

**Kennisprogramma Zeespiegelstijging**  
**Systemanalyses Waterveiligheid**  
**Deelrapport Geotechnische Sterkte**

In opdracht van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging Ministerie Infrastructuur en Waterstaat / Deltacommissaris

# Geotechnische sterkte in KP-ZSS systeemanalyses waterveiligheid

## Auteur(s)

Peter de Grave

Wim Kanning

## Geotechnische sterkte in KP-ZSS systeemanalyses waterveiligheid

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	mevrouw A. Labrujere
<b>Referenties</b>	Referenties
<b>Trefwoorden</b>	Systeemanalyses waterveiligheid, KP-ZSS, geotechnische sterkte, OKADER, fragility curves

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	30-10-2024
<b>Projectnummer</b>	11210592-002
<b>Document ID</b>	11210592-002-ZWS-0001
<b>Pagina's</b>	58
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

<b>Peter de Grave</b>		
<b>Wim Kanning</b>		
<b>Met medewerking van</b>		
<b>M.G. van der Krogt</b>		
<b>L.M. Wopereis</b>		

# Samenvatting

## **Algemeen**

Binnen de systeemanalyses van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP-ZSS) wordt onderzoek gedaan naar de houdbaarheid en de oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma onder een stijgende zeespiegel. Hierbij is in Fase 1 in 2022/2023 voor het hele hoofdwatersysteem de waterveiligheidsopgave met bijbehorende dijkversterkingsopgave en -kosten bepaald.

In de analyses is de OKADER tool gebruikt, waarmee een inschatting kan worden gemaakt van de benodigde dijkdimensies en bijbehorende kosten voor verandering in hydraulische randvoorwaarden in de tijd. De dijksterkte ten aanzien van macrostabiliteit en piping wordt in OKADER benaderd met generieke fragility curves die de voorwaardelijke faalkansen van een dijk bij een bepaalde waterstand beschrijven, en zijn vastgesteld op basis van een (beperkt) aantal archetypes van dijken. Deze benadering is per definitie minder nauwkeurig en locatiespecifiek dan bijvoorbeeld resultaten uit een beoordeling of VNK2. Gezien de lokale complexiteit zijn dijkversterkingen en bijbehorende kosten erg moeilijk in een generiek model te vatten. Dit zorgt voor een onzekerheid in de uitkomsten, welke in absolute zin dus met de nodige terughoudend moeten worden beschouwd, maar wel in relatieve zin inzicht kunnen geven in verschillen.

Twee belangrijke kanttekeningen bij de OKADER-analyses zijn in deze studie verder uitgediept:

- 1 de invloed van de berekende faalkansen in de uitgangssituatie
- 2 de extrapolatie van de sterktemodellen bij een stijgende zeespiegel

## **Analyse faalkansen in de uitgangssituatie**

Vanuit beleidsstudies die in het verleden zijn uitgevoerd is bekend dat OKADER vanuit de waterstandsstatistiek en fragility curves vaak hoge faalkansen berekent in de uitgangssituatie. Dit leidt in de berekening tot een grote initiële versterkingsopgave (vóór het jaar 2050) om aan de norm te voldoen, waarbij tevens een effect te verwachten is op de berekende dijkversterkingen in de verdere toekomst. Binnen deze studie is een methode uitgewerkt om in de OKADER-analyses uit te kunnen gaan van een set referentiekansen die een realistischer beeld beoogt te geven van de uitgangssituatie.

Voor het 'op orde komen' aan de norm berekenen we met deze aangepaste kansenset (op basis van VNK2) kosten die (gesommeerd over de beschouwde deelgebieden RMM en Rivieren, Wadden en Westerschelde) ruim 3 miljard euro lager zijn dan in de Systeemanalyses van het KP-ZSS, een afname van zo'n 25% van ruim 13 naar ca. 10 miljard euro. De doorwerking van de inzichten in de startkansen naar de toekomst is qua dijkversterkingskosten vooral te zien in versterkingen op plekken waar de opgaves klein blijven, met name in de tijdlijn Laag (met een zeespiegelstijging van 1 m in het jaar 2200) en in het meer bovenstrooms gelegen gebied van de rivieren waar de waterstandsstijgingen door zeespiegelstijging sowieso beperkt blijven, ook in de extremere tijdlijnen. De totale effecten op de kosten van de extremere tijdlijnen zijn kleiner, omdat dijken bij deze extremere scenario's sowieso versterkt zullen moeten worden vanwege een tekort aan kruinhoogte. De berekende kosteneffecten ten gevolge van de gewijzigde referentiekansen vallen binnen de bandbreedtes die in beleidsanalyses acceptabel geacht worden, en zullen niet leiden tot sterk gewijzigde inzichten binnen de systeemanalyses van het KP-ZSS.

### ***Extrapolatie sterktemodel macrostabiliteit***

Daarnaast zijn kanttekeningen geplaatst bij de aanpak binnen de systeemanalyses met betrekking tot de extrapolatie van de geotechnische sterktemodellen (met name ten aanzien van macrostabiliteit) bij een stijgende buitenwaterstand. In het KP-ZSS wordt de stabiliteitsopgave bepaald middels een verschuiving van fragility curves, hierdoor neemt de opgave per definitie lineair toe met de ZSS: het maakt hierbij niet uit of de aanpassing van 0 m naar 1 m ZSS is of van 4 m naar 5 m ZSS.

In dit rapport wordt de omgang met en de extrapolatie van de geotechnische sterkte beschouwd en wordt gekeken naar de impact hiervan op de dijkversterkingskosten zoals berekend in de systeemanalyses. Hierbij zijn twee cases doorgerekend, één aan de kust en één in het benedenrivierengebied. Voor beide cases is bepaald hoeveel extra berm er voor macrostabiliteit nodig is om aan de stabiliteitseisen te voldoen voor een ZSS van 0, 1 en 2m.

Met name de case 'benedenrivieren' laat zien dat de benodigde versterkingsdimensies exponentieel (meer dan lineair) kunnen toenemen met ZSS. Dit wordt vooral verklaard door de beperkte grondsterkte, lage gewichten en lage effectieve spanningen welke typisch zijn voor het benedenrivierengebied, waardoor deze case gevoelig is voor toenames in buitenwaterstanden. Bij case kust wordt er maar een heel beperkte toename gevonden van de benodigde berm lengtes.

Op basis van bovenstaande lijkt het waarschijnlijk dat bij een grotere ZSS het huidige KP-ZSS in het benedenrivierengebied een onderschatting geeft van opgave, benodigde ruimte en kosten en dat er mogelijk meer constructieve maatregelen nodig zijn omdat verschillende dijken in de toekomst mogelijk niet meer met grond versterkt kunnen worden. Op basis van verkennende berekeningen met OKADER is te zien dat kosten voor de tijdlijn Zeer Extreem (tot zichtjaar 2200) voor het benedenrivierengebied ruim 20% kunnen stijgen ten opzichte van de systeemanalyses, en dat aanpassing van de keringen relatief steeds duurder wordt bij een hogere mate van zeespiegelstijging.

Om een bovengrens van de invloed te kunnen bepalen is gekeken naar de kosten van het constructief versterken van alle keringen in het benedenrivierengebied. Hieruit volgt een kostentoename van 75%, met de kanttekening dat ook voor constructieve maatregelen nog geen representatieve ontwerpberekeningen zijn gedaan en dat ook hier de dimensies (en kosten) van constructies verder kunnen toenemen met een stijgende zeespiegel.

### ***Tot slot***

Deze studie (op basis van cases en onderliggende fysica) laat zien dat de aanpak in het KP-ZSS waarin wordt gewerkt met een verschuiving van fragility curves voor geotechnische sterkte de onderliggende fysica niet goed weergeeft en daarmee niet altijd geschikt is om de stabiliteitsopgave goed in te schatten. Het is de vraag in hoeverre dit geldt over het land verspreid, hoe dit afhangt van de lokale belasting, dijk- en ondergrondopbouw.

Over de technische houdbaarheid van stabiliteitsmaatregelen in grond kunnen geen absolute uitspraken worden gedaan op basis van de beschikbare analyses in het KP-ZSS of deze studie. Het lijkt zeer waarschijnlijk dat bij grotere ZSS de huidige KP-ZSS aanpak een onderschatting geeft van opgave, benodigde ruimte en kosten; en dat er meer constructieve maatregelen nodig zijn. Wat dit betekent voor de bredere conclusies over technische en economische houdbaarheid binnen het KP-ZSS is buiten de scope van dit project.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstelling	8
1.3	Aanpak	9
1.4	Leeswijzer	9
<b>2</b>	<b>Achtergronden dijksterkte in OKADER</b>	<b>10</b>
2.1	Beschrijving OKADER en de toepassing binnen het KP-ZSS	10
2.2	Methode fragility curves	12
2.2.1	Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)	13
2.2.2	Piping en Heave (STPH)	14
2.3	Omgang met faalkanseisen en lengte-effecten	15
2.4	Beschrijving versterkingsmaatregelen	16
<b>3</b>	<b>Analyse effecten startkansen</b>	<b>19</b>
3.1	Inleiding	19
3.2	Gehanteerde referentiekansen	19
3.3	Vergelijking faalkansen OKADER en VNK2	20
3.3.1	Macrostabieliteit binnenwaarts (STBI)	20
3.3.2	Piping en Heave (STPH)	21
3.4	Correctie versterkingsopgave systeemanalyses	21
3.5	Resultaten dijkversterkingsopgave en -kosten	24
3.5.1	Rijn-Maasmonding en rivieren	24
3.5.2	Waddenzee	27
3.5.3	Zuidwestelijke Delta	28
<b>4</b>	<b>Beschouwing methode fragility curves</b>	<b>30</b>
4.1	Inleiding	30
4.2	Beschrijving methode verschuiven fragility curves	30
4.2.1	Bepaling uitgangssituatie	30
4.2.2	Verschuiving fragility curves bij ZSS	31
4.2.3	Effect op dijkdimensies	31
4.2.4	Benodigde toename berm	32
4.3	Beschouwing aanpak methode verschuiving fragility curves	33
4.3.1	Verwachte effecten van ZSS op waterspanningen en benodigde dimensies	33
4.3.2	Mogelijke effecten die zorgen voor een exponentiële opgave door ZSS	34
4.3.3	Veranderingen in de tijd die verder een rol kunnen spelen	35
4.4	Beschouwing omgang uitgesloten vakken	35

4.5	Samengevat	35
<b>5</b>	<b>Cases benodigde stabiliteitsmaatregelen bij ZSS</b>	<b>36</b>
5.1	Aanpak	36
5.1.1	Algemeen	36
5.1.2	Uitgangspunten en aannames	37
5.2	Case 1: Kust	37
5.2.1	Beschrijving case	37
5.2.2	Stap 1: Effect van ZSS op waterstanden en golfhoogte	38
5.2.3	Stap 2: Effect ZSS op de benodigde dijkhoogte	38
5.2.4	Stap 3: Benodigde extra berm lengte om aan de stabiliteitseisen te voldoen.	39
5.2.5	Stap 4: Duiding	40
5.3	Case 2: Benedenrivieren	40
5.3.1	Beschrijving case	40
5.3.2	Stap 1: Effect van ZSS op waterstanden	41
5.3.3	Stap 2: Effect ZSS op de benodigde dijkhoogte	41
5.3.4	Stap 3: Benodigde extra berm lengte om aan de stabiliteitseisen te voldoen.	42
5.3.5	Stap 4: Duiding	43
5.4	Duiding resultaten	44
5.5	Gevoeligheid uitkomsten voor kosten	44
<b>6</b>	<b>Discussie</b>	<b>47</b>
6.1	Over het gebruik van OKADER binnen het KP-ZSS	47
6.2	Over de analyse van startkansen	47
6.3	Over de methode verschuiving fragility curves voor de stabiliteitsopgave	48
6.4	Over de doorgerekende cases	49
6.5	Over de implicaties voor de technische en financiële houdbaarheid	49
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>51</b>
7.1	Conclusies	51
7.2	Aanbevelingen	52
	<b>Bronnen</b>	<b>53</b>
<b>A</b>	<b>Berekende faalkansen systeemanalyses en VNK</b>	<b>54</b>
A.1	Faalkansen Macrostabiliteit binnenwaarts OKADER en VNK2+	54
A.2	Faalkansen piping OKADER en VNK2+	55
<b>B</b>	<b>Correctie versterkingsopgave systeemanalyses Wadden en Zuidwestelijke Delta</b>	<b>56</b>
B.1	Waddenzee	56
B.2	Zuidwestelijke Delta	57

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Binnen de Systeemanalyses van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP-ZSS) wordt onderzoek gedaan naar de houdbaarheid en de oprekbaarheid van de huidige voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma onder een stijgende zeespiegel. Hierbij is in Fase 1 in 2022/2023 voor het hele hoofdwatersysteem de waterveiligheidsopgave bepaald. Hierbij is niet alleen gekeken naar de toename van hydraulische belastingen in het systeem, ook zijn met behulp van de OKADER-tool de benodigde dijkversterkingen bepaald en zijn de bijbehorende dijkversterkingskosten beschouwd.

Vanuit het ENW zijn kanttekeningen geplaatst bij de aanpak in Fase 1 met betrekking tot de extrapolatie van de sterktemodellen bij een stijgende buitenwaterstand. Hierbij is geen invulling gegeven of de maatregelen haalbaar en uitvoerbaar zijn en wat dat mogelijk betekent voor het systeem als geheel. In het onderliggende voorstel wordt naar een deel van deze kanttekeningen gekeken, namelijk de omgang met en de extrapolatie van de geotechnische sterkte zoals deze is gehanteerd en de impact hiervan op de kosten.

Om in de analyses de geotechnische mechanismen macrostabiliteit en piping mee te kunnen nemen is een methode op basis van fragility curves gebruikt, zoals geïmplementeerd in OKADER. Voor het riviereengebied zijn de fragility curves in een aanpalend beleidstraject (IRM) opgesteld, binnen het KP-ZSS is deze set aangevuld tot een landelijk dekkend geheel volgens dezelfde vastgestelde methodiek.

Vanuit beleidsstudies die in het verleden zijn uitgevoerd is bekend dat OKADER hoge faalkansen berekent in de uitgangssituatie. Dit leidt tot een grote initiële versterkingsopgave om aan de norm te voldoen. Onduidelijk is hoe deze referentiekansen doorwerken naar de versterkingsopgave en -kosten in de toekomst onder zeespiegelstijging.

In voorgaande studies is tevens niet uitgebreid gekeken naar de toepasbaarheid van de set fragility curves bij een (continue) sterk gestegen buitenwaterstand voor ontwerpdoeleinden (bepalen van benodigde dijkdimensies), zoals bij een grote mate van zeespiegelstijging aan de orde is. In dit rapport worden deze aspecten verder uitgediept.

## 1.2 Doelstelling

Het doel van deze opdracht is het in beeld brengen van de mogelijke omissies in de gehanteerde aanpak van extrapolatie van geotechnische sterkte, voornamelijk gericht op het startpunt van de analyses (referentiekansen) en de omgang met fragility curves bij het bepalen van de dijkversterkingsdimensies. Hierbij worden onzekerheden en bandbreedtes in kaart gebracht, en wordt een duiding gegeven van de impact op de in de systeemanalyses berekende dijkversterkingsdimensies en -kosten.

Op basis van de uitkomsten wordt een korte doorkijk gegeven naar mogelijke invloed op de conclusies van fase 1 en een eerste inzicht in hoe invulling kan worden gegeven aan de omissies.

## 1.3 Aanpak

Om de voorliggende vragen te kunnen beantwoorden zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- 1 Uitwerken van een berekeningsmethode waarbij door aanpassingen in de fragility curves is uitgegaan van een meer realistische set van referentiekansen in de beginsituatie. Hiertoe zijn de nodige wijzigingen doorgevoerd in OKADER, waarna is doorgerekend hoe dit doorwerkt in de berekende dijkversterkingsopgave en -kosten in de systeemanalyses van het KP-ZSS.
- 2 Beschouwen van omissies in de methode fragility curves bij een stijgende buitenwaterstand. Op basis van een gestructureerde analyse onder meer op basis van consultatie van experts worden aandachtspunten bij de gehanteerde aanpak binnen het kennisprogramma geïnventariseerd en wordt een inschatting gedaan van de relevantie en mogelijke impact op de versterkingsdimensies.
- 3 In een vervolgstap worden specifieke berekeningen gemaakt (macrostabiliteit) voor een aantal representatieve trajecten en vakken. Bij dit onderdeel is aansluiting gezocht bij een lopend onderzoek binnen SITO-IS naar tipping-points in dijkversterkingen bij een stijgende buitenwaterstand (Deltares, 2024). Berekeningsresultaten worden vergeleken met de resultaten van de methode fragility curves en waar nodig doorgerekend in OKADER om verschillen te kunnen duiden.
- 4 Tot slot is een beschouwing gemaakt van de doorwerking van de bevindingen op de resultaten van de systeemanalyses van het KP-ZSS en wordt een inschatting gedaan van de impact in relatie tot bandbreedtes en resterende onzekerheden.

## 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op de achtergronden van OKADER en de gehanteerde methodiek bij het berekenen van de versterkingsmaatregelen en -kosten daarin aan de hand van fragility curves. Tevens worden hier de achtergronden en uitgangspunten bij de fragility curves zelf beschreven.

In hoofdstuk 3 wordt de analyse beschreven naar het effect van de startkansen op de dijkversterkingsopgave en -kosten (activiteit a).

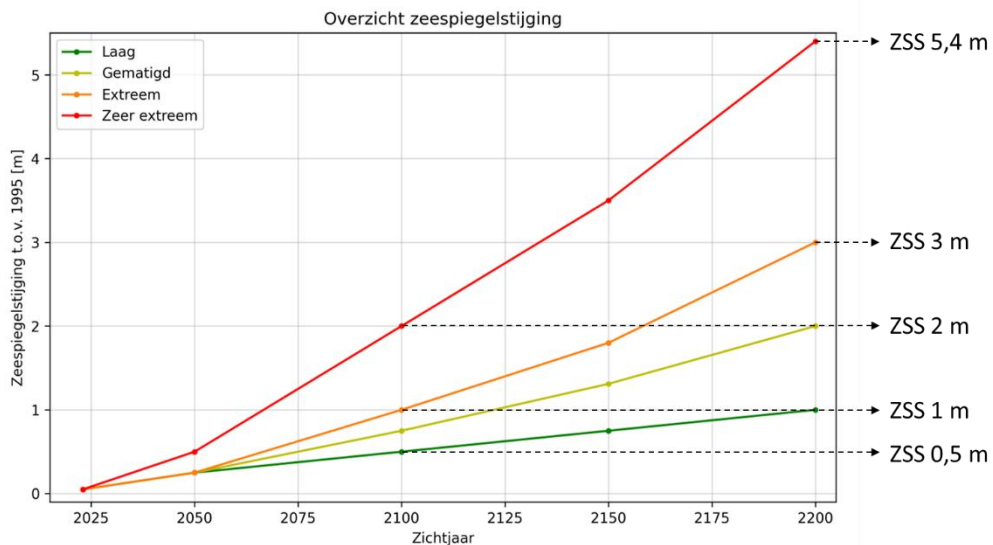
In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de fragility curves (activiteit b) en de methode (verschuiving) die we hierin hanteren om de dimensies van versterkingsmaatregelen te bepalen, en de zaken die we hierbij mogelijk over het hoofd zien. Aansluitend daarop wordt in hoofdstuk 5 (activiteit c) op basis van 2 cases een verkenning gedaan naar wat het effect van zeespiegelstijging is op benodigde dijkdimensies, vooral gericht op binnenwaartse stabiliteit in combinatie met overloop/overslag, en wordt gekeken naar de doorwerking van deze inzichten op de kostenberekeningen.

Hoofdstuk 6 sluit af met de conclusies en aanbevelingen.

## 2 Achtergronden dijksterkte in OKADER

### 2.1 Beschrijving OKADER en de toepassing binnen het KP-ZSS

OKADER is het instrument waarmee binnen de systeemanalyses van het KP-ZSS de dijkversterkingsopgave in de tijd is bepaald met de daarbij behorende dijkversterkingskosten. In de analyses wordt voor ieder dijkvak in een aantal (5-jaarlijkse) tijdstappen gekeken of een dijkversterking onder een gegeven hydraulisch regime - in dit geval de mate van zeespiegelstijging - nodig is, en wordt de dijk versterkt met een bepaalde ontwerplevensduur wanneer deze op dat moment niet aan de gestelde eisen voldoet. De systematiek is ontwikkeld door Deltares/HKV binnen de studie Effectiviteit Rivierverruiming [RWS Waterdienst (2016)]. Binnen het KP-ZSS zijn vier tijdlijnen van zeespiegelstijging beschouwd, zoals weergegeven in onderstaand figuur.



Figuur 2.1 Tijdlijnen zeespiegelstijging zoals beschouwd binnen het KP-ZSS

Om te beoordelen of de kering op een bepaald moment voldoet beschouwt OKADER steeds drie faalmechanismen. Voor het faalmechanisme Grasesosie Kruin en Binnentalud (GEKB, ook hoogte of overloop/overslag) wordt binnen OKADER voor iedere tijdlijn direct gewerkt met benodigde kruinhoogtes (of Hydraulische Belasting Niveaus, HBN's) die zijn berekend met Hydra-NL bij een vastgesteld overslagdebiet. Deze worden simpelweg vergeleken met de aanwezig kruinhoogtes in de uitgangssituatie.

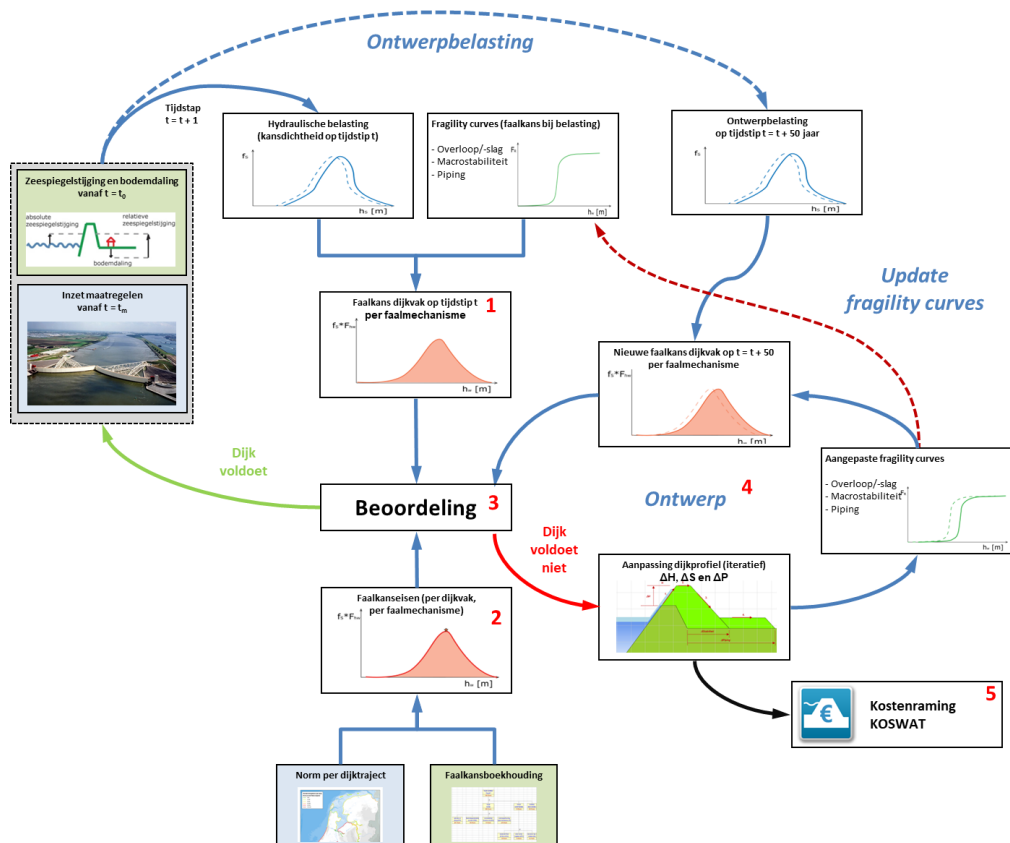
Voor de faalmechanismen macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) en piping en heave (STPH) wordt de aanwezige faalkans bepaald door waterstandsstatistiek aan de teen van de dijk te combineren met zogenaamde fragility curves, die de relatie geven tussen de buitenwaterstand en de faalkans van de dijk, en daarmee een representatie geven van de sterkte van de dijk. De berekende faalkans wordt vergeleken met de gestelde faalkanseisen per doorsnede, volgend uit de norm van het dijktraject volgens de systematiek zoals beschreven in het ontwerpinstrumentarium (OI2014 v4). Deze methode wordt in de volgende paragraaf uitvoeriger beschreven.

Wellicht is een dijk aanvankelijk nog hoog en sterk genoeg en kan een versterking nog een tijdje uitgesteld worden. Op een gegeven moment zal een kering echter afgekeurd worden bij een stijgende buitenwaterstand (in combinatie met lokale bodemdaling, zie [KP-ZSS, 2023]). Door maatregelen in het systeem te nemen kan dit versterkingsmoment beïnvloed worden, bijvoorbeeld bij het wijzigen van het sluitpeil van de Maeslantkering of de inzet van een retentiegebied).

Wanneer een dijk niet meer voldoet is het vervolgens de vraag hoe het dijkontwerp er precies uit moet zien, rekening houdend met een bepaalde ontwerplevensduur, normering, ondergrond, e.d. en wat de daarbij bijbehorende dijkversterkingskosten zijn.

De stappen die in OKADER voor ieder dijkvak doorlopen worden zijn schematisch weergegeven in onderstaande figuur. Met rode nummers zijn de volgende 5 blokken weergegeven:

- 1 Bepalen van de faalkans (doorsnedekans) per mechanisme uit lokale waterstandsstatistiek (geldig voor een bepaalde tijdstap) en fragility curves
- 2 Bepalen van de faalkanseisen per doorsnede uit de wettelijk vastgelegde normen, en de aannames over faalkansboekhouding en lengte-effect factoren volgens OI2014v4.
- 3 Beoordeling: wanneer de dijk voldoet wordt opnieuw gestart bij stap 1 voor een volgende tijdstap. Wanneer de dijk niet voldoet komen we in de ontwerpcyclus terecht, stap 4.
- 4 Ontwerp: bepalen van de ontwerpdimensies waarmee de dijk voor de gestelde ontwerplevensduur aan de eisen voldoet.
- 5 Vaststellen van de bijbehorende dijkversterkingskosten uit kostendatabase opgesteld met KOSWAT.



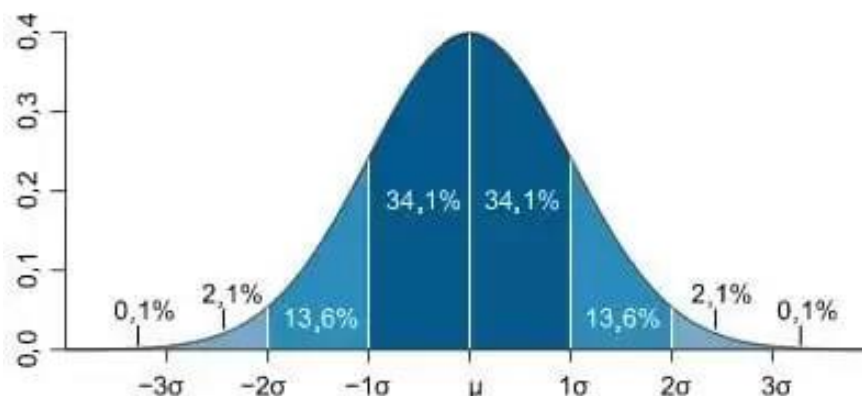
Figuur 2.2 Schematische weergave van de OKADER berekening

## 2.2 Methode fragility curves

De sterkte van de dijk ten aanzien van Macrostabieleit Binnenwaarts (STBI) en Piping en Heave (STPH) wordt in OKADER beschreven aan de hand van fragility curves. Fragility curves geven het verband weer tussen de buitenwaterstand en de faalkans, hoe hoger de waterstand, hoe groter de kans dat een dijk faalt. Voor het bovenrivierengebied zijn de fragility curves in een aanpalend beleidstraject (IRM) opgesteld [HKV, 2021], binnen het KP-ZSS is deze set aangevuld tot een landelijk dekkend geheel volgens dezelfde vastgestelde methodiek [W+B, HKV, 2022].

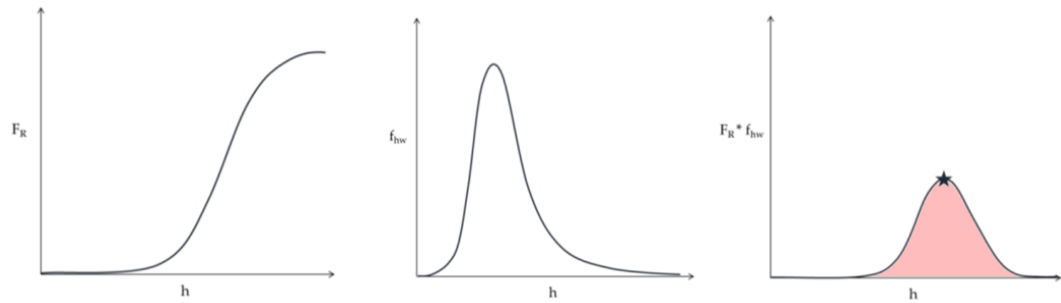
Bij het afleiden van de fragility curves is gebruik gemaakt van een beperkt aantal typologieën of klassen van keringen op basis van bepaalde eigenschappen waaraan dijkvakken in OKADER zijn toegedeeld in afstemming met de diverse waterkeringbeheerders. De typologieën geven een representatieve spreiding weer van de keringen die we vinden in Nederland. Zeer specifieke omstandigheden en uitzonderingen zijn hierin niet meegenomen, dit zou leiden tot extreem veel klassen en daarnaast is de verwachting dat het geen wezenlijk effect heeft op de conclusies die getrokken worden binnen de beleidsanalyses.

De fragility curves worden beschreven met een normale verdeling zoals weergegeven in onderstaand figuur, waarbij op de x-as de waterstand staat, en op de y-as de voorwaardelijke faalkans bij die bepaalde waterstand. De fragility curve is feitelijk de cumulatieve oppervlakte onder de grafiek. Het gemiddelde ( $\mu$ , mu) geeft het centrale punt van de verdeling aan, dit is in dit geval de waterstand waarbij de kering een kans van 50% heeft om te falen (de oppervlakte onder de curve links van het gemiddelde  $\mu$ ). De standaardafwijking ( $\sigma$ , sigma) zegt iets over de spreiding van de waarden. Bij een waterstand van  $(\mu - \sigma)$  heeft de dijk een kans van 16% dat deze faalt. Bij een waterstand van  $(\mu + 2\sigma)$  is er nog maar een kans van 2,2% dat de dijk niet faalt. Hoe groter  $\sigma$ , hoe groter de spreiding en hoe onzekerder dus eigenlijk het punt waarop de dijk zal falen.



Figuur 2.3 Standaard normale verdeling

Door combinatie van de fragility curve met de waterstandsstatistiek aan de teen van de dijk wordt de faalkans op een bepaald tijdstip (het tijdstip waarop de waterstandsstatistiek geldig is) bepaald. Voor iedere individuele waterstand met een bepaalde kans van voorkomen wordt door vermenigvuldiging de (conditionele) faalkans van de dijk berekend, het optellen van al deze berekende faalkansen over het gehele waterstandsbereik geeft de totale faalkans voor de doorsnede ten aanzien van het beschouwde mechanisme. Bij waterstanden boven de kruinhoogte en onder de buitenteen (maaiveld) wordt een conditionele faalkans van 0 verondersteld.



Figuur 2.4 Bepaling faalkans per mechanisme (oppervlakte rode vlak) uit fragility curve (links) en waterstandsstatistiek aan de teen van de dijk (midden)

### 2.2.1 Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)

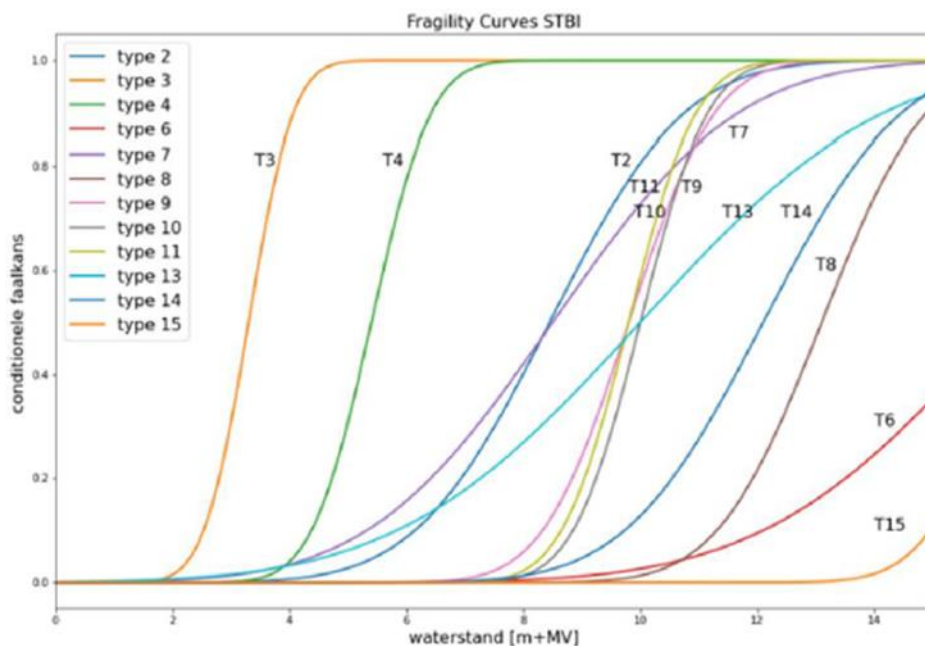
Bij het vaststellen van de typologieën voor macrostabiliteit zijn de waterspanningen, de dijkgeometrie en de aanwezigheid van een binnenberm, de aanwezigheid en de dikte van afdekkende kleilagen en de gevoeligheid voor overslag/overloop relevant. Gekozen is voor de typologie-indeling zoals weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 2.1 Typologieën macrostabiliteit

Typologieën STBI	Dunne deklaag (< 4 m)	Dikke deklaag (> 4 m)	
zandkern	zeer gevoelig (type 0)	type 2	met overloop/overslag
	type 3	type 4	zonder overloop/overslag
kleikern	zeer gevoelig (type 0)	type 6	met overloop/overslag
	type 7	type 8	zonder overloop/overslag
zandkern met binnenberm	type 9	type 10	met overloop/overslag
	type 11	ongevoelig (type 999)	zonder overloop/overslag
kleikern met binnenberm	type 13	type 14	met overloop/overslag
	type 15	ongevoelig (type 999)	zonder overloop/overslag

Standaard curves voor de typologieën zijn bepaald door ongedraineerd rekenen met behulp van het CSSM (Critical State Soil Mechanics model). De sterkte wordt bepaald door de (on)gedraineerde schuifsterkte van (on)gedraineerde materialen op basis van het Lift-Van glijvlakmodel. De berekende curves zijn weergegeven in onderstaande figuur.

Op de x-as is de belasting (waterstand) gedefinieerd ten opzichte van het maaiveld. Door deze op te tellen bij de maaiveldhoogte wordt de fragility curve gedefinieerd ten opzichte van NAP. Ofwel, dijken van een type 3 of 4 zullen al een flinke kans op falen hebben bij waterstanden enkele meters boven maaiveldhoogte, terwijl dijken met een type 6 of 15 nauwelijks gevoelig zijn voor macrostabiliteit.



Figuur 2.5 Fragility curves STBI

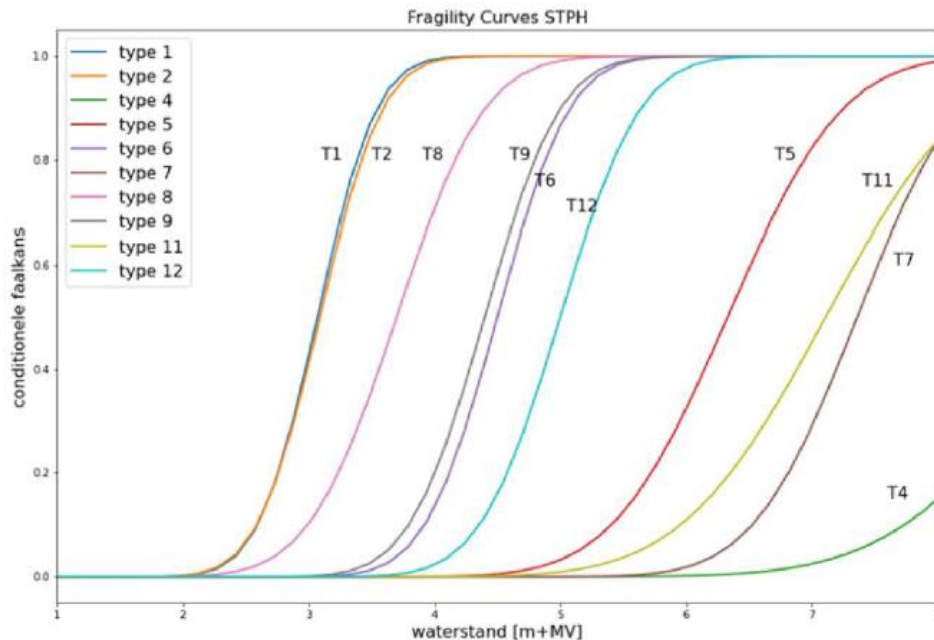
## 2.2.2 Piping en Heave (STPH)

Voor het mechanisme piping en heave wordt de dijksterkte beschreven door de rekenregel van Sellmeijer. Deze is afhankelijk van de dikte van verschillende bodemlagen (aquitard en aquifer), het kwelslootpeil, korreldiameters, de doorlatendheid, de aanwezigheid en de dikte van afdekkende kleilagen. De gedefinieerde klassen zijn gebaseerd op de ervaringen met het toepassen van de rekenregel en de kalibratiestudies binnen het WBI.

Tabel 2.2 Typologieën piping en heave

Typologieën STPH	Transmissiviteit (kD)			
	< 250 m <sup>2</sup> /dag	250 - 1.250 m <sup>2</sup> /dag	>1.250 m <sup>2</sup> /dag	
dunne deklaag (< 2 m)	type 1	type 2	zeer gevoelig (type 0)	kwelweg < 50 m
	type 4	type 5	type 6	kwelweg > 50 m
dikke deklaag (> 2 m)	type 7	type 8	type 9	kwelweg < 50 m
	ongevoelig (type 999)	type 11	type 12	kwelweg > 50 m

In onderstaand figuur zijn de berekende curves weergegeven. Wederom is op de x-as de belasting (waterstand) gedefinieerd ten opzichte van het maaiveld. Door deze op te tellen bij de maaiveldhoogte wordt de fragility curve gedefinieerd ten opzichte van NAP. Zie voor meer achtergrond bij de fragility curves de betreffende rapportages van HKV [HKV, 2021 en W+B, HKV, 2022]



Figuur 2.6 Fragility curves STPH

### 2.3 Omgang met faalkanseisen en lengte-effecten

Voor de faalmechanismen STBI en STPH wordt de faalkans (doorsnedekans) bepaald door waterstandsstatistiek aan de teen van de dijk te combineren met de fragility curves. Voor iedere waterstand met een bepaalde kans van voorkomen wordt door vermenigvuldiging de (conditionele) faalkans van de dijk berekend, het optellen van al deze berekende faalkansen over het gehele waterstandsbereik geeft de totale faalkans voor de doorsnede ten aanzien van het beschouwde mechanisme.

In de tweede stap van het OKADER stroomschema in Figuur 2.2 wordt voor iedere tijdstap per dijkvak de berekende doorsnedekans per mechanisme getoetst aan de gestelde faalkanseisen. In de Waterwet is voor ieder normtraject vastgelegd aan welke overstromingskansnorm het traject dient te voldoen. De som van de faalkansbijdragen van alle faalmechanismen mag niet groter zijn dan de normkans.

Allereerst wordt binnen OKADER in stap 2 de beschikbare faalkansruimte (=overstromingskansnorm) verdeeld over de verschillende faalmechanismen. Hierbij wordt gewerkt met de standaard faalkansbegroting en de faalkansruimtefactor  $\omega$  (default waarden) zoals voorgesteld (startpunt) voor dijken in het ontwerpinstrumentarium 2014 (OI2014 v4). 24% van de faalkansruimte wordt toebedeeld aan het mechanisme overloop/golfoverslag, 24% aan opbarsten/piping en 4% aan macrostabiliteit binnenwaarts.

In een vervolgstap wordt per faalmechanisme de faalkanseis van het dijktraject vertaald naar een faalkanseis per doorsnede. Binnen een dijktraject bevinden zich meerdere dijkvakken die onafhankelijk van elkaar kunnen falen. Hoe langer het traject, hoe groter de kans dat er ergens in de dijk een zwakke plek zit, dus hoe groter de faalkans. Dit wordt beschreven met het zogenaamde lengte-effect  $N$ . De doorsnede-eis wordt als volgt bepaald:

$$P_{eis,dsn} = \frac{P_{max,traject} \cdot \omega}{N}$$

Voor overloop/golfoverslag is de waarde voor het lengte-effect voorgeschreven (afhankelijk van lengte en oriëntatie van het traject), voor de geotechnische mechanismen macrostabiliteit en piping wordt deze berekend met de volgende formule:

$$N = 1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b}$$

Waarin:

- a* Fractie van de lengte van het traject dat gevoelig is voor het betreffende faalmechanisme (-)
- b* Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken voor het betreffende faalmechanisme (m)
- L<sub>traject</sub>* Lengte van het dijktraject, zoals vastgelegd in de Waterwet (m)

In het OI2014 v4 worden tevens startwaarden voorgeschreven voor de parameters *a* en *b* die zijn overgenomen in OKADER. Deze zijn weergegeven in onderstaande tabel. In praktijk kan door de waterkeringbeheerder afgeweken worden van de standaard faalkansboekhouding en de startwaarden voor de parameters *a* en *b*.

Tabel 2.3 Gehanteerde waarden parameters *a* en *b* in OKADER

Faalmechanisme	Watersysteem	Parameter <i>a</i> (-)	Parameter <i>b</i> (m)
Piping	Bovenrivieren	0,90	300
	Overig	0,4	300
Macrostabiliteit	Alle systemen	0,033	50

## 2.4 Beschrijving versterkingsmaatregelen

Wanneer een dijk in OKADER niet meer voldoet aan de gestelde faalkanseisen zal deze binnen het KP-ZSS versterkt worden met een ontwerplevensduur van 50 jaar. Feitelijk wordt hierbij dezelfde methode van beoordelen (zie voorgaande paragrafen) gebruikt, maar met een aangepaste waterstandsstatistiek voor een tijdstip dat 50 jaar in de toekomst ligt (inclusief zeespiegelstijging) in combinatie met een versterkt dijklichaam met aangepaste fragility curves.

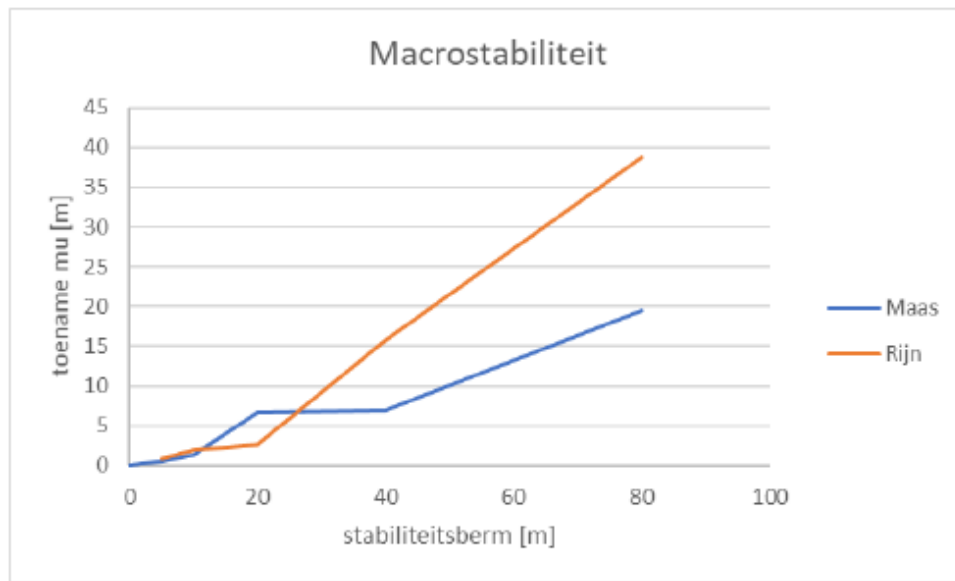
OKADER heeft voor piping en macrostabiliteit fragility curves beschikbaar voor verschillende toenames van de dijkbasis (bermlengtes) om te kunnen bepalen hoeveel versterking nodig is om aan de norm te voldoen. Bij het ontwikkelen van de fragility curves zijn door HKV normale verdelingen (met gemiddelde  $\mu$  en standaardafwijking  $\sigma$ ) voor situaties met maatregelen geschat op basis van trends in fragility curven uit OKADER 2020. De toename van  $\mu$  ten opzichte van de huidige situatie is hierbij een functie van de lengte van de berm. Immers, door de dijk te versterken zal deze bij een zelfde waterstand een kleinere faalkans hebben. Ofwel, de waterstand waarbij de dijk met een kans van 50% bezwijkt (de  $\mu$  in de fragility curve, zie paragraaf 2.2) zal toenemen. De standaardafwijking  $\sigma$  waarde is relatief ongevoelig voor de lengte van de berm. Een versterking leidt daarmee tot een verschuiving van de fragility curve. Zie voor meer achtergrond de rapportage [W+B, HKV, 2022 paragraaf 2.5].

Voor beide mechanismen wordt zodoende iteratief bepaald welke bermlengte nodig is om aan het einde van de beoogde levensduur weer exact aan de gestelde faalkanseisen te voldoen, dit is dan de versterkingsopgave.

In onderstaande tabellen en grafieken worden de gevonden verbanden tussen de berm lengtes en de toename van  $\mu$  weergegeven, waarbij een afwijkend verband wordt gehanteerd voor de Rijntakken en de Maas. Bijvoorbeeld door het toevoegen van 10 meter stabiliteitsberm aan een dijk langs de een van de Rijntakken zal de  $\mu$  van de fragility curve 2 m verschuiven, ofwel de dijk zal een 2 m hogere waterstand kunnen keren.

Tabel 2.4 Toename van het gemiddelde ( $\mu$ ) als functie van de lengte van de stabiliteitsberm

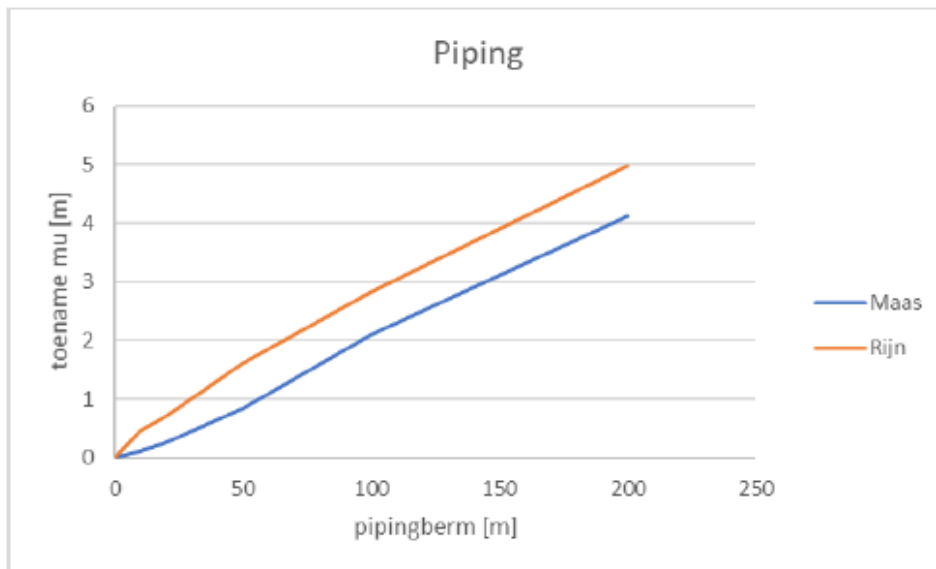
Stabiliteitsberm [m]	Maas	Rijn
0	0	0
5	0.587082	0.886895
10	1.337883	1.987891
20	6.664512	2.683756
40	6.922987	15.73523
80	19.4148	38.82311



Figuur 2.7 Toename van het gemiddelde ( $\mu$ ) als functie van de lengte van de stabiliteitsberm

Tabel 2.5 Toename van het gemiddelde ( $\mu$ ) als functie van de lengte van de pipingberm

Pipingberm [m]	Maas	Rijn
0	0	0
10	0.119323	0.456067
20	0.259839	0.710155
50	0.840143	1.617677
100	2.112399	2.839483
200	4.120582	4.98389



Figuur 2.8 Toename van het gemiddelde ( $\mu$ ) als functie van de lengte van de pipingberm

## 3 Analyse effecten startkansen

### 3.1 Inleiding

Vanuit beleidsstudies die in het verleden zijn uitgevoerd is bekend dat OKADER hogere faalkansen berekent in de uitgangssituatie dan we zouden verwachten op basis van expertinschattingen en in relatie tot de normhoogte op basis van overschrijdingskans die we voor het jaar 2017 hanteerden. We hebben het hier over faalkansen in de orde van 1/5 of 1/25 per jaar op trajectniveau, waar we in praktijk geen dijkdoorbraken zien van primaire keringen in Nederland in de afgelopen decennia. Dit komt primair door een te conservatieve inschatting van de aanwezige dijksterkte en het stapelen van onzekerheden in de vertaling van de lokale situaties naar de trajectfaalkans. We zien dit beeld ook terug in de eerste Landelijke Beoordelingsronde Overstromingskans van primaire waterkeringen (LBO1), waar initieel op sommige plaatsen ook hoge kansen worden berekend, en pas met uitvoerige vervolgstudies een meer reëlere overstromingskans wordt gevonden.

In OKADER leidt deze grote faalkans in de uitgangssituatie tot een te grote initiële versterkingsopgave om aan de norm te voldoen. Dit komt met name tot uiting in de versterkingsopgave die wordt gevonden in de tijdlijnen tot 2050, onduidelijk is hoe deze referentiekansen doorwerken naar de versterkingsopgave en -kosten in de toekomst onder zeespiegelstijging.

In dit hoofdstuk wordt een meer realistische referentiekans bepaald (paragraaf 3.2 en 3.3), en wordt een methodiek uitgewerkt om van deze kansen uit te kunnen gaan in de berekeningen met de OKADER-tool (paragraaf 3.4). Tenslotte wordt bekeken hoe deze aanpassing doorwerkt in de berekende dijkversterkingsopgave en -kosten (paragraaf 3.5) in de tijdlijnen van het KP-ZSS. Algemene conclusies ten aanzien van de methode zijn gegeven in hoofdstuk 6.

### 3.2 Gehanteerde referentiekansen

Er zijn in Nederland verschillende bronnen van overstromingskansinformatie, die met verschillende doelen tot stand zijn gekomen en onderling een grote spreiding vertonen. De meest consistente en landsdekkende set van kansen is nog steeds de referentiekansenset uit het Deltaprogramma Veiligheid (DPV), welke is gebaseerd op de studie VNK2. Deze kansen vormen tevens de basis voor de Waterveiligheidsmonitor, waarmee jaarlijks een indicatie wordt gegeven van het effect van maatregelen (m.n. de dijkversterkingen uitgevoerd door het HWBP) op de waterveiligheid (afname van het overstromingsrisico) van Nederland. In de rapportage voor de Europese Richtlijn Overstromingsrisico's (ROR) wordt tevens gebruik gemaakt van deze kansenset. In overleg met de opdrachtgever is besloten om in deze analyse bij deze set aan te sluiten. Bijkomend voordeel is dat OKADER gebruik maakt van de VNK2 vakindeling, waarmee berekende faalkansen per traject, dijkvak of doorsnede zonder veel moeite 1-op-1 te vergelijken zijn.

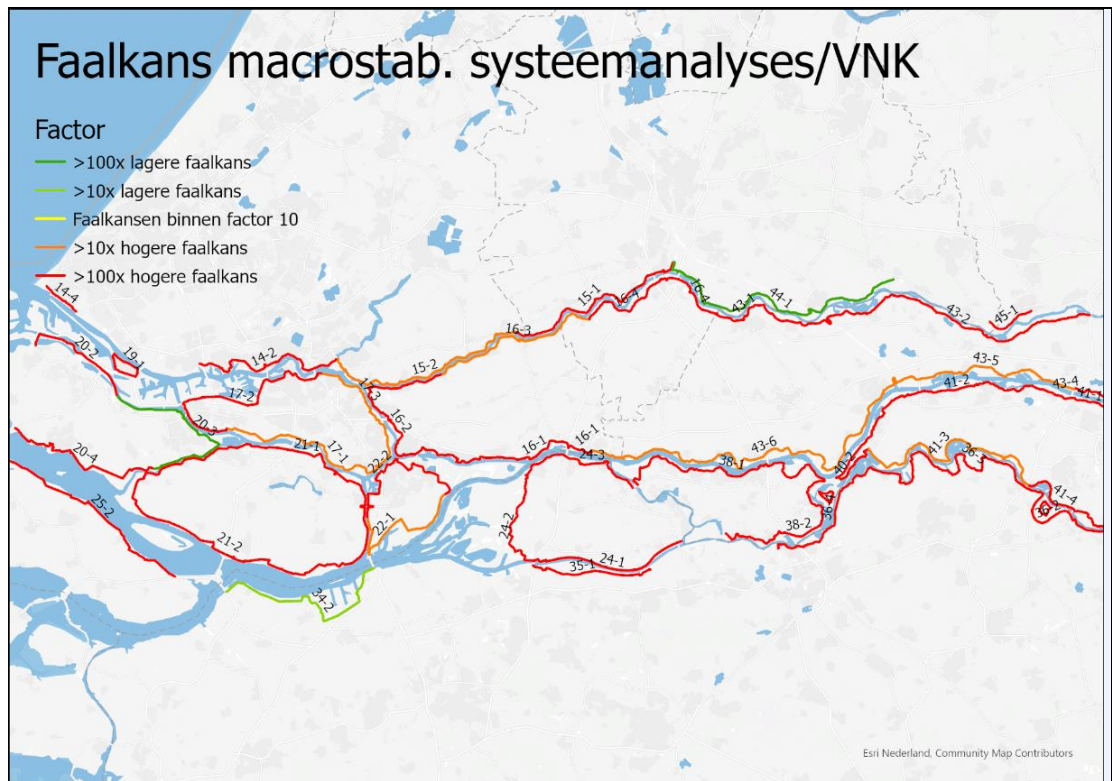
In OKADER wordt de versterkingsopgave bepaald door de drie faalmechanismen hoogte, macrostabiliteit en piping, waarbij enkel voor macrostabiliteit en piping wordt gewerkt met fragility curves. In deze analyse worden dus enkel deze laatste twee mechanismen beschouwd. Wanneer de faalkans op een dijkvak in VNK2 bepaald wordt door een ander mechanisme, dan blijft dit buiten beschouwing.

Let op: deze analyse richt zich enkel op die dijkvakken waar de berekende faalkans in OKADER groter is dan de kans in VNK2. Wanneer deze kans reeds kleiner is (of kleiner dan de normkans als de VNK2 kans niet aanwezig was) zijn geen aanpassingen gedaan in de OKADER analyses.

### 3.3 Vergelijking faalkansen OKADER en VNK2

#### 3.3.1 Macrostabiteit binnenwaarts (STBI)

In onderstaande set van figuren is voor de Rijn-Maasmonding en het in het KP-ZSS beschouwde deel van het rivierengebied weergegeven hoe de faalkansen in de beginsituatie 2023 (dus zonder zeespiegelstijging) voor macrostabiteit uit de OKADER berekeningen zich verhouden tot de faalkansen voor het betreffende mechanisme in VNK2 (geaggregeerd per normtraject). De onderliggende kaarten met berekende faalkansen binnen de systeemanalyses en VNK zijn gegeven in Bijlage A. Over het algemeen worden in OKADER faalkansen gevonden die minstens een factor 100 groter zijn dan de kansen in VNK2 (hierbij worden uitschieters gevonden tot een factor > 1.000.000 voor trajecten waar in OKADER een faalkans wordt gevonden, terwijl in VNK2 soms op voorhand het mechanisme was uitgesloten (m.n. bovenrivierengebied en sterk constructieve trajecten)).



Figuur 3.1 Verhouding faalkansen macrostabiteit per normtraject uit OKADER en VNK2 (RMM en Rivieren)

Voor de Wadden en de Zuidwestelijke Delta worden vergelijkbare resultaten gevonden. Voor de Oosterschelde zijn in de analyses slechts voor enkele vakken OKADER-berekeningen gemaakt.



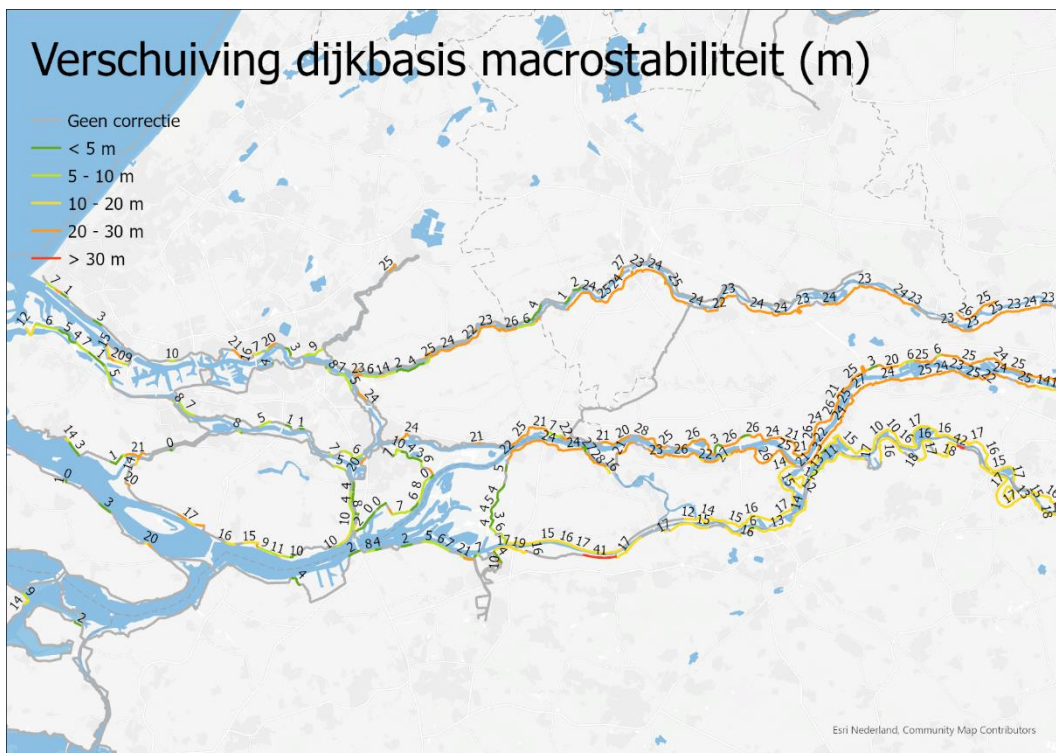
Wanneer we de aangepaste (vershoven) fragility curve nu integreren met de waterstandsstatistiek voor het startjaar van de analyses zullen we de VNK faalkans voor het betreffende mechanisme vinden.

Om de benodigde verschuiving van de fragility curves (macrostabiliteit en piping) te kunnen berekenen zijn de volgende stappen gevolgd:

- 1 Omrekenen van de vakkans voor macrostabiliteit en piping uit VNK2 naar doorsnedekans (i.v.m. lengte-effect)
- 2 Aanpassen van de gestelde faalkanseisen (normen) per doorsnede voor ieder dijkvak in OKADER naar de eerder berekende doorsnedekans uit VNK2.
- 3 Bepalen van de versterkingsopgave (toename van de dijkbasis) in OKADER ten aanzien van macrostabiliteit en piping om aan de gestelde doorsnedekans uit VNK te voldoen. Hierbij wordt zowel in de beoordeling als het ontwerp de waterstandsstatistiek voor de uitgangssituatie gehanteerd (peiljaar 2023).

Binnen VNK zijn niet voor ieder dijkvak gegevens beschikbaar (stap 2). Aangenomen is dat het mechanisme voor het betreffende vak in dat geval niet maatgevend was, de verschuiving is hier zodanig bepaald dat het vak in de uitgangssituatie voldoet aan de norm. Let op, voor vakken waar de berekende faalkans in OKADER reeds kleiner is dan de faalkans in VNK2 (of kleiner dan de normkans als de VNK2 kans niet aanwezig was) zijn de fragility curves niet verschoven.

De berekende versterkingsopgave in stap 3 leidt tot een verschuiving in de fragility curves zoals geschetst in de tabellen en grafieken in paragraaf 2.4. Echter, om de aangepaste berekeningen voor de systeemanalyses in OKADER te kunnen draaien is niet het invoerbestand met fragility curves aangepast, maar wordt de benodigde initiële versterking om aan de VNK kans te voldoen direct in het script toegepast als een correctie op de berekende opgave in de eerste versterkingsronde van de systeemanalyses. We gaan er feitelijk vanuit dat dit stukje veiligheid (waardoor de faalkans in de uitgangssituatie lager wordt) nu al in de huidige kering aanwezig is, hiervoor hoeven dus niet opnieuw kosten gerekend te worden. Het effect hiervan op het eindresultaat is hetzelfde als wanneer we het gemiddelde  $\mu$  van de fragility curves zouden verschuiven, maar e.e.a. bleek op deze manier eenvoudiger door te voeren in de software. In onderstaande figuren wordt per dijkvak weergegeven welke correctie in de opgave wordt berekend ten aanzien van macrostabiliteit en piping volgens bovenstaand stappenplan.



Figuur 3.3 Berekende correctie in de versterkingsopgave in de dijkbasis van macrostabiliteit

Voor macrostabiliteit vinden we in het bovenrivierengebied (Rijntakken) veelal een correctie op de opgaves van de eerste versterkingsronde van zo'n 20-25 m, wat overeenkomt met een verschuiving in  $\mu$  van zo'n 3 tot 5 meter volgens Figuur 2.7. Dezelfde conditionele faalkans correspondeert dus met een waterstand die 3 tot 5 meter hoger ligt. Voor de Maas blijven de correcties op de eerste versterkingsronde kleiner, maar liggen ook in de orde van 15 m. In het benedenrivierengebied zijn de verschuivingen vaak kleiner (orde 5 à 10 m), al zijn ook hier vakken te vinden die in OKADER meer gevoelig lijken en in VNK niet, waar we dus een verschuiving vinden in de orde 20 m en meer. We kunnen stellen dat we de initiële versterkingsopgaves in de eerste versterkingsronde van de systeemanalyses met deze waarden hebben overschat.

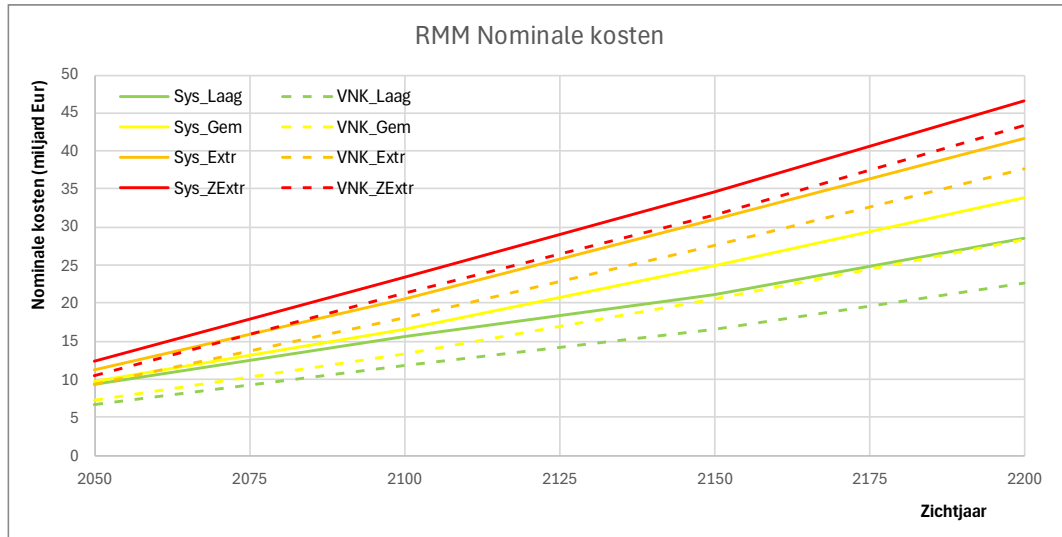


Tabel 3.1 Resultaten kostenberekeningen systeemanalyses en analyses met aangepaste startkansen op basis van VNK2 voor de Rijn-Maasmonding en het rivierengebied. Nominale kosten tot en met zichtjaar zonder correctie voor restwaarde (in miljard euro incl. BTW).

	Systeemanalyses				VNK startkansen			
	Laag	Gem.	Extreem	Zeer Extreem	Laag	Gem.	Extreem	Zeer Extreem
<b>Totaal</b>								
2050	9,3	9,7	11,2	12,4	6,7	7,3	9,2	10,5
2100	15,5	16,6	20,5	23,5	11,9	13,3	18,1	21,3
2150	21,2	25,0	31,0	34,7	16,6	20,5	27,6	31,6
2200	28,5	33,8	41,7	46,6	22,6	28,4	37,6	43,3
<b>Rijnmond-Drechtsteden</b>								
2050	2,1	2,2	2,5	3,3	1,7	1,9	2,3	3,1
2100	4,0	4,7	6,2	8,0	3,6	4,3	5,9	7,8
2150	6,0	7,4	9,2	11,4	5,5	7,0	8,8	11,2
2200	9,0	11,0	13,3	16,5	8,2	10,4	12,9	16,3
<b>Waal</b>								
2050	3,3	3,3	3,6	3,7	2,3	2,3	2,8	2,9
2100	6,0	6,0	6,2	6,4	4,2	4,4	5,1	5,3
2150	7,8	8,7	9,3	9,5	5,6	6,4	7,5	7,8
2200	10,1	10,7	11,2	11,5	7,3	8,0	9,3	9,7
<b>Haringvliet en Hollands Diep</b>								
2050	0,3	0,4	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,6
2100	0,5	0,7	1,1	1,7	0,4	0,6	1,0	1,6
2150	0,7	1,1	1,8	2,6	0,6	1,0	1,8	2,5
2200	1,2	2,1	3,1	3,7	1,0	2,0	2,9	3,6
<b>Nederrijn-Lek</b>								
2050	1,9	2,0	2,2	2,2	1,4	1,5	1,8	1,8
2100	2,7	2,8	3,7	3,9	2,1	2,2	3,1	3,4
2150	3,6	3,8	5,8	6,1	2,9	3,1	5,0	5,3
2200	4,0	4,4	7,2	7,5	3,2	3,7	6,2	6,9
<b>Maas</b>								
2050	1,7	1,8	2,4	2,5	1,1	1,3	2,0	2,2
2100	2,3	2,5	3,3	3,4	1,5	1,9	2,9	3,1
2150	3,0	3,9	4,9	5,2	2,0	3,0	4,5	4,7
2200	4,2	5,5	6,9	7,3	2,9	4,3	6,3	6,8

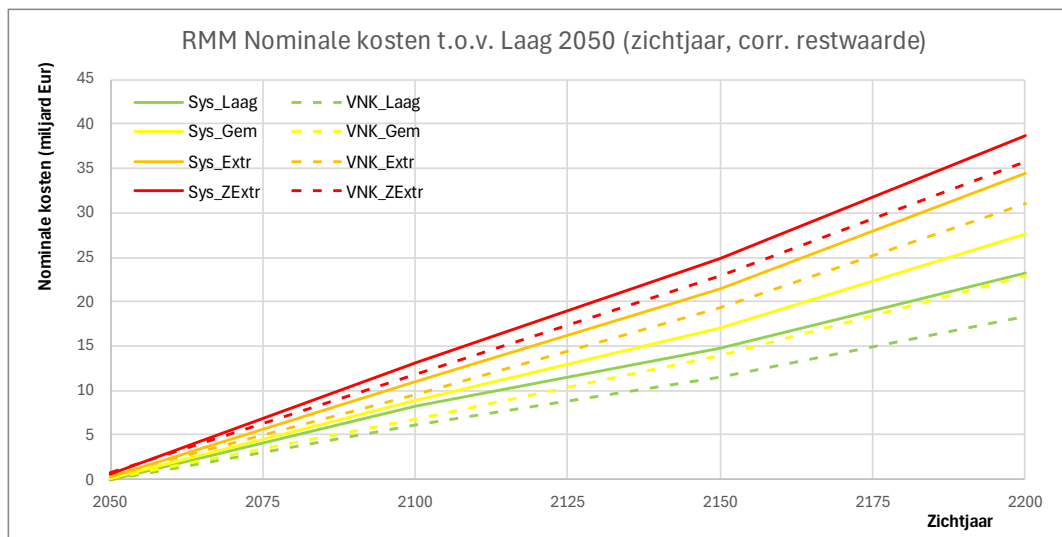
In Figuur 3.5 wordt het verloop van de dijkversterkingskosten in de tijd weergegeven met de eerdere resultaten uit de systeemanalyses in doorgetrokken lijnen en de analyses die gecorrigeerd zijn met de startkansen van VNK gestippeld weergegeven.

In de totalen in de tabel (rood omrand) is te zien dat voor het op orde komen aan de norm (Tijdljn Laag, zichtjaar 2050) de nominale kosten tot 2050 dalen met ca. 2,6 miljard euro van 9,3 miljard naar 6,7 miljard. Dit is het verschil tussen de doorgetrokken en gestippelde groene lijn in het jaar 2050. Ofwel, een flink deel van de opgave in 2050 valt weg. Het verschil tussen de lijnen voor tijdljn Zeer Extreem in 2050 is kleiner, de opgave is hier veel groter en neemt dus relatief minder af, maar ook hier is nog een effect te zien van een kleine 2 miljard euro tot 2050.



Figuur 3.5 Nominale kosten Rijn-Maasmonding en rivierengebied voor tijdljnen Laag, Gematigd, Extr, en Zeer Extreem voor systeemanalyses en de situatie met startkansen VNK2

Om een eerlijke vergelijking te maken worden de kosten zoals ook in de systeemanalyses is gedaan gecorrigeerd voor de restwaarde die de versterkingen in een bepaald zichtjaar (2050, 2100, 2150 en 2200) nog hebben (versterkingen de vlak voor het zichtjaar zijn uitgevoerd tellen niet helemaal mee), en wordt voor beide varianten gecorrigeerd voor de kosten (excl. restwaarde) van op orde komen (Laag 2050) om het verloop van de lijnen onderling beter te kunnen duiden. De lijnen uit de systeemanalyses en de voorliggende analyse voor de tijdljn Laag krijgen daarmee hetzelfde startpunt (Figuur 3.6).



Figuur 3.6 Nominale kosten Rijn-Maasmonding en rivierengebied voor tijdljnen Laag, Gematigd, Extr, en Zeer Extreem voor systeemanalyses en de situatie met startkansen VNK2 gecorrigeerd met restwaarde en kosten op orde komen 2050.

De grootste verschillen tussen de systeemanalyses en berekeningen met de VNK startkansen zijn te zien in tijdlijn Laag. De kosten tussen 2050 en 2200 (excl. op orde komen) nemen af met zo'n 5 miljard (21%), van 23,2 naar 18,4 miljard, de inzichten in de startkansen werken voor deze tijdlijn door in de hele beschouwde periode tot het jaar 2200, met name omdat minder ruimte nodig is voor de versterkingen ook in latere versterkingsrondes.

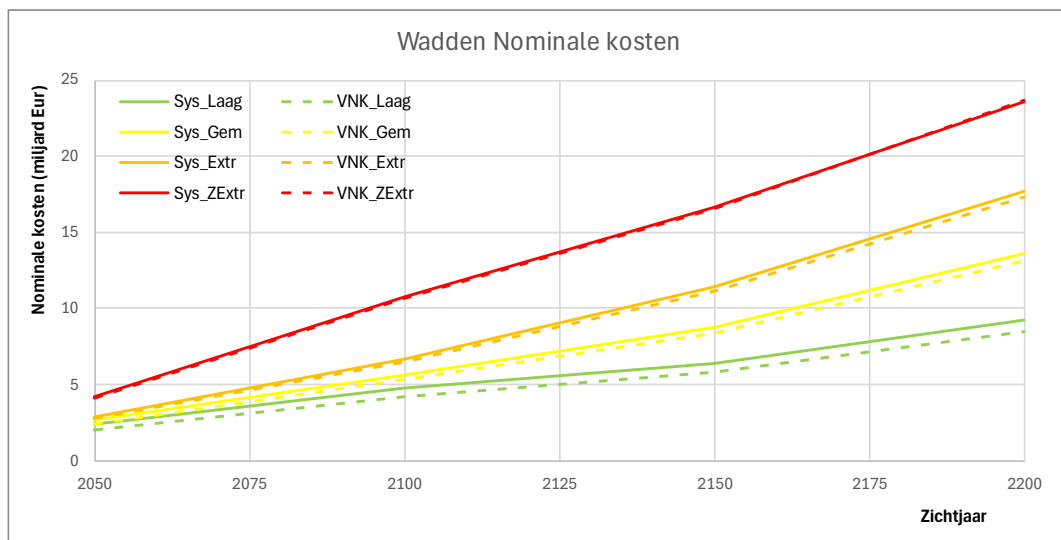
De afname die we zien in de tijdlijn Zeer Extreem is in absolute zin kleiner, ca. 3 miljard (8%). Een deel van de opgave vervalst, maar omdat deze opgave zoveel groter is geeft dit relatief een mindere afname. De tijdlijn Zeer Extreem wordt daarmee relatief duurder ten opzichte van de tijdlijn Laag (was 1,7x zo duur als Laag, wordt nu 2x zo duur).

### 3.5.2 Waddenzee

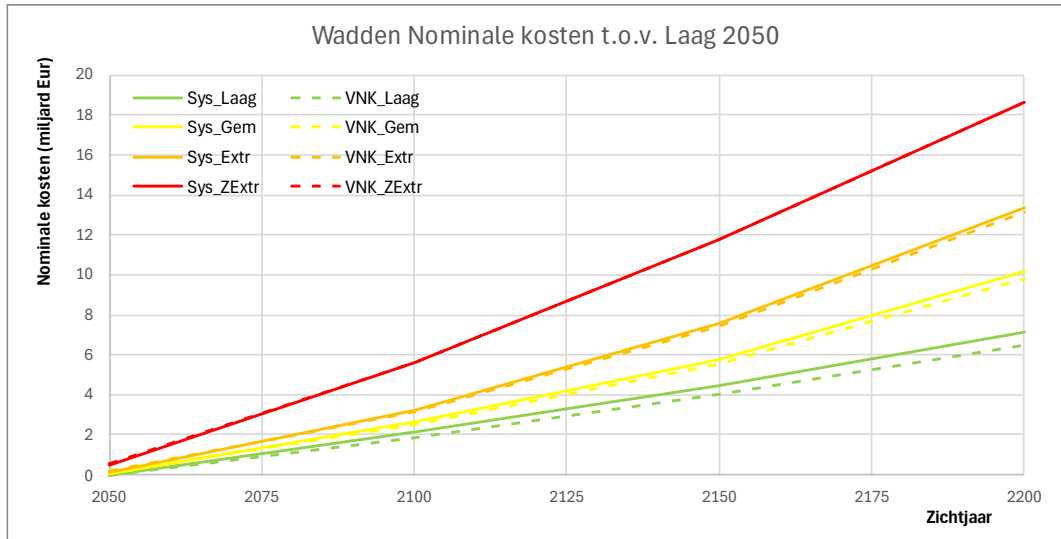
In Figuur 3.7 wordt het verloop van de kosten in de tijd weergegeven met de resultaten van de systeemanalyses in doorgetrokken lijnen en de analyses die gecorrigeerd zijn met de startkansen van VNK gestippeld weergegeven.

In de totalen is te zien dat voor het op orde komen aan de norm (Tijdlijn Laag, zichtjaar 2050) de nominale kosten dalen met ca. 0,4 miljard euro van 2,4 miljard naar 2,0 miljard. Dit is de sprong tussen de doorgetrokken en gestippelde groene lijn in 2050. Ofwel, een klein deel van de opgave in 2050 valt weg. Dit effect is nog enigszins terug te zien in de tijdlijnen Gematigd en Extreem, maar de lijnen voor tijdlijn Zeer Extreem liggen nagenoeg op elkaar. Het wegvallen van een deel van de opgave vóór 2050 heeft hier weinig effect op de versterkingsopgave en kosten, bij deze mate van zeespiegelstijging moeten de keringen hoe dan ook (ook vóór 2050) versterkt worden. De versterkingsopgave wordt in dit gebied bij deze extremere tijdlijnen voornamelijk bepaald door de benodigde hoogte van de dijken

Dit zelfde effect zien we eveneens terug in de grafiek (Figuur 3.8) waar gecorrigeerd is voor restwaarde en de kosten voor 'op orde komen'.



Figuur 3.7 Nominale kosten Wadden voor tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem voor systeemanalyses en de situatie met startkansen VNK2

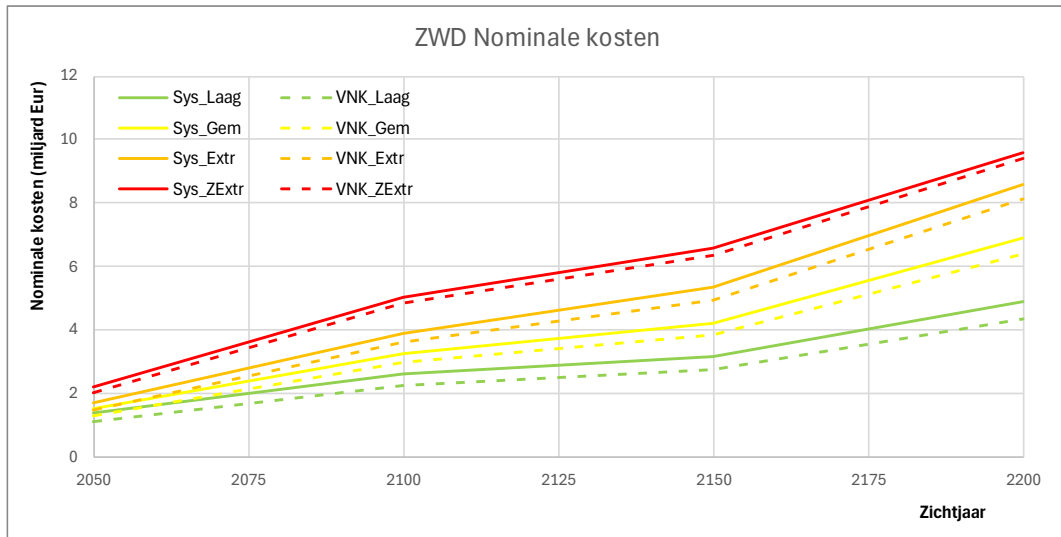


Figuur 3.8 Nominale kosten Wadden voor tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem voor systeemanalyses en de situatie met startkansen VNK2 gecorrigeerd met restwaarde en kosten op orde komen 2050.

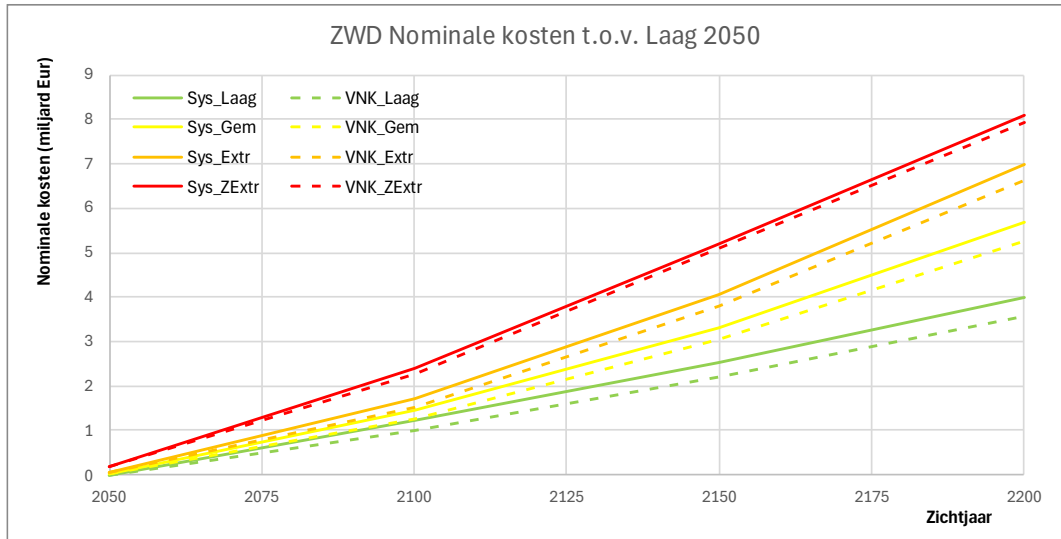
### 3.5.3 Zuidwestelijke Delta

Voor de Zuidwestelijke Delta zijn de resultaten weergegeven in onderstaand figuur, en zien we vrijwel hetzelfde plaatje als in de Waddenzee.

De nominale kosten van op orde komen (tijdlijn Laag 2050) nemen af van 1,4 naar 1,1 miljard Euro. Gecorrigeerd met restwaarde in de zichtjaren en met de kosten van op orde komen neemt tijdlijn Laag 2200 af met 0,5 miljard (-11%) en Zeer Extreem 2200 met 'slechts' 0,2 miljard (-2%). De versterkingsopgave bij de extremere tijdlijnen wordt ook hier gedomineerd door de hoogteopgave.



Figuur 3.9 Nominale kosten Zuidwestelijke Delta voor tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem voor systeemanalyses en de situatie met startkansen VNK2



Figuur 3.10 Nominale kosten Zuidwestelijke Delta voor tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem voor systeemanalyses en de situatie met startkansen VNK2 gecorrigeerd met restwaarde en kosten op orde komen 2050.

## 4 Beschouwing methode fragility curves

### 4.1 Inleiding

In de KP-ZSS systeemanalyses wordt een uniforme landelijke set fragility curves gebruikt voor het bepalen van dijksterkte ten aanzien van macrostabiliteit en piping, waarbij standaard curves aan dijkvakken worden toegewezen op basis van de zogenaamde typologie van de dijk. Bij het bepalen van benodigde versterkingsmaatregelen om te blijven voldoen aan de norm bij een stijgende buitenwaterstand, wordt dijkbreedte aan het ontwerp toegevoegd. Hierbij worden fragility curves verschoven. Doel van dit hoofdstuk is om te onderzoeken in hoeverre de methode 'verschuiven van de fragility curves' recht doet aan de werkelijkheid. Daarbij kijken we specifiek naar of de relatie tussen opgave en toename van de belasting lineair is, of dat er sprake is van een exponentiele relatie waarbij de opgave steeds sterker toeneemt naarmate de belasting toeneemt.

Het rekenen met fragility curves voor het karakteriseren van dijksterkte is een geaccepteerde methode, maar de juistheid valt of staat met de definitie van de fragility curves en hoe deze worden ingepast. In dit rapport kijken we alleen naar de huidige methode die in het KP-ZSS is gebruikt waarbij fragility curves worden verschoven om benodigde dijkversterkingen bij ZSS te bepalen, er wordt aan gerefereerd als 'methode verschuiven fragility curves' of 'huidige methode'.

We richten ons in de rest van het rapport voornamelijk op stabiliteit. Voor hoogte zijn er geen redenen om aan de uitkomsten te twijfelen en voor piping wordt vaak teruggevallen op verticale maatregelen (zie hoofdstuk 2). De conclusies in hoofdstuk 4 en 5 gelden dus voornamelijk voor stabiliteit.

### 4.2 Beschrijving methode verschuiven fragility curves

Om te bepalen welke opgave er is bij verschillende ZSS worden er de volgende generieke stappen doorlopen in de methode verschuiven fragility curves (zie W+B, HKV, 2022):

- 1 Toewijzen fragility curves voor stabiliteit en piping aan elk dijkvak in overleg met beheerders;
- 2 Per dijkvak bepalen hoe de belastingen veranderen als gevolg van ZSS en welke verschuiving in fragility curves nodig is om weer aan eisen te voldoen.
- 3 Voor hoogte, stabiliteit en piping bepalen welke opgave nodig is om de belastingen op te vangen.

HKV (2021) concludeert dat de mate van detail in de gebruikte aanpak minder is dan reguliere beoordelingen en ontwerpen, en dat deze daarvoor dus ook niet gebruikt kunnen worden.

#### 4.2.1 Bepaling uitgangssituatie

Voor de bepaling van de uitgangssituatie, de situatie in 2050 waarbij alles op orde is, worden ruwweg de volgende stappen doorlopen:

- Per dijkvak typologie toekennen
- Fragility curves STPH en STBI koppelen aan verschillende typologieën
- Verschuiven fragility curve op basis van hoogte buitenteen
- Integreeren op basis van waterstandsstatistiek

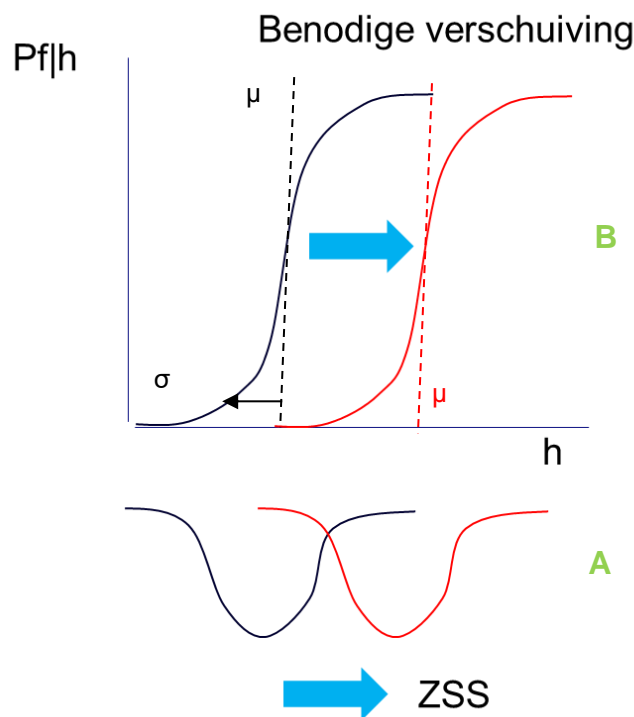
In 2025 start de berekening, zodanig dat in 2050 alles op orde is.

#### 4.2.2 Verschuiving fragility curves bij ZSS

Een fragility curve geeft de faalkans weer gegeven een waterstand bij verschillende waterstanden. Deze kunnen worden bepaald op basis van probabilistische analyses. In het KP-ZSS is gekozen om de fragility curves te karakteriseren met een gemiddelde waarde ( $\mu$ ) en een standaardafwijking ( $\sigma$ ), zie Figuur 4.1. De  $\mu$  is de gemiddelde sterkte uitgedrukt in [m], wat kan worden geïnterpreteerd als het verval wat de kering kan keren. De onzekerheid daarin wordt vervat in de standaardafwijking  $\sigma$ . Wanneer meer onzekerheden dan alleen de waterstand een rol spelen (bijv. ondergrond) leidt dit tot een hogere waarde voor  $\sigma$ .

De bepaling van de benodigde verschuiving van de fragility curves als gevolg van ZSS gebeurt door (zie Figuur 4.1):

- Bepaling effect ZSS op lokale waterstanden (h) en golven (A). Hierin zitten ook de effecten dat ZSS niet overal even sterk doorwerkt op lokale belastingen.
- Bepaling benodigde verschuiving fragility curves (B) van het gemiddelde ( $\mu$ ).



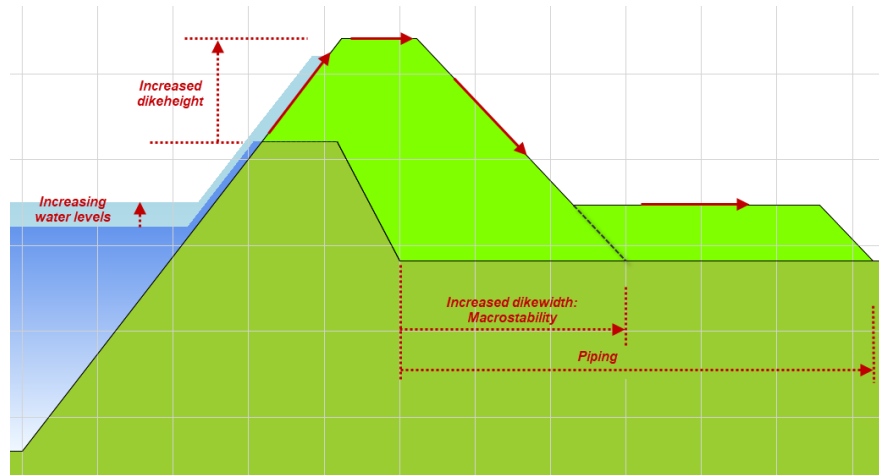
Figuur 4.1 Verschuiving fragility curves als gevolg van ZSS. Situatie zonder ZSS in zwart, verschuiving als gevolg van ZSS in rood. Het gemiddelde ( $\mu$ ) en standaardafwijking ( $\sigma$ ) van de fragility curve zijn ook getoond.

#### 4.2.3 Effect op dijkdimensies

Het effect van ZSS op de hoogte volgt direct uit de toename in buitenwaterstand en golven. Hier wordt verder niet op ingegaan. Aangezien taluds constant worden gehouden resulteert extra hoogte al in extra breedte.

Het effect op de overige dijkdimensies (extra breedte, berm) voor piping en stabiliteit wordt berekend via het verschuiven van de fragility curves zodanig dat bij ZSS weer aan de eis wordt voldaan, zie Figuur 4.2. Voor stabiliteit wordt de extra benodigde berm vertaald naar een benodigde dijkbasistoename.

Voor piping wordt vervolgens gekeken of er nog een extra berm nodig is, naast de maatregel voor stabiliteit. Voor stabiliteit wordt in geval van bebouwing gekozen voor een constructieve maatregel, deze zijn verder niet beschouwd.

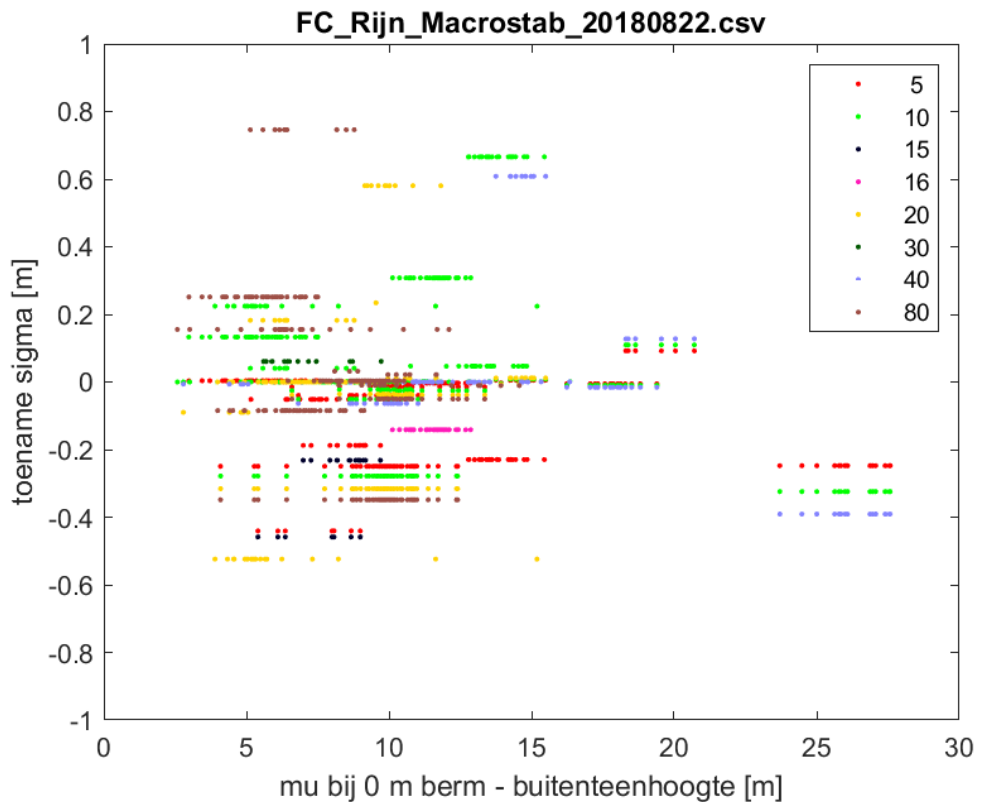


Figuur 4.2 Effect benodigde dijkdimensies als gevolg van zeespiegelstijging

#### 4.2.4 Benodigde toename berm

In Figuur 2.7 en Figuur 2.8 staan de in het KP-ZSS gebruikte relaties in hoeverre de benodigde berm toeneemt als functie van de verschuiving van de fragility curve met het gemiddelde  $\mu$ . In W+B en HKV (2022) is geconcludeerd dat alleen een horizontale verschuiving door middel van  $\mu$  voldoende is om het effect van ZSS mee te nemen. Er wordt in die studie geconcludeerd dat een vervlakking als gevolg van een verandering in de standaardafwijking ( $\sigma$ ) niet aan de orde is.

De achtergrond van zowel de mate van verschuiving van  $\mu$  als het niet meenemen van veranderingen in  $\sigma$  zijn gebaseerd op cases in verschillende watersystemen waarbij de relatie tussen verschuiving in fragility curve en benodigde berm lengte zijn geplot. Een voorbeeld hiervan staat in Figuur 4.3, waarin is te zien dat het gemiddelde ( $\mu$ ) van de fragility curve wel toeneemt met berm lengte, maar in de standaardafwijking ( $\sigma$ ) geen trend valt te ontdekken. *Een belangrijk aandachtspunt bij deze analyses is dat de gebruikte cases allemaal zonder het effect van ZSS zijn.* En daaruit volgend: door alleen  $\mu$  te verschuiven volgens de relaties in Figuur 2.7 en Figuur 2.8 volgt er per definitie een lineaire toename van de opgave met ZSS. De opgave van 0 naar 1 m ZSS is gelijk aan die van 3 naar 4 m ZSS omdat alleen de  $\mu$  wordt aangepast. Dit wordt in de volgende paragraaf verder uitwerkt.



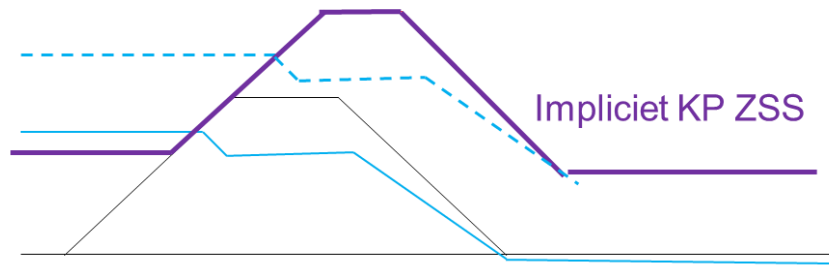
Figuur 4.3 Scatterplot met veranderingen gemiddelde fragility curve ( $\mu$ ) en standaardafwijking ( $\sigma$ ) als functie van bermlengtes in m (legenda) voor macrostabiliteit (Rijn). Bron W+B, HKV (2022).

### 4.3 Beschouwing aanpak methode verschuiving fragility curves

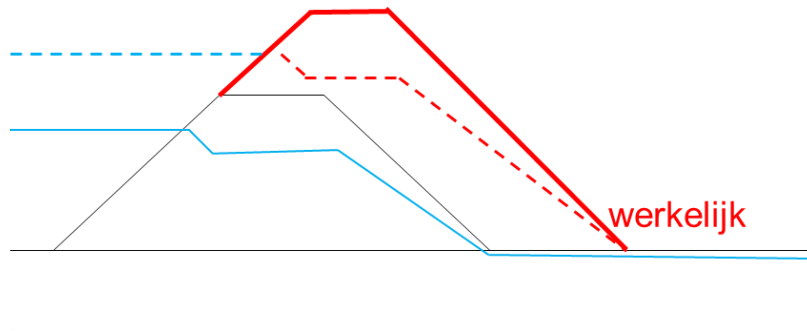
Binnen dit onderdeel wordt een inventarisatie gedaan van effecten die we mogelijk over het hoofd zien in de aanpak fragility curves. Er is vooral gefocust op stabiliteit aangezien er met piping snel wordt overgestapt op verticale maatregelen en hier bijna geen bermen voor ontworpen worden in OKADER.

#### 4.3.1 Verwachte effecten van ZSS op waterspanningen en benodigde dimensies

Wat er gebeurt bij de verschuiving van fragility curves is dat impliciet ook het achterland en de waterspanningen mee veranderen. Immers, de situatie na verschuiving is weer precies gelijk aan de situatie voor ZSS. Dit staat schematisch weergegeven in Figuur 4.4. In werkelijkheid zijn er verschillende eigenschappen die niet mee-variëren zoals hoogte achterland, polderpeil en stijghoogtes onder de dijk. Het verval neemt in werkelijkheid steeds verder toe, zie Figuur 4.5. Deze impliciete aannames in het KP-ZSS zorgen voor een mogelijke onderschatting van de benodigde dijkdimensies.



Figuur 4.4 Impliciete aannames KP-ZSS (blauw is buitenwaterstand en waterspanningen bij ZSS=0; gestippeld blauw is waterstand en waterspanningen bij ZSS > 0).



Figuur 4.5 Indicatieve, werkelijke situatie als gevolg van ZSS (rode stippels zijn waterspanningen aangepast aan ZSS).

#### 4.3.2 Mogelijke effecten die zorgen voor een exponentiële opgave door ZSS

Het impliciete hoofduitgangspunt bij het verschuiven van fragility curves is dus dat de fragility curve verschoven kan worden met alleen de  $\mu$ . En daarmee volgt er per definitie een lineaire toename van de opgave met ZSS. De volgende effecten zouden echter kunnen zorgen voor een niet lineaire toename van de opgave als gevolg van ZSS:

- Toenemend verval aangezien het achterland niet meegroeit met de ZSS. Een toenemend verval zorgt voor een toenemende dijkhoogte. Een hogere dijk is minder stabiel dan een lage dijk met verder gelijke eigenschappen;
- Stijging van het freatisch vlak ten opzichte van huidige situatie. Een hoger freatisch vlak zorgt voor een vermindering van stabiliteit;
- Waterspanningen in diepe lagen. Doordat deze vaak in contact staan met het buitenwater, nemen waterspanningen in diepe lagen toe. En daarmee de effectieve spanningen in/onder de dijk, wat zorgt voor een lagere stabiliteit;
- Opdrijven of opbarsten als gevolg van toegenomen waterspanningen in diepe lagen. Opdrijven (wegvallen van effectieven spanningen on deklaag) of opbarsten (scheur in deklaag) zorgt voor een afname van de stabiliteit.

Daarnaast is er ook in toenemende mate kwel te verwachten, wat verder buiten de scope van deze studie valt.

De mate waarop een exponentiële toename van de opgave te verwachten valt hangt sterk af van de lokale situatie: de sterkte van grond en de gevoeligheid van stabiliteit voor waterspanningen.

Gezien de uitdagingen van dijkversterkingen in het benedenrivierengebied in verband met slappe grond is de verwachting dat dit probleem zich als eerste in het benedenrivierengebied manifesteert.

De analyses in bovenstaande paragraaf gelden op basis van de huidige uitgangspunten binnen het KPZSS, waarin op de zeespiegel na, alles verder constant blijft.

#### 4.3.3 Veranderingen in de tijd die verder een rol kunnen spelen

Het uitgangspunt bij het KP-ZSS is dat alles gelijk blijft in de tijd qua randvoorwaarden (normen, rekenregels voor dijksterkte, beleid, beheer, etc.) behalve de zeespiegel. Voor de bepaling van technische en economische houdbaarheid hebben verschillende veranderingen in de tijd ook invloed op de opgave, waaronder:

- Bodemdaling achterland: bodemdaling kan resulteren in een (significante) daling van het achterland. Het effect van bodemdaling werkt bij benadering gelijk door als het effect van ZSS omdat het verval groter wordt en kan dus een significant effect hebben op de scope. Voor de hoogtebepaling is bodemdaling wel meegenomen in het KP-ZSS, maar de huidige aanpak laat het meenemen voor stabiliteit en piping niet toe.
- Vernatting: er wordt meer neerslag verwacht in de toekomstige winters, wat effect kan hebben op de stabiliteitsopgave.
- Af- of toename sterkte in de tijd: sterkte eigenschappen van grond kunnen zowel afnemen als toenemen in de tijd door bijvoorbeeld consolidatie.

Deze zijn nog niet meegenomen in de analyses maar kunnen de uitkomsten beïnvloeden.

#### 4.4 Beschouwing omgang uitgesloten vakken

De omgang met macrostabiliteit en piping op plekken waar deze mechanismen nu geen issue zijn (op voorhand uitgesloten binnen de systeemanalyses) wordt in de analyses specifiek beschouwd. Dit is mogelijk een correcte benadering wanneer de vakken zijn uitgesloten op fenomenologische gronden (mits dit ook bij een hogere buitenwaterstand nog geldig is), maar niet als het gaat om een doorsnede die nu min of meer toevallig aan de eisen voldoet. Op basis van gesprekken met HKV is gebleken dat de uitsluiting erg conservatief is toegepast, alleen op basis fenomenologische gronden, vooral ondergrondopbouw welke niet piping gevoelig is. Dit onderwerp is hiermee verder niet relevant.

#### 4.5 Samengevat

Op basis van bovenstaande beschouwing wordt geconcludeerd het inherent is aan de aanpak van het KP-ZSS op basis van het verschuiven van fragility curves dat de dijkversterkingsopgave voor stabiliteit lineair toeneemt met de ZSS. Op basis van een theoretische beschouwing in paragraaf 4.3 kan worden geconcludeerd dat deze verschuiving niet goed past bij de fysische effecten. Bijvoorbeeld omdat het verval over de kering toeneemt met een afnemende stabiliteit tot gevolg. Deze effecten (toenemend verval, toenemende waterspanningen met ZSS) zorgen ervoor dat de opgave sterker toeneemt dan de belasting. Het is echter de vraag hoe sterk dit effect is en wat dit betekent voor de conclusies over technische en economische houdbaarheid. Daar wordt in het volgende hoofdstuk verder op ingegaan.

# 5 Cases benodigde stabiliteitsmaatregelen bij ZSS

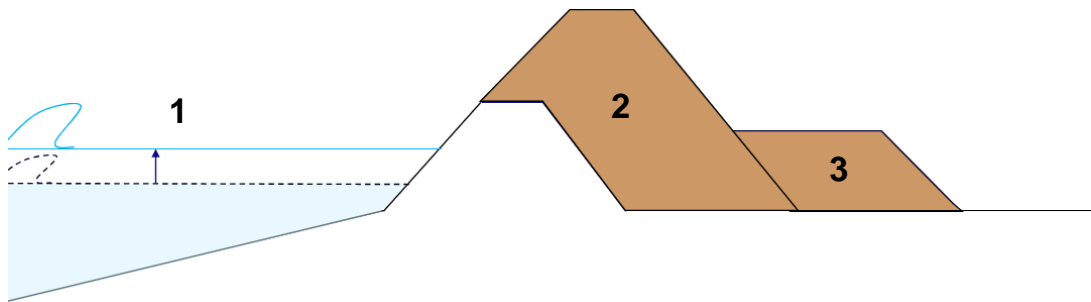
## 5.1 Aanpak

### 5.1.1 Algemeen

Bij dit onderdeel wordt aansluiting gezocht bij een lopend onderzoek binnen SITO-IS naar tipping-points in dijkversterkingen bij een stijgende buitenwaterstand. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de cases en aanpak wordt verwezen naar Deltares (2024). Op basis van 2 cases is een verkenning gedaan naar wat het effect van zeespiegelstijging is op benodigde dijkdimensies, vooral gericht op binnenwaartse stabiliteit en overtopping. Piping is niet beschouwd omdat de verwachting is dat dit faalmechanisme niet meer in grond wordt opgelost maar met verticale maatregelen zoals geotextielen, heaveschermen, etc. De benodigde dijkdimensies voor stabiliteit worden bepaald conform het BOI.

De aanpak is als volgt om de benodigde dijkdimensies te bepalen voor 0, 1m en 2m zeespiegelstijging (ZSS):

- 1 Bepaal het effect van ZSS op waterstanden en golfhoogte;
- 2 Bepaal het effect hiervan op de benodigde dijkhoogte;
- 3 Bepaal de benodigde extra berm lengte om aan de stabiliteitseisen te voldoen;
- 4 Duiding.



Figuur 5.1 Benodigde aanpassingen aan ZSS

Er wordt gekeken naar de benodigde dimensies ten opzichte van een dijk die al aan de norm voldoet bij 0m ZSS (de huidige situatie). De aanpak voor hydraulische belastingen is bij benadering gelijk aan de aanpak in het kennisprogramma. De aanpak voor stabiliteit wijkt zoals in Hoofdstuk 4 besproken af. Daarnaast wordt het effect op de fragility curves bepaald om zo goed de vergelijking met de aanpak uit het KP-ZSS te kunnen leggen.

Er wordt naar een case aan de kust en een case in het benedenrivierengebied gekeken:

- De kust (Wadden) omdat ZSS hier direct waterstanden en golven beïnvloedt, met relatief sterke grond;
- Benedenrivierengebied omdat hier minder effect van ZSS is op de waterstand, maar de grond ook slapper.

## 5.1.2 Uitgangspunten en aannames

De uitgangspunten zijn gekozen passende bij deze cases, waarbij niet alles in detail kon worden uitgezocht en er aannames nodig waren. Enkele van de belangrijkste aannames en uitgangspunten zijn:

- De taludhellingen blijven gelijk.
- Het effect van ZSS op waterspanningen wordt meegenomen conform de leidraden.
- Alleen versterkingen in grond.
- Verder blijft alles gelijk, dus gelijkblijvende normen, belastingen (behalve ZSS), etc.

Er zijn een aantal aspecten die mogelijk wat pessimistisch zijn voor generieke toepassing (resultierend in relatief hoge benodigde berm lengtes):

- Aanpassing waterspanningen (freatisch vlak, diepere lagen): er wordt in deze studie aangenomen dat waterspanningen meestijgen met verhoogde buitenwaterstanden. Dit is alleen het geval in geval van langdurige belastingen en/of relatief doorlatende dijken.
- Responsfactor: deze past bij een schaaldijk, minder bij een dijk met veel voorland.

En een aantal aspecten die mogelijk wat optimistisch zijn:

- Geen bodemdaling: door bodemdaling van het achterland nemen de vervallen nog verder toe en dus naar verwachting de opgave.
- Vernatting van de dijk: veel klimaatscenario's voorzien in meer neerslag in de toekomst, wat een negatief effect zal hebben op de stabiliteit.
- Gelijkblijvende normen: door economische groei is het niet ondenkbaar dat de normen strenger worden in de toekomst.
- Geen indringingslengte: dus relatief lage waterspanningen in deklaag.

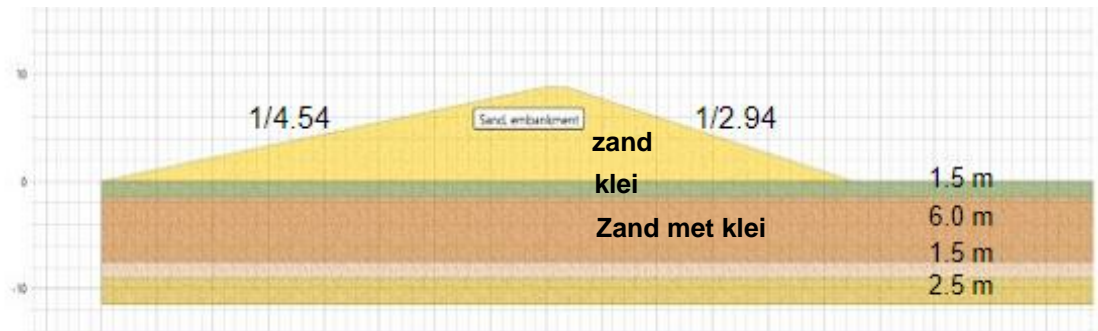
Daarnaast spelen vele andere aspecten die nu allemaal constant zijn gehouden, zoals afvoeren, sluiting van stormvloedkeringen etc.

Het past niet binnen de scope van dit project dit allemaal in detail uit te zoeken. De verwachtingen is dat de combinatie van enkele mogelijk pessimistische en optimistische uitgangspunten niet tot andere conclusies leidt. Voor een verificatie van de conclusies en voor toepassing bij nieuwe cases is het wel nuttig dit verder uit te zoeken. Daarnaast blijkt dat veel uitgangspunten sterk locatie-specifiek zijn, het is dus raadzaam met typologieën te werken. Case 2 is bijvoorbeeld representatief voor een schaaldijk qua stijghoogterespons. Het is daarom van belang deze analyse voor een veel bredere set van dijktypes te herhalen om te bepalen wat de benodigde dimensies in verschillende regio's. Dat kan ook leiden tot een aanscherping/aanvulling van de typologieën waarin sommige van deze dominante factoren nu mogelijk geen plaats krijgen.

## 5.2 Case 1: Kust

### 5.2.1 Beschrijving case

Case kust is gebaseerd op een dijk langs de Waddenzee. De dimensies en ondergrond opbouw staan in Figuur 5.2. Het dijklichaam bestaat uit zandmateriaal, hieronder een dunne kleilaag en daar weer onder een watervoerend zandlichaam welke in connectie staat met de Waddenzee.



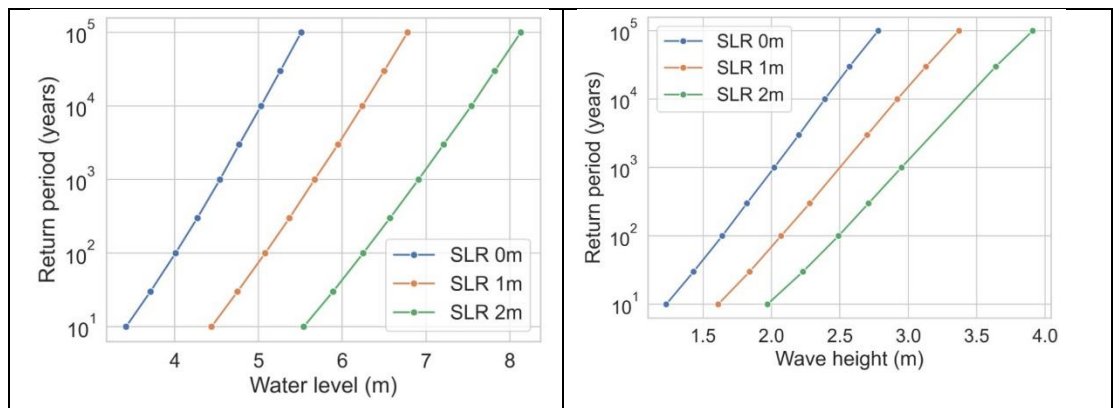
Figuur 5.2 Doorsnede Case kust inclusief deklaagdiktes (rechts) en hellingen van de taluds.

Er zijn twee gevoeligheidsanalyses uitgevoerd (zie stap 3) zodat inzicht wordt gekregen in de gevoeligheid van de uitkomsten en daarmee de conclusies voor variaties in dijk eigenschappen:

- 1 Een afname van de doorlatendheid buitendijkse deklaag, waardoor de lek lengte toeneemt van 146m naar 438m, en dus de drukken onder de dijk verminderen.
- 2 Een 10% afname van de schuifsterkte parameters van dijklichaam en de bovenste twee lagen hieronder.

### 5.2.2 Step 1: Effect van ZSS op waterstanden en golfhoogte

In Figuur 5.3 staat het effect van ZSS op golven en waterstanden. Hierin is dezelfde aanpak als bij de bepaling van randvoorwaarden voor het WBI2017 gebruikt, maar dan met ZSS. De golven nemen vooral toe omdat golven hier diepte gelimiteerd zijn. Een meter waterstandstoename zorgt dan ruwweg voor een halve meter golftoename.



Figuur 5.3 Effect van zeespiegelstijging op waterstanden (links) en golfhoogte (rechts)

### 5.2.3 Step 2: Effect ZSS op de benodigde dijkhoogte

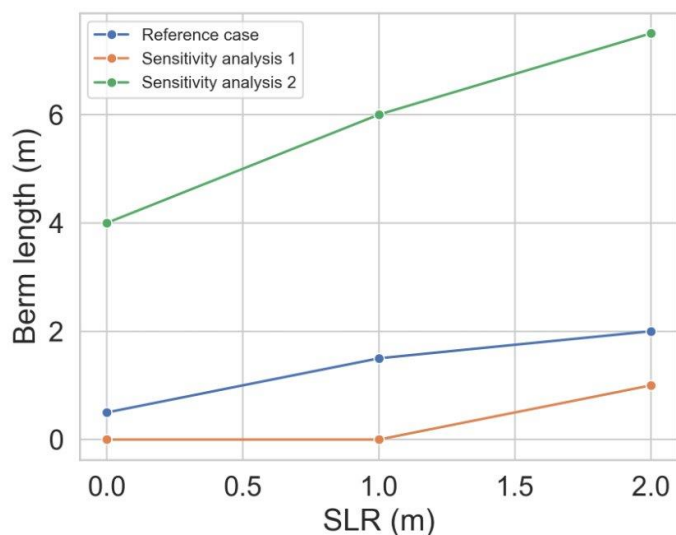
In Tabel 5.1 staat de toename van de benodigde dijkhoogte als functie van ZSS. Wat opvalt is dat de benodigde dijkhoogte ongeveer twee keer zo snel toeneemt als de ZSS. Dit wordt verklaard door de toename van golven. Dit zorgt dus ook automatisch voor een toename van de dijkbreedte zonder het effect van stabiliteit mee te nemen.

Tabel 5.1 Benodigde dijkhoogte en toename dijkhoogte als gevolg van ZSS van case 1.

ZSS (m)	Benodigde dijkhoogte (m)	Toename dijkhoogte (m)
0	7.57	0
1	9.37	1.8
2	11.27	3.7

### 5.2.4 Stap 3: Benodigde extra berm lengte om aan de stabiliteitseisen te voldoen.

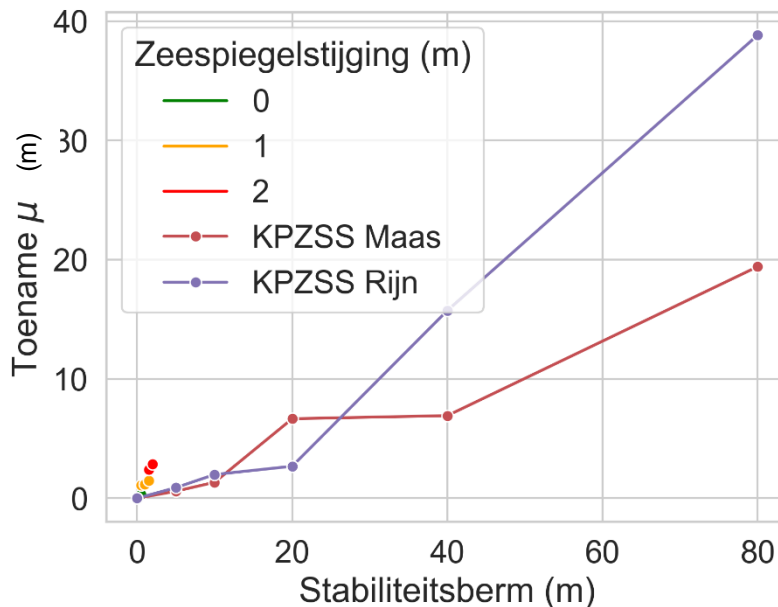
De stabiliteitseisen (faalkanseis, benodigde stabiliteitsfactor) zijn gebaseerd op het OI2014v4<sup>1</sup> met standaard faalkansbegroting en lengte-effect factoren. De dijkbasis is 60m, 74m en 88m voor respectievelijk 0, 1m en 2m ZSS, inclusief het effect van toename dijkbasis als gevolgd van extra hoogte. De benodigde berm lengte om aan de stabiliteitseisen te voldoen is weergegeven in Figuur 5.4. De benodigde berm is dus erg beperkt, zelfs voor de gevoeligheidsanalyses.



Figuur 5.4 Toename benodigde berm voor stabiliteit voor referentiesituatie (blauw) en twee gevoeligheidsanalyse (oranje: meer invloed voorland; groen: lagere grondsterkte)

De resultaten van de analyses zijn ook geplot in mu-berm relaties van het KP-ZSS, zie Figuur 5.5. Gezien de erg kleine bermen kan hier weinig uit geconcludeerd worden qua trends aangezien het KP-ZSS naar veel grotere bermen kijkt.

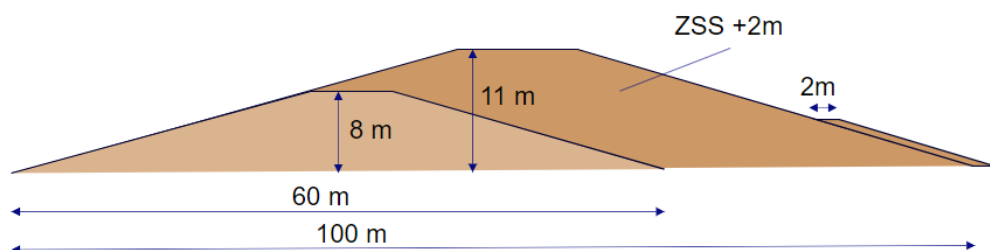
<sup>1</sup> <https://iplo.nl/@190108/ontwerpen/>



Figuur 5.5 Toename parameter  $\mu$  uit de fragility curve als functie van stabiliteitsberm. Case kust.

### 5.2.5 Stap 4: Duiding

De toename van de dijkdimensies voor case Kust zijn samengevat in Figuur 5.6. Het valt op dat de benodigde dimensies veranderen, vooral door de toename van de benodigde hoogte. De benodigde extra berm (exponentiële toename opgave met ZSS) is maar erg beperkt. De voornaamste reden is dat het dijkmateriaal (zand) en ondergrond (sterke klei en zand) hier relatief sterk zijn en het effect van waterspanningen beperkt. De maatgevende waterstand staat slechts halverwege tegen de dijk. Een groot deel van de toename van de dijk betreft dus grond die niet vernat tijdens hoogwater en dus voor relatief veel stabiliteit zorgt. In dergelijke gevallen is een lineaire benadering goed te verantwoorden.



Figuur 5.6 Toename dijkdimensies samengevat voor case Kust

## 5.3 Case 2: Benedenrivieren

### 5.3.1 Beschrijving case

Case benedenrivierengebied bevindt zich in het benedenrivierengebied. De dijk bestaat uit niet al te sterke klei boven op een slappe lagen pakket met een laag gewicht. De effectieve spanningen zijn dus beperkt. De stabiliteit van de uitgangssituatie is beperkt, er is ook voor 0 m ZSS een versterking nodig, welke eerste wordt bepaald. Resultaten worden relatief ten opzichte van deze versterkte uitgangssituatie gepresenteerd. De respons in de zandlaag onder de slappe lagen is met 0,76 relatief groot.

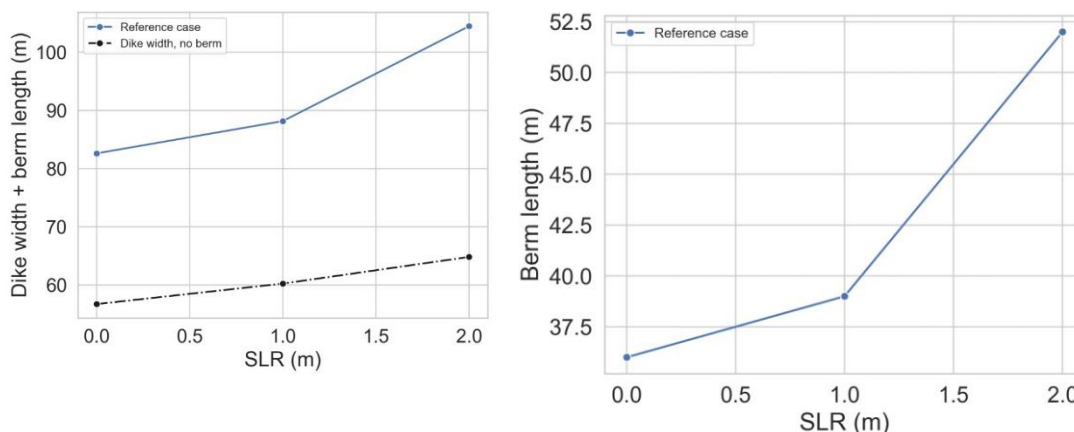


Tabel 5.2 Benodigde dijkhoogte case benedenrivierengebied

ZSS (m)	Benodigde dijkhoogte (m)	Extra dijkhoogte (m)
0	6.1	0
1	6.6	0.5
2	7.25	1.15

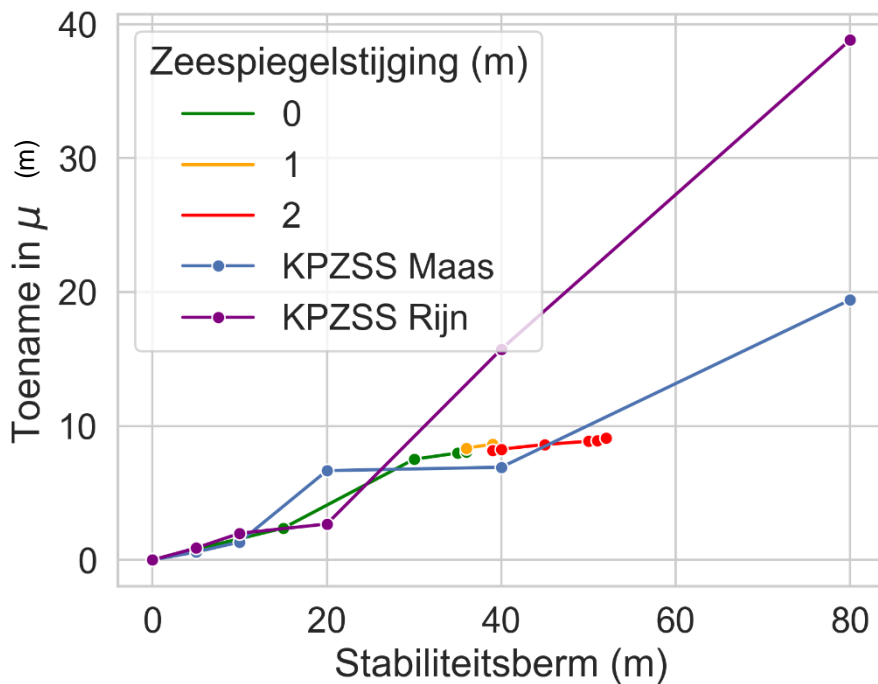
### 5.3.4 Stap 3: Benodigde extra berm lengte om aan de stabiliteitseisen te voldoen.

De benodigde extra bermbreedte om aan de stabiliteitseisen te voldoen staat in Figuur 5.9 (rechts), alsmede hoe zich dit verhoudt tot de situatie zonder berm (rechts) als alleen de hoogte wordt aangepast. Wat opvalt is dat dat er ongeveer 37m berm nodig is om de referentiesituatie met 0m ZSS voldoende stabiel te krijgen. Maar vooral dat de benodigde bermbreedte daarna exponentieel toeneemt met de ZSS.



Figuur 5.9 Benodigde totale breedte (links) en extra bermlengte (rechts) voor aanpassing aan ZSS.

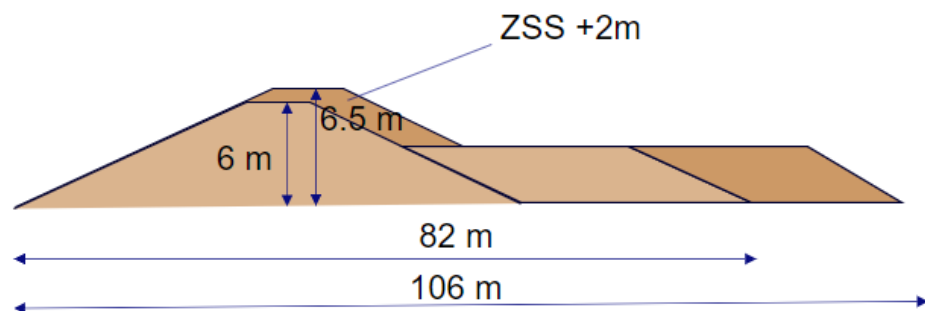
De toename van  $\mu$  in de fragility curves als gevolg van de toename van de berm staat in Figuur 5.10, samen met de nu gebruikte relaties uit het KP-ZSS. Wat vooral opvalt is dat de resultaten van deze case veel vlakker lopen, er is dus veel meer berm nodig voor een toename van  $\mu$  dan het KP-ZSS aanneemt. Bij korte bermen lijkt de Maas nog redelijk te kloppen, maar vooral bij iets langere bermen (daar waar het om draait) is de helling van de case in deze studie veel vlakker dan zowel Rijn als Maas. En daarbij vlakt de relatie af, wat duidt op een steeds verder toenemende opgave.



Figuur 5.10 Toename parameter  $\mu$  uit de fragility curve als functie van stabiliteitsberm. Case benedenrivieren

### 5.3.5 Stap 4: Duiding

De toename van dijkdimensies bij case benedenriviereengebied als gevolg van ZSS staan in Figuur 5.11. Het valt op dat de opgave sterk (exponentieel) toeneemt met de ZSS. Dit wordt voornamelijk bepaald door de gevoeligheid voor a) waterspanningen en b) de slappe grond: a) door de lage effectieve spanningen (door lage soortelijke gewichten in dijksmateriaal en vooral ondergrond) hebben verandering in freatisch vlak relatief veel effect op de stabiliteit. Daarbij zorgen dezelfde lage soortelijke gewichten voor opdrijven bij hoge waterstanden, waardoor er maar weinig sterkte gemobiliseerd kan worden in de deklaag. b) Een verhoging zorgt voor meer aandrijvende kracht welke maar moeilijk opgevangen kan worden door de lage grondsterktes. Een berm helpt, maar zorgt ook deels voor extra aandrijvende kracht wat weer gecompenseerd moet worden met meer berm. Mogelijk dat een andere bermvorm of constructieve oplossingen (bijv. damwanden; een gangbaar alternatief als bermen geen uitkomst bieden of in geval van ruimtegebrek) hier nodig zijn bij nog grotere ZSS.



Figuur 5.11 Samenvatting toename dijkdimensies case benedenrivieren

## 5.4 Duiding resultaten

De cases laten grote verschillen zien. Bij case kust is er nauwelijks een extra opgave voor stabiliteit, terwijl bij case benedenrivierengebied een sterke toename is van de opgave voor stabiliteit met toenemende ZSS. Dit kan worden verklaard door de belastingen en de sterkte.

Case kust is meer golf-gedomineerd met als resultaat veel meer hoogtetoename en vooral toename van het aandeel dijklichaam wat niet beïnvloed wordt door het freatisch vlak. Ook is de grond relatief sterk bij case kust.

Case benedenrivieren daarentegen is zeer gevoelig voor verhogingen van de buitenwaterstand. De grond is slap en licht, waardoor verhogingen zich doorvertalen naar relatief veel extra opgave om de stabiliteit voldoende te houden, onder meer door opdrijven van de deklaag. Wat verder opvalt is dat in case 2 opdrijven plaats vindt bij hoge waterstanden. Dit uit zich in een knik in fragility curves (dit is bijvoorbeeld zichtbaar in cases welke zijn gebruikt voor de kalibratie van binnenwaartse stabiliteit<sup>2</sup>). In de standaard typologieën die in het KP-ZSS zijn gebruikt, is deze knik nergens zichtbaar en lijkt opdrijven/opbarsten daarmee impliciet niet meegenomen.

## 5.5 Gevoeligheid uitkomsten voor kosten

Om een inschatting te kunnen maken hoe voorgaande inzichten zouden kunnen doorwerken in de systeemanalyses in termen van versterkingskosten zijn nieuwe OKADER berekeningen gemaakt waarbij in het RMM en Rivierengebied de fragility curves van de 'versterkte dijk' voor alle beschouwde vakken zijn verschoven volgens het nieuw gevonden verband tussen  $\mu$  en de berm lengte zoals gepresenteerd in Figuur 5.10. In de analyse is verder uitgegaan van de startkansen van VNK, zoals beschreven in Hoofdstuk 3.

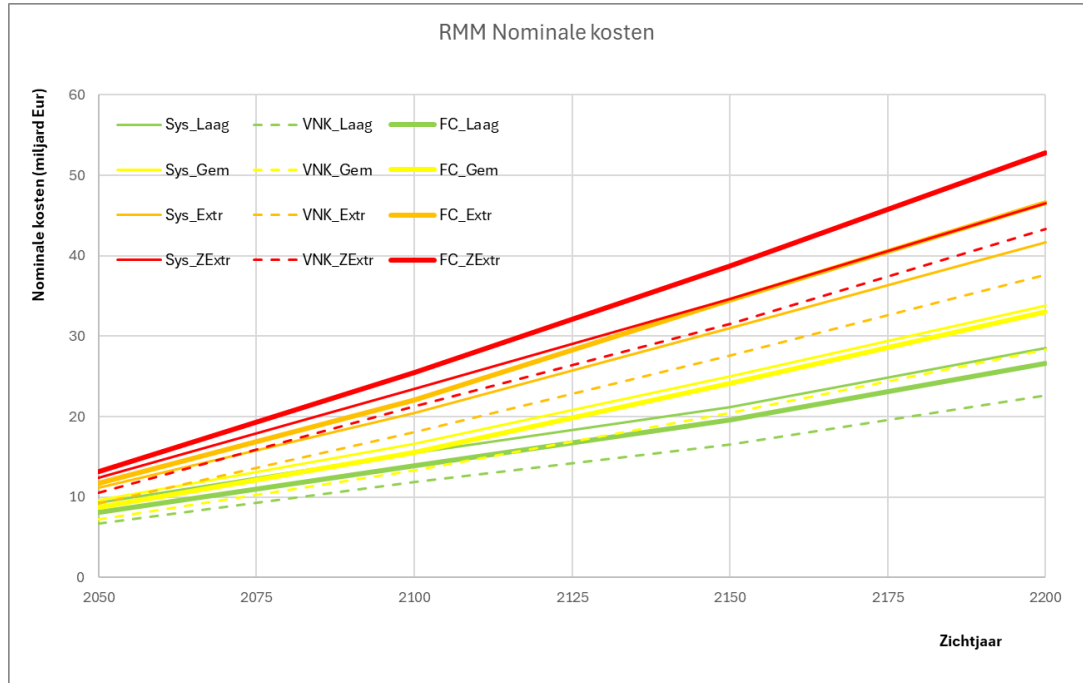
Voor hogere waterstandsstijgingen wordt door toepassing van het nieuwe verband een bredere stabiliteitsberm berekend dan voorheen om een zelfde mate van veiligheid te behalen (ten opzichte van de oorspronkelijk gehanteerde 'KP-ZSS Rijn'-lijn). Let wel, dit verband is afgeleid op basis van één beschouwde case, in praktijk zal dit niet voor alle vakken in het gebied gelden. Het moet daarom worden beschouwd als een indicatie van het mogelijke verschil.

In de grafiek van Figuur 5.10 is te zien dat de veiligheid op een gegeven moment niet of nauwelijks meer zal toenemen bij het toevoegen van meer stabiliteitsbermlengte (de  $\mu$  blijft constant dus de fragility curve verschuift niet meer). Dit betekent dat voor grotere waterstandsstijgingen het beoogde veiligheidsniveau niet meer met een versterking in grond behaald kan worden. Dit zien we in de berekeningen vooral terug in de tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem waar dit bij 129 respectievelijk 166 van de 1100 beschouwde vakken in het benedenrivierengebied aan de orde is, met name langs de Waal en de Nederrijn-Lek. Om voor deze vakken toch een inschatting te kunnen maken van de versterkingskosten wordt hier gekozen voor een volledig constructieve versterking op het gehele vak. Kosten hiervoor zijn geschat op basis van de gemiddelde constructieve kosten per kilometer in het beschouwde deelgebied.

---

<sup>2</sup> [https://iplo.nl/publish/pages/157096/1230086-009-geo-0030-r-derivation\\_of\\_the\\_semi-probabilistic\\_safety\\_assessment\\_rule\\_for\\_inner\\_slope\\_s.pdf](https://iplo.nl/publish/pages/157096/1230086-009-geo-0030-r-derivation_of_the_semi-probabilistic_safety_assessment_rule_for_inner_slope_s.pdf)

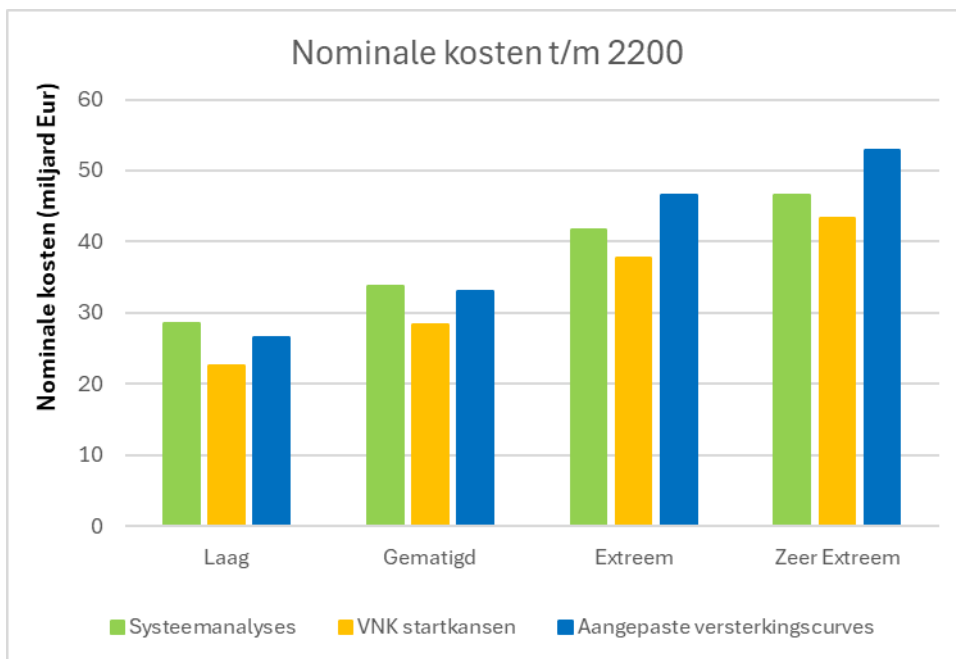
Het aldus gevonden kostenverloop is toegevoegd aan eerdere figuren zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 3 op basis van Figuur 3.5. Waar eerder in de analyses van Hoofdstuk 3 de kosten van de tijdlijnen nog naar beneden gingen door aanpassing van de kansen in de referentiesituatie (verschuiving van de dunne doorgetrokken naar de gestippelde lijnen voor de verschillende tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem) is nu weer een stijging van de kosten te zien (verschuiving van de gestippelde lijnen naar de dik doorgetrokken lijnen).



Figuur 5.12 Nominale kosten Rijn-Maasmonding en rivierengebied voor tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem voor systeemanalyses, de situatie met startkansen VNK2 en de aangepaste versterkingscurves.

Voor de leesbaarheid is tevens een staafdiagram toegevoegd waarin enkel de kosten voor het eindjaar 2200 worden gepresenteerd, zie Figuur 5.13.

Voor de tijdlijn Laag zien we dat de kosten met de aangepaste 'versterkingscurves' vergelijkbaar zijn met de kosten zoals oorspronkelijk berekend in de systeemanalyses. Voor de tijdlijn Zeer Extreem zien we dat de nominale kosten tot 2200 een stuk hoger uitvallen dan in de analyses op basis van de VNK2 startkansen, hierin is een toename van zo'n 22% te zien, waarmee we ook 15% boven de ramingen uit de oorspronkelijk systeemanalyses uitkomen. Daarbij zien we dat de kosten voor de extremere tijdlijnen exponentieel toenemen, de lijnen gaan steeds steiler lopen, dit sluit aan bij de verwachtingen dat de aanpassing van de keringen relatief steeds duurder wordt bij een hogere mate van zeespiegelstijging.



Figuur 5.13 Nominale kosten Rijn-Maasmonding en rivierengebied voor tijdlijnen Laag, Gematigd, Extreem en Zeer Extreem voor systeemanalyses, de situatie met startkansen VNK2 en de aangepaste versterkingscurves voor het zichtjaar 2200.

Als laatste gevoeligheidsanalyse is nog beschouwd hoe de kosten van de tijdlijnen Extreem en Zeer Extreem zouden toenemen wanneer het hele RMM en Rivierengebied constructief versterkt zou worden. Voor tijdlijn Extreem zouden de kosten hierbij toenemen van 46 naar 81 miljard voor de periode tot 2200, voor tijdlijn Zeer Extreem van 52 naar 89 miljard Euro, een toename van zo'n 75%. Gesteld dat we met constructieve maatregelen overal het beoogde veiligheidsniveau halen (dit is nog niet gezegd) zou dit als bovengrens gehanteerd kunnen worden.

## 6 Discussie

In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze studie bediscussieerd en worden de kaders verder besproken.

### 6.1 Over het gebruik van OKADER binnen het KP-ZSS

OKADER is een tool waarmee een inschatting kan worden gemaakt van de benodigde dijkdimensies en bijbehorende kosten voor verandering in hydraulische randvoorwaarden in de tijd. Binnen het KP-ZSS is deze tool toegepast om de impact van zeespiegelstijging (ZSS) te bepalen. Binnen OKADER wordt voor een scenario van ZSS eerst de benodigde dijkhoogte bepaald en vervolgens de benodigde extra aanpassingen die nodig zijn voor stabiliteit en piping. De hoogte-opgave kan redelijk nauwkeurig in beeld worden gebracht omdat deze direct gekoppeld is aan de hydraulische randvoorwaarden. Er zijn tot nu toe geen redenen om aan dit deel van de uitkomsten te twijfelen.

De sterkte (stabiliteit, piping) wordt in OKADER benaderd met generieke fragility curves die zijn vastgesteld voor een beperkt aantal dijktypes. Deze zijn per definitie minder nauwkeurig en locatiespecifiek dan bijvoorbeeld resultaten uit een beoordeling of VNK2. Gezien de lokale complexiteit zijn dijkversterkingen en bijbehorende kosten erg moeilijk in een generiek model te vatten. Dit zorgt voor een onzekerheid in de uitkomsten: deze moeten in absolute zin dus met de nodige terughoudendheid worden beschouwd en er moet vooral naar relatieve verschillen worden gekeken.

Om meer grip te krijgen op deze onzekerheden is er in deze studie daarom gekeken naar:

- De startkansen: Als beginpunt van de KP-ZSS onderzoeken naar de impact op waterveiligheid is 2050 gekozen. Er wordt vanuit gegaan dat de keringen dan op orde gebracht zullen zijn. Als de 'huidige' start(faal)kansen van de waterkeringen te hoog worden ingeschat komt dit tot uiting in een grote investering vóór het jaar 2050 om alles op orde te krijgen (welke buiten de gepresenteerde uitkomsten na 2050 vallen) maar ook een kleinere investering na 2050 omdat minder ruimte voor de versterking nodig is en er op minder plaatsen ruimtelijke knelpunten zullen optreden die hoge (inpassings)kosten met zich meebrengen. Het is dus de vraag hoe gevoelig de uitkomsten (versterkingsopgave bij verschillende ZSS) zijn voor deze startkansen.
- De methode verschuiving fragility curves: in hoeverre is de eerder gebruikte methode (W+B en HKV, 2022) van de verschuiving van fragility curves bij ZSS scenario's afdoende om uitspraken te kunnen doen over de benodigde sterkteopgave.

### 6.2 Over de analyse van startkansen

Binnen deze analyse wordt verondersteld dat de faalkansen die per dijkvak zijn berekend binnen VNK2 een realistischere representatie van de uitgangssituatie geven dan de door OKADER berekende (relatief hoge) kansen in de systeemanalyses van het KP-ZSS (op basis van waterstandsstatistiek en fragility curves). Hierdoor wordt de berekende dijkversterkingsopgave binnen het KP-ZSS voor het 'op orde komen' aan de norm overschat.

Voor de kosten van het op orde komen beschouwen we de tijdlijn Laag in de periode tot en met het jaar 2050. Bij het aanpassen van de startkansen aan de hand van VNK2 (zie hoofdstuk 3 voor de hierbij gehanteerde methode) worden de berekende kosten voor het op orde komen (gesommeerd over de beschouwde deelgebieden) ruim 3 miljard euro lager, een afname van zo'n 25% van ruim 13 naar ca. 10 miljard euro.

In de systeemanalyses van het KP-ZSS worden deze kosten voor het op orde komen veelal buiten beschouwing gelaten, en wordt vooral gefocust op de relatieve verschillen die optreden in de tijdlijnen ná het jaar 2050. Het bijstellen van de overstromingskansen in de uitgangssituatie leidt echter ook in die periode tot een verkleining van de opgaves en zal tot lagere kosten leiden omdat met gereduceerde versterkingsdimensies op minder plaatsen ruimtelijke knelpunten zullen optreden bij de dijkversterkingen.

In de afbeeldingen in paragraaf 3.4 wordt een indicatie gegeven van de winst in ruimtebeslag die in de uiteindelijke toekomstige situatie te behalen is ten opzichte van de systeemanalyses. Deze reductie werkt zoals gesteld door in alle toekomstige versterkingen in alle tijdlijnen, de uiteindelijke dimensies van de dijk onder zeespiegelstijging (toekomstige situatie zichtjaar 2200) worden dus kleiner. NB: bij het beschouwen van het totale ruimtebeslag van de versterkingsopgaves wordt aanbevolen vooral te focussen op de macrostabiliteitsopgave, op plekken waar ruimtelijke knelpunten ontstaan zal voor het mechanismen piping veelal (tegen geringe meerkosten) een alternatieve (verticale) maatregel zoals een kwelscherm, geotextiel, e.d. waarschijnlijker zijn.

De doorwerking van de inzichten in de startkansen naar de toekomst (na 2050) is qua dijkversterkingskosten vooral te zien in versterkingen op plekken waar de opgaves klein blijven, met name in de tijdlijn Laag en in het meer bovenstrooms gelegen gebied van de rivieren waar de waterstandsstijgingen door zeespiegelstijging ook in de extremere tijdlijnen beperkt blijven. Op deze plekken zullen op sommige vakken toekomstige versterkingen overbodig blijven, wat direct de meeste winst oplevert. De totale berekende kostenreductie binnen de tijdlijn Laag ná het jaar 2050 komt op zo'n 17,5%, de kosten dalen hier van 35 naar 29 miljard euro. Voor de extremere tijdlijnen wordt het effect van de aangepaste startkansen steeds kleiner, omdat de keringen hoe dan ook versterkt zullen moeten worden of omdat de versterking sowieso wordt gedomineerd door de hoogteopgave. Voor de tijdlijn Zeer Extreem is de reductie in kosten na 2050 nog slechts een kleine 5% (van 66 naar 63 miljard).

### 6.3 Over de methode verschuiving fragility curves voor de stabiliteitsopgave

De methode verschuiving fragility curves die in het KP-ZSS (W+B en HKV, 2022) wordt gebruikt voor de stabiliteitsopgave, behelst een verschuiving van de fragility curves als gevolg van ZSS. Deze methode levert inherent een lineaire toename van de benodigde stabiliteitsopgave met ZSS: het maakt niet uit de aanpassing van 0m naar 1m ZSS is of van 4m naar 5m ZSS.

Ook de onderliggende analyses, de relatie tussen benodigde berm en de verschuiving van de fragility curve, die zijn gebruikt, maken alleen gebruik van versterkingsontwerpen van de huidige situatie zonder ZSS. Er wordt in de gebruikte methode geen gebruik gemaakt van ontwerpen bij een hogere buitenwaterstand en een groter verval over de dijk. Er wordt via de aanpak in de eerder gebruikte methode aangenomen dat de dimensies voldoende zijn om aan de ZSS te voldoen. In werkelijkheid wordt dit lineaire gedrag niet verwacht.

Er is in deze analyse vooral naar macrostabiliteit gekeken. Voor piping wordt er maar heel beperkt met bermen gerekend in OKADER, er wordt verondersteld dat dit mechanisme in de toekomst veelal met verticale maatregelen (kwelschermen, geotextielen, e.d.) wordt opgelost.

Hierbij is wel de vraag in hoeverre de pipingmaatregelen aangepast kunnen worden aan ZSS (wat zijn de precieze limieten in termen van toelaatbaar kritiek verval aan bijvoorbeeld geotextielen).

## 6.4 Over de doorgerekende cases

Er zijn twee cases doorgerekend, één aan de kust en één in het benedenrivierengebied. Voor beide cases is naar het effect van ZSS op hoogte en binnenwaartse stabiliteit gekeken. Voor stabiliteit is dit gedaan door te kijken hoeveel extra berm er (naast de benodigde extra breedte als gevolg van een verhoging) nodig is om aan de stabiliteitseisen te voldoen bij een ZSS van 0, 1 en 2m. Deze aanpak is een aanscherping van de huidige aanpak in het KP-ZSS.

Voor de case benedenrivieren laat zien dat de benodigde aanpassing (uitgedrukt als benodigde berm) exponentieel toeneemt met de ZSS. Dit in tegenstelling tot de aannames en uitkomsten in de huidige aanpak in het KP-ZSS. Dit wordt vooral verklaard door de beperkte grondsterkte, lage gewichten en lage effectieve spanningen welke typisch zijn voor het benedenrivierengebied, waardoor deze case gevoelig is voor toenames in buitenwaterstanden. Bijvoorbeeld omdat opdrijven kan optreden, maar ook omdat door de lage effectieve spanningen er maar weinig sterkte gemobiliseerd kan worden. Ook wordt het optredende verval in de huidige aanpak onderschat. Bij case kust wordt er maar een heel beperkte toename gevonden van de benodigde berm lengtes. Dit wordt vooral verklaard door de relatief sterke grond en beperktere gevoeligheid voor waterspanningen. Dit laatste komt vooral omdat door golven de dijkhoogte meer toeneemt dan de ZSS en er dus relatief een groot deel van het dijklichaam niet beïnvloed wordt door het freatisch vlak en ook bij hogere ZSS sterkte kan leveren tegen instabiliteit.

Er is naar twee cases gekeken, deze geven een eerste indicaties van exponentiele effecten voor de benodigde dijkdimensies. Dit geldt niet voor heel Nederland, maar mogelijk neemt voor een deel van de Nederlandse dijken de opgave dus sterker (exponentieel) toe dan de toename in belasting. Gezien de belastingen en dijk- en ondergrondopbouw lijkt dit vooral het geval in (delen van) het benedenrivierengebied.

Case benedenrivierengebied laat een vlakke en afvlakkende relatie zien tussen de verschuiving van de fragility curve ( $\mu$ ) en berm lengte, wat impliceert dat er steeds meer berm nodig is voor een bepaalde verhoging van de zeespiegel. Deze is veel vlakker dan in de huidige aanpak van het KP-ZSS, waardoor de benodigde versterkingen van het KP-ZSS voor vergelijkbare gevallen wordt onderschat. Onderzocht moet worden of grondoplossingen bij grotere ZSS een nog haalbaar zijn, gezien het exponentieel toenemen van de benodigde hoeveelheid berm bij hogere ZSS of dat het effectiever is om op een constructieve maatregel over te gaan.

## 6.5 Over de implicaties voor de technische en financiële houdbaarheid

Deze studie laat zien dat de aanpak in het KP-ZSS waarin wordt gewerkt met een verschuiving van fragility curves niet afdoende is om een inschatting van de opgave te krijgen voor wat betreft stabiliteit. Over de **technische houdbaarheid** van stabiliteitsmaatregelen in grond kunnen dus geen absolute uitspraken worden gedaan op basis van de beschikbare analyses in het KP-ZSS of deze studie. Het lijkt waarschijnlijk dat bij grotere ZSS de huidige KP-ZSS aanpak een onderschatting geeft van opgave, benodigde ruimte en kosten; en dat er meer constructieve maatregelen nodig zijn. Wat dit betekent voor de bredere conclusies over technische en economische houdbaarheid binnen het KP-ZSS is buiten de scope van dit project.

Wat dit betekent voor de algemene conclusies voor het KP-ZSS moet worden beschouwd in relatie tot het totaal aan onzekerheden (zie paragraaf 6.1.1) en bijdrages aan de kosten (bijvoorbeeld dijkverhogingen). Een eerste verkenning met OKADER hiervan laat zien dat dimensies van versterkingen in het benedenrivierengebied met de nieuwe inzichten uit case 2 toenemen en dat verschillende dijken met constructies moeten worden als de impact op benodigde dijkdimensies zoals in Hoofdstuk 5 beschreven worden toegepast. Dit levert extra constructieve maatregelen en dus kosten op.

We zien (wanneer we ook de inzichten uit de analyse van de startkansen meenemen) dat kosten voor de tijdlijn Zeer Extreem (tot zichtjaar 2200) voor het hele systeem tot zo'n 20% kunnen stijgen ten opzichte van de systeemanalyses (paragraaf 5.5). Hierbij zien we ook dat de kosten voor de extremere tijdlijnen exponentieel toenemen, de lijnen gaan steeds steiler lopen, dit sluit aan bij de verwachtingen dat de aanpassing van de keringen relatief steeds duurder wordt bij een hogere mate van zeespiegelstijging. Een eerste schatting van kosten met OKADER voor het benedenrivierengebied laat een toename van 75% zien als alles constructief versterkt wordt, een bovengrens benadering van de opgave aangezien het onwaarschijnlijk is dat alles constructief versterkt moet worden. Met de kanttekeningen dat er ook nog geen representatieve ontwerpberekeningen zijn gedaan voor de technische en daarmee ook financiële houdbaarheid in het geval van verschillende ZSS.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

Deze studie richt zich erop hoe binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging dijksterkte is meegenomen bij het trekken van conclusies over de technische en economische houdbaarheid van het huidige systeem van waterkeringen bij een verschillende mate van zeespiegelstijging. Daarmee richt deze studie zich op een klein aspect van het KP-ZSS. Er spelen andere aanpasbaarheidsvraagstukken op waterveiligheidsgebied, bijvoorbeeld over stormvloedkeringen of andere strategieën en denkrichtingen (bijvoorbeeld de strategie meebewegen), die buiten de scope van dit project vallen. In dit project is gekeken naar twee aannames onderliggend aan de KP-ZSS analyses van de technische en economische houdbaarheid: de invloed van de startkansen (de huidige faalkansen van de waterkeringen), en de aanname dat zeespiegelstijging zich lineair doorvertaalt in de sterkte-opgave, vooral gericht stabiliteit binnenwaarts en piping.

De belangrijkste conclusies van de analyses zijn:

- De **startkansen** hebben vooral invloed op de totale kosten bij de lagere tijdlijnen met een zeespiegelstijging van 1 tot 2 m tot aan het jaar 2200. Door de eerste versterkingsstap buiten beschouwing te laten wordt ten onrechte verondersteld dat de startkansen geen invloed hebben op de vervolgoopgave. Uit een vergelijking met de systeemanalyses blijkt een totale berekende kostenreductie, door het aanpassen van de startkansen, binnen de tijdlijn Laag ná het jaar 2050 van zo'n 17,5%. De kosten dalen hier van 35 naar 29 miljard euro.
- Voor de extremere tijdlijnen (3 tot 5 m ZSS in 2200) wordt het effect van de aangepaste startkansen steeds kleiner. Relatief gezien worden de extremere tijdlijnen duurder ten opzichte van de tijdlijn Laag als gevolg van aangepast startkansen. Echter, de berekende kosteneffecten ten gevolge van de gewijzigde startkansen vallen **binnen de bandbreedtes** die in beleidsanalyses acceptabel geacht worden, en zullen niet leiden tot sterk gewijzigde inzichten binnen de systeemanalyses van het KP-ZSS.
- De methode verschuiving fragility curves die in het KP-ZSS (W+B en HKV, 2022) wordt gebruikt voor de stabiliteitsopgave, behelst een verschuiving van de fragility curves als gevolg van ZSS. Deze methode levert inherent een lineaire toename van de benodigde stabiliteitsopgave met ZSS. In werkelijkheid wordt deze **lineaire toename niet verwacht**, aangezien het verval toeneemt en waterspanningen ook steeds grotere worden bij toenemen ZSS.
- Er zijn twee cases doorgerekend op stabiliteit om te bepalen of de verschuiving van de fragility curve, en daarmee de lineaire toename van de opgave, realistisch is. Voor case Kust lijkt de verschuiving redelijk te kloppen. Dit lijkt vooral te komen door relatief sterkte grond en deels droge dijk (zeedijken verzadigen doorgaans maar gedeeltelijk). Voor case Benedenrivieren wordt echter een **exponentieel toename van de benodigde hoeveelheid berm** gevonden met toenemende ZSS. Dit lijkt te komen door de slappe grond en hoge waterspanningen.
- Het exponentieel groeien van de opgave lijkt vooral te spelen in het **benedenrivierengebied**, uitgevoerde analyses zijn echter nog onvoldoende om een uitspraak te kunnen doen waar dit precies speelt. Gezien de exponentieel toename van de opgave is het de vraag of grondoplossingen bij grotere ZSS een nog haalbaar zijn.
- Een eerste schatting van kosten met OKADER voor het benedenrivierengebied laat een toename van 75% zien als alles constructief versterkt wordt.

Deze studie (op basis van cases en onderliggende fysica) laat zien dat de aanpak in het KP-ZSS waarin wordt gewerkt met een verschuiving van fragility curves voor geotechnische sterkte de onderliggende fysica niet goed weergeeft en daarmee niet altijd geschikt is om de stabiliteitsopgave goed in te schatten. De huidige aanpak van het KP-ZSS onderschat de opgave. Het is de vraag in hoeverre dit geldt over het land verspreid, hoe dit afhangt van de lokale belasting, dijk- en ondergrondopbouw.

Over de **technische houdbaarheid** van stabiliteitsmaatregelen in grond kunnen dus geen absolute uitspraken worden gedaan op basis van de beschikbare analyses in het KP-ZSS of deze studie. Het lijkt zeer waarschijnlijk dat bij grotere ZSS de huidige KP-ZSS aanpak een onderschatting geeft van opgave, benodigde ruimte en kosten; en dat er meer constructieve maatregelen nodig zijn. Wat dit betekent voor de bredere conclusies over technische en economische houdbaarheid binnen het KP-ZSS is buiten de scope van dit project.

## 7.2 Aanbevelingen

Op basis van de uitgevoerde analyses lijkt het zinvol om in toekomstige OKADER-analyses de opgave om op orde te komen aan de norm zo realistische mogelijk te beschrijven. Hierbij verdient het aanbeveling om ook actuelere bronnen dan VNK in oenschouw te nemen.

Het wordt aanbevolen om regionale analyses te doen over hoe het dijksysteem er uit komt te zien op basis van verschillende ZSS, op basis van geotechnische berekeningen en realistische uitgangspunten. Een goede eerste stap hierin is om een aantal representatieve locaties (5 á 10) door te rekenen met een vergelijkbare aanpak als in dit rapport. En dit eventueel verder uit te breiden als dit nodig is om conclusies verder te onderbouwen. Op basis van deze analyses kan een beter beeld worden verkregen van de generieke conclusies van technische en economische houdbaarheid.

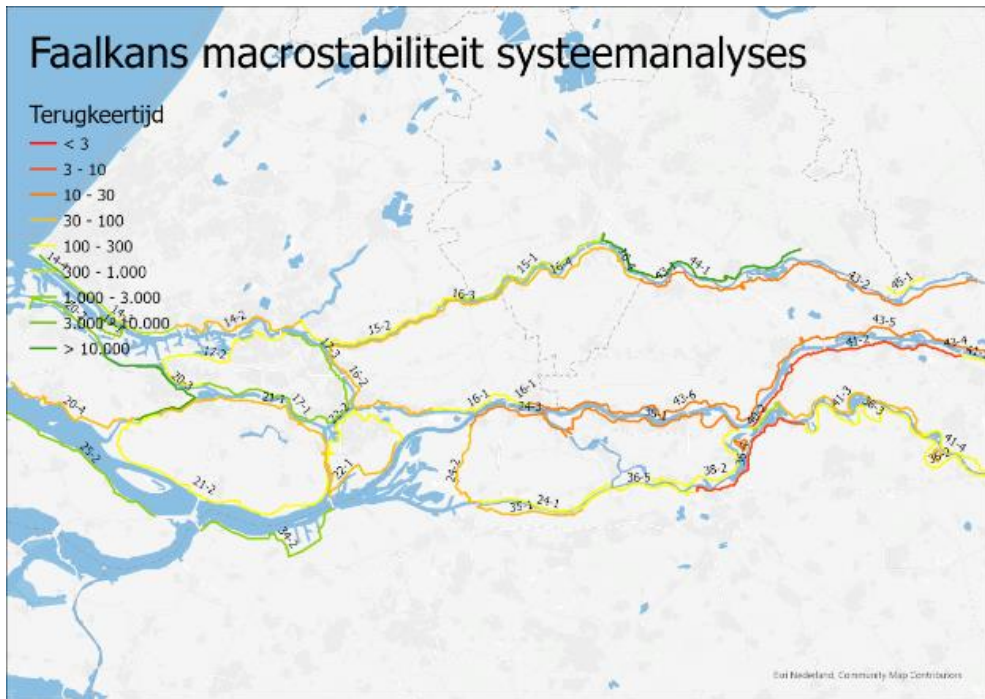
Constructieve maatregelen worden in OKADER vaak gekozen als er bebouwing is, maar kunnen ook aantrekkelijk zijn wanneer grondconstructies niet meer efficiënt zijn (weinig sterkte-toename per meter berm). Ook bij constructieve maatregelen is het echter de vraag in hoeverre de opgave exponentieel toeneemt met zeespiegelstijging en dus hoe de ontwerpen er uit komen te zien en wat de kosten zijn. Bijkomend aandachtspunt is dat deze maatregelen vaak beperkt aanpasbaar zijn, en de ontwerputgangspunten waar op wordt voortgebouwd in beleidsanalyses dus erg belangrijk worden. Het wordt aanbevolen dit voor constructieve maatregelen bij ZSS verder te onderzoeken.

# Bronnen

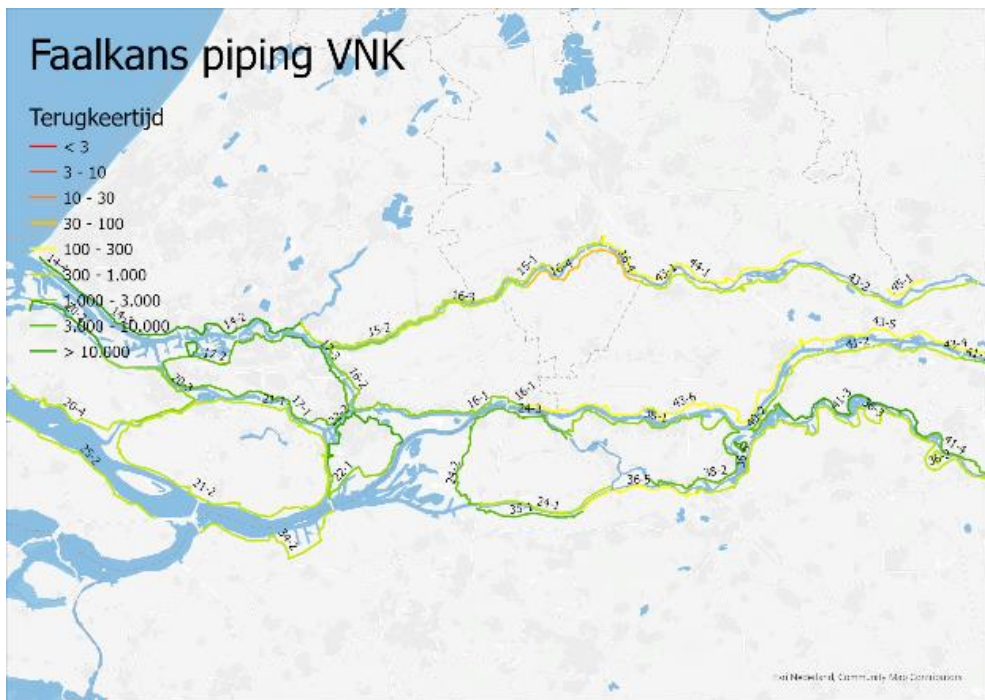
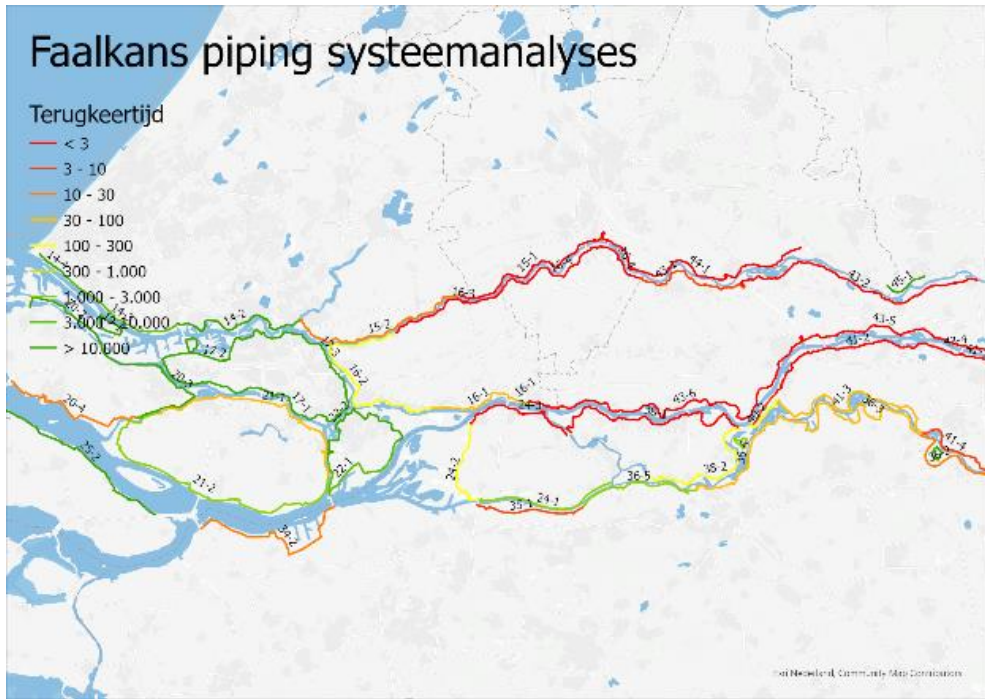
- HKV (2021). *Actualisatie OKADER voor toepassing bij de IRM-MER*. HKV, rapportage project PR4343.10 dd. april 2021
- W+B, HKV (2022). Landelijke set fragility curven t.b.v. KP-ZSS. Witteveen+Bos, rapportage 129320/22-013.341 dd. 16 september 2022.
- Deltares (2024). Tipping points for levee reinforcement under SLR. Deltares project 11210269. Auteurs: L. Wopereis, M. van der Krogt
- Achtergronden bij de normering van de primaire waterkeringen in Nederland. Hoofdrapport. N. Slootjes en H. van der Most. Uitgave van ministerie van Infrastructuur en Milieu. 22 april 2016
- Ter Horst, W. Veiligheid Nederland in Kaart 2. Overstromingsrisico van dijkgebieden 14, 15 en 44. Rapport HB 1828484. Projectbureau VNK2.
- Slootjes, N. & Van der Most, H. (2016) Factsheets normering primaire waterkeringen Getalsinformatie per normtraject.
- Van Reen, M.J. (2014). Veiligheid Nederland in Kaart 2. Overstromingsrisico dijkgebied 13, Noord-Holland. Rapport. HB 2310963. Projectbureau VNK2.
- Consequentieanalyse. Technisch-inhoudelijke uitwerking DPV 2.2. Werkdocument Deelprogramma Veiligheid, Definitief 19 September 2014).
- Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor 2 (2023). *Systeemanalyse waterveiligheid - Deelrapport Rijn-Maasmonding en Rivierengebied*. HKV rapportnummer PR4682.10 dd. 12 mei 2023
- RWS Waterdienst (2016). *Uitwerking methode voor bepaling kostenreductie rivierverruiming - Kostenreductie dijkverbeteringen door uitvoering rivierverruiming*. Consortium Deltares, HKV, e.a. Eindrapportage dd. 19-07-2016.
- RWS WVL (2017). *Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen – Veiligheidsfactoren en Belastingen bij nieuwe Overstromingskansnormen*. OI2014v4 dd. 1-2-2017

# A Berekende faalkansen systeemanalyses en VNK

## A.1 Faalkansen Macrostabiliteit binnenwaarts OKADER en VNK2+

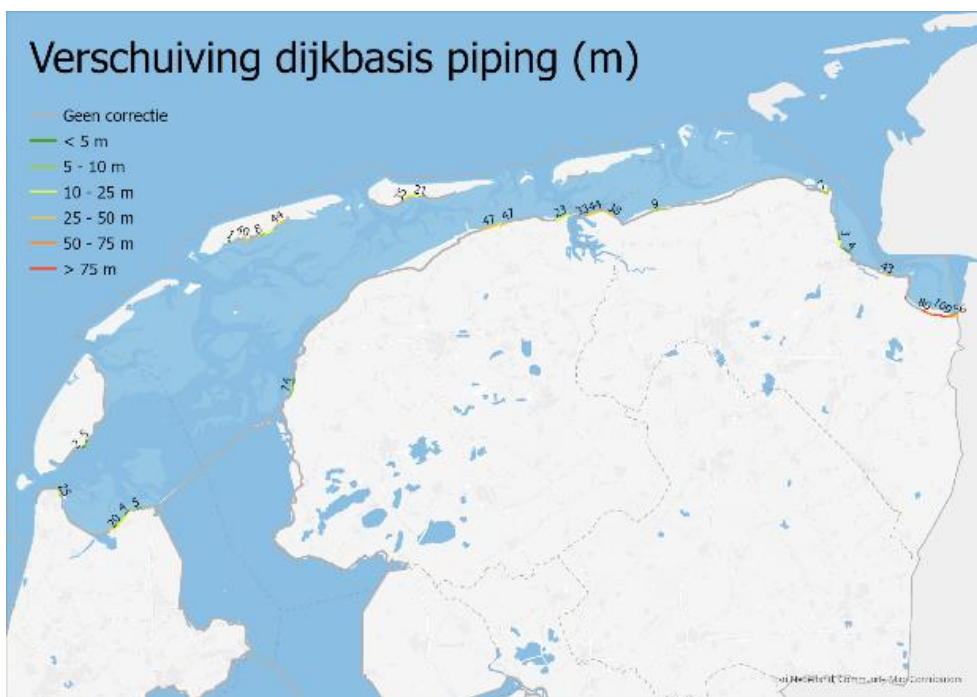


## A.2 Faalkansen piping OKADER en VNK2+

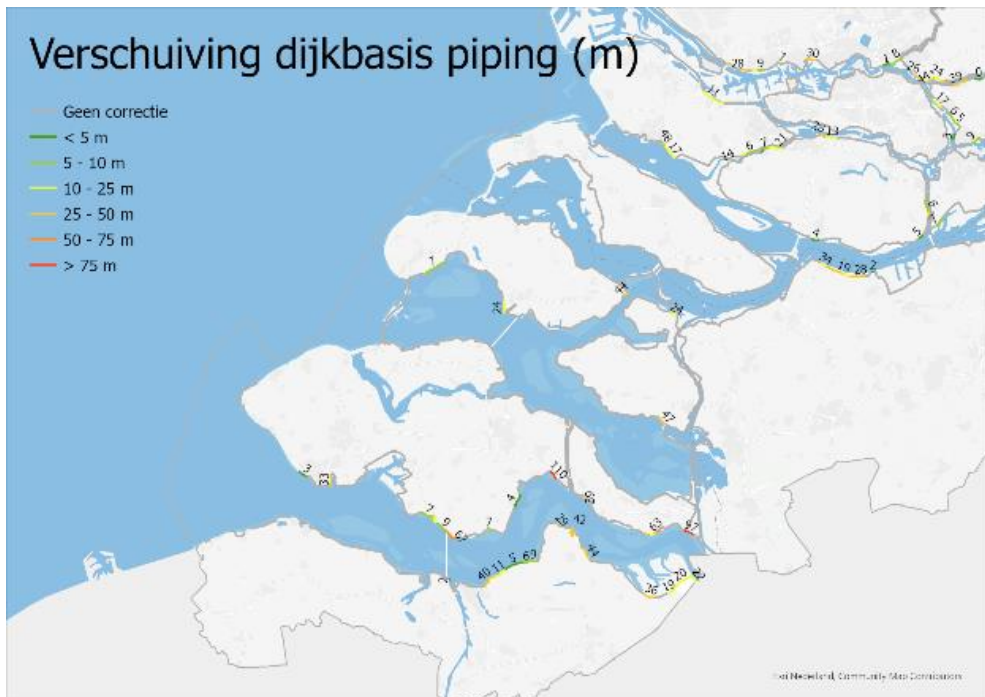
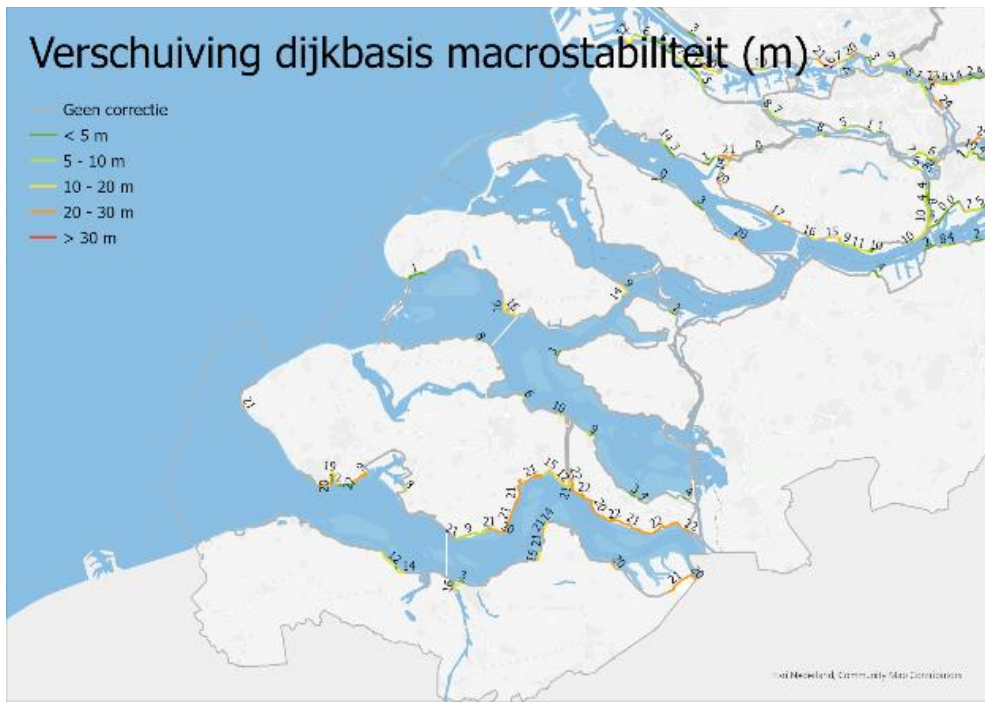


# B Correctie versterkingsopgave systeemanalyses Wadden en Zuidwestelijke Delta

## B.1 Waddenzee



## B.2 Zuidwestelijke Delta



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)