Integrale Veiligheid Oosterschelde

MIRT onderzoek - knikpunten, oplossingsrichtingen en effecten

Rijkswaterstaat Zee en Delta

6 april 2017

Project	Integrale Veiligheid Oosterschelde
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Zee en Delta
Document	MIRT onderzoek - knikpunten, oplossingsrichtingen en effecten
Status	Definitief
Datum	6 april 2017
Referentie	RW1929-201/17-004.991
Projectcode	Rijkswaterstaat Zee en Delta
Projectleider	RW1929-201
Projectdirecteur	dr.ir. R.L.J. Nieuwkamer ing. A.J.P. Helder
Auteur(s)	
Gecontroleerd door	dr. N. von Meijenfeldt, ir. R. Bouw, P.T.G. van Tol. MSc., dr.ir. M.W.J. Smit, dr.ir. R.L.J. Nieuwkamer, drs. R. van Ek, ir. M.H.P. Jansen, ir. A. Smit
Goedgekeurd door	dr.ir. R.L.J. Nieuwkamer
Paraaf	

Adres

Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.
Van Twickelostraat 2
Postbus 233
7400 AE Deventer
+31 (0)570 69 79 11
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V. noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1 INTRODUCTIE 1

1.1 Aanleiding 1

1.2 Probleemstelling 2

1.3 Doelstelling 2

1.4 Methode van onderzoek 3

2 SYSTEEMBESCHRIJVING 5

2.1 Inleiding systeembeschrijving 5

2.2 Fysieke systeem 5

2.2.1 Systeemgrens 5
2.2.2 Oosterscheldesysteem 6
2.2.3 Oosterscheldekering 9
2.2.4 Dijken 12

2.3 Socio-economisch systeem 13

2.4 Beheerssysteem 14

2.4.1 Veiligheidsstrategie Oosterscheldekering 14
2.4.2 Veiligheidsstrategie dijken 16
2.4.3 Relaties met andere beleidsvelden 17
2.4.4 Zeespiegelstijging 18

3 KNIKPUNTEN OOSTERSCHELDEKERING 20

3.1 Aanpak vraag 1: gesloten toestand 20

3.1.1 Toetssporen 20
3.1.2 Norm 21
3.1.3 Stappen 23

3.2 Aanpak vraag 2: prestatiepeilen 24

3.2.1 Afspraken 24
3.2.2 Stappen 25

3.3 Knikpunten 25

3.3.1 Overzicht knikpunten 25
3.3.2 Knikpunten voor 2050 25

4 KNIKPUNTEN DIJKEN 27

4.1 Invloed nieuwe normering 27

4.2 Norm per traject 28

4.3 Faalmechanismen waterkeringen 29

4.3.1 Beschrijving 29
4.3.2 Faalkansbegroting 30
4.3.3 Lengte-effect 31

4.4 Relatie faalmechanismen en belastingen 31

4.5 Hydraulische belastingen 32

4.5.1 Methodiek 32
4.5.2 Onzekerheden 32
4.5.3 Locaties 33
4.5.4 Waterstand 34
4.5.5 Hydraulisch belastingsniveau 35
4.5.6 Bekledingen 36

4.6 Knikpunten per faalmechanisme 38

4.6.1 Macrostabiliteit binnenwaarts 38
4.6.2 Piping 41
4.6.3 Microstabiliteit 41
4.6.4 Bekleding binnentalud 42
4.6.5 Bekleding buitentalud 43
4.6.6 Zettingsvloeiing 45

4.7 Conclusie 46

5 KNIKPUNTEN TEN GEVOLGE VAN AUTONOME, RUIMTELIJKE ONTWIKKELINGEN 48

5.1 Autonome, ruimtelijke ontwikkelingen 48

5.2 Aantakking van het Volkerak-Zoommeer 49

5.3 Oosterschelde als waterberging voor veiligheid Rijnmond-Drechtsteden 50

6 OPLOSSINGSRICHTINGEN 52

6.1 Urgente knikpunten 52

6.2 Mogelijke oplossingsrichtingen 53

6.3 Te beoordelen oplossingsrichtingen 55

7 GLOBALE ANALYSE 57

7.1 Beoordelingskader 57

7.2 Beschrijving huidige situatie en autonome ontwikkeling per criterium 58

7.2.1 Energie 58
7.2.2 Water 60
7.2.3 Bodem en ondergrond 60
7.2.4 Ecologie en biodiversiteit 61
7.2.5 Ruimtegebruik 64
7.2.6 Ruimtelijke kwaliteit 68
7.2.7 Overige criteria 70

7.3 Effecten van oplossingsrichtingen 70

8 VOORSTEL VOOR VERVOLGTRAJECT 73

8.1 Beschouwing 73

8.2 Aanbevelingen voor een vervolgtraject 74

9 REFERENTIES 75

Laatste pagina 77

Bijlage(n) Aantal pagina's

I Knikpuntenanalyse OSK 37

II Bepaling hydraulische belastingen dijken 5

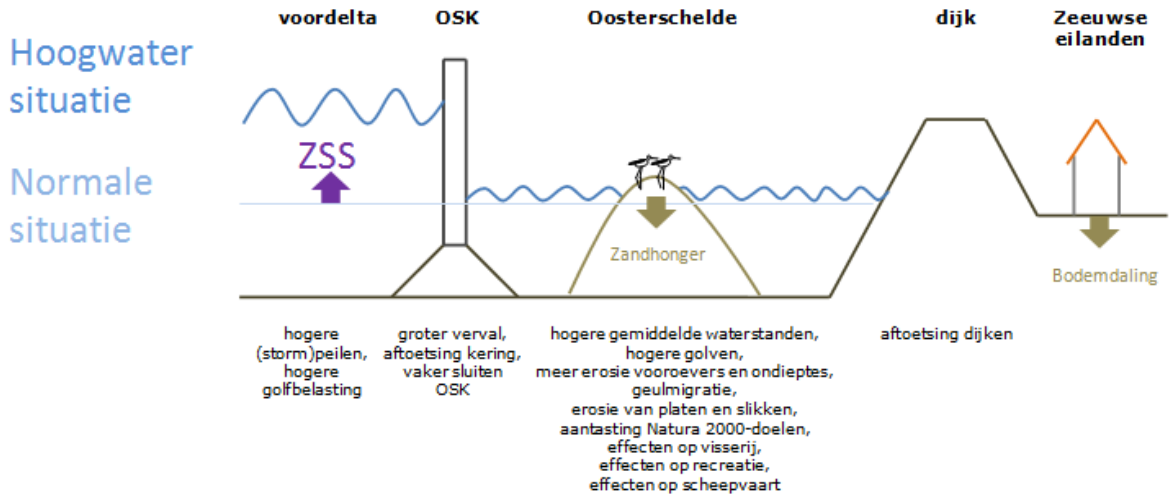
1

INTRODUCTIE

1.1 Aanleiding

Volgens het Deltaprogramma 2015 heeft de Oosterschelde in de huidige situatie te maken met morfologische veranderingen, zoals geulverplaatsing en zandhonger, en zal in toenemende mate ook klimaatverandering en zeespiegelstijging gaan optreden. Naar verwachting gaan de effecten hiervan de huidige veiligheidsstrategie, natuurwaarden en het economische gebruik beïnvloeden. De vraag is of deze ontwikkelingen leiden tot noodzakelijke aanpassingen van de veiligheidsstrategie. Afbeelding 1.1 geeft het Oosterscheldesysteem schematisch weer en vat daarbij de grootste bedreigingen voor de verschillende componenten als gevolg van zeespiegelstijging en morfologische veranderingen samen. De Oosterscheldekering (OSK) is een belangrijke schakel in de huidige veiligheidstrategie van de Oosterschelde. Deze waterkering is als afsluitbare stormvloedkering aangelegd om bij een zware storm de achterliggende Oosterschelde tegen hoog water te beschermen.

Afbeelding 1.1 Systeemplaatje Oosterschelde



De oplossing voor de bedreiging van de integrale veiligheid van de Oosterschelde wordt gezocht in een voorkeursstrategie die is gericht op een toekomstbestendige aanpak van de waterveiligheidsopgave en tegelijkertijd bijdraagt aan de aanpak van de erosie van het intergetijdengebied (zandhonger) en het economisch gebruik van de Oosterschelde. Dit alles volgens de principes van het Deltaprogramma Zuidwestelijke Delta: voldoende beschermd, economisch vitaal en ecologisch veerkrachtig.

1.2 Probleemstelling

In de Oosterschelde worden extreme waterstanden voorkomen door sluiting van de kering, maar bij condities net voor de kering sluit of bij een noodsluiting kunnen hoge waterstanden voorkomen. Door de zeespiegelstijging neemt de kans op deze condities toe.

Het natuurlijke voorland van slikken en platen breekt de golven, wat de golfbelasting op de dijken vermindert. Als het voorland verdwijnt door erosie (zandhonger) en door zeespiegelstijging, krijgen de dijken een krachtigere golfaanval te verwerken en moet wellicht extra geïnvesteerd worden in de sterkte van enkele tientallen kilometers van de dijk om de veiligheid op peil te houden.

Door zeespiegelstijging (ZSS) worden de waterstanden op de Noordzee hoger, waardoor de OSK vaker en langer dicht moet bij een ongewijzigd sluitregime. In deze studie is gerekend met de ZSS volgens het W-scenario uit de KNMI'06 scenario's.

Door de bouw van de OSK is het natuurlijke evenwicht tussen afbraak en ophoging van de zandplaten in de Oosterschelde verschoven naar een algemene en trage erosie. Dit verschijnsel wordt zandhonger genoemd. Zeespiegelstijging versnelt het verdrinken van platen en slikken in de Oosterschelde. Zonder menselijk ingrijpen, loopt het areaal intergetijdengebied geleidelijk aan terug en kunnen slikken en platen op den duur zelfs geheel verdwijnen. Dit effect is negatief voor veiligheid, natuur, visserij en recreatie.

Behoefte
Voor de lange termijn heeft het Ministerie van Infrastructuur en Milieu behoefte aan een integrale, samenhangende strategie voor een klimaatbestendige aanpak van de waterveiligheidsopgave voor de Oosterschelde. Deze integrale samenhangende veiligheidsstrategie zal bestaan uit een optimale combinatie van aangepast beheer van de Oosterscheldekering, (innovatieve) dijkversterkingen en zandsuppleties ter versterking van het intergetijdengebied.

Kernvraag
Gezien de ontwikkelingen waar de Oosterschelde mee geconfronteerd wordt, is de kernvraag van dit MIRT-onderzoek: wat is de houdbaarheid van de huidige veiligheidsstrategie voor de Oosterschelde?

Knikpunten
In dit MIRT-onderzoek is onderzocht tot welke mate van zeespiegelstijging (ZSS) en morfologische veranderingen in de Voordelta en Oosterschelde de huidige veiligheidsstrategie gehandhaafd kan blijven, zonder het nemen van aanvullende maatregelen. Hiervoor zijn zogenaamde knikpunten geïdentificeerd. Een knikpunt wordt gedefinieerd als het moment waarop het waterveiligheidssysteem van de Oosterschelde[1] niet meer de gewenste veiligheid tegen overstromingen biedt. Aanpassing van de veiligheidsstrategie is dan noodzakelijk. De huidige veiligheidsstrategie houdt in dat het waterveiligheidssysteem voldoet aan de vigerende normen bij het thans gebruikte sluitregime van de Oosterscheldekering. De veiligheidsnormen en het sluitregime worden beschreven in hoofdstuk 2.

1.3 Doelstelling

Witteveen+Bos heeft van Rijkswaterstaat de opdracht gekregen om door middel van een MIRT-onderzoek inzichtelijk te maken welke knikpunten er zijn te verwachten in de veiligheidsstrategie van de Oosterschelde voor de periode 2015-2100. Van de urgente knikpunten die voor 2050 optreden, wordt inzichtelijk te gemaakt welke aanpassingen aan de veiligheidsstrategie gedaan moeten worden om de Oosterschelde te laten voldoen aan de gestelde normen voor waterveiligheid en het behoud van ecologische waarde en economische gebruikswaarde. Daarnaast wordt op hoofdlijnen verkend welke mogelijke oplossingen er zijn

[1] Het waterveiligheidssysteem van de Oosterschelde bestaat uit de waterkeringen rond de Oosterschelde, de Oosterscheldekering en het sluitregime van de Oosterscheldekering.

om de veiligheid in de toekomst te waarborgen. De effecten op veiligheid, ecologie en economie van de oplossingsrichtingen worden in een globale analyse beschreven en beoordeeld. De studie wordt afgesloten met een beschouwing op mogelijke vervolgstappen.

1.4 Methode van onderzoek

Systeemanalyse als basis

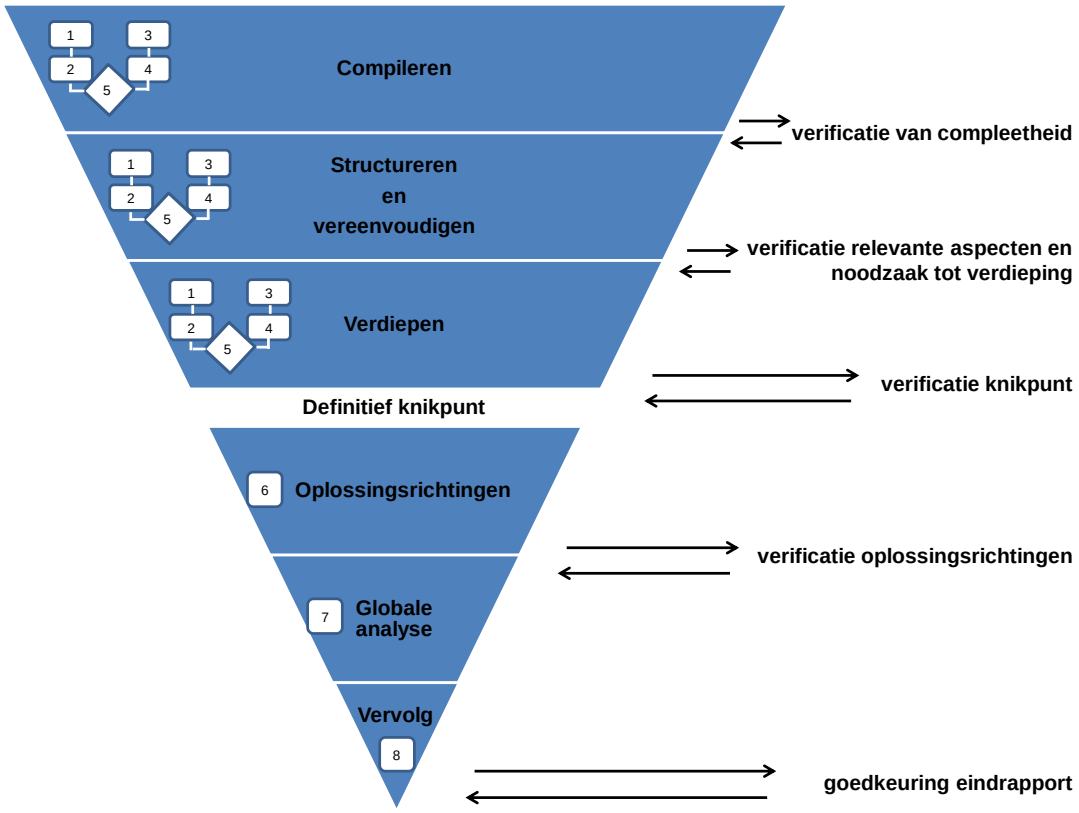
In de systeemanalyse analyseren wij het functioneren van de verschillende fysieke componenten (kering, dijken, Oosterschelde, Voordelta) apart, in onderlinge samenhang en in samenhang met het gebruik (natuur en economie). Het is belangrijk voor het systeembegrip te beseffen dat de Deltawerken onomkeerbare ingrepen zijn, waarvan de morfologische en ecologische effecten nog steeds doorwerken. Een nieuwe veiligheidsstrategie moet dus rekening houden met de doorwerkende effecten en passen binnen de kaders van de bestaande keringen en dammen van de Deltawerken.

De probleemanalyse in drie rondes

De probleemanalyse is in drie rondes uitgevoerd (zie de bovenste helft van afbeelding 1.2). In de eerste ronde is alle beschikbare informatie gecompileerd en gestructureerd. Daarbij zijn die aspecten geselecteerd die van belang zijn voor de probleemanalyse. In de tweede ronde is op basis van de beschikbare informatie en door middel van expert judgement beredeneerd op welke aspecten en binnen welke tijdshorizon problemen optreden. De derde ronde heeft zich tot slot gericht op die vragen waar op basis van expert judgement geen uitsluitsel gegeven kan worden of waar uitkomsten een nadere onderbouwing behoeven. Dit heeft geresulteerd in een definitieve lijst met knikpunten voor de integrale veiligheidsstrategie van de Oosterschelde. Deze aanpak in de drie integrale rondes heeft als meerwaarde dat:

- we breed starten, waardoor alles een plek krijgt in het onderzoek;
- de onderzoeksinspanning heel gericht, en daarmee efficiënt en vooral effectief, wordt ingezet.

Afbeelding 1.2 Trechtering van het werkproces



Om tot relevante knikpunten te komen, is gekeken naar de fysieke begrenzingen van de systemen. Zo is voor de OSK, bijvoorbeeld, gekeken naar welke waterstand deze kan keren voordat hij faalt. Of in het geval van de dijken naar welke golfhoogte deze kunnen weerstaan voordat niet meer wordt voldaan aan de veiligheidsnorm, zoals opgenomen in de Waterwet vanaf 1 januari 2017. Vervolgens is indicatief aangegeven of te verwachten is, op basis van de huidige scenario's voor ZSS, of het knikpunt vóór 2050, tussen 2050 en 2100 en na 2100 optreedt.

2

SYSTEEMBESCHRIJVING

2.1 Inleiding systeembeschrijving

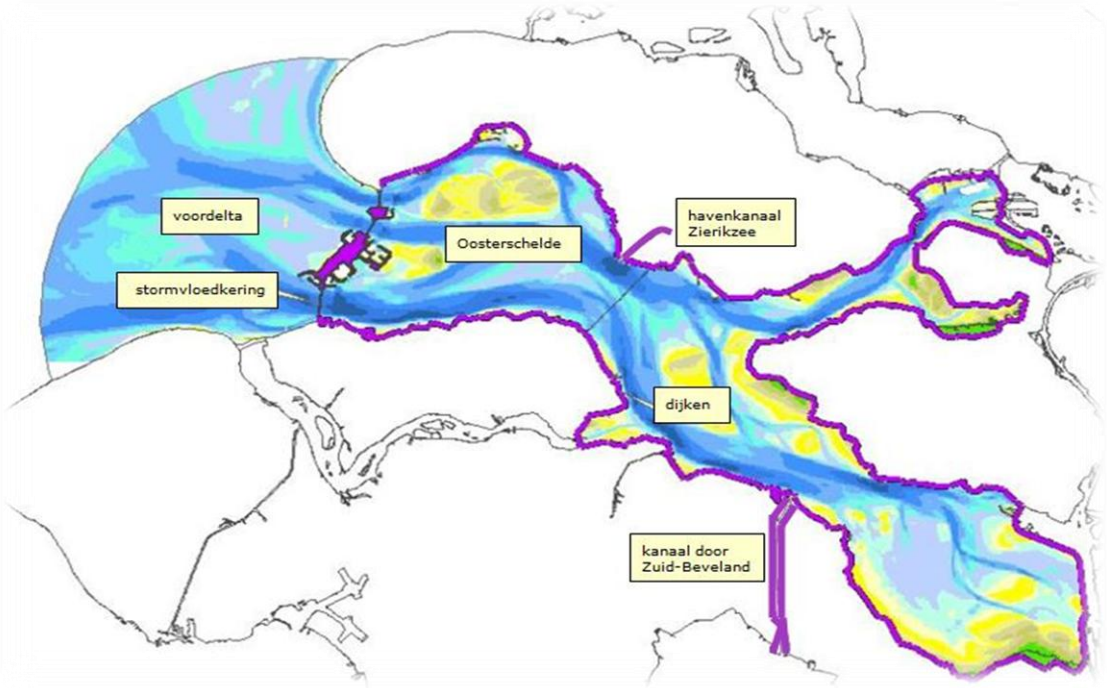
In deze systeembeschrijving onderscheiden we drie systemen:
- het fysieke systeem, waarin fysische, chemische en biologische processen zich afspelen;
- het socio-economische systeem, met de gebruiksfuncties;
- het beheersysteem van de overheden die het beheer voeren over de Oosterschelde, Voordelta, OSK en dijken.

2.2 Fysieke systeem

2.2.1 Systeemgrens

Het plangebied van dit MIRT-onderzoek bestaat uit de gehele Oosterschelde, inclusief de bijbehorende Voordelta, de OSK en alle omringende dijken, waaronder het havenkanaal van Zierikzee en het kanaal door Zuid-Beveland. Daarnaast beslaat het projectgebied dat deel van de Voordelta, waarvan de te verwachten morfologische verandering een invloed heeft op de maatgevende belasting van de kering (zie afbeelding 2.1).

Afbeelding 2.1 Systeemgrens Oosterschelde. Met in paars de ligging van de waterkeringen. Het blauwe kleurverloop toont de geulen (donkerblauw = diep) en het ondiepe water. De gele en groene kleuren tonen de intergetijdengebied en de schorren



De Oosterschelde ligt in het zuidwesten van Nederland, geheel in de provincie Zeeland. Het vormt een centraal onderdeel van het voormalige estuariumgebied van Rijn, Maas en Schelde. De Oosterschelde wordt begrensd door de dijken van de eilanden Schouwen-Duiveland, Tholen en Sint Philipsland, Noord-Beveland en Zuid-Beveland en de dammen van de Deltawerken. De grootte van het gebied betreft circa 35.000 ha, omgeven door een dijk van 194 km, een lengte van hemelsbreed 40 km van oost naar west en 27 km van noord naar zuid.

2.2.2 Oosterscheldesysteem

De Oosterschelde is het grootste nationale park van Nederland. Door het getij is het landschap altijd anders. Bij laagwater worden de droogvallende slikken en platen zichtbaar, welke bij hoogwater vervolgens tijdelijk weer uit het zicht verdwijnen. Dit zogenoemde intergetijdengebied in de delta van de Rijn en de Maas herbergt een enorme rijkdom aan planten en dieren. Ook voor de schelpdiersector is de Oosterschelde van groot belang. Het is het belangrijkste productiegebied van schelpdieren in Nederland en is daarnaast van grote waarde voor toerisme en recreatie.

Geschiedenis

In de periode voorafgaand aan de Deltawerken was de Oosterschelde een estuarium. De verbinding met de rivieren zorgde voor een brak-zoutgradiënt in de Oosterschelde met bijbehorende estuariene flora en fauna. De getijdenstromen en golfwerking zorgden voor erosie- en sedimentatieprocessen die resulteerden in een wisselend patroon van schorren, slikken en droogvallende platen (het intergetijdengebied), ondiep water en diepe getijdengeulen. In 1986 is de Oosterschelde afgesloten door de bouw van twee compartimenteringsdammen: Philipsdam en Oesterdam aan de rivierzijde en een stormvloedkering aan de zeezijde. Het eindresultaat is een Oosterscheldebekken met een 10 % gereduceerd getijverschil en een 30 % gereduceerd getijvolume [ref. 5], waarbij zanduitwisseling met de Noordzee nagenoeg onmogelijk is gemaakt. Als gevolg is het systeem morfologisch uit evenwicht geraakt. Desondanks wordt de Oosterschelde nog steeds gekarakteriseerd als een intergetijdengebied afgewisseld met ondiep water en diepe getijdengeulen.

Huidige fysische systeem

Het intergetijdengebied van de Oosterschelde is het gebied tussen gemiddeld laagwater spring (GLWS) en gemiddeld hoogwater spring (GHWS). Dit betreft alle gebieden die bij laagwater droogvallen; de slikken, platen en schorren. De slikken en platen vormen de onbegroeide delen in de Oosterschelde. De slikken liggen tegen een dijk aan en de platen liggen tussen de geulen en zijn bij laagwater geheel omringd door water. Beide gebieden hebben veelal een zandige bodem. Maar in diverse gebieden komen ook kleirijke bodems voor die na erosie van de zandlaag zijn overgebleven. De begroeide delen zijn schorren. Schorren liggen globaal tussen gemiddeld hoogwater bij doodtij (GHWD) en een minimale overspoelingsfrequentie van gemiddeld vijf keer per jaar. In de Oosterschelde wordt deze bovengrens in feite nergens gehaald. Een geul bestaat uit de permanente waterdelen, waarbij de diepe geulen dieper dan NAP -7 m zijn. Ondiepe geulen bestaan uit de zone langs het intergetijdengebied, dit is in de Oosterschelde tussen circa NAP -2 m en NAP -7 m.

Morfologie

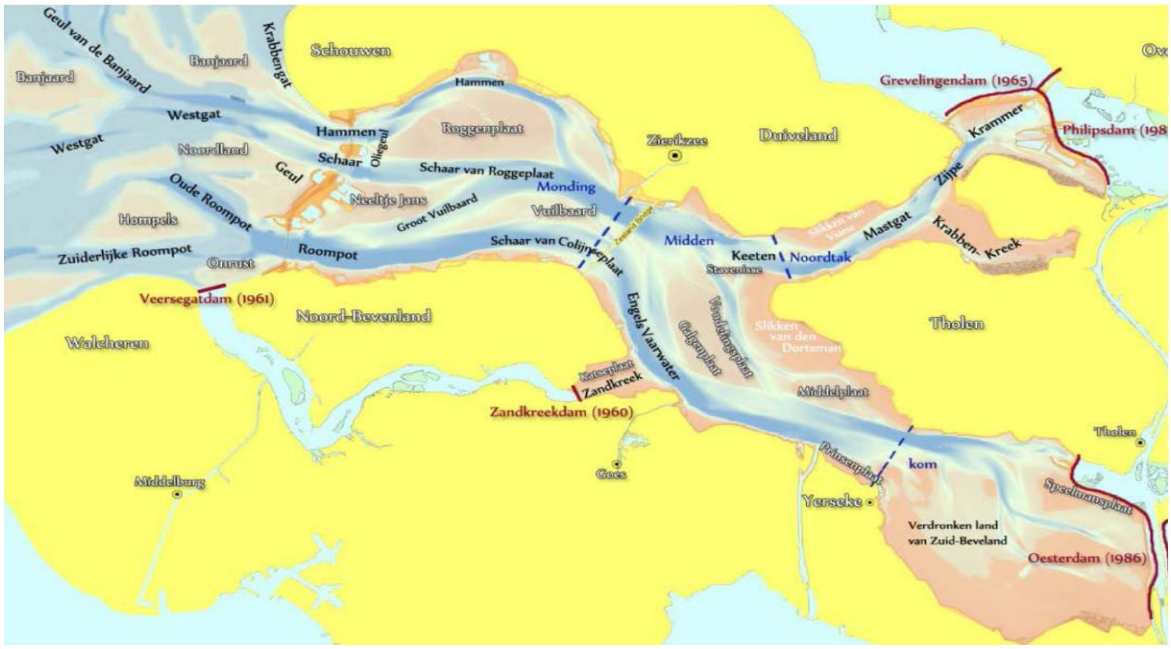
Zandhonger

Sinds de aanleg van de stormvloedkering in de jaren ’80 stroomt er minder water in en uit de Oosterschelde. Daarbij is door de aanleg zanduitwisseling met de Noordzee nagenoeg onmogelijk gemaakt. Aan weerszijden van de kering zijn door de grote turbulentie erosiekuilen ontstaan. De zandtransporten zijn aan beide zijden vooral van de kering af gericht, waardoor de jaarlijkse hoeveelheden getransporteerd zand door de kering gering zijn [ref. 5].

De kleinere hoeveelheid water in combinatie met de relatief grote getijdengeulen heeft geleid tot een afname van de stroomsnelheid en getijvolume. Het water heeft daardoor onvoldoende kracht om sediment te verplaatsen van de geulen naar het intergetijdengebied. Bij storm spoelt er echter wel zand van het

intergetijdengebied in de geulen, maar de opbouwende werking van het getij is te klein om dit sediment weer terug op de platen te brengen. De afbrekende krachten werken dus nog wel, maar de opbouwende krachten niet voldoende door afname in de dynamiek van het water. Hierdoor is het evenwicht verstoord. De afbraak van het intergetijdengebied overheerst en dit proces staat bekend als de 'zandhonger' [ref. 62]. Als gevolg zijn sinds de aanleg van de Deltawerken ongeveer 1.100 ha platen en slikken definitief verdronken en zijn de platen en slikken gemiddeld 25 cm lager geworden [ref. 54]. De zandhonger in de geulen leidt tot erosie van de platen en slikken, en zeespiegelstijging tot een geleidelijke verdrinking. Het areaal platen en slikken loopt geleidelijk terug en dreigt op termijn geheel te verdwijnen. Wanneer platen en slikken eenmaal zijn verdronken is dit proces lastig om te keren. Volgens de MIRT-verkenning Zandhonger [ref. 54] zal het areaal intergetijdengebied naar verwachting afnemen met 9 % in 2020 en met 35 % in 2060, ten opzichte van de situatie in 2010. Verwacht wordt dat de geconstateerde ontwikkelingen zich de komende decennia zullen voortzetten. Afbeelding 2.2 geeft een overzicht van de in de Oosterschelde aanwezige geulen en platen.

Afbeelding 2.2 Overzichtskaart geulen en platen in de Oosterschelde [ref. 3]



Voordelta

Sinds de bouw van de OSK is de morfologie van de Voordelta volop in verandering als aanpassing op de nieuw ontstane situatie. Dit is met name het geval geweest aan de zuidelijke zijde van de Voordelta. Veranderingen in de diepte van geulen en ligging van platen voor en achter de kering kunnen van grote invloed zijn op toe- en afstroming nabij de kering. Zo blijkt uit een door Deltares in 2012 uitgevoerde morfologische studie [ref. 3]. Aan de buitenzijde verplaatsen de geulen zich iets naar het noorden, waardoor de aanstroming van de OSK wat schuiner wordt. Verwacht wordt dat dit zich in de komende periode versterkt, waardoor de waterbeweging verandert. De laatste jaren zijn vooral aan de binnenzijde van de OSK morfologische veranderingen te zien bij de Hammen en Roompot. De Hammen wordt ondieper, hoewel de snelheid waarmee dit gebeurt de laatste jaren is afgenomen. De Roompot verdiept en versmalt, waardoor de stroming en golfbelasting aan de binnenzijde in beperkte mate toenemen.

Waterstanden, stromingen en golven

Op de Oosterschelde is onder dagelijkse omstandigheden getij aanwezig met een getijslag (verschil tussen laagwater en hoogwater) in de orde van 2,5 m tot 2,7 m bij de kering en 3,0 m tot 3,7 m achterin de Oosterschelde.

Tijdens stormomstandigheden wordt de Oosterschelde afgesloten wanneer de verwachtte waterstanden in de Voordelta boven NAP +3 m uitkomt. Dit gebeurt door de schuiven in de OSK te sluiten. Hierbij wordt, indien haalbaar, een 1-2-1 wisselstrategie aangehouden. Deze strategie houdt in dat bij de eerste hoogwatertop en sluiting van de kering, er gestreefd wordt naar een Oosterscheldepeil van NAP + 1,0 m. Voor een tweede en derde hoogwatertop gelden respectievelijk NAP + 2,0 m en NAP + 1,0 m als streefpeil op de Oosterschelde. Als de kering niet gesloten is, maar de waterstand komt boven de NAP +3 m uit, dan wordt automatisch een noodsluiting op NAP +3 m uitgevoerd. Voor een aantal faalmechanismen van de achterliggende dijken is deze noodsluiting de maatgevende situatie.

De grootste golfbelasting is te vinden op locaties met een lange strijklengte. Deze locaties liggen op Noord-Beveland (significante golfhoogte Hs = 1,7 m), Zuid-Beveland (ingang kanaal), bij Stavenisse (Hs = 1,5 m) en de zuidkant van Schouwen (Hs = 2,0 m). De golfbelasting op de dijken varieert nogal langs de Oosterschelde. Dit komt mede doordat op veel locaties er een voorland aanwezig is. De zandhonger, en de daaruit resulterende erosie van het intergetijdengebied, heeft vooral effect op de golfhoogten in de Oosterschelde. Des te lager de platen en de vooroevers, des te hoger de golven. In de HR2006 [ref. 16] is gerekend met een ontwerpbodem voor 2050. Recentelijk is een nieuwe prognosebodem bepaald. Hierin gaat de bodemligging in de ondiepe gedeelten meestal iets omlaag. Door Svasek [ref. 37] is gekeken wat de effecten zijn van de nieuwe bodemprognoses op de ontwerprandvoorwaarden. De verschillen in golfrandvoorwaarden zijn klein (orde +/- 0,20 m in H_s en T_p= +/- 0,6 s), waarbij 90% van de verschillen tussen -/+ 20 % van de oorspronkelijke golfhoogte ligt.

Ecologie

Het water, het intergetijdengebied en de binnendijks gelegen gebieden van de Oosterschelde herbergen samen de belangrijkste getijdennatuur van Zuidwest-Nederland [ref. 33]. De platen, slikken en schorren zijn leefgebieden voor bijzondere vegetaties. Door de beperkte invloed van golven en de hoge diversiteit aan substraat hebben zich onder water verschillende gemeenschappen van wieren, weekdieren, wormen en kreeftachtigen ontwikkeld. Het intergetijdengebied kent een rijk bodemleven, waarbij de hoge biomassa en productiviteit het mogelijk maakt dat grote aantallen steltlopers en vissen in de Oosterschelde kunnen leven. De Oosterschelde is van internationaal belang voor overwinterende en trekkende watervogels. De grote variatie in getij, stroming, watertemperatuur, hoogteligging, sedimentsamenstelling en de goede waterkwaliteit heeft geleid tot een grote diversiteit aan dier- en plantensoorten. Het ondiepe water vervult een belangrijke rol als kraamkamer voor vissen, terwijl de platen als rustgebied dienen voor gewone zeehonden [ref. 62 en 33]. Een (sub)populatie bruinvissen verblijft in de Oosterschelde. Omdat de Oosterschelde verscheidene habitattypen herbergt en leefgebied is van beschermde vogelsoorten, de noordse woelmuis en de gewone zeehond, kent het gebied instandhoudingsdoelen voor deze soorten vanuit het Europese Natura 2000-beleid [ref. 33].

Zandhonger vormt een belangrijk obstakel voor het behalen van de instandhoudingsdoelen. Door afname van het areaal en afvlakking van de hoogste delen van de zandplaten, zorgt zandhonger voor het zichtjaar 2060 al voor een afname in de beschikbare foerageertijd per getij. Dit leidt tot een drastische afname van draagkracht voor foeragerende steltlopers. Daarnaast zijn er verslechteringen voorzien in het areaal en de kwaliteit van vegetaties en rustgebied voor zeehonden. De zeespiegelstijging vormt een verdere bedreiging voor het areaal aan zandplaten en daarmee de natuurwaarde van de Oosterschelde.

Instandhouding

Periodiek suppleren van intergetijdengebied in de Oosterschelde blijkt de meest kansrijke maatregel te zijn om zandhonger in de Oosterschelde tegen te gaan [ref. 62]. Uit de MIRT-verkenning Zandhonger [ref. 54] is daarbij gebleken dat de maatregelen tegen zandhonger (suppleties) er in slagen om de negatieve effecten van zandhonger op de natuur te verhelpen. Daarnaast dragen de maatregelen bij aan het behoud van het karakteristieke landschap van platen en slikken en de recreatieve beleving in de Oosterschelde. Tot slot dragen de suppleties op langer termijn bij aan de hoogwaterveiligheid. Op basis daarvan is men in 2015 met suppletie van de Roggenplaat gestart.

2.2.3 Oosterscheldekering

De OSK is een 8,5 km lange stormvloedkering tussen Schouwen-Duiveland en Noord-Beveland, die de Oosterschelde bij dreigend hoogwater afsluit (zie afbeelding 2.3). De kering is ontworpen om een ontwerppeil van NAP +5,3 m tot NAP +5,5 m te kunnen keren [ref. 4]. De bovenkant van de kerende delen van de afsluitbare constructie ligt daar nog 30 cm boven om ruimte te bieden aan 20 cm zeespiegelstijging en 10 cm bodemzakking. Het betreft een halfopen kering, waarvan 3 km afsluitbaar is. Bij een waterstandvoorspelling van NAP +3,0 m wordt de OSK gesloten. Dit komt gemiddeld één keer per jaar voor en gebeurt door middel van het sluiten van de 62 schuiven, die de kering telt.

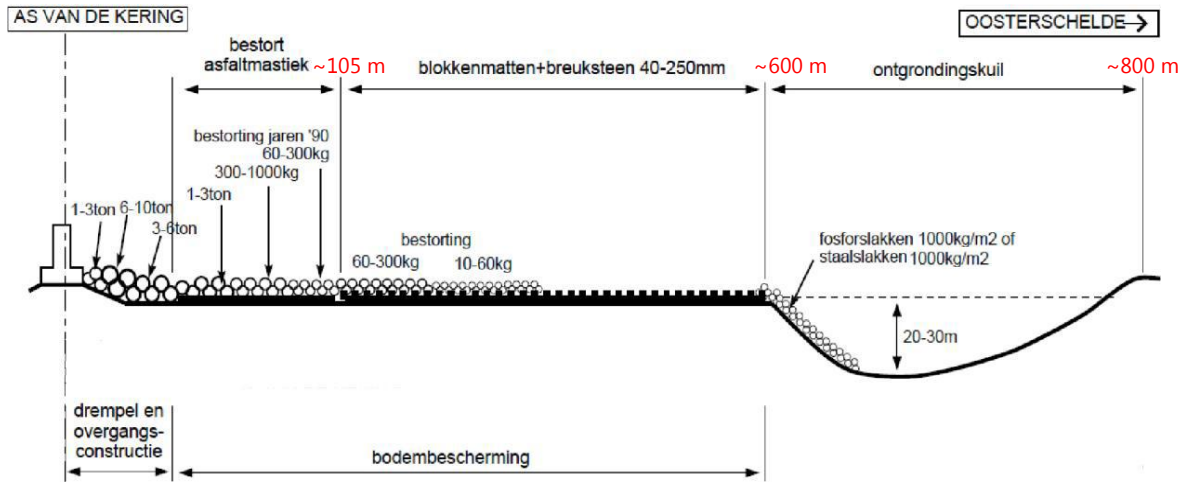
Afbeelding 2.3 Oosterscheldekering

De OSK bestaat uit een beweegbare en een vaste kering. Deze kunnen beide verder worden onderverdeeld in:

1 beweegbare kering:
   - constructieve delen:
     - bovenbalken;
     - dorpelbalken;
     - pijlers;
     - verkeerskokers;
     - sluitingsmiddelen (schuiven e.d.);
   - drempel en bodembescherming (afbeelding 2.4):
     - bodembescherming vanaf 105 m uit kering: (i) blokkenmatten zonder bestorting, (ii) blokkenmatten met bestorting, (iii) asfaltmastiek met bestorting ≤ 60-300 kg en (iv) asfaltmastiek met bestorting > 60-300 kg;
     - bodembescherming tot 105 m uit kering: drempel en overgangsconstructie;
   - ontgrondingskuilen (inclusief bestortingen met slakken);

2 vaste kering:
- aanzetdammen:
  - damaanzetten;
  - breukstenen damaanzetten;
- waterkerende eilanden:
  - hoofdwaterkering Roggenplaat;
  - hoofdwaterkering Neeltje Jans;
  - coupure Damvak Geul (voetgangerstunnel);
  - coupure Buitenhaven Neeltje Jans (verkeersviaduct);
- Roompotsluis (en sluisplateau).

Afbeelding 2.4 Algemene opbouw drempel en bodembeschermingen



De havendammen worden niet als apart onderdeel van de OSK beschouwd (zie kader).

Instandhouding

Het dagelijks beheer en onderhoud van de OSK, inclusief de aan weerszijden aanwezige ontgrondingskuilen, vallen onder de verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat Zee en Delta. De hellingen van de ontgrondingskuilen worden regelmatig gemonitord en, indien nodig, bestort[1]. Een bestorting wordt aangebracht als een onbestorte helling steiler is dan 1:5 of een eerdere bestorte helling steiler is dan 1:3.

In 2014 heeft minister Schultz van Haegen de beheerstrategie van deze kuilen aangescherpt (zie kader). De aanscherping betreft het maximeren van de kuildiepte op 40 m. Daarnaast kan bij het doorbreken van een kleilaag ervoor gekozen worden om al eerder een bestorting aan te brengen om een verdere ontgronding te voorkomen.

[1] Bestortingen kunnen met verschillende materialen worden uitgevoerd, zoals stortsteen of staalslakken. De kuilen worden doorgaans bestort met staalslakken.

Beweegbare, afsluitbare kering [ref. 2]
Tot de beweegbare, afsluitbare kering van de OSK worden de pijlers met schuiven en dorpelbalken in de drie stroomgeulen Roompot, Schaar en de Hammen en de bodembescherming gerekend.

Vaste kering
Tot de vaste kering behoren de damvakken (grondlichamen) op de eilanden Neeltje Jans en Roggenplaat, de overgangsconstructies (damaanzetten) aan de oevers van de drie stroomgaten, en de Roompotsluis

Havendammen
De havendammen maken geen onderdeel uit van de primaire waterkering en mogen bezwijken bij een storm met herhalingstijd van 100 jaar, maar niet volledig verdwijnen bij hydraulische condities met een herhalingstijd van 4000 jaar (dit in verband met enige reductie van de golfcondities waarmee rekening is gehouden in het ontwerp en de toetsing).

Door klimaatveranderingen zal de kans op bezwijken toenemen. Verwacht wordt dat het restprofiel gelijk blijft (door de ZSS worden de havendammen vaker belast, maar gaat er ook meer golfenergie over de dammen heen). Een ZSS in combinatie met een gelijkblijvend restprofiel resulteert in een kleinere reductie van de golfcondities (hogere waterstand boven de dammen). De afname van de reducerende werking wordt, indien relevant, meegenomen in de analyse. Het bezwijken van de havendammen zelf niet.

Tekst uit bijlage bij de brief van de minister [ref. 17]
'*Rond de Oosterscheldekering liggen matten en blokken om het wegspoelen van zand - erosie - te voorkomen. Dat is de bodembescherming. Aan de randen van die matten - op minimaal 600 m van de Oosterscheldekering - ontstaan van nature zogenoemde ontgrondingskuilen door stroming. Op het moment dat de hellingen van deze kuilen te steil dreigen te worden, moeten deze bestort worden met stortsteen.*

Zo wordt voorkomen dat de bodembescherming rond de Oosterscheldekering gaat schuiven en wordt de stabiliteit van de aangrenzende dijken geborgd. Volgens het oorspronkelijke beheer worden de hellingen haaks op de bodembescherming bestort als deze steiler worden dan 1:5. Voor hellingen die al eerder zijn bestort geldt dat deze opnieuw worden bestort als deze steiler worden dan 1:3. In september 2013 heb ik u gemeld dat het beheer is aangescherpt door deze beheerstrategie ook toe te gaan passen op de zijhellingen van de ontgrondingskuilen. Hierdoor is het beheer nu feitelijk al zwaarder dan de bouwers destijds voor ogen hadden.

Het nu in afronding zijnde vervolgonderzoek toont aan dat naarmate de ontgrondingskuilen dieper worden de risico's op afschuiving toenemen, ook bij bestortte hellingen. Om deze risico's in te perken zou bij een grotere kuildiepte dan 40 m het hellingscriterium stapsgewijs moeten worden aangescherpt. Om risico's uit te sluiten opteer ik voor een robuustere beheerstrategie door de diepte van de ontgrondingskuilen te maximaliseren op circa 40 m. Bij het bereiken van deze diepte wordt, naast de helling, dan ook de bodem van de kuil bestort. Bij deze diepte blijft een onvoorziene afschuiving buiten de invloedsfeer van de Oosterscheldekering en aangrenzende keringen en blijft de veiligheid gegarandeerd.

Het natuurlijke ontgrondingsproces wordt sterk bepaald door de bodemsamenstelling. Zand erodeert gelijkmatig maar snel. Van nature aanwezige kleilagen eroderen langzaam maar als deze doorslijten dan kunnen onderliggende zandpakketten vervolgens snel eroderen waardoor de diepte van ontgrondingskuilen snel toeneemt. Daarom zal ik hierop specifiek monitoren en wordt voortaan bij een dreigende doorbraak van een kleilaag afgewogen of het niet economisch effectiever is om preventief te bestorten. Dit in plaats van het toepassen van het reguliere beheer door het periodiek bestorten van de hellingen van de groeiende ontgrondingskuil. Dit is in feite een aanvulling op de eerste aanscherping van het beheer, de maximale kuildiepte wordt hierdoor bepaald door de ligging van een kleilaag en kan dus ook minder zijn dan de genoemde 40 m.'

2.2.4 Dijken

Op afbeelding 2.1 is duidelijk te zien dat de Oosterschelde volledig wordt begrensd door primaire waterkeringen. Voorheen werd de primaire keringen onderverdeeld in zogenoemde a-, b-, c- en d-keringen. Deze indeling is vervallen doordat er in de Waterwet op trajectniveau wordt gekeken. De Waterwet onderscheidt de volgende drie typen dijktrajecten:

- keringen die direct beschermen tegen overstromingen;
- voorliggende keringen;
- compartimenterende keringen.

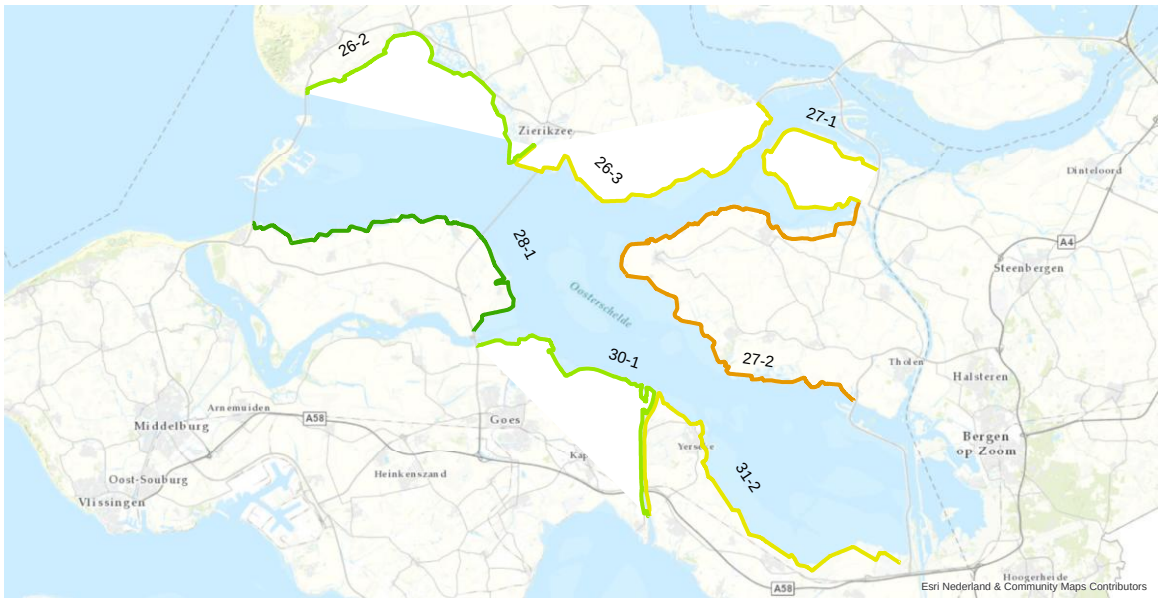
Langs de Oosterschelde is alleen sprake van keringen die direct beschermen tegen overstromingen en voorliggende keringen. Compartimenterende keringen zoals bedoeld in de Waterwet komen niet langs de Oosterschelde voor. De dammen, zoals de Philipsdam en de Oesterdam, die gebouwd zijn om de Oosterschelde te compartimenteren vallen conform de nieuwe normering onder 'voorliggende keringen', aangezien deze keringen polders langs onder andere het Volkerak-Zoommeer beschermen tegen bedreigingen vanuit de Oosterschelde.

Keringen die direct beschermen tegen overstromingen

De keringen die direct beschermen tegen overstromingen zijn onderverdeeld in dijktrajecten. De dijktrajecten zijn weergegeven in afbeelding 2.5.

In de Waterwet is de overstap gemaakt van normen voor dijkringen naar normen voor dijktrajecten. De gevolgen van een overstroming van een dijkring hangen af van de locatie waar het water door of over de kering stroomt. Een dijktraject is een deel van de waterkering, waarbij de gevolgen van een doorbraak op enige locatie binnen het traject tot vergelijkbare gevolgen leiden. Met de overstap naar normen voor dijktrajecten wordt recht gedaan aan de verschillen in gevolgen bij overstromingen op verschillende locaties van de dijk [ref. 57]. De norm van de waterkering is in de Waterwet daarom per dijktraject vastgelegd.

Afbeelding 2.5 Keringen die direct beschermen tegen overstromingen, inclusief naamgeving



Voorliggende keringen

De voorliggende keringen rond de Oosterschelde betreffen (zie afbeelding 2.6):

- 216 Grevelingendam, beschermt het Grevelingenmeer tegen bedreigingen vanuit de Oosterschelde;
- 217 Philipsdam, beschermt het Volkerak-Zoommeer tegen bedreigingen vanuit de Oosterschelde;
- 218 Oosterscheldekering, beschermt de Oosterschelde tegen bedreigingen vanuit de Noordzee;

- 219 Oesterdam, beschermt het Volkerak-Zoommeer tegen bedreigingen vanuit de Oosterschelde;
- 222 Sluizenkanaal door Zuid-Beveland, beschermt de Oosterschelde tegen bedreigingen vanuit de Westerschelde.

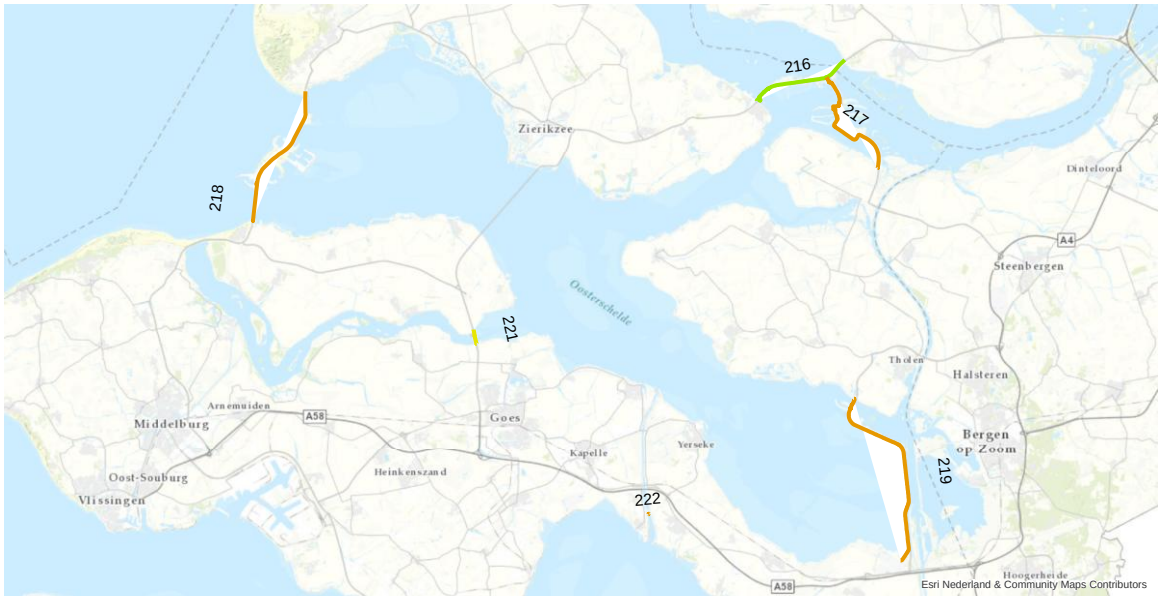
De Zandkreekdam (traject 221) beschermt het Veerse Meer tegen bedreigingen vanuit de Oosterschelde. Doordat de waterkeringen langs het Veerse Meer zijn ingedeeld als regionale waterkering, is de Zandkreekdam geen voorliggende waterkering maar een kering die direct beschermt tegen overstromingen.

Instandhouding

De dijken van de dijkringgebieden rondom de Oosterschelde vallen binnen het beheergebied van Waterschap Scheldestromen. Belangrijke activiteiten met betrekking tot het onderhoud zijn:

- onderhouden van grasbekledingen door middel van maaien en/of begrazen;
- aanvullen inwassing van de steenzettingen met split en verwijderen van vegetatie;
- bestorten van diepe geulen in het voorland en nabij de teen van de dijk wanneer de geulwanden te steil zijn geworden (steiler dan 1:5 over een hoogte van 5 m);
- faunabeheer van schadelijke diersoorten;
- controleren op en herstellen van schades door verzakkingen, zettingen, verwekingen, zandvoerende wellen, aansluitingen op kunstwerken en niet-waterkerende objecten (NWO).

Afbeelding 2.6 Voorliggende waterkeringen rond de Oosterschelde



2.3 Socio-economisch systeem

In de Oosterschelde vinden verschillende vormen van visserij plaats. Het betreft vooral mossel- en oesterteelt, sleepnetvisserij, kokkelvisserij en visserij met vaste tuigen. Het kweken van mosselen en oesters in de Oosterschelde gebeurt op aangewezen kweekpercelen. Deze percelen liggen op de randen van de slikken en platen. Ook het vissen met vaste vistuigen gebeurt merendeels op de ondiepere, deels droogvallende, delen van de Oosterschelde. De kreeftenkorven worden vooral in de zones met hard substraat (onder aan de dijkvoeten) ingezet. Andere vaste vistuigen worden ook op de droogvallende slikken en platen ingezet. Dit is ook de zone waar de kokkelvisserij plaatsvindt. Om voedselgebrek tegen te gaan bij schelpdieretende vogels wordt een beleid van voedselreservering gehanteerd. Alleen bij voldoende kokkels mag er mechanisch op gevist worden. Dat was in 2006 voor het laatst. Sleepnetvisserij, wat door een klein aantal vissers gebeurt, vindt plaats op de diepere delen van de Oosterschelde.

In de Oosterschelde liggen twee hoofdvaarwegen. De ene hoofdvaargeul, de Roompot, loopt van de Bergsediepsluis in de Oesterdam (oostkant van de Oosterschelde) richting de Noordzee via de Roompotsluis. Deze oost-westverbinding is vooral een route voor recreatievaart. De andere hoofdvaargeul is de hoofdtransportas Gent-Duitsland van Wemeldinge naar Krammer. Vooral de beroepsscheepvaart maakt gebruik van deze noord-zuidverbinding.

Daarnaast is de Oosterschelde een gewaardeerd recreatiegebied voor watersportliefhebbers, dagrecreanten, sportvissers, pierenstekers, sportduikers en natuurliefhebbers. Vaarrecreatie is de recreatievorm die wijdverbreid voorkomt in de Oosterschelde. Het gebied is een uniek en geliefd vaarwater voor plezierjachten en charterschepen, vanwege het getij, het wisselende landschap van periodiek droogvallende slikken en platen en de gedempte golfslag. Op een aantal plaatsen langs de Oosterschelde zijn zandstrandjes aangelegd, welke populair zijn bij strandrecreanten. De sportvisserij is onder te verdelen in kantvissers, bootvissers en chartervissers.

2.4 Beheerssysteem

2.4.1 Veiligheidsstrategie Oosterscheldekering

Taken en verantwoordelijkheden

Voor de veiligheidsstrategie bestaat de volgende verdeling van de verantwoordelijkheden voor de OSK:

- het Rijk (min. I&M) is verantwoordelijk voor de veiligheidsnorm;
- Rijkswaterstaat (Zee&Delta) is verantwoordelijk voor:
  - beheer en onderhoud;
  - toetsing;
- inspectie Leefomgeving en Transport is verantwoordelijk voor het toezicht.

Veiligheidsnorm

In de Waterwet zijn de primaire waterkeringen opgedeeld in trajecten die afzonderlijk zijn genormeerd. De OSK betreft traject 218 en is ingedeeld in de categorie voorliggende keringen. Voorliggende keringen zijn trajecten die de functie hebben achterliggende keringen te beschermen door te voorkomen dat de hydraulische belasting op die keringen substantieel wordt verhoogd. Voor voorliggende keringen is de veiligheidsnorm in de Waterwet gegeven in de vorm van een faalkans met de volgende definitie:

> *Kans op verlies van waterkerend vermogen van een dijktraject waardoor de hydraulische belasting op een achterliggend dijktraject substantieel wordt verhoogd.*

Voor de meeste trajecten schrijft de wet twee veiligheidsnormen voor: een signaleringswaarde en een ondergrens. De signaleringswaarde is strenger dan de ondergrens en dient om de beheerder tijdig te attenderen dat de waterkering binnen afzienbare tijd niet meer voldoet aan het minimaal beoogde beschermingsniveau. Daarmee heeft de beheerder tijd om de versterkingsopgave voor te bereiden. In hoofdlijnen is het proces:

- beheerders geven aan de minister van I&M door als bij een wettelijke beoordeling een dijktraject niet meer voldoet aan de **signaleringswaarde**;
- het prioriteren en programmeren van de versterkingsopgaven wordt op basis van deze gegevens landelijk gemaakt;
- de ontwerpen van de versterkingsopgaven worden (doorgaans) opgesteld op basis van de **ondergrens**, gegeven de condities aan het einde van de levensduur.

Stormvloedkeringen, zoals de OSK, bevatten beweegbare delen. Zij staan onder normale omstandigheden open en worden alleen bij extreme omstandigheden gesloten. Voor de stormvloedkeringen is het noodzakelijk gebleken om naast een faalkans per jaar een aparte norm voor de betrouwbaarheid van de sluiting te bepalen. Deze aanvullende norm heeft als eenheid «kans per sluitvraag» (en dus niet kans per jaar). Met deze kans op niet-sluiten wordt rekening gehouden bij het vaststellen van de hydraulische belasting op achterliggende dijktrajecten.

In verband met de complexiteit van de OSK is deze aanvullende norm niet gedefinieerd in de Waterwet (zie kader). De kans op niet-sluiten wordt meegenomen in de afleiding van de hydraulische belasting (HB) voor de achterliggende primaire keringen, door middel van het model IMPLIC. De beoordeling van de OSK bestaat daarmee uit de volgende twee onderdelen [ref. 21]:

- is de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet?
- wordt voldaan aan de afspraken die zijn gemaakt over de prestatiepeilen in het achterland, die zijn gehanteerd bij het afleiden van de hydraulische belasting?

Tekst over Kans op niet-sluiten voor de OSK in Memorie van toelichting [ref. 20]

De OSK is een bijzondere kering. Voor deze kering is het niet mogelijk om de kans op niet sluiten uit te drukken in een enkel getal, omdat het een kering met 62 schuiven betreft. Daarbij komt dat de gevolgen van het falen niet alleen worden bepaald door de hoeveelheid schuiven die niet sluiten, maar tevens door de positie van deze schuiven ten opzichte van elkaar en de positie van deze schuiven binnen de kering. Het bepalen van de kans op niet-sluiten is daardoor een technisch zeer complex vraagstuk. Het is onmogelijk daaruit één getal voor de sluitvraag af te leiden. Daarom zal de kans op niet-sluiten worden verwerkt in de hydraulische belasting die op grond van artikel 2.3 van de Waterwet voor de achterliggende primaire keringen wordt bepaald.

Artikel 2.3, eerste lid van de Waterwet [ref. 19]

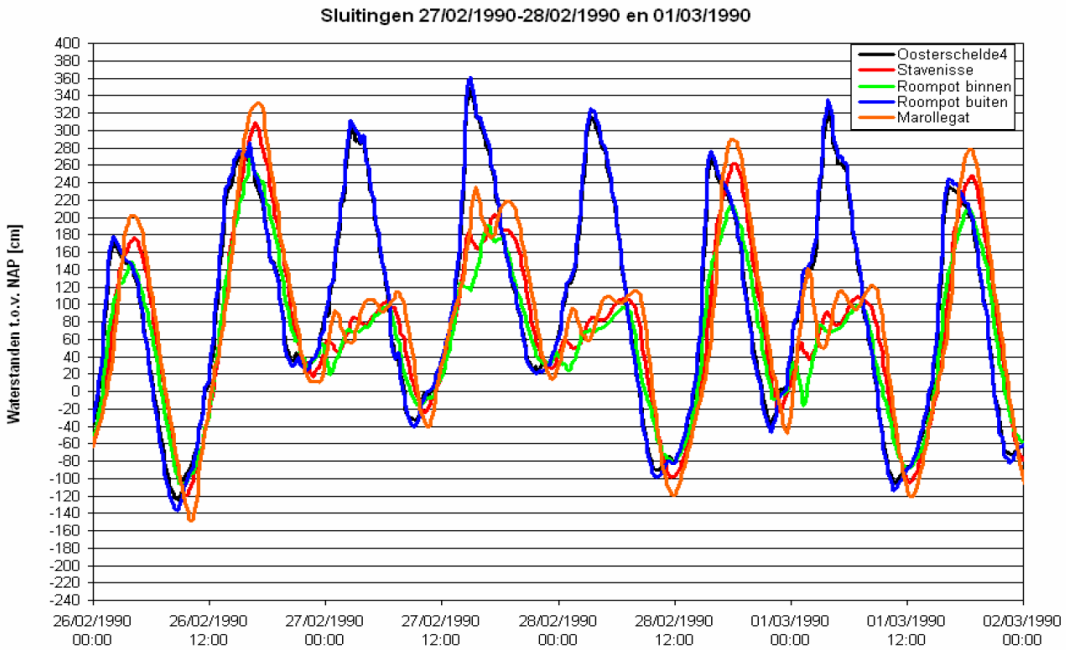
Ten behoeve van de beoordeling van de veiligheid van een dijktraject worden bij ministeriële regeling regels gesteld voor het bepalen van de hydraulische belasting en de sterkte.

Sluitregime

De OSK sluit bij een verwachte zeewaterstand bij de kering van NAP +3,00 m of hoger. Als een waterstand van NAP +2,75 m wordt verwacht, wordt het Beslisteam Sluiting OSK bijeengeroepen. Op basis van de weersvoorspellingen, in combinatie met lokale gegevens en het te verwachten getij, beslist dit team of de OSK gesloten moet worden. Als bij hoge zeewaterstanden iets mis gaat met de alarmering of bediening, is er het noodsluitsysteem, dat bij NAP +3,00 m de schuiven automatisch sluit [ref. 7].

Bij aanhoudende stormvloed wordt, indien mogelijk, een wisselstrategie van het binnenpeil van NAP +1,+2,+1 m gehanteerd. De afgelopen 30 jaar sloot de kering gemiddeld 1 keer per jaar. De laatste sluiting was tijdens de Sinterklaasstorm van 2013.

Afbeelding 2.7 OSK succesvolle uitvoering sluitregime NAP +1,+2,+1 m in februari 1990 [ref. 7]



Recente versterkingen

In 2014 zijn de versterkingsmaatregelen aan de Ringdijk en de hoofdwaterkering op het eiland Roggenplaat opgeleverd. In hoofdlijnen bestonden de werkzaamheden uit het versterken van de bekledingen [ref. 46 en 47]. Naast de versterkingen aan het eiland Roggenplaat zijn recent de ontgrondingskuilen aan beide zijden van de OSK bestort (paragraaf 2.2.3).

2.4.2 Veiligheidsstrategie dijken

Taken en verantwoordelijkheden

Voor de veiligheidsstrategie bestaat de volgende verdeling van de verantwoordelijkheden voor de dijken rond de Oosterschelde:

- het Rijk (min. I&M) is verantwoordelijk voor de veiligheidsnorm;
- Waterschap Scheldestromen is verantwoordelijk voor:
  - beheer en onderhoud;
  - toetsing;
- inspectie Leefomgeving en Transport is verantwoordelijk voor het toezicht;
- de Provincie Zeeland is verantwoordelijk voor de toezicht op het waterschap als geheel.

Oude normering: veiligheidsnorm

Voorheen (1996 -2016) was de norm gedefinieerd als een gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste hoogwaterstand waarop de primaire waterkering moet zijn berekend. Dit betrof een zogeheten *overschrijdingskansnorm*.

Gegeven de norm worden probabilistisch de hydraulische belastingen (de zogenaamde Hydraulische randvoorwaarden, HR, gedefinieerd in de HR2006) berekend en vervolgens de veiligheid (= sterkte/belasting) getoetst op basis van veiligheidsfactoren conform het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV2006). Bijvoorbeeld: als een waterkering een veiligheidsnorm heeft van 1/4.000 per jaar, dan wordt eerst de waterstand berekend die eens in de 4.000 jaar voorkomt. Vervolgens wordt beoordeeld of de geotechnische stabiliteit bij deze waterstand voldoet door het in rekening brengen van de veiligheidsfactoren.

Nieuwe normering: overstromingskans

In de nieuwe Waterwet (vanaf 1-1-2017) wordt de norm meestal gegeven in de vorm van een *overstromingskans*. Dit is de kans op verlies van het waterkerende vermogen van een dijktraject, waardoor het door het dijktraject beschermde gebied zodanig overstroomt dat dit leidt tot dodelijke slachtoffers en/of substantiële economische schade.

Een overstromingskans is daarmee de kans op een overstroming door het bezwijken van een primaire waterkering, rekening houdend met allerlei mogelijke waterstanden en sterkteaspecten van de kering. In een overstromingskans zijn dus verschillende mogelijke wijzen van falen verdisconteerd.

Gegeven de norm wordt de waterkering beoordeeld met het Wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI2017). Het WBI2017 bestaat uit een voorgeschreven procedure voor het uitvoeren van de toetsing [ref. 21], een beschrijving van de te hanteren hydraulische belastingen [ref. 22] en de rekenregels op basis waarvan de beoordeling dient te worden uitgevoerd [ref. 23]. De toetsing wordt ondersteund door software waarin de rekenregels voor de verschillende faalmechanismen en voor het afleiden van de hydraulische belastingen zijn opgenomen.

Afleiden van norm

Bij het vaststellen van de veiligheidsnorm per dijktraject heeft het Rijk de volgende doelen geformuleerd:

- iedereen die in Nederland achter een primaire waterkering woont, kan uiterlijk in 2050 rekenen op ten minste een beschermingsniveau van 10^{-5} per jaar. Dit wordt het basisbeschermingsniveau genoemd. Hiermee wordt bedoeld dat de kans op overlijden als gevolg van een overstroming voor een individu niet groter is dan 1 op 100.000 per jaar;

- er wordt meer bescherming geboden op plaatsen waar sprake kan zijn van:
  - grote groepen dodelijke slachtoffers en/of;
  - grote economische schade en/of;
  - ernstige schade door uitval van vitale en kwetsbare infrastructuur van nationaal belang, bijvoorbeeld een kerncentrale.

Recente versterkingen

Langs de Oosterschelde zijn in het verleden bekledingen toegepast waarbij betonblokken direct op een kleilaag zijn toegepast. Door veroudering van de bekleding zijn geultjes in de kleilaag (erosie) ontstaan. Hierdoor voldeden deze bekledingen niet meer aan de veiligheidseisen. Als gevolg zijn vanaf 1997 door het projectbureau Zeeweringen van Rijkswaterstaat en Waterschap Scheldestromen dijkverzwaringen uitgevoerd aan de dijken langs de Oosterschelde. Daarbij zijn de steenbekledingen van vrijwel alle dijken versterkt.

De nieuwe bekledingen zijn destijds 'robuust' ontworpen met een levensduur van ca. 50 jaar (tot ongeveer 2060) op basis van de toen geldende normen (1/4.000 per jaar overschrijdingskans). Voor het ontwerp zijn, op basis van de waargenomen bodemveranderingen en inzichten in hydrodynamische ontwikkelingen, hydraulische randvoorwaarden toegepast die zijn vastgelegd [ref. 5]. In de toegepast hydraulische randvoorwaarden is ruimte opgenomen om onzekerheden in ontwikkeling van onder andere de morfologie op te vangen.

Verder worden sinds 2009 door Rijkswaterstaat in kader van project vooroeververdediging de vooroevers van de Oosterschelde met stortsteen versterkt. Een aanzienlijk deel van de dijken rond de Oosterschelde grenst aan diep water of geulen. De vooroever van die dijken moet stabiel genoeg zijn om de kering te kunnen dragen. Dit project loopt tot en met 2017 en helpt om afschuiven van de dijken te voorkomen.

Op dit moment worden op verschillende plaatsen door het Waterschap Scheldestromen versterkingen uitgevoerd. Dit betreft onder andere de zuidkust van Schouwen-Duiveland, waar een gronddicht verticaal geotextiel wordt aangebracht om problemen ten aanzien van zandmeevoerende wellen tegen te gaan[1]. Daarnaast zijn er plannen in voorbereiding om de waterkering bij Kattendijke te versterken.

2.4.3 Relaties met andere beleidsvelden

Natuur

Het MIRT onderzoek Integrale veiligheid Oosterschelde heeft raakvlakken met verschillende andere beleidsvelden, waaronder het internationaal water- en natuurbeleid (KRW en Natura 2000). De Oosterschelde is aangewezen als KRW-waterlichaam van het type K2 (beschut polyhalien kustwater). Natuurdoelen uit de KRW bestaan uit de biologische kwaliteitselementen, zoals het voorkomen van mosselbanken, zeegrasvelden en schorren. Daarnaast is dit belangrijke natuurgebied aangewezen als Natura 2000-gebied en Nationaal Park. De droogvallende platen en slikken met daarop foeragerende steltlopers en het onderwatergetijdenlandschap vormen de belangrijkste natuurwaarden. Verder vormt het gebied een belangrijke stop voor migrerende vogels, is het een belangrijk broedgebied voor bijzondere vogelsoorten en komen er waardevolle habitats voor, zoals Atlantische en continentale kwelders en schorren.

Deltaprogramma

Een ander beleidsveld waar het onderzoek aan raakt is het Deltaprogramma 2016. Hierin wordt samen toegewerkt naar een klimaatbestendig veilige, ecologisch veerkrachtige en economisch vitale Zuidwestelijke Delta, waar de Oosterschelde deel van uitmaakt [ref. 32]. Voor de Oosterschelde wordt hierbij specifiek aandacht besteed aan de waterveiligheidsstrategie, waarin dijken en zand worden gecombineerd. Als onderdeel van het Deltaprogramma is in 2013 de MIRT verkenning Zandhonger Oosterschelde uitgevoerd [ref. 54]. Op basis hiervan is in 2014 ingestemd met de ontwikkelde voorkeursaanpak, waarbij de zandhonger wordt bestreden met het suppleren van zand op intergetijdengebied. Vanwege de snelheid waarmee de oppervlakte en hoogte van de Roggenplaat afneemt, is urgentie aan de suppletie van deze plaat gegeven.

[1] Bron: https://scheldestromen.nl/projectorganisatie-waterveiligheid

De uitvoeringsperiode is in 2017-2018 voorzien [ref. 32]. Aanpak van de andere platen is in de MIRT-verkenning als minder urgent beoordeeld en wordt daarmee niet voor 2025 uitgevoerd. In het project Kustgenese, onderdeel van het Deltaprogramma Kust, wordt gekeken naar de ontwikkeling van het gehele zandige kustsysteem, inclusief de niet zand delende systemen. Voor die bekkens wordt een sedimentanalyse opgesteld op basis waarvan een sedimentstrategie voor de gehele Zuidwestelijke delta kan worden opgesteld. Het MIRT onderzoek IVO levert een bijdrage aan dit project door in te gaan op de vraag of het structureel ophogen van de dijkvoorlanden, slikken en platen met sediment ('de stuurknop Zand') een mogelijke oplossing is om de Oosterschelde veilig, economisch vitaal en ecologisch veerkrachtig te houden.

Verder wordt er momenteel in de Oosterschelde toegewerkt naar een nieuwe overkoepelende organisatie. Dit nieuwe 'Oosterschelde-Overleg' gaat vanuit de kaders van het Deltaprogramma 2015 en de beschikbare sectorale wensen(kaarten) de regionale ambities voor de Oosterschelde vanuit een integrale visie vertalen naar een voorkeursstrategie [ref. 36]. De eventuele ruimtelijke consequenties hiervan worden meegenomen in de nieuwe Omgevingsvisie.

Duurzaamheid

Tot slot wordt vanuit de nationale en regionale duurzaamheidsambities (de speerpunten van Rijkswaterstaat in deze zijn 'Energie en Klimaat', 'Circulaire Economie' en 'Duurzame gebiedsontwikkeling') gekeken of er mogelijkheden zijn om in de Oosterschelde op duurzame wijze energie op te wekken. Naast windenergie wordt er recentelijk ook naar de mogelijkheden voor getijdenenergie gekeken. Vanwege de hoge stroomsnelheden is de OSK de meest geschikte locatie voor een getijdencentrale om energie op te wekken in Nederland. Eind 2015 zijn dan ook als proef de eerste vijf turbines in de kering geplaatst. De turbines benutten de zeer krachtige waterstromen die zich op het vaste ritme van eb en vloed bij de Oosterscheldekering voordoen. Mogelijk dat in de toekomst het aantal turbines uitgebreid wordt[1].

2.4.4 Zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging (ZSS) en windklimaat tot nu toe in statistiek

De bedreigingen in het kustgebied worden gevormd door windsnelheid, windrichting en zeewaterstand. Voor het berekenen van de waterstand in de Oosterschelde wordt gebruikt gemaakt van de zeewaterstand op de Noordzee, welke doorvertaald wordt door middel van het model IMPLIC naar een waterstand langs de teen van de waterkering in de Oosterschelde.

In het kader van de WBI2017 is de statistiek van de bedreigingen geactualiseerd. Hierbij is voor de windsnelheid en de windrichting gebruik gemaakt van een langere meetreeks, waardoor de statistiek nauwkeuriger is. Voor de Oosterschelde betekent dit dat de kans op hoge windsnelheden vanuit het noordwesten toeneemt ten opzichte van de oude normering, terwijl de kans op hoge windsnelheden uit de westelijke tot zuidwestelijke richtingen iets afneemt [ref. 9].

De statistiek van zeewaterstanden (basispeilen) is gebaseerd op de situatie in het jaar 1985. In verband met een mogelijke stijging van de hoogwaters door zeespiegelrijzing en lokale effecten zijn de basispeilen in het WBI2017 geactualiseerd voor het jaar waarin de toetsing van een waterkering betrekking heeft [ref. 9]. Dit betekent dat de statistiek van de zeewaterstand in het WBI2017 is afgeleid voor het zichtjaar 2023.

Gevolgen

De zeespiegelstijging (ZSS) versnelt het verdrinken van platen en slikken in de Oosterschelde. Door de ZSS neemt de gemiddelde waterstand op de Oosterschelde toe en zal de OSK tijdens dreigende hoogwaterstand vaker en langer dicht zijn.

Faalmechanismen van dijken worden op verschillende manieren door ZSS in combinatie met morfologische veranderingen beïnvloed. Door het gecombineerde effect van ZSS en erosie van het voorland door zandhonger neemt de waterdiepte voor veel dijktrajecten toe. Daar waar de golfwerking dieptebeperkt is,

[1] Volgens Rijkswaterstaat is het verzoek tot uitbreiding afgewezen. Er is wel een vergunning voor 1 extra centrale.

kunnen in de toegenomen waterdiepte grotere golven ontstaan. Hierdoor wordt de kans op erosie van het dijklichaam in de golfslagzone vergroot. Hogere golven die over de dijk slaan, vergroten daarbij de kans op verweking en erosie van het binnentalud van de dijk. Verder neemt door ZSS aan Oosterscheldezijde en doorgaande klink aan polderzijde het stijghoogteverschil over de dijklichamen toe, waardoor de kans op opbarsten/piping wordt vergroot.

In de bepaling van de knikpunten is uitgegaan van een ZSS op de Noordzee van circa 0,22 m in 2050 en circa 0,72 m in 2100 ten opzichte van het referentiejaar 2017, zoals volgt uit het computerprogramma Hydra-NL voor het scenario warm/stoom. Het scenario warm/stoom is in Hydra-NL gedefinieerd als 0,35 m ZSS op de Noordzee in 2050 ten opzichte van het jaar 1985 en 0,85 m ZSS op de Noordzee in 2100 ten opzichte van het jaar 1985 [ref. 14].

Zeespiegelstijging (ZSS) in de huidige studie versus de meest recente inzichten

De huidige studie is gebaseerd op de deltascenario's uit 2012 [ref. 63]. Voor ZSS is uitgegaan van het W-scenario (4 °C opwarming in 2100), te weten +85 cm. Deze prognose is afkomstig van de KNMI'06 scenario's gebaseerd op de AR4 van het IPCC [ref. 64]. Inmiddels heeft het KNMI nieuwe klimaatscenario's (KNMI'14 scenario's) uitgebracht op basis van AR5 waarbij voor zeespiegelstijging een bandbreedte is aangegeven met een hogere bovengrens [ref. 65]. Het G-scenario gaat uit van 30-75 cm ZSS voor de Nederlandse kust en het W-scenario van 55-100 cm ZSS in 2100 ten opzichte van 1981-2010. Hoewel de opwarming van de aarde onzeker is in verband met onzekerheid rond de emissie van broeikasgassen lijkt, door het uitblijven van adequate maatregelen, de kans steeds kleiner dat we op het G-scenario uitkomen.

De prognose van het IPCC ten aanzien van de ZSS in 2100 in AR4 is te voorzichtig doordat het smelten van het landijs op Groenland en Antarctica buiten beschouwing is gelaten vanwege te grote onzekerheid. In AR5 is hier wel rekening mee gehouden maar de prognose is nog steeds aan de voorzichtige kant. Sinds AR5 zijn er nieuwe inzichten die wijzen naar een versnelde smelt van het landijs op Groenland en Antarctica. Zo veranderen algen en roetdeeltjes het albedo van Groenland (dark snow) waardoor het afsmelten wordt versneld. Daarnaast zijn diverse processen relevant voor het afkalven en afbreken van ijs in Antarctica niet meegenomen in AR5. In 2016 [ref. 66] is een artikel in Nature verschenen waarin bij de modellering van Antarctica wel met deze processen is rekening gehouden. Het resulterende model blijkt beter in staat om de ZSS te simuleren bekend uit palao-klimatologische studies. Het model dat het beste presteerde voor waarnemingen uit het verleden is in de studie ingezet voor toekomstprojecties. Op basis van die analyse is geconcludeerd dat alleen al van Antarctica in 2100 een extra meter ZSS is te verwachten. Het KNMI verwijst op haar website (09 mei 2016) naar deze studie en geeft aan dat het IPCC na 2018 met bijgestelde scenario's zal komen [ref. 67]. De herziening van IPCC-scenario's zal voor het KNMI aanleiding zijn om de klimaatscenario's voor Nederland aan te passen (mogelijk meer dan 1.5 m ZSS in 2100). Een dergelijke aanpassing is ook aangekondigd voor de deltascenario's [ref. 68]. Voor deze studie betekent dit dat knikpunten eerder gaan optreden dan voorzien en dat de knikpuntenanalyse moet worden herzien na bekendmaking van de nieuwe ZSS-scenario's. Op basis hiervan kan een hogere urgentie ontstaan voor het uitvoeren van maatregelen.

3

KNIKPUNTEN OOSTERSCHELDEKERING

De OSK is een belangrijke schakel in de huidige veiligheidstrategie. In dit hoofdstuk is aangegeven tot welke mate van ZSS een veilige inzet van de OSK gegarandeerd kan worden (zonder het nemen van aanvullende maatregelen). Hiervoor zijn zogenaamde knikpunten gedefinieerd. Een knikpunt treedt in deze analyse op, als een van de volgende twee vragen negatief beantwoord wordt (zie ook paragraaf 2.4.1):

- vraag 1 (gesloten toestand):
  Is de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet?
- vraag 2 (prestatiepeilen):
  Wordt voldaan aan de afspraken die zijn gemaakt over de prestatiepeilen in het achterland, die zijn gehanteerd bij het afleiden van de hydraulische belasting?

Deze twee vragen zijn op verschillende wijzen beantwoord. In paragraaf 3.1 is de aanpak van vraag 1 opgenomen en in paragraaf 3.2 de aanpak voor vraag 2. De knikpunten zijn gepresenteerd in paragraaf 3.3.

3.1 Aanpak vraag 1: gesloten toestand

Is de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet?

Deze vraag is beantwoord door de relevante faalmechanismen en onderdelen van de OSK (paragraaf 3.1.1) te toetsen aan de norm in de Waterwet (paragraaf 3.1.2). De uitgevoerde stappen zijn beschreven in paragraaf 3.1.3. De uitwerking van de stappen is opgenomen in bijlage I.

3.1.1 Toetssporen

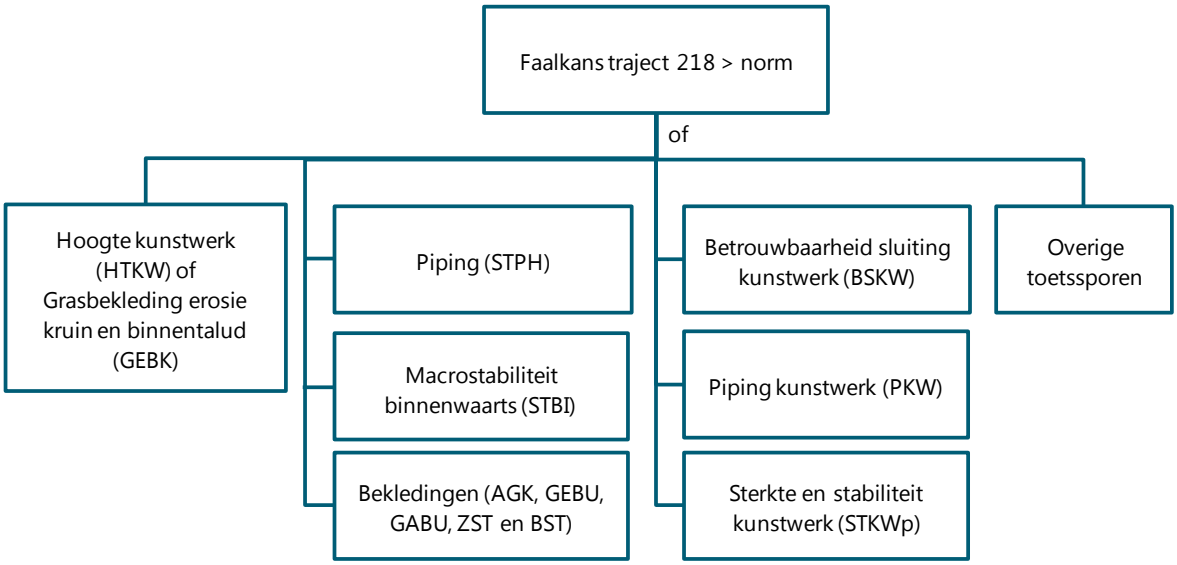
In de knikpuntenanalyse is voor de eerste vraag een foutenboom opgesteld (afbeelding 3.1). Deze boom wijkt af van de bestaande foutenbomen[1] om aan te kunnen sluiten op het WBI2017. In de boom is het gehele traject opgenomen, in combinatie met de relevante toetssporen. Een toetsspoor is de wijze waarop een faalmechanisme of een onderdeel van de waterkering wordt beoordeeld en bestaat in de meeste gevallen uit:

- een eenvoudige toets;
- een gedetailleerde toets;
- een toets op maat.

Doorgaans vergt een gedetailleerde toets een grotere inspanning dan een eenvoudige toets en vergt een toets op maat een grotere inspanning dan een gedetailleerde toets. In de foutenboom zijn de toetssporen voor de kunstwerken en waterkerende eilanden visueel gegroepeerd, maar zijn als afzonderlijke toetssporen beschouwd.

[1] De foutenboom die is opgesteld ten behoeve van het ontwerp is opgenomen in [ref. 15 en 59]. In de derde toetsronde heeft Arcadis een nieuwe boom afgeleid en gerapporteerd in de Faalkansanalyse van de civiele delen [ref. 1].

Afbeelding 3.1 Top foutenboom knikpuntenanalyse voor gesloten toestand



Opmerkingen bij de foutenboom:

1 in de foutenboom is het toetsspoor Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW) opgenomen. Binnen dit toetsspoor wordt in de knikpuntenanalyse alleen het faalmechanisme bezwijken bodembescherming bij het niet sluiten van één of meerdere schuiven beschouwd. Eventueel waterbezwaar door het (deels) niet sluiten van de kering wordt niet beschouwd in deze foutenboom, maar vindt plaats binnen de knikpuntenanalyse in relatie tot de prestatiepeilen;

2 onder de bekledingen is het toetsspoor BST (breuksteen stabiliteit). Dit toetspoor is niet opgenomen in het WBI2017. Het toetsspoor is hier gedefinieerd, omdat het relevant is voor de breukstenen aanzetdammen;

3 onder overige toetssporen vallen de indirecte faalmechanismen, zoals zettingsvloeiing en niet-waterkerende objecten. Het optreden van een indirect faalmechanisme leidt niet direct tot falen van de OSK, maar tot een vermindering van de sterkte en/of toename van de belasting.

3.1.2 Norm

Ondergrens en signaleringswaarde

De Waterwet schrijft per dijktraject doorgaans twee veiligheidsnormen voor: een signaleringswaarde en een ondergrens. De signaleringswaarde is veelal strenger dan de ondergrens en dient om de beheerder tijdig te attenderen dat de waterkering binnen afzienbare tijd niet meer voldoet aan het minimaal beoogde beschermingsniveau. Daarmee heeft de beheerder tijd om de versterkingsopgave voor te bereiden. In hoofdlijnen is het proces:

- beheerders geven aan de minister van I&M door als bij een wettelijke beoordeling een dijktraject niet meer voldoet aan de **signaleringswaarde**;
- het prioriteren en programmeren van de versterkingsopgave wordt op basis van deze gegevens landelijk gemaakt;
- de ontwerpen van de versterkingsopgaven worden (doorgaans) opgesteld op basis van de **ondergrens**, gegeven de condities aan het einde van de levensduur.

Tabel 3.1 Faalkans OSK [ref. 19]

Traject	Signaleringswaarde	Ondergrens
218	1:30.000	1:10.000

In de knikpuntenanalyse is voor de norm de ondergrenswaarde voor de OSK aangehouden (1:10.000). Een knikpunt geeft immers aan wanneer de waterkering niet meer voldoet aan de norm en geeft niet het

moment wanneer een proces in werking gesteld moet worden om versterkingsmaatregelen te onderzoeken (signaleringswaarde).

Faalkansbegroting

Binnen het WBI2017 is het mogelijk om de OSK op trajectniveau te beoordelen of op het niveau van een vak (doorsnede of kunstwerk). De faalkans conform de norm (1/10.000 per jaar) wordt in het laatste geval eerst verdeeld over de verschillende faalmechanismen middels een verdeelsleutel (de faalkansbegroting).

In het WBI2017 is een standaard faalkansbegroting opgenomen [ref. 23]. In de knikpuntenanalyse is deze begroting overgenomen en daarnaast het effect van een aangepaste begroting onderzocht (Tabel 3.2). De belangrijkste reden voor een aangepaste begroting zijn:

- een relatief groot deel van het traject bestaat uit kunstwerken;
- de faalkans van het faalmechanismen piping is klein, omdat (i) de waterkerende grondconstructies veelal opgebouwd zijn met zand op een zandondergrond, (ii) bij de waterkerende eilanden sprake is van een grote kwelweglengte en (iii) aan weerszijden van de kering bodembeschermingen aanwezig zijn die uitspoelen van materiaal voorkomen;
- het toetsspoor voor de stabiliteit van breuksteenbekledingen is niet opgenomen in de standaard faalkansbegroting.

Tabel 3.2 Faalkansbegroting voor gesloten toestand[1]

Toetsspoor	**Faalkansruimtefactor (ϖ) standaard**	**Faalkansruimtefactor (ϖ)** aangepast
hoogte kunstwerk (HTKW) of grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEBK)	0,24	0,20
piping (STPH)	0,24	0,01
macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	0,04	0,04
golfklappen op asfaltbekledingen (AGK)	0,01	0,01
grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	0,05	0,05
grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)	0,01	0,01
stabiliteit steenzetting (ZST)	0,03	0,03
stabiliteit breuksteen (BST)	-	0,04
betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)	0,04	0,04
piping kunstwerk (PKW)	0,02	0,02
sterkte en stabiliteit kunstwerk (STKWp)	0,02	0,25
overige toetssporen	0,30	0,30
Totaal	1,00	1,00

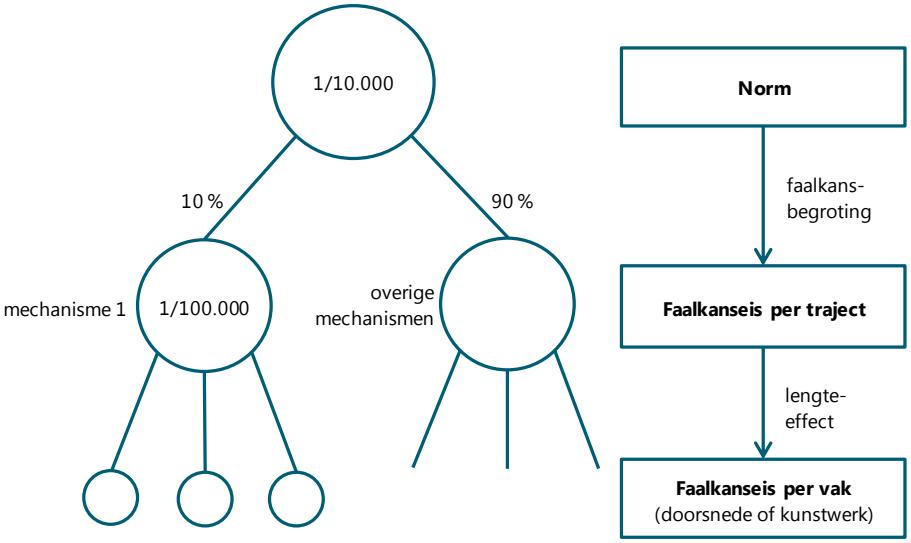
De grootste verschuiving in de aangepaste verdeling vindt plaats van STPH naar STKWp. Omdat het toetsspoor STPH een nauwelijks relevant faalmechanisme is voor de OSK, is de aangepaste faalkansbegroting met name relevant voor STKWp. In bijlage I is het effect van deze verschuiving voor dit toetsspoor nader toegelicht.

[1] De aangepaste begroting is een voor de OSK geoptimaliseerde verdeling van de toelaatbare faalkansen voor de toetssporen binnen de beschikbare faalkansruimte. De voorgestelde aanpassingen kunnen alleen binnen een toets op maat. De haalbaarheid van de begroting moet nader onderzocht worden in de beoordelingsronde 2017 tot 2023.

Lengte-effect

Om de faalkanseis voor een faalmechanisme te vertalen naar een faalkanseis op vakniveau, is het lengte-effect in rekening gebracht (Afbeelding 3.2). Het lengte-effect brengt de invloed van variaties in de eigenschappen van de waterkering (zoals opbouw van een dijklichaam) en ondergrond (zoals sterkte en opbouw) binnen een traject op de faalkans van een faalmechanisme in rekening. De factor voor het lengte-effect verdisconteert daarmee de kans dat een traject faalt, groter is dan de kans dat een beschouwd vak binnen het traject faalt.

Afbeelding 3.2 Illustratie van het bepalen van de faalkanseis per vak voor een toetsspoor [ref. 23]



De faalkanseis per toetsspoor op vakniveau (doorsnede of kunstwerk) is als volgt afgeleid:

$$P_{eis;vak} = \frac{\omega P_{eis}}{N}$$

Waarin:

P_{eis} norm van het traject (1/10.000 voor de OSK);
ω faalkansruimtefactor voor het betreffende toetsspoor;
N lengte-effectfactor voor een doorsnede of kunstwerk.

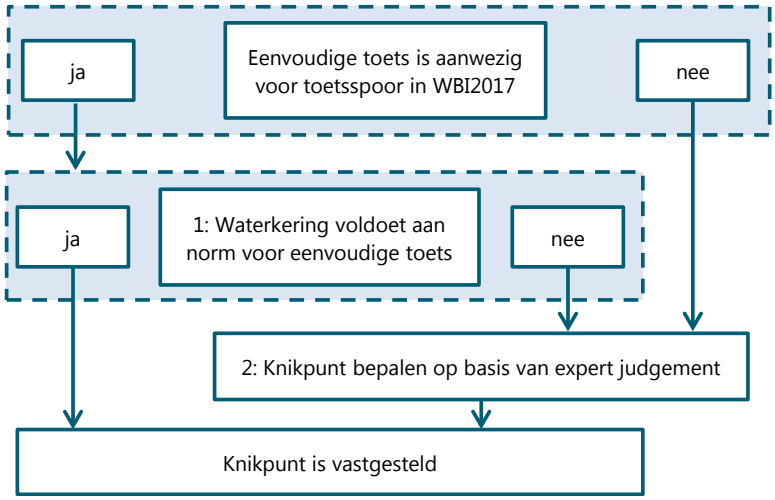
De lengte-effectfactor is per toetsspoor verschillend en doorgaans voorgeschreven in het WBI2017. In bijlage I is per toetsspoor de factor en de faalkanseis op vakniveau gegeven.

3.1.3 Stappen

In de knikpuntenanalyse zijn per toetsspoor de volgende stappen doorlopen (Afbeelding 3.3):

- (1) Uitvoeren eenvoudige toets: Voor een aantal toetssporen is in het WBI2017 [ref. 23] een eenvoudige toets opgenomen. Als deze niet beschikbaar is, dan is direct verder gegaan naar stap 2. Als een eenvoudige toets wel beschikbaar is, dan is deze doorlopen. Mogelijk volgt hieruit dat de faalkans verwaarloosbaar is. In dat geval is de beoordeling voor dit toetsspoor afgerond, anders is doorgegaan met stap 2;
- (2) Expert judgement: In stap 2 zijn de hydraulische belastingen (HB) vergeleken met de gehanteerde HB in de derde toetsronde en de gehanteerde HB bij het opstellen van het oorspronkelijke ontwerp. Vervolgens is op basis van expert judgement een schatting gegeven van het moment van optreden van het knikpunt.

Afbeelding 3.3 Stroomschema bepalen knikpunten OSK



De benodigde HB zijn afgeleid met behulp van Hydra-NL versie 1.3.0 (5e concept) en de database HR2006_Zeeuwse Stormvloedkeringen. Voor een nadere toelichting van de afleiding van de HB en de uitwerking van de stappen per toetsspoor wordt verwezen naar bijlage I.

3.2 Aanpak vraag 2: prestatiepeilen

Wordt voldaan aan de afspraken die zijn gemaakt over de prestatiepeilen in het achterland, die zijn gehanteerd bij het afleiden van de hydraulische belasting?

De beantwoording van deze vraag hangt af van de gemaakte afspraken (paragraaf 3.2.1) en de wijze waarop deze worden vertaald naar de HB (Bijlage I). De stappen zijn beschreven in paragraaf 3.2.2.

3.2.1 Afspraken

Op dit moment zijn er nog geen definitieve afspraken gemaakt over de prestatiepeilen op basis van de norm die vanaf 1 januari 2017 geldt. Wel is er een voorstel gedaan voor een mogelijke invulling. Dit voorstel is opgenomen in de memo Beheerruimte Oosterscheldekering in het WBI [ref. 53]. Op basis van deze memo is in de knikpuntenanalyse uitgegaan van de volgende afspraken:

- per traject (zoals gedefinieerd in de Waterwet) gelden twee prestatiepeilen: één prestatiepeil voor de ondergrens en één voor de signaleringswaarde;
- een prestatiepeil van een dijktraject is de gegarandeerde waterstand ter plaatse van de teen van de primaire waterkering met een kans van voorkomen gelijk aan de voorgeschreven norm (ondergrenswaarde of signaleringswaarde) voor het betreffende traject in de Waterwet;
- tussen de prestatiepeilen en de waterstanden die volgen uit het WBI is een minimale marge aanwezig voor de beheerruimte van de OSK. Deze marge betreft:
  - 5 cm voor de ondergrens;
  - 10 cm voor de signaleringswaarde.

3.2.2 Stappen

De verwachting is dat de marge van 5 en 10 cm absoluut is en meegenomen wordt in de afleiding van de HB voor het achterliggende gebied[1]. Als in de toekomst de zeespiegel stijgt, dan heeft dat zowel effect op de prestatiepeilen als de HB die volgen uit het WBI. Daarmee heeft een ZSS invloed op de HB op de dijktrajecten rondom de Oosterschelde, maar levert een ZSS geen knikpunten op voor de OSK in relatie tot de tweede vraag. Het effect van de ZZS op de HB op de dijktrajecten rondom de Oosterschelde is meegenomen in de knikpuntenanalyse voor de dijken (hoofdstuk 4).

3.3 Knikpunten

3.3.1 Overzicht knikpunten

Een overzicht van de geschatte knikpunten van de relevante toetssporen in de tijd is gegeven in tabel 3.3. De meeste knikpunten treden op na 2050. Het moment van de knikpunten is afgeleid in bijlage I, voor het urgente knikpunt (HTKW) is in de navolgende paragraaf een beschrijving gegeven.

Tabel 3.3 Overzicht beredeneerde schatting van het moment van optreden van de knikpunten

Toetsspoor	**Voor 2050** (ZZS <0,22 m)	**Na 2050** (ZSS >0,22 m)	**Na 2100** (ZSS > 0,72 m)
grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEBK)		x	
piping (STPH)			n.v.t.
macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)			x
stabiliteit breuksteen (BST)		x	
hoogte kunstwerk (HTKW)	x		
betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)			x
piping kunstwerk (PKW)			x
sterkte en stabiliteit kunstwerk (STKWp)		x	

3.3.2 Knikpunten voor 2050

Alleen het toetsspoor Hoogte kunstwerk (HTKW) treedt naar verwachting voor 2050 op. Dit komt door de bekleding van het sluisplateau van de Roompotsluis. Het sluisplateau van de Roompotsluis (Afbeelding 3.4) heeft een kerende hoogte van NAP +5,8 m en is conform de toetsrapportage uit de derde toetsronde bekleed met basalton betonzuilen van 0,18 m hoog, op een 0,3 m dik zanddichte filterlaag van grind 0/32 mm [ref. 1]. De bekleding loopt door tot circa 3 m boven het sluisplateau op de taluds van de landhoofden (Afbeelding 3.5).

[1] Momenteel is de marge nog niet meegenomen in Hydra-NL. Naar verwachting wordt in juni 2017 een versie van Hydra-NL formeel opgeleverd waarin de marge is verwerkt.

Afbeelding 3.4 Roompotsluis bekeken in de richting van de Oosterschelde

Afbeelding 3.5 Bekleding sluisplateau Roompotsluis

De zetsteenbekleding wordt belast door overslaande golven tijdens stormcondities. Voor de bekleding is volgens het rapport van Arcadis [ref. 2] het toelaaatbare ontwerpoverslagdebiet 1.100 l/s/m. Aan deze eis werd in de derde toetsronde nog net voldaan met de volgende hydraulische randvoorwaarden (HR2006):

- toetspeil: NAP +5,18 m;
- golfhoogte Hs: 2,4 m;
- golfperiode Tp: 8,7 s.

Conform het WBI2017 is de faalkanseis voor het toetsspoor (HTKW) op kunstwerkniveau 1/125.000 per jaar als de standaard faalkansbegroting wordt aangehouden en 1/150.000 per jaar in het geval van een aangepaste begroting. Bij deze herhalingstijden is de waterstand circa NAP +6,1 m respectievelijk NAP +6,2 m. Daarmee is er niet alleen sprake van een overslagsituatie, maar treedt er tevens overloop op (kruinhoogte NAP +5,8 m). Het overslagdebiet is daarmee aanzienlijk groter dan 1100 l/s/m.

4

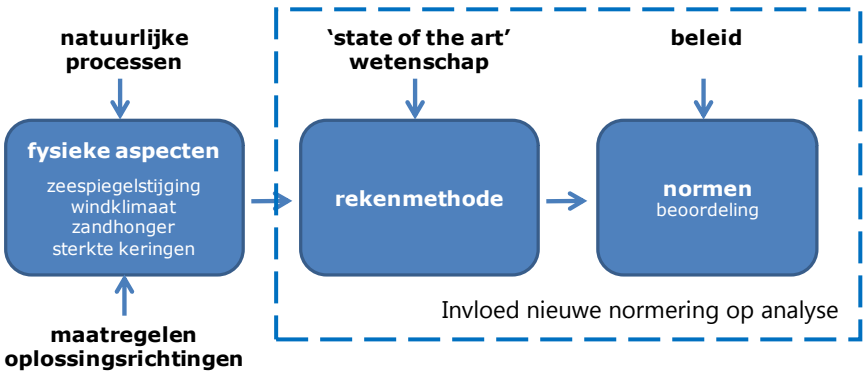
KNIKPUNTEN DIJKEN

In dit hoofdstuk worden mogelijke knikpunten voor de dijken geïdentificeerd. Eerst is geanalyseerd op welke aspecten de nieuwe normering effect heeft (paragraaf 4.1). Vervolgens zijn de wijzigingen in normering van de waterkering uitgewerkt in paragraaf 4.2. Een beschrijving van alle faalmechanismen die van toepassing zijn op dijken en dammen is opgenomen in paragraaf 4.3. De relatie tussen de van toepassing zijnde faalmechanismen en de hydraulische belastingen is gegeven in paragraaf 4.4. Deze relatie geeft een indicatie van welke maatregelen effectief kunnen zijn in het geval een knikpunt optreedt. De hydraulische belastingen zijn beschreven in paragraaf 4.5. Een toename van de hydraulische belastingen hoeft op zichzelf niet noodzakelijkerwijs te leiden tot knikpunten. Hiertoe moet per faalmechanisme worden beschouwd wat de wijzigingen zijn in de rekentechnieken en veiligheidsfactoren. Deze wijzigingen en de effecten daarvan zijn opgenomen in paragraaf 4.6. De knikpuntenanalyse dijken wordt afgesloten met een conclusie in paragraaf 4.7.

4.1 Invloed nieuwe normering

In de analyse is onderscheid gemaakt in (Afbeelding 4.1):
- daadwerkelijk in de Oosterschelde optredende fysieke processen;
- rekenmethoden die de fysieke processen beschrijven;
- normen waarmee we een oordeel uitspreken over de wenselijkheid van de beschreven processen.

Afbeelding 4.1 Onderscheid tussen fysieke aspecten, rekenmethode en normen



Door de nieuwe normering wijzigen de fysieke aspecten van het systeem niet. Wel wordt in de wijziging van de Waterwet de norm en de rekenmethode waarmee de veiligheid van de waterkering wordt beoordeeld van de waterkering aangepast. Benadrukt wordt dat de aanpassing van de normering en de aanpassing van de rekenmethode niet los van elkaar kunnen worden gezien, aangezien de factoren en parameters die in de nieuwe methodiek worden toegepast zijn afgestemd op de nieuwe normering.

Aanpak knikpuntenanalyse

In de knikpuntenanalyse zijn de volgende stappen doorlopen:
- opstellen beschrijvingen voor de relevante faalmechanismen voor dijken;

- bepalen benodigde hydraulische belastingen per faalmechanisme;
- berekenen van de hydraulische belastingen conform de nieuwe normeringen en bepalen effecten van de wijziging in de normering en de zeespiegelstijging;
- op basis van gewijzigde rekenregels en gewijzigde belastingen worden de knikpunten per faalmechanismen bepaald. Hierbij wordt per faalmechanisme een methode toegepast die het beste past bij de wijzigingen in methode en belastingen.

Toegepaste methoden om de knikpunten te bepalen zijn:
- volledig doorlopen van de beoordeling van het faalmechanisme voor een aantal karakteristieke doorsneden langs de Oosterschelde indien zowel de beoordelingsmethode als de belastingen significant zijn gewijzigd. Een voorbeeld van deze aanpak is het faalmechanisme Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (Hoogte);
- vergelijking met de gegevens van de derde toetsronde waarbij de effecten van de wijziging in de normering wordt meegenomen op basis van een beperkt aantal berekening. Deze methode is gebruikt indien de met name de 'meetlat' waaraan getoetst wordt is gewijzigd. Een voorbeeld van deze aanpak is het faalmechanisme Macrostabiliteit binnenwaarts (afschuiving dijklichaam);
- redeneren op basis van ervaringen met de nieuwe normering.

4.2 Norm per traject

De maximaal toelaatbare overstromingskans is gedefinieerd per dijktraject[1]. Langs de Oosterschelde varieert deze tussen 1/300 per jaar voor Noord-Beveland tot 1/10.000 per jaar voor Tholen (Afbeelding 4.2).

Doordat de wijziging van de norm per traject verschilt, kunnen bepaalde knikpunten voor sommige dijktrajecten eerder of later optreden, al naar gelang of de norm zwaarder of lichter is. Om deze reden zijn de knikpunten per faalmechanisme en per dijktraject gedefinieerd.

Afbeelding 4.2 Normering dijktrajecten langs de Oosterschelde

[1] Een dijktraject is een strekking van de waterkering waarbij een doorbraak op een willekeurige locatie tot een zelfde schadebeeld en slachtoffers zal leiden. Op locaties waar bijvoorbeeld een regionale waterkering aansluit op de primaire waterkering is veelal een grens aanwezig tussen dijktrajecten.

4.3 Faalmechanismen waterkeringen

4.3.1 Beschrijving

Een dijk kan op verschillende wijzen falen. Deze verschillende wijzen waarop een dijk kan falen is in het WBI vertaald naar verschillende toetssporen waarop de dijk getoetst moet worden. De sporen waarop de dijk getoetst moet worden zijn [ref. 23]:

- macrostabiliteit binnenwaarts (afschuiving dijklichaam): door onvoldoende geotechnische sterkte kan een dijklichaam binnenwaarts afschuiven. Het gaat om een massa grond die wegglijdt.
- piping: grondwater stroomt, door het verschil in waterstand aan de buiten- en de binnenzijde, onder de dijk of een damwand door. Die stroming kan grond meenemen, waardoor gangen ontstaan onder de dijk zandmeevoerende wellen ontstaan. Dit kan ertoe leiden dat de dijk wordt ondermijnd en instort;
- microstabiliteit: door een potentiaalverschil over de dijk ontstaat een stroming door de dijk en kan bij de binnenteen van de dijk water uittreden en mogelijk de bekleding van het binnentalud worden opgedrukt.
- bekledingen:
  De toetssporen voor het beoordelen van bekledingen zijn onderverdeeld naar type bekleding (asfalt, gras en steenzettingen):
  - asfaltbekledingen:
    - golfklappen op asfaltbekledingen: Asfalt op dijken is, net zoals alle andere asfaltbekledingen, vermoeiingsgevoelig. Bij een langdurige belasting op één niveau neemt de belasting die door de bekleding kan worden weerstaan af. Uiteindelijk zal de bekleding falen door scheurvorming, die ontstaat door het overschrijden van de breuksterkte door golfklappen;
    - wateroverdrukken bij asfaltbekledingen: Na hoogwater kan de waterstand in de waterkering de val van het buitenwater niet volgen. Hierdoor ontstaat een verval over de asfaltbekleding op het buitentalud. Indien het gewicht van de bekleding onvoldoende is, kan deze door het waterstandsverschil worden opgedrukt van het buitentalud;
  - grasbekleding:
    - grasbekleding erosie buitentalud: door golfklappen op en rond de waterlijn en golfoploop boven de waterlijn kan de grasbekleding en de daaronder gelegen kleilaag eroderen. De belasting op de grasbekleding wordt voornamelijk bepaald door de duur van de golfklappen en golfoploop, wat samenhangt met het waterstandsverloop en de hoogte van het beschouwde punt op het buitentalud;
    - grasbekleding erosie kruin en binnentalud: de waterstand is te hoog, de golven slaan over de dijk heen. Enige overslag over de kering kan worden verwerkt, omdat het water dan nog afgevoerd kan worden via het gewone waterstelsel achter de kering, mits de bekleding van het binnentalud van de dijk voldoende erosiebestendig is. Wanneer het binnentalud wegslaat, spreken we van falen. In de voorgaande toetsronde werd dit faalmechanisme ‘Overloop en overslag’ genoemd, vanwege de directe relatie met het golfoverslagdebiet;
    - grasbekleding afschuiven binnentalud: ter bescherming tegen golfoverslag heeft het binnentalud van een dijk doorgaans een bekleding van bijvoorbeeld gras, asfalt of stenen nodig. Onder deze bekleding kunnen wateroverdrukken ontstaan door het verval over de waterkering én infiltratie door overslaand water. Hierdoor kan de bekleding afschuiven, waarna het ondergelegen kernmateriaal kan eroderen en een bres kan ontstaan;
  - steenzetting: Onder het faalmechanisme steenzettingen vallen meerdere deelfaalmechanismen die allen met eenzelfde model worden berekend. Centraal in de deelfaalmechanismen is de golfbelasting op het talud als aandrijving van het falen van de steenzetting.

Bovenstaande faalmechanismen betreffen alleen de directe faalmechanismen van een waterkering. Naast directe faalmechanismen bestaan ook indirecte faalmechanismen. Indien een indirect faalmechanisme optreedt, leidt dit niet automatisch tot een overstroming. Wel kan de belasting op de waterkering zwaarder worden bij het optreden van een indirect faalmechanisme, of de sterkte van de waterkering afnemen. Dit kan op zijn beurt leiden tot falen van de waterkering als geheel.

Stabiliteit van het voorland is een voorbeeld van een indirect faalmechanisme. Het falen van het voorland kan effect hebben op de waterkerende functie van de waterkering: zo kan bijvoorbeeld zettingsvloeiing[1] leiden tot schade aan de dijk, die vervolgens leidt tot een verminderde macrostabiliteit of een verhoging van de golfbelasting doordat demping op het voorland afneemt. Indien een indirect faalmechanisme niet kan worden uitgesloten of de waterveiligheid (negatief) beïnvloeden, moeten de effecten van deze faalmechanismen worden meegenomen als scenario in de beoordeling van de overige faalmechanismen. De kans van optreden van dit scenario is in dat geval gelijk aan de kans van optreden van het indirecte faalmechanisme.

Van de indirecte faalmechanismen is alleen zettingsvloeiing beschouwd in de knikpuntenanalyse. De reden hiervoor is dat dit faalmechanisme een sterkt verband heeft met de morfologie en het veranderen van de vooroever.

4.3.2 Faalkansbegroting

Uitgegaan wordt van de standaard faalkansverdeling [ref.21], zie Tabel 4.1. Uitgaan van de standaard faalkansbegroting is een conservatief uitgangspunt, doordat niet de gehele faalkansruimte wordt gebruikt. Bij het beoordelen van de waterkering kan, indien volledig probabilistisch wordt getoetst, de faalkansruimte geheel worden benut. De optimale verdeling van de faalkansruimte is per traject anders. Om deze reden is voor een algemeen beeld van de dijken langs de Oosterschelde gebruikt gemaakt van de standaardverdeling.

Tabel 4.1 Standaard faalkansverdeling

Type waterkering	Faalmechanisme	Faalkansruimte
dijk	overloop en golfoverslag	24 %
	opbarsten en piping	24 %
	macrostabiliteit binnenwaarts	4 %
	bekledingen	10 %
kunstwerken	niet sluiten	4 %
	piping	2 %
	constructief falen	2 %
duin		10 %
overig		20 %
Totaal		**100 %**

[1] Een zettingsvloeiing is een taludinstabiliteit van een relatief steil voorland waarbij zand wegvloeit op de manier van een (dikke) vloeistof in een tijdsbestek van enkele minuten. Het zand komt pas tot rust onder een zeer flauwe helling met mogelijk schade aan de dijk.

4.3.3 Lengte-effect

Voor beoordeling van de dijken langs de Oosterschelde dient de faalkanseis van de dijktrajecten, met in achtneming van de faalkansverdeling, te worden vertaald naar een faalkanseis per doorsnede. Bij deze vertaling dient rekening gehouden te worden met het feit dat de kans dat het ergens in de dijkring misgaat, groter is dan de kans dat het op een specifieke locatie van de dijk misgaat. In deze vertaalslag wordt daarom gebruik gemaakt de lengte-effectfactor.

De lengte-effectfactor is afhankelijk van het beschouwde faalmechanisme en de onzekerheid binnen het betreffende faalmechanisme. Voor de hoogte van de waterkering is met een grote mate van zekerheid het zwakste punt van de dijk te identificeren: dit is de locatie met de laagste kruinhoogte. Daarnaast is de belasting ook in hoge mate gecorreleerd; als op één locatie sprake is van hoogwater, dan geldt dit voor alle locaties. Voor de bepaling van de hoogte van de waterkering wordt daarom uitgegaan van een relatief kleine lengte-effectfactor van 2 [ref. 30].

Voor het afschuiven van het dijklichaam en piping is er juist sprake van een grote lengte-effectfactor in de orde grootte 20 tot 30. De reden hiervoor is de grote spreiding in sterkteparameters in de ondergrond en het beperkte aantal (punt) metingen wat beschikbaar is. De exacte waarde van de lengte-effectfactor voor deze faalmechanismen hangt af van de lengte van het traject. Een langer traject heeft een grotere lengte-effectfactor. De te hanteren waarden van de lengte-effectfactor zijn opgenomen in [ref. 30].

4.4 Relatie faalmechanismen en belastingen

De faalmechanismen kunnen worden onderverdeeld naar het soort belasting, dat maatgevend is voor het faalmechanisme. Tabel 4.2 koppelt de belastingen aan de faalmechanismen.

Tabel 4.2 Koppeling belasting aan faalmechanismen

Faalmechanisme	Maximum waterstand bij norm	Golven	Verloop buitenwaterstand[1]
macrostabiliteit binnenwaarts	x		x
piping	x		x
microstabiliteit	x	x	x
bekleding binnentalud			
grasbekleding erosie kruin en binnentalud	x	x	
grasbekleding afschuiven binnentalud	x	x	
bekleding buitentalud		x	
golfklappen op asfaltbekledingen		x	x
wateroverdrukken bij asfaltbekledingen	x		x
grasbekleding erosie buitentalud		x	x
grasbekleding afschuiven buitentalud		x	x
stabiliteit steenzettingen		x	x[2]

*1 Voor macrostabiliteit, piping en microstabiliteit is ook het verloop van de buitenwaterstand (driedaags gemiddelde) van belang. Het verloop van de gemiddelde waterstand bepaalt in grote mate de waterspanningen in de ondergrond, terwijl de top van de storm door de beperkte duur hier een veel beperktere invloed op heeft.

*2 Voor steenzettingen wordt het verloop van de buitenwaterstand niet expliciet toegepast in het model SteenToets. In het ontwerp van de bekledingen in het kader van Projectbureau Zeeweringen is wel rekening gehouden met de buitenwaterstand en met name met langdurige golfaanval op een bepaalde hoogte.

4.5 Hydraulische belastingen

De hydraulische belasting door golven en waterstanden wordt uitgedrukt in belastingparameters: duur, richting en hoogte van combinaties van waterstanden en golven [ref. 22]. De te gebruiken hydraulische belastingen verschillen per faalmechanisme en kunnen afhangen van het detailniveau waarop het betreffende faalmechanisme wordt beschouwd. In onderstaande paragrafen zijn de belangrijkste hydraulische belastingen uitgewerkt.

4.5.1 Methodiek

De bedreiging voor de dijken langs de Oosterschelde wordt gevormd door een hoge zeewaterstand en wind (zowel snelheid als richting). Voor een groot aantal combinaties van de bedreigingen zijn voor locaties langs de dijken aan de Oosterschelde de belastingen bepaald door middel van productieberekeningen. Hierbij zijn de waterstanden bepaald met het model IMPLIC en de golven met het model SWAN. De resulterende golfhoogtes en waterstanden zijn opgeslagen in databases, die door Rijkswaterstaat ter beschikking zijn gesteld.

De hydraulische belastingen zijn vervolgens bepaald met het programma Hydra-NL. In dit programma wordt de statistiek van de bedreigingen gecombineerd met de databases om per uitvoerlocatie de waterstand en golfhoogte bij een bepaalde terugkeertijd te bepalen.

In het kader van de nieuwe normering zijn geen nieuwe productieberekeningen uitgevoerd. De inhoud van de databases is daarmee gelijk aan de HR2006 [ref. 16]. Wat wel is gewijzigd in de nieuwe normering is de statistiek van de zeewaterstand buiten de OSK, de statistiek van de windsnelheden en -richting, en een verbetering van de vertaling naar waterstanden met het IMPLIC model.

Voor alle faalmechanismen dienen de hydraulische belastingen te worden afgeleid bij de norm van het traject. Uitzondering hierop vormen de hydraulische belastingen voor het faalmechanisme Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (golfoverslag) en de daaraan gerelateerde faalemchanismen. Voor deze faalmechanismen dient nadrukkelijk de faalkansbegroting (paragraaf 4.3.2) en de lengte-effectfactor (paragraaf 4.3.3) te worden meegenomen [ref. 22].

4.5.2 Onzekerheden

De belangrijkste ontwikkeling in de hydraulische belastingen is dat onzekerheden (zie onderstaand kader) expliciet worden meegenomen. Het programma Ringtoets was op het tijdstip van het schrijven van deze analyse nog niet beschikbaar voor het belastingsmodel van de Oosterschelde met de OSK. Het effect van het meenemen van onzekerheden en de nieuwe normering is in onderstaande paragrafen daarom beschouwd met het programma Hydra-NL, waarbij de methodiek conform OI2014v3 is gevolgd.

Onzekerheden en verwerking daarvan
Er zijn twee typen onzekerheden, natuurlijke variabiliteit en kennisonzekerheden. De natuurlijke variabiliteit is de kans van voorkomen van een bepaalde belasting. Dit is de statistiek die is opgenomen in zowel Ringtoets als Hydra-NL. De natuurlijke variabiliteit is de enige onzekerheid in hydraulische belastingen die in de voorgaande toetsronden is meegenomen.

De kennisonzekerheden worden in het WBI expliciet meegenomen en kunnen verder onderverdeeld worden in statistische onzekerheden en in modelonzekerheden.

Statistische onzekerheden zijn onzekerheden die gerelateerd zijn aan de statistische betrouwbaarheid van de schatting/keuze van de kansverdelingen die de bedreigingen moeten beschrijven, inclusief de verdelingsparameters. Dit type onzekerheid is het gevolg van een beperkt aantal gegevens of metingen. De kansverdeling en bijbehorende parameters van de zeewaterstand te Hoek van Holland is bijvoorbeeld afgeleid op basis van een beperkte set van ongeveer 130 beschikbare jaarmaxima uit de periode 1880-2013. De kansverdelingen die zijn gefit op deze data, worden vervolgens gebruikt voor extrapolatie naar gebeurtenissen met terugkeertijden van 10.000 jaar of meer, wat gepaard gaat met een aanzienlijke onzekerheid. **In Hydra-NL zijn de statistische onzekerheden reeds verwerkt in de statistiek**.

Modelonzekerheden betreffen de onzekerheden in modelresultaten die worden gegenereerd door gebruik te maken van wiskundige recepten om bepaalde fysische verschijnselen te modelleren, zoals waterbeweging, golfopwekking en golfvoortplanting. Het betreft concreet de uitkomsten van de productieberekeningen met IMPLIC voor de waterstanden en SWAN voor de golfcondities. **In Hydra-NL worden de modelonzekerheden niet standaard meegenomen.** Voor modelonzekerheden zijn de onzekerheidstoeslagen conform OI2014v3 gehanteerd:
- **+0,40 m op de waterstand;**
- **+10 % op de golfbelastingen.**

In het OI2014v3 is de onzekerheidstoeslag voor zowel de statistische onzekerheid als de modelonzekerheid verdisconteerd. In Hydra-NL is de statistische onzekerheid al verdisconteerd in de berekeningen. Hierdoor is sprake van dubbeltelling. De modelonzekerheid van IMPLIC is in de orde grootte 0,2 tot 0,3 m. De dubbeltelling is daarmee in de orde grootte 0,1 m en is daarmee niet van dusdanige invloed dat hierdoor knikpunten zijn verschoven.

Effect
Het meenemen van de onzekerheidstoeslagen conform OI2014v3 leidt tot een conservatieve inschatting van de hydraulische belastingen. In het WBI2017 programma Ringtoets zijn deze toeslagen verwerkt in de berekeningen; dit betekent dat in dit programma geen toeslag achteraf wordt toegepast. Ringtoets is op dit moment alleen geschikt voor toetsingen, omdat de effecten van ZSS niet kunnen worden beschouwd. Wel is met behulp van het programma afgeschat wat de ruimte is van de onzekerheidstoeslag.

Voor de Oesterdam is de waterstand bij norm bepaald op NAP +4,34 m (zie tabel 4.3). Uit de berekening met Ringtoets volgt een waterstand van NAP +4,09 m. Hieruit volgt dat de hydraulische belastingen conform OI2014 robuust zijn en tot een verhoging leiden van circa 0,2 m.

4.5.3 Locaties

In de knikpuntenanalyse zijn de uitvoerlocaties in Hydra-NL zoals weergegeven in Afbeelding 4.3 toegepast.

Afbeelding 4.3 Toegepaste uitvoerlocaties bepaling hydraulische belastingen

4.5.4 Waterstand

Tabel 4.3 geeft de waterstand bij norm weer voor de geselecteerde uitvoerlocaties. Tevens is in deze tabel de waterstand opgenomen zoals conform HR2006 bij een herhalingstijd van 4.000 jaar. Wanneer de kolommen onderling worden vergeleken, kan worden geconcludeerd voor alle uitvoerlocaties dat de waterstand bij norm is toegenomen ten opzichte van de vigerende norm. Dit is grotendeels te verklaren door gewijzigde toeslagen.

Het verschil tussen de waterstand bij norm varieert van circa 0,2 m het traject met de laagste norm (1/300 per jaar, Noord-Beveland) tot maximaal 0,54 m voor de locatie Het Stinkgat. Het effect van aanpassingen in het model zijn ook zichtbaar; niet op alle locaties met gelijke norm is het verschil in toegenomen waterstand gelijk.

Opvallend is het kleine verschil tussen de waterstand voor de zichtjaren 2017, 2050 en 2100. Voor de zichtjaren 2017 en 2050 zijn de waterstanden nagenoeg aan elkaar gelijk, voor het zichtjaar 2100 liggen deze beperkt (maximaal 0,2 m) hoger. Ter vergelijking: op de Noordzee bedraagt de ZSS ten opzichte van 2017 0,22 m in 2050 en 0,72 m voor 2100, uitgaande van het W+ scenario KNMI 2006. De ZSS op de Noordzee werkt klaarblijkelijk niet of beperkt door op de Oosterschelde.

De verklaring hiervoor ligt in de OSK. Bij ongewijzigd sluitingsregime wordt de kering gesloten bij een verwachte waterstand hoger dan NAP +3,0 m. Het peil van de Oosterschelde zal hierdoor niet hoger worden dan het sluitpeil, afgezien van invloeden van opwaaiing, slingeringen en effecten van de betrouwbaarheid van de OSK. Wel leidt de zeespiegelstijging tot een hogere sluitfrequentie van de OSK, doordat de waterstand van hoger dan NAP +3,0 m vaker wordt overschreden.

Bovenstaand effect is ook goed te zien in de probabilistische berekening van de waterstand. Wordt de waterstand in 2017 nog mede bepaald door scenario's waarbij de kering niet is gesloten, voor 2100 wordt de waterstand op de Oosterschelde voor alle scenario's bepaald door strategische sluitingen.

De beperkte invloed van ZSS op de extreme waterstand op de Oosterschelde heeft voor alle faalmechanismen die alleen afhankelijk zijn van de extreme waterstand tot gevolg dat, als de waterkering in het zichtjaar 2017 voldoet aan het WBI2017, deze ook geen knikpunt vormt tot 2100. Daarbij wordt wel uitgegaan van een functionerende OSK in combinatie met een ongewijzigd sluitingsregime.

Tabel 4.3 Waterstand conform WBI2017 (inclusief onzekerheidstoeslagen)en vergelijking met waterstanden conform HR20061

Naam uitvoerpunt HR2006	Waterstand HR2006 norm [m+NAP]				Waterstand WBI2017 [m + NAP]			
	norm	2011	2050	2100	norm	2017	2050	2100
ZSS		0,07 m	0,35 m	0,85 m		0,07 m	0,35 m	0,85 m
Anna Jacobapolder	4.000 jaar	3,71	3,72	3,79	3.000 jaar	4,02	4,03	4,07
Grevelingendam	4.000 jaar	3,73	3,74	3,83	10.000 jaar	4,11	4,12	4,20
Het Stinkgat	4.000 jaar	3,77	3,78	3,85	10.000 jaar	4,31	4,33	4,41
Krabbendijke	4.000 jaar	3,77	3,77	3,8	3.000 jaar	3,97	3,97	3,99
Oesterdam	4.000 jaar	4,21	4,22	4,27	10.000 jaar	4,34	4,35	4,37
Oosterland	4.000 jaar	3,54	3,55	3,66	3.000 jaar	3,83	3,84	3,88
Pijlerdam	4.000 jaar	3,12	3,19	3,43	1.000 jaar	3,49	3,53	3,66
Roompot	4.000 jaar	3,13	3,19	3,42	300 jaar	3,35	3,42	3,53
Sint-Maartensdijk	4.000 jaar	3,79	3,8	3,85	10.000 jaar	4,01	4,01	4,06
t Oude dorp	4.000 jaar	3,58	3,59	3,69	10.000 jaar	3,96	3,97	4,10
Veerhaven Kats	4.000 jaar	3,25	3,28	3,51	300 jaar	3,49	3,50	3,50
Zierikzee	4.000 jaar	3,32	3,34	3,53	3.000 jaar	3,62	3,63	3,73

4.5.5 Hydraulisch belastingsniveau

Tabel 4.4 geeft het hydraulisch belastingsniveau[2] (HBN) weer voor de geselecteerde uitvoerlocaties. Tevens is in deze tabel het HBN opgenomen zoals bepaald conform HR2006. Uit de tabel blijkt dat het HBN over het algemeen lager komt te liggen dan conform HR2006. De reden hiervoor is dat conform VTV2006 uitgegaan dient te worden van een overslagdebiet van 1 l/s/m (veilige waarde waarbij nog geen schade ontstaat), terwijl in het WBI2017 uitgegaan mag worden van 5 l/s/m (veilige waarden waarbij de waterkering nog net niet faalt).

Analoog aan de constatering bij de waterstand, is bij het HBN sprake van een klein verschil tussen de zichtjaren 2017, 2050 en 2100. De verklaring hiervoor ligt wederom bij de OSK, die er voor zorgt dat de invloed van de zeespiegelstijging op de maximum waterstand op de Oosterschelde gering is.

Tabel 4.4 HBN conform WBI2017 (inclusief onzekerheidstoeslagen) en vergelijking met HBN conform HR20063

Naam uitvoerpunt HR2006	Kruinhoogte legger [m+NAP]	$HBN_{1l/s/m}$ conform HR2006[m+NAP]		$HBN_{5l/s/m}$ conform WBI2017 [m + NAP]			
		norm	2011	norm	2017	2050	2100
ZSS			0,07 m		0,07 m	0,35 m	0,85 m
Anna Jacobapolder	6,8	4.000 jaar	4,4	25.000 jaar	4,19	4,26	4,41

[1] Zeespiegelstijging (ZSS) ten opzichte van referentiejaar 1990.

[2] Het hydraulisch belastingsniveau (HBN) is het kruinniveau waarbij een bepaald overslagdebiet optreedt. Ligt het HBN lager dan de kruin, dan is optredend overslagdebiet kleiner dan het criterium en kan gesteld worden dat de waterkering voldoet. Ligt het HBN hoger, dan is het overslagdebiet hoger dan het criterium en voldoet de waterkering daarmee niet.
In de derde toetsronde is het HBN bepaald voor een overslagdebiet van 1 l/s/m. In de nieuwe normering wordt uitgegaan van hogere overslagdebieten; Het HBN voor de nieuwe normering is derhalve bepaald bij 5 l/s/m.

[3] Zeespiegelstijgin (ZSS) ten opzichte van referentiejaar 1990.

Naam uitvoerpunt HR2006	Kruinhoogte legger [m+NAP]	$HBN_{1l/s/m}$ conform HR2006[m+NAP]		$HBN_{5l/s/m}$ conform WBI2017 [m + NAP]			
		norm	2011	norm	2017	2050	2100
Grevelingendam	6,4	4.000 jaar	4,4	83.333 jaar	4,82	4,88	5,00
Het Stinkgat	6,1	4.000 jaar	4,7	83.333 jaar	4,78	4,90	5,05
Krabbendijke	7,0	4.000 jaar	5,0	25.000 jaar	4,64	4,68	4,76
Oesterdam	6,5*	4.000 jaar	5,9	83.333 jaar	5,50	5,63	5,88
Oosterland	5,5	4.000 jaar	4,6	2.5000 jaar	4,52	4,71	5,17
Pijlerdam	6,2	4.000 jaar	4,9	8.333 jaar	4,50	4,59	4,66
Roompot	7,5	4.000 jaar	5,0	2.500 jaar	4,28	4,29	4,46
Sint-Maartensdijk	6,3	4.000 jaar	5,0	83.333 jaar	5,46	5,51	5,43
t Oude dorp	6,8	4.000 jaar	5,6	83.333 jaar	5,35	5,54	5,83
Veerhaven Kats	6,5	4.000 jaar	5,1	2.500 jaar	4,47	4,51	4,59
Zierikzee	7,3	4.000 jaar	5,8	25.000 jaar	6,07	6,09	6,12

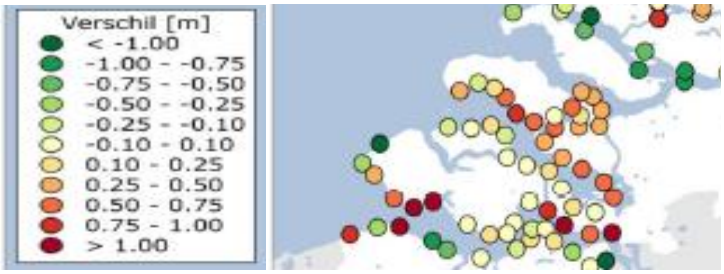
* Kruinhoogte tussen NAP +6,0 m en NAP +7,0 m [ref. 33].

4.5.6 Bekledingen

Voor bekledingen zijn de hydraulische belastingen bepaald voor de uitvoerlocaties Zierikzee en Krabbendijke. Zierikzee wordt hierbij als representatief gezien voor het noordelijke deel van de Oosterschelde en Krabbendijke voor het zuidelijke deel. De reden hiervoor is dat in de verschilstudie naar het effect van het toepassen van het WBI2017 en het expliciet meenemen van onzekerheden het grootste verschil in HBN tussen de nieuwe normering (inclusief onzekerheden) en de HR2006 (Afbeelding 4.4) voor Zierikzee is geconstateerd[1].

Voor het zuidelijk deel van de Oosterschelde is het HBN niet noemenswaardig toegenomen ten opzichte van de huidige normering.

Afbeelding 4.4 Verschil HBN WBI2017 (nieuwe norm, inclusief onzekerheden) en HR2006, totale effect, uitsnede Oosterschelde [ref. 72]



Voor beide locaties zijn de hydraulische belastingen bepaald voor de verschillende normen 300 jaar, 1.000 jaar, 3.000 jaar en 10.000 jaar, zodat inzicht verkregen wordt in het effect van de verschillende normen op de

[1] Het betreffende verschil is niet teruggevonden in de berekening van het HBN. Reden hiervoor is dat gebruik gemaakt is van een andere versie van Hydra-Ring, waardoor de modelonzekerheid berekend is, in plaats van het hanteren van een vaste toeslag. Daarnaast wordt het HBN ook bepaald door de toegepaste geometrie. In de knikpuntenanalyse is de werkelijk aanwezige geometrie toegepast. De buitenberm in de geometrie leidt tot een lager HBN dan wanneer een standaardprofiel zonder buitenberm wordt toegepast.

hydraulische belastingen behorende bij bekledingen (tabel 4.5). Hierbij is gefocust op de golfhoogte, aangezien dit de belangrijkste parameter is. Tevens is een berekening gemaakt bij een terugkeertijd van 4.000 per jaar om inzicht te verkrijgen over de golfhoogten in de huidige normering.

Tabel 4.5 Golfhoogte voor steenzettingen bij waterstand NAP +3,0 m bij verschillende normen, inclusief +10 % onzekerheidstoeslag op de golfhoogte

Naam uitvoerpunt HR2006	Golfhoogte ontwerp [m] [ref. 55., 56.]	Golfhoogte HR2006 [m]	Golfhoogte nieuwe normering (inclusief onzekerheidstoeslag) [m]			
			300 jaar	1.000 jaar	3.000 jaar	10.000 jaar
Krabbendijke	1,05	1,04	1,00	1,07	1,13	1,21
Zierikzee	2,61 ~3,25	2,02	1,75	2,04	2,20	2,28

De hydraulische belastingen zijn alleen bepaald voor het jaar 2011. De hydraulische randvoorwaarden voor de overige zichtjaren zullen in dezelfde orde grootte liggen, omdat de hydraulisch belastingen op bekledingen voornamelijk bepaald worden door extreme windsnelheden, waarvan op dit moment nog geen inzicht is dat de statistiek hiervan gaat wijzigen in de toekomst. De effecten van zeespiegelstijging op golfhoogte, zoals hogere golfhoogte door grotere waterdiepte, worden verwaarloosd omdat de waterstand bij norm niet of beperkt toeneemt.

In tabel 4.5 zijn de golfhoogten volgens de vigerende norm vergeleken met de golfhoogten bij de nieuwe normering. Uit de tabel blijkt dat de golfhoogte voor Zierikzee in het ontwerp overschat is, wat komt doordat destijds is uitgegaan van de golfrandvoorwaarden bij een maatgevend windveld met een overschrijdingskans van 1/4.000 per jaar. Doordat in deze beschouwing de correlatie tussen de waterstand en de golfrandvoorwaarden niet is meegenomen, zijn de hydraulische randvoorwaarden voor met name de hoger op het talud gelegen bekledingen overschat.

Het verschil tussen de hydraulische belastingen bij de vigerende norm en de nieuwe normering is het gevolg van de onzekerheidstoeslag op de golfhoogte (zie onderstaand kader). Om de modelonzekerheden te verdisconteren, is op de golfbelasting een toeslag van +10 % op de golfhoogte toegepast, ongeacht de locatie binnen de Oosterschelde. Door deze toeslag liggen de golfhoogte behorende bij de nieuwe normering hoger dan de vigerende normering. Echter, vanwege de conservatieve aanname in de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden, passen deze in het noordelijk deel nog binnen de ontwerprandvoorwaarden.

Uit Afbeelding 4.4 blijkt dat in het noordelijk deel van de Oosterschelde het HBN toeneemt. De oorzaak van deze toename in het noorden ligt in de onzekerheid, wat leidt tot hogere rekenwaarden voor de golfhoogten. In het zuidelijk deel van de Oosterschelde is geen noemenswaardige stijging van het HBN te zien. Mogelijk leidt voor dit deel van de Oosterschelde de vaste toeslag van 10 % tot een overschatting van de hydraulische belastingen.

Hydraulische ontwerpbelastingen
Voor een optimaal ontwerp op basis van de overstromingsnorm zijn probabilistische randvoorwaarden nodig, die zouden er rekening mee moeten houden dat de kans op het samenvallen van een hoge waterstand met een grote golfbelasting minimaal is. Omdat deze probabilistische randvoorwaarden in deze vorm niet beschikbaar zijn, wordt binnen het Project Zeeweringen ontworpen met deterministische randvoorwaarden. Hierbij wordt voor alle waterstanden uitgegaan van de golfrandvoorwaarden bij een maatgevend windveld met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar. Hiertoe zijn de significante golfhoogte H, en de piekperiode T_p berekend voor alle windrichtingen. Vervolgens is voor elke waterstand de maatgevende combinatie van significante golfhoogte en piekperiode bepaald. Voor de golfrandvoorwaarden bij tussenliggende waterstanden wordt lineair geïnterpoleerd. Bij lagere waterstanden wordt lineair geëxtrapoleerd. Deze benadering zonder de beschouwing van de correlatie tussen de waterstand en de golfrandvoorwaarden kan, met name voor de hogere gedeelten van de bekleding, tot enige overschatting van de belasting leiden.

Er is rekening gehouden met de verwachte ongunstigste bodemligging in de planperiode van 50 jaar. Daartoe is op bepaalde locaties een verdieping ten opzichte van de huidige situatie in rekening gebracht, representatief voor de verwachte erosie.

Tijdens de maatgevende stormen variëren de waterstanden op de Oosterschelde minder dan op de Noordzee, omdat de OSK wordt gesloten bij waterstanden op de Noordzee van NAP +3 m en hoger. Hierbij wordt gestreefd naar een waterpeil van NAP +1 m op de Oosterschelde. Dit waterpeil wordt circa 10 uur gehandhaafd, aangezien de kering pas bij het eerstvolgende laagwater weer kan worden geopend. Indien wordt voorspeld dat ook het volgende hoogwater hoger zal zijn dan NAP +3 m, is het streven het waterpeil op de Oosterschelde na de tweede sluiting van de kering te beperken tot NAP +2 m. In de ontwerpberekeningen wordt bovendien rekening gehouden met een noodsluiting van de OSK. Bij een noodsluiting kan de waterstand oplopen tot het ontwerppeil, met een duur van 5 uur. In 2004 is een onderzoek gestart naar de effecten van de langer durende belastingen op de sterkte van de gezette bekledingen. Hieruit is gebleken dat evenals bij breuksteenbekledingen een zwaardere bekleding nodig is naarmate het aantal golven wat gedurende de storm de bekleding belast groter is.

De toetspeilen en ontwerppeilen van de Oosterschelde zijn gebaseerd op een noodsluiting van de OSK. Aangezien de OSK een vast sluitregime heeft, hoeft geen rekening gehouden te worden met een waterstandverhoging als gevolg van de zeespiegelrijzing. Daarom zijn op iedere locatie achter de OSK het toetspeil en het ontwerppeil gelijk aan elkaar en constant in de tijd (Ontwerppeil 2010-2060).

4.6 Knikpunten per faalmechanisme

4.6.1 Macrostabiliteit binnenwaarts

Bij toepassing van het WBI2017 leidt het faalmechanisme *Macrostabiliteit binnenwaarts* tot een knikpunt. Redenen hiervoor zijn:
- gewijzigd sterktemodel;
- nieuwe minimale veiligheidsfactoren die afhankelijk zijn van trajectlengte en norm;
- toegenomen waterstanden en daarmee toegenomen vervalbelasting op de waterkering.

Gewijzigd sterktemodel
In de nieuwe normering wordt overgestapt van het huidige Mohr-Coulombmodel naar het Critical State Soil Model (CSSM). Het CSSM-model wordt vaak ook wel aangeduid als het ongedraineerd rekenen voor klei en veen.

Voor het toepassen van het CSSM-model zijn aanvullende gegevens benodigd ten opzichte van de voorgaande toetsronden. Dit betreft onder andere de ongedraineerde schuifsterkte. Deze gegevens zijn niet beschikbaar uit de voorgaande toetsronde, waardoor het effect van het gewijzigde sterkte-model niet kan worden bepaald. Voor de beoordeling is een landelijke set met defaultwaarden beschikbaar. Deze waarden

betreffen een veilige inschatting die geldig is voor heel Nederland. Toepassing van de betreffende set leidt tot een zeer conservatieve benadering en is daarom niet toegepast.

Om bovenstaande reden is de analyse van het faalmechanisme *Macrostabiliteit* uitgevoerd op basis van het OI2014v3, waarin staat aangegeven hoe conform het huidige Mohr-Coulomb model tot een oordeel van de sterkte van de waterkering kan worden gekomen.

Minimale veiligheidsfactoren

In de derde toetsronde is de toetsing uitgevoerd door middel van een berekening per dijksectie van 100 m. De glijcirkels zijn bepaald met behulp van het glijvlakmodel van Bishop[1]. In de betreffende berekeningen is het betreffende profiel goedgekeurd indien de veiligheidsfactor (SF) groter is dan 1,12 [-]. Deze norm is voor alle dijkringen hetzelfde, aangezien deze gebaseerd is op de norm van de dijkringen (1/4.000 per jaar).

Veiligheidsfactor (SF)

De stabiliteit van een grondlichaam tegen afschuiven is onderzocht door vergelijking van de sterkte en de belasting. Het maximaal mobiliseerbare tegenwerkende moment (of de weerstandbiedende krachten) en het aandrijvend moment (of de aandrijvende kracht) worden berekend op basis van rekenwaarden. De variabelen die de sterkte vertegenwoordigen, worden door γ_R gedeeld zodat een veilige rekenwaarde voor de sterkte wordt verkregen. Daarentegen worden de variabelen die representatief zijn voor de belasting met γ_S vermenigvuldigd.

Voor het mechanisme macrostabiliteit wordt als volgt invulling gegeven aan de veiligheidsfactoren:
$\gamma_S = 1$ en $\gamma_R = \gamma_b\ \gamma_d\ \gamma_m\ \gamma_n$

Waarin:

- γ_b partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het schematiseren van de ondergrond (ook wel schematiseringsfactor genoemd);
- γ_d partiële veiligheidsfactor die verband houdt met het gebruikte model (ook wel modelfactor genoemd);
- γ_m partiële veiligheidsfactor die verband houdt met de materiaalparameters (ook wel materiaalfactor genoemd);
- γ_n partiële veiligheidsfactor die verband houdt met schade (ook wel schadefactor genoemd). De waarde van de schadefactor is afhankelijk van de betrouwbaarheid van de doorsnede. Dit betekent dat de norm van het traject, de faalkansverdeling en het lengte-effect de grootte van de schadefactor bepalen. Een hoge vereiste betrouwbaarheid van de doorsnede leidt tot een hoge schadefactor en daarmee tot een zwaardere waterkering;
- γ_R veiligheidsfactor van de sterkte;
- γ_S veiligheidsfactor van de belasting.

In de materiaalfactor γ_m zijn onzekerheden ten aanzien van de beschrijving van de schuifsterkte verdisconteerd. Deze worden verwerkt in de sterkte-eigenschappen die worden ingevoerd in het schuifsterktemodel.

De schematiseringsfactor, modelfactor en schadefactor worden met elkaar vermenigvuldigd en vormen de veiligheidsfactor waaraan de SF getoetst moet worden.

In het WBI is de minimale SF afhankelijk van de norm en de trajectlengte van het beschouwde dijktraject. Met andere woorden: in een langer traject is de kans groter dat ergens een afschuiving optreedt en om deze reden is de eis voor het betreffende traject strenger. In onderstaande tabel is per traject de vereiste SF opgenomen, voor zowel het model Bishop als het model Uplift-Van.

---

[1] In het geval van opdrijven en/of opbarsten is daarnaast gebruik gemaakt van het model Uplift-Van en een aangepast verloop van de waterspanningen in de ondergrond.

Tabel 4.6 Vereiste veiligheidsfactoren (SF) Macrostabiliteit (exclusief schematiseringsfactor)

Traject	Uitvoerlocatie	Norm	Lengte	y_n	SF_{Bishop}	$SF_{UpliftVan}$
26-2	n.v.t.	1.000	20700	1.07	1.19	1.14
26-3	Zierikzee/Oosterland	3.000	21900	1.10	1.22	1.17
216	n.v.t.	1.000	6050	1.04	1.16	1.10
217	Grevelingendam	10.000	7800	1.11	1.23	1.18
27-1	Anna Jacobapolder	3.000	16200	1.09	1.21	1.16
27-2	Het Stinkgat/'t Oude dorp/Sint-Maartensdijk	10.000	36800	1.14	1.27	1.21
219	Oesterdam	10.000	11500	1.12	1.24	1.18
31-2	Krabbendijk	3.000	28700	1.11	1.23	1.17
30-1	n.v.t.	1.000	19300	1.07	1.19	1.13
28-1	Veerhaven Kats/Roompot	300	23900	1.04	1.16	1.10

Uit tabel 4.6 blijkt dat de veiligheidsfactor (SF) voor nagenoeg alle trajecten, met uitzondering van Noord-Beveland, strenger is dan de huidige norm. Hieruit volgt dat de wijziging naar de nieuwe normering een knikpunt te weeg zal brengen, aangezien een deel van de dijktrajecten naar verwachting niet voldoet aan de nieuwe stabiliteitseis.

Uit de gegevens van de derde toetsronde blijkt dat een groot aantal doorsneden een hogere berekende SF hebben dan minimaal vereist. Dit wil zeggen dat delen van de waterkering wel zullen voldoen onder de nieuwe normering. De exacte lengte waarover aanpassingen noodzakelijk zijn na aanleiding van de wijziging in de norm dient te worden bepaald door middel van de volgende toetsronde.

Toegenomen waterstanden

Een ander effect van de nieuwe normering is dat de waterstanden waarbij het faalmechanisme *Macrostabiliteit* beschouwd dient te worden maximaal 0,4 m (zie tabel 4.3) hoger liggen. De hogere waterstand leidt tot een hogere freatische lijn in de waterkering (verhoging van de belasting) en hogere waterdruk in de ondergrond (verlaging van de sterkte). Voor *Macrostabiliteit binnenwaarts* leidt de toename van de buitenwaterstand tot een afname van circa 0,05 op de SF[1]. Conservatief wordt gesteld dat deze afname van de SF van toepassing is voor alle dijken langs de Oosterschelde.

Vergelijking met resultaten uit derde toetsronde

In de derde toetsronde zijn door het Waterschap Scheldestromen stabiliteitsberekeningen uitgevoerd voor elke 100 m van de waterkering. Uit deze berekeningen is gebleken dat in totaal circa 18 km in de derde toetsronde is afgekeurd en zal worden versterkt. Aangenomen is dat wanneer de betreffende strekkingen worden versterkt, deze ook voldoende sterkte hebben conform de nieuwe normering.

Voor elke locatie langs de dijken van de Oosterschelde is de berekende SF vergeleken met de SF zoals opgenomen in tabel 4.6. Hieruit volgt dat het huidig te versterken areaal toeneemt met circa 38 km. Deze lengte is gebaseerd op het conservatieve uitgangspunt dat de afname van de SF ten gevolge van de hogere waterstand op de Oosterschelde voor alle locaties geldt.

Knikpunt

In de toekomst blijft de waterstand bij norm op de Oosterschelde nagenoeg gelijk (tabel 4.3), uitgaande van een functionerende OSK en ongewijzigde sluitstrategie. Onder dagelijkse omstandigheden, in de aanloop naar de storm, neem door zeespiegelstijging de gemiddelde waterstand in de Oosterschelde wel toe. Dit leidt tot hogere waterspanningen in de ondergrond, aangezien hiervoor het langdurig gemiddelde van belang is en niet de hoogte van de piek van de storm. De hogere waterspanningen in de ondergrond leiden

[1] Gebaseerd op berekeningen uitgevoerd voor een aantal profielen in dijkring 27.

tot een verdere afname van de berekende schadefactoren. Zeespiegelstijging zal daarmee in de toekomst leiden tot een groter areaal waar de waterkering niet voldoet aan de eisen ten aanzien van *Macrostabiliteit binnenwaarts*.

4.6.2 Piping

Conform de nieuwe normering kan dit faalmechanisme worden uitgesloten, indien de waterkering aan de volgende eisen voldoet [ref. 23]:

- er is aantoonbaar in het verleden geen zandmeevoerende wel waargenomen;
- in calamiteitenplannen wordt rekening gehouden met maatregelen die moeten worden genomen wanneer twee extreme hoogwatergolven achter elkaar optreden;
- er is geen sprake van een aansluiting op een constructie of van een doorgaande leiding onder de waterkering;
- rivierafvoer speelt geen rol bij het verval over de waterkering;
- kwelweglengte is groter dan 50 m.

De redenatie achter deze eisen is dat, behoudens bij rivierdijken, de belastingsduur dusdanig kort is dat de grondwaterstroming nabij de teen van de dijk niet voldoende groot is om een doorgaande pipe te creëren. Belangrijke parameters in deze zijn de belastingsduur en de breedte van de waterkering. Vandaar dat rivierafvoer is uitgesloten, immers de belastingduur is dan in de orde grootte weken, en dat tevens een minimale breedte wordt vereist.

Langs de dijken in de Oosterschelde zijn door het waterschap metingen van de waterspanningen in de ondergrond verricht. Door middel van deze metingen is de indringing van de waterdruk in de ondergrond vastgesteld. Op basis van dit onderzoek is vastgesteld dat, ondanks dat de waterkering aan de criteria voldoet, maatregelen noodzakelijk zijn aan de waterkering. Aan de zuidkant van Schouwen-Duiveland wordt een filter in de teensloot aangebracht om *Piping* tegen te gaan. Het filter zorgt ervoor dat geen gronddeeltjes uitgespoeld kunnen worden. Hierdoor kan geen doorgaande pipe worden gevormd en is de waterkering veilig, ook bij toekomstige ZSS.

Toegenomen waterstanden

Een effect van de nieuwe normering is dat de waterstanden waarbij het faalmechanisme *Piping* beschouwd dient te worden maximaal 0,4 m (zie tabel 4.3) hoger liggen. Deze hogere waterstand heeft een zeer beperkte invloed op het faalmechanisme, aangezien de belastingsduur kort is (orde grootte uren). Door de beperkte belastingsduur heeft deze verhoging nagenoeg geen gevolgen voor de waterdruk aan de teen van de waterkering.

Door ZSS neemt de gemiddelde waterstand in de OS toe. Hierdoor neemt ook het min of meer constante verval over de dijken langs de Oosterschelde toe, waardoor de hogere waterspanningen aan de binnenteen van de dijk zullen ontstaan.

Knikpunt

Onder dagelijkse omstandigheden, in de aanloop naar de storm, neem door zeespiegelstijging de gemiddelde waterstand in de Oosterschelde toe. Dit leidt tot hogere waterspanningen in de ondergrond, aangezien hiervoor het langdurig gemiddelde van belang is en niet de hoogte van de piek van de storm. De hogere waterspanningen in de ondergrond leiden tot een verdere afname van de berekende schadefactoren. Zeespiegelstijging zal daarmee in de toekomst leiden tot een groter areaal waar de waterkering niet voldoet aan de eisen ten aanzien van *Piping*.

4.6.3 Microstabiliteit

In de nieuwe normering hoeft het faalmechanisme *Microstabiliteit* alleen beschouwd te worden wanneer het golfoverslagdebiet tijdens maatgevende situaties kleiner is dan 0,1 l/s/m. Bij een groter overslagdebiet zal

overslaand water infiltreren en leiden tot een verhoging van de freatische lijn in de waterkering. Om deze reden zal bij een groter golfoverslagdebiet dan 0,1 l/s/m het faalmechanisme *Grasbekleding afschuiven binnentalud* (GABI) maatgevend zijn. Uit de bepaling van het HBN volgt dat op merendeel van beschouwde locaties het golfoverslagdebiet hoger is dan 0,1 l/s/m, zodat het faalmechanisme *Grasbekleding afschuiven binnentalud* (GABI) maatgevend is.

4.6.4 Bekleding binnentalud

De bekleding op het binnentalud dient getoetst te worden op twee faalmechanismen:
- grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB);
- grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI).

Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB)
Ten gevolge van de nieuwe normering neemt het hydraulisch belastingsniveau toe, met name aan de noordzijde van de Oosterschelde. De maximale toename op basis van Hydra-NL in de onderzochte locaties bedraagt circa 0,46 m ter plaatse van Sint-Maartensdijk. Over het algemeen volgt uit de berekening van het HBN een afname van dit niveau, wat wordt veroorzaakt doordat een hoger overslagdebiet toegelaten kan worden.

De toename van het HBN betekent niet automatisch dat hierdoor sprake is van een knikpunt. De waterkeringen rond de Oosterschelde stammen grotendeels uit de tijd van voor de realisatie van de OSK. Dat wil zeggen dat de hoogte van de waterkering berekend zijn voor een hogere buitenwaterstand en golfcombinatie dan werkelijk optreedt met een functionerende OSK. Dit is ook goed zichtbaar in de VNK-studies van de verschillende dijkringen in het Oosterscheldegebied, waar zeer lage faalkansen worden gevonden voor het faalmechanisme Overloop en overslag.

Voor de beschouwde locaties langs de Oosterschelde worden overslagdebieten gevonden in de orde grootte van 0,1 tot 1 l/s/m. Dit is lager dan het maximaal toelaatbare overslagdebiet van 5 l/s/m wat gehanteerd mag worden indien er sprake is van een matige graskwaliteit. Alleen indien er sprake is van een slechte graskwaliteit, is het berekende overslagdebiet te hoog. In de knikpuntenanalyse is aangenomen dat de grasbekleding van goede kwaliteit is of verbeterd kan worden. Hiermee wordt geconcludeerd dat dit faalmechanisme niet voor 2050 optreedt.

Doordat de waterstand op de Oosterschelde gereguleerd wordt, en daardoor niet of beperkt toeneemt door zeespiegelstijging, neemt het HBN en het optredende golfoverslagdebiet niet of nauwelijks toe (zie paragraaf 4.5.5). Omdat in de huidige situatie geen problemen zijn ten aanzien van dit faalmechanisme, is de verwachting dat het knikpunt pas na 2100 zal optreden.

Bovenstaand beeld is gebaseerd op een beperkt aantal berekeningen. Lokaal kan wel sprake zijn van een hoger golfoverslagdebiet. Met name ter hoogte van Zierikzee wordt een overslagdebiet groter dan 5 l/s/m berekend. Andere locaties waar een hoger overslagdebiet wordt verwacht, zijn de havens, waar de waterkering over het algemeen lager is en geen buitenberm heeft. Toch wordt op deze locaties ook niet direct een probleem ten aanzien van dit faalmechanisme verwacht, aangezien onder voorwaarden een hoger golfoverslagdebiet kan worden toegestaan. Ook zijn in de berekeningen de effecten van havendammen en hoge voorlanden gelegen tussen de uitvoerlocatie en de dijkteen niet meegenomen; deze kunnen een reducerend effect hebben op de hydraulische belasting van de waterkering[1].

[1] De hydraulische belastingen voor de dijken langs de Oosterschelde zijn bepaald voor een vaste set van uitvoerlocaties op een korte afstand (circa 50 m) van de dijkteen. De lokale bodemligging ter plaatse van de uitvoerlocatie is meegenomen in de databases op basis waarvan de hydraulische belastingen zijn afgeleid; met andere woorden: de berekening voor een uitvoerlocatie met een hoge bodemligging leidt tot lagere golfhoogte. Alleen indien tussen de uitvoerlocatie en de teen van de waterkering een significant hoger voorland aanwezig is, of een havendam aanwezig is, dient de invloed hiervan separaat te worden beschouwd. Door de korte afstand tussen de uitvoerlocatie en de dijkteen is op de beschouwde uitvoerlocaties geen additionele beschouwing van voorlanden en/of havendammen benodigd.

Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI)

Langs de Oosterschelde is er aan de binnenzijde nagenoeg overal sprake van een 'groene dijk'. Dat wil zeggen dat de bescherming van het binnentalud wordt gevormd door een grasmat op een kleilaag. In de knikpuntenanalyse is uitgegaan van een kern bestaande uit zand. Dit is een conservatieve aanname; indien de kern van de dijk uit klei bestaat is dit gunstig voor de beoordeling van dit faalmechanisme.

De waterkeringen langs de Oosterschelde kunnen niet door middel van de eenvoudige beoordeling worden goedgekeurd, onder meer doordat het golfoverslagdebiet groter is dan 0,1 l/s/m. Om deze reden dient te worden doorgegaan met de gedetailleerde toets. In de gedetailleerde toets wordt bepaald of de bekleding op het binnentalud zwaar genoeg is om niet te worden opgedrukt door de waterstand in de dijkkern. De waterstand in de dijkkern wordt bepaald door drie hoofdcomponenten (zie ook bijlage III):

- de waterstand die onder dagelijkse omstandigheden aanwezig is.
- de (kortdurende) opzet gedurende de stormcondities.
- als gevolg van golfoverslag kan er sprake zijn van infiltratie van water in de waterkering.

De freatische lijn die op deze wijze is bepaald is zeer conservatief en leidt tot een verval van circa 2 m over de bekleding van het binnentalud. De verwachting is daarom dat dit faalmechanisme naar alle waarschijnlijkheid niet zal leiden tot een knikpunt voor 2050. De reden hiervoor is dat het faalmechanisme zeer gevoelig is voor het golfoverslagdebiet en de duur van de golfoverslag. In de hydraulische belastingen is een grote mate van conservatisme aanwezig door de 'vaste' onzekerheidstoeslag van 0,40 m op de waterstand. Een 0,25 m lagere waterstand zou in bovenstaand geval al leiden tot een halvering van het verval over de bekleding van het binnentalud. Een andere reden is het feit dat de bekleding op het buitentalud uit een kleilaag of waterdichte bekleding bestaat, die infiltratie vanaf de buitenzijde voorkomt.

De ligging van het freatische vlak kan worden gemonitord door middel van peilbuismetingen. De extreme situatie met golfoverslag heeft slechts een kleine kans van voorkomen. Echter, een situatie met extreme neerslag kan een indicatie geven van de doorlatendheid van de kleilagen op de taluds. Hierdoor kan de berekening gefundeerd verder worden geoptimaliseerd.

De opbouw van de voorliggende keringen (Oesterdam, Grevelingendam en Philipsdam) is anders dan van reguliere dijken, doordat aan twee zijden water aanwezig is, en dus ook aan twee zijden een harde bekleding aanwezig en geen kleilaag. Ook zijn deze waterkeringen over het algemeen veel breder dan de dijken in het gebied. Om deze reden is het bij deze specifieke waterkeringen de kans op drukopbouw onder de bekleding nihil en vormt dit faalmechanisme daarmee geen knikpunt.

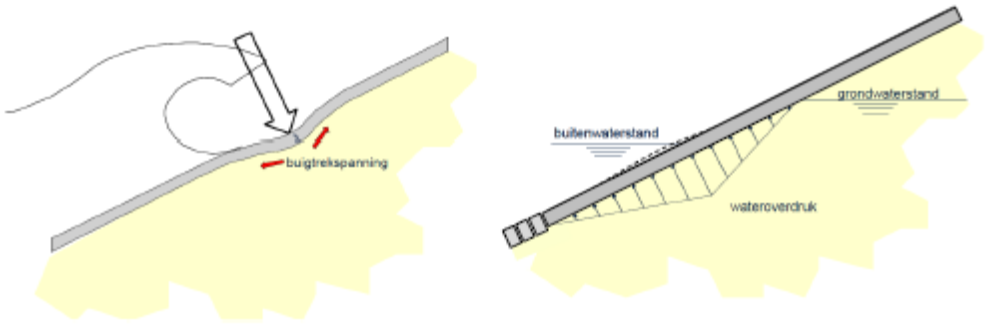
4.6.5 Bekleding buitentalud

Asfalt

Asfaltbekledingen moeten beoordeeld worden op twee faalmechanismen (Afbeelding 4.5):

- golfklappen op asfaltbekleding (hierna aangeduid als *Golfklap*);
- wateroverdrukken bij asfaltbekledingen (hierna aangeduid als *Wateroverdruk*).

Afbeelding 4.5 Mechanisme van de toetssporen, links *Golfklap*, rechts *Wateroverdruk* [ref. 29]



Golfklap

Ten aanzien van het faalmechanisme *Golfklap* zijn de rekenmethodieken niet aangepast. Doordat in het ontwerp de hydraulische belastingen op een robuuste wijze zijn afgeleid, wordt geen knikpunt verwacht voor 2050.

Wateroverdrukken

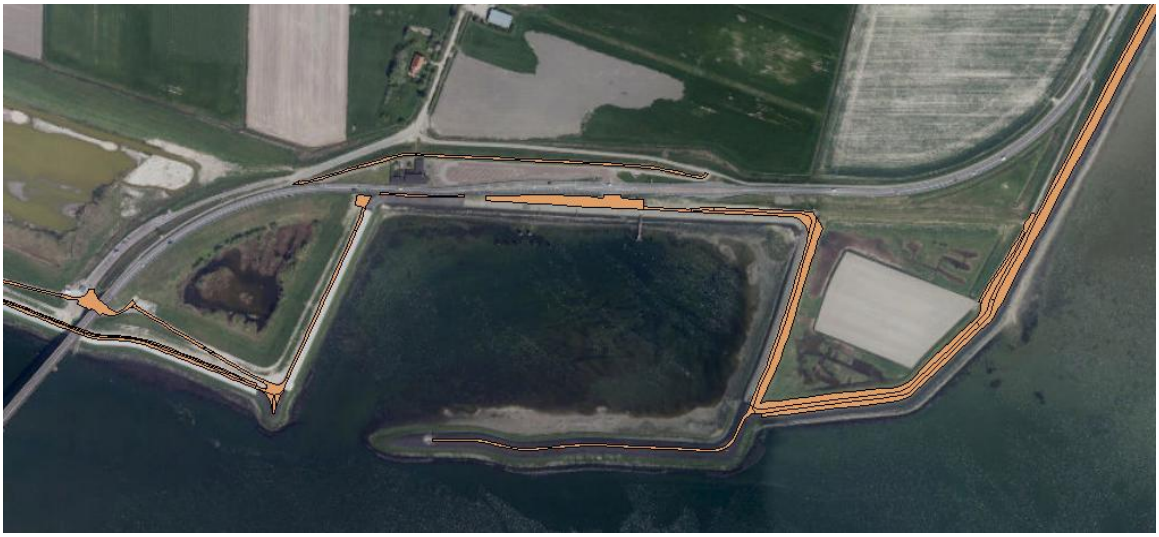
De methode waarop het deelfaalmechanisme *Wateroverdruk* wordt beoordeeld, is bij de nieuwe normering gelijk aan de methode zoals gehanteerd in de derde toetsronde. Op dit onderdeel zal het toepassen van de nieuwe normering niet leiden tot een knikpunt.

De waterstand waarbij het deelfaalmechanisme *Wateroverdruk* dient te worden beoordeeld neemt door toepassing van het WBI2017 maximaal 0,54 m toe ten opzichte van het HR2006 (locatie Het Stinkgat, tabel 4.3). Dit kan in het meest ongunstige geval betekenen dat de overdruk onder de asfaltbekleding maximaal 0,27 m toeneemt [ref.29]. Door toepassen van WBI2017 neemt de belasting toe, en kan dus mogelijk sprake zijn van een knikpunt.

Langs de Oosterschelde zijn echter voornamelijk steenzettingen toegepast als bekleding. Een bekleding van asfalt in de dagelijkse getijzone is onlogisch, aangezien de bekleding in dat geval dagelijks wordt belast. Asfalt is hier minder geschikt voor, aangezien dit een vermoeiingsgevoelig materiaal is. Afbeelding 4.6 laat de een karakteristiek beeld van de asfaltbekledingen langs de Oosterschelde zien. De asfaltverhardingen zijn aangebracht op de buitenberm als onderhoudsstrook. Op sommige locaties is ook het talud boven de buitenberm verhard vanwege een te hoge golfaanval voor grasbekledingen. Deze laatstgenoemde asfaltbekledingen zijn dan uitgevoerd in open steenasfalt, wat vervolgens is afgestrooid met grond en ingezaaid met gras om het groene uiterlijk van de waterkering te behouden.

Vanwege de hoge ligging van de bekleding ten opzichte van de waterstand bij norm kunnen geen wateroverdrukken worden opgebouwd onder de bekleding; hiervoor zouden de asfaltbekledingen zich veel lager op het talud moeten bevinden. Om deze reden leidt de wijziging in de norm niet tot een knikpunt voor asfaltbekledingen.

Afbeelding 4.6 Karakteristiek beeld asfaltbekledingen langs Oosterschelde (locatie haven De Val), asfalt aangegeven in oranje



Door ZSS neemt de gemiddelde waterstand toe op de Oosterschelde. Uitgaande van een functionerende OSK en ongewijzigd sluitregime, blijft de waterstand bij norm ongeveer gelijk. Hierdoor neemt in de toekomst het verschil tussen de gemiddelde waterstand en de waterstand bij norm af. Hierdoor zal ook de wateroverdruk onder de bekleding afnemen, waardoor dit faalmechanisme geen knikpunt kent.

Grasbekledingen

Op het buitentalud is op de meeste locaties een grasbekleding aanwezig boven de buitenberm. Deze bekledingen liggen ruimschoots boven de waterstand bij norm en worden daarom alleen belast door golfoploop.

De waterstand bij norm neemt toe, met name door het expliciet meenemen van onzekerheden in de bepaling van de hydraulische belastingen. De norm waarbij het faalmechanisme *Overloop en golfoverslag* berekend moet worden neemt voor alle dijktrajecten toe (Tabel 4.4). Grasbekledingen op het buitentalud hebben een sterke koppeling met dit faalmechanisme.

Doordat de hydraulische belastingen op het buitentalud toenemen, met name de waterstand bij norm, worden grasbekledingen zwaarder belast. Dit betekent dat de huidige overgang tussen harde bekleding en grasbekleding mogelijk te laag ligt.

De buitenberm van de waterkering langs de Oosterschelde liggen circa 1 m hoger dan de waterstand bij norm en daarmee ook de onderzijde van de bekleding. De toename van de belasting zal daardoor beperkt zijn. Om deze reden wordt door de wijziging in de norm niet direct een knikpunt verwacht. Doordat de ZSS slechts beperkt doorwerkt op de OS wordt om deze reden pas na 2100 een knikpunt verwacht ten aanzien van dit faalmechanisme.

Steenzettingen

In de beoordeling van steenzettingen is de toe te passen veiligheidsfactor verhoogd van 1,1 naar 1,2. Dit betekent dat bij gelijkblijvende golfhoogte, de toplaag van de steenzetting circa 10 % dikker moet zijn. Het buitentalud is in het kader van Projectbureau Zeeweringen vervangen in het afgelopen decennium. Doordat in het ontwerp de hydraulische belastingen op een robuuste wijze zijn afgeleid, bestaat enige ruimte tussen de ontwerpbelasting en de berekende belasting conform vigerende norm.

Door de nieuwe normering zijn daarnaast nog twee effecten zichtbaar:
- enerzijds kunnen de hydraulische belastingen afnemen doordat de normering van het betreffende traject lager is geworden (wijziging van 1/4.000 per jaar naar 1/300, 1/1.000 of 1/3.000 per jaar;
- toename van de hydraulische belastingen ten gevolge van het expliciet meenemen van onzekerheden;

Op basis van expert-judgement en ervaringen bij andere projecten langs de kust wordt ingeschat dat voor trajecten waar de norm niet toeneemt, de wijziging in de normering niet leidt tot een knikpunt.

Binnen het gebied zijn echter een aantal dijktrajecten aanwezig waar de norm wordt verzwaard. Voor deze trajecten wordt het veiligheidsniveau verhoogd ten opzichte van de huidige situatie. Dit betekent dat er waarschijnlijk delen zijn waar de huidige bekledingen te licht zijn om te voldoen bij de zwaardere hydraulische belastingen die horen bij de zwaardere norm. Dit geeft dus een knelpunt.

Bovenstaande is onafhankelijk van de morfologische ontwikkelingen en effecten van langdurige belastingen op één hoogte, aangezien in het bepalen van de ontwerpbelastingen hier rekening mee is gehouden.

4.6.6 Zettingsvloeiing

Door de morfologische ontwikkelingen (zandhonger) neemt de breedte van het voorland af. Het gevolg van het optreden van een zettingsvloeiing is dat deze mogelijk niet meer veilig kan worden opgevangen in het voorland. In de nieuwe normering is zettingsvloeiing een zogeheten indirect faalmechanisme. Effecten van het optreden van een zettingsvloeiing dienen door middel van een scenario verdisconteerd te worden in de beoordeling van de overige faalmechanismen. Zo kan bijvoorbeeld een zettingsvloeiing invloed hebben op golfoverslag, indien een golfdempend voorland verdwijnt door een zettingsvloeiing.

Wanneer het effect van een eventuele zettingsvloeiing op een ander faalmechanisme te groot is, of zelfs de kernzone van de waterkering aantast, kan zettingsvloeiing niet meer veilig worden opgevangen. In dit geval wordt het vastleggen van de geulwand noodzakelijk om het mogelijk optreden van zettingsvloeiing te kunnen ondervangen.

Erosiekuilen OSK
De erosiekuilen aan de binnenzijde van de OSK hebben naast invloed op de stabiliteit van de OSK ook invloed op de veiligheid van de aangrenzende dijktrajecten. De erosiekuilen worden bestort, indien de diepte groter wordt dan 40 m ten opzichte van de rand van de bodembescherming (zie paragraaf 2.2.3). Hierdoor hebben deze kuilen geen invloed op de OSK. Op basis van dezelfde redenering kan worden gesteld dat deze erosiekuilen ook geen invloed hebben op de dijken.

De waterkeringen in Zeeland zijn gevoelig voor het faalmechanisme zettingsvloeiing, getuige de vele inlaagdijken die in het verleden zijn aangelegd en de gedocumenteerde dijkvallen. Ook in het recente verleden zijn zettingsvloeiingen in het gebied opgetreden. De veiligheid tegen zettingsvloeiing wordt gevormd door enerzijds het vastleggen van geulwanden (voorkoming) en anderzijds door voldoende voorland (accepteren, want geen schade).

Wanneer voldoende voorland niet (meer) aanwezig is, dient de geulwand te worden bestort. Bij voortzetting van het huidige actieve beheer en onderhoud is zettingsvloeiing niet te verwachten en is het optreden van het knikpunt voor 2100 onwaarschijnlijk.

4.7 Conclusie

Tabel 4.7 vat de resultaten van de knikpuntenanalyse samen. Uit deze tabel blijkt dat door het toepassen van de nieuwe normering per 2017 knikpunten verwacht worden ten aanzien van de faalmechanismen *Macrostabiliteit* en *Bekleding buitentalud*. De betreffende knikpunten worden veroorzaakt door wijzigingen in de rekenmethodieken en veiligheidsfactoren.

De huidige harde bekledingen (steenzettingen, asfalt) zijn ontworpen op het zichtjaar 2060 met conservatieve projectspecifieke hydraulische belastingen. Bij een norm van 1/300 per jaar, 1/1.000 per jaar en 1/3.000 is op basis van expert-judgement en ervaringen bij andere projecten geconcludeerd dat in de toegepaste hydraulische ontwerpbelastingen genoeg ruimte zit om effecten in wijzigingen van de veiligheidsfactoren op te vangen. Voor deze trajecten wordt daarom pas na 2050 een knikpunt verwacht.

Mogelijk zijn er langs de waterkering van Tholen en de Oesterdam wel locaties aanwezig waar een knikpunt voor 2050 wordt verwacht, omdat op deze locaties:
- de hydraulische belasting toeneemt door het meenemen van onzekerheden;
- de normering wordt verzwaard van 1/4.000 per jaar tot 1/10.000 per jaar;
- de veiligheidsfactor voor steenzettingen met 10 % toeneemt.

Tabel 4.7 Samenvatting knikpunten dijken

Faalmechanisme	Voor 2050	Na 2050	Na 2100
macrostabiliteit binnenwaarts	x		
piping	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.*1
microstabiliteit	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
bekleding binnentalud			
grasbekleding erosie kruin en binnentalud			x
grasbekleding afschuiven binnentalud			x
bekleding buitentalud			
golfklappen op asfaltbekledingen		x	
wateroverdrukken bij asfaltbekledingen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t. *3
grasbekleding erosie buitentalud			x
grasbekleding afschuiven buitentalud			
stabiliteit steenzettingen	x (Tholen, Oesterdam)	x (overige trajecten)	
zettingsvloeiing			x

*1 Piping is niet van toepassing voor de waterkering langs de Oosterschelde, omdat wordt voldaan aan de criteria van de eenvoudige beoordeling;

*2 Als het overslagdebiet groter is dan 0,1 l/s/m is de beoordeling van Grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI) maatgevend boven de beoordeling van de microstabiliteit. In de knikpuntenanalyse is conservatief er van uitgegaan dat het golfoverslagdebiet voor alle locaties groter is dan 0,1 l/s/m.

*3 Belasting neemt ten gevolge van ZSS in de toekomst af. Het toepassen van de nieuwe normering leidt niet tot een knikpunt. In de toekomst zal daarom ook geen knikpunt optreden ten aanzien van dit faalmechanisme.

5

KNIKPUNTEN TEN GEVOLGE VAN AUTONOME, RUIMTELIJKE ONTWIKKELINGEN

5.1 Autonome, ruimtelijke ontwikkelingen

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de inventarisatie van thans bekende autonome ontwikkelingen, die relevant kunnen zijn voor de integrale veiligheid van de Oosterschelde. Deze autonome ontwikkelingen zijn afkomstig uit beleidsnotities en/of -visies, of zijn door Rijkswaterstaat aangedragen als potentieel relevante ontwikkelingen waarvan het moeilijk aan te geven is hoe deze zich in de loop der tijd ontwikkelen. Bij iedere geïdentificeerde autonome ontwikkeling is aangegeven of de veiligheidsstrategie erdoor beïnvloed kan worden. Uit de tabel 5.1 blijkt dat er twee autonome ontwikkelingen zijn die op relatief korte termijn, tot 2050, effect kunnen hebben op de veiligheidsstrategie, namelijk de aantakking van het Volkerak-Zoommeer aan de Oosterschelde en het inzetten van de Oosterschelde als waterberging voor veiligheid van de Rijnmond en Drechtsteden. Deze twee ontwikkelingen en hun effect op de veiligheidsstrategie worden beschreven in de twee volgende paragrafen In tabel 5.1 wordt de redeneerlijn waarom de overige ontwikkelingen geen effect hebben op de veiligheidsstrategie beknopt beschreven.

Tabel 5.1 Overzicht van relevante, autonome ontwikkelingen voor de veiligheidsstrategie van de Oosterschelde

Mogelijke ontwikkelingen	Invloed op veiligheidsstrategie Oosterschelde
Aantakking Volkerak-Zoommeer	nee, zie paragraaf 5.2 voor toelichting
Oosterschelde als waterberging voor veiligheid Rijnmond-Drechtsteden	ja, zie paragraaf 5.3
stroomlijnen stormvloedkering	nee. Het stroomlijnen van de OSK beïnvloedt de getijslag en de stroomsnelheid, door een groter debiet door de OSK. Dit heeft effect op de bodembescherming van de OSK en erosie van zandplaten (buitenteenbekleding). Deze effecten zijn al bij de OSK en dijken meegenomen. Het stroomlijnen is een maatregel die op zichzelf geen nieuw knikpunten geeft.
mee laten groeien van kustfundament	nee. Dit gaat over het compenseren van de ZSS en de erosie door het inbrengen van zand in de Oosterschelde vanaf de Noordzee. Het betreft een oplossingsrichting, niet een knikpunt.
stroomlijnen/'nieuwe' route Scheepvaart Oosterschelde	nee, dit betreft het afsnijden van de bocht in de scheepvaartroute. Deze ingreep heeft morfologisch en ecologisch effect, maar geen effect op veiligheidsstrategie. Dit betreft daarom geen knikpunt.
doorlaatmiddel Veerse Meer	nee. Als er veel ZSS is dan heeft dat gevolgen op peil Veerse Meer. Dat is een effect van ZSS. Het Veerse Meer kan nog een stijging van 30 cm probleemloos aan. Bij gemiddelde (dagelijkse) omstandigheden kan er al een peilverhoging op het Veerse Meer optreden van meer dan 30 cm. Onder stormvloed kan het waterpeil op de Oosterschelde 2 m stijgen zonder negatieve effecten voor het Veerse Meer. Dan wordt het doorlaatmiddel

Mogelijke ontwikkelingen	Invloed op veiligheidsstrategie Oosterschelde
	waarschijnlijk dichtgezet. Het doorlaatmiddel Veerse Meer vormt dus geen knikpunt in de veiligheidsstrategie, maar wel een knikpunt voor het dagelijks beheer. Dit valt echter buiten deze studie.
ontwikkeling recreatie en toerisme Oosterschelde(kansenkaart: Oosterschelde visie 2012-2018)	nee. De Oosterschelde wordt steeds meer een toeristisch gebied, waardoor er een conflict met de natuur door verstoring kan ontstaan. Dit betreft geen knikpunt voor de veiligheidsstrategie.
getijdencentrale (turbines) in stormvloedkering	nee. Met elke turbine die in de kering hangt, wordt de faalkans groter van niet sluiten, omdat eerst de turbine uit het water getild moet worden. De stroomsnelheid door de kering wordt kleiner door turbines. Combinatie met stroomlijnen is wel mogelijk om effect op stroomsnelheid te minimaliseren. Turbines trillen en brengen bewegingen over op de kering. Wij gaan er hier van uit dat deze nadelen technisch zijn op te lossen en dat het geen knikpunt geeft in de veiligheidsstrategie. De turbines moeten passen binnen de veiligheidsstrategie.
munitiedepot, afdekken of laten lekken	nee. Een munitiedump uit de 2e Wereld Oorlog met de meest vervuilende stoffen (o.a. witte fosfor) ligt in een diepe put van 60 m bij Zierikzee, buitendijks in de Oosterschelde. Door roest kunnen vervuilende stoffen op termijn vrij komen. Defensie zegt dat het veilig is. Opruimen kan niet, want dat levert meer schade op. Afdekken kan, maar men wil het niet vanwege kosten en precedent werking. Dit betreft een milieuprobleem en geen knikpunt voor de veiligheidsstrategie.
duurzame (schelpdier)visserij	nee. Onder druk van het zogenaamde mosselconvenant wordt de sector gedwongen om de bodemvangst van kleine mosseltjes (zaad) in de Waddenzee uit te faseren en te vervangen voor vangst van zaad in zogenaamde mosselzaad invang installaties (MZI's). Het merendeel van de MZI's moet in de Waddenzee een plaatsje krijgen, maar de Oosterschelde krijgt ook z'n deel. Momenteel is al ongeveer 150 ha in gebruik voor MZI's en dat areaal neemt toe. Deze toename heeft geen grootschalige gevolgen voor de veiligheidsstrategie, maar des te meer voor het ruimtegebruik. Voor de oesterteelt is het beeld onduidelijk. Die heeft het momenteel bijzonder moeilijk. De traditionele bodemteelt wordt bedreigd door het herpesvirus en door een roofslakje. Beide plagen bedreigen de oesterteelt. De oestersector hoopt dat de Franse manier van telen, in zakken op lage tafeltjes op het intergetij een oplossing biedt. Maar vooralsnog staat die innovatie nog in de kinderschoenen. In het geval de ontwikkeling naar oestertafels gaat, dan zal het een impact hebben op de N2000 natuurwaarden van het intergetij. In ieder geval zal die ontwikkeling geen effect hebben op de veiligheidsstrategie.

5.2 Aantakking van het Volkerak-Zoommeer

De ontwerp-Rijksstructuurvisie Grevelingen en Volkerak-Zoommeer bevat een ontwikkelperspectief dat uitgaat van het terugbrengen van beperkt getij op de Grevelingen en in het Volkerak-Zoommeer. Het Volkerak-Zoommeer zou daardoor weer zout worden.

Voorafgaand aan het zout maken van het Volkerak-Zoommeer worden maatregelen uitgevoerd voor alternatieve zoetwatervoorziening en zoutbestrijding voor de landbouw, zoals vastgelegd in de

bestuursovereenkomst Zoetwatermaatregelen Zuidwestelijke Delta [ref. 32]. Een zout Volkerak-Zoommeer kan immers niet meer de huidige rol van zoetwatervoorziening voor omliggende gebieden vervullen. Deze maatregelen zijn echter niet van invloed op het Oosterscheldesysteem.

Voor het Volkerak-Zoommeer loopt al een procedure tot aanpassing van het peilbesluit vanwege het besluit tot waterberging op het Volkerak-Zoommeer in tijden van hoog water, met een tijdelijke peilstijging van NAP +2,30 m als gevolg. Het gemiddeld peil blijft in deze herziening rond NAP. Bij het zout maken en het toelaten van getij is een gemiddeld peil van NAP - 0,10 m nodig, zowel bij gescheiden als verbonden bekkens [ref. 31]. Dit vergt dus opnieuw een herziening van het peilbesluit.

De herintroductie van beperkt getij en het terugbrengen van zout in het Volkerak-Zoommeer heeft als doel om de waterkwaliteit van het meer te verbeteren. Dit wordt bereikt door middel van een doorlaat in de Philipsdam, die het Volkerak-Zoommeer verbindt met de Oosterschelde. Uitgangspunt daarvoor is een getijslag van maximaal 30 cm bij een gemiddeld waterpeil van NAP -0,10 m op het Volkerak-Zoommeer. Hiervoor is er een uitwisselingsdebiet nodig door de Philipsdam via een nieuw te bouwen doorlaatmiddel (doorgaans P300 genoemd) met een maximum capaciteit van bijna 1.500 m^3/s. Dit doorlaatmiddel zal afsluitbaar moeten zijn, omdat de huidige getijslag op de Oosterschelde bij de Philipsdam bijna 4 m bedraagt.

Het debiet dat per getijslag nodig is voor het vullen van het Volkerak-Zoommeer zal via de Oosterscheldekering vanuit de Noordzee worden aangevoerd. Hierdoor zal het debiet door de Oosterscheldekering enigszins toenemen, omdat er een groter bekken met een grotere komberging ontstaat en dat heeft effect op het debiet door de Oosterscheldekering en dus op de getijslag en het intergetijdengebied. In het rapport Verminderd Getij [ref. 62] is berekend dat de (minimale) vermindering van getijslag en getijvolume in de Oosterschelde door de constructie van een doorlaatmiddel in de Philipsdam tegengesteld is aan de verwachting. De oorzaak ligt in het faseverschil in het getij dat ontstaat tussen beide bekkens. Dit faseverschil bedraagt ongeveer 2,5 uur. Gedurende dit faseverschil loopt het water door het doorlaatmiddel in tegenovergestelde richting als in de Oosterschelde zelf. Hierdoor kan het getij in de Oosterschelde zich niet volledig ontwikkelen. De conclusie is dat de doorlaatmiddelen die onderwerp zijn van het nader onderzoek een verwaarloosbaar effect hebben op het getijvolume door de OSK. Naar verwachting geeft de verwaarloosbare toename van het debiet door de OSK geen constructieve knelpunten aan de OSK en zijn er ook geen constructieve oplossingsrichtingen nodig. Het aantakken van het Volkerak-Zoommeer is daarom geen knikpunt.

5.3 Oosterschelde als waterberging voor veiligheid Rijnmond-Drechtsteden

Voor Rijnmond-Drechtsteden wordt in het kader van de deltabeslissing Rijn-Maasdelta de afsluiting van de Rijn-Maasmonding zeezijde na 2040 als optie voor de lange termijn onderzocht (Deltaprogramma 2017). Dit betreft de variant met sluizen in de Oude Maas en de Nieuwe Maas ter hoogte van Vlaardingen in combinatie met piekberging in de Oosterschelde (variant Spaargaren). De inschatting is dat eens in de ongeveer 500 jaar de Oosterschelde gebruikt wordt als berging voor rivierwater [ref. 18]. Uit het in 2015 uitgevoerde onderzoek blijkt dat waterberging op de Oosterschelde een positief effect heeft op de maatgevende hoogwaterstanden in het zuidelijk deel van het rivierengebied [ref. 18].

Waarom knikpunt

Het inzetten van het Oosterscheldebekken als waterberging van rivierwater vergt aanpassing van het huidige sluitingsregime. Indien het Oosterscheldebekken als berging van rivierwater ingezet gaat worden, moet de OSK al dicht gezet worden bij een zo laag mogelijk peil, om zo groot mogelijke bergingsruimte te creëren en het Volkerak-Zoommeer te kunnen laten spuien op de Oosterschelde. De noodzakelijke aanpassing van het sluitingsregime veroorzaakt dus een knikpunt in de veiligheidsstrategie van de Oosterschelde.

Wanneer treedt het knikpunt op

Of de optie 'Rijn-Maasmonding aan zeezijde afsluiten' met de maatregel 'Oosterschelde als piekberging in kader van de waterveiligheid van de Rijnmond-Drechtsteden inzetten' werkelijkheid wordt, is nog niet

bekend. De minister van Infrastructuur en Milieu heeft besloten de Rijn-Maasmonding niet op korte termijn aan de zeezijde af te sluiten, maar deze optie bij het onderzoek naar de vervanging van de Maeslantkering als volwaardig alternatief mee te nemen. Naar verwachting komt tegen 2050 een besluit over of herijking van een besluit voor het vervangen van de Maeslantkering aan de orde zal zijn. Op basis van de huidige inzichten en kennis zal naar verwachting rond 2040 begonnen worden met de beschouwing van deze maatregel.

6

OPLOSSINGSRICHTINGEN

6.1 Urgente knikpunten

Ter samenvatting van de voorgaande hoofdstukken 4 en 5 geeft tabel 6.1 per onderdeel een overzicht van de geïdentificeerde knikpunten en wanneer deze knikpunten naar verwachting optreden in de tijd. De knikpunten die naar verwachting voor 2050 optreden zijn:

- Oosterscheldekering:
  - bekleding sluisplateau Roompotsluis;
- Dijken:
  - macrostabiliteit binnenwaarts;
  - grasbekleding afschuiven binnentalud;
  - grasbekleding erosie buitentalud;
  - grasbekleding afschuiven buitentalud;
  - stabiliteit steenzettingen;
- autonome ontwikkelingen:
  - aantakking van het Volkerak Zoommeer;
  - waterberging Oosterschelde voor veiligheid Rijnmond-Drechtsteden.

Met uitzondering van het sluisplateau van de OSK zijn voor deze knikpunten op hoofdlijnen mogelijke oplossingsrichtingen gedefinieerd. Het sluisplateau is niet verder meegenomen in de analyse, omdat de benodigde maatregelen beperkt zijn en niet onderscheidend.

Tabel 6.1 Groslijst knikpunten Integrale veiligheid Oosterschelde

Knikpunt	Voor 2050	Na 2050	Na 2100
1 OSK			
a grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEBK)		x	
b piping (STPH)			n.v.t.
c macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)			x
d stabiliteit breuksteen (BST)		x	
e hoogte kunstwerk (HTKW)	x		
f betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)			x
g piping kunstwerk (PKW)			x
h sterkte en stabiliteit kunstwerk (STKWp)		x	
2 dijken			
a macrostabiliteit binnenwaarts	x		
b piping	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
c microstabiliteit	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

Knikpunt	Voor 2050	Na 2050	Na 2100
d grasbekleding erosie kruin en binnentalud			x
e grasbekleding afschuiven binnentalud			x
f golfklappen op asfaltbekledingen		x	
g wateroverdrukken bij asfaltbekledingen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
h grasbekleding erosie buitentalud			x
i grasbekleding afschuiven buitentalud			x
j stabiliteit steenzettingen	x (Tholen, Oesterdam)	x (overige trajecten)	
k zettingsvloeiing			x
3 autonome ontwikkelingen			
a waterberging Oosterschelde voor veiligheid Rijnmond-Drechtsteden	x		

6.2 Mogelijke oplossingsrichtingen

Oosterscheldekering

Alleen het toetsspoor Hoogte kunstwerk (HTKW) treedt naar verwachting voor 2050 op. Dit komt door de bekleding van het sluisplateau van de Roompotsluis. Een mogelijke oplossing is het vergroten van de sterkte door bijvoorbeeld de bekleding te vervangen of het lokaal verhogen van de kruin. Ook kan een meer gedetailleerd onderzoek naar de stromingsbelasting en de (rest)sterkte van de bekleding en frontmuren ertoe leiden dat het knikpunt verder in de tijd gelegd kan worden.

Dijken

De oplossingsrichtingen voor de dijken zijn gekoppeld aan het soort hydraulische belasting waardoor het betreffende faalmechanisme wordt veroorzaakt. Tabel 6.2 geeft voor de betreffende knikpunten de betreffende hydraulische belastingen weer. Naast directe aanpassingen aan de waterkering (zoals vervanging van de bekledingen), kan bijvoorbeeld de golfbelasting worden verlaagd door het verhogen van het voorland, waardoor de golfdemping toeneemt, of de waterstand worden verlaagd door het aanpassen van de sluitstrategie. De gemiddelde waterstand kan niet op eenvoudige wijze worden aangepast door aanpassingen op de vooroever of aanpassingen aan de sluitstrategie. Doordat het grootste deel van de tijd de OSK is geopend, neemt bij ZSS de gemiddelde waterstand in de Oosterschelde gelijkmatig toe.

Tabel 6.2 Koppeling belasting aan faalmechanismen voor urgente knikpunten

Knikpunt	Maximum waterstand bij norm	Golven	Verloop buitenwaterstand
macrostabiliteit binnenwaarts	x		x
stabiliteit steenzettingen		x	x

Per knikpunt zijn in onderstaande tabel de oplossingsrichtingen weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen vergroten van de sterkte en verlagen van de belastingen.

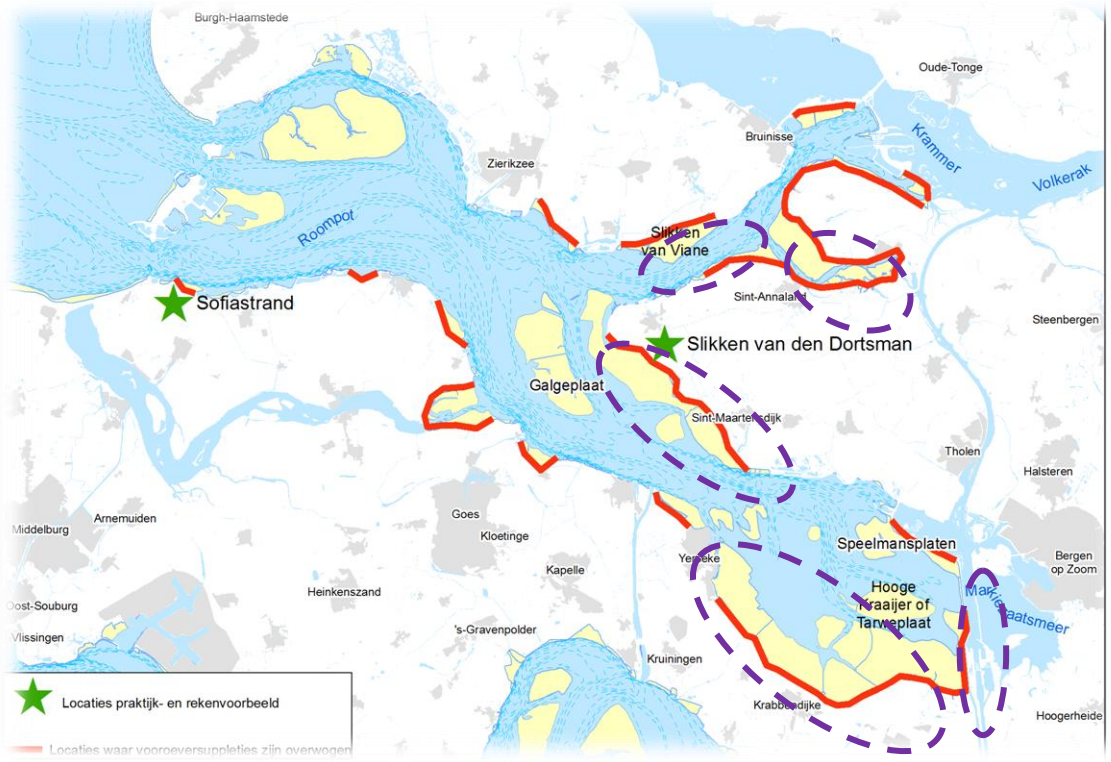
Tabel 6.3 Knikpunten, oplossingsprincipes en oplossingsrichtingen per knikpunt

Knikpunt	Principe	Oplossingsrichting
macrostabiliteit binnenwaarts	verlagen belastingen	- aanbrengen drainage om de waterspanningen te verlagen
	vergroten sterkte	- aanpassen binnendijkse geometrie (verflauwen taluds of aanbrengen van een binnenberm) - aanbrengen constructieve oplossing (damwand, dijkvernageling, etc.)
stabiliteit steenzettingen	verlagen belastingen	- sluitstrategie OSK aanpassen (eerder sluiten bij combinatie van lager peil en hoge windsnelheden) - verlagen golfbelasting door aanpassingen aan de vooroever (zand suppleren tot een hoogte van NAP +2,0 m, aanbrengen breuksteen dammen of damwanden voor breken van golven) - verlagen golfbelasting door verkleinen van de strijklengte door verhogen van zandplaten of aanbrengen structuren
	vergroten sterkte	- vervangen van de bekleding

Op basis van deze tabel kunnen we concluderen dat voor het oplossen van knikpunten ten aanzien van macrostabiliteit alleen maatregelen aan de dijken mogelijk zijn en geen maatregelen aan de OSK of in het Oosterscheldebekken zelf, bijvoorbeeld door zandsuppleties.

De overige oplossingen kunnen in principe op alle locaties waar het knikpunt speelt, circa 48,5 km, langs de Oosterschelde worden uitgevoerd, met de volgende aandachtspunten:
- het verhogen van het voorland is alleen mogelijk indien op de betreffende locatie in de huidige situatie voorland aanwezig is (afbeelding 6.1). Op locaties waar een geul direct voor de waterkering gelegen is, is deze oplossingsrichting niet mogelijk;
- het aanbrengen van grondkerende constructies is door hoge kosten alleen haalbaar indien er geen ruimte voor oplossingen in grond aanwezig is, bijvoorbeeld in het geval van bebouwing of een natuurgebied.

Afbeelding 6.1 Geschikte locaties voor maatregelen op het voorland [ref. 62]



Waterberging Oosterschelde voor veiligheid Rijnmond-Drechtsteden.
Het inzetten van het Oosterscheldebekken als waterberging van rivierwater is een knikpunt en vergt aanpassing van het huidige sluitregime van de OSK en constructieve maatregelen aan de Philipsdam in de vorm van de bouw van een nieuw doorlaatmiddel. Indien het Oosterscheldebekken als berging van rivierwater ingezet gaat worden, moet de OSK al dicht gezet worden bij een zo laag mogelijk peil, om zo groot mogelijke bergingsruimte te creëren en het Volkerak-Zoommeer te kunnen laten spuien op de Oosterschelde. Verwacht wordt dat vóór 2050 een besluit wordt genomen. De oplossingsrichting die bij dit knikpunt hoort is aanpassing van de sluitstrategie, maar dan met een heel ander oogmerk dan sluiten om stormvloeden buiten te houden.

6.3 Te beoordelen oplossingsrichtingen

Voor de bekledingen op het binnentalud en buitentalud zijn verschillende oplossingsrichtingen mogelijk. Deze oplossingsrichtingen zijn in te delen in maatregelen aan de waterkeringen, maatregelen in het Oosterscheldebekken en het aanpassen van de sluitstrategie van de OSK (tabel 6.4).

Tabel 6.4 Mogelijke oplossingsrichtingen

Nr.	Oplossingsrichtingen voor bekledingen	Globale kostenkentallen
maatregelen aan de waterkeringen		
1	vervangen van de zetsteenbekleding en/of de grasbekleding op het buitentalud	gras: EUR 800.000,--/km zetsteen: EUR 2.000.000,--/km
maatregelen in het Oosterscheldebekken		
2	verlagen golfbelasting en golfoverslag door aanpassingen aan de vooroever (zand suppleren tot een hoogte van NAP +2,0 m, aanbrengen breuksteen dammen of damwanden voor breken van golven)	EUR 500.000,--/km
3	verlagen golfbelasting en golfoverslag door verkleinen van de strijklengte door verhogen van zandplaten, aanbrengen structuren	n.t.b.
sluitstrategie OSK		
4	sluitstrategie OSK aanpassen (eerder sluiten bij combinatie van lager peil en/of hoge windsnelheden). Waterschap Scheldestromen heeft hiertoe een voorstel ingediend [ref. 60]. Deze gaat ervan uit dat de aanpassing van de sluitstrategie de sluitfrequentie met 10 % toeneemt. In de effectbeoordeling is conservatief uitgegaan van 20 %.	tot 2050: EUR 10.000,-- tot 2100: EUR 100.000,--

7

GLOBALE ANALYSE

7.1 Beoordelingskader

De focus in de knikpuntenanalyse en bijbehorende oplossingsrichtingen is volledig gericht op waterveiligheid (ZSS) en autonome ontwikkeling (AO). Uitvoering van een oplossingsrichting kan effecten hebben op gebruiksfuncties die aanwezig zijn in de Oosterschelde. Deze effecten zijn globaal beoordeeld met een beoordelingskader wat is toegepast bij de MIRT verkenning Zandhonger Oosterschelde [ref. 54], aangevuld met de Omgevingswijzer [ref. 73]. Tabel 7.1 geeft het beoordelingskader weer.

Tabel 7.1 Beoordelingskader

Thema's	Beoordelingscriteria
1 Energie - energie verbruik OSK - windenergie - getijdenenergie	- dieselverbruik en kosten voor bediening OSK - productie duurzame energie via wind (MW) - productie duurzame energie via getijde turbines (MW)
2 Water - hoogwaterveiligheid - waterkwaliteit	- veiligheid: golfhoogte tijdens hoogwater - veiligheid: gemiddeld waterpeil - waterkwaliteit: saliniteit (niet KWR aspecten)
3 Bodem en ondergrond - bodemkwaliteit - munitie	- slibkwaliteit slikken en schorren - risico van munitieresten
4 Ecologie en biodiversiteit - intergetijdengebied - foerageergebied steltlopers - gewone zeehonden - zeegrasvelden - zilte pionierbegroeiing (H3110_A) - slijkgrasvelden (H1320) - schorren en zilte graslanden buitendijks (H1330_A) - kinderkamerfunctie voor vis - rustgebieden fauna - sublitorale bodem	- aantal ha intergetijdengebied - aantal ha en kwaliteit foerageergebied steltlopers - aantal ha en kwaliteit rustgebied gewone zeehonden - aantal ha en kwaliteit zeegrasvelden - aantal ha en kwaliteit zilte pionierbegroeiing (H3110_A) - aantal ha en kwaliteit slijkgrasvelden (H1320) - aantal ha en kwaliteit schorren en zilte graslanden buitendijks (H1330_A) - aantal ha intergetijdengebied en ondiep water met kinderkamerfunctie voor vissen - aantal locaties voor fauna noodzakelijke rustgebieden met (en frequentie van) verstoring - aantal ha ongestoorde sublitorale bodem
5 Ruimtegebruik · visserij en schelpdierkwekerij 1 mossel- en oesterpercelen 2 verwaterpercelen	visserij en schelpdierkwekerij + recreatie: - locatie en omvang van de activiteit - economisch belang

Thema's	Beoordelingscriteria
3 sleepnetvisserij 4 kokkelvisserij 5 visserij met vaste vistuigen 6 weervisserij · recreatie 1 watersport (zeilen, surfen, waterskien) 2 dagrecreatie 3 pierensteken/sportvisserij 4 duiken · scheepvaart 1 vaarroutes beroepsvaart 2 havens	scheepvaart: - toegankelijkheid scheepvaartroutes - bruikbaarheid havens - economisch belang
6 Ruimtelijke kwaliteit - cultuurhistorie 1 historische bouwkunde (gebouwd erfgoed) - historische geografie (cultuurlandschap) 2 archeologisch erfgoed (scheepswrakken en buitendijkse vindplaatsen) - landschap 3 karakteristieke landschapselementen (slikken & platen) 4 aardkunde (geomorfologische, bodemkundige en hydrologische verscheidenheid) 5 weids karakter en ongereptheid van natuurschoon	- behoud cultuurhistorisch erfgoed
7 Investerings- en onderhoudskosten: - investeringen - onderhoud	- aanlegkosten in EUR's - beheerskosten in EUR's
8 Flexibiliteit	- aansluiting bij filosofie adaptief deltamanagement
9 CO_2-emmissie	- kg CO2 of kg CO2 per eenheid

7.2 Beschrijving huidige situatie en autonome ontwikkeling per criterium

7.2.1 Energie

Energieverbruik OSK

Volgens Rijkswaterstaat kost het energieverbruik van een stormsluiting en opening van de kering samen tussen de 1250 en 1500 liter dieselolie. Nettokosten (exclusief omzetbelasting) liggen ruim beneden de EUR 1.000,-- per sluiting. In de huidige situatie gaat de OSK gemiddeld een maal per jaar dicht.

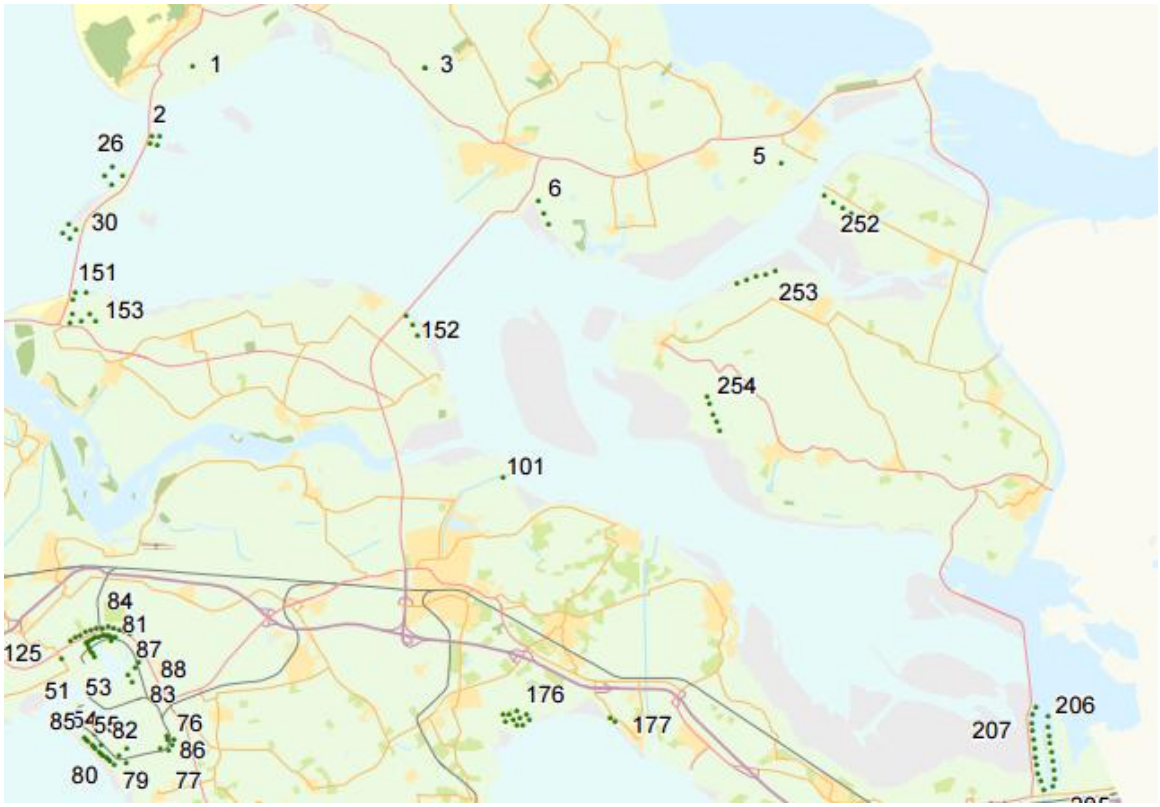
Ten gevolge van de zeespiegelstijging zal de OSK vaker sluiten. Het huidige sluitregime is gemiddeld 4 keer per 5 jaar. Met het huidig scenario voor ZSS zal de OSK in 2050 gemiddeld 6 keer per jaar moeten sluiten en in 2100 meer dan 11 keer per 5 jaar. Het verwachte dieselverbruik in 2050 is dan een factor 1,5 en in 2100 een factor 14 hoger dan in de huidige situatie.

Windenergie

De ligging van windmolens is aangegeven in Afbeelding 7.1. In totaal gaat het om ongeveer 28 windmolens goed voor 80 MW. Veel windmolenparken liggen op de OSK. Uitbreiding is hier voorzien, bijvoorbeeld Windpark Bouwdokken op voormalige werkeiland Neeltje Jans (negen windturbines, elk een vermogen van

4-6 MW), maar de kering met de eilanden is al behoorlijk volgebouwd met windturbines. Mogelijk zal de capaciteit nog toenemen door gebruik van meer moderne turbines maar veel extra MW's worden niet verwacht. ZSS heeft geen invloed op de windturbines.

Afbeelding 7.1 Locatie van windmolens in de Oosterschelde



#	Gemeente	Plaats	Aantal	Exploitant	MW	MW/molen
2	Schouwen-Duivenland	Roggeplaat	4	Windpark Roggeplaat BV	9,2	2,3
5	Schouwen-Duivenland	Bruinisse	1	Kik	0,08	0,08
6	Schouwen-Duivenland	Zierikzee	3	Windpark Zierikzee	10,2	3,4
26	Veere	Neeltje Jans	4	Windpark Neeltje Jans	12	3
30	Veere	Neeltje Jans	4	Windpark Roompotsluis BV	12	3
101	Goes	Goes	1	Zeeuwwind	2,7	2,7
151	Noord-Beveland	Kamperland	3	Windpark Zeeland	9	3
152	Noord-Beveland	Kats	3	Zeeuwind	9	3
253	Tholen	Anne Vosdijkpolder	5	Eneco	15	3

Getijdenenergie

In het kader van innovatie heeft Rijkswaterstaat eind 2015 een vijftal getijdenturbines laten plaatsen in de OSK (Afbeelding 7.2). Het gaat om het grootste project voor getijdenstroom in Nederland. De turbines hebben een totale capaciteit van 1,2 MW. Er is inmiddels een vergunning om ook bij een tweede opening in de OSK turbines te installeren. Dit vindt naar verwachting in 2018 plaats. Meer turbines betekent meer weerstand voor de waterstroming door de kering. Dit is ongunstig in verband met afname van de getijslag en daardoor een toename in de zandhonger en afname van het areaal intergetijdengebied.

Afbeelding 7.2 Getijde energie turbines in de OSK

7.2.2 Water

Waterkwaliteit

De OS bestaat uit zout water met een beperkte dynamiek. De kering zorgt voor een gedempte getijdenwerking die alleen bij extreem hoge stormvloeden wordt gesloten. Het water is helder en vormt een leefmilieu voor een rijke flora en fauna. De waterkwaliteit voldoet zowel aan de eisen die de functie zwemwater stelt als aan de eisen van de functie schelpdierwater. De Schelpdierwaterrichtlijn en de Viswaterrichtlijn zijn 31 december 2013 ingetrokken. Het beschermingsniveau wordt gehandhaafd met het streven naar de goede toestand onder de KRW. De KRW kent echter geen eisen voor de bacteriologische kwaliteit van schelpdieren. Deze eis is daarom blijven staan in regelgeving, evenals de noodzaak om voor schelpdieren beschermde gebieden aan te wijzen. De aanwijzing van de gebieden is ongewijzigd ten opzichte van 2009. De schelpdierwateren in het stroomgebied van de Schelde zijn Delta en Voordelta.

ZSS heeft geen negatief effect op de waterkwaliteit.

7.2.3 Bodem en ondergrond

Bodemkwaliteit

De slibkwaliteit van de slikken en schorren is goed. Het vormt geen belemmeringen voor grondverzet en dijkaanpassingen. Zoute kwel speelt binnendijks maar is niet meegenomen in deze studie aangezien het accent ligt op buitendijkse gebieden. Door ZSS zal de bodemkwaliteit niet negatief worden beïnvloed.

Munitie

Bij Zierikzee ligt een munitiedepot. Hier geldt een duik-, vis- en ankerverbod om risico's te vermijden. Er is een potentieel risico indien de locatie wordt geroerd. Wanneer dit niet het geval is kunnen risico's zo goed als worden uitgesloten. Het is niet mogelijk dat de gestorte munitie spontaan ontploft. De waterkwaliteit in de omgeving is onderzocht (fosfor) maar tot nu toe is er niet sprake van een probleem. Zolang de locatie niet geroerd wordt worden hier geen effecten verwacht.

7.2.4 Ecologie en biodiversiteit

Intergetijdengebied

Voor aanleg van de kering was het areaal intergetijdengebied circa 12.000 ha groot. Direct na aanleg van de kering nam dit af naar 11.300 ha. Dat kwam door een hoger laagwaterniveau, waardoor de laagste delen van de slikken en platen permanent onder water verdwenen. De neergaande trend heeft zich verder doorgezet naar 10.000 ha in 2007 [ref. 54]. Er is sprake van een neergaande trend als gevolg van zandhonger. Het areaal platen en slikken loopt geleidelijk terug en dreigt op termijn geheel te verdwijnen. Sinds 1986 is ruim 10% verdwenen. Op basis van de MER zandhonger wordt verwacht dat zonder suppleren deze neergaande trend zich zal voortzetten met 9 % in 2020 en 35 % in 2060 [ref. 54]. Oostelijk deel Roggenplaat blijft waarschijnlijk tot 2050 in stand, maar de Galgenplaat gaat langzaam achteruit en dreigt voor 2050 te verdwijnen. Het verdwijnen van het intergetijdengebied wordt verder versneld door de ZSS die een stijging van het gemiddeld peil veroorzaakt op de OS. In het kader van de ANT-studie OS [ref. 5] is berekend dat bij een ZSS van 60 cm over 1990-2100 er in 2060 nog maar 8.000 ha en in 2100 slechts 4.000 tot 6.000 ha intergetijdengebied over zal zijn. Op basis van het W-scenario, met een ZSS van NAP +85 cm zullen de resterende arealen nog kleiner zijn dan aangegeven in de ANT-OS studie. Dit zal resulteren in een achteruitgang van diverse natuurdoelstellingen. Vooral natuur gekoppeld aan de platen en slikken zal te leiden hebben van deze ontwikkeling. Habitattypen zoals de pioniervegetaties (H1310A) de slijkgrasvegetaties (H1320) en de schorren (1330A) zullen waarschijnlijk slechts beperkt beïnvloed worden door de effecten van de zandhonger (tot 2060). Dit komt deels doordat de schorren liggen op locaties waar geen of weinig erosie plaatsvindt, en deels doordat schorranden op een aantal plaatsen verdedigd zijn. ZSS zal leiden tot een hoger gemiddeld peil en zal schorren in de toekomst uiteindelijke aantasten (golfslag) en verdrinken.

Foerageergebied steltlopers

De kwaliteit van het foerageergebied van steltlopers is gedefinieerd als het areaal intergetijdengebied waarin de complete range van relevante droogvalduren beschikbaar is. Door de zandhonger neemt het aandeel aan gebieden die kort droogvallen (0 - 20 % droogvalduur) in alle deelgebieden verhoudingsgewijs toe, terwijl de gebieden die lang droogvallen (60 - 80 % droogvalduur) verhoudingsgewijs afnemen. Hierdoor wordt foerageren in de hogere zones beperkt, wat betekent dat de minimale benodigde foerageertijd voor kleine vogels en de foerageertijd in de winter mogelijk niet altijd behaald kan worden.

Uit recent onderzoek [ref. 72] is gebleken, dat het aandeel kleine steltlopers in hoger gelegen gebieden groter is in vergelijking met lagere gebieden. Gebleken is dat het voedselaanbod in geen van de gebieden een limiterende factor vormt en dat dit dus niet een reden is voor steltlopers om in bepaalde gebieden wel of niet te foerageren. Aannemelijker is dat de lange droogvalduur een factor is die een positieve bijdrage levert aan de geschiktheid van het foerageergebied voor kleine steltlopers. Dit kan echter niet los gezien worden van factoren als bereikbaarheid van de bodemfauna voor de steltlopers en de mate van verstoring tijdens het foerageren.

In het kader van het Biologisch Monitoringprogramma van de zoute Rijkswateren worden er maandelijkse tellingen verricht van watervogels en steltlopers. Bergeend, Bonte strandloper, Drieteenstrandloper, Kanoet, Rosse grutto, Scholekster, Wulp, en Zilverplevier vertegenwoordigen meer dan 95 % van het totale aantal individuen.

De Scholekster, de talrijkst voorkomende steltloper in de Oosterschelde, is significant in aantallen afgenomen. In 2011/2012 kwam nog slechts 45 % voor ten opzichte van het begin van de tellingen (seizoengemiddeld). Toch blijft het de talrijkste soort in de Oosterschelde, gevolgd door Bonte strandloper en Wulp Bij de Kanoet zien we een sterke afname sinds de piek in 2006 [ref. 5].

In 2020 staat de kwaliteit van de foerageerfunctie van deelgebied west (Roggenplaat) onder druk door erosie van de hogere zones. Dit zijn vooral de hoogste zones met droogvalduren van 60 % en hoger. In 2020 zijn deze hogere zones gehalveerd en in 2030 zijn de hoogte-zones grotendeels verdwenen (knikpunt!). In 2060 verdwijnt zelfs de gehele hoogste zone met droogvalduur 60 - 80 % en het aandeel met droogvalduur 40 - 60 % krimpt drastisch.

In de ANT-OS studie is een raming gemaakt het effect van zandhonger en ZSS op de droogvalduur van verschillende gebieden, uitgaande van 60 cm ZSS over de periode 1990 - 2100 (middenscenario) [ref. 5]. Opvallend is de snellere afname van het areaal met droogvalduurklasse 40-60 % ten opzichte van de afname van het totale areaal (droogvalduurklasse 0-100 %). In de gebieden West en Noordoost nemen de arealen met droogvalduurklasse 20-40 eerst nog toe. De verklaring is te vinden in de erosie van de hoger gelegen gebieden die daardoor in een lagere klasse van droogvalduren terecht komen; de ZSS draagt hier nog verder aan bij. Gebieden met bijvoorbeeld droogvalduur 40-60 % veranderen daardoor in gebieden met droogvalduur 20-40 %. In West leidt dit tot de toename in de tijd van de droogvalduurklassen 0-20 % en 20-40 %. In de overige gebieden speelt hetzelfde fenomeen, maar daar is de afname van de lagere gebieden dermate sterk dat de toename door dit van klasse overspringen van stukken areaal teniet gedaan wordt. De voor vogels in de Oosterschelde meest belangrijke zone is de zone met droogvalduurklasse 40-80 %. Dit is vooral van toepassing voor de grotere gebieden, met name West: Roggenplaat, Neeltje Jan, Midden: Galgeplaat, Dortsman, Zandkreek, slikken Kats, Oost: Kom vanaf Oostdijk naar het oosten inclusief de Hoge kraaier en Noord: Krabbenkreek, Viane, slikken Slaak. Kleine slikken en platen hebben door hun geringe omvang weinig invloed op de populatieomvang steltlopers.

Door een verwachte afname met 9 % potentieel foerageergebied in 2020 en 35 % in 2060 wordt een afname verwacht in het aantal steltlopers van 16 % in 2020 en 33 % in 2060 [ref. 54]. Op basis met de ANT-OS studie wordt voor het gebied met droogvalduur 40-80 % zonder zeespiegelstijging in 2060 een reductie van ongeveer 40 % verwacht en met ZSS met het midden en hoge scenario respectievelijk 56 % en 61 % [ref. 5]. Zonder ingrijpen zal de oppervlakte van geschikt foerageergebied teruglopen, alsook het aantal steltlopersoorten. Kleine steltlopers kunnen uiteindelijk zelfs helemaal zullen verdwijnen uit de OS. Verwacht wordt dat wanneer dit punt wordt bereikt, het verdwijnen van de kleine steltlopers vrij plotseling zal plaatsvinden en mogelijk onomkeerbaar zal zijn.

De urgentie voor zandsuppleties is het hoogst in West, gevolgd door Midden en Oost (suppleties binnen 20-30 jr) en Noord (suppleties binnen 30-40 jr). Vanwege het verdwijnen van het intergetijdengebied met hogere droogvalduren is ingrijpen op korte termijn bij deelgebied West (met name Roggenplaat) noodzakelijk om de instandhoudingsdoelstellingen voor steltlopers te waarborgen. Zandsuppleties zijn hier gepland in 2017. Voor de overige gebieden is zandsuppletie pas na 2025 gepland. Dit betekent dat tot die tijd een verdere achteruitgang in het aantal steltlopers (scholekster, kanoet) is te verwachten. Om het bodemleven de kans te geven na de suppleties de platen te koloniseren moet er ver voor 2030 worden ingegrepen. Bovendien zal tussen 2020 en 2030 het resterende 60 - 80 % droogvalduur zo klein zijn dat vogels elkaar mogelijk gaan beconcurreren. De kwaliteit van de foerageerfunctie van andere deelgebieden komt pas onder druk te staan na 2025.

Gewone zeehonden

Eind jaren '70 was de zeehond vrijwel uitgestorven door jacht, vervuiling en rustverstoring. Nu is vooral in de monding van de Oosterschelde weer regelmatig een groep van ongeveer 25 gewone zeehonden te zien. Het rustgebied van gewone zeehonden bestaat uit platen in het intergetijdengebied met hoge gedeelten en weinig verstoring. De belangrijkste ligplaatsen zijn de Roggenplaat Middengeul en de Roggenplaat Westgeul.

De zandhonger heeft negatieve effecten op het areaal en kwaliteit van de rustgebieden van de gewone zeehond. De rustgebieden komen lager te liggen waardoor delen niet meer of gedurende te korte periode per getij droogvallen en daardoor ongeschikt worden als rustgebied. Zonder ingrijpen zal in 2020 het grootste gedeelte van de huidige rustplaatsen op de Roggenplaat nog bestaan, maar deze zijn verlaagd met 1 tot 10 cm. Hierdoor neemt de mogelijke rusttijd per getij en daarmee ook de kwaliteit af. In deelgebied midden bestaat de oostelijke punt van de Galgenplaat in 2020 nog als rustgebied, maar deze is 5 tot 10 cm verlaagd door erosie. In 2060 zijn mogelijk alle rustgebieden verdwenen door de zandhonger.

Zeegrasvelden

Rond 2009-2010 is er in totaal nog 140 ha zeegras aanwezig, een fractie van het areaal van voor de aanleg van de OSK. In deelgebied west ontbreekt zeegras. De arealen zeegrasvelden zijn het grootst in deelgebied midden, in de Zandkreek, Kattendijke, Kats en Dortsman (56 ha). Ook in deelgebied noord (totaal 34 ha, Viane, Krabbenkreek en Mastgat-oost) en oost (50 ha, Yerseke, Verdronken land van Zuid-Beveland en

Rattekaai-west) zijn arealen klein zeegras aanwezig. Daarnaast zijn nog enkele pollen groot zeegras aanwezig in Krabbenkreek. In de OS is de ondergrens voor begroeibaar areaal van zeegrasvelden NAP -0,6 m. De kwaliteit van zeegrasvelden wordt bepaald door het bedekkingspercentage en de soortenrijkdom waarbij de klassen goed (bedekking > 5 %, meer dan één soort) en matig (bedekking < 5 %, één soort) worden onderscheiden. Rond 2009-2010 is 33 ha van goede kwaliteit en 107 ha van matige kwaliteit.

Zeegrasvelden verminderen het opwervelen van sediment, waardoor de helderheid vergroot wordt. Tevens kunnen ze giftige ammoniumconcentraties verlagen. Door deze positieve terugkoppelingsmechanismen kunnen zeegrassen hun eigen leefmilieu verbeteren en in stand houden, maar als ze eenmaal verdwenen zijn, is terugkeer extra moeilijk. Door erosie als gevolg van de zandhonger komt een deel van het areaal beneden de NAP -0.6 m. Hierdoor wordt een afname ten opzichte van de huidige situatie verwacht van 4 % in 2020 en 18 % in 2060. Oplossingsrichtingen met zandsuppleties (6, 7) kunnen, afhankelijk van de locatie, de afname als gevolg van de zandhonger reduceren. In deelgebied oost is sprake van uitbreiding van klein zeegras in de daar geleidelijk bloot komende zachte kleilagen van de oude polder die daar ooit lag. Deze lagen komen bloot door de zandhonger. In de periode 2010-2016 is het areaal daar circa 2x zo groot geworden (kwaliteit: matig). Daarnaast is er in deelgebied noord na 2010 sprake van een kleine, nieuwe populatie groot zeegras van circa 3ha op het westelijk deel van de Plaat van Oude Tonge. Deze populatie zal zich vermoedelijk niet veel verder uitbreiden en komt voor in een vergelijkbare dieptezone als het Klein zeegras. De kwaliteit van zeegrasvelden wordt niet beïnvloed.

Zilte pionierbegroeiing (H3110_A)

Het areaal in de uitgangssituatie bedraagt 5 ha. De gebieden met zeekraal zijn te vinden in het natte deel van de schorren, onder andere in de Schelphoek en de zuidoost hoek van de OS.

Het areaal en de kwaliteit van zilte pioniersbegroeiingen zal afnemen door de zandhonger in 2060 en door ZSS. In 2020 is er nog geen effect als gevolg van de zandhonger op het areaal zilte pioniersbegroeiingen.

Slijkgrasvelden (H1320)

Pionierbegroeiingen met slijkgrassoorten domineren op periodiek met zout water overspoelde slikken. In de OS komen slijkgrasvelden voor in alle schorren (Rumoirtschorren, Krabbenkreek, Dortsman, Verdronken land van Zuid-Beveland, Schor van Viane, de Oesterput op Noord-Beveland) vaak in combinatie met zeekraal. Er is in totaal 236 ha slijkgraslanden in de OS.

De zandhonger heeft geringe effecten op slijkgrasvelden buitendijks. Het areaal buitendijks wordt langzaam kleiner wordt door erosie. ZSS kan dit verlies aan geschikt areaal versnellen.

Schorren en zilte graslanden buitendijks (H1330_A)

Natuurlijke schorren vertonen een fraai patroon van steeds fijner vertakkende kreken en prielen, die worden geflankeerd door hoge oeverwallen met daarachter lager gelegen kommen. Het areaal aan schorren en zilte graslanden buitendijks bedraagt 222 ha. De buitendijkse graslanden kunnen door zeewater overspoeld worden. Na het aanleg van de Deltawerken is het getijregiem op de Oosterschelde sterk verminderd en is er een ernstig sedimenttekort in het bekken ontstaan. Op de schorren is de sedimentatie ruwweg met een factor 2 afgenomen, terwijl de schorren zelf versmallen [ref. 70]. Deze ontwikkeling in de periode 1989 - 1993 heeft zich doorgezet tot 2003. Het sediment dat zich afzet bij Rattekaai en Slaak is fijner dan vóór 1989. De kwaliteit van het habitattype zou zijn verminderd na aanleg van de OSK.

De zandhonger heeft geringe effecten op deze vegetatie. De sedimentatie op de schorren nog waarschijnlijk zal afnamen in de loop van de komende decennia (50 jaar), omdat door de zandhonger het voorland verlaagt. Daardoor is het voor de schorren lastiger om boven het niveau van het slikken te blijven. De ZSS vormt een potentieel knelpunt indien dit te snel optreedt waardoor sedimentatie achter blijft bij het waterpeil. Hierdoor wordt de kwaliteit van het habitattype aangetast raken bij een te hoge inundatiefrequentie of zelfs geheel overstroomd kan raken. Volgens een studie van het RIKZ [ref. 70] kunnen schorren qua hoogte de relatieve ZSS bijhouden bij het minimum scenario (20 cm in 100 jaar). Bij het maximum scenario (85 cm in 100 jaar) houdt de aanslibbing de zeespiegelstijging niet bij en zullen alle schorren op termijn verdrinken. Bij het midden scenario (60 cm per 100 jaar) kunnen alleen de schorren bij

Rattekaai en vermoedelijk ook enkele kleinere schorgebiedjes die onder de dezelfde condities als Rattekaai zijn gelegen, de zeespiegelstijging bijhouden, maar de andere schorren niet. Metingen aan de ZSS voor de periode 1890 tot 2014 laten een stijging van minder dan 19 cm per 100 jaar zien.

Kinderkamerfunctie voor vis

Zowel het intergetijdengebied als het ondiepe water van de Oosterschelde vervult een belangrijke rol als kinderkamer voor verschillende vissoorten (o.a. schol en tong). Er is duidelijke relatie tussen het areaal aan kinderkamers en de populatiegrootte.

Een afname van het intergetijdengebied in de Oosterschelde leidt tot een afname van het visbestand op de Noordzee. Maximaal 5,8 % van de populatiegrootte op de Noordzee wordt bepaald door de grootte van de kinderkamers in de Oosterschelde. Zandhonger heeft tot effect dat in 2060 35 % van het areaal kinderkamerfunctie voor vissen verloren gaat. Tegelijkertijd neemt het areaal kinderkamer in ondiep water, dat minder van kwaliteit is, toe.

Rustgebieden fauna

Het gaat hier om hoogwatervluchtplaatsen (HVP) voor steltlopers. Deze liggen soms op de schorren, maar vooral binnendijks, op en achter de dijk. Dit is niet relevant voor wat er gebeurt in de OS. De zandhonger heeft geen effect op de dergelijke locaties. Er worden geen effecten verwacht van ZSS en maatregelen in de OS op deze locaties.

Sublitorale bodem

Sublitorale bodem heeft betrekking op delen van de kustwateren die beneden de laagwaterlijn liggen en die in principe altijd onder water staan. Er kan onderscheid gemaakt worden in harde en zachte substraten. Dergelijke gebieden hebben vaak een rijke bodemfauna. Er lijkt geen actuele kaart beschikbaar te zijn van het sublitorale deel van de OS, juist daar waar de visserij met gesleept vistuig actief is. Voor de Oosterschelde is er wel een databestand van puntbemonstering van bodemsediment aanwezig van het NIOO. Deze punten zijn echter zeer ongelijk verdeeld over het gebied en alleen daar geconcentreerd in gebieden ten behoeve van ander langlopend onderzoek.

In gesprekken met vissers is duidelijk naar voren gekomen dat de bodemstructuur na de voltooiing van de Oosterschelde kering sterk is veranderd. Fijn zand, klei en veenbodems worden in toenemende mate door sedimentatie met grof zand afgedekt. Er zijn in 2006 drie geïsoleerde relictgebieden met een vaste veenbodem aanwijsbaar: 1). Een klein gebied ten westen van de munitie stortplaats voor de haveningang van het kanaal naar Zierikzee, 2). Een gebiedje ten Noordwesten van Philipsland, 3). Een gebied ten Zuidwesten van Gorishoek. Dit zijn restanten van voormalig veel groter sublitoraal veengebied. Kleibodems worden in het bevisbare gedeelte van de Oosterschelde niet meer aangetroffen. Wel worden er regelmatig lossen pakketten klei opgevist die door getijdenstromen worden meegevoerd van elders.

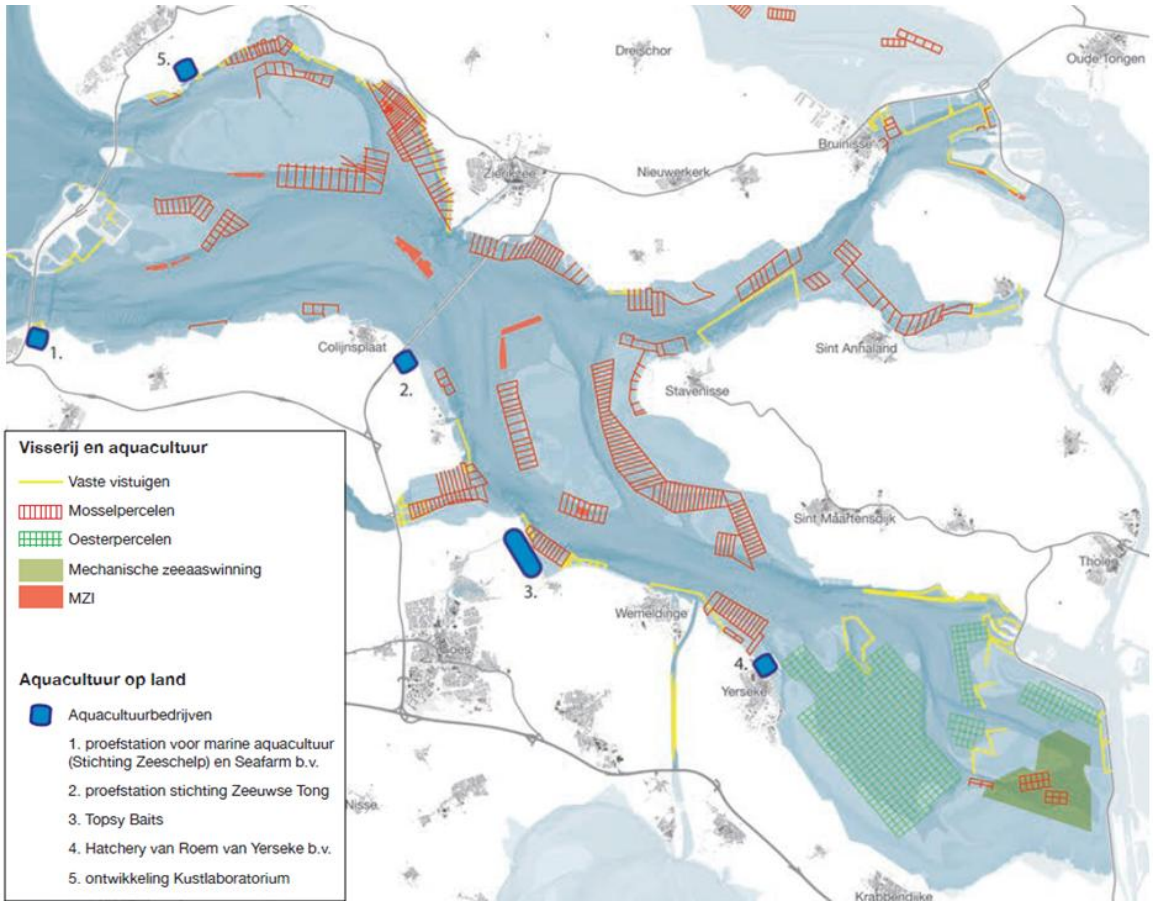
De MER zandhonger geeft aan dat er geen effecten optreden door de zandhonger op de bodemfauna en soortenrijkdom van sublitorale gemeenschappen. Dit geldt voor zowel hard substraat levensgemeenschappen (wieren, schelpdieren, anemonen, sponzen et cetera) en zacht substraat levensgemeenschappen (wormachtige, schelpdieren, krabben en garnalen et cetera). ZSS leidt waarschijnlijk tot een toename van het areaal laagdynamisch sublitoraal. De oplossingsrichtingen met zandsuppleties (6+7) kan verstorend werken, maar er is weinig over bekend.

7.2.5 Ruimtegebruik

Visserij en schelpdierkwekerij

In de Oosterschelde vinden verschillende vormen van visserij plaats, namelijk mossel- en oesterteelt, sleepnetvisserij, kokkelvisserij, visserij met vaste tuigen (inclusief kreeftenvisserij) en weervisserij. Afbeelding 7.4 geeft aan de locatie aan van vaste vistuigen, mosselpercelen, oesterpercelen, mechanische zeeaaswinning en mosselzaadinvanginstallaties (MZI).

Afbeelding 7.3 Locatie van de diverse visserij en schelpdierkwekerij activiteiten



Autonome ontwikkelingen zijn:

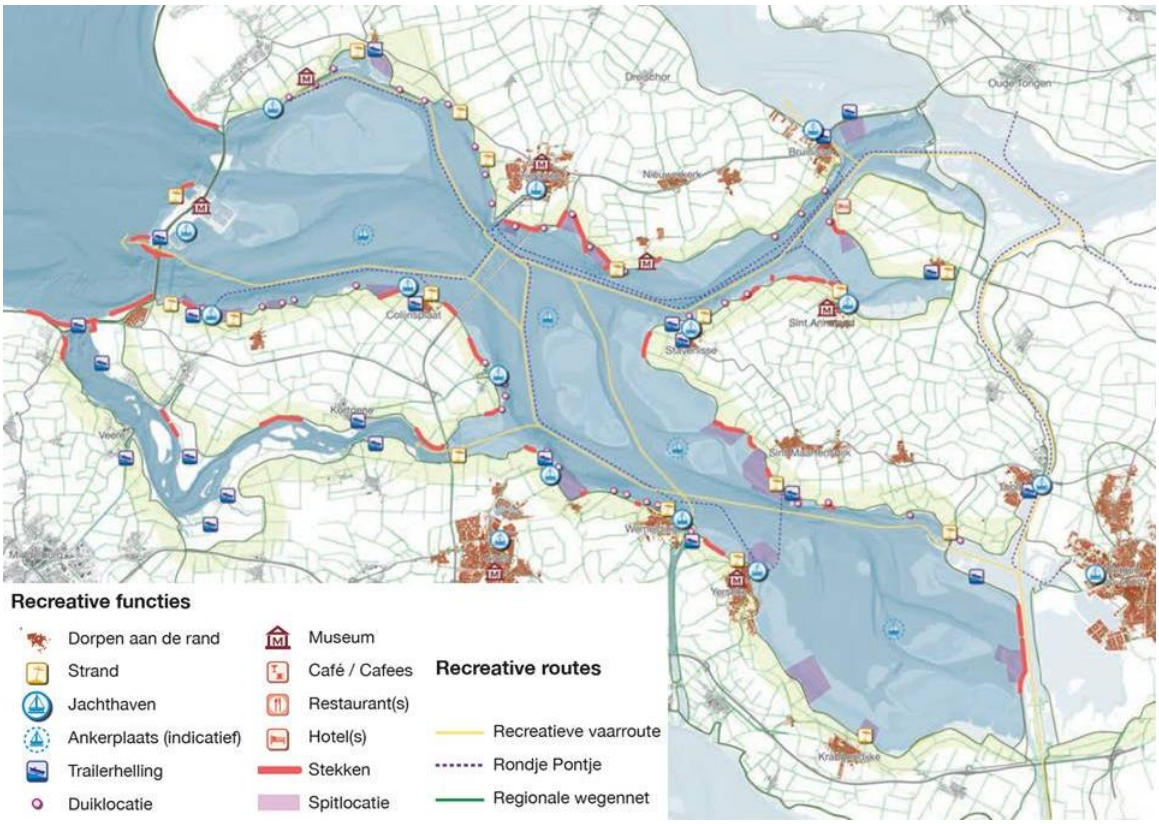
- op basis van de veranderde droogvalduur op de slikken en platen van de Oosterschelde ten gevolge van de zandhonger is verwacht dat de kokkelbestanden zullen afnemen en de bestanden wilde Japanse oesters zullen toenemen. Of en in welke mate deze effecten zich daadwerkelijk zullen gaan manifesteren is afhankelijk van andere factoren die niet, of indirect, te maken hebben met de zandhonger of ZSS;
- mossel- en oesterpercelen: De trend is dat er meer mosselzaadinvanginstallaties (MZI's) komen. Het areaal breidt uit, vooral richting de OSK, vanwege instroom van voedsel vanuit de Noordzee. De hangcultures gaan slecht op plekken met geringe waterverversing (stroming) vanwege afzetting van pseudofaeces. De oesterkweek heeft het momenteel zwaar vanwege ziektes. Om die reden wil men nabij de OSK zitten met de teelt;
- voor commerciële oester- en mosselpercelen worden geen duidelijke effecten verwacht van de zandhonger of ZSS. Het tijdens een sluiting van de OSK min of meer stagnante peil op de Oosterschelde kan, vanwege een concentratie van de golfenergie binnen een bepaalde zone, bijdragen aan de schade die als gevolg van een storm ontstaat aan mosselpercelen. Voor de mosselpercelen in de Oosterschelde geldt met name een streefpeil van NAP + 1,00 m als minder gewenst. Negatieve effecten zijn te voorkomen door wisselpercelen in te zetten;
- verwaterpercelen: Er worden voor deze activiteit geen effecten verwacht van ZSS en autonome ontwikkelingen;
- sleepnetvisserij: ZSS heeft geen effect. De visafslag van Colijnsplaat gaat dicht;
- kokkelvisserij: Deze activiteit neemt af door ZSS en door zandhonger en is niet meer zo relevant. De kokkel is afhankelijk van fytoplankton (eencellige algen) en dit lijkt af te nemen. Daarnaast worden kokkels gegeten door vogels, vissen en andere predatoren zoals krabben en garnalen. Door afname van koude winters neemt de predatie van garnalen toe. Verder is er sprake van reserveringsbeleid in verband met de vogels;

- visserij met vaste vistuigen: De kreeftenvisserij is een belangrijke economische activiteit in de Oosterschelde. De kreeften worden gevangen met vallen in de nabijheid van onderwateroeverbestortingen, waar de kreeften hun holen hebben. Er worden geen effecten verwacht;
- weervisserij: Het gaat hier onder andere om visserij op ansjovis waar de OS als kraamkamer voor functioneert. Commercieel is het niet interessant maar wel interessant voor toeristen. Marginale activiteit. Door zandhonger is sprake van een afname.

Recreatie

De recreatiesector in de Oosterschelde kent zeven typen gebruikers: (1) dagrecreanten en verblijfsrecreanten, (2) watersporters (pleziervaart), (3) sportvissers, (4) pierenstekers, (5) duikers, (6) vogelaars en (7) strandrecreanten. De locatie van de verschillende type recreanten is aangegeven in afbeelding 7.5. Per type recreant is gekeken in hoeverre de zandhonger en maatregelen voorzien in de huidige situatie een effect zullen hebben op hun gedrag en waardering van het Oosterscheldegebied (tabel 7.2). Voor de huidige situatie is de verwachting dat er geen grote verandering zal optreden in het gedrag en de waardering van het gebied.

Afbeelding 7.4 Locatie van de gebruiksfunctie recreatie



Tabel 7.2 Type recreanten en effect zandhonger en ZSS

Type recreant	Effect zandhonger en ZSS	Reden
dag- en verblijfrecreant	nee	de landschappelijke waarde van de huidige Oosterschelde is hoog (afwisseling van platen, slikken en geulen, en zichtbaarheid getij). Zandhonger en ZSS spelen niet in de beleving van de recreant vanwege de traagheid van het proces en gewenning
watersporter	nee	Natuurbeleving en de aanwezigheid van historische steden, dorpen en passantenhavens (nu circa 16) zijn van belang naast beschikbaarheid van vaarroutes. Zandhonger, ZSS en mitigerende maatregelen veranderen hier weinig aan. Het aantal kitesurfers neemt toe. Dit wordt gereguleerd in verband met verstoring van vogels door het toekennen van specifieke locaties
sportvisser	nee	Volgens Sportvisserij Zuidwest Nederland is er al jarenlang sprake van een daling in de visvangsten in de OS. Stichting Rugvin volgt de bruinvis en ziet als belangrijke doodsoorzaak vermagering en verhongering. Mogelijke oorzaken zijn (1) afname voedselrijkdom, (2) overbegrazing van schelpdieren, en (3) veranderde morfologische omstandigheden. Er vindt een verschuiving plaats naar strandvisserij. Oplossingsrichtingen hebben naar verwachting geen effect. Niet het soort vis maar de hoeveelheid vis is voor de sportvisser van belang. Zandhonger, ZSS en maatregelen hebben hierop geen effect op
pierenstekers	nee	Zonder suppleties en met ZSS groot effect vanwege verlies habitat. Met maatregelen tijdens de aanlegfase en ontwikkeling van de suppleties vindt tijdelijk verstoring van de ecotoop plaats. Doordat er een zandlaag wordt aangebracht gaat het bodemleven van de slikken tijdelijk verloren. Dit gaat ten koste van de vangstmogelijkheden bij het pierensteken. Het bodemleven in de slikken herstelt naar verwachting in circa 5 jaar. Gedurende deze periode zullen pierenstekers van een andere locatie gebruik moeten maken. Het pierensteken vindt plaats op locaties waar een vergunning voor is afgegeven. Bij suppleties op deze locaties moet - tijdelijk - een vervangende locatie worden aangewezen. In de Oosterschelde zijn voldoende slikken om vervangende locaties aan te wijzen.
duiker	nee	Duikers in de Oosterschelde hebben vaste duiklocaties. Locaties kunnen interessanter worden wanneer hard substraat wordt ingezet bij vooroeververstersking. Effect hangt af van wijze van uitvoering. Waarschijnlijk alleen interne verschuiving van populariteit van locaties. Op het niveau van de hele OS geen effect. In de nabijheid van deze locaties zullen geen suppleties of zandwinning plaats vinden, daarom zijn er geen effecten te verwachten
vogelaar	nee	Voor vogelaars is vooral de diversiteit van kustbroedvogels en trekvogels belangrijk. Vooral de binnendijks gelegen inlagen zijn van belang. De verwachting is dat in de periode tot 2060 geen soorten zullen verdwijnen. De effecten van de zandhonger voor de vogelaars zijn daarom klein
strandrecreant	nee	In de Oosterschelde zijn er 16 zwemlocaties, deels bestaande uit zandstrandjes. Op basis van een vergelijking van de locaties van de stranden gecombineerd met de erosiekaarten 2060 is geconcludeerd, dat er bij 5 van de 16 zwemlocaties erosie plaats vindt. De gemeenten houden de kwaliteit van de strandjes op peil met zandsuppleties, waardoor er geen effect op de strandrecreatie is

Scheepvaart
In de Oosterschelde liggen twee hoofdvaargeulen. De ene hoofdvaargeul, de Roompot, loopt van de Bergsediepsluis in de Oesterdam richting de Noordzee, via de Roompotsluis. Dit is vooral een route voor recreatievaart. De andere hoofdvaargeul is de hoofdtransportas Gent-Duitsland (ViN 138, CEMT klasse VIb), namelijk de noordzuidverbinding Wemeldinge - Krammer, via Zijpe, Mastgat en Keeten, door het middengebied van de Oosterschelde naar het Kanaal door Zuid-Beveland en uiteindelijk de Westerschelde. De beroepsscheepvaart maakt vooral gebruik van deze noord-zuidverbinding. Per jaar maken circa 45.000 schepen, met een gezamenlijke lading van circa 25 miljoen ton laadvermogen, gebruik van de Oosterschelde. Het aantal sluispassages door de Krammersluizen is ongeveer dertig procent van wat er door de Volkeraksluizen gaat. Verder zijn er geen beperkingen in de doorvaarthoogte als gevolg van bruggen e.d. Daarnaast is er veel scheepvaart ten behoeve van de schelpdiervisserij.

Er liggen drie bruggen over het Kanaal door Zuid-Beveland. Elke brug heeft een vaste overspanning en een beweegbaar brugdeel (basculebrug). De doorvaarthoogten bij de Vlakebruggen (spoorbrug van de Zeeuwse Lijn en verkeersbrug van de N289) en de Postbrug (brug van de N670) is bij een waterstand op NAP onder de vaste bruggen 10,50 m en bij de basculebruggen 9,50 m. Schepen die qua grootte dicht tegen die doorvaarhoogte aanzitten kunnen in de toekomst hinder gaan ondervinden bij hogere waterpeilen (vaker en langer wachttijden bij openen beweegbare delen). Belangrijke havens voor beroepsvaart zijn Yerseke, Bruinisse en Zierikzee. De kades liggen op circa NAP +3,2 m. Die waarde ligt dicht aan tegen het sluitpeil van de OS (NAP +3,0 m). In principe zal het peil in de OS niet boven het sluitpeil komen, maar door opwaaiing, slingeringen en effecten van de betrouwbaarheid van de OSK is een hoger peil in de havens wel mogelijk. Dit kan overlast opleveren, maar grote schade wordt niet verwacht.

7.2.6 Ruimtelijke kwaliteit

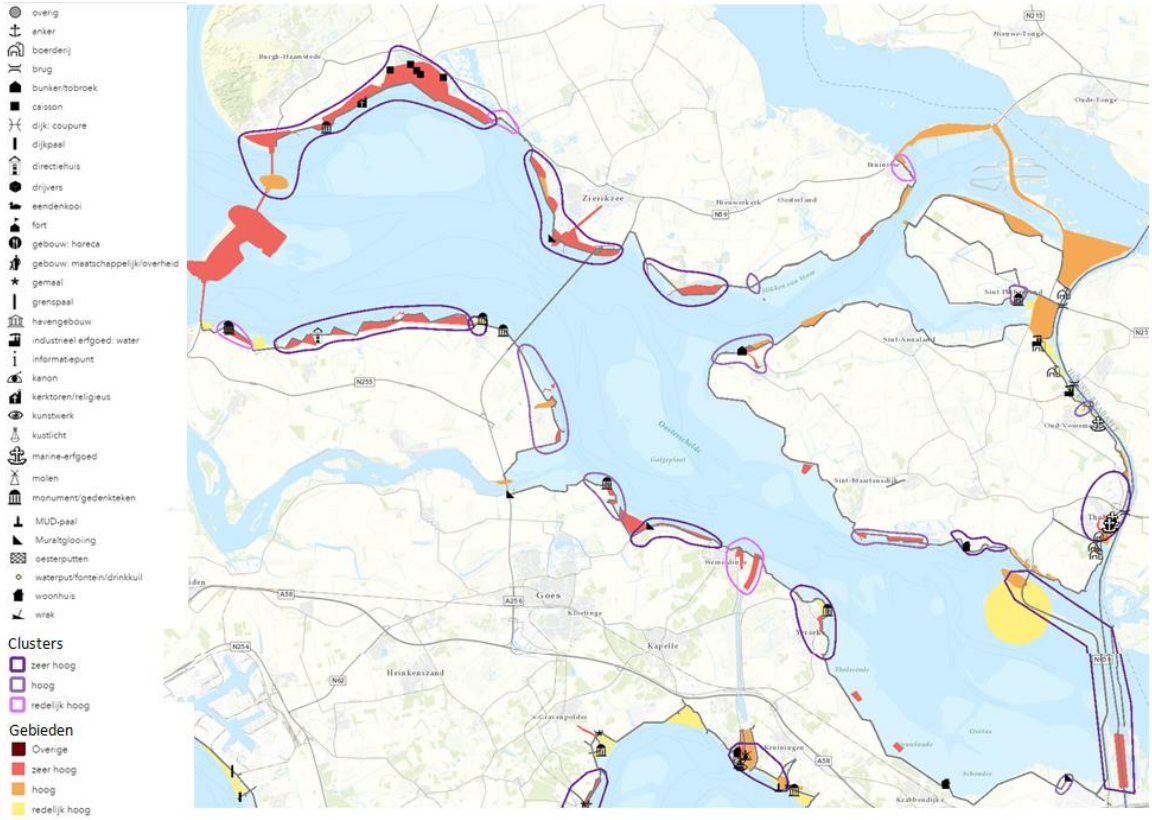
Cultuurhistorie
Door projectbureau Zeeweringen is een verkenning uitgevoerd naar de cultuurhistorische waarden in de OS. Daarin zijn vooral objecten aangegeven langs de waterkeringen zoals oude zeeweringen (Muraltglooiing), industrieel of maritiem erfgoed, wrakken, diverse gebouwen en bunkers en havens (afbeelding 7.6). Daarnaast is er een aparte kaart beschikbaar van kleine getijhavens, oude veerhavens en havenrestanten (Afbeelding 7.6). In een aantal gevallen zijn de resten van de haven nog te vinden, maar is de 'havenkom' inmiddels volgestort en omgebouwd tot een plateau. De oude veerhaven van Gorrishoek is meer een aanlegplaats tegen de dijk. Deze is niet als landbouwhaventje gebruikt. De aanlegplaats bij St Philipsland is wel voor landbouw gebruikt maar fungeert nu soms als meerplaats voor aken met als thuishaven St Philipsland. De hoogte van de kade in de getijhaventjes ligt tussen de 2 en 3.9 m NAP. Bij hoogwater (> 2 m NAP) kan de kade flink onder water komen te staan.

Midden in de OS liggen ook diverse objecten met cultuurhistorische waarden zoals verdronken dorpen en scheepswrakken. De locatie van verdronken kerkdorpen en de vele tientallen verdronken buurtschappen en kapeldorpen is goed bekend. Deze zijn te vinden langs de gehele kust en geconcentreerd rond de Roggenplaat en het verdronken land van Beveland. Scheepswrakken zijn ook goed gekarteerd.

Oude getijhavens zoals Rattekaai, Tolseinde, Kat, Oesterput en Wiskerke, Viane liggen buiten de dijkglooiing. Bij ZSS zullen deze locaties meer schade oplopen door golfslag.

De locatie van veel verdronken dorpen en scheepswrakken is goed bekend. Vaak zijn deze al bezocht en leeggehaald. Van ZSS is geen effect te verwachten.

Afbeelding 7.5 Kaart met cultuurhistorische waarden nabij de keringen.



Afbeelding 7.6 Locatie van kleine getijhavens, oude veerhavens en havenrestanten

7.2.7 Overige criteria

Investerings- en onderhoudskosten
Voor de huidige situatie brengen wij niet de kosten in beeld, maar alleen de meerkosten van de verschillende oplossingsrichtingen.

Flexibiliteit
Van de oplossingsrichtingen wordt beoordeeld of ze aansluiten bij de filosofie van adaptief deltamanagement.

CO_2-emmissie
De CO_2-emissie van de huidige situatie wordt niet in kaart gebracht, omdat dat enerzijds ondoenlijk is en anderzijds niet nuttig, omdat de oplossingsrichtingen worden beoordeeld op hun extra CO_2-emissie ten opzichte van de huidige situatie.

7.3 Effecten van oplossingsrichtingen

In tabel 6.4 zijn vier mogelijke oplossingsrichtingen aangegeven voor het opheffen van de knikpunten van de bekledingen. Op basis van expert judgement en indicatieve berekeningen zijn de effecten van deze oplossingsrichtingen geschat om te zien welke oplossingsrichting de voorkeur verdient. Onderstaande tabel 7.3 vat de effecten samen.

Tabel 7.3 Beoordeling effecten van de oplossingsrichtingen voor bekledingen

Criterium	Vervangen van de zetsteenbekleding en/of de grasbekleding op het buitentalud	Verlagen golfbelasting en golfoverslag door maatregelen in het Oosterscheldebekken	Sluitstrategie aanpassen
1 Energie Energieverbruik OSK	geen effect	geen effect	tot 2050 circa 10.000 euro extra kosten ten opzichte van de huidige situatie tot 2100 circa 100.000 euro extra kosten ten opzichte van huidige situatie
Windenergie	geen effect	geen effect	geen effect
Getijdenenergie	geen effect	zandsuppleties hebben mogelijk effect op komberging en daarmee op het debiet door de OSK. Naar verwachting is dit effect verwaarloosbaar	verwaarloosbaar effect, want de turbines wekken stroom op onder normale omstandigheden en worden opgehaald bij extreme omstandigheden. Deze komen beperkt voor.
2 Water hoogwaterveiligheid	overal effectief	alleen effectief op bepaalde dijktrajecten met vooroever, zie afbeelding 6.1	overal effectief, lokaal mogelijk aanvullende constructieve maatregelen aan de dijkbekleding nodig
waterkwaliteit	met de voorgestelde oplossingsrichtingen blijft er sprake van waterstroming in de Oosterschelde. Er worden daardoor geen grote effecten verwacht voor saliniteit, zuurstofloosheid en voedselvoorraad voor schelpdieren		
3 Bodem en ondergrond bodemkwaliteit munitie	geen effect	geen effect	geen effect
4 Ecologie en biodiversiteit intergetijdengebied foerageergebied steltlopers gewone zeehonden zeegrasvelden zilte pionierbegroeiing (H3110_A) slijkgrasvelden (H1320) schorren zilte graslanden buitendijks (H1330_A) kinderkamerfunctie voor vis; rustgebieden fauna sublitorale bodem.	geen effect, natuurwaarden op de dijken zijn beperkt en de te versterken bekledingen op het buitentalud liggen te hoog om een meerwaarde voor de ecologie te creëren	groot positief effect in analogie van de effecten van suppleties zoals beschreven in de verkenning Zandhonger Bijkomend voordeel is dat een deel van de harde oevers worden vervangen door zachte oevers	beperkt effect, omdat in de nieuwe sluitstrategie de OSK slechts beperkt extra dicht gaat. Tot 2050 gaat het om 1 extra sluiting per 10 jaar. Na 2050 loopt dit op naar 1 sluiting extra per jaar
5 Ruimtegebruik visserij en schelpdierkwekerij mossel- en oesterpercelen verwaterpercelen	geen effect	bij de suppleties en zandwinning valt een negatief effect op de mossel- en oesterpercelen en verwaterpercelen op voorhand niet uit te sluiten er zijn zorgen vanuit de mosselteelt over zandsuppleties. Effecten zullen worden onderzocht en indien nodig zal gebruik worden gemaakt van een compensatieregeling. Voor veel gebieden is er geen effect, mogelijk een klein effect bij grote toename in stroomgeulen	geen effect
sleepnetvisserij kokkelvisserij visserij met vaste vistuigen weervisserij	geen effect	sleepnetvisserij, visserij met vaste vistuigen en weervisserij ondervinden, mogelijk met uitzondering van de kreeftenvisserij, geen hinder van de suppleties en zandwinning	geen effect
recreatie watersport (zeilen, surfen, waterskien) dagrecreatie pierensteken/sportvisserij duiken	geen effect	geen effect (zie MER Zandhonger). Duikers mogelijk negatief effect bij grootschalige maatregelen (vooroeverversterking met staalslakken)	geen effect
scheepvaartroutes beroepsvaart havens	geen effect	geen effect (zie MER Zandhonger)	geen effect
6 Ruimtelijke kwaliteit cultuurhistorie historische bouwkunde (gebouwd erfgoed); historische geografie (cultuurlandschap);	beperkt effect. Versterkingsmaatregelen moeten ruimtelijk ingepast worden	licht positief effect (zie MER Zandhonger)	geen effect

Criterium	Vervangen van de zetsteenbekleding en/of de grasbekleding op het buitentalud	Verlagen golfbelasting en golfoverslag door maatregelen in het Oosterscheldebekken	Sluitstrategie aanpassen
archeologisch erfgoed (scheepswrakken en buitendijkse vindplaatsen); landschap karakteristieke landschapselementen (slikken & platen); aardkunde (geomorfologische, bodemkundige en hydrologische verscheidenheid); weids karakter en ongereptheid van natuurschoon			
7 Investerings- en onderhoudskosten investeringen onderhoud	48,5 km * 2 miljoen EUR/km zetsteen = in totaal circa 97 miljoen EUR	van de 48,5 km kan naar schatting 80 % worden versterkt met zandsuppleties. Dat is 39 km ad circa 0,5 miljoen EUR/km = 19,5 miljoen EUR aan zandsuppleties + Dus 9,5 km moet traditioneel versterkt worden ad 2 miljoen = 19 miljoen EUR = in totaal circa 38,5 miljoen EUR	De sluitstrategie aanpassen kan in principe effectief zijn om de belasting op steenzettingen te verminderen. In de praktijk zal het zo zijn dat er hier en daar toch kleinschalige herstelmaatregelen nodig zijn, omdat lokaal een steenzetting er slecht aan toe is. Om hier enigszins rekening te houden nemen wij aan dat deze maatregel voor 90 % effectief is, dus resterende kosten zijn 10 % van 97 miljoen plus sluitingskosten = in totaal circa 10 miljoen EUR
8 Flexibiliteit	minst flexibel	flexibeler dan dijkbekledingen, omdat zand naar behoefte en afhankelijk van de morfologische ontwikkeling kan worden bijgestort	groot, omdat door het aanpassen van het sluitregiem investeringen in de aanpassing van dijkbekleding kan worden uitgesteld tegen zeer geringe kosten. Hierdoor wordt tijd gewonnen, die benut kan worden om de ontwikkeling van de zeespiegelstijging te volgen en een lange termijn strategie voor de Oosterschelde te ontwikkelen (zie hoofdstuk 8)
9 CO_2-emmissie	middel	groot, vanwege meer grondverzet	gering

8

VOORSTEL VOOR VERVOLGTRAJECT

8.1 Beschouwing

Deze rapportage focust op de kernvraag: 'Wat is de houdbaarheid van de huidige veiligheidsstrategie voor de Oosterschelde?'

Effecten op de veiligheidsstrategie op korte termijn

Uit de analyses in dit rapport blijkt dat op korte termijn de effecten van nieuwe normering en nieuwe rekenmodellen dominant zijn over de effecten van zeespiegelstijging op de veiligheidsstrategie van de Oosterschelde. De Oosterscheldekering (OSK) houdt het effect van zeespiegelstijging op de hoogste waterstanden letterlijk buiten de deur.

Daarnaast blijkt dat de effecten van de combinatie van zeespiegelstijging, nieuwe rekentechnieken en nieuwe normering op de veiligheid van de Oosterscheldekering en dijken langs de Oosterschelde op korte termijn tot 2050 relatief beperkt zijn. Tot 2050 is er slechts een knikpunt gevonden voor de OSK, namelijk de hoogte van het sluisplateau, dat relatief eenvoudig constructief is op te lossen. Dit betekent dat voor dit knikpunt geen aanpassing van de veiligheidsstrategie nodig is. Een soortgelijke conclusie kan voor de dijken worden getrokken. De knikpunten aan de steenbekledingen die daar optreden zijn ten gevolge van de nieuwe normering en/of rekentechnieken. De steenbekledingen zijn eenvoudig te vervangen en het is dan ook zeer de vraag of dit consequenties heeft voor de veiligheidsstrategie als zodanig of dat dit beschouwd moet worden als een onderhoudsvraagstuk. Overigens blijkt uit een globale analyse van effecten, zoals weergegeven in tabel 7.3, dat een deel van de knikpunten bij de dijken, met name de bekleding van het buitentalud, (tijdelijk) efficiënt opgelost kan worden door het vaker sluiten van de OSK of met een zandsuppletie op de vooroever. Het aanpassen van het sluitregiem van de OSK om de belasting op de dijken te verminderen zou overigens wel een aanpassing van de veiligheidsstrategie betekenen. Het voor de veiligheidsstrategie meest ingrijpende knikpunt is indien de Oosterschelde als berging van rivierwater wordt ingezet om het benedenrivierengebied te ontlasten tijdens extreme rivierafvoer. Deze waterbergingsfunctie vraagt daadwerkelijk een andere sluitstrategie van de OSK. Hoe die sluitstrategie er dan precies uit komt te zien kan in de komende jaren worden uitgewerkt. Daar is nog voldoende tijd voor, omdat een besluit over het al dan niet inzetten van de Oosterschelde als waterberging van rivierwater pas rond 2040 wordt verwacht.

Het optreden van knikpunten in de tijd is in deze studie gebaseerd op het vigerende KNMI2006 W scenario voor ZSS. Dit scenario is verouderd en de verwachting is dat binnen enkele jaren het scenario voor ZSS naar boven zal moeten worden bijgesteld. Voor deze studie betekent dit dat knikpunten eerder gaan optreden en dat de knikpuntentabel hierop moet worden herzien. Op basis hiervan kan een hogere urgentie ontstaan voor het uitvoeren van maatregelen.

Effecten op de veiligheidsstrategie op de lange termijn

Na 2050 neemt het aantal knikpunten van de OSK toe. Daarnaast zal de kering significant vaker dicht moeten, afhankelijk van de zeespiegelstijging (ZSS). Bij een ZSS van bijvoorbeeld 1,25 m zal de OSK bijna 100 keer per jaar dicht moeten. 1,25 m ZSS is voor 2100 niet te verwachten, maar het aantal sluitingen per jaar zal tussen 2050 en 2100 aanzienlijk toenemen met alle consequenties voor de natuur. Daarmee is de

houdbaarheid van de huidige veiligheidsstrategie op lange termijn beperkt en staat Nederland voor een keuze:

(i) we sluiten de OSK definitief;
(ii) we versterken de OSK aanzienlijk (wat lastig is want een kunstwerk is moeilijk aanpasbaar) in combinatie met dijkversterking of
(iii) we bereiden ons voor op een situatie waarin de OSK niet meer aanwezig is.

Deze keuze, hoewel anno 2017 nog niet aan de orde, komt door de zeespiegelstijging eerder dan verwacht. De OSK is namelijk ontworpen voor een levensduur van 200 jaar. Gezien de verwachte zeespiegelstijging zal de OSK deze leeftijd onder de huidige veiligheidsstrategie niet halen.

Effecten onder dagelijkse omstandigheden

Onder dagelijkse omstandigheden staat de Oosterscheldekering open. De zeespiegelstijging werkt daardoor direct door op de gemiddelde waterstanden op de Oosterschelde. Dit heeft effect op de erosie van platen, schorren en slikken in de Oosterschelde. In de studie naar de zandhonger [ref. 54] is beschreven dat zandsuppleties de beste methode zijn om deze effecten te mitigeren. Zandsuppletie houdt echter niet in dat de huidige veiligheidsstrategie moet worden aangepast.

8.2 Aanbevelingen voor een vervolgtraject

1 Op basis van de voorliggende globale analyse, wordt aanbevolen om de OSK zolang mogelijk te gebruiken om de dijkbekledingen te ontzien en tijd te nemen voor de formele beoordelingen van de dijken en OSK conform het WBI. De tijd die dat oplevert, kan tevens benut worden om te bezien hoe de ZSS en de nieuwe wettelijke boordelingskaders zich de komende jaren daadwerkelijk ontwikkelen. Op grond van deze conclusie is een meer gedetailleerd vervolgonderzoek nodig naar de mogelijkheden om het sluitingsregime aan te passen.
2 Er dient een voorstel voor vervolgonderzoek (onderzoeksagenda) te komen om na te gaan of er werkelijk problemen zijn met de dijken. In het onderzoek zal aandacht besteedt moeten worden aan onzekerheid in waterpeilregime, want dat is relevant bij dijken.

9

REFERENTIES

1 Arcadis (2010a). Faalkansanalyse civiele delen stormvloedkering Oosterschelde. Referentie D03011.008007 073933874:F!.
2 Arcadis (2010b). VTV toetsrapportage stormvloedkering Oosterschelde. Referentie 074108722:C.
3 Deltares (2012a). Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, Deelrapportage Morfologie, Kenmerk 1206907-004-GEO-0003.
4 Deltares (2012b). Rol van stormvloedkering voor lange termijn veiligheid en functiebehoud van Oosterschelde, Een systeembeschrijving als aanzet voor een onderzoeksplan, Kenmerk 1206856-000-VEB-0003.
5 Deltares (2013). Eindadvies ANT Oosterschelde. Kenmerk 1207722-000-ZKS-0010.
6 Deltares (2015). WTI2017, Voorschrift toetsen op veiligheid, Technisch deel. Kenmerk 1220078-000-GEO-0009.
7 Deltares (2016). Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017, Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen, kenmerk 1230087-008-HYE-0001.
8 Deltares (2016). WTI - Onzekerheden, Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk toetsinstrumentarium, kenmerk 1220080-001-ZWS-0004.
9 Deltares (2016). Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017 - Hydraulische belastingen Kust
10 DHV (2007). Verkenning Aanpassing Sluitingsregime Stormvloedkering Oosterschelde, Dossier B14.13-01-001.
11 HKV (1998). Beheer- & Onderhoudsplan Natte werken, Oosterscheldekering, kenmerk PR115.
12 HKV (2013). Veiligheidsanalyse Oosterschelde, Bepaling waterstanden en golfbelasting Oosterschelde.
13 HKV (2015). Verdieping van varianten voor het afsluiten van de Rijnmond. MHW en HBN berekeningen in de Rijn-Maasmonding. PR3014.20.
14 HKV (2016). Hydra-NL, Gebruikershandleiding, Versie 1.3.
15 Legger waterkeringen: http://www.scheldestromen.nl/aspx/download.aspx?PagIdt=162103&File=legger_waterkeringen_2012_bijlage_2_profiel_primaire_keringen_a_b.pdf.
16 Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007) Hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen (HR2006).
17 Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2014). Brief aan de voorzitter van de Tweede Kamer, betreft: Waterveiligheid, d.d. 02-06-2014.
18 Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2015). Motie Geurts, Deltaprogramma: onderzoek naar de effecten van sluizen in de Nieuwe Maas en Oude Maas op de waterveiligheid en de zoetwatervoorziening. Nader onderzoek variant afsluiting Nieuwe Waterweg. Rijkswaterstaat. 19 november 2015.
19 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Wijziging van de Waterwet en enkele andere wetten (nieuwe normering primaire waterkeringen), Voorstel van wet, vergaderjaar 2015–2016, 34 436, nr. 2.
20 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Wijziging van de Waterwet en enkele andere wetten (nieuwe normering primaire waterkeringen), Memorie van toelichting, vergaderjaar 2015–2016, 34 436, nr. 3.
21 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage I Procedure, datum 1 september 2016.
22 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen, datum 1 september 2016.
23 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid, datum 1 september 2016.

24 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Schematiseringshandleiding hoogte kunstwerk, datum 1 september 2016.
25 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Schematiseringshandleiding betrouwbaarheid sluiting kunstwerk, datum 1 september 2016.
26 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk, datum 1 september 2016.
27 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerk, datum 1 september 2016.
28 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Schematiseringshandleiding grasbekleding, datum 1 september 2016.
29 Minister van Infrastructuur en Milieu (2016). Schematiseringshandleiding asfaltbekleding, datum 1 september 2016.
30 Minister van Infrastructuur en Milieu (2015). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen, Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen, OI2014v3.
31 Ministerie van Infrastructuur en Milieu en Ministerie van Economische Zaken (2014). Ontwerp-rijksstructuurvisie Grevelingen en Volkerak-Zoommeer.
32 Ministerie van Infrastructuur en Milieu en Ministerie van Economische Zaken (2015). Deltaprogramma 2016. Werk aan de delta. En nu begint het pas echt.
33 Ministerie van Economische Zaken (2009). Definitief aanwijzingsbesluit Natura 2000-gebied Oosterschelde. Programmadirectie Natura 2000. PDN/2009-118.
34 Projectbureau Zeeweringen (2010). Ontwerpnota Oesterdam Zuid, referentie: PZDT-R-09388.
35 Projectteam OSK (2014). Herbeschouwing bodembescherming en herijking faalkans Oosterscheldekering, Eindrapportage projectteam.
36 Provincie Zeeland (2016). Ruimte voor verbetering. Herziening Omgevingsplan Zeeland 2012-2018 en eerste wijziging Verordening Ruimte Provincie Zeeland. Kernteam herziening omgevingsplan.
37 Svasek (2010), Impact bodemprognose op detailadviezen Oosterschelde. Definitief rapport, referentie MB/1565/09388/C.
38 Svasek (2014). Herbepaling golftransmissie Oosterscheldekering, Referentie 1755/U14183/D/MB.
39 Rijkswaterstaat (1991). Ontwerpnota Stormvloedkering Oosterschelde, Boek 2: De waterbouwkundige werken.
40 Rijkswaterstaat (1991). Ontwerpnota Stormvloedkering Oosterschelde, Boek 3: De betonwerken.
41 Rijkswaterstaat (2007). Hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR2006).
42 Rijkswaterstaat (2007). Implic berekeningen prestatiepeilen Oosterschelde, Kenmerk ZLMD-07N.17.
43 Rijkswaterstaat (2007). Prestatiepeilen Oosterschelde, Kenmerk VBSSVKO-7334-T-28.
44 Rijkswaterstaat (2008a). Prestatiepeilen Oosterschelde vervolg, Kenmerk PPEILSVKO-T-2.
45 Rijkswaterstaat (2008b). Prestatiepeilen Oosterschelde: nu en in de toekomst.
46 Rijkswaterstaat (2012). As-build tekeningen, Project zeeweringen, Roggenplaat, Situatie nieuw (Noordzeezijde). Tekeningnummer ZLRW-2012-01251.
47 Rijkswaterstaat (2012). As-build tekeningen, Project zeeweringen, Roggenplaat, Situatie nieuw (Oosterscheldezijde). Tekeningnummer ZLRW-2012-01252.
48 Rijkswaterstaat (2014). Herbeschouwing bodembescherming en herijking faalkans Oosterscheldekering, Eindrapportage projectteam.
49 Rijkswaterstaat (2015). Handboek Oosterscheldekering, pagina 65 tot en met 123.
50 Rijkswaterstaat (2016). Reactie van Krijn met kaartje PP en TP (email: 'Prestatiepeilen en kaartje', d.d. 29-02-2016).
51 Rijkswaterstaat (2016). Reactie van Krijn op besprekingsverslag m.b.t. morfologie (e-mail: 'OSK verslag overleg knikpunten', d.d. 29-02-2016).
52 Rijkswaterstaat (2016). Vervalstatistiek aangeleverd door Krijn (stukken via WeTransfer: 29-06-2016).
53 Rijkswaterstaat (2016). Memo Beheerruimte Oosterscheldekering in het WBI.
54 Rijkswaterstaat dienst Zeeland (2013). MIRT Verkenning Zandhonger Oosterschelde. Milieueffectrapportage. Hoofdrapport. Witteveen+Bos en Bureau Waardenburg, rapport RW1809-28/torm/230.
55 Royal Haskoning (2011). Aanvullend detailadvies binnenzijde westelijke strekdam en havenkanaal Zierikzee. Referentie 9V7794.A0/N0001/EARN/ILAN/Rott.

56 Royal Haskoning DHV (2012).Update detailadvies St. Pieterspolder, Nieuw Olzendepolder. Referentie 1587/U12310/C/PvdR.
57 STOWA (2016). Water veiligheid Begrippen begrijpen 2.0.
58 TAW (2003). Leidraad kunstwerken.
59 TNO (1980). Faalkansanalyse van de Oosterschelde stormvloedkering, rapportnummer B-80-62/62.3.2002.
60 Waterschap Scheldestromen (2014). Aanpassing sluitingscriterium Oosterscheldekering.
61 Witteveen+Bos (2016). MIRT onderzoek Integrale veiligheid Oosterschelde, Invloed ZSS op hydraulische belastingen Oosterschelde op basis van Hydra-NL berekeningen.
62 Zanten, E. van & Adriaanse, L. A. (2008). Verminderd getij. Verkenning naar mogelijke maatregelen om het verlies van platen, slikken en schorren in de Oosterschelde te beperken. Hoofdrapport. Rijkswaterstaat dienst Zeeland.
63 Bruggeman, W. et al., 2013. Deltascenario's voor 2050 en 2100 Nadere uitwerking 2012-2013, Brochure Deltares/PBL in opdracht van Ministerie van I&M/Rijkswaterstaat.
64 Van den Hurk B. et al., 2006. Climate change scenarios 2006 for the Netherlands. WR 2006-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands.
65 Van den Hurk B. et al., 2014. KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century - A Netherlands perspective; Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands.
66 DeConto, R.M. & D. Pollard, 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. Nature 531, 591-597, doi:10.1038/nature17145.
67 KNMI, 09 mei 2016: http://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/ijssmelt-antarctica-in-volgende-eeuw-rampzalig.
68 Bruggeman, W. et al.,W 2016. Verkenning actualiteit Deltascenario's. Notitie 26 augustus 2016 Deltares/PBL/KNMI.
69 Waterrecreatie advies, 2016. Prognose ontwikkeling recreatievaart in 2030, 2040 en 2050 rekening houdend met de WLO scenario's.
70 Van Maldegem, Dirk & Dick de Jong, 2004. Opwassen of verdrinken: sedimentaanvoer naar schorren in de Oosterschelde, een zandhongerig gedempt getijdesysteem. RIKZ/AB/2003/826x.
71 Bouwmeester, René, 2015. Het gebruik van intergetijdengebieden in de Oosterschelde door steltlopers. Onderzoeksrapport, HZ University of Applied Science, Delta academy.
72 Rijkswaterstaat (2016). Landelijk beeld verschilanalyse hydraulische belastingen WBI2017.
73 Zie https://www.omgevingswijzer.org/.

Bijlage(n)

I

BIJLAGE: KNIKPUNTEN OSK

Inleiding

In deze bijlage zijn de knikpunten voor de OSK op basis van het WBI2017 ingeschat. Een knikpunt treedt in deze analyse op, als de volgende vraag negatief beantwoord wordt:

Is de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet?

De volgende onderwerpen zijn in deze bijlage opgenomen:

- I.1 Algemene beschrijving aanpak knikpuntenanalyse
- I.2 Hydraulische belastingen die zijn aangehouden in het ontwerp en de hydraulische belastingen die benodigd zijn voor de wettelijke beoordeling (WBI2017)
- Beoordeling van de verschillende toetssporen:
  - I.3 Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEBK)
  - I.4 Piping (STPH)
  - I.5 Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)
  - I.6 Golfklappen op asfaltbekledingen (AGK)
  - I.7 Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)
  - I.8 Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)
  - I.9 Stabiliteit steenzetting (ZST)
  - I.10 Stabiliteit breuksteen (BST)
  - I.11 Hoogte kunstwerk (HTKW)
  - I.12 Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)
  - I.13 Piping kunstwerk (PKW)
  - I.14 Sterkte en stabiliteit kunstwerk (STKWp)
- Overige onderwerpen:
  - I.15 Toelichting rol OSK in afleiding HB voor dijktrajecten Oosterschelde
  - I.16 Sluitfrequentie OSK als gevolg van de ZSS

Kanttekening

Het traject waarbinnen de OSK valt, is afwijkend van de meeste waterkeringentrajecten die in Nederland aanwezig zijn. Daarmee zijn de beschikbare eenvoudige en gedetailleerde toetsen binnen het WBI2017 voor een aantal toetssporen niet toepasbaar voor de OSK en moet een toets op maat worden uitgevoerd.

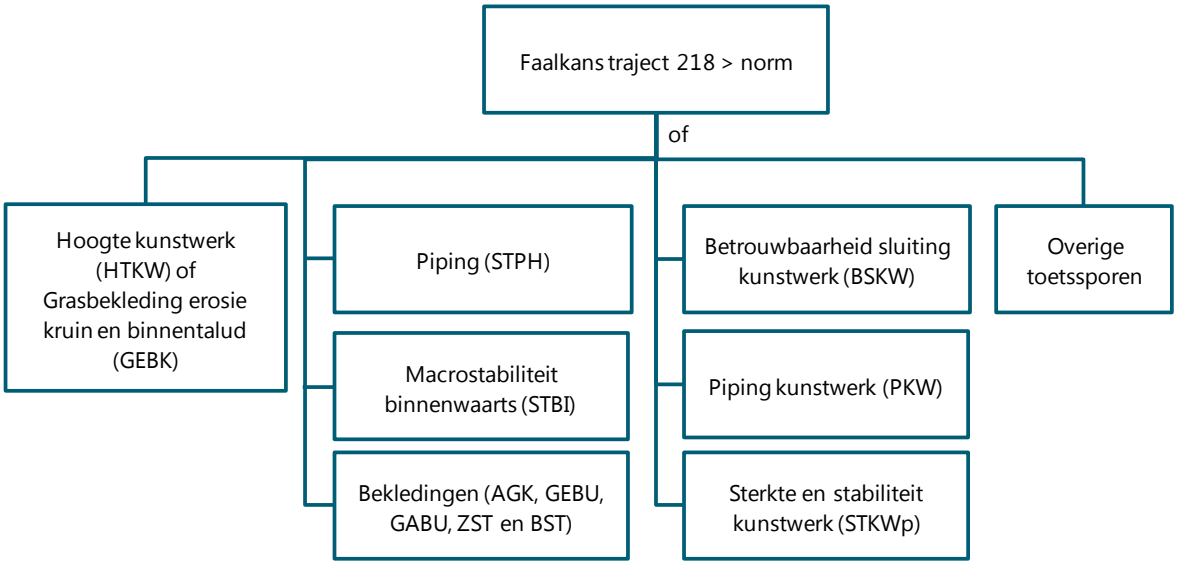
Op dit moment is Rijkswaterstaat, als beheerder van de OSK, de wettelijke veiligheidsbeoordeling aan het voorbereiden om aan zijn zorgplicht te kunnen voldoen. De aanpak en uitwerking van de veiligheidsbeoordeling zijn nog niet gereed. De knikpuntenanalyse voor het project IVO loopt hier in zekere zin op vooruit, maar mag vanzelfsprekend geen belemmering vormen voor (of sturing geven aan) het wettelijke beoordelingsproces.

Het project IVO kijkt op een hoger abstractieniveau en naar een groter gebied (het systeem de Oosterschelde). De analyse voor de OSK binnen het project IVO is gericht op het in beeld brengen wanneer in de tijd de OSK niet meer voldoet aan de nieuwe norm, gegeven de ZSS en morfologische veranderingen. De beschouwing is op hoofdlijnen en gebaseerd op een aantal grove aannamen. De aannamen zijn daarbij beperkt onderbouwd. Deze aanpak past vanzelfsprekend niet bij een wettelijke beoordeling.

I.1 Aanpak

De hoofdvraag 'Is de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet?' is beantwoord voor de relevante toetssporen zoals opgenomen in de volgende foutenboom.

Afbeelding I.1 Top foutenboom knikpuntenanalyse voor gesloten toestand



De beoordeling van de toetssporen is uitgevoerd op het niveau van een vak (doorsnede of kunstwerk). De faalkans conform de norm (1/10.000 per jaar) is daarvoor eerst verdeeld over de verschillende faalmechanismen middels een verdeelsleutel (de faalkansbegroting).

In de analyse is naast de standaard faalkansbegroting [ref. 23] tevens het effect van een aangepaste begroting onderzocht. De belangrijkste reden voor een aangepaste begroting zijn:
- een relatief groot deel van het traject bestaat uit kunstwerken;
- de faalkans van het faalmechanismen piping is klein, omdat (i) de waterkerende grondconstructies veelal opgebouwd zijn met zand op een zandondergrond, (ii) bij de waterkerende eilanden sprake is van een grote kwelweglengte en (iii) aan weerszijden van de kering bodembeschermingen aanwezig zijn die uitspoelen van materiaal voorkomen;
- het toetsspoor voor de stabiliteit van breuksteenbekledingen is niet opgenomen in de standaard faalkansbegroting.

In de knikpuntenanalyse zijn per toetsspoor de volgende stappen doorlopen (Afbeelding I.2):
- (1) Uitvoeren eenvoudige toets: Voor een aantal toetssporen is in het WBI2017 [ref. 23] een eenvoudige toets opgenomen. Als deze niet beschikbaar is, dan is direct verder gegaan naar stap 2. Als een eenvoudige toets wel beschikbaar is, dan is deze doorlopen. Mogelijk volgt hieruit dat de faalkans verwaarloosbaar is. In dat geval is de beoordeling voor dit toetsspoor afgerond, anders is doorgegaan met stap 2;
- (2) Expert judgement: In stap 2 zijn de hydraulische belastingen (HB) vergeleken met de gehanteerde HB in de derde toetsronde en de gehanteerde HB bij het opstellen van het oorspronkelijke ontwerp. Vervolgens is op basis van expert judgement een schatting gegeven van het moment van optreden van het knikpunt.

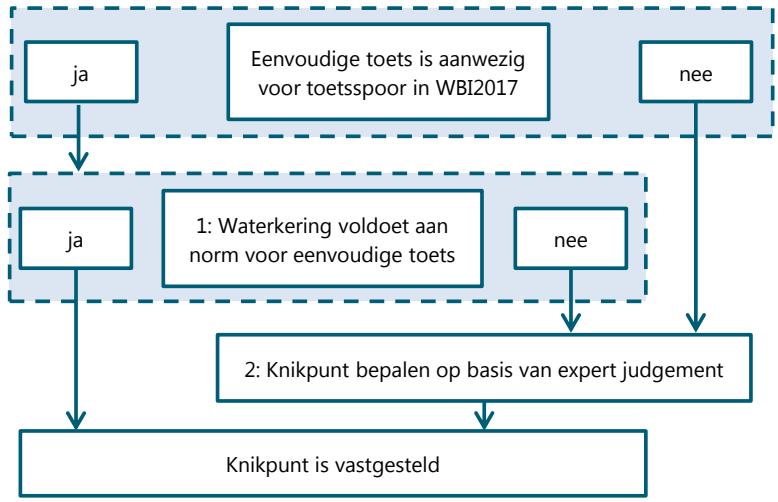
Tabel I.1 Faalkansbegroting voor gesloten toestand

Toetsspoor	**Faalkansruimtefactor (ϖ) standaard**	**Faalkansruimtefactor (ϖ)** aangepast
hoogte kunstwerk (HTKW) of grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEBK)	**0,24**	**0,20**
piping (STPH)	**0,24**	**0,01**
macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	0,04	0,04
golfklappen op asfaltbekledingen (AGK)	0,01	0,01
grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)	0,05	0,05
grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)	0,01	0,01
stabiliteit steenzetting (ZST)	0,03	0,03
stabiliteit breuksteen (BST)	-	**0,04**
betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)	0,04	0,04
piping kunstwerk (PKW)	0,02	0,02
sterkte en stabiliteit kunstwerk (STKWp)	**0,02**	**0,25**
overige toetssporen	0,30	0,30
Totaal	1,00	1,00

Opmerking bij tabel:

- de aangepaste begroting is een voor de OSK geoptimaliseerde verdeling van de toelaatbare faalkansen voor de toetssporen binnen de beschikbare faalkansruimte. De voorgestelde aanpassingen kunnen alleen binnen een toets op maat. De haalbaarheid van de begroting moet nader onderzocht worden in de beoordelingsronde 2017 tot 2023.

Afbeelding I.2 Stroomschema bepalen knikpunten OSK



I.2 Hydraulische belastingen WBI2017

Oorspronkelijk ontwerp

In de volgende tabel zijn de belangrijkste ontwerprandvoorwaarden gegeven waarop het ontwerp oorspronkelijk is beoordeeld. De waarden zijn overgenomen uit het rapport 'Faalkansanalyse civiele delen stormvloedkering Oosterschelde' van Arcadis [ref. 1].

Tabel I.2 Overzicht ontwerprandvoorwaarden per onderdeel [ref. 1]

Object	Waterstand [m+NAP]	Golfhoogte Hs [m]	Golfperiode Tp [s]	Verval Δh [m] vloed/eb
bovenbalken (Hammen en Schaar)	5,5	4,1[3)]	9,5	-
bovenbalken (Roompot)	5,5	5,3[3)]	9,5	-
dorpelbalken	-	-	-	6,2/3,5
pijlers (Hammen en Schaar)	5,3[1)]	-[2)]	-	6,0/-
pijlers (Roompot)	5,5[1)]	-[2)]	-	6,2/-
schuiven verticale belasting (Hammen en Schaar)	5,5	4,25[3)]	9,5	6,2/-
schuiven verticale belasting (Roompot)	5,5	5,75[3)]	9,5	6,2/-
schuiven horizontale belasting	3,5	6,18[3)]	6,1	4,2/-
damaanzet (Schouwen Duiveland, Roggenplaat Noord, Roggenplaat Zuid en Neeltje Jans)	5,3[1)]	3,5[1)]	11,5	6,2/3,4
damaanzet (Noordland en Noord-Beveland)	5,5[1)]	4,0[1)]	11,5	6,2/3,4
breukstenen aanzetdammen	5,5	4,0	-	6,2/-
hoofdwaterkering waterkerende eilanden (Roggenplaat, Westelijke ringdijk)	5,5	3,5	10	-
hoofdwaterkering waterkerende eilanden (Roggenplaat, hoofdwaterkering)	5,45	2,0[4)]	10	-
hoofdwaterkering waterkerende eilanden (Neeltje Jans)	5,45	5,0	-	-
coupure Damvak Geul (voetgangerstunnel)	5,5	4,0	10	-
coupure Buitenhaven Neeltje Jans (verkeersviaduct)	5,45	2,25[5)]	10	-
Roompotsluis (sluisplateau)	5,5	6,8[3)]	10	-
Roompotsluis (sluis)	5,5	6,2[3)]	9,5	6,2/3,55

Opmerkingen bij tabel:

1 voor de damaanzetten, bovenbalken en pijlers is onderscheid gemaakt tussen de geulen Hammen/Schaar en Roompot in verband met de invloed van oriëntatie en geometrie op de randvoorwaarden. Bij het ontwerp van de damaanzetten aan de geulen Hammen en Schaar zijn bij het ontwerp lagere waterstand en golfhoogten aangehouden ten opzichte van de Roompot. Voor de bovenbalken zijn alleen lagere golfhoogten bij gelijke waterstand aangehouden. Voor de overige elementen is geen onderscheid gemaakt tussen de geulen;

2 de horizontale belastingen op de pijlers zijn afhankelijk van golfdrukken en afdracht van de krachten op bovenbalken en schuiven. De totale ontwerpbelasting is bepaald in een probabilistisch model;

3 de hier genoemde golfhoogte is de inkomende golfhoogte (H_i);

4 de golfhoogte bij de hoofdwaterkering op de Roggenplaat is de golfhoogte ter plaatse van de kering, na reducerende werking van de (bezweken) ringdijk en voorland;

5 de golfhoogte bij de coupure Buitenhaven Neeltje Jans (verkeersviaduct) is de golfhoogte ter plaatse van de kering, na reducerende werking van de (bezweken) havendammen [ref. 2].

Hydraulische belastingen WBI2017

Met Hydra-NL versie 1.3.0 (5e concept) en de database HR2006_Zeeuwse Stormvloedkeringen zijn de HB per faalmechanisme berekend met de volgende uitgangspunten:

- gehanteerde faalkans is per toetsspoor verschillend;
- voor de zichtjaren 2050 en 2100 wordt gerekend met het klimaatscenario warm/stoom;
- naast de klimaatveranderingen wordt alleen een onzekerheidstoeslag van 10 % op de golfbelasting toegepast voor de modelonzekerheid in de afleiding van de golven met SWAN. Als de onzekerheidstoeslag is toegepast, dan is dit expliciet in de tekst vermeld.

Onzekerheden

Het WBI kent verschillende soorten onzekerheden. Niet alle onzekerheden zijn reeds verwerkt in Hydra-NL (kader).

Nieuwe onzekerheden in WBI

Naast onzekerheden in de natuurlijke variabiliteit worden in het WBI statistische onzekerheden en modelonzekerheden expliciet meegenomen.

Statistische onzekerheden

Statistische onzekerheden zijn onzekerheden die gerelateerd zijn aan de statistische betrouwbaarheid van de schatting/keuze van de kansverdelingen die de bedreigingen moeten beschrijven, inclusief de verdelingsparameters. Dit type onzekerheid is het gevolg van een beperkt aantal gegevens of metingen. De kansverdeling en bijbehorende parameters van de zeewaterstand te Hoek van Holland is bijvoorbeeld afgeleid op basis van een beperkte set van ongeveer 130 beschikbare jaarmaxima uit de periode 1880-2013. De kansverdelingen die zijn gefit op deze data, worden vervolgens gebruikt voor extrapolatie naar gebeurtenissen met terugkeertijden van 10.000 jaar of meer, wat gepaard gaat met een aanzienlijke onzekerheid. In Hydra-NL zijn de statistische onzekerheden reeds verwerkt in de statistiek.

Modelonzekerheden

Modelonzekerheden betreffen de onzekerheden in modelresultaten die worden gegenereerd door gebruik te maken van wiskundige recepten om bepaalde fysische verschijnselen te modelleren, zoals waterbeweging, golfopwekking en golfvoortplanting. Het betreft concreet de uitkomsten van de productieberekeningen met WAQUA, IMPLIC en PHAROS voor de waterstanden en SWAN en Bretschneider voor de golfcondities. In Hydra-NL worden de modelonzekerheden niet standaard meegenomen.

De volgende toeslagen worden toegepast op de HB die volgen uit Hydra-NL:

- waterstand 0 m (kader)
- golfhoogte 10 %
- golfperiode 10 %

Er is geen toeslag voor de modelonzekerheid voor de afleiding van de waterstand meegenomen. Voor de kustsystemen is immers geen gebruik gemaakt van een hydrodynamisch model om lokale waterstanden te berekenen. De lokale waterstand voor die systemen is bepaald op basis van interpolatie tussen de verschillende meetstations en de daaruit voortvloeiende fout/onzekerheid is relatief klein [ref. 8].

De toeslag van 10 % op de golfcondities volgt uit het ontwerpinstrumentarium [ref. 30]. Dit is een conservatieve aanpak. Het is mogelijk in Hydra-NL om de onzekerheden handmatig in te voeren in de 'test-modus' van het programma. Onder andere voor de herleidbaarheid van de resultaten is in de knikpuntenanalyse ervoor gekozen om de toeslagen achteraf toe te passen.

Waterstanden en golfcondities bij norm

De waterstanden en golfcondities bij de norm (1/10.000 per jaar) zijn gegeven in de volgende tabel voor de zichtjaren 2017, 2050 en 2100.

Tabel I.3 Hydraulische belastingen bij norm (inclusief onzekerheidstoeslag)

locatie	2017			2050			2100		
	ws [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]	ws [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]	ws [m+NAP]	H_s [m]	T_p [s]
5 (N traject 218)	5,3	2,5	10,9	5,6	2,6	12,9	6,1	2,7	13,1
6 (Hammen)	5,3	2,8	8,2	5,6	2,8	11,0	6,1	3,0	11,2
7 (Hammen)	5,4	3,4	7,8	5,6	3,5	10,3	6,1	3,6	10,6
10 (Roggenplaat)	5,4	3,8	9,0	5,6	3,8	11,6	6,1	4,0	12,1
14 (Schaar)	5,4	3,3	6,9	5,6	3,3	10,4	6,1	3,4	10,7
15 (Schaar)	5,4	2,8	9,8	5,6	2,8	8,5	6,1	2,9	8,8
24 (Neeltje Jans)	5,4	2,8	8,6	5,6	2,9	13,5	6,1	3,2	13,5
29 (Roompotsluis)	5,4	3,8	8,7	5,6	3,9	10,6	6,1	4,0	11,0
31 (Roompot)	5,4	3,7	7,4	5,6	3,8	10,8	6,1	3,9	11,1
32 (Roompot)	5,4	3,6	7,9	5,6	3,6	9,0	6,1	3,7	9,4
33 (Z traject 218)	5,4	3,6	8,0	5,6	3,7	9,4	6,1	3,8	9,7

Opmerkingen bij tabel:

- ws: waterstand;
- H_s: significante golfhoogte;
- T_p: piekperiode;
- locatie Roompotsluis betreft een uitvoerlocatie in Hydra-NL aan de Noordzeezijde en buiten de havenhoofden;
- locaties N traject 218 en Z traject 218 betreffen de noord- respectievelijk zuidzijde van het traject.

Zichtjaar 2017

In deze rapportage wordt gesproken over het zichtjaar 2017. De wettelijke beoordelingsronde loopt echter van 2017 tot 2023. Hydra-NL geeft de HB aan het einde van de beoordelingsronde (2023). Voor de leesbaarheid van de analyse is 2017 aangehouden.

Hydraulisch belastingsniveau (HBN)

In Hydra-NL zijn de profielen uit de toetsrapportage van de derde toetsronde ingevoerd om een beeld te krijgen van de mate van overslag die te verwachten is. De resultaten van de berekeningen van het hydraulisch belastingsniveau (HBN) met Hydra-NL zijn gegeven in de volgende tabel.

Tabel I.4 HBN, gegeven frequentie 1/150.000 per jaar en toelaatbaar overslagdebiet van 5 l/s/m (inclusief onzekerheidstoeslag)

Locatie	Profiel	Kruinhoogte [m+NAP]	Dijknormaal [° t.o.v. N]	2017 HBN [m+NAP]	2050 HBN [m+NAP]	2100 HBN [m+NAP]
5 (N traject 218)	7	12,0	270	8,7	9,3	10,1
10 (Roggenplaat)	6	8,0	310	>13,0	>13,5	>14,5
24 (Neeltje Jans)	3	12,0	310	12,4	12,8	13,4
33 (Z traject 218)	7	12,0	310	9,9	10,4	10,9

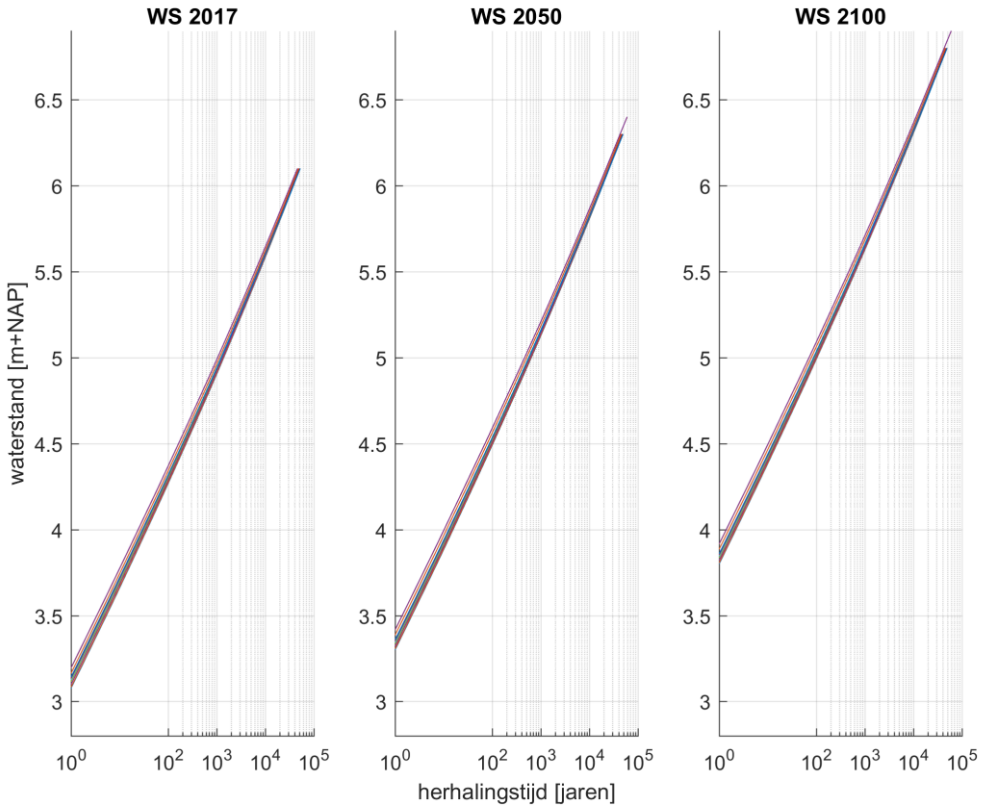
Opmerking bij tabel:

- profiel 6 voor de Roggenplaat betreft een profiel van de ringdijk. De kruin van de waterkering is hoger (circa NAP +12 m);

Frequentielijnen

In de volgende afbeelding zijn de frequentielijnen gegeven voor de waterstand voor de zichtjaren 2017, 2050 en 2100.

Afbeelding I.3 Frequentielijnen voor de waterstand

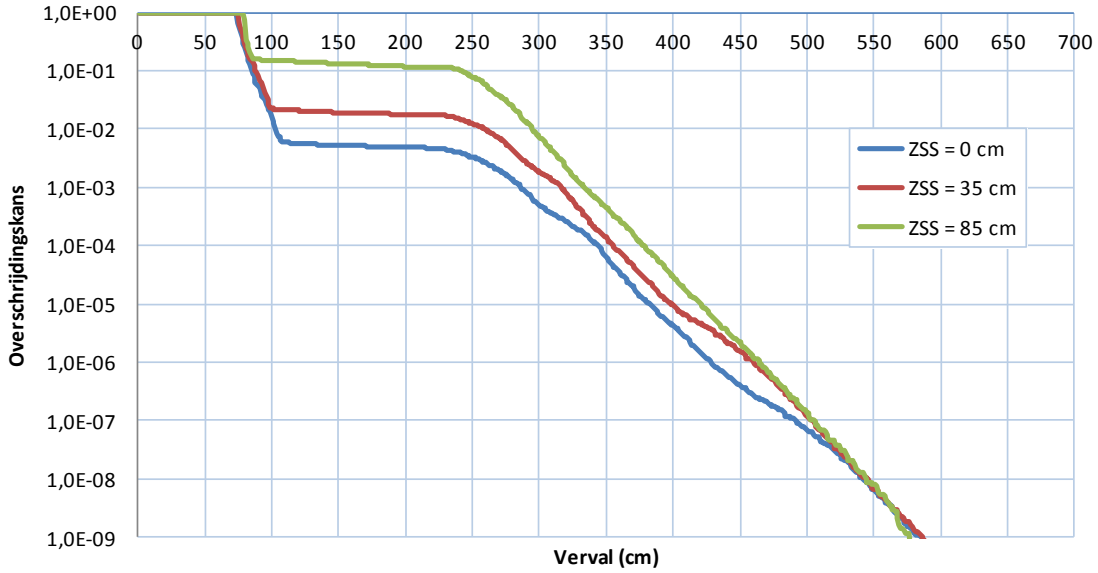


Legenda

Vervalstatistiek

De vervalstatistiek over de OSK in de Roompotgeul bij 1 of meer falende schuiven is in de volgende afbeelding weergegeven voor drie waarden van de ZSS (0 m, 0,35 m en 0,85 m). Uit de grafiek kan afgelezen worden hoe groot de kans per jaar is dat een bepaald verval wordt overschreden.

Afbeelding I.4 Vervalstatistiek OSK (Roompot) bij één of meer falende schuiven en drie niveaus voor ZSS



Met name tussen een verval van 1,0 en 2,5 m neemt de overschrijdingskans toe als gevolg van de ZSS. omdat de OSK vaker dicht moet. Bij een verval van circa 5 m is de zeewaterstand bijna gelijk aan de bovenkant van de bovenbalk en is de binnenwaterstand niet meer in stand te houden (verval neemt af en het effect van de ZSS is dan niet meer zichtbaar).

Morfologische veranderingen

Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta of in de Oosterschelde kunnen op de langere termijn van invloed zijn op (het beheer van) de OSK. In de volgende afbeelding is de kombergingsgrafiek van 2013 van de Oosterschelde gegeven. Bij extreem hoogwater (boven NAP +3 m) neemt de komberging niet meer significant toe.

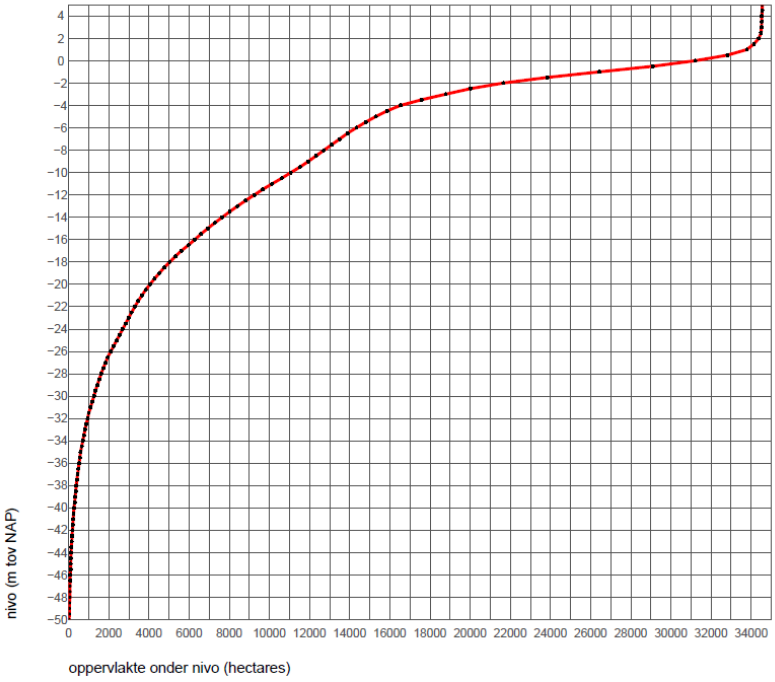
Onder dagelijkse omstandigheden wordt bij hoogwater vaker dan nu het steile deel bereikt met weinig toename van de komberging tot gevolg. Bij laagwater blijft het vlakkere deel met een relatief grote toename van komberging van toepassing. Mogelijk zal de vorm van de kombergingsgrafiek iets veranderen.

Daarnaast zijn er nog lokale ontwikkelingen, zoals bijvoorbeeld in het noorden van de Roompot. Over het aangrenzend platengebied zal door de ZSS in de toekomst een groter debiet gaan lopen en mag dus worden verwacht dat de stroomsnelheid in het noorden van de Roompot relatief meer zal toenemen dan gemiddeld over de hele kering. Er zijn daardoor (op de langetermijn meer) beheermaatregelen nodig om het risico op stabiliteitsverlies van de zijhellingen van de beide ontgrondingskuilen in het noorden van de Roompot en ook van de koppen van de havendammen te voorkomen.

Voordelta

Door de morfologische dynamiek in de Voordelta kunnen de hydraulische belastingen (met name golfcondities) op de OSK toenemen door de erosietrend die zichtbaar is in de richting van de kering. De verwachting is dat het effect van de morfologische veranderingen een ondergeschikte rol heeft op de toename van de hydraulische belastingen ten opzichte van de ZSS voor het optreden van knikpunten voor 2100.

Afbeelding I.5 Wateroppervlakte (ha) op een bepaald niveau, gegeven de bodemopname van 2013 [ref. 51]



I.3 Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEBK)

Eenvoudige toets

In de Bijlage III Sterkte en veiligheid [ref. 23] is een eenvoudige toets opgenomen voor het toetsspoor GEBK. In de opmerkingen bij het spoor is echter aangegeven dat deze toets komt te vervallen in een volgende versie van het document.

Faalkanseis per vak

De lengte-effectfactor is conform Bijlage I van de Schematiseringshandleiding grasbekleding [ref. 28] voor het toetsspoor GEBK gelijk aan 3. Daarmee is de faalkanseis per vak 1/125.000 per jaar indien uitgegaan wordt van de standaard faalkansbegroting en 1/150.000 per jaar indien een aangepaste begroting wordt aangehouden. Vanwege het kleine verschil tussen de HB die gelden bij deze twee faalkansen (orde grootte 1 % op de golfcondities) is in de beoordeling van GEBK de zwaarste norm (1/150.000 per jaar) aangehouden.

Hydraulische belastingen

Het HBN is berekend, gegeven een toelaatbaar overslagdebiet van 5 l/s/m (paragraaf 4.5.4). Het volgende beeld is hieruit af te leiden:

- aan de uiteinden van het traject (locaties 5 en 33) is het HBN ruim onder de aanwezige kruinhoogte voor het zichtjaar 2050 (orde grootte 1.5 m);
- ter plaatse van het eiland Neeltje Jans (locatie 24) is in het zichtjaar 2017 het HBN meer dan 5 l/s/m. Aan de binnenzijde van locatie 24 (profiel 3) is een gras op kleibekleding (0,5 m) dik aanwezig op een talud 1:4. Het hoofdillustratiepunt voor deze locatie heeft de volgende waarden voor het zichtjaar 2017 (inclusief onzekerheidstoeslagen):
  - lokale waterstand NAP +6,1 m
  - significante golfhoogte Hm0 3,2 m
  - spectrale golfperiode Tm-1,0 10,4 s
  - golfrichting t.o.v. Noord 323 graden
- ter plaatse van de Ringdijk aan de zeezijde van het eiland Roggenplaat is het volgende hoofdillustratiepunt voor het zichtjaar 2050 gevonden (inclusief onzekerheidstoeslagen):
  - lokale waterstand NAP +6,4 m
  - significante golfhoogte Hm0 3,7 m
  - spectrale golfperiode Tm-1,0 9,6 s

- golfrichting t.o.v. Noord 294 graden

Knikpunten
In de derde toetsronde scoorde waterkerende grondconstructies voldoende tot goed voor het toetsspoor Hoogte (kader). In de meeste gevallen was het overslagdebiet kleiner dan 0,1 l/s/m.

Toetsoordeel derde toetsronde [ref. 2]
In de toetsing van de derde toetsronde scoorde de damlichamen van de damaanzetten goed op het toetsspoor Hoogte vanwege het beperkte overslagdebiet van 0,1 l/s/m. Ook de coupures en grondlichamen op de waterkerende eilanden scoren om dezelfde reden als de damaanzetten goed met uitzondering van de waterkering van de Roggenplaat. Deze scoorde voldoende, omdat pas na een geavanceerde beoordeling op basis van afslagberekeningen tot het oordeel gekomen kon worden.

Uiteinden traject
De verwachting is dat voor de uiteinden van het traject (noord- en zuidzijde) het knikpunt ruim na 2050 ligt voor het toetsspoor GEBK. De damaanzetten liggen hier relatief beschut.

Eiland Neeltje Jans
In de derde toetsronde zijn de volgende onderdelen beoordeeld voor het eiland Neeltje Jans:
- damvak Geul (aanleghoogte NAP +12,0 m);
- coupure Damvak Geul (aanleghoogte NAP +8,0 m);
- coupure Buitenhaven (aanleghoogte NAP +9,0 m).

Het Damvak Geul en de coupure Damvak Geul scoorden in de derde toetsronde goed in verband met de aanwezige duinen voor de waterkering (kader en Afbeelding I.6). De verwachting is dat het knikpunt voor het Damvak Geul na 2100 ligt.

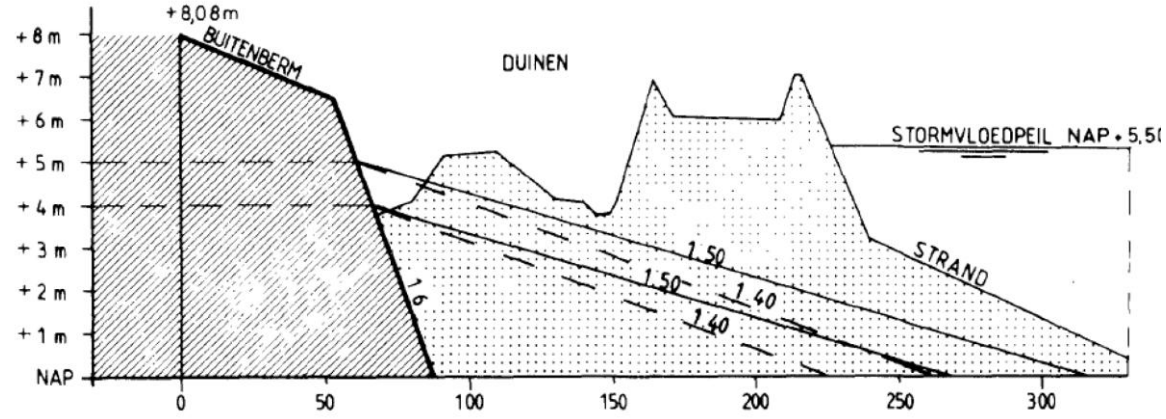
Voor de coupure Damvak Geul treedt het knikpunt eerder op. In Hydra-NL is het mogelijk om te rekenen met voorlanden. Als een voorland in rekening wordt gebracht met een hoogte van NAP +4 m en helling 1:50, is het overslagdebiet > 10 l/s/m. Een voorland met een hoogte van NAP +5 m en helling 1:50 geeft een overslagdebiet van circa 5 l/s/m.

De verwachting is dat het overslagdebiet groter is dan 5 l/s/m voor het zichtjaar 2050. Op basis van de geometrie van de coupure en het voorland is schade aan de binnenzijde te verwachten, maar lijkt de kans op doorgaande erosie met het volledig bezwijken van de coupure tot gevolg klein of zijn de versterkingsmaatregelen lokaal uit te voeren zonder invloed op de uitkomst van het project IVO. Daarom is het knikpunt na 2050 geschat.

Beoordeling hoogte in derde toetsronde Damvak Geul en coupure Damvak Geul
In de derde toetsronde zijn afslagberekeningen uitgevoerd. Op basis van deze berekeningen is de volgende conclusie opgenomen: ‘Op basis van de nieuwe duinafslagberekening is bepaald dat er geen sprake is van enige golfaanval op de dijk.’

Nieuwe afslagberekeningen zijn noodzakelijk, om het moment van optreden van de knikpunten nauwkeurig te kunnen bepalen. Deze berekeningen zijn niet uitgevoerd binnen het project IVO. Binnen het project is op basis van expert judgement een schatting gemaakt.

Afbeelding I.6 Evenwichtsprofiel ten tijde van het ontwerp

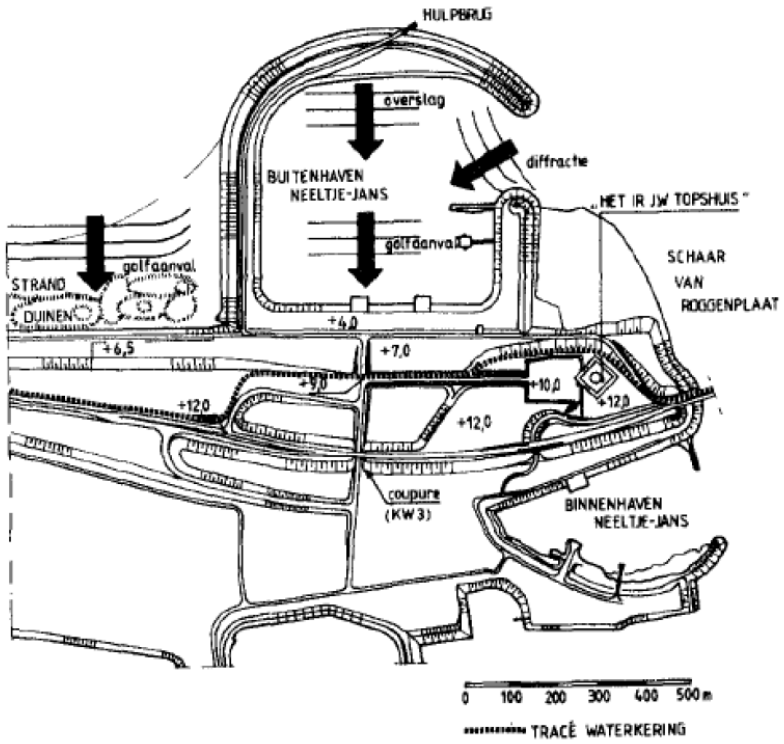


De coupure Buitenhaven betreft een verkeersviaduct en heeft een kerende hoogte van NAP +9 m. De coupure wordt beschermd door de havendammen van de Buitenhaven (Afbeelding I.7). De waterstand en de golfbelasting zijn bij de faalkanseis per vak (1/150.000 per jaar) toegenomen ten opzichte van het ontwerp (waterstand NAP +5,45 m, golfhoogte H_s 2,25 m en golfperiode T_p 10 s). Om het knikpunt goed te bepalen zijn de volgende stappen noodzakelijk:

- berekenen restprofiel havendammen;
- berekenen golfbelasting voor de teen van het voorland voor de coupure door golfindringing door de havenmonding en golfvoortplanting over het restprofiel van de havendammen;
- berekenen afslagprofiel voorland primaire waterkering;
- beoordelen mate van overslag over primaire waterkering.

Deze berekeningen zijn niet uitgevoerd ten behoeve van de knikpuntenanalyse. Gezien de geometrie van het voorland (plateau van circa 100 m breed op NAP +7 m tot hoogte lijn NAP +9 m en circa 250 m tot viaduct) en de beperkte toename van de HB is het knikpunt na 2050 ingeschat.

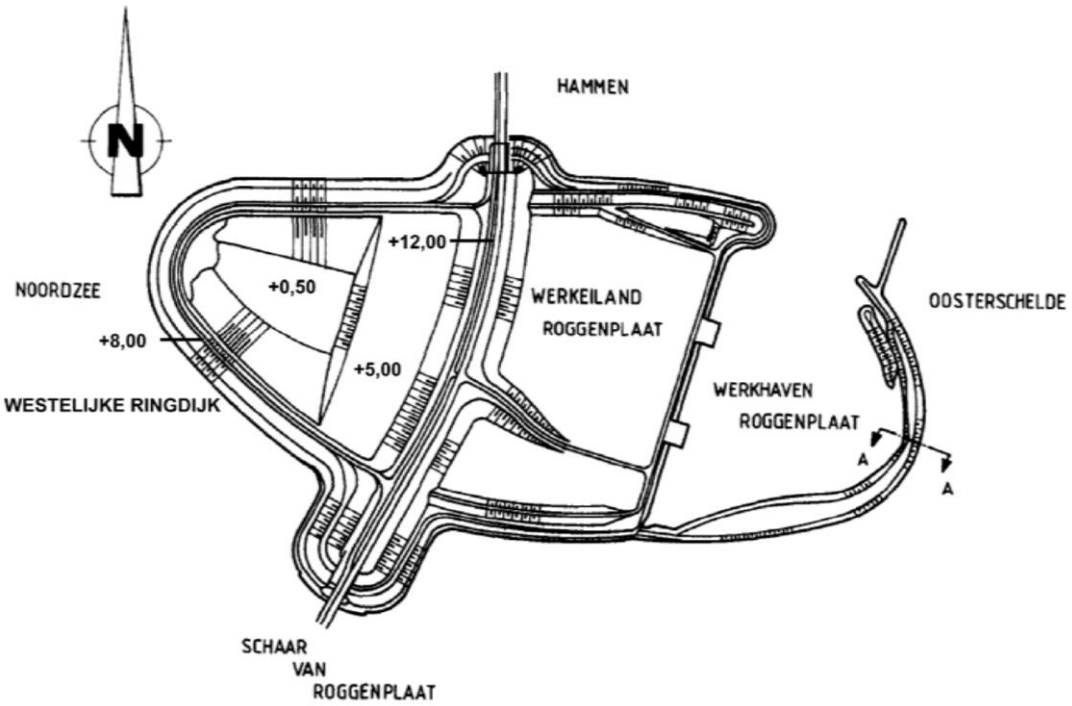
Afbeelding I.7 Golfreducerende werking van havendammen ter plekke van coupure Buitenhaven



Roggenplaat

De Ringdijk rondom de Roggenplaat heeft een kruinhoogte van NAP +8 m (Afbeelding I.8). In de derde toetsronde is uitgegaan van een bezweken Ringdijk. Na de derde toetsronde is deze samen met de hoofdwaterkering versterkt (paragraaf 2.4.1). Op basis van de toetsresultaten in de derde toetsronde en de reeds uitgevoerde versterking van de Ringdijk en hoofdwaterkering is de verwachting dat het knikpunt na 2100 optreedt.

Afbeelding I.8 Eiland Roggenplaat [ref. 2]



I.4 Piping (STPH)

Eenvoudige toets

In het WBI is voor STPH een eenvoudige toets opgenomen. Als de waterkerende grondconstructies zanddijken zijn op een zandondergrond, dan hoeven deze niet meer nader te worden beschouwd. Conform de toetsrapportage uit de derde toetsronden is dit het geval voor de waterkerende eilanden (kader). Door de aanwezigheid van de bodembeschermingen ter plaatse van de damaanzetten is piping ook voor de damaanzetten geen relevant faalmechanisme conform de toetsrapportage. Het faalmechanisme is daarom niet verder beschouwd in de knikpuntenanalyse.

Toetsoordeel derde toetsronde [ref. 2]

Damaanzetten
Gezien de opbouw van de constructie en de aanwezigheid van de bodembescherming tot ca. 650 m uit de as van de kering is het niet aannemelijk dat piping en heave op zullen treden ter plaatse van de breukstenen dammen. De breukstenen dammen zijn waterdoorlatende constructies. Bij een gesloten kering kan het water via deze weg zonder problemen door de kering verplaatsen.

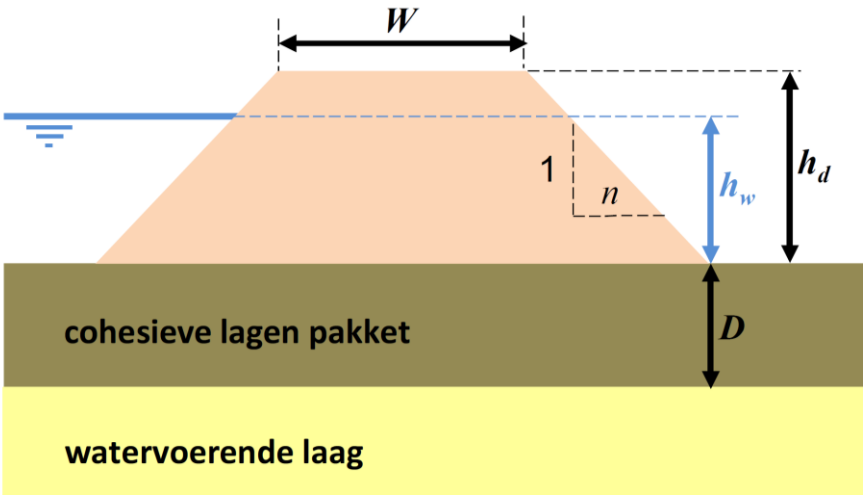
De damlichamen zijn opgebouwd uit een zandlichaam op een bodembescherming van steenasfaltmatten. De steenasfaltmatten zijn waterdoorlatend. Conform paragraaf 4.2.2 van Katern 5 wordt het damlichaam geclassificeerd als type 2B en is piping niet relevant. Het oordeel voor dit toetsspoor op basis van Stap 1 Eenvoudige toetsing luidt voor alle 6 breukstenen dammen en damlichamen: goed.

Waterkerende eilanden
De vaste waterkering is opgebouwd uit een zandlichaam op goed doorlatende ondergrond. Conform paragraaf 4.2.2 wordt het damlichaam geclassificeerd als type 2B en is piping niet relevant. Het oordeel voor dit toetsspoor op basis van Stap 1 Eenvoudige toetsing luidt voor alle 4 de maatgevende doorsneden: goed.

I.5 Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)

Eenvoudige toets
In het WBI is voor STBI een eenvoudige toets opgenomen. In de toets wordt nagegaan of op basis van het profiel van de kering kan worden gesteld of voldoende restprofiel overblijft na het optreden van een afschuiving. Daarbij wordt het profiel sterk geschematiseerd (Afbeelding I.9).

Afbeelding I.9 Overzicht geometrische kenmerken voor eenvoudige toets STBI [ref. 23]



Waarin:

h_w	buitenwaterstand bij norm
W	kruinbreedte
h_d	hoogteverschil tussen de kruinhoogte van de dijk en het maaiveld bij de binnenteen van de dijk
D	Dikte cohesieve lagenpakket
1:n	binnentaludhelling

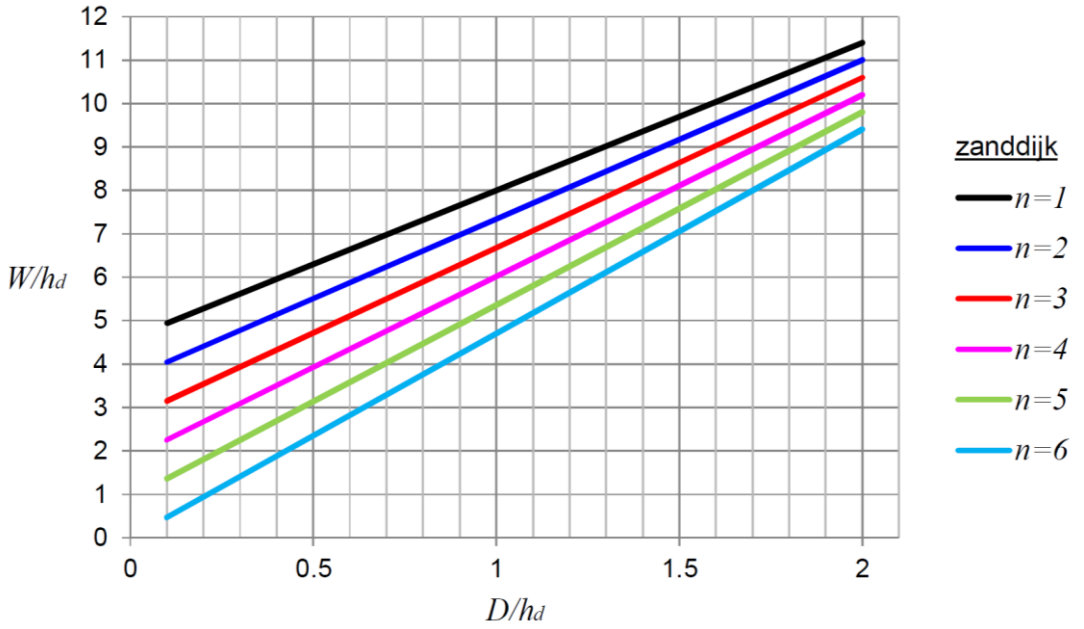
In de volgende tabel zijn op basis van de toetsrapportage van de derde toetsronde [ref. 2] de waarden voor W en h_d opgenomen. Gegeven de minimale verhouding W/h_d van 5,3 mag bij een taludhelling van 1:4 de dikte van het cohesieve lagenpakket (D) meer dan 6 m zijn op basis van de contourplot (Afbeelding I.10)

zoals opgenomen in Bijlage III sterkte en stabiliteit [ref. 23]. Het betreft een zanddijk op een zandondergrond. Daarmee is in de knikpuntenanalyse aangenomen dat het knikpunt na 2100 optreedt voor het toetsspoor STBI.

Tabel I.5 Geometrische kenmerken waterkerende grondconstructies

waterkering	W [m]	h_d [m]	1:n [-]
Damvak Geul	39,5	7,5	4
Waterkering Roggenplaat	50,5	7,5	4

Afbeelding I.10 Contourplot met veilige afmetingen zanddijk [ref. 23]



I.6 Golfklappen op asfaltbekledingen (AGK)

Eenvoudige toets

Voor het toetsspoor AGK is een eenvoudige toets aanwezig. De asfaltbekledingen op OSK kunnen niet beoordeeld worden op basis van de eenvoudige toets. Ook kunnen een aantal bekledingen (zoals de asfaltbekledingen op de Ringdijk) niet beoordeeld worden middels de gedetailleerde toets, omdat de golfcondities zwaarder zijn dan toegestaan conform de toepassingseisen voor de gedetailleerde toets (eis: H_{m0} < 3 m). Voor deze bekledingen moet een toets op maat worden uitgevoerd.

Knikpunten

In de knikpuntenanalyse is het toetsspoor AGK niet verder meegenomen, omdat:

- een deel van de bekledingen wordt beschermd door de aanwezigheid van de duinen (zoals Damvak Geul). Voor deze bekledingen is de golfbelasting onder maatgevende omstandigheden beperkt en zal het knikpunt na 2100 liggen;
- een deel van de bekledingen (Ringdijk van de Roggenplaat) net vervangen is en aangenomen mag worden dat deze robuust is uitgevoerd;
- het afkeuren van een bekleding op het OSK voor het project IVO niet leidt tot significante maatregelen voor het veiligheidssysteem van de Oosterschelde. Bij een afgekeurde bekleding ligt het versterken van de bekleding voor de hand. Het afkeuren van een bekleding op het traject leidt bijvoorbeeld niet tot een andere sluitingstrategie of het versterken van de dijken langs de Oosterschelde.

I.7 Grasbekleding erosie buitentalud (GEBU)

Eenvoudige toets
Voor het toetsspoor GEBU is een eenvoudige toets aanwezig. De grasbekledingen op de OSK kunnen echter niet beoordeeld worden op basis van de eenvoudige toets in verband met de grote van de golfbelasting.

Knikpunten
In de toetsing van de derde toetsronde is de damaanzet Schouwen-Duivenland nader beoordeeld. De overige damaanzetten werden vergelijkbaar geacht. De damaanzet Schouwen-Duivenland heeft de volgende taludbekleding aan de Noordzeezijde:

- tot NAP -2 m breuksteen 60-300 kg
- vanaf NAP -2 m breuksteen 300-1000 kg
- vanaf NAP 0 m gepenetreerde breuksteen, dik 0,35m
- vanaf NAP +6 m asfaltbeton, dik 0,20 m
- vanaf NAP +11 m kleibekleding met gras
- kruin op circa NAP +12 m

Vanwege de beperkte hoeveelheid grasbekleding op het buitentalud van de OSK (alleen boven NAP +11 m) is in de knikpuntenanalyse de grasbekledingen niet verder beschouwd. Net als bij het toetsspoor voor asfalt leidt een knikpunt in de recente toekomst niet tot een aangepaste veiligheidsstrategie voor het veiligheidssysteem van de Oosterschelde. Na afkeuren ligt het voor de hand om de grasbekleding te versterken.

I.8 Grasbekleding afschuiven buitentalud (GABU)

Het toetsspoor is niet nader beschouwd (zie tevens GEBU).

I.9 Stabiliteit steenzetting (ZST)

Eenvoudige toets
Voor het toetsspoor ZST is geen eenvoudige toets aanwezig.

Knikpunten
Op het traject komt slechts beperkt zetsteen voor. Op de Ringdijk van de Roggenplaat was relatief veel zetsteen (Haringmanblokken) aanwezig. Deze zijn reeds overlaagd tijdens de laatste versterking.

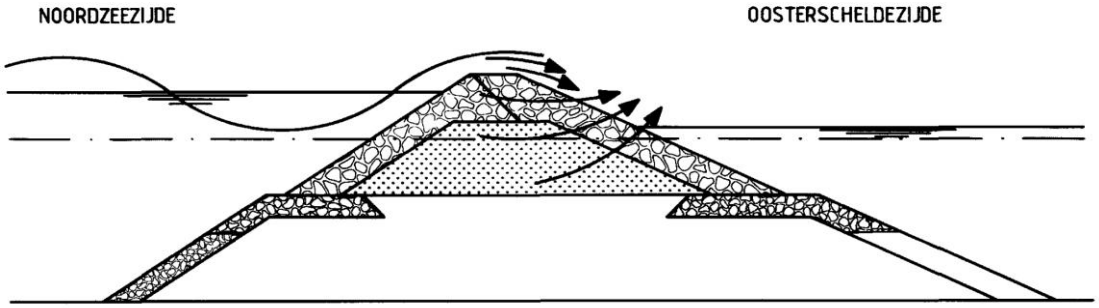
Vanwege de beperkte hoeveelheid zetsteenbekleding op het buitentalud van de OSK is in de knikpuntenanalyse het toetsspoor ZST niet verder beschouwd. Net als bij het toetsspoor voor asfalt leidt een knikpunt in de recente toekomst niet tot een aangepaste veiligheidsstrategie voor het veiligheidssysteem van de Oosterschelde. Het ligt dan voor de hand om de bekleding te versterken.

I.10 Stabiliteit breuksteen (BST)

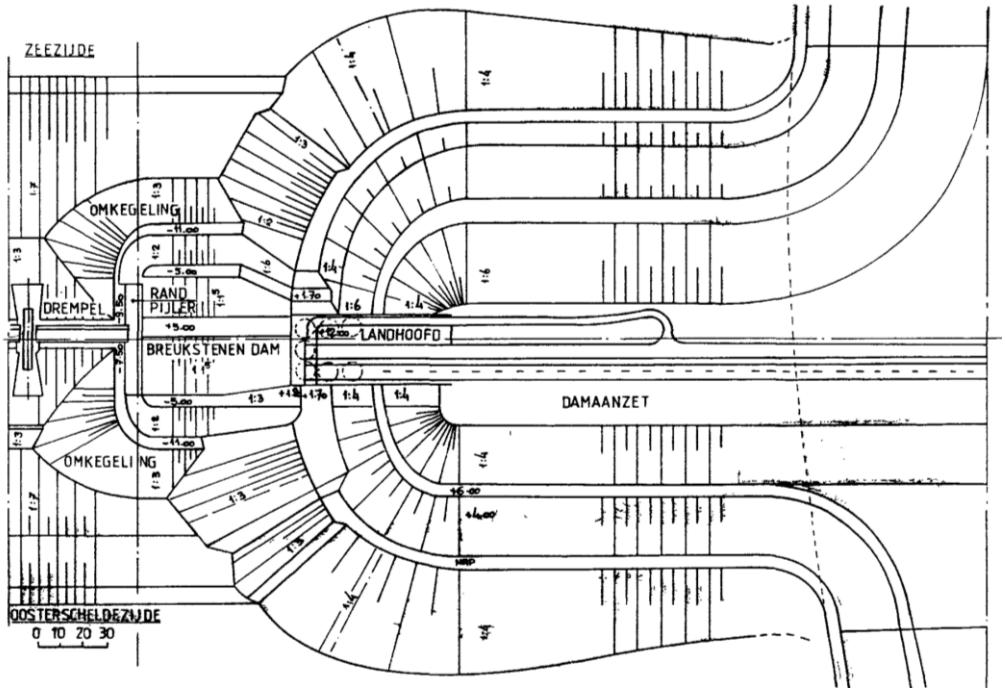
Eenvoudige toets
Voor breuksteen bekledingen zijn geen specifieke toetsregels voorgeschreven in het WBI2017.

Op de OSK komen op verschillende locaties breuksteen bekledingen voor. Alleen de breukstenen aanzetdammen zijn beschouwd in de knikpuntenanalyse (Afbeelding I.11, Afbeelding I.12 en Tabel I.6).

Afbeelding I.11 Principedoorsnede breukstenen aanzetdam [ref. 39]



Afbeelding I.12 Bovenaanzicht damaanzet [ref. 39]



Tabel I.6 Gegevens breukstenen damaanzetten zeezijde [ref. 39]

Dam	Locatie in Hydra-NL	Kruinhoogte [m+NAP]	Taludhelling zeezijde [1:x]	Gradering zeezijde (boven NAP -6 m) [ton]
Schouwen-Duiveland	6 (Hammen)	7,0	1,5	6-10
Roggenplaat Noord	7 (Hammen)	6,8	1,5	6-10
Roggenplaat Zuid	14 (Schaar)	6,8	1,5	6-10
Neeltje Jans	15 (Schaar)	6,8	1,5	6-10
Noordland	31 (Roompot)	7,0	1,5	6-10
Noord-Beveland	32 (Roompot)	7,4	1,5	10-15

Faalkanseis per vak

De lengte-effectfactor is voor BST niet gegeven in het WBI2017. Conform Bijlage III Sterkte en veiligheid [ref. 23] is de factor voor ZST gelijk aan 4. Als deze factor ook aangehouden wordt voor het toetsspoor BST, dan is de faalkanseis per vak 1/1.000.000.

Hydraulische belastingen

In faalkansanalyse door Arcadis is een faalkans voor de breukstenen damaanzetten kleiner dan 10^{-6} per jaar aangenomen doordat de toetsrandvoorwaarden (HR2006) lager zijn dan de ontwerprandvoorwaarden: waterstand = NAP +5,5 m en golfhoogte Hs = 4 m conform Tabel I.2. In de volgende tabel zijn de golfhoogtes voor de zichtjaren 2050 en 2100 gegeven bij de norm die volgen uit in Hydra-NL (waterstand en bekleding onafhankelijk).

Tabel I.7 Golfhoogte Hm0 [m] voor de zichtjaren 2050 en 2100 en herhalingstijd 10.000 (inclusief onzekerheidstoeslag)

Locatie	2050	2100
6 (Hammen)	2,8	3,0
7 (Hammen)	3,5	3,6
14 (Schaar)	3,3	3,4
15 (Schaar)	2,8	2,9
31 (Roompot)	3,8	3,9
32 (Roompot)	3,6	3,7

Doorgaans worden bekledingen conform het WBI2017 semi-probabilistisch beoordeeld bij de norm op basis van veiligheidsfactoren. Voor zetsteen is de veiligheidsfactor bijvoorbeeld 1,2. Een dergelijke factor is voor breuksteen niet gegeven in het WBI.

Om de breukstenen aanzetdammen betrouwbaar te kunnen beoordelen, is een volledige probabilistische analyse aan te bevelen. Ten behoeve van de knikpunten is deze analyse niet uitgevoerd. Hier is enkel gekeken naar de oorspronkelijke ontwerpfilosofie. Tijdens het ontwerp zijn schaaltesten uitgevoerd en die zijn vergeleken met de formule van Hudson. Op basis van de schaaltesten werd een stabiliteitsfactor afgeleid[1] en werd een veiligheidscoëfficiënt van 1,3 m op de ontwerpgolfhoogte aangehouden (bezwijkgolfhoogte Hs is 5,2 m en de ontwerpgolfhoogte Hs = 4 m) [ref. 39].

Om de volgende reden is aangenomen dat het knikpunt na 2100 ligt:

- de golfcondities bij norm zijn kleiner dan de ontwerpgolfhoogte (H_s = 4 m) en bezwijkgolfhoogte (H_s = 5,2 m);
- in de stabiliteitsformule is gerekend met ‘intermediate damage’ in plaats van bezwijken. Samen met de toegepaste veiligheidscoëfficiënt van 1,3 m op de golfcondities in het ontwerp, lijkt er voldoende veiligheid in het ontwerp te zijn meegenomen.

[1] De K_D-waarde in de Hudson-formule met een waarde van 5,1 ref. 39]. In de faalkansanalyse heeft Arcadis de uitkomsten van de formule van Hudson vergeleken met de meer recent ontwikkelde formule van Van der Meer. Met deze laatste formule werd een schadefactor (S_d-waarde) van 5 gevonden [ref. 1]. Dit komt overeen met intermediate damage.

I.11 Hoogte kunstwerk (HTKW)

Eenvoudige toets

De eenvoudige toets voor het toetsspoor bestaat uit het beantwoorden van de vraag of het mechanisme relevant is voor het kunstwerk. Zowel voor de Roompotsluis als de beweegbare kering is dit het geval.

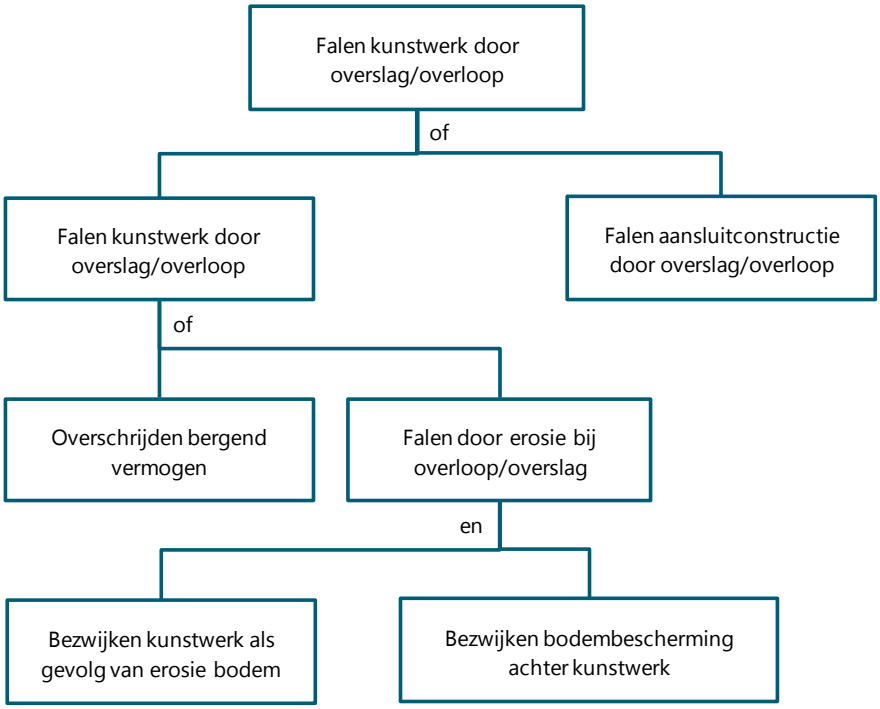
Faalkanseis per vak

De lengte-effectfactor is conform Bijlage III Sterkte en veiligheid [ref. 23] voor het toetsspoor HTKW gelijk aan het toetsspoor GEBK en daarmee voor de OSK gelijk aan 3. Daarmee is de faalkanseis per vak 1/125.000 per jaar indien uitgegaan wordt van de standaard faalkansbegroting en 1/150.000 per jaar indien een aangepaste begroting wordt aangehouden. Net als bij GEBK is in de beoordeling alleen de zwaarste norm (1/150.000 per jaar) aangehouden.

Foutenboom

De foutenboom in de volgende afbeelding is overgenomen uit de Schematiseringshandleiding hoogte kunstwerk [ref. 24]. Op basis van deze boom is het toetsspoor voor de knikpuntenanalyse doorgelopen voor de beweegbare kering en de Roompotsluis.

Afbeelding I.13 Foutenboom toetsspoor hoogte kunstwerk [ref. 24]



Falen kunstwerk door overslag/overloop

Beweegbare kering

De waterstand bij een herhalingstijd van 150.000 jaar is circa NAP +6,2 m voor het zichtjaar 2017. In een dergelijke situatie is er sprake van overloop over de bovenbalken. Voor de beantwoording van de vraag: *Is*

de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet? is het niet relevant of in dit toetsspoor het bergend vermogen wordt overschreden[1].

De waterbelasting door overloop en overslag aan de binnenzijde op de bodembescherming dient wel beschouwd te worden. Deze belasting is echter kleiner dan de stromingsbelasting bij het niet sluiten van een schuif. Het knikpunt voor dit deelmechanisme wordt daarom na 2050 geschat. De stabiliteit van de bovenbalk in een overloopsituatie is beschouwd bij het toetsspoor STKWp.

Roompotsluis

Vergelijkbaar met de beweegbare kering is alleen gekeken naar het deelmechanisme falen door erosie. De verwachting is dat de bodembescherming aan de binnenzijde van het binnenhoofd en de kolk voldoende weerstand kan bieden tegen de belasting door overloop. Het sluisplateau is hier gezien als aansluitconstructie.

Falen aansluitconstructie door overslag/overloop

Beweegbare kering

Dit faalmechanisme is met name van belang bij de breukstenen damaanzetten. De kruinhoogtes en graderingen van de toplaag (boven NAP -6,0 m) zijn gegeven in de volgende tabel.

Tabel I.8 Gegevens breukstenen damaanzetten Oosterscheldezijde [ref. 39]

Dam	Locatie in Hydra-NL	Kruinhoogte [m+NAP]	Taludhelling Oosterscheldezijde [1:x]	Gradering Oosterscheldezijde (boven NAP -6 m) [ton]
Schouwen-Duiveland	6 (Hammen)	7,0	2,2	10-15
Roggenplaat Noord	7 (Hammen)	6,8	2,0	6-10
Roggenplaat Zuid	14 (Schaar)	6,8	2,0	6-10
Neeltje Jans	15 (Schaar)	6,8	2,0	6-10
Noordland	31 (Roompot)	7,0	2,0	6-10
Noord-Beveland	32 (Roompot)	7,4	2,2	10-15

In de toetsrapportage is de volgende ontwerpformule opgenomen die verkregen is tijdens het modelonderzoek tijdens de bouw van de kering:

- $H - h_{kr} = 1{,}4 \cdot \Delta D$ (bij taludhelling 1:2,2)
- $H - h_{kr} = 1{,}3 \cdot \Delta D$ (bij taludhelling 1:2)

Waarin:

H Noordzeewaterstand + $0{,}5H_s$ [m+NAP]
h_{kr} kruinhoogte [m+NAP]
ΔD sterkteparameter voor de toegepaste steensortering [m]
= circa 2,6 m voor gradering 10-15 ton
= circa 2,3 m voor gradering 6-10 ton

De waterstand en golfcondities (ongecorreleerd) met een herhalingstijd van 150.000 jaar zijn gegeven in de volgende tabel.

[1] Dit is wel relevant voor de vraag: *Wordt voldaan aan de afspraken die zijn gemaakt over de prestatiepeilen in het achterland, die zijn gehanteerd bij het afleiden van de hydraulische belasting?* Voor de beantwoording van deze vraag wordt verwezen naar paragraaf 3.2.

Tabel I.9 Waterstand en golfcondities met een frequentie van 1/150.000 per jaar (inclusief onzekerheidstoeslag)

locatie	2017		2050		2100	
	ws [m+NAP]	H_{m0} [m]	ws [m+NAP]	H_{m0} [m]	ws [m+NAP]	H_{m0} [m]
6 (Hammen)	6,2	3,1	6,4	3,2	6,9	3,3
7 (Hammen)	6,2	3,8	6,4	3,9	6,9	4,0
14 (Schaar)	6,2	3,7	6,4	3,8	6,9	3,9
15 (Schaar)	6,2	3,1	6,4	3,2	6,9	3,2
31 (Roompot)	6,2	4,2	6,4	4,3	6,9	4,4
32 (Roompot)	6,2	4,0	6,4	4,1	6,9	4,2

Opmerkingen bij tabel:

- ws: lokale waterstand;
- H_{m0}: significante golfhoogte;

De maatgevende condities worden gevonden bij locatie 31 (Roompot). Voor het zichtjaar 2100 (ws = NAP +6,9 m en H_{m0} = 4,4 m) is de benodigde ΔD 1,6 m. Dit is kleiner dan aanwezig (2,3 m).

Om de volgende redenen is het moment van optreden van het knikpunt aangenomen na 2100:

- er is een redelijk grote marge tussen de benodigde ΔD en aanwezige ΔD voor alle beschouwde zichtjaren;
- in de Deelnota 8: Breukstenen dammen van de Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde, boek 2 [ref. 39] is aangegeven dat er een veiligheidscoëfficiënt aanwezig is tussen de ontwerpgolfhoogte en de bezwijkgolfhoogte. De waarde van de veiligheidscoëfficiënt is niet benoemd, maar mogelijk is deze gelijk aan de waarde voor de zeezijde (zie BST). In dat geval is de bezwijkgolfhoogte H_s = 5,2 m.

Roompotsluis

Het sluisplateau van de Roompotsluis heeft een kerende hoogte van NAP +5,8 m en is conform de toetsrapportage uit de derde toetsronde bekleed met basalton betonzuilen van 0,18 m hoog, op een 0,3 m dik zanddichte filterlaag van grind 0/32 mm [ref. 1]. De bekleding loopt door tot circa 3 m boven het sluisplateau op de taluds van de landhoofden van de brug.

De zetsteenbekleding wordt belast door overslaande golven tijdens stormcondities. Voor de bekleding is volgens het rapport van Arcadis [ref. 2] het toelaatbare ontwerpoverslagdebiet 1.100 l/s/m. Aan deze eis werd in de derde toetsronde nog net voldaan met de volgende hydraulische randvoorwaarden (HR2006):

- toetspeil: NAP +5,18 m;
- golfhoogte Hs: 2,4 m;
- golfperiode Tp: 8,7 s.

Bij een faalkanseis van 1/150.000 per jaar is de waterstand voor het zichtjaar echter NAP +6,2 m. Daarmee is er niet alleen sprake van een overslagsituatie, maar treedt er tevens overloop op (kruinhoogte NAP +5,8 m). Het overslagdebiet is daarmee aanzienlijk groter dan 1100 l/s/m. De verwachting is daarom dat het knikpunt voor 2050 optreedt.

I.12 Betrouwbaarheid sluiting kunstwerk (BSKW)

Eenvoudige toets

Voor het toetsspoor BSKW is een eenvoudige toets beschikbaar. De eenvoudige toets kan niet worden toegepast op de beweegbare kering. Voor de beweegbare kering is daarom verder gegaan naar stap (2).

Conform de eenvoudige toets is het faalmechanisme niet relevant voor de Roompotsluis (kader). De Roompotsluis is daarom verder niet meer beschouwd.

Beslisregel schutsluis eenvoudige toets [ref. 23]

De faalkans voor betrouwbaarheid sluiting van een schutsluis is verwaarloosbaar klein indien de fysiek kerende hoogte van de hoogwaterkerende keermiddelen in binnen- en buitenhoofd, en van de kolk aan elkaar gelijk zijn. Aanvullend geldt dat de schutsluis altijd een van de (sets) schutdeuren gesloten is.
Nooit mogen alle schutdeuren open staan om:

- scheepvaart vrije doorvaart te geven als er geen verval is;
- water in dan wel uit de polder te laten.

De Roompotsluis voldoet aan deze beslisregel.

Faalkanseis per vak

De lengte-effectfactor is conform Bijlage III Sterkte en veiligheid [ref. 23] voor het toetsspoor BSKW gelijk aan:

$$N = max(1; c \cdot n_{2a})$$

Waarin:

c: reductiefactor om tot uitdrukking te brengen dat de faalkansen van kunstwerken niet allemaal precies even groot zijn (= 0,5);

n2a aantal kunstwerken in het dijktraject waarvan de faalkans niet verwaarloosbaar klein is volgens de eenvoudige toets [-].

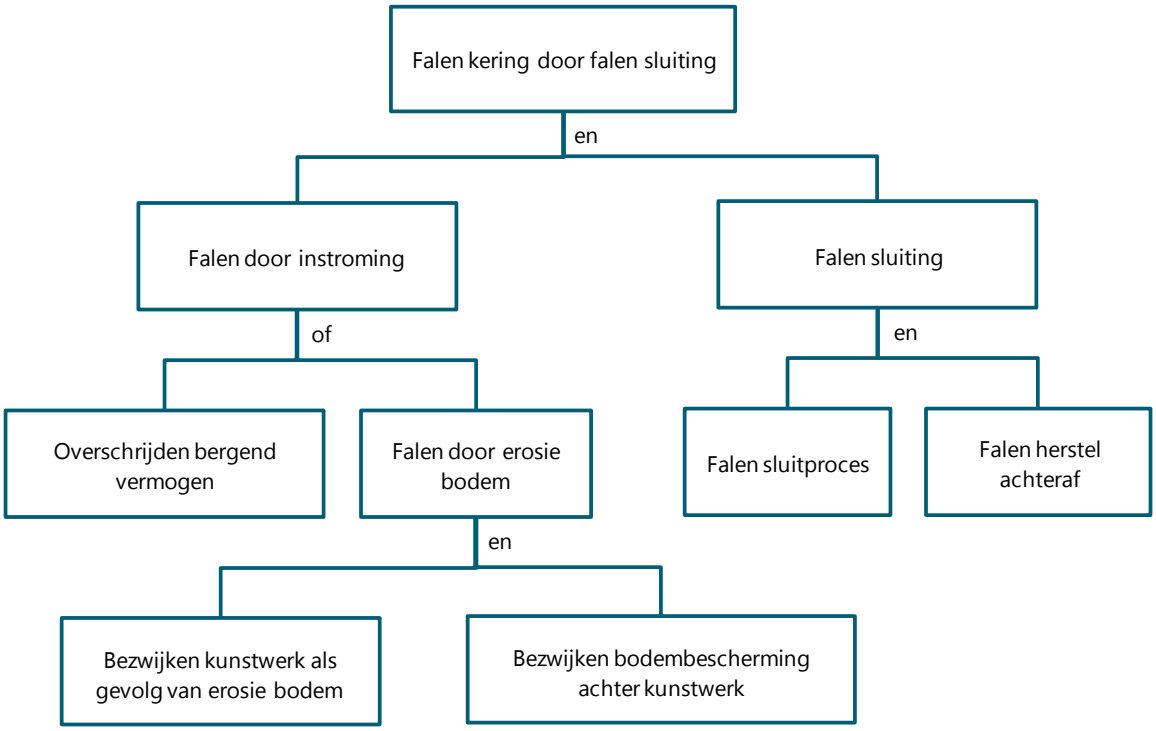
Op basis van de eenvoudige toets is gesteld dat de faalkans voor de Roompotsluis verwaarloosbaar is. Als de Roompotsluis buiten beschouwing wordt gelaten, dan is het de vraag of de beweegbare kering gezien moeten worden als 1, 3 of 62 kunstwerken. Voor dit toetsspoor is in de knikpuntenanalyse uitgegaan van één kunstwerk, waarbij de kans op niet sluiten van één of meerdere schuiven wordt beschouwd.

Met een lengte-effectfactor van N = 1 is de faalkanseis per vak is 1/250.000.

Foutenboom

De foutenboom in de volgende afbeelding is overgenomen uit de Schematiseringshandleiding betrouwbaarheid sluiting kunstwerk [ref. 25]. Op basis van deze boom is het toetsspoor voor de knikpuntenanalyse doorgelopen voor de beweegbare kering.

Afbeelding I.14 Foutenboom toetsspoor betrouwbaarheid sluiting kunstwerk [ref. 25]



Knikpunten

Voor de bewegende kering is voor het toetsspoor BSKW in de knikpuntenanalyse met name gekeken naar de kans op falen van de bodembescherming als één of meerdere schuiven niet sluiten. Het bergend vermogen is immers niet relevant voor de beantwoording van de vraag: *Is de faalkans in gesloten toestand kleiner dan de norm in de Waterwet?* Daarnaast is de kans op succesvol herstel van schade gedurende een storm verwaarloosbaar klein.

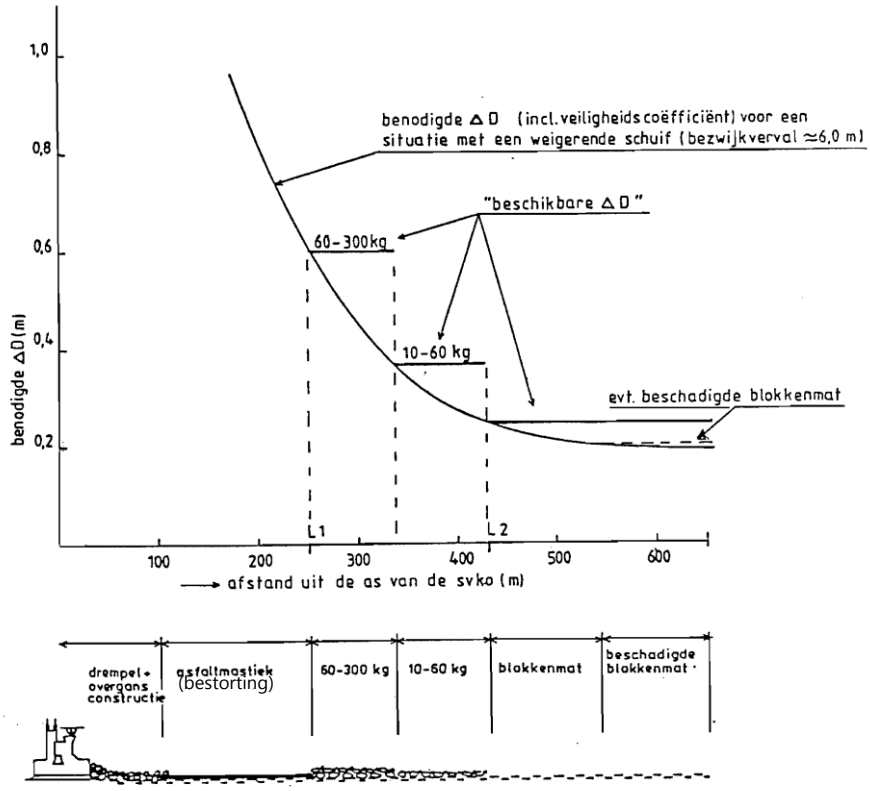
Als aangenomen wordt dat de OSK faalt als de bodembescherming faalt, dan moet de kans op falen van de bodembescherming (gegeven dat één of meerdere schuiven niet sluiten) kleiner zijn dan 1/250.000 per jaar. Op basis van de grafiek in Afbeelding I.15 wordt bij deze kans de volgende vervallen gevonden:

- 2017: 4,0 m;
- 2050: 4,3 m;
- 2100: 4,4 m.

Het bezwijkverval (vloed) voor de drempel en overgangsconstructie is 6,2 m [ref. 1]. Voor de bodembeschermingen vanaf 105 m uit de kering wordt conform de keringspecifieke relatie een vergelijkbaar bezwijkverval (6,0 m) gevonden (Afbeelding I.13). De bezwijkvervallen zijn bepaald op basis van schaaltesten en gingen uit van een binnenwaterstand op NAP -0,7 m.

In de schaaltesten zitten onzekerheden. Daarnaast zitten er onzekerheden in de materiaaleigenschappen en de uitvoeringswijze. In het ontwerp is daarom een veiligheidsfactor van circa 1,5 aangehouden om te komen tot de ontwerpvervallen (circa 4 m).

Afbeelding I.15 Benodigde stabiliteit (ΔD) als functie van de afstand tot de kering [ref. 48]



Voor een nauwkeurige bepaling van het knikpunt moeten zowel de onzekerheden aan de belastingenzijde als aan de sterktezijde beschouwd worden op basis van een statische analyse. Met name het effect van de aangepaste sluitstrategie (1-2-1 wisselstrategie[1] in plaats van NAP -0,7 m) op de stabiliteit van de bodembeschermingen en de kans op bezwijken van de OSK als gevolg van falen van de bodembeschermingen dienen nader onderzocht te worden. Deze analyses zijn in de knikpuntenanalyse niet uitgevoerd (kader). Voor het project IVO is aangenomen dat het knikpunt voor het toetsspoor BSKW na 2100 optreedt omdat:

- de faalkans voor het toetsspoor BSKW gelijk is aan de faalkans die aangehouden is bij het ontwerp (4*10-6 per jaar);
- er een marge aanwezig is tussen het optredende verval (4,4 m) en het bezwijkverval zonder veiligheidsfactor (6,0 m);
- de aanpassing van de sluitstrategie leidt tot een kleiner verval. Door de aanpassing is de binnenwaterstand tijdens sluiten toegenomen, waardoor het optredende verval over de kering kleiner zal zijn dan tijdens het ontwerp is aangehouden. Daarbij komt dat bij een verval van circa 5 m de zeewaterstand hoger is dan de bovenkant van de bovenbalk en is de binnenwaterstand niet meer in stand te houden (verval neemt af);
- in deze analyse conservatief is aangenomen dat de OSK bezwijkt, als de bodembescherming faalt. Met name schade aan de bodembescherming op 100 m uit de kering leidt niet direct tot falen van de kering.

Relatie met derde toetsronde

In de derde toetsronde is voor de bodembescherming op 105 m uit de kering een faalkans van $6{,}4*10^{-5}$ en een toelaatbaar verval van 3,7 m afgeleid. Voor de drempel en overgangsconstructie is een faalkans juist kleiner geworden (10^{-8}) ten opzichte van het ontwerp ($4*10^{-6}$) [ref. 1].

[1] De 1-2-1 wisselstrategie houdt in dat bij de eerste hoogwatertop en sluiting van de kering, er gestreefd wordt naar een Oosterscheldepeil van NAP + 1,0 m. Voor een tweede en derde hoogwatertop gelden respectievelijk NAP + 2,0 m en NAP + 1,0 m.

In de toetsing is een andere faaldefinitie gehanteerd, dan tijdens het ontwerp. In de toetsing is namelijk het begin van falen beschouwd; de uitgewerkte faalkans is de kans op begin van beweging van delen van de bodembescherming. Om de werkelijke faalkans te bepalen is in de toetsing aanbevolen om de overdrachtskansen opnieuw af te leiden.

De volgende nuanceringen zijn gemaakt door de beheerder op de toetsrapportage [ref. 1]:
'1 In het ontwerp van de bodembescherming is uitgegaan van één weigerende schuif als maatgevende situatie. Voor het gebied dichter naar de rand van de bodembescherming (de laatste 100 tot 200 m) is niet een weigerende schuif, maar een open kering maatgevend. De gevolgen van de schade zijn daar ook anders. Bij één falende schuif is er een risico op schade wat dichter bij de kering. Die schade is in elk geval lokaal en met inspectie redelijk goed te detecteren. Bij extreme vervallen bij open kering is er kans op schade meer aan het eind van de bodembescherming en deze schade kan zich over een veel groter gebied uitstrekken. Inspectie is dan een stuk lastiger en omvangrijker. Echter, deze schade moet zich wel verder ontwikkelen richting de kering voordat deze gevaar loopt. In de uitgevoerde faalkansanalyse is geen rekening gehouden met deze ruimtelijke spreiding.
2 In de ontwerpnota bodembescherming zijn schadegevallen gedefinieerd en afhankelijk van het gebied ook vastgesteld waar welke schade toelaatbaar is. Er zijn gebieden waar alleen een onbeschadigde bodembescherming toelaatbaar is, maar er zijn ook gebieden waar (beperkte) schade wel toelaatbaar is.
3 Er is bij het ontwerp van de bodembescherming de fundamentele keuze gemaakt dat beperkte schade aan de bestorting en zelfs aan de blokkenmatten aanvaardbaar is, mits er een bewakings- en reparatiefilosofie is, die voldoende garanties geeft op een stabiele situatie van de onderliggende zandbodem. In dit rapport is echter elke schade (waar dan ook) meteen als faalgebeurtenis beschouwd.'

Om de faalkans (en knikpunt) goed te bepalen, is een nader onderzoek nodig naar:
- de onzekerheden in de sterkte in het schaalonderzoek;
- het effect van de aangepaste sluitstrategie op de belastingen;
- de overdrachtskansen tussen 'begin van falen van de bodembescherming' en 'daadwerkelijk bezwijken van de OSK'.

Op basis van een probabilistische analyse kan vervolgens de kans op bezwijken van de OSK als gevolg van falen van de bodembescherming beter worden bepaald. Deze analyse is niet uitgevoerd in het project IVO. In overleg met de beheerder is aangenomen dat er voldoende marge zit tussen het 'begin van falen van de bodembescherming' en 'daadwerkelijk bezwijken van de OSK'.

I.13 Piping kunstwerk (PKW)

Eenvoudige toets
Voor het toetsspoor PKW is een eenvoudige toets aanwezig.

Beweegbare kering
De tekst in het volgende kader is opgenomen in de toetsrapportage van de derde toetsronde.

Toetsoordeel derde toetsronde [ref. 2]
Gezien de opbouw van de constructie en de aanwezigheid van de bodembescherming tot circa 650 m uit de as van de kering is het niet aannemelijk dat piping en heave zullen op treden.

Door de aanwezige granulaire filterconstructies is de kans dat piping optreedt klein. Tijdens het ontwerp is de stabiliteit tegen 'opbarsten' van de aanstortingen tegen de drempel onderzocht. Door de vervalbelasting ontstaat er een stroming onder de drempel door die (in combinatie met de aangroei van mossels) ervoor kan zorgen dat er schade aan de aanstortingen ontstaan. De berekende bezwijkvervallen lagen tussen de 5,8 m en 8,0 m voor verschillende scenario's en lijken daarmee niet tot een knikpunt te leiden.

Roompotsluis

De Roompotsluis is in de derde toetsronde beoordeeld op piping en heave. Het oordeel is opgenomen in het volgende kader. Op basis van dit oordeel kan middels een eenvoudige toets tot een oordeel worden gekomen.

Toetsoordeel derde toetsronde [ref. 2]

Het invullen van de waarden in de formule geeft: ΔHc= 7,2 m. Het optredende verval is 5,9 m. Volgens de formule van Lane voldoet de constructie. Het oordeel voor het toetsspoor Stabiliteit Piping en Heave luidt: goed.

Knikpunten

De verwachting is dat het knikpunt na 2100 optreedt vanwege de volgende redenen:

- beweegbare kering
  - de kans op een bezwijkverval van 5,8 m is met het aangepaste sluitregime erg klein. In dat geval staat de zeewaterstand circa 1 m boven de bovenbalken. Het verval is dan niet meer in stand te houden;
- Roompotsluis:
  - het kritieke verval op basis van de rekenregel van Lane is in de derde toetsronde afgeleid op 7,2 m;
  - uitgaande van een waterstand van NAP +1 m op de Oosterschelde is bij een verval van 7,2 m de buitenwaterstand meer dan NAP +8 m. Bij een dergelijk hoge waterstand op de Noordzee kan de OSK niet meer zijn rol van primaire waterkering vervullen.

I.14 Sterkte en stabiliteit kunstwerk (STKWp)

Puntconstructie

Het toetsspoor STWKp betreft de beoordeling van de sterkte en stabiliteit van een puntconstructie. De definitie van een puntconstructie is gegeven in het volgende kader.

Definitie puntconstructie [ref. 21]

Type kunstwerk in een waterkering waarvoor geldt dat de onzekerheden gerelateerd aan de lengte in de richting van de as van de waterkering (relatief beperkt ten opzichte van de lengte loodrecht op de as van de waterkering) over het algemeen een ondergeschikte rol speelt, zoals sluizen en coupures.

De Roompotsluis is een kunstwerk die goed past binnen deze definitie. Door de relatief lange lengte van de beweegbare keringen in de stroomgaten is deze definitie niet van toepassing op deze kunstwerken. Een logische vervolgstap is het verder onderverdelen van de beweegbare keringen in deelvakken, zodat de onzekerheden die gerelateerd zijn aan de lengte (in de richting van de kering) weer een ondergeschikte rol spelen. In een volledig probabilistische beoordeling is deze analyse goed uitvoerbaar.

In de knikpuntenanalyse is echter aangenomen dat de definitie van een puntconstructie ook van toepassing is op de beweegbare keringen. Dit is geen conservatieve aanname. Per onderdeel is in het vervolg beoordeeld in hoeverre deze aanname invloed heeft op de knikpunten.

Eenvoudige toets

Voor het toetsspoor STKWp zijn geen voorschriften beschikbaar voor de eenvoudige toets.

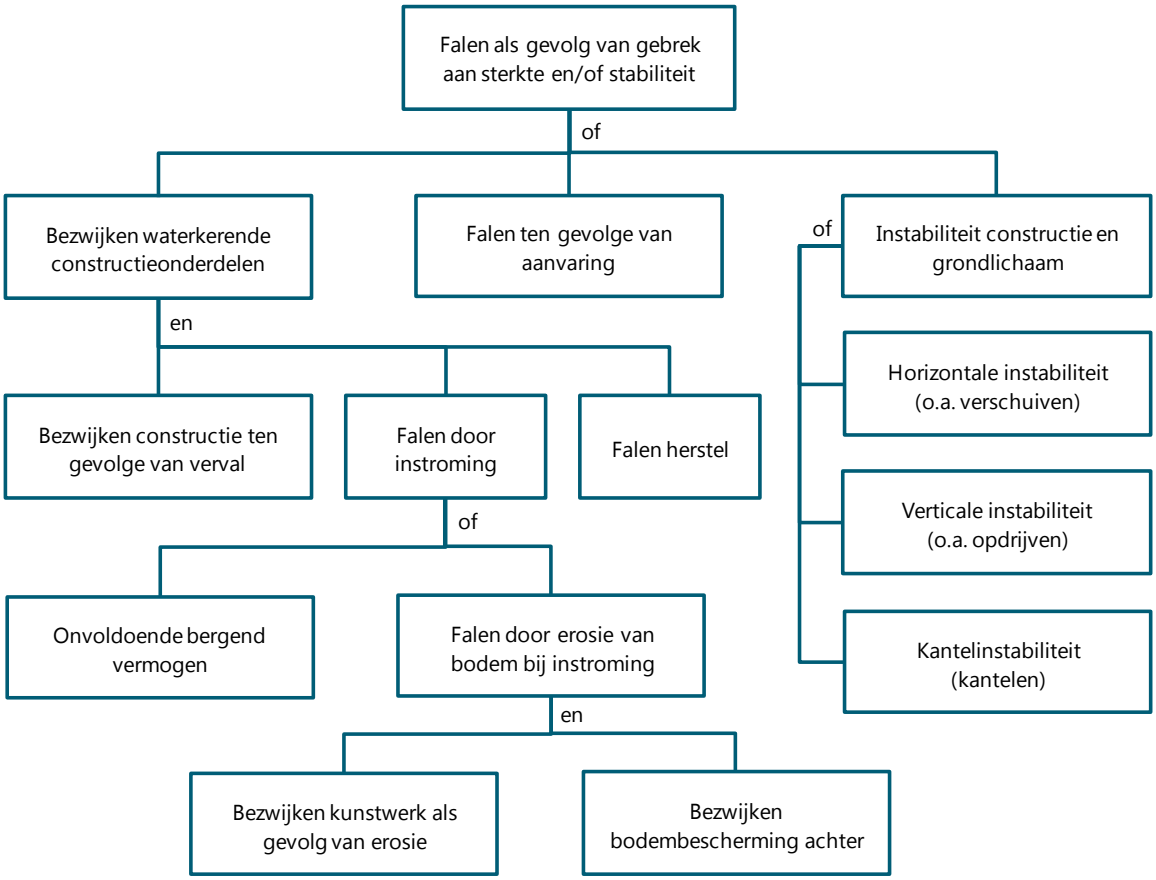
Faalkanseis per vak

De lengte-effectfactor is conform Bijlage III Sterkte en veiligheid [ref. 23] voor het toetsspoor STKWp gelijk aan 3. Daarmee is de faalkanseis per vak 1/1.500.000 per jaar indien uitgegaan wordt van de standaard faalkansbegroting en 1/120.000 per jaar indien een aangepaste begroting wordt aangehouden.

Foutenboom

De foutenboom in de volgende afbeelding is afgeleid uit de Schematiseringshandleiding sterkte en stabiliteit kunstwerken [ref. 27]. Op basis van deze boom is het toetsspoor voor de knikpuntenanalyse doorgelopen.

Afbeelding I.16 Foutenboom toetsspoor sterkte en stabiliteit kunstwerk [ref. 27]



Bezwijken waterkerende constructieonderdelen

Als gevolg van een vervalbelasting (inclusief golven) kan een constructieonderdeel bezwijken. Dat leidt alleen tot falen van het kunstwerk als tijdig herstel niet meer mogelijk is en als gevolg van het bezwijken vervolgschade ontstaat (falen door erosie van de bodem) of door het bezwijken het bergend vermogen overschreden wordt.

Falen herstel

De kans op het succesvol herstellen van schade na het bezwijken van een significant constructieonderdeel is voor de OSK (zowel de bewegende kering als de Roompotsluis) verwaarloosbaar klein ($P_{f,herstel\ sluiting}$ = 1,0). De afmetingen van een doorstroomopening na bezwijken zullen te groot zijn en de optredende golven en stroomsnelheden zullen te hoog zijn om tijdens een hoogwatergolf herstel succesvol uit te voeren [ref. 27].

Falen door instroming (beweegbare kering)

Het bergend vermogen van de Oosterschelde is groot. Daarnaast leidt het falen van bijvoorbeeld een schuif in de beweegbare kering niet direct tot het falen van de bodembescherming. De bodembescherming is immers ontworpen om doorgaande erosie bij het niet sluiten van een schuif te voorkomen.[1]

Aangezien er 62 openingen zijn, kan echter aangenomen worden dat als een constructieonderdeel (bijvoorbeeld een schuif of bovenbalk) faalt, meerdere vergelijkbare constructieonderdelen zullen falen.

[1] Mogelijk faalt de bodembescherming wel als gevolg van het slechts gedeeltelijk sluiten van schuiven (tijdens het ontwerp brievenbus genoemd). In het ontwerp heeft dat niet geresulteerd in een ontwerpeis. Voor dergelijke belastingsituaties zijn toelaatbare vervallen vastgesteld. Dat wil zeggen dat de schuiven niet mogen worden gesloten als hierdoor het toelaatbare verval wordt overschreden. Hoe dit in het sluitingsprotocol is opgenomen, is in het project IVO niet nader onderzocht, maar kan mogelijk tot een eerder knikpunt leiden bij BSKW.

Daarom is in de knikpuntenanalyse conservatief aangenomen dat als een constructieonderdeel faalt, de gehele constructie faalt. Daarmee wordt gecompenseerd voor het gegeven dat de beweegbare keringen niet als een puntconstructie kunnen worden beschouwd.

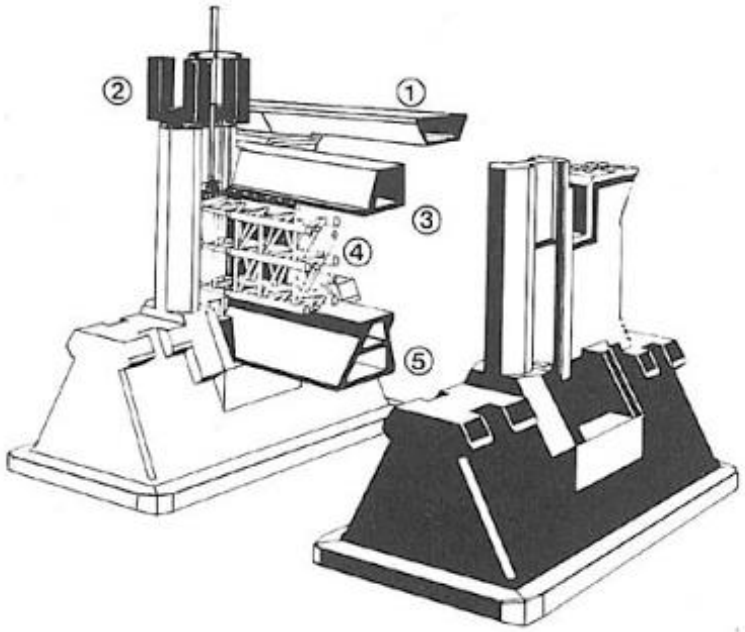
Falen door instroming (Roompotsluis)

De Roompotsluis valt binnen de definitie van een puntconstructie. Afwijkend aan de beweegbare kering is in de knikpuntenanalyse aangenomen dat door het falen van een constructieonderdeel van de Roompotsluis, het bergend vermogen van de Oosterschelde niet wordt overschreden. De kans dat door het falen van bijvoorbeeld beide deuren zowel de bodembeschermingen, hoofden als kolk tijdens de duur van een storm verdwijnen, wordt voldoende klein geschat.

Bezwijken constructie ten gevolge van verval

In de knikpuntenanalyse is voor dit onderdeel alleen gekeken naar de beweegbare keringen. De kans op herstel wordt voor deze kunstwerken verwaarloosbaar geacht en er wordt conservatief van uitgegaan dat de kans op falen van een onderdeel direct leidt tot falen van de kering. De maatgevende constructieonderdelen zijn de verkeerskoker, bovenbalk, schuif en dorpelbalk (Afbeelding I.17). Per onderdeel is op basis van expert judgement het knikpunt bepaald.

Afbeelding I.17 Onderdelen beweegbare kering: (1) verkeerskoker, (2) hamerstuk, (3) bovenbalk, (4) schuif en (5) dorpelbalk



Verkeerskokers

Met betrekking tot de verkeerskokers is de volgende tekst opgenomen in de faalkansrapportage van Arcadis.

Tekst in faalkansrapportage over de verkeerskokers [ref. 1]

In de verkeerskoker zijn belangrijke kabels ondergebracht, die noodzakelijk zijn voor het openen/sluiten van de kering. Het bezwijken van de verkeerskoker heeft geen invloed op de stabiliteit van de andere onderdelen van de beweegbare kering. De kans is aanwezig dat de verkeerskoker is bezweken door andere omstandigheden dan de maatgevende storm, juist voordat die optreedt. In dit geval leidt de schade van de koker tot een mogelijk niet sluiten van de kering. De kans hierop wordt als verwaarloosbaar beschouwd. Daarom worden de verkeerskokers niet opgenomen in de faalkansanalyse.

Tijdens stormomstandigheden kan de verkeerskoker belast worden door overslaand water (‘bruiswater’) en trillingen als gevolg van golfklappen tegen de bovenbalk. De verwachting is dat deze belasting beperkt is,

maar dit is alleen goed te modelleren middels schaaltesten. Mocht de verkeerskoker bezwijken, dan kan mogelijk (een deel) van de schuiven niet meer geopend worden en de kering bezwijken door het ebverval (laagwater op zee en hoogwater op de Oosterschelde). Op basis van expert judgement is het optreden van het knikpunt na 2050 geschat.

Bovenbalk en schuiven

Om de knikpunten voor de bovenbalk en schuiven nauwkeurig te bepalen, is een statistische analyse nodig van zowel de sterkte als de belastingen. Deze analyse is in het project IVO niet uitgevoerd. In het project is het knikpunt geschat op basis van een vergelijking tussen de oorspronkelijk afgeleide faalkans en de faalkanseis, en tussen de oorspronkelijke en nieuwe HB.

In het faalkansenrapport van Arcadis [ref. 1] zijn de volgende faalkansen afgeleid (gelijk aan het ontwerp):
- bovenbalk: ≤ 1×10^{-8} per jaar;
- schuiven en schuifaanslagen: ≤ 1×10^{-9} per jaar.

Deze faalkansen zijn een orde kleiner dan de faalkanseis op vakniveau (7×10^{-7} per jaar bij een standaard faalkansbegroting en 8×10^{-6} bij een aangepaste begroting). Hieruit volgt dat de faalkansbijdrage verwaarloosbaar klein is.

De bovenbalken en schuiven hebben te maken met zowel een vervalbelasting als golfbelasting. De aangehouden HB in het ontwerp zijn opgenomen in Tabel I.2. Voor de bovenbalk en schuiven zijn de aangehouden golfbelasting in het ontwerp (minimaal Hs = 4,1 m voor Hammen en Schaar en Hs = 5,3 m voor Roompot) vergelijkbaar of zwaarder dan volgt uit Hydra-NL (Tabel I.7).

De waterstand is aanzienlijk hoger dan aangehouden in het ontwerp en zelfs boven de bovenbalken. Over het algemeen is de golfbelasting maatgevend boven de vervalbelasting. Daarnaast is de verwachting dat een extreem hoge waterstand (gelijk of hoger dan bovenkant bovenbalk) er toe leidt dat een deel van de golfenergie over de balken gaat. Een lagere waterstand is dan maatgevend. Bij extreem hoge waterstanden (> NAP +5,6 m) ontstaat echter naast een overslagsituatie ook een overloopsituatie. Het gedrag van de constructie is in deze situatie lastig te voorspellen zonder schaalonderzoek. De combinatie van verval, overloop en golfklappen kan leiden tot een grotere belasting dan nu wordt voorzien (bijvoorbeeld trillingen).

In de knikpuntenanalyse is aangenomen dat het knikpunt na 2050 optreedt, omdat:
- er een marge zit tussen de oorspronkelijk berekende faalkans en de toelaatbare faalkans conform het WBI2017;
- de ontwerpgolfbelasting vergelijkbaar is;
- in het ontwerp nog een veiligheidscoëfficiënt van 1,2 is toegepast [ref. 40];
- bij een overloopsituatie de waterstand op de Oosterschelde lastig te handhaven is.

Dorpelbalk

De bovenkant van de dorpelbalken varieert tussen de NAP -4,5 m en NAP -10,5 m [ref. 1]. De dorpelbalken worden naast hydraulische belastingen (vervalbelasting) ook belast door gronddrukken door de aanstortingen. De vervalbelasting is afgenomen door aanpassing van het sluitregime (toetspoor BSKW) en er zijn geen aanwijzingen dat de gronddrukken zijn toegenomen [ref. 1]. Aangenomen is dat het knikpunt na 2100 optreedt.

Falen ten gevolge van aanvaring

In de toetsing van de derde toetsronde is het aanvaringsrisico benoemd in relatie tot de Roompotsluis. Het aanvaringsrisico is toen niet 'bijzonder hoog' genoemd (kader)[1].

[1] Voor de wettelijke beoordeling is het raadzaam om de faalkans te onderzoeken als gevolg van (i) een aanvaring onder stormcondities en (ii) een aanvaring onder dagelijkse omstandigheden in combinatie met de kans op een storm tijdens de herstelperiode. In 2005 is bijvoorbeeld een viskotter tegen de OSK aangevaren (zonder schade aan de kering).

Derde toetsronde [ref. 2]
Het aanvarings- of aanrijdingsrisico is niet bijzonder hoog. De sluis wordt beperkt gebuikt voor beroepsvaart. Tijdens een storm vindt geen schutting plaats. Het wegverkeer over de sluis is minimaal.

In de knikpuntenanalyse is 'falen ten gevolge van aanvaring' niet nader beschouwd, omdat;
- de verwachting is dat deze vorm van falen geen nieuwe knikpunten oplevert ten opzichte van de beschouwing van de vigerende norm;
- het effect van een ZSS op een aanvaring beperkt is.

Instabiliteit constructie en grondlichaam

Beweegbare kering
Met name zijn de faalmechanismen horizontale instabiliteit en kantelinstabiliteit en in mindere mate verticale instabiliteit voor de beweegbare kering van belang. Een belangrijke parameter is het optredende verval over de kering.

Het ontwerpverval is circa 6 m (Tabel I.2). Door aanpassing van het sluitregime is de binnenwaterstand tijdens sluiten toegenomen (1-2-1 wisselstrategie in plaats van NAP -0,7 m), waardoor het optredende verval over de kering kleiner zal zijn dan tijdens het ontwerp is aangehouden.

Overschrijding van het ontwerpverval lijkt onrealistisch, omdat bij een ontwerpverval van 6,0 m en een minimale binnenwaterstand tijdens sluiting circa NAP +0,7 m resulteert in een maximale buitenwaterstand van NAP +6,7 m. Op dat moment staat het water (bij een buitenwaterstand van NAP +6,7 m) 0,9 m boven de bovenkant van de bovenbalk (> NAP +5,6 m) en lijkt het waterbezwaar in de Oosterschelde te groot om een binnenwaterstand van NAP +0,7 m te handhaven.

De verwachting is dat het knikpunt voor het deelmechanisme instabiliteit constructie en grondlichaam voor de beweegbare kering daarmee na 2050 optreedt.

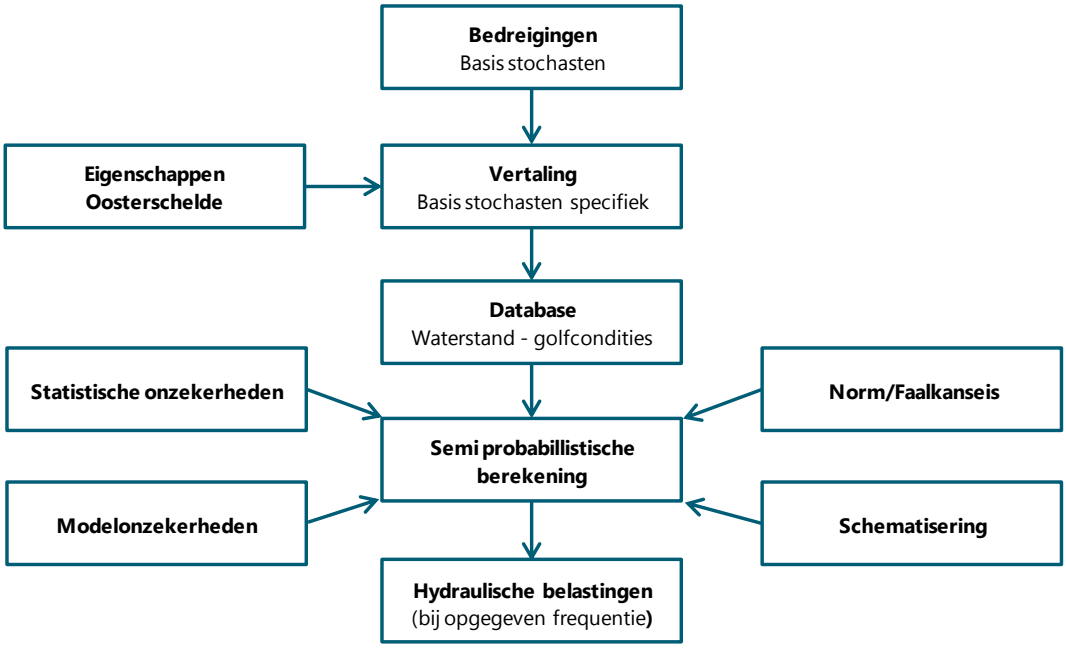
Roompotsluis
De kans op kantelen en verschuiven van een gehele schutsluis is verwaarloosbaar klein. Opdrijven van de kolkvloer is afhankelijk van de type uitvoering mogelijk. Voor opdrijven is net als bij de beweegbare kering de vervalbelasting maatgevend. In het ontwerp is een verval van 6,2 m aangehouden. Bij een buitenwaterstand van NAP +6,9 m is er sprake van een overloopsituatie ter plaatse van het buitenhoofd. In dat geval is het aannemelijk dat de kolk gevuld is, tenzij de deuren of het nivelleersysteem in het binnenhoofd zijn gefaald. Opdrijven is in de situatie van een gevulde kolk niet mogelijk. De verwachting is daarom dat het knikpunt voor dit faalmechanisme optreedt na 2100.

Knikpunten
Knikpunten voor het toetsspoor STKWp treden naar verwachting pas na 2050 op.

I.15 Toelichting rol OSK in afleiding HB voor dijktrajecten Oosterschelde

Het proces van het afleiden van de HB bestaat grofweg uit twee delen. Kenmerkend aan het eerste deel is het deterministische karakter van een beschreven dataset. In dit deel is geen enkele statistiek meegenomen. Dit in tegenstelling tot het tweede deel van het proces. Een overzicht van het complete proces is weergegeven in de volgende afbeelding.

Afbeelding I.18 Overzicht processchema [ref. 22]



Fysische berekeningen

De database wordt opgebouwd vanuit zogenoemde bedreigingen (paragraaf 2.2.2), welke een invloed hebben op de HB. Anders dan de term suggereert, kunnen bedreigingen ook een (ten aanzien van de eis) positieve invloed hebben op de HB. Voor de database is het immers niet eenduidig wat een gewenste waterstand/golf is. Alle factoren die een invloed hebben op de HB (waterstand en golven) worden beschouwd.

Bedreigingen voor de Oosterschelde zijn waterstand Noordzee, wind, windrichtingen toestand OSK. In de database komen alle combinaties van bedreigingen voor en zijn bij deze combinaties de waterstanden en golven ter plaatse van de waterkering deterministisch bepaald. Deze berekeningen zijn toegespitst op de Oosterschelde, in het specifiek op enkele uitvoerlocaties aan de teen van de kering. Enkel op deze locaties zijn de berekende waarde geldig.

(Semi)probabilistische berekeningen

In het tweede deel worden er een aantal kansverdelingen opgelegd aan de uitkomsten van het eerste deel, de database. Het voordeel van deze semiprobabilistische berekeningen is dat zij lost staan van enig fysische kennis over het proces. De deterministisch afgeleide hydraulische randvoorwaarden (HR)[1] die zijn bepaald voor alle combinaties van alle basisstochasten zijn samen te vatten tot een 'black-box': de database.

$$HR(loc_I|ws_{NZ}, u, r, sc_{os}, \Delta, T) = f(ws_{NZ}, u, r, sc_{OS}, \Delta, T)$$

Waarbij ws_{NZ} de waterstand op de Noordzee, u, r respectievelijk de windkracht en -richting, Δ het faseverschil tussen windopzet en getij, T de stormduur, en sc_{os} de toestand (en scenario) van de OSK is. Deze parameters zijn opgenomen in de database.

Voor de probabilistische analyse is het minder relevant hoe de functie $f(\dots)$ is opgebouwd. Enkel is het van belang welke basisstochasten er in de database $HR(loc_l)$ voorkomen. Daarmee is bekend welke combinaties

[1] In deze paragraaf wordt gesproken over HR als het deterministisch bepaalde waterstanden en golven zijn ter plaatse van de teen van de waterkering. Nadat er vervolgens een probabilistische analyse is uitgevoerd om de belastingen te bepalen ten behoeve van de beoordeling van een toetsspoor, wordt gesproken over de HB.

van basisstochasten fysisch mogelijk zijn. Door een kansverdeling p op te leggen aan de combinaties is vervolgens bekend welke frequentie (of verdeling) deze combinaties zullen voorkomen.

Wiskundige achtergrond

Elke basisstochast heeft, zoals de naam impliceert, een kans van optreden. Deze kansen zijn vastgelegd in kansverdelingen. Het kan voorkomen dat stochasten gecorreleerd zijn. De kansverdeling van gecorreleerde stochasten zijn niet eenvoudig uit elkaar te halen. De kansverdeling dient dan per combinatie toegepast te worden.

In het algemeen geldt dat voor twee stochasten a en b:

$$p(a,b) = p(a|b)p(b)$$

Waarbij $p(a,b)$ de kans is op de combinatie a en b. $p(a)$ en $p(b)$ de kans is op respectievelijk a en b. Het verticale streepje is te lezen als 'gegeven '. Dus $p(a|b)$ is de kans op a gegeven een waarde b. De kans op $p(a)$ wordt dan gegeven door:

$$p(a) = \int p(a|b)p(b)db$$

Indien de stochasten a en b niet gecorreleerd zijn, dan kan de formule vereenvoudigd worden:

$$p(a,b) = p(a)p(b)$$

In de database met HR zijn zowel gecorreleerde als ongecorreleerde stochasten opgenomen. Er wordt uitgegaan dat de kansverdeling over het scenario sc, het faseverschil Δ, de stormduur T onderling geen correlatie hebben. Daarnaast is er geen correlatie tussen sc, Δ, T met de windsnelheid u en windrichting r en de waterstand op de Noordzee ws_{NZ}. Er is wel correlatie tussen r en u en de waterstand op de Noordzee. Dit kan als volgt worden uitgedrukt:

$$p(ws_{NZ}, u, r, T, \Delta, sc) = p(ws_{NZ}, u, r)p(T)p(\Delta)p(sc)$$

De windrichting en windsnelheid zullen dus als 3-dimensionale verdeling de berekening in gaan. De kansverdeling over stormduur, faseverschil en scenario zijn 1-dimensionaal. Door niet gecorreleerde verdelingen uit te splitsen volgens bovenstaande formule wordt een 6-dimensionale verdeling gesplitst in één 3-dimensionale verdeling en drie 1-dimensionale verdeling. Niet alleen zal hierdoor de berekening sneller verlopen, ook zal het computationele fouten (afrondingsfouten in de precisie - aantal decimale getallen - die computer aan kan) beperken. Immers geldt dat $p(a,b) \leq p(a)$ en de getallen in een 5-dimensionale tabel zullen veel kleiner zijn (en grotere precisie vereisen) dan in getallen in lagere dimensionale tabellen.

Gegeven deze werkwijze met kansverdelingen, kan de verdeling over de waterstand worden bepaald. De waterstand correleert met alle voornoemde basisstochasten. Immers, alle niet correlerende factoren worden buiten de analyse gelaten. De kans op een bepaalde waterstand (h) wordt gegeven door:

$$p(h) = \int p(h|ws_{NZ}, u, r, T, \Delta, sc) dws_{NZ}\, du\, dr\, dT\, d\Delta\, dsc$$

Omdat gewerkt wordt met numerieke tabellen, zal de integraal overgaan in een sommatie over alle kansen:

$$p(h) = \sum p(h|ws_{NZ}, u, r, T, \Delta, sc) = \sum p(ws_{NZ}, u, r)p(T)p(\Delta)p(sc)$$

Vertaling in software

Om de faalkansen en de frequentielijnen te bepalen, is in de knikpuntenanalyse gebruik gemaakt van het programma Hydra-NL (versie 1.3.0 concept 5). Het programma voert de beschreven statistiek uit op de onderliggende database. De database beschrijft de HR in het gebied, specifiek op een aantal uitvoerlocaties. De databases die ingelezen worden in Hydra-NL zijn vooraf door het uitvoeren van productieberekeningen

met hydrodynamische waterbewegings- en golfmodellen (in het geval van de Oosterschelde met IMPLIC en SWAN) samengesteld en gevuld.

Naast de database met HR wordt er gebruik gemaakt van verdelingen over de basisstochasten, zoals windrichting, windkracht en kans op niet sluiten. Deze worden teruggevonden in txt bestanden in Hydra-NL, zoals:

- VS_sigmafunctie_OS_2017.txt
- CondPovOS11_12u_zichtjaar1985_2017_metOnzHeid.txt
- KansenFaseverschil_OS.txt
- Ovkanswind_Vlissingen_2017_metOnzHeid.txt
- KansenWindrichting_OS_2017.txt
- BesliskansenOSKering.txt

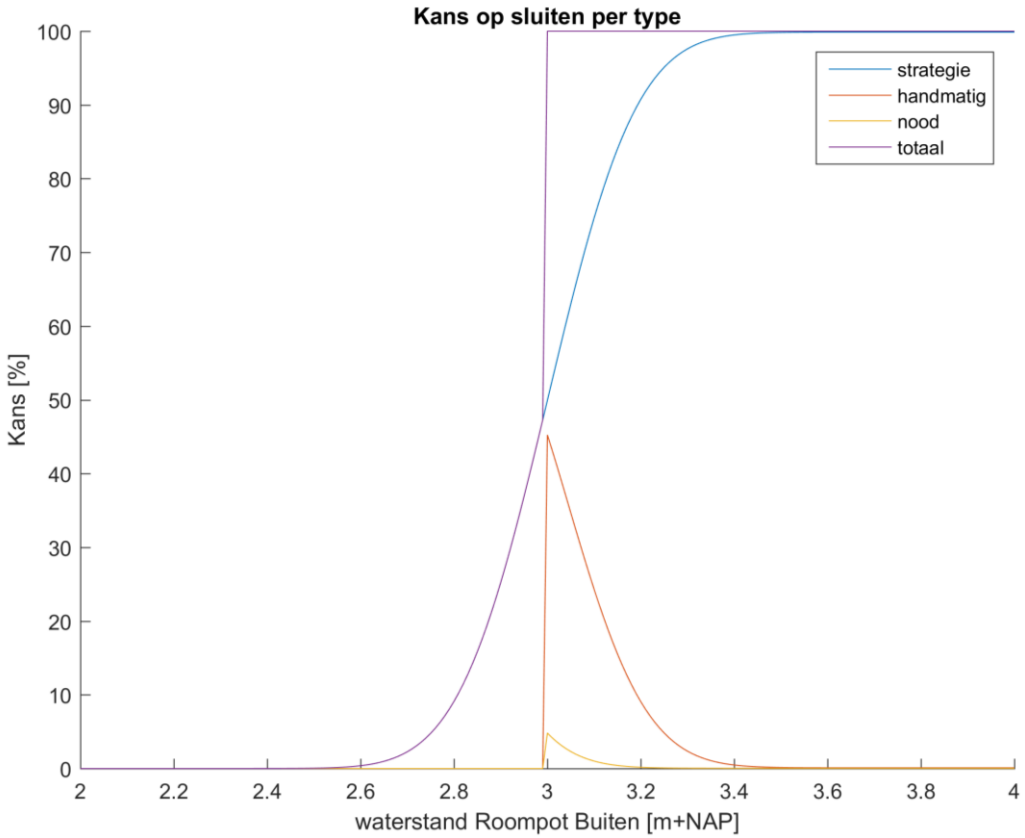
Sluitstrategie

De waterstand op de Oosterschelde wordt niet alleen direct beïnvloed door de natuurlijke condities en de Noordzee, ook de OSK heeft invloed op de waterstand op de Oosterschelde. De toestand van de OSK (open of (deels) gesloten) heeft grote invloed op de waterstand en golven op de Oosterschelde. Daarom zijn er toestanden gedefinieerd waarin de kering zich kan bevinden. Voor elke combinatie van natuurlijke scenario's en toestand van de OSK is het effect berekend. De ene combinatie is echter meer waarschijnlijk dan de ander.

De kans op een sluittype is weergegeven in de volgende afbeelding. Deze illustreert het verloop van

$$p(sluit_type = \{strategie, handmatig, nood\} | ws_{NZ})$$

Afbeelding I.19 Kans op een sluittype op basis van de waterstand Roompot Buiten zoals meegenomen in Hydra-NL



Sluitstrategie [tekst overgenomen uit [ref. 7]

De OSK sluit bij een verwachte zeewaterstand bij de kering van NAP +3,00 m of hoger. Als een waterstand van NAP +2,75 m wordt verwacht, wordt het Beslisteam Sluiting OSK bijeengeroepen. Op basis van de weersvoorspellingen, in combinatie met lokale gegevens en het te verwachten getij, beslist dit team of de OSK gesloten moet worden. Als bij hoge zeewaterstanden iets mis gaat met de alarmering of bediening, is er het noodsluitsysteem, dat bij NAP +3,00 m de schuiven automatisch sluit.

De kering heeft een kans dat 0, 1, 2,.. 62 schuiven falen. Wat de kans hierop is, hangt onder andere af van of de kering bemand of onbemand is. Naarmate de kering vaker in een toestand komt waarop het bemand dan wel onbemand moet gaan sluiten (bijvoorbeeld door de ZSS) zullen de kansen een zwaardere impact hebben op de kansverdeling van waterstanden op de Oosterschelde. De kansen op falen wordt weergegeven in de volgende tabel.

Tabel I.10 Kans op niet sluiten per vraag P_{Ns} zoals opgenomen in Hydra

Aantal schuiven	Bemand	Onbemand
0 (geen schuif faalt)	9,87E-01	9,40E-01
1 (één schuif faalt)	1,16E-02	5,33E-02
2 (twee schuiven)	3,76E-04	1,79E-03
5 (3,4 of 5 schuiven)	1,89E-04	2,00E-03
10 (6 - 10 schuiven)	6,19E-04	1,00E-03
16 (25% van de schuiven	3,82E-04	5,95E-04
31 (50% van de schuiven)	1,69E-04	2,30E-04
47 (75% van de schuiven)	7,11E-08	9,22E-08
62 (De gehele kering)	2,05E-05	7,55E-04

De kans op een specifiek scenario gegeven de waterstand kan worden uitgedrukt door:

$$p(sc, sluit\ type, ws_{NZ}) = p(sc = \{0,1,2,5,..62\}, \quad sluit\ type = \{bemand, onbemand\}, \quad ws_{NZ})$$

$$\begin{aligned} p(sc|ws_{NZ}) &= \sum p(sc|\ sluit\ type)\ p(sluit\ type|ws_{NZ}) \\ &= p(sc|bemand)\ p(bemand|ws_{NZ}) + p(sc|onbemand)p(onbemand|ws_{NZ}) \end{aligned}$$

Waarbij de kans op bemand sluiten bestaat uit strategisch plus handmatig sluiten. De kans op sluiten (bemand of onbemand) neemt toe bij ZSS; immers de kering zal sluiten bij een waterstand van boven de NAP +3 m. Als de kans groter is dat er een waterstand boven de NAP +3 m voor zal komen in de toekomst zal er dus vaker gesloten moeten worden:

$$p(ws_{NZ} > NAP + 3m \mid ZSS) > p(ws_{NZ} > 3mNAP \mid geen\ ZSS)$$

Als aangenomen wordt dat de kans op niet sluiten gelijk blijft voor de OSK (tabel 6.1), dan zal de gecombineerde kans $p(sc|ws_{NZ})$ ook toenemen. En daarmee ook de kans overschrijden van het prestatiepeil in de Oosterschelde.

$$p(h > h_{prestatie}) = \sum_{h>h_{prestatie}} p(ws_{NZ}, u, r)p(\Delta)p(T), p(sc)$$

Te zien is dat de kans op sluiten toeneemt bij een hogere waterstand, omdat bij een ZSS de kans toeneemt dat er een hogere waterstand wordt gevonden. Hoewel de OSK een kerend vermogen heeft wat het peil in de Oosterschelde moet kunnen garanderen, is er dus een kans op voorkomen dat dit streefpeil niet gehaald kan worden.

I.16 Sluitfrequentie OSK in relatie tot ZSS

Ten behoeve van de analyse van de oplossingsrichtingen is een inschatting gemaakt van het aantal sluitingen per jaar als gevolg in relatie tot de ZSS. Hiervoor is een bestaande waterstandsreeks geanalyseerd. Het globale beeld is:

- ZSS 0 m 4x per 5 jaar
- ZSS +0,22 m 6x per 5 jaar
- ZSS +0,72 m 56x per 5 jaar

De onderbouwing van deze waarden is hieronder gegeven.

Methode

In de analyse is de data gebruikt afkomstig van de locatie Roompot Buiten. Deze is verkregen via de website van Waterbase. De meetreeks heeft een tijdsresolutie van 10 min en loopt van 1 januari 2011 tot en met 31 december 2015.

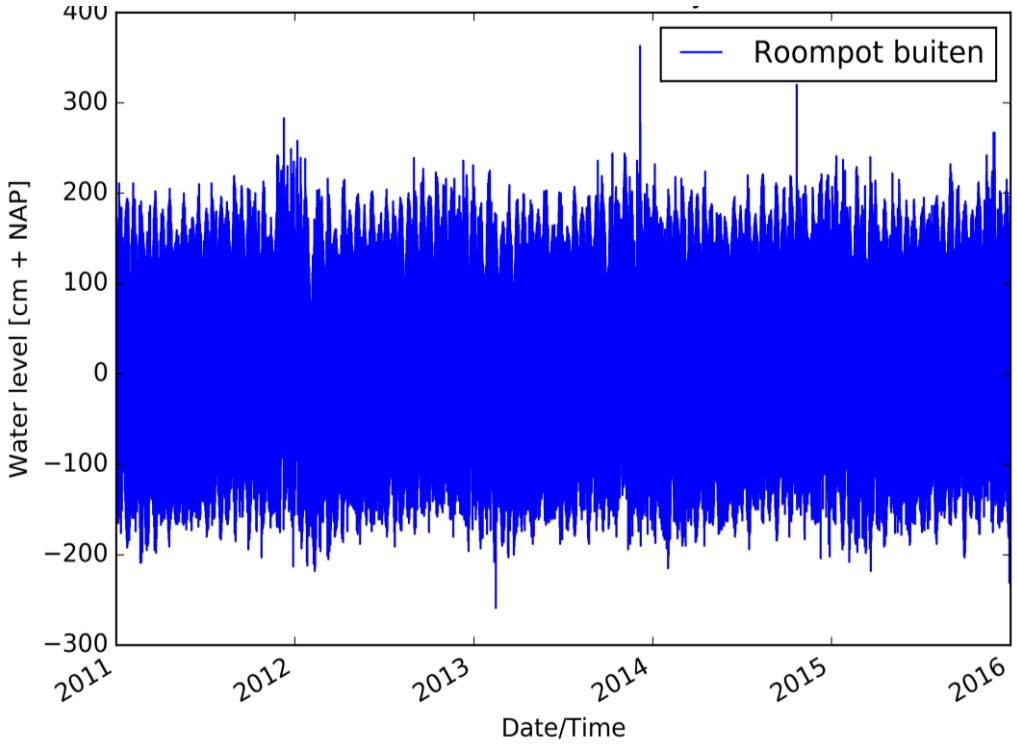
De waterstand bepaalt of de Oosterscheldekering (OSK) open of dicht gaat. Om kortdurende schommelingen in de waterstand te verwijderen is een 'rolling-window' toegepast: de maximale waterstand in de 12 uur voor of 12 uur na een betreffende meetwaarde wordt behouden. De gedachte hierachter is dat de OSK niet bij elke fluctuatie open en dicht gaat. Er zit een traagheid in regeling van de kering. Door enkel naar de maximale waterstand per 24 uur te kijken, zal de kering wel direct reageren als de waterstand boven een bepaalde drempel komt, maar zal conservatief zijn wanneer de waterstand weer onder de drempel komt. Op deze manier kan de OSK enkel één keer per 24 uur sluiten.

De drempel voor de waterstand die wordt gebruikt bij de analyse is NAP +3,0 m. Het is bekend dat de OSK zal sluiten wanneer de verwachte waterstand boven de NAP +3,0 m komt. Omdat de verwachte waterstand gebaseerd is op geschiedenis van de waterstand zal de over langere periode de gemeten waterstand volstaan. De discrepanties tussen waterstand en verwachte waterstand zullen uitmiddelen.

Waterniveau

In de volgende afbeelding is de ruwe meetreeks te zien. Duidelijk is te zien dat er twee pieken zijn in de waterstand, waarbij de waterstand boven de NAP +3,0 m komt. Tijdens de pieken is de waterstand meerdere keren boven de NAP +3,0 m gekomen.

Afbeelding I.20 Meetreeks Roompot Buiten

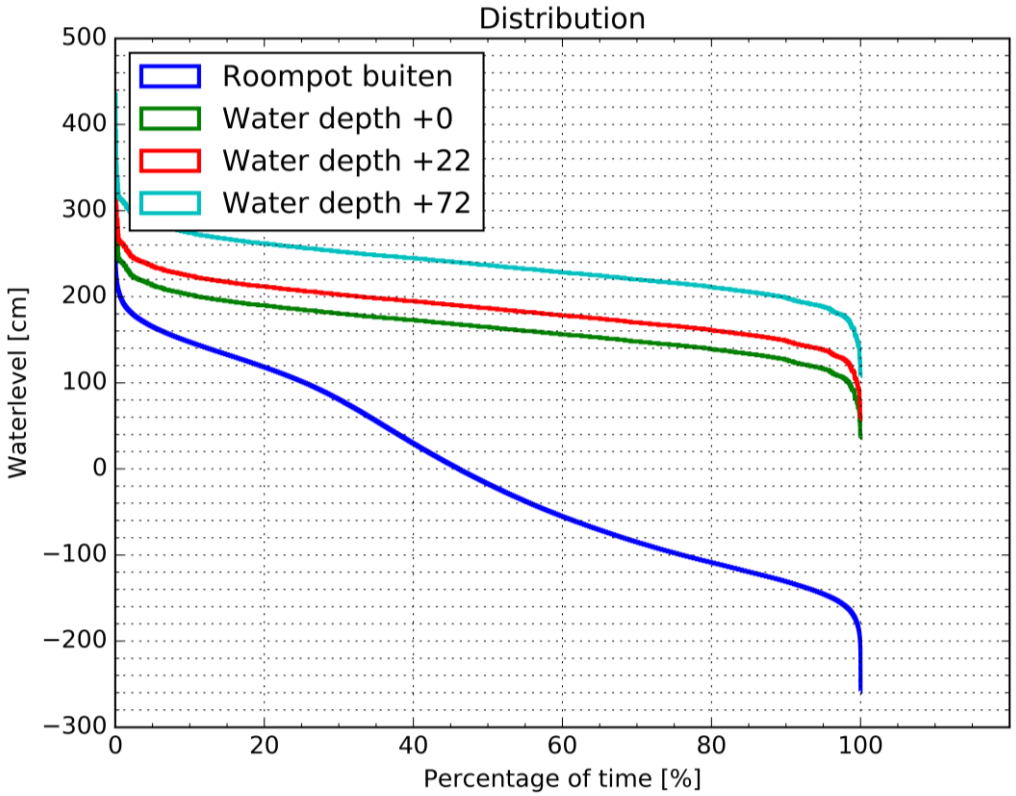


Rolling-window en zeespiegelstijging

In de volgende afbeelding is de verdeling van waterstanden weergegeven. De blauwe lijn geeft de distributie van de ruwe meetreeks. In de afbeelding is te zien dat een waterstand van NAP +0 m voor iets minder dan 50 % van de tijd voorkomt. De waterstand in 99,9 % van de tijd is groter dan NAP -2,5 m.

De groen, rode en turquoise lijnen geven de reeksen waarover een rolling-window is toegepast. Ze geven de verdeling van de maximale waterstand voor elke 24 uur. Respectievelijk is hier een zeespiegelstijging van 0 m, 0,22 m en 0,72 m toegekend. In alle reeksen is waterstand in 99,9 % van de tijd hoger dan NAP +0,5 m.

Afbeelding I.21 Verdeling van oorspronkelijke waterstand (Roompot buiten) en na het toepassen van een rolling 24-uurs window inclusief transformatie op basis van de verwachte zeespiegelstijging in de zichtjaren 2050 en 2100



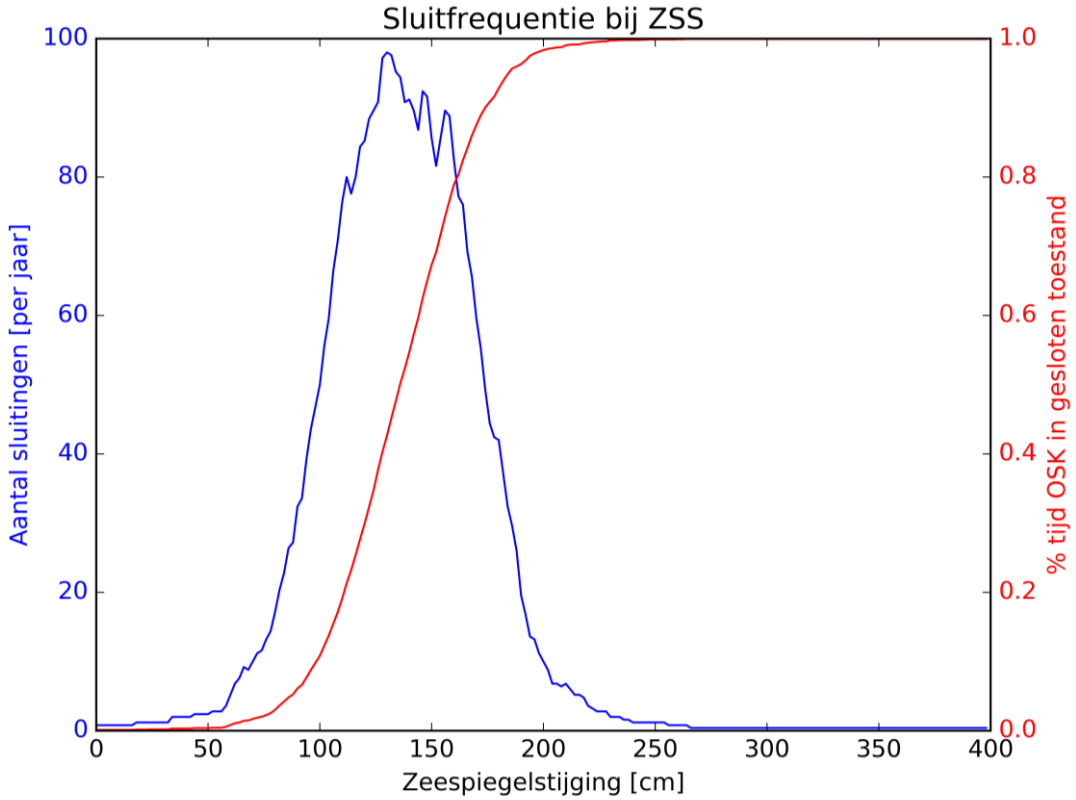
Sluitfrequenties

In de volgende afbeelding is het aantal sluitingen per jaar weergegeven waarvoor de OSK moet sluiten, omdat de waterstand boven de NAP +3,0 m uitkomt. Op de horizontale as is de ZSS weergegeven. Voor de zichtjaren 2050 en 2100 is dit respectievelijk 0,22 m en 0,72 m.

Wat opvalt is dat het aantal sluitingen tot 1,25 m fors oploopt van 2 naar bijna 100 sluitingen per jaar. Af en toe neemt het aantal sluitingen af, dit komt doordat periode van sluiting aan elkaar gekoppeld kunnen worden waardoor de kering tussentijds niet opengaat. Omdat de analyse op de gemeten reeks van 5 jaren is gedaan, kunnen deze toevalligheden ontstaan.

Na dat de zeespiegel 1,50 m is gestegen, wordt het aantal sluitingen minder. Dit komt omdat er langere periode zijn waarin de kering in gesloten toestand verkeerd dan in open toestand. Dit blijkt ook uit de in rood weergegeven lijn. Deze lijn geeft aan hoeveel procent van de tijd de kering gesloten is. Bij een stijging van +2,50 m zal de kering in 99.9 % van de tijd gesloten zijn.

Afbeelding I.22 Sluitfrequentie OSK bij ZSS



II

BIJLAGE: BEPALING HYDRAULISCHE BELASTINGEN DIJKEN

II.1 Locaties

De hydraulische belastingen zijn bepaald voor een twaalftal karakteristieke locaties langs de Oosterschelde (afbeelding II.1).Tabel II.1 geeft een koppeling tussen de locatie, het uitvoerpunt in de database en de dijkpaal.

Afbeelding II.I Toegepaste uitvoerlocaties bepaling hydraulische belastingen

Tabel II.1 Koppeling locaties met dijkpaal en uitvoerlocaties

Locatie	Uitvoerlocatie	Dijkpaal	Norm (afkeurgrens) [1/jaar]
Anna Jacobapolder	Oosterschelde_locatie0673	dp 599	3.000 jaar
Grevelingendam	Oosterschelde_locatie0750	dp 477	10.000 jaar
Het Stinkgat	Oosterschelde_locatie0609	dp 733	10.000 jaar
Krabbendijke	Oosterschelde_locatie0281	dp 1329	3.000 jaar
Oesterdam	Oosterschelde_locatie0375	dp 1156	10.000 jaar
Oosterland	Oosterschelde_locatie0807	dp 341	3.000 jaar
Pijlerdam	Oosterschelde_locatie0956	dp 11	1.000 jaar
Roompot	Oosterschelde_locatie0006	dp 1937	300 jaar
Sint-Maartensdijk	Oosterschelde_locatie0450	dp1017	10.000 jaar
t Oude dorp	Oosterschelde_locatie0563	dp 829	10.000 jaar

Locatie	Uitvoerlocatie	Dijkpaal	Norm (afkeurgrens) [1/jaar]
Veerhaven Kats	Oosterschelde_locatie0104	dp 1782	300 jaar
Zierikzee	Oosterschelde_locatie0866	dp 227	3.000 jaar

II.2 Database en programmatuur

De hydraulische belastingen zijn afgeleid met Hydra-NL versie 1.3.0. De toegepaste database is *HR2006_Oosterschelde_v01*.

De database bevat vertaling van de bedreigingen (waterstand Noordzee en wind) naar hydraulische belastingen aan de teen van de dijk. Deze vertaling is vooralsnog ongewijzigd ten opzichte van de HR2006, zodat deze database gebruikt kan worden. In het WBI2017 is de statistiek van de bedreigingen bijgewerkt. Deze statistiek is niet opgenomen in de database, maar in de achterliggende bestanden behorende bij het programma Hydra-NL.

II.3 Terugkeertijden

De terugkeertijden per locatie voor de faalmechanismen is opgenomen in tabel II.2. Conform WBI2017 dienen de hydraulische belastingen bepaald te worden bij de trajectnorm (tabel II.1). Uitzondering hierop vormt het beschouwde faalmechanisme Graserosie kruin en binnentalud (GEKB). Het hydraulisch belastingsniveau (HBN) voor dit faalmechanisme dient berekend te worden bij de faalkanseis op vakniveau. De faalkanseis op vakniveau is bepaald met:

$$P_{vak} = \frac{P_{eis}\omega}{N}$$

Waarin:

P_{eis}	norm traject	[1/jaar] (Tabel II.1)
ω	faalkansruimte voor Graserosie kruin en binnentalud (GEKB)	0,24 [-] (Tabel 4.1 S)
N	Lengte-effect	3
P_{eis}	eis op vakniveau	

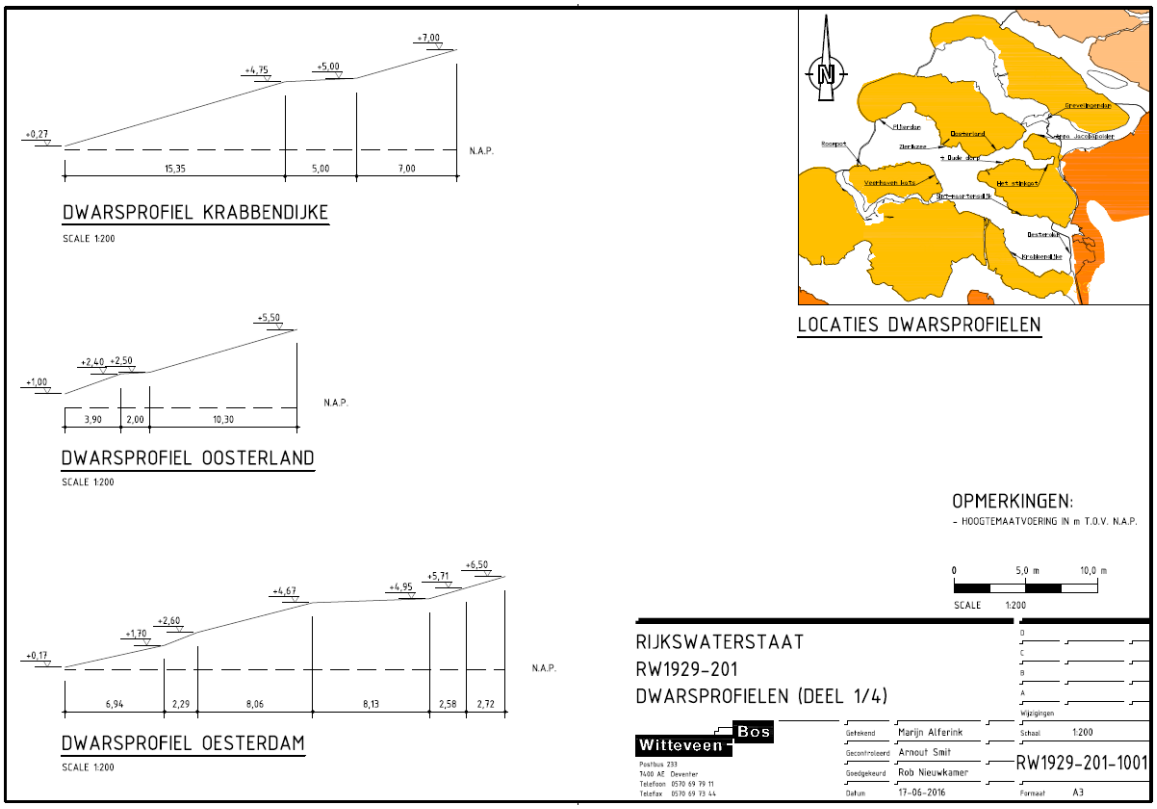
Tabel II.2 Terugkeertijden per faalmechanisme

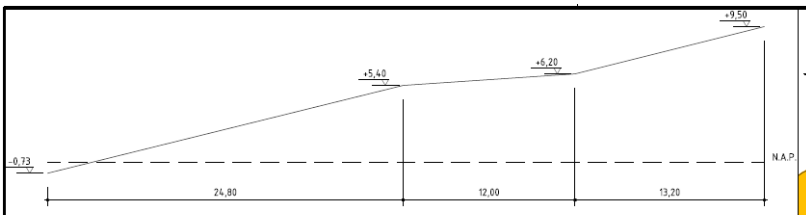
Locatie	Eis HBN	Eis overige faalmechanismen
Anna Jacobapolder	25.000 jaar	3.000 jaar
Grevelingendam	83.333 jaar	10.000 jaar
Het Stinkgat	83.333 jaar	10.000 jaar
Krabbendijke	25.000 jaar	3.000 jaar
Oesterdam	83.333 jaar	10.000 jaar
Oosterland	2.5000 jaar	3.000 jaar
Pijlerdam	8.333 jaar	1.000 jaar
Roompot	2.500 jaar	300 jaar
Sint-Maartensdijk	83.333 jaar	10.000 jaar
t Oude dorp	83.333 jaar	10.000 jaar
Veerhaven Kats	2.500 jaar	300 jaar
Zierikzee	25.000 jaar	3.000 jaar

II.4 Profielen

De profielen van de Oosterschelde dijken volgen in onderstaande profieltekeningen. Het betreffen dwarsprofielen van de volgende dijken:

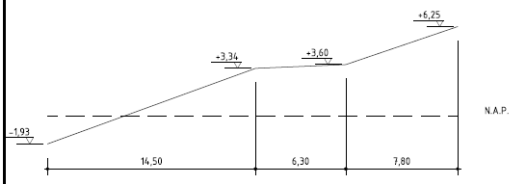
1 Krabbendijke, Oosterland, en Oesterdam;
2 Pijlerdam, Sint-Maartensdijk, en 't Oude Dorp;
3 Veerhaven Kats, Zierikzee, Het Stinkgat;
4 Grevelingendam, Anna Jacobapolder, en Roompot.





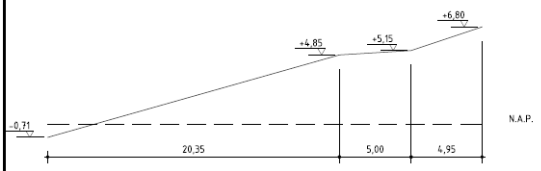
DWARSPROFIEL PIJLERDAM

SCALE 1:200



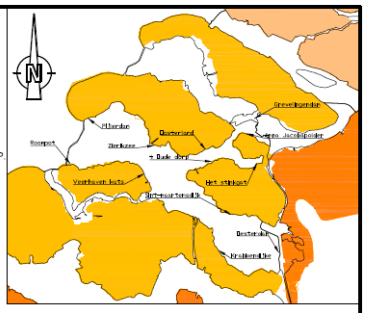
DWARSPROFIEL SINT-MAARTENSDIJK

SCALE 1:200



DWARSPROFIEL 'T OUDE DORP

SCALE 1:200



LOCATIES DWARSPROFIELEN

OPMERKINGEN:

- HOOGTEMAATVOERING IN m T.O.V. N.A.P.

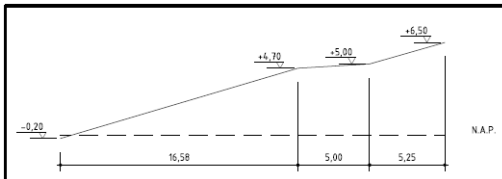
0 5,0 m 10,0 m

SCALE 1:200

RIJKSWATERSTAAT
RW1929-201
DWARSPROFIELEN (DEEL 2/4)

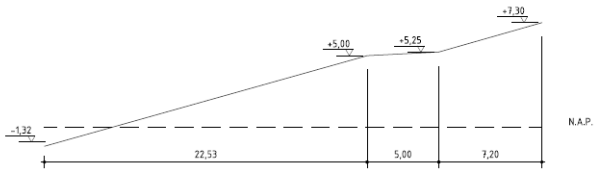
Witteveen+Bos
Postbus 233
7400 AE Deventer
Telefoon 0570 69 79 11
Telefax 0570 69 73 44

Getekend	Marijn Alferink	Schaal	1:200
Gecontroleerd	Arnout Smit		RW1929-201-1002
Goedgekeurd	Rob Nieuwkamer		
Datum	17-06-2016	Formaat	A3



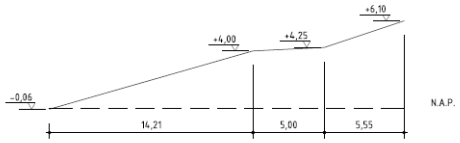
DWARSPROFIEL VEERHAVEN KATS

SCALE 1:200



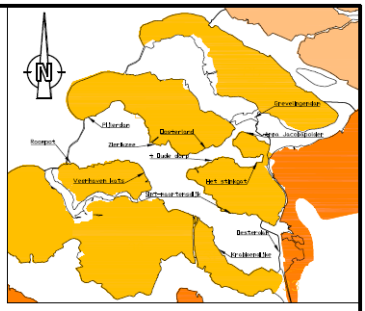
DWARSPROFIEL ZIERIKZEE

SCALE 1:200



DWARSPROFIEL HET STINKGAT

SCALE 1:200



LOCATIES DWARSPROFIELEN

OPMERKINGEN:

- HOOGTEMAATVOERING IN m T.O.V. N.A.P.

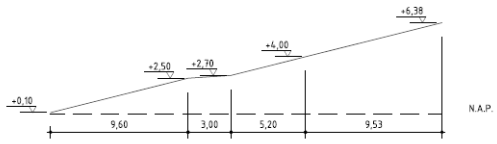
0 5,0 m 10,0 m

SCALE 1:200

RIJKSWATERSTAAT
RW1929-201
DWARSPROFIELEN (DEEL 3/4)

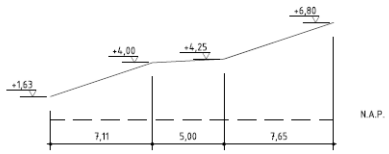
Witteveen+Bos
Postbus 233
7400 AE Deventer
Telefoon 0570 69 79 11
Telefax 0570 69 73 44

Getekend	Marijn Alferink	Schaal	1:200
Gecontroleerd	Arnout Smit		RW1929-201-1003
Goedgekeurd	Rob Nieuwkamer		
Datum	17-06-2016	Formaat	A3



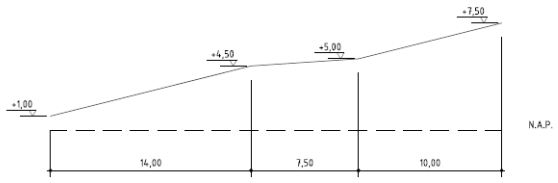
DWARSPROFIEL GREVELINGENDAM

SCALE 1:200



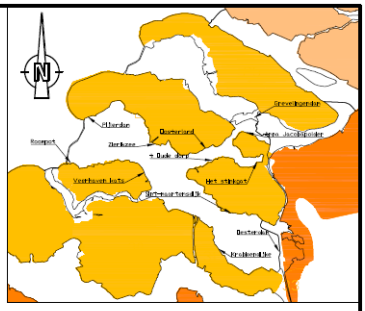
DWARSPROFIEL ANNA JACOBAPOLDER

SCALE 1:200



DWARSPROFIEL ROOMPOT

SCALE 1:200



LOCATIES DWARSPROFIELEN

OPMERKINGEN:

- HOOGTEMAATVOERING IN m T.O.V. N.A.P.

0 5,0 m 10,0 m

SCALE 1:200

RIJKSWATERSTAAT

RW1929-201

DWARSPROFIELEN (DEEL 4/4)

Witteveen + Bos

Postbus 233
7400 AE Deventer
Telefoon 0570 69 79 11
Telefax 0570 69 73 44

Getekend	Marijn Alferink	Schaal	1:200
Gecontroleerd	Arnout Smit		RW1929-201-1004
Goedgekeurd	Rob Nieuwkamer		
Datum	17-06-2016	Formaat	A3

Wijzigingen: D, C, B, A