

Bijlage A Kenmerkende stabiliteitsrelatie

In de pilot is de volgende stabiliteitsrelatie aangenomen die geldig is voor de globale toetsing, om het effect van de scenario's op de hoeveelheid af te keuren dijkvakken in te schatten:

$$\frac{1}{F} \frac{H_s}{\Delta D_{\min}} = k \cdot \xi^{\frac{2}{3}}$$

$$\text{met } \xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L_0}} \text{ en } L_0 = \frac{9.81 T_p^2}{2\pi}$$

waarin:

- H_s = significante golfhoogte [m]
- T_p = piekperiode [s]
- Δ = relatieve dichtheid [-]
- D_{\min} = minimaal benodigde dikte [-]
- k = factor voor de stabiliteitsrelatie, bij Anamos is deze maximaal 6 [-]
- α = taludhelling [°]
- L_0 = golflengte op diep water [m]
- ξ = brekerindex [-]
- F = stabiliteitsverhogende factor voor oriënterende berekening als gevolg van inklemming, etc. (zie hoofdstuk 6).

Omschrijven leidt tot :

$$D_{\min} = \frac{1}{F} \left(H_s T_p \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{\Delta k} (\tan \alpha)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{9.81}{2\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

De kenmerkende belasting, S_k , is als volgt gedefinieerd:

$$S_k = \frac{1}{F} \left(H_s T_p \right)^{\frac{2}{3}}$$

Bijlage B Bepaling van waterstanden met IMPLIC

De bepaling van de waterstand op de Oosterschelde is zowel bij gesloten als bij geopende kering complex. Daarom wordt gebruik gemaakt van een bestaand hydraulisch model: IMPLIC. Dit model is geijkt voor de Oosterschelde en wordt binnen de bestaande beheersstrategie van de kering gebruikt als basis. Hierin zijn de sluitstrategie, de hydraulische eigenschappen van de Oosterschelde en de kering opgenomen.

Alle basisparameters, die het waterstandsverloop langs de Oosterschelde bepalen, kunnen sterk variëren. Er zijn oneindig veel combinaties van de basisparameters denkbaar die evenzoveel mogelijke waterstanden langs de Oosterschelde opleveren. Om alle variaties probabilistisch te kunnen doorrekenen is met IMPLIC voor ieder pilotvak een transformatiematrix gevuld. Hiermee kunnen de waterstanden op de Oosterschelde worden gevonden, die optreden bij discrete combinaties van de basisparameters.

Om voor iedere willekeurige optredende hydraulische situatie de bijbehorende waterstanden op de Oosterschelde te vinden zou tussen alle basisparameters moeten worden geïnterpoleerd. Zo zou een continue overdrachtsfunctie ontstaan. Vanwege het aantal basisparameters zou dit een 7-dimensionale interpolatie noodzakelijk maken. Deze methodiek is versimpeld door alleen tussen de basisparameters te interpoleren, die de waterstand langs de Oosterschelde het meest beïnvleden: de windsnelheid en de maximale waterstand aan de buitenzijde.

Voor de maximale windsnelheid en de maximale waterstand aan de buitenzijde van de kering zijn de volgende waarden berekend, waartussen geïnterpoleerd wordt:

- maximale windsnelheden buiten de kering: 10, 20, 30, 40, 50 m/s
- maximale waterstanden aan de buitenzijde van de kering:
NAP +1.50, +2.50, +3.50, +4.50, +5.50, +6.50 meter

De overige basisparameters zijn opgedeeld in meerdere discrete intervallen. De discrete intervallen worden gekenmerkt door kenmerkende waarden, waarvoor IMPLIC-berekeningen zijn gemaakt. Als bijvoorbeeld de heersende windrichting binnen een bepaald interval valt, hoort daarbij de IMPLIC-berekening van de windrichting die dat interval kenmerkt.

- windrichtingen: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°
deze windrichtingen kenmerken respectievelijk de volgende intervallen: 337.5° tot 22.5°, 22.5° tot 67.5°, 67.5° tot 112.5°, etc.
- faseverschil: -260, 0 en 260 minuten. Deze faseverschillen kenmerken de volgende intervallen: -372 tot -124, -124 tot 124 en 124 tot 372 minuten.
- duur windopzet: 20, 40, 60, 80 en 100 uur. Deze duren kenmerken de volgende intervallen: 0 tot 30, 30 tot 50, 50 tot 70, 70 tot 90 en groter dan 90 uur.
- noodsluiter: ja of nee

Voor het astronomisch hoogwater is het gemiddeld astronomisch hoogwater genomen en is niet gevarieerd. De maximale waterstand aan de buitenzijde van de kering is gelijk aan de som van de maximaal voorspelde waterstand en de voorspelonnauwkeurigheid.

In IMPLIC gelden de waterstanden bij het station OS11 als randvoorwaarde. Bij dit station, dat enkele kilometers zeewaarts van Roompot Buiten ligt, is de invloed van de kering (reflecties, opstuwing, etc) verwaarloosbaar.

In Tabel 6 is aangegeven welke uitvoerpunten zijn toegepast bij de pilotvakken:

Pilot-vak	Gebied	naburig dorp/stad	IMPLIC knooppnr.	IMPLIC puntnr.
1	Schouwen Duivenland	Zierikzee	76.1	8
2	Noord Beveland	Wissekerke	43.2	1
3	Zuid Beveland	Kattendijke	97.1	3
4	Tholen	Strijenham	151.2	4
5	St. Philipsland	Sluis	113.2	6

Tabel 6: IMPLIC knooppnummers toegepast voor de pilotvakken.

Bijlage C Bepaling golfparameters met SWAN

Bij de bepaling van de golfbelasting op de steenbekledingen langs de Oosterschelde wordt gebruik gemaakt van de meest recente rekenresultaten van SWAN [10]. Deze rekenresultaten vormen tevens de basis voor de afleiding van de reeds afgegeven randvoorwaarden [9]. SWAN is een programma dat op basis van een model van de bodemligging van de Oosterschelde met een twee dimensionaal rekenrooster golfparameters berekent. De golfparameters zijn afhankelijk van de heersende waterstand, windsnelheid en -richting, inkomende golven (deining) en stroming.

De SWAN-berekeningen zijn beschikbaar voor de waterstanden NAP, NAP + 2.0 meter en NAP + 4.0 meter. Bij de SWAN-berekeningen is aangenomen dat de windsnelheid op de Oosterschelde 1 m/s lager is dan de windsnelheid bij Vlissingen. Evenals bij de afgegeven randvoorwaarden door RIKZ [9] wordt er een extra correctie voor de piekperiode toegepast, door 1 seconde bij de piekperiode op te tellen. Deze correctie houdt verband met een vergelijking met metingen, die een hogere periode lieten zien.

Identiek aan de IMPLIC-berekeningen is een transformatiematrix opgesteld op basis van reeds beschikbare SWAN-resultaten. Hiermee kan de relatie worden gelegd tussen de waterstand, windsnelheid en windrichting enerzijds en de golfparameters (H_s en T_p) anderzijds. Tussen de windsnelheid en de waterstand wordt geïnterpoleerd.

Invloed van de kering

Bij de golfberekeningen is de stand van de stormvloedkering van belang. Bij geopende kering kan deining doordringen in de Oosterschelde. Bovendien treden stroomsnelheden op als gevolg van getij, die van invloed zijn op de golfparameters. In de reeds gemaakte berekeningen is aangenomen dat voor de waterstanden NAP en NAP + 2.0 meter de kering open is. Bij NAP + 4.0 meter is de kering gesloten en treedt geen invloed van stroming of deining op.

In de SWAN-resultaten is de invloed van stroming apart in rekening gebracht. Deze invloed moet worden gesuperponeerd op de rekenresultaten van de transformatiematrix, wanneer de kering geopend is. In het probabilistische scenario wordt het moment waarbij de kering gesloten wordt en waarbij de invloed van de stroming verwaarloosbaar wordt nauwkeuriger in rekening gebracht dan bij het basisscenario. De stormvloedkering wordt gesloten als de waterstand bij de kering (inclusief de voorspelfout) hoger is dan NAP + 3.0 meter.

De relatie tussen de maximale waterstand bij OS11 en Hoek van Holland is afgeleid in Bijlage A. Uit een analyse van gelijktijdige metingen is een relatie afgeleid tussen de maximale waterstand bij Hoek van Holland en Roompot Buiten. Uit een combinatie van beide relaties blijkt dat een maximale waterstand bij Roompot Buiten van NAP + 3.00 meter overeenkomt met een maximale waterstand bij OS11 van NAP + 2.70 meter.

Uitvoerlocaties SWAN

Met SWAN zijn de golfparameters berekend voor ongeveer 1000 locaties op 50 meter afstand van de teen van de dijk. Per dijkvak zijn de golven op ongeveer 3 locaties berekend. In de deterministische berekening van de randvoorwaarden is door RIKZ reeds de maatgevende SWAN-locatie per dijkvak bepaald. In de pilot wordt dezelfde locatie als maatgevend aangehouden. Deze locaties zijn in Tabel 7 gegeven:

Pilot-vak	Gebied	naam dijkvak	naburig dorp/stad	SWAN punt
1	Schouwen Duivenland	ingang havenkanaal	Zierikzee	879
2	Noord Beveland	inlaag	Wissekerke	55
3	Zuid Beveland	polder Brede Watering	Kattendijke	205
4	Tholen	Schakerloopolder	Strijenham	431
5	St. Philipsland	Willempolder	Sluis	660

Tabel 7: Uitvoerpunten van SWAN toegepast voor de pilotvakken.

Bijlage D Wind-waterstandstatistiek volgens het Volkermodel

In deze bijlage wordt het Volkermodel beschreven en tevens aangegeven welke correcties moeten worden toegepast zodanig dat het model toepasbaar is voor de Oosterschelde.

Volkermodel

Het Volkermodel is geldig voor Hoek van Holland en is als volgt opgebouwd, volgens [5]: Het gaat uit van de kans van optreden van verschillende windrichtingssectoren, φ_i , die 22.5 ° groot zijn:

$$f(\varphi = \varphi_i)$$

De kansverdeling per getij van de waterstand bij Hoek van Holland, h_{HH} , gegeven de windrichting luidt:

$$f(H_{HH} > h | \varphi = \varphi_i) = 1 - \exp \{ -\exp [- (h - A_{h\varphi}) / B_{h\varphi}] \}$$

De kansverdeling van de windsnelheid, V , wordt weergegeven door de som van twee kansverdelingen: een deel dat gecorreleerd is met de waterstand en een deel dat ongecorreleerd is. Het ongecorreleerde deel is aangegeven als W .

$$V = W + \rho / b (h_{HH} - A_{h\varphi}) / B_{h\varphi}$$

Voor het deel dat niet gecorreleerd is met de waterstand (W) geldt:

$$f(W < w) = \exp \{ -\exp \{ (-a - bw) / M \} \}$$

De waarden voor $A_{h\varphi}$, $B_{h\varphi}$, a , b , ρ , M zijn afhankelijk van de windrichting φ en zijn gegeven in Tabel 8:

windrichting	kans	A(h)	B(h)	a	b	pho	M
22.5	0.0453	1.14	0.072	-9.6	1	0	1.21
45	0.0558	1.11	0.078	-9.6	1	0	1.1
67.5	0.0645	1.06	0.052	-9.3	1	0	1.1
90	0.0576	1.05	0.065	-9.2	1	0	1.1
112.5	0.0415	0.82	0.098	-8.8	1	0	1.14
135	0.0445	1.16	0.047	-8	1	0	1.83
157.5	0.0583	1.11	0.073	-8.6	1	0	1.37
180	0.0746	1.16	0.087	-9.2	1	0	1.55
202.5	0.0908	1.27	0.063	-10.7	1	0	1.6
225	0.0961	1.32	0.109	-1.72	0.39	0.67	1
247.5	0.091	1.38	0.119	-1.46	0.33	0.56	1
270	0.076	1.17	0.25	-1.03	0.24	0.5	0.67
292.5	0.0576	1.08	0.304	-1.13	0.3	0.67	0.67
315	0.0509	1.05	0.326	-1.16	0.3	0.68	0.67
337.5	0.0496	1.05	0.261	-1.5	0.4	0.78	0.67
360	0.0472	1.08	0.185	-1	0.3	0.36	0.67

Tabel 8: Waarden voor de parameters van het Volkermodel per windrichting volgens [5]

Voor de jaarmaxima over alle windrichtingen wordt de kansverdeling volgens Volker gegeven door:

$$f_{\text{jaar}}(H_{HH} > h) = 1 - \exp \{ -\exp [- (h - 2.2) / 0.33] \}$$

Transformatie van kansen per getij naar kansen per jaar

Voor de stabiliteit van de steenbekledingen zijn veiligheidsnormen gegeven in "kansen per jaar". Daarom moet de waterstandsstatistiek per windrichting worden getransformeerd van "kansen per getij" naar "kansen per jaar". Hier wordt gebruik gemaakt van de afleiding die is gehanteerd in de case-studies van de Marsroute. Hierbij wordt vanuit gegaan dat er 353 hoogwaters per jaar voorkomen in het stormseizoen. De manier van transformatie is gelijk aan "Case study Noord Schuddeland" [1]

$$f_{\text{jaar}}(H_{\text{HvH}} > h | \varphi = \varphi_i) = 1 - \exp \{ -\exp [- (h - (A_{h\varphi} + B_{h\varphi} \ln 353)) / B_{h\varphi}] \}$$

Transformatie van windsnelheden

Er is een transformatie van windsnelheden nodig om twee redenen:

1. De statistiek van windsnelheden volgens het Volkermodel komen niet overeen met Vlissingen.
2. De windstatistiek wordt volgens Volker bepaald op tijdstippen van hoog water. Er wordt verwaarloosd dat de maximale windsnelheid bij lagere waterstanden kan optreden. Voor de belasting op de steenbekledingen zijn deze maximale windsnelheden van belang.

De windsnelheden van het Volkermodel worden gecorrigeerd door vermenigvuldiging met een factor, zodanig dat de gecorrigeerde windsnelheidsstatistiek rond de 1/4000 situatie overeenkomt met de statistiek van de maximale windsnelheden bij de Vlissingen. Deze correctiefactor verschilt per windrichting en is gelijk aan de 1/4000 windsnelheid bij Vlissingen gedeeld door de 1/4000 windsnelheid van het Volkermodel (Schiphol). Voor de correctiefactoren voor de windsnelheid per windrichting wordt verwezen naar Tabel 9.

windrichting	1/4000 windsnelheid		correctiefactor
	Vlissingen	Volker	
30	20	16	1.25
60	21	16	1.31
90	20	15	1.33
120	19	15	1.27
150	20	18	1.11
180	24	18	1.33
210	29	20	1.45
240	32	35	0.91
270	34	36	0.94
285	33	33	1
300	32	32	1
315	29	34	0.85
330	26	28	0.93
360	22	24	0.92

Tabel 9: Correctiefactoren voor de windsnelheid

Transformatie van waterstanden

De kansverdelingen volgens Volker gelden voor Hoek van Holland. Om deze te kunnen toepassen op de Oosterschelde moeten de waterstanden worden vertaald naar het station OS11, zeewaarts van Roompot, die als rand geldt voor de IMPLIC-berekeningen.

Bij OS11 heeft RIKZ statistiek afgegeven voor verschillende windrichtingsectoren. Het probleem is echter dat deze sectoren niet overeenkomen met de 22.5° indeling van Volker. Bij gebrek aan aansluitende statistiek wordt de volgende aanpak aangehouden:

- de omnidirectionele waterstandstatistiek van Volker wordt vertaald naar OS11, zodanig dat deze overeenkomt met de omnidirectionele waterstandstatistiek van RIKZ bij OS11.
- de verdeling van de kansbijdragen over de windrichtingen wordt volgens Volker uitgevoerd.
- de vertaling van de waterstanden voor omnidirectionele statistiek wordt ook toegepast op de richtingsafhankelijke statistiek van Volker voor alle windrichtingen.

De correctie van de waterstand van Hoek van Holland naar OS11 geschiedt in een aantal stappen:

1. Bij OS11 is de omnidirectionele statistiek gegeven in een frequentieverdeling per jaar:

$$F_{\text{jaar,OS11}}(h) = 7.136 \cdot \exp \left((-h / 0.228)^{0.98} + (2.2 / 0.228)^{0.98} \right)$$

2. Per getij kan er maar 1 maximale waterstand voorkomen. Er treden jaarlijks 700 getijden op en dus 700 maxima per jaar.
3. Per waterstand wordt de overschrijdingsfrequentie per jaar teruggeschaald naar een overschrijdingskans per getij:

$$f_{\text{getij,OS11}}(h) = F(h) / 700$$

4. De overschrijdingskans per getij wordt vertaald naar een overschrijdingskans per jaar:

$$f_{\text{jaar,OS11}}(h) = 1 - (1 - f_{\text{getij}}(h))^{700}$$

Dit is 1 minus de kans dat in alle getijden de waterstand h onderschreden wordt. Er blijkt dat de overschrijdingskans overeenkomt met de overschrijdingsfrequentie voor waterstanden boven NAP + 3.0 meter. Tevens blijkt dat de overschrijdingskans weinig gevoelig is voor het aantal getijden. Als bijvoorbeeld alleen het winterhalfjaar wordt beschouwd wordt het aantal getijden 350, in plaats van 700. De overschrijdingskansen veranderen dan bijna niet.

5. De waterstand bij OS11 volgt uit een vertaling van de waterstand bij Hoek van Holland:

$$h_{\text{OS11}} = a h_{\text{HvH}} + b$$

6. De factoren a en b worden zodanig ingeschat dat de overschrijdingskansverdeling per jaar bij Hoek van Holland met de vertaling naar OS11 overeenkomt met de beschikbare kansverdeling bij OS11. Hierbij is aangenomen dat beide kansverdelingen volledig gecorreleerd zijn. Dit houdt in dat een waterstand bij Hoek van Holland een gelijke kans van overschrijden heeft als de bijbehorende vertaalde waterstand bij OS11. Zodat:

$$f_{\text{jaar,OS11}}(h_{\text{OS11}}) = f_{\text{jaar,HvH}}(a h_{\text{HvH}} + b)$$

Er blijkt te gelden: $h_{\text{OS11}} = 0.745 h_{\text{HvH}} + 1.04$.

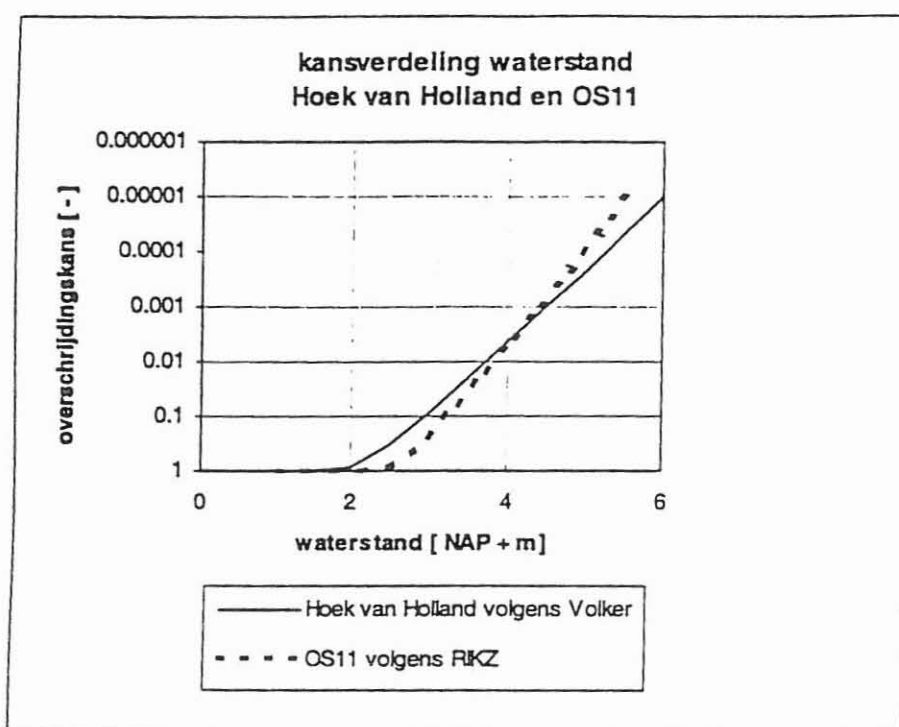
Begrenzing van de transformatie

Onder de drempelwaarde van NAP + 2.20 meter is de statistiek voor OS11 niet meer geldig.

De overeenkomstige waterstand bij Hoek van Holland is NAP + 1.56 meter. Dan is sprake van dagelijkse omstandigheden, die gemiddeld met een hogere frequentie dan 7.14 keer per jaar voorkomen. Dit komt overeen met een kans op overschrijden van nagenoeg 1.0 per jaar.

Hoewel de transformatie voor lagere waterstanden dan de drempelwaarde minder nauwkeurig is, wordt toch aangenomen dat de transformatie opgaat voor waterstanden onder de drempelwaarden. De afwijking in de kansverdeling is hierbij acceptabel klein, omdat bij lagere waterstanden de jaarlijkse overschrijdingskans (nagenoeg) gelijk is (1.0).

In Figuur 10 zijn de kansverdelingen van Hoek van Holland en OS11 gegeven.

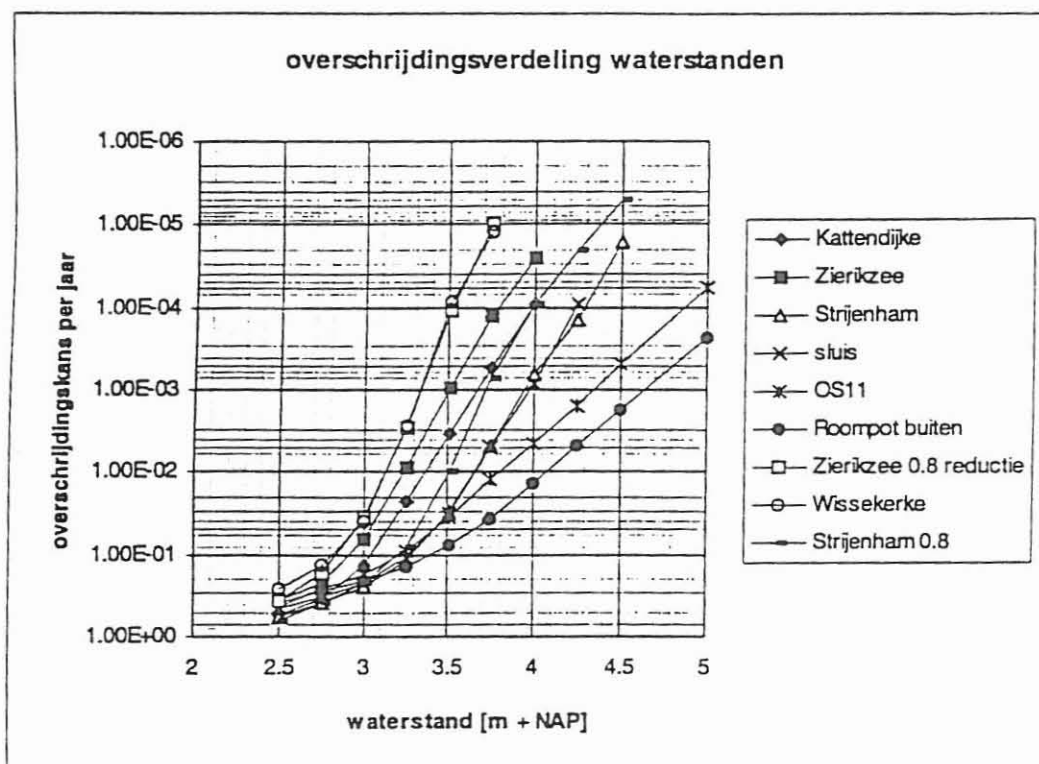


Figuur 10: Overschrijdingskansverdelingen van de waterstanden bij Hoek van Holland en OS11

Bijlage E Verificatie

Verificatie IMPLIC-berekeningen

In deze bijlage wordt de probabilistische berekening op basis van IMPLIC geïllustreerd. Met de probabilistische berekening zijn hiervoor de kansverdelingen van de watertanden bij de pilotvakken opgesteld bij de verschillende pilotvakken. Deze kansverdelingen zijn gegeven in Figuur 11.



Figuur 11: Overschrijdingskansverdelingen van waterstanden aan de buiten- en binnenzijde van de stormvloedkering

De waterstanden bij de overschrijdingskans van 1/4000 per jaar zijn voor de verschillende pilotvakken vergeleken met de bestaande toetspeil, volgens het Randvoorwaardenboek [11] en met de ontwerppeilen van de nota basispeilen [8]. Deze peilen zijn ontleend aan Barcon-berekeningen.

Pilotvak	waterstand met overschrijdingskans 1/4000 per jaar [m+NAP]	Toetspeil / ontwerppeil [m+NAP]
Zierikzee	3.65	3.45 ¹
Wissekerke	3.45	3.45 ¹
Kattendijke	3.85	3.45 ¹
Strijenham	4.15	3.85 ¹
Sluis	4.15	3.70 ¹
Zierikzee met 20% windreductie	3.45	3.45 ¹
Strijenham met 20% windreductie	3.85	3.85 ¹
OS11	4.70	4.70 ²
Roompot buiten	5.00	5.10 ²

¹ toetspeil

² ontwerppeil (zonder zeespiegelrijzing, evenals toetspeil)

Tabel 10: Vergelijking maatgevende waterstanden

De waterstanden met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar komen aan de buitenzijde van de kering (Roompot Buiten) overeen met de het afgegeven ontwerppeil. OS11 komt overeen met de statistiek van RIKZ.

De verschillen van de 1/4000 waterstanden met de toets- en ontwerppeilen zijn vlak bij de stormvloedkering (Wissekerke) nul en nemen toe, naarmate de locatie verder in het oosten van de Oosterschelde ligt. In het uiterste punt (Strijenhams Sluis) zijn de verschillen 0.45 respectievelijk 0.30 meter. Dit heeft te maken met de invloed van het verloop van de windsnelheid in een storm. Bij Barcon is een variërende windsnelheid als randvoorwaarde gehanteerd, terwijl bij het probabilistische scenario een constante maximale windsnelheid is aangehouden.

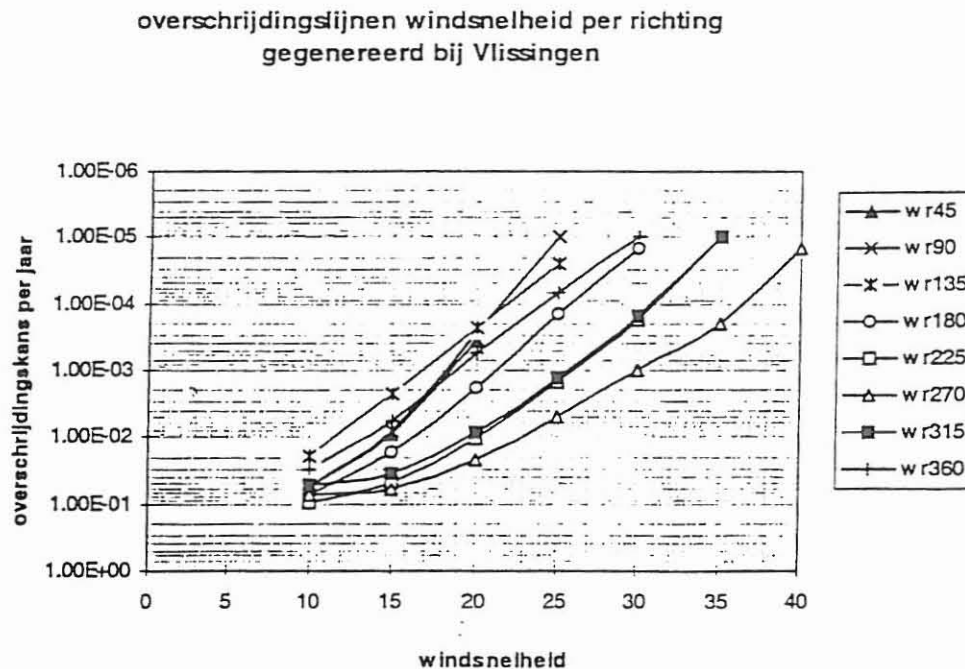
Als de 20% windreductie op de maximale windsnelheid wordt toegepast komen de waterstanden bij Zierikzee en Strijenhams Sluis wel overeen met de vigerende toetspeilen. Hiermee is aangetoond dat de IMPLIC-berekeningen met voldoende betrouwbaarheid kunnen worden toegepast.

Bovendien zijn met SIMPLIC, het probabilistische waterbewegingsprogramma dat bij Barcon gebruikt is, opnieuw overschrijdingslijnen van de waterstanden bij een aantal vakken bepaald. Dit keer is de windsnelheid constant en maximaal gehouden, net zoals in het probabilistische scenario met IMPLIC-berekeningen. De resultaten van IMPLIC zijn dus in overeenstemming met SIMPLIC.

IMPLIC is dus voldoende betrouwbaar, omdat SIMPLIC in het verleden ook voldoende betrouwbaar werd geacht. Wel moet in overeenstemming met SIMPLIC het windsnelheidsverloop in rekening gebracht worden. Dit kan ook door de constante maximale windsnelheid te reduceren met 20%.

Controle windsnelheden

In Figuur 12 zijn de overschrijdingskansverdelingen gegeven voor de windsnelheden bij Vlissingen, zoals die zijn berekend met het probabilistische scenario. Vervolgens zijn de windsnelheden vergeleken met de statistiek bij Vlissingen.



Figuur 12: Overschrijdingskansverdelingen van windsnelheden per windrichting bij Vlissingen

De windsnelheden met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar komen voor de verschillende windrichtingen overeen met de windsnelheden die RIKZ heeft gehanteerd voor Vlissingen. Hiermee is aangetoond dat de probabilistische model de windstatistiek kan reproduceren.

Bijlage F Resultaten per pilotvak

Pilotvak 1: Zierikzee	waterstand	H _s	T _p	Inklem- factor F	kenmerkende belasting S _k
Scenario	[m+NAP]	[m]	[s]	[-]	[(ms) ^{2/3}]
Basisscenario	0	2.5	6.1	1	6.15
originele randvoorwaarden,	1	2.6	6.25	1	6.42
geen inklemming,	2	2.7	6.4	1	6.68
aparte berekening van	3	2.75	6.35	1	6.73
belasting en sterkte	3.5	2.78	6.33	1	6.75
Probabilistische belasting	0	2.2	5.7	1	5.40
belasting volgens Volker,	1	2.45	5.95	1	5.97
geen inklemming,	2	2.65	6.2	1	6.46
aparte berekening van	3	2.7	6.3	1	6.61
belasting en sterkte	3.5	2.55	6.3	1	6.37
Inklemmingsfactor 1.5	0	2.5	6.1	1.5	4.10
originele randvoorwaarden	1	2.6	6.25	1.5	4.28
Inklemmingsfactor 1.5	2	2.7	6.4	1.5	4.46
aparte berekening van	3	2.75	6.35	1.5	4.49
belasting en sterkte	3.5	2.78	6.33	1.5	4.51
Integrale berekening	0			1	5.40
belasting volgens Volker,	1			1	5.97
geen inklemming,	2			1	6.46
Integrale berekening	3			1	6.61
belasting en sterkte	3.5			1	6.37

Tabel 11: Rekenresultaten voor de verschillende scenario's voor het pilotvak Zierikzee.

Pilotvak 2: Wissekerke	waterstand	H _s	T _p	Inklem- factor F	kenmerkende belasting S _k
Scenario	[m+NAP]	[m]	[s]	[-]	[(ms) ^{2/3}]
Basisscenario	0	2	6.2	1	5.36
originele randvoorwaarden,	1	2.05	6.15	1	5.42
geen inklemming,	2	2.1	6.1	1	5.47
aparte berekening van	3	2.1	5.8	1	5.29
belasting en sterkte	3.5	2.1	5.65	1	5.20
Probabilistische belasting	0	1.7	5.85	1	4.62
belasting volgens Volker,	1	1.95	6	1	5.15
geen inklemming,	2	2.1	6.3	1	5.59
aparte berekening van	3	2.1	5.75	1	5.26
belasting en sterkte	3.5	2.05	5.55	1	5.06
Inklemmingsfactor 1.5	0	2	6.2	1.5	3.57
originele randvoorwaarden	1	2.05	6.15	1.5	3.61
Inklemmingsfactor 1.5	2	2.1	6.1	1.5	3.65
aparte berekening van	3	2.1	5.8	1.5	3.53
belasting en sterkte	3.5	2.1	5.65	1.5	3.47
Integrale berekening	0			1	4.54
belasting volgens Volker,	1			1	4.95
geen inklemming,	2			1	5.16
Integrale berekening	3			1	5.36
belasting en sterkte	3.5			1	5.16

Tabel 12: Rekenresultaten voor de verschillende scenario's voor het pilotvak Wissekerke.

Pilotvak 3: Kattendijke	waterstand	H _s	T _p	Inklem- factor F	kenmerkende belasting S _k
Scenario	[m+NAP]	[m]	[s]	[-]	[(ms) ^{2/3}]
Basisscenario	0	1.2	6	1	3.73
originele randvoorwaarden,	1	1.4	6	1	4.13
geen inklemming,	2	1.6	6	1	4.52
aparte berekening van	3	1.8	6	1	4.89
belasting en sterkte	3.5	1.9	6	1	5.06
Probabilistische belasting	0	1.15	5.15	1	3.27
belasting volgens Volker,	1	1.4	5.25	1	3.78
geen inklemming,	2	1.6	5.45	1	4.24
aparte berekening van	3	1.8	5.7	1	4.72
belasting en sterkte	3.5	1.9	5.85	1	4.98
Inklemmingsfactor 1.5	0	1.2	6	1.5	2.49
originele randvoorwaarden,	1	1.4	6	1.5	2.75
Inklemmingsfactor 1.5	2	1.6	6	1.5	3.01
aparte berekening van	3	1.8	6	1.5	3.26
belasting en sterkte	3.5	1.9	6	1.5	3.38
Integrale berekening	0			1	3.27
belasting volgens Volker,	1			1	3.78
geen inklemming,	2			1	4.24
Integrale berekening	3			1	4.72
belasting en sterkte	3.5			1	4.98

Tabel 13: Rekenresultaten voor de verschillende scenario's voor het pilotvak Kattendijke.

Pilotvak 4: Strijenham	waterstand	H _s	T _p	Inklem- factor F	kenmerkende belasting S _k
Scenario	[m+NAP]	[m]	[s]	[-]	[(ms) ^{2/3}]
Basisscenario	0	1.3	4.9	1	3.44
originele randvoorwaarden,	1	1.5	5.1	1	3.88
geen inklemming,	2	1.7	5.3	1	4.33
aparte berekening van	3	1.75	5.45	1	4.50
belasting en sterkte	3.5	1.78	5.53	1	4.58
Probabilistische belasting	0	1	4.65	1	2.79
belasting volgens Volker,	1	1.25	5	1	3.39
geen inklemming,	2	1.5	5.3	1	3.98
aparte berekening van	3	1.6	5.4	1	4.21
belasting en sterkte	3.5	1.5	5.35	1	4.01
Inklemmingsfactor 1.5	0	1.3	4.9	1.5	2.29
originele randvoorwaarden,	1	1.5	5.1	1.5	2.59
Inklemmingsfactor 1.5	2	1.7	5.3	1.5	2.89
aparte berekening van	3	1.75	5.45	1.5	3.00
belasting en sterkte	3.5	1.78	5.53	1.5	3.06
Integrale berekening	0			1	2.79
belasting volgens Volker,	1			1	3.39
geen inklemming,	2			1	3.98
Integrale berekening	3			1	4.21
belasting en sterkte	3.5			1	4.01

Tabel 14: Rekenresultaten voor de verschillende scenario's voor het pilotvak Strijenham.

Pilotvak 5: Sluis	waterstand	H _s	T _p	inklem- factor F	kenmerkende belasting S _k [(ms) ^{2/3}]
Scenario	[m+NAP]	[m]	[s]	[-]	
Basisscenario	0	1,1	5,2	1	3,20
originele randvoorwaarden,	1	1,35	5,5	1	3,81
geen inklemming,	2	1,6	5,8	1	4,42
aparte berekening van	3	1,65	5,75	1	4,48
belasting en sterkte	3,5	1,68	5,73	1	4,51
Probabilistische belasting	0	1,15	5,2	1	3,29
belasting volgens Volker,	1	1,4	5,45	1	3,88
geen inklemming,	2	1,6	5,7	1	4,37
aparte berekening van	3	1,7	5,8	1	4,60
belasting en sterkte	3,5	1,75	5,7	1	4,63
Inklemmingsfactor 1.5	0	1,1	5,2	1,5	2,13
originele randvoorwaarden	1	1,35	5,5	1,5	2,54
Inklemmingsfactor 1.5	2	1,6	5,8	1,5	2,94
aparte berekening van	3	1,65	5,75	1,5	2,99
belasting en sterkte	3,5	1,68	5,73	1,5	3,02
Integrale berekening	0			1	3,20
belasting volgens Volker,	1			1	3,82
geen inklemming,	2			1	4,29
Integrale berekening	3			1	4,54
belasting en sterkte	3,5			1	4,65

Tabel 15: Rekenresultaten voor de verschillende scenario's voor het pilotvak Sluis.

Bijlage G Gevoeligheidsanalyse

Bij het probabilistische scenario zijn verschillende vereenvoudigingen aangenomen. De invloed van de belangrijkste vereenvoudigingen is onderzocht door het maken van aanvullende berekeningen. Bovendien zijn invloeden van andere aspecten onderzocht. Allereers is de aanpak beschreven, vervolgens de resultaten en ten slotte een analyse van de resultaten.

Aanpak van de gevoeligheidsanalyse

De volgende gevoeligheidsberekeningen zijn gemaakt en vergeleken met het probabilistische scenario:

- **Discretisatie van de waterstand rondom het sluitpeil**
De basisberekening gaat uit van IMPLIC-berekeningen voor maximale waterstanden bij OS11 die variëren met discrete stappen van 1 meter. Hiertussen is voor een willekeurige storm geïnterpoleerd om de bijbehorende waterstanden op de Oosterschelde te vinden. Het sluitpeil van de stormvloedkering (NAP +3.00 meter bij Roompot Buiten) vormt echter een discontinu effect in deze interpolatie. Om de gevoeligheid hiervoor te onderzoeken is een extra probabilistische berekening gemaakt op basis van IMPLIC-berekeningen met kleinere stappen rondom het sluitpeil (0.25 m).
- **Discretisatie van de windrichting.**
De Volkerstatistiek is gebaseerd op een indeling van de windroos in sectoren van 22.5°, terwijl RIKZ een indeling in 30° aanhoudt. De gevoeligheid hiervoor is onderzocht door in een extra berekening telkens twee windrichtingssectoren van 22.5° van het Volkermodell te clusteren tot sectoren van 45°.
- **Transformatie van de waterstandstatistiek naar OS11 per windrichting**
In de basisberekening is de waterstand van Hoek van Holland naar OS11 vertaald op basis van een omnidirectioneel afgeleide relatie. De verdeling van de waterstandstatistiek over de windrichtingen is gelijk verondersteld aan Hoek van Holland. De gevoeligheid hiervoor is ingeschat door een berekening te maken, waarbij de relatie tussen beide stations per windrichtingssector apart is afgeleid.
- **Minimale waterstand tijdens extreme windsnelheden**
Omdat het onzeker is hoe lang de maximale windsnelheid aanhoudt is het ook onzeker wat de minimale waterstand is die hierbij kan optreden. De basisberekening rekent met de minimale waterstand in een tijdsvenster van 8 uur. In een extra berekening is de minimale waterstand bepaald met venster van 20 uur voor het optreden van de maximale waterstand.
- **Correlatie tussen de waterstand en de windsnelheid.**
De mate van correlatie tussen de waterstand en de windsnelheid is, voornamelijk onder extreme condities, relatief onzeker. De invloed van de correlatie is onderzocht door een berekening te maken, waarbij de maximale windsnelheid volledig gecorreleerd is met de maximale waterstand in een storm. Hierbij is de windsnelheid eenduidig gerelateerd aan de maximale waterstand door aan te nemen dat beide parameters dezelfde overschrijdingskansen hebben.
- **Nauwkeurigheid van de Monte Carlo simulatie door het beperkte aantal simulaties.**
Gekozen is voor 400.000 simulaties. Daarmee wordt met een betrouwbaarheid van 95 % bereikt dat de overschrijdingskansen van 1/4000 volgens de Monte Carlo-simulatie in werkelijkheid varieert tussen 1/3200 en 1/4800 per jaar. De invloed van deze onnauwkeurigheid op de minimaal benodigde steendikte is ingeschat op basis de vergelijking van de minimaal benodigde steendiktes met overschrijdingskansen van 1/4000 en 1/4800 per jaar.
- **Onzekerheden ten aanzien van de bodemligging en scheefstand van de waterspiegel.**
In de toekomst wordt een bodemdaling verwacht. Bovendien zullen de ondiepe delen van de Oosterschelde (platen, slikken en schorren) tijdens extreme stormen eroderen. In de SWAN-berekening is hiermee rekening gehouden. Daarnaast gaat de SWAN-berekening uit van een horizontale waterstand. In werkelijkheid zal er sprake zijn van een zekere

scheefstand onder invloed van opwaaiing. De gevoeligheid van beide onzekerheden is ingeschat door de waterstand binnen de SWAN-berekening met 0.5 meter te verlagen.

- **Modelonzekerheden van waterstanden en golven**
De golven en waterstanden zijn berekend op basis van een modellering (SWAN en IMPLIC). Deze modellering zijn echter niet 100% nauwkeurig. De onzekerheden ten aanzien van deze modellen zijn onderzocht door een extra berekening te maken waarbij de onzekerheden van de belastingen op het dijkvak als stochastisch zijn meegenomen.
 - De onzekerheid van de piekperiode is normaal verdeeld met een gemiddelde gelijk aan de deterministische piekperiode minus 0.5 seconden. Dit is dus gelijk aan een gemiddelde waarde van 0.5 seconden, die bovenop de piekperiode uit de SWAN-resultaten wordt gezet. In de "Audit golfbrandvoorwaarden Oosterschelde" [5] wordt dit aanbevolen. Voor de standaardafwijking is 0.5 seconden aangehouden.
 - De onzekerheid van de significante golfhoogte is normaal verdeeld met een gemiddelde gelijk aan de deterministische waarde (dit is de best guess) en een standaardafwijking van 10%.
 - De onzekerheid van de berekende waterstand bij de dijkvakken met IMPLIC is gemiddeld gelijk aan de deterministische waarde, met een standaardafwijking van 0.10 meter.
 - De onzekerheid van de windsnelheidsstatistiek. Deze is gemiddeld gelijk aan de afgegeven statistiek met een standaardafwijking van 2 m/s.
- **Te hanteren norm**
Om een idee te krijgen hoe gevoelig het resultaat is voor de gehanteerde norm is ook een berekening uitgevoerd voor een overschrijdingskans van 1/400 per jaar. Dit resultaat kan worden gebruikt voor de prioritering van de uit te voeren dijkvakken.
- **Reductie van de windopzet door stormverloop**
Bij Barcon [1] is het verloop van de windsnelheid in de tijd meegenomen bij de bepaling van de waterstanden op de Oosterschelde, terwijl dit in de pilot niet is gedaan. Bij de verificatie van IMPLIC is gebleken dat de invloed hiervan op de waterstand niet te verwaarlozen is, door traagheidseffecten (zie Bijlage sdfsdf). Voor de bepaling van de waterstanden levert een reductie van de constante maximale windsnelheid met 20% dezelfde waterstanden op als met een variërend waterstandsverloop. Er is een gevoeligheidsberekening gemaakt waarbij de windsnelheid voor de bepaling van de waterstand is gereduceerd met 20%. De windsnelheid voor de golfberekening is niet aangepast.

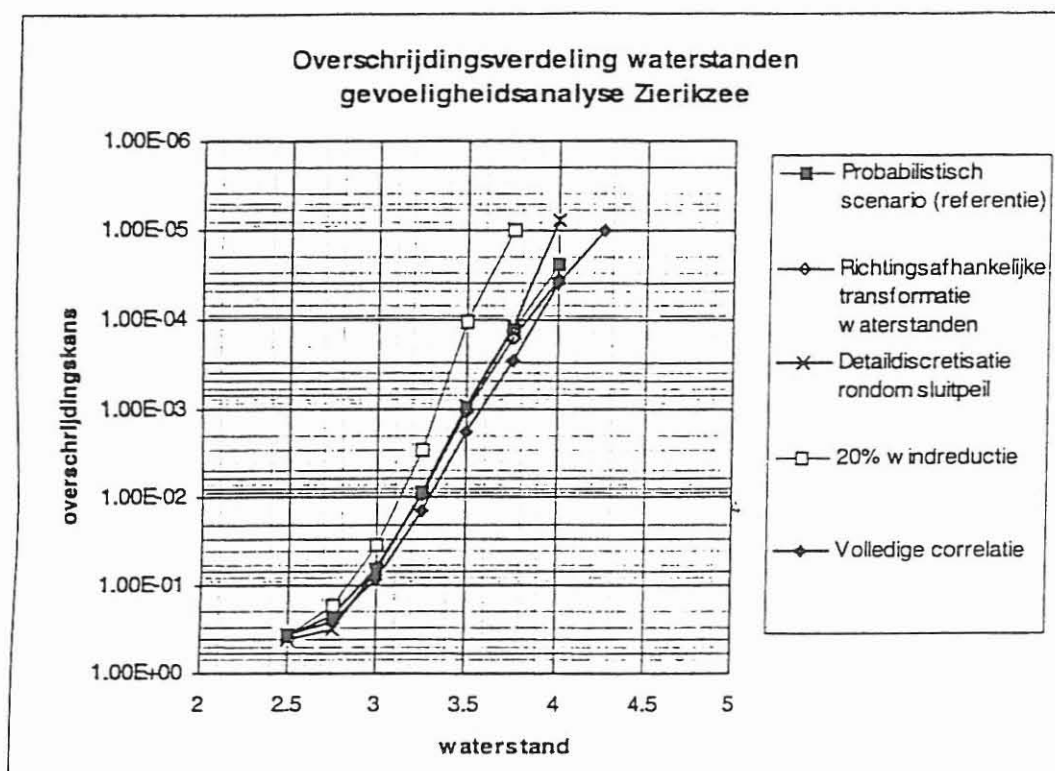
Resultaten van de gevoeligheidsanalyse

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn gegeven in Tabel 16. Bovendien zijn vervolgens de waterstandsoverschrijdingslijnen van relevante berekeningen weergegeven in

Figuur 13.

Ingereep	waterstand	H _s	T _p	S _k	reductie S _k gemiddeld over hoogte	
	[m+NAP]	[m]	[s]	[(ms) ^{2/3}]	t.o.v. scenario 2 [-]	t.o.v. scenario 1 [-]
Scenano 2 probabilistische belasting zonder ingreep	0	2.2	5.7	5.40	0%	4%
	1	2.45	5.95	5.97		
	2	2.65	6.2	6.46		
	3	2.7	6.3	6.61		
	4	0	0	0.00		
Gedetailleerde discretisatie waterstanden rondom sluitpeil	0	2.2	5.7	5.40	2%	6%
	1	2.45	6	6.00		
	2	2.6	6.2	6.38		
	3	2.65	6.25	6.50		
	4	0	0	0.00		
Samenvoegen van windrichtingssectoren tot 45° sectoren	0	2.25	5.7	5.48	0%	4%
	1	2.5	6	6.08		
	2	2.65	6.2	6.46		
	3	2.7	6.3	6.61		
	4	0	0	0.00		
Transformatie van de waterstandstatistiek naar OS11 per windrichting	0	2.2	5.7	5.40	0%	4%
	1	2.5	6	6.08		
	2	2.65	6.2	6.46		
	3	2.7	6.3	6.61		
	4	0	0	0.00		
Lagere minimale waterstanden bij maximale windsnelheden	0	2.3	5.75	5.59	0%	4%
	1	2.45	6	6.00		
	2	2.65	6.2	6.46		
	3	2.7	6.3	6.61		
	4	0	0	0.00		
Volledige correlatie	0	2.3	5.65	5.53	-3%	1%
	1	2.55	5.95	6.13		
	2	2.75	6.2	6.62		
	3	2.8	6.35	6.81		
	4	0	0	0.00		
Overschrijdingskans 1/4800 per jaar (controle nauwkeurig- heid Monte Carlo)	0	2.25	5.75	5.51	0%	4%
	1	2.45	6	6.00		
	2	2.65	6.2	6.46		
	3	2.7	6.3	6.61		
	4	0	0	0.00		
Verlaging van de waterstand voor de golfberekening (gevoeligheid voor bodemverlaging)	0	1.95	5.5	4.86	4%	7%
	1	2.25	5.8	5.54		
	2	2.5	6.05	6.12		
	3	2.6	6.25	6.42		
	4	0	0	0.00		
Onzekerheden van de windsnelheid, golven en water- standen als stochast (modelonzekerheden)	0	2.4	6.15	6.02	-9%	-4%
	1	2.65	6.35	6.57		
	2	2.85	6.55	7.04		
	3	2.9	6.6	7.16		
	4	0	0	0.00		
Overschrijdings- frequentie van 1/400 per jaar (Gevoeligheid voor de norm)	0	1.9	5.5	4.78	13%	17%
	1	2.1	5.75	5.26		
	2	2.25	6	5.67		
	3	2.25	6.05	5.70		
	4	0	0	0.00		
20% windreductie voor windopzet	0	2.2	5.7	5.40	0%	4%
	1	2.45	5.95	5.97		
	2	2.65	6.2	6.46		
	3	2.7	6.3	6.61		
	4	0	0	0.00		

Tabel 16: Rekenresultaten van de gevoeligheidsanalyse voor het pilotvak Zierikzee.



Figuur 13: Overschrijdingslijnen van de waterstand bij Zierikzee voor de gevoeligheidsberekeningen

Analyse van de resultaten

De resultaten van de berekeningen van de gevoeligheidsanalyse, die in Tabel 16 zijn gegeven, zijn in deze paragraaf vergeleken met de resultaten van het scenario met probabilistische belasting, dat als referentie is genomen.

- De discretisatie van de probabilistische berekening is nauwkeurig genoeg. Zowel een nauwkeurigere discretisatie van de waterstand rondom het sluitpeil als een bundeling van windrichtingssectoren tot 45° hebben weinig invloed.
- De transformatie van de waterstand van Hoek van Holland naar OS11 is nauwkeurig genoeg. Een berekening met richtingsafhankelijke transformatie van waterstanden naar OS11 leveren slechts kleine veranderingen op ten opzichte van de probabilistische referentieberekening.
- De berekening is weinig gevoelig voor de duur van de maximale windsnelheid, en dus voor de ondergrens van het optredende waterstandsvenster. Een verlaging van minimale waterstand van het waterstandsvenster levert weinig verschillen op met het probabilistische scenario.
- De berekening is relatief ongevoelig voor de mate van correlatie. De golfbelasting neemt bij een volledige correlatie van maximale windsnelheden en waterstanden af met 3% in de maatgevende situatie met een overschrijdingskans van 1/4000 per jaar, terwijl de waterstanden toenemen met 0.10 meter (zie Figuur 13).
- Een afname van de golfbelasting wordt veroorzaakt doordat bij hoge waterstanden op de Oosterschelde geen lage windsnelheden te verwachten zijn. Verwacht wordt dat de maatgevende golfbelasting op het bekken niet drastisch wordt beïnvloed door het toepassen van correlaties die bepaald zijn met andere methodes dan het Volkermodel, bijvoorbeeld met de methode "de Haan".

- Nauwkeurigheid probabilistische berekening is voldoende, omdat de golfbelasting bij een overschrijdingskans van 1/4800 verwaarloosbaar afwijkt van het probabilistische referentieberekening.
- De maatgevende golfbelasting is wel gevoelig voor de onzekerheden van de waterdiepte als gevolg van scheefstand van de waterspiegel op de Oosterschelde en bodemverlagende effecten, zoals bodemerosie onder extreme stormomstandigheden.
De gevoeligheid geldt met name bij lage waterstanden. Een verhoging van de bodem van 0.5 meter in de golfberekening leidt tot een verlaging van de golfbelasting van 5% bij NAP + 2.0 meter.
Het effect voor de hele Oosterschelde is naar alle waarschijnlijkheid nog groter, omdat het dijkvak bij Zierikzee grenst aan relatief diep water. Hierdoor is de invloed van de bodem op de golfbelasting bij Zierikzee relatief klein, ten opzichte van andere dijkvakken waarbij een ondiep voorland aanwezig is.
- Het meenemen van alle onderkende modelonzekerheden van IMPLIC en SWAN leidt tot orde 10% hogere golfbelasting en derhalve 10% grotere benodigde steendiktes. Het is echter onduidelijk of deze onzekerheden al impliciet in de stabiliteitsrelaties zijn meegenomen. Het is de vraag of het reëel is om deze onzekerheden in rekening te brengen, omdat daarmee mogelijk extra veiligheid op veiligheid wordt gestapeld.
- Een hypothetische verlaging van de norm tot een overschrijdingsfrequentie van 1/400 per jaar leidt tot een verlaging van de benodigde steendikte van ongeveer 10 tot 15%.
- De maatgevende golfbelasting is nauwelijks gevoelig voor de waterstandsverlaging als gevolg van de toegepaste windreductie. Deze reductie van de maximale windsnelheid van 20% is nodig om het effect van de variërende windsnelheid in rekening te brengen.

Bijlage H Overzichtskaarten