HWBP
voor sterke dijken

Opgave- en ontwikkelbehoefte-gesprekken

Eindrapport deel 2



Datum 6 november 2024
Status Definitief, versie 2

Inhoud

Inhoudsopgave

1 Inleiding 4
1.1 Aanleiding 4
1.2 Doel 5
1.3 Methode 5
1.4 Onderbouwing verwachte opgave en marge 6
1.5 Opbouw van dit document 7
2 Zuidwestelijke Delta 8
2.1 Kenmerken gebied 8
2.2 Autonome ontwikkelingen 9
2.3 Verwachte opgave tot 2050 10
2.4 Beter bepalen van de opgave 10
3 Kust 13
3.1 Kenmerken gebied 13
3.2 Autonome ontwikkelingen 14
3.3 Verwachte opgave tot 2050 14
3.4 Beter bepalen van de opgave 15
4 Wadden 16
4.1 Kenmerken gebied 16
4.2 Autonome ontwikkelingen 17
4.3 Verwachte opgave tot 2050 18
4.4 Beter bepalen van de opgave 18
5 Meren 20
5.1 Kenmerken gebied 20
5.2 Autonome ontwikkelingen 22
5.3 Verwachte veiligheidsopgave tot 2050 22
5.4 Beter bepalen van de opgave 22
6 Benedenrivierengebied 25
6.1 Kenmerken gebied 25
6.2 Autonome ontwikkelingen 26
6.3 Verwachte veiligheidsopgave tot 2050 27
6.4 Nauwkeuriger bepalen opgave 27
7 Bovenrivierengebied 30
7.1 Kenmerken gebied 30
7.2 Autonome ontwikkelingen 31
7.3 Verwachte veiligheidsopgave tot 2050 32
7.4 Beter bepalen opgave 32
8 Handelingsperspectief kennis en instrumenten 35
8.1 Algemeen 35
8.2 Veiligheidsopgave 35
8.3 Nader onderzoek 38
8.4 Gebiedsprogramma's 40
8.5 Opleiding en ondersteuning 41

Bijlage A Kennisontwikkelingen – inhoudelijke notities 42



1. Inleiding

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Nederland heeft ongeveer 3.500 km primaire waterkeringen. Deze primaire keringen worden beheerd door Rijkswaterstaat en waterschappen. In 2017 zijn de overstromingskansbenadering en nieuwe waterveiligheidsnormen ingevoerd waardoor niet meer gekeken wordt naar een overschrijdingskans per dijkvak, maar naar een overstromingskans per dijktraject. In de Omgevingswet is opgenomen dat in 2050 alle primaire keringen voldoen aan de gestelde eisen. Naast de norm is ook de organisatie voor het beheersen van overstromingsrisico's gewijzigd in het Bestuursakkoord Water. Daarnaast is er overgestapt op een continu systeem (continue monitoring en voortrollend versterkingsprogramma) met andere rollen en verantwoordelijkheden. Tenslotte is er in de periode vanaf de implementatie van de overstromingskansbenadering tot heden veel kennis ontwikkeld die een beter inzicht in het gedrag van waterkeringen geeft.

Deze wijzigingen (aard van de norm, instrumentarium, organisatie, inhoudelijke kennis) zijn groot. Er is sprake van een systeemsprong. Daarom is afgesproken de eerste beoordelingsronde (LBO1, 2017-2023) als leerperiode te beschouwen waarin waterschappen en Rijk met elkaar ontdekken wat de overstromingskansbenadering betekent en welke informatie vanuit de beoordeling nodig is voor de andere waterveiligheidsprocessen. In 2023 is de Kamer geïnformeerd over de uitkomsten van de LBO1 en is een vertaling gemaakt vanuit de beoordelingsresultaten naar een inschatting van het aantal te versterken kilometers en de bijbehorende kosteninschatting. Deze globale kosteninschatting (GKI) heeft een grote onzekerheidsmarge, voornamelijk voor de lengte van de versterkingen die nog niet geprogrammeerd staan.

Om de juiste keuzes te maken rondom de landelijke strategie van de versterkingsopgave is het belangrijk deze onzekerheidsmarge te duiden en de opgave in kilometers (en bijbehorende kosten) scherper in beeld te krijgen. De duiding is belangrijk voor het definiëren van maatregelen om de onzekerheidsband te verkleinen en de daarvoor benodigde kennis en instrumentontwikkeling te bepalen.

Het is, na tien jaar, een logisch moment om het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) door te ontwikkelen. Het kan nodig zijn om de (financiële) afspraken te actualiseren. Met het oog op die doorontwikkeling en actualisatie is door de alliantie HWBP is een actieplan 'Toekomstgericht HWBP' opgesteld. Als onderdeel van dit plan heeft DGWB aan de programmadirectie van het HWBP gevraagd om op basis van de resultaten van LBO1, en andere beschikbare informatie, in zogenaamde 'opgave- en ontwikkelbehoeftegesprekken' (OOG) met inhoudelijk experts van de waterkeringbeheerder en externe specialisten de veiligheidsopgave tot 2050 te duiden.

Dit document betreft deel 2 van het eindrapport van de opgave- en ontwikkelbehoeftegesprekken. Het document gaat in op de benodigde kennis en instrumentontwikkeling voor het nauwkeuriger bepalen van de veiligheidsopgave van waterkeringen.

1.2 Doel

Doel van de OOG is het verkrijgen van een gezamenlijk beeld van de landelijke veiligheidsopgave tot 2050 om de juiste strategische keuzes te maken. Hierbij gaat het om:

1. het zo goed mogelijk, en door de betrokkenen gedragen, bepalen van de versterkingsopgave in kilometers tot 2050. Ten behoeve van de financiering en programmering van versterkingsprojecten in aanloop naar herijking van financiële afspraken;
2. input genereren voor verdere kennis- en instrumentontwikkeling;
3. inventariseren behoefte aan opleiding en ondersteuning.

Ad 1 versterkingsopgave en HWBP-programma

De informatie uit dit project wordt door het HWBP gebruikt voor het maken en inrichten van een programma tot 2050. Het gaat dan om een gedragen inzicht in de reële veiligheidsopgaven tot 2050. We focussen ons in het project op de technische veiligheidsinformatie en kijken niet naar omgevings- en andere (maatschappelijke) opgaven. In deel 1 van het eindrapport is de verwachte opgave gerapporteerd inclusief duiding.

Ad 2 kennis en instrumentontwikkeling

De informatie uit het project wordt gebruikt voor het inrichten (prioriteren en programmeren) van kennis- en instrumentontwikkeling in de Kennis- en Innovatieagenda (K&I-agenda) van het HWBP, Kennis voor Keringen (KvK) en het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI). Het gaat dan om een beschrijving van ontwikkelingen en activiteiten waarmee een nauwkeuriger onderbouwing van de veiligheidsopgave kan worden bepaald. Voor de verschillende ontwikkelingen wordt aangegeven op welke locaties deze relevant zijn met een indicatie van de impact. Het onderhavige deel 2 van het eindrapport geeft invulling aan dit doel.

Ad 3 opleiding en ondersteuning

De eerste beoordelingsperiode (LBO1) is gedefinieerd als leerperiode. Op basis van de gesprekken wordt de behoefte aan opleiding en ondersteuning geïdentificeerd voor doorontwikkeling en benutten van de overstromingsrisicobenadering. Het laatste hoofdstuk van dit rapport gaat in op de behoefte aan opleiding en ondersteuning.

1.3 Methode

Om een specifieker beeld te krijgen van de veiligheidssopgave tot 2050, is in gesprekken tussen inhoudelijk specialisten van waterschappen en externe specialisten duiding gegeven aan de LBO1 resultaten. Het betrekken van externe specialisten maakt een extra technisch-inhoudelijke duiding over verwachte en mogelijke kennisontwikkeling mogelijk en zorgt voor landelijke uniformiteit. Hierbij staat het resultaat van de beoordeling niet ter discussie maar wordt vooral gekeken hoe een vertaling kan worden gemaakt van de beoordeling naar de veiligheidsopgave, gegeven verwachte (kennis)ontwikkelingen tot 2050.

Elk dijktraject is uniek. Per beheerder is in een startgesprek stilgestaan bij de kenmerken van de dijktrajecten. Afhankelijk van het aantal trajecten in beheer en de complexiteit van de opgave zijn een of meerdere inhoudelijke gesprekken gevoerd om verder de diepte in te gaan en te komen tot een gedeeld beeld van de opgave en kansen voor kennis- en instrumentontwikkeling.

Van alle gesprekken zijn verslagen gemaakt. De verslagen vormen de basis van voorliggende achtergrondrapportage. De verslagen zijn niet integraal overgenomen in de eindrapportage maar zijn gebruikt voor het verkrijgen van een totaalbeeld.

In deel 1 van het eindrapport is de gevolgde methode meer in detail beschreven.

1.4 Onderbouwing verwachte opgave en marge

In de gesprekken is op basis van het verhaal van de kering, de tot dusver uitgevoerde analyses en actuele kennis een schatting gemaakt van de opgave die zo goed mogelijk aansluit bij de overstromingskans. In deel 1 van de eindrapportage is aangegeven dat voor een groot aantal kilometers nader onderzoek nodig is om de verwachte opgave te onderbouwen en vast te stellen. Het is niet mogelijk om op basis van LBO1 resultaten in een enkel expertgesprek in de OOG een definitieve uitspraak over de veiligheidsopgave te doen.

Voor het creëren van overzicht zijn categorieën benoemd van verschillende mogelijkheden voor het beter bepalen van de opgave:

A. Meer data en realistisch schematiseren. Hierbij kan gedacht worden aan meer gedetailleerd grondonderzoek, uitvoeren van monitoring, nadere schematisering en het specifieker maken van lokale omstandigheden. Er wordt opgemerkt dat de gegevensbehoefte niet statisch is, maar samenhangt met de kennis- en gebiedsontwikkelingen.
B. Meer inzicht en toepasbare instrumenten. Nieuwe inzichten en daarop afgestemde modellen en instrumenten richten zich op een betere beschrijving van de fysica of realistisch bepalen van de kans op van optreden van een mechanisme. Het gaat om de keuze en toepassen van modellen die de fysica meer in detail beschrijven (voorbeeld: D-Geo Flow bij piping) of (probabilistische) rekentechnieken om de kans op een mechanisme nauwkeuriger te bepalen. Hiervoor zijn kennis en modellen beschikbaar. Kennis is soms nog (deels) in ontwikkeling en wordt via een handelingsperspectief beschikbaar gesteld.
C. Integrale beschouwing van het traject, de kering en faalmechanismen. Denk bijvoor-

beeld aan: het gecombineerd beschouwen van faalmechanismen zoals falen grasbekleding buitentalud en de erosie van kruin en binnentalud; het beschouwen van het gehele faalpad in plaats van het kijken naar een enkele knoop aan het begin van het faalpad; het in samenhang beschouwen van de sterkte en de belasting op de waterkering; het meenemen van observaties en beheersmaatregelen tijdens hoogwater in de veiligheidsanalyse; of het toepassen van bewezen sterkte waarbij het gedrag van de kering in zijn geheel wordt beschouwd. Onder intergrale beschouwing vallen ook: het nauwkeuriger vastleggen van criteria waarop de kans op overstroming wordt vastgesteld. In LBO1 werd soms nog uitgegaan van schadecriteria in plaats van overstromingscriteria.

D. Overwegen van beleidskeuzes. Het gaat hier veelal om systeemingrepen, zoals een ander sluitregime van een voorliggende stormvloedkering of een andere afvoerverdeling bij splitspunten van grote rivieren.

Op basis van de kennis van de specialisten aan de kant van de beheerder en de kennis van de externe specialisten is een inschatting gemaakt van een verwachte opgave en een marge rond deze verwachting, rekening houdend met kans van slagen van het benutten van de mogelijkheden A t/m D. Bij het schatten van de verwachte opgave is het huidige beleid als uitgangspunt genomen.

1.5 Opbouw van dit document

Dit document betreft deel 2 van de eindrapportage van de opgave- en ontwikkelbehoefte gesprekken. Het betreft een beknopte rapportage waarin voor zes gebieden, met vergelijkbare kenmerken van hydraulische belasting, ondergrond en waterkeringen, mogelijkheden om de veiligheidsopgave nauwkeuriger te beschrijven zijn samengevat.

Hoofdstuk 2 tot en met 7 geven per gebied een beschrijving van het gebied en gaan in op de autonome ontwikkelingen die de veiligheidsopgave tot 2050 in dat gebied bepalen. Vervolgens wordt een beschrijving gegeven van de mogelijkheden, onderverdeeld in de eerder beschreven categorieën A t/m D, die er zijn om de opgave nauwkeuriger te bepalen. De hoofdstukken focussen op het algemene beeld en kenmerken van het gebied en gaan niet in op lokale aspecten. Het rapport eindigt met handelingsperspectieven voor kennis en instrumentontwikkeling. In het laatste hoofdstuk wordt ook ingegaan op opleiding en ondersteuningsbehoefte.

Bijlage A bevat de inhoudelijke notities die als basis zijn gebruikt bij de opgave- en ontwikkelbehoeftegesprekken.



2. Zuidwestelijke Delta

2 Zuidwestelijke Delta



2.1 Kenmerken gebied

De Zuidwestelijke Delta ligt direct aan zee en is verbonden met de rivieren Maas, Waal en Schelde. Het omvat het areaal van Waterschap Hollandse Delta (WSHD), Waterschap Scheldestromen (WSSS) en een deel van Waterschap Brabantse Delta (WSBD) en Rijkswaterstaat (RWS). De primaire waterkeringen in dit gebied grenzen aan de Westerschelde, Oosterschelde, Schelde-Rijnkanaal, Grevelingenmeer, Krammer, het Volkerak, Haringvliet en een deel van het Hollandsch Diep.

De ‘binnenzijde’ (achter dammen en stormvloedkeringen) van de Zuidwestelijke Delta kenmerkt zich door dijkversterkingen die na de stormvloed van 1953 zijn uitgevoerd. Aansluitend zijn door de aanleg van dammen en stormvloedkeringen de hydraulische belastingen verlaagd. De waterveiligheidseisen zijn met de introductie van overstromingskansnormen in 2017 voor een deel van het areaal verlaagd. Een deel van de keringen is daardoor overgedimensioneerd. Dit betekent dat er in dit deelgebied geen significante hoogteopgave wordt verwacht. Het gedrag van (stormvloed)keringen zijn aan de binnenzijde van de Zuidwestelijke Delta bepalend voor de hydraulische belastingen. Hierbij beïnvloeden de mate van afsluiting en beleidskeuzes (bijvoorbeeld het sluitpeil en kans op niet-sluiten) de hydraulische belastingen. Naast de invloed van zee (storm geeft hoge en korte duur belasting) beïnvloedt de rivier (afvoer geeft lagere maar lange duur belasting) de hydraulische belasting in de Zuidwestelijke Delta. Het effect op de amplitude (hoogste waterstand) wordt beperkt door de komberging van het Haringvliet.

De ‘buitenzijde’ (zeezijde) bestaat uit een zandige (duinen) en harde (dijken met asfalt, steenzettingen en grasbekleding) kustlijn. Dit deel van de Zuidwestelijke Delta wordt niet beschermd door voorliggende keringen. In het project Zeeweringen zijn de waterkeringen aan het einde van de vorige eeuw en begin van deze eeuw voorzien van nieuwe bekledingen op het buitentalud. De belasting wordt bepaald door stormen op zee die hoge waterstanden en golven veroorzaken. Bij de buitenzijde wordt ook de Westerschelde gerekend. De rivier de Schelde heeft geen noemenswaardige bijdrage aan de opgave op de Westerschelde.

De Zuidwestelijke Delta is een getijdegebied met een gelaagde bodemopbouw van voornamelijk zand- en (slappe)kleilagen, veen (in de richting van Rotterdam) en zandige geulafzettingen. De dijkopbouw bestaat vaak uit een 'oude' kleidijk met een aanvulling in zand. De dikte van de deklaag varieert over het gebied en verloopt grofweg van dik in het oosten naar dun(ner) in het westen.

De overstromingskans in de Zuidwestelijke Delta wordt hoofdzakelijk bepaald door faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit en in (iets) mindere mate door falen van de grasbekleding op het buitentalud. Lokaal speelt piping (bij zandige geulafzettingen) en graserosie van de kruin en het binnentalud een rol.

2.2 Autonome ontwikkelingen

Klimaatverandering, kennisontwikkeling en veroudering zijn in de Zuidwestelijke Delta relevant voor de veiligheidsopgave tot 2050.

Aan de 'buitenzijde' wordt tot 2050 een zeespiegelstijging van ongeveer 30 centimeter verwacht. De mate waarin deze stijging de overstromingskans beïnvloedt is afhankelijk van kennisontwikkelingen waaronder ontwikkelingen in de zeewaterstandstatistiek. Deze compenseren naar verwachting (deels) de zeespiegelstijging. Een stijging van 30 centimeter zal voor de kust vermoedelijk nauwelijks effect hebben op de overstromingskans van duinwaterkeringen en geotechnische mechanismen van harde keringen (vrijboord is vaak zo hoog dat situatie STBI met overslag geen rol speelt, ook niet met zeespiegelstijging).

Voor de faalmechanismen rondom bekledingen van het buitentalud wordt verwacht dat kennisontwikkeling waarbij integraal vanuit het systeem en kering naar onderdelen wordt gekeken de toename van de waterstand zou moeten kunnen opvangen. Voor hoogtegerelateerde faalmechanismen zal kennisontwikkeling mogelijk niet helemaal de zeespiegelstijging compenseren. Als er op basis van LBO-1 nu sprake is van een "oversterkte" van een halve decimeringshoogte dan is dat bij benadering gelijk aan het effect van de zeespiegelstijging.

Aan de 'binnenzijde' speelt naast zeespiegelstijging ook toename van rivierafvoer een rol. De orde van grootte van de stijging van de representatieve waterstanden is naar verwachting gelijk waarbij bij gelijkblijvende prestaties van stormvloedkeringen de invloed van rivierafvoer (lange duur belasting) verder benedenstrooms merkbaar is. Door zeespiegelstijging wordt de mogelijkheid tot spuien bij de Haringvlietsluizen beperkt, wat bijdraagt aan een langere duur van de rivier hoogwatergolf. Door de overdimensionering van de keringen wordt aan de binnenzijde geen grootschalige extra veiligheidsopgave door klimaatverandering verwacht.

Veroudering van asfaltbekledingen leidt in de Zuidwestelijke Delta tot 2050 tot een extra veiligheidsopgave.

2.3 Verwachte opgave tot 2050

De totale lengte van de primaire waterkeringen in de Zuidwestelijke Delta is ongeveer 853 km. De verwachte opgave bedraagt 217 km. Hiervan is circa 56 km in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). De lengte van kering waar nader onderzoek nodig is om de veiligheidsopgave te onderbouwen, is circa 88 kilometer. In onderstaande figuur is het resultaat van de OOG voor de Zuidwestelijke Delta weergegeven.



Figuur 1 Resultaat opgave- en ontwikkelbehoefte gesprekken Zuidwestelijke delta

2.4 Beter bepalen van de opgave

Hieronder is een samenvatting gegeven van diverse mogelijkheden om de opgave voor dit gebied beter te kunnen bepalen. Deze aspecten zijn tijdens de OOG ter tafel gekomen en meegewogen bij het bepalen van de opgave tot 2050.

Beter bepalen van de opgave door	Impact op verwachte opgave en bandbreedte (tot 2050)
A: Meer data en beter schematiseren	
Beter in kaart brengen van getijdeafzettingen (bijv. met paleogeografische kaarten) en het bepalen van de aard van de getijdezanden. Een relatief hoog lutumgehalte heeft een gunstig effect op de weerstand tegen piping.	Groot. Het meenemen van de gelaagdheid in de bodem en de aard van de getijdezanden kan een grote impact hebben op de totale pipingopgave in het gebied.
Peilbuismonitoring gericht op getijderespons van waterspanningen voor scherper bepalen stabiliteitsopgave.	Beperkt. Op een groot deel van het areaal is dit al uitgevoerd. Waar het nog niet is toegepast kan een significant scherpere veiligheidsopgave worden bepaald.
Beter inzicht in dijkopbouw, locatie kleikern en zand.	Aanzienlijk. Voor macrostabiliteit binnenwaarts is het van belang meer inzicht te hebben in de dijkopbouw. Dit is van belang voor het bepalen van de freatische lijn en het kwantificeren van vervolgmechanismen.
Meer inzicht in de sterkte en samenstelling van asfalt.	Klein. Asfalt moet op een gegeven moment vervangen worden. Het verlengen van deze vervangingstermijn door meer inzicht in veroudering verkleint niet of nauwelijks de opgave tot 2050. Op dit moment worden – in het onderzoek naar gebruik van lage temperatuur asfalt– de mogelijkheden voor het recyclen van asfalt onderzocht.

Beter bepalen van de opgave door	Impact op verwachte opgave en bandbreedte (tot 2050)
B: Meer inzicht fysica en betere modellen	
Met nieuwe zeewaterstandstatistiek kan de overstromingskans door falen van bekledingen nauwkeuriger worden bepaald.	Groot. Verwacht wordt dat deze de huidige opgave in de Zuidwestelijke Delta reduceert en de impact van klimaatverandering compenseert. Het heeft dus een grote impact op de verwachte opgave. De nieuwe waterstandstatistiek dient in het licht van de overige kennisontwikkelingen en onzekerheden te worden beschouwd.
Toepassen actuele inzichten rondom graserosie van buitentalud, kruin en binnentalud: o.a. vervanging Q-variant, samenvoegen kansruimten en het stochastisch rekenen aan het mechanisme.	Aanzienlijk.Verwacht wordt dat toepassing van actuele kennis de hogere belastingen door klimaatverandering compenseert.
Toepassen actuele kennis rondom piping (sterkte fines getijdeafzettingen, meerlaagsheid en anisotropie).	Aanzienlijk. Verwacht wordt dat door toepassen van actuele kennis alleen lokaal, ter plaatse van geulafzettingen, piping een relevant mechanisme is.
Meer inzicht in asfaltbekleding zoals onderzoek naar lage temperatuur asfalt en naar kans van optreden het faalmechanisme ASP (Asfalt S-Profiel).	Beperkt. Relevant voor versterkingsmaatregelen. Dit onderzoek leidt naar verwachting niet tot een vermindering van het aantal te versterken kilometers, omdat het aanwezige asfalt voor 2050 aan het eind van zijn levensduur is.

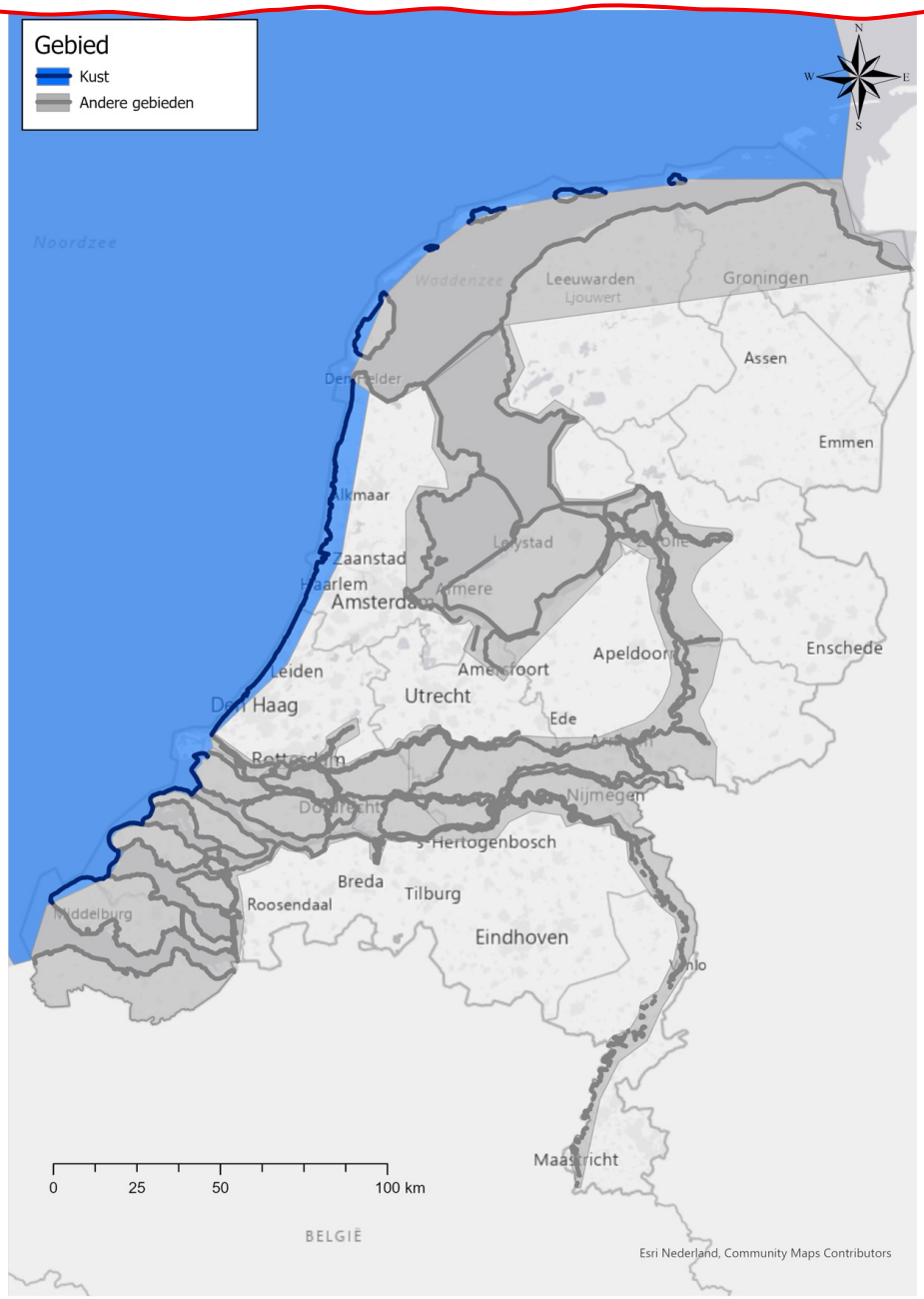
Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte (tot 2050)
C: Integrale beschouwing van de kering en het faalpad	
Faalpad piping en macrostabiliteit bij tijdsafhankelijke belasting.	Beperkt. Mogelijk wel van belang bij het afwegen van verschillende onzekerheden. Vaak meer redenerend: bijvoorbeeld, waar een geul ligt gaat het zo snel dat tijdsafhankelijk niet uitmaakt en waar geen geul ligt is piping niet aan de orde.
Integrale beschouwing bekledingen. Voor een aanzienlijk deel van de trajecten ligt de representatieve waterstand met lage terugkeertijden net boven de berm. Voor de bekledingsopgave is het relevant om inzicht te krijgen in het effect van golfklappen bij een dergelijke waterstand. Mogelijk liggen de zwaarste belastingen door golfklappen lager dan nu rekening mee wordt gehouden.	Onbekend. Deze ontwikkeling geeft een onbekende vermindering van de opgave rondom buitenbekledingen.
Integrale beschouwing traject.	Groot. In OOG zijn de onderdelen en faalmechanismen los besproken. Het was niet mogelijk om een beeld te krijgen van de opgave wanneer we integraal vanuit het traject beschouwen. Het effect zal groot zijn gegeven de hoeveelheid cat. IV-beoordelingen (overstromingskans is kleiner dan norm op trajectniveau maar groter dan criteria op doorsnedeniveau).
Integraal beschouwen onzekerheden.	Groot. In OOG is geprobeerd om onzekerheden integraal te beschouwen. Dit was complex omdat de referentie een situatie is waar alle onzekerheden conservatief zijn ingeschat. Het is moeilijk om een beeld te krijgen van het totaal, zeker als de norm een zeer strenge eis is en ver ligt van de situatie waar je op basis van ervaringen een beeld kunt vormen

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte (tot 2050)
D: Beleidskeuzes die opgave kunnen beïnvloeden	
Beleidskeuzes rondom de voorliggende stormvloedkeringen, zoals de kans op niet-sluiten en faalkans beïnvloeden de overstromingskans in het achterland.	Groot. Sluitprotocollen van voorliggende Oosterscheldekering en Haringvlietsluizen hebben een grote invloed op de hydraulische belastingen aan de binnenzijde van de Zuidwestelijke Delta. Deze beleidskeuzes zijn momenteel niet voorzien en niet opgenomen in de bandbreedte.



3. Kust

3 Kust



3.1 Kenmerken gebied

Het kustgebied betreft alle keringen die direct aan de Noordzee grenzen, uitgezonderd de keringen die al onder de Zuidwestelijke Delta vallen. Het kustgebied omvat gedeelten van het areaal van Hoogheemraadschap van Delfland (HHvD), Hoogheemraadschap van Rijnland (HHvR), Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK), Wetterskip Fryslân (WF), Waterschap Scheldestromen en RWS.

De waterkeringen bestaan voornamelijk uit duinen. Op sommige locaties, voornamelijk bij kustplaatsen, zijn harde of hybride keringen aanwezig. Daarnaast is een aantal stormvloedkeringen, kunstwerkcomplexen en dammen onderdeel van de waterkeringen langs de kust zoals bijvoorbeeld de Oosterscheldekering, Brouwersdam, Haringvlietdam, Maeslantkering en sluizen bij IJmuiden. Het gedrag van (stormvloed)keringen bepalend voor de hydraulische belastingen op het achterliggende keringensysteem (zie bijvoorbeeld gebied Zuidwestelijke Delta). Hierbij beïnvloeden de mate van afsluiting en beleidskeuzes (bijvoorbeeld het sluitpeil en kans op niet-sluiten) de hydraulische belastingen.
In het versterkingsprogramma Zwakke Schakels zijn de zwakke plekken langs de kust versterkt aan het begin van de 21e eeuw. Duinafslag is het dominante faalmechanisme.

De waterkeringen langs de kust zijn veelal zandig. Periodiek worden voor de zandige kust zandsuppleties uitgevoerd door het Rijk binnen het programma kustlijnzorg. Deze suppleties zorgen ervoor dat de kust flexibel mee kan groeien met zeespiegelstijging.

3.2 Autonome ontwikkelingen

Voor de verwachte veiligheidsopgave tot 2050 moet rekening worden gehouden met autonome ontwikkelingen. Voor de kust betreft dit voornamelijk zeespiegelstijging door klimaatverandering welke naar verwachting circa 30 cm is. Een dergelijke verhoging zal voor de kust vermoedelijk geen/nauwelijks invloed hebben op de veiligheidsopgave tot 2050.

Door de geringe opgave hebben nieuwe inzichten rondom zeewaterstatistiek minder impact dan bij de Zuidwestelijke Delta.

3.3 Verwachte opgave tot 2050

De totale lengte van de primaire waterkeringen langs de kust is ongeveer 315 km. De verwachte opgave bedraagt 11 km. Hiervan is circa 5 km in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). De waarde van nader onderzoek om de veiligheidsopgave te onderbouwen is relatief beperkt. Dit komt doordat de zwakke schakels langs de kust recent allemaal zijn aangepakt. In onderstaande figuur is het resultaat van de OOG voor de kust weergegeven.



Figuur 2 Resultaat opgave- en ontwikkelbehoefte gesprekken kust

3.4 Beter bepalen van de opgave

Eventuele vermeerdering of vermindering van de opgave zal voor dit gebied een beperkte invloed hebben op de totale opgave van Nederland. De aanwezige onzekerheden zijn ook zeer traject- en locatiespecifiek.

Uit de gesprekken kwam naar voren dat er met name twee ontwikkelingen relevant zijn voor de inschatting van de overstromingskans van de keringen in dit gebied. Dit betreffen de verbetering van de zeewaterstandstatistiek en de ontwikkeling van een 2D toepassing van XBeach.

Hoewel de inschatting van de opgave langs de kust niet beïnvloed wordt door deze ontwikkelingen, zijn beide onderwerpen in vrijwel alle gesprekken met beheerders van primaire waterkeringen langs de kust benoemd. De ontwikkelingen bepalen namelijk in grote mate ons beeld van de waterveiligheid en dus ook de overstromingskans voor de betreffende gebieden. Een nadere onderbouwing van de benodigde ontwikkelingen om ook in de toekomst de overstromingskans van duinwaterkeringen en hybride waterkeringen goed te kunnen blijven inschatten is opgenomen in de Roadmap Zandige Waterkeringen 2024-2035 van Kennis voor Keringen.



4. Wadden

4 Wadden



4.1 Kenmerken gebied

Het waddengebied beslaat alle keringen rondom de Waddenzee. Dit zijn zowel de keringen aan de Waddenzeekant van de Waddeneilanden, als delen van Noord-Holland, Friesland en Groningen. Het waddengebied omvat gedeelten van het areaal van HHNK, WF, Waterschap Hunze & Aa's (WSHA), Waterschap Noorderzijlvest (WSNZ) en RWS.

Het waddengebied kenmerkt zich door een grote variëteit in de grondopbouw door de vele geulen en plaatafzettingen die zich door de eeuwen heen hebben ontwikkeld. De Waddenzee is een dynamische omgeving. Geulen zijn verschenen, ingedamd, verplaatst of verdwenen. Droogvallende zandplaten bevatten een gelaagde bodemopbouw, die ook terug te vinden is in de bodemopbouw rondom de aanwezige keringen.

Veel dijken waren onderdeel van de deltaversterkingen die in de jaren '70 en '80 zijn uitgevoerd. Hierbij is een groot deel van de dijken opgehoogd en rechtgetrokken. De dijkopbouw bestaat veelal uit een zandlichaam met een (dunne) kleilaag. In sommige gebieden bestaat de kern van de dijk uit klei. In de versterkte dijken is veelal nog een oude waterkering aanwezig, die door het rechttrekken van de dijk varieert in locatie binnen het dijkprofiel. De bekleding van het buitentalud bestaat veelal uit een (eventueel ingegoten) kreukelberm, een ondertalud van steenzetting, een berm van asfalt, een boventalud, kruin en binnentalud van gras. Veel van de harde bekleding is in de jaren '70 en '80 aangelegd, wat inhoudt dat veel van deze bekledingen vervangen moeten worden. De asfaltbekleding zal veelal aan het eind van zijn levensduur zijn voor 2050. Op locaties waar asfaltbekledingen laag (onder de freatische lijn) op het talud liggen, ontstaat mogelijk eerder een veiligheidsopgave door nieuwe inzichten in het falen van asfalt, beschreven als het nieuwe mechanisme Asfalt S-Profiel (ASP). Falen van de steen- en grasbekledingen op het buitentalud zijn ook dominante mechanismen in dit gebied.

Piping speelt in het waddengebied lokaal een rol ter plaatse van oude geulenafzettingen onder de dijk die voor aanleg van de dijk weinig gemigreerd zijn over de tijd. Op deze locaties is de gelaagdheid van het voorland voor de dijk beperkt, waar in de rest van het

waddengebied de gelaagdheid zeer groot is, en daarmee de kans op piping klein. Deze kennis is echter recent ontwikkeld, en kon binnen LBO1 nog niet overal toegepast worden.

Verder kenmerken de keringen aan de zuidkant van het waddengebied zich door de aanwezigheid van kwelders. Hierop groeit een zoutminnende vegetatie. De kwelders staan vaak alleen tijdens (kleine) stormen onder water. Kwelders hebben een relevante invloed op de geohydrologie en op het reduceren van golven.

4.2 Autonome ontwikkelingen

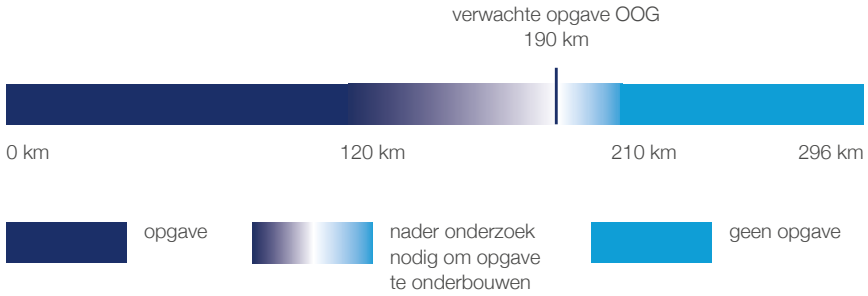
Voor de veiligheidsopgave tot 2050 zijn autonome ontwikkelingen van belang. Langs de Wadden betreft dit veroudering, klimaatverandering, morfologische- en kennisontwikkelingen. Bodemdaling door oxidatie, zetting en gaswinning speelt lokaal een rol. Veroudering van asfaltbekleding leidt in het waddengebied tot 2050 tot een extra opgave.

Door het indammen van delen in het waddengebied, zoals de Lauwerszee en de Zuiderzee, is de komberging van de Waddenzee afgenomen. Dit leidt tot een andere evenwichtssituatie van de aanwezige platen en geulen, die zich tot op heden nog aan het aanpassen zijn. Hierdoor heeft de Waddenzee zogenoemde ‘zandhonger’. De Waddenzee hoogt zichzelf langzaam op door het proces van sedimentatie. Dit proces is, in elk geval tot 2050, sterker dan de verwachtte zeespiegelstijging, waardoor de golfhoogte naar verwachting niet significant toeneemt door golfbreking op het (hogere) voorland. Lokaal is door gaswinning (uit het verleden) ook sprake van bodemdaling, mogelijk in combinatie met aardbevingen.

Verwacht wordt dat kennisontwikkeling rondom waterstandsstatistiek leidt tot een toename van de (reken)waterstand onder stormcondities aan de westkant van de Waddenzee, en een afname aan de oostkant. De impact van infragravity waves en kennisontwikkelingen rondom golven in het gebied is onbekend.

4.3 Verwachte opgave tot 2050

Het totaal aantal kilometers primaire waterkering in het waddengebied is ongeveer 300 km. De verwachte opgave bedraagt 190 km. Hiervan is circa 56 km in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). De lengte van kering waar nader onderzoek nodig is om de veiligheidsopgave te onderbouwen is 90 kilometer. Op circa 30 km is in OOG een versterkingsopgave ten gevolge van veroudering van asfalt geconstateerd. In onderstaande figuur is het resultaat van de OOG voor de Wadden weergegeven.



Figuur 3 Resultaat opgave- en ontwikkelbehoefte gesprekken Wadden

4.4 Beter bepalen van de opgave

De overstromingskans wordt bepaald door falen van bekledingen op het buitentalud. In de beoordeling is lokaal ook een significante bijdrage aan de overstromingskans geconstateerd door piping.

Hieronder is een samenvatting gegeven van diverse mogelijkheden om de opgave voor dit gebied beter vast te kunnen stellen. Deze aspecten zijn tijdens de OOG ter tafel gekomen en zijn meegewogen bij het bepalen van de bandbreedte van de opgave tot 2050.

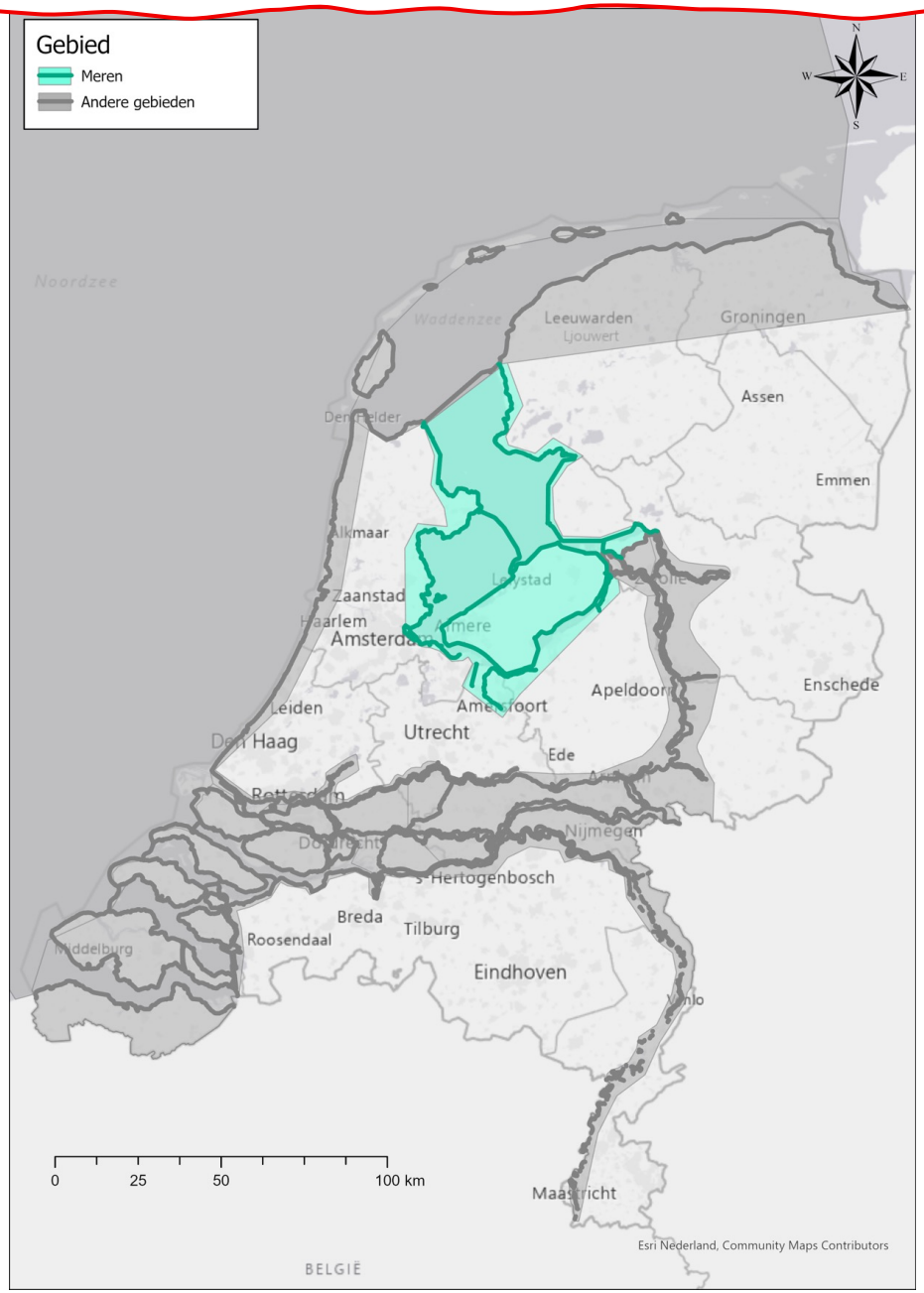
Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
A: Meer data en beter schematiseren	
Lokaal schematiseren en bepalen sterkteparameters. Voor dit gebied zijn specifiek waterspanningen en aanwezigheid van geulen relevant.	Dit zal naar verwachting leiden tot grote vermindering van de opgave.
Voorliggende gebieden, zoals kwelders, havendammen, voorlanden en keringen van andere beheerders meenemen.	Dit zal naar verwachting leiden tot grote vermindering van de opgave.
B: Meer inzicht fysica en betere modellen	
Toepassen actuele kennis bekledingen. Bijvoorbeeld gecombineerd rekenen voor GEBU/GEKB. Het probabilistisch en tijdsafhankelijk berekenen van de sterkte van bekledingen.	Aanzienlijk. Op verscheidene plekken in het waddengebied wordt de grasbekleding op het buitentalud afgekeurd, maar is er geen hoogteopgave. Wanneer de grasbekleding niet in de golfklapzone ligt, kan gecombineerd rekenen voor GEBU en GEKB de opgave voor de grasbekleding op het buitentalud wegnemen.
Meenemen van doordringing van infragravity waves.	Dit leidt tot een onbekende vergroting van de opgave voor bekledingen en hoogte.
Meer inzicht in asfaltbekleding zoals onderzoek naar lage temperatuur asfalt en naar kans van optreden het faalmechanisme ASP (Asfalt S-Profiel).	Beperkt: relevant voor versterkingsmaatregelen. Dit onderzoek leidt naar verwachting niet tot een vermindering van het aantal te versterken kilometers, omdat het aanwezige asfalt voor 2050 aan het eind van zijn levensduur is.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
C: Integrale beschouwing van de kering en het faalpad	
Integraal beschouwen van buitenbekleding. Voor een deel van de trajecten ligt de representatieve waterstand met lage terugkeertijden net boven de berm. Voor de bekledingsopgave is het relevant om inzicht te krijgen in het effect van golfklappen bij een dergelijke waterstand in relatie tot overgangen tussen bekledingstype. Mogelijk liggen de zwaarste belastingen door golfklappen lager dan waar nu rekening mee wordt gehouden.	Deze ontwikkeling geeft een onbekende vermindering van de GEBU-opgave.
Beschouwing van het volledige faalpad van de waterkering. Dus meenemen sterkte van onderlagen en dijkkern (inclusief aanwezigheid van (oude) inliggende keringen) bij de bepaling van de overstromingskans.	Dit zal naar verwachting leiden tot grote vermindering van de versterkingsopgave. Dit wordt gezien als een van de belangrijkste ontwikkelingen op dit moment.
Rekenen met een realistisch waterstandsverloop en faseverschil tussen de piek van de storm en piek van de waterstand. Enerzijds is de stormduur langer dan nu meegerekend wordt, anderzijds is het faseverschil in sommige delen van het waddengebied, met name de Eems-Dollard, groot.	Dit zal naar verwachting met name in de Eems-Dollard leiden tot grote vermindering van de versterkingsopgave.
Integrale beschouwing traject.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.
Integraal beschouwen onzekerheden.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.
D: Beleidskeuzes die opgave kunnen beïnvloeden	



5. Meren

5 Meren



5.1 Kenmerken gebied

Het merengebied beslaat het IJsselmeer, Markermeer, Ketelmeer, IJmeer, Gooimeer, Eemmeer, de Eem en de Veluwerandmeren en dus (delen van) de arealen van HHNK, WDOD, WSZZ, WSVV, AGV, WF en RWS. In de afgelopen 100 jaar is er veel veranderd in het gebied. In 1933 is de Zuiderzee afgesloten door de aanleg van de Afsluitdijk en werd het IJsselmeer gevormd. In 1942 is de Noordoostpolder drooggelegd en in 1968 is de Flevopolder. In 1975 is het Markermeer afgesplitst van het IJsselmeer door de aanleg van de Houtribdijk. De Afsluitdijk valt onder het gebied Wadden en wordt niet in dit hoofdstuk beschouwd. De Houtribdijk is tweezijdig kerend en daarom ook vanuit beide zijden genormeerd. Dit heeft zijn weerslag op de totale lengte van primaire keringen waarin de Houtribdijk twee keer is meegenomen. In de dijktrajecten langs de meren bevinden zich meerdere kunstwerken zoals sluizen, inlaten, duikers en gemalen die verder niet bepalend zijn voor de veiligheidsopgave en daarom niet zijn beschouwd.

De veiligheidseisen van een aantal trajecten rondom Flevoland zijn in 2017 verhoogd. Voor de meeste trajecten zijn de veiligheidseisen min of meer gelijk gebleven. Van een aantal trajecten zijn de eisen verlaagd.

De ondergrond in het merengebied laat zich niet makkelijk beschrijven. De dikte van de Holocene deklaag die uit veen en/of klei bestaat varieert sterk. Langs het Markermeer zijn dikke klei en veenpakketten aanwezig. De deklaag aan de oostkant van het IJsselmeer is dun. In het noordoosten van het IJsselmeer bevinden zich onder een (dunne) deklaag holocene getijdeafzettingen. De stroming in de meren is beperkt waardoor er op de bodem een significante hydraulische weerstand bevindt die effect heeft op de waterspanningen onder de kering.

De dijken gelegen aan de voormalige Zuiderzee zijn aangelegd en (tot 1933) onderhouden als zeedijk en kunnen daardoor enigszins overgedimensioneerd zijn.
De dijkopbouw bestaat voornamelijk uit klei, maar lokaal bevindt zich puin, zand en ander materiaal in de dijk wat de sterkte van de kering kan beïnvloeden.

In voorgaande toetsrondes zijn veel dijken langs het Markermeer (HHNK) afgekeurd en naar aanleiding van het toetsresultaat versterkt. Dat geldt ook voor de verbindende waterkering Houtribdijk.

De dijken van het ingepolderde Flevoland zijn relatief recent opgebouwd en zijn (grotendeels) aangelegd op een zandcunet. Hiervoor zijn kleilagen afgegraven tot een laag van 1 meter boven de pleistocene zandlaag voor een waterdichte afsluiting. De dijkkern bestaat uit zand, gelegen tussen kleileemdammen en is afgedekt met een kleilaag. Doordat het zandcunet of zandlichaam breder is dan de dijkbekleding, kan buitenwater makkelijk intreden, waarbij wordt opgemerkt dat op veel locaties in de loop van de tijd een significante hydraulische weerstand op het zand heeft gevormd. Door drainage en een kwelsloot wordt kwelwater afgevoerd.

De dijkbekleding rond de meren bestaat onder andere uit (een combinatie van) een stortsteenberm, (een) steenzetting van natuursteen (zoals Noorse steen en basalt) en een grasbekleding. Lokaal worden asfaltbekledingen aangetroffen. Representatieve belastingen in het merengebied worden bepaald door opzet en golven veroorzaakt door storm. Ten opzichte van de kust worden de hydraulische belastingen in de meren gekarakteriseerd door relatief korte strijklengtes en relatief ondiep water.

Op trajecten met hoge golfbelastingen wordt de overstromingskans bepaald door falen van de buitenbekleding. In de eerste beoordelingsronde is ook een veiligheidsopgave rondom macrostabiliteit geconstateerd. Op trajecten waar de veiligheidseisen in 2017 zijn verhoogd (Flevoland) is er een opgave op erosie van de kruin en het binnentalud. Een deel van deze keringen is momenteel in versterking.

5.2 Autonome ontwikkelingen

Relevante autonome ontwikkelingen in het merengebied betreffen het meerpeil en kennisontwikkeling. Op enkele trajecten met asfaltbekledingen speelt veroudering een rol. Bodemdaling heeft geen significant effect op de versterkingsopgave.

Een belangrijk aspect bij het opstellen van de databases met hydraulische belastingen en statistiek is het peilbeheer van Markermeer en IJsselmeer. Het huidige beleid gaat ervan uit dat tot 2050 geen peilverhoging zal plaatsvinden. Er wordt geen verandering in hydraulische belastingen (naast eventuele beleidskeuzes betreffende meerpeil) voor 2050 verwacht. Na 2050 wordt wel een meerpeilverandering voorzien. Dit kan effect hebben op versterkingsprojecten die (kort) voor 2050 worden gedefinieerd.

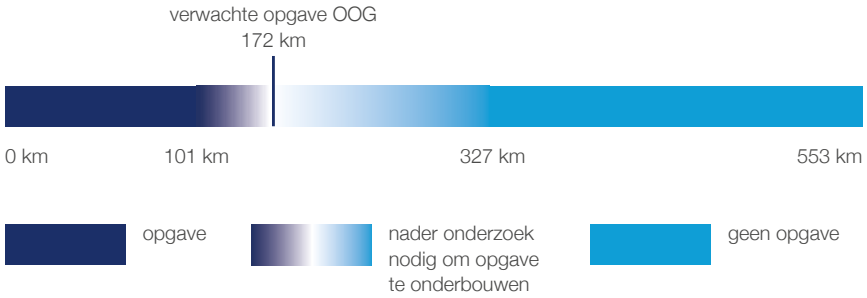
Verwacht wordt dat de versterkingsopgave door kennisontwikkeling significant kan worden verkleind wanneer faalmechanismen, het traject en watersysteem integraal worden beschouwd. Doorbraakprocessen en bresgroei van de verbindende keringen hebben effect op hydraulische belastingen

Op basis van het historisch gedrag wordt, met uitzonderingen van de trajecten waar de veiligheidseisen in 2017 zijn verhoogd, tot 2050 een beperkte veiligheidsopgave verwacht.

5.3 Verwachte veiligheidsopgave tot 2050

De totale lengte van de primaire waterkeringen in het merengebied is ongeveer 553 km. De verwachte opgave bedraagt 172 km. Hiervan is circa 42 km in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). De lengte van de kering waar nader onderzoek nodig is om de veiligheidsopgave te onderbouwen bedraagt 226 kilometer en is langs de meren relatief groot in vergelijking tot de te verwachte opgave. De grote lengte met nader onderzoek wordt veroorzaakt door een beperkt aantal trajecten die zijn met een voorlopig oordeel zijn beoordeeld en waar te weinig gegevens aanwezig zijn om de verwachte opgave in OOG te onderbouwen.

In onderstaande figuur is het resultaat van de OOG voor de meren weergegeven.



Figuur 4 Resultaat opgave- en ontwikkelbehoefte gesprekken Meren

5.4 Beter bepalen van de opgave

De overstromingskans in het merengebied wordt bepaald door macrostabiliteit binnenwaarts, zetsteen en voornamelijk bij de polders gras erosie buitentalud. Lokaal lijkt piping een rol te spelen alhoewel dit op basis van bewezen sterkte (vroeger stond de waterstand aanzienlijk hoger) plus een redelijk constant meerpeil, niet volgens verwachting is. Verder kent een aantal dijken in het merengebied een aanzienlijke vervorming. Dit betekent echter niet direct dat de macrostabiliteit binnenwaarts onvoldoende is.

De volgende aspecten zijn genoemd in de OOG als belangrijk voor het verkrijgen van een realistisch beeld van de opgave tot 2050.

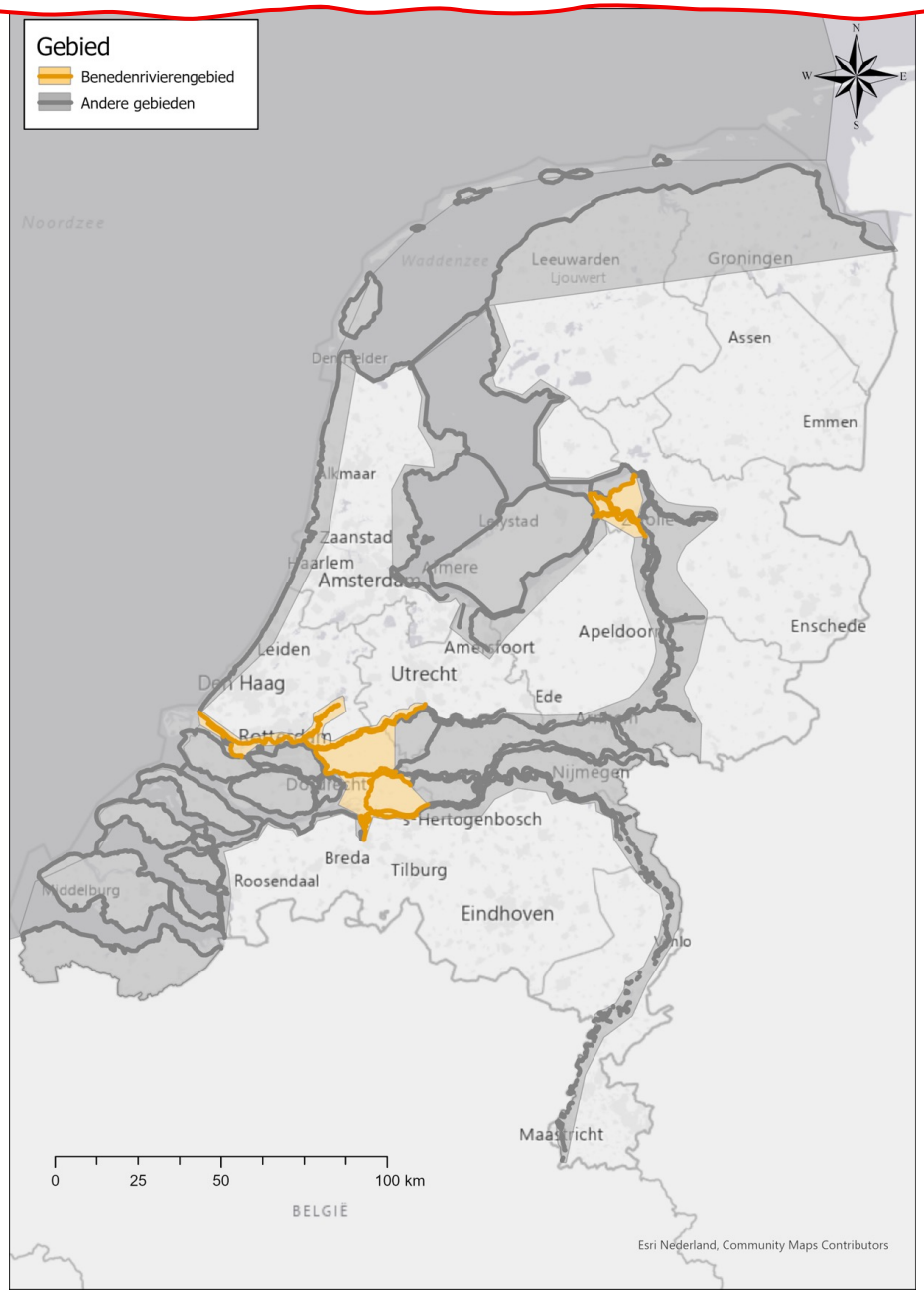
Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
A: Meer data en beter schematiseren	
Lokaal bepalen sterkte parameters.	Voor Zuiderzeedijken beperkt. De ondergrond en opbouw van de dijken in het merengebied kennen aanzienlijke ruimtelijke variatie. In vergelijking met andere ontwikkelingen/kennis is de verwachting dat de impact hiervan beperkt is.
B: Meer inzicht fysica en betere modellen	
Toepassen actuele kennis rondom macrostabiliteit zoals probabilistische analyse stabiliteit binnentalud.	Groot. In combinatie met bewezen sterkte en vooral bij dikkere pakketten bestaande uit meerdere lagen kan dit een aanzienlijke aanscherping geven.
Toepassen/benutten actuele inzichten GEBU en GEKB.	Onbekend of dit tot een grote, middel of kleine aanscherping zal leiden van de gras bekleding opgave. Onder actuele inzichten vallen o.a. gecombineerd rekenen met GEBU en GEKB, een realistische rekenwaarde voor golfklappen, tijdsverloop van waterstand en golven en een open versus gesloten zode in relatie tot de lengte-effect-factor en het meenemen van vervolgprocessen.
Nadere beschouwing van grondgedrag voor macrostabiliteit. In huidige analyses is uitgegaan van volledig ongedraineerd gedrag in klei en veenlagen. Gedraineerd gedrag lijkt passender gegeven de geringe veranderingen in waterspanningen tijdens hoogwater.	Groot. Het verschil in sterkte tussen ongedraineerd en gedraineerd gedrag is erg groot.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
C: Integrale beschouwing van de kering en het faalpad	
Bewezen sterkte (ofwel overleefde belastingen). In de tijd voor aanleg van de Afsluitdijk hebben de dijken rond de voormalig Zuiderzee hogere waterstanden gekeerd en zijn nadien versterkt.	Groot. Uit metingen blijkt bijvoorbeeld dat waterspanningen in en onder de dijk maar in beperkte mate veranderen bij verhoogd meerpeil (STBI).
Integraal beschouwen faalmechanisme bekledingen.	Groot: Het integraal beschouwen van bekleding heeft effect op de opgave van bekledingen. Door rekening te houden met de sterkte van onderlagen en keileem in de kering kan de overstromingskans nauwkeuriger (significant lager) worden onderbouwd.
Integraal beschouwen faalmechanisme macrostabiliteit.	Groot in combinatie met een bewezen sterkte analyse en probabilistische analyses. Het integraal beschouwen van de geohydrologische situatie en het meenemen van tijdsafhankelijkheid (kort duur belasting) heeft effect op de overstromingskans door geotechnische faalmechanismen.
Integrale beschouwing traject.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.
Integraal beschouwen onzekerheden.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.
D: Beleidskeuzes die de opgave kunnen beïnvloeden	
Het meerpeil wordt beleidsmatig vastgesteld.	Groot. Aanpassing van het meerpeil kan een grote invloed hebben op de opgave in het merengebied. Deze beleidskeuze is momenteel niet voorzien en is niet opgenomen in de bandbreedte.



6. Benedenrivieren-gebied

6 Benedenrivierengebied



6.1 Kenmerken gebied

In de figuur links is in oranje het benedenrivierengebied aangegeven. Een denkbeeldige grens tussen boven- en benedenrivierengebied volgt globaal een lijn tussen de plaatsen Gorinchem, Schoonhoven en Zwolle. De keringen in het benedenrivierengebied worden beheerd door de waterschappen rivierenland, Brabantse Delta. Hollandse Delta, Drents Overijselse Delta en de hoogheemraadschappen van Stichtse Rijnlanden, Schieland en de Krimpenerwaard, Delfland en Rijkswaterstaat.

Het benedenrivierengebied bestaat uit de Rijn-, Maas-, Ijssel- en Vechtdelta, globaal het noordelijk en westelijk deel van het rivierengebied. In het benedenrivierengebied worden de representatieve belastingen niet alleen gedomineerd door hoge rivierafvoer maar ook significant beïnvloed door storm op zee en meren. In de Rijn-Maasdelta speelt ook de doorwerking van het getij. De belastingkarakteristieken van de verschillende gebeurtenissen (storm, hoogwatergolven op Rijn, Vecht en Maas) zijn verschillend en gedeeltelijk gecorreleerd.

Dit gebied heeft over het algemeen een dikke deklaag bestaande uit overwegend veen en organische en siltige klei en lokaal zandige insluitingen. Lokaal is de deklaag bij rivierduinen of historische doorbraken (geulen) minder dik. Door de bodemopbouw van dikke slappe lagen treden relatief grote autonome zettingen op in dit gebied (dijk en achterland). In het zuidwestelijk deel van de Maas-Rijn delta komen ook getijdeafzettingen voor. De deklaag is hier in het algemeen iets minder dik.

De historische context en het moment van de laatste dijkversterking bepaalt de eigenschappen van de kering. Deze varieert sterk per traject. De keringen zijn meestal hoog genoeg doordat veel keringen in het verleden, voor de aanleg van dammen en stormvloedkeringen, hoge belastingen hebben gekeerd. Golfbelastingen zijn door korte strijklengtes relatief beperkt. Falen van bekledingen is alleen relevant op locaties met grote strijklengtes en meestal niet dominant voor de overstromingskans. Piping is een relevant faalmechanisme op locaties waar de deklaag dun of afwezig is. In de IJssel-Vechtdelta

komen deze situaties vaker voor dan in de monding van de Rijn en Maas. De overstromingskans en veiligheidsopgave wordt vooral bepaald door binnenwaartse macrostabiliteit.

Voor het benedenrivierengebied wordt de opgave grotendeels bepaald door macrostabiliteit. Daarnaast zijn of ontstaan op sommige delen veiligheidsopgaven door piping en onvoldoende hoogte.

6.2 Autonome ontwikkelingen

Voor de verwachte veiligheidsopgave tot 2050 moet in het benedenrivierengebied rekening worden gehouden met bodemdaling, klimaatverandering (wijziging hydraulische belastingen) en kennisontwikkelingen. De inschatting is dat verouderingsprocessen niet significant bijdragen aan de veiligheidsopgave.

Er is een sterke relatie tussen de dikte van de deklaag en de bodemdaling. Wijzigingen van het polderpeil achter de keringen beïnvloedt de bodemdaling. Op locaties met een dikke deklaag zoals de Alblasserwaard en de polder Mastenbroek is de bodemdaling relevanter voor de toekomstige opgave dan klimaatverandering.

Door klimaatverandering zullen hydraulische belastingen in de toekomst stijgen. Tot 2050 zijn deze nog relatief beperkt en redelijk voorspelbaar. Na 2050 neemt de onzekerheid toe en laten analyses een snellere stijging van zeewaterstand zien. Voor de Rijn-Maasdelta wordt dat representatieve waterstanden met circa 20 cm zullen stijgen. Dichter bij de kust wordt deze stijging veroorzaakt door een zeespiegelstijging (korte hoogwatergolf). Richting het oosten wordt de stijging van de waterstand meer veroorzaakt door toename rivierafvoer. Het meerpeil op het IJsselmeer wordt pas na 2050 verhoogt. De stijging van hydraulische belastingen in de IJsseldelta is daardoor naar verwachting beperkt. Beleidsbeslissingen rondom stormvloedkeringen en systeemwerking hebben een significante impact op de waterstand.

De impact van klimaatverandering op wind en daarmee golfbelastingen is onbekend. Generiek kan worden opgemerkt dat wind en golfbelastingen in het rivierengebied in de huidige rekenmodellen wordt overschat. Verwacht wordt dat kennisontwikkeling de effecten van klimaatverandering ruimschoots compenseert.

Verouderingsprocessen van waterkeringen hebben in het benedenrivierengebied geen significante impact op veiligheidsopgave. Lokaal kunnen door morfologische ontwikkelingen van rivieren veiligheidsopgaven door zettingsvloeiing ontstaan.

6.3 Verwachte veiligheidsopgave tot 2050

De totale lengte aan primaire waterkeringen in het benedenrivierengebied is ongeveer 370 km. De verwachte opgave bedraagt 159 km. Hiervan is circa 68 km in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). De lengte van kering waar nader onderzoek nodig is om de veiligheidsopgave te onderbouwen is 64 kilometer. In onderstaande figuur is het resultaat van de OOG voor de benedenrivieren weergegeven.



Figuur 5 Resultaat opgave- en ontwikkelbehoefte gesprekken benedenrivieren

6.4 Nauwkeuriger bepalen opgave

In de gesprekken bij de waterschappen is stilgestaan bij de mogelijkheden om met nader onderzoek een scherp en realistisch beeld te krijgen van de opgave tot 2050.

Ondergenoemde punten kwamen ter sprake bij alle gesprekken met waterschappen in het benedenrivierengebied en zijn meegewogen bij het bepalen van de genoemde bandbreedte en verwachting.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
A: Meer data en beter schematiseren	
Gedetailleerd grondonderzoek en langjarige peilbuismonitoring om een goed beeld te krijgen van de opbouw en sterkte-eigenschappen van de ondergrond, weerstand van het voorland, vooroever en rivierbodem en daardoor op de waterspanningen.	Groot. Waterspanningen vormen de belasting voor de mechanismen macrostabiliteit en piping. Hydraulische weerstand van het voorland heeft ook effect op de kwelweglengte voor een pipinganalyse.
Beter bepalen dijkopbouw en sterkte-eigenschappen met veld- en laboratoriumonderzoek en nauwkeuriger schematiseren van dijk en waterspanningen bij stabiliteitsanalyses.	Groot. De sterkteeigenschappen van dijk en ondergrond hebben directe impact op de overstromingskans door macroinstabiliteit.
Scherper schematiseren waterspanningen door infiltratie bij overloop & overslag. Toepassen inzichten KIA-onderzoek naar stabiliteit bij overslag.	Beperkt, met name lokaal. In de OOG is aangehouden dat het mechanisme ‘stabiliteit bij overslag’ niet dominant is ten opzichte van ‘stabiliteit zonder overslag’. Echter stabiliteit bij overslag kan wel dempend werken op de te verwachten aanscherping van de stabiliteitsopgave door meer inzicht in fysica.
B: Meer inzicht fysica en betere modellen	
Cumulatieve overslagbenadering i.p.v. kritiek overslagdebiet.	Lokaal groot, bij overloopsituaties is het effect kleiner.
Toepassen recente inzichten rondom piping (weerstand voorland, meerlaagsheid, anisotropie, sterkte fines). Meenemen sterkte deklaag bij opbarsten.	Beperkt. Piping is vooral in de Ijssel-Vechtdelta relevant. Bij dijken met een relatief dikke deklaag maar waarbij opbarsten op basis van bestaande rekenregels niet kan worden uitgesloten. Meer kennis rondom weerstand rivierbodem, vooroever en voorland gewenst. Met DgeoFlow analyses zal naar verwachting de scope reduceren.
Toepassen actuele kennis rondom stabiliteit (probabilistische analyses).	Aanzienlijk. Vooral bij dikkere pakketten bestaande uit meerdere lagen kan dit een aanzienlijke aanscherping geven. Verkennende berekeningen zoals analyses langs de Lek laat zien dat aanzienlijke winst is te behalen.
Rondom graserosie zijn verschillende kennisontwikkelingen relevant: (i) meer passende Hydraulische Belastingen voor bekledingen (in plaats van Q-variant), (ii) probabilistische beschrijving van de sterkte van de grasmat in plaats van hanteren rekenwaarde (zowel GEKB als GEBU) en (iii) nieuwe inzichten/ aanpak ten aanzien van de combinatie van de mechanismen GEKB en GEBU (meenemen correlatie tussen mechanismen).	Aanzienlijk. De opgave door GeBu zal grotendeels verdwijnen. Gecombineerd rekenen GeBu/ GEKB heeft alleen impact als mechanismen gecorreleerd zijn, dus als waterstanden stormgedreven zijn, anders niet toepasbaar.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
C: Integrale beschouwing van de kering en het faalpad	
Het meenemen van vervolgprocessen en tijdsafhankelijkheid.	Groot. Bij dijken met een korte hoogwatergolf (stormgedreven) Bij dijken met zandkern en overslag kleiner. Lokaal: bij brede dijken of dijken met een hoog voorland
Bewezen sterkte waarbij integraal naar gedrag van de kering wordt gekeken.	Aanzienlijk. Voor dijken met een vlakke fragility curve, zoals dijken langs Hollandsche IJssel en Zwarte Water kan het toepassen van bewezen sterkte effect hebben op de stabiliteitsopgave. Nieuwe inzichten waarbij het gedrag van de kering in een dergelijke analyse nog meer centraal wordt gesteld zouden een aanzienlijke aanscherping kunnen opleveren.
Integrale beschouwing traject.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.
Integraal beschouwen onzekerheden.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
D: Beleidskeuzes die de opgave kunnen beïnvloeden	
Systeemkeuzen.	Groot, Sluitprotocollen voorliggende keringen Hollandsche IJsselkering: GEKB en STBI-dominant Algera Kering: Gesloten of open kering heeft grote invloed. Functioneren Ramspolkering, prestatie-eis verbindende kering.



7. Bovenrivieren-gebied

7 Bovenrivierengebied



7.1 Kenmerken gebied

Het bovenrivierengebied, blauw in bovenstaande figuur, bestaat uit de bovenstrooms gelegen delen van de Rijn en Maas waar de waterstand wordt gedomineerd door rivierafvoeren en er geen sprake is van getij-invloeden. Kenmerkend is de lange duur van de hoogwatergolf. De keringen in het bovenrivierengebied worden beheerd door de waterschappen Limburg, Aa en Maas, Brabantse Delta, Rivierenland, Rijn en IJssel, Vallei en Veluwe, Drents Overijsselse Delta, het Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden en Rijkswaterstaat.

In het bovenrivierengebied is de deklaag aanmerkelijk dunner en minder organisch dan in het benedenrivierengebied. De dikte van de deklaag neemt stroomafwaarts toe. Zandbanen geven locaties van voormalige riviergeulen aan. Nabijgelegen hoge gronden zorgen voor complexe geohydrologische situaties.
Soms wordt de Zuidelijke Maasvallei nog als apart deelgebied genoemd binnen het bovenrivierengebied. De Zuidelijke Maasvallei heeft ten opzichte van de rest van het bovenrivierengebied een meer grindhoudende bodem, met name verder stroomopwaarts, relatief korte dijktrajecten en een overwegend beperktere overstromingsdiepte in geval van falen.

In de jaren ‘90 zijn de meeste dijken in het bovenrivierengebied zwaar belast geweest, tijdens het hoogwater van 1993 en 1995. Er heeft geen overstroming plaatsgevonden maar er was wel reden voor evacuatie van de Bommelerwaard, de Betuwe ennhet Land van Maas en Waal. Dit was aanleiding voor een grootschalige dijkversterkingsronde: het Deltaplan Grote Rivieren. Veel dijken in het bovenrivierengebied zijn in deze periode onder een noodwet in korte tijd verhoogd en verbreed waarbij vaak het principe van de getailleerde dijk is toegepast: een dijk met steile boventaluds en flauwere ondertaluds. De dijken met grotere kerende hoogtes kregen een binnenberm om de weerstand tegen instabiliteit en piping te vergroten. De opbouw van de dijken is wisselend: dijken met een kleikern, een zandkern of een heterogene opbouw van zand en klei en resten van verhardingslagen komen voor.

Tot eind vorige eeuw is de Maas bovenstrooms van Cuijk nauwelijks bedijkt. Na de hoogwaters van 1993 en 1995 zijn verschillende maatregelen uitgevoerd en rondom een aantal dorpen en steden dijken aangelegd. Deze kregen in 2005 de status van primaire keringen die in eerste instantie moesten overstromen om te hoge waterstanden benedenstrooms te voorkomen. Deze eis is bij de nieuwe normen voor de meeste locaties komen te vervallen.

De wijziging van de norm in 2017 heeft voor een aantal trajecten in het bovenrivierengebied tot significante verzwaring van de eisen geleid. Met name langs de Maas zijn keringen hierdoor te laag.

Voor vrijwel het gehele bovenrivierengebied wordt de overstromingskans in belangrijke mate bepaald door falen als gevolg van piping en macrostabiliteit. Voor trajecten langs de Maas is door de nieuwe norm (sterke verhoging van de veiligheidseisen) op grote strekkingen een hoogteopgave. Veel van deze trajecten zijn inmiddels in versterking.

7.2 Autonome ontwikkelingen

Tot 2050 zijn er verschillende ontwikkelingen die van invloed kunnen zijn op de veiligheidsopgave in het bovenrivierengebied. Klimaatveranderingen en kennisontwikkelingen zijn het meest relevant.

In de toekomst worden hogere waterstanden verwacht op de Maas als gevolg van een toename van neerslag in het stroomgebied. Tot 2050 zal dat naar verwachting leiden tot een waterstandsverhoging van 2 à 3 decimeter. Rivierverruimende maatregelen binnen de huidige kaders (bv zonder grootschalige dijkverleggingen) hebben lokaal een waterstandverlagend effect van 1 à 2 decimeter.

Voor de ontwikkeling van hydraulische belastingen in de tijd op de Rijntakken spelen verschillende aspecten een rol. Klimaatverandering leidt tot meer neerslag in het stroomgebied van de Rijn. Dit heeft effect op de afvoerstatistiek bij Lobith. Hogere afvoeren zullen vaker voorkomen. Vanaf een bepaalde afvoer wordt verondersteld dat waterkeringen in Duitsland overstromen waardoor de afvoer bij Lobith wordt begrensd op circa 18.000 m^3/s. Door de regelwerken op de splitsingspunten wordt de afvoer verdeeld over de Rijntakken. Het huidige beleid daarbij is dat de Lek wordt ontzien waardoor het grootste deel van de hogere afvoer ten gevolge van klimaatverandering via de Waal naar de Noordzee stroomt. Verwacht wordt dat klimaatverandering in 2050 leidt tot een stijging van representatieve waterstanden op de Waal en IJssel van 0 – 20 cm ten opzichte van 2023. Toekomstige maatregelen in het rivierbed, bijvoorbeeld in het kader van Integraal RivierManagement, hebben invloed op de lokale afvoerwaterstand relatie. Het gaat daarbij om verlagingen in de orde van centimeters tot een decimeter.

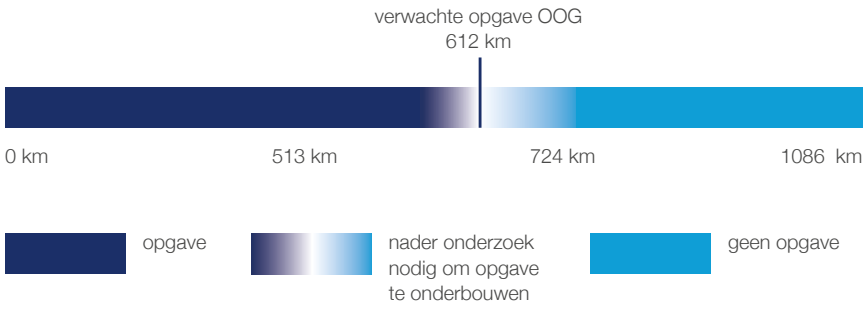
Rondom golfbelastingen vinden kennisontwikkelingen plaats. In de modellen voor het bepalen van golven op rivieren zit een aantal conservatieve aannamen. De overstromingskans wordt niet bepaald door golfgerelateerde mechanismen. De kennisontwikkelingen om de golfbelastingen scherper (minder conservatief) te bepalen hebben daardoor geen impact op de overstromingskans.

Ook rondom sterkte vinden autonome ontwikkelingen plaats. Bodemdaling en verouderingsprocessen hebben tot 2050 geen significante invloed op de veiligheidsopgave. Door kennisontwikkelingen rondom de faalmechanismen, piping en macrostabiliteit kan de opgave in de toekomst steeds scherper worden bepaald. Omdat in het verleden vaak conservatieve aannamen rondom kennisonzekerheden zijn gedaan, zal kennisontwikkeling in de praktijk naar verwachting leiden tot een kleinere opgave. Relevante kennisontwikkelingen waarmee de opgave nauwkeuriger kan worden bepaald, worden in onderstaande tabel weergegeven.

7.3 Verwachte veiligheidsopgave tot 2050

De totale lengte aan primaire waterkeringen in het benedenrivierengebied is ongeveer 1086 km. De verwachte opgave bedraagt 612 km. Hiervan is circa 317 km in versterking (verkenning, planuitwerking of realisatie). De lengte van kering waar nader onderzoek nodig is om de veiligheidsopgave te onderbouwen is 211 kilometer.

In onderstaande figuur is het resultaat van de OOG voor de bovenrivieren weergegeven.



Figuur 6 Resultaat opgave- en ontwikkelbehoefte gesprekken bovenrivieren

7.4 Beter bepalen opgave

In de gesprekken bij de waterschappen met beheergebieden in het bovenrivierengebied is stil gestaan bij de mogelijkheden om met nader onderzoek een realistisch beeld te krijgen van de opgave tot 2050. Hierbij is het uitgangspunt dat alle bestaande kennis en nieuwe kansrijke kennisontwikkeling worden meegenomen, voor zover praktisch uitvoerbaar. Ondergenoemde punten kwamen ter sprake bij alle gesprekken met waterschappen in het bovenrivierengebied.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
A: Meer data en beter schematiseren	
Gedetailleerd grondonderzoek en langjarige peilbuismonitoring om een goed beeld te krijgen van de opbouw en sterkte-eigenschappen van de ondergrond en de waterspanningen.	Groot. Met name langs de IJssel, de Waal en langs het Pannerdens Kanaal is veel kennis opgehaald van de respons van de stijghoogte bij opgetreden hoogwaterstanden in de afgelopen jaren. Deze informatie is al verwerkt in een aantal dijkversterkingsontwerpen en laat zien dat een forse aanscherping mogelijk is op de pipingopgave en binnenwaartse stabiliteitsopgave.
Realistisch geohydrologisch model rekening houdend met voorlandweerstand in uiterwaarden en bodem van strangen.	Groot. Met name de combinatie van voorlandweerstand met aannemelijke waarden voor meerlaagsheid en doorlatendheidsanisotropie kan een aanmerkelijke aanscherping geven op de pipingopgave en binnenwaartse stabiliteitsopgave.
B: Meer inzicht fysica en betere modellen	
Probabilistische analyses in plaats van semi-probabilistische analyses met default kalibratieformules.	Aanzienlijk. Verkennende analyses voor trajecten langs de Lek, Waal en Maas hebben laten zien dat hiermee een aanzienlijke aanscherping is te bereiken. Verwachting wordt dat het effect bij een dikker slap lagenpakket toeneemt (dus richting benedenrivierengebied). In situaties met hoog voorland kan met probabilistische analyses een nauwkeuriger opgave worden bepaald doordat de situaties waarbij geen water tegen de dijk staat niet mee worden genomen.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
B: Meer inzicht fysica en betere modellen	
Inzichten sterkte van kleikern. Het gaat hier om twee aspecten: sterkte van grond in de initieel onverzadigde zone en sterkte van transitional soils in de kleikern van de dijk. De laatste tijd is er via praktijkproeven en labonderzoek veel kennis verkregen over het effect van zuigspanningen in de initieel onverzadigde zone en over dilatant ongedraineerd gedrag van de transitional soils.	Lokaal kan het effect groot zijn. Uit de eerste toepassingen blijkt dat het effect op de stabiliteitsopgave sterk afhankelijk is van de dijkopbouw (alleen van toepassing op homogene kleikernen). Genoemde aspecten hebben namelijk grote invloed op ondiepe glijvlakken.
Inzichten in sterkte van deklaag bij opdrijven voor macrostabiliteit.	Lokaal kan het effect groot zijn.
Scherper schematiseren waterspanningen door infiltratie bij overloop & overslag. Toepassen inzichten KIA-onderzoek naar stabiliteit bij overslag.	Lokaal kan het effect groot zijn. In de OOG is aangehouden dat het mechanisme ‘stabiliteit bij overslag’ niet dominant is ten opzichte van ‘stabiliteit zonder overslag’. Er wordt verwacht dat stabiliteit zonder overslag de stabiliteitsopgave zal domineren. Echter, stabiliteit bij overslag kan wel dempend werken op de te verwachten aanscherping van de stabiliteitsopgave.
Benutten laatste inzichten bekledingen.	Aanzienlijk. Verwvacht wordt dat door het benutten van de laatste inzichten in het bovenrivierengebied tot 2050 geen grootschalige opgaven rondom erosie van buitentalud voorkomen.

Beter bepalen van de opgave door:	Impact op verwachte opgave en bandbreedte
B: Meer inzicht fysica en betere modellen	
In het BRP kunnen ook kennisleemten worden meegenomen: -3D effecten bij piping, zoals 3D effect door grotere toestroming naar de pijp; - extra sterkte door fines; - gegradeerd zand, grondlagen, suffosie.	Afhankelijk van gebiedskenmerken. Deze effecten moeten worden bezien in het licht van alle resterende onzekerheden in het faalpad piping (in het beslisondersteunend raamwerk piping is hiervoor een aanzet gedaan). Het effect van 3D stroming is naar verwachting beperkt bij ondiepe deklagen. Bij toenemende deklaagdikte en een sterk 3D grondwaterstromingsbeeld onder de dijk (bijv. bij sterke meandering) kan het 3D effect een rol gaan spelen en is het effect ongunstig. In het bovenstroomse deel van de Maas is de wijze waarop interne erosie zich manifesteert (gegradeerd en grof materiaal) onbekend.
C: Integrale beschouwing van de kering en het faalpad	
Integrale beschouwing traject.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.
Integraal beschouwen onzekerheden.	Groot. Zie Zuidwestelijke Delta.
D: Beleidskeuzes die de opgave kunnen beïnvloeden	
Systeemkeuzen. Afvoerverdeling bij splitsingspunten en het omgaan met overstromingen in Duitsland en het beleidsmatig aftoppen afvoer bij Lobith kan een groot effect hebben op de hydraulische randvoorwaarden voor het Pannerdensch Kanaal, de Beneden-Rijn en de IJssel.	Beperkt effect voor stabiliteit en piping. Groot effect op overloop.



8. Handelingsperspectief kennis en instrumenten

8 Handelingsperspectief kennis en instrumenten

8.1 Algemeen

Het resultaat van de OOG is een verwachte veiligheidsopgave tot 2050 van circa 1360 kilometer. De verwachte veiligheidsopgave tot 2050 is fors lager dan gehanteerd voor de Globale Kosten Indicatie (GKI). Het verschil tussen de verwachte opgave en de aangemelde opgave wordt mede veroorzaakt door benutten van meest actuele inzichten en kennis over de overstromingskansbenadering. De uitvoering van het waterveiligheidsbeleid is er (nog) op gericht aan te tonen dat de overstromingskans niet groter is dan de omgevingswaarde die in de Omgevingswet is vastgelegd en een maatregel te treffen wanneer dit niet (op korte termijn) kan worden aangetoond.

Dit is niet verwonderlijk omdat bij de ontwikkeling van het WBI2017 pas op het laatste moment is besloten over te stappen op een overstromingskansbenadering. De ontwikkelaars hebben een hybride ontwerp- en beoordelingsinstrumentarium ontwikkeld dat zowel bij overschrijdingskansnormen als bij overstromingskansnormen kan worden toegepast. Daarbij is vanuit toepasbaarheid gekozen om aan te sluiten op bestaande werkprocessen. Het gevolg hiervan is dat de toepassing van de overstromingskansbenadering en de implicatie in de praktijk niet voldoende duidelijk zijn. Uit de OOG volgt dat de eerste landelijke beoordeling veelal is uitgevoerd als een toets waarin de veiligheid met het voorgeschreven rekeninstrumentarium moest worden aangetoond.

Om te voorkomen dat keringen onterecht worden versterkt is het belangrijk dat het instrumentarium analyse van het werkelijke gedrag van de kering faciliteert. Het instrumentarium moet helpen de overstromingskans te onderbouwen.

Opgemerkt wordt (1) dat in het procesinstrumentarium (de Ministeriele Regeling) voor LBO2 de beoordeling als onderdeel van de continue monitoring is beschreven en het basis instrumentarium (handleiding, modellen etc.) kan worden gebruik voor het onderbouwen van een overstromingskans.

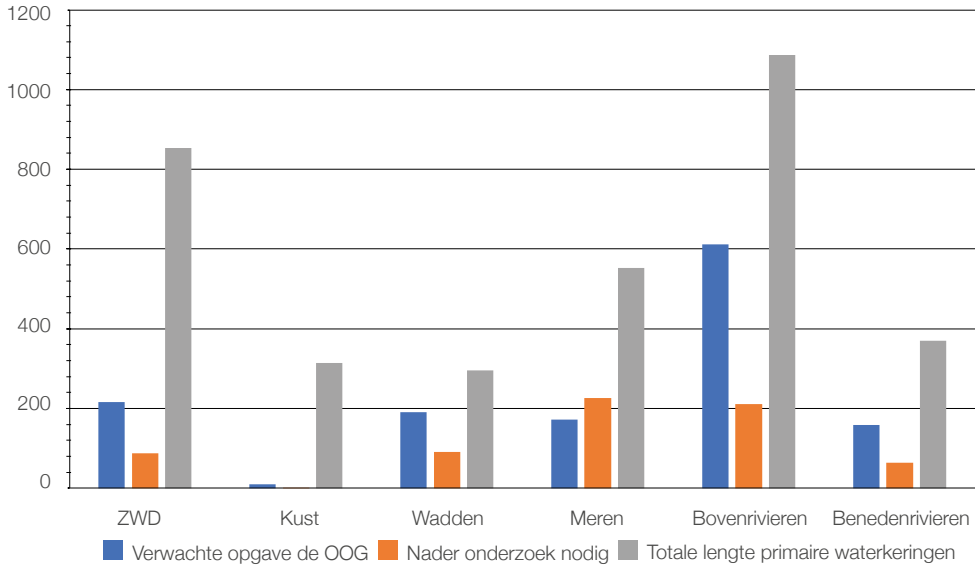
Opgemerkt wordt (2) dat het gebruikmaken van het instrumentarium bij de beoordeling gericht moet zijn op het onderbouwen van de overstromingskans om handelingsperspectieven te kunnen bepalen en niet voor het zo scherp mogelijk bepalen van de overstromingskans.

8.2 Veiligheidsopgave

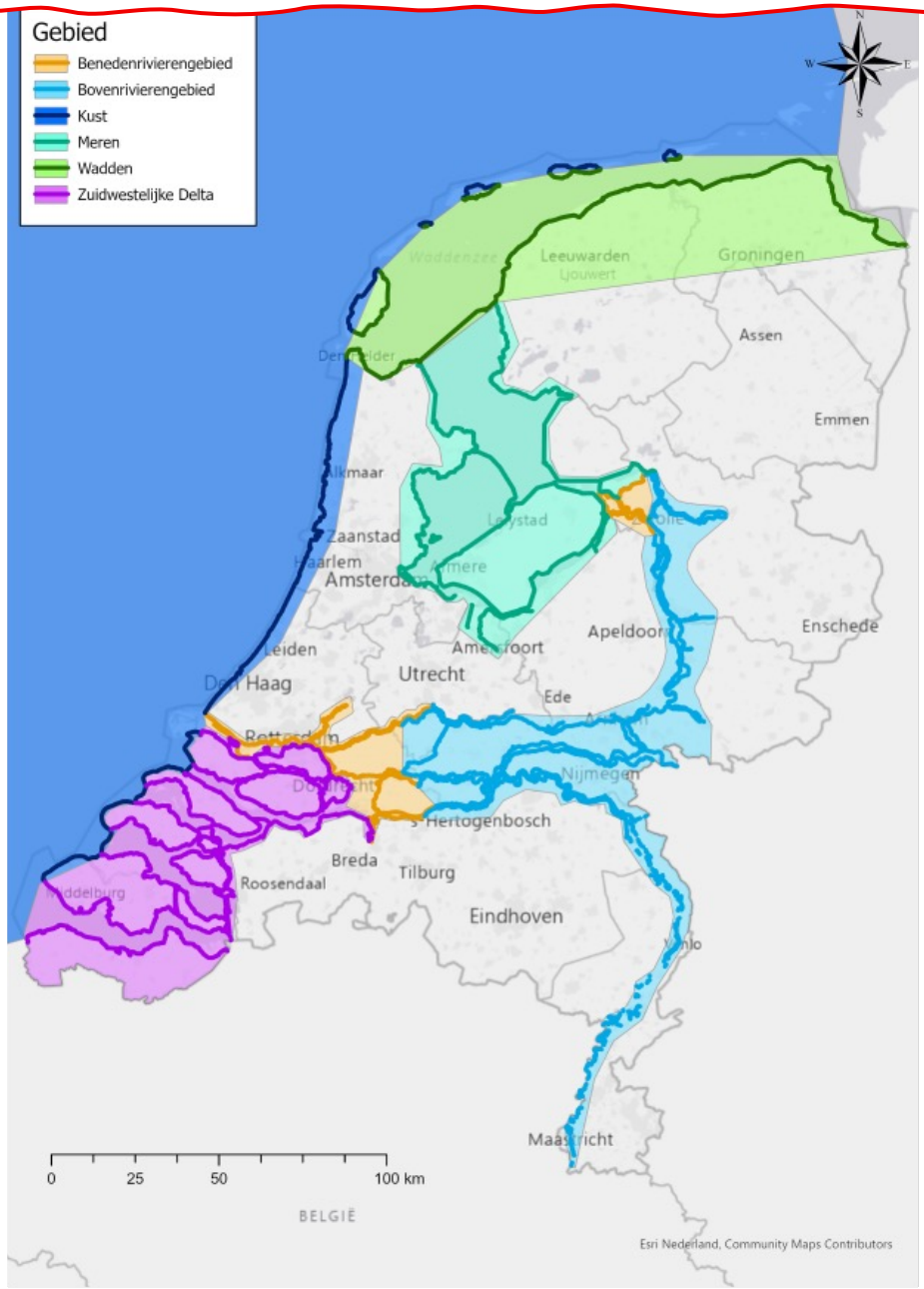
In de OOG is geconcludeerd dat keringen waarvan de opgave nog niet met zekerheid kon worden vastgesteld, als veiligheidsopgave zijn gerapporteerd in de GKI. Uit de OOG volgt dat op circa 700 km nader onderzoek nodig is om te bepalen of en waar tot 2050 een veiligheidsopgave ontstaat. Dit nader onderzoek bestaat uit het verzamelen van extra gegevens, aanscherpen van schematisaties, benutten van beschikbare kennis en het uitvoeren van integrale analyses.
In voorgaande hoofdstukken is dit voor de Zuidwestelijke Delta, de kust, de Wadden, de meren, het bovenrivierengebied en het benedenrivierengebied uitgewerkt. Onderstaande tabel en staafdiagram geven een overzicht van de verwachte opgave tot 2050 van deze gebieden. Naast de lengte van de verwachte opgave is de lengte aangegeven waar nader onderzoek nodig is om de opgave te onderbouwen.

Gebied	Lengte [km]		
	Totale lengte primaire waterkeringen	Verwachte veiligheidsopgave tot 2050	Nader onderzoek nodig om opgave te onderbouwen
Zuidwestelijke Delta	853	217	88
Kust	315	11	2
Wadden	296	190	91
Meren	553	172	227
Bovenrivieren	1.086	612	210
Benedenrivieren	370	159	64
Totaal	**3.473**	**1.361**	**682**

Tabel 1 Overzicht van lengtes per gebied



Figuur 7 Staafdiagram met lengtes per gebied



Figuur 8 Overzichtskaart gebieden >>>

Elk gebied heeft eigen kenmerken wat ertoe leidt dat verschillende faalmechanismen dominant zijn voor de veiligheidsopgave.

- De Zuidwestelijke Delta geeft een diffuus beeld en geen eenduidig dominant mechanisme. Door de aanleg van de Deltawerken zijn veel van de achter de dammen en stormvloedkeringen liggende keringen overgedimensioneerd en is de veiligheidsopgave tot 2050 relatief beperkt. De keringen langs de Westerschelde vormen hier een uitzondering op.
- Langs de Kust wordt de overstromingskans bepaald door Duinafslag. Tot 2050 wordt hier nauwelijks een veiligheidsopgave voorzien.
- In het waddengebied zijn de faalmechanismen rondom bekledingen van het buitentalud dominant voor overstromingskans en de veiligheidsopgave tot 2050.
- Bij de meren valt de grote lengte van nader te onderzoeken kering op. Het betreffen hier een beperkt aantal trajecten waar een voorlopig oordeel is gegeven en in de OOG onvoldoende informatie aanwezig was om de veiligheidsopgave te onderbouwen. Faalmechanismen rondom bekledingen bepalen de opgave van de nieuwe dijken. Voor de oude Zuiderzeedijken is nader onderzoek nodig om de binnenwaartse stabiliteit nauwkeuriger te onderbouwen.
- In het rivierengebied wordt de opgave vooral bepaald door geotechnische mechanismen:
  - waarbij in het benedenrivierengebied door dikke deklagen macrostabiliteit het meest bepalend en
  - in het bovenrivierengebied de pipingopgave groter is. In het bovenrivierengebied zijn hoogte gerelateerde mechanismen relevant op locaties waar door wijziging van de norm rekening moet worden gehouden met hogere hydraulische belasting (voornamelijk de Maas).

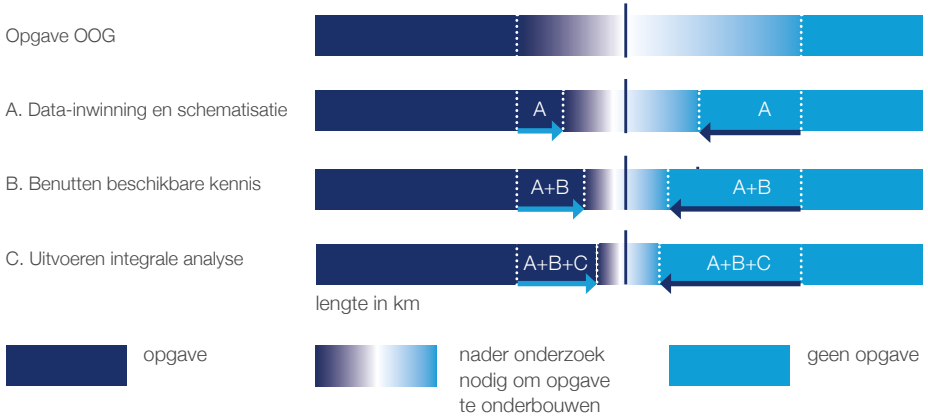
Voor de doorontwikkeling van kennis en instrumenten is het belangrijk om de kenmerken (en kennisvragen) uit het gebied centraal te zetten. De kenmerken bepalen het toepassingsgebied van de instrumenten. Voor de doorontwikkeling van productinnovaties geeft de opgave per gebied een inzicht van de potentie. De resultaten van de OOG kunnen worden gebruikt voor onderbouwing van de innovatieagenda.

Opgemerkt wordt (3) dat in de raamwerken van Kennis voor Keringen[1] al wordt gewerkt met archetypen van keringen waarbij de kenmerken uit het gebied centraal staan.

Opgemerkt wordt (4) dat RWS-WVL, HWBP en Deltares gezamenlijk in rode draden kennisontwikkelingen vanuit het gebied definiëren en prioriteren.

8.3 Nader onderzoek

Zoals in de vorige paragraaf aangegeven is op circa 700 km nader onderzoek nodig om te bepalen of en waar tot 2050 een veiligheidsopgave ontstaat. Dit nader onderzoek bestaat uit het verzamelen van extra gegevens, aanscherpen van schematisaties, benutten van beschikbare kennis en het uitvoeren van integrale analyses. Voor het benutten van kennis en het uitvoeren van integrale analyses is kennis- en instrumentontwikkeling nodig. Kennisontwikkeling kan ook helpen bij het efficiënt verzamelen van gegevens. De impact op de verwachte veiligheidsopgave is schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



[1] *Raamwerken zijn gericht op het beschrijven van de fysica van mechanismen die leiden tot falen van de kering en de bepalende factoren bij de interactie tussen belastingen en sterkte (zoals tijdsafhankelijkheid). In het vervolg wordt ingegaan op de benodigde kennis en instrumenten voor het bepalen van de bijdrage aan de overstromingskans voor de verschillende omstandigheden*

Het verzamelen van gegevens en aanscherpen van schematisaties (A) is een continu proces en onderdeel van het assetmanagement van de beheerder. Zeker waar nieuwe kennis wordt ontwikkeld, kan de inspanning op het gebied van gegevensverzameling en schematisatie groot zijn en loont het om te investeren in slimme meet- en monitoringstechnieken. Wanneer voldoende data aanwezig is, kunnen data driven en AI-modellen worden gebruikt om gericht data in te winnen en overstromingskansen slimmer en nauwkeuriger te bepalen.

Voor het benutten van en kunnen toepassen van beschikbare kennis (B) is het belangrijk dat:

- Kennisontwikkeling zich meer richt op en (samen met instrumentontwikkeling) verantwoordelijk is voor implementatie en toepassing in de praktijk.
- Ontwerpkeuzes in instrumenten onderbouwd worden vanuit het gedrag van de kering en niet vanuit model en rekenuitgangspunten.
- Wanneer is onderbouwd dat nieuwe kennis theoretisch correct is en risico's bij toepassing kunnen worden beheerst, deze samen met uitvoeringsprojecten (beoordeling en versterking) wordt doorontwikkeld. Dit voorkomt dat nieuwe kennis lang op de plank blijft liggen. Vanuit toepassing in de praktijk worden daarnaast de juiste kennisvragen gesteld voor doorontwikkeling. Dit vraagt dat kennisontwikkelaars en -gebruikers samenwerken.
- Vanuit een stabiel (probabilistisch) veiligheidsraamwerk wordt gewerkt waardoor onzekerheden op gelijke wijze worden meegenomen. Dit veiligheidsraamwerk is randvoorwaardelijk bij kennisontwikkeling en toepassing.
- Nieuwe en bestaande kennis goed en centraal wordt beheerd en ontsloten.

Vanuit het verleden zijn we gewend om alle onderdelen van de kering afzonderlijk te beschouwen. Het resultaat van een beoordeling is de som van de beoordelingen van de verschillende onderdelen. Wanneer alle correlaties tussen mechanismen en onzekerheden consistent worden meegenomen, wordt hiermee een goede onderbouwing gegeven van de overstromingskans.

Niet alle onderdelen zijn echter even relevant en het is in de praktijk ondoenlijk om alle onzekerheden en correlaties correct mee te nemen. Het afzonderlijk beschouwen van onzekerheden en beoordelen van losse onderdelen en faalmechanismen in een traject leidt tot een (forse) overschatting van de werkelijke veiligheidsopgave. Door faalmechanismen te toetsen aan criteria op doorsnedeniveau wordt in feite op een oude manier (overschrijdingskansbenadering) beoordeeld of de kering voldoet aan ontwerprandvoorwaarden.

Bij een integrale analyse (C) wordt beoogd om vanuit het grotere geheel te onderbouwen welke onderdelen maatgevend zijn zonder alle onderdelen gedetailleerd te moeten beschouwen. Daarbij kunnen verschillende niveaus worden onderscheiden. Het gaat om onderdelen (faalmechanismen) in het traject, onderdelen (mechanismen) in het faalpad en onderdelen (onzekerheden) in het mechanisme.

In de OOG was het niet mogelijk om de impact van een integrale analyse op de veiligheidsopgave aan te geven. Er is nog te weinig kennis en ervaring om de impact nauwkeurig in te schatten.

Opgemerkt wordt (5) dat in het procesinstrumentarium (Ministeriele Regeling en handleiding veiligheidsontwerp) het uitvoeren van integrale analyses wordt gestimuleerd en in de raamwerken van Kennis voor Keringen wordt onderzocht hoe dit kan worden ondersteund.

Opgemerkt wordt (6) dat afgelopen jaar in het KenI project Veiligheidsrendement, in enkele publicaties van DIV en in de BOI-handreiking Veiligheidsontwerp verschillende handvatten zijn ontwikkeld die (onderdelen van) een integrale analyse ondersteunen.

8.4 Gebiedsprogramma's

Gegeven de conclusie dat:

- het belangrijk is het gedrag van de kering centraal te zetten (paragraaf 8.1),
- de kenmerken van het gebied de opgave bepalen (paragraaf 8.2),
- het belangrijk is de kennis- en instrumentontwikkeling te focussen op toepassen en benutten van kennis (doorontwikkeling parallel en in beoordelings- en versterkingsprojecten) en uitvoeren van integrale analyses (paragraaf 8.3),

ligt het voor de hand om te werken met gebiedsgerichte programma's waarbij kennisontwikkeling is gekoppeld is aan het versterkingsprogramma.

Voorbeelden gebiedsprogramma's - ter inspiratie

Een gebiedsprogramma voor het merengebied kan zich focussen op een voortrollend programma waarbij de versterking van waterkeringen (gericht op verhoging meerpeil na 2050) wordt gekoppeld aan natuurontwikkeling (bijvoorbeeld vooroevers om belasting te reduceren) en grondstromen vanuit het beheer van vaarwegen. Kennisontwikkeling is daarbij gericht op bouwen met natuur, benutten van gebiedseigen grond en het onderbouwen van de geotechnische stabiliteit van de huidige kering op basis van overleefde waterstanden.

In de Zuidwestelijke Delta en het benedenrivierengebied kan het programma bestaan uit het programmeren van hotspots en uitvoeren van relatief kleine projecten in afwachting van keuzes rondom lange termijn inrichting van de Delta. Kennisontwikkeling is gericht het zo scherp mogelijk bepalen van de veiligheidsopgave door het benutten van de laatste kennis, het uitvoeren van integrale analyses en de inzet van geplande tijdelijke maatregelen.

In het bovenrivierengebied moeten veel keringen door de normverzwaring worden versterkt. De kennis- en instrumentontwikkeling kan een versterkingsprogramma ondersteunen welke gericht is op het standaardiseren van de aanpak en slimme uitvoering van de versterking.

8.5 Opleiding en ondersteuning

Goede instrumenten zijn randvoorwaarden voor het uitvoeren van een nauwkeurige veiligheidsanalyse maar zgeen garantie voor een goede onderbouwing van de veiligheidsopgave. Cultuur van de verschillende organisaties, beleidsmatige en organisatorische aspecten en ook de wijze waarop de gouden driehoek samenwerken spelen een belangrijke rol.

Van groot belang is dat iedereen werkt vanuit eenzelfde betekenis van de overstromingskansbenadering. Uit de analyse en gesprekken die rondom OOG hebben plaatsgevonden, blijkt dat veel behoefte is aan duidelijkheid over doelen van de overstromingskansbenadering en de consequenties hiervan voor de invulling van rol en verantwoordelijkheid van de verschillende actoren in het systeem. Bij de uitwerking hiervan is het belangrijk aandacht te besteden aan cultuur van de verschillende actoren.

Door de externe specialisten is geconcludeerd dat het kennisniveau van beheerders hoog is. De intern specialisten van het waterschap zijn in het algemeen op de hoogte van de laatste ontwikkelingen en mogelijke impact op de overstromingskans in hun beheergebied. De projectmatige uitvoering van een beoordeling (tijd en planning staan vast) gekoppeld aan een ILT check (controle op proces) en bestuurlijke vaststelling (garanderen veiligheid) van het veiligheidsbeeld leidt ertoe dat in de praktijk een conservatieve overstromingskans wordt gerapporteerd.

Uit de OOG gesprekken volgt dat integraal werken moeilijk is. Hier is behoefte aan ondersteuning en opleiding.

Behoefte is er ook aan landelijke ondersteuning bij toepassen van nieuwe kennis en kwaliteitsborging daarvan. Het laatste zorgt voor een gezamenlijke verantwoordelijkheid voor het correct uitvoeren van analyses van de overstromingskans. De landelijke ondersteuning draagt bovendien bij aan landelijke uniformiteit. De ondersteuning gaat verder dan het gezamenlijk uitvoeren van een werkatelier in de beoordeling of een onafhankelijk advies van extern specialisten.

Voor het uitvoeren van een veiligheidsanalyse is het belangrijk dat de gouden driehoek (markt, overheid, kennisinstellingen) goed wordt ingezet. Dit betekent dat de basiskennis van de overstromingskansbenadering goed moet zijn. Het gaat daarbij niet alleen om kennis over het uitvoeren van (probabilistische) berekeningen maar ook om het onderbouwen van de keuze voor rekenmodellen. Het is belangrijk dat de opleidingen (hogescholen, universiteiten, PAO, particuliere wateropleidingen) vanuit dezelfde basis worden gegeven. Wellicht is een gezamenlijke masteropleiding Waterveiligheid vanuit verschillende universiteiten en hogescholen zinvol.



Bijlage A

Kennisontwikkelingen – inhoudelijke notities

Bijlage A - Kennisontwikkelingen – inhoudelijke notities

In opgave- en ontwikkelbehoeftegesprekken wordt de verwachte veiligheidsopgave in 2050 beschouwd (inclusief bandbreedte). Daarbij wordt rekening gehouden met autonome ontwikkelingen (bodemdaling, veroudering, klimaatverandering /zeespiegelstijging en kennisontwikkelingen). In deze bijlage worden de belangrijkste ontwikkelingen rondom hydraulische belastingen, dijkerosie, piping en macrostabiliteit beschreven. Deze 'inhoudelijke notities' zijn opgesteld voorafgaand aan de OOG gesprekken en waren bedoeld voor consistentie tijdens de gesprekken. In Kennis voor Keringen wordt de relevantie van de verschillende kennisleemtes voor de overstromingskans onderzocht.

Deze inhoudelijke notities zijn slechts een samenvatting van verschillende relevante ontwikkelingen voor de OOG gesprekken. Uitgebreide beschrijvingen van deze ontwikkelingen zijn te vinden in de rode draden die door Kennis voor Keringen (KvK), Kennis en Innovatie Agenda (KIA) en SITO-IS (voormalige SO-programma Deltares) worden beheerd.

A.1 Hydraulische belastingen

kennisontwikkelingen

Voor hydraulische belastingen is geen soortgelijke rode draad als voor overstroming door dijkerosie, macrostabiliteit of piping opgesteld. Wel is een eerste versie van de Roadmap voorlandmodellering beschouwd en kunnen de (oude en nieuwe) plannen voor Kennis voor Keringen worden gebruikt om kennisontwikkelingen te identificeren. Hiernaast zijn ook ingangstoets gespreksverslagen gebruikt en de Meetstrategie[2] voor kennisleemten in het kader van belastingen door golven op waterkeringen.

Algemeen wordt opgemerkt over (ontwikkeling/verbetering van) hydraulisch belasting modellen dat onzekerheden aan de sterktekant de hydraulische belasting modelonzekerheden kunnen overschaduwen. Het is dan ook van belang om de (reductie van) onzekerheden in de hydraulische belastingen in samenhang te beschouwen met de (reductie van) onzekerheden in de sterktemodellering.

Verder zijn niet alle ontwikkelingen overal even relevant. Het effect dat een bepaalde ontwikkeling heeft op de overstromingskans is sterk afhankelijk van de locatie. Voor het bepalen van het effect op de overstromingskans moeten alle ontwikkelingen integraal worden beschouwd. Voor de opgave- en ontwikkelgesprekken wordt expliciet rekening gehouden met de ontwikkelingen in tabel A.1.

Als toevoeging op de tabel kwam in de gesprekken naar voren dat ook de ontwikkeling van Xbeach 2D van groot belang is om het beheer van de kust vorm te kunnen geven (en een goed veiligheidsbeeld te creëren). Hoewel de verwachting overal is dat er geen opgave is, betekent het ontbreken van een bandbreedte niet dat er geen ontwikkeling nodig is op dit vlak. In veel inschatting is ervan uitgegaan dat er ook middelen komen om kwantitatief meer gevoel te hebben.

Onderwerp	Beschrijving
Het tijdsverloop van belastingen (inclusief de totale duur)	Traditioneel werd vooral gekeken naar piekwaarden van waterstand en golfcondities, maar met de overstap naar overstromingskans wordt ook het tijdsverloop van belastingen belangrijker (of zelfs bepalend). Binnen KvK wordt een raamwerk tijdsafhankelijke belastingen ontwikkeld. Resultaten en tijdlijn zijn nog niet bekend. Ook is binnen KvK tijdsafhankelijkheid interactie Hydraulische Belastingen en Sterke op de agenda gezet. Resultaten en tijdlijn zijn nog niet bekend. Met de "research tool" is een stap gezet naar probabilistisch rekenen inclusief veranderende belastingen in de tijd. Ook is een GEBU-GEKB tool ontwikkeld waar onder andere gebruik wordt gemaakt van de tijdsafhankelijke belastingen zoals ontwikkeld in de research tool.

2 *Deltares rapport 11209262-012-ZWS-0002_v1.0-Meetstrategie v1 - Kennisleemten belastingen door golven op waterkeringen.pdf*

Onderwerp	Beschrijving
Gevolgen van klimaatverandering (zeespiegelstijging) op hydraulische belastingen	In het ontwerpinstrumentarium worden scenario's G en W meegenomen. In 2023 zijn door het KNMI nieuwe klimaatscenario's gepresenteerd. De discussie over welke scenario's te hanteren voor welke toepassingen loopt nog. Dit is een aandachtspunt t.a.v. hydraulische belastingen richting 2050. De invloed van klimaatverandering is sterk afhankelijk van de beschouwde locatie. Denk bij het rivierengebied aan meer neerslag en dus hogere afvoeren. Voor locaties verbonden aan zee kan zeespiegelstijging leiden tot hogere waterstanden. Dit beperkt mogelijkheden tot het spuien van rivierafvoer wat vervolgens leidt tot (langere) hoogwaterstanden in het rivierengebied.
Golfbelasting reductie door voorlanden	Ten behoeve van de veiligheidsbeoordeling van primaire waterkeringen in Nederland is vanuit de modellering van een watersysteem standaard informatie beschikbaar over waterstanden en golven op locaties nabij de waterkering. Maar dat is nog niet op de locatie waar deze informatie nodig is, namelijk ter plaatse van de buitenteen van de waterkering. In het tussenliggende gebied van enkele tientallen tot honderden meters is in veel gevallen sprake van bodemvariaties en/of objecten, die nog van invloed zijn op de waterstanden en golven bij de teen van de waterkering. Voor het bepalen van een realistische overstromingskans heeft het onderzoek naar golfreductie (vertaling over voorlanden en golfoploop) een relevante impact op overstromingskans. Dit jaar wordt binnen SITO-IS een eerste versie voor een Roadmap modellering invloed voorland op hydraulische belastingen opgeleverd, waarin diverse richtingen zijn geschetst ter verbetering van de huidige aanpak.
Golfdoordringing in estuaria	De doordringing van Noordzeegolven in de estuaria van de Waddenzee en de Zuidwestelijke delta wordt onderschat. Dit leidt tot een onderschatting van de overstromingskans die op diverse locaties fors kan zijn. Al jarenlang wordt onderzoek gedaan naar deze onderschatting, maar dit heeft nog niet geleid tot een volledige oplossing. Momenteel is dit het onderwerp van een voorstel dat is ingediend bij KvK en MVED (Meerjarige Veldmetingen Eems-Dollard).
Golfbelasting op rivieren – enkel voor rivierengebied	In de modellen voor het bepalen van golfcondities op rivieren zitten een aantal conservatieve aannamen, o.a. ten aanzien van stroming en bodem. Er zijn mogelijkheden om de waarden voor de golfcondities scherper te bepalen. Dat is echter alleen zinvol als de golfgerelateerde faalmechanismen dominant zijn. In het rivierengebied is dat slechts in beperkte mate het geval. In diverse projecten is het effect van stroming (bijv. Tiel-Waardenburg) verdisconteerd. Momenteel loopt binnen SITO-PS QRF (Quick Response Force) onderzoek naar golven op rivieren.
De invloed van infragravity (IG) golven op de hydraulische belasting – enkel voor kust en estuaria	Momenteel worden binnen het BOI (het effect van) IG golven niet in rekening gebracht, noch in de modellering van golven, noch in de doorwerking op golfoploop. Een eerste aanzet voor de modellering van IG golven en het effect op golfoploop wordt binnen KvK (project Hydraulische Belastingen) uitgevoerd. TU Delft heeft een module voor IG golven in SWAN geïmplementeerd. Voor het effect op golfoploop ligt een voorstel klaar. Het effect op hydraulische belastingen is vooralsnog kwalitatief.
Maatschappelijke ontwikkelingen en beleidsmatige keuzes	Kering/sluit beleid, rivierafvoer en meerpeilkeuzes

Tabel A.1: Kennis en instrumentontwikkeling hydraulische belastingen

A.1.2 Verwachte opgave per gebied

Kust en estuaria

- Doordringing van laagfrequentie golfenergie in de estuaria van de Waddenzee en Zuidwestelijke Delta wordt onderschat.
- De invloed van infra-gravity waves wordt binnen het BOI niet in rekening gebracht.
- Zeespiegelstijging heeft een direct effect op de veiligheidsopgave in gebieden/dijken die direct verbonden zijn met de zee. Richting 2050 is daar uiteraard geen hard getal aan te hangen, maar nu wordt uitgegaan van een bandbreedte van 15-45 cm zeespiegelstijging.
- Recentelijk is voor BOI nieuwe zeewaterstandstatistiek afgeleid, zij het nog niet formeel vastgesteld. De waterstand komt lager uit dan de statistiek gehanteerd voor WBI. De verlaging hangt af van herhalingstijd en locatie. Voor een herhalingstijd van 10.000 jaar komt het neer op een daling van ongeveer 20 cm bij IJmuiden tot 60 cm voor de Zeeuwse Delta. Voor kleinere herhalingstijden is het verschil kleiner. Voor het Noordelijk kustgebied verandert de statistiek niet noemenswaardig. Kortom, naar 2050 lijkt de zeespiegelstijging voor het zuidelijk deel van de Nederlandse kust (ten zuiden van IJmuiden) tenietgedaan te worden door daling van de zeewaterstandstatistiek, ervan uitgaande dat deze op den duur formeel wordt vastgesteld. Voor het kustgebied ten noorden van IJmuiden kan niet worden gesteld dat zeespiegelstijging en de nieuwe waterstandstatistiek tegen elkaar wegvallen.

Meren

- Hogere afvoeren en zeespiegelstijging leiden tot hogere meerpeilen. Zolang de pompcapaciteit kan worden vergroot, hoeft dat niet tot problemen te leiden. Naar verwachting is dat tot 2050 het geval.

Rivierengebied

- Klimaatverandering leidt tot meer neerslag in het stroomgebied van de Rijn. Dit heeft effect op de afvoerstatistiek bij Lobith. Hogere afvoeren zullen vaker voorkomen. Vanaf een bepaalde afvoer wordt verondersteld dat waterkeringen in Duitsland overstromen, waardoor de afvoer bij Lobith wordt begrensd op circa 18.000 m3/s. Daarbij gaan we er echter wel van uit dat Duitsland zelf geen maatregelen neemt.
- Door de regelwerken op de splitsingspunten wordt de afvoer verdeeld over de Rijntakken. Het huidige beleid daarbij is dat de Lek (en Nederrijn) wordt ontzien, wat er in de praktijk op neerkomt dat het grootste deel van de hogere afvoer ten gevolge van klimaatverandering via de Waal naar de Noordzee stroomt. Dit is beschreven in een memo dat door het Adviesteam Dijkontwerp is opgesteld .
- Golfbelasting op rivieren wordt bepaald met modellen die conservatieve aannames bevatten. Golfgerelateerde mechanismen zijn (vaak) niet dominant voor de bepaling van de overstromingskans.

A.2 Dijkerosie

A.2.1 kennisontwikkelingen

In de rode draad overstroming door dijkerosie wordt een overzicht gegeven van de verschillende kennisleemten en -ontwikkelingen. Deze ontwikkelingen volgen de volgende categorisering: theorie, model, ontwerp/realisatie, en implementatie. Voor de verwachte veiligheidsopgave zijn met name de categorieën theorie en model van belang. Verder zijn niet alle ontwikkelingen overal even relevant. Het effect dat een bepaalde ontwikkeling heeft op de overstromingskans is sterk afhankelijk van de locatie. Voor het bepalen van het effect op de overstromingskans moeten alle ontwikkelingen integraal worden beschouwd.

Voor de opgave- en ontwikkelgesprekken wordt expliciet rekening gehouden met de ontwikkelingen in tabel A.2. Naast deze ontwikkelingen zijn er diverse onderzoeken naar aspecten die lokaal een grote rol kunnen spelen. Te denken valt bijvoorbeeld aan de sterkte van Noorse Steen en gras op zand. De kennisontwikkelingen die lokaal een grote rol kunnen spelen worden niet structureel beschouwd.

Onderwerp	Beschrijving
Erosie van onderlagen/ kern	Voor het onderbouwen van een faalkans dient een compleet faalpad in ogenschouw genomen te worden. Dit betekent onder andere het meenemen van de erosie van onderlagen en de kern van de dijk nadat de toplaag is gefaald. Onderzoek van dit onderwerp heeft een nieuwe rekenmethode gegeven voor het ontwerpen en beoordelen van een grasbekleding met onderliggende kleilaag. De methode bestaat uit een probabilistische tool, met daarin een rekenmethode gebaseerd op onderzoek in de Deltagoot, aangevuld met numerieke berekeningen. Beschikbaarheid: aparte prototypes voor de kust en het rivierengebied. Deze ontwikkeling leidt ertoe dat de overgang van de harde bekleding naar de grasbekleding op een lager niveau dan voorheen kan komen te liggen.
Gecombineerde beoordeling van mechanismen GEKB en GEBU	Door Zuiderzeeland is een aanpak ontwikkeld waarbij de mechanismen GEKB en GEBU gecombineerd zijn. Hierbij zijn effectief de volgende aspecten aangescherpt: (i) zuivere cumulatieve overbelasting methode voor GEKB in plaats van kritieke overslagdebieten, (ii) mogelijkheid voor probabilistische analyse GEBU-oploop en GEBU-klap, (iii) scherpere bepaling hydraulische randvoorwaarden voor GEBU ten opzichte van de nu gehanteerde Q-variant en (iv) mogelijkheid om via een foutenboom de mechanismen GEKB, GEBU-oploop en GEBU-klap in gezamenlijkheid te beschouwen. Deze vier aspecten zorgen voor een aanscherping van de benodigde kruinhoogte en benodigde hoogte van de harde bekleding.
Sterkte asfalt met een granulaire onderlaag	Het toepassen van een granulaire onderlaag maakt het mogelijk om de asfaltbekleding beter te verdichten tijdens de aanleg, met een dunnere asfaltlaag en langere levensduur tot gevolg. Er is een rekenmethode ontwikkeld voor het bepalen van de laagdikte van het asfalt waarin de invloed van de granulaire onderlaag is verdisconteerd. Hierbij wordt wel de notitie gegeven dat wordt gekeken naar de versterkingsopgave in 2050, wanneer vrijwel al het op dit moment aanwezige asfalt aan het eind of voorbij het eind van de levensduur zal zijn.
Sterkte asfalt i.c.m. een hoge freatische lijn (S-profiel)	Als de freatische lijn onder het asfalt in de buurt komt van de buitenwaterstand, is de stabiliteit lager dan volgens de huidige rekenmethodes. Hiertoe zijn formules ontwikkeld waarmee het maximaal toelaatbare niveau van de freatische lijn kan worden berekend. Dit is een nieuw mechanisme, genaamd Asfalt S-Profiel (ASP). Hiervoor geldt (net als voor bovenstaand mechanisme) dat het asfalt in 2050 einde levensduur zal zijn, maar kan het wel noodzakelijk maken om het asfalt hoger op te trekken.
Sterkte steenzetting met een dichte overgangsconstructie in de golfklapzone	Met Deltagootproeven in het kader van de POV-Waddenzeedijken met een steenzetting met een dichte overgangsconstructie in de golfklapzone, zoals vaak langs de Waddenzee voorkomt, is vastgesteld dat Steentoets onnodig conservatieve resultaten geeft. Een nieuwe rekenmethode wordt in 2022 geïmplementeerd in Steentoets, waardoor steenzettingen scherper kunnen worden beoordeeld en ontworpen.

Tabel A.2: Kennis- en instrumentontwikkeling Dijkerosie

A.2.2 Verwachte opgave per gebied

Basis (relevant voor alle gebieden)

- Kritieke belasting in termen van duur en hoogte voor falen grasmat/bekleding.
- Erosie (terugschrijdend of voortschrijdend) van onderlagen/kern.
- Interactie met andere mechanismen/vervolgprocessen (bv macro-instabiliteit na erosie).

Kust en estuaria

Langs de kust en (in mindere mate) in estuaria zijn de dijken over het algemeen hoog, en hebben vaak een berm ter hoogte van de hoogwaterlijn. Zowel de grote hoogte als de berm zijn noodzakelijk om de (vaak) grasbekleding op het binnentalud te beschermen, en waterbezwaar te voorkomen. Op het buitentalud bestaat de bekleding vaak uit (van onder naar boven) een steenzetting, asfalt en gras. Golfbelasting is het drijvend mechanisme voor de beoordeling.

- Vanwege hogere golven is vooral het tijdsverloop van waterstand en golven leidend tot falen bekleding van belang.
- Stroomsnelheden behorende bij golfoploop en golfoverslag bepalen de faalkans: deze interne belasting is samen met de invloed van overgangen/NWOs van belang.
- Opgave op locaties waar oude asfaltbekledingen aanwezig zijn.
- Opgave voor steenzettingen en gras is sterkt afhankelijk van de toename van de belastingen.

Meren

Langs meren zijn de benodigde dijken lager dan langs de kusten en estuaria, maar volgen een soortgelijke opbouw. Niet alle dijken hebben een berm aan de buitenzijde. De oriëntatie van de dijk is bepalend voor de belastingen (windrichting). Afhankelijk van de oriëntatie is de beoordeling meerpeil- of windgedomineerd.

- Vanwege hogere golven is vooral het tijdsverloop van waterstand en golven leidend tot falen bekleding van belang.
- Stroomsnelheden behorende bij golfoploop en golfoverslag bepalen de faalkans: deze interne belasting is samen met de invloed van overgangen/NWO's van belang.

Rivierengebied

Langs het rivierengebied zijn de dijken i.v.m. beperkte golfaanval over het algemeen lager. De beperkte golfaanval resulteert in minder gebruik van harde bekledingstypen, zoals steenzettingen en asfalt. Rivierdijken bevatten over het algemeen geen bermen om golfaanval te dempen, maar bestaan typisch volledig uit gras en sluiten aan op de uiterwaard. Dijken waar wel directe golfaanval op plaatsvindt hebben over het algemeen wel een harde bekleding. Voor rivierdijken in het bovenrivierengebied is overloop vaak een dominant faalmechanisme.

- Vanwege de over het algemeen beperkte golfaanval is hier bepaling van sterkte van de grasmat (en overgangsconstructies/NWO's) van belang.
- Eveneens vanwege beperkte golfhoogte is erosie van onderlaag en kern een bepalende factor in de faalkans.

A.3 Piping

A.3.1 kennisontwikkelingen

In het Beslissingsondersteunend Raamwerk Piping wordt voor piping een overzicht gegeven van de verschillende kennisleemten en -ontwikkelingen. Het kennisniveau en de mogelijke impact van de verschillende ontwikkelingen op de overstromingskans zijn uitgewerkt in 14 factsheets. Niet alle ontwikkelingen zijn overal even relevant. Het effect dat een bepaalde ontwikkeling heeft op de overstromingskans is sterk afhankelijk van de locatie. Voor het bepalen van het effect op de overstromingskans moeten alle ontwikkelingen integraal worden beschouwd.

Voor de opgave- en ontwikkelgesprekken wordt expliciet rekening gehouden met de ontwikkelingen in tabel A.3. Naast deze ontwikkelingen zijn er diverse onderzoeken naar aspecten die lokaal een grote rol kunnen spelen. Te denken valt bijvoorbeeld aan modelonderzoek naar suffosie (in grinden en zanden waar kleine korrels tussen grote korrels kunnen eroderen) en primaire erosie. De kennisontwikkelingen die lokaal een grote rol kunnen spelen worden niet structureel beschouwd.

Onderwerp	Beschrijving
Dikte en sterkte deklaag (factsheet 1,7) • *Sterkte deklaag bij opbarsten*	Handelingsperspectief Reevediep geeft aan dat bij deklagen dikker dan 4 m in het algemeen geen opbarsten wordt verwacht, uitzonderingen daargelaten. Bij dikkere deklagen speelt de onzekere drukval in de pipe (0,3d) een rol. Deze drukval kan hoger of lager zijn dan 0,3d. Dit betekent dat tussen 2 en 4 m de overstromingskans wellicht iets wordt over- of onderschat (door de 0,3d drukval), en bij deklagen dan 4 m sterk wordt overschat door de sterkte van de deklaag tegen scheuren. Het KIA-project Reevediep ontwikkelt handvatten waarmee rekening kan worden gehouden met de sterkte van de deklaag.
Sterkte - eigenschappen zandlaag (factsheet 5, 6, 8, 9)) • *Fines*	De korrelgrootteverdeling van het zand in de baan van de pipe is bepalend voor de mate waarin een pipe kan groeien. Uit het KIA-project Hedwigepolder volgt dat de fijne fractie voor extra sterkte kan zorgen en in getijdeafzettingen een groot effect op de overstromingskans kan hebben. Pipegroei kan geremd worden wanneer een grove zandafzetting (soort grof zand barrière) dwars in de baan van de pipe ligt, en er kunnen als gevolg van heterogeniteit sterkere en zwakkere paden parallel aan de baan van de pipe zijn. Daarnaast heeft een brede sortering (grote uniformiteit) meer sterkte door meer korrelcontacten dan een homogeen zandafzetting. Tenslotte is de helling van de pipe van invloed op de pipegroei. Afhankelijk van de richting van de helling, en of het een uniforme helling is of een fluctuerende kan het effect positief of negatief zijn. Voor de Nederlandse zanden (m.u.v. grind in Limburg) dient, gegeven de huidige kennis, vooral rekening te worden gehouden met de invloed van fines op de overstromingskans.

Onderwerp	Beschrijving
Belasting – Geohydrologische aspecten (factsheet 2, 4, 419, 12, 13) • *Voorland* • *Meerlaagsheid & anisotropie* • *3D effecten*	De waterspanningen onder de deklaag binnendijks worden bepaald door: - de intredeweerstand van rivierbodem en van het voorland; - het doorlaatvermogen van het aquifer (inclusief meerlaagsheid en anisotropie), - de uittredeweerstand van de deklaag in het achterland (en andere aspecten zoals sloten, bemaling, of hoge gronden …) de waterspanningen ter plaatse van de teen. Deze aspecten beïnvloeden daarnaast sterk het kritieke verval, en de pipelengte bij kritiek verval. Die laatste is relevant wanneer kortsluiting onder het voorland een risico is. In KvK is een stappenplan opgesteld voor het meenemen van voorland. Bij sterk driedimensionale toestroming (gaten, enkele wellen bij situaties met hoge uittredeweerstand van de deklaag in het achterland) kunnen 3D effecten leiden tot een fors grotere overstromingskans dan berekend in de 2D modellen (rekenregel en D-Geo Flow). Hiervoor is nog relatief weinig kennis beschikbaar om een inschatting te maken van het effect. De geohydrologische aspecten dienen integraal te worden beschouwd.
Tijdsafhankelijkheid (factsheet 11,14, 2)	Tijdsafhankelijkheid kan betrekking hebben op: • Toename van de waterspanning, met name bij een onverzadigde ondergrond verwacht, de invloed van compressibiliteit van water is naar verwachting relatief kleiner. • Pipegroeisnelheid, de pipe zal niet instantaan kortsluiting maken bij overschrijden kritiek verval. • De duur van vervolgprocessen, het ruimen van de pipe, en kruinverlaging en bresgroei. Bij kortere hoogwatergolf (kust en meren) is het mogelijk dat er geen of onvoldoende pipegroei optreedt en dus geen doorbraak volgt. Hier zijn de afzettingen (o.a. fines) minder pipinggevoelig of ontbreekt een intredepunt. Relevant is de eventuele aanwezigheid van pipes gevormd tijdens eerdere hoogwaters.

Onderwerp	Beschrijving
Data ondergrond en historische waarnemingen *Monitoring*	Met meer gegevens (bodemopbouw en eigenschappen grondlagen), langjarige monitoring van waterspanningen en door gebruik van informatie uit waarnemingen kan een scherpere overstromingskans worden bepaald. Afgelopen jaren zijn diverse nieuwe meettechnieken (bijvoorbeeld drones) ontwikkeld. Binnen KvK loopt een onderzoek naar data en schematisatie. Ook zijn er ontwikkelingen om AI in te zetten om informatie uit modellen en waarnemingen te combineren.

Tabel A.3: Ontwikkelingen kennis en instrumentontwikkeling Piping

A.3.2 Verwachte opgave per gebied

Kust en estuaria (en voormalige Zuiderzee)
Getijdenplaatafzettingen zijn veelal slechts enkele meters dik. De opbouw van de plaat kan sterk variëren: van zeer homogeen tot sterk gelaagd. De algemeen lage doorlatendheid, hoge mate van anisotropie, de soms sterke gelaagdheid, en de relatief dunne pakketten leiden tot minder toename van de waterspanning onder de deklaag in het achterland. Dit leidt tot kleinere kansen op opbarsten en heave t.o.v. rivierafzettingen (ook door weinig stroming naar de wel), zeker als het doorlatendheidscontrast met de deklaag klein is. De kans op terugschrijdende erosie is ook een stuk lager, door een lager doorlaatvermogen en ook door een toename in kritieke schuifspanning als gevolg van cohesie en inbedding van zandkorrels in een fijnere matrix.
Bij kleiige plaatafzettingen is piping niet relevant, bij zandige plaatafzettingen is de kans op piping erg klein.

Ten opzichte van getijdenplaatafzettingen zijn getijdengeulafzettingen dikker, veelal zandiger, en kunnen relatief weinig kleilaagjes bevatten, waardoor de bulkdoorlatendheid hoger en anisotropie lager is. Ook kan de deklaag boven recent actieve geulen lokaal dunner zijn. De afmetingen van de geul, en het al dan niet kortsluiting maken met het Pleistocene watervoerende pakket, zijn dan van groot belang om te bepalen of de waterspanning en concentratie van stroming voldoende zijn voor alle processen in het faalpad. Na optreden van initiële mechanismen is de duur van de belasting van belang, het is de vraag in hoeverre de vervolgprocessen op kunnen treden binnen de beperkte duur van de hoogwaterbelasting. Ook voor getijdengeulafzetting geldt dat de kans op terugschrijdende erosie een stuk lager is t.o.v. rivierafzettingen zonder fijne fractie.
Lokaal kan piping bij geulafzettingen tot een veiligheidsopgave leiden. De dominante mechanismen zijn sterk afhankelijk van de lokale situatie.

Bovenrivierengebied
De initiële mechanismen en met name horizontale pipegroei bepalen in grote mate de overstromingskans. De geohydrologische aspecten - invloed van de intredeweerstand in het voorland, heterogeniteit van het watervoerend pakket (preferente stroombanen en zwakke plekken, meerlaagsheid, anisotropie) en aspecten die concentratie van stroming naar de pipe beïnvloeden (zoals de doorlatendheid van de deklaag binnendijks en aanwezigheid van sloten) - zijn aandachtspunten voor het maken van een scherpe analyse van de overstromingskans.
In het bovenrivierengebied is piping vaak bepalend voor de veiligheidsopgave. Het dominante mechanisme is terugschrijdende erosie (opbarsten bij dikkere deklagen).

Benedenrivierengebied
Het westelijke deel van het gebied vertoont veel overeenkomst met getijdengebied, het oostelijke deel meer met bovenrivierengebied. Voor beide delen zijn geohydrologische aspecten die de toename van waterspanning buiten- en binnendijks beïnvloeden van groot belang voor de faalkans. De sterkte en dikte van de deklaag is ook van groot belang voor de kans op opbarsten. In beide gebieden is het van belang of het Holocene WVP kortsluiting maakt met het Pleistocene WVP.
In het westelijke deel van het gebied is de duur van de belasting beperkt en wordt de piekbelasting gedomineerd door het aandeel uit getij en storm, daardoor is het de vraag in hoeverre vervolgprocessen op kunnen treden. In het oostelijke deel is de duur van de belasting langer en wordt gedomineerd door de rivierafvoer.

In het westelijk deel worden lokaal een pipingopgaven verwacht. In oostelijke richting neemt de opgave toe. De dominante mechanismen betreffen opbarsten (m.n. bij dikkere deklagen), heave en terugschrijdende erosie, vervolgprocessen (bij beperkte duur) van de hoogwaterbelasting.

Limburg

De initiële mechanismen en met name horizontale pipegroei bepalen in grote mate de overstromingskans. Kenmerkend voor Limburg is de veelal dunne doorlatende deklaag en watervoerend pakket met hoge doorlatendheid, waardoor wel veel kwel ontstaat, maar weinig zandmeevoerende wellen waargenomen worden. Over terugschrijdende erosie en daarmee de relevantie van het pipingmechanisme is veel onzekerheid omtrent de erosiegevoeligheid van de grove zand- en grindpakketten in Limburg. De grotere korrels, de hoge uniformiteitscoëfficiënt en mogelijk verkitting dragen naar verwachting bij aan een hogere erosieweerstand.

A.4 Macrostabiliteit

kennisontwikkelingen

In onderstaande tabel zijn de actuele kennisontwikkelingen weergegeven met de meeste impact op de veiligheidsopgave. De ontwikkelingen zijn overgenomen uit de rode draad overstroming door geotechnische instabiliteit.

Onderwerp	Beschrijving
Waterspanningen en freatisch vlak bij overslag • *Waterspanningen bij overslag*	Een geotechnische instabiliteit treedt op doordat de schuifsterkte afneemt als gevolg van een toename van waterspanningen. Rondom het verloop van het freatisch vlak bij overslag bestaat grote onzekerheid. In het verleden was dit minder van belang omdat een kering zodanig hoog werd aangelegd dat onder maatgevende omstandigheden het overslagdebiet verwaarloosbaar is. >>> In de overstromingskansbenadering wordt niet meer gerekend met een maatgevend hoogwater. Recent onderzoek heeft aangetoond dat de sterkte van de bekleding tegen erosie hoger is dan verwacht. In het KenI project stabiliteit bij overslag wordt onderzoek gedaan naar infiltratie door overslag en gevolgen hiervan voor geotechnische stabiliteit van het binnentalud.
Tijdsafhankelijkheid	Tijdsafhankelijkheid kan betrekking hebben op: • Toename van de waterspanning, met name in de onverzadigde kering en ondergrond verwacht. • Het doorbraakproces, na een eerste afschuiving is er vaak nog geen kruinverlaging. Vervolgmechanismen zijn nodig voordat een overstroming zal optreden. Over het doorbraakproces is nog veel onbekend. Bijvoorbeeld, het verloop van de afschuiving (wanneer en hoe snel) en het profiel, hoogte en stabiliteit van de klif die daarna ontstaat. Ook het gedrag van de grond, bijvoorbeeld verloop van pieksterkte naar reststerkte bij grote vervorming is onbekend. Bij zanddijken of dijken met zandscheg is nog veel onduidelijk over mechanismen uitspoelen en afdrukken bekleding. In KvK wordt onderzoek gedaan naar de invloed van de duur van een hoogwater op de waterspanningen (tijdsafhankelijkheid).
Sterkte initieel onverzadigde zone	Theorie over schuifsterkte initieel onverzadigde en gestructureerde grond in “ondiepe glijvlakken”/ bekleding (vooral bij overslag) nog niet sluitend.
Sterkte deklaag bij opdrijven	De theorie voor sterkte van grond in relatie tot opbarsten ontbreekt. In de technische leidraden worden hiervoor conservatieve schematiseringsregels gegeven. In het KIA-project Praktijkproef Opbarsten bij dijken wordt een model gevalideerd en handelingsperspectieven opgesteld waarmee rekening kan worden gehouden met de sterkte van dijken bij opdrijven.

Onderwerp	Beschrijving
Data ondergrond en historische waarnemingen • *Actuele sterkte* • *Lengte-effect*	Met meer gegevens (bodemopbouw en eigenschappen grondlagen), koppeling van verschillende informatiebronnen (lokale & regionale data & monitoring, parameters updaten o.b.v. metingen). En door gebruik van informatie uit historisch overleefde waterstanden of proefbelastingen kan een scherpere overstromingskans worden bepaald. Afgelopen jaren is veel aandacht besteed aan de ontwikkeling van de methode actuele sterkte. Rondom het toepassen van nieuwe methoden voor bepaling sterkte van grondlagen (o.a. transitional soils) is nog veel onduidelijk. Over sommige schematisatie aspecten is nog discussie. Door waterschappen en bureaus wordt hier verschillend mee omgegaan.
Invloed waterspanningen op stabiliteit (vlakke Beta – h relatie)	Aangevuld naar aanleiding van gesprekken. In een aantal casussen is er gesproken over het ontbreken van of de minimale impact van de waterspanningen op de berekende stabiliteitsfactor. (Vlakke Beta-h relatie). Dit onderwerp dient nader onderzocht te worden vanwege de grote impact op sommige dijkstrekkingen, waar verandering in de belasting geen effect heeft op de berekende stabiliteit.

Tabel A.4: Ontwikkelingen kennis en instrumentontwikkeling Macrostabiliteit

In onderstaande tabel is per type waterkering aangegeven waar de meeste impact van de kennisontwikkeling wordt verwacht.

Dijktype	Wel/ geen overslag	Watersysteem		
		Kust/ meren/ estuaria (Korte duur belasting, hoge golven)	Bovenrivieren (Lange duur belasting)	Benedenrivieren (Lange duur belasting met korte top)
Zanddijk met toplaag (bekleding) of dijk met zandkern	Overslag	Initiële mechanismen: afschuiven (diep of ondiep), afdrukken, uitspoelen		Idem; bij brede dijk ook vervolgprocessen: erosie en vervolgafschuivingen
	Geen overslag	Vervolgprocessen: vervolgafschuivingen	Vervolgprocessen: uitspoelen en vervolg-afschuivingen	Vervolgprocessen: vervolgafschuivingen
Kleidijk of dijk met kleikern	Overslag	Vervolgprocessen: erosie en vervolg-afschuivingen	Initiële mechanisme: afschuiven (diep of ondiep) Vervolgprocessen: erosie en vervolgafschuivingen	Vervolgprocessen: erosie en vervolgafschuivingen
	Geen overslag	Vervolgprocessen: vervolgafschuivingen		

Tabel A.5: Overzicht van onderzoek waarvan het meeste rendement voor aanscherping van de veiligheidsopgave wordt verwacht (referentie Rode draad overstroming door geotechnische instabiliteit)

A.4.2 Verwachte opgave per gebied

Kust

De groene keringen langs de kust zijn na de watersnoodramp binnen- en buitendijks in zand versterkt waarbij een binnendijks taludverflauwing (1:3) heeft plaatsgevonden. Op het binnentalud ligt een kleibekleding. Aan de binnenzijde is op een binnenberm vaak een onderhoudsweg aanwezig. Aan de binnenteen ligt meestal een kwelsloot. Op locaties met een hoge kruin waar de overslag beperkt is, wordt geen opgave verwacht. Zelfs als een initiële afschuiving optreedt, is de kans klein dat vervolgprocessen gedurende de hoogwatergebeurtenis leiden tot een doorbraak. De reststerkte van de kering na een afschuiving bij overslag is veel kleiner, uitzondering daarop zijn keringen met nog een oude kleikern. Schade door overslag zal bij een goede grasmat als eerste optreden bij overgangen. Een opgave wordt verwacht op locaties waar bij representatieve gebeurtenissen significant overslag optreedt. De hoeveelheid overslag is afhankelijk van de geometrie aan de buitenzijde en kenmerken van hydraulische belastingen (storm).

Estuaria en meren

Op de dijktrajecten waar de keringen na 1953 zijn versterkt of aangelegd zijn de groene keringen vergelijkbaar met de kust. De keringen die niet zijn versterkt, zijn meestal hoog genoeg (nauwelijks overslag), opgebouwd uit klei en kennen steile taluds. Hier geldt dat in het verleden vaak al representatieve belastingen (historische waterstanden of extreme neerslag) zijn opgetreden. De verwachting is dat de kans dat een geotechnische instabiliteit tijdens een hoogwatergebeurtenis optreedt en tot overstroming leidt klein is. Door het steile binnentalud is een initiële afschuiving voorstelbaar. De berekende overstromingskansen in de beoordeling zijn echter veelal een bovengrens omdat geen rekening is gehouden met vervolgprocessen en tijdsafhankelijkheid. Bovendien is het dijkmateriaal vaak sterker dan in berekeningen wordt aangehouden en worden waterspanningen in de dijk veilig geschematiseerd. Langs meren en estuaria wordt verwacht dat binnendijkse macrostabiliteit van groene dijken geen dominant faalmechanisme is.

Benedenrivieren

Veel dijken in het benedenrivierengebied zijn de laatste 30 jaar versterkt. De versterkingsmaatregelen die zijn toegepast variëren sterk over het gebied. Doordat ook de veiligheidsnormen in het benedenrivierengebied strenger zijn geworden, is het moeilijk om een verwachte opgave te onderbouwen. De opgave uit de beoordeling kan meestal worden aangescherpt met een scherpere schematisatie en door rekening te houden met vervolgprocessen. Verwacht wordt dat door de hoge eisen een significante opgave zal overblijven.

Bovenrivieren

De groene dijken in het bovenrivierengebied zijn zandiger dan de keringen in het benedenrivierengebied. Ook is de Holocene laag dunner (vaker opbarsten) en ligt de grondwaterstand onder dagelijkse omstandigheden lager (grotere sterkte initieel verzadigde zone). Daarentegen is de duur van een hoogwatergolf langer waardoor een doorbraak na initiële schade voorstelbaar is (als er geen maatregelen worden genomen). Door scherpere schematisatie van waterspanningen en door rekening te houden met de sterkte uit de initieel onverzadigde zone kan de veiligheidsopgave door geotechnische instabiliteit worden aangescherpt. Verwacht wordt dat in het bovenrivierengebied een opgave door geotechnische instabiliteit aanwezig is bij dijktrajecten waar de eisen in 2017 veel strenger zijn geworden.