

Impact waterstandsverlaging op de huidige (dijk)veiligheidsopgave tot 2050 Rijnmond Drechtsteden



Impact waterstandsverlaging op de huidige (dijk)veiligheidsopgave tot 2050 Rijnmond Drechtsteden

Auteur(s)

Mark van der Krogt

Han Knoeff

Impact waterstandsverlaging op de huidige (dijk)veiligheidsopgave tot 2050 Rijnmond Drechtsteden

Opdrachtgever	Deltaprogramma Rijnmond Drechtsteden
Contactpersoon	Gijs Bloemberg
Projectreferenties	-
Trefwoorden	Waterveiligheidsopgave, systeemmaatregelen, dijkversterking, overstromingskans, faalmechanismen, Rijnmond Drechtsteden

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	22-10-2025
Projectnummer	11212127-002
Document ID	11212127-002-GEO-0002
Pagina's	52
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Mark van der Krogt Han Knoeff	
--	----------------------------------	--

Samenvatting

In het Deltaprogramma Rijnmond Drechtsteden wordt onderzocht in hoeverre systeemmaatregelen, die de waterstand in het hoofdwatersysteem verlagen, bijdragen aan het beheersen van overstromingsrisico's. In de onderzoeken die tot nu toe zijn uitgevoerd, is uitgegaan van een situatie waarin de waterkeringen in 2050 voldoen aan de overstromingskansnorm en dat de veiligheidsopgave tot 2050 middels dijkversterkingen wordt opgelost. Verwacht wordt dat tot 2050 99-165 km waterkeringen moet worden versterkt (waarvan ca. 40 km al in versterking is), waarbij het zwaartepunt in het oosten van het gebied (voormalige dijkkringen 15 en 16) ligt. De opgave bestaat vooral uit een hoogte- en stabiliteitsopgave die soms overlappen.

Deltares heeft onderzocht wat de impact is van waterstandsddaling door systeemmaatregelen op deze veiligheidsopgave tot 2050. Daarbij is gekeken naar de algemene kenmerken van de keringen in Rijnmond Drechtsteden en de relatie tussen waterstandsverlaging en de overstromingskans voor de dominante faalmechanismen. De conclusies moeten ook in dit licht worden gezien.

Op basis van dit onderzoek concluderen we dat de overstromingskans bij een waterstandsverlaging door maatregelen in het watersysteem kleiner wordt. De impact op het aantal voor 2050 te versterken kilometers waterkering is echter beperkt. De waterstandsddaling kan wel leiden tot kleinere dimensies van de versterking.

De reductie op het aantal te versterken kilometers wordt met name verwacht bij keringen die enkel een hoogte-opgave hebben (ca. 40% van de opgave), mits daar een waterstandsverlaging van 30-60 cm kan worden gerealiseerd. De stabiliteitsopgave wordt niet significant door een waterstandsddaling beïnvloed omdat het hier kleidijken betreft, waarvan de overstromingskans relatief ongevoelig is voor waterstandsddaling. In het gebied wordt tot 2050 geen significante stabiliteitsopgave verwacht bij de dijktypen die gevoeliger zijn voor waterstandsddaling, zoals zanddijken en dijken met overslag.

Kleinere dimensies van de versterking door waterstandsddaling kunnen een significant effect hebben voor locaties waar een dijkversterking een grote impact heeft op de omgeving. Met impact wordt het ruimtebeslag, de benodigde kosten en de maatschappelijke consequenties bedoeld. Mogelijk kunnen ingrijpende maatregelen worden uitgesteld. Een voorbeeld betreft de Voorstraat in Dordrecht, waar de huidige kering op dit moment net aan de norm voldoet maar vóór 2050 een opgave wordt verwacht. Een beperkte verlaging van de waterstand kan hier potentiële toekomstige versterkingsmaatregelen als gevolg van zeespiegelstijging voorkomen of uitstellen. De impact hiervan op de omgeving is aanzienlijk. Aanbevolen wordt om de inzet van maatregelen in het watersysteem voor dit soort kansrijke hotspots nader te onderzoeken als onderdeel van de trajectaanpak.

Maatregelen in het watersysteem hebben invloed op zowel de waterstand als de duur van een hogere waterstand. Deze hebben effect op zowel het doorbraakproces als het overstromingspatroon, en de daarmee de gevolgen van overstroming (schade en slachtoffers). Dit is nog niet meegenomen in de huidige studie. Het verdient aanbeveling om de houdbaarheid van de conclusies op langere termijn te toetsen en daarbij het overstromingsrisico van het gebied centraal te stellen en de belasting, sterkte en gevolgen integraal te beschouwen.

Kortom, systeemmaatregelen die leiden tot waterstandsdeling hebben tot 2050 een gering effect op het aantal kilometers te versterken dijken, maar kunnen in specifieke gevallen wel de impact van dijkversterkingen verkleinen.

Daarom adviseren we om nader te onderzoeken of het op lange termijn loont om nu al systeemmaatregelen in te plannen (en beleidsmatig in te boeken) die ervoor zorgen dat dijkversterkingen minder ingrijpend zijn voor de maatschappij en de omgeving. Zeker bij complexe dijktrajecten in dicht stedelijk gebied (zoals de Voorstaat in Dordrecht) lijkt het zinvol om het totale systeem te beschouwen.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	6
1	Inleiding	8
2	Omvang van de veiligheidsopgave tot 2050	10
3	Bepalende faalmechanismen voor de opgave	11
4	Invloed waterstandsverlaging op de opgave	13
5	Invloed van waterstandsverlaging op overstromingskans	15
6	Synthese	19
	Verantwoording	21
	Referenties	22
A	Impact systeemmaatregelen op binnenwaartse macrostabiliteit	23
A.1	Introductie	23
A.1.1	Inleiding	23
A.1.2	Aanpak	23
A.2	Verhaal van de kering voor geotechnische stabiliteit	25
A.2.1	Hydraulische belasting	25
A.2.1.1.	Ontwikkelingen tot 2050	25
A.2.1.2.	Effect systeemmaatregelen	26
A.2.2	Belastingeffect	26
A.2.2.1.	Freatische lijn	26
A.2.2.2.	Effect systeemmaatregelen	27
A.2.2.3.	Stijghoogte watervoerende zandlaag en indringingslengte	28
A.2.2.4.	Effect systeemmaatregelen	29
A.2.3	Initieel mechanisme	29
A.2.3.1.	Ontwikkelingen en onzekerheden	30
A.2.4	Vervolgmechanismen	30
A.2.5	Archetypen	31
A.3	Effect waterstandsdeling op overstromingskans voor geotechnische instabiliteit	32
A.3.1	Inleiding	32
A.3.2	Faalkans stabiliteit	32
A.3.3	Vervolgmechanismen	35
A.3.4	Beschouwing impact waterstandsverlaging op stabiliteitsopgave	35
A.4	Kwalitatief impact op veiligheids- en versterkingsopgave tot 2050	36
A.5	Conclusies	37
B	Uitkomsten OOG gesprekken	39

1 Inleiding

In het Deltaprogramma wordt de inzet van systeemmaatregelen voor het beheersen van overstromingsrisico's op lange en korte termijn onderzocht in het programma Rijnmond Drechtsteden. Als onderdeel hiervan wordt de impact van systeemmaatregelen op de (water)veiligheidsopgave tot 2050 beschouwd. De kernvraag daarbij is in hoeverre systeemmaatregelen kunnen zorgen voor een reductie in het aantal kilometers te versterken waterkeringen.

Dit rapport gaat in op het effect van waterstandsverlaging door systeemmaatregelen op de veiligheidsopgave in Rijnmond Drechtsteden tot 2050. Het werkgebied is weergegeven in Figuur 1.1. De aanpak bestaat uit:

- 1 Een overzicht van de geschatte veiligheidsopgave en een uitsplitsing naar faalmechanismen en dijktrajecten op basis van de Opgave en Ontwikkelbehoeftegesprekken (OOG) in hoofdstuk 2 en 3.
- 2 Een beschouwing van het effect van waterstandsverlaging op de overstromingskans voor de dominante faalmechanismen op basis van het verhaal van de kering in hoofdstuk 4, en het effect op het aantal te versterken kilometers dijk in hoofdstuk 4.
- 3 Een vertaling naar de impact van waterstandsverlaging op de veiligheidsopgave in relatie tot andere onzekerheden in hoofdstuk 6.

Het onderzoek betreft een kwalitatieve analyse op hoofdlijnen. Voor de analyse zijn geen nieuwe berekeningen gemaakt maar zijn generieke relaties afgeleid op basis van analyses uit bestaande onderzoeken.¹ Specifieke locaties zijn niet onderzocht.

Het rapport gaat specifiek in op het effect van waterstandsverlaging op de overstromingskans. Hoe tot deze waterstandsverlaging te komen en hoe groot deze verlaging is ligt buiten de scope van deze studie. De inventarisatie en analyse van systeemmaatregelen zijn dan ook geen onderdeel van dit rapport. Ook is geen rekening gehouden met de mogelijke impact van waterstandsverlaging op de veiligheidseisen die aan trajecten en faalmechanismen² worden gesteld. Ook is niet ingegaan op de belastingstatistiek en andere belastingkarakteristieken³. Dit rapport kan niet worden gebruikt om effecten van waterstandsstijging op de veiligheidsopgave te voorspellen. Een verantwoording over de totstandkoming van dit rapport is opgenomen aan het einde van dit document.

¹ Opgave en ontwikkelbehoefte gesprekken van het HWBP, het kennisprogramma zeespiegelstijging van het Deltaprogramma en kalibratieanalyses uit het beoordelingsinstrumentarium.

² Door waterstandsverlaging nemen gevolgen en overstromingsrisico's af wat kan leiden tot andere normen op trajectniveau. Wanneer de gevolgen bij overstroming kleiner worden kan theoretisch de eis aan de overstromingskans worden gereduceerd. Daarnaast kan een verlaging impact hebben op de afleiding van eisen voor faalmechanismen vanuit de norm op trajectniveau (faalkansbegroting). Deze tweede orde effecten hebben waarschijnlijk geen significant effect op de veiligheidsopgave tot 2050 en zijn daarom niet onderzocht.

³ Systeemmaatregelen hebben effect op de waterstandstatistiek, dat wil zeggen: de piekwaterstand onder normcondities en de representatieve waterstandverlopen (in tijd). Dat betekent dat naast de waterstandsafname, ook de duur kan veranderen, wat ook een invloed heeft op de geotechnische sterkte van dijken.



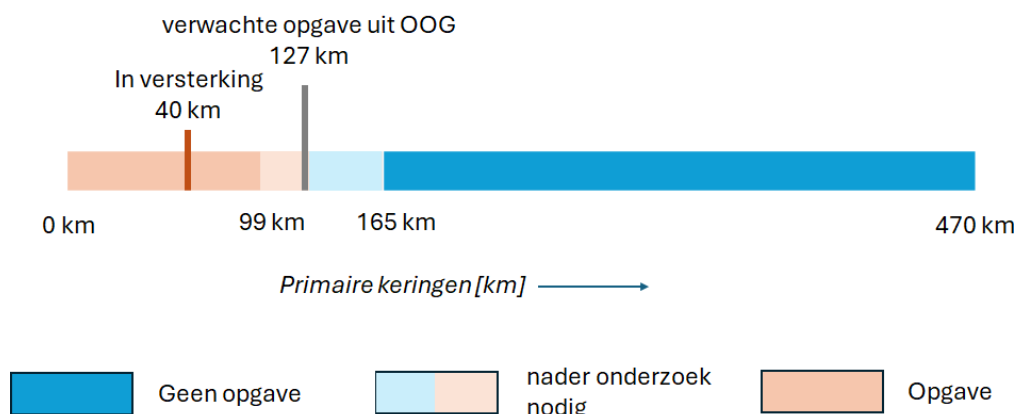
Figuur 1.1 Werkgebied Rijnmond Drechtsteden.

2 Omvang van de veiligheidsopgave tot 2050

Tot 2050 kent het gebied van Rijnmond Drechtseden een veiligheidsopgave die deels is veroorzaakt door de wijziging van de veiligheidsnorm in 2017, deels door nieuwe rekenregels (bijvoorbeeld WBI 2017), en deels doordat een deel van de keringen al voor 2017 niet voldeed aan de veiligheidseisen.

De totale lengte aan primaire waterkeringen in Rijnmond Drechtsteden is circa 470 km. In de eerste beoordelingsronde (LBO1) is 240 km aan dijken gerapporteerd die niet aan de veiligheidsnorm voldoen. Het geschatte aantal kilometers dijkversterking uit de Opgave en Ontwikkelbehoeftegesprekken (OOG) bedraagt 127 km⁴ met een bandbreedte van 99-165 km. Hiervan is circa 40 km al in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). Dit betekent dat er circa 50-125 km dijkversterking potentieel beïnvloed kan worden door systeemmaatregelen. In Figuur 2.1 is het resultaat van de OOG voor de Rijnmond Drechtsteden weergegeven.

In de OOG-gesprekken is de verwachte veiligheidsopgave tot 2050 op basis van expertkennis geëxtrapoleerd uit de resultaten van de eerste landelijke beoordelingsronde. Daarbij is rekening gehouden met resultaten van nader onderzoek, impact van nieuwe kennis. Bij de beoordeling wordt ook rekening gehouden met klimaatverandering en bodemdaling. (HWBP, 2024).



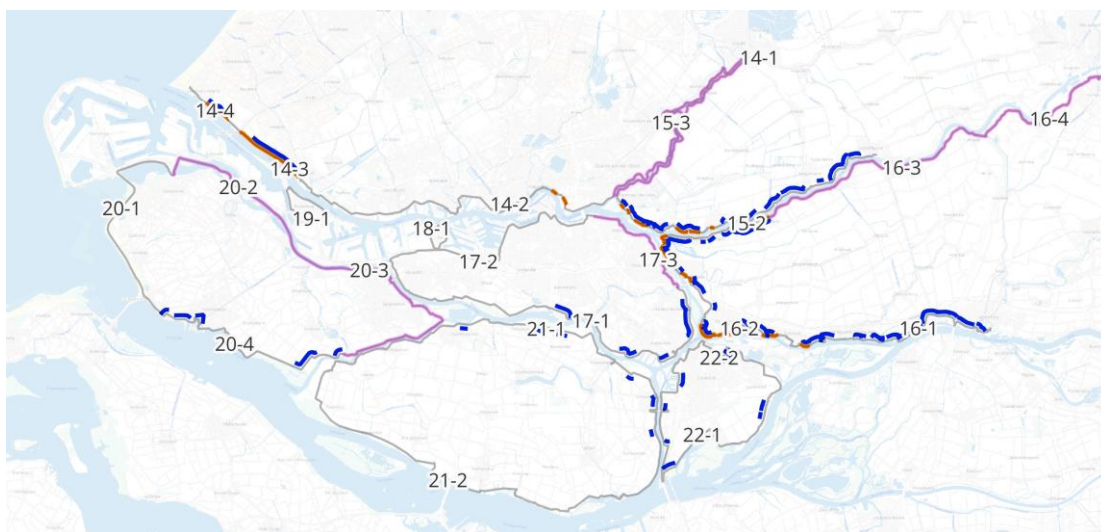
Figuur 2.1 Verwachte opgave tot 2050 [bron: (HWBP, 2024)].

⁴ Nadrukkelijk wordt opgemerkt dat het hier een verwachte opgave betreft die volgt uit gesprekken tussen inhoudelijk experts van het waterschap en specialisten van Deltares, het Adviesteam Dijkontwerp en Rijkswaterstaat WVL. Omdat het verwachtingen betreft zijn de gegevens per dijktraject niet openbaar.

3 Bepalende faalmechanismen voor de opgave

In Figuur 3.1 zijn de trajecten en dijkvakken weergegeven waarvan in de eerste landelijke beoordelingsronde (LBO-1, 2023) een onvoldoende oordeel is gerapporteerd voor de faalmechanismen hoogte (faalmechanisme graserosie kruin en binnentalud - GEKB) en stabiliteit (faalmechanisme stabiliteit binnenwaarts - STBI). Hiervan is een aantal keringen reeds in versterking.

Het figuur geeft een overzicht waar de trajecten met een veiligheidsopgave liggen. Wat opvalt is dat bijna alle trajecten een stabiliteitsopgave hebben. De hoogteopgave is geconcentreerd in de trajecten waarbij de veiligheidseisen in 2017 zijn verhoogd. De stabiliteitsopgave is ontstaan door normverzwaring en wijziging van rekenmodellen.



Figuur 3.1 Overzicht van de dijkvakken waarvoor in LBO-1 (2023) een toetsoordeel IV, V of VI is gerapporteerd voor GEKB (oranje) en STBI (blauw). Dijktrajecten die momenteel bij HWBP geagendeerd of versterkt worden zijn paars gekleurd. Van dijktrajecten 18-1 (oordeel A), 19-1 (oordeel C), 20-1 (oordeel A) zijn geen toetsoordelen op vakniveau beschikbaar via het Waterveiligheidsportaal. Opgemerkt wordt dat OOG een genuanceerdere inschatting geeft van de veiligheidsopgave (inclusief kennisontwikkeling en autonome ontwikkelingen tot 2050). Bron: Waterveiligheidsportaal.

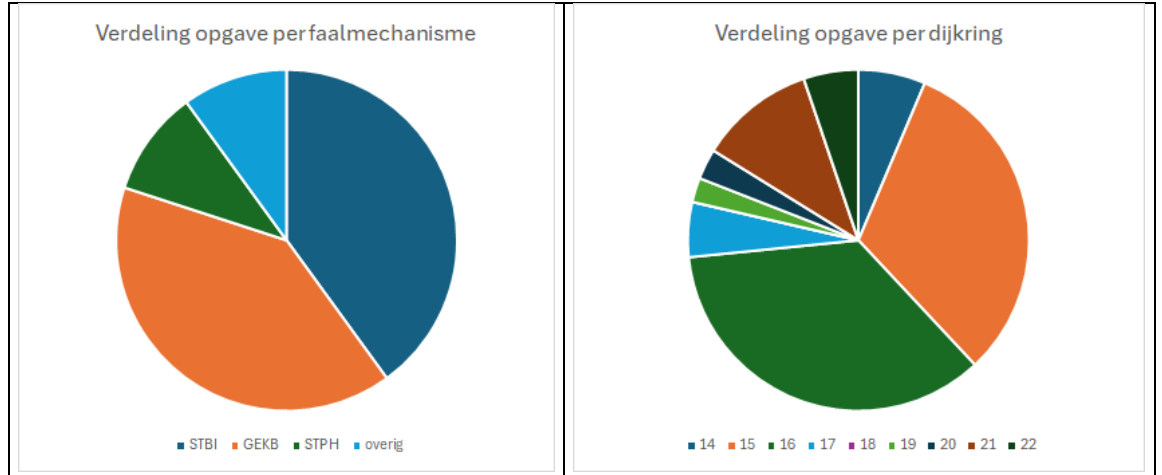
In OOG is de veiligheidsopgave tot 2050 in het gebied van Rijnmond Drechtsteden geschat op 99-165 km. Deze opgave wordt grofweg door 40% door hoogte gerelateerde faalmechanismen bepaald, circa. 40% door macrostabiliteit van het binnentalud, en 20% door overige mechanismen (piping, erosie-, stabiliteit van het buitentalud, zettingsvloeiing), zie Figuur 3.2. De opgave verschilt van traject tot traject.

Uit de Opgave en Ontwikkelgesprekken volgt dat de grootste opgave in Rijnmond Drechtsteden zich in de trajecten van de voormalige dijkkring 15 en 16 bevindt, zie Figuur 3.2. Het betreft hier zowel een opgave door hoogte –(GEKB) en stabiliteit (STBI). Een gecombineerde opgave macrostabiliteit en hoogte komt soms voor.

De opgave is ontstaan door een combinatie van normverzwaring (dijkhoogte) en nieuwe kennis van faalmechanismen (stabiliteit). In de overige trajecten van Rijnmond Drechtsteden worden tot 2050 lokaal veiligheidsopgaven verwacht. Deze zijn veroorzaakt door wijziging

van rekenregels rondom de faalmechanismen macrostabiliteit en piping. In Bijlage B wordt de opgave tot 2050 in Rijnmond Drechtsteden nader beschreven.

De keringen in dijkkring 15 en 16 betreffen vooral kleidijken. Onder extreme omstandigheden zijn een deel van deze dijken vatbaar voor opdrijven. Dat wil zeggen dat de waterspanningen in de watervoerende zandlagen door verhoging van de buitenwaterstand hoger worden dan het gewicht van de deklaag in het achterland. De keringen lopen gedeeltelijk door bebouwd gebied.



Figuur 3.2 Verdeling van de opgave in kilometers over mechanismen (links) en dijkkringen (rechts). Dijkkringen bestaan uit meerdere trajecten. Het betreft de opgave tot 2050 die nog niet in versterking is.

4 Invloed waterstandsverlaging op de opgave

Een waterstandsverlaging heeft bijna altijd een effect op een versterkingsopgave. Door een waterstandsval kunnen de dimensies van dijkversterkingen worden gereduceerd, waardoor de versterkingskosten lager worden, of valt de noodzaak tot versterking weg. In gebieden waar ruimte schaars is kan de impact op de omgeving significant zijn bijvoorbeeld als een constructieve maatregel niet meer nodig is waardoor een dijkversterking goedkoper wordt.

Echter, de kosten voor het oplossen van een faalmechanisme zijn slechts een deel van de totale kosten van dijkversterkingen.⁵ Een groot deel van de kosten van dijkversterkingen zijn gerelateerd aan zaken zoals planvorming, vergunningen, grondverwerving, het verleggen van kabels en leidingen, communicatie en participatie, en de inpassing in de omgeving. De grootste impact van een waterstandsval op de totale opgave ontstaat daarom wanneer een dijkversterking overbodig wordt.

Op basis van beoordelingsresultaten is ingeschat hoeveel de overstromingskans moet afnemen (door waterstandsverlaging) opdat een dijkversterking overbodig wordt. In de Opgave en Ontwikkelgesprekken wordt alleen een uitspraak gedaan over het aantal te versterken kilometers en geen uitspraak over de afstand tot de norm. Daarom baseren we ons voor deze inschatting op de beoordelingsresultaten van de eerste landelijke beoordelingsronde (LBO1). Hieruit blijkt dat de meeste oordelen op dijkvakniveau in categorie IV of V liggen. Dat betekent een veiligheidstekort van een factor 10 tot 100 ten opzichte van de overstromingskans, zie Figuur 4.1.

Tot 2050 zal deze veiligheidsopgave nog iets toenemen door klimaatverandering en bodemdaling. Tegelijkertijd zal door nader onderzoek en toepassen van nieuwe kennis de overstromingskans reduceren, wat naar verwachting de toename van de overstromingskans door klimaatverandering en bodemdaling compenseert⁶.

Op basis van bovenstaande, wordt geredeneerd dat een reductie van de overstromingskans met een factor 10 a 100 op de meeste locaties de veiligheidsopgave verdwijnt. Dit geldt voor zowel voor GEKB als voor STBI.

Hoofdstukken 5 en 6 beschouwen vervolgens bij welke waterstandsval deze reductie te verwachten is per faalmechanisme.

⁵ Een afname van de overstromingskans zal ook het ontwerp van dijkversterkingen kunnen verkleinen, maar omdat de kosten voor het oplossen van het faalmechanisme relatief een klein deel betreffen van een dijkversterkingsproject laten we dit in deze analyse op hoofdlijnen buiten beschouwing.

⁶ Door nader onderzoek neemt de onzekerheid over het gedrag van de kering af. Dit leidt in het algemeen tot een reductie van de overstromingskans. In sommige gevallen kan nader onderzoek echter ook leiden tot hogere overstromingskans.

Categorie	Categorie oordeel per vak per toetsspoor	Begrenzing categorie *
I _v	Voldoet ruim aan de signaleringswaarde	$P_{f,dsn} < \frac{1}{30} P_{eis,sig,dsn}$
II _v	Voldoet aan de signaleringswaarde	$\frac{1}{30} P_{eis,sig,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,sig,dsn}$
III _v	Voldoet aan de ondergrens en mogelijk aan de signaleringswaarde	$P_{eis,sig,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,ond,dsn}$
IV _v	Voldoet mogelijk aan de ondergrens en/of aan de signaleringswaarde	$P_{eis,ond,dsn} < P_{f,dsn} < P_{eis,ond}$
V _v	Voldoet niet aan de ondergrens	$P_{eis,ond} < P_{f,dsn} < 30 P_{eis,ond}$
VI _v	Voldoet ruim niet aan de ondergrens	$P_{f,dsn} > 30 P_{eis,ond}$
VII _v	Nog geen oordeel	

- * $P_{f,dsn}$ Faalkans per vak (doorsnede of kunstwerk) [1/jaar]
 $P_{eis,sig}$ Signaleringswaarde van het dijktraject [1/jaar]
 $P_{eis,ond}$ Ondergrens van het dijktraject [1/jaar]
 $P_{eis,sig,dsn}$ Faalkanseis per doorsnede of kunstwerk [1/jaar]

Figuur 4.1 Relatie oordeel per toetsspoor (faalmechanisme) en overstromingskans in LBO1.

5 Invloed van waterstandsverlaging op overstromingskans

De relatie tussen waterstandsvaling en overstromingskans verschilt per faalmechanisme en locatie en per archetype dijk. Locatie-specifieke eigenschappen kunnen ervoor zorgen dat een klein waterstandsverschil een grote impact heeft op de overstromingskans van een dijk. Bijvoorbeeld wanneer door een waterstandsvaling het voorland niet meer onder water loopt of de waterspanningen onder de dijk zodanig reduceren dat geen opdrijven meer optreedt. De kans op dergelijke knikpunten is klein wanneer de waterstandsvaling relatief beperkt is. Bij een waterstandsvaling door systeemmaatregelen (orde decimeters) zijn deze knikpunten naar verwachting alleen lokaal relevant. Aanbevolen wordt om hier voor specifieke locaties vervolgonderzoek naar te doen.

De in dit hoofdstuk gebruikte relaties gelden niet voor verhoging van de overstromingskans door waterstandsstijging.

Hoogte (GEKB)

Voor faalmechanismen gerelateerd aan de dijkhoogte bestaat de belasting uit de duur en grootte van overslagdebiet en de sterkte uit de weerstand van de grasbekleding en onderlagen tegen erosie. Waterstandsverlaging heeft een directe invloed op de belasting en daarmee de overstromingskans.

De relatie tussen buitenwaterstandsvaling en dijkhoogte is vrij direct. In deze studie veronderstellen we dat de relatie ongeveer evenredig is. Dat wil zeggen dat voor een inschatting van het effect van waterstandsvaling door systeemmaatregelen kan worden uitgegaan dat in het ontwerppunt het effect van een waterstandsvaling 1:1 doorwerkt in de overstromingskans.

Om een lokale veiligheidsopgave door GEKB op te lossen is dus een factor 10 a 100 lagere kans op waterstand nodig. Dit komt overeen met circa 1 à 2 decimeringshoogtes⁷. In het relevante gebied (oostelijke deel waar grootste opgave is) is de decimeringshoogte 30 à 40 cm.

Derhalve is een eerste grove inschatting dat met een waterstandsverlaging van 1 decimeringshoogte (ca. 30 cm) de helft van de hoogteopgave verdwijnt, en met 2 decimeringshoogte nagenoeg de volledige opgave (ca 60 cm). De impact hangt dus af van de waterstandsvaling die bereikt kan worden in dit gebied.

Stabiliteit (STBI)

Voor macrostabiliteit (STBI) is de relatie tussen waterstand en overstromingskans minder direct. Het effect van de waterstand op de overstromingskans voor STBI is afhankelijk van de dijkopbouw (zand- of kleidijk) en van de ondergrond (wel of niet opdrijven). Die eigenschappen bepalen de kans op de processen die leiden tot een overstroming door binnenwaartse macro instabiliteit, namelijk:

- Belasting-effect: waterspanningen.
- Initieel mechanisme: afschuiving binnentalud, opdrijven en overslag.

⁷ Een decimeringshoogte is het verschil in waterstand bij twee overschrijdingskansen die een factor 10 verschillen op basis van de waterstandsstatistiek. Bijvoorbeeld het verschil tussen de waterstand met een overschrijdingskans van 1/1.000 per jaar en 1/10.000 per jaar.

- Vervolgmechanismen: erosie en bresvorming.

Met belasting-effect wordt bedoeld de invloed van de waterstand op de waterspanningen in het dijklichaam en de stijghoogte in het watervoerende pakket. De waterspanningen hebben invloed op de schuifsterkte langs het glijvlak en bepalen daarmee de kans op een binnenwaartse afschuiving.

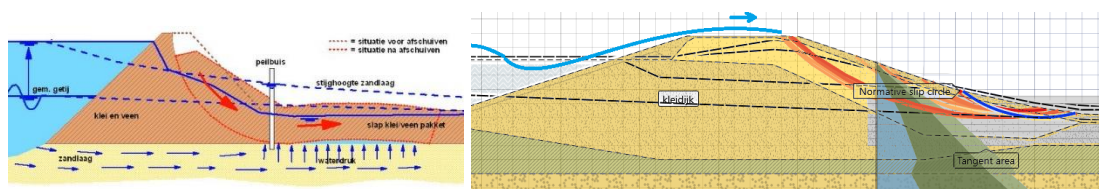
Het belastingeffect is afhankelijk van het waterstandsverloop (gedomineerd door kortdurende storm of langer durende afvoer) en verschilt per archetypische dijk: kleidijk of zanddijk en ondergrond: doorlatend of ondoorlatend. Hoe langer de duur van een verhoogde waterstand hoe groter het belasting effect. Het belastingeffect is het grootst bij een zanddijk op ondoorlatende ondergrond, en het kleinst bij een kleidijk op kleiondergrond.

Dijken waarbij het kernmateriaal zand is of ander doorlatend materiaal (gedraineerd gedrag) zijn daarnaast gevoeliger voor een toename van waterspanningen dan dijken waarbij de kern bestaat uit ondoorlatend materiaal (klei, ongedraineerd gedrag). In de huidige nationale modelleringsaanpak (ongedraineerd rekenen, WBI instrumentarium) neemt de schuifsterkte van ondoorlatend materiaal (klei) maar beperkt af bij hogere waterspanningen.

Een taludafschuiving wordt over het algemeen getriggerd door verhoogde waterspanningen en daardoor lagere schuifsterkte. De kans op een afschuiving wordt echter gedomineerd door de onzekerheid in de geotechnische parameters zoals de ongedraineerde sterkte van klei. In het licht van deze onzekerheden is de impact van een verandering van de waterstand op de overstromingskans daardoor relatief klein. In specifieke gevallen met weinig onzekerheid in geotechnische dijksterkte kan waterstandsverandering wel bepalend zijn.

Voor deze analyse is de relatie tussen waterstand en afschuiven (een zogenaamde fragility curve) kwalitatief afgeleid uit probabilistische berekeningen voor de kalibratie van het semi probabilistische rekenvoorschrift uit WBI2017 (Kanning, Teixeira, Van der Krogt, & Rippi, 2017) en van fragility curves uit meerdere referentieprojecten. Hieruit volgt dat zonder overslag en zonder opdrijven afhankelijkheid tussen waterstand en de kans op macro-instabiliteit beperkt is.

Overslag en opdrijven (illustratief weergegeven in Figuur 5.1) zijn twee specifieke situaties waarbij de stabiliteit (en daarmee de overstromingskans) sterker wordt beïnvloed door de waterstand. Bij opdrijven van de (ondoorlatende) deklaag is het gewicht van de deklaag niet voldoende om de druk van het water uit de zandlaag te weerstaan. Dit vermindert de stabiliteit. Bij golfoverslag kan water ook via de kruin en het binnentalud infiltreren waardoor de waterspanningen in het dijklichaam, met name bij zanddijken toenemen en daarmee de stabiliteit af. Zonder overslag is de kans bovendien klein dat vervolgmechanismen na een eerste afschuiving leiden tot een doorbraak en overstroming.



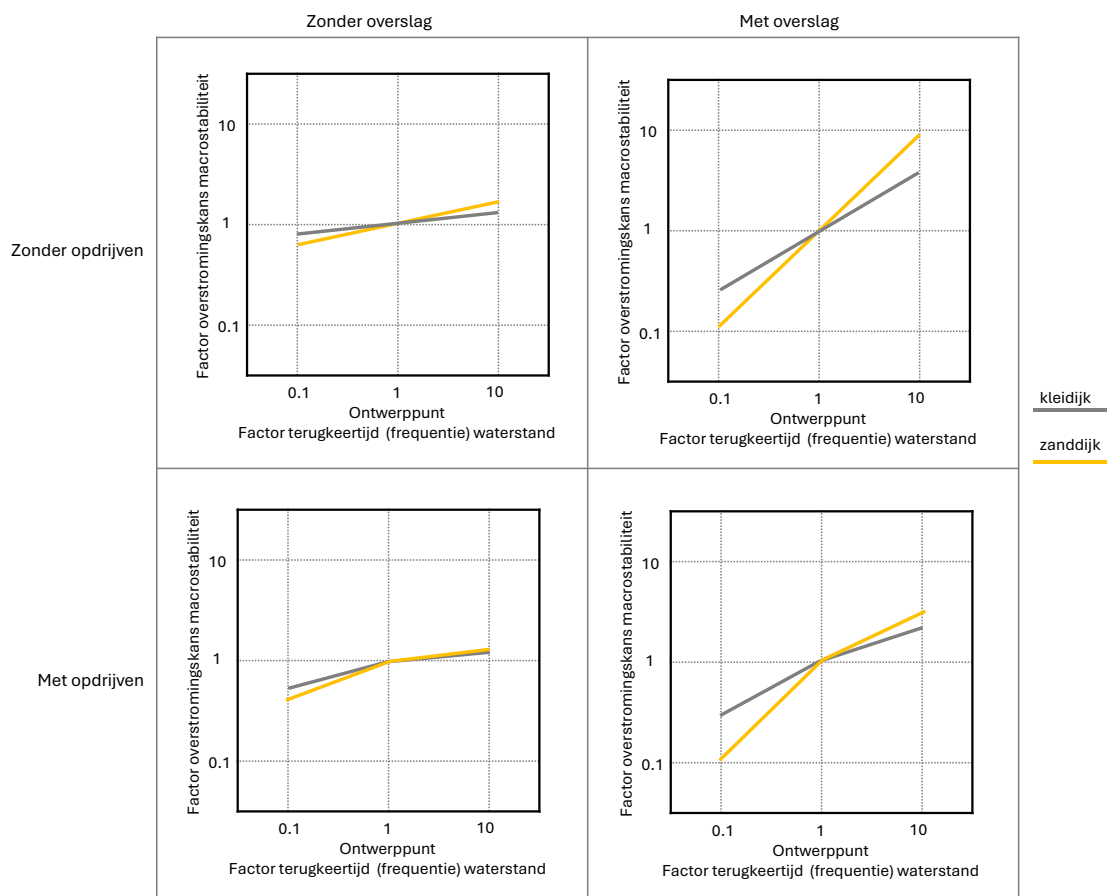
Figuur 5.1 Mechanismen opdrijven en stabiliteit door infiltratie bij golfoverslag.

Op basis van het verhaal van de kering (Bijlage A.2) en de onderzochte fragility curves (Bijlage A.3), is impact van waterstandsverlaging op binnenwaartse macrostabiliteit is kwalitatief uitgewerkt. De resultaten zijn samengevat in Tabel 5.1 en visueel in Figuur 5.2. Kwalitatief is voor een klei en zanddijk de relatie tussen de overstromingskans geotechnische

stabiliteit in kaart gebracht in gevallen met/zonder opdrijven, en met/zonder overslag. Het is hierin vooral van belang of de situatie opdrijven of overslag bepalend voor de overstromingskans.

Tabel 5.1 *Inschatting van het effect van een waterstand met een factor 10 lagere overschrijdingskans op de overstromingskans STBI.*

Archetype	Overslag	Opdrijven	Invloed waterstand op stabiliteit	Kans vervolgmechanismen na afschuiving	Effect van een waterstand met een factor 10 lagere overschrijdingskans op de overstromingskans STBI
A. Klei/zand	Zonder	Zonder	Nauwelijks	Nauwelijks	Geen
B. Klei/zand	Zonder	Met	Klein	Nauwelijks	Nauwelijks, factor 1-2
C. Klei	Met	Zonder	Klein	Klein	Nauwelijks, factor 1-2
D. Klei	Met	Met	Middel	Klein	Klein, factor 2-5
E. Zand	Met	Zonder	Middel	Groot	Middel, factor 5
F. Zand	Met	Met	Groot	Groot	Groot, factor 10



Figuur 5.2 *Schematische weergave invloed van waterstandsverlaging op de overstromingskans voor geotechnische instabiliteit voor verschillende archetypen. De figuren zijn gebaseerd op kwalitatieve inschattingen met faalpaden gecombineerd met kennis uit fragility curves van meerdere referentieprojecten.*

Op basis van de relaties in Figuur 5.2 wordt geconcludeerd dat bij dijken zonder overslag en zonder opdrijven het effect van een of twee decimeringshoogtes lagere waterstand het effect op de overstromingskans te klein is om het volledige veiligheidstekort op te lossen en de

dijkversterking overbodig te maken. Bijvoorbeeld: het effect van één decimeringshoogte verschil (factor 10 t.o.v. ontwerppunt) resulteert in verschil faalkans met factor 2 a 3; hetgeen geen significant effect heeft op een lokale dijkversterkingsopgave (zie Hoofdstuk 4). Alleen in situaties waarin de overstromingskans gedomineerd wordt door stabiliteit bij golfoverslag of opdrijven kan een waterstandsverlaging in de orde van 1 tot 4 decimeringshoogtes de overstromingskans met een factor 10 á 100 doen afnemen.

In het gebied komen deze situaties weinig voor, gebaseerd op de inschatting dat dat a) er maar een beperkte gecombineerde opgave is voor hoogte en stabiliteit, waardoor overslag met stabiliteit geen issue is, en b) dat opbarsten alleen lokaal maatgevend is. Het effect van een waterstandsval door systeemmaatregelen werkt dus veel minder door in de overstromingskans voor macrostabiliteit, waardoor er weinig impact te verwachten is veiligheidsopgave door STBI.

STPH (piping)

Lokaal is in het gebied van Rijnmond Drechtsteden sprake van een veiligheidsopgave door piping. Het faalmechanisme piping wordt veroorzaakt door verhoogde waterspanningen in de watervoerende zandlaag aan de binnenzijde van de kering. De mate waarin waterspanningen toenemen is vooral afhankelijk van de eigenschappen (doorlatendheid en dikte) van de zandlaag en de aanwezigheid van voorland.

De impact van waterstandsval door systeemmaatregelen op piping is niet nader onderzocht. De opgave door piping is relatief klein in Rijnmond Drechtsteden. Door toepassen van geavanceerde analyses met de laatste inzichten is een groot deel van de opgave uit de eerste landelijke beoordelingsronde verdwenen (HWBP, 2024). De reductie van de pipingopgave door systeemmaatregelen is daardoor beperkt en valt naar verwachting binnen de totale onzekerheidsband van de opgave.

6 Synthese

De veiligheidsopgave op basis van OOG tot 2050 in Rijnmond Drechtsteden is geschat op 99-165 km, waarvan 40 km al in versterking is. De opgave wordt vooral bepaald door de hoogte-gerelateerde faalmechanismen (GEKB, 40%) en macrostabiliteit (STBI, 40%). Het veiligheidstekort voor hoogte en stabiliteit is voor de meeste keringen gemiddeld twee normklassen, wat overeenkomt met een factor 10 á 100 op de overstromingskans.

Hoogte

De opgave voor hoogte (GEKB) tot 2050 bevindt zich voornamelijk in het oosten van Rijnmond Drechtsteden. Het betreft vooral de dijktrajecten van dijkkring 15 en 16 waar de opgave is ontstaan door nieuwe normen en een ander instrumentarium voor de bepaling van hydraulische belastingen.

Tot 2050 zal de opgave iets toenemen door klimaatverandering en bodemdaling. Door nader onderzoek en toepassen van nieuwe kennis reduceert de overstromingskans. Dit compenseert naar verwachting op de meeste locaties de toename van de overstromingskans door klimaatverandering en bodemdaling tot 2050.

Voor hoogte-gerelateerde faalmechanismen kan grofweg worden uitgegaan van een 1:1 doorwerking van waterstands­daling in de overstromingskans. Uitgaande van een veiligheidstekort van orde 10 á 100 voor de meeste keringen, is de inschatting dat met een waterstands­verlaging van 1 decimerings­hoogte (ca. 30 cm) de helft van de hoogteopgave verdwijnt, en met 2 decimerings­hoogte nagenoeg de volledige opgave (ca 60 cm). Voor hoogte kan derhalve een significante reductie in opgave worden bereikt als 1 á 2 decimerings­hoogte aan waterstands­verlaging kan worden gerealiseerd.

Macrostabiliteit

De veiligheidsopgave tot 2050 door binnenwaartse macrostabiliteit (STBI) bevindt zich eveneens in de dijktrajecten van de voormalige dijk­ringen 15 en 16. Dit betreffen voornamelijk (klei)dijken waar onder normcondities geen overslag optreedt maar soms wel sprake is van opdrijven. Dit betreft keringen waarvan de overstromingskans en daarmee de stabiliteitsopgave niet significant wordt gereduceerd door een (beperkte) waterstands­daling door systeem­maatregelen, omdat het effect van enkele decimeters waterstands­daling door systeem­maatregelen veel minder doorwerkt in de overstromingskans voor macrostabiliteit dan voor hoogte. Desalniettemin kan een waterstands­verlaging in specifieke lokale situaties een positief effect hebben op de omvang en impact van dijk­versterkingsopgaven, qua kosten en ruimtebeslag.

Conclusie

Op basis van dit onderzoek concluderen we dat de overstromingskans bij een waterstands­verlaging door maatregelen in het watersysteem kleiner wordt. De impact op het aantal voor 2050 te versterken kilometers waterkering is echter beperkt. Vooral voor hoogte kan een reductie in de het aantal kilometers te versterken dijk worden bereikt als 30-60 cm aan waterstands­verlaging kan worden gerealiseerd. Voor stabiliteit wordt geen significante reductie van het aantal kilometers dijk­versterking verwacht.

De waterstands­daling kan wel leiden tot kleinere dimensies van dijk­versterkingen. Kleinere dimensies van de versterking door waterstands­daling kunnen een significant effect hebben voor locaties waar een dijk­versterking een grote impact heeft op de omgeving. Met impact

wordt het ruimtebeslag, de benodigde kosten en de maatschappelijke consequenties bedoeld. Mogelijk kunnen ingrijpende maatregelen worden uitgesteld.

Een voorbeeld betreft de Voorstraat in Dordrecht, waar de huidige kering op dit moment net aan de norm voldoet maar vóór 2050 een opgave wordt verwacht. Een beperkte verlaging van de waterstand kan hier potentiële toekomstige versterkingsmaatregelen als gevolg van zeespiegelstijging voorkomen of uitstellen. De impact hiervan op de omgeving is aanzienlijk. Aanbevolen wordt om de inzet van maatregelen in het watersysteem voor dit soort kansrijke hotspots nader te onderzoeken als onderdeel van de trajectaanpak (Unie van Waterschappen, 2023).

Tot slot

De analyse gaat uit van het vigerende nationale beleid. Hierin zijn maximaal toelaatbare overstromingskansen van dijktrajecten in de Wet vastgelegd. Van systeemmaatregelen wordt vooral het effect op representatieve waterstanden beschouwd. Het beleid is gericht op de middellange termijn. De impact van systeemmaatregelen wordt naar verwachting groter als er op grotere tijdschalen, en integraal wordt gekeken naar overstromingsrisico's waarbij ook de gunstige effecten van waterstandsverlaging op het doorbraakproces en de overstromingsgevolgen bij een dijkdoorbraak worden meegenomen.

Maatregelen in het watersysteem hebben invloed op zowel de waterstand als de duur van een hogere waterstand. Deze hebben effect op zowel het doorbraakproces als het overstromingspatroon, en de daarmee de gevolgen van overstroming (schade en slachtoffers). Het verdient aanbeveling om de houdbaarheid van de conclusies op langere termijn te toetsen en daarbij het overstromingsrisico van het gebied centraal te stellen en de belasting, sterkte en gevolgen integraal te beschouwen.

Kortom, systeemmaatregelen die leiden tot waterstandsvaling hebben tot 2050 een gering effect op het aantal kilometers te versterken dijken, maar kunnen in specifieke gevallen wel de impact van dijkversterkingen verkleinen.

Daarom adviseren we om nader te onderzoeken of het op lange termijn loont om nu al systeemmaatregelen in te plannen (en beleidsmatig in te boeken) die ervoor zorgen dat dijkversterkingen minder ingrijpend zijn voor de maatschappij en de omgeving. Zeker bij complexe dijktrajecten in dicht stedelijk gebied (zoals de Voorstaat in Dordrecht) lijkt het zinvol om het totale systeem te beschouwen.

Verantwoording

Deze rapport betreft een kwalitatieve analyse op basis van de opgestelde aanpak en beschikbare informatie op gebiedsniveau.

Een eerste versie van de notitie is besproken in een specialistengesprek bij het Hoogheemraadschap van Delfland op 3 juli 2025. Daarbij is ingegaan op:

- **De aanpak.** Geconcludeerd is dat de aanpak past bij de vraag. Gebruik van de resultaten uit de Opgave en Ontwikkelbehoeftegesprekken is passend waarbij wordt opgemerkt dat deze een verwachte opgave weergeven. De impact op de veiligheidsopgave voor macrostabiliteit is kwalitatief onderbouwd. Door de verschillende specialisten zijn aanbevelingen gedaan om de navolgbaarheid van de redenering te verbeteren. Het toevoegen van referenties helpt daarbij.
- **De resultaten.** In het gesprek is ingegaan op verschillende deelaspecten van de analyse. In het algemeen zijn de resultaten in lijn met het beeld van de specialisten en voldoende om conclusies over de impact van systeemmaatregelen op de veiligheidsopgave tot 2050 te onderbouwen. Op enkele onderdelen wordt aanbevolen om de resultaten nauwkeuriger te formuleren.
- **De conclusies.** In het specialistengesprek zijn geen uitspraken gedaan over de betekenis van de resultaten voor Rijnmond Drechtsteden. De voorliggende analyse vormt een van de bouwstenen op basis waarvan conclusies kunnen worden getrokken over de doeltreffendheid van systeemmaatregelen voor integrale strategieën voor waterveiligheid in deze regio op de korte en lange termijn.

De resultaten van het specialistengesprek zijn verwerkt in een tweede versie van de notitie die is voorgelegd (ter sparren) aan ENW op 5 september 2025. Het ENW benoemt de volgende aandachtspunten:

- De analyses zijn gebaseerd op opgaven die met de huidige instrumenten bepaald. De instrumenten gaan uit van een geschematiseerde werkelijkheid. Wanneer het werkelijke gedrag van de kering wordt meegenomen kan een beter beeld worden gekregen. Voorbeelden zijn de impact van een weg op de overstromingskans van een dijk en de relatie tussen waterspanningen en hoogwaterduur.
- Kijk integraal vanuit het systeem en beperk systeemmaatregelen niet alleen tot maatregelen in het watersysteem. Ga uit van risico's, neem het bezwijkgedrag van de keringen en gevolgen mee. Ontwerp oplossingen van keringen kunnen ook als systeemmaatregelen worden opgevat.
- Beschouw ook de lokale impact van systeemmaatregelen. Het is nu globale analyse. Hotspots kunnen een effect hebben die belangrijker is dan een gemiddeld beeld. Aanbevolen wordt de analyse met steekproeven van casussen te onderbouwen.
- Er zijn al eerdere vergelijkbare studies gedaan, neem deze ook op.

De opmerkingen van het ENW zijn verwerkt in deze notitie. Het rapport heeft daarnaast een interne reviewprocedure doorlopen. Tevens zijn in deze versie 2 de opmerkingen van de opdrachtgever verwerkt.

Referenties

- Broman, C. (2023). *Probabilistic assessment of inner slope stability in dikes. Gaining insight in the difference between the semi-probabilistic and probabilistic estimates of the reliability index for inner slope stability with overtopping*. M.Sc. Thesis. Delft University of Technology. .
- HWBP. (2024). *Opgave- en ontwikkelbehoeftegesprekken. Eindrapport deel 1*. 6 november 2024.
- Kanning, W., Teixeira, A., Van der Krogt, M., & Rippi, K. (2017). *Derivation of the semi-probabilistic safety assessment rule for inner slope stability. Calibration STBI 2016*. Deltares rapport 1230086-009-GEO-0030.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2021). *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit WBI 2017*. versie 4.0.
- Rijkswaterstaat. (2023). *Handleiding Overstromingskansanalyse. Deel 1 Geotechnische instabiliteit*.
- TAW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, ISBN-90-369-5565-3.
- Unie van Waterschappen. (2023). *Handreiking Trajectaanpak. Strategische keuzes bij de aanpak van een waterveiligheidsopgave aan een dijktraject*. Versie II, december 2023.
- Wopereis, L., Teng, D., Van Bergeijk, V., Van der Krogt, M., & Van, M. (2024). *Tipping points for levee reinforcement under Sea Level Rise*. Sito IS MS2 11210269-004.

A Impact systeemmaatregelen op binnenwaartse macrostabiliteit

A.1 Introductie

Deze bijlage beschrijft de achtergrond van de gevolgde analyse voor het inschatten van de impact van waterstandsverlaging op de veiligheidsopgave voor binnenwaartse stabiliteit. Voor hoogte is een eenvoudiger inschatting gemaakt en enkel in de hoofdtekst toegelicht.

A.1.1 Inleiding

Deze bijlage gaat in op het effect van een waterstandsverlaging door een systeemmaatregel op de reductie van veiligheidsopgave en het aantal km te versterken dijken voor macrostabiliteit van het binnentalud in het gebied Rijnmond Drechtsteden. Hoewel een waterstandsverlaging over het algemeen een minder lage belasting op (grond)dijken is, betekent dit niet dat de overstromingskans er significant door afneemt, namelijk:

- de kans op macrostabiliteit wordt niet direct bepaald door de buitenwaterstand, maar vooral door het effect van de belasting in termen van waterspanningen in en onder de dijk (respectievelijk freatische lijn en stijghoogte). Afhankelijk van de omstandigheden wordt deze meer of minder beïnvloed door de buitenwaterstand.
- Een systeemmaatregel heeft niet alleen effect op de waterstand maar ook op duur en waterstandsstatistiek omdat het gebied een overgangsgebied is tussen benedenrivieren en de Noordzee. Een korte duur hogere waterstand heeft in sommige gevallen een minder groot effect op de macrostabiliteit dan een lange duur lagere waterstand.
- Voor dijken met een kleikern geldt dat neerslag een belangrijke parameter is die de waterspanningen bepaalt, onafhankelijk van systeemmaatregelen.
- De overstromingskans door macrostabiliteit wordt ook door onzekerheden rondom bodemopbouw, geotechnische sterkteparameters en waterstandverloop bepaald. Deze onzekerheid is groot. Wanneer een waterstanddaling binnen de onzekerheidsmarge valt (in termen van effect op de overstromingskans), is de impact op de veiligheidsopgave beperkt.

De veiligheidsopgave zal in de toekomst veranderen onder invloed van klimaat (zeespiegelstijging, veranderingen rivierafvoer, neerslag), verouderingsprocessen en bodemdaling. De overstromingskans door macrostabiliteit kunnen we in de toekomst steeds beter inschatten doordat informatie over de keringen en kennis van faalmechanismen toeneemt.

A.1.2 Aanpak

De overstromingskans door een binnenwaartse macrostabiliteit is afhankelijk van de belasting en sterkte van de kering. De belasting bestaat uit waterspanningen in en onder de kering. Deze kunnen hoger worden door neerslag of wanneer de buitenwaterstand hoger wordt. De mate waarin waterspanningen toenemen hangt af van de eigenschappen van belasting (onder andere waterstandsverloop, wel of niet opdrijven) en kering (onder andere bodemopbouw, dijk materiaal, voorland).

Met systeemmaatregelen kan de hydraulische belasting worden verlaagd, door waterstandsverlaging in het riviersysteem. De impact van systeemmaatregelen op het aantal te versterken kilometers voor macrostabiliteit wordt met een bureaustudie verkend. De bureaustudie bestaat uit:

- A. Een beschrijving van het verhaal van de kering. Hierin wordt vanuit fysica en onzekerheden aangegeven welke kenmerken van belasting en sterkte relevant zijn voor

de vraag. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de bestaande literatuur en onderzoeken uit Kennis voor Keringen. Vanuit het verhaal worden archetypen afgeleid van keringen die verschillend reageren op systeemmaatregelen.

- B. Het effect van de buitenwaterstand op de geotechnische stabiliteit is voor verschillende doeleinden in beeld gebracht. Op basis van een beknopt literatuuronderzoek wordt een overzicht gegeven van de verschillende gehanteerde methoden en conclusies.
- C. Een overzicht op hoofdlijnen van de veiligheidsopgave volgens LBO1, VNK2 en OOG wordt gegeven. Daarbij wordt, waar mogelijk op basis van de binnen de scope van dit onderzoek beschikbare gegevens, de veiligheidsopgave gerelateerd aan de archetypen uit onderdeel A.
- D. Op basis van onderdeel A. en B. wordt aangegeven wat het effect is van waterstands­daling op de veiligheidsopgave en het aantal te versterken kilometers voor geotechnische instabiliteit. De analyse vindt plaats voor een waterstands­daling van waterstanden met kleine terugkeertijden (één of twee decimerings­hoogtes) die redelijkerwijs door systeem­maatregelen kan worden gerealiseerd. De impact van systeem­maatregelen wordt beschouwd in het licht van de andere on­zekerheden die in onderdeel A. zijn beschreven.

Deze bijlage gaat achtereenvolgens op bovenstaande onderwerpen in aan de hand van het verhaal van de kering: de fysische processen die plaatsvinden en leiden tot falen (overstroming).

Gebruikte Definities

Overstromingskans: De faalkans van de waterkering (overstromingskans, >20 cm waterhoogte in een postcodegebied) op het niveau van een dijkvak of dijktraject. De kans is bij benadering de som van de faalkansen van alle faalpaden. De kans wordt uitgedrukt als een jaarlijkse waarschijnlijkheid (bijvoorbeeld 1/10.000 per jaar).

(Water)veiligheidsopgave: Het verschil tussen de overstromingskans en de overstromingskansnorm. De veiligheidsopgave heeft veelal een betrekking op een bepaald jaartal of tijdsperiode.

Versterkingsopgave: Het aantal kilometers waterkering met een veiligheidsopgave.

Faalpad: Een faalpad is een opeenvolging van gebeurtenissen, startend met een initieel mechanisme en eindigend met een overstroming.

Faalmechanisme: De verzameling faalpaden die een significante bijdrage hebben aan de overstromingskans (de dominante faalpaden).

Mechanisme: een fysische gebeurtenis welke een onderdeel is van een faalpad.

A.2 Verhaal van de kering voor geotechnische stabiliteit

Het verhaal van de kering is een beschrijving van de fysische processen die plaatsvinden en leiden tot falen. Een faalpad is een set van opeenvolgende gebeurtenissen die uiteindelijk leidt tot de ongewenste gebeurtenis (Rijkswaterstaat, 2023). In dit geval een taludafschuiving (macrostabiliteit), welke vervolgens leidt tot dijkdoorbraak en overstroming.

De gebeurtenissen zijn grofweg in te delen in een aantal categorieën: de belasting en het belasting-effect, initiële mechanismen (sterkte), en vervolgmecanismen (reststerkte). De belangrijkste aspecten en onzekerheden voor stabiliteit zijn samengevat in onderstaande tabel.

Tabel A.1 Overzicht van relevante processen en invloeden voor het faalpad van stabiliteit.

	Hydraulische belasting	Belasting-effect	Initiële faalmechanisme (afschuiving)	Vervolgmechanismen
Algemeen	Buitenwaterstand Duur Neerslag Golfoverslag	Waterspanningen: Freatische lijn Stijghoogte	Dijkgeometrie (hoogte, taludhelling) Grondsterkte (dijkmateriaal en ondergrond)	Restprofiel (restkruinhoogte) Erosiebestendigheid
Specifiek	Combinatie van zee of afvoer, Open of gesloten Stormvloedkeringen	Hydraulische weerstand (dijk en ondergrond) Neerslag	Opdrijven en/of overslag relevant	Dijkkern klei (erosiebestendig) of zand (niet erosiebestendig)

A.2.1 Hydraulische belasting

De hydraulische belasting onder normcondities wordt bepaald door een combinatie van de waterstand op zee (korte hoogwatergolf) en de rivierafvoer (lange hoogwatergolf). Daarbij wordt de invloed van de hoogwatergolf uit zee beheerst met stormvloedkeringen.

A.2.1.1. Ontwikkelingen tot 2050

Door klimaatverandering zal de hydraulische belasting in de toekomst veranderen. In 2050 wordt voor de kust een zeespiegelstijging van circa 30 cm verwacht. De onzekerheid rondom deze stijging is relatief klein. De onzekerheid neemt toe wanneer verder in de toekomst wordt gekeken.

De zeespiegelstijging zal tot hogere piekwaterstanden leiden. De mate waarin hangt af van het sluitregime van de stormvloedkeringen. Op dit moment wordt uitgegaan dat 1 op de 100 sluitingen faalt. In de toekomst zal de kering vaker sluiten en is de kansbijdrage van niet gesloten keringen groter, waardoor ook de kans op hogere piekwaterstanden zal toenemen. Verwacht wordt dat wanneer het sluitregime niet wordt aangepast (beleidsmatige beslissing) de waterstand door invloed vanuit zee tot 2050 met 10 a 20 cm zal stijgen (zeespiegelstijging komt gedempt door). Dit effect is verschillend van locatie tot locatie binnen het studiegebied. Over het algemeen in de huidige situatie hoe meer de piekwaterstanden gedomineerd worden door rivierafvoeren, hoe kleiner het effect. Regionaal verschilt dit.

Klimaatverandering beïnvloedt ook de rivierafvoer. Het effect op de amplitude (hoogste waterstand) is op de bovenrivieren beperkt tot enkele decimeters, en wordt vanwege de waterberging op het Haringvliet enigszins gedempt bij de trajecten in Rijnmond Drechtsteden. Op locaties waar de kansbijdrage van afvoer-gedomineerde situaties toeneemt door

klimaatverandering (bijvoorbeeld doordat de mogelijkheden voor spuien via het Haringvliet kleiner worden met zeespiegelstijging), leidt dit tot langere duren waarover verhoogde waterstanden voorkomen. Langere verhoogde waterstanden hebben een negatief effect op het belastingeffect en daarmee op de geotechnische faalmechanismen piping en stabiliteit. De effecten van piekwaterstand en duur op macrostabiliteit wordt beschouwd in Hoofdstuk 3. Naast klimaatontwikkelingen zijn er rondom hydraulische belastingen ook kennisontwikkelingen van belang bij het vertalen van het beeld uit de eerste landelijke beoordelingsronde naar de verwachte veiligheidsopgave in Rijnmond Drechtsteden tot 2050.

Binnen het kennisprogramma kennis voor keringen wordt onderzoek gedaan naar de invloed / relevantie van geotechnische faalmechanismen. Op relatief korte termijn zal een alternatief voor de waterstandverlooptool beschikbaar komen waarmee de representatieve duur van de belasting nauwkeuriger kan worden bepaald. Waarschijnlijk zal dit leiden tot kortere hoogwaterduur en verdwijnt de aanname van stationariteit voor golven waardoor de belastingduur daarvan ook afneemt.

In de Opgave en Ontwikkelgesprekken (OOG) (HWBP, 2024) wordt aangegeven dat kennisontwikkeling ten aanzien van de belasting de effecten door klimaatverandering tot 2050 naar verwachting zal compenseren. Dit betekent dat de huidige veiligheidsopgave tot 2050 niet significant groter zal worden door veranderende hydraulische belastingen.

- A.2.1.2. Effect systeemmaatregelen
Systeemmaatregelen hebben effect op de waterstandstatistiek, dat wil zeggen: de piekwaterstand onder normcondities en de representatieve waterstandverlopen. Dat betekent dat naast de waterstandsafname, ook de duur kan veranderen, wat ook een invloed heeft op de geotechnische sterkte van dijken. De systeemmaatregelen en specifieke effecten daarvan zijn geen onderdeel van deze notitie.

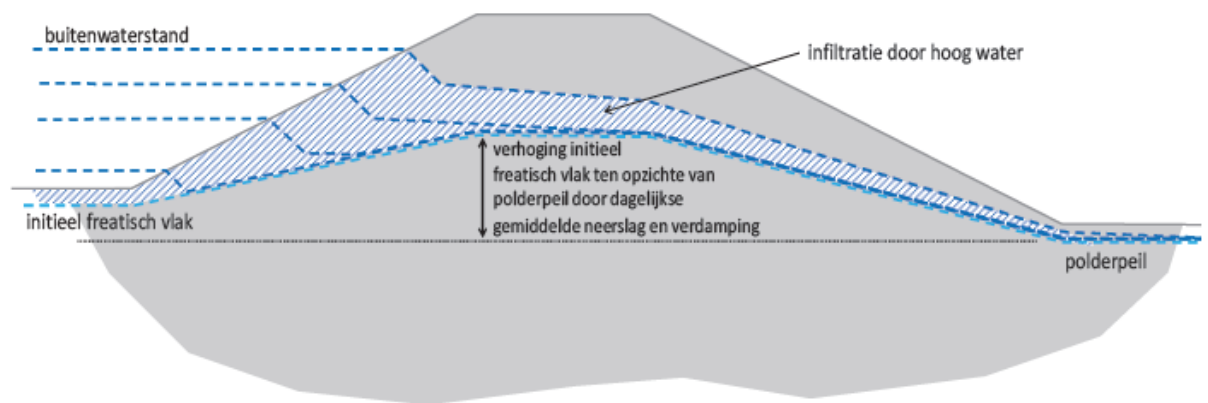
A.2.2 Belastingeffect

De belasting bij een binnenwaartse macrostabiliteit wordt veroorzaakt door waterspanningen in en onder de kering. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de freatische lijn (grondwaterstand in de dijk), de stijghoogte in de watervoerende zandlaag onder de kering en het waterspanningen verloop.

Rondom de schematiseringen van waterspanningen is veel onzekerheid. In veel analyses voor de eerste landelijke beoordelingsronde zijn voor schematisatie van waterspanningen conservatief veronderstelde uitgangspunten aangehouden ten aanzien van de belastingduur (bijv. stationaire stroming). Monitoring van waterspanningen in combinatie met grond en laboratorium onderzoek leidt in het algemeen tot een nauwkeuriger schematisatie, een scherpere analyse van de binnenwaartse macrostabiliteit en in veel gevallen significant kleinere veiligheidsopgaven (HWBP, 2024).

- A.2.2.1. Freatische lijn
De ligging van de freatische lijn is afhankelijk van:
- Neerslag en verdamping.
 - Infiltratie door buitentalud (combinatie waterstandsverloop en doorlatendheid buitentalud en kernmateriaal, verschil klei en zanddijk).
 - Infiltratie door overslag (combinatie overslagduur en doorlatendheid binnentalud en kernmateriaal, verschil klei en doorlatendheid).

De schematisatie van de freatische lijn is beschreven in Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (ENW, 2004). Het verloop van de freatische lijn in de kering is sterk onzeker. De vaak heterogene en beperkte informatie over de dijkopbouw is hiervoor een belangrijke oorzaak.



Figuur 7.7 Schematiseren van een freatisch vlak. Schematisch is aangegeven welke verhoging van het freatisch vlak ontstaat bij verschillende hoge buitenwaterstanden uitgaande van een initiële verhoging van het freatisch vlak door de dagelijkse gemiddelde neerslag (en verdamping)

Een verandering van de piekbuitenwaterstand en duur werkt door in een hogere of lagere ligging van de freatische lijn in het dijklichaam. Met name de ligging onder de binnen en buitenkruin wordt beïnvloed. Aan de binnenteen en in het achterland is het effect verwaarloosbaar. Door een hogere freatische lijn nemen de waterspanningen toe en de schuifsterkte in dit deel van het dijklichaam af.

De mate waarin de freatische lijn verandert hangt af van de duur van het hoogwater en de doorlatendheid van het dijksmateriaal. Bij stormopzet van zee is de duur over relatief korter dan bij een rivierafvoer. En bij kleidijken is de doorlatendheid lager dan bij zanddijken. Langs grote lijnen is vooral van belang of het hoogwater optreedt als gevolg van stormopzet op zee of een hoge rivierafvoer (of een combinatie daarvan), en of het een relatief doorlatende zanddijk of ondoorlatende kleidijk is.

Uit bovenstaande figuur volgt dat de verandering van de ligging van de freatische lijn beperkt is ter plaatse van representatieve glijcirkels voor macrostabiliteit. Dit kan veranderen als door golven water over de dijk stroomt. Indien golfoverslag over de kruin en het binnentalud optreedt, kan dit leiden tot extra infiltratie van water en derhalve een toename van de verzadiging. Langdurige infiltratie door overslag kan leiden tot een volledig verzadigde dijk.

A.2.2.2. Effect systeemmaatregelen

Systeemmaatregelen hebben een effect op de (kans op) piekwaterstand en overslagdebiet. Ook de vorm en duur van de hoogwatergolf een rol. Deze zorgt bepaalt hoe lang water in de dijk kan infiltreren. Een kwalitatieve inschatting van de impact van de buitenwaterstand en duur op de freatische lijn is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel A.2 Kwalitatieve inschatting van de impact van de buitenwaterstand en duur op de freatische lijn.

Invloed piek en duur buitenwaterstand op freatische lijn		Zonder overslag		Met overslag	
		Kleidijk	Zanddijk	Kleidijk	Zanddijk
Duur	Stormopzet, representatieve duur hoogwatergolf is 2 dagen	Nauwelijks	Klein	Klein	Middel
	Afvoer, representatieve duur hoogwatergolf is 28 dagen	Klein	Middel	Klein	Middel

Referentie in de tabel is de freatische lijn onder dagelijkse omstandigheden. Daarbij wordt opgemerkt dat langdurige regenval ook een factor is die freatische waterspanningen verhoogt. Geconcludeerd wordt dat een systeemmaatregel vooral een positieve impact op de freatische lijn heeft als overslag dominant is voor de freatische lijn, en de kans op overslag kleiner wordt. Dit speelt vooral bij zanddijken omdat die gevoeliger zijn voor de ligging van de freatische lijn. Voor overige situaties is er nauwelijks een effect.

Een kortere duur van de hoogwatergolf kan een gunstig effect hebben op de ligging van de freatische lijn. Een toename van de hoogwaterduur is eerder te verwachten omdat door een systeemmaatregel zoals afsluiting aan de zee de rivierafvoer belangrijker wordt in de waterstandsstatistiek. Naar verwachting is effect van systeemmaatregelen te klein voor een significant effect op de ligging van de freatische lijn en daarmee de kans op een binnenwaartse macro-instabiliteit.

A.2.2.3. Stijghoogte watervoerende zandlaag en indringingslengte

Een hogere stijghoogte in een watervoerende zandlaag heeft een negatief effect op de stabiliteit. Dit geldt alleen voor diepe afschuivingen. De stijghoogte in de watervoerende zandlaag is afhankelijk van:

- Weerstand rivierbodem.
- Weerstand voorland en achterland.
- Opdrijven.

De weerstand van rivierbodem bepaalt de mate waarin de hogere waterstand doorwerkt in de stijghoogte van watervoerende zandlagen. Als de rivier niet insteekt in een watervoerende zandlaag stijgt de stijghoogte nauwelijks. De weerstand in het voor en achterland bepaalt hoe snel in een stationaire situatie de verhoogde stijghoogte uitdempt. Bij een niet-stationaire situatie (korte hoogwatergolf) dempt de verhoogde stijghoogte sneller uit.

De stijghoogte in de watervoerende zandlaag kan niet hoger worden dan de opdrijfpotential.

Het effect van de duur van de hoogwatergolf op het waterspanningsverloop wordt uitgedrukt met de indringingslengte. Dit is de lengte waarin de stijghoogte in het holocene deklaag doordringt. Deze is afhankelijk van de bodemopbouw en de duur van de waterstand, zie onderstaande tabel uit de Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2021).

Tabel A.3 Indicatie van de indringingslengte.

Tabel 7.7 Indicatie van de indringingslengte bij verschillende ondergrondschematisaties en tijdsduur van het hoogwater (bewerking van Schoofs en Van Duinen [8])

Laaqopbouw Holocene pakket Codes van de SOS eenheden (Bijlage C) tussen haakjes	Indringingslengte [m] bij 5 dagen hoogwater	Indringingslengte [m] bij 20 dagen hoogwater
Basisveen (H_vbv_v) met Hollandveen (H_vhv_v) en/of Echteld (H_Rk_..)	1,0	2,0
Echteld organische klei (H_Rk_ko) en/of klei- en veenlagen (H_Rk_k&v) en/of kleiig veen (H_Rk_vk)	1,0	2,0
Hollandveen (H_vhv_v)	1,0	> 6,0
Echteld siltige klei (H_Rk_k) en/of klei met zandlagen (H_Ro_k&z)	> 6,0	> 6,0

Voor het Drechtsteden gebied is de duur afhankelijk van de bedreiging uit zee, een storm op zee, of een hoge rivierafvoer (of een combinatie daarvan). Bij stormopzet van zee is de duur van de hoogwatergolf korter dan bij een rivierafvoer.

A.2.2.4. Effect systeemmaatregelen

Systeemmaatregelen hebben een effect op de (kans op) piekwaterstand de vorm en duur van de hoogwatergolf een rol. Deze bepaalt de stijghoogte en met name de indringingslengte.

Een kwalitatieve inschatting van de impact van de duur op de stijghoogte in het watervoerende zandlaag is weergegeven in onderstaande tabel. Daarbij is uitgegaan van de situatie dat een rivier insnijdt in de watervoerende zandlaag en een situatie zonder opdrijven.

Tabel A.4 Kwalitatieve inschatting van de impact van de duur op de stijghoogte in het watervoerende zandlaag.

Invloed duur buitenwaterstand op stijghoogte watervoerend pakket (WVP)		Weerstand voorland (situatie zonder opdrijven*)		
		Schaardijk insnijdend WVP	Kleine weerstand voorland op WVP	Grote weerstand voorland op WVP
Duur	Stormopzet, 2 dagen	Middel	Klein	Nauwelijks
	Afvoer, 28 dagen	Groot	Middel	Klein

Als de hoogwaterduur door een systeemmaatregel wordt verkort, werkt dit positief via een lagere stijghoogte en minder indringing, maar als de hoogwater duur langer wordt werkt dit negatief via een hogere stijghoogte en meer indringing.

Een systeemmaatregel heeft vooral een positieve impact op de stijghoogte als opdrijven dominant is en hierdoor deze kans kleiner wordt. Voor overige situaties is er mogelijk nog een effect te verwachten op locaties met weinig weerstand van het voorland.

A.2.3 Initieel mechanisme

De stabiliteit van dijken wordt bepaald door de schuifsterkte die door de grond kan worden geleverd. Dijken waarbij het kernmateriaal zand is of ander doorlatend materiaal (gedraineerd gedrag) zijn gevoeliger voor een toename van waterspanningen dan dijken waarbij de kern bestaat uit ondoorlatend materiaal (klei, ongedraineerd gedrag). In de huidige nationale modelleringsaanpak (ongedraineerd rekenen, WBI instrumentarium) neemt de schuifsterkte van ondoorlatend materiaal maar beperkt af bij hogere waterspanningen. Hierdoor is er een zwakke relatie tussen een lagere buitenwaterstand en de schuifsterkte van ondoorlatende dijken. Dit geldt deels ook omgekeerd, dus bij een hogere buitenwaterstand reduceert de stabiliteit in beperkte mate.

Een duidelijke uitzondering is bij waterstanden dicht bij de kruin met overslag, waarbij het water via de kruin en binnentalud in de dijk kan infiltreren omdat de dijkbekleding (grotweg bovenste meter op kruin en binnentalud) over het algemeen een orde doorlatender is dan het kernmateriaal.

Daarnaast is van belang dat bij steile taluds vooral kleine ondiepe afschuifvlakken zullen optreden, terwijl bij hogere dijken op slappe ondergrond (klei en veen) de glijvlakken groter en dieper zijn. Dit is relevant omdat de belastingeffecten effect hebben op verschillende delen van het glijvlak. De freatische lijn heeft invloed op de schuifsterkte in het gedeelte van het glijvlak in het dijklichaam. De stijghoogte en indringingslengte zijn relevant voor de diepe ondergrond en het grensvlak met het watervoerend pakket.

Daarnaast is de grootte ook relevant voor de kans op vervolgmechanismen van het dijklichaam na een afschuiving. Op basis van Tabel A.2 en Tabel A.4 volgt dat de impact van een systeemmaatregel vooral een effect heeft op zanddijken met overslag en dijken met opdrijven.

A.2.3.1. Ontwikkelingen en onzekerheden

De conclusie dat kleidijken slechts in beperkte mate gevoelig zijn voor toename van waterspanning hangt samen met de gehanteerde modellering en schematisering, waarbij het huidige instrumentarium (met ongedraineerd rekenen) als uitgangspunt is genomen. Ook de schematisering van de freatische lijn berust vaak op (deels conservatieve) aannames of geëxtrapoleerde metingen.

Verdere kennisontwikkeling, zoals een verfijnde modellering van de schuifsterkte (bijvoorbeeld de sterkte in de initieel onverzadigde zone) en een meer complete beschrijving van het volledige faalpad (zowel de initiërende mechanismen als de onderliggende fysische processen die tot een overstroming leiden), kan leiden tot scherpere en vaak lagere inschattingen van overstromingskansen. Ook lopende KIA-onderzoeken naar onder meer het lengte-effect, veiligheidsrendement en stabiliteit bij golfoverslag dragen bij aan een verdere verfijning van oordelen over dijkveiligheid.

Daarnaast biedt een probabilistische analyse de mogelijkheid om de overstromingskans als gevolg van macrostabiliteit nauwkeuriger te bepalen. Dit type analyse is met name van waarde in situaties met meerdere grondlagen (waarbij de probabilistische benadering tot uitmiddeling leidt) of wanneer rekenwaarden aanzienlijk afwijken van de uitgangspunten die zijn gehanteerd bij de kalibratie.

Tegelijkertijd blijft gelden dat geotechnische analyses altijd gekenmerkt worden door onzekerheden, voortkomend uit beperkte beschikbaarheid van gegevens. Schematiseringonzekerheid, modelonzekerheid en kennisonzekerheid blijven daarmee een wezenlijk aandeel houden in de uiteindelijke faalkans voor stabiliteit, met name voor kleidijken die relatief ongevoeliger zijn voor toename in waterspanningen.

A.2.4 Vervolgmechanismen

Wanneer de overslag beperkt is zal een analyse van de vervolgprocessen bijdragen aan een significant kleinere overstromingskans. Bij zanddijken is na initiële afschuiving en overslag de kans op vervolgmechanismen groot. Bij kleidijken wordt bij korte duur en/of kleine overslaggebieden de kans op vervolgmechanismen klein ingeschat.

Tabel A.5 *Inschatting kans op vervolgmechanismen per archetype.*

Kans op vervolgmechanismen	Kleidend (kern)	Zanddijk (kern)
Storm gedomineerd	Klein	Zeer groot
Afvoer gedomineerd	Verwaarloosbaar	Groot

**vaak is kernmateriaal heterogeen en onzeker, de erosiebestendigheid die relevant is voor de kans op vervolgmechanismen is dan ook onzeker.*

A.2.5 Archetypen

Uit voorgaande paragrafen volgen de volgende (relevante) archetypen:

- A. Dijk zonder overslag zonder opdrijven.
- B. Dijk zonder overslag met opdrijven.
- C. Kleidend met overslag zonder opdrijven.
- D. Kleidend met overslag en opdrijven.
- E. Zanddijk met overslag zonder opdrijven.
- F. Zanddijk met overslag en opdrijven.

Op basis van kenmerken een samenvatting voor relatie buitenwaterstand – stabiliteit op basis van archetypen. Het effect verschilt van de kering en is kwalitatief weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel A.6 *Kwalitatieve relatie buitenwaterstand – stabiliteit op basis van archetypen.*

Dijktype	Overslag	Opdrijven	Invloed waterstand op stabiliteit	Kans vervolgmechanismen na afschuiving
A. Klei/zand	<i>Zonder</i>	<i>Zonder</i>	Nauwelijks	Nauwelijks
B. Klei/zand	<i>Zonder</i>	Met	Klein	Nauwelijks
C. Klei	Met	<i>Zonder</i>	Klein	Klein
D. Klei	Met	Met	Middel	Klein
E. Zand	Met	<i>Zonder</i>	Middel	Groot
F. Zand	Met	Met	Groot	Groot

**vaak is kernmateriaal heterogeen en onzeker, de weerstand tegen vervolgmechanismen is dan sterk onzeker.*

A.3 Effect waterstandsdeling op overstromingskans voor geotechnische instabiliteit

A.3.1 Inleiding

Het gehele faalpad draagt bij aan de overstromingskans voor geotechnische instabiliteit. De belangrijkste onzekerheden zijn hierin:

- Belasting: stormvloed en afvoer statistiek en sluitkans.
- Initiële mechanismen (gegeven waterstand): geotechnische onzekerheid en belastingeffect.
- vervolgmecanismen (gegeven afschuiving): overslagvolume en erosiegevoeligheid/-bestendigheid van het dijkmateriaal.

De opsplitsing tussen initiële mechanismen en vervolgmecanismen wordt gemaakt omdat deze twee effecten apart worden beschouwd in veiligheidsbeoordelingen.

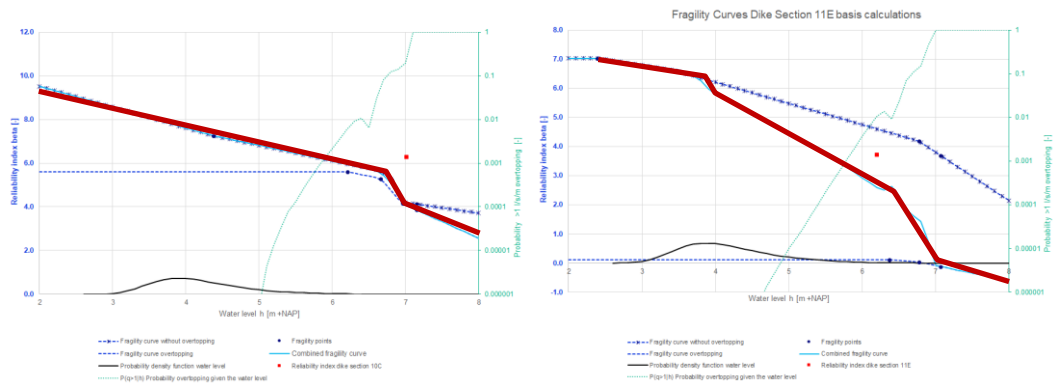
Waterstandsverlaging kan dus doorwerken in een afname van de overstromingskans via:

- 1 Een lagere faalkans voor macrostabiliteit, doordat de kansbijdrage van macro-instabiliteit bij hoge waterstanden minder wordt. Het effect is hier afhankelijk van de steilheid van de fragility curves (curve die de afhankelijkheid van de faalkans uitzet tegen de buitenwaterstand).
- 2 Een kleinere kans op vervolgmecanismen na een afschuiving doordat de kans op overslag kleiner wordt bij lagere waterstanden. Een waterstandsverlaging kan meer zekerheid geven dat de kruinhoogte na een afschuiving nog voldoende is om een doorbraak te voorkomen.

A.3.2 Faalkans stabiliteit

De onzekerheid in geotechnische sterkteparameters is het gevolg van onvolledige informatie/kennis omdat deze beperkt wordt door de hoeveelheid gegevens die praktisch gezien ingewonnen kan worden.

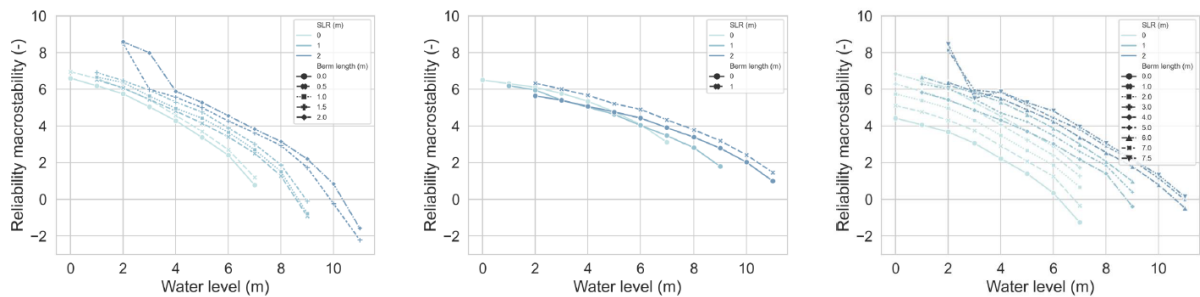
De relatie tussen faalkans voor macrostabiliteit en de buitenwaterstand wordt doorgaans weergegeven met fragility curves. Fragility curves voor stabiliteit zijn over het algemeen tamelijk vlak in vergelijking tot andere faalmechanismen. Dit komt door de grote onzekerheid in geotechnische eigenschappen ten opzichte van de gevoeligheid voor belasting-effecten bij hoge waterstanden. Voor kleidijken, en dijken op cohesieve ondergronden waarbij opdrijven/opbarsten een lage kans hebben zijn de fragility curves over het algemeen zeer vlak. Voor zanddijken, en dijken gevoelig voor opdrijven/opbarsten zijn fragility curves steiler. Voor dijken waarbij oppervlakkige glijvlakken relevant zijn zoals bij steile en hoge zanddijken is de waterafhankelijkheid groter (Kanning, Teixeira, Van der Krogt, & Rippi, 2017).



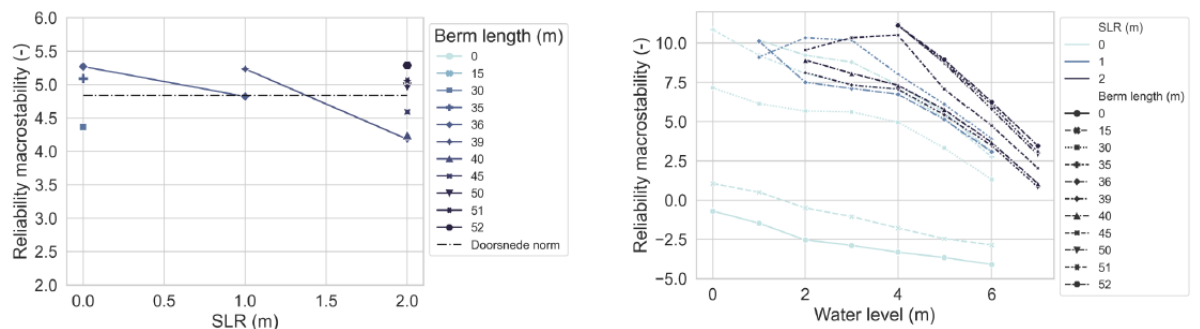
Figuur A.3 Kenmerkende fragility curve (rode lijn) waarbij infiltratie door overslag een rol speelt ligt bij de waterstand in het ontwerp punt (rode vierkantje). (bron: (Broman, 2023).

In het kader van het kennisprogramma ZSS zijn in het Deltares Sito-IS programma is verkend hoe fragility curves voor macrostabiliteit veranderen bij verschillende ZSS scenario's (Wopereis, Teng, Van Bergeijk, Van der Krogt, & Van, 2024). Hierbij werd telkens de dijk aangepast zodat deze precies voldeed aan de hoogte/overslag/erosie-eisen.

Voor een zeedijk in het Waddenzegebied (zand, geen opdrijven, geen overslag), werd per factor 10 waterstandsverlaging (50-70 cm) grofweg een stabiliteitstoename van 0.1-0.5 betrouwbaarheidsindex berekend, grofweg een faalkansafname van een factor 2-5.



Voor een rivierdijk in het benedenrivierengebied in de Lek (klei, opdrijven, geen overslag) werd bij een factor 10 waterstandsverlaging (30 cm) een toename van 0.1-0.2 (faalkansafname factor 1-2) betrouwbaarheidsindex bij geen opdrijven, en 0.1-0.8 bij wel opdrijven (faalkansafname factor 2-10).



A.3.3 Vervolgmechanismen

De fragility curves in bovenstaande paragraaf gaan over de kans op macrostabiliteit, terwijl er na een afschuiving door macrostabiliteit in veel gevallen nog een restprofiel over is dat nog een bepaald waterkerend vermogen heeft. Bij lage waterstanden is de kans op vervolgmechanismen klei doordat er bij lage waterstanden een kleinere kans op erosie en bresgroei is.

Kwalitatief geredeneerd vanuit faalpaden kun je zeggen dat een reductie van de kans op hoogwater met 10% leidt tot een 10% lagere kans op bresgroei en vervolgmechanismen. Dit gaat echter alleen op in geval de overstromingskans gedomineerd wordt door de vervolgmechanismen. Deze kans wordt nog niet altijd in de beoordelingen ingeboekt.

A.3.4 Beschouwing impact waterstandsverlaging op stabiliteitsopgave

Samenvattend kan vanuit de archetypen worden beredeneerd wat het effect van een decimeringshoogte waterstandsvaling (factor 10 lagere kans ca. 30 cm) is op de overstromingskans (initiële en vervolgmechanismen).

Zanddijken zijn gevoeliger voor de buitenwaterstand en gevoeliger voor overbelasting door een relatieve lage erosiebestendigheid bij overslag. Een verlaging van de piekwaterstand en de duur werken beide gunstig op de waterspanningen en daarmee op de kans op macrostabiliteit. Een verlaging van de piekwaterstand kan ook effect hebben de kans op vervolgmechanismen, omdat de kans op overbelasting met overslag en erosie afneemt.

- Er is vooral kans op impact bij dijken waarvan de overstromingskans nu bepaald wordt door overbelasting, dus met overslag. Archetype F -> grofweg factor 10.
- Zanddijken zonder overslag, maar met opdrijven zijn nog wel gevoelig voor de waterstand. Archetype E -> grofweg factor 5.

Kleidijken zijn minder gevoeliger voor de buitenwaterstand minder gevoelig voor overbelasting door een relatieve goede erosiebestendigheid bij golfoverslag. Daarnaast wordt de faalkans voor stabiliteit bij kleidijken op klei- of veenondergrond vooral gedomineerd door de geotechnische onzekerheid. Hierdoor heeft een waterstandsverlaging maar zeer weinig effect op de berekende faalkans voor stabiliteit.

- Enige winst van waterstandsverlaging kan verwacht worden als kleidijken gevoelig zijn voor opdrijven, of wanneer het restprofiel/restkruinhoogte kleiner is (bij overslag, of bij grote diepe glijvlakken). Archetype C en D -> grofweg factor 2-5.
- In andere gevallen wordt er voor niet veel optimalisatie verwacht ten aanzien van de faalkans. Archetype A, B -> grofweg factor 1-2.

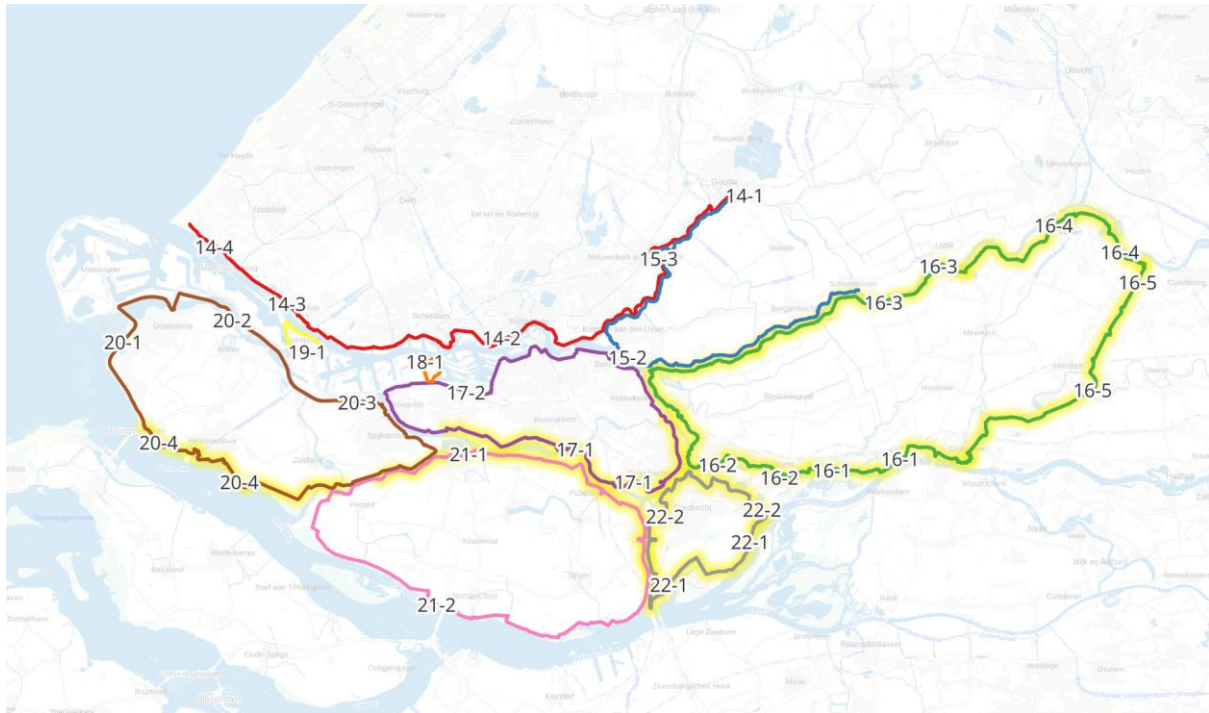
Tabel A.7 *Inschatting van het effect van een waterstand met een factor 10 lagere overschrijdingskans op de overstromingskans STBI.*

Archetype	Overslag	Opdrijven	Invloed waterstand op stabiliteit	Kans vervolgmechanismen na afschuiving	Effect waterstand met een factor 10 lagere overschrijdingskans op de overstromingskans STBI
A. Klei/zand	Zonder	Zonder	Nauwelijks	Nauwelijks	Geen
B. Klei/zand	Zonder	Met	Klein	Nauwelijks	Nauwelijks, factor 1-2
C. Klei	Met	Zonder	Klein	Klein	Nauwelijks, factor 1-2
D. Klei	Met	Met	Middel	Klein	Klein, factor 2-5
E. Zand	Met	Zonder	Middel	Groot	Middel, factor 5
F. Zand	Met	Met	Groot	Groot	Groot, factor 10

Uitgaande van de normverzwaring per 2017 in dit gebied en een lichte toename van de faalkans door degradatie-effecten, zal het veiligheidstekort (sterkte) in de orde van factor 10-100 op de faalkansnorm zijn. Dat betekent grofweg dat voor archetype F een waterstandsvaling van 1 a 2 decimeringshoogte 30-60 cm nodig is om het veiligheidstekort te compenseren, en voor archetype D en E 2 tot 4 decimeringshoogten, ca. 60-120 cm.

A.4 Kwalitatief impact op veiligheids- en versterkingsopgave tot 2050

Rijnmond Drechtsteden bevat 8 voormalige dijkringen. 2 dijkringen (14 en 15) liggen gedeeltelijk in een ander systeem. Een aantal trajecten is reeds in versterking. Tot 2050 is er nog circa 25 km aan stabiliteitsopgave (wat nog niet in versterking is); met de informatie van dit moment op trajecten 16-1 t/m 16-5, 17-1, 20-4, 21-1, 22-1 en 22-2. Deze dijktrajecten zijn geel gearceerd. Dijktrajecten 19-1, 20-3, en 20-4 zijn op dit moment gearceerd bij HWBP.



In onderstaande tabel zijn de twee archetypen weergegeven die het meest voorkomen. Systemmaatregelen hebben een significant effect op de overstromingskans van Archetype E en F.

- A) Dijk zonder overslag zonder opdrijven.
- B) Dijk zonder overslag met opdrijven.
- C) Kleidijk met overslag zonder opdrijven.
- D) Kleidijk met overslag en opdrijven.
- E) Zanddijk met overslag zonder opdrijven.
- F) Zanddijk met overslag met opdrijven.

De huidige opgave door binnenwaartse macrostabiliteit bevindt zich voornamelijk bij (klei) dijken zonder overslag met opdrijven. Lokaal speelt overslag ook een rol (archetypen B en D). Keringen waarvan de stabiliteitsopgave niet significant wordt gereduceerd door systemmaatregelen.

Tabel 6.1 Diverse archetypen.

Traject	Opmerkingen	STBI	Archetype	
			1 ^e	2 ^e
14-1	In versterking Schielandse Hoge Zeedijk (11,4 km) ook GEKB	X	-	
14-2				
14-3				
14-4				
15-2		X	B	
15-3	Een deel van het traject is in versterking KIJK (10,5 km)	X	-	
16-1		X	B	
16-2		X	B	D
16-3	Versterking SAFE: Streefkerk- Fort Everdingen (12,3 km). Betreft partiele versterking	X	B	
16-4		X	B	
16-5	Diefdijklinie, opgave is erg onzeker	X	B	
17-1		X		
17-2				
17-3	Dijktraject in versterking, Oostmolendijk-Ringdijk Ridderkerk (1,0 km)	X	-	
18-1				
19-1				
20-1				
20-2	Versterking Brielse Maasdijk (12,5 km) is in voorbereiding			
20-3	Geervliet Hekelingen (4,6 km)	X	-	
20-4		X	A	
21-1			-	
21-2		X	A?	
22-1		X	A?	C/D?
22-2		X	A?	C/D?

A.5 Conclusies

Waterstandsverlaging kan een significante impact hebben op de veiligheids- en versterkingsopgave tot 2050 bij zanddijken met overslag. Vooral waar hoogwater stormvloedgedomineerd is. Het effect van één decimeringshoogte lagere waterstand (factor 10 kleinere kans) is grofweg een factor 10 met de faalkans voor stabiliteit bij deze dijken. Om het aangenomen veiligheidstekort (ingeschat op basis van de normverzwaring in 2017) te compenseren is een waterstandsafname van 1 a 2 decimeringshoogte nodig, circa 30-60 cm. Deze situatie komt weinig voor (maximaal enkele kilometers) in het gebied van Rijnmond Drechtsteden.

Ook bij dijken waar opdrijven speelt kan waterstandsverlaging relevant zijn voor de opgave. Hier is het verwachte effect van waterstandsverlaging minder (één decimeringshoogte leidt tot een factor 2 tot 5 lagere faalkans).

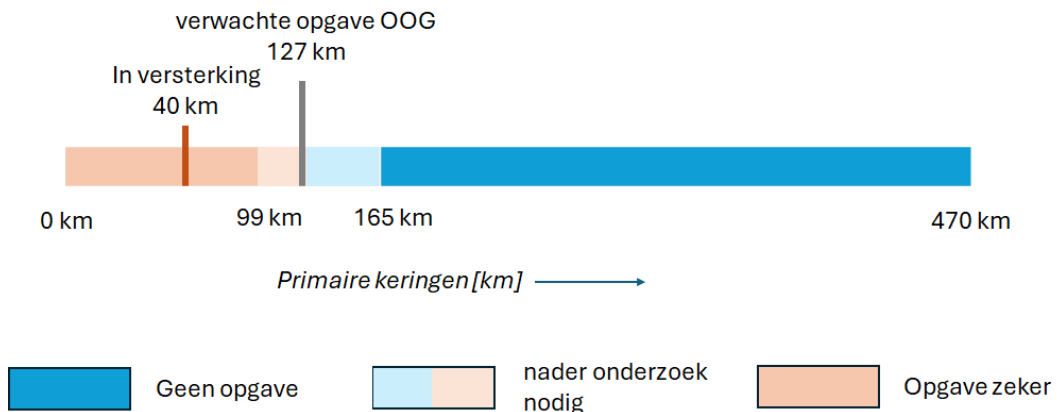
Om het veiligheidstekort significant te reduceren zodat de opgave wordt verkleind is een waterstandsverlaging van 2 tot 4 decimeringshoogten nodig, circa 60-120cm. Deze situatie komt eveneens weinig voor in het gebied van Rijnmond Drechtsteden.

In de meeste gevallen is het effect van waterstandsverlaging zeer beperkt voor de stabiliteitsopgave tot 2050 in het gebied van Rijnmond Drechtsteden. Ten eerste vanwege de beperkte invloed op het belasting-effect (de waterspanningen). Ten tweede omdat er voor ondoorlatende dijken ongedraineerd wordt gerekend, waardoor een waterspanningsverhoging tot een beperkte schuifsterkte-afname leidt, waardoor de faalkans van stabiliteit wordt gedomineerd door geotechnische onzekerheden. Door vlakke fragility curves heeft een waterstandsverlaging een beperkt effect op de faalkans/betrouwbaarheid voor macrostabiliteit.

B Uitkomsten OOG gesprekken

Opgave tot 2050

De totale lengte aan primaire waterkeringen in Rijnmond Drechtsteden is circa 470 km. In de eerste beoordelingsronde is een veiligheidsopgave van 240 km gerapporteerd. De inschatting van de verwachte opgave uit de Opgave en Ontwikkelbehoeftegesprekken (OOG) bedraagt 127 km. Hiervan is circa 40 km in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). De lengte van kering waar nader onderzoek nodig is om de veiligheidsopgave te onderbouwen is 67 kilometer. In onderstaande figuur is het resultaat van de OOG voor de Rijnmond Drechtsteden weergegeven.



Figuur B.1 Verwachte opgave tot 2050 (HWBP, 2024).

Ongeveer 75% van de opgave die nog niet in versterking is, bevindt zich in de Krimpenerwaard (voormalige dijkkring 15) en Alblasserwaard (voormalige dijkkring 16). De opgave wordt hier veroorzaakt door de normverzwaring in 2017 en nieuwe kennis rondom materiaalmodellen die de sterkte van klei beschrijven. Deze opgave wordt voor ca 40% bepaald door het faalmechanismen binnenwaartse macrostabiliteit (STBI) en voor circa 40% bepaald door graserosie van kruin en binnentalud (GEKB). Een gecombineerde opgave van STBI en GEKB komt niet vaak voor.

Lokaal zijn er opgaven door het faalmechanismen piping (STPH). In de landelijke beoordeling zijn er ook opgaven door buitenwaartse macrostabiliteit (STBU) en Graserosie van het buitentalud (GEBU). Dit betreffen in het algemeen artefacten van het instrumentarium die te maken hebben met de overgang in 2017 op een norm die uit gaat van overstromingskansen.

De opgave in de overige trajecten die nog niet in versterking zijn wordt vooral veroorzaakt door nieuwe inzichten rondom de faalmechanismen binnenwaartse macrostabiliteit en lokaal piping. Lokaal spelen ook andere faalmechanismen een rol, bijvoorbeeld Zettingsvloeiing (STVL) en stabiliteit steenzettingen. Het betreft in het algemeen trajecten waar normverandering niet tot hogere veiligheidseisen heeft geleid.

In onderstaande tabel zijn de dominante faalmechanismen per traject weergegeven. Dominante faalmechanismen zijn de faalmechanismen die de veiligheidsopgave bepalen. In bijlage B is een kwalitatieve beschrijving van de opgave per traject beschreven. Deze beschrijvingen zijn gebaseerd op de OOG.

Tabel B.1 Veiligheidsopgave Rijnmond Drechtsteden en dominante faalmechanismen.

Traject	Opmerkingen	Faalmechanismen			
		GEKB	STBI	STPH	overig
14-1	In versterking Schielandse Hoge Zeedijk (11,4 km) ook GEKB	X	X		
14-2		X		X	GEBU
14-3					STVL
14-4					STVL
15-2		X	X	X	
15-3	Een deel van het traject is in versterking KIJK (10,5 km)	X	X		
16-1		X	X	X	
16-2		X	X	X	
16-3	Versterking SAFE: Streefkerk- Fort Everdingen (12,3 km). Betreft partiele versterking	X	X		
16-4		X	X	X	
16-5	Diefdijklinie, opgave is erg onzeker		X	X	
17-1			X	X	
17-2				X	
17-3	Dijktraject in versterking, Oostmolendijk-Ringdijk Ridderkerk (1,0 km)		X		
18-1					
19-1		X			
20-1					
20-2	Versterking Brielse Maasdijk (12,5 km) is in voorbereiding	X			
20-3	Versterking Geervliet Hekelingen (4,6 km)		X		
20-4			X	X	
21-1				X	
21-2			X	X	
22-1			X		
22-2			X	X	

Per dijktraject

Dijktraject 14-1

Dijktraject 14-1 is gelegen langs de noordzijde van de getijderivier de Hollandse IJssel. Het traject loopt van de Stormvloedkering Hollandsche IJssel in het westen tot de Waaiersluis in het oosten. Het grootste deel, 16,5 km, van dit dijktraject is in beheer bij HHSK. 3,7 km is in beheer bij HHvR en 0,1 km, de Waaiersluis, is in beheer bij HDSR.

De Hollandse IJssel is een zoetwatergetijdenrivier met een gemiddelde getijdenslag van 1,5 meter bij Krimpen a/d IJssel en 1,9 meter bij Gouda. Vanwege de aanwezige stormvloedkeringen (Hollandsche IJsselkering en Maeslantkering) is de Hollandsche IJssel een complex watersysteem.

Bij een open Stormvloedkering Hollandsche IJssel worden de waterstanden bepaald door de getijdenwerking, bij een gesloten Stormvloedkering door het sluitpeil en het maaldebiet. Ook de maatgevende golfhoogtes zijn sterk afhankelijk van de open of gesloten stormvloedkering en de daarbij geldende windstatistiek. Ook de faalkans en de faalkanseis per sluitvraag van de HIJK spelen een rol in de hydraulische belastingen op de Hollandse IJssel.

De dijken langs de Hollandsche IJssel bestaan uit klei op een dik pakket van slappe lagen. Vanwege het dikke pakket slappe lagen snijdt de riviergeul niet in het Pleistocene zand, waardoor verhoogd buitenwater nauwelijks tot een respons van de potentiaal in het pleistocene zand leidt. Vrijwel de hele dijk is verder door de jaren heen binnen- of buitenwaarts versterkt met een zandberm. Op deze zandberm ligt een laag klei van minimaal 30 cm, waar latere versterkingen/ophogingen weer op verder hebben gebouwd. Verder is over de hele lengte van de dijk een zandcunet in de kruin aanwezig die als fundering voor de asfaltweg dient. Op een paar plaatsen bestaat de dijk vrijwel volledig uit zand, bijvoorbeeld vanwege een dijkverlegging of het dichten van een stroomgat in 1953.

Momenteel is een groot gedeelte (11,4 km) van het traject in versterking in het project Schielandse Hoge Zeedijk. Binnen dat project zijn GEKB en STBI de dominante faalmechanismen. Er is geen restopgave binnen het dijktraject.

Dijktraject 14-2

Dijktraject 14-2 betreft de waterkering aan de noordzijde van de Nieuwe Maas en loopt van de Stormvloedkering Hollandsche IJssel in het Oosten tot nabij het metrostation Vlaardingen Oost in het westen. Het oostelijke deel van 10,3 km is in beheer van HHSK. De overige 9,5 km is in beheer bij HHvD. De grens ligt net ten westen van de Maastunnel. Uit LBO1 volgt voor het deel in beheer bij HHvD geen veiligheidsopgave.

De Nieuwe Maas is een zoetwatergetijderivier waarvan de optredende waterstanden worden bepaald door storm op de Noordzee en het sluiten van de Maeslantkering. Het dijktraject wordt gekenmerkt door het stedelijke gebied. De dijk heeft steile taluds en op veel plaatsen een brede kruin. Het buitentalud is op plaatsen voorzien van harde bekledingen maar ook van een grasbekleding. De dijk bestaat uit klei en zand en ligt op een dik pakket slappe lagen. Op sommige locaties ligt de kruin laag ten opzichte van het buitenwater.

Er is in dijktraject 14-2 geen significante stabiliteitsopgave.

Dijktraject 14-3 en dijktraject 14-4

Traject 14-2 14-3 maakt onderdeel uit van de Delflandsedijk. De totale lengte van de Delflandsedijk is 31 kilometer en ligt tussen Hoek van Holland en de Parksluizen in Rotterdam langs de Nieuwe Waterweg en de Nieuwe Maas.

Voor dijktraject 14-3 wordt het (maatgevend) hoog water direct beïnvloed door de Maeslantkering. Het (bedoelde) effect van die stormvloedkering is dat verzwareningen van de rivierdijk de komende tijd niet nodig zijn. Dijktraject 14-2 ligt net voor de Maeslantkering tot aan de aansluiting op de duinen bij Hoek van Holland.

In de landelijke beoerelingsronde is geen veiligheidsopgave door binnenwaartse macrostabiliteit geconstateerd. Deze wordt tot 2050 niet verwacht.

Dijktraject 15-2

Dijktraject 15-2 is gelegen aan de noordzijde van de rivier de Lek en loopt van Schoonhoven in het oosten tot aan de Stormvloedkering Hollandsche IJssel bij Krimpen aan den IJssel in

het westen. De dijk bestaat voornamelijk uit klei en is gelegen op een dik pakket van slappe grondlagen.

In het recente verleden, tussen 2000 en 2016, is de dijk vrijwel over de gehele lengte versterkt, dit naar aanleiding van de afkeuring in de 1e en 2e landelijke toetsronden. Door de beperkte ruimte is de dijk op ongeveer de helft van de lengte versterkt met stabiliteitsconstructies. De overige delen zijn versterkt door binnendijkse bermten aan te leggen.

De overstromingskans wordt bepaald door STBI en GEKB. Lokaal speelt STPH een rol. Ten aanzien van STBI zijn er veel ontwikkelingen die van invloed zijn op de verwachte veiligheidsopgave tot 2050. Rekenen met de sterkte van de initieel onverzadigde zone (SIOZ) heeft veel invloed in situaties waar oppervlakkige glijcirkels gevonden worden. In situaties waar diepe glijvlakken berekend worden zullen naar verwachting probabilistische analyses tot een afname van faalkans leiden. Afhankelijk van de situatie kan dit ertoe leiden dat de veiligheidsopgave komt te vervallen. Verder valt er mogelijk winst te behalen door het opstellen van een realistischere schematisatie van de waterspanningen en dan met name onder dagelijkse omstandigheden. De in LBO1 aangehouden indringingslengte is erg groot en heeft veel impact op de berekende faalkansen.

Door maatwerkanalyses kan de opgave op STBI fors afnemen. Deze afname wordt ingeschat op 50% van de in LBO1 afgekeurde lengte met een ondergrens van 30% en een bovengrens van 70%.

Dijktraject 15-3

Dijktraject 15-3 is gelegen langs de zuidzijde van de getijderivier de Hollandse IJssel. Het traject loopt van de Stormvloedkering Hollandse IJssel in het westen tot de Waaiersluis in het oosten.

De Hollandse IJssel is een zoetwatergetijdenrivier met een gemiddelde getijdenslag van 1,5 meter bij Krimpen a/d IJssel en 1,9 meter bij Gouda. Vanwege de aanwezige stormvloedkeringen (Hollandse IJsselkering en Maeslantkering) is de Hollandse IJssel een complex watersysteem. Bij een open Stormvloedkering Hollandse IJssel worden de waterstanden bepaald door de getijdenwerking, bij een gesloten Stormvloedkering door het sluitpeil en het maalpeil. Ook de maatgevende golfhoogtes zijn sterk afhankelijk van de open of gesloten kering en de daarbij geldende windstatistiek.

De dijken langs de Hollandse IJssel bestaan uit klei op een dik pakket van slappe lagen. Vanwege het dikke pakket slappe lagen snijdt de riviergeul niet in het Pleistocene zand, waardoor verhoogd buitenwater nauwelijks tot een respons van de potentiaal in het pleistocene zand leidt.

Momenteel is een groot gedeelte (10,5 km) van het traject in versterking in het project Krachtige IJsseldijk Krimpenerwaard (KIJK). Binnen dat project zijn GEKB en STBI de dominante faalmechanismen. Er is er een restopgave binnen het dijktraject van circa 9 km waarbij STBI dominant is. Voor deze restopgave zijn de ontwikkelingen rondom STBI relevant. Rekenen met de sterkte van de initieel onverzadigde zone (SIOZ) heeft veel invloed in situaties waar oppervlakkige glijcirkels gevonden worden. In situaties waar diepe glijvlakken berekend worden, zullen naar verwachting probabilistische analyses tot een afname van faalkans leiden. Afhankelijk van de situatie kan dit ertoe leiden dat de veiligheidsopgave komt te vervallen. Bodemdaling leidt in principe niet tot een aanvullende veiligheidsopgave tenzij stabiliteit bij golfoverslag dominant wordt. Het meenemen van de

aanwezige voorlanden kan daarnaast leiden tot een afname van de veiligheidsopgave tot 2050.

Verwacht wordt dat etot 2050 er op 4,4 km een opgave op STBI blijft bestaan met een ondergrens van 2,2 km en een bovengrens van 6,6 km. Dit komt bovenop de lengte van 10,5 km die momenteel in versterking is binnen dit traject.

Dijktraject 16-1

Dijktraject 16-1 betreft de primaire waterkeringen aan de zuidzijde van de Alblasserwaard langs de Boven- en Beneden-Merwede tussen Gorinchem en Hardinxveld-Giessendam. Het dijktraject is in de jaren '90 van de vorige eeuw in verschillende dijkversterkingsprojecten versterkt. De laatste versterking betreft de afbouw van de waterkering tussen Gorinchem en Hardinxveld-Oost. Deze waterkering is in 1996 versterkt in het kader van het Deltaplan Grote Rivieren. Vanwege de slappe ondergrond zijn in het decennium daarna dermate grote zettingen opgetreden die moesten worden gecompenseerd. Deze compensatiewerkzaamheden zijn in oktober 2012 afgerond. Door de experts wordt verwacht dat daarbij de waterkering over een lengte van enkele kilometers met circa 10 tot 50 cm is verhoogd.

Traject 16-1 bevindt zich in het overgangsgebied. Dat wil zeggen dat de hydraulische belastingen zowel door de waterstand op zee als de afvoer van de Rijn worden bepaald. De hoogwatergolven hebben een lange duur component (afvoer) en korte duur component (stormvloed). In dit gebied is de lange duur component dominant voor het hoogwater. De golfbelasting is door ligging en strijklengte beperkt.

De dijken in traject 16-1 zijn over het algemeen oude kleidijken op een dik pakket slappe lagen. De dijken zijn regelmatig en degelijk versterkt. Hierbij is goede klei gebruikt en daarbij zijn de binnentaluds verflauwd. Het binnentalud heeft in de meeste gevallen een helling van circa 1:3. De keringen zijn voldoende hoog. Tegenover Werkendam is de dijk over een korte strekking buitenwaarts versterkt en opgebouwd uit zand. In Gorinchem (stadswallen) en Hardinxveld Giessendam loopt de kering door bebouwd gebied waar veel constructieve elementen in de waterkering zijn opgenomen.

De overstromingskans op het traject wordt bepaald door binnenwaartse macrostabiliteit. De stabiliteitsopgave kan worden aangescherpt. In het BOI is in 2017 overgestapt op een ander sterktemodel waarmee in eerste instantie hoge overstromingskansen zijn uitgerekend die een trendbreuk met het verleden gaven. Het toepassen van de huidige inzichten in het schuifsterktemodel zal tot een realistischer beeld leiden. Naast een conservatief sterktemodel zijn er optimalisaties mogelijk in de waterspanningen en faaldefinitie. De ontwerpen zijn gebaseerd op 13 uursmetingen met conservatieve keuzen voor extrapolatie. Verwacht wordt dat de kans op een diep glijvlak wat gedurende een hoog water leidt tot kruinverlaging met de nieuwe inzichten rondom waterstandsverloop en sterkte-eigenschappen lager wordt en wellicht verdwijnt. De opgave kan verder worden gereduceerd door herverdeling van faalkansruimte, bijvoorbeeld door uitwisseling met het faalmechanisme piping. Bij een complexe laagopbouw, met meerdere grondlagen geeft een probabilistische analyse een scherper beeld dan een semi probabilistische analyse. Mogelijk dat voor delen van het dijktraject een stabiliteitsopgave over blijft. Op basis van het huidige veiligheidsbeeld zal het zwaartepunt liggen langs het kanaal van Steenenhoek.

Dijktraject 16-2

Dijktraject 16-2 betreft de primaire waterkeringen aan de westzijde van de Alblasserwaard langs de Beneden-Merwede, Noord en Lek. De meeste waterkeringen op dijktraject 16-2 zijn voor het laatst versterkt in de jaren '90 van de vorige eeuw. Uitzondering hierop vormt

dijkversterkingsproject Kinderdijk-Schoonhovenseveer (KIS). Deze dijkversterking is uitgevoerd naar aanleiding van de resultaten van de tweede wettelijke toetsronde (2001-2006). De dijkversterking was onderdeel van HWBP-2 en heeft een totale lengte van circa 11 km. Het dijkversterkingsproject Kinderdijk-Schoonhovenseveer is eind 2018 afgerond. Traject 16-2 bevindt zich net als traject 16-1 in het overgangsgebied. Dat wil zeggen dat de hydraulische belastingen zowel door de waterstand op zee als de afvoer van de Rijn worden bepaald. De hoogwatergolven hebben een lange duur component (afvoer) en korte duur component (stormvloed). Op de westelijke delen van het dijktraject heeft de korte duur component meer invloed op het ontstaan van hoogwater. De golfbelasting is door ligging en strijklengte beperkt, met uitzondering van de kop van Papendrecht en een strekking bij Kinderdijk.

Langs de Beneden Merwede en de Noord loopt de kering door bebouwd gebied (Sliedrecht, Papendrecht, Alblasterdam) en heeft hier vaak een hoog voorland met bebouwing. Er zijn veel constructies toegepast en er is een aantal strekkingen met verholten keringen. Bij Alblasterdam ligt een schaadijk. Enkele wielen duiden op historische doorbraken. Morfologische ontwikkelingen laten zien dat de bodem van de Noord op enkele plekken uitschuurt waardoor de afsluitende deklaag op de rivierbodem doorsneden kan worden. Door deze ontwikkeling ontstaat mogelijk een dijkversterkingsopgave. De kering langs de Lek loopt door twee kernen (Nieuw Lekkerland en Streefkerk). De kanteldijk bij de tunnel onder de Noord is in beheer bij Rijkswaterstaat.

Net als in traject 16-1 bestaan de keringen in traject 16-2 uit robuuste kleidijken op een dik pakket klei en veenlagen. De enkele geulen door het Holocene pakket zijn vaak kleilig opgevuld of van beperkte dikte. Door bodemdaling is de kruin en het achterland steeds lager komen te liggen. Op sommige locaties leidt dit onder maatgevende omstandigheden tot een significant overslagdebiet. De stijghoogte in het Pleistocene zand is onder dagelijkse omstandigheden veelal hoger dan het maaiveldniveau. Op een locatie bij Papendrecht is een wel aangetroffen die ook onder dagelijkse omstandigheden water geeft.

De overstromingskansen op het traject wordt bepaald door binnenwaartse macrostabiliteit en Gras erosie van kruin en binnentalud. Rondom macrostabiliteit geldt voor traject 16-2 hetzelfde als voor 16-1. Een sterke reductie van de opgave uit LBO1 wordt verwacht door toepassing van de laatste inzichten rondom modellering van sterkte, probabilistische analyses en kennisontwikkelingen rondom tijdsafhankelijkheid. Door nauwkeuriger schematisatie van waterspanningen zullen ondiepe glijvlakken (bij kleidijken leidt een ondiepe afschuiving niet direct tot overstroming) maatgevender worden. Een hogere waterstand in de toekomst zal dit positieve effect van een scherpere schematisatie compenseren. Verwacht wordt dat de tussenvakken van KIS een opgave blijven. Het betreft hier kleidijken met steil binnentalud.

Dijktraject 16-3 en 16-4

Het dijktraject 16-3 betreft de primaire waterkeringen aan onderzijde van de Lek tussen Streefkerk en Ameide (Sluis). Een deel van deze waterkeringen is in de tweede wettelijke toetsing (2001-2006) (LRT2) als onvoldoende beoordeeld. Dit heeft ertoe geleid dat in het kader van het HWBP2 programma de dijkversterking Kinderdijk – Schoonhovenseveer is uitgevoerd. In het kader van het project Ruimte voor de Rivier zijn delen van het traject Schoonhovenseveer – Langerak versterkt.

Het dijktraject 16-4 betreft de primaire waterkeringen aan onderzijde van de Lek tussen Ameide (Sluis) en Everdingen. Een deel van deze waterkeringen is in het kader van het project Ruimte voor de Rivier versterkt in de projecten “Lekdijk Vianen” en “Hagestein – Opheusden”.

Beide trajecten zijn in versterking in het project SAFE. In het versterkingsproject is een afweging gemaakt welke kennis wordt gebruikt voor het dijkontwerp. Daarbij is gekozen voor een partiele versterking. Van de trajecten wordt 12,3 km versterkt. Na versterking blijft in beide trajecten nog een restopgave over.

Voor de trajecten 16-3 en 16-4 betreft het respectievelijk een stabiliteitopgave van 3,5 km en 2,3 km. Deze opgave heeft geen overlap met andere mechanismen.

Dijktraject 16-5, diefdijk

De Diefdijklinie is een bijzondere waterkering omdat deze qua functie en normering afwijkt van de overige primaire waterkeringen in Nederland. De Diefdijklinie is een compartimenteringskering die pas water keert nadat een bres is ontstaan in de voorliggende primaire kering; bij een doorbraak van de bandijken langs de bovenrivieren (Waal en Nederrijn) beschermt de Diefdijklinie de Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden. De norm voor dit dijktraject is pragmatisch afgeleid en uitgedrukt 'per gebeurtenis'. In de situatie waarin een hydraulische belasting optreedt, gegeven een doorbraak van de voorliggende primaire kering, mag de Diefdijklinie in één van de tien gevallen falen.

Het is moeilijk om een uitspraak te doen over de opgave tot 2050. Daarvoor zijn te veel pragmatische overwegingen in de normstelling en beoordeling gedaan. Belangrijk is het systeem goed te beschrijven en vanuit het systeem de norm goed te duiden en realistische hydraulische belastingen te bepalen. Vervolgens kan de opgave worden bepaald, rekening houdend met bodemdaling en actuele kennis.

Verwacht wordt dat de opgave uit LBO1 de bovengrens is van de werkelijke opgave. De ondergrens is geen of een zeer lokale opgave. Op basis van de beschikbare informatie kan geen nadere duiding worden gegeven.

Dijktraject 17-1

Het dijktraject betreft de kering langs de Oude Maas aan de zuidzijde van IJsselmonde Aan de Westzijde ligt de kering langs de Noord. Na de dijkversterkingen na de stormvloed van 1953 zijn de hydraulische belastingen door het de aanleg van dammen en keringen in de estuaria verlaagd. Daarna zijn in de jaren 1980 nog een aantal versterkingen uitgevoerd. Daarnaast is met de introductie van de nieuwe normering sprake van een normverlaging (terwijl recente dijkverzwaringen juist boven-normatief zijn ontworpen). De huidige representatieve waterstand bij de norm is lager dan de waterstand die in de periode tot 1970 (dus voor de sluiting van de estuaria) zijn opgetreden. De hydraulische belasting onder normcondities wordt bepaald door een combinatie van de waterstand op zee (korte hoogwatergolf) en de rivierafvoer (lange hoogwatergolf). Daarbij wordt de invloed van de hoogwatergolf uit zee beheerst met stormvloedkeringen.

Na 1953 zijn de keringen verhoogd en is het binnentalud verflauwd. De versterkingen zijn uitgevoerd met zand, veelal tussen perskaden van klei. Op het talud is een kleibelkleding aangelegd. Met slib is in de loop van de tijd het voorland op diverse plaatsen verhoogd. De ondergrond is heterogeen. Op veel plaatsen is een dikke deklaag (>4m) aanwezig die uit klei en veenlagen bestaat. Het zandpakket onder de deklaag zijn veelal Holocene getijdeplaat en geulafzettingen. Ook zijn direct onder de deklaag Pleistocene zandafzettingen aan getroffen. Op locaties zonder hoog voorland en een dikkere deklaag is het voorstelbaar dat een binnenwaartse macro-instabiliteit tot een overstroming leidt. De kans hierop hangt af van de duur van de belasting, de respons van de waterspanningen en de (sterkte) eigenschappen van het dijksmateriaal.

Voor macrostabiliteit wordt verwacht dat in de toekomst een scherpere opgave kan worden bepaald door beter inzicht in de bodemopbouw en waterspanningen. Daarnaast kan lokaal kennisontwikkeling van de sterkte van de deklaag bij opbarsten en een betere modelering van de schuifsterkte van klei in de onverzadigde zone de opgave verkleinen. Wanneer na een eerste afschuiving de overslag beperkt is zal een analyse van de vervolgprocessen bijdragen aan een significant kleinere overstromingskans.

Tenslotte kan met een probabilistische analyse de overstromingskans door macrostabiliteit scherper worden bepaald. Een probabilistische analyse heeft met name impact wanneer sprake is van meerdere grondlagen (probabilistische analyse leidt tot uitmiddeling) of wanneer de rekenwaarde sterk afwijken van de uitgangspunten die in de kalibratie zijn gehanteerd.

Dijktraject 17-2

Het dijktraject beschermt het noordwestelijk deel van IJsselmonde tegen de invloed van de Oude en de Nieuwe Maas. In het traject zijn 16 kunstwerken aanwezig.

Een groot deel van het traject ligt in het stedelijk gebied of aan de zuidzijde van het havengebied van Rotterdam. De kering heeft hier doorgaans een breed en hoog voorland met veel bebouwing of industrie. De kering zelf bestaat grotendeels uit een groene dijk met een grastalud. Op enkele locaties met weinig ruimte is in de kering een keermuur aanwezig. Het deel van het traject wat langs de Oude Maas ligt heeft een minder breed voorland. Het voorland bestaat hier voor een groot deel uit grienden. De dijken bestaan hier uit groene dijken met grastaluds.

Op dit traject zijn er geen recente dijkversterkingen uitgevoerd. De laatste versterkingen dateren uit de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw die in het kader van de Deltawet zijn uitgevoerd. Door de aanleg van stormvloedkeringen en normverlaging zijn de representatieve hydraulische belastingen daarna lager geworden. Er wordt tot 2050 geen stabiliteitsopgave verwacht.

Dijktraject 17-3

Het dijktraject beschermt het oostelijke deel van IJsselmonde tegen de invloed van de rivier de Noord. Het dijktraject is 9,4 km lang en bestaat volledig uit dijken. In het traject zijn 5 kunstwerken aanwezig.

In de eerste landelijke beoordeling van Primaire waterkeringen is geconstateerd dat de overstromingskans groter is dan de eisen die in de wet zijn vastgelegd. Het veiligheidsoordeel is bepaald op basis van de verschillende relevante faalmechanismen. Daartoe behoort de hoogte, macrostabiliteit en bekleding van de groene dijken en de sterkte, stabiliteit en betrouwbaarheid sluiting voor een kunstwerk. Binnenwaartse macrostabiliteit is het dominante faalmechanisme die bepalend is voor de overstromingskans op trajectniveau.

Het dijktraject is in versterking.

Dijktraject 18-1

Het dijktraject beschermt het dorp Pernis tegen de invloed van de Noordzee. Het dijktraject is 5 km lang en bestaat uit groene dijken. In het traject zijn twee kunstwerken aanwezig.

De Pernisse Ringdijk is aangelegd in de periode 1959 tot 1974 en bestaat uit zand met daarop een kleibedekking en gras. In de 80-er jaren is het gedeelte tussen hm 0.9 en 3.0 hergeprofileerd met klei, waardoor dat gedeelte een zeer dikke kleibekleding heeft.

Uit de beoordeling volgt dat overstromingskans veel kleiner is dan de omgevingswaarde die in de Wet is vastgelegd. Er zijn geen autonome ontwikkelingen bekend die voor 2050 tot een veiligheidsopgave leiden.

Dijktraject 19-1

Het normtraject ligt aan twee verschillende type watersystemen. Beide watersystemen zijn gescheiden door de Europoortkering. De Calanddijk en de Europadijk maken deel uit van de Europoortkering.

De noordzijde van het normtraject ligt in het benedenrivierengebied. De maatgevende omstandigheden bestaan voor dit deel uit een hoge rivierafvoer gecombineerd met een hoge zeewaterstand op de Noordzee waarbij de stormvloedkeringen (Maeslant- en Hartelkering) in de Europoortkering door de beheerder (zijnde Rijkswaterstaat) gesloten zijn. De beleidsmatige keuzes rondom het sluiten van de stormvloedkeringen heeft veel effect op de hydraulische belastingen van de noordelijke kering. De zuidzijde staat onder directe invloed van de Noordzee. De representatieve omstandigheid voor dit deel bestaat uit een extreme situatie op de Noordzee en is onafhankelijk van de rivierwaterstand. De kans dat gelijktijdig extreme gebeurtenissen aan de noordzijde als de zuidzijde optreden is verwaarloosbaar.

De dijken rondom Rozenburg bestaan hoofdzakelijk uit zand en zijn de laatste decennia niet versterkt. Zetting van de dijk is daarom te verwaarlozen. De bodemdaling ter plaatse van Rozenburg is eveneens verwaarloosbaar. De waterkeringen betreffen meest brede dijklichamen vaak met hoog en breed voorland. De rapportage van de landelijke beoordeling beschrijft de eigenschappen van de waterkering.

Er is tot 2050 geen relevante stabiliteitsopgave.

Dijktraject 20-1

Het normtraject beschermt het westelijk deel van Voorne Putten tegen stormvloeden vanaf de Noordzee. Het traject bestaat voornamelijk uit duinen (15 km). Het deel van het traject aan de oostzijde van het Oostvoornse meer bestaat uit een dijk (ca 1 km).

Er wordt tot 2050 geen stabiliteitsopgave verwacht.

Dijktraject 20-2

Het normtraject beschermt het noord westelijk deel van Voorne Putten tegen stormvloeden vanaf de Noordzee. Het traject bestaat uit de Brielse Maasdijk vanaf Heenvliet tot aan de Brielse Maasdam. De veiligheidsopgave is besproken in de ingangstoets. In de ingangstoets is geconcludeerd dat er een versterkingsopgave is en dat er mogelijkheden zijn om de veiligheidsopgave aan te scherpen. De overstromingskans wordt bepaald door het faalmechanisme Graserosie Kruin en Binnentalud.

De versterking van het dijktraject is in voorbereiding.

Dijktraject 20-3

Het normtraject beschermt het zuidwesten deel van Voorne Putten tegen hoge belastingen vanuit Hartelkanaal, Spui en Oude Maas. Recent (2015) is de dijkversterking Spui-West afgerond. Het betrof een dijkversterking over een lengte van 2,8 km verdeeld over een aantal trajecten langs het Spui. Voor het HWBP is een dijkversterking in voorbereiding. Traject Geervliet - Hekelingen (normtraject 20-3) op Voorne-Putten is vroegtijdig in het HWBP opgenomen in verband met een urgente veiligheidsopgave.

Dijktraject 20-4

Het dijktraject beschermt het zuidelijke deel van Voorne-Putten tegen de invloed van het Haringvliet en het Spui Aan de westzijde bestaat uit het normtraject over een lengte van circa 2 km uit duinen. Het overige deel van het traject bestaat uit dijken. De vestingwal van Hellevoetsluis is onderdeel hiervan.

De Zeedijk ten oosten van Hellevoetsluis betreft een schaaldijk en grenst direct aan het Haringvliet. Bij de overige dijken is meestal voorland aanwezig. In het traject zijn 10 kunstwerken aanwezig.

In het kader van de Deltawerken zijn na de stormvloed van 1953 veel keringen versterkt. Op traject 20-4 zijn de meeste dijken verhoogd en is het binnentalud verflauwd. De versterkingen zijn uitgevoerd met zand. Op het talud is een kleibelkleding aangelegd. De bodemopbouw is heterogeen. Onder de kering bevindt zich vaak Holocene kleilagen op getijdeplataafzettingen welke lokaal worden doorsneden door met zand opgevulde (getijde)geulen. In de periode 2014-2018 is in het kader van het tweede hoogwaterbeschermings-programma (HWBP2) een aantal dijkversterkingen uitgevoerd. Het betrof in totaal een dijkversterking over een lengte van 2,8 km verdeeld over de Zuidijk (720 m) en de vestingwallen van Hellevoetsluis (660 m).

Door de aanleg van dammen zijn de hydraulische belastingen in de estuaria daarna lager geworden. Daarnaast is met de introductie van de nieuwe normering sprake van een normverlaging. De huidige representatieve waterstand bij de norm is lager dan de waterstanden die in het verleden (voor aanleg dammen en stormvloedkeringen) zijn opgetreden. Door de lange strijkengte op het Haringvliet zijn de golfbelastingen, met name de schaaldijk ten oosten van Hellevoetsluis, significant. De vestingwal van Hellevoetsluis is niet versterkt en een continue aandachtspunt in de beoordelingen.

Verschillende faalmechanismen zijn in het gebied relevant. Op locaties met een hoge golfbelastingen wordt de overstromingskans bepaald door falen van de bekledingen: steenzettingen en graserosie van het buitentalud. Op locaties waar zich direct onder de dijk een geulafzetting bevindt is piping een relevant faalmechanisme. Een opgave door binnenwaartse macrinostabiliteit is niet uit te sluiten.

Voor macrostabiliteit wordt verwacht dat een scherpere opgave kan worden bepaald door beter inzicht in de bodemopbouw en waterspanningen. Doordat de keringen hoog zijn en doordat er onder normomstandigheden nauwelijks overslag optreedt kan met kennis van vervolprocessen in de toekomst de overstromingskans verder worden aangescherpt. De huidige restbreedtemethode is hiervoor op dit moment onvoldoende geschikt en kan zowel een boven als een onderschatting geven. Wanneer de afstand tot de norm klein is, kan het beter bepalen van de OCR of een probabilistische analyse (bij een complexe bodemopbouw) helpen om met beperkte inspanningen een de opgave uit te sluiten. Verwacht wordt dat de macrostabiliteitstopgave in 2050 beperkt is (0 tot 4 km).

Dijktraject 21-1

Het dijktraject betreft keringen langs het Spui, de Oude Maas en Dordtse Kil aan de noordzijde van de Hoekse Waard. In het traject zijn 17 kunstwerken en 2 tunnels aanwezig. In het kader van de Deltawerken zijn na de stormvloed van 1953 veel keringen versterkt. De laatste versterkingen zijn in de periode 2015-2016 in het kader van HWBP2 uitgevoerd.

Door de aanleg van dammen zijn de hydraulische belastingen in de estuaria daarna lager geworden. Daarnaast is met de introductie van de nieuwe normering sprake van een normverlaging. De huidige representatieve waterstand bij de norm is lager dan de waterstanden die in het verleden (voor aanleg dammen en stormvloedkeringen) zijn opgetreden. De hydraulische belasting onder normcondities wordt bepaald door een

combinatie van de waterstand op zee (korte hoogwatergolf) en de rivierafvoer (lange hoogwatergolf). Daarbij wordt de invloed van de hoogwatergolf uit zee beheerst met stormvloedkeringen.

Langs de Oude Maas is vaak een hoog voorland aanwezig. Langs de Dordtse Kil en het Spui liggen schaaldijken. Na 1953 zijn de meeste keringen verhoogd en is het binnentalud verflauwd. De versterkingen zijn uitgevoerd met zand. Op het talud is een kleibekleding aangelegd. Ook zijn in het traject kleidijken aanwezig. De ondergrond bestaat uit een dik watervoerend pakket met een deklaag van wisselende dikte. In de deklaag zijn lokaal tussenzandlagen aanwezig. Zandlagen betreffen voornamelijk getijdeafzettingen. De tussenzandlagen zijn veelal plaatafzettingen.

De schaaldijk langs het Spui is op locaties waarbij geulafzettingen dicht onder het maaiveld bevinden pipinggevoelig. Op locaties zonder hoog voorland en een dikkere deklaag is het voorstelbaar dat een binnenwaartse macro-instabiliteit tot een overstroming leidt. De kans hierop hangt af van de duur van de belasting, de respons van de waterspanningen en de (sterkte) eigenschappen van het dijksmateriaal.

De golfbelasting op de waterkering is door de beperkte strijklengte en objecten (begroeiing, dammen, hoog voorland) klein. Hoogtegerelateerde faalmechanismen dragen door de aanwezige overhoogte niet significant bij aan overstromingskans.

Voor macrostabiliteit wordt verwacht dat een scherpere opgave kan worden bepaald door beter inzicht in de bodemopbouw en waterspanningen. Doordat de keringen hoog zijn en doordat er onder normomstandigheden nauwelijks overslag optreedt kan met kennis van vervolprocessen in de toekomst de overstromingskans verder worden aangescherpt. De huidige restbreedtemethode is hiervoor op dit moment onvoldoende geschikt en kan zowel een boven als een onderschatting geven. Wanneer de afstand tot de norm klein is, kan het beter bepalen van de OCR of een probabilistische analyse (bij een complexe bodemopbouw) helpen om met beperkte inspanningen een de opgave uit te sluiten. Verwacht wordt dat de macrostabiliteitstopgave in 2050 zeer beperkt is (0 tot 2 km).

Dijktraject 21-2

Het dijktraject betreft keringen langs het Spui en het Haringvliet aan de zuidzijde van de Hoekse Waard. In het traject zijn 17 kunstwerken aanwezig. In het kader van de Deltawerken zijn na de stormvloed van 1953 veel keringen versterkt. De laatste versterkingen zijn in de periode 2015-2016 in het kader van HWBP2 uitgevoerd. De versterkingen zijn uitgevoerd bij een oversrijdingskansnorm van 1/4000 jaar-1.

Door de aanleg van de Deltwerken zijn de hydraulische belastingen in de estuaria daarna lager geworden. Daarnaast is met de introductie van de nieuwe normering sprake van een normverlaging. De huidige representatieve waterstand bij de norm is lager dan de waterstanden die in het verleden zijn opgetreden. Tussen 1953 en 1970 (afsluiting Haringvliet) is de waterstand 16 keer hoger geweest dan de waterstand met een terugkeertijd gelijk aan de huidige norm. De hydraulische belasting onder normcondities wordt bepaald door een combinatie van de waterstand op zee (korte hoogwatergolf) en de rivierafvoer (lange hoogwatergolf). Daarbij wordt de invloed van de hoogwatergolf uit zee beheerst met stormvloedkeringen.

Na 1953 zijn de meeste keringen verhoogd en is het binnentalud verflauwd. De versterkingen zijn uitgevoerd met zand. Op het talud is een kleibekleding aangelegd. Ook zijn in het traject kleidijken aanwezig. De ondergrond bestaat uit een dik watervoerend pakket met een deklaag van wisselende dikte. In de deklaag zijn lokaal tussenzandlagen aanwezig.

Zandlagen betreffen voornamelijk getijdeafzettingen. De tussenzandlagen zijn veelal plaatafzettingen. Langs de meeste keringen is (beperkt) voorland aanwezig.

Op basis van de analyses in LBO1 kon de macrostabiliteit over 5 km en de weerstand tegen piping over 14 km nog niet worden aangetoond. Hoogtegerelateerde faalmechanismen zijn niet significant voor de overstromingskans.

Voor macrostabiliteit kan de opgave worden aangescherpt door een scherpere schematisatie van bodemopbouw en sterkte-eigenschappen (oa OCR). Wellicht zijn deze aanscherpingen niet nodig door herverdeling van faalkansruimte. Het aanscherpen van schematisatie is belangrijker en heeft meer impact dan een probabilistische analyse. Vanwege de overhoogte en korte duur van de hoogwatergolf wordt verwacht dat met kennis van vervolprocessen de overstromingskans in de toekomst verder kan worden gereduceerd. In 2050 wordt geen opgave door macrostabiliteit verwacht.

Dijktraject 22-1

Het dijktraject beschermt het zuidelijke deel van het Eiland van Dordrecht tegen de invloed van de Dordtse Kil en de Nieuwe Merwede. Het eiland wordt in tweeën gedeeld door de Wieldrechtse zeedijk. De noordzijde van het eiland bestaat grotendeels uit stedelijke bebouwing. De zuidzijde bestaat uit polders en natuur. De dijken van traject 22-1 zijn relatief nieuw en na de stormvloed van 1953 aangelegd in het kader van de deltawerken. Tot 1955 was de Wieldrechtse zeedijk de primaire kering. De dijken die in het kader van de Deltawerken zijn aangelegd bestaan uit zanddijken met een kleibekleding. De dijken hebben een vrij smalle kruin en een binnen talud van 1:3. Aan de binnentoe van de kering ligt op vaak een weg (Nieuwe Merwedeweg, Oude Beerpoldersekade), soms op een binnenberm (Rijskstraatweg).

Na 1953 zijn er nog een aantal stormvloeden geweest die tot waterstanden hebben geleid die hoger zijn dan de waterstand met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan norm. Nadat in 1970 de Haringvlietdam gereed kwam, zijn de extreme waterstanden veel lager dan voor de afsluiting van het Haringvliet. De hydraulische belasting onder normcondities wordt bepaald door de waterstand op zee (korte hoogwatergolf) en de rivierafvoer (lange hoogwatergolf).

In de periode 2015-2016 zijn dijkversterkingen op het Eiland van Dordrecht uitgevoerd in het kader van het tweede Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP2). Het betreft drie strekkingen in dijktraject 22-1 (buitendijk van de zuidoostpunt oost en west, buitendijk van Wieldrecht zuid).

De ondergrond bestaat uit een Holocene deklaag die bestaat uit een opeenstapeling van klei en veenlagen. De dikte van de lagen varieert. Onder de deklaag ligt een Pleistocene zandige afzetting. De overstromingskans wordt bepaald door het faalmechanisme macrostabiliteit (op locaties met een dikke Holocene deklaag). Lokaal kan een pipingopgave ontstaan in gebieden met een dunne deklaag. De golfbelasting op de waterkering is door de beperkte strijklengte of aanwezigheid van een breed voorland klein. Faalmechanismen die afhankelijk zijn van golfbelasting of dijkhoogte zijn niet dominant voor de overstromingskans in dijktraject 22-1.

Toepassen van nieuwe kennis rondom tijdsafhankelijkheid (vervolgmechanismen) en probabilistische analyses kunnen de opgave door stabiliteit lokaal aanscherpen.

Dijktraject 22-2

Het dijktraject beschermt het noordelijk deel van het Eiland van Dordrecht tegen de invloed van de Oude Maas, Wantij, Dordtse Kil en de Nieuwe Merwede. Het eiland wordt in tweeën

gedeeld door de Wieldrechtse zeedijk. De noordzijde van het eiland bestaat grotendeels uit stedelijke bebouwing. De zuidzijde bestaat uit polders en natuur.

Een bijzonder deel van dit dijktraject betreft de Voorstraat. Deze waterkering ligt midden in de binnenstad van Dordrecht en bestaat uit een dijklichaam dat niet hoog genoeg is. Daarom is hier een vloedschotten- en coupuresysteem aangebracht dat gesloten kan worden bij extreme hoge waterstanden. Uit berekeningen volgt dat de hoeveelheid water dat bij representatieve normbelasting over de vloedschotten stroomt op dit moment acceptabel is. Dit betekent wel dat deze waterkering kwetsbaar is voor stijgende waterstanden als gevolg van klimaatverandering.

Als gevolg van de te lage waterkering en het niet werken van het coupuresysteem liep in 1953 het water over de Voorstraat en kwam de stad Dordrecht gedeeltelijk onder water te staan. Een deel van de waterkering van het Eiland van Dordrecht, waaronder de Noordendijk, Wantijdijk, de Buitendijk van de Zuidpunt en de Buitendijk van de Wieldrecht, raakte aanzienlijk beschadigd. Dit was vooral het gevolg van overloop en erosie van het binnentalud. De dijken van traject 22-2 zijn tussen 1960 en 2001 op Deltahoogte gebracht. Van de groene keringen is de kering verhoogd en het binnentalud verflauwd. De versterking is waar mogelijk in zand uitgevoerd. Op locaties waar geen ruimte was voor een binnendijkse versterking zijn constructieve versterkingen aangebracht.

Na 1953 zijn er nog een aantal stormvloed en waterstanden geweest die tot waterstanden hebben geleid die hoger zijn dan de waterstand met een overschrijdingsfrequentie gelijk aan de huidige norm. Nadat in 1970 de Haringvlietdam gereed kwam, zijn de extreme waterstanden veel lager dan voor de afsluiting van het Haringvliet. De hydraulische belasting onder normcondities wordt bepaald door de waterstand op zee (korte hoogwatergolf) en de rivierafvoer (lange hoogwatergolf).

In de periode 2015-2016 zijn dijkversterkingen op het Eiland van Dordrecht uitgevoerd in het kader van het tweede Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP2). Het betreft twee strekkingen in dijktraject 22-2 (buitendijk van Wieldrecht noord en Wantijdijk).

De ondergrond bestaat net als in dijktraject 22-1 uit een deklaag van een opeenstapeling van klei en veenlagen. De dikte van de lagen varieert. Onder de deklaag liggen zandige getijdeplaat, geul en pleistocene afzettingen.

De overstromingskans van de groene kering wordt bepaald door het faalmechanisme macrostabiliteit (op locaties met een dikke Holocene deklaag) en piping in gebieden met een dunne deklaag en Pleistocene of Holocene geulafzettingen. De golfbelasting op de waterkering is door de beperkte strijklengte klein. Faalmechanismen die afhankelijk zijn van golfbelasting of dijkhoogte zijn niet dominant voor de overstromingskans in dijktraject 22-2.

Op basis van de huidige inzichten wordt tot 2050 geen extra opgave door macrostabiliteit verwacht. De mogelijkheden om de huidige opgave aan te scherpen zijn beperkt.

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