

Veiligheidsbeoordeling van de Oosterscheldekering

Jan Stijnen en Vincent Vuik (HKV lijn in water), Krijn Saman en Jesse Simonse (Rijkswaterstaat), Henri Steenbergen en Raphaël Steenbergen (TNO)

In het kader van de Waterwet moet de Oosterscheldekering, inclusief alle aansluitende dammen, werkeilanden en de Roompotsluis, beoordeeld worden op zijn waterkerende functie. Deze beoordeling is in de afgelopen drie jaar uitgevoerd. Dit artikel geeft een kijkje in wat daar allemaal bij komt kijken. Het beschrijft enkele inhoudelijke uitdagingen, presenteert de voornaamste resultaten en deelt leerervaringen. De hoofdconclusies van de beoordeling zijn dat de faalkans van de Oosterscheldekering voldoet aan de norm (de ondergrenswaarde van 1/10.000 per jaar) en dat constructief falen van alle verschillende componenten relatief weinig effect heeft op de waterstandsstatistiek op de Oosterschelde.

De Waterwet schrijft voor dat de veiligheid van alle primaire waterkeringen elke twaalf jaar moet worden beoordeeld. Een van die primaire waterkeringen is de Oosterscheldekering, volledig in beheer bij Rijkswaterstaat Zee en Delta. Een consortium van HKV, TNO en Iv-Infra heeft gezamenlijk met Rijkswaterstaat de beoordeling van deze stormvloedkering uitgevoerd.

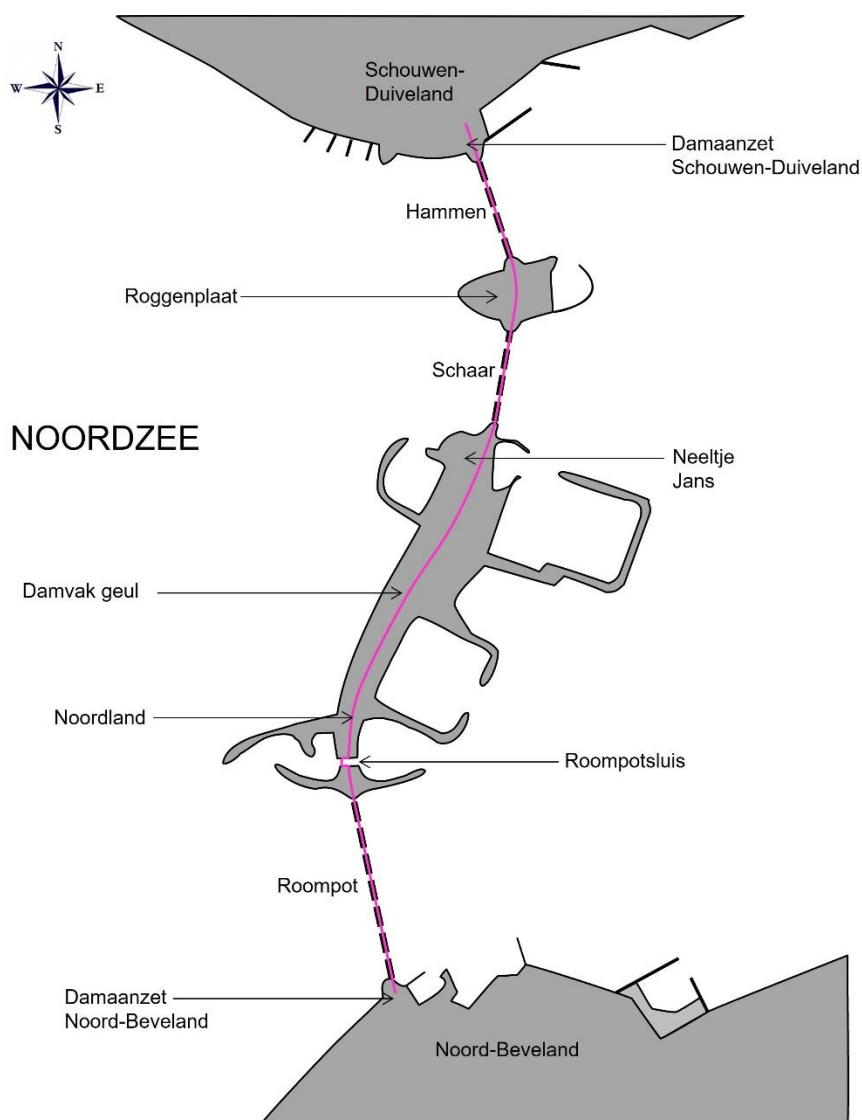
De Oosterscheldekering is een zogeheten voorliggende kering, die extreme belastingen op de dijken rond de Oosterschelde reduceert door stormvloed van zee buiten te houden. Verlies van waterkerend vermogen leidt bij voorliggende keringen niet altijd tot een overstroming van het achterland, maar tot een verhoging van de hydraulische belastingen op de achterliggende primaire waterkeringen. Voor voorliggende keringen is een maximaal toelaatbare faalkans opgenomen in de wet [1].

Behalve een faalkanseis moet de Oosterscheldekering ook voldoen aan afspraken over zogeheten prestatiepeilen, die zijn gemaakt met de beheerder van de dijken rond de Oosterschelde. Prestatiepeilen zijn waterstanden op diverse locaties in de Oosterschelde bij een bepaalde kans van voorkomen, waarin het effect van faalkansen van diverse onderdelen van de Oosterscheldekering (werktuigbouwkundig, elektrotechnisch en constructief falen) is verdisconteerd. De Oosterscheldekering moet er dus voor zorgen dat de waterstanden op de Oosterschelde bij extreme omstandigheden binnen de afgesproken grenzen blijven.

De veiligheidsbeoordeling van de Oosterscheldekering is dus anders dan voor andere primaire voorliggende keringen, omdat de OSK moet voldoen aan twee eisen: de faalkanseis op trajectniveau en de eis over de prestatiepeilen op de Oosterschelde. Daarnaast bezit de Oosterscheldekering allerlei unieke componenten, waardoor het standaard WBI2017-instrumentarium voor een beoordeling weinig zinvol is om te gebruiken.

De Oosterscheldekering

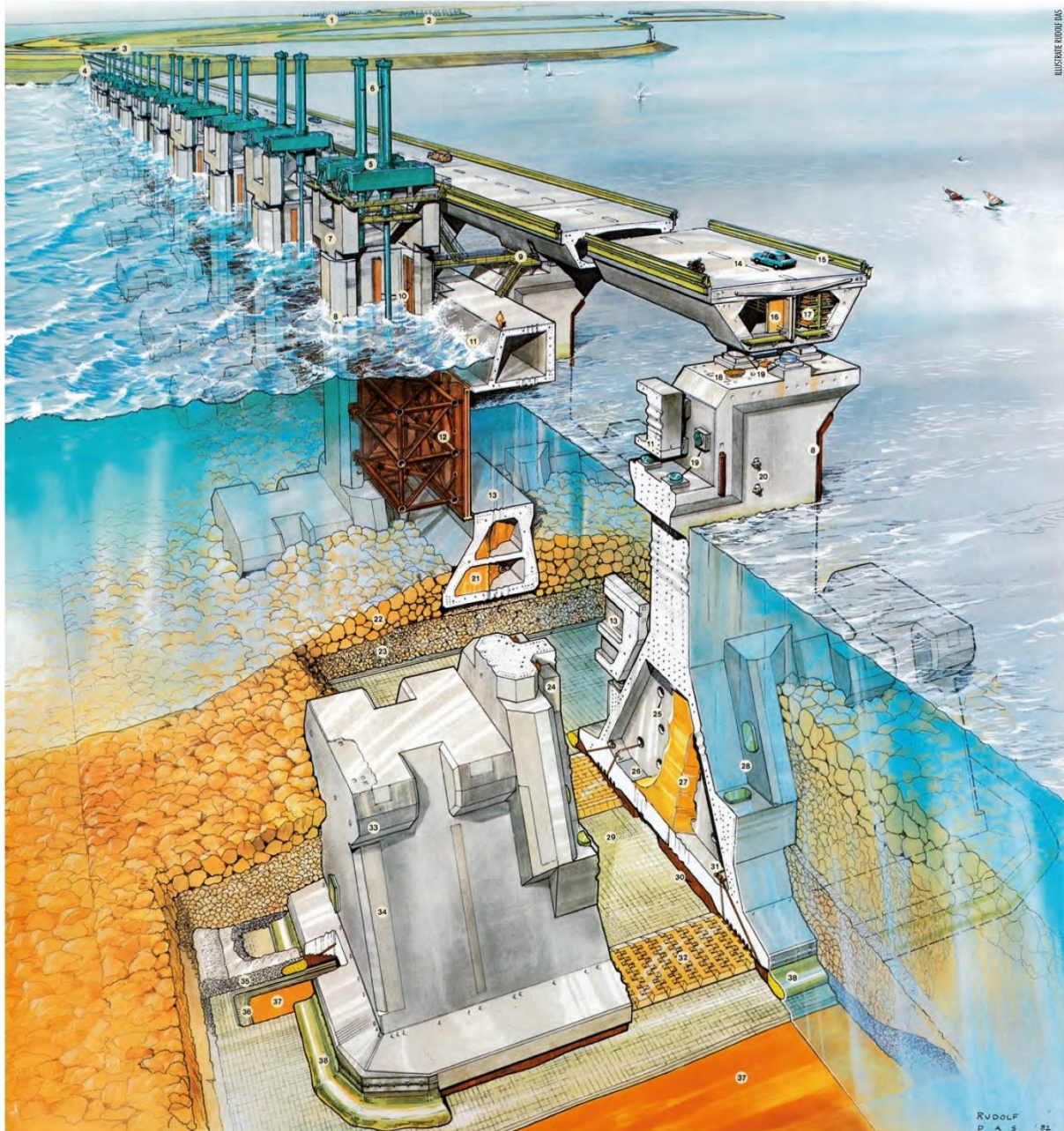
De Oosterscheldekering is de benaming van het normtraject dat de eilanden Noord-Beveland en Schouwen-Duiveland met elkaar verbindt. Het traject van ongeveer 9 kilometer bestaat uit een beweegbare stormvloedkering in drie geulen (Roompot, Schaar van Roggenplaat en Hammen), een scheepvaartsluis (Roompotsluis), twee waterkerende eilanden (Neeltje Jans en Roggenplaat), met elkaar verbonden via overgangsconstructies van damaanzetten en breukstenen dammen (afbeelding 1).



Afbeelding 1. De onderdelen van het normtraject Oosterscheldekering

De Oosterscheldekering bestaat uit een groot aantal onderdelen, waarbij de meeste onderdelen volledig uniek zijn voor deze kering (zie afbeelding 2). De betonnen pijlers zijn gefundeerd op de gestabiliseerde en geëgaliseerde bodem van de Oosterschelde. Tussen de pijlers bevinden 62 gewapende betonnen dorpelbalken en bovenbalken. Deze balken zijn opgelegd op en ingeklemd in de pijlers. De stalen schuiven die tussen de pijlers hangen bestaan uit een complex geheel van o.a. vakwerkliggers, schaalbeplating en schuifaanslagen. Rondom de pijlers en dorpelbalken is een stortstenen drempel aangebracht. Vanwege de sterke stroming is aan beide kanten van de kering over

een afstand van vele honderden meters een bodembescherming aangelegd. Bij een stormvloed sluiten de schuiven de doorstroomopeningen tussen de pijlers, dorpelbalken en bovenbalken af. De belasting op de schuiven door verval en golven wordt via de schuifaanslagen afgedragen op de pijlers. De bovenbalk vormt dan de kerende hoogte van de kering, voor de meeste locaties is dat een niveau van NAP+5,8m.



- | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 1 sluitgat Hammen | 11 bovenbalk | 21 zandvulling dorpelbalk | 31 groutleidingen |
| 2 sluitgat Schaar van Roggenplaat | 12 schuif | 22 topaagdrempel | 32 tegelmat |
| 3 schutsluis Roompot | 13 dorpelbalk | 23 kerndrempel | 33 hijsnokken |
| 4 breukstenendam als landhoofd | 14 verkeersweg | 24 oplegnokschuif | 34 beschermingslaag tegen stort drempelstenen |
| 5 cardanbalk draagt bewegingswerk | 15 vangrail | 25 tussenwandgaten voor zandvulling | 35 aanstorting grindzak |
| 6 hefcilinders | 16 apparatengalerij | 26 pijlerbodem | 36 ondermat |
| 7 opzetstuk | 17 leidingenstraat | 27 zandvulling pijler | 37 verdichte Oosterscheldebodem |
| 8 wrijfhout | 18 toegang tot pijler | 28 aanslagen/opleggingen dorpelbalk | 38 grindzak |
| 9 bordessen en trappen voor onderhoud | 19 opleggingen | 29 bovenmat | |
| 10 geleiding van schuif | 20 ankerpunten voor onderhoud drempel | 30 ondergroutvulling | |

Afbeelding 2. Opbouw van de Oosterscheldekering [2]

De functie van de Oosterscheldekering is het verlagen van hydraulische belastingen op de primaire waterkeringen rond de Oosterschelde. Tijdens storm op zee zorgt de combinatie van getij en stormopzet voor een hoge zeewaterstand in de monding van de Oosterschelde. De stormvloedkering zorgt dat deze hoge waterstanden slechts beperkt doorwerken op de Oosterschelde. Er treedt tijdens stormen wel golfoverslag op over de bovenbalken en er zijn diverse lekopeningen tussen de verschillende constructieonderdelen, maar omdat de Oosterschelde een groot bergend oppervlak heeft (350 km²), is het effect op de waterstand beperkt. Daarnaast worden de dijken rond de Oosterschelde niet belast door hoge en lange golven die binnendringen vanaf de Noordzee, maar alleen door lokaal op de Oosterschelde opgewekte windgolven.

De dominante belastingen op de Oosterscheldekering zelf bestaan uit waterstanden, verval en golven als gevolg van stormen op de Noordzee. Deze hydraulische belastingen moeten veilig kunnen worden weerstaan door de schuiven, pijlers en andere constructieve onderdelen van de Oosterscheldekering, evenals door de vaste waterkeringen en overgangsconstructies. Falen van onderdelen leidt tot een toename van de waterstanden op de Oosterschelde.

Werkwijze

Omdat de kering zo uniek is, is gekozen voor een volledige 'toets op maat'-aanpak. Daarbij zijn de volgende stappen gevolgd:

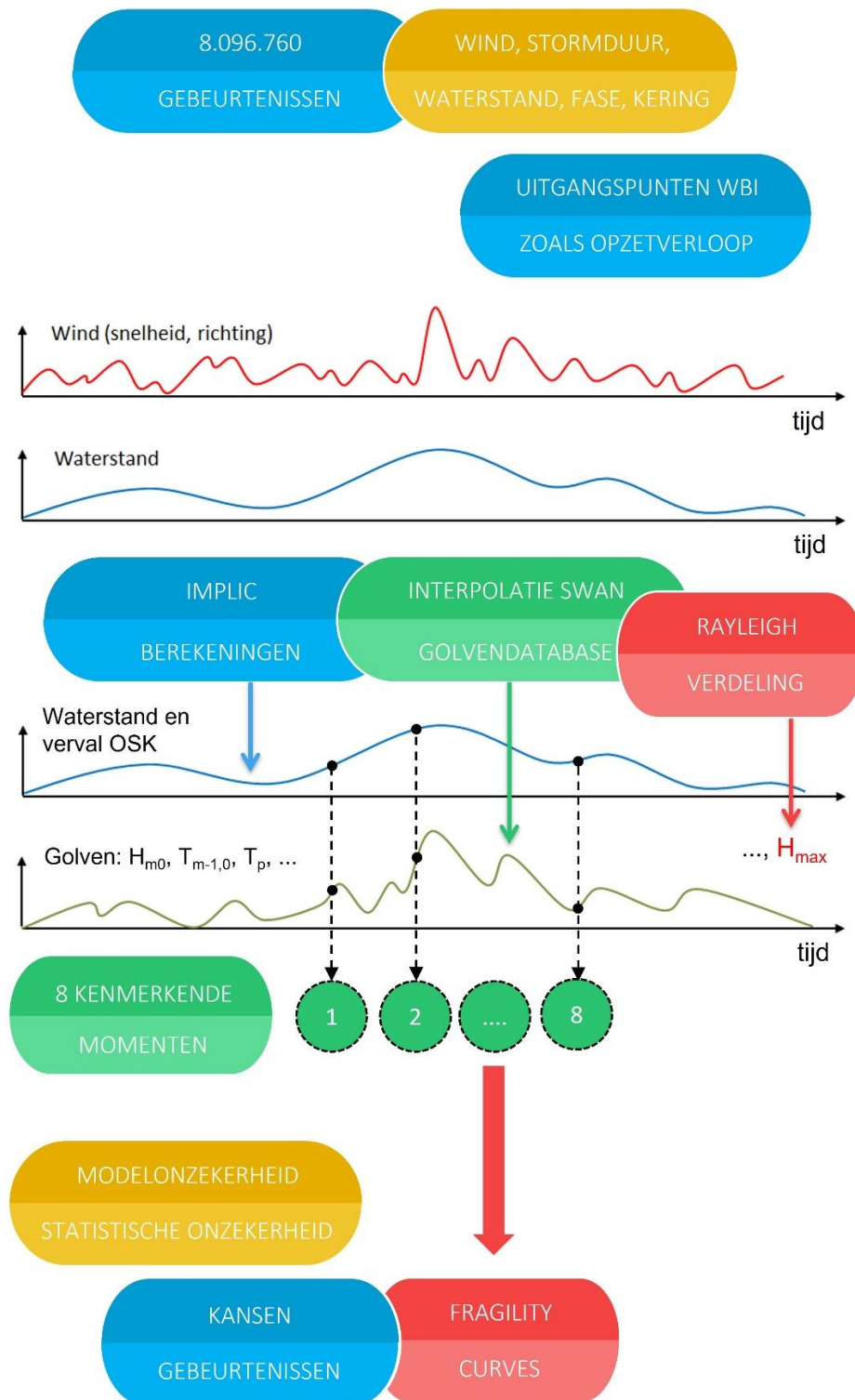
1. Op basis van modelberekeningen is gedefinieerd wanneer sprake is van 'falen' van de kering. Zoals eerder aangegeven hoeft bezwijken van een enkel onderdeel niet zonder meer problemen te geven voor de waterveiligheid. Als faaldefinitie is gehanteerd dat een constructief onderdeel van de gesloten kering zodanig bezwijkt, dat de kering zijn waterkerend vermogen verliest.
2. In een werkwijze van grof naar fijn is de kering daarna onderverdeeld in te beoordelen componenten en faalmechanismen: de decompositie.
3. Vervolgens is voor alle faalmechanismen onderzocht of deze een significante bijdrage leveren aan de faalkans op trajectniveau. Voor alle componenten en faalmechanismen is eerst nagegaan of de faalkansbijdrage relevant of juist verwaarloosbaar is. Bij een verwaarloosbare faalkansbijdrage is een verdere uitwerking niet nodig.
4. Voor de niet-verwaarloosbare faalmechanismen is een faalkans berekend door de statistiek van hydraulische belastingen te combineren met de statistiek van de sterkte voor dit faalmechanisme.
5. Tot slot zijn alle losse faalkansen van de verschillende faalmechanismen en componenten met elkaar gecombineerd. Deze zogenoemde 'assemblage' heeft uiteindelijk geleid tot een faalkans op trajectniveau (eis 1) en het berekenen van effecten op de waterstandsstatistiek op de Oosterschelde (eis 2).

Voor het uitvoeren van een veiligheidsbeoordeling is informatie nodig over zowel de hydraulische belastingen (zoals waterstanden en golven) als de sterkte van de kering.

Hydraulische belastingen

Voor de hydraulische belastingen is gebruik gemaakt van tijdsverlopen van een groot aantal waterstandsberekeningen (8 miljoen) voor verschillende combinaties van zeewaterstand, wind, stormduur, aantal niet-sluitende schuiven, etc. Deze zijn vervolgens gecombineerd met een groot

aantal golfberekeningen met het model SWAN om zo ook tijdsverlopen te krijgen met golfparameters. Per tijdsverloop van waterstand en golfcondities zijn tot slot op kenmerkende momenten (maximale waterstand, maximaal verval, maximale golfhoogte, etc.) de benodigde belastingsparameters voor de beoordeling bepaald. Elk tijdsverloop heeft zijn eigen kans van voorkomen, dat weer is meegewogen in de uiteindelijke bepaling van de totale faalkans. Ook is rekening gehouden met diverse model- en statistische onzekerheden.



Afbeelding 3. Het samenstellen van combinaties van hydraulische belastingen op kenmerkende momenten, als invoer voor de faalkansberekening voor constructieve elementen

Sterkte

Bij de beoordeling van de constructieve elementen van de stormvloedkering is de sterkte niet berekend op basis van gedetailleerde constructieve berekeningen. De benodigde inspanning daarvoor zou te groot zijn. Er is daarom op een slimme manier gebruik gemaakt van de oorspronkelijke ontwerpberekeningen die zijn vastgelegd in een groot aantal ontwerpdocumenten.

Voor de meeste constructieve componenten bestaan geen indicaties dat de actuele sterkte anders is dan de ontwerpsterkte. In recent modelonderzoek en inspecties is bijvoorbeeld nog geen vermoeding van het staal van de schuiven waargenomen. Daarom is het uitgangspunt gehanteerd dat de sterkte gelijk is aan de ontwerpsterkte, waarbij de ontwerpsterkte volgt uit de ontwerpbelasting, vermenigvuldigd met een veiligheidsfactor. In bepaalde gevallen is er wel rekening gehouden met nieuwe inzichten, zoals bijvoorbeeld de relatief lage vloeigrens van het staal in de schuiven en over de dwarskrachtcapaciteit van beton. Voor zulke onderdelen is in de berekeningen een lagere sterkte gehanteerd dan de ontwerpsterkte.

Constructief bezwijken

Bezwijken van een onderdeel vindt plaats als de belasting groter is dan de sterkte, waarbij de belasting gebaseerd is op de actuele hydraulische belastingen en de sterkte op de ontwerpbelasting. De vergelijking tussen belasting en sterkte gebeurt op basis van de belasting op een bepaald constructief element. Als het bezwijken ook daadwerkelijk leidt tot verlies aan waterkerend vermogen, is sprake van falen volgens de faaldefinitie.

Als voorbeeld wordt hier het falen van een bovenbalk (aangegeven met nummer 11 in afbeelding 2) gegeven. De bovenbalk van doorstroomopening Roompot-3 is ontworpen op een ontwerpbelasting van 333 kN/m, uitgedrukt als gelijkmatig verdeelde lijnbelasting op de balk. Na vermenigvuldiging met een veiligheidsfactor van 1,2 geeft dit een ontwerpsterkte van 400 kN/m. De betonnen bovenbalk bezwijkt als de hydraulische belastingen een kracht veroorzaken die groter is dan de sterkte. Er is dus een vertaling nodig van hydraulische randvoorwaarden (golven, waterstand, verval over de kering) naar een kracht in kN/m op de bovenbalk. Voor deze vertaling is het model Sainflou-OSK [3] toegepast. Dit model berekent het drukverloop over een verticale wand voor een combinatie van waterstand, verval, golfhoogte en golfperiode. Sainflou-OSK is een versie van het Sainflou-golfdrukmodel, specifiek afgeregeld op drukmetingen bij een schuif van de OSK. De lijnbelasting in kN/m is berekend door het drukverloop uit Sainflou-OSK te integreren over de hoogte van de bovenbalk. Zo kunnen belasting en sterkte met elkaar worden vergeleken.

Faalkans

De faalkans van een element volgt uit een probabilistische vergelijking tussen de statistiek van de belasting en statistiek van de sterkte. De definitie van belasting en sterkte verschilt per faalmechanisme. De statistiek van de belasting volgt uit het WBI2017. De statistiek van de sterkte volgt uit de ontwerpsterkte, waaromheen een onzekerheidsband is aangebracht, bijvoorbeeld op basis van een karakteristieke variatiecoëfficiënt voor de vloeigrens van staal.

Voor elk faalmechanisme is eerst onderzocht of dit een significante bijdrage levert aan de faalkans op trajectniveau. Als een faalkans voor een bepaald faalmechanisme op trajectniveau kleiner is dan 1 procent van de ondergrens van de trajectnorm (dus kleiner is dan 10^{-6} per jaar), is gesteld dat de faalkansbijdrage van dit faalmechanisme verwaarloosbaar klein is. Om dit te bepalen is voor een deel van de mechanismen een faalkansberekening uitgevoerd, terwijl voor een ander deel gekozen is voor een toetsing bij een bepaalde rekenwaarde voor de hydraulische belastingen. Voor de vaste waterkeringen binnen het traject (de eilanden en overgangsconstructies) is de grenswaarde van 1% toegepast als fictieve trajectnorm, waarna via de standaard faalkansbegroting alle gebruikelijke faalmechanismen voor dijken zijn getoetst.

Voor vrijwel alle componenten en faalmechanismen is geconcludeerd dat de faalkansbijdrage verwaarloosbaar klein is. Ook de dijken en dammen binnen het traject voldoen aan het criterium van de verwaarloosbare faalkansbijdrage. Drie componenten hebben een niet-verwaarloosbare faalkansbijdrage: (1) de vakwerkliggers van de schuiven, (2) de stompen in de schuiven (verbindingen tussen de schaalbeplating en de vakwerkliggers) en (3) de betonnen sponningen in de pijlers waar de schuiven hun belasting op afdragen via de schuifaanslagen.

Combineren van faalkansen

Het assembleren van de faalkansen voor alle vakwerkliggers, stompen en betonnen sponningen in de kering gebeurt in 3 stappen:

1. De faalkansen van de drie vakwerkliggers, de stompen en betonnen sponningen zijn eerst samengevoegd tot één faalkans per 'poortje' van de stormvloedkering, gegeven een bepaald tijdsverloop van een storm.
2. Daarna zijn de faalkansen voor alle 62 poortjes gecombineerd tot één faalkans voor het gehele normtraject, nog steeds gegeven het tijdsverloop van een storm.
3. Tot slot zijn de faalkansen voor alle stormen gecombineerd tot een faalkans per jaar voor het gehele traject.

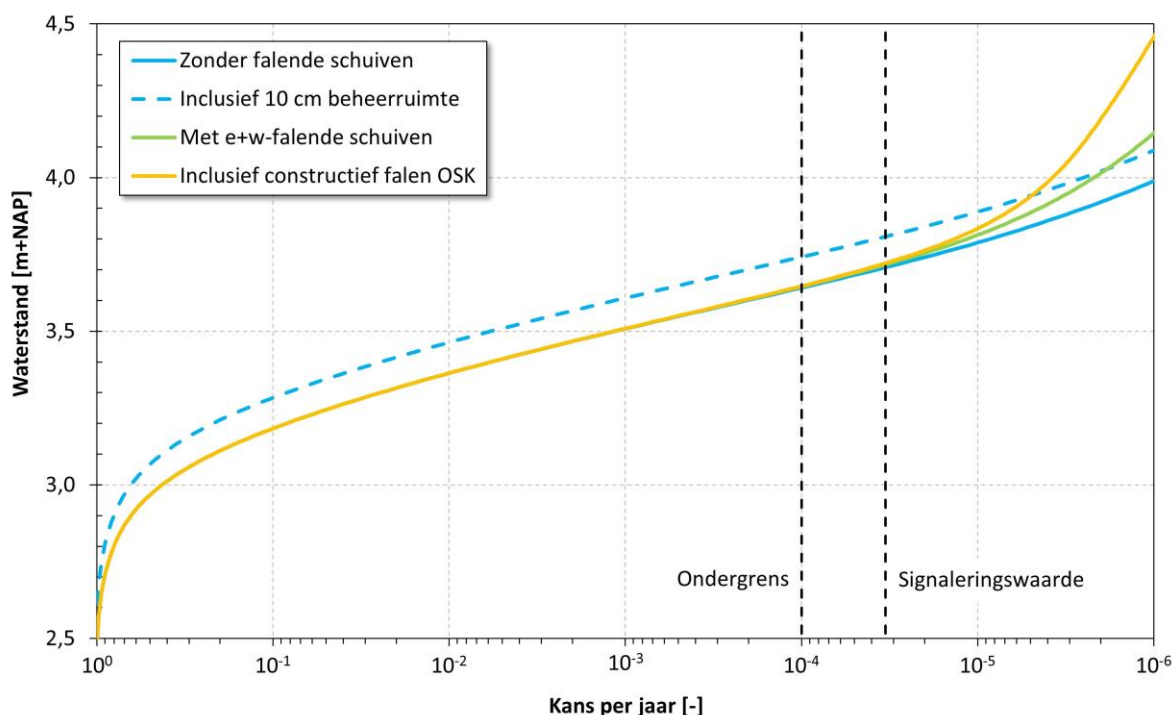
Doordat het assembleren per tijdsverloop van een storm is uitgevoerd, zijn ruimtelijke correlaties tussen de belasting op de verschillende componenten (binnen één storm) correct meegenomen.

Effecten op prestatiepeilen

De faalkansen van de 62 poortjes resulteren in een kans op één, twee, tot uiteindelijk 62 open poortjes als gevolg van constructief falen tijdens een bepaalde storm. Er zijn ook kansen bepaald dat een zeker aantal poortjes niet sluit door falen van elektrotechnische en werktuigbouwkundige onderdelen. Als al deze verschillende typen faalkansen bij elkaar worden gevoegd, moet de kering nog steeds voldoen aan de afspraken die zijn gemaakt over prestatiepeilen.

Prestatiepeilen worden berekend op diverse locaties langs de waterkeringen rondom de Oosterschelde. Om de voorgaande stappen te doorlopen en de uiteindelijke prestatiepeilen te bepalen is een modelinstrumentarium ontwikkeld, dat hier het ‘Prestatiepeilenmodel’ wordt genoemd. Afbeelding 4 toont een voorbeeld met de waterstandsstatistiek voor locatie Philipsdam-West. Het startpunt is een referentiesituatie zonder faalkansen van de OSK (de doorgetrokken blauwe lijn). Hierin zitten wel effecten van lekkage door de kering, golfoverslag over de kering en windopzet op de Oosterschelde, maar alle poortjes van de kering openen en sluiten volgens het protocol. Ten opzichte van deze referentiesituatie met perfect functionerende kering is een beheerruimte van 10 centimeter gedefinieerd (de gestreepte blauwe lijn), in samenspraak tussen Rijkswaterstaat en het waterschap Scheldestromen.

De kansen op niet-sluiten (e+w-falen) of constructief bezwijken van alle 62 poortjes in de OSK zorgen ervoor dat de waterstandsstatistiek omhoog schuift (groene of gele lijn). Hoe hoger de herhalingsstijd, hoe groter de invloed van faalkansen van de OSK wordt. Afsproken is om de waterstandsstatistiek af te lezen bij de norm van het dijktraject waar de beschouwde locatie voor ligt. Voor Philipsdam-West is de ondergrens 1/10.000 per jaar. Dit geeft een referentiepeil voor de referentiesituatie en een prestatiepeil bij de situatie inclusief faalkansen van de OSK. Als het prestatiepeil minder dan de 10 centimeter beheerruimte boven het referentiepeil ligt, voldoet de OSK aan de gemaakte afspraken. Uit afbeelding 4 blijkt dat dit inderdaad het geval is voor locatie Philipsdam-West. Bij herhalingsstijden van eens per miljoen jaar gaat ook constructief falen van de OSK significant bijdragen, met een verhoging van de waterstanden in de orde van 0,5m.



Afbeelding 4. Waterstandsstatistiek voor locatie Philipsdam-West voor een referentiesituatie zonder falende schuiven (blauwe lijn), met alleen elektrotechnisch en werktuigbouwkundig falen (groen) en met alle faalvormen, inclusief constructief falen van de OSK (geel)

Eindoordeel

Na een onderzoek van tweeënhalf jaar is met succes een volledige probabilistische beoordeling uitgevoerd. Daarbij zijn faalkansen van individuele componenten gecombineerd tot één faalkans voor het gehele traject. Het is gelukt om goed inzicht te krijgen in de veiligheid van het gehele normtraject. Het uiteindelijke veiligheidsoordeel luidt dat de Oosterscheldekering voldoet aan de ondergrenswaarde van de norm. De berekende faalkans op trajectniveau wordt daarbij gedomineerd door de faalkans van drie componenten van de Oosterscheldekering: (1) de vakwerkliggers van de schuiven, (2) de betonnen sponningen in de pijlers waar de schuiven hun belasting op afdragen via de schuifaanslagen, en (3) de stempen in de schuiven (verbindingen tussen de schaalbeplatingen en vakwerkliggers). Alle andere componenten leveren een verwaarloosbaar kleine bijdrage aan de faalkans op trajectniveau.

De faalkansen van de drie dominante componenten zijn berekend op basis van conservatieve uitgangspunten. Daaronder zijn de keuze van de strenge faaldefinitie voor eis 1 (de faalkans voor één component), de keuze voor steeds gebruiken van de grootste schuiven/sluitgaten bij falende delen van de kering en de keuze voor een relatief lage vloeigrens van het staal in de stempen en de vakwerkliggers. Gegeven de verschillende conservatieve uitgangspunten is de conclusie dat het veiligheidsoordeel robuust en stabiel is: de Oosterscheldekering voldoet tenminste aan de ondergrens.

De effecten op de prestatiepeilen zijn relatief klein om twee redenen:

- Alleen falen van een groot aantal poortjes leidt tot significante waterstandstoenames op het achterliggende Oosterscheldebekken.
- De invloed van de faalkans van de constructieve delen van de stormvloedkering hebben alleen significante invloed op waterstanden bij overschrijdingsfrequenties beduidend zeldzamer dan die van de norm van de achterliggende dijktrajecten.

Meer informatie over de veiligheidsbeoordeling is te vinden in het beoordelingsrapport, dat te downloaden is via de website van het Waterveiligheidsportaal [4].

Vooruitblik

Uit de veiligheidsbeoordeling volgt dat de eis over een faalkans op trajectniveau het meest strikt is voor de Oosterscheldekering, gegeven de gekozen faaldefinitie. Dit is interessant, omdat de eis over de prestatiepeilen eigenlijk het dichtst aansluit bij de functie van de Oosterscheldekering: het verlagen van hydraulische belastingen op de waterkeringen rond de Oosterschelde. In de komende jaren zal onderzocht worden of het wenselijk is om de (wettelijke) eisen aan de kering in toekomstige beoordelingsrondes aan te passen. Dankzij deze beoordeling zijn de instrumenten om dit onderzoek te doen, nu beschikbaar.

De veiligheidsbeoordeling heeft betrekking op de huidige situatie. Rijkswaterstaat gaat een vervolgonderzoek opstarten naar de effecten van zeespiegelstijging op de faalkans van de verschillende constructieve onderdelen van de kering, inclusief de doorwerking naar een veranderende waterstandsstatistiek op de Oosterschelde.

De Oosterschelde is het enige watersysteem in Nederland waarvoor bij de veiligheidsbeoordeling expliciet rekening gehouden is met het achterliggende gebied. Een dergelijke werkwijze is in principe

toepasbaar op alle voorliggende keringen, zoals de Haringvlietsluizen, Maeslantkering, Afsluitdijk en Houtribdijk. Falen van relatief kleine componenten hoeft niet even streng te worden beoordeeld als falen waarbij de veiligheid van het achterland in gevaar komt. Zo kan de beoordeling van de Oosterscheldekering dienen als inspiratiebron voor de veiligheidsfilosofie van voorliggende waterkeringen.

Referenties

1. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). *Ministeriële Regeling "Procedure beoordeling veiligheid primaire waterkeringen"*.
2. Illustratie van Rudolf Das, in 'De Oosterschelde bracht het keerpunt'. *De Ingenieur*, 30 september 2011. <https://www.deingenieur.nl/artikel/de-oosterschelde-bracht-het-keerpunt>
3. Jongeling, T.G.H. (2013). *Golfdrukmodel voor schuiven van de Oosterscheldekering; model t.b.v. vermoeiingsanalyse schuiven*. Deltares rapport 1207853-000, november 2013.
4. HKV, TNO en Iv-Infra (2022). *Wettelijke beoordeling traject 218, Oosterscheldekering. Veiligheidsrapportage*. Versie 4.0 (definitief). HKV, TNO en Iv-Infra in opdracht van Rijkswaterstaat Zee en Delta. Zaaknummers RWS 31152255, 31152256, HKV-project PR4119 en TNO-project 060.38932, Lelystad, 20 september 2022. <https://waterveiligheidspotaal.nl>.