wat de doorwerking van deze toe- en afnames van de waterstanden betekenen voor de kosten en de waterveiligheidsopgave.

#### *7.3.5 Waterveiligheidsopgave dijken*

In de vorige paragraaf zijn de toe- en afnames van de waterstanden besproken voor een "extreem hoog" zeefront en een "volledig overstroombaar" zeefront. De resulterende waterstanden zijn per locatie gekoppeld aan het dichtstbijzijnde normtraject binnen het studiegebied van de Rijn-Maasmonding om een grove schatting te kunnen maken van de invloed op de waterveiligheidsopgave en kosten.

Daarbij is onderscheid gemaakt in de deelgebieden Haringvliet-Hollandsch Diep (HVHD), Rijnmond-Drechtsteden (RDST), Nederrijn/Lek (NRLK), Waal en Maas (Figuur 75). Bovenstrooms van Culemborg, Tiel en Lith is geen reducerend effect van de oprekmaatregel meegenomen, omdat voor locaties als Zaltbommel en Den Bosch de waterstandsreductie slechts enkele centimeters is in 2200 bij tijdelijk Zeer Extreem. De detailresultaten voor tijdelijk Zeer Extreem zijn weergegeven in Tabel 108 ("extreem hoog" zeefront) en Tabel 109 ("volledig overstroombaar" zeefront) in Bijlage D.

### **Conclusie invloed op versterkingskosten**

Uit de vergelijking van de resultaten voor een "extreem hoog" zeefront met de "basisset" van KP ZSS blijkt dat tot 2100 het percentage vermeden dijkversterkingskosten in alle vier delen van het onderzoeksgebied gezamenlijk afneemt met ongeveer 5%. Na 2100 zien we een onderscheid naar de verschillende deelgebieden:

- op de rivieren (deelgebieden WAAL en MAAS) blijft de procentuele reductie van de vermeden dijkversterkingskosten ook tot 2200 gelijk aan 5%.
- In deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Nederrijn-Lek neemt de reductie toe tot maximaal 9% in 2200.

- Op het Haringvliet/Hollandsch diep vinden we een reductie van maximaal 12% in 2200.

De invloed van een "volledig overstroombaar" zeefront op de totale kosten van de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied liggen in de orde van enkele procenten. Door het grotere overloopdebiet stijgen de versterkingskosten in deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Nederrijn-Lek met ongeveer 4% in 2100 en met ongeveer 8% in 2200 t.o.v. van de "basiswa". Daar komen de versterkingskosten van het zeefront zelf nog bij (overslag- en erosiebestendig maken), maar deze zijn verder niet ingeschat. Langs de riviertakken (deelgebieden Waal en Maas) blijft de toename beperkt tot 2% in 2200.

## 7.4 Berging Zuidwestelijke Delta

### 7.4.1 Werking van de maatregel

Bij een stormvloed op de Noordzee sluiten de Europoortkeringen (Maeslantkering en Hartelkering) en de Haringvlietsluizen om de Rijn-Maasmonding (RMM) te beschermen tegen overstromingen vanuit zee. Rivierwater kan dan tijdelijk (enkele uren tot maximaal 1½ dag) niet meer naar de zee stromen en het gebied achter de stormvloedkeringen loopt dan vol met rivierwater. De verhouding tussen de rivierafvoer (duur en grootte) en het bergend oppervlak in de RMM bepaalt achter een gesloten zeefront<sup>19</sup> de maximale waterstand. Eén van de maatregelen uit het Ruimte voor de Rivier programma is om water vanuit het Haringvliet / Hollandsch Diep te bergen op Volkerak-Zoommeer (VZM) als het zeefront gesloten is. In een dergelijke situatie stroomt rivierwater tijdelijk richting de Zuidwestelijke Delta (Figuur 106), waardoor de hoogwaterstanden op met name het Haringvliet en Hollandsch Diep dalen. De maatregel om te bergen op het VZM is in eerste instantie bedoeld om waterstandverlaging bij Dordrecht te bereiken (Voorstraat en historisch buitendijks).

---

<sup>19</sup> Onder het "zeefront" verstaan we de aaneenschakeling van dammen en stormvloedkeringen langs de kust tussen Hoek van Holland en Stellendam.





Figuur 106: Overzicht van de Rijn-Maasmonding en Zuidwestelijke delta, met daarin uitgelicht de Grevelingen, het Volkerak-Zoommeer, de dreiging van de zee (stormvloed) en de rivieren (hoge afvoer).

In de basisvariant van KP ZSS is de berging op het Volkerak-Zoommeer meegenomen als maatregel (dus zónder extra berging op de Grevelingen of de Oosterschelde). De waterstandsverlaging die deze maatregel oplevert, draagt bij aan de veiligheid in de regio, met name rond het Haringvliet en het Hollandsch Diep [Slootjes et al., 2010]. Door de strenge normen langs de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas is het falen van de Europoortkering (1 keer per 100 sluitingen) dominant in de hydraulische belastingen. De berging van water heeft alleen een significant effect (en wordt ook alleen uitgevoerd) als het zeefront gesloten is. Mede daarom heeft de inzet van waterberging met name effect rond het Haringvliet / Hollandsch Diep. Een andere verklaring waarom juist daar de inzet van berging in de Zuidwestelijke Delta het grootst is, is omdat dit het dichtst bij het inlaatpunt voor de bergingsmaatregel ligt.

In deze analyse sluiten we aan bij de uitgangspunten van één van de uitgewerkte varianten uit Slootjes et al., (2010). We gaan uit van de (fictieve) variant met waterberging op het VZM, aangevuld met berging op de Grevelingen, met optimale inzet van de spuumiddelen (in de Volkerak- en Grevelingendam) en zonder gebruik van een (theoretische) getijcentrale in de Brouwersdam. We bepalen het effect van deze variant door te kijken naar de wijziging van de hydraulische belastingen t.o.v. de doorgerekende "basisset" (paragraaf 3.3). Met toenemende zeespiegelstijging zal het aantal sluitingen van de Europoortkering en daarmee van de inzet van de berging flink toenemen. Zoals eerder benoemd, wordt waterberging alleen ingezet als het zeefront in de RMM gesloten is. Door inzet van de berging zal de waterstand daarom alleen in de gesloten situatie van de doorgerekende "basisset" dalen.

De inzet van de berging is bedoeld om het oplopen van de waterstand te beperken, als afvoer via de Haringvlietssluisen en de Nieuwe Waterweg niet mogelijk is door een verhoogde waterstand (een storm) op zee. De rivierafvoer zal verhoogd moeten zijn om een duidelijk effect van de berging waar te nemen.

### Eerste grove inschatting

Om gevoel te krijgen bij de invloed van berging, zijn enkele eenvoudige balansberekeningen gedaan. De oppervlakte van het Volkerak-Zoommeer en de Grevelingen bedragen respectievelijk 80 en 140 km<sup>2</sup>. Het bergend oppervlak van de RMM ligt (afhankelijk van de rivierafvoer) tussen 470 en 600 km<sup>2</sup> [HKV, 2022b]. Stel dat we uitgaan van 6.500 - 17.500 m<sup>3</sup>/s aan afvoer van de Maas, Waal en Lek gezamenlijk en dat deze afvoer richting zee 16 - 32 uur gestremd is. Achter het gesloten zeefront zal dan tijdelijk een waterschijf van 0,5 - 3,5 m geborgen moeten worden. Door inzet van de 'extra' berging op de Grevelingen wordt deze schijf kleiner en gaat er grofweg 0,1 - 0,7 m van deze schijf af, omdat het bergend oppervlak groter is. Heel kort kunnen we stellen dat het toenemen van de waterstand in de gehele delta achter het gesloten front door de rivierafvoer gemiddeld met 15 - 20% verlaagd kan worden door de inzet van 'extra' berging op de Grevelingen. Dit effect is op het Haringvliet en Hollandsch Diep groter dan op de Nieuwe Waterweg en Nieuwe Maas.

#### 7.4.2 Hydraulische belastingen

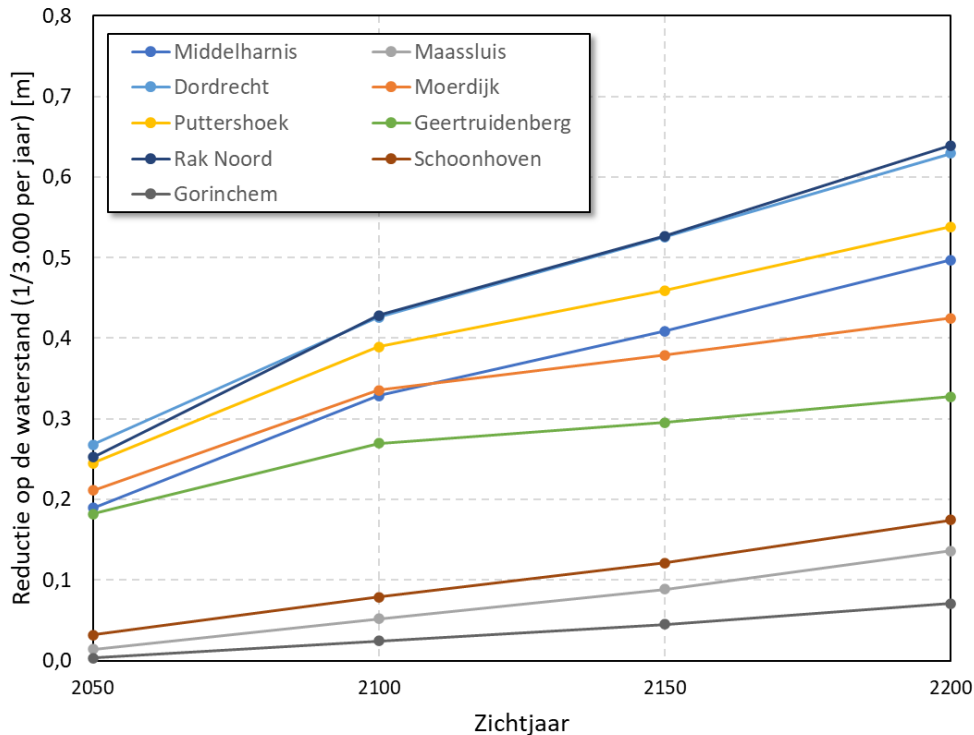
Uit de analyse van Slootjes et al. (2010) blijkt dat de gesloten situatie minder dominant wordt als de waterstand in de gesloten situatie daalt door de inzet van berging. Voor locaties langs het Haringvliet daalt de bijdrage van de gesloten keringsituatie in de illustratiepunten van 70-80% tot 15-25% als VZM en Grevelingen ingezet worden als berging.

We weten al dat berging vooral effectief is achter een gesloten zeefront: als de Europoortkering faalt, dalen de waterstanden niet. Naarmate de bijdrage in de hydraulische belastingen van een gesloten keringsituatie meer en meer verschuift richting een open keringsituatie, zal berging op een gegeven moment een verwaarloosbaar waterstandsverlagend effect krijgen.

De bijdrage van de open- en gesloten keringsituatie aan de hydraulische belastingen is dus een belangrijk effect om mee te nemen in de beschouwing. Daarom zijn resultaten uit Slootjes (2012) gebruikt om een relatie te leggen tussen zeespiegelstijging, waterberging en de verschuiving van de bijdragen van een 'open' en 'gesloten' zeefront aan de waterstand bij de norm. We schatten het effect van de berging bij de norm en veronderstellen dat hiervoor de inzetfrequentie niet toe hoeft te nemen.

In Figuur 107 is een schatting gegeven van de reductie van de waterstanden per locatie in de tijd. Daarbij is aangenomen dat waterberging effectiever is bij een stijging van de zeespiegel. De gedachte daarbij is: door zeespiegelstijging nemen de waterstanden in de delta toe, waardoor meer water naar de waterberging zal stromen. De toename in effectiviteit is evenredig met de toename uit Slootjes (2012) tussen ZSS+0,35 m en ZSS+0,85 m.

### Reductie door waterberging Zuidwestelijke Delta (t.o.v. Slootjes et al. 2012)



Figuur 107 Waterstandreducties door 'extra' waterberging op het VZM en de Grevelingen voor tijdlijn Zeer Extreem met afname doorgezet evenredig met de effectiviteit uit Slootjes (2012).

Uit Figuur 107 volgt dat voor locaties nabij het zeefront (Maassluis) de reductie op de waterstanden beperkt is, omdat de faalgebeurtenis van de EPK dominant is in de berekening van de hydraulische belastingen (maximaal 0,12 m in 2200). Voor locaties verder van het zeefront vandaan (Gorinchem en Schoonhoven) is de reductie ook beperkt (maximaal 0,15 m in 2200), omdat de rivierafvoer dominant is in de berekening van de hydraulische belastingen. Voor de locaties in het tussengebied varieert de reductie door 'extra' waterberging op de Grevelingen van ongeveer 0,2 m in 2050 tot 0,3 – 0,6 m in 2200. Als we de 3 meest bovenstrooms gelegen locaties (Schoonhoven op de Lek, Geertruidenberg op de Maas en Gorinchem op de Waal) met elkaar vergelijken, zien we dat:

- het effect bij Geertruidenberg het kleinst is. Dit komt omdat het debiet van de Waal in verhouding tot de Lek en de Maas groot is. Een verandering van de waterstand op het Hollandsch Diep heeft dan ook niet zoveel effect op de Waal.
- het effect op de Maas is het grootst. Ten eerste ligt Geertruidenberg vrij dicht bij het inlaatpunt van de bergingsmaatregel en ten tweede is het debiet van de Maas een stuk kleiner dan dat van de Waal. Een verandering in de waterstand op het Hollandsch Diep zie je dus vrij direct terug op een locatie dichtbij de inlaat op de Maas.
- het debiet van de Lek bij Schoonhoven is vergelijkbaar met dat van de Maas, maar Schoonhoven ligt ver weg van het inlaatpunt van de berging. Daarom zien we weliswaar een wat groter effect bij Schoonhoven dan bij Gorinchem, maar een kleiner effect dan bij Geertruidenberg.

Voor de volledigheid merken we op dat de toenames in de waterstanden t.o.v. de basisset zijn bepaald door te kijken naar de illustratiepunten uit de berekeningen met verschillende maten van zeespiegelstijging. Daarin is dus automatisch rekening gehouden met aangepaste sluitpeilen.

### 7.4.3 Waterveiligheidsopgave dijken

In paragraaf 7.4.2 zijn de ingeschatte reducties op de waterstand door extra waterberging in de Zuidwestelijke Delta (Grevelingen) gerapporteerd. Deze gebruiken we om een inschatting te maken van het effect op de waterveiligheidsopgave. De resultaten per uitvoerlocatie (Figuur 107) zijn gekoppeld aan de dichtstbijzijnde normtrajecten binnen het studiegebied van de RMM. Daarbij is onderscheid gemaakt in Haringvliet-Hollandsch Diep (HVHD), Rijnmond-Drechtsteden (RDST), Nederrijn/Lek (NRLK), Waal en Maas. Bovenstrooms van Culemborg, Tiel en Lith is geen reducerend effect van de waterberging meegenomen, omdat de locaties Zaltbommel en Den Bosch nog slechts enkele centimeters reductie geven in de waterstand in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem. De resultaten van de reducties zijn weergegeven in Tabel 110 in Bijlage D. In de laatste kolom van die tabel staat tussen haakjes het percentage vermeden kosten als de effectiviteit van de waterberging niet groter wordt dan het maximaal berekende effect uit Slootjes (2012).

#### **Conclusie invloed op versterkingskosten**

Het percentage vermeden dijkversterkingskosten varieert in alle 4 de deelgebieden. Dit percentage neemt af als de zeespiegel stijgt en de rivierafvoer toeneemt. In de gesloten situatie moet dan meer water worden geborgen om dijkversterking te voorkomen. Enerzijds zal op het moment van sluiten van het zeefront de waterstand in de delta hoger zijn en anderzijds zal meer water via de rivieren naar de delta stromen.

Op de riviertakken is het percentage in de deelgebieden Nederrijn-Lek en Maas respectievelijk gelijk aan maximaal orde 10% en 5% in 2050. Op de Waal is nauwelijks effect berekend (maximaal 2% reductie in 2050). Op het Haringvliet en Hollandsch Diep is het effect van de extra berging het grootst, namelijk 40% reductie in 2050 en 10% reductie in 2200. In de regio Rijnmond-Drechtsteden is de reductie orde 30% in 2050 en orde 10% in 2200. Als het effect van de 'extra' berging wordt gemaximaliseerd op het berekende effect bij ZSS+0,85 [Slootjes et al., 2012], dan neemt het percentage vermeden kosten in de toekomst sterker af. In 2200 wordt dan nog grofweg de helft van de berekende reductie bereikt.

## 7.5 Berging door systeemwerking

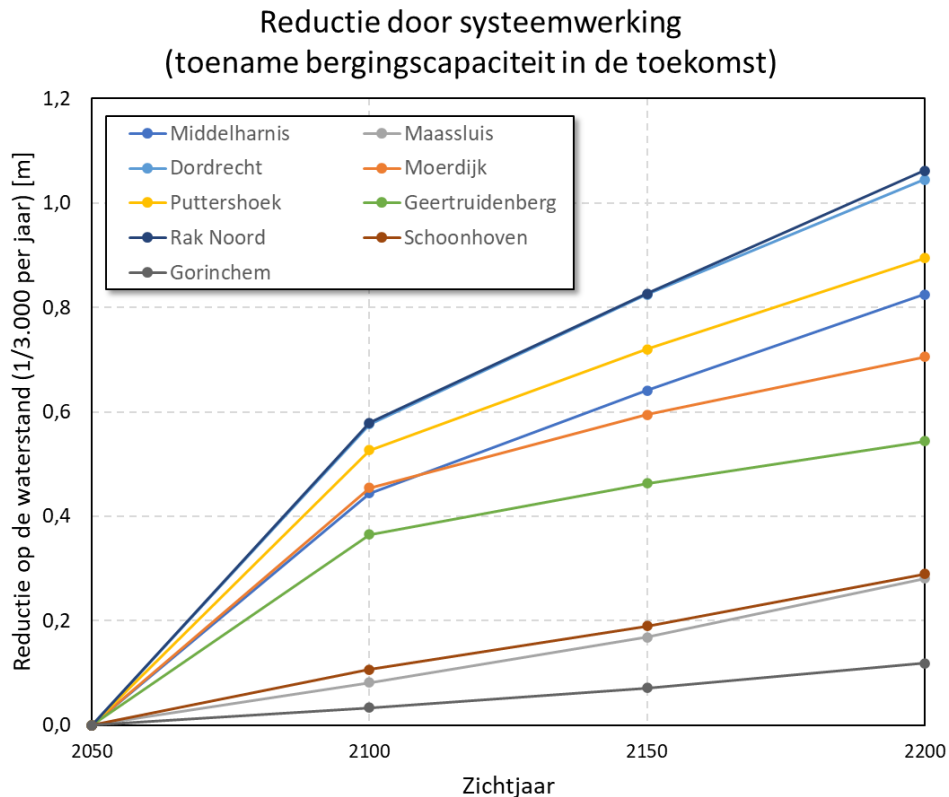
### 7.5.1 Werking van de maatregel

Identiek aan de methode voor *Waterberging in de Zuidwestelijke Delta* zoals beschreven in paragraaf 7.4.2 zijn voor verschillende locaties in de Rijn-Maasmonding de reducties op de waterstand bij de norm door het overlopen van de primaire kering van een fictief binnendijks gebied ter grootte van de Hoeksche Waard geschat (systeemwerking).

We nemen aan dat de primaire kering van het gebied een hoogte heeft, die nog dateert van voor de invoering van de normen in de Waterwet van 2017 o.b.v. de overstromingskansbenadering. Het uitgangspunt voor deze analyse is "systeem op orde" in 2050. De kering wordt daarom hoger verondersteld dan noodzakelijk om aan de normen in de Waterwet te voldoen (resthoogte). Daarom is in 2050 het effect van het vollopen van de polder gelijk aan nul gesteld. Ergens tussen 2050 en 2100 zal deze primaire kering (en de oude keringen in het gebied) overlopen als in andere delen van de delta de waterstanden nog onder de kruin staan, ondanks dat de primaire kering voldoet aan het wettelijk vastgestelde beschermingsniveau. Het water dat (in situaties extremer dan het gegarandeerde beschermingsniveau) de polder instroomt vormt geen bedreiging meer voor andere delen van de delta.

### 7.5.2 Hydraulische belastingen

Voor dezelfde locaties als in paragraaf 7.3 en 7.4 (Figuur 103) zijn de reducties op de waterstand (tijdlijn Zeer Extreem) weergegeven in Figuur 108. We hebben gewerkt met diverse grofstoffelijke aannames en de resultaten zijn dan ook niet meer dan een indicatie.



Figuur 108: Waterstandreducties door overlopen van de primaire kering van een fictief binnendijks gebied voor tijdlijn Zeer Extreem.

#### Conclusie invloed op waterstanden

Voor locaties nabij het zeefront (Maassluis) is de reductie door systeemwerking maximaal 0,2 – 0,3 m in 2200, omdat de faalgebeurtenis van de EPK dominant is. Voor locaties verder bij het zeefront vandaan (Gorinchem en Schoonhoven) is de reductie maximaal 0,1 - 0,3 m in 2200, omdat de rivierafvoer dominant is in de waterstandsberekening. Voor de locaties in het tussengebied is de reductie door systeemwerking een stuk groter en varieert van ongeveer 0,35 m in 2100 tot 1,05 m in 2200. Als maximaal effect in 2200 op het Haringvliet-Hollandsch Diep vinden we reducties op de waterstanden die variëren tussen 0,7 m en 1,05 m.

### 7.5.3 Waterveiligheidsopgave dijken

In paragraaf 7.5.2 zijn de ingeschatte reducties op de waterstand door het meenemen van systeemwerking beschreven. Deze gebruiken we om een inschatting te maken van het effect op de waterveiligheidsopgave. De resultaten per uitvoerlocatie in paragraaf 7.5.2 zijn net als eerder gekoppeld aan de dichtstbijzijnde normtrajecten binnen het studiegebied van de RMM. Daarbij is onderscheid gemaakt in Haringvliet-Hollandsch Diep (HVHD), Rijnmond-Drechtsteden (RDST), Nederrijn/Lek (NRLK), Waal en Maas. Bovenstrooms van Culemborg, Tiel en Lith is geen reducerend effect van de waterberging meegenomen, omdat de locaties Zaltbommel en Den Bosch nog slechts enkele centimeters reductie geven in de waterstand in 2200 voor tijdlijn Zeer Extreem. De resultaten van de

waterstandsreducties zijn weergegeven in Tabel 111 in Bijlage D. In de laatste kolom van die tabel staat tussen haakjes het percentage vermeden kosten als de effectiviteit van de waterberging niet groter wordt dan het maximaal berekende effect uit Slootjes (2012).

### **Conclusie invloed op versterkingskosten**

Het percentage vermeden dijkversterkingskosten varieert tussen de vier deelgebieden. Dit percentage neemt af als in de toekomst de zeespiegel stijgt en de rivierafvoer toeneemt. Deze afname is echter minder duidelijk zichtbaar dan bij de 'extra' berging op de Grevelingen (paragraaf 7.4). Het grootste effect van de waterberging op de Grevelingen op de versterkingskosten wordt berekend in 2050 ("systeem op orde"). In de analyse van de systeemwerking in de Rijn-Maasmonding is aangenomen dat in 2050 de primaire kering niet overloopt. Deze primaire kering heeft nog resthoogte (voldoet ruimschoots aan de norm voor hoogte). In 2100 t/m 2200 is het effect van de systeemwerking groter door het grotere oppervlak van het achterliggende bergingsgebied en het volume dat zal instromen als de primaire kering overloopt.

Tot 2050 zal de primaire kering voor de systeemwerking voldoende hoogte hebben om ook gebeurtenissen extremer dan de bij de ondergrensnorm te keren. In de analyse is aangenomen dat overlopen dan niet optreedt. Na 2050 zal de kering (indien nodig) worden opgehoogd conform de wettelijk norm. De hoogte van de keringen voldoet daarmee in het hele gebied (in theorie) precies aan de normen uit de Waterwet. Het gebied met de laagste norm heeft de laagste kruinhoogte en zal dus als eerste onderlopen. Door het overloopdebiet dat de achterliggende polder inloopt, dalen de versterkingskosten in de delta met ongeveer 15 – 20% in 2100 en met ongeveer 13 – 16% in 2200 in tijdlijn Zeer Extreem t.o.v. van de "basisset". Langs de riviertakken (deelgebieden Nederrijn-Lek, Waal en Maas blijft de reductie beperkt tot orde 5% in 2200.

## **7.6 Invloed rivierverruimende maatregelen<sup>20</sup>**

### *7.6.1 Werking van de maatregel*

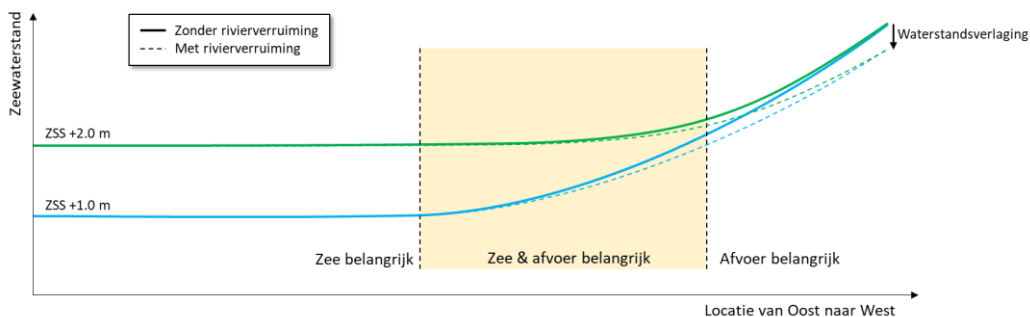
Rivierverruimende maatregelen vergroten in het algemeen de bergings- en afvoercapaciteit van de rivier. Bij een hoge rivierafvoer op de Maas of Rijn stromen de uiterwaarden mee om binnendijks gebied te beschermen tegen overstromingen. Bij een hoge afvoer kan gebruik gemaakt worden van extra berging, of extra doorstroom, waardoor de waterstanden bovenstrooms lager worden. Rivierverruimende maatregelen hebben lokaal ook een verlagend effect als ze in eerste instantie niet onder water staan. Ze hebben hun grootste effectiviteit in gebieden waar de afvoercapaciteit van de betreffende riviertak de beperkende factor is. Ze zijn bedoeld om hoge rivierafvoeren op te vangen en niet om stijging van de zeespiegel op te vangen.

Aanleggen van rivierverruimende maatregelen in het gebied waar de zee het belangrijkste is, levert weinig waterstandsverlaging op. Als je in dat gebied de rivier breder maakt, vult deze zich immers met zeewater. Dit geldt eigenlijk ook al in het overgangsgebied waar zowel de afvoer als de zee belangrijk zijn (Figuur 108).

In het door de zee gedomineerde deel van de Rijn-Maasmonding worden dergelijke maatregelen daarom als weinig effectief beschouwd en zal de effectiviteit verder afnemen naarmate de middenstand van het getij in het gebied met meerdere meters stijgt. De verwachting is dat door een stijging van de zeespiegel de grens

<sup>20</sup> Waterberging op het Volkerak-Zoommeer valt onder de PKB Ruimte voor de Rivier. Deze maatregel is in dit hoofdstuk niet meegenomen, maar is separaat beschouwd in hoofdstuk 7.4.

van het riviergedomineerde gebied en het overgangsgebied verschuift, waardoor rivierverruimende maatregelen in een kleiner gebied effectief worden.



Figuur 109: Schematisch verloop van de zeewaterstand (dikke doorgetrokken lijnen) van oostelijke naar westelijke richting voor twee verschillende niveaus van zeespiegelstijging, inclusief de invloed van rivierverruimende maatregelen (gestreepte lijnen).

De effectiviteit van de maatregelen hangt o.a. af van de precieze locatie van de maatregel in het gebied, de norm (afvoerniveau) waarvoor de maatregel is ontworpen, de riviertak en het type maatregel (zomerbedverdieping, dijkverlegging, berging, etc.). Dat maakt het lastig om generieke uitspraken te doen over hoe de effectiviteit van rivierverruimende maatregelen wordt beïnvloed door zeespiegelstijging.

Rivierverruimende maatregelen in het bovenstroomse, afvoergedomineerde deel van de Rijn-Maasmonding (RMM) kunnen wel voor verlaging van de waterstanden in het Rivierengebied. Hiervoor worden resultaten gebruikt die beschikbaar zijn vanuit het project Integraal Riviermanagement (IRM). In Huthoff et al. (2020) is een inschatting gemaakt van de maximale capaciteit van het watersysteem om de waterstand te reduceren door rivierverruimende maatregelen. Dit geeft voor verschillende riviertakken van de Rijn en de Maas wat de maximale waterstands-daling is die behaald kan worden met rivierverruimende maatregelen.

Voor de theoretisch maximaal te realiseren waterstands-daling zijn diverse typen buitendijkse maatregelen beschouwd [Huthoff, 2020], waaronder:

- Kribverlaging;
- Uiterwaardverlaging;
- Zomerbedverbreding en -verdieping;
- Langsdammen;
- Retentie;
- Nevengeulen.

Het gaat om het maximale aanbod van de maatregelpakketten uit de Blokkendoos Deltaprogramma Rivieren en de POV Vecht (zie Bijlage I uit Huthoff et al. (2020)).

Bij de inschatting van de waterstandeffecten bij de verschillende maatregelen is gebruik gemaakt van berekeningen van evenwichtsdieptes. Hiermee wordt bij constante afvoer het waterstandseffect in een dwarsprofiel berekend. De waterstands-daling is gegeven voor een vaste piekafvoer bij Lobith van 16.000 m<sup>3</sup>/s en op de Maas van 3.800 m<sup>3</sup>/s bij Borgharen. In werkelijkheid zal de waterstands-daling bij de inzet van een maatregel minder groot zijn dan het maximale karakteristieke effect, omdat deze maximale verlaging volgens een stuwkromme moet worden opgebouwd. De zogenaamde halveringslengte van de stuwkromme is een maat voor hoe snel (in afstand) een effect opbouwt, en voor hoe deze ook weer aan effect verliest bovenstrooms van de maatregel [Huthoff, 2020].

In Huthoff et al. (2020) is een inschatting gegeven vanuit IRM van het maximaal te verwachten effect van maatregelen per riviertak op basis van een afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Voor de Rijn-Maasmonding zijn over het algemeen beduidend lagere afvoeren van belang, die eerder rond de 8.000 – 13.000 m<sup>3</sup>/s liggen (locatieafhankelijk). De effectiviteit van de rivierverruimende maatregelen zal daardoor voor de Rijn-Maasmonding minder zijn dan genoemd in Huthoff et al., (2020). Een tweede bijkomstigheid van de lagere afvoeren is dat de invloed van de zee naar verhouding groter zal zijn (de rivierafvoer geeft minder “tegendruk” aan de zeewaterstand), waardoor bij lagere afvoerniveaus de invloed van de zeespiegelstijging naar verhouding een groter effect heeft. Dat is een tweede argument waarom de effectiviteit van rivierverruimende maatregelen vermoedelijk omlaag zal gaan bij lagere afvoerniveaus. Tot slot geldt (nog meer dan in het bovenrivierengebied) dat in de Rijn-Maasmonding niet slechts één afvoerniveau van belang is, maar juist het samenspel van afvoeren met zeewaterstanden, de wind en de toestand van de stormvloedkeringen (open/gesloten).

Om toch te proberen kwantitatieve uitspraken te doen, maken we gebruik van de informatie uit Huthoff et. al. (2020). Daarin is op basis van standaardwaardes voor halveringslengtes voor de Maas en Rijntakken geschat welk effect maximaal haalbaar is per riviertraject. Hierbij zijn stuwkromme-berekeningen uitgevoerd en is er van uit gegaan dat per traject de meest effectieve buitendijkse maatregel is ingezet [Huthoff, 2020].

De waterstandsdalingen uit Huthoff et. al. (2020) zijn gekoppeld aan relevante normtrajecten binnen het studiegebied van RMM van KP ZSS. Dit levert per normtraject een waterstandsreductie op, afgerond op decimeters. Verder is aangenomen dat de verlaging van de waterstand 1-op-1 doorwerkt in het HBN. Een belangrijk uitgangspunt daarbij is dat de effectiviteit van de maatregelen niet wordt beïnvloed door zeespiegelstijging. Met andere woorden: de waterstandsdaling door de maatregelen blijft gelijk in alle zichtjaren. In werkelijkheid is de verwachting dat de waterstandsdaling afneemt naar mate de invloed van de zee toeneemt (benedenstroomse waterstanden zullen stijgen). Dit betekent dat de waterstandsdaling door de maatregelen overschat zal worden voor de benedenstroomse delen van het rivierengebied voor grotere zichtjaren.

#### 7.6.2 *Hydraulische belastingen*

In Huthoff et. al. (2020) zijn voor verschillende riviertrajecten de maximaal haalbare verlagingen op de waterstanden ingeschat (Figuur 110). De waarden uit deze tabellen zijn aan de normtrajecten binnen het studiegebied van RMM van KP ZSS gekoppeld. Zo is per normtraject een waterstandsreductie bepaald, afgerond op decimeters. We nemen aan dat de effectiviteit van de maatregelen niet beïnvloed wordt door zeespiegelstijging. Met andere woorden: de waterstandsdaling door de maatregelen blijft gelijk in alle zichtjaren. In werkelijkheid zal dit niet het geval zijn: de verwachting is dat de waterstandsdaling afneemt naar mate de invloed van de zee toeneemt (benedenstroomse waterstanden zullen stijgen). Dit betekent dat de waterstandsdaling door de maatregelen overschat zal worden voor de benedenstroomse delen van het rivierengebied voor grotere zichtjaren (zie ook de redeneerlijn in hoofdstuk 7.6.1).

De waterstandsdaling van het bovenstaande pakket aan maatregelen is gekoppeld aan de resultaten uit de basisberekeningen voor de waterveiligheidsopgave. De toename in waterstand en de bijbehorende kosten is berekend voor elke combinatie van tijdlijn en zichtjaar. Deze resultaten zijn gebruikt om de vermeden dijkversterkingskosten te bepalen van het pakket aan rivierverruimende maatregelen.



Tabel 20  
Geschatte maximale waterstandeffecten van maatregelen per traject op de Rijntakken (bij een Bovenrijnafvoer van 16000 m<sup>3</sup>/s)<sup>27</sup>.

Traject	Trajectlengte (km)	Halveringslengte (km)	Effecten van maatregelen binnen traject		Effecten van maatregelen benedenstrooms		Alles samen dH gem (cm)
			dH max (cm)	dH gem (cm)	dH max (cm)	dH gem (cm)	
a	b	c	d	e	f	g	h
Bovenrijn	9	15	-19	-10	-54	-44	<b>-50</b>
Boven Waal	17	15	-30	-17	-51	-35	<b>-50</b>
Midden Waal	47	15	-48	-32	-27	-11	<b>-40</b>
Beneden Waal	17	15	-27	-15	0	0	<b>-20</b>
Pannerdensch Kanaal	10	15	-24	-13	-81	-65	<b>-80</b>
Boven NRLEK	11	15	-27	-14	-64	-50	<b>-60</b>
Midden NRLEK	51	15	-61	-41	-33	-13	<b>-50</b>
Beneden NRLEK	21	15	-33	-19	0	0	<b>-20</b>
Boven IJssel	10	15	-30	-16	-82	-66	<b>-80</b>
Midden IJssel	72	15	-80	-59	-54	-16	<b>-80</b>
Beneden IJssel	34	15	-54	-34	0	0	<b>-30</b>

Tabel 21  
Geschatte maximale waterstandeffecten van maatregelen per traject op de Maas (bij een afvoer van 3800 m<sup>3</sup>/s).

Traject	Trajectlengte (km)	Halveringslengte (km)	Effecten van maatregelen binnen traject		Effecten van maatregelen benedenstrooms		Alles samen dH gem (cm)
			dH max (cm)	dH gem (cm)	dH max (cm)	dH gem (cm)	
a	b	c	d	e	f	g	h
Bovenmaas	13	10	-52	-30	-66	-43	<b>-70</b>
Grensmaas	40	5	-66	-54	-93	-15	<b>-70</b>
Plassenmaas	30	10	-84	-55	-68	-26	<b>-80</b>
Peelhorst	34	10	-61	-41	-80	-25	<b>-70</b>
Venloslenk	33	15	-64	-40	-73	-34	<b>-70</b>
Bedijkte Maas	45	15	-66	-44	-53	-18	<b>-60</b>
Getijdenmaas	26	15	-43	-25	-34	-20	<b>-50</b>
Bergsche Maas	21	25	-34	-19	0	0	<b>-20</b>

Figuur 110: Maximaal te verwachten waterstandsval voor de Rijntakken en de Maas o.b.v. het IRM-pakket als gerapporteerd in [Huthoff et al., 2020].

Met de methode zoals beschreven in paragraaf 7.6.1 zijn voor verschillende normtrajecten in de Rijn-Maasmonding de maximale reducties op de waterstand door rivierverruimende maatregelen in het rivierengebied afgeleid. Voor de deelgebied NRLK, Waal en Maas zijn de gemiddelde waterstanden voor de referentiesituatie en de reducties op de waterstand weergegeven in Tabel 112 in Bijlage D.

Voor het gebied van de Rijn-Maasmonding zijn met name de meest benedenstrooms gelegen trajecten het meest interessant. We zien dat de waterstandsval op die trajecten veelal beperkt blijft tot orde 0,2 meter. De daadwerkelijk te verwachten waterstandsval zal naar verwachting afnemen tot enkele centimeters, om meerdere redenen:

- Omdat in Huthoff et al. (2020) een maximaal pakket aan maatregelen is doorgerekend, wat al een bovengrens is.
- Omdat de zeespiegel stijgt. Hoe groter de zeespiegelstijging, hoe minder effectief rivierverruimende maatregelen (zie hoofdstuk 7.6.1);
- Omdat voor de RMM lagere afvoeren dan 16.000 m<sup>3</sup>/s van belang zijn; Omdat een groot aantal belastingcombinaties van belang is, en niet slechts één afvoerniveau;

Een maatregel als extra berging op de Grevelingen kan in het benedenrivierengebied wel degelijk effect hebben in het gebied waar de zee het belangrijkste is. Daarbij zijn wel enkele voorwaarden van belang. Het bergend oppervlak van de Rijn-Maasmonding ligt tussen de 470 en 600 km<sup>2</sup>. Een bergingsmaatregel moet daarom een flinke omvang hebben om substantiële verlaging van de waterstanden te geven. In het geval van berging op de Grevelingen is dit inderdaad het geval, omdat het bergend oppervlak daarmee orde 25% toeneemt. Daarnaast neemt de effectiviteit van een bergingsmaatregel toe naarmate de faalkans van de stormvloedkeringen kleiner wordt. We verwijzen naar hoofdstuk 7.4 voor een uitgebreidere toelichting op een dergelijk type rivierverruimende maatregel.

### 7.6.3 Waterveiligheidsopgave dijken

Uit de vorige paragraaf volgen reducties op de waterstand door rivierverruimende maatregelen in het rivierengebied. In de voorliggende paragraaf geven we een doorkijk naar de invloed van deze maatregelen op de waterveiligheidsopgave in de RMM. In Tabel 112 in Bijlage D is het effect van het pakket rivierverruimende maatregelen op de dijkversterkingskosten gegeven. Per deelgebied uit RMM is het aantal normtrajecten weergegeven, inclusief de bijbehorende cumulatieve lengte. De gemiddelde waterstandstoename voor het betreffende deelgebied t.o.v. de referentie is weergegeven voor elk zichtjaar, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de situatie met en zonder rivierverruimende maatregelen. De bijbehorende nominale kosten (gecorrigeerd voor de restwaarde) zijn berekend volgens de aanpak in paragraaf 7.2. Merk op dat dit alleen de kosten betreft voor dijkversterking. *De kosten voor het realiseren van het pakket aan rivierverruimende maatregelen zijn hierin niet meegenomen.*

In Tabel 112 in Bijlage D is het effect van rivierverruimende maatregelen op de waterstandstoename en nominale kosten per deelgebied voor tijdlijn Extreem bepaald. De deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsch Diep zijn niet opgenomen, omdat rivierverruiming hier nauwelijks invloed heeft.

In Tabel 112 in Bijlage D is te zien dat de effectiviteit van de rivierverruimende maatregelen varieert over de riviertakken, de trajecten en over de zichtjaren. Voor zichtjaar 2100 slaagt het pakket aan rivierverruimende maatregelen er deels in om de benodigde dijkversterkingsopgave in het rivierengebied te beperken. Op de Nederrijn/Lek bedraagt de kostenreductie ongeveer 65%, welke in benedenstroomse richting geleidelijk afneemt naar nul. Dit komt doordat in het overgangsgedebied de invloed vanuit zee steeds groter wordt en de rivierverruimende maatregelen vooral effect hebben op de afvoer gedomineerde gebieden. Op de Waal en de Maas ligt de kostenreductie rond de 30%.

Naarmate de zichtjaren extremer worden, neemt de reductie op de kosten voor alle riviertakken af tot orde 30%. Dit komt omdat de hydraulische belastingen extremer worden, o.a. doordat het overgangsgedebied verder landinwaarts opschuift in toekomstige zichtjaren. Voor de RMM (ofwel het meest benedenstrooms gelegen van het rivierengebied) is de impact van rivierverruiming in alle zichtjaren beperkt. Het percentage vermeden dijkversterkingskosten neemt voor de Waal en Maas harder af dan voor de Nederrijn/Lek naarmate het zichtjaar toeneemt. Dit komt door de beleidsmaatregel 'Lek ontzien' waardoor vanaf 2100 de afvoer richting de Lek is gelimiteerd op 18.000 m<sup>3</sup>/s en de rivierverruimingsmaatregelen effectief blijven.

## 7.7 Invloed zeespiegelstijging bovenstrooms splitsingspunten

Eén van de vragen die nog onbeantwoord is gebleven, is hoe ver de hoge zeespiegelstijgingen op de rivier bovenstrooms doorwerken, misschien zelfs tot bovenstrooms van de splitsingspunten (Pannerdensch Kop en IJsselkop). Omdat we naar het gecombineerde effect van ZSS en afvoerstatistiek kijken, is niet voor elke tijdlijn en zichtjaar eenduidig te bepalen welk deel van de waterstandsstijging is toe te rekenen aan de ZSS en welk deel aan de afvoerstatistiek. Dit is wel mogelijk voor de berekeningen waarbij de afvoerstatistiek hetzelfde is. Deze zijn in oranje gemarkeerd in onderstaande tabel.

Tabel 26 Geselecteerde berekeningsresultaten met gelijke afvoerstatistiek waarmee de invloed van de ZSS in bovenstroomse richting bepaald kan worden.

Zichtjaar	Tijdlijn	Database fysica			Statistiek	
		Zeespiegelstijging	Aanpassing sluitpeil	Afvoer-verdeling	Zeespiegelstijging	Afvoerstatistiek
2023	n.v.t.	0 cm	-	Vast16000	0 cm	Ref2023
2050	Laag	0 cm	-	Vast16000	25 cm	GL2050
	Gematigd	0 cm	-	Vast16000	25 cm	GL2050
	Extreem	0 cm	-	Vast16000	25 cm	WH2050
	Zeer extreem	50 cm	-	Vast18000	50 cm	WH2050
2100	Laag	50 cm	-	Vast18000	50 cm	GL2050
	Gematigd	50 cm	-	Vast18000	75 cm	GL2100
	Extreem	100 cm	-	Vast18000	100 cm	WH2100
	Zeer extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	WH2100
2150	Laag	50 cm	-	Vast18000	75 cm	GL2050
	Gematigd	100 cm	-	Vast18000	131 cm	GL2150
	Extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	180 cm	WH2150
	Zeer extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	350 cm	WH2150
2200	Laag	100 cm	-	Vast18000	100 cm	GL2050
	Gematigd	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	GL2200
	Extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	300 cm	WH2200
	Zeer extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	537 cm	WH2200

We hebben twee locaties in de buurt van de splitsingspunten op de Rijntakken geselecteerd: Bommel (net bovenstrooms van Nijmegen langs de Waal) en Mook (op de Maas). Voor deze locaties hebben we voor de hierboven met oranje gemarkeerde uitgangspunten Hydra-NL berekeningen geanalyseerd. Door een vergelijking te maken tussen de uitkomsten voor tijdlijn Zeer Extreem en tijdlijn Extreem krijgen we een indicatie van de doorwerking van de ZSS rondom de splitsingspunten.

Uit de resultaten volgt dat ter hoogte van de splitsingspunten bij Bommel (vak 43003034 op de Waal) het effect van de ZSS in de orde van enkele centimeters ligt (Tabel 27).

Tabel 27 Hydra-NL resultaten voor locatie Bommel langs de Waal (vak 43003034).

Zichtjaar	Tijdlijn	Database fysica			Statistiek		Verschil in waterstand tussen tijdlijn Zeer Extreem en tijdlijn Extreem		
		Zeespiegelstijging	Aanpassing sluitpeil	Afvoer-verdeling	Zeespiegelstijging	Afvoer-statistiek	T1.000 jaar	T10.000 jaar	T100.000 jaar
2100	Extreem	100 cm	-	Vast18000	100 cm	WH2100	~0	~0	0.05
	Zeer extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	WH2100			
2150	Extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	180 cm	WH2150	0.01	-0.02	-0.01
	Zeer extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	350 cm	WH2150			
2200	Extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	300 cm	WH2200	0.01	0.04	0.03
	Zeer extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	537 cm	WH2200			

Ter hoogte van Mook (vak 36001017) op de Maas ligt het effect van de toename van de ZSS ook in de orde van enkele centimeters (Tabel 28).

Tabel 28 Hydra-NL resultaten voor locatie Mook langs de Maas (vak 36001017).

Zichtjaar	Tijdlijn	Database fysica			Statistiek		Verschil in waterstand tussen tijdlijn Zeer Extreem en tijdlijn Extreem		
		Zeespiegelstijging	Aanpassing sluitpeil	Afvoer-verdeling	Zeespiegelstijging	Afvoer-statistiek	T1.000 jaar	T10.000 jaar	T100.000 jaar
2100	Extreem	100 cm	-	Vast18000	100 cm	WH2100	~0	0.04	0.07
	Zeer extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	200 cm	WH2100			
2150	Extreem	200 cm	125 cm	Vast18000	180 cm	WH2150	0.03	-0.02	-0.05
	Zeer extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	350 cm	WH2150			
2200	Extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	300 cm	WH2200	0.03	0.03	0.03
	Zeer extreem	300 cm	250 cm	Vast18000	537 cm	WH2200			

Op basis van deze resultaten zien we geen aanleiding om de effecten van ZSS te beschouwen bovenstrooms van de splitsingspunten. We merken op dat deze analyse gericht is op de (hoog)waterveiligheid. De implicaties voor vaarwegbeheer, de watervraag (i.e. het effect bij lage afvoeren) of andere functies zijn verder niet onderzocht.

## 7.8 Invloed zeespiegelstijging op morfologie

Het doel is van de voorliggende aanvullende analyse is om inzicht te geven in de toekomstige bodemveranderingen van de Rijntakken, de Maas en de Rijn-Maasmonding met de daarbij horende hoogwaterstanden als gevolg van veranderingen in de afvoerfrequentie en zeespiegelstijging. Eerst geven we een inschatting van de invloed op de morfologie van de rivierbodem (paragraaf 7.8.1) en vervolgens op de morfologie van de Rijn-Maasmonding (paragraaf 7.8.2).

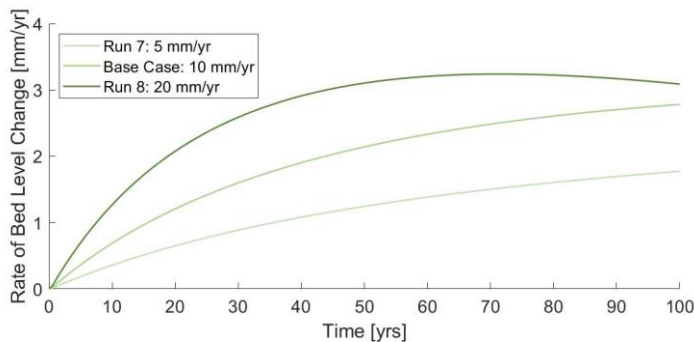
### 7.8.1 Morfologie rivierbodem (Rijntakken en Maas)

De huidige rivierbodem in de Rijntakken en de Maas is niet in evenwicht. Door rivieringrepen in de afgelopen eeuwen treedt grootschalige bodemerosie op. Binnen het programma Integraal Rivier Management (IRM) is één van de doelen om huidige erosieve trends van de bodem te stoppen. Het is echter nog niet duidelijk hoe en wat het effect hiervan zal zijn op de waterstanden. In de huidige basisset voor KP ZSS zijn in dit gebied geen bodemveranderingen opgenomen. Voor de schatting van de bodemveranderingen door zeespiegelstijging nemen we als uitgangspunt dat de

erosieve trends worden gestopt. De situatie zonder IRM (systeem)maatregelen is meegenomen in de beschouwing voor de volledigheid.

Veranderingen in de afvoerfrequentie en stijging van de zeespiegel zullen leiden tot een nieuw evenwicht in de rivier. Volgens de evenwichtsbenadering in de morfologie leidt zeespiegelstijging tot dezelfde mate van stijging van het zomerbed. Met andere woorden, 1 m zeespiegelstijging leidt in een nieuw morfologisch evenwicht tot 1 m bodemstijging. De morfologische tijdschaal voor een rivier zoals de Waal ligt echter in de ordegrrootte van  $10^3$  jaar voor veranderingen in de zeespiegel en afvoerfrequentie [De Vries, 1975]. Door de continue verandering van de afvoerfrequentie en de zeespiegel zal de rivierbodem zich blijvend bevinden in de overgangsfase naar een nieuw evenwicht. Voor de veranderingen in de afvoerfrequentie zal dit voor alle scenario's leiden tot een afname van de bodemhelling, met erosie in het bovenstroomse trajecten van de riviertakken en aanzanding/minder erosie in de benedenstroomse trajecten [Arbos et al., 2023]. Zeespiegelstijging leidt tot een aanzandingsgolf die van beneden- naar bovenstrooms migreert [Arbos et al., 2023].

In de meeste publicaties wordt de bodemverandering bepaald tot 2100. Modelberekeningen laten zien dat de bodemveranderingssnelheid door een constante zeespiegelstijging min of meer stabiliseert na 50 jaar (Figuur 111). We nemen daarom aan dat de bodemverandering tussen 2050 en 2100 representatief is voor de ontwikkeling tot 2200. Om de effecten van een niet-lineaire zeespiegelstijging mee te kunnen nemen, zullen numerieke berekeningen moeten worden uitgevoerd.



Figuur 111: De bodemveranderingssnelheid voor een rivier zoals de Waal voor verschillende niveaus van de snelheid van de zeespiegelstijging [Scherpbier, 2022].

De gevolgde werkwijze is als volgt:

- We schatten de bodemveranderingen in op basis van [Arbos et al. 2023]. Hierin zijn de meest recente inzichten van klimaatverandering en morfologische ontwikkelingen meegenomen. Met een SOBEK-RE model zijn voor verschillende afvoerscenario's (WL/WH/GL/GH) en zeespiegel-stijgingsscenario's (KNMI '14, RCP4.5 ~ Middel en RCP8.5 ~ Extreem) de effecten op de bodemligging in de Rijn en Waal bepaald. We gaan uit van een trajectgemiddelde bodemverandering. De resultaten laten echter zien dat er veel ruimtelijke variatie is in de bodemligging. Rond de vaste laag bij St. Andries (Waal) bevindt zich een kantelpunt. Bovenstrooms van St. Andries treedt in de referentieberekening erosie op en benedenstrooms aanzanding. Op basis van de huidige bodemtrends verwachten we een soortgelijk kantelpunt in de andere riviertakken.
- Voor extrapolatie vanaf 2100 en verder is uitgegaan van de aanzandings-snelheid tussen 2050-2100. Hierbij is het niet-lineaire gedrag van de zeespiegelstijging en de bijbehorende reactie van de bodemligging daarop genegeerd.

- De mate van bodemverandering in andere takken dan de Waal is verhoudingsgewijs bepaald op basis van de morfologische tijdschaal van elke tak [Arbos et al., 2023].
- De verwachting is dat de Maas en de Nederrijn-Lek soortgelijk gedrag zullen laten zien als de Waal met de aanname dat de stuwen geen additionele impact zullen hebben op de bodemverandering.
- De aanname is dat in de IJssel geen bodemverandering zal optreden als gevolg van zeespiegelstijging (we verwaarlozen het effect van de herverdeling van afvoer en sediment bij de splitsingspunten).
- Het effect van de bodemhoogte verandering op de hoogwaterstanden is ingeschat op basis van Levelt (2022). In die studie zijn de Rijntakken uniform verhoogd met 0,5 m en de Maas met 0,25 m.

De verwachte bodemveranderingen zijn bepaald voor alle tijdlijnen en zichtjaren. Op basis van die gegevens is een inschatting gemaakt van de resulterende waterstandsveranderingen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de informatie uit Levelt (2022). Hierbij is geen rekening gehouden met variaties in bodemverandering over en tussen de takken en de daarbij horende veranderingen in de afvoerdeling. Het gaat om een ordegrootte schatting. De resultaten zijn verzameld in Tabel 29.

Tabel 29 Inschatting van de waterstandsstijging in de aanzandende trajecten op basis van Levelt (2022).

	Zichtjaar	Zonder IRM	Laag	Gematigd	Extreem	Zeer Extreem
Beneden-Waal (rkm 933-951)	2050	0.01		0.00	0.01	0.01
	2100	0.02	0.05	0.06	0.03	0.03
	2150	0.04	0.10	0.11	0.05	0.05
	2200	0.05	0.15	0.17	0.07	0.07
Nederrijn vanaf Driel – Lek (rkm 890-970)	2050	0.04		0.00	0.01	0.01
	2100	0.12	0.02	0.03	0.02	0.02
	2150	0.19	0.05	0.06	0.02	0.02
	2200	0.27	0.07	0.08	0.03	0.03
Beneden-IJssel (rkm 970-1005)	2050	0.02				
	2100	0.06	0.02	0.02	0.00	0.00
	2150	0.10	0.06	0.06	0.02	0.02
	2200	0.14	0.09	0.09	0.02	0.02
Benedenstroomse Maas (rkm 201-248)	2050	0.03				
	2100	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	2150	0.13	0.00	0.01	0.00	0.00
	2200	0.18	0.01	0.01	0.00	0.00

Zoals te zien uit de tabel is de invloed van zeespiegelstijging het grootst (orde +0,15 m) op de Beneden-Waal voor tijdlijnen Laag en Gematigd in zichtjaar 2200. De verwachting is dat dit veroorzaakt wordt door net een andere afvoerfrequentielijn. De invloed op de overige takken (voor alle tijdlijnen en zichtjaren) blijft beperkt tot maximaal +0,10 m) en ligt veelal in de orde van enkele centimeters.

De verschillen in de kolom "Zonder IRM" zijn het grootst, omdat we er in de overige zichtjaren en tijdlijnen vanuit gegaan zijn dat de huidige erosieve trends van de bodem door IRM gestopt zijn.

We merken op dat de gepresenteerde getallen een eerste, globale inschatting zijn van de bodem- en waterstandsveranderingen. Voor een betrouwbaardere inschatting is het advies om morfologische berekeningen uit te voeren om het effect van bijv. de hier gehanteerde uitgangspunten te toetsen.

### 7.8.2 Morfologie Rijn-Maasmonding

De bodemontwikkeling van de Rijn-Maasmonding wordt bepaald door verschillende mechanismen. Cox et al. (2021b) hebben een voorspelling gemaakt van de bodemontwikkeling in de Rijn-Maasmonding, rekening houdend met veranderingen in de sedimenttoevoer, klimaatverandering, zeespiegelstijging en baggeractiviteiten. We vatten hier de belangrijkste (relevante) resultaten uit Cox et al. (2021a,b) samen.

Het sedimentbudget van de RMM en de daarbij horende bodemveranderingen worden grotendeels bepaald door baggeractiviteiten in het gebied. Het gebaggerde sediment wordt tot nu toe onttrokken uit het systeem en het volume is significant groter dan de sedimenttoevoer vanuit de rivieren en de kust. Dit heeft tussen 2000-2020 geleid tot een negatieve sedimentbalans (Figuur 112) en erosie in alle takken met uitzondering van het Spui en Hollands Diep (Figuur 113).



Figuur 112: (a) Bijdragen van de rivieren (paars), kust (donkergroen) en baggeractiviteiten (groen) aan het sedimentbudget. (b) Het jaarlijkse sedimentbudget. (c) Het cumulatieve jaarlijks sedimentbudget [Cox et al.,2021b].



Figuur 113: De gemiddelde bodemverandering tussen 2000 en 2019 op basis van het cumulatieve sedimentbudget [Cox et al.,2021a].

De ontwikkeling van de RMM wordt grotendeels bepaald door socio-economische factoren. Deze hebben onder andere impact op de baggerdiepte en -volumes. De verwachting is dat schipdimensies zullen toenemen, wat leidt tot een toename van de baggervolumes. Daarnaast zal door zeespiegelstijging de sedimenttoevoer vanuit de kust toenemen en door afvoerveranderingen ook de sedimenttoevoer vanuit de rivieren (zie de toenames in Figuur 112 voor zichtjaren 2050 en 2085). Dit sediment belandt voornamelijk in de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg waar het wordt weggebaggerd en dit leidt tot sedimenthonger en erosie in de andere takken. Op dit moment is het baggervolume veel groter dan het aanzandingsvolume en de verwachting is dat dit in de toekomst ook zal blijven. Een grote aanpassing in het baggerbeleid is nodig om tot een positieve sedimentbalans te komen en aanzanding in het systeem te geven. Wanneer baggeractiviteiten buiten beschouwing worden gelaten, zal voornamelijk aanzanding optreden in de Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas en Lek (zie het donkerblauwe gebied in Figuur 114, dat een indicatieve verhoging van de bodem weergeeft in de orde van 5-10 m tot aan 2085).



Figuur 114: Cumulatieve bodemverandering 2018-2085 zonder baggeractiviteiten [Cox et al.,2021b].

De bodemontwikkeling van de RMM wordt dus grotendeels bepaald door de hoeveelheid baggeractiviteit. Richting de toekomst wordt verwacht dat:

- Zeespiegelstijging zorgt voor een toename van de sedimenttoevoer vanuit de kust;
- Afvoerveranderingen zorgen voor een toename van de sedimenttoevoer vanuit de rivieren;



- Baggerhoeveelheden toenemen door hogere sedimenttoevoer en grotere schipdimensies.

De huidige trend is voornamelijk erosie (Figuur 113), met op een paar plekken beperkte aanzanding (1-10 cm). Wanneer wordt gestopt met baggeren kan potentieel 5-10 m aanzanding optreden, wat leidt tot eenzelfde waterstandsverhoging in het gebied. We achten dit echter weinig realistisch, aangezien het gebied ook in de toekomst voor scheepvaart toegankelijk zal moeten blijven. Toekomstige sedimentmanagementstrategieën zijn zeer bepalend voor de bodemontwikkeling in de RMM. Op basis van deze resultaten en het huidige sedimentmanagement is er geen reden aan te nemen dat de bodemontwikkeling een negatieve invloed heeft op de hoogwaterveiligheid.

## 8 Regionaal beeld en conclusies

### 8.1 Inleiding

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

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

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

Voor vijf verschillende waarden van zeespiegelstijging (0,5, 1, 2, 3, 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.<sup>21</sup>

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 éérder optreedt (bijvoorbeeld 2 m in 2100). Naarmate de zeespiegelstijging zich sneller ontwikkelt zal de benodigde aanpassing *per versterkingsstap* aan de waterkeringen groter zijn, het *anta!* 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 aan de voet van de waterkering en de bodemdaling eronder zijn twee andere factoren die variëren in de tijd. Ook zonder zeespiegelstijging zullen deze twee factoren zorgen voor een waterveiligheidsopgave. Op basis van bovenstaande constatering wordt het beeld voor de kosten besproken aan de hand van een bepaalde mate van zeespiegelstijging, morfologie en bodemdaling (onder de

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

waterkering) passend bij het zichtjaar 2200. We merken op dat de kosten in deze studie zijn bepaald op basis van een perfecte voorspelling van de zeespiegelstijging. In werkelijkheid is de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt onzeker en wordt geprobeerd die binnen een ontwerpproject zo goed mogelijk in te schatten voor een periode van 50 jaar (levensduur ontwerp).

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

## **8.2 Invloed van zeespiegelstijging op de hydraulische belastingen**

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

Vanwege de omvang is het gebied opgedeeld in deelgebieden die zich (min of meer) op vergelijkbare wijze gedragen in termen van hydraulische belastingen: Nederrijn-Lek, Waal, Maas, Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet & Hollandsch Diep. Deze indeling hanteren we bij de duiding van de resultaten.

### *8.2.1 Impact op de waterstanden*

Afhankelijk van de mate van zeespiegelstijging (in combinatie met de afvoerverdeling en de morfologie) werkt de invloed van de zeespiegelstijging op een andere manier door. Voor verschillende mate van zeespiegelstijging geldt dat de aanwezigheid van de Europoortkering een belangrijke reducerend effect op de waterstanden. Dit effect is het grootst direct achter de stormvloedkeringen en neemt af in bovenstroomse richting. Naarmate de zeespiegel verder stijgt (zeker bij de hoogste zeespiegelstijgingen van 3 en 5 m) gaat het overlopen van de Europoortkering een steeds belangrijkere rol spelen en wordt het waterstands-reducerende effect van de kering steeds minder.

#### *Zeespiegelstijging van 1 m passend bij zichtjaar 2200*

Bij een zeespiegelstijging van 1 m in 2200 is het effect van de zeespiegelstijging op de riviertakken minder groot dan in de delta. De toename in waterstanden voor de riviertakken is grofweg 30% van de zeespiegelstijging (dat neemt af tot praktisch 0% bij de splitsingspunten). Dit wordt ook deels veroorzaakt door een toename van de rivierafvoeren. In de deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en het Haringvliet & Hollandsch Diep werkt de zeespiegelstijging tussen de 90 en 100% door.

#### *Zeespiegelstijging van 2 m passend bij zichtjaar 2200*

Met name voor de deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en het Haringvliet & Hollandsch Diep werkt een zeespiegelstijging van 2 m nagenoeg volledig door in de waterstanden. In de overige drie deelgebieden nemen de waterstanden met grofweg 30 tot 40% van de zeespiegelstijging toe (dat neemt af tot praktisch 0% bij de splitsingspunten). Dit is logisch omdat de afstand tot de zee groter is en de invloed van de afvoer groter wordt naarmate locaties meer in bovenstroomse richting liggen.

*Zeespiegelstijging van 3 m passend bij zichtjaar 2200*

Bij 3 m komt de zeespiegelstijging nagenoeg volledig terug komt in de toename van de waterstanden voor Rijnmond-Drechtsteden en het Haringvliet & Hollandsch Diep. Naast de stijging van de zeespiegel gaan ook andere factoren een steeds duidelijkere rol spelen, zoals de toename van de afvoeren van de rivieren, of de toename van het sluitpeil van de Maeslantkering. Op de riviertakken werkt de zeespiegelstijging meer door op de waterstanden dan bij lagere mate van zeespiegelstijgingen, hoewel daarbij ook de toegenomen rivierafvoeren een rol zullen spelen.

In alle deelgebieden zijn de stijgingen in de waterstand (vaak) net wat hoger dan alleen de zeespiegelstijging. Dit komt omdat de verandering van de afvoer voor de verschillende zichtjaren zorgt voor een extra toename t.o.v. de toename door de zeespiegelstijging. In de deelgebieden waar de invloed van de zee minder is (Nederrijn-Lek, Waal en Maas) zijn de toenames van de waterstanden in zichtjaar 2200 duidelijk minder groot dan in de andere twee deelgebieden (Rijnmond-Drechtsteden en het Haringvliet & Hollandsch Diep).

*Zeespiegelstijging van +/-5 m passend bij zichtjaar 2200*

Bij een zeespiegelstijging van +/-5 m wordt het deelgebied Rijnmond-Drechtsteden gedomineerd door de invloed van de zeespiegelstijging. De rol van de zeespiegel op het Haringvliet & Hollandsch Diep is in eerste instantie meer indirect van aard: als de Europoortkering vaker sluit, zal het gebied achter de stormvloedkeringen vaker vollopen door de rivierafvoer (die ook toeneemt). Vanaf een bepaald niveau van zeespiegelstijging lopen de stormvloedkeringen en de Haringvlietsluizen over en vult het achterliggende gebied zich ook met zeewater.

Bij een zeespiegelstijging van +/-5 m is de toename van de waterstanden minder dan de toename van de zeespiegelstijging. Dit wordt veroorzaakt door het niet volledig verwerken van de zeespiegelstijging in de fysica, maar deels via de statistiek. Dit leidt tot enige onderschatting van waterstanden bij de norm en van de hydraulische belastingniveaus bij +/-5 m zeespiegelstijging. Dit geldt niet bij zeespiegelstijgingen tot ongeveer 3 m, waarbij de zeespiegelstijging nagenoeg volledig terug komt in de toename van de waterstanden.

*8.2.2 Impact op de hydraulische belastingniveaus voor golfoverslag*

In Tabel 30 is de gemiddelde stijging van de hydraulische belastingniveaus voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging uiteengezet voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied. Daarbij is de zeespiegelstijging telkens gekoppeld aan het resultaat voor een bepaalde tijdlijn en passend bij zichtjaar 2200. 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 niet gerapporteerd, omdat deze zijn afgeleid voor zichtjaar 2100.

Tabel 30: Gemiddelde stijging van het hydraulisch belastingniveau voor golfoverslag (HBN) ten opzichte van het hydraulisch belastingniveau in 2050 (met daarin in alle gevallen een zeespiegelstijging van 0,25 m ten opzichte van 1995) voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging (ZSS) ten opzichte van 1995 voor de Rijn-Maasmonding en het rivierengebied. De bodemdaling in het gebied past 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)				
		RDST	HVHD	NRLK	WAAL	MAAS
1,0 m	0,75 m	0,8 m	0,8 m	-0,2 m <sup>22</sup>	0,3 m	0,3 m
2,0 m	1,75 m	1,9 m	2,1 m	0,1 m	0,6 m	0,8 m
3,0 m	2,75 m	3,3 m	3,4 m	1,2 m	1,6 m	2,5 m
5,4 m	5,15 m	5,1 m	4,5 m	1,6 m	2,0 m	3,0 m

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 2,1 m voor deelgebied Haringvliet-Hollandsch Diep (deelgebied HVHD).

Het is nauwelijks mogelijk om de toenames in het hydraulisch belastingniveau voor alle deelgebieden direct te koppelen aan de zeespiegelstijging, omdat ook andere factoren zoals de afvoerstatistiek, de afvoerverdeling en het sluitpeil van de stormvloedkeringen een rol spelen, evenals de windgolven. Wat wel te zien is, is dat Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet & Hollandsch Diep vergelijkbare resultaten laten zien. Deze deelgebieden worden beiden gedomineerd door de invloed van de zeespiegelstijging. Voor Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet & Hollandsch Diep is dus wel een duidelijke koppeling aanwezig met de zeespiegelstijging.

De andere drie deelgebieden (Nederrijn-Lek, Waal en Maas) worden niet alleen door de zee beïnvloed, maar ook door de afvoer. De deelgebieden Nederrijn-Lek en Waal geven vergelijkbare resultaten (al heeft een andere afvoerverdeling voor het ontzien van de Nederrijn-Lek op de Nederrijn-Lek een verlagend effect en op de Waal een verhogend effect). De Maas gedraagt zich duidelijk anders dan de andere twee afvoergedomineerde gebieden en is gevoeliger voor de invloed van de afvoer in extremere tijdlijnen en hogere zichtjaren (in de zin dat we grotere verschillen zien door een andere afvoerstatistiek voor een bepaald scenario). Verder worden de resultaten met 5,4 m zeespiegelstijging (net als de bij de waterstanden) gekleurd doordat niet de volledige zeespiegelstijging is verwerkt in de fysica, maar met name via de statistiek. Dit leidt tot enige onderschatting van waterstanden bij de norm en van de hydraulische belastingniveaus bij 5,4 m zeespiegelstijging. Ook het aftoppen van de Rijnafoeren werkt door in de resultaten voor de bovenstrooms gelegen gebieden op de Rijntakken.

In zijn algemeenheid is het beeld dat de verschillen in de hydraulische belastingniveaus niet heel anders zijn de verschillen in de waterstanden. We constateren dat de gemiddelde verschillen in de hydraulische belastingniveaus wat groter zijn dan de verschillen in de waterstanden en dat de hydraulische belastingniveaus ook wat meer variatie vertonen. De grootste verschillen tussen de hydraulische belastingniveaus en de waterstanden treden op voor Rijnmond-Drechtsteden, waar de invloed van de zeespiegelstijging (toenemende waterdiepten) i.c.m. wind zorgt voor grotere golven en daarmee hogere hydraulische belastingniveaus. Ook op de Maas zien we in zichtjaar 2150 en 2200 nog verschillen tussen de toenames van het

<sup>22</sup> Deze afname is het gevolg van het feit dat ook gerekend is met een andere afvoerverdeling, waardoor minder water over de Nederrijn-Lek stroomt (zie voor details paragraaf 3.2.1).

hydraulisch belastingniveau en de toenames van de waterstand van enkele decimeters.

### 8.2.3 Werking van de Europoortkering

In deze studie is een hydraulisch model gehanteerd waarin is uitgegaan van de Europoortkering in de huidige situatie en daarmee voldoet aan de huidige overstromingskansnorm. Door zeespiegelstijging zullen de bewegende delen van de Maeslantkering gaan overlopen vanaf een niveau van NAP+5 m en de bewegende delen van de Hartelkering vanaf NAP +3 m. De verbindende kering tussen de Maeslant- en de Hartelkering is als niet overstroombaar gemodelleerd. De aanname dat de Maeslantkering nog kan functioneren ten tijden dat deze overstroomt, dient verder onderzocht te worden, evenals de constructieve sterkte in deze situaties. De Hartelkering is overstroombaar ontworpen.

De Maeslant- en Hartelkering zullen door zeespiegelstijging bij handhaving van het huidige sluitpeil vaker moeten sluiten. Door het sluitpeil te verhogen zullen deze keringen bij eenzelfde mate van zeespiegelstijging minder vaak hoeven te sluiten wat de natuurlijke dynamiek in het estuarium ten goede komt alsmede de slijtage van de kering beperkt. Het nadelige effect van een verhoogd sluitpeil is de toename van de hydraulische belastingen op de achterliggende keringen (hoewel dat effect beperkt is gebleken rond de normfrequenties van de waterkeringen) alsmede frequentere inundatie van buitendijkse gebieden.

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

Tabel 31 geeft een indicatie van het aantal sluitingen als functie van de zeespiegelstijging, zoals bepaald in [HKV, 2022a].

Tabel 31: Sluitfrequenties Maeslant- en Hartelkering bij verschillende niveaus van zeespiegelstijging passend bij zichtjaar 2200.

ZSS t.o.v. 1995 [m+NAP]	Sluitfrequentie per jaar
0	1/18
1	6
2	1
3	1/6
5,4	161
Legenda	
	Geen aangepast sluitpeil
	Sluitpeil + 125 cm
	Sluitpeil + 250 cm

Opgemerkt wordt dat het vaker sluiten van de Maeslant- en Hartelkering ook effect heeft op andere functies, zoals het beheer en onderhoud van de Maeslant- en Hartelkering, natuur/ecologie en morfologie. Deze effecten zijn in deze studie niet onderzocht.

### 8.2.4 Werking van de Hollandsche IJsselkering

Voor de Hollandsche IJsselkering geldt een vergelijkbare redenering als voor de Europoortkering. Deze kering houdt een groot deel van de zeespiegelstijging tegen, maar dit wordt steeds minder naarmate de zeespiegel verder stijgt. Een belangrijk verschil met de Maeslantkering is dat de HIJK in de berekeningen een kleinere faalkans heeft (1/2000 per sluitvraag) en daardoor goed zijn werk als stormvloedkering doet. Vanaf een niveau van NAP +5 m gaat de Hollandsche Kering overlopen, net als de Maeslantkering. Een ander verschil met de Maeslantkering is dat het beschikbare bergende volume achter de Hollandsche IJsselkering veel kleiner is dan dat achter de Europoortkering. Dit betekent dat bij zeewaterstanden die boven NAP +5 m komen, de Hollandsche IJssel ook snel gevuld zal worden met zeewater. De rol van het overlopen van de Hollandsche IJsselkering is dan ook duidelijk zichtbaar in de resultaten.

## 8.3 Versterkingsopgave per watersysteem

De impact van zeespiegelstijging op de versterkingsopgave voor de dijken en kunstwerken die onderdeel zijn van de primaire waterkeringen in Rijnmond-Drechtsteden en het Rivierengebied 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.

De gemiddelde opgave per dijktraject is bepaald op basis van de verschillende dijkvakken per dijktraject.

In Tabel 32 is de gemiddelde hoogteopgave ten opzichte van de huidige situatie (zichtjaar 2023) voor het hele Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied weergegeven, waarbij is gemiddeld over alleen de te versterken dijkvakken per dijktraject en vervolgens over alle dijktrajecten in het gebied.

De gemiddelde hoogteopgave is lager dan de mate van zeespiegelstijging. Bij een zeespiegelstijging van 1 m en 3m is de gemiddelde hoogteopgave van respectievelijk 0,6 m en 2,3 m berekend. Bij een zeespiegelstijging van 1 m is voor een aantal trajecten nog geen hoogteopgave berekend: langs de Nederrijn-Lek (alle trajecten bovenstrooms van 44-1 en 43-2) en langs de Maas (36-1, 36-4, 36a-1, 37-1, 38-2 en 41-4). Voor deze trajecten is een zekere resthoogte aanwezig. Dit komt doordat deze trajecten meer bovenstrooms gelegen zijn waar de zeespiegelstijging geen of beperkt invloed heeft. Bij een zeespiegelstijging van 3 m is voor alle trajecten een hoogteopgave berekend.

Tabel 32: 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.

Zeespiegelstijging t.o.v. 1995 [m]	Gemiddelde hoogteopgave ten opzichte van 2023 over alleen te versterken trajecten voor RMM		
	Minimum	gemiddeld	maximum
1,0 m	0,2	0,5	1,6
2,0 m	0,5	1,1	2,6
3,0 m	1,2	2,3	3,9
5,4 m	1,8	3,1	5,3

De versterkingsopgave voor macrostabiliteit (benodigde taludverflauwing of binnenbermbreedte) leidt -gemiddeld over alleen de te versterken trajecten- tot een verbreding van de dijkbasis van 10 tot 15 m bij een zeespiegelstijging van 1 en 3 m ten opzichte van 1995. De maximale opgave is circa 30 m voor een enkel traject bij een zeespiegelstijging van 5,4 m t.o.v. 1995.

De benodigde verbreding van de dijkbasis (extra kwelweglengte) voor het faalmechanisme piping leidt tot grotere opgaven. 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 50 m en 100 m, met een maximum van meer dan 100 m.

Het faalmechanisme macrostabiliteit en piping leidt bij het merendeel van de dijktrajecten tot een significante opgave. Het ruimtebeslag dat bij de versterkingsopgave hoort is afhankelijk van de gekozen versterkingsstrategie (volledige grondoplossing of een combinatie met constructieve of innovatieve maatregelen).

#### **8.4 Kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging**

De kosten voor de waterveiligheidsopgave voor de dijken en kunstwerken in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied 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 33 in paragraaf 8.4.1
2. Kosten ten opzichte van 2023 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging; zie Tabel 34 in paragraaf 8.4.2
3. Kosten ten opzichte van de situatie met het "systeem op orde" tot en met zichtjaar 2050 voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging; zie Tabel 35 in paragraaf 8.4.3

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

##### *8.4.1 Kosten tot en met 2050 voor Systeem op orde*

De kosten voor Systeem op orde zijn opgenomen in Tabel 33. Deze zijn ongeveer 10,7 miljard euro voor alle primaire waterkeringen aan dijken en de beschouwde kunstwerken in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied. Deze kosten worden voor circa 90% bepaald door de dijken en voor 10% door de kunstwerken (voornamelijk de stormvloedkeringen). De kosten worden niet gecorrigeerd voor reststerkte, om ervoor te zorgen dat de kosten voor het 'op orde' komen buiten de analyses van het KP ZSS blijven. De tijdlijnen worden immers met deze kosten gecorrigeerd (zie paragraaf 8.4.4).

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



Tabel 33: Nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied voor systeem op orde tot en met 2050. Voor Systeem op orde zijn dit de kosten tot en met 2050, waarbij rekening is gehouden met reststerkte na 2050.

ZSS ten opzichte van 1995 (0,25 – 0,5 m)	Nominale kosten in miljard euro		
	Totaal dijken en kunstwerken	Dijken	Kunstwerken
Systeem op orde	10,7	9,6	1,1

#### 8.4.2 Kosten voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van 2023

De kosten voor het versterken van de dijken en kunstwerken (inclusief vervanging van de stormvloedkeringen) in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zijn bepaald voor een zeespiegelstijging van 1 m, 2 m, 3 m en 5,4 m. In Tabel 34 zijn de kosten voor zichtjaar 2200 opgenomen ten opzichte van 2023, waarbij de dijken en kunstwerken uiteindelijk precies voldoen aan de norm in zichtjaar 2200 voor 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 38,4 miljard euro voor 1 m zeespiegelstijging tot bijna 49,6 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 34: Nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging met uitgangspunt zichtjaar 2200 (ten behoeve van bodemdaling en een vijftigjarige versterkingscyclus) ten opzichte van de huidige situatie 2023. 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	38,4	26,0	12,4
2,0 m	42,8	30,3	12,5
3,0 m	49,6	36,9	12,7
5,4 m	55,3	41,2	14,1

De kosten worden voornamelijk bepaald door versterking van de dijken (70 - 75%) en in mindere mate door de kunstwerken (25 - 30%).

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

Gevraagd is om ook inzicht te bieden in de bijdrage van alleen zeespiegelstijging op de versterkingskosten. In Tabel 35 staan de nominale kosten in zichtjaar 2200 voor het versterken van de dijken en kunstwerken. Daarbij voldoen deze precies aan de norm bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging en verminderd met de totale

(niet gecorrigeerde) kosten die vóór 2050 gemaakt worden (tijdelijk Laag) om het systeem op orde te brengen. Opgemerkt wordt dat de opgave voor de dijken - naast zeespiegelstijging en toename van de rivierafvoeren - ook wordt veroorzaakt door autonome bodemdaling. Dat betekent dat alleen bodemdaling ook tot een opgave zal leiden.

Tabel 35: Toename van de nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken voor Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200 ten opzichte van de nominale kosten voor systeem op orde met zichtjaar 2050.

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	27,7	16,4	11,3
2,0 m	1,75 m	32,1	20,7	11,4
3,0 m	2,75 m	39,0	27,3	11,6
5,4 m	5,15 m	44,6	31,6	13,0

#### 8.4.4 Kosten per te versterken km dijk

De kosten per kilometer te versterken dijk zijn een goede parameter om de orde-grootte kosten voor zeespiegelstijging in perspectief te plaatsen. De kosten per kilometer geven ook inzicht hoe deze zich verhouden tot de huidige dijkversterkingskosten binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (anno 2022), gegeven het huidige prijspeil. In Tabel 36 staat per niveau van zeespiegelstijging het aantal te versterken kilometers<sup>23</sup> en de nominale kosten per km op basis van het totaal aantal te versterken km gesommeerd over meerdere versterkingsrondes.

Tabel 36: Nominale kosten in miljoen euro per kilometer te versterken dijk o.b.v. de lengte van het te versterken aantal kilometer dijk langs de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied 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.

ZSS t.o.v. 1995	Aantal km te versterken (totaal areaal 1183 km)	Nominale kosten in mln. euro per km te versterken dijk
T/m 2050 Systeem op orde	639	15
1,0 m	1004	26
2,0 m	1046	29
3,0 m	1054	35
5,4 m	1056	39

De gemiddelde kosten per te versterken km dijk zijn bij 1,0 m zeespiegelstijging ongeveer 26 miljoen euro (verdeeld over meerdere versterkingsrondes) en bij 3,0 m zeespiegelstijging ongeveer 35 miljoen euro. 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

<sup>23</sup> Hierbij is gesommeerd over de vaklengte voor alle te versterken dijkvakken in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied.

(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. Bij een zeespiegelstijging van +/-5 m geldt dit voor 10% van de versterkingsmomenten. Dit gaat met name op voor de benedenstrooms-gelegen trajecten, waar in 50 jaar meer dan 2 m zeespiegelstijging optreedt.

#### 8.4.5 Gemiddelde jaarlijkse kosten per m zeespiegelstijging

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

De totale kosten voor "systeem op orde" van de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied bedragen ongeveer 10,7 miljard euro. Dat is omgerekend gemiddeld 395 miljoen euro per jaar, zie Tabel 37. De jaarlijkse kosten om alle dijken en kunstwerken te laten voldoen aan een bepaald niveau van zeespiegelstijging zijn berekend o.b.v. de periode 2050 tot en met 2200. De jaarlijkse kosten na 2050 bij 1 m zeespiegelstijging zijn gemiddeld 185 miljoen euro per jaar, wat overeenkomt met ongeveer 50% 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 zijn respectievelijk 55%, 65% en 75% van de jaarlijkse kosten van "systeem op orde". Gegeven alle onzekerheden van de verdere toekomst concluderen we dat de jaarlijkse kosten in eenzelfde orde grootte liggen als in de periode 2023 – 2050, waarmee bedoeld wordt dat de gemiddelde jaarlijkse kosten voor de beschouwde niveaus van zeespiegelstijging niet met een factor 10 toenemen.

Tabel 37: Totale nominale kosten in miljard euro en jaarlijkse nominale kosten in miljoen euro per jaar voor alle dijken en kunstwerken in de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied voor systeem op orde tot en met 2050 en bij een bepaald niveau van zeespiegelstijging in zichtjaar 2200.

ZSS ten opzichte van 1995	Totale nominale kosten en jaarlijkse kosten voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied 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	10,7	395		
1,0 m			27,7	185
2,0 m			32,1	215
3,0 m			39,0	260
5,4 m			44,6	300

## 8.5 Ruimtelijke impact

De kostengetallen zijn gepresenteerd voor de strategie 'business as usual': een grondoplossing zolang het ruimtelijk past en anders constructieve maatregelen om de dijkversterking te realiseren. De strategie 'volledige grondoplossing' geeft inzicht in het benodigde ruimtebeslag als geen constructieve maatregelen genomen worden. Dit geeft ook inzicht in de mate dat een bepaald niveau van zeespiegelstijging tot ruimtelijke knelpunten leidt. De strategie 'volledige grondoplossing met innovatieve pipingmaatregel' (bijv. een verticaal zanddicht geotextiel of grof-zandbarrière) levert minder ruimtelijke knelpunten op, mits de opgave voor de dijkverbreding door piping wordt veroorzaakt. Het aantal tijdelijk of permanent te amoveren gebouwen in de versterkingszone bij strategieën 'volledige grondoplossing' en 'volledige grondoplossing met innovatieve pipingmaatregel' is een indicator voor de mate van ruimtelijke knelpunten, zie Tabel 38. 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 pipingoplossingen, echter kunnen een negatief effect hebben op de maatgevende hoogwaterstanden of bijvoorbeeld de scheepvaart

### 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 38 is de bandbreedte van het aantal gebouwen in de versterkingszone bij twee strategieën met meer ruimtelijke impact weergegeven, waarbij van de

gebouwen in het Basis Administratie Gebouwen (BAG) met peildatum 1 oktober 2021<sup>24</sup>. Bij de strategie "business as usual" zijn dit ordegruotte<sup>25</sup> het aantal gebouwen in de versterkingszone, waardoor constructieve maatregelen getroffen worden in plaats van een grondoplossing aan de binnenwaartse zijde.

Tabel 38: Gemiddelde ruimtelijk opgave en totaal aantal te amoveren gebouwen bij een volledige grondoplossing per watersysteem voor Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied op basis van alleen te versterken trajecten per watersysteem voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging ten opzichte van 1995.

ZSS t.o.v. 1995 [m]	Gemiddelde ruimtelijke opgave en totaal aantal te amoveren gebouwen in de versterkingszone bij een volledige grondoplossing per watersysteem	
	Bandbreedte voor de strategieën volledige grondoplossing incl. innovatieve pipingmaatregelen volledige grondoplossing excl. innovatieve pipingmaatregelen	
	Toename opgave dijkbreedte [m]	Totaal aantal gebouwen
1,0 m	55	18.000-26.000
2,0 m	65	20.000-30.000
3,0 m	100	22.000-35.000
5,4 m	140	24.000-38.000

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

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

## 8.6 Inschatting onzekerheidsbandbreedte resultaten

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

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

<sup>24</sup> Het aantal gebouwen in de versterkingszone is ingedeeld in klassen van 1.000 gebouwen. Het aantal gebouwen in de versterkingszone valt voor beide versterkingsstrategieën binnen één klasse van 1.000 gebouwen.

<sup>25</sup> Officieel maakt KOSWAT gebruik van een verouderde bebouwingsdatabases o.b.v. de TOP10NL 2013/2014.

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 onzekerheden 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 39).

Tabel 39: Matrix voor onzekerheidsbandbreedte.

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

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

#### 8.6.1 Hydraulische belastingen

- In alle kruinhoogteberekeningen is gekozen voor een constant golfoverslag-debiet 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 mate van zeespiegelstijging (tijdlijn).*
- De onzekerheid van de informatie in de databases fysica is een andere belangrijke bron van onzekerheid. 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 onderzochte gevoeligheden werken op verschillende manieren door, het effect hiervan op de resultaten worden beschreven in paragraaf 8.7.

#### 8.6.2 Versterkingsopgave dijken en kunstwerken

- Voor de dijken is binnen OKADER gebruik gemaakt van 2 typen fragility curves: macrostabiliteit en voor piping. De resultaten voor de hoogteopgave door golfoverslag (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. De verwachting is dat het effect gemiddeld is,

omdat de effecten over binnen een watersysteem uitmiddelen. *Effect: gemiddeld.*

- De versterkingsopgave voor kunstwerken is voor de meeste kunstwerken alleen bepaald voor het faalmechanisme hoogte, omdat dit faalmechanisme bij kunstwerken met name wordt beïnvloed door zeespiegelstijging. Er is geen inzicht in welke mate andere faalmechanismen bij kunstwerken leidend zijn voor het moment voor het versterken of vervangen van het betreffende kunstwerk en daarmee maatgevend zijn boven de versterkingsopgave voor hoogte door zeespiegelstijging. Daarnaast geldt ook dat sommige kunstwerken niet gedeeltelijk te versterken (op te hogen) zijn en dus direct vervangen moeten worden. *Effect: klein.*

### 8.6.3 Kosten

- KOSWAT hanteert een maximale kruinverhoging van 2 m per versterkingsronde. Dit heeft als gevolg dat verhogingen van meer dan 2m niet resulteren in hogere kosten dan een verhoging van 2m per versterkingsmoment. Indien een verhoging van meer dan 2m benodigd is, resulteert dit in een onderschatting van de dijkversterkingskosten. Voor de tijdlijn Zeer Extreem geldt dit voor ongeveer 15% van de versterkingsmomenten. Het effect is dus onafhankelijk van de mate van zeespiegelstijging en wordt daarom als gemiddeld geschat. *Effect: middel.*
- De kosten worden gepresenteerd voor 1 uniforme versterkingsstrategie voor het hele gebied, terwijl in werkelijkheid een combinatie van constructieve versterking en volledige grondoplossing zal worden gerealiseerd. Deze combinatie leidt tot lagere versterkingskosten. Het effect hiervan op de kosten is afhankelijk van de mate van zeespiegelstijging en is ongeveer 5 - 10%. *Effect: klein.*
- Het versterken of vervangen van een kunstwerk is maatwerk en dat betekent ook dat de bijbehorende kosten voor de versterkings- en vervangingsopgave objectspecifiek zijn. De verwachting is dat de kosten voor de kunstwerken nu worden onderschat. De gehanteerde kostenkanten zijn onafhankelijk verondersteld van de omvang van de versterking (bijv. hoogteopgave) en dat betekent dat alleen zeespiegelstijging invloed heeft op het moment van versterken van de kunstwerken. De invloed op de kosten voor kunstwerken is naar verwachting groot, maar de invloed op de totale kosten is kleiner omdat de kosten voor het versterken en vervangen van kunstwerken ongeveer 25-30% is van de totale kosten voor het versterken van alle dijken en kunstwerken langs de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied. *Effect: middel - groot.*
- 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 geïmmoveerd. De grens hiervan is niet nader onderzocht.

## 8.7 Effectiviteit van een aantal mogelijke oprekmaatregelen

In de Rijn-Maasmonding en het rivierengebied is naar mogelijke oprekmaatregelen gekeken. De effectiviteit van deze maatregelen verschilt per maatregel en lichten we hieronder kort toe:

- *Verkleinen van de faalkans van de Europoortkering* van 1/100 naar 1/1.000 per sluitvraag geeft lagere hydraulische belastingen achter de stormvloedkeringen (dit kan oplopen tot 0,5 - 0,6 m aan verlaging van de waterstanden nabij de Maeslantkering). Het effect is groter bij de hydraulische belastingniveaus dan bij de waterstanden, maar niet altijd en is afhankelijk van de wind(richting en -

snelheid). In het algemeen neemt de invloed van het verkleinen van de faalkans af in de richting van het rivierengebied. De invloed van een verkleinde faalkans van de Europoortkering zal op systeemniveau voor de kosten van weinig invloed zijn, gezien de minimale invloed op de individuele trajecten in de gevoeligheidsanalyse. *Effect: groot voor traject 14-3 (net achter de Maeslantkering) en voor de overige trajecten is het effect klein.*

- Het effect van een *aangepast sluitpeil van de Europoortkering* is het grootst in het buitendijks gebied voor locaties die dichtbij de Europoortkering liggen bij lage terugkeertijden. Bij de norm is het effect van een aangepast sluitpeil direct achter de Europoortkering nihil. Een verhoging van het sluitpeil zorgt voor een toename van de hydraulische belastingen achter de stormvloedkeringen. Dit geldt voor situaties waarin de kering bij een verhoogd sluitpeil niet dicht hoeft en bij het huidige sluitpeil wel, maar ook voor extremere omstandigheden, waarbij de kering bij het verhoogde sluitpeil dicht moet, aangezien de waterstand op het bekken dan al verhoogd is op het moment van de sluitvraag.

De toename in waterstanden bij kleine terugkeertijden (<100 jaar) ligt in dezelfde ordegrootte als de toename van het sluitpeil, wat overeenkomt met de verwachting. Naarmate de terugkeertijden groter worden, wordt het effect van het falen van de stormvloedkeringen steeds belangrijker en wordt het effect van een aangepast sluitpeil steeds kleiner. Voor de impact op het buitendijks gebied zijn de waterstanden bij de hoge terugkeertijden al van belang en heeft het aangepast sluitpeil dus meer effect dan bij de lage terugkeertijden. Verder geldt dat naarmate de afstand tot de stormvloedkeringen afneemt, neemt ook het effect van het sluitpeil op de waterstanden af, totdat dit nagenoeg geheel verdwijnt bij afvoergedomineerde locaties.

Voor deze gevoeligheidsanalyse is het niet goed mogelijk om het effect van een aangepast sluitpeil op de kosten te bepalen, omdat de OKADER-berekeningen alleen uitgevoerd kunnen worden voor een hele tijdlijn. Voor het aangepaste sluitpeil was het enkel mogelijk om het effect op de hydraulische belastingen te bepalen voor tijdlijn Gematigd in 2200 en Extreem in 2200, omdat voor deze twee tijdlijnen en zichtjaren de hydraulische databases met aangepast sluitpeil beschikbaar zijn. *Effect: plaatselijk groot.*

- Het effect van het *aftoppen van de Rijnafvoer* is het grootst op de Waal en de Nederrijn-Lek, wat ook te verwachten is, omdat dit de afvoergedomineerde trajecten zijn. Het effect van het aftoppen kan op de afvoergedomineerde trajecten oplopen tot meerdere decimeters (tot 0,6 – 0,7 m verlaging), maar neemt in benedenstroomse richting af tot orde 0,2 m op de Beneden Waal en Beneden Lek. De aanpassing aan het aftoppen van de Rijnafvoer heeft minimale invloed op de kosten. De invloed is beperkt en zal op systeemniveau niet leiden tot andere conclusies. Aftoppen van de Rijntakken gebeurt enkel als er overstromingen in Duitsland in het Ruhrgebied plaatsvinden. In deze analyse is de waarschijnlijkheid hiervan niet beschouwd maar is dit wel meegenomen in de vorm van een hoog aftopdebiet van 22.000 m<sup>3</sup>/s. *Effect: groot langs de rivieren.*
- *Het meenemen of aanpassen van de modelonzekerheden* hebben, afhankelijk van tijdlijn en zichtjaar, een invloed op de kosten. De invloed is echter beperkt op de kosten en zal op systeemniveau niet leiden tot significant andere conclusies. Dat wordt is mede omdat deze invloed op de verschillen met de referentie klein zal zijn. *Effect: middel*

Ook de aanvullende analyses laten zien dat een aantal van de gehanteerde uitgangspunten effect kunnen hebben:

- In de overgangsgebieden tussen zee- en rivierdominantie kunnen andere aannames over de wijze van overlopen van het zeefront zorgen voor 0,5 – 0,6



- m verhoging, óf verlaging van de waterstanden t.o.v. de basisberekeningen uit KP ZSS, in het bijzonder in tijdlijn Zeer Extreem. *Effect: plaatselijk groot.*
- Berging in de Zuidwestelijke Delta (inzet Volkerak-Zoommeer aangevuld met extra berging op de Grevelingen) is effectiever achter een gesloten keringsituatie: als de Europoortkering faalt, dalen de waterstanden niet. Naarmate de bijdrage in de hydraulische belastingen van een gesloten keringsituatie meer en meer verschuift richting een open keringsituatie, zal berging op een gegeven moment een verwaarloosbaar waterstandsverlagend effect krijgen. Voor de locaties in het overgangsgebied kunnen de waterstanden met 0,2 tot 0,6 m dalen door 'extra' waterberging op de Grevelingen (afhankelijk van tijdlijn en zichtjaar). *Effect: plaatselijk groot.*
  - Rivierverruimende maatregelen zorgen met name op afvoergedomineerde locaties (rivierengebied) voor verlaging van de hydraulische belastingen. In de benedenstrooms gelegen delen van de Lek, Waal en Maas worden de maximale verlagingen ingeschat op 0,2 m. Onder invloed van zeespiegelstijging wordt het effect lager. Het gebied waar rivierverruimende maatregelen effect hebben wordt kleiner doordat het "overgangsgebied" naar het oosten opschuift. *Effect: middel.*

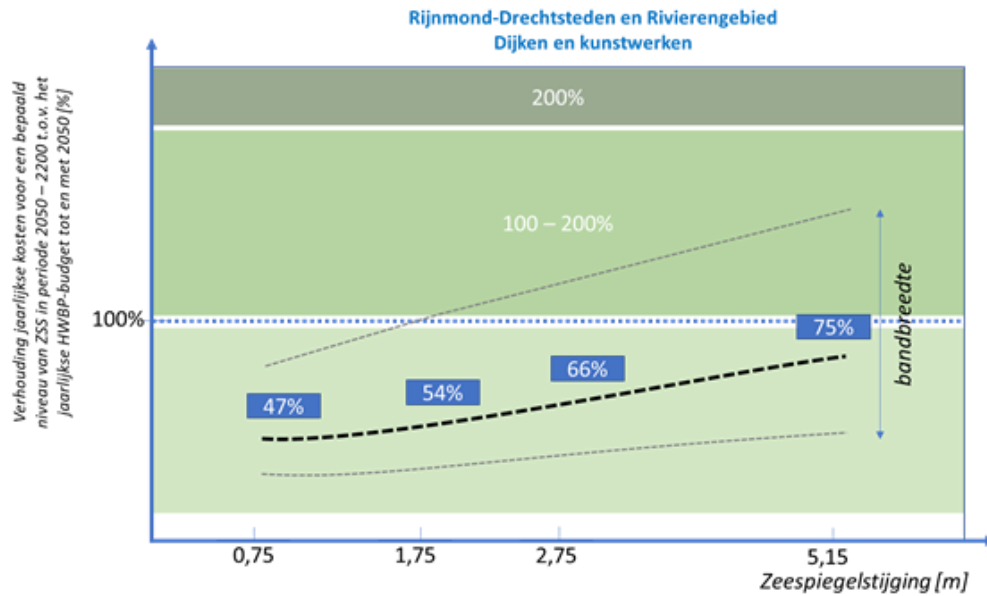
## 8.8 Conclusies

Op basis van deze Systeemanalyse Waterveiligheid voor de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

### Algemeen

- In het gebied van de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied zien we grote verschillen (zowel in hydraulische belastingen als in de kosten) tussen de verschillende deelgebieden/trajecten. Hoe meer benedenstrooms een locatie gelegen is, hoe groter het effect is van de zeespiegelstijging, wat we ook verwachten. De effecten zijn het grootst op de Nieuwe Waterweg achter de Europoortkering tot voorbij Rotterdam. Doordat de afvoerstatistiek wisselt per tijdlijn is puur het effect van zeespiegelstijging moeilijk te duiden. Daarvoor kan het beste naar een benedenstrooms (waterbergend) gebied (dat ver gelegen is van de Europoortkering) als Haringvliet & Hollandsch Diep gekeken worden. Daar zien we een constant toenemend verloop van de kosten met de tijdlijnen.
- De – in deze beleidsstudie berekende – stijging van de versterkingsopgave voor hoogte als functie van de zeespiegelstijging is (*gemiddeld gezien over het hele gebied*) lager dan de stijging van de zeespiegelstijging. In de deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet Hollandsch Diep volgt de toename van de hoogteopgave redelijk de zeespiegelstijging, of is zelfs wat hoger dan de zeespiegelstijging. In het rivierengebied is de doorwerking van de zeespiegelstijging op de toename van de hoogteopgave beduidend lager. Op traject- of vakniveau verschilt de invloed van zeespiegelstijging, afhankelijk van de ligging van de locatie in het gebied, de norm en lokale omstandigheden zoals dijkoriëntatie en bodemhoogte voor de waterkering.
- De jaarlijkse kosten tussen 2050 en 2200 om de dijken en kunstwerken te laten voldoen bij een zeespiegelstijging tot 5,4 m zijn lager dan of ordegrrootte gelijk aan de - in deze beleidsstudie berekende - jaarlijkse kosten tussen 2023 en 2050 om beide watersystemen (benedenrivieren en bovenrivieren) te laten voldoen aan de norm in 2050 (zie Figuur 115). Hierbij is er vanuit gegaan dat het niveau van zeespiegelstijging van 5,4 m pas in 2200 zal optreden.
- 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 orde grootte heeft als het huidige budget van het Hoogwaterbeschermingsprogramma.



Figuur 115: 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 geeft schematisch de bandbreedte weer, maar is niet berekend.

- Een belangrijk uitgangspunt voor de Systeemanalyse van de Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied is dat de Europoortkering blijft functioneren zoals in het huidige systeem<sup>26</sup>. Door zeespiegelstijging zal de Europoortkering vaker sluiten. Bij een zeespiegelstijging van 1 m is dit ongeveer 6x per jaar (ongeveer 100x vaker dan de huidige sluitfrequentie) en bij een zeespiegelstijging van 3 m is dit ongeveer 1x per 6 jaar, waarbij opgemerkt wordt dat bij een zeespiegelstijging van 3 m het sluitpeil met +2,5 m is aangepast. Aanpassing van het sluitpeil is nodig om het aantal sluitingen bij hogere stijgingen van de zeespiegel beperkt te houden. Dit heeft als nadeel dat de stormvloedkeringen pas bij een hogere waterstand sluiten, waardoor de waterstanden in het achterland zullen stijgen (ook zonder storm op zee). Dit heeft consequenties voor het buitendijks gebied, scheepvaart en kosten voor het beheer van de stormvloedkering, maar is binnen de scope van deze studie verder niet onderzocht. Voor de Europoortkering geldt dat het effect van sluitpeilverhoging op de hydraulische belastingen bij de norm mogelijk beperkt is. Bij een zeespiegelstijging van 3 m zal de Europoortkering overstromen.
- De totale kosten om de dijken in Rijn-Maasmonding en het Rivierengebied te versterken volgens versterkingsstrategie 3B (traditionele versterking) ten opzichte van 2050 voor 1 m ZSS in 2200 bedragen ongeveer 26 miljard euro en voor +/-5 m ZSS in 2200 ongeveer 41 miljard euro. Dit komt overeen met

<sup>26</sup> Door zeespiegelstijging zullen de bewegende delen van de Maeslantkering gaan overlopen vanaf een niveau van NAP+5 m en de bewegende delen van de Hartelkering vanaf NAP +3 m. De verbindende kering tussen de Maeslant- en de Hartelkering is als niet overstroombaar gemodelleerd. De aanname dat de Maeslantkering nog kan functioneren ten tijden dat deze overstroomt, dient verder onderzocht te worden, evenals de constructieve sterkte in deze situaties. De Hartelkering is overstroombaar ontworpen.

dijkversterkingskosten in de orde van 25 miljoen euro per kilometer en voor +/- 5 m ZSS ongeveer 40 miljoen euro per km. Voor de meeste vakken/trajecten betreft tot 2200 vier versterkingsrondes. Platgeslagen resulteert dit in een indicatie van de kosten per versterkingsronde die grofweg liggen tussen 6 en 10 miljoen euro per kilometer per versterkingsronde.

### **Gevoeligheidsanalyses**

- De effecten van de diverse gevoeligheidsanalyses op de resultaten van de waterveiligheidsopgave lijken beperkt. De gevoeligheidsanalyses naar de faalkans van de Europortkering en het aftoppen van de Rijnafvoer hebben niet of nauwelijks effect op de resultaten van de waterveiligheidsopgave. De modelonzekerheden hebben enig effect op het resultaat. Het valt op dat een hoger sluitpeil in de regel minder effect heeft op de waterveiligheidsopgave, uitgezonderd het overgangsgebied waar wel een effect is van orde 0,5 m. We verwachten wel een groot effect op de buitendijkse gebieden. De effecten van de gevoeligheidsanalyses die zijn uitgevoerd naar de ontwerplevensduur (75 jaar i.p.v. 50 jaar) en het type versterkingsstrategie (strategie 3A) laten zien dat de effecten hiervan klein zijn ten opzichte van de toch al aanwezige variatie in de resultaten over de trajecten. De consequenties op de waterveiligheidsopgave zullen op systeemniveau naar verwachting niet leiden tot significant andere conclusies.
- Zeespiegelstijging levert op meerdere locaties ruimtelijke knelpunten in het gebied. Voor de trajecten in Rijnmond-Drechtsteden (m.u.v. de Hollandsche IJssel), Nederrijn-Lek en Waal zijn er op circa 80% tot 85% van de te versterken dijkvakken ruimtelijke knelpunten. Locaties met ruimtelijke knelpunten zijn locaties waar gedeeltelijk (constructieve maatregelen genomen in plaats van een volledige grondoplossing).

Geconcludeerd mag worden dat de waterveiligheidskosten door zeespiegelstijging voor de dijken en kunstwerken, zelfs tot zeespiegelstijgingen van 5 m in dezelfde bandbreedte vallen als die van de huidige benodigde versterkingen om aan de nieuwe normen te voldoen. Gezamenlijk zijn de totale kosten voor de Rijn-Maasmonding en het rivierengebied bij een zeespiegelstijging van 3 m ongeveer 50 miljard euro, inclusief de kosten voor aanpassing/vervanging van de stormvloedkeringen. Opgemerkt wordt dat de kosten voor het aanpassen/vervangen van de nieuwe stormvloedkeringen bij een zeespiegelstijging van 5 m uiterst onzeker zijn, waarbij de stormvloedkeringen niet meer zullen overlopen.

## 9 Referenties

- | <b>Auteur</b>                  | <b>titel</b>   |
|--------------------------------|--|
| 1. Bamber et al. (2019).       | Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. Bamber, J.L., M. Oppenheimer, R. E. Kopp, W. P. Aspinall en R. M. Cooke. <i>Proceedings of the National Academy of Sciences</i> 116(23), pp. 11195-11200 (DOI: 10.1073/pnas.1817205116). may May 2019. Bamber et al., 2019 |
| 2. CBS.                        | Grond-, weg- en waterbouw (GWW) inputprijsindex 2015=100 <a href="https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/84538NED/table">https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/84538NED/table</a> .   |
| 3. Cox et. al., 2021a.         | Anthropogenic effects on the contemporary sediment budget of the lower Rhine-Meuse Delta channel network. Cox, J. R., Huismans, Y., Knaake, S. M., Leuven, J. R. F. W., Vellinga, N. E., van der Vegt, M., ... & Kleinhans, M. G. <i>Earth's Future</i> , 9(7), e2020EF001869.                               |
| 4. Cox et. al., 2021b.         | Climate change and human influences on sediment fluxes and the sediment budget of an urban delta: the example of the lower Rhine-Meuse delta distributary network. Cox, J. R., Dunn, F. E., Nienhuis, J. H., van der Perk, M., & Kleinhans, M. G. <i>Anthropocene Coasts</i> , 4(1), 251-280.                |
| 5. De Conto en Pollard (2016). | Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. <i>Nature</i> 531(7596):591-597. DOI:10.1038/nature17145. Mmaart 2016  |
| 6. Deltares (2014a).           | Bodemdaling in het rivierengebied. Technische analyses voor DPR, Asselman, A., O. Levelt en A. van der Kraan. versie 2, 1209392-000. juli 2014.  |
| 7. Deltares (2014b).           | KOSTen voor versterken WATERkeringen KOSWAT systeemdocumentatie versie 2.3.2 revisie 47275. augustus 2015.   |
| 8. Deltares (2020).            | Statistiek extreme hoogwaters Rijn en Maas op basis van geschaalde KNMI'14 scenario's – versie 0.1. Mark Hegnauer. Deltares rapport 11205237-003-ZWS-0014, 4 december 2020.  |
| 9. HKV (2016).                 | Invloed onzekerheid op bepalen van waterstandsverlopen. Verandering percentielen van afvoer en meerpeil bij meenemen statistische en modelonzekerheid waterstand. Guus Rongen en Chris Geerse. HKV lijn in water, rapport PR3280.20. oktober 2016.   |
| 10. HKV (2021a).               | Hydra-NL versie 2.8.3 voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging; Uitgangspunten en achtergronden. M. Duits. HKV lijn in water, rapport PR4407.20. juli 2021.   |
| 11. HKV (2021b).               | Productieberekeningen BOI2023; Deelperceel 3: Rijn- en Maasmonding (conceptuitgangspunten). C. Oerlemans, J.W. Stijnen, M. Bénit en A. Paarlberg. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV- en Arcadis rapport PR4538.10, Lelystad. 26 oktober 2021.   |
| 12. HKV (2022a).               | Hydraulische belastingen Hollandsche IJssel; voor KP-ZSS en BOI2023. D. Honingh, J.W. Stijnen, T. Botterhuis, C. Oerlemans en G. Rongen. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV-rapport PR4611.10, Lelystad. juni 2022.  |
| 13. HKV (2022b).               | Analyse bergend oppervlak Rijn-Maasmonding bij toename middenstand zee. T. Botterhuis. In opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. HKV-memorandum PR4682.10, Lelystad. oktober 2022.  |
| 14. HKV (2022c).               | Pilotfase RMM. Opdrachtgever Rijkswaterstaat-WVL, C. Oerlemans, T. Botterhuis en B. Thonus. HKV lijn in water rapport PR4423.10. februari 2022.  |
| 15. HKV (2022d).               | Analyse bergend oppervlak Rijn-Maasmonding bij toename middenstand zee. T. Botterhuis (HKV), Q. Lodder (RWS). HKV lijn in water memo PR4682.10. oktober 2022.  |
| 16. IPCC (2023).               | Synthesis report of the IPCC Sixth assessment report (AR6). 20 maart 2023.   |

17. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid primaire waterkeringen. 2016.
18. RHDHV (2021). Duidingskader strategieën zeespiegelstijging. In opdracht van Rijkswaterstaat, WVL. Referentie: BI1832-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001. Status: S0/P01.01. 8 december 2021.
19. Rijkswaterstaat (2015). Handreiking Ontwerpen met overstromingskansen. Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen. Versie 2.5 juli. 2015.
20. Rijkswaterstaat GPO (2019). Excelfile behorende bij het rapport GPO RWS, 2019. Bijlage I – Onderbouwing raming vervangingswaarde kunstwerken. 2019.
21. Rijkswaterstaat (2021a). Tijden voor Spoor 2 Kennisprogramma Zeespiegelstijging. RWS memo. 24 maart 2021.
22. Rijkswaterstaat (2021b). Gewenst sluitpeil Maeslant- en Hartelkering bij Zeespiegelstijging voor eerste verkennende berekeningen. Memo RWS-WVL. 10 juni 2021.
23. Rijkswaterstaat (2022a). Referentie – Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022.
24. Rijkswaterstaat (2022b). Aanpak Kunstwerken Systeemanalyse WV KP ZSS. 2022.
25. Rijkswaterstaat (2022c). Generieke werkwijze, Systeemanalyse waterveiligheid Kennisprogramma Zeespiegelstijging, versie 1.0. 28 juli 2022.
26. Rijkswaterstaat (2022d). Toepassingsleidraad OKADER voor KP ZSS spoor II. P. de Grave (Deltares). Februari 2022.
27. Witteveen+Bos & HKV (2022). Landelijke set fragility curven t.b.v KP-ZSS. In opdracht van Rijkswaterstaat, Referentie: 129320/22-011.011. WVL. 22 juli 2022.
28. Groeneweg et al. (2022). Jacco Groeneweg, Ton Visser, Julius Sumihar (Deltares), Jan Stijnen, Ton Botterhuis en Laura de Vries (HKV). Evaluatie keringenscripts Rijn-Maasmonding. Deltares-rapportage 11208058-038-GEO-0001. juli 2022.
29. Slootjes et al. (2010). Gevoeligheidsanalyse Waterberging Zuidwestelijke Delta - Hoofdrapport, Slootjes, N., M.K. Karelse, Y.J.G. van Kruchten, T. Louters, J. Bulthuis, S. de Goederen, J.W. Slager en R. Slomp. HKV / DHV / Rijkswaterstaat Rotterdam. 2010.
30. Slootjes (2012). Nader onderzoek extra waterberging Zuidwestelijke Delta - Onderdeel van de mogelijke strategieën Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta - Syntheserapport, N. Slootjes, Deltares rapport 206075-001, Delft, 2012.
31. RWS en MinIenW (2020). Notitie actualisatie beleidsuitgangspunt afvoerverdeling Rijntakken (hoogwater), M. Schropp (RWS) en L. Kok (IenW/DGWB). 20 mei 2020.
32. Huthoff et al. (2020). IRM QuickScan Afvoercapaciteit - Eindrapport, F. Huthoff, S. Ouwerkerk, R. Daggenvoorde, Y. Snoek en B. Voortman. In opdracht van RWS-WVL. HKV-rapport PR4162.10, Lelystad, 2020.
33. Van der Kraan (2011). Zettingsverwachting primaire waterkeringen. Achtergrondplaatje van NAM/RWS. Zettingsverwachting geschat op basis van metingen (HHSK), ervaring/metingen (WSHD en WSRL) en de gegevens uit het achtergrondplaatje (overige waterschappen). In opdracht van Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden. december 2011.



## Bijlage A Afvoerdeling splitsingspunten

Tabel 40: Koppeling afvoeren Rijn, Waal, Lek en Maas bij een instelling van de afvoerdeling op Rijnafoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.

<b>Vaste instelling afvoerdeling 16.000 m<sup>3</sup>/s</b>					
<b>Bovenrijn</b>	<b>Waal</b>	<b>Pan. Kan.</b>	<b>IJssel</b>	<b>Lek</b>	<b>Maas</b>
600	481	119	117	2	55
2.000	1.445	555	324	232	222
4.000	2.757	1.243	527	717	729
6.000	4.112	1.888	812	1.079	1.235
8.000	5.420	2.580	1.080	1.503	1.742
10.000	6.497	3.503	1.426	2.079	2.248
13.000	8.347	4.653	1.938	2.719	3.008
16.000	10.167	5.833	2.501	3.340	3.768
17.000	10.742	6.258	2.718	3.549	4.022
18.000	11.317	6.683	2.935	3.757	4.275
20.000	12.367	7.633	3.459	4.179	4.782
24.000	14.341	9.659	4.742	4.914	5.796

Tabel 41: Koppeling afvoeren Rijn, Waal, Lek en Maas bij een instelling van de afvoerdeling op Rijnafoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith.

<b>Vaste instelling afvoerdeling 18.000 m<sup>3</sup>/s</b>					
<b>Bovenrijn</b>	<b>Waal</b>	<b>Pan. Kan.</b>	<b>IJssel</b>	<b>Lek</b>	<b>Maas</b>
600	481	119	117	2	55
2.000	1.445	555	324	232	222
4.000	2.757	1.243	527	717	729
6.000	4.112	1.888	812	1.079	1.235
8.000	5.423	2.577	1.087	1.493	1.742
10.000	6.678	3.322	1.398	1.929	2.248
13.000	8.715	4.286	1.858	2.432	3.008
16.000	10.638	5.362	2.413	2.954	3.768
17.000	11.183	5.817	2.657	3.168	4.022
18.000	11.728	6.272	2.901	3.382	4.275
20.000	12.694	7.306	3.465	3.856	4.782
24.000	14.612	9.388	4.651	4.746	5.796

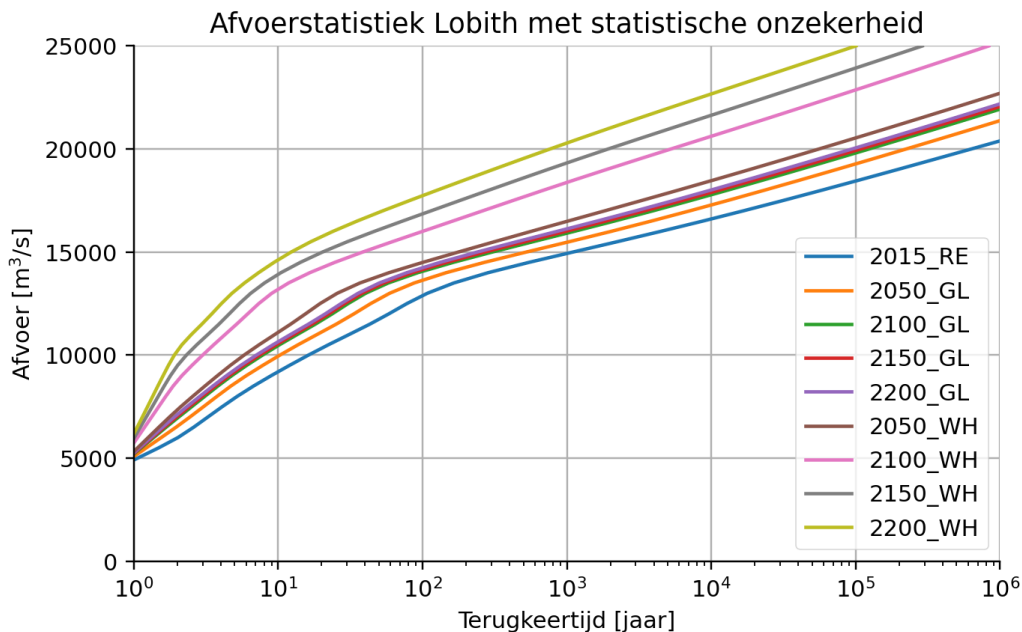
## Bijlage B Afvoerstatistiek Rijn en Maas

Voor de Hydra-NL berekeningen is gebruik gemaakt van afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Lith. Voor de referentiesituatie (2023) betreft dit de statistiek conform WBI2017, voor de statistiek in 2050, 2100, 2150 en 2200 is de afvoerstatistiek consistent met de KNMI2014 scenario's (GL en WH) uit GRADE [Deltares, 2020].

De precieze afleiding van de afvoerstatistiek voor 2100 en 2200 is gedetailleerd beschreven in [HKV, 2021a]. Kort gezegd, is deze afgeleid uit de beschikbare statistiek voor 2050 en 2085 voor Lobith en Borgharen. Daarbij is de statistische onzekerheid 'uitgeïntegreerd' en is de afvoer van Borgharen vervolgens vertaald naar Lith d.m.v. een afvoer-afvoer relatie.

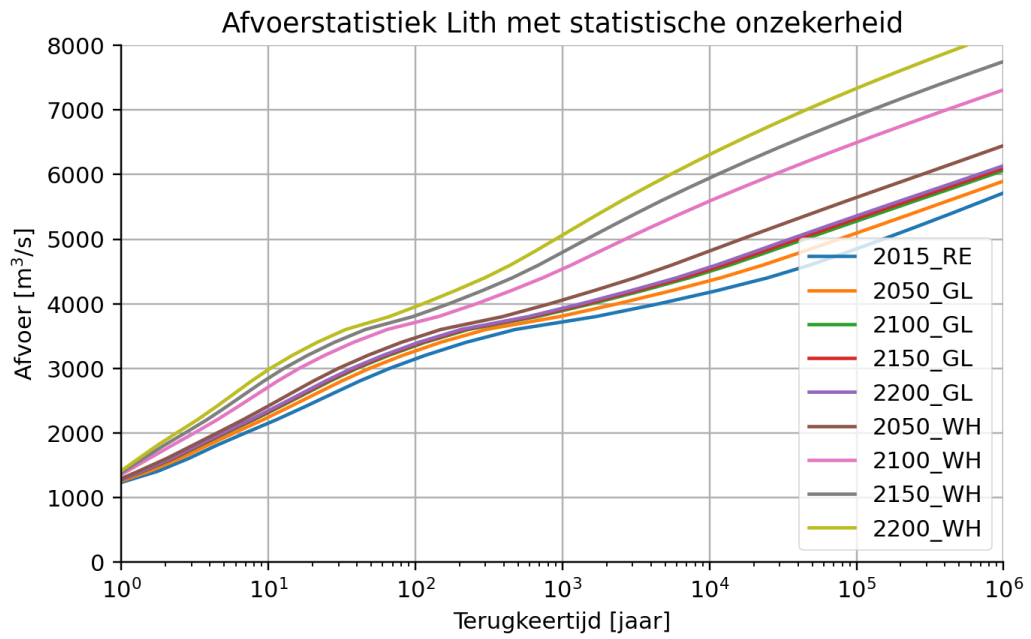
Voor 2050 en 2150 zijn binnen dit project ook invoerbestanden voor Hydra-NL gegenereerd t.b.v. de berekeningen voor de verschillende tijdlijnen. Zoals hierboven aangegeven was voor 2050 al statistiek beschikbaar, voor 2150 is deze bepaald d.m.v. lineaire interpolatie tussen de eerder afgeleide statistiek voor 2100 en 2200. Het uitintegreren van de statistische onzekerheid en het vertalen van Borgharen naar Lith is vervolgens op dezelfde wijze uitgevoerd als beschreven in [HKV, 2021a].

Figuur 116 en Figuur 117 geven de resulterende rivierafvoerstatistiek grafisch weer.



Figuur 116: Afvoerstatistiek Rijn (Lobith) voor referentie en klimaatscenario's.





Figuur 117: Afvoerstatistiek Maas (Lith) voor referentie en klimaatscenario's.

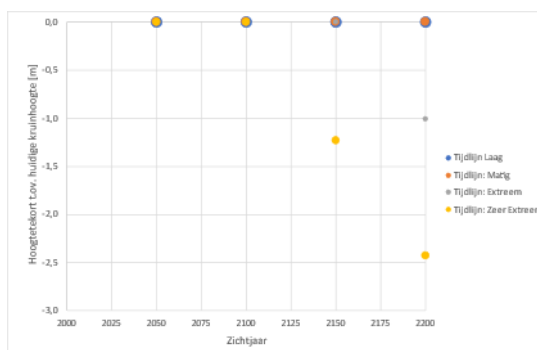
## Bijlage C Analyse per kunstwerk

### C.1 Algerasluis

De Algerasluis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Voor de Algerasluis zijn geen kosten opgenomen, omdat deze opgenomen zijn als onderdeel van de Hollandse IJsselkering.

Tabel 42: Kenmerken Algerasluis.

Kosten vervanging 2022	[€]	166.727.375
KostenType	[-]	Schutsluis - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	6,0
Einde levensduur	[-]	2067
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000004



Figuur 94: Hoogtetekort Algerasluis.

### C.2 Waaiersluis

De Waaiersluis bestaat uit vier objecten. Binnen deze objecten is onderscheid gemaakt in een type schutsluis, een type spuisluis en een type gemaal. Er is één schutsluis, twee spuisluizen en één gemaal aanwezig.

Het kruinhoogtetekort voor de verschillende objecten is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtetekort is voor de vier objecten gelijk.

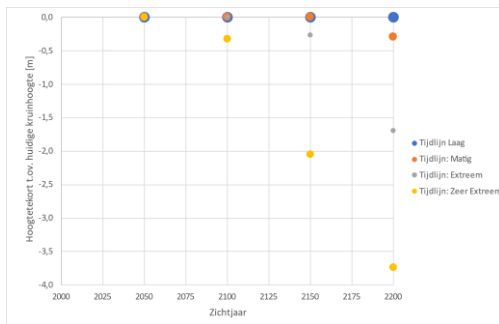
Voor alle vier de type objecten is de strategie 2 het goedkoopst. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voor einde levensduur. De objecten worden bij einde levensduur pas vervangen. Opgemerkt dient te worden dat in onderstaande tabel slechts de kosten voor één spuisluis zijn gepresenteerd. Binnen het kunstwerk zijn twee identieke spuisluizen aanwezig.

Tabel 43: Kenmerken Waaiersluis.

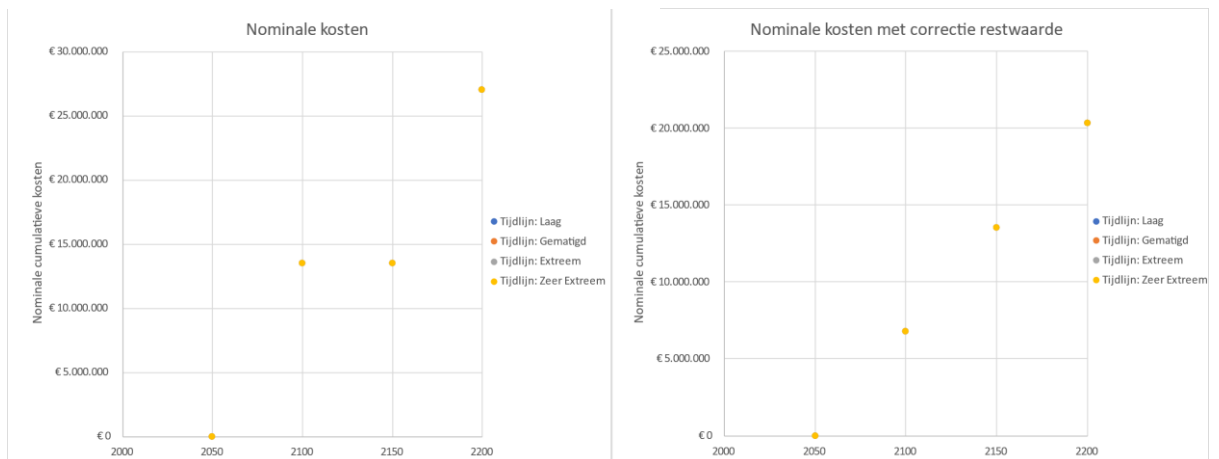
		Schutsluis	Spuisluis <sup>1</sup>	Gemaal
Kosten vervanging 2022	[€]	13.528.000	1.610.544	1.281.600

KostenType	[-]	Schutsluis - Klein	Uitwateringssluis - Klein	Gemaal - Klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,0	4,0	4,0
Einde levensduur	[-]	2050	2050	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,0004	0,0004	0,0004

<sup>1</sup> Slechts de kosten kenmerken van één spuisluis gepresenteerd.



Figuur 118: Hoogtetekort kunstwerk Waaiersluis.

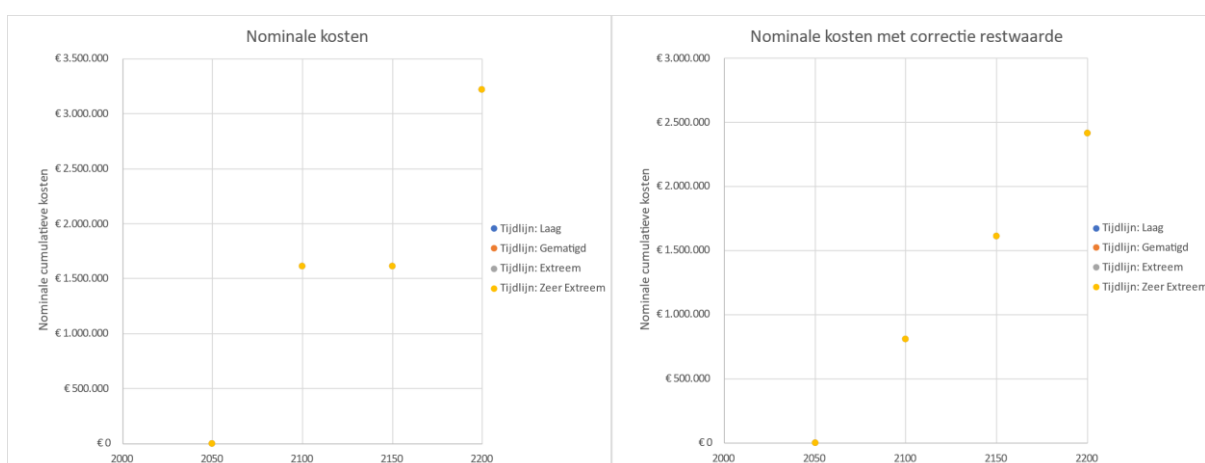


Figuur 119: Nominale cumulatieve kosten Waaiersluis Schutsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 44: Nominale kosten Waaiersluis schutsluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdlijn: Laag</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 13.528.000	€ 6.764.000
2150	€ 13.528.000	€ 13.528.000
2200	€ 27.056.000	€ 20.292.000
<b>Tijdlijn: Gematigd</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 13.528.000	€ 6.764.000
2150	€ 13.528.000	€ 13.528.000
2200	€ 27.056.000	€ 20.292.000

Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 13.528.000	€ 6.764.000
2150	€ 13.528.000	€ 13.528.000
2200	€ 27.056.000	€ 20.292.000
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 13.528.000	€ 6.764.000
2150	€ 13.528.000	€ 13.528.000
2200	€ 27.056.000	€ 20.292.000

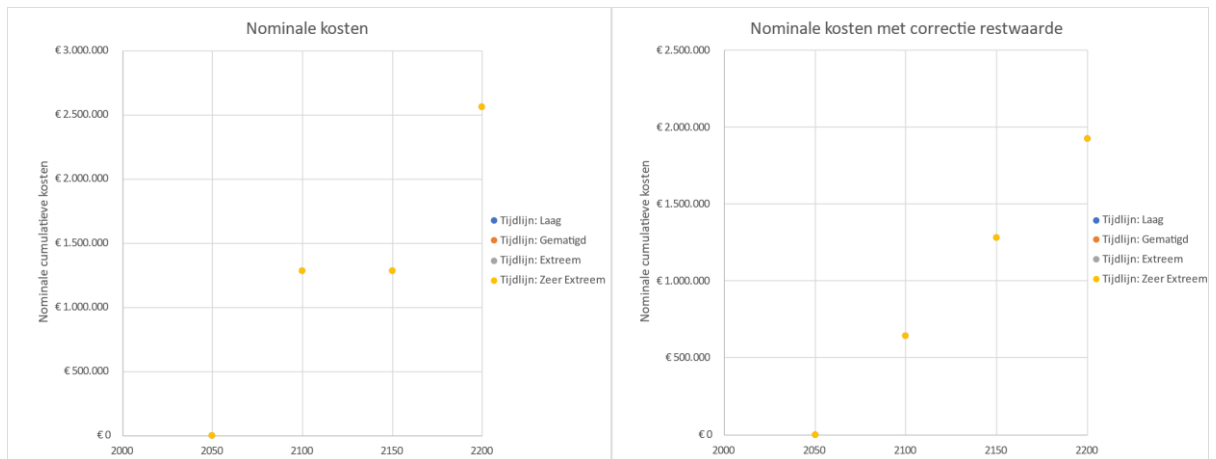


Figuur 120: Nominale cumulatieve kosten Waaiersluis Spuisluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 45: Nominale kosten Waaiersluis spuisluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.610.544	€ 805.272
2150	€ 1.610.544	€ 1.610.544
2200	€ 3.221.088	€ 2.415.816
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.610.544	€ 805.272
2150	€ 1.610.544	€ 1.610.544
2200	€ 3.221.088	€ 2.415.816
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.610.544	€ 805.272
2150	€ 1.610.544	€ 1.610.544
2200	€ 3.221.088	€ 2.415.816
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.610.544	€ 805.272

2150	€ 1.610.544	€ 1.610.544
2200	€ 3.221.088	€ 2.415.816



Figuur 121: Nominale cumulatieve kosten Waaiersluis gemaal: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 46: Nominale kosten Waaiersluis gemaal per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdljn: Laag</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.281.600	€ 640.800
2150	€ 1.281.600	€ 1.281.600
2200	€ 2.563.200	€ 1.922.400
<b>Tijdljn: Gematigd</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.281.600	€ 640.800
2150	€ 1.281.600	€ 1.281.600
2200	€ 2.563.200	€ 1.922.400
<b>Tijdljn: Extreem</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.281.600	€ 640.800
2150	€ 1.281.600	€ 1.281.600
2200	€ 2.563.200	€ 1.922.400
<b>Tijdljn: Zeer Extreem</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.281.600	€ 640.800
2150	€ 1.281.600	€ 1.281.600
2200	€ 2.563.200	€ 1.922.400

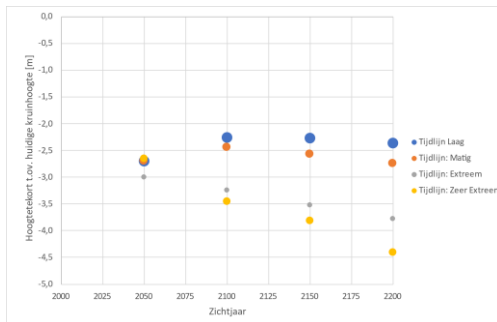
### C.3 Stuw en sluis Hagestein

Het kunstwerk Hagestein bestaat uit een stuw en een schutsluis. Het kunstwerk wordt enkel op hoogte beoordeeld. Het kunstwerk heeft namelijk geen

waterkerende functie. Het kruinhoogtetekort voor de stuw en sluis is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtetekort is voor de twee objecten gelijk.

Tabel 47: Kenmerken Hagestein.

		Schutsluis	Stuw
Kosten vervanging 2022	[€]	148.091.717	168.303.897
KostenType	[-]	Schutsluis - Special	Inlaatwerk - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,5	4,5
Einde levensduur	[-]	2068	2068
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024	0,000024



Figuur 122: Hoogtetekort kunstwerk Hagestein.

#### C.4 Prinses Beatrixsluis

De prinses Beatrixsluis bestaat uit twee identieke schutsluizen. In deze paragraaf wordt enkel het kruinhoogtetekort en de kosten van één schutsluis gepresenteerd.

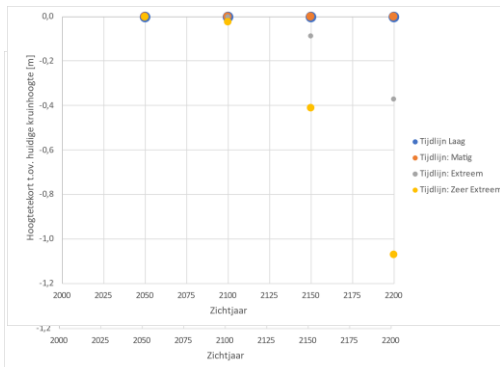
Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

Voor beide schutsluizen is strategie 2 het goedkoopst. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voor einde levensduur. De objecten worden bij einde levensduur pas vervangen. Opgemerkt dient te worden dat in onderstaande tabel slechts de kosten voor één schutsluis zijn gepresenteerd. Binnen het kunstwerk zijn twee identieke schutsluizen aanwezig.

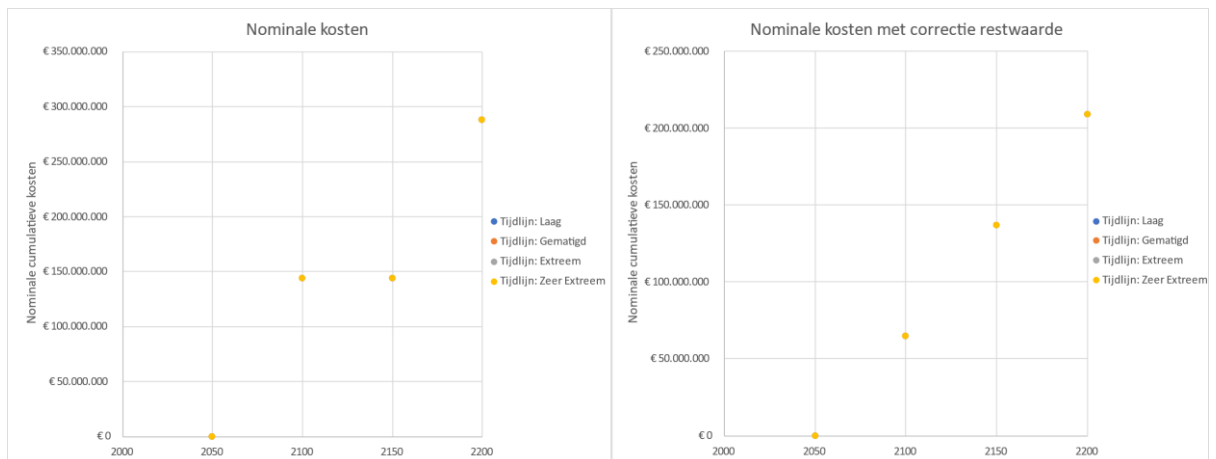
Tabel 48: Kenmerken Prinses Beatrixsluis.

		Schutsluis <sup>1</sup>
Kosten vervanging 2022	[€]	144.163.840
KostenType	[-]	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	7,7
Einde levensduur	[-]	2055
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024

<sup>1</sup> Slechts de kosten kenmerken van één schutsluis gepresenteerd.



Figuur 123: Hoogtetekort kunstwerk Prs. Beatrixsluis schutsluis.



Figuur 124: Nominale cumulatieve kosten Prinses Beatrixsluis schutsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 49: Nominale kosten Prinses Beatrix schutsluis per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdljn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 144.163.840	€ 64.873.728
2150	€ 144.163.840	€ 136.955.648
2200	€ 288.327.680	€ 209.037.568
Tijdljn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 144.163.840	€ 64.873.728
2150	€ 144.163.840	€ 136.955.648
2200	€ 288.327.680	€ 209.037.568
Tijdljn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 144.163.840	€ 64.873.728
2150	€ 144.163.840	€ 136.955.648
2200	€ 288.327.680	€ 209.037.568

Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 144.163.840	€ 64.873.728
2150	€ 144.163.840	€ 136.955.648
2200	€ 288.327.680	€ 209.037.568

### C.5 Prinses Marijkesluis

De prinses Marijkesluis bestaat uit vier objecten. Binnen het kunstwerk zijn twee identieke schutsluizen, één keersluis en één gemaal aanwezig.

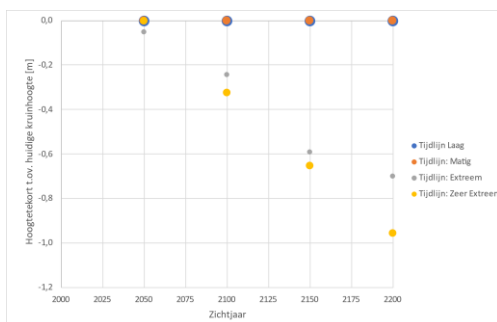
Het kruinhoogtetekort voor de verschillende objecten is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtetekort is voor de vier objecten gelijk.

Voor alle vier de type objecten is de strategie 2 het goedkoopst. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voor einde levensduur. De objecten worden bij einde levensduur pas vervangen. Opgemerkt dient te worden dat in onderstaande tabel slechts de kosten voor één schutsluis zijn gepresenteerd. Binnen het kunstwerk zijn twee identieke schutsluizen aanwezig.

Tabel 50: Kenmerken Prinses Marijkesluis.

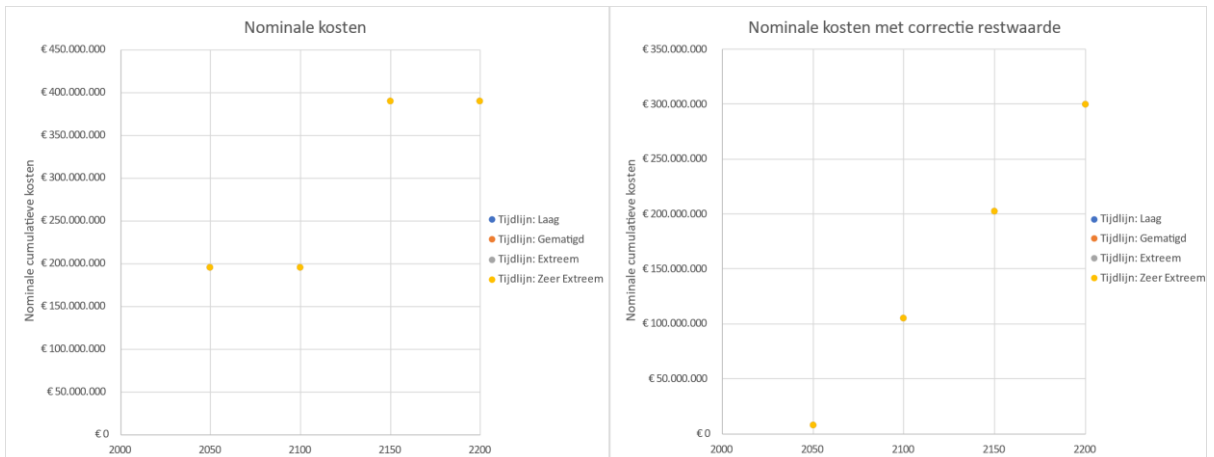
		Schutsluis <sup>1</sup>	Keersluis	Gemaal
Kosten vervanging 2022	[€]	194.729.871	34.968.802	45.521.713
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel	Keersluis - Middel	Gemaal - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	9,1	9,1	9,1
Einde levensduur	[-]	2046	2058	2023
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008	0,00008	0,00008

<sup>1</sup> Slechts de kosten kenmerken van één schutsluis gepresenteerd.



Figuur 125: Hoogtetekort kunstwerk Prs. Marijkesluis schutsluis.

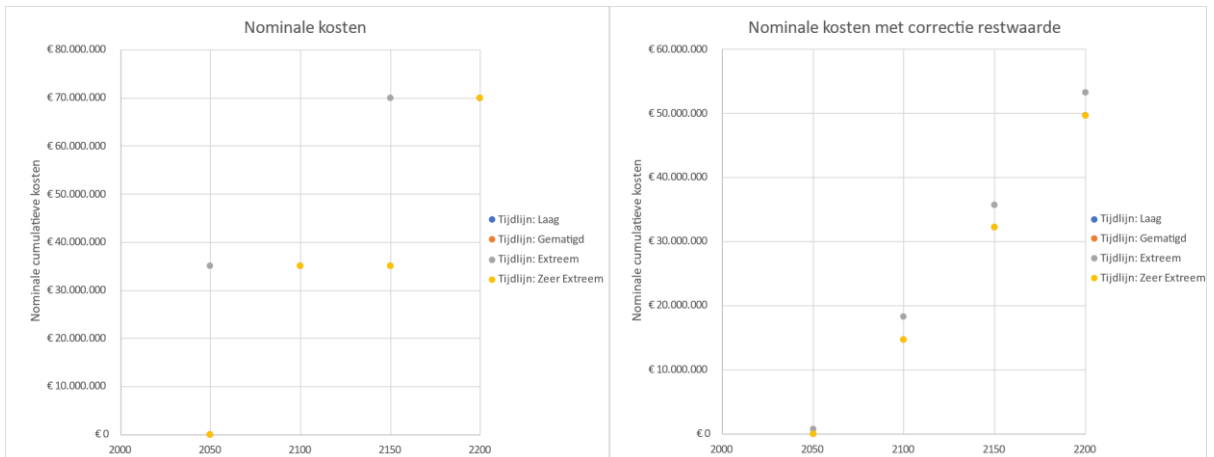




Figuur 126: Nominale cumulatieve kosten Prinses Marijkesluis schutsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 51: Nominale kosten Prinses Marijke schutsluis per tijdlijn en zichtjaar.

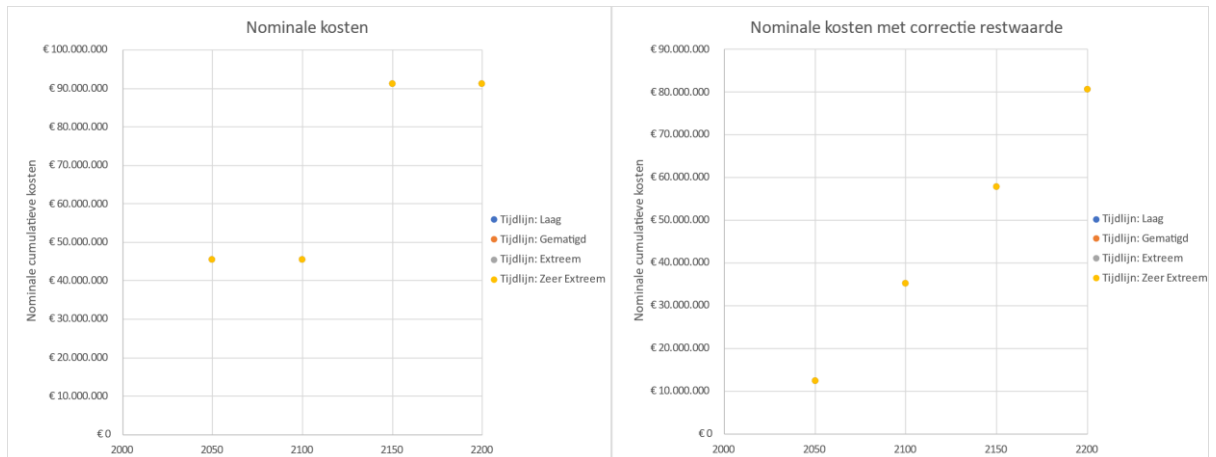
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdljn: Laag</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 194.729.871	€ 7.789.195
2100	€ 194.729.871	€ 105.154.130
2150	€ 389.459.741	€ 202.519.065
2200	€ 389.459.741	€ 299.884.001
<b>Tijdljn: Gematigd</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 194.729.871	€ 7.789.195
2100	€ 194.729.871	€ 105.154.130
2150	€ 389.459.741	€ 202.519.065
2200	€ 389.459.741	€ 299.884.001
<b>Tijdljn: Extreem</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 194.729.871	€ 7.789.195
2100	€ 194.729.871	€ 105.154.130
2150	€ 389.459.741	€ 202.519.065
2200	€ 389.459.741	€ 299.884.001
<b>Tijdljn: Zeer Extreem</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 194.729.871	€ 7.789.195
2100	€ 194.729.871	€ 105.154.130
2150	€ 389.459.741	€ 202.519.065
2200	€ 389.459.741	€ 299.884.001



Figuur 127: Nominale cumulatieve kosten Prinses Marijkesluis keerschuij: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 52: Nominale kosten Prinses Marijkesluis keerschuij per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdljn: Laag</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 34.968.802	€ 14.686.897
2150	€ 34.968.802	€ 32.171.298
2200	€ 69.937.604	€ 49.655.699
<b>Tijdljn: Gematigd</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 34.968.802	€ 14.686.897
2150	€ 34.968.802	€ 32.171.298
2200	€ 69.937.604	€ 49.655.699
<b>Tijdljn: Extreem</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 34.968.802	€ 699.376
2100	€ 34.968.802	€ 18.183.777
2150	€ 69.937.604	€ 35.668.178
2200	€ 69.937.604	€ 53.152.579
<b>Tijdljn: Zeer Extreem</b>	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 34.968.802	€ 14.686.897
2150	€ 34.968.802	€ 32.171.298
2200	€ 69.937.604	€ 49.655.699



Figuur 128: Nominale cumulatieve kosten Prinses Marijkesluis gemaal: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 53: Nominale kosten Prinses Marijkesluis gemaal per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 45.521.713	€ 12.290.863
2100	€ 45.521.713	€ 35.051.719
2150	€ 91.043.426	€ 57.812.576
2200	€ 91.043.426	€ 80.573.432
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 45.521.713	€ 12.290.863
2100	€ 45.521.713	€ 35.051.719
2150	€ 91.043.426	€ 57.812.576
2200	€ 91.043.426	€ 80.573.432
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 45.521.713	€ 12.290.863
2100	€ 45.521.713	€ 35.051.719
2150	€ 91.043.426	€ 57.812.576
2200	€ 91.043.426	€ 80.573.432
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 45.521.713	€ 12.290.863
2100	€ 45.521.713	€ 35.051.719
2150	€ 91.043.426	€ 57.812.576
2200	€ 91.043.426	€ 80.573.432

### C.6 Prinses Irenesluis

De prinses Irenesluis bestaat uit twee objecten. Binnen het kunstwerk zijn twee verschillende schutsluizen aanwezig.

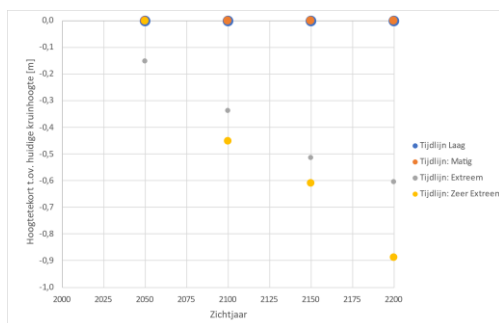
Het kruinhoogtetekort voor de verschillende objecten is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtetekort is

verschillende voor de twee objecten. De kruinhoogte van de oude sluis is 0,10 meter lager dan van de duwvaartsluis.

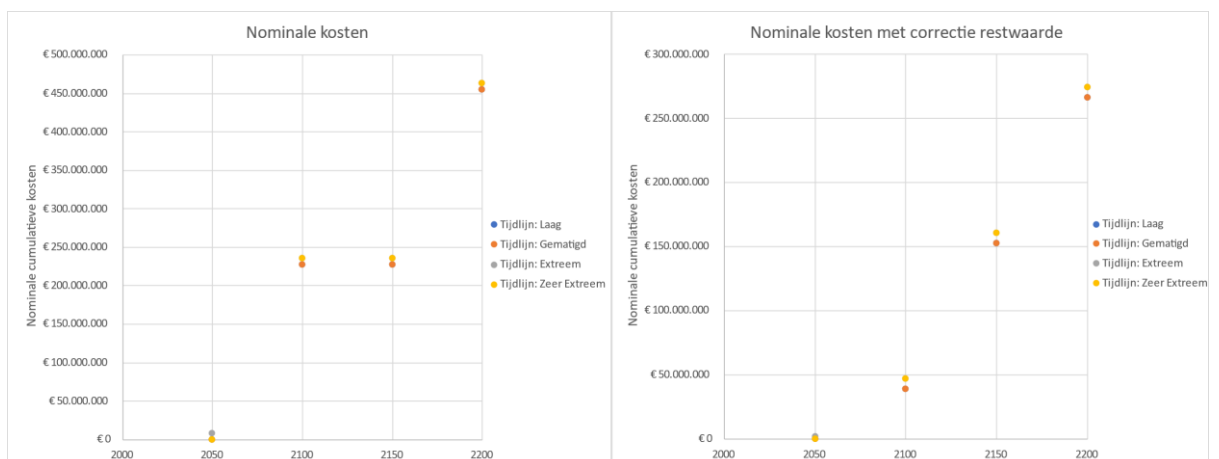
Voor allebei de type objecten is strategie 2 het goedkoopst voor de tijdlijnen Laag en Gematigd. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voor einde levensduur. De objecten worden bij einde levensduur pas vervangen. Vanaf de tijdlijn Extreem is strategie 1 goedkoper voor beide kunstwerken. En bij de tijdlijn zeer Extreem is strategie 1 goedkoper voor de duwvaartsluis en strategie 2 voor de oude sluis. De kosten nemen dus niet per definitie toe met het extremer worden van de tijdlijnen.

Tabel 54: Kenmerken Prinses Irenesluis.

		Duwvaartsluis	Oude sluis
Kosten vervanging 2022	[€]	227.167.263	234.695.040
KostenType	[-]	Schutsluis - Groot	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	9,2	9,1
Einde levensduur	[-]	2083	2046
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024	0,000024



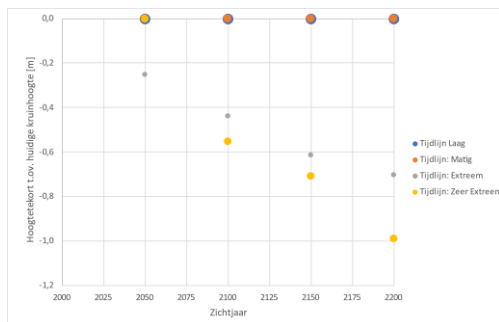
Figuur 129: Hoogtetekort kunstwerk Prs. Irenesluis Duwvaartsluis.



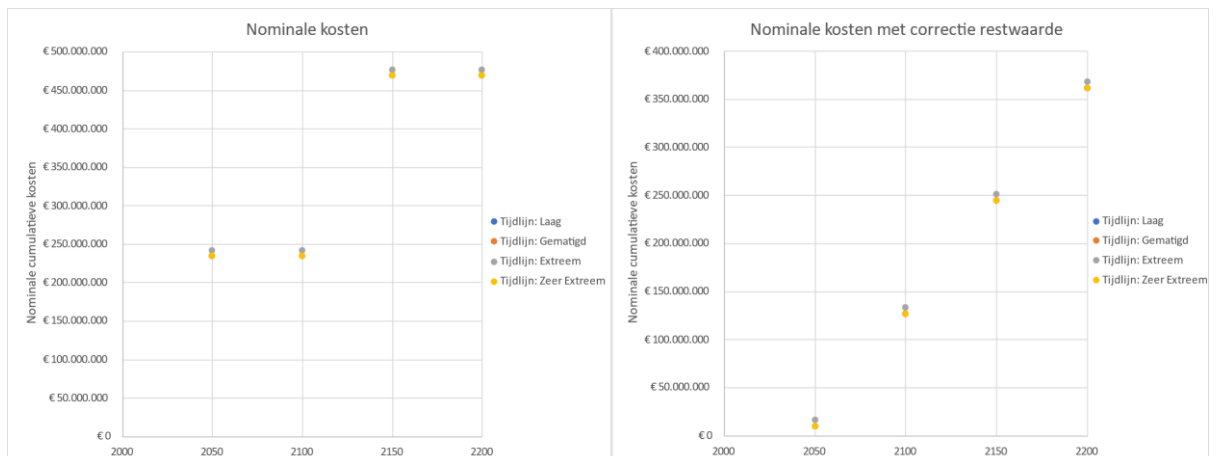
Figuur 130: Nominale cumulatieve kosten Prinses Irenesluis duwvaartsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 55: Nominale kosten Prinses Irenesluis duwvaartsluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 227.167.263	€ 38.618.435
2150	€ 227.167.263	€ 152.202.067
2200	€ 454.334.527	€ 265.785.698
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 227.167.263	€ 38.618.435
2150	€ 227.167.263	€ 152.202.067
2200	€ 454.334.527	€ 265.785.698
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 8.182.943	€ 1.596.672
2100	€ 235.350.207	€ 46.801.378
2150	€ 235.350.207	€ 160.385.010
2200	€ 462.517.470	€ 273.968.642
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 235.350.207	€ 46.801.378
2150	€ 235.350.207	€ 160.385.010
2200	€ 462.517.470	€ 273.968.642



Figuur 131: Hoogtetekort kunstwerk Prs. Irenesluis Oude sluis.



Figuur 132: Nominale cumulatieve kosten Prinses Irenesluis Oude sluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 56: Nominale kosten Prinses Irenesluis oude sluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 234.695.040	€ 9.387.802
2100	€ 234.695.040	€ 126.735.322
2150	€ 469.390.081	€ 244.082.842
2200	€ 469.390.081	€ 361.430.362
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 234.695.040	€ 9.387.802
2100	€ 234.695.040	€ 126.735.322
2150	€ 469.390.081	€ 244.082.842
2200	€ 469.390.081	€ 361.430.362
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 241.476.289	€ 16.169.051
2100	€ 241.476.289	€ 133.516.571
2150	€ 476.171.330	€ 250.864.091
2200	€ 476.171.330	€ 368.211.611
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 234.695.040	€ 9.387.802
2100	€ 234.695.040	€ 126.735.322
2150	€ 469.390.081	€ 244.082.842
2200	€ 469.390.081	€ 361.430.362

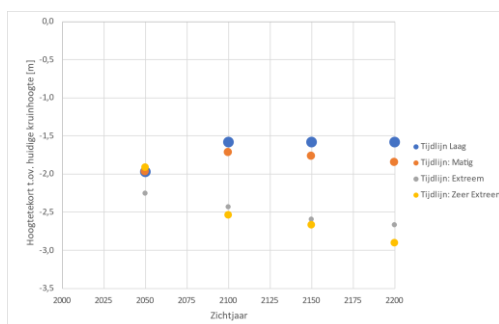
## C.7 Stuw en sluis Amerongen

Het kunstwerk Amerongen bestaat uit een stuw en een schutsluis. Het kunstwerk wordt enkel op hoogte beoordeeld. Het kunstwerk heeft namelijk geen waterkerende functie. Het kruinhoogtetekort voor de stuw en sluis is bepaald op

basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtekort is voor de twee objecten gelijk.

Tabel 57: Kenmerken Amerongen.

		Schutsluis	Stuw
Kosten vervanging 2022	[€]	163.268.901	168.303.897
KostenType	[-]	Schutsluis - Special	Inlaatwerk - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	7,5	7,5
Einde levensduur	[-]	2073	2073
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024	0,000024



Figuur 133: Hoogtetekort kunstwerk Amerongen.

### C.8 Pr. Bernhardsluis

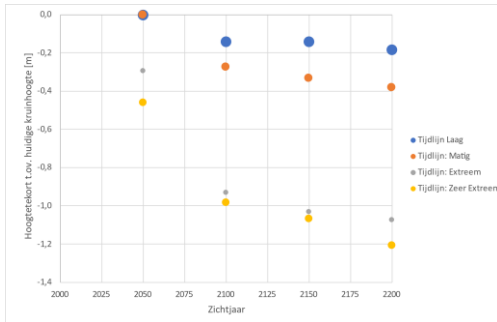
De prins Bernhardsluis bestaat uit twee objecten. Binnen het kunstwerk zijn twee verschillende schutsluizen aanwezig.

Het kruinhoogtetekort voor de verschillende objecten is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtekort is gelijk voor beide objecten.

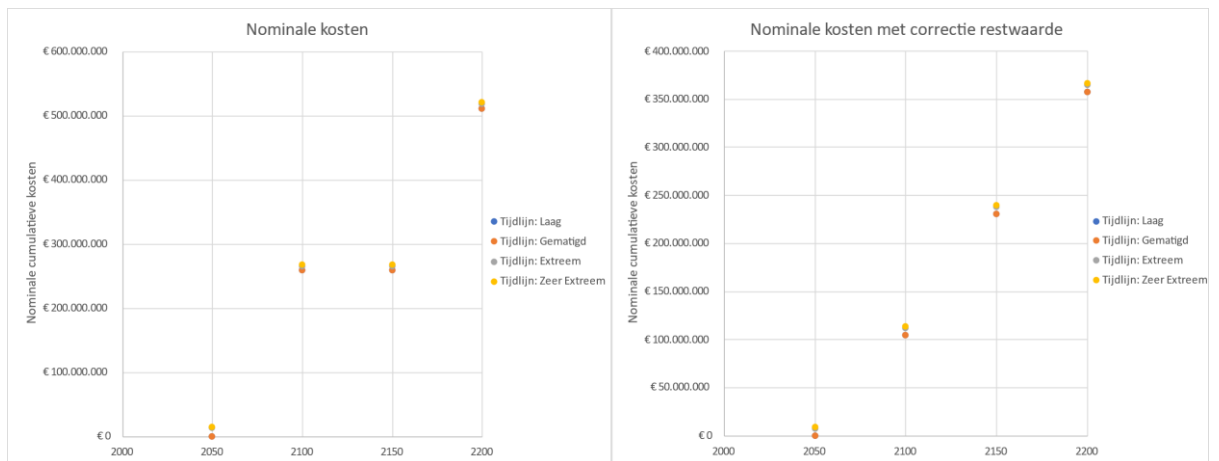
Voor allebei de type objecten is strategie 1 het goedkoopst voor alle tijdlijnen. De objecten worden voor einde levensduur versterkt en bij einde levensduur vervangen. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen. Dit komt door het toenemende kruinhoogtetekort.

Tabel 58: Kenmerken Pr. Bernhardsluis.

		Oude sluis	Duwvaartsluis
Kosten vervanging 2022	[€]	253.035.106	257.456.232
KostenType	[-]	Schutsluis - Groot	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	12.3	12.3
Einde levensduur	[-]	2061	2082
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024	0,000024



Figuur 134: Hoogtetekort kunstwerk Pr. Bernhardsluis.



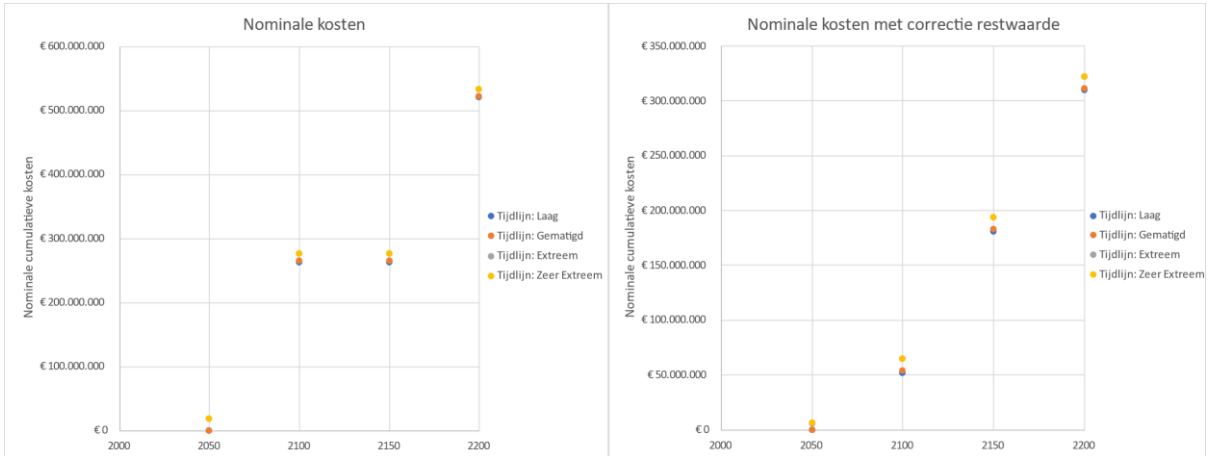
Figuur 135: Nominale cumulatieve kosten Pr. Bernhardsluis Oudesluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 59: Nominale kosten Pr. Bernhardsluis Oude sluis per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdljn: Laag</b>		
	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 258.542.689	€ 104.191.275
2150	€ 258.542.689	€ 230.708.827
2200	€ 511.577.795	€ 357.226.380
<b>Tijdljn: Gematigd</b>		
	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 258.542.689	€ 104.191.275
2150	€ 258.542.689	€ 230.708.827
2200	€ 511.577.795	€ 357.226.380
<b>Tijdljn: Extreem</b>		
	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 12.721.909	€ 7.124.269
2100	€ 265.757.015	€ 111.405.600
2150	€ 265.757.015	€ 237.923.153
2200	€ 518.792.121	€ 364.440.706



Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 14.525.491	€ 8.819.048
2100	€ 267.560.596	€ 113.209.182
2150	€ 267.560.596	€ 239.726.735
2200	€ 520.595.702	€ 366.244.288



Figuur 136: Nominale cumulatieve kosten Pr. Bernhardsluis duwvaartsluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 60: Nominale kosten Pr. Bernhardsluis duwvaartsluis per tijdlijn en zichtjaar.

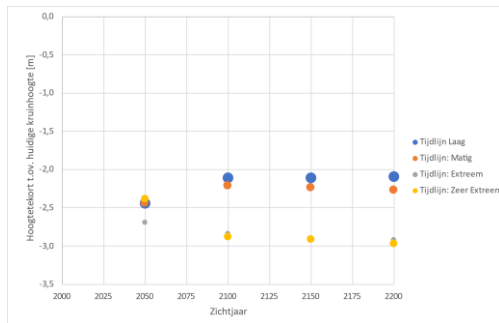
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 263.060.046	€ 51.945.936
2150	€ 263.060.046	€ 180.674.052
2200	€ 520.516.278	€ 309.402.168
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 264.895.140	€ 53.781.030
2150	€ 264.895.140	€ 182.509.146
2200	€ 522.351.372	€ 311.237.262
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 18.449.474	€ 5.615.057
2100	€ 275.905.706	€ 64.791.596
2150	€ 275.905.706	€ 193.519.712
2200	€ 533.361.938	€ 322.247.828
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 18.449.474	€ 6.400.838
2100	€ 275.905.706	€ 64.791.596
2150	€ 275.905.706	€ 193.519.712
2200	€ 533.361.938	€ 322.247.828

### C.9 Stuw en sluis Driel

Het kunstwerk Driel bestaat uit een stuw en een schutsluis. Het kunstwerk wordt enkel op hoogte beoordeeld. Het kunstwerk heeft namelijk geen waterkerende functie. Het kruinhoogtetekort voor de stuw en sluis is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtetekort is voor de twee objecten gelijk.

Tabel 61: Kenmerken Driel.

		Schutsluis	Stuw
Kosten vervanging 2022	[€]	171.847.309	168.303.897
KostenType	[-]	Schutsluis - Special	Inlaatwerk - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	10.6	10.6
Einde levensduur	[-]	2078	2076
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024	0,000024



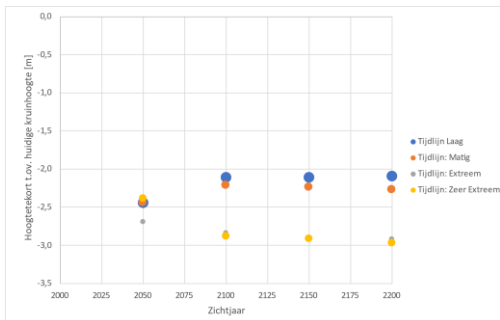
Figuur 137: Hoogtetekort kunstwerk Driel.

### C.10 Sluiscomplex Weurt

Het kunstwerk Weurt bestaat uit een stuw en een schutsluis. Het kunstwerk wordt enkel op hoogte beoordeeld. Het kunstwerk heeft namelijk geen waterkerende functie. Het kruinhoogtetekort voor de stuw en sluis is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtetekort is voor de twee objecten gelijk.

Tabel 62: Kenmerken Driel.

		Schutsluis	Stuw
Kosten vervanging 2022	[€]	171.847.309	168.303.897
KostenType	[-]	Schutsluis - Special	Inlaatwerk - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	10.6	10.6
Einde levensduur	[-]	2078	2076
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024	0,000024



Figuur 138: Hoogtetekort kunstwerk Driel.

### C.11 Volkeraksluizen

Het kunstwerk de Volkeraksluizen bestaat uit acht objecten. Er is onderscheid gemaakt in drie type schutsluizen en één type spuisluis. Alle objecten hebben dezelfde kruinhoogte. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

Voor alle objecten binnen het kunstwerk Volkeraksluizen is strategie 2 het goedkoopst voor alle tijdlijnen. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voor einde levensduur. Het object wordt bij einde levensduur pas vervangen. De kosten zijn voor alle tijdlijnen constant.

Tabel 63: Kenmerken Volkeraksluizen.

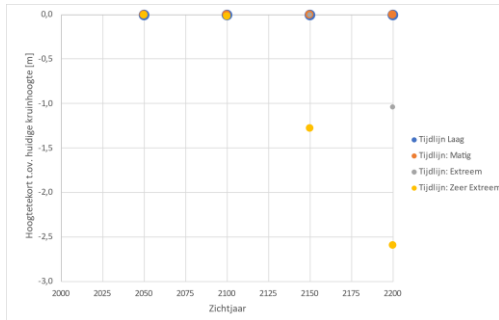
		Schutsluis 1	Schutsluis 2	Schutsluis 3	Spuisluis <sup>4</sup>
Kosten vervanging 2022	[€]	376.482.140	357.433.683	98.981.635	168.303.897
KostenType	[-]	Schutsluis - Special	Schutsluis - Special	Schutsluis - Special	Uitwateringsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NA P]	5.0	5,0	5,0	5,0
Einde levensduur	[-]	2073	2084	2083	2083
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008	0,00008	0,00008	0,00008

<sup>1</sup>Volkeraksluis 1 en Volkeraksluis 2

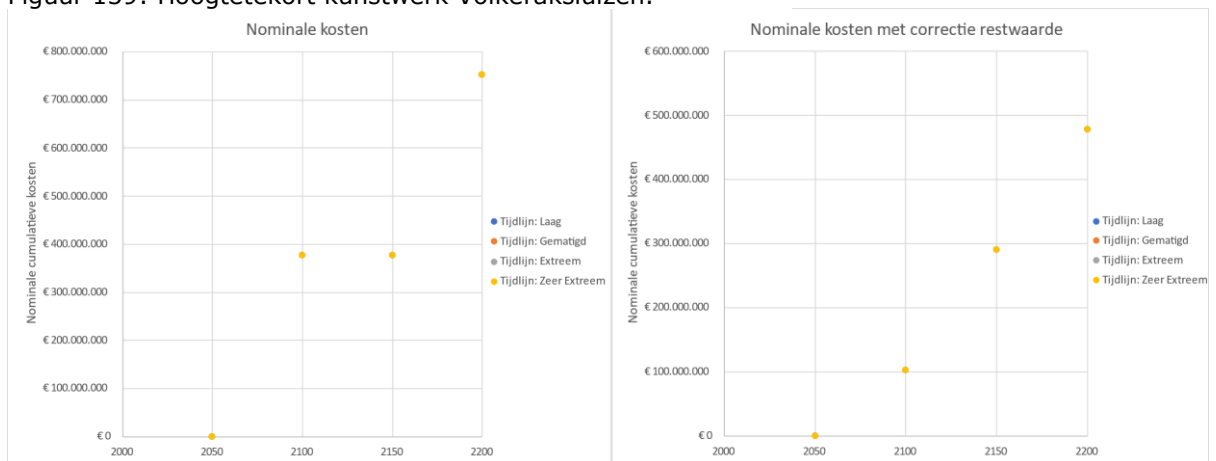
<sup>2</sup>Volkeraksluis 3

<sup>3</sup>Volkerak Jachtensluis

<sup>4</sup>Volkerakinlaatsluis 1, 2, 3 en 4



Figuur 139: Hoogtetekort kunstwerk Volkeraksluizen.

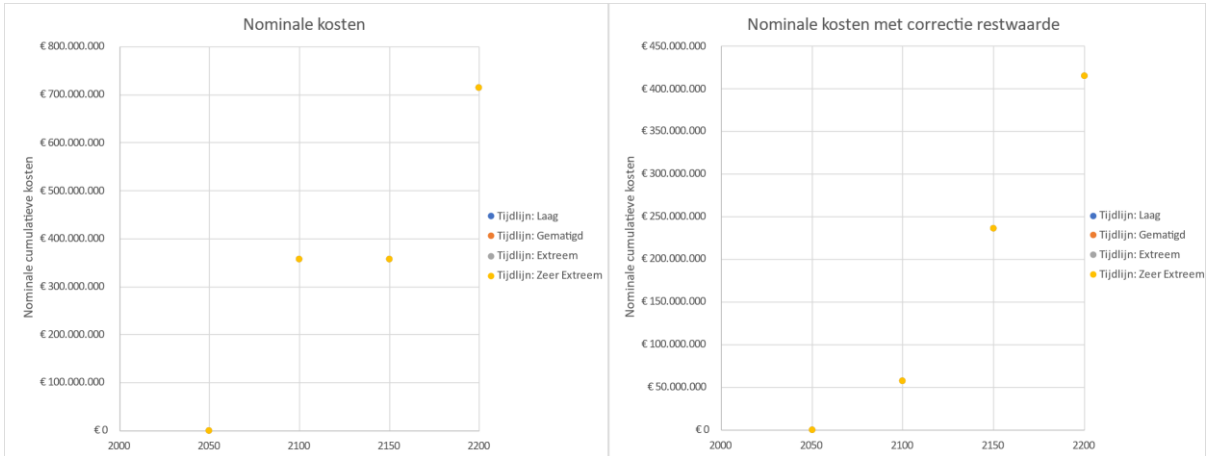


Figuur 140: Nominale cumulatieve kosten Volkeraksluis 1 en Volkerak sluis 2: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 64: Nominale kosten Volkeraksluis 1 en Volkeraksluis 2 per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdljn: Laag		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 376.482.140	€ 101.650.178
2150	€ 376.482.140	€ 289.891.248
2200	€ 752.964.280	€ 478.132.318
Tijdljn: Gematigd		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 376.482.140	€ 101.650.178
2150	€ 376.482.140	€ 289.891.248
2200	€ 752.964.280	€ 478.132.318
Tijdljn: Extreem		
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 376.482.140	€ 101.650.178
2150	€ 376.482.140	€ 289.891.248
2200	€ 752.964.280	€ 478.132.318

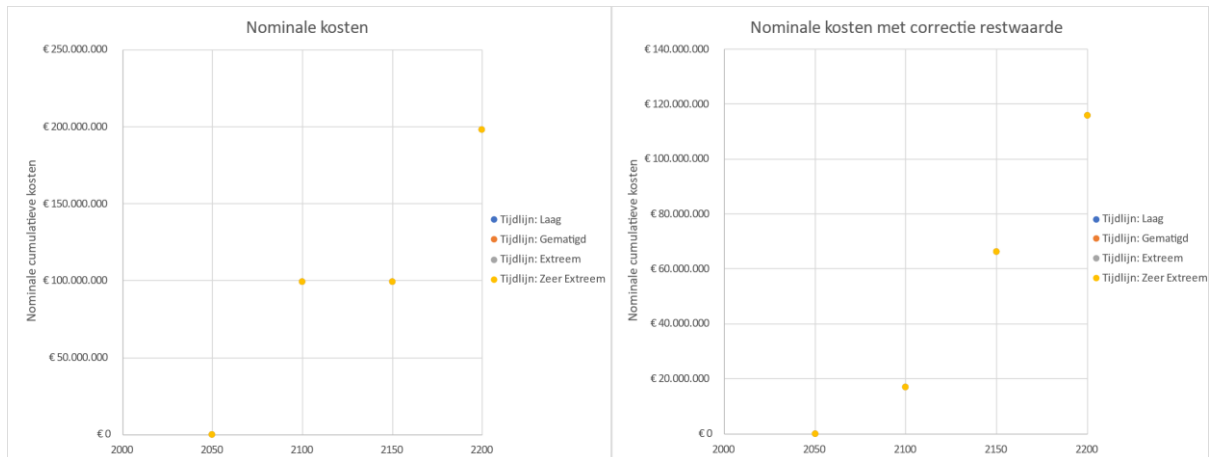
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 376.482.140	€ 101.650.178
2150	€ 376.482.140	€ 289.891.248
2200	€ 752.964.280	€ 478.132.318



Figuur 141: Nominale cumulatieve kosten Volkeraksluis 3: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 65: Nominale kosten Volkeraksluis 3 per tijdlijn en zichtjaar.

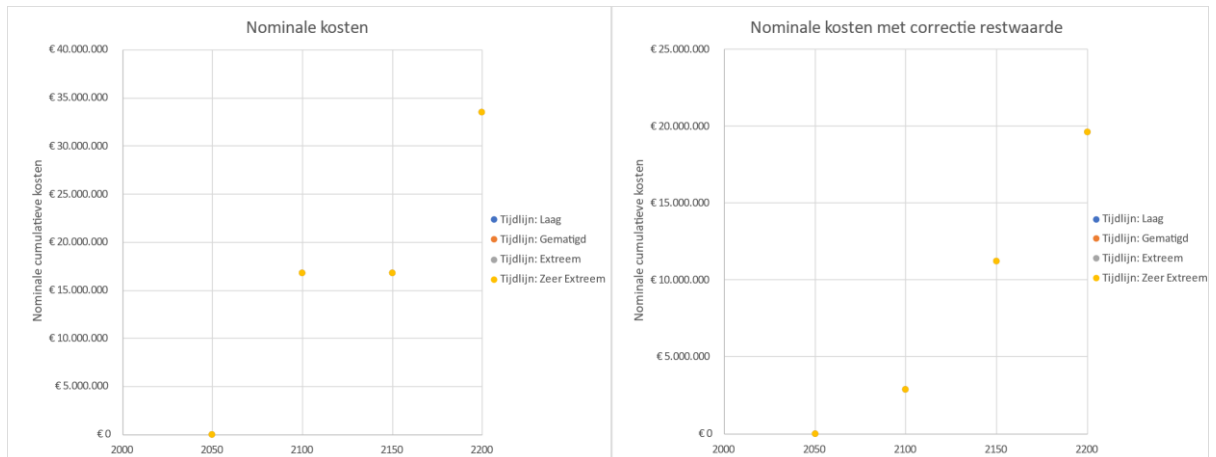
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 357.433.683	€ 57.189.389
2150	€ 357.433.683	€ 235.906.231
2200	€ 714.867.367	€ 414.623.073
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 357.433.683	€ 57.189.389
2150	€ 357.433.683	€ 235.906.231
2200	€ 714.867.367	€ 414.623.073
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 357.433.683	€ 57.189.389
2150	€ 357.433.683	€ 235.906.231
2200	€ 714.867.367	€ 414.623.073
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 357.433.683	€ 57.189.389
2150	€ 357.433.683	€ 235.906.231
2200	€ 714.867.367	€ 414.623.073



Figuur 142: Nominale cumulatieve kosten Volkerak Jachtensluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 66: Nominale kosten Volkerak Jachtensluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 98.981.635	€ 16.826.878
2150	€ 98.981.635	€ 66.317.695
2200	€ 197.963.269	€ 115.808.513
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 98.981.635	€ 16.826.878
2150	€ 98.981.635	€ 66.317.695
2200	€ 197.963.269	€ 115.808.513
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 98.981.635	€ 16.826.878
2150	€ 98.981.635	€ 66.317.695
2200	€ 197.963.269	€ 115.808.513
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 98.981.635	€ 16.826.878
2150	€ 98.981.635	€ 66.317.695
2200	€ 197.963.269	€ 115.808.513



Figuur 143 Nominale cumulatieve kosten Volkerak Inlaatsluis 1, 2, 3 en 4: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 67: Nominale kosten Volkerak Inlaatsluis 1, 2, 3 en 4 per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 16.755.000	€ 2.848.350
2150	€ 16.755.000	€ 11.225.850
2200	€ 33.510.000	€ 19.603.350
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 16.755.000	€ 2.848.350
2150	€ 16.755.000	€ 11.225.850
2200	€ 33.510.000	€ 19.603.350
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 16.755.000	€ 2.848.350
2150	€ 16.755.000	€ 11.225.850
2200	€ 33.510.000	€ 19.603.350
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 16.755.000	€ 2.848.350
2150	€ 16.755.000	€ 11.225.850
2200	€ 33.510.000	€ 19.603.350

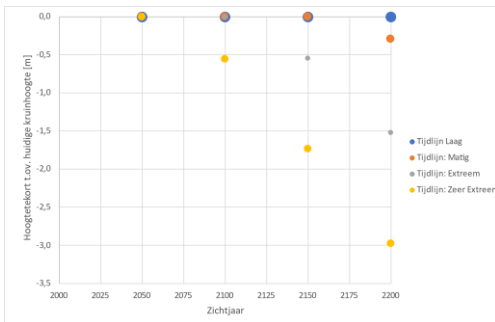
### C.12 Biesboschluis

De Biesboschluis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

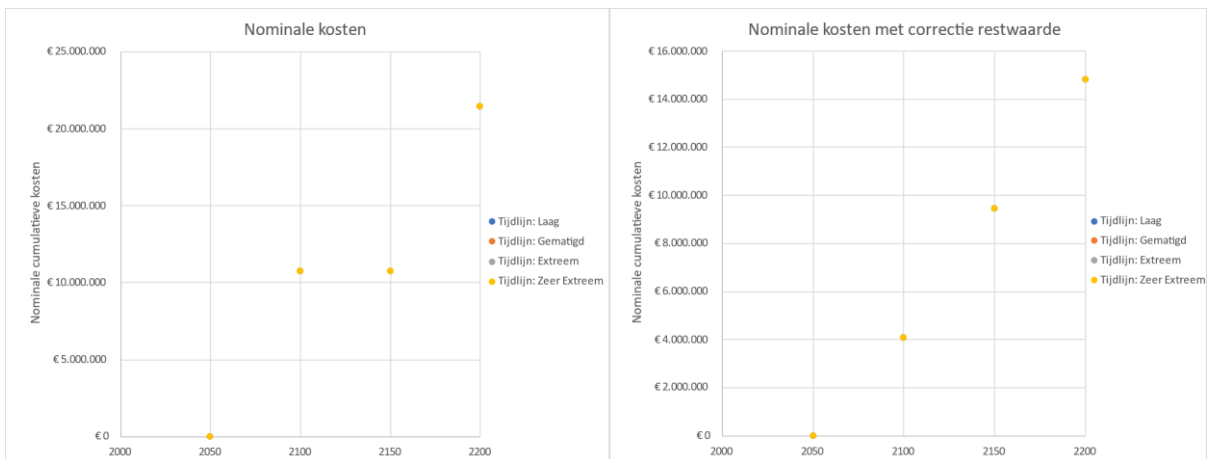
Voor de Biesboschluis is strategie 2 het goedkoopst voor alle tijdlijnen. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voor einde levensduur. Het object wordt bij einde levensduur pas vervangen. De kosten zijn voor alle tijdlijnen constant.

Tabel 68: Kenmerken Biesboschluis.

		Duwvaartsluis
Kosten vervanging 2022	[€]	10.726.676
KostenType	[-]	Schutsluis - Zeer klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,0
Einde levensduur	[-]	2062
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008



Figuur 144: Hoogtetekort kunstwerk Biesboschluis.



Figuur 145: Nominale cumulatieve kosten Biesboschluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 69: Nominale kosten Biesboschluis per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdljn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 10.726.676	€ 4.076.137
2150	€ 10.726.676	€ 9.439.475
2200	€ 21.453.352	€ 14.802.813
Tijdljn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0



2100	€ 10.726.676	€ 4.076.137
2150	€ 10.726.676	€ 9.439.475
2200	€ 21.453.352	€ 14.802.813
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 10.726.676	€ 4.076.137
2150	€ 10.726.676	€ 9.439.475
2200	€ 21.453.352	€ 14.802.813
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 10.726.676	€ 4.076.137
2150	€ 10.726.676	€ 9.439.475
2200	€ 21.453.352	€ 14.802.813

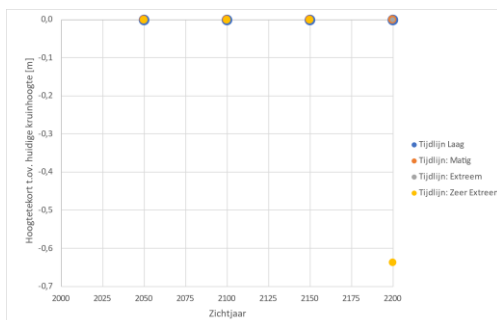
### C.13 Wilhelminasluis

De Wilhelminasluis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

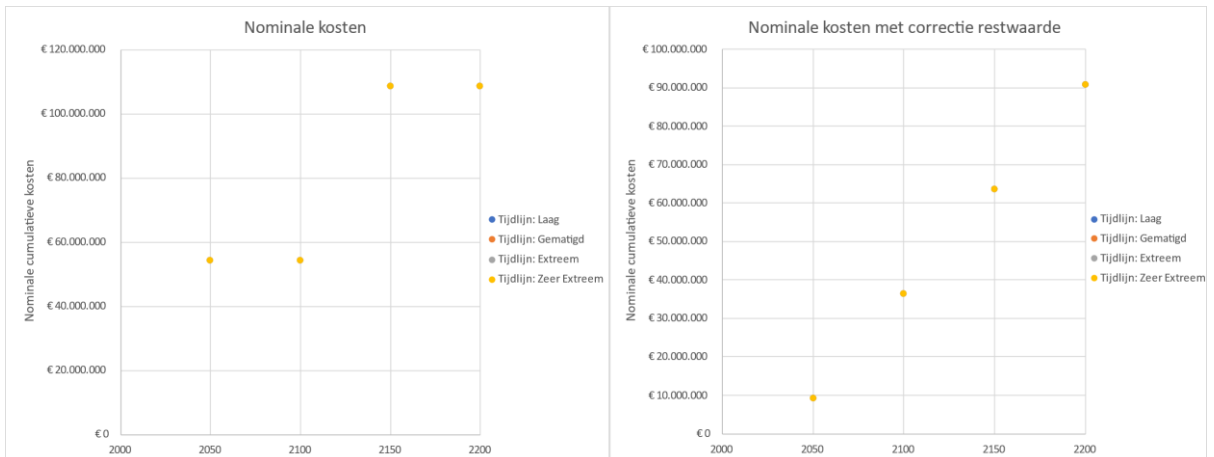
Voor de Wilhelminasluis is versterkingsstrategie 2 het goedkoopst voor alle tijdlijnen. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voor einde levensduur. Doordat het object voor alle tijdlijnen pas bij einde levensduur wordt vervangen, is er geen verschil in kosten tussen de tijdlijnen.

Tabel 70: Kenmerken Wilhelminasluis.

		Duwvaartsluis
Kosten vervanging 2022	[€]	54.320.346
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	7,3
Einde levensduur	[-]	2033
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00004



Figuur 146: Hoogtetekort kunstwerk Wilhelminasluis.



Figuur 147: Nominale cumulatieve kosten Wilhelminasluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 71: Nominale kosten Wilhelminasluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 54.320.346	€ 9.234.459
2100	€ 54.320.346	€ 36.394.632
2150	€ 108.640.691	€ 63.554.804
2200	€ 108.640.691	€ 90.714.977
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 54.320.346	€ 9.234.459
2100	€ 54.320.346	€ 36.394.632
2150	€ 108.640.691	€ 63.554.804
2200	€ 108.640.691	€ 90.714.977
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 54.320.346	€ 9.234.459
2100	€ 54.320.346	€ 36.394.632
2150	€ 108.640.691	€ 63.554.804
2200	€ 108.640.691	€ 90.714.977
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 54.320.346	€ 9.234.459
2100	€ 54.320.346	€ 36.394.632
2150	€ 108.640.691	€ 63.554.804
2200	€ 108.640.691	€ 90.714.977

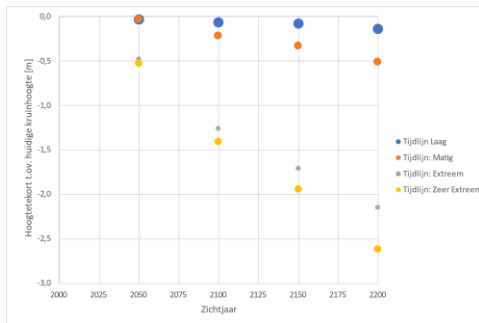
### C.14 Sluis Engelen

Sluis Engelen bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

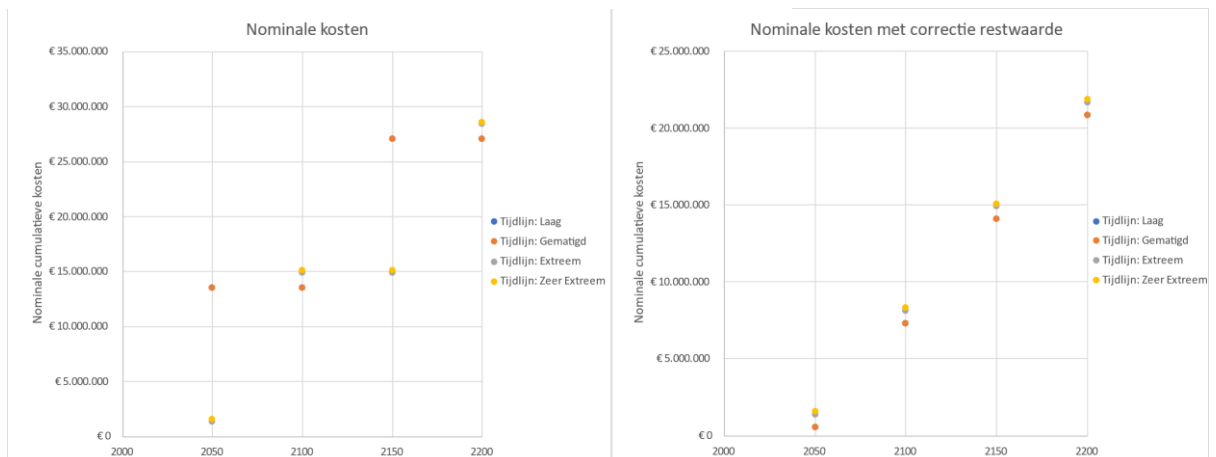
Bij Sluis Engelen ontstaat een kruinhoogtetekort bij alle tijdlijnen voordat einde levensduur is bereikt. Voor de tijdlijnen Laag en Gematigd is versterkingsstrategie 2 het goedkoopst. De sluis wordt direct vervangen wanneer een kruinhoogtetekort optreedt. Voor de tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem is versterkingsstrategie 1 het goedkoopst. Het object wordt eerst versterkt en pas bij einde levensduur vervangen. De kosten nemen toe bij het extremer worden van de tijdlijnen.

Tabel 72: Kenmerken Sluis Engelen.

		Duwwaartsluis
Kosten vervanging 2022	[€]	13.528.000
KostenType	[-]	Schutsluis - Klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	6,5
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008



Figuur 148: Hoogtetekort kunstwerk Sluis Engelen.



Figuur 149: Nominale cumulatieve kosten Sluis Engelen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 73: Nominale kosten sluis Engelen per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 13.528.000	€ 541.120
2100	€ 13.528.000	€ 7.305.120

2150	€ 27.056.000	€ 14.069.120
2200	€ 27.056.000	€ 20.833.120
Tijdslijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 13.528.000	€ 541.120
2100	€ 13.528.000	€ 7.305.120
2150	€ 27.056.000	€ 14.069.120
2200	€ 27.056.000	€ 20.833.120
Tijdslijn: Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 1.360.301	€ 1.360.301
2100	€ 14.888.301	€ 8.124.301
2150	€ 14.888.301	€ 14.888.301
2200	€ 28.416.301	€ 21.652.301
Tijdslijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 1.553.151	€ 1.553.151
2100	€ 15.081.151	€ 8.317.151
2150	€ 15.081.151	€ 15.081.151
2200	€ 28.609.151	€ 21.845.151

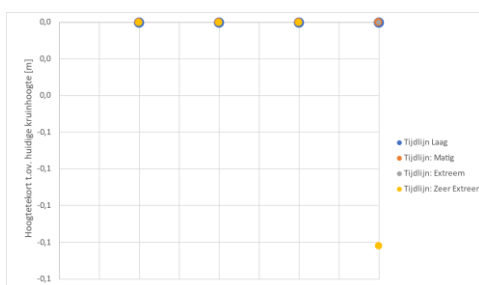
### C.15 Sluis St. Andries

Het kunstwerk Sluis St. Andries bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdslijnen en zichtjaren.

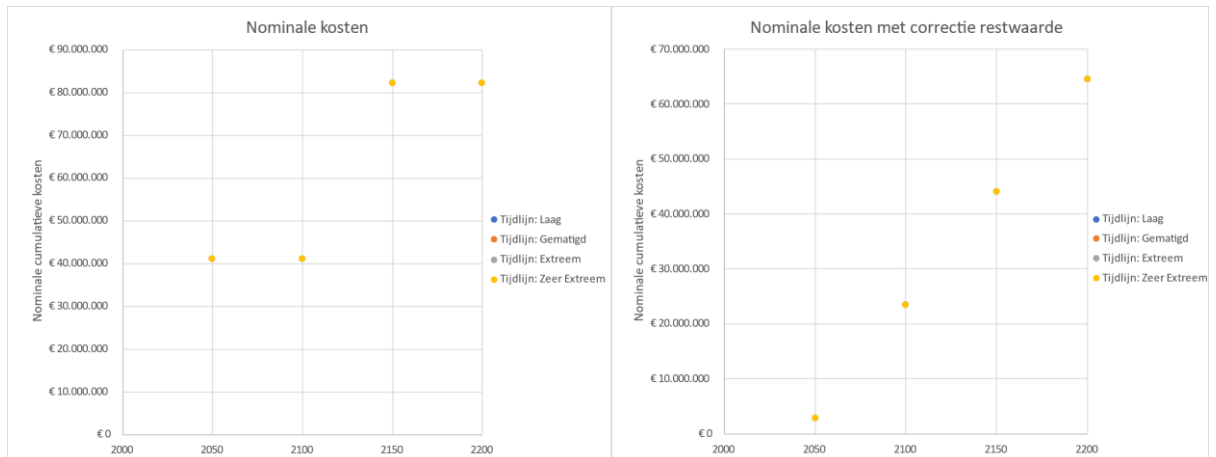
Voor Sluis St. Andries resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten voor alle tijdslijnen. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voordat einde levensduur is bereikt. Doordat het object voor alle tijdslijnen pas bij einde levensduur wordt vervangen, is er geen verschil in kosten tussen de tijdslijnen.

Tabel 74: Kenmerken Sluis St. Andries.

		Duwvaartsluis
Kosten vervanging 2022	[€]	41.113.391
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	10,6
Einde levensduur	[-]	2043
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024



Figuur 150: Hoogtetekort kunstwerk St. Andries.



Figuur 151: Nominale cumulatieve kosten St. Andries: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 75: Nominale kosten sluis St. Andries per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 41.113.391	€ 2.877.937
2100	€ 41.113.391	€ 23.434.633
2150	€ 82.226.782	€ 43.991.328
2200	€ 82.226.782	€ 64.548.024
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 41.113.391	€ 2.877.937
2100	€ 41.113.391	€ 23.434.633
2150	€ 82.226.782	€ 43.991.328
2200	€ 82.226.782	€ 64.548.024
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 41.113.391	€ 2.877.937
2100	€ 41.113.391	€ 23.434.633
2150	€ 82.226.782	€ 43.991.328
2200	€ 82.226.782	€ 64.548.024
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 41.113.391	€ 2.877.937
2100	€ 41.113.391	€ 23.434.633
2150	€ 82.226.782	€ 43.991.328
2200	€ 82.226.782	€ 64.548.024

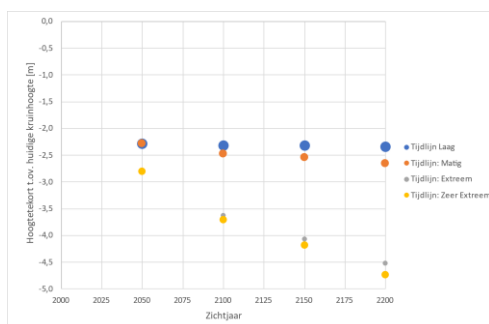
### C.16 Prinses Maxima sluizen

Het kunstwerk Prinses Maximasluizen bestaat uit drie objecten. Dit zijn twee schutsluizen en één stuw. Het kunstwerk wordt enkel op hoogte beoordeeld. Het kunstwerk heeft namelijk geen waterkerende functie. De kerende hoogte van de

drie objecten is gelijk. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

Tabel 76: Kenmerken Prinses Maxima sluisen.

		Zuidelijke sluis	Stuw	Noordelijke sluis
Kosten vervanging 2022	[€]	38.443.691	117.755.482	151.771.841
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel	Inlaatwerk - Special	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	6,0	6,0	6,0
Einde levensduur	[-]	2045	2045	2106
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008	0,00008	0,00008



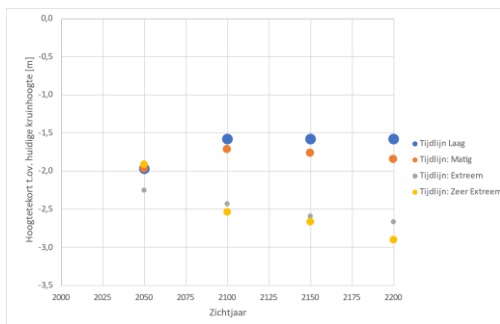
Figuur 152: Hoogtetekort kunstwerk Prinses Maxima sluisen.

### C.17 Stuw en sluiscomplex Grave

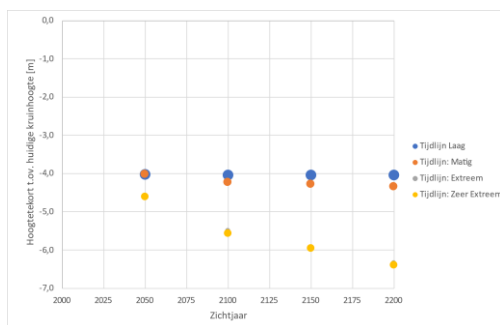
Het kunstwerk Grave bestaat uit een stuw en twee schutsluisen. Het kunstwerk wordt enkel op hoogte beoordeeld. Het kunstwerk heeft namelijk geen waterkerende functie. Het kruinhoogtetekort voor de stuw en de schutsluisen is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. Het kruinhoogtetekort is verschillend voor de objecten. De kruinhoogte van de zuidelijke sluis is lager dan van de noordelijke sluis en de stuw.

Tabel 77: Kenmerken Grave.

		Schutsluis noord	Stuw	Schutsluis zuid
Kosten vervanging 2022	[€]	74.962.092	79.378.901	42.720.000
KostenType	[-]	Schutsluis - Middel	Inlaatwerk - Special	Schutsluis - Middel
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	9,5	9,5	8,2
Einde levensduur	[-]	2083	2025	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000024	0,000024	0,000024



Figuur 153: Hoogtetekort kunstwerk Grave (schutsluis noord en stuw).



Figuur 154: Hoogtetekort kunstwerk Grave (schutsluis zuid).

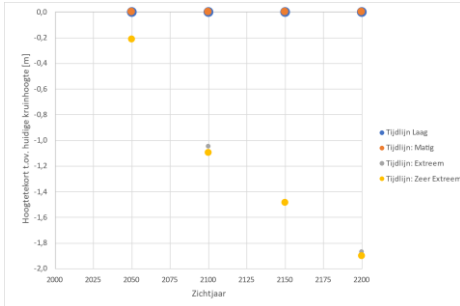
### C.18 Sluiscomplex Heumen

Het kunstwerk sluiscomplex Heumen bestaat uit drie objecten. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De objecten hebben alle drie een verschillende kerende hoogte.

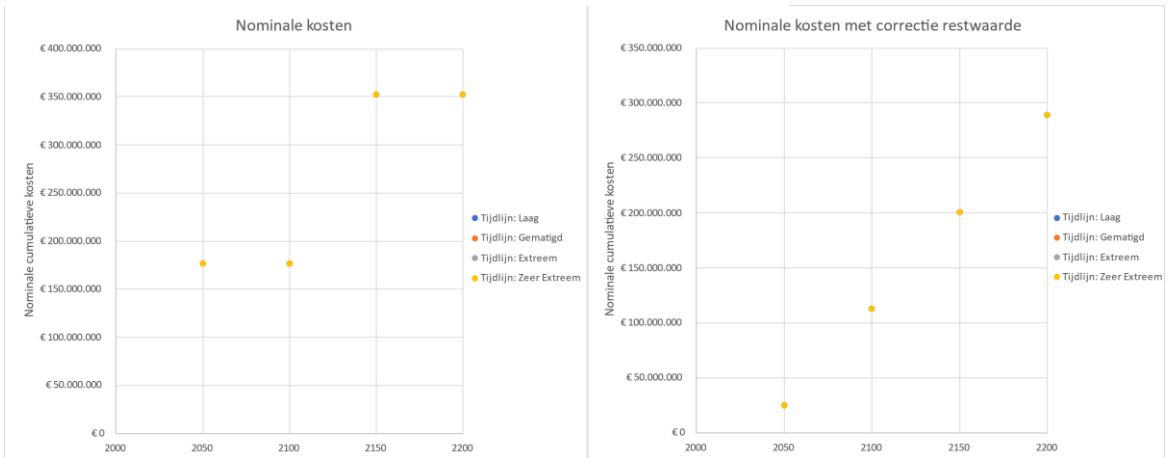
Voor de sluis en het gemaal resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten voor alle tijdlijnen. Voor de keersluis resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten bij de tijdlijn Laag. Voor de tijdlijnen Gematigd, Extreem en Zeer Extreem resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten.

Tabel 78: Kenmerken Sluiscomplex Heumen.

		Sluis	Gemaal	Keersluis
Kosten vervanging 2022	[€]	175.806.575	1.811.3730	44.098.509
KostenType	[-]	Schutsluis - Klein	Gemaal - Middel	Keersluis - Klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	13,4	12,9	13,1
Einde levensduur	[-]	2036	2025	2092
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008	0,00008	0,00008



Figuur 155: Hoogtetekort kunstwerk Sluis Heumen.



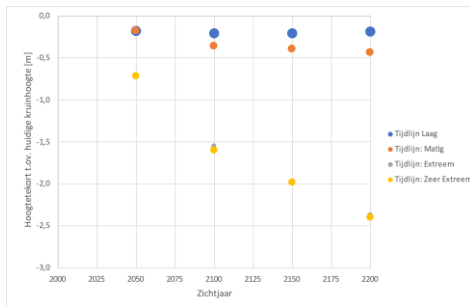
Figuur 156: Nominale cumulatieve kosten Sluis Heumen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 79: Nominale kosten Parksluizen per tijdljn en zichtjaar.

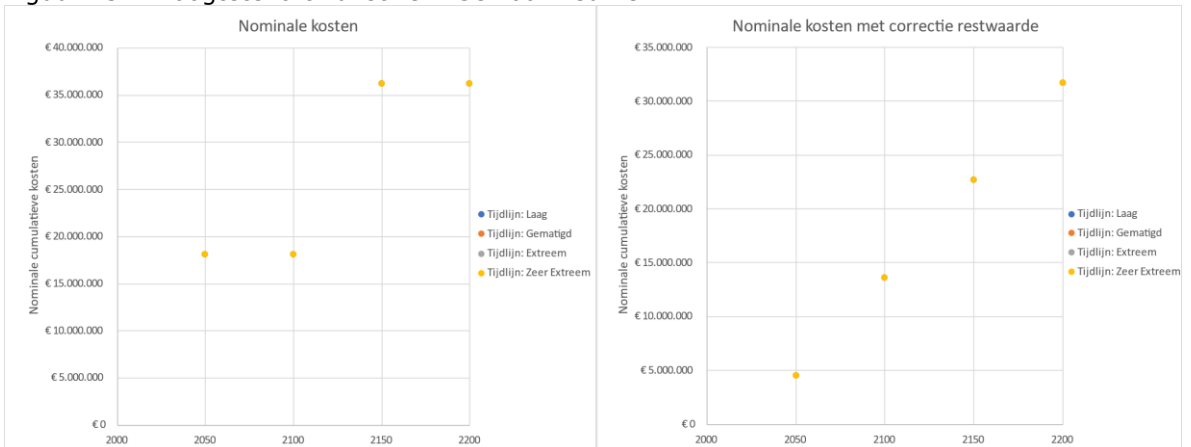
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdljn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 175.806.575	€ 24.612.920
2100	€ 175.806.575	€ 112.516.208
2150	€ 351.613.149	€ 200.419.495
2200	€ 351.613.149	€ 288.322.783
Tijdljn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 175.806.575	€ 24.612.920
2100	€ 175.806.575	€ 112.516.208
2150	€ 351.613.149	€ 200.419.495
2200	€ 351.613.149	€ 288.322.783
Tijdljn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 175.806.575	€ 24.612.920
2100	€ 175.806.575	€ 112.516.208
2150	€ 351.613.149	€ 200.419.495
2200	€ 351.613.149	€ 288.322.783



Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 175.806.575	€ 24.612.920
2100	€ 175.806.575	€ 112.516.208
2150	€ 351.613.149	€ 200.419.495
2200	€ 351.613.149	€ 288.322.783



Figuur 157: Hoogtetekort kunstwerk Gemaal Heumen.

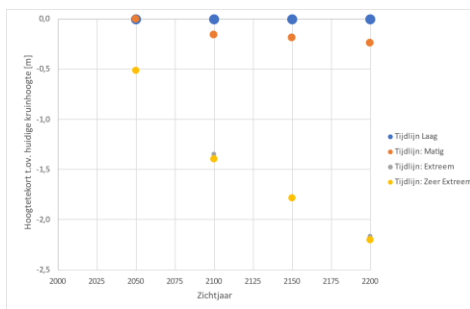


Figuur 158: Nominale cumulatieve kosten Gemaal Heumen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

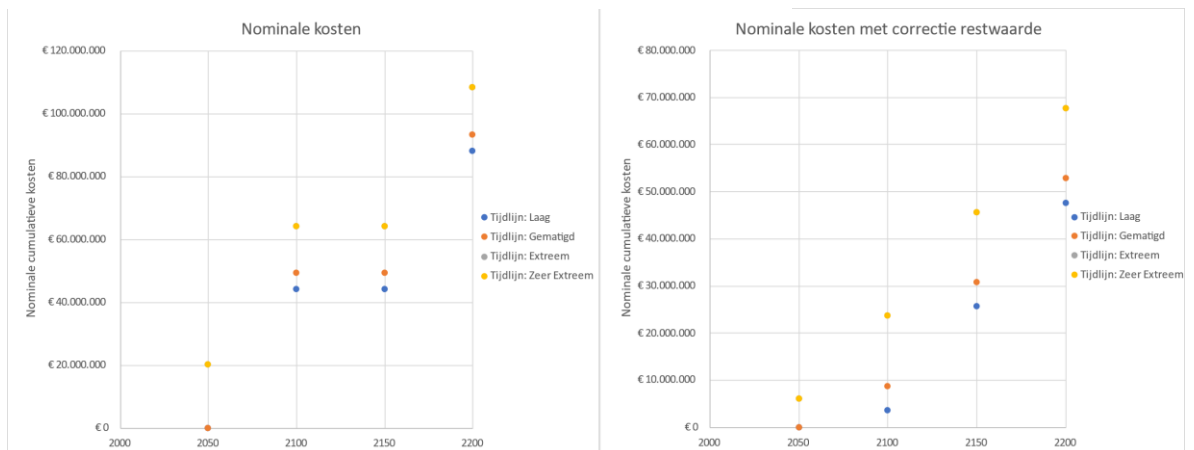
Tabel 80: Nominale kosten Gemaal Heumen per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 18.113.730	€ 4.528.432
2100	€ 18.113.730	€ 13.585.297
2150	€ 36.227.460	€ 22.642.162
2200	€ 36.227.460	€ 31.699.027
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 18.113.730	€ 4.528.432
2100	€ 18.113.730	€ 13.585.297
2150	€ 36.227.460	€ 22.642.162
2200	€ 36.227.460	€ 31.699.027

Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 18.113.730	€ 4.528.432
2100	€ 18.113.730	€ 13.585.297
2150	€ 36.227.460	€ 22.642.162
2200	€ 36.227.460	€ 31.699.027
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 18.113.730	€ 4.528.432
2100	€ 18.113.730	€ 13.585.297
2150	€ 36.227.460	€ 22.642.162
2200	€ 36.227.460	€ 31.699.027



Figuur 159: Hoogtetekort kunstwerk Keersluis Heumen.



Figuur 160: Nominale cumulatieve kosten Keersluis Heumen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 81: Nominale kosten Keersluis Heumen per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 44.098.059	€ 3.527.845
2150	€ 44.098.059	€ 25.576.874
2200	€ 88.196.117	€ 47.625.903

Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 49.284.248	€ 8.714.034
2150	€ 49.284.248	€ 30.763.063
2200	€ 93.382.306	€ 52.812.092
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 20.072.274	€ 6.021.682
2100	€ 64.170.332	€ 23.600.118
2150	€ 64.170.332	€ 45.649.148
2200	€ 108.268.391	€ 67.698.177
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 20.072.274	€ 6.021.682
2100	€ 64.170.332	€ 23.600.118
2150	€ 64.170.332	€ 45.649.148
2200	€ 108.268.391	€ 67.698.177

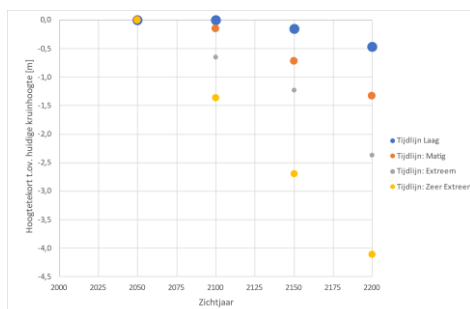
### C.19 Parksluizen

Het kunstwerk Parksluizen bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

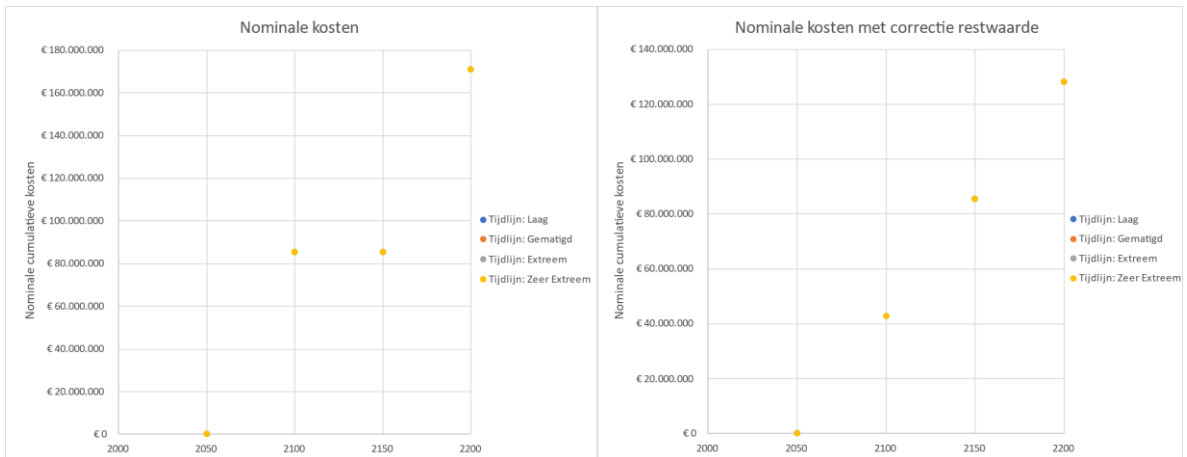
Voor de Parksluizen resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten voor alle tijdlijnen. Er ontstaat geen kruinhoogtetekort voordat einde levensduur is bereikt. Doordat het object voor alle tijdlijnen pas bij einde levensduur wordt vervangen, is er geen verschil in kosten tussen de tijdlijnen.

Tabel 82: Kenmerken Parksluizen.

		Duwvaartsluis
Kosten vervanging 2022	[€]	85.440.000
KostenType	[-]	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,8
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000004



Figuur 161: Hoogtetekort kunstwerk Parksluizen.



Figuur 162: Nominale cumulatieve kosten Parksluizen: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 83: Nominale kosten Parksluizen per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 85.440.000	€ 42.720.000
2150	€ 85.440.000	€ 85.440.000
2200	€ 170.880.000	€ 128.160.000
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 85.440.000	€ 42.720.000
2150	€ 85.440.000	€ 85.440.000
2200	€ 170.880.000	€ 128.160.000
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 85.440.000	€ 42.720.000
2150	€ 85.440.000	€ 85.440.000
2200	€ 170.880.000	€ 128.160.000
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 85.440.000	€ 42.720.000
2150	€ 85.440.000	€ 85.440.000
2200	€ 170.880.000	€ 128.160.000

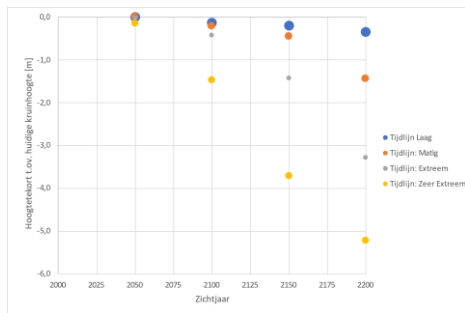
## C.20 Boezemgemaal Gouda

Het kunstwerk Boezemgemaal Gouda bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

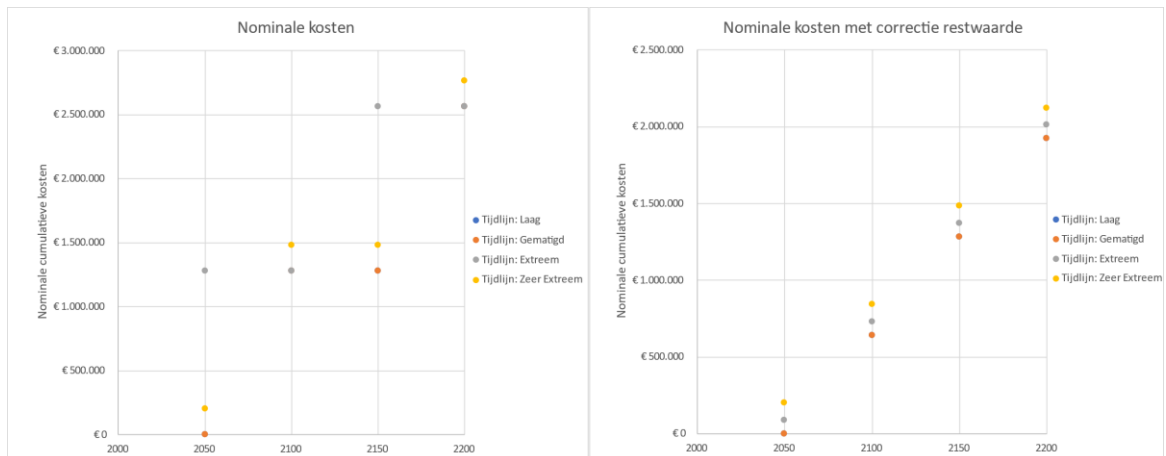
Voor het Boezemgemaal is de versterkingsstrategie afhankelijk van de tijdlijn. Bij alle tijdlijnen treedt een kruinhoogtetekort op voor het bereiken van einde levensduur. Voor de tijdlijnen Laag, Gematigd en Zeer Extreem is versterkingsstrategie 1 het goedkoopst. Opgemerkt dient te worden dat de versterking voor de tijdlijnen Laag en Gematigd in 2049 plaats vinden en de kosten minimaal zijn. De kosten voor versterking zijn 0. Hier is dus eigenlijk sprake van versterkingsstrategie 2. Voor tijdlijn Extreem is versterkingsstrategie 2 het goedkoopst. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen.

Tabel 84: Kenmerken Boezemgemaal Gouda.

		Gemaal
Kosten vervinging 2022	[€]	1.281.600
KostenType	[-]	Gemaal - Klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	3,0
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000012



Figuur 163: Hoogtetekort kunstwerk Boezemgemaal Gouda.



Figuur 164: Nominale cumulatieve kosten Boezemgemaal Gouda: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 85: Nominale kosten Boezemgemaal Gouda per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.281.600	€ 640.800
2150	€ 1.281.600	€ 1.281.600
2200	€ 2.563.200	€ 1.922.400
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 1.281.600	€ 640.800
2150	€ 1.281.600	€ 1.281.600
2200	€ 2.563.200	€ 1.922.400
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 1.281.600	€ 89.712
2100	€ 1.281.600	€ 730.512
2150	€ 2.563.200	€ 1.371.312
2200	€ 2.563.200	€ 2.012.112
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 201.229	€ 201.229
2100	€ 1.482.829	€ 842.029
2150	€ 1.482.829	€ 1.482.829
2200	€ 2.764.429	€ 2.123.629

### C.21 Keersluis Spuikanaal Gouda

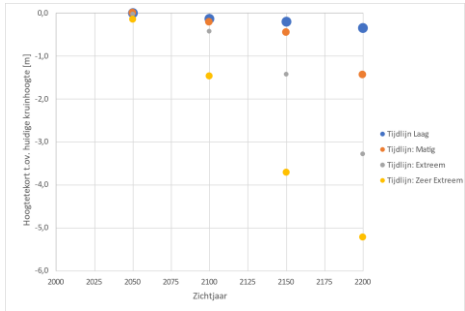
Het kunstwerk Keersluis Spuikanaal Gouda bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

Voor Keersluis Gouda is de versterkingsstrategie afhankelijk van de tijdlijn. Bij alle tijdlijnen treedt een kruinhoogtetekort op voor het bereiken van einde levensduur. Voor de tijdlijnen Laag, Gematigd en Zeer Extreem is versterkingsstrategie 1 het goedkoopst. Opgemerkt dient te worden dat de versterking voor de tijdlijnen Laag en Gematigd in 2049 plaats vinden en de kosten minimaal zijn. De kosten voor versterking zijn 0. Hier is dus eigenlijk sprake van versterkingsstrategie 2. Voor tijdlijn Extreem is versterkingsstrategie 2 het goedkoopst. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen.

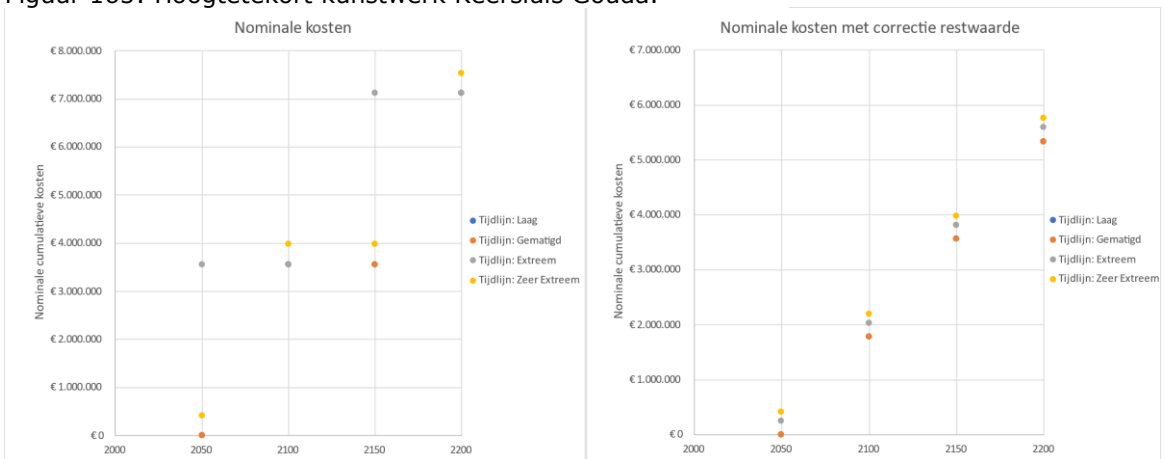
Tabel 86: Kenmerken Keersluis Gouda.

		Gemaal
Kosten vervanging 2022	[€]	3.560.000
KostenType	[-]	Keersluis - Klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	3,0

Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000012



Figuur 165: Hoogtetekort kunstwerk Keersluis Gouda.



Figuur 166: Nominale cumulatieve kosten Keersluis Gouda: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 87: Nominale kosten Keersluis Gouda per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdljn: Laag</b>		
	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.560.000	€ 1.780.000
2150	€ 3.560.000	€ 3.560.000
2200	€ 7.120.000	€ 5.340.000
<b>Tijdljn: Gematigd</b>		
	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.560.000	€ 1.780.000
2150	€ 3.560.000	€ 3.560.000
2200	€ 7.120.000	€ 5.340.000
<b>Tijdljn: Extreem</b>		
	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 3.560.000	€ 249.200
2100	€ 3.560.000	€ 2.029.200
2150	€ 7.120.000	€ 3.809.200

2200	€ 7.120.000	€ 5.589.200
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 418.677	€ 418.677
2100	€ 3.978.677	€ 2.198.677
2150	€ 3.978.677	€ 3.978.677
2200	€ 7.538.677	€ 5.758.677

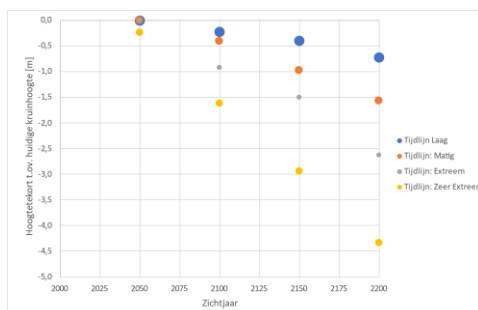
## C.22 Leuvekolk

Het kunstwerk Leuvekolk bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

Voor de Leuvekolk resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten voor de tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem. Er treedt bij deze tijdlijnen geen kruinhoogtetekort op voor einde levensduur. Bij de tijdlijn Zeer Extreem wordt het kunstwerk eerst versterkt en bij einde levensduur vervangen. De kosten voor de tijdlijnen Laag, Gematigd en Extreem zijn gelijk. De kosten voor de tijdlijn Zeer Extreem zijn hoger.

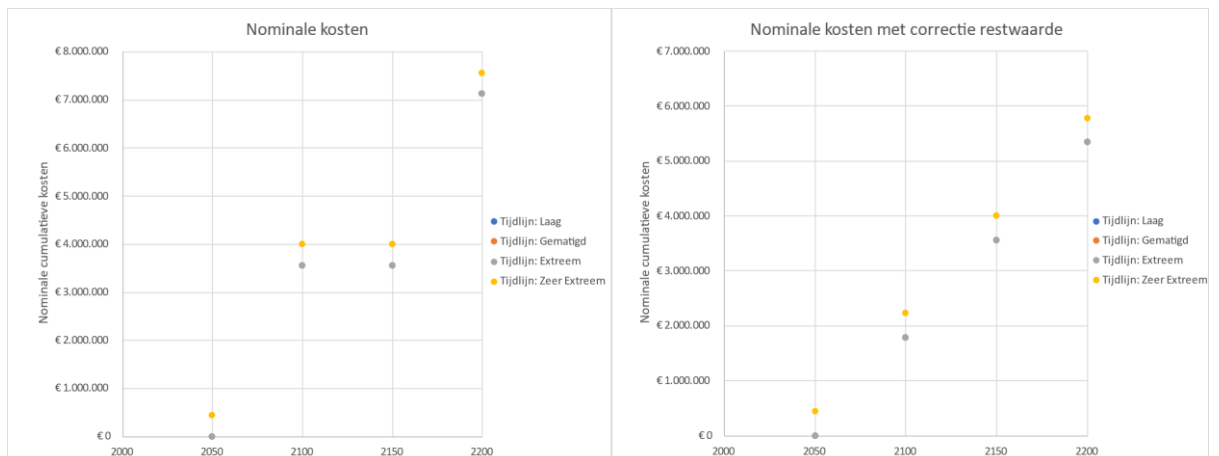
Tabel 88: Kenmerken Leuvekolk.

		Keersluis
Kosten vervanging 2022	[€]	3.560.000
KostenType	[-]	Keersluis - klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,5
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000004



Figuur 167: Hoogtetekort kunstwerk Leuvekolk.





Figuur 168: Nominale cumulatieve kosten Leuvelkolk: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 89: Nominale kosten sluis Leuvelkolk per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.560.000	€ 1.780.000
2150	€ 3.560.000	€ 3.560.000
2200	€ 7.120.000	€ 5.340.000
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.560.000	€ 1.780.000
2150	€ 3.560.000	€ 3.560.000
2200	€ 7.120.000	€ 5.340.000
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 3.560.000	€ 1.780.000
2150	€ 3.560.000	€ 3.560.000
2200	€ 7.120.000	€ 5.340.000
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 442.214	€ 442.214
2100	€ 4.002.214	€ 2.222.214
2150	€ 4.002.214	€ 4.002.214
2200	€ 7.562.214	€ 5.782.214

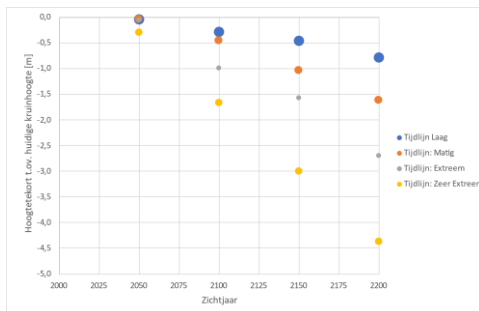
### C.23 Schilthuis

Het kunstwerk Schilthuis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

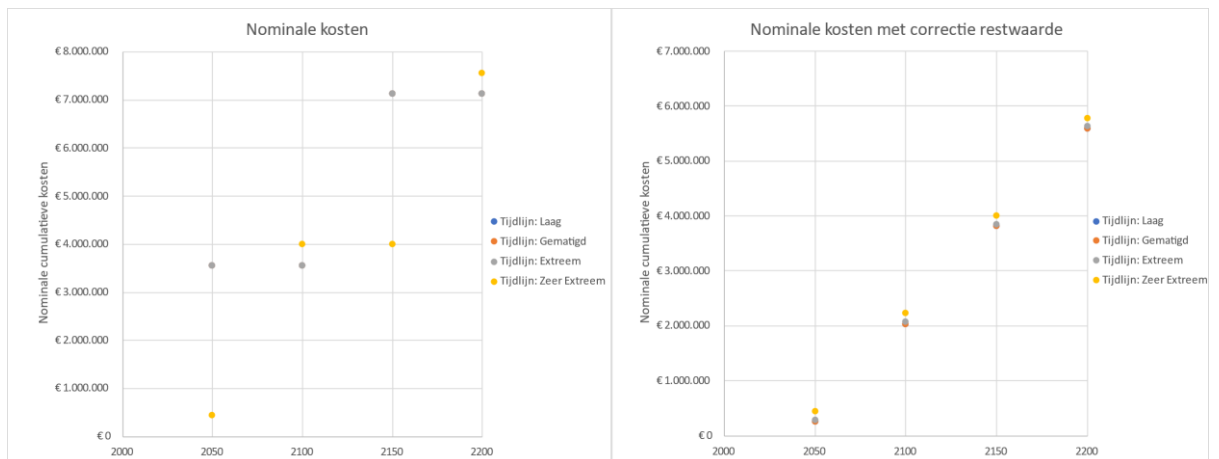
Voor de Schilthuis resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten voor alle tijdlijnen. Er treedt bij deze tijdlijnen een kruinhoogtetekort op voor einde levensduur. Het kunstwerk wordt direct vervangen wanneer een kruinhoogtetekort ontstaat. De kosten nemen toe bij het extremer worden van de tijdlijnen.

Tabel 90: Kenmerken Schilthuis.

		<b>Keersluis</b>
Kosten vervanging 2022	[€]	3.560.000
KostenType	[-]	Keersluis - klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,5
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000004



Figuur 169: Hoogtetekort kunstwerk Coupure Krimpen a/d Lek.



Figuur 170: Nominale cumulatieve kosten Schilthuis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 91: Nominale kosten Schilthuis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 3.560.000	€ 249.200
2100	€ 3.560.000	€ 2.029.200
2150	€ 7.120.000	€ 3.809.200

2200	€ 7.120.000	€ 5.589.200
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 3.560.000	€ 249.200
2100	€ 3.560.000	€ 2.029.200
2150	€ 7.120.000	€ 3.809.200
2200	€ 7.120.000	€ 5.589.200
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 3.560.000	€ 284.800
2100	€ 3.560.000	€ 2.064.800
2150	€ 7.120.000	€ 3.844.800
2200	€ 7.120.000	€ 5.624.800
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 442.214	€ 442.214
2100	€ 4.002.214	€ 2.222.214
2150	€ 4.002.214	€ 4.002.214
2200	€ 7.562.214	€ 5.782.214

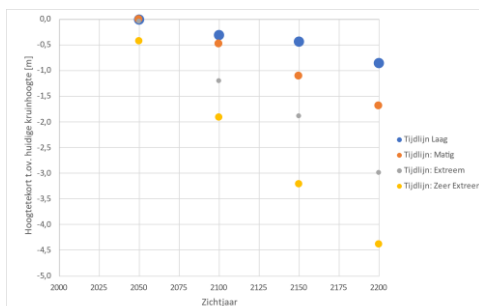
#### C.24 Coupure Krimpen a/d Lek

Het kunstwerk Schilthuis bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren.

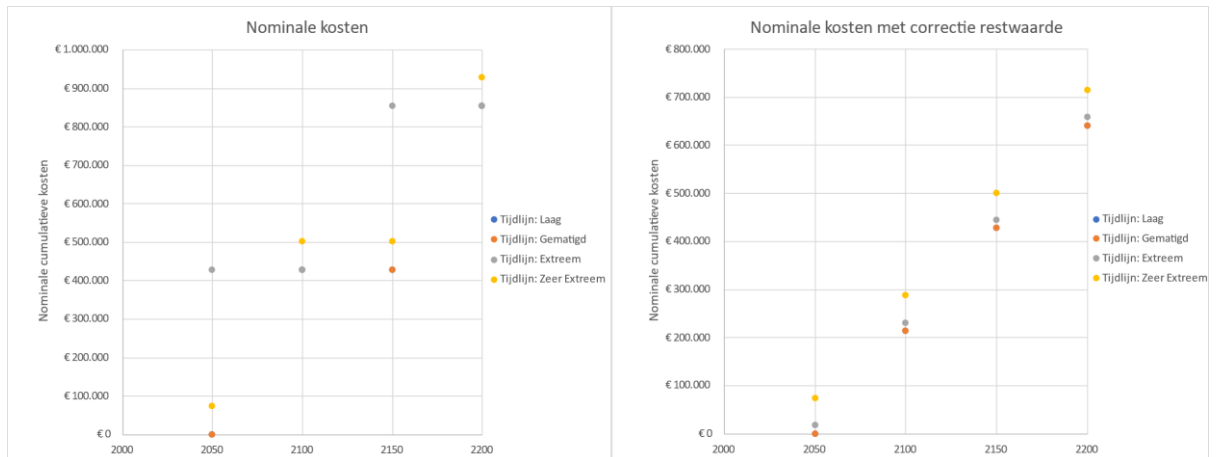
Voor de Schilthuis resulteert versterkingsstrategie 2 in de laagste kosten voor alle tijdlijnen. Er treedt bij deze tijdlijnen een kruinhoogtetekort op voor einde levensduur. Het kunstwerk wordt direct vervangen wanneer een kruinhoogtetekort ontstaat. De kosten nemen toe bij het extremer worden van de tijdlijnen.

Tabel 92: Kenmerken Schilthuis.

		Keersluis
Kosten vervanging 2022	[€]	3.560.000
KostenType	[-]	Keersluis - klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	4,5
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,000004



Figuur 171: Hoogtetekort kunstwerk Coupure Krimpen a/d Lek.



Figuur 172: Nominale cumulatieve kosten Coupure Krimpen a/d Lek: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 93: Nominale kosten Coupure Krimpen a/d Lek per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdlijn: Laag</b>		
	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 427.200	€ 213.600
2150	€ 427.200	€ 427.200
2200	€ 854.400	€ 640.800
<b>Tijdlijn: Gematigd</b>		
	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 427.200	€ 213.600
2150	€ 427.200	€ 427.200
2200	€ 854.400	€ 640.800
<b>Tijdlijn: Extreem</b>		
	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 427.200	€ 17.088
2100	€ 427.200	€ 230.688
2150	€ 854.400	€ 444.288
2200	€ 854.400	€ 657.888
<b>Tijdlijn: Zeer Extreem</b>		
	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 73.481	€ 73.481
2100	€ 500.681	€ 287.081
2150	€ 500.681	€ 500.681
2200	€ 927.881	€ 714.281

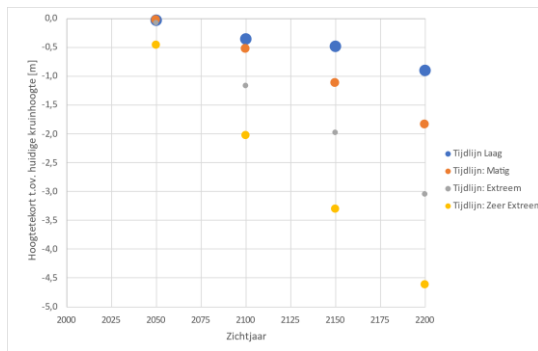
### C.25 Keersluis Middelharnis

Het kunstwerk Spuimiddel sluis Empel bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De

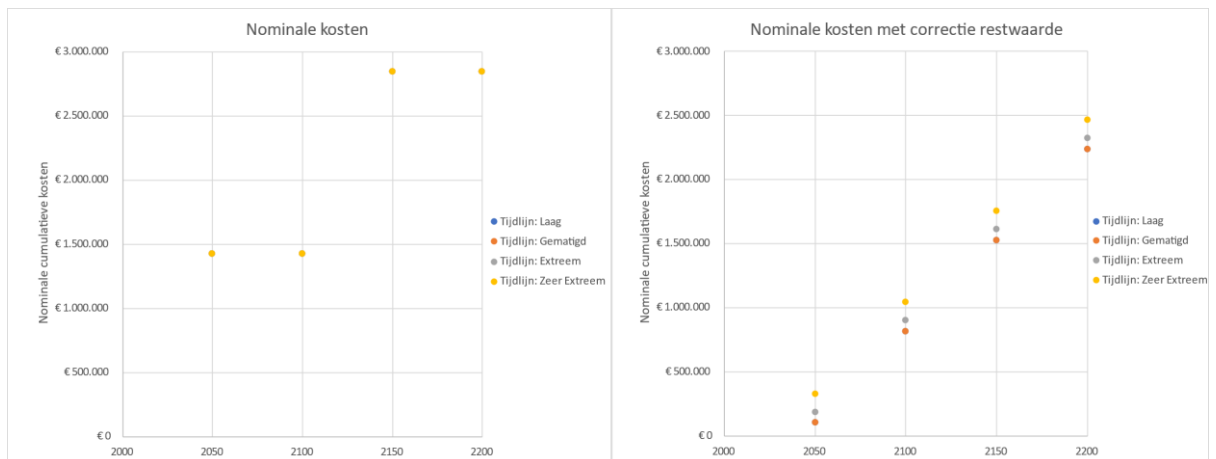
kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen. Voor alle tijdlijnen is versterkingsstrategie 2 het goedkoopst. Het object wordt vervangen wanneer een kruinhoogtetekort optreedt.

Tabel 94: Kenmerken Keersluis Middelharnis.

Kosten vervanging 2022	[€]	1.424.000
KostenType	[-]	Keersluis - Zeer klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	2,8
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,0004



Figuur 173: Hoogtetekort Keersluis Middelharnis.



Figuur 174: Nominale cumulatieve kosten Keersluis Middelharnis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 95: Nominale kosten Keersluis Middelharnis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 1.424.000	€ 99.680
2100	€ 1.424.000	€ 811.680
2150	€ 2.848.000	€ 1.523.680

2200	€ 2.848.000	€ 2.235.680
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 1.424.000	€ 99.680
2100	€ 1.424.000	€ 811.680
2150	€ 2.848.000	€ 1.523.680
2200	€ 2.848.000	€ 2.235.680
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 1.424.000	€ 185.120
2100	€ 1.424.000	€ 897.120
2150	€ 2.848.000	€ 1.609.120
2200	€ 2.848.000	€ 2.321.120
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 1.424.000	€ 327.520
2100	€ 1.424.000	€ 1.039.520
2150	€ 2.848.000	€ 1.751.520
2200	€ 2.848.000	€ 2.463.520

## C.26 Spuimiddel sluis Empel

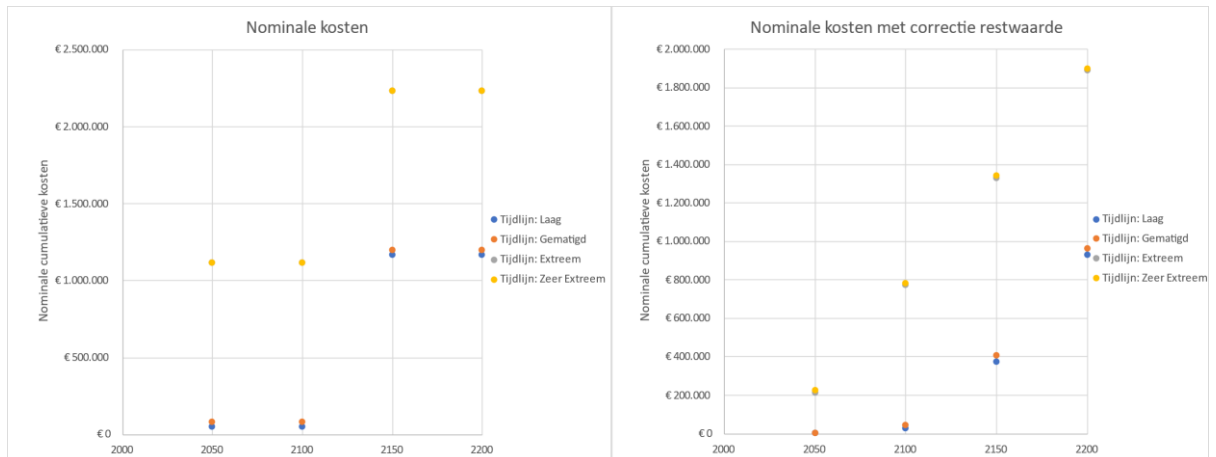
Het kunstwerk Spuimiddel sluis Empel bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De kosten voor de tijdlijnen Laag en Gematigd zijn gelijk. Voor deze tijdlijnen wordt versterkingsstrategie 1 toegepast. Dit bestaat uit eerst versterken en bij einde levensduur vervangen. De kosten voor versterken zijn afhankelijk van het kruinhoogtetekort. Bij een toenemend kruinhoogtetekort nemen de versterkingskosten dus toe. De kosten voor de tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem zijn ook gelijk. Bij deze tijdlijnen wordt versterkingsstrategie 2 toegepast. Hierbij wordt het object direct vervangen wanneer een kruinhoogtetekort ontstaat.

Tabel 96: Kenmerken Spuimiddel sluis Empel.

Kosten vervanging 2022	[€]	1.117.000
KostenType	[-]	Schutsluis - Zeer klein
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,59
Einde levensduur	[-]	2121
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00004



Figuur 175: Hoogtetekort Spuimiddel sluis Empel.



Figuur 176: Nominale cumulatieve kosten Spuimiddel sluis Empel: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 97: Nominale kosten Spuimiddel sluis Empel per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 48.625	€ 1.971
2100	€ 48.625	€ 25.771
2150	€ 1.165.625	€ 372.555
2200	€ 1.165.625	€ 931.055
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 80.472	€ 3.262
2100	€ 80.472	€ 42.650
2150	€ 1.197.472	€ 404.402
2200	€ 1.197.472	€ 962.902
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 1.117.000	€ 212.230
2100	€ 1.117.000	€ 770.730
2150	€ 2.234.000	€ 1.329.230
2200	€ 2.234.000	€ 1.887.730
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 1.117.000	€ 223.400
2100	€ 1.117.000	€ 781.900
2150	€ 2.234.000	€ 1.340.400
2200	€ 2.234.000	€ 1.898.900

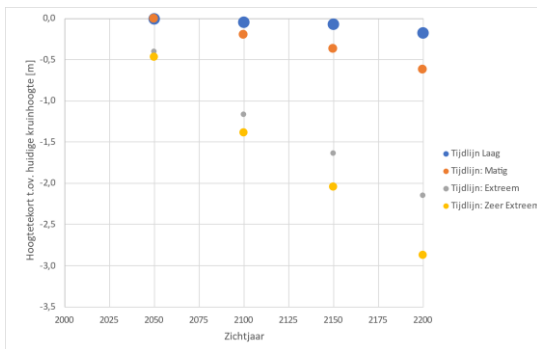
### C.27 Kromme Nol kering

De Kromme Nol kering bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De kosten voor de tijdlijnen Laag en Gematigd zijn gelijk. Voor deze tijdlijnen wordt

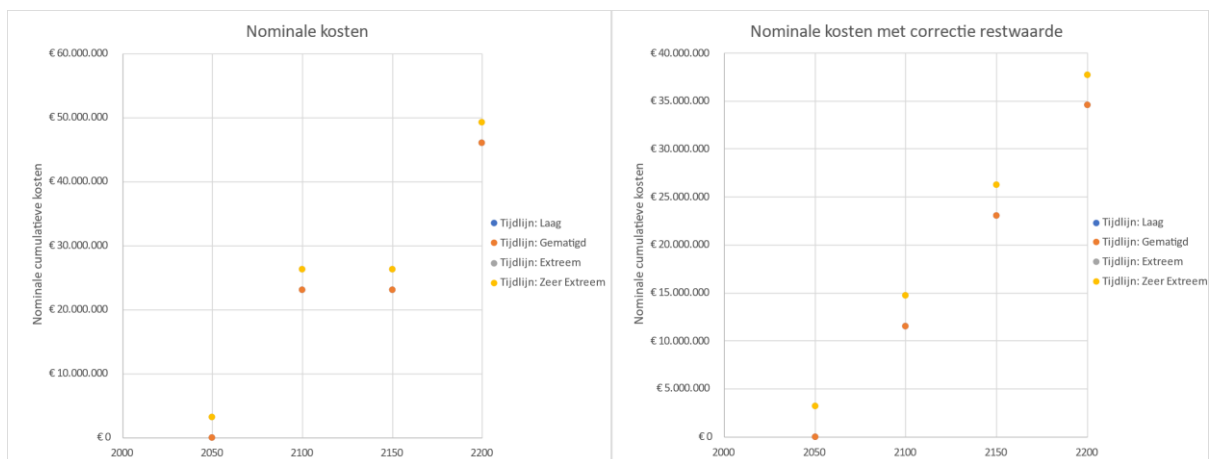
versterkingsstrategie 2 toegepast. Voor deze tijdlijnen treedt geen kruinhoogtetekort op voor einde levensduur. De kosten voor de tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem zijn ook gelijk. Bij deze tijdlijnen wordt versterkingsstrategie 1 toegepast. Dit bestaat uit eerst versterken en bij einde levensduur vervangen. De kosten voor versterken zijn afhankelijk van het kruinhoogtetekort. Bij een toenemend kruinhoogtetekort nemen de versterkingskosten dus toe.

Kosten vervanging 2022	[€]	23.041.744
KostenType	[-]	Keersluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,59
Einde levensduur	[-]	2050
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008

Tabel 98: Kenmerken Kromme Nol kering.



Figuur 177: Hoogtetekort Kromme Nol kering.



Figuur 178: Nominale cumulatieve kosten Kromme Nol kering: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 99: Nominale kosten Kromme Nol kering per tijdlijn en zichtjaar

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 23.041.744	€ 11.520.872



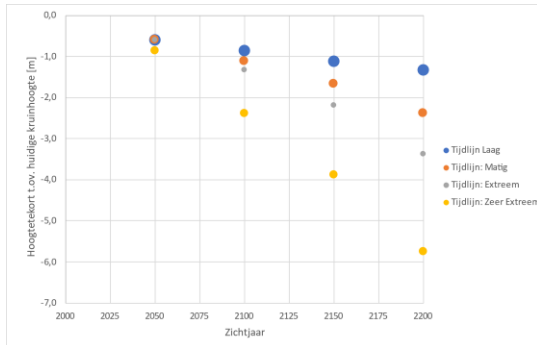
2150	€ 23.041.744	€ 23.041.744
2200	€ 46.083.488	€ 34.562.616
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 23.041.744	€ 11.520.872
2150	€ 23.041.744	€ 23.041.744
2200	€ 46.083.488	€ 34.562.616
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 3.166.879	€ 3.166.879
2100	€ 26.208.623	€ 14.687.751
2150	€ 26.208.623	€ 26.208.623
2200	€ 49.250.367	€ 37.729.495
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 3.166.879	€ 3.166.879
2100	€ 26.208.623	€ 14.687.751
2150	€ 26.208.623	€ 26.208.623
2200	€ 49.250.367	€ 37.729.495

### C.28 Maeslantkering

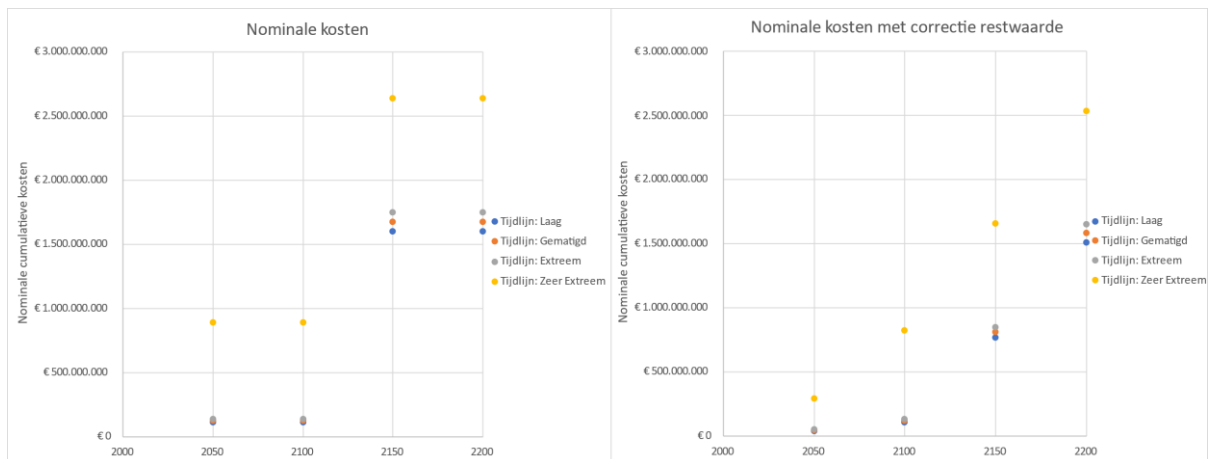
De Maeslantkering bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De kosten nemen toe bij het extremer worden van de tijdlijnen. Dit komt doordat voor alle tijdlijnen versterkingsstrategie 1 het goedkoopst is. Hierbij wordt het kunstwerk eerste versterkt en pas bij einde levensduur vervangen. De kosten voor versterken zijn afhankelijk van het kruinhoogtetekort. Bij een toenemend kruinhoogtetekort nemen de versterkingskosten dus toe. Daarnaast zijn ook de kosten voor vervanging afhankelijk van de zeespiegelstijging.

Tabel 100: Kenmerken Maeslantkering.

Kosten vervanging 2022	[€]	Afhankelijk van kruinhoogtetekort, zie bijlage E.
KostenType	[-]	Schutsluis - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,0
Einde levensduur	[-]	2106
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008



Figuur 179: Hoogtetekort Maeslantkering.



Figuur 180: Nominale cumulatieve kosten Maeslantkering: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 101: Nominale kosten Maeslantkering per tijdljn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijdljn: Laag</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 109.513.530	€ 35.624.883
2100	€ 109.513.530	€ 101.596.889
2150	€ 1.595.639.226	€ 763.408.836
2200	€ 1.595.639.226	€ 1.506.471.684
<b>Tijdljn: Gematigd</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 122.373.195	€ 39.808.148
2100	€ 122.373.195	€ 113.526.940
2150	€ 1.671.241.675	€ 803.875.326
2200	€ 1.671.241.675	€ 1.578.309.566
<b>Tijdljn: Extreem</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 135.241.525	€ 43.994.231
2100	€ 135.241.525	€ 125.465.029
2150	€ 1.743.267.487	€ 842.772.948
2200	€ 1.743.267.487	€ 1.646.785.929
<b>Tijdljn: Zeer Extreem</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 886.030.353	€ 288.226.741

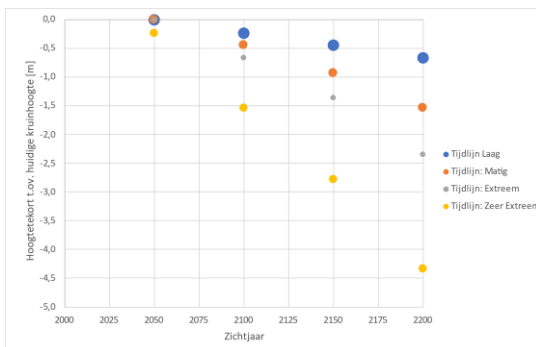
2100	€ 886.030.353	€ 821.979.966
2150	€ 2.635.078.190	€ 1.655.611.402
2200	€ 2.635.078.190	€ 2.530.135.320

## C.29 Hartelkering

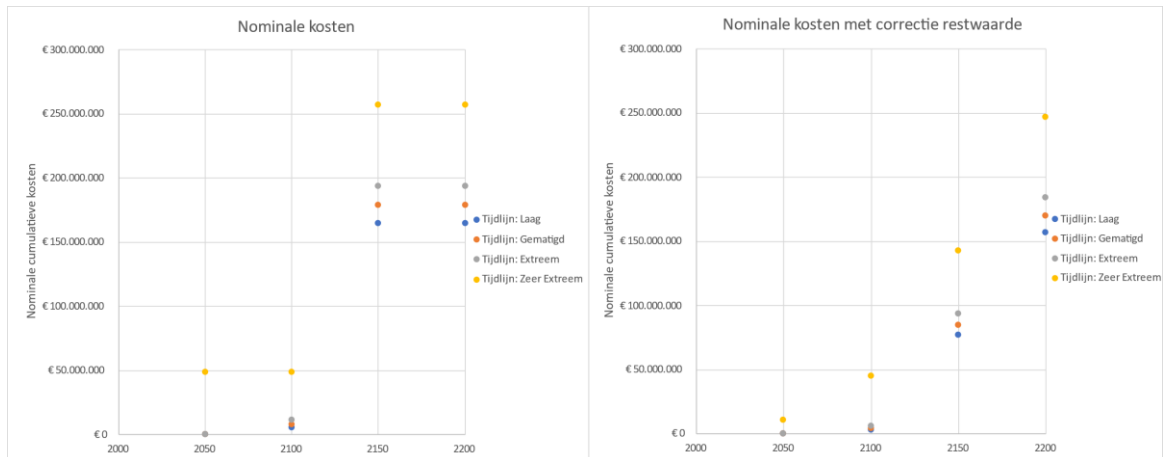
De Hartelkering bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De kosten nemen toe bij het extremer worden van de tijdlijnen. Dit komt doordat voor alle tijdlijnen versterkingsstrategie 1 het goedkoopst is. Hierbij wordt het kunstwerk eerste versterkt en pas bij einde levensduur vervangen. De kosten voor versterken zijn afhankelijk van het kruinhoogtetekort. Bij een toenemend kruinhoogtetekort nemen de versterkingskosten dus toe. Daarnaast zijn ook de kosten voor vervanging afhankelijk van de zeespiegelstijging.

Tabel 102: Kenmerken Hartelkering.

Kosten vervanging 2022	[€]	Afhankelijk van kruinhoogtetekort, zie bijlage E.
KostenType	[-]	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,82
Einde levensduur	[-]	2105
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008



Figuur 181: Hoogtetekort Hartelkering.



Figuur 182: Nominale cumulatieve kosten Hartelkering: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 103: Nominale kosten Hartelkering per tijdlijn en zichtjaar.

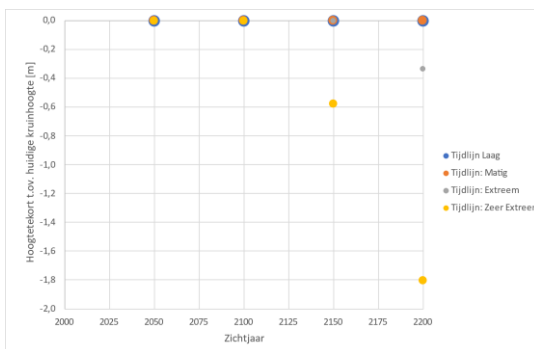
Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
<b>Tijddlijn: Laag</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 5.540.712	€ 2.770.356
2150	€ 164.722.086	€ 77.172.330
2200	€ 164.722.086	€ 156.763.018
<b>Tijddlijn: Gematigd</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 7.895.301	€ 3.947.650
2150	€ 178.746.173	€ 84.778.193
2200	€ 178.746.173	€ 170.203.629
<b>Tijddlijn: Extreem</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 11.474.321	€ 5.737.160
2150	€ 193.324.029	€ 93.306.689
2200	€ 193.324.029	€ 184.231.543
<b>Tijddlijn: Zeer Extreem</b>	Versterkingsstrategie 1	
2050	€ 48.617.863	€ 10.418.114
2100	€ 48.617.863	€ 45.145.159
2150	€ 257.159.870	€ 142.461.766
2200	€ 257.159.870	€ 246.732.770

### C.30 Hollandsche IJsselkering

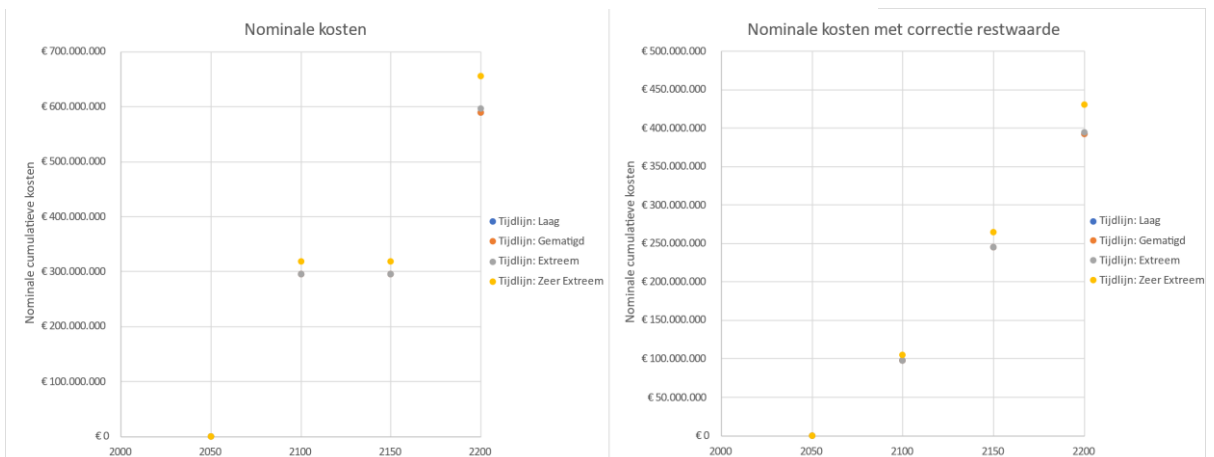
De Hollandsche IJsselkering bestaat uit één object. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen. Voor de Hollandsche IJsselkering is versterkingsstrategie 2 het goedkoopst. Het kunstwerk wordt vervangen bij einde levensduur. De kosten nemen toe, omdat de kosten voor vervanging afhankelijk zijn van de zeespiegelstijging.

Tabel 104: Kenmerken Hollandsche IJsselkering

Kosten vervanging 2022	[€]	Afhankelijk van kruinhoogtetekort, zie bijlage E.
KostenType	[-]	Schutsluis - Groot
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	6,0
Einde levensduur	[-]	2067
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008



Figuur 183: Hoogtetekort Hollandsche IJsselkering



Figuur 184: Nominale cumulatieve kosten Hollandsche IJsselkering: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 105: Nominale kosten Hollandsche IJsselkering per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 294.442.987	€ 97.166.186
2150	€ 294.442.987	€ 244.387.679
2200	€ 588.885.974	€ 391.609.173
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0

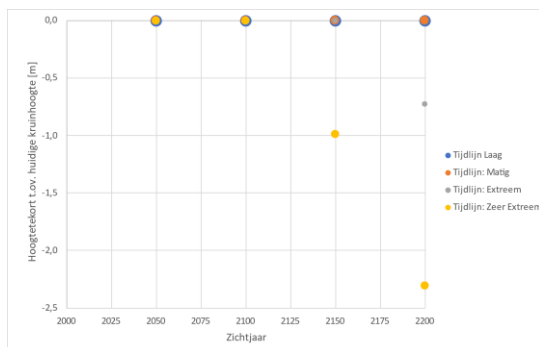
2100	€ 294.442.987	€ 97.166.186
2150	€ 294.442.987	€ 244.387.679
2200	€ 588.885.974	€ 391.609.173
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 294.442.987	€ 97.166.186
2150	€ 294.442.987	€ 244.387.679
2200	€ 596.803.127	€ 394.221.833
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 318.194.446	€ 105.004.167
2150	€ 318.194.446	€ 264.101.390
2200	€ 655.821.905	€ 429.611.507

### C.31 Haringvlietsluizen

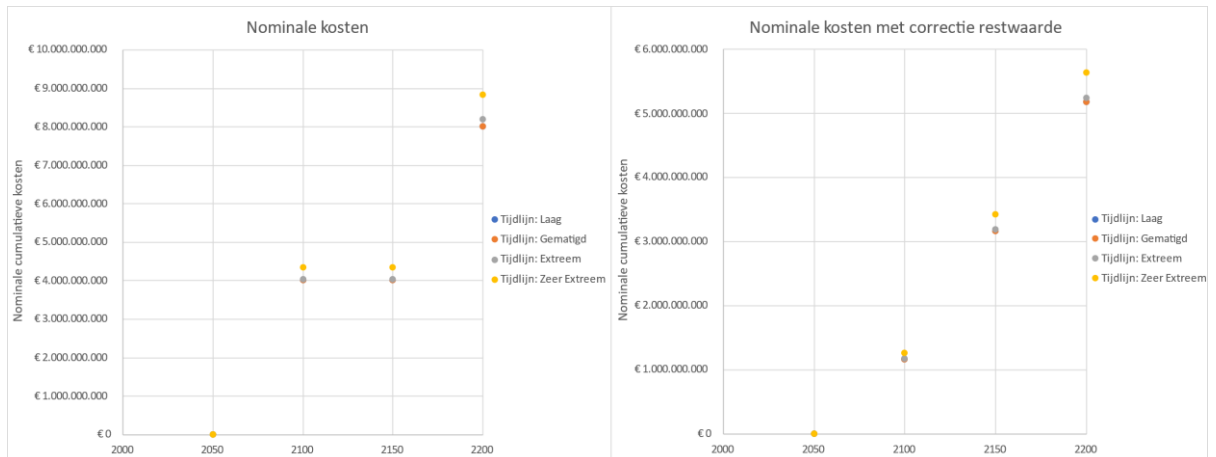
De Haringvlietsluizen bestaan uit 17 identieke spuisluisen. Het kruinhoogtetekort is bepaald op basis van de waterstand bij verschillende tijdlijnen en zichtjaren. De kosten nemen toe met het extremer worden van de tijdlijnen. Dit komt doordat geen kruinhoogtetekort optreedt voor einde levensduur. Voor de Haringvlietsluizen is versterkingsstrategie 2 het goedkoopst. De spuisluisen worden bij alle tijdlijnen pas vervangen bij einde levensduur. In Tabel 106 zijn slechts de kenmerken van een enkele spuisluis gepresenteerd. In totaal zijn 17 spuisluisen aanwezig.

Tabel 106: Kenmerken Haringvlietsluizen spuisluis.

		Spuisluis
Kosten vervanging 2022	[€]	Afhankelijk van kruinhoogtetekort, zie bijlage E.
KostenType	[-]	Uitwateringssluis - Special
Huidig kruinniveau	[m+NAP]	5,0
Einde levensduur	[-]	2071
Overschrijdingskans	[per jaar]	0,00008



Figuur 185: Hoogtetekort Haringvlietsluizen spuisluis.



Figuur 186: Nominale cumulatieve kosten Haringvlietsluizen spuisluis: links totale kosten preventie, rechts totale kosten inclusief verwerking restwaarde.

Tabel 107: Nominale kosten Haringvlietsluizen spuisluis per tijdlijn en zichtjaar.

Zichtjaar	Cumulatief nominale kosten	Cumulatief nominale kosten met correctie restwaarde
Tijdlijn: Laag	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 26.031.175	€ 7.549.041
2150	€ 26.031.175	€ 20.564.628
2200	€ 52.062.349	€ 33.580.215
Tijdlijn: Gematigd	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 26.031.175	€ 7.549.041
2150	€ 26.031.175	€ 20.564.628
2200	€ 52.062.349	€ 33.580.215
Tijdlijn: Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 26.031.175	€ 7.549.041
2150	€ 26.031.175	€ 20.564.628
2200	€ 52.062.349	€ 33.580.215
Tijdlijn: Zeer Extreem	Versterkingsstrategie 2	
2050	€ 0	€ 0
2100	€ 26.031.175	€ 7.549.041
2150	€ 26.031.175	€ 20.564.628
2200	€ 52.062.349	€ 33.580.215

## Bijlage D Tabellen met kostenreducties aanvullende analyses

**D.1 Tabellen bij aanvullende analyse: Overstroombaarheid zeefront**

Tabel 108: Effect van de variant "Extreem Hoog" op de nominale kosten (minus restwaarde) in miljoenen euro's per deelgebied

Deelgebied	Aantal trajecten	Lengte dijk [km]	Tijdlijn	Zichtjaar	Nominale kosten - restwaarde [mln. eur]		Percentage vermeden dijkversterkingskosten
					Zonder maatregel	Met maatregel	[%]
HVHD	9	181	Zeer	2050	72	70	2
				2100	991	926	7
			Extreem	2150	2263	2056	9
				2200	3387	2975	12
RDST	17	296	Zeer	2050	610	597	2
				2100	5285	4998	5
			Extreem	2150	10400	9678	7
				2200	17032	15548	9
NRLK	10	216	Zeer	2050	514	514	0
				2100	2565	2438	5
			Extreem	2150	4310	4001	7
				2200	6692	6114	9
WAAL	10	217	Zeer	2050	1049	1049	0
				2100	4219	4175	1
			Extreem	2150	6703	6550	2
				2200	11098	10750	3
MAAS	16	238	Zeer	2050	337	336	0
				2100	2568	2519	2
			Extreem	2150	4022	3884	3
				2200	5865	5628	4



Tabel 109: Effect van de variant "Volledig overstroombaar" op de nominale kosten (minus restwaarde) in miljoenen euro's per deelgebied.

Deelgebied	Aantal trajecten	Lengte dijk [km]	Tijdlijn	Zichtjaar	Nominale kosten - restwaarde [mln. eur]		Percentage vermeden dijkversterkingskosten
					Zonder maatregel	Met maatregel	[%]
HVHD	9	181	Zeer Extreem	2050	72	72	0
				2100	991	1030	-4
				2150	2263	2402	-6
				2200	3387	3671	-8
RDST	17	296	Zeer Extreem	2050	610	612	0
				2100	5285	5480	-4
				2150	10400	10944	-5
				2200	17032	18171	-7
NRLK	10	216	Zeer Extreem	2050	514	514	0
				2100	2565	2659	-4
				2150	4310	4534	-5
				2200	6692	7120	-6
WAAL	10	217	Zeer Extreem	2050	1049	1049	0
				2100	4219	4253	-1
				2150	6703	6805	-2
				2200	11098	11312	-2
MAAS	16	238	Zeer Extreem	2050	337	337	0
				2100	2568	2597	-1
				2150	4022	4113	-2
				2200	5865	6032	-3

**D.2 Tabel bij aanvullende analyse: Berging in Zuidwestelijke Delta**

Tabel 110: Effect van 'extra' waterberging Zuidwestelijke Delta (Grevelingen) op de nominale kosten (minus restwaarde) in miljoenen euro's per deelgebied.

Deelgebied	Aantal trajecten	Lengte dijk [km]	Tijdljn	Zichtjaar	Reductie in de waterstand [cm]	Nominale kosten - restwaarde [mln. EUR]		Percentage vermeden dijkversterkingskosten [%]
						Zonder maatregel	Met maatregel	
HVHD	9	181	Zeer Extreem	2050	18-21	72	43	40 (40)
				2100	27-33	991	849	14 (13)
				2150	30-41	2263	2023	11 (8)
				2200	33-50	3387	3061	10 (6)
RDST	17	296	Zeer Extreem	2050	1-27	610	447	27 (27)
				2100	6-43	5285	4700	11 (9)
				2150	11-53	10400	9503	9 (6)
				2200	17-63	17032	15684	8 (4)
NRLK	10	216	Zeer Extreem	2050	3	514	473	8 (8)
				2100	8	2565	2480	3 (2)
				2150	12	4310	4182	3 (1)
				2200	17	6692	6496	3 (1)
WAAL	10	217	Zeer Extreem	2050	0	1049	1046	0 (0)
				2100	2	4219	4181	1 (0)
				2150	4	6703	6608	2 (0)
				2200	6	11098	10923	2 (0)
MAAS	16	238	Zeer Extreem	2050	1-18	337	328	3 (3)
				2100	4-27	2568	2473	4 (3)
				2150	6-30	4022	3890	3 (3)
				2200	8-33	5865	5707	3 (2)

**D.3 Tabel bij aanvullende analyse: Berging door Systemwerking**

Tabel 111: Effect door overlopen van de primaire kering van een bergingsgebied op de nominale kosten (minus restwaarde) in miljoenen euro's per deelgebied.

Deel- gebied	Aantal trajecten	Lengte dijk [km]	Tijdljn	Zichtjaar	Reductie in de waterstand [cm]	Nominale kosten - restwaarde [mln. EUR]		Percentage vermeden dijkversterkingskosten [%]
						Zonder maatregel	Met maatregel	
HVHD	9	181	Zeer Extreem	2050	-	72	72	0
				2100	37-46	991	798	19 (18)
				2150	47-64	2263	1887	17 (13)
				2200	55-83	3387	2845	16 (12)
RDST	17	296	Zeer Extreem	2050	-	610	610	0
				2100	7-58	5285	4494	15 (14)
				2150	15-83	10400	8992	14 (11)
				2200	25-105	17032	14794	13 (10)
NRLK	10	216	Zeer Extreem	2050	-	514	514	0
				2100	11	2565	2450	4 (4)
				2150	19	4310	4110	5 (4)
				2200	28	6692	6366	5 (4)
WAAL	10	217	Zeer Extreem	2050	-	1049	1049	0
				2100	3	4219	4168	1 (1)
				2150	8	6703	6554	2 (2)
				2200	12	11098	10808	3 (2)
MAAS	16	238	Zeer Extreem	2050	-	337	337	0
				2100	5-37	2568	2441	5 (5)
				2150	8-47	4022	3816	5 (4)
				2200	12-55	5865	5602	5 (3)

**D.4 Tabel bij aanvullende analyse: Rivierverruimende maatregelen**

Tabel 112: Effect van rivierverruimende maatregelen op de waterstandstoename en nominale kosten. Per deelgebied, Neder-Rijn/Lek (NRLK), Waal (WAAL) en Maas (MAAS) is voor tijdelijk Extreem bepaald wat de vermeden dijkversterkingskosten zijn. De deelgebieden Rijnmond-Drechtsteden en Haringvliet-Hollandsch Diep zijn niet opgenomen in de Tabel, omdat rivierverruiming hier geen invloed heeft.

Deelgebied	Aantal trajecten	Lengte dijk [km]	Tijdelijk	Zichtjaar	Waterstands-toename t.o.v. referentie [m]		Nominale kosten - restwaarde [mln. EUR]		Vermeden dijkversterkingskosten [%]
					Zonder maatregel	Met maatregel	Zonder maatregel	Met maatregel	
NRLK	10	216	Extreem	2100	0.7	0.2	2450	850	65
				2150	1.0	0.5	4150	2150	50
				2200	1.4	0.9	6250	4000	35
WAAL	10	217	Extreem	2100	1.2	0.9	4100	2850	30
				2150	1.5	1.2	6450	4850	25
				2200	1.8	1.5	9750	7750	20
MAAS	16	238	Extreem	2100	1.5	1.0	2450	1700	30
				2150	1.9	1.4	3850	3000	25
				2200	2.5	2.0	5550	4500	20

## Bijlage E Vervangingskosten Stormvloedkeringen

## Bijlage F Betrouwbaarheid Sluiten en Civiel Falen van SVK's

