

Systemanalyse Hollandsche IJssel

Uitwerking conform BOI uitgangspunten

Rijkswaterstaat



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Systemanalyse Hollandsche IJssel



Uitwerking conform BOI uitgangspunten

Eindrapport

Auteurs

Guus Rongen
Bob Maaskant

PR3925.10
april 2019

Samenvatting

Context

Het doel van Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden (DPRD) is om inzicht te verkrijgen in kosteneffectieve sets van maatregelen voor de waterveiligheidsopgave langs de Hollandsche IJssel op de middellange termijn. Hiertoe is vorig jaar door HKV een conceptuele mini-systeemanalyse uitgevoerd. Het doel van deze analyse was om zicht te krijgen op de werking van het systeem en op de waterveiligheidsopgave voor nu en in de toekomst. In de voorliggende studie is de potentie van de systeemmaatregelen onderzocht aan de hand van uitgangspunten conform het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI). Daarmee is het een verdere uitwerking van de aanbevelingen uit de mini-systeemanalyse.

Systeemmaatregelen en uitgangspunten

In deze studie zijn drie typen systeemmaatregelen uitgewerkt volgens BOI-uitgangspunten en is onderzocht wat het effect ervan is op de belasting bij de norm. Daarbij is gekeken naar waterstanden en hydraulische belastingniveaus (HBN). De drie onderzochte systeemmaatregelen zijn:

1. Het verkleinen van de faalkans van de Hollandsche IJsselkering (HIJK)

Van falen per eens op de 200 sluitvragen naar falen per eens op de 1000 of 5000 sluitvragen.

2. Het aanpassen van het sluitregime van de HIJK in het model

Bij waterbezwaar of een verwachte waterstand bij Hoek van Holland groter dan 3,0 m+NAP sluit de kering op kentering. In de overige gevallen vindt een getrapte peilsluiting plaats, waarmee de translatiegolf die ontstaat door het sluiten van de kering deels wordt voorkomen.

3. Toevoegen van waterbezwaar

Het waterbezwaar van de waterschappen langs de Hollandsche IJssel kan op deze tak worden geborgen, ook bij gesloten kering. In dit geval is de capaciteit om water uit de regionale systemen op te vangen beperkt en stijgt de waterstand achter de HIJK dus gedurende de storm. In voorliggend onderzoek is gerekend met een kans van 1/3 op waterbezwaar tijdens een sluiting. Het waterbezwaar in deze situatie is 75 m³/s. Twee maalstoppeilen zijn aangehouden in deze studie: 2,6 m+NAP bij Krimpen aan den IJssel en 2,8 m+NAP bij Gouda.

De tweede en derde maatregel zijn huidige praktijk, maar worden in voorliggende studie uitgewerkt volgens het BOI. Hiervoor zijn nieuwe productiesommen gedraaid volgens BOI-uitgangspunten (WBI2017 en OI2014). De belangrijkste aanpassingen ten opzichte van de eerdere DPRD-uitgangspunten zijn:

1. Aanpassingen aan de wind

Verschillende aspecten van de wind verschillen van de manier waarop deze volgens DPRD-uitgangspunten gemodelleerd werden. Zo is winddragafkapping toegepast, waarbij het effect van windsnelheden groter dan de 30 m/s op de opzet wat afneemt. Volgens BOI moet de

open water windsnelheid worden toegepast, waar dit in DPRD nog de potentiële windsnelheid was. Op de Hollandsche IJssel zelf is van deze overstap afgeweken vanwege korte strijklengtes en beschutting. Daarnaast zijn de stormverlopen aangepast conform WBI2017 en is de koppeling tussen windsnelheid en zeewaterstand aangepast aan de WBI2017-statistiek.

2. Klimaatscenario's

De resultaten zijn berekend voor het huidig klimaat en de klimaatscenario's 2050W⁺ en 2100W⁺. Voor deze laatste twee zijn ook nieuwe productieberekeningen gedraaid en databases opnieuw gevuld.

Effect van systeemmaatregelen

Het gecombineerde effect van de systeemmaatregelen geeft een verlaging van de waterstanden bij de norm van 0,4 tot 0,5 meter. Dit komt grotendeels door het betrouwbaarder maken van de HIJK. Bij een 1/1.000 faalkans van de HIJK per sluitvraag levert dit een verlaging van 0,2 meter en bij een verdere verlaging van de faalkans naar 1/5.000 per sluitvraag nog eens 0,2 meter. Dit beeld is redelijk uniform langs de Hollandsche IJssel. Alleen bij de 1/5.000 faalkans speelt waterbezwaar een rol en heeft het dus zin om het waterbezwaar te beperken tijdens zware stormen. Voor de andere varianten is de situatie met een falende HIJK maatgevend. Dit komt enerzijds omdat het maalstoppeil de waterstand achter de HIJK tijdens sluiting beperkt tot 2,6 à 2,8 m+NAP. Anderzijds zijn de sluitwaterstanden erg laag. Zelfs met een waterbezwaar van 75 m³/s duurt het 10 tot 20 uur tot een maalstop. Dit benadrukt het belang van een goede sluiting: niet alleen de faalkans van de HIJK is belangrijk, ook de (begin)waterstand na sluiten.

Ook voor de HBN's is het verkleinen van de faalkans van de HIJK de meest effectieve systeemmaatregel. De reductie voor verkleinen naar 1/1.000 en 1/5.000 per sluitvraag is in beide gevallen 0,1 tot 0,2 meter. De speling wordt veroorzaakt door het waterbezwaar. Een HBN volgt uit een combinatie van waterstand en wind. De waterstand tijdens sluiting (en daarmee het waterbezwaar) is dus belangrijker voor het HBN dan voor de maatgevende waterstand.

Effect systeemmaatregelen in 2050 en 2100

In de klimaatscenario's 2050W⁺ en 2100W⁺ stijgt de zeespiegel en neemt de rivierafvoer toe. Vooral de zeespiegelstijging is voor de Hollandsche IJssel belangrijk. Door de stijgende zeespiegel nemen de maatgevende waterstanden met 0,1 meter toe in 2050 en met nog eens 0,15 meter in 2100. Deze waterstanden zijn hoger dan het maalstoppeil, waardoor het waterbezwaar niet meer belangrijk is voor de waterstand bij de norm. Alleen het verkleinen van de faalkans heeft nog effect: 0,15 tot 0,2 meter verlaging in 2050 en 0,1 tot 0,15 m verlaging in 2100. De verlagingen in het HBN zijn vergelijkbaar. Hiervoor heeft de gesloten situatie met waterbezwaar nog wel effect, omdat ook waterstanden lager dan de norm bijdragen aan het HBN.

In klimaatscenario 2100W⁺ is de gemiddelde zeespiegel 75 cm hoger dan in het huidige klimaat. Het huidige sluitpeil van 2,25 m+NAP wordt dan met springtij bijna elke getijperiode gehaald. Met onveranderd sluitregime zal de kering dan vaak onder dagelijkse omstandigheden al sluiten, gemiddeld één of twee keer per week.

De beschreven resultaten zijn bepaald zonder modelonzekerheden. Het effect van de onzekerheid in de waterstand is groot. Bij een standaardafwijking van 10 cm ligt de toename t.o.v. de situatie zonder onzekerheid in de orde van 5 tot 10 cm, wat kan oplopen tot 30 cm bij een standaardafwijking van 20 cm. Vooral bij een kleine faalkans van de kering is het effect groot (dit resulteert in een kleine decimeringshoogte). In deze studie is Hydra-NL aangepast zodat de modelonzekerheid afhankelijk van de sluitsituatie van de HIJK opgegeven kan worden. Bijbehorende waarden zijn echter nog niet afgeleid.

Maalstopfrequentie

De kans op een maalstop volgend uit de nieuwe productieberekeningen is ongeveer 1/20.000 per jaar in het huidige klimaat. Dit is onder de conservatieve aanname van 75 m³/s waterbezwaar in 1/3 van het aantal sluitingen. Voor 2050 en 2100 stijgt deze frequentie naar 1/3.000 en 1/600 per jaar. Ter vergelijking, de kering sluit onder het huidige regime in 2100 enkele tientallen keren per jaar. Dat een maalstop zo zeldzaam is, komt door de lage sluitwaterstanden. Bij waterbezwaar sluit de HIJK op kentering, waarna de kering 10 tot 20 uur gesloten moet blijven voordat een maalstop optreedt. Voor een dergelijke lange sluiting is een zeer zware storm nodig, al dan niet in combinatie met een falende Europoortkering. Ook deze frequenties zijn bepaald zonder modelonzekerheid. Door dit wel te doen nemen de frequenties toe, maar het beeld dat een maalstop zeer zeldzaam is verandert niet.

Aanbevelingen

In deze studie is aangetoond dat een uitwerking van de systeemmaatregelen volgens BOI-uitgangspunten een aanzienlijke verlaging van de waterstanden en de HBN's geeft. De meest effectieve maatregel is het verkleinen van de faalkans van de Hollandsche IJsselkering, nu en in de toekomst bij klimaatverandering. Uit verder onderzoek zal moeten blijken of een verbetering van de faalkans naar eens per 1000 of 5000 sluitvragen mogelijk is. Deze studie biedt echter een aantal handvatten om het effect van verschillende faalmodi te beschouwen. Zo kan na een mislukte kenteringsluiting de kering wellicht nog op peil sluiten. Een nadere uitwerking van het effect van dit soort faalmodi kan bijdragen aan een betere inschatting van de faalkans.

Een tweede invloedrijk effect is de modelonzekerheid in de waterstand. In deze studie zijn stappen gemaakt om deze beter toe te passen, maar de exacte waarden zullen uit een vervolgstudie moeten blijken. Een klein verschil in standaardafwijking van 5 cm kan tot een 10 cm hogere of lagere

maatgevende waterstand leiden. Het is dus de moeite waard om een nauwkeurige, maar realistische inschatting van de modelonzekerheid op de Hollandsche IJssel te maken.

Inhoud

1	Aanleiding	11
2	Inleiding	12
2.1	Probleemstelling	12
2.2	Doelstelling	12
2.3	Leeswijzer	13
3	Uitgangspunten	14
3.1	Inleiding	14
3.2	Randvoorwaarden update naar WBI2017	14
3.3	Hollandsche IJsselkering	17
3.4	Klimaatscenario's	17
3.5	Waterbezwaar	20
3.6	Sluitregime	20
4	Aanpassingen SOBEK en Hydra-NL	21
4.1	Aanpassingen SOBEK	21
4.2	Aanpassingen Hydra-NL	25
5	Resultaten	27
5.1	Effect systeemmaatregelen op waterstanden	27
5.2	Vergelijking met mini-systeemanalyse	31
5.3	Effect systeemmaatregelen op HBN	35
5.4	Effect modelonzekerheden waterstand	38
5.5	Maalstopfrequentie	39
6	Conclusies en advies	42
6.1	Conclusies	42
6.2	Aanbevelingen	43
7	Referenties	45
7.1	Referenties	45
	Bijlagen	47
A	Nadere uitwerking uitgangspunten productieberekeningen	49
B	Effect aanpassing winduitgangspunten	55
C	Sluitprocedures Hollandsche IJsselkering	62
D	Partieel falen Hollandsche IJsselkering	66
E	Plan van aanpak waterbezwaar	69

1 Aanleiding

Binnen het Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden is in 2014 een integrale gebiedsanalyse uitgevoerd. Sindsdien is bestuurlijk afgestemd om initiatieven en onderzoeken rondom de verschillende systeemelementen (kering, voorlanden en dijken) op elkaar af te stemmen. Veel van deze onderzoeken binnen het project Krachtige IJsseldijken Krimpenerwaard (KIJK), de projectoverstijgende verkenning (POV) Voorlanden en het deltaprogramma Zoet Water (Slim Watermanagement) zijn inmiddels opgeleverd. De resultaten hiervan zijn echter niet volledig en in samenhang bekend.

Daarom is door Rijkswaterstaat en het Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard een studie (update) van de systeemanalyses opgestart om zicht te krijgen op de werking van het systeem en de waterveiligheidsopgave voor nu, 2050 en 2100. Het doel van DPRD is om inzicht te verkrijgen in kosteneffectieve sets van maatregelen voor de waterveiligheidsopgave van de Hollandsche IJssel op de middellange termijn. Hiertoe is vorig jaar door HKV een conceptuele systeemanalyse uitgevoerd en beschreven door Rongen en Botterhuis (2018). Het doel van deze analyse was om zicht te krijgen op de werking van het systeem en op de waterveiligheidsopgave voor nu in de toekomst.

Deze systeemanalyse had als doel het inzichtelijk maken van de effecten van (1) het aanpassen van de faalkans van de Hollandsche IJsselkering (SVKHII), (2) het waterbezwaar en (3) een sluiting op kentering. De resultaten van deze conceptuele systeemanalyse in 2018 lieten zien dat de systeemmaatregelen veel potentie bieden om de waterveiligheidsopgave te verkleinen. De aanpak is daarom nu volgens de uitgangspunten van het BOI uitgewerkt, om de veiligheidsopgave nauwkeuriger te kunnen bepalen.

2 Inleiding

2.1

Probleemstelling

Uit de Mini-systeemanalyse Hollandsche IJssel (Rongen & Botterhuis, 2018) blijkt dat de potentie van enkele systeemmaatregelen om de waterveiligheidsopgave te verkleinen groot is. De aanpak die in dat project gevolgd is, moet verder worden uitgewerkt om de werkelijke reductie te bepalen. Hiervoor zijn drie aanbevelingen gedaan:

1. Als eerste stap in het vervolgonderzoek zouden de resultaten moeten worden gereproduceerd met een volwaardig hydraulisch model (op vergelijkbare wijze als voor het WBI2017) met het SOBEM-model van DPRD. In de berekeningen zouden dan 3 toestanden van de kering (falen, sluiten op peil, en sluiten op kentering) en 3 varianten voor waterbezwaar (geen, een beetje en veel waterbezwaar) moeten worden onderzocht. Op die manier worden de effecten van het verbeteren van de stormvloedkering (faalkans en sluitprocedure) met WBI2017-uitgangspunten onderbouwd.
2. Vervolgens zou de kans op een maalstop bepaald moeten worden. Uit een eerste analyse naar samenvallen van waterbezwaar in de regio en een storm op zee (sluiting SVKHIJ) moet duidelijk worden hoe vaak en hoeveel waterbezwaar achter een gesloten kering optreedt. Dit geeft een onderbouwing (en eventueel bijstelling) van de cijfers uit de 'huidige praktijk' die in dit onderzoek zijn gebruikt.
3. Als laatste stap kan onderzocht worden wat de gevolgen zijn van minder uitslaan richting de Hollandsche IJssel vanuit de aanliggende waterschappen.

De eerste twee punten zijn het belangrijkste onderdeel van deze studie. De meeste aandacht gaat naar punt 1, het reproduceren van de resultaten volgens het officiële instrumentarium. Daaruit zou meer duidelijkheid moeten volgen over of en hoe de maalstopfrequentie verder uitgezocht moet worden (punt 2 en 3).

2.2

Doelstelling

Deze studie beschrijft een aantal werkzaamheden om dit te bereiken. We definiëren hiervoor twee doelstellingen:

1. De analyses uit de eerder uitgevoerde systeemanalyse moeten worden gereproduceerd volgens BOI uitgangspunten, zodat deze een officieel karakter krijgen.

2. Het opstellen van een Plan van Aanpak waarin wordt beschreven op welke wijze bepaald kan worden wat de kans is op een maalstop die samenvalt met een storm op zee (sluiting SVKHIIJ).

Met deze twee onderdelen kan bepaald worden of een mogelijke aanpassing van het adaptatiepad Hollandsche IJssel nuttig is.

2.3

Leeswijzer

Dit rapport is opgedeeld in drie delen. Deze studie reproduceert de resultaten van de mini-systeemanalyse op basis van nieuwe productieberekeningen. Het eerste deel, hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4, beschrijft de uitgangspunten voor deze productieberekeningen en de aanpassingen die aan SOBEK en Hydra-NL zijn gedaan om ermee te rekenen. Hoofdstuk 5 beschrijft vervolgens de resultaten voor de Hollandsche IJssel, het effect van de systeemmaatregelen op de waterstanden, HBN's en de maalstopfrequentie. Hoofdstuk 6 geeft tot slot de conclusies en een advies voor het gebruik van de resultaten.

In dit rapport wordt zo nu en dan gerefereerd naar de conceptuele systeemanalyse die aan deze studie vooraf is gegaan (Rongen en Botterhuis, 2018). Deze studie, genaamd Mini-Systeemanalyse Hollandsche IJssel wordt dan aangeduid als de "mini-systeemanalyse". Daarnaast worden de termen WBI2017 en BOI (Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium, de 'nieuwe' naam) ook door elkaar gebruikt. In principe bedoelen we hiermee hetzelfde, al is het in sommige gevallen duidelijker om naar het WBI2017 te verwijzen dan naar het BOI.

3 Uitgangspunten

3.1 Inleiding

In deze systeemanalyse voor de Hollandsche IJssel zijn drie typen maatregelen onderzocht. Het sluiten van de Hollandsche IJsselkering op kentering, het omgaan met waterbezwaar en het verkleinen van de faalkans van de kering. In de mini-systeemanalyse zijn deze systeemmaatregelen onderzocht door pragmatische aanpassingen te doen aan de achterliggende hydraulische randvoorwaarden. In deze studie worden dezelfde maatregelen volgens BOI-uitgangspunten uitgewerkt. Dit betekent dat aanpassingen gedaan zijn aan het SOBEEK DPRD model en aan Hydra-NL. Vervolgens zijn hier nieuwe productieberekeningen mee gemaakt. Dit hoofdstuk beschrijft de uitgangspunten die hierbij zijn aangehouden.

Bijlage A geeft een uitgebreidere uitwerking van de uitgangspunten. Het effect van de uitgangspunten voor de wind is uitgewerkt in bijlage B.

3.2 Randvoorwaarden update naar WBI2017

Om de productieberekeningen in lijn te krijgen met het WBI2017 (en BOI), zijn verschillende veranderingen doorgevoerd in de randvoorwaarden voor het SOBEEK-RE model en Hydra-NL. De voornaamste veranderingen ten opzichte van de vorige DPRD-uitgangspunten hebben betrekking op de wind. Deze paragraaf geeft een overzicht van deze veranderingen. Het document "WAQUA-productieberekeningen Rijn-Maasmonding" (Agtersloot & Paarlberg, 2016) is hierbij telkens aangehouden als leidraad.

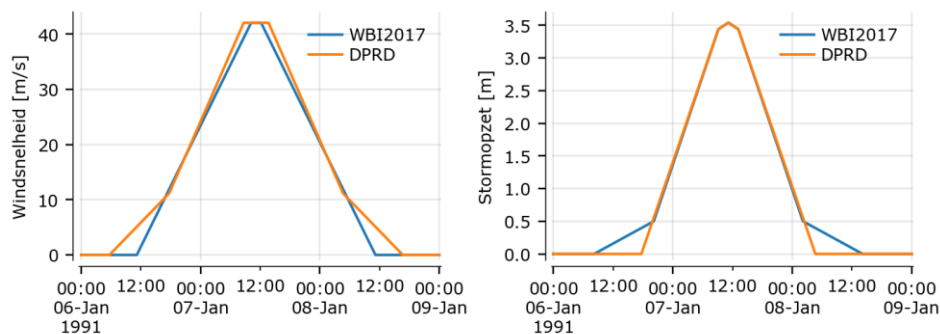
3.2.1 Windstatistiek

In het WBI2017 is de statistiek van zeewaterstand en wind aangepast ten opzichte van het WTI2011 (en DPRD). In het belastingmodel van de Hollandsche IJssel zijn de windsnelheid en zeewaterstand afhankelijk van elkaar. De windsnelheid wordt (kort door de bocht) bepaald door bij een gegeven zeewaterstand en windrichting de verwachtingswaarde van de windsnelheid te bepalen. Bij een aangepaste statistiek verandert deze koppeling dus ook. Duits (2019) heeft hiervoor een nieuwe koppeltabel afgeleid. Door de veranderingen in statistiek neemt de verwachte windsnelheid bij een gegeven zeewaterstand toe. In Duits (2019) wordt de afleiding hiervan uitgebreid toegelicht.

Naast de statistiek van de piekwaarden, zijn ook de duren in het WBI2017 anders dan in voorgaande beoordelingsinstrumenten. Figuur 1 geeft hiervan een overzicht. In het WBI2017 worden bredere flanken voor beide het verloop van de windsnelheid en stormopzet aangehouden, maar deze zullen

weinig effect op de piekwaterstanden hebben. Het belangrijkste verschil is de kortere topduur van de windsnelheid, 2 uur in plaats van de 5 uur volgens het eerdere DPRD-uitgangspunt (Slootjes et al., 2011). Merk op dat dit niet verward moet worden met de topduur van de stormopzet (de rechter figuur). Deze is 4 uur, net als het DPRD uitgangspunt.

*Figuur 1
Verlopen van
windsnelheid en
stormopzet voor het
WBI2017 en DPRD.*



3.2.2

Winddrag

De schuifspanning die de wind uitoefent op het wateroppervlak stijft naarmate de windsnelheid toeneemt. Bij zeer hoge windsnelheden (> 30 m/s) neemt de wind drag-coëfficiënt echter niet meer verder toe (Van Vledder, 2017). Deze coëfficiënt is een maat voor de schuifspanning van de wind op het water. Door deze coëfficiënt af te kappen wordt de waterstandsopzet in de productieberekeningen bij grote windsnelheden wat verkleind. Voor de Hollandsche IJssel zal dit vooral bij hoge windsnelheden vanuit zuidwestelijke richting een groot effect hebben.

Voor lokale golfgroei wordt deze winddragafkapping niet meegenomen. Deze wordt namelijk in Hydra-NL berekend met de Bretschneider formules. Door aangepaste windstatistiek te gebruiken in Hydra-NL zou winddragafkapping ook bij de bepaling van golfcondities en HBN's meegenomen kunnen worden.¹ Het toepassen van winddragafkapping bij lokale golfgroei is een keuze die gemaakt moet worden in het proces van ontwerpen en beoordelen van dijken. Merk op dat deze keuze voor de Hollandsche IJssel geen invloed heeft op de stormopzet, omdat de windstatistiek in dit watersysteem alleen gebruikt wordt voor het berekenen van lokale scheefstand (dwarsopzet) en golfgroei.

3.2.3

Open water windsnelheid en lokale wind hiding

Een ander windfenomeen is de zogenaamde "hiding" in beschutter gelegen gebieden. Binnen het WT12011 en WBI2017 wordt de open water

¹ Momenteel wordt als standaardoptie in Hydra-NL de windstatistiek "Ovkanswind_Schiphol_met_Volkerfactor_2017_metOnzHeid" gebruikt. Om winddragafkapping ook bij golfgroei mee te nemen, zou van dit bestand een nieuwe versie met winddragcorrectie gemaakt moeten worden. Mocht dit als een structurele 'oplossing' worden gezien, dan zou ook gekozen kunnen worden dit als optie in Hydra-NL in te bouwen. Dit is minder foutgevoelig en voor de gebruiker makkelijker dan het aanpassen van de te gebruiken statistiekbestanden.

windsnelheid opgelegd aan het SOBEK-model. Deze is iets hoger dan de potentiële windsnelheid, die het KNMI op een open veld meet. Dit komt omdat de wind zich op het 'gladde' open water beter kan ontwikkelen dan op een open grasveld. Het DPRD-uitgangspunt was om de potentiële windsnelheid te gebruiken, dus het WBI2017-uitgangspunt om de open water windsnelheid toe te passen leidt tot een verhoging van de opzet. De Hollandsche IJssel is echter geen brede rivier, en lokaal staat er redelijk wat bebouwing naast. Het is daarom aannemelijk dat de wind zich hier niet tot open water windsnelheden kan ontwikkelen. Daarom is gekozen om in de SOBEK-berekeningen de potentiële windsnelheid boven de Hollandsche IJssel toe te passen zoals dit voorheen ook wel voor de smallere bovenrivieren werd gedaan. Deze keuze is wellicht nog steeds aan de conservatieve kant, de werkelijke windsnelheid zou lager kunnen zijn.

3.2.4

Ruimtelijk variërende wind

Een laatste windaspect is de ruimtelijk variërende wind. In Stijnen en Daggenvoorde (2018) is in een eenvoudig experiment een ruimtelijk variërend windveld toegepast boven de Vecht-IJsseldelta, wat een groot effect blijkt te hebben op de resulterende opzet. In deze studie kiezen we om dit niet te doen. Dergelijke ruimtelijke windvelden zijn nog niet ver genoeg onderzocht en uitgewerkt om in deze studie toe te passen. Daarnaast heeft het gebruikte SOBEK-RE model per riviertak al een hiding factor toegekend gekregen. Door deze aan te passen op basis van een ruimtelijk variërend windveld kan deze kalibratie verstoord worden. De enige aanpassing van de hiding-factor voor de Hollandsche IJssel is gedaan om de potentiële windsnelheid te kunnen gebruiken. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 4.1.3 en bijlage B.

3.2.5

Afvoerverdeling

De afvoerverdeling uit het WBI2017 (Agtersloot & Paarlberg, 2016) is in deze studie aangehouden. Deze wijkt licht af van de DPRD afvoerverdeling. Beide zijn gegeven in Tabel 1.

*Tabel 1
Afvoerverdeling
volgens DPRD- en
WBI2017-
uitgangspunten.*

Q_Lobith [m ³ /s]	Q Waal [m ³ /s]		Q Nederrijn [m ³ /s]		Q Maas [m ³ /s]	
	DPRD	WBI2017	DPRD	WBI2017	DPRD	WBI2017
600	550	550	25	25	55	55
2.000	1.401	1.453	308	235	217	377
4.000	2.697	2.737	750	702	687	884
6.000	3.997	4.062	1.158	1.045	1.156	1.284
8.000	5.296	5.314	1.572	1.413	1.626	1.708
10.000	6.473	6.511	2.077	2.045	2.095	2.134
13.000	8.285	8.376	2.747	2.732	2.800	2.918
16.000	10.165	10.171	3.376	3.350	3.504	3.620
18.000	11.435	11.111	3.798	3.684	3.974	3.978

Het gekozen WBI2017-uitgangspunt is niet volgens de Planologische Kernbeslissing Ruimte (PKB), waarin de beleidsmatige afvoerverdeling is vastgelegd. Daarmee is het uitgangspunt niet volgens het OI, maar er is geen juist alternatief beschikbaar voor de RMM. De afwijking is echter klein, en zo ver benedenstrooms als de monding van de Hollandsche IJssel is het effect van de afwijking verwaarloosbaar.

De laterale afvoeren in het WBI2017 zijn gelijk aan die in het WTI2011. Deze zijn dus niet aangepast.

3.3 Hollandsche IJsselkering

Voor de Hollandsche IJsselkering (HIJK) worden in de analyses drie verschillende faalkansen gehanteerd, dit zijn:

- Huidige situatie: 1/200 per sluitvraag
- 1/1.000 per sluitvraag
- 1/5.000 per sluitvraag

Deze kansen beschrijven de kans op het niet sluiten van de HIJK terwijl het wel nodig was gegeven de hydraulische belastingen. Bijlage D gaat nader in op het partieel functioneren van de HIJK, en kan als achtergrond bij deze faalkansen dienen.

3.4 Klimaatscenario's

3.4.1 Gebruikte scenario's

Voor het berekenen van waterstanden en HBN's voor toekomstige zichtjaren is gebruik gemaakt van aangepaste statistiek voor de afvoer en een verhoogde zeespiegel. Hiervoor is gerekend met de KNMI W⁺ scenario's, conform OI-uitgangspunt (Rijkwaterstaat, 2017). Deze geven voor 2050 een zeespiegelstijging van 35 cm, en voor 2100 een zeespiegelstijging van 85 cm (KNMI, 2006). Voor het huidige klimaat is de zeespiegel bij Maasmond, waarvan de zeewaterstandstatistiek wordt gebruikt, reeds 10 cm gestegen conform het WBI2017 (Agtersloot & Paarlberg, 2016). Voor 2050 en 2100 komt hier dus nog 25 en 75 cm bij.

Het is niet te verwachten dat de Hollandsche IJsselkering onveranderd functioneert bij 85 cm zeespiegelstijging (2100W⁺). Bij de minste of geringste opzet zal het sluitpeil van 2,25 m+NAP gehaald worden, waardoor de kering zeer vaak dicht moet. Wellicht dat tegen deze tijd het sluitcriterium of de kering in zijn geheel vervangen is. De berekeningen voor zichtjaar 2100 hebben als doel om voor ontwerpzichtjaren na 2050 de randvoorwaarden te berekenen en om het effect van de systeemmaatregelen onder klimaatverandering inzichtelijk te maken, maar niet om de situatie in 2100 te beschrijven.

3.4.2

Verschillen in databases voor klimaatscenario's

De zeespiegelstijging wordt in Hydra-NL verwerkt door de statistiek van de zeewaterstanden in zijn geheel op te hogen met een aantal centimeter. Wanneer voor 2050W⁺ een berekening wordt gemaakt met een database op basis van het huidige klimaat, wordt een zeespiegelstijging van 25 cm gemodelleerd als een stormopzet van 25 cm onder dagelijkse omstandigheden. Met betrekking tot de (kentering)sluitingen van de stormvloedkeringen is dit niet helemaal correct, omdat het basisgetij eigenlijk verhoogd moet worden. Belangrijker is echter dat in het belastingmodel van de Hollandsche IJssel de zeewaterstand in de productieberekeningen aan de windsnelheid gekoppeld is. Een 25 cm hogere stormopzet geeft dus ook hogere windsnelheden. Merk op dat dit effect alleen geldt bij het gebruik van een database waarin wind en zeewaterstand gekoppeld zijn. In de WBI2017-databases voor de Rijn-Maasmonding zijn windsnelheid en zeewaterstand onafhankelijk, en zullen verschillen tussen databases voor klimaatscenario's niet door dit effect komen.

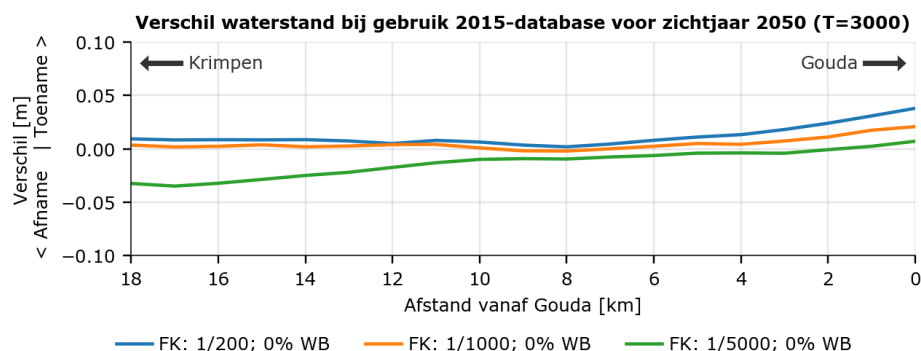
Deze inconsistentie is opgelost door een extra set productie-berekeningen te draaien met zeespiegelstijging. Het basisgetij wordt dan verhoogd en vervolgens gekoppeld aan dezelfde windsnelheden als gebruikt in de situatie zonder zeespiegelstijging. De windsnelheid wordt hierdoor niet overschat en de sluitingen zijn correct gesimuleerd. De gebruiker moet vervolgens wel kiezen welke database te gebruiken, en bij tussenliggende zichtjaren de resultaten interpoleren.

3.4.3

Verschillen bij gebruik database huidig klimaat voor 2050W⁺ en 2100W⁺

Het verschil in waterstand voor 2050 bij het gebruik van de database voor het huidig klimaat, en de database voor 2050W⁺ is gegeven in Figuur 2. Het verschil geeft op sommige plaatsen een toename en op andere plaatsen een afname van waterstanden. Voor de faalkansen van 1/200 en 1/1.000 per sluitvraag van de HIJK is de open situatie maatgevend en zien we alleen een toename door de grotere windsnelheid bij Gouda. Bij een faalkans van 1/5.000 per sluitvraag speelt de gesloten situatie ook mee voor de maatgevende waterstand en zie je dat grotere windsnelheden ervoor zorgen dat het water bij Krimpen 'weggeblazen' wordt. Over de hele linie is het verschil kleiner dan 5 cm.

*Figuur 2
Verskil in
waterstand bij
gebruik database
huidig klimaat met
aangepast statistiek,
of gebruik 2050
database.*

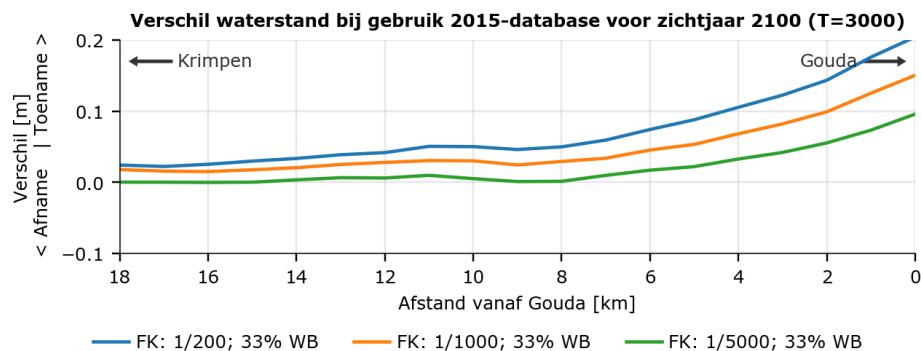


Hoewel het verschil kleiner is dan 5 cm, heeft het gebruik van de database voor het huidig klimaat dus wel een effect op de resultaten. De toename bij Gouda, en afname bij Krimpen komt voornamelijk door de hogere windsnelheid. Daarom is dit effect ook het grootst bij de kleinste faalkans, omdat hier de gesloten situatie het meest bijdraagt. Naast de wind spelen de andere sluitmomenten van de HIJK ook een rol in de verschillen. Omdat de resultaten met een 2050W⁺ database fysisch gezien het meest realistisch zijn, hebben we de deze gebruikt voor het produceren van 2050W⁺ resultaten. We bevelen aan deze database ook binnen het BOI te gebruiken, vanwege de correcte koppeling met de wind.

Voor scenario 2100W⁺ zijn ook productieberekeningen gedraaid. De zeespiegelstijging is hier 75 cm ten opzichte van het huidig klimaat. Het verschil tussen zeespiegelstijging via productiesommen en via stormopzet zal dus nog groter zijn, omdat Hydra-NL met een hogere windsnelheid rekent.

Het verschil langs de Hollandsche IJssel voor de verschillende faalkansen van de HIJK is gegeven in Figuur 3. Vooral bij Gouda is het effect van de wind duidelijk te herkennen. In deze situatie zijn de verschillen het grootst bij een 1/200 faalkans, omdat het effect van de wind in de open situatie het grootst is (bij Krimpen wordt het water niet langer "weggeblazen"). De verschillen zijn dusdanig dat het voor 2100W⁺ aan te bevelen is met een klimaatdatabase te rekenen.

*Figuur 3
Verskil in
waterstand bij
gebruik database
huidig klimaat met
aangepast statistiek,
of gebruik 2100
database.*



Waterbezwaar

De grootte van het waterbezwaar in de productieberekeningen is 75 m³/s, verdeeld over de vijf grootste gemalen (RWS-ZH, 2005). Tabel 2 geeft de verdeling van de afvoeren over deze gemalen.

*Tabel 2
Verdeling van de laterale afvoeren over de verschillende gemalen.*

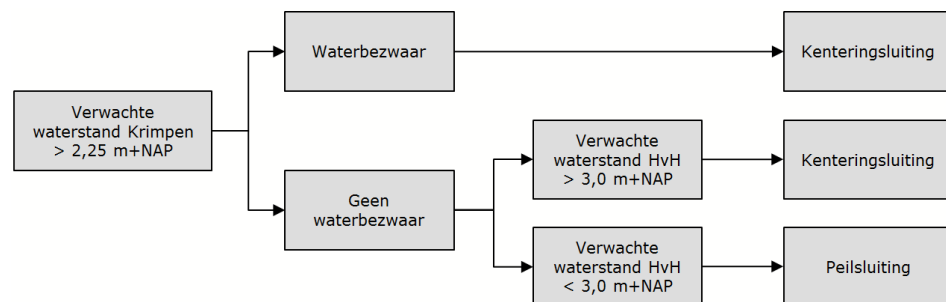
Gemaal	Afstand [km]	Percentage [%]	Laterale toevoer [m ³ /s]
De Waaier	0,0	15%	11,25
Gouda	2,9	40%	30,00
Verdoold	5,3	10%	7,50
Kroes	7,0	25%	18,75
Veurink	14,7	10%	7,50
<i>Totaal</i>		<i>100%</i>	<i>75,00</i>

De kans op waterbezwaar is gesteld op 1/3 in geval van sluiting. Uit ervaringen blijkt dat de kering in grofweg 1 op de 3 sluitingen op kentering sluit doordat er sprake is van waterbezwaar (RWS-WNZ, 2018). In hoofdstuk 4 gaan we nader in op het effect van het waterbezwaar.

Sluitregime

Een tweede modelaanpassing betreft het sluitregime van de HIJK. Deze is zoveel mogelijk conform het draaiboek toegepast (RWS-ZH, 2005) en is anders dan het in eerdere DPRD studies gehanteerde regime. Dit betekent dat de kering bij een voorspelde waterstand groter dan 2,25 m+NAP sluit. In geval van waterbezwaar, of wanneer de verwachte waterstand bij Hoek van Holland hoger is dan 3,0 m+NAP, sluit de HIJK op kentering. In de overige gevallen (geen waterbezwaar en waterstand bij Hoek van Holland < 3,0 m+NAP) op peil. Figuur 4 geeft de beslisboom voor het bepalen van het type sluiting.

*Figuur 4
Beslisboom voor het type sluiting van de Hollandsche IJsselkering*



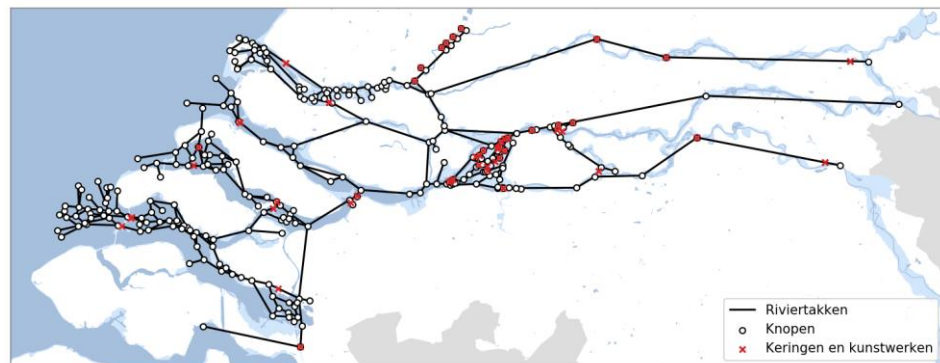
4 Aanpassingen SOBEK en Hydra-NL

Om aan de uitgangspunten te voldoen zoals in het vorige hoofdstuk beschreven, moeten aanpassingen aan het SOBEK-model en Hydra-NL worden gedaan. Dit hoofdstuk beschrijft deze aanpassingen.

4.1 Aanpassingen SOBEK

Om de verschillende systeemmaatregelen netjes te verwerken en aan alle uitgangspunten te voldoen, wordt het bestaande DPRD SOBEK-RE model aangepast. Dit model is weergegeven in Figuur 5. Het model bevat de Rijntakken vanaf het begin van de Neder-Rijn/Lek en de Waal en de Maas vanaf Molenhoek, tot aan de monding in zee.

*Figuur 5
Overzicht SOBEK-
model van de Rijn-
Maasmonding.*



De aanpassingen aan het SOBEK-model betreffen:

1. de sluitprocedure van de Hollandsche IJsselkering,
2. het verwerken van de windsnelheden en de winddragafkapping,
3. het toevoegen van waterbezwaar,
4. de translatiegolf.

De genoemde punten worden in onderstaande paragrafen besproken.

4.1.1 Sluitprocedure

In het bestaande SOBEK-model sluit de Hollandsche IJsselkering op peil. De sluiting wordt gestart wanneer bij Krimpen aan den IJssel een waterstand van 1,80 m+NAP wordt gehaald. De hoogte van de deur boven de drempel neemt in één uur af van 9 meter tot 0 meter. In deze studie is het belangrijk dat de verschillende type sluitingen goed worden gesimuleerd. Daarom hebben we 3 type sluitingen geïmplementeerd. De gebruikte sluitcriteria zijn uitgebreid beschreven in bijlage C. Hieronder zijn ze kort opgesomd.

1. Reguliere peilsluiting

Wanneer de sluiting op peil plaatsvindt, start de sluiting bij een waterstand van 1,80 m+NAP bij Krimpen. De schuif daalt vervolgens in 12,5 minuut (2 cm per seconde) van 18 naar 3 meter, en in de laatste 40 minuten in 10 stappen naar 0 meter. Dit vertraagde laatste stuk is om te voorkomen dat een (grote) translatiegolf ontstaat.

2. Kenteringsluiting met spuien

Wanneer de sluiting op kentering plaatsvindt, gaat de kering dicht (in 15 minuten) op het moment dat de stroming draait voorafgaand aan het voorspelde hoogwater. Dit moment komt ongeveer overeen met het laagwater, waardoor de binnenwaterstanden bij sluiting laag zijn. De kering gaat weer open op het kentering na het hoogwater. Als tijdens de sluiting de binnenwaterstand boven de buitenwaterstand komt, wordt de schuif geheven zodat gespuid kan worden.

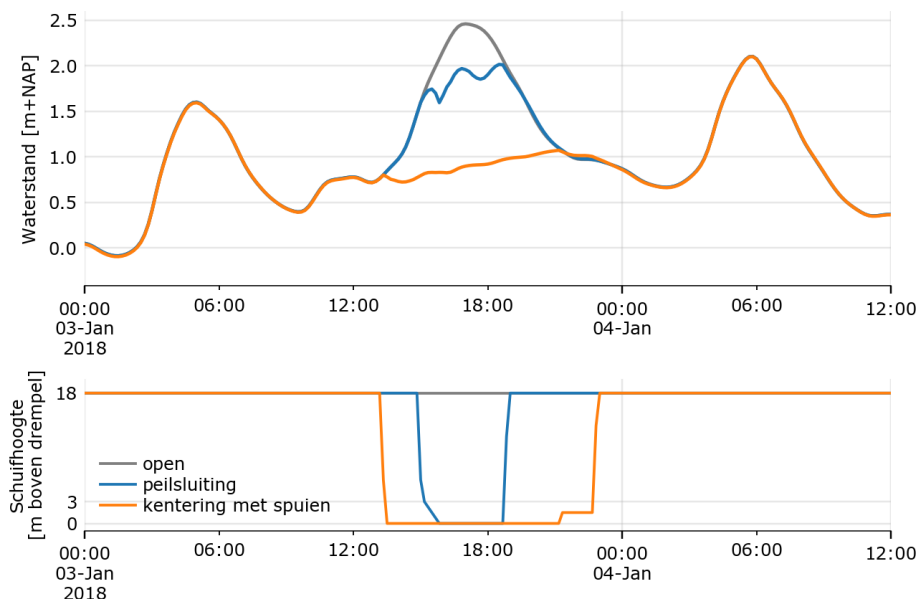
3. Open kering

De laatste 'sluitsituatie' is de open kering. Dit komt voor wanneer de kering niet hoeft te sluiten, of wanneer de sluiting faalt. In de productieberekeningen is geen onderscheid gemaakt in de manieren waarop de kering kan falen.

Alle sluitingen worden gestuurd op een hoogwatervoorspelling. Alleen wanneer de waterstand op de Hollandsche IJssel boven de 2,25 m+NAP komt wordt de kering gesloten. Deze 'hoogwatervoorspelling' is een SOBEK simulatie zonder sluiting, die altijd eerst wordt gedraaid.

Voor de storm van 3 januari 2018 zijn deze drie sluitingen gesimuleerd. De resulterende waterstanden bij Krimpen en de corresponderende hoogten van de schuif zijn in Figuur 6 gegeven.

*Figuur 6
3 sluitprocedures
voor het hoogwater
van 3 januari 2018.*



Uit de grafiek blijkt dat de waterstanden bij de sluiting op kentering een stuk lager zijn dan bij de peilsluiting. Ook de optredende translatiegolf is kleiner.

4.1.2

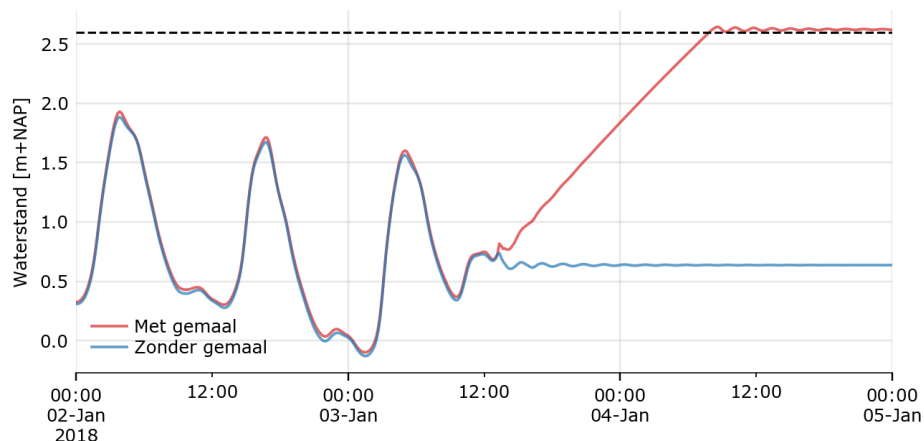
Waterbezwaar

Op de Hollandsche IJssel zorgen de vijf grootste gemalen (de Waaier, Gouda, Verdoold, Kroes en Veurink) voor laterale toevoer naar de Hollandsche IJssel. Het waterbezwaar wordt geschat op $75 \text{ m}^3/\text{s}$ als extreme, maar realistische waarde (de Gelder, 2019). Tabel 2 in het uitgangspuntenhoofdstuk geeft de verdeling van de afvoeren over de gemalen.

Er zijn twee maalstopcriteria gebruikt. De gemalen stoppen wanneer de waterstand bij Krimpen $2,6 \text{ m} + \text{NAP}$ bereikt, of de waterstand bij gemaal Gouda $2,8 \text{ m} + \text{NAP}$ bereikt. Dit tweede criterium is toegevoegd omdat een wind vanuit zuidwest tot west het water richting Gouda kan opzetten, waardoor daar hoge waterstanden ontstaan terwijl het criterium bij Krimpen aan de IJssel niet gehaald wordt.

Figuur 7 laat zien wat het effect is van het waterbezwaar op de waterstanden.

*Figuur 7
Waterstanden bij sluiten met en zonder toevoer van gemalen.*



Een aantal punten valt op:

1. Een waterbezwaar van $75 \text{ m}^3/\text{s}$ geeft een waterstandsstijging van grofweg 10 cm per uur. Afhankelijk van de sluitwaterstand zal het ongeveer 10 tot 20 uur duren voordat het maalstoppeil bij Krimpen wordt bereikt.
2. Het waterstandsverschil door de extra afvoer op de Hollandsche IJssel is klein tijdens de open situatie. In de periode van 2 tot 3 januari zien we hooguit enkele centimeters verschil in waterstand. Een maalstop afkondigen terwijl de kering open (of niet gesloten) is, heeft dus weinig effect.

4.1.3

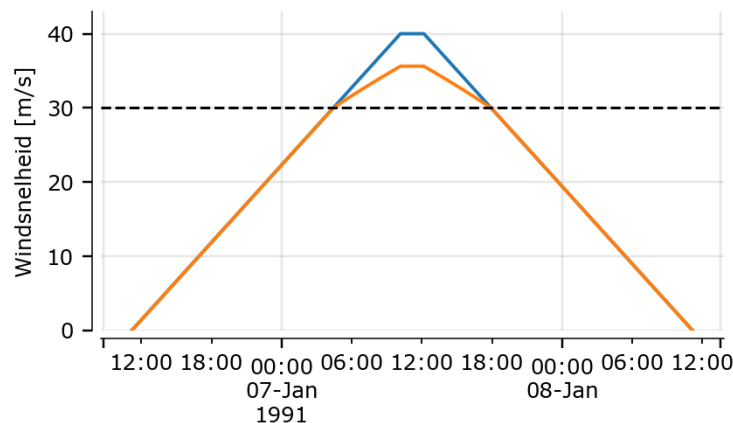
Wind

Uit de uitgangspunten zoals besproken in hoofdstuk 3 volgen verschillende aanpassingen aan de wind. Zo moet de winddragafkapping worden verwerkt en boven de Hollandsche IJssel de potentiële windsnelheid worden gebruikt. De mogelijkheden om de wind te definiëren in SOBEK-RE zijn echter beperkt.

Er kan maar één dragcoëfficiënt worden opgegeven en maar met één windverloop worden gerekend dat uniform over het gebied wordt toegepast.

Tijdens de storm verloopt de wind van laag naar hoog naar laag. Alleen in de piek moet eventueel de dragcoëfficiënt worden aangepast. We lossen dit op door eerst uit te rekenen wat de effectieve schuifspanning zou zijn wanneer de dragcoëfficiënt wel aangepast zou worden. Vervolgens passen we de windsnelheid zodanig aan dat deze zonder winddragafkapping overeen komt met de schuifspanning. In Figuur 8 is een voorbeeld gegeven van een verloop met en zonder correctie. In bijlage B is deze vertaling wiskundig uitgewerkt.

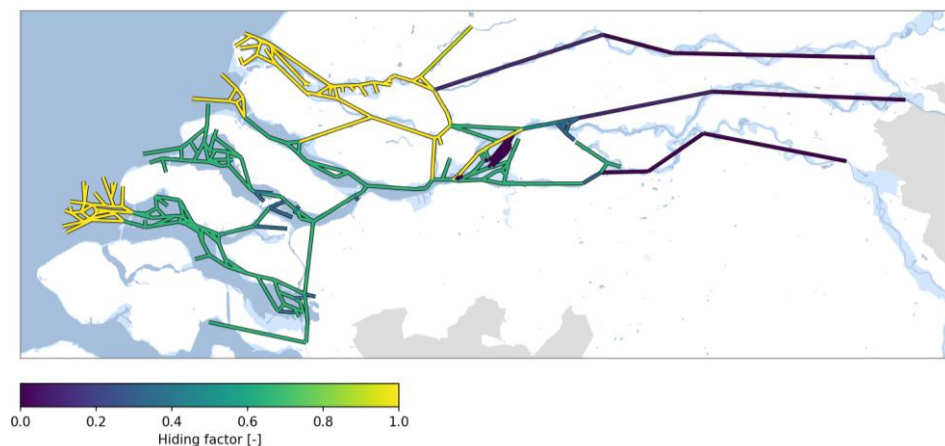
*Figuur 8
Windverloop met en
zonder
winddragcorrectie.*



Vervolgens moet de wind opgeschaald worden van potentiële naar open water windsnelheid, behalve op de Hollandsche IJssel waar de potentiële windsnelheden opgelegd wordt. Hier lopen we tegen de beperking in SOBEK aan dat maar één windverloop modelbreed opgegeven kan worden. We lossen dit op door de wind op te schalen, maar op de Hollandsche IJssel de hiding factor wat aan te passen, zodat hier met een lagere (potentiële) winsnelheid gerekend wordt (zie ook hoofdstuk 3.2).

De enige aanpassingen die doorgevoerd zijn in de hiding-factoren zijn dus boven de Hollandsche IJssel. In combinatie met de reeds aanwezige hiding-factoren leidt dit tot het in Figuur 9 gegeven beeld voor het DPRD-model.

*Figuur 9
Hiding factoren in
het SOBEK-model.
Merk op dat op de
Hollandsche IJssel
de hiding factor bij
een piekwind-
snelheid van 40 m/s
iets onder 1.0 ligt.*



Het lokaal opleggen van de potentiële wind leidt ertoe dat het knikpunt voor de winddragafkapping niet overal bij 30 m/s ligt. Voor de takken met een grotere hiding factor dan de Hollandsche IJssel ligt deze te hoog, waardoor de windsnelheden iets te hoog zijn. Voor de takken met een kleinere hiding factor ligt het knikpunt te laag, waardoor te lage windsnelheden gebruikt worden. Op de Hollandsche IJssel is het knikpunt altijd 30 m/s, omdat deze riviertak de focus van de studie is.

4.1.4

Translatiegolf

Een belangrijk punt uit de voorgaande studie was de translatiegolf die optreedt na sluiting. De grootte van deze golf is vooral afhankelijk van de stroomsnelheid op het moment van sluiten. Hoe groter deze is, hoe heftiger de schommelingen die optreden. Deze schommelingen zijn dusdanig groot dat ze kunnen leiden tot de maximale opgetreden waterstanden.

Het is moeilijk te zeggen of de gesimuleerde grootte van de translatiegolf overeenkomt met de werkelijkheid grootte, wederom omdat niet zoveel goede metingen van sluitingen bekend zijn. Door recente sluitingen te simuleren met het SOBEK-model komen we soms op een grotere, soms op een kleinere golf uit. De 2D-WAQUA-resultaten laten wel een snellere demping van de golf zien, maar dit lijkt dus niet in lijn met de metingen te zijn.

In de nieuwe set productieberekeningen worden de sluitprocedures aangepast. De open sluiting vindt (conform de werkelijkheid) langzamer plaats, om de translatiegolf te voorkomen. Daarnaast wordt bij hogere zeewaterstanden (>3,0 m+NAP bij Hoek van Holland) altijd op kentering gesloten. Bij een kenteringsluiting ontstaat nauwelijks een translatiegolf. Door de aanpassingen aan de sluitprocedures is het effect van de translatiegolf op hoge waterstanden al verkleind.

Het aanpassen van de sluitprocedures is daarom voldoende om de negatieve effecten van de translatiegolf te verminderen. We doen daarom geen verdere modelaanpassingen om de translatiegolf te dempen anders dan de aanpassing van de sluitingen die doorgevoerd wordt in de productieberekeningen.

4.2

Aanpassingen Hydra-NL

Om het effect van de kenteringsluiting in de resulterende waterstanden en HBN's te kunnen bepalen is het Hydra-NL rekenhart voor de Hollandsche IJssel aangepast. Voor de situatie waarin de Hollandsche IJsselkering gesloten is, wordt nu onderscheid gemaakt tussen een situatie met en zonder waterbezwaar. Beide situaties krijgen een kans toegekend, en een set waterstanden in de database met hydraulische randvoorwaarden. Standaard is de kans op waterbezwaar 1/3. In 33% van de gevallen valt een hoogwater (voor de Hollandsche IJssel voornamelijk door storm op zee) dus samen met

zware neerslag. Voor de grootte van het waterbezwaar is deze kans van voorkomen een conservatief uitgangspunt.

Een tweede aanpassing in Hydra-NL betreft de modelonzekerheid in de waterstand. Tot nu toe werd deze in het Benedenrivierengebied (en ook de Hollandsche IJssel) afhankelijk gesteld van de sluitsituatie van de Europoortkering. Voor de Hollandsche IJssel is het echter logisch deze aan de sluitsituatie van de HIIK zelf te koppelen. Dit vergt een aanpassing in Hydra-NL.

Concreet zijn de volgende aanpassingen in Hydra-NL doorgevoerd:

1. Het toevoegen van de sluitprocedure voor sluiten op kentering;
2. Het berekenen van frequentielijnen, illustratiepunten en uitsplitsingen gegeven de kans op waterbezwaar;
3. Het verwerken van de modelonzekerheid in de waterstand op basis van de toestand van de Hollandsche IJsselkering, in plaats van de toestand van de Europoortkering.

5 Resultaten

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten uit de nieuwe productieberekeningen. Eerst presenteren we de waterstandsresultaten volgend uit de nieuwe productieberekeningen voor het huidige klimaat, 2050W⁺ en 2100W⁺. Hiermee kunnen we het effect van de verschillende systeemmaatregelen bepalen. Vervolgens blikken we kort terug op de resultaten uit mini-systeemanalyse (Rongen & Botterhuis, 2018). Dit doen we, omdat dit inzicht biedt in de oorsprong van de resultaten. Vervolgens gaan we specifiek in op de HBN-resultaten voor de verschillende zichtjaren. Als laatste worden de resultaten met betrekking tot de modelonzekerheid en de maalstop gegeven.

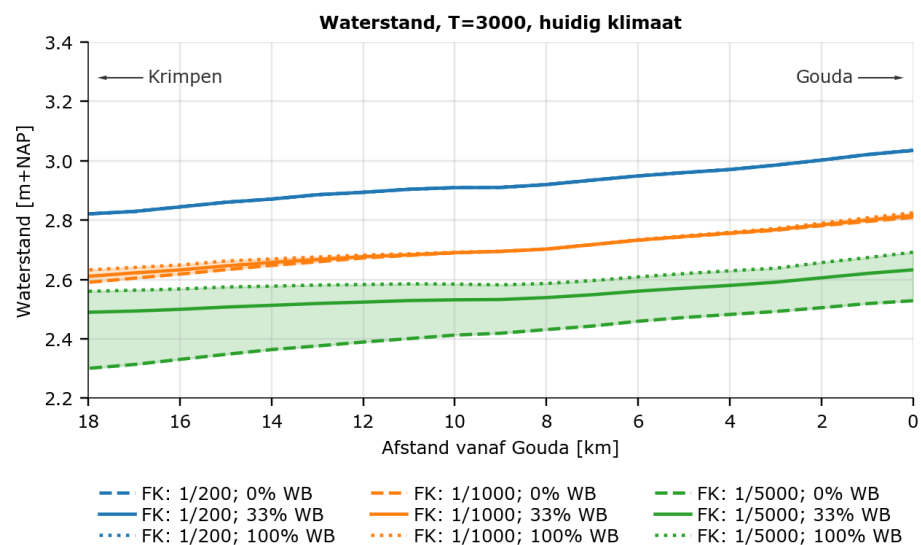
5.1 Effect systeemmaatregelen op waterstanden

Deze paragraaf geeft de resultaten uit de nieuwe productieberekeningen, berekend met de nieuwe versie van Hydra-NL. De resultaten zijn opgesplitst naar faalkans van de HIJK en waterbezwaar, zodat het effect van de systeemmaatregelen op de maatgevende waterstanden duidelijk wordt. De resultaten zijn berekend voor het huidige klimaat en de zichtjaren 2050 en 2100 en de beide normen (ondergrens-norm) van de aangrenzende trajecten (1/3000 en 1/1.0000 jaar).

5.1.1 Huidig klimaat, waterstanden 1/3.000 jaar

Figuur 10 geeft de resultaten onder het huidig klimaat bij een overschrijdingskans van 1/3.000 per jaar.

*Figuur 10
Waterstanden met
nieuwe productie-
berekeningen en een
nieuwe versie van
Hydra-NL, voor
T=3.000 jaar en
huidig klimaat.*



De blauwe, oranje en groene lijnen geven de faalkansen van 1/200, 1/1.000 en 1/5.000 per sluitvraag van de Hollandsche IJsselkering aan. Per faalkans is onderscheid gemaakt tussen geen, 1/3 kans op, en altijd waterbezwaar. 1/3 is de expertinschatting die we gebruiken in deze studie, de andere twee geven de bandbreedte aan.

Wat opvalt is dat waterbezwaar pas een verschil geeft bij een faalkans van 1/5.000 (bandbreedte bij 1/200 en 1/1.000 per sluitvraag is verwaarloosbaar). Dit komt omdat pas bij deze kleine faalkans de gesloten situatie een bijdrage gaat geven, waardoor het toegevoegde waterbezwaar effect heeft op (bijdraagt aan) de waterstanden bij de norm.

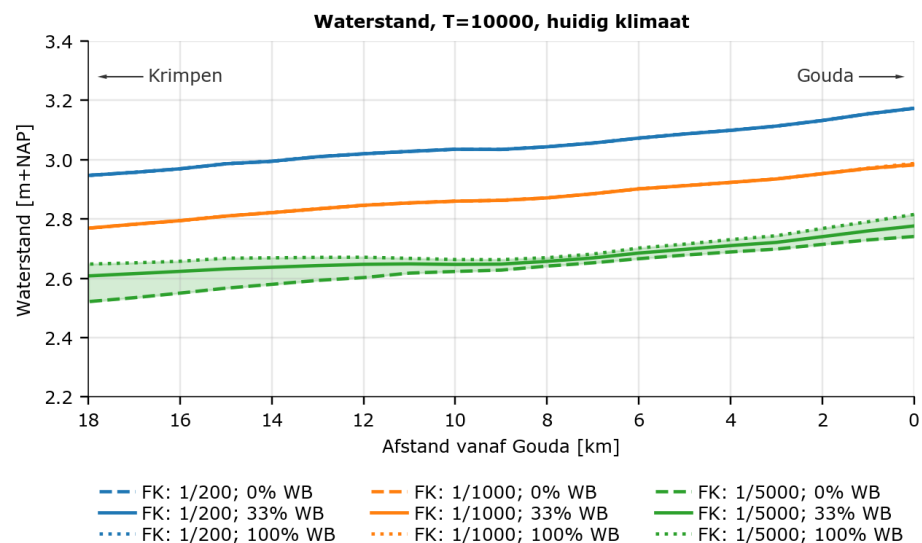
Dat de open situatie zo dominant is, zelfs bij een faalkans van 1/5.000, komt door de sluitwaterstanden en het waterbezwaar. De waterstanden in de gesloten situatie kunnen door het maalstopcriterium niet ver boven de 2,60 m+NAP bij Krimpen, of boven de 2,80 m+NAP bij Gouda stijgen. Voor een faalkans van 1/200 en 1/1.000 is de waterstand in de open situatie (falende HIJK) hoger dan deze maalstoppeilen en is de open situatie dus maatgevend. Pas bij een faalkans van 1/5.000 draagt de open situatie zo weinig bij, dat de waterstanden die daarbij eens per 3000 jaar optreden (i.e. bij de ondergrensnorm) lager zijn dan het maalstoppeil. Hier kan een lange sluiting van de HIJK met waterbezwaar dus hogere waterstanden geven, waardoor de maatgevende waterstand een combinatie is van een open en gesloten (met waterbezwaar) Hollandsche IJsselkering. Merk op dat voor een langdurige sluiting met waterbezwaar de Maeslantkering gefaald moet zijn, omdat anders niet zulke hoge waterstanden op de Hollandsche IJssel voor de kering optreden.

5.1.2

Huidig klimaat, waterstanden 1/10.000 jaar

Voor traject 14-1 geldt een ondergrensnorm van 1/10.000 per jaar. Figuur 11 geeft de waterstanden bij deze norm in het huidig klimaat.

*Figuur 11
Waterstanden uit
huidige studie
(nieuwe productie-
berekeningen en een
nieuwe versie van
Hydra-NL) voor
T=10.000 jaar en
huidig klimaat.*



Voor deze hogere norm wordt de open situatie nog belangrijker dan bij de 1/3.000 per jaar situatie. Door de kleinere kans (zeldzamere situatie) zijn de waterstanden in de open situatie hoger, waardoor de gesloten situatie die gelimiteerd is door de maalstop minder bijdraagt. Daarom is het effect van de waterbezwaar voor de 1/5.000 faalkans kleiner. Maatgevend zijn wederom de stormen waarbij de Europoortkering niet hoeft te sluiten en de Hollandsche IJsselkering faalt.

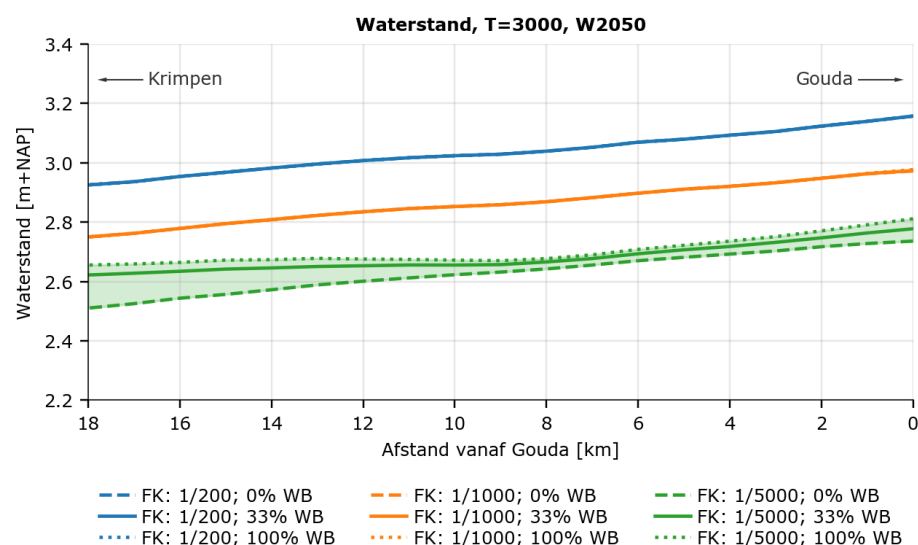
5.1.3

Zichtjaar 2050, waterstanden

De waterstandsresultaten zijn ook berekend voor zichtjaar 2050. In het gebruikte W⁺ scenario stijgt de zeespiegel 35 cm (25 cm ten opzichte van het huidige klimaat), en nemen de rivierafvoeren toe. Voor de Hollandsche IJssel is voornamelijk de zeespiegelstijging relevant. Deze stijging leidt ertoe dat de sluitwaterstanden toenemen, waardoor minder ruimte is voor waterbezwaar. Tegelijkertijd stijgen ook de waterstanden in de open situatie.

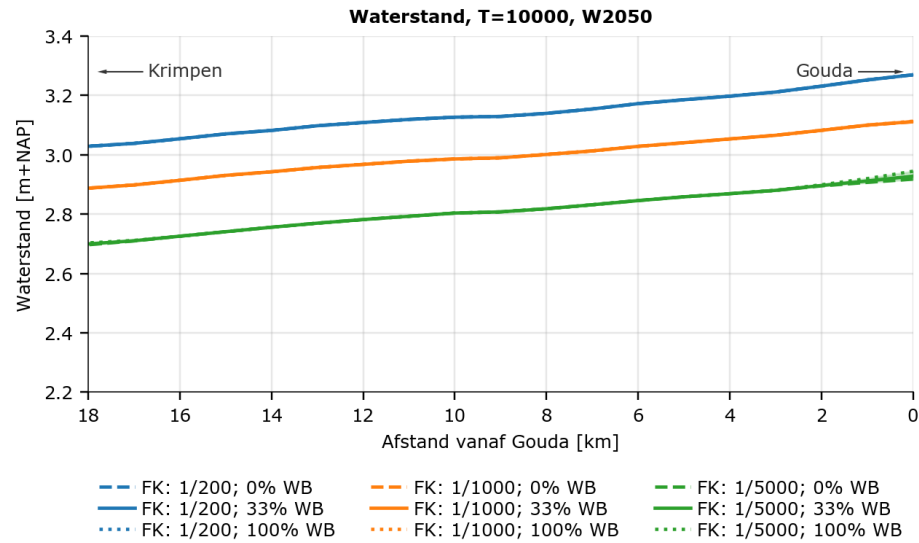
Figuur 12 geeft de resultaten bij een ondergrensnorm van 1/3000 per jaar, Figuur 13 bij 1/10.000 per jaar. De resultaten voor 1/3.000 per jaar lijken erg op die in Figuur 11. Het effect is ongeveer hetzelfde, de hogere waterstanden door zeespiegelstijging leiden tot een grotere invloed van de open situatie. Dit effect is dus belangrijker dan de hogere sluitwaterstand bij de dichte situatie.

*Figuur 12
Waterstanden uit huidige studie (nieuwe productie-berekeningen en een nieuwe versie van Hydra-NL) voor T=3.000 jaar en zichtjaar W2050.*



Bij een normfrequentie van 1/10.000 per jaar is het effect van het waterbezwaar vrijwel geheel weg. Hier is de open situatie dus (nog) dominant.

Figuur 13
Waterstanden uit huidige studie (nieuwe productie-berekeningen en een nieuwe versie van Hydra-NL) voor T=10.000 jaar en zichtjaar W2050.



5.1.4

Zichtjaar 2100, waterstanden

Ook voor 2100 zijn de maatgevende waterstanden bepaald. In het gebruikte W⁺ scenario stijgt de zeespiegel 85 cm (75 cm ten opzichte van het huidige klimaat) en nemen de rivierafvoeren verder toe. Voor de Hollandsche IJssel is net als in 2050 voornamelijk de zeespiegelstijging relevant.

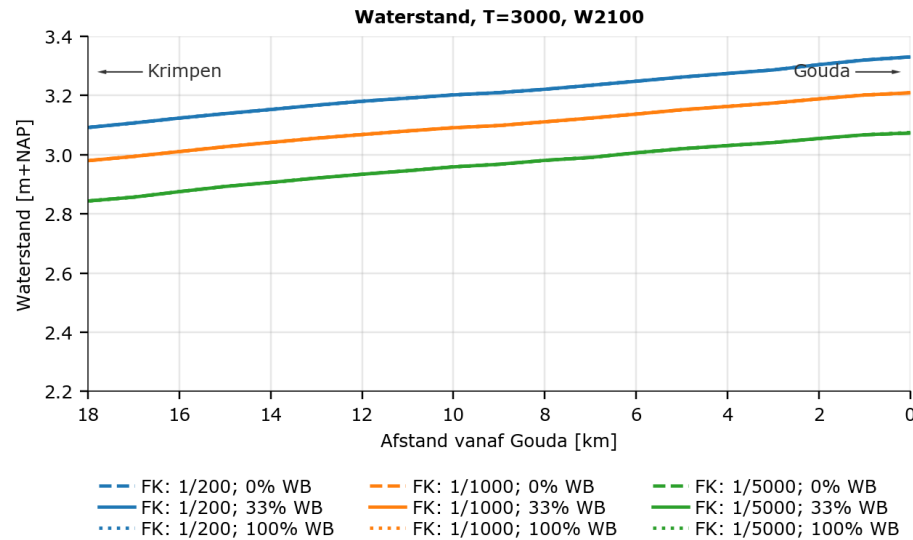
Zoals ook al besproken in paragraaf 3.4, is de (werking van de) Hollandsche IJsselkering in 2100 waarschijnlijk niet meer hetzelfde. Bij het huidige sluitcriterium zal de kering bij een beperkte verhoging van het gemiddeld getij al moeten sluiten. Het is dus niet realistisch dat de kering bij een dergelijke zeespiegelstijging nog hetzelfde functioneert. Desalniettemin geeft deze paragraaf de resultaten voor dit zichtjaar, ze kunnen namelijk wel inzicht geven in het effect van de systeemmaatregelen onder de veranderende randvoorwaarden die klimaatverandering schept. De constatering dat het huidige sluitregime in 2100 wellicht niet meer voldoet kan overigens ook voor de Europoortkering gelden.

Figuur 14 geeft de resultaten voor 2100W⁺ bij een ondergrensnorm van 1/3.000 per jaar, Figuur 15 bij 1/10.000 per jaar. Bij beide normen zijn de waterstanden in de open situatie dusdanig veel hoger dan het maalstoppeil, dat de gesloten situatie niet meer bijdraagt. Desondanks zal door de hogere sluitwaterstanden vaker een maalstop plaatsvinden, deze draagt alleen niet bij aan de waterstand bij de norm.

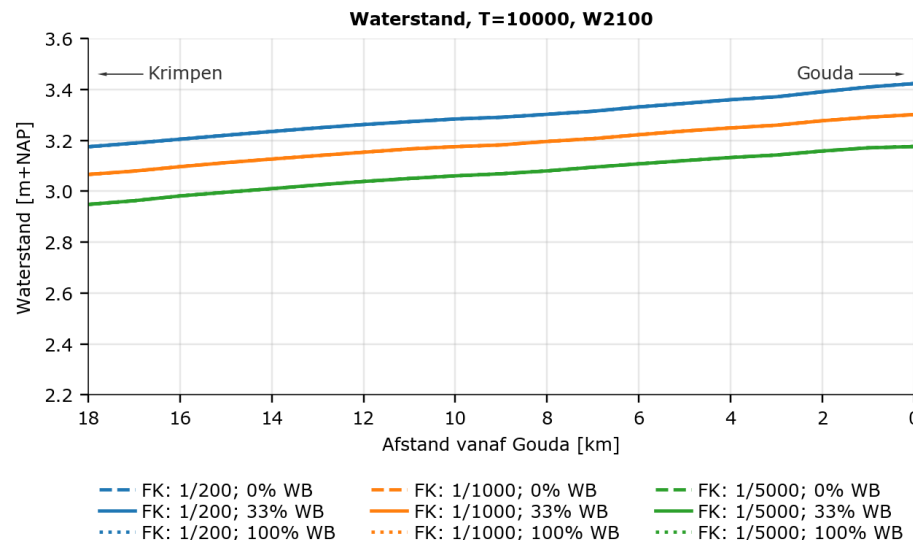
Het verkleinen van de faalkans van de Hollandsche IJsselkering heeft bij deze hoge waterstanden steeds minder effect. Dit komt doordat de waterstanden in extremere situaties minder toenemen (de decimeringswaarde neemt af). Bij deze waterstanden zal de Europoortkering namelijk (ook) moeten sluiten, waardoor er een extra barrière voor de Hollandsche IJssel ligt. De hoge

waterstand komt nu dus pas binnen bij een falende HIJK én een falende Europoortkering.

Figuur 14
Waterstanden uit huidige studie (nieuwe productie-berekeningen en een nieuwe versie van Hydra-NL) voor T=3.000 jaar en zichtjaar W2050.



Figuur 15
Waterstanden uit huidige studie (nieuwe productie-berekeningen en een nieuwe versie van Hydra-NL) voor T=10.000 jaar en zichtjaar W2050.



5.1.5

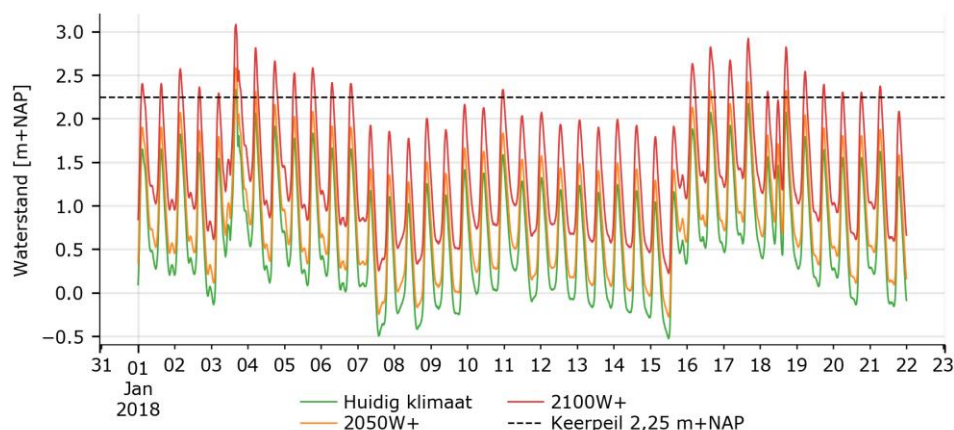
Sluitfrequentie bij zeespiegelstijging

De vorige paragrafen lieten zien dat vooral de zeespiegelstijging tot hogere waterstanden bij de norm leidt. Deze stijging geldt echter ook voor de vaker voorkomende waterstanden waarbij de Hollandsche IJsselkering sluit. In deze paragraaf maken we een inschatting van de sluitfrequentie onder de zeespiegelstijging van de klimaatscenario's. We gebruiken hiervoor de waterstandsmetingen bij Krimpen aan den IJssel (beschikbaar sinds 1971) en corrigeren deze voor zeespiegelstijging in het verleden. Vervolgens kan voor elk scenario bepaald worden hoe vaak het sluitpeil (2,25 m+NAP bij Krimpen) overschreden wordt bij de bij het scenario horende zeespiegelstijging.

Uit de SOBEK-simulaties blijkt dat de verhoging van het gemiddeld getij door zeespiegelstijging bij Krimpen vrijwel even groot is als bij Maasmond. We

kunnen dus aannemen dat de huidige waterstanden in 2050 (W⁺) 25 cm hoger zijn, en in 2100 75 cm hoger. De gemeten waterstanden corrigeren we ook voor de zeespiegelstijging tussen het begin van de meting en nu. Hiervoor gaan we uit van 2,3 mm per jaar zoals bepaald bij Hoek van Holland (Baart et al., 2019). Een voorbeeld van waterstandsverlopen voor verschillende scenario's is weergegeven in Figuur 16.

*Figuur 16
Voorbeeld van waterstandsverlopen bij Krimpen aan den IJssel voor het huidig klimaat en de scenario's 2050W⁺ en 2100W⁺. De zwart gestippelde lijn geeft het keerpeil aan. Wanneer dit overschreden wordt de kering gesloten zijn.*



De afgebeelde periode is willekeurig gekozen, maar laat goed zien dat vooral in 2100 het keerpeil in de buurt komt van de dagelijkse hoogwaters. In dat bereik heeft een beetje extra zeespiegelstijging een groot effect op de sluitfrequentie.

Het aantal sluitingen onder de beschreven uitgangspunten is gegeven in Tabel 3. Vooral bij 75 cm zeespiegelstijging wordt de sluitfrequentie erg hoog, in het stormseizoen meerdere keren per week. Merk op dat het huidige gemiddelde van 4 à 5 sluitingen per jaar groter is dan het aantal overschrijdingen van 2,25 m+NAP, ongeveer 2 keer per jaar. De beheerder sluit de kering op basis van de verwachte waterstand en zal liever te vroeg sluiten dan het keerpeil laten overschrijden. We kunnen dan ook aannemen dat de geschatte frequenties in Tabel 3 aan de lage kant zijn.

*Tabel 3
Verwachte aantal sluitvragen per jaar bij de zeespiegelstijging uit klimaatscenario's*

Scenario	Zeespiegelstijging t.o.v. huidig klimaat	Gemiddeld aantal sluitingen per jaar
Huidig klimaat	-	1,8 per jaar
2050W ⁺	25 cm	6,5 per jaar
2100W ⁺	75 cm	82 per jaar

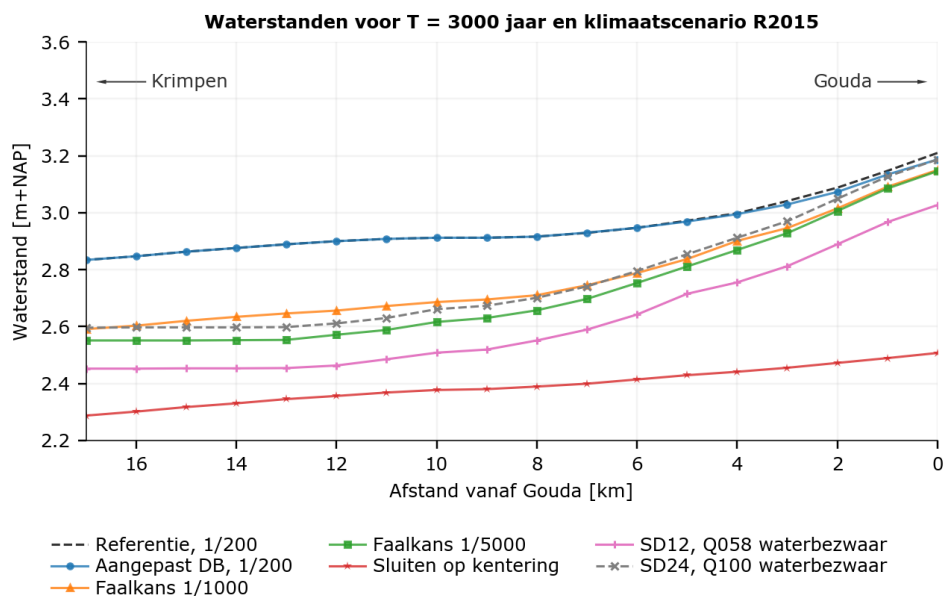
5.2

Vergelijking met mini-systeemanalyse

In deze paragraaf blikken we kort terug op de resultaten uit de mini-systeemanalyse, omdat deze deels afwijken van de nieuwe resultaten. Het beschouwen van deze verschillen geeft inzicht in wat onder de nieuwe uitgangspunten de belangrijkste situaties bij de ondergrensnorm voor de Hollandsche IJssel zijn.

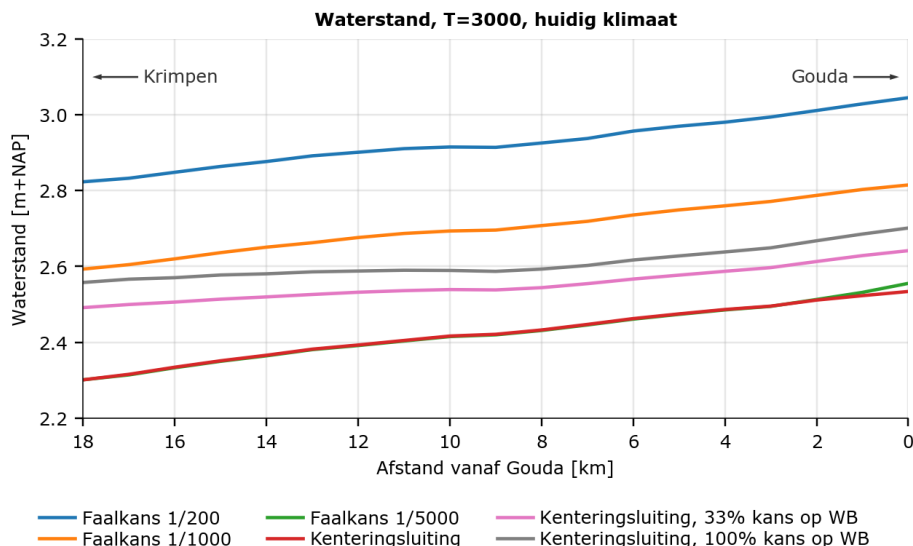
De waterstanden door het aanpassen van de sluiting en het toevoegen van waterbezwaar zijn in de mini-systeemanalyse niet met SOBEK-berekeningen bepaald, maar met aannames van sluitwaterstanden en spuivolumes. De resultaten uit de mini-systeemanalyse zijn te zien in Figuur 17.

Figuur 17
Waterstanden uit de mini-systeemanalyse voor T=3.000 jaar en huidig klimaat. Bij de kenteringsluiting (rode, roze en grijze lijn) hoort een faalkans van 1 op de 5000 sluitvragen.



De verschillende lijnen in de figuur geven verschillende scenario's aan. In Figuur 18 zijn dezelfde resultaten gegeven, maar dan bepaald met de nieuwe productieberekeningen. Merk op dat de waarden op de verticale as afwijken van Figuur 17.

Figuur 18
Waterstanden voor verschillende scenario's. Bij de kenteringsluiting (rode, roze en grijze lijn) hoort een faalkans van 1 op de 5000 sluitvragen.



De resultaten voor de peilsluiting en een faalkans van 1/200 en 1/1.000 per sluitvraag van de HIJK (de blauwe en oranje lijn) zijn bij Krimpen aan de IJssel ongeveer gelijk. Bij Gouda zijn de waterstanden uit de nieuwe berekeningen een stuk lager. Voor een faalkans van 1/5.000 per sluitvraag van de HIJK zijn de waterstanden over de hele linie een stuk lager dan in de

voorgaande studie. De kenteringsluiting geeft echter ongeveer hetzelfde resultaat, net zoals het toevoegen van waterbezwaar. Merk op dat het waterbezwaar nu met een SOBEK-simulatie is berekend, in plaats van de waterstanden achteraf te verhogen. Twee belangrijke verschillen bekijken we nader:

1. Lagere waterstanden bij Gouda

In de eerste plaats zijn de waterstanden bij Gouda berekend met de nieuwe productieberekeningen een stuk lager dan volgde uit de mini-systeemanalyse. Aan de hand van de illustratiepunten, gegeven in Tabel 4, kunnen we dit verklaren.

*Tabel 4
Kansbijdrage uit
illustratiepunt voor
Hydra-NL
berekening bij een
HIJK-faalkans van
1/1.000 per
sluitvraag, km 0
(Waaiersluis), een
peilsluiting en
T=3.000 jaar*

Versie	Waterstand [m+NAP]	Kansbijdrage gesloten HIJK	Kansbijdrage open HIJK
Aangepaste database (mini-systeemanalyse)	3,15	90%	10%
Nieuwe productieberekeningen	2,82	0%	100%

In de oude situatie was de opzet richting Gouda dusdanig groot dat een zuidwestenwind dominant was voor de maatgevende waterstand bij Gouda. Bij de nieuwe productieberekeningen is dit niet langer het geval. De opzet richting Gouda is kleiner door de volgende oorzaken:

- a. Door de aanpassingen aan de sluitprocedures zijn de sluitwaterstanden lager. De maximale waterstand door opwaaiing is daarmee ook lager.
- b. Door de aanpassingen aan de wind (zoals winddragafkapping) is het effect van de wind bij hoge windsnelheden kleiner. Het water wordt dan minder richting Gouda opgezet.
- c. In de voorgaande studie werd de dichte situatie gesimuleerd door de open situatie te verschuiven. Zo kon het versturende effect van de translatiegolf verwijderd worden. Uit de SOBEK-simulaties blijkt echter dat het verhang richting Gouda bij de open situatie groter is, doordat de stroming het water 'opstuwt'.

Door deze drie aspecten had bij gebruik van de aangepaste database uit de voorgaande studie het verkleinen van de HIJK-faalkans bij Gouda weinig effect. De open situatie (die dan minder vaak voorkomt) droeg immers toch al weinig bij. Met de nieuwe productieberekeningen is het effect van de wind op de waterstand kleiner en is de gesloten situatie 'netjes' gesimuleerd. Dit heeft tot gevolg dat de waterstand bij de norm bij Gouda vrijwel geheel door de situaties met een open HIJK veroorzaakt wordt.

2. Lagere waterstanden bij peilsluiting

Een tweede aspect zijn de lagere waterstanden bij de peilsluiting, waardoor zelfs bij een faalkans van 1/5.000 per sluitvraag van de HIJK de open situatie nog dominant is. In de mini-systeemanalyse werd aangenomen dat de binnenwaterstand na sluiting 2,25 m+NAP was, een

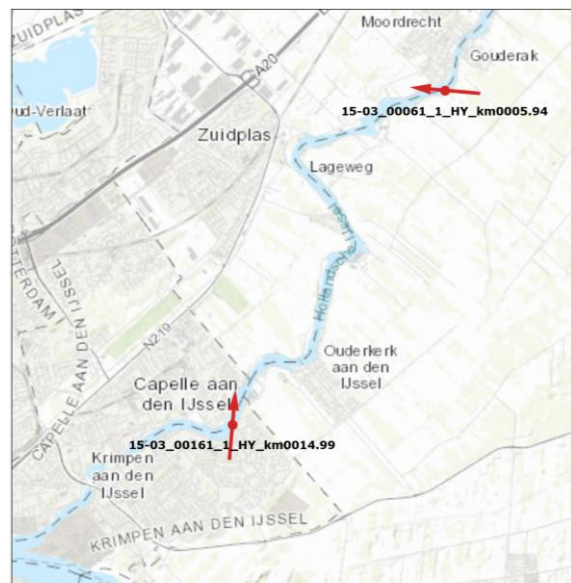
conservatieve bovengrens voor de waterstand na sluiting. Vervolgens namen we aan dat de wind ging liggen en het water horizontaal kwam te staan, waardoor de waterstanden bij Krimpen a/d IJssel nog enkele decimeters stegen. Uit de SOBEK-simulaties blijkt echter dat de HIJK bij een binnenwaterstand van 2,0 m+NAP meestal gesloten is. Ook gaat de kering weer open voordat de waterspiegel horizontaal komt te staan aan het einde van de storm. Hierdoor zijn de waterstanden over het geheel lager en is ook bij een faalkans van 1/5.000 van de HIJK de open situatie nog maatgevend.

5.3

Effect systeemmaatregelen op HBN

Voor twee locaties langs traject 15-3 leiden we de benodigde kruinhoogtes (HBN) af. De eerste locatie ligt rond km 6 met een westelijke dijkoriëntatie, het tweede verder benedenstrooms rond km 15 met een westelijke dijkoriëntatie. De locaties met oriëntatie zijn weergegeven in Figuur 19. Beide locaties liggen aan traject 15-3 in het projectgebied van project KIIJK. De resultaten zijn niet geldig voor de westzijde van het watersysteem, traject 14-1. Vanwege de oriëntatie van dat traject zullen deze dijken gevoeliger zijn voor overloop (hoge waterstanden) dan overslag (waterstanden en wind). Het effect van de systeemmaatregelen aan deze zijde zullen meer in lijn zijn met de waterstandsresultaten bij hoge terugkeertijden; de open situatie is dominant en het effect van het waterbezwaar klein. De exacte resultaten hangen voor beide trajecten af van het profiel, de oriëntatie en keuzes als het kritieke overslagdebiet (zie onderstaande tekst), de getalswaarde kunnen met een HBN-berekening in Hydra-NL bepaald worden.

*Figuur 19
Locaties waarvoor
HBN-berekeningen
zijn uitgevoerd. De
richting van de rode
pijl geeft de
dijknormaal aan.
Golven uit deze
richting geven de
zwaarste belasting
op de dijk.*



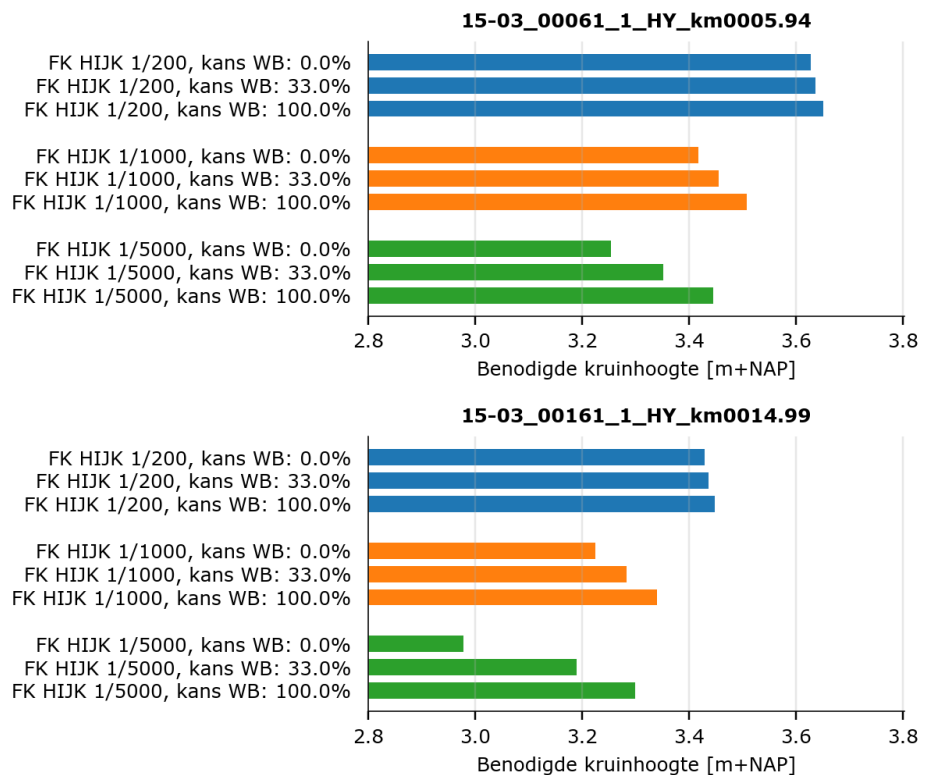
Het gehanteerde kritieke overslagdebiet is 5 l/s/m. Het te kiezen overslagdebiet is een ontwerpkeuze die afhangt van de kwaliteit van de bekleding, overgangen in de bekleding of objecten en constructies op de dijk. Voor de resultaten betekent dit dat de verschillen tussen de varianten meer

zeggen dan de absolute waarden zelf. Beide dwarsprofielen zijn ook afkomstig uit project KIIJK. De taludhelling van het profiel bij km 6 is 1:2,3, voor het profiel bij km 15 deze 1:2,0.

De berekende HBN's voor de twee locaties bij het huidige klimaat zijn gegeven in Figuur 20. Voor een faalkans van 1/200 zijn de verschillen door waterbezwaar klein. Hier is de open situatie maatgevend. Voor een faalkans van 1/1.000 van de HIIJK, en nog sterker voor 1/5.000, neemt de bandbreedte door waterbezwaar flink toe (grotere spreiding in de groene balkjes). Dan wordt namelijk de gesloten situatie steeds belangrijker; een hoog HBN treedt namelijk niet alleen op bij een hoge waterstand, maar ook een combinatie van een lagere waterstand en ongunstige wind kan maatgevend zijn.

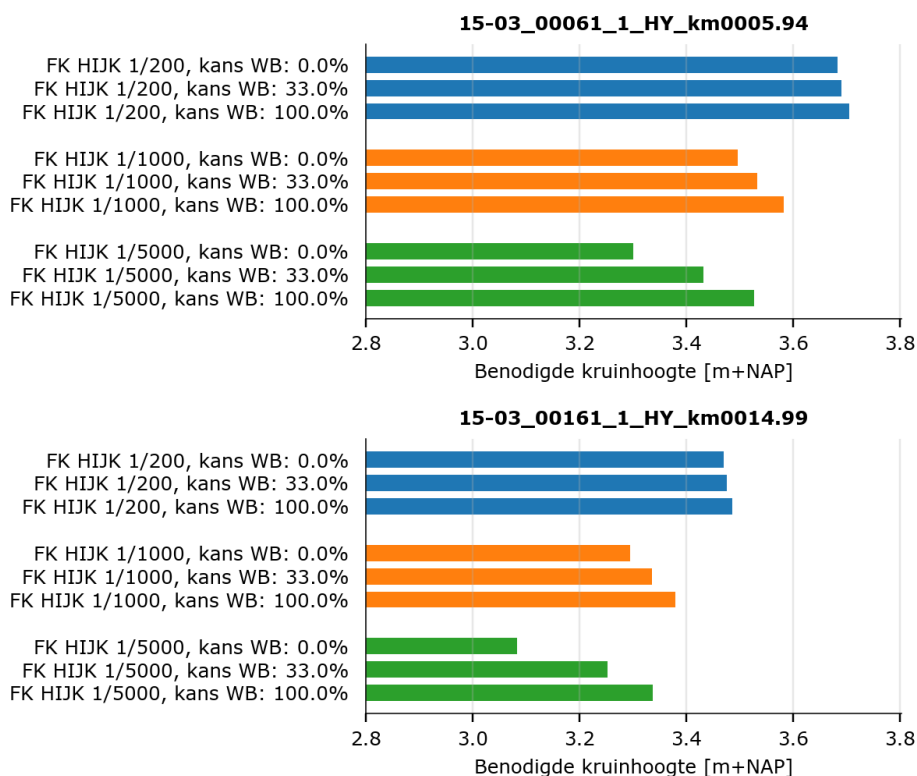
De afname van het HBN door het verkleinen van de faalkans is dan ook iets kleiner dan bij de waterstanden. Het gaat om 20 tot 40 cm, in plaats van de 30 tot 50 cm afname bij waterstand. Als de gesloten situatie belangrijker is, heeft het verkleinen van de faalkans minder effect.

*Figuur 20
HBN's voor twee
locaties langs traject
15-3. De
hoogtenorm
(ondergrens) voor
dit traject is
1/25.000 per jaar.
De resultaten zijn
berekend voor het
huidig klimaat. Er is
een kritiek
overslagdebiet van 5
l/s/m aangehouden.*



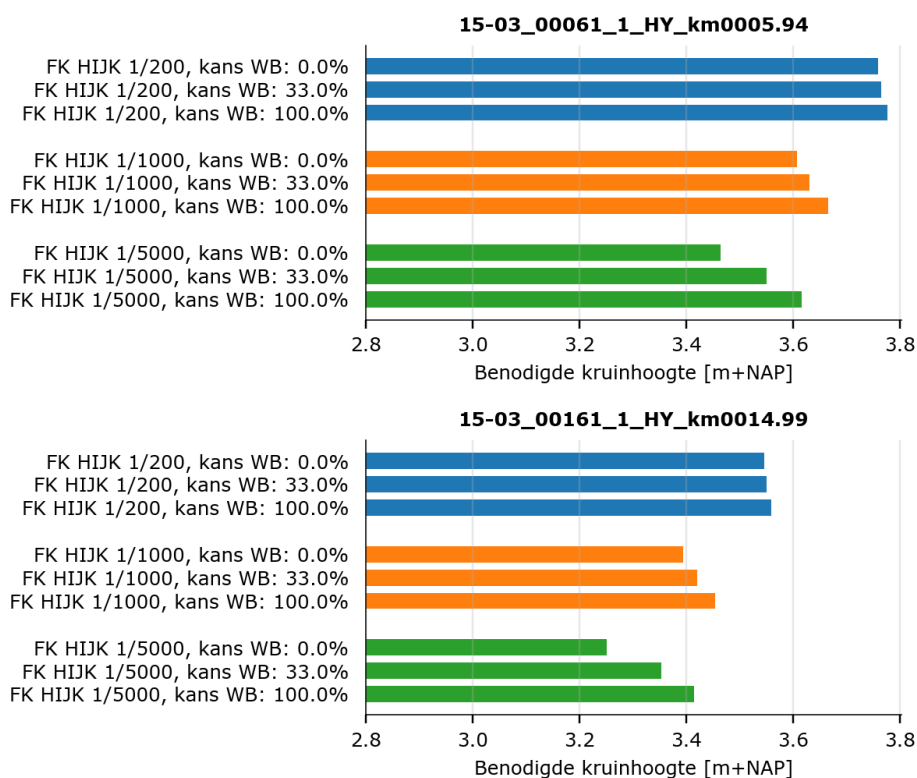
De resultaten zijn ook bepaald voor 2050W⁺, en weergegeven in Figuur 21. Het patroon komt sterk overeen met de resultaten voor het huidige klimaat, alleen dan ongeveer 10 cm hoger.

Figuur 21
HBN's voor twee locaties langs traject 15-3. De hoogtenorm (ondergrens) voor dit traject is 1/25.000 per jaar. De resultaten zijn berekend voor zichtjaar 2050 en klimaatscenario W⁺. Er is een kritiek overslagdebiet van 5 l/s/m aangehouden.



Voor 2100W⁺ zijn de resultaten weergegeven in Figuur 22. De HBN's stijgen gemiddeld 10 cm ten opzichte van 2050W⁺, terwijl de zeewaterstand 50 cm is gestegen. Het effect van het waterbezwaar is kleiner dan in 2050, omdat het maastopcriterium vaker de waterstanden zal beperken. Er is echter nog wel steeds een effect van waterbezwaar, wat voor 2100W⁺ bij de waterstandberekeningen niet langer het geval is.

Figuur 22
HBN's voor twee locaties langs traject 15-3. De hoogtenorm (ondergrens) voor dit traject is 1/25.000 per jaar. De resultaten zijn berekend voor zichtjaar 2100 en klimaatscenario W⁺. Er is een kritiek overslagdebiet van 5 l/s/m aangehouden.

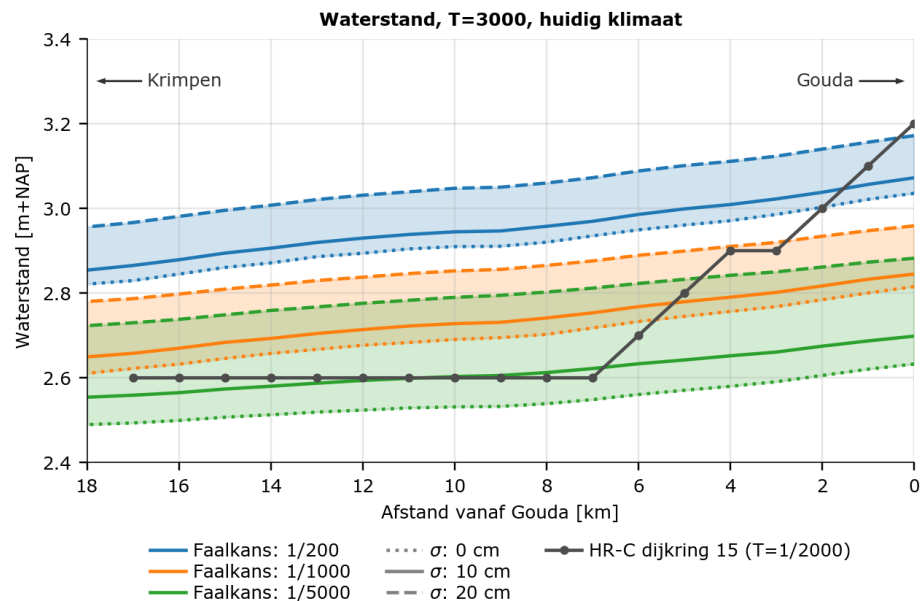


Effect modelonzekerheden waterstand

In de mini-systeemanalyse bleek dat het effect van de modelonzekerheid in de waterstand tot een grote toename in de resulterende waterstanden leidde. Dit komt doordat de gesloten situatie zo gecontroleerd is dat de decimeringswaarde erg klein is. In dit soort situaties is het effect van de modelonzekerheid erg groot (Rongen en Geerse, 2016). De waarden van de modelonzekerheid zijn een belangrijk punt van discussie. Momenteel loopt er een studie naar de modelonzekerheden in het Benedenrivierengebied. Op basis van de voorlopige resultaten lijken de huidige waarden ($\sigma_{EPopen}=15$ cm, $\sigma_{EPgesloten}=25$ cm) een overschatting te zijn. Definitieve waarden zijn echter nog niet beschikbaar. Om het effect op de 1/3.000 per jaar waterstand te bepalen is daarom een bandbreedte geschetst per faalkans van de HIJK in Figuur 23. Hiervoor zijn drie standaardafwijkingen toegepast: 0 cm (geen onzekerheid), 10 cm en 20 cm. Er is daarbij geen onderscheid gemaakt tussen een open en gesloten Hollandsche IJsselkering. De berekeningen zijn allen gedaan met een 1/3 kans op waterbezwaar.

Bij een standaardafwijking van 20 cm wordt het verkleinen van de faalkans voor een groot deel teniet gedaan door de speling die de modelonzekerheid biedt. Het effect is kleiner dan bepaald in de mini-systeemanalyse, maar nog steeds erg groot. De wellicht realistischere waarde van 10 cm geeft echter een beperkte toename van de waterstanden. Ter referentie zijn de resultaten van de HR-C voor dijkkring 15 weergegeven met een zwarte lijn (Kuijper & Slootjes, 2008)². Verder is goed te zien dat de doorwerking van de modelonzekerheid niet-lineair is (het lijntje met een standaardafwijking van 10 cm ligt dicht bij de 0 cm dan bij de 20 cm). Dat betekent dat hogere waarden voor de modelonzekerheid steeds harder gaan doorwerken in de resulterende waterstanden.

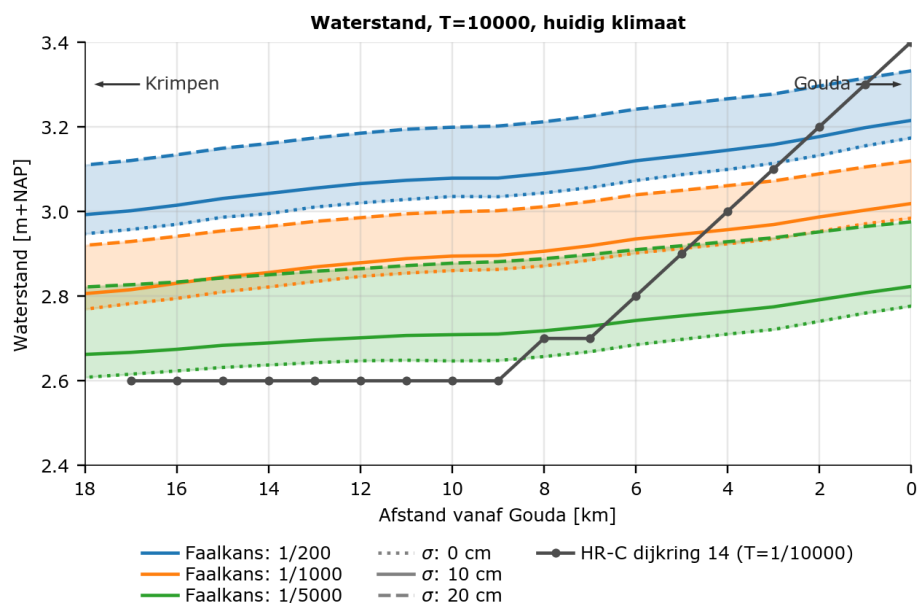
*Figuur 23
Effect
modelonzekerheid
op T=3.000 jaar
waterstanden voor
verschillende
faalkansen van de
Hollandsche
IJsselkering, en
verschillende
waarden voor de
modelonzekerheid in
de waterstand.*



² De maatgevende waterstanden in de HR-C zijn bepaald onder het uitgangspunt dat de HIJK niet faalt. De sterkte toename richting Gouda is het gevolg van windopzet. Maatgevende waterstanden lager dan het maalstoppeil (2,60 m+NAP) zijn verhoogd tot dit niveau.

Aan de linkeroever van de Hollandsche IJssel geldt een ondergrensnorm van 1/10.000 per jaar. Het effect van de modelonzekerheid is hier vergelijkbaar, zoals Figuur 24 laat zien. Bij een faalkans van 1/5.000 voor de HIJK is de bandbreedte iets kleiner, omdat de open kering hier belangrijker is. De blauwe bandbreedte is daarentegen wat breder, omdat de decimeringshoogte boven de 3,0 m+NAP afneemt door het sluiten van de Europoortkering.

*Figuur 24
Effect
modelonzekerheid
op T=10.000 jaar
waterstanden voor
verschillende
faalkansen van de
Hollandsche
IJsselkering, en
verschillende
waarden voor de
modelonzekerheid in
de waterstand.*



Strijker en Geerse (2019) hebben een studie gedaan naar de grootte van de modelonzekerheden in het benedenrivierengebied. Zij komen uit op lagere waarden dan tot nu toe gehanteerd in het WBI2017. De gevonden waarden variëren per gebied, op de Oude Maas b.v. variëren de waarden tussen de 5 en 15 cm. Voor de Hollandsche IJssel zelf zijn geen waarden bepaald. Strijker en Geerse adviseren in hun conceptrapport voor de Rijn-Maasmonding gebiedsbreed een waarde van 15 cm aan te houden. Dit advies is echter nog niet definitief, en de Hollandsche IJssel is niet specifiek beschouwd in de studie. We adviseren daarom de onzekerheidswaarden voor de Hollandsche IJssel af te leiden in een soortgelijke studie. Gegeven het grote effect dat een kleine toename in de onzekerheid kan hebben, is het de moeite waard hier voldoende aandacht aan te besteden.

5.5

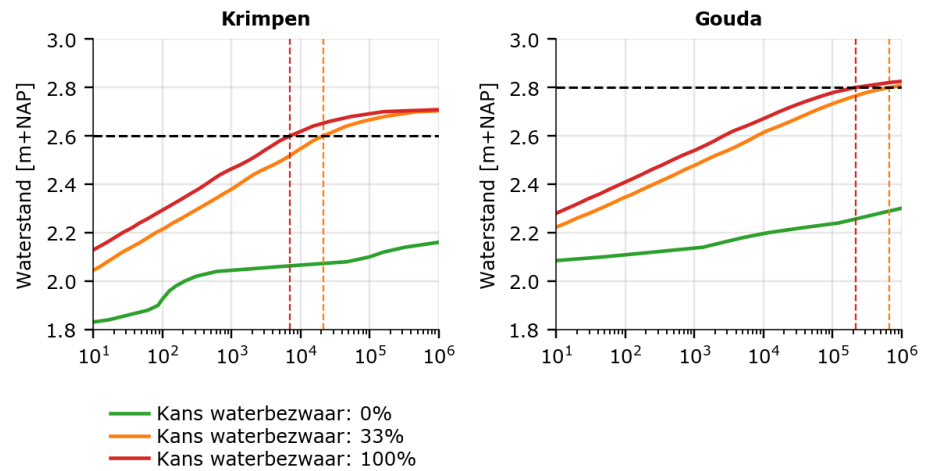
Maalstopfrequentie

De maalstopfrequenties zijn bepaald voor de dichte situatie. Wanneer de kering open is, of faalt, wordt namelijk aangenomen dat er geen maalstop wordt afgekondigd. Het effect van de extra afvoer op de waterstanden is dan klein.

De berekende frequenties voor Krimpen a/d IJssel en Gouda bij het huidig klimaat zijn weergegeven in Figuur 25. Bij een realistische kans op waterbezwaar van 33%, komt de maalstop slechts met een kans van

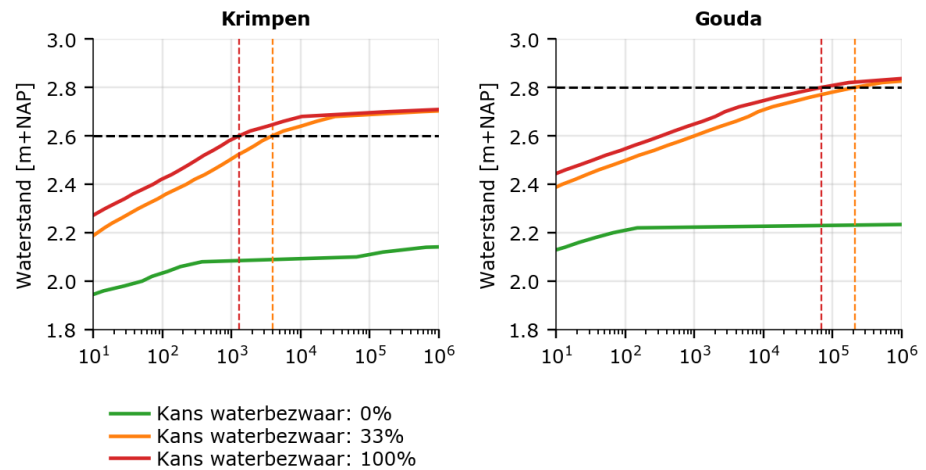
1/20.000 per jaar voor. Het maalstoppeil wordt een stuk vaker overschreden, maar dit zal meestal gepaard gaan met de open situatie.

*Figuur 25
Maalstopfrequenties
bij huidig klimaat.*



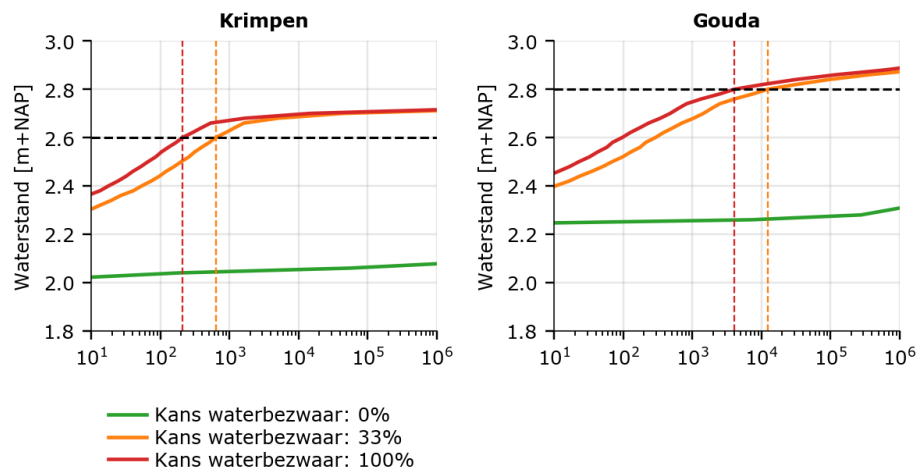
Bij zeespiegelstijging (2050 W⁺) zal een maalstop relatief vaker voorkomen: 1/3.000 per jaar bij Krimpen (Figuur 26). Deze kans is nog steeds relatief klein.

*Figuur 26
Maalstopfrequenties
bij 2050 W⁺.*



Voor klimaatscenario 2100 W⁺ stijgt deze kans verder naar 1/600 per jaar bij Krimpen (Figuur 27).

Figuur 27
Maalstopfrequenties
bij 2100 W⁺.



De resultaten zijn bepaald zonder modelonzekerheid in de waterstand. Uit de figuren kan worden afgelezen hoe vaak een maalstop voorkomt wanneer de waterstanden hoger uitvallen. Zouden de waterstanden door onzekerheid 15 cm toenemen dan komt een maalstop 10x zo vaak voor.

Opvallend aan de resultaten is dat het effect van het waterbezwaar kleiner dan verwacht lijkt te zijn, terwijl toch met een forse hoeveelheid is gerekend. De sluitwaterstand is kennelijk dusdanig laag dat een extreme storm (rond de 4,0 m+NAP) nodig is om tot een maalstop te komen. In 99% van de gevallen houdt de Europoortkering deze storm buiten. Met deze twee punten in gedachten is het goed te verklaren dat we een maalstopfrequentie van 1/20.000 per jaar berekenen voor het huidige klimaat.

Ondanks de kleine kansen op een maalstop zijn een aantal globale stappen uitgewerkt om de maalstopfrequentie aan te scherpen en beheersmaatregelen te onderzoeken. Deze stappen zijn beschreven in bijlage E. Mochten in de toekomst keuzes worden gemaakt waardoor de maalstopfrequentie toeneemt, of de berekende frequenties niet acceptabel zijn, dan kan de bijlage als een startpunt worden gebruikt voor verder onderzoek.

6 Conclusies en advies

6.1

Conclusies

In de uitgevoerde analyses is gekeken naar de invloed van het updaten van de uitgangspunten van de modellen naar het BOI, de invloed van de faalkans van de Hollandsche IJsselkering, de invloed van klimaat en de invloed van het waterbezwaar vanuit het regionale systeem. Hieruit kan geconcludeerd worden dat:

- Met name het verkleinen van de faalkans van de HIJK leidt tot een reductie in normwaterstanden en bijbehorende HBN's (langs traject 15-3) op de Hollandsche IJssel. Deze reductie ligt in de orde van 20 tot 40 centimeter, afhankelijk van de faalkans van de HIJK.
- Het updaten naar de WBI2017 uitgangspunten met name een positieve invloed heeft op de waterstanden en HBN's die meer bovenstrooms liggen (nabij Gouda).
- Uit de resultaten blijkt dat voor het huidige zichtjaar de open situatie vrijwel altijd maatgevend is voor de waterstanden en de HBN's bij een faalkans van 1/200 en 1/1.000 voor de HIJK. Deze open situaties worden gekenmerkt door een storm die enkele keren per jaar kan voorkomen in combinatie met een falende HIJK. Bij een faalkans van 1/5.000 voor de HIJK neemt de invloed van de gesloten situatie in combinatie met waterbezwaar toe.
- Waterbezwaar heeft alleen effect wanneer de gesloten situatie bijdraagt aan het bepalen van de beoordelings- en ontwerpwaterstanden, dit is het geval bij een zeer kleine faalkans van de HIJK. Hierin is de kenteringsluiting en de daarbij horende sluitwaterstand erg belangrijk voor de maatgevende waterstanden.
- Een maalstop komt zeer zelden voor (1/20.000 per jaar). Bij klimaatverandering neemt de frequentie toe tot 1/3.000 per jaar bij 2050W⁺ en 1/600 per jaar bij 2100W⁺, maar de kans blijft relatief klein. Hierin is het effect van modelonzekerheden niet meegenomen.
- Voor het zichtjaar 2050 nemen de waterstanden en HBN's door zeespiegelstijging toe. Door zeespiegelstijging worden de open situaties nog bepalender bij de norm. In de gesloten situatie worden de waterstanden namelijk beperkt door het maalstoppeil.
- Voor het zichtjaar 2100 nemen de waterstanden en HBN's verder toe. Het aantal sluitingen van de kering neemt ook flink toe, omdat het sluitpeil bij springtij of een kleine opzet al gehaald wordt. Voor de maatgevende

waterstand speelt de dichte situatie geen rol meer. Het effect van het verkleinen van de faalkans wordt kleiner, omdat de decimeringshoogte afneemt boven de 3,0 m+NAP. De Europoortkering moet dan namelijk ook falen om de 'open' waterstand binnen te krijgen. Voor het HBN speelt de gesloten situatie met waterbezwaar nog steeds een rol, omdat ook niet-maatgevende waterstanden bijdragen.

- De resultaten zijn gevoelig voor de modelonzekerheid van de waterstand. Lopend onderzoek laat zien dat de momenteel gebruikte onzekerheden verkleind kunnen worden. Dit kan voor de berekeningen met onzekerheden tot enkele decimeters in waterstanden en HBN's schelen.

6.2

Aanbevelingen

In deze studie is aangetoond dat een uitwerking van de systeemmaatregelen volgens BOI-uitgangspunten een aanzienlijke verlaging van de waterstand en het HBN geeft. De meest effectieve maatregel is het verkleinen van de faalkans van de Hollandsche IJsselkering, nu en in de toekomst bij klimaatverandering. Uit verder onderzoek zal moeten blijken of een verbetering van de faalkans naar 1/1.000 of 1/5.000 per sluitvraag mogelijk is. Deze studie biedt echter een aantal handvatten om het effect van verschillende faalmodi te beschouwen. Zo kan na een mislukte kenteringsluiting de kering wellicht nog op peil sluiten. Een nadere uitwerking van het effect van dit soort faalmodi kan bijdragen aan een betere inschatting van de faalkans. Niet alleen vanwege de faalkans van de kering, maar ook omdat de uitvoering van de sluiting (de sluitwaterstand) belangrijk is.

Naast het onderzoeken van de faalkans, is het met het oog op ontwerpen richting 2100 ook nuttig om na te denken over het functioneren van de Hollandsche IJsselkering bij flinke zeespiegelstijging. Het dagelijks hoogwater komt in klimaatscenario 2100W+ in de buurt van het sluitpeil van de Hollandsche IJsselkering. De kering gaat dan dusdanig vaak dicht dat het de vraag is of de huidige kering met het huidige sluitregime nog houdbaar is. Dit punt is ook van belang bij het gebruik van de opgeleverde 2100W+-databases voor het ontwerpen van waterkeringen.

Een tweede invloedrijk effect is de modelonzekerheid in de waterstand. In deze studie zijn stappen gemaakt om deze beter toe te passen, maar de exacte waarden zullen uit een vervolgstudie moeten blijken. Een klein verschil in standaardafwijking van 5 cm kan tot een 10 cm hogere of lagere maatgevende waterstand leiden. Het is dus de moeite waard om een nauwkeurige, maar realistische inschatting van de modelonzekerheid op de Hollandsche IJssel te maken.

De belastingcombinaties die tot een kritiek overslagdebiet leiden, hebben veelal een windsnelheid rond de 30 m/s. Boven de 30 m/s kan het effect van winddragafkapping meegenomen worden bij het bepalen van golfcondities.

Ook de keuze voor het kritieke overslagdebiet speelt hierin mee, en is zelf een keuze die veel invloed kan hebben op het eindresultaat. Deze twee punten (winddragafkapping en kritiek overslagdebiet) moeten in het achterhoofd gehouden worden bij de beoordeling en het ontwerp van dijken. Hiermee kan eventueel een te conservatief ontwerp of een onterechte afkeuring voorkomen worden.

Referenties

Achtersloot R en A. Paarlberg, 2016.

WAQUA Productieberekeningen Rijn-Maasmonding – Wettelijk beoordelingsinstrumentarium 2017. Deltares 1220082-001, november 2016. In opdracht van RWS-WVL.

Baart F., G. Rongen, M. Hijma, H. Kooi, R. de Winter, R. Nicolai, 2019.

Zeespiegelmonitor 2018 - De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Deltares 11202193-000, maart 2019. In opdracht van RWS-WVL.

Duits M, 2019.

Memo verwachte windsnelheid gegeven zeewaterstand. HKV Lijn in water PR3925.10, februari 2019.

Gelder, A. de, 2019.

Modellering van uitmalen en maalstop in de Hollandsche IJssel. Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard, memo 2019.01570, maart 2019.

KNMI, 2006.

Klimaat in de 21^{ste} eeuw – vier scenario's voor Nederland. KNMI, mei 2006.

Kuijper, B. en N. Slootjes, 2008.

Hydraulische randvoorwaarden categorie c-keringen – Achtergrondrapportage Hollandsche IJssel (dijkkring 14 en 15). HKV lijn in water, PR1322, november 2008. In opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Rijkswaterstaat, 2017.

Handreiking ontwerpen met overstromingskansen - Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskans-normen. Rijkswaterstaat, februari 2017. In opdracht van Ministerie van infrastructuur en milieu.

Rongen G.W.F. en T. Botterhuis, 2018.

Mini-systeemanalyse Hollandsche IJssel. HKV lijn in water PR3757.10, juli 2018. In opdracht van RWS-WVL.

Rongen G.W.F. en C. Geerse, 2016.

Invloed onzekerheid op bepalen van waterstandsverlopen - Verandering percentielen van afvoer en meerpeil bij meenemen statistische en modelonzekerheid waterstand. HKV lijn in water PR3280.20, oktober 2016. In opdracht van RWS-WVL.

RWS-WNZ, 2018.

Sluitingen 2013-2018 uit jaarsommen SOBEK. RWS-WNZ, 2018.

RWS-ZH, 2005.

Draaiboek waterbeheer Hollandsche IJssel en Lek – behorend bij het waterakkoord Hollandsche IJssel en Lek. RWS-ZH, versie 1.0, maart 2006.

Slootjes N., A. Jeuken, T. Botterhuis en Q. Gao, 2011.

Resultaten MHW berekeningen t.b.v. probleemanalyse en verkenning
hoekpunten - Bijlagen C-D-E. Deltares 1204302-000, april 2011.

SOBEK-RE, 2012

Flow – Technical Reference, SOBEK-RE 2.52.008. April 2012.

Stijnen J. en R. Daggenvoorde, 2018.

Proef productieberekeningen IJVD - met het Nationaal Water Model. HKV
lijn in water PR3707.10, juni 2018. In opdracht van RWS-WVL.

Stijker B. en C. Geerse, 2019.

Model uncertainty in the tidal river area – Estimation of water level
uncertainty substantiated with physical calculations (concept rapport).
HKV lijn in water PR3893.10, februari 2019. In opdracht van RWS-WVL.

Van Vledder, 2017.

Stappenplan aanpassing hydraulische Randvoorwaarden op basis van
nieuwe inzichten winddrag. G. van Vledder, Van Vledder Consulting, 2017.

Bijlagen

A Nadere uitwerking uitgangspunten productieberekeningen

A.1 Inleiding

In deze studie is het BOI-instrumentarium aangepast, zodat voor de Hollandsche IJssel gerekend kan worden met de meeste recente uitgangspunten. Dit memo beschrijft de uitgangspunten die zijn gebruikt om het project aan te laten sluiten bij WBI2017 en OI2014.

De volgende vijf uitgangspunten worden in deze bijlage besproken:

1. Wind-drag afkapping
2. Wind hiding
3. Hoe om te gaan met klimaatscenario's
4. Status Hydra-NL
5. Translatiegolf

A.2 Wind

Het omgaan met de wind wordt aan de hand van 3 punten besproken:

- Wind-drag afkapping: het reduceren van windwrijving bij hoge windsnelheden.
- Wind-hiding: het aanpassen van de lokale windsnelheid (ten opzichte van de potentiële windsnelheid) door 'hiding' van de omgeving.
- Ruimtelijk variërende wind: het variëren van de potentiële wind over Nederland.

Deze bijlage geeft de achtergrond bij de uitgangspunten omtrent wind en beredeneert de gemaakte keuze in deze studie. In bijlage B wordt het effect van deze aanpassingen aan de hand van SOBEK-simulaties gedemonstreerd. Hierin wordt waar nodig ook een wiskundige onderbouwing gegeven.

A.2.1 Winddragafkapping

De laatste inzichten over de afkapping door winddrag (Van Vledder, 2017) geven aan dat bij hoge windsnelheden (>30 m/s) het effect van de windsnelheid op het wateroppervlak afneemt. Dit heeft tot gevolg dat de scheefstand en golfgroei minder toeneemt bij toenemende windsnelheid. De reductie door wind-drag afkapping kan op twee manieren worden meegenomen: via de windstatistiek, of direct in de productieberekeningen. Beide hebben een ander effect op het resultaat:

1. Winddragafkapping via statistiek
De winddrag afkapping wordt niet meegenomen in de productieberekeningen, maar verwerkt via kleinere kansen op extreme winden. Door de volledige windsnelheid in de hydrodynamische

berekeningen te verwerken rekenen we met volledige (en dus iets overschatte) scheefstand, dus grotere waterdiepten voor lokale golfgroei. De kansen op deze grote golven zijn wel weer kleiner.

2. Winddragafkapping via productieberekeningen

Door de windsnelheid in de productieberekeningen te verwerken geven de resultaten een fysisch realistischer beeld van de verminderde scheefstand door winddragafkapping. Hierdoor is er sprake van verminderde waterdiepte voor golfgroei. De afkapping van de winddrag wordt vervolgens niet verwerkt in de statistiek, waardoor golfgroei met Bretschneider bij hoge windsnelheden (> 30 m/s) wordt overschat.

In deze studie kiezen we optie 2 omdat zo de meest realistische waterstanden worden berekend en de oorspronkelijke (fysisch correcte) statistiek kan worden gebruikt. In de toekomst kan de correctie voor Bretschneider zoals deze toegepast is in (Stijnen en Daggenvoorde, 2018) wellicht in Hydra-NL worden ingebouwd.

A.2.2

Wind hiding

Een tweede effect wat bij de Hollandsche IJssel speelt is wind hiding. Dit gaat over de vertaling van de potentiële windsnelheid naar de open water windsnelheid. De potentiële windsnelheid is gedefinieerd als de windsnelheid zoals deze waait over een open, onbeschut grasveld. Op open water is de wrijving van het oppervlak nog wat lager, waardoor de windsnelheid nog wat hoger is dan de potentiële windsnelheid. Uitgangspunt van DPRD was om de potentiële windsnelheid te gebruiken voor productieberekeningen. In het WTI2011 is de overstap gemaakt naar de open water wind, een keuze die in het WBI2017 overgenomen is.

Langs de Hollandsche IJssel is een zekere beschutting van de omgeving, waardoor het gebruik van de open water windsnelheid wellicht een kleine overschatting geeft. Door een tekort aan metingen bij zeer hoge windsnelheden (deze komen namelijk niet vaak voor) is het niet mogelijk om de werkelijke hiding te kalibreren. In het 2D-WAQUA model van de Rijn-Maasmonding komt bij gelijke windsnelheid een ongeveer gelijk langsverhang (van Krimpen naar Gouda) voor.

In het verleden is voor de Boven- en Benedenrivieren onderscheidt gemaakt tussen het gebruik van potentiële windsnelheid en open water-windsnelheid. Deze keuze werd gemaakt omdat de rivieren hier smaller zijn, waardoor de wind zich niet volledig kan ontwikkelen tot open water windsnelheid. De Hollandsche IJssel kan ook in de categorie smalle wateren worden ingedeeld, en heeft daarnaast lokaal nog redelijk wat bebouwing, die ook een remmende werking heeft. We kiezen analoog aan keuzes uit het verleden voor het toepassen van de potentiële windsnelheid op de Hollandsche IJssel, door de hiding factor lokaal te verlagen (zie volgende paragraaf).

Het is belangrijk om te beseffen dat het dwarsverhang en de golfcondities voor de Hollandsche IJssel beide in Hydra-NL berekend worden. Een oeverdatabase bevat dus de informatie voor de bijbehorende aslocatie, inclusief de strijklengtes en dieptes waarmee scheefstand en golfcondities

berekend kunnen worden. Voor de Hollandsche IJssel kan dus alleen het langsverhang (verval tussen Krimpen en Gouda) beïnvloed worden door de hiding aan te passen in de productieberekeningen.

A.2.3

Ruimtelijk variërend windveld

Stijnen (2018) beschrijft een methode om met een ruimtelijk variërend windveld productieberekeningen te maken voor de IJsseldelta. In dit project is een ruimtelijk variërend windveld afgeleid dat over de lijn Schiphol – Lauwersoog constant is, naar het zuidoosten afneemt en naar het noordwesten toeneemt. Er is voor gekozen om deze aanpak *niet* over te nemen in deze studie, omdat deze nog niet ver genoeg uitgekristalliseerd is. Bovendien zijn de hiding factoren in het SOBEK model gebruikt als kalibratie.

A.3

Klimaatscenario's

De KNMI'06 klimaatscenario's voor 2050 en 2100 geven extremere afvoeren en zeespiegelstijging. Het effect van stijgende afvoeren kan zonder complicaties worden opgelost door de afvoerstatistiek aan te passen. De zeespiegelstijging heeft echter niet alleen effect op de maximale zeewaterstand, maar ook op de gemiddelde zeewaterstand en daarmee mogelijk ook op de fysica van het systeem. Dat wil zeggen dat het niet voldoende is om bij een trekking uit de database de kansen aan te passen voor klimaatverandering op basis van de aangepaste statistiek maar dat je dan ook de database moet aanpassen voor de gewijzigde fysica. Wat het effect van klimaatverandering voor de fysica op de Hollandsche IJssel exact is, is op voorhand moeilijk te zeggen. Wel is bekend dat het effect het grootst is in het overgangsgebied, wat bovenstrooms van Rotterdam ligt (en dus niet bij de monding van de HIJ). De kenteringsluiting van de Hollandsche IJsselkering kan echter wel veranderen door zeespiegelstijging. Vanwege de hogere gemiddelde waterstand kan de sluiting bijvoorbeeld langer duren (effect op waterstand via waterbezwaar), wat niet te simuleren is door de statistiek van de piekzeewaterstanden aan te passen.

Afgestemd is dat aparte databases voor 2050W⁺ en 2100W⁺ afgeleid moeten worden, wanneer het verschil in waterstand bij het gebruik van de klimaatdatabase of de database voor huidig klimaat groter dan 5 cm is. Deze eis is vrij streng, maar gegeven de grote versterkingsopgave die volgt uit een klein tekort aan hoogte wel te verantwoorden. Daarnaast kijken we ook naar de sluitsituatie, omdat dit een belangrijk onderdeel is van het project. Andere klimaatscenario's dan W⁺ worden niet doorgerekend omdat de OI-werkwijze voor de Hollandsche IJssel voorschrijft om W⁺ te gebruiken.

Het resultaat van deze vergelijking laat zien dat het verschil voor 2050W⁺ kleiner is dan 5 cm, en voor 2100W⁺ een stuk groter. Dit komt omdat in het belastingmodel van de Hollandsche IJssel de windsnelheid aan de stormopzet gekoppeld is. Wanneer de zeespiegelstijging alleen via de statistiek wordt verwerkt, nemen de kansen op hogere windsnelheden ook toe. Vanuit dit oogpunt leveren we ook de databases voor 2050W⁺ en 2100W⁺ op.

Status Hydra-NL

Binnen dit project wordt een nieuwe versie van Hydra-NL gemaakt met de volgende mogelijkheden:

1. Rekenen met twee sluitsituaties voor de Hollandsche IJsselkering (de kans op beide is een instelling);
2. Modelonzekerheden zijn te definiëren aan de hand van de sluitsituatie van de HIJK;
3. Werken met SQLite-databases is mogelijk.

De huidige functionaliteiten (illustratiepunten, uitsplitsingen, etc.) blijven beschikbaar. De fragility curve optie die specifiek voor KIIK is ontwikkeld, wordt niet uitgebreid met de extra keringsituatie, maar de oorspronkelijke functionaliteit blijft ook hier beschikbaar. De databases die momenteel in MDB-variant beschikbaar zijn worden omgezet naar SQLite en opgeleverd met het project. De vernieuwde versie van Hydra-NL krijgt versienummer 2.6. Overige recente aanpassingen, worden ook meegenomen in de nieuwe versie.

Translatiegolf

Een terugkomend aspect in de mini-systeemanalyse was de translatiegolf die optreedt na sluiting. De grootte van deze golf is vooral afhankelijk van de stroomsnelheid op het moment van sluiten. Hoe groter, hoe heftiger de schommelingen die optreden. Deze schommelingen zijn dusdanig groot dat ze effect kunnen hebben op de maximale waterstanden die optreden. Dit aspect moet echter niet overschat worden. Een translatiegolf door sluiting zal niet meer dan 2 decimeter waterstandsverhoging geven. Dit kan wel de maximale waterstand tijdens een sluiting veroorzaken, maar omdat de sluitpeilen niet echt hoger zijn dan 2,0 m+NAP, zal dit niet de *maatgevende* waterstand veroorzaken.

Het is moeilijk te zeggen of de grootte van de translatiegolf zoals deze in SOBEK wordt berekend overeenkomt met de grootte van de golf zoals deze in werkelijkheid optreedt. Door recente sluitingen na te rekenen komen we soms op een grotere, soms op een kleinere golf uit. Op basis hiervan kunnen we aannemen dat SOBEK wel in de goede orde zit met de simulatie van de golf. De 2D-WAQUA-resultaten van de WBI2017 productiesommen laten wel een snellere demping van de golf zien, maar op basis van metingen lijkt dit dus niet beter te zijn.

In de nieuwe set productieberekeningen worden de sluitprocedures aangepast. De open sluiting vindt (conform de werkelijkheid) langzamer plaats, om de translatiegolf te voorkomen. Daarnaast wordt voor de hogere zeewaterstanden (>3,0 m+NAP bij Hoek van Holland) altijd op kentering gesloten. De kenteringsluiting veroorzaakt nauwelijks een translatiegolf. Door deze aanpassingen in de sluitprocedures en het gemodelleerde sluitregime is het effect van de golf op hoge waterstanden al verkleind. Deze aanpassingen zijn voldoende om de negatieve effecten van de translatiegolf te

verminderen. We stellen daarom voor om geen verdere modelaanpassingen te doen om de translatiegolf te dempen (anders dan de aanpassing van de sluitingen die toch al doorgevoerd wordt in de productieberekeningen).

A.6

Samengevat

Een kort overzicht van de voorgestelde aanpassingen:

1. Voor windsnelheden boven de 30 m/s wordt de winddrag factor verlaagd (wind drag afkapping). Hierdoor wordt de scheefstand in de productieberekeningen bij grote windsnelheden wat verkleind. Ook correctie op windgolven? Kun je bij het vullen van de database met golfcondities rekening mee houden (hoeft niet in Hydra-NL te gebeuren)
2. Conform het WBI2017 wordt over het gehele model de open water windsnelheid toegepast. De Hollandsche IJssel is hierop een uitzondering. Hier wordt door de aanwezige beschutting de windsnelheid iets verlaagd naar de potentiële windsnelheid.
3. Naast de databases met hydraulische randvoorwaarden voor het huidige klimaat, worden deze ook voor 2050W⁺ en 2100W⁺ gemaakt. De database voor het huidig klimaat is vooral in 2100 niet meer toepasbaar, omdat de een verhoging van de zeewaterstandstatistiek voor de Hollandsche IJssel impliceert dat de windsnelheden toenemen.
4. Er komt een nieuwe Hydra-NL versie beschikbaar met uitgebreide functionaliteit voor de HIJ.

Er worden geen aanvullende maatregelen genomen om de translatiegolf te dempen, naast het aanpassen van de sluitingen (kentering en vertraagd peil).

B

Effect aanpassing winduitgangspunten

In deze studie is het instrumentarium voor de Hollandsche IJssel aangepast in lijn met de BOI-uitgangspunten, onder andere omtrent de wind. Hierbij zijn een aantal aanpassingen gedaan, opgesomd:

1. aanpassing van de stormverlopen (duren);
2. wind-drag afkapping;
3. gebruik van potentiële wind boven de Hollandsche IJssel en de open water windsnelheid op de andere takken;
4. koppeling tussen zeewaterstand en windsnelheid op basis van WBI2017 statistiek.

Om het effect van deze aanpassingen los van elkaar te kunnen beschouwen zijn ze voor één belastingcombinatie individueel beschouwd. Hiervoor hebben we een zeewaterstand van 4 m+NAP gekozen met een zuidwestenwind van ongeveer 40 m/s en een Rijnafvoer van 2.000 m³/s. Voor deze situatie wordt het water flink naar Gouda opgestuwd, waardoor de verschillen duidelijk zichtbaar zijn. In de volgende paragrafen worden de aanpassingen een voor een toegelicht. Tabel 5 geeft een overzicht van de uitgangspunten die in de verschillende varianten worden gehanteerd.

*Tabel 5
Overzicht van de gehanteerde uitgangspunten en modelinstellingen voor de verschillende gevoeligheidsberekeningen. De DPRD uitgangspunten zijn blauw gemarkeerd, de gehanteerde (WBI2017) uitgangspunten oranje.*

	Opzet- en windverlopen	Winddrag-afkapping	Windsnelheid	Koppeltabel wind en zeewaterstand
Referentie	DPRD	Nee	Potentieel	DPRD
Stormduren	WBI2017	Nee	Potentieel	DPRD
Winddrag-afkapping	DPRD	Ja	Potentieel	DPRD
Potentiële wind HIJ	DPRD	Nee	Open water, potentieel boven HIJ	DPRD
Vertaaltabel	DPRD	Nee	Potentieel	WBI2017
Totaal	WBI2017	Ja	Open water, potentieel boven HIJ	WBI2017

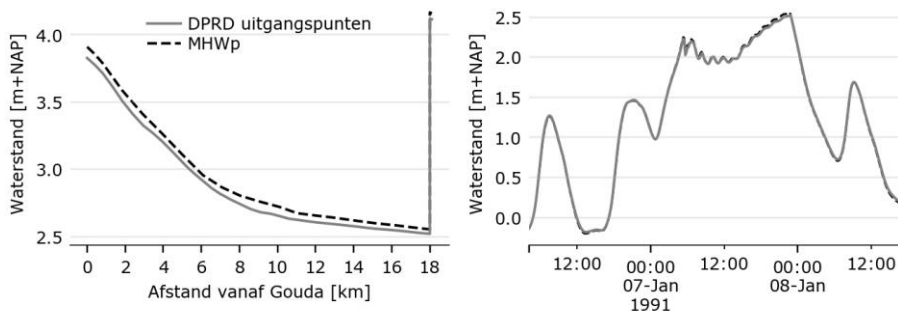
B.1

Referentie

Voordat we het effect van de verschillende aanpassingen aan de wind laten zien, proberen we het 'oude' MHWprocessor-resultaat te reproduceren. We gebruiken hiervoor het stormverloop van DPRD, geen winddragafkapping, de open water windsnelheid en de koppeling tussen zeewaterstand en wind op basis van de DPRD-statistiek. Het resultaat van deze vergelijking is weergegeven in Figuur 28. De maximale waterstanden (links) en verlopen (rechts) komen niet exact overeen, in de MHWp som lijkt meer water in het systeem te zitten. Dit kan een aantal oorzaken hebben, zoals de toegevoegde rekenpunten, de uitvoertijdstep, de initiële condities of het iets later sluiten

van de kering. De grijze lijn wordt in deze gevoeligheidsanalyse gebruikt als referentie. Het verloop van de waterstanden is echter zeer goed vergelijkbaar. Het is bekend dat kleine variaties kunnen doorwerken in het sluitmoment van de kering, wat gemakkelijk enkele centimeters verschil in waterstanden achter de kering kan geven.

*Figuur 28
Reproductie van
MHWp-som met
referentiesom. Links
het verschil in
maximale
waterstand, rechts
de waterstands-
verlopen achter de
kering.*

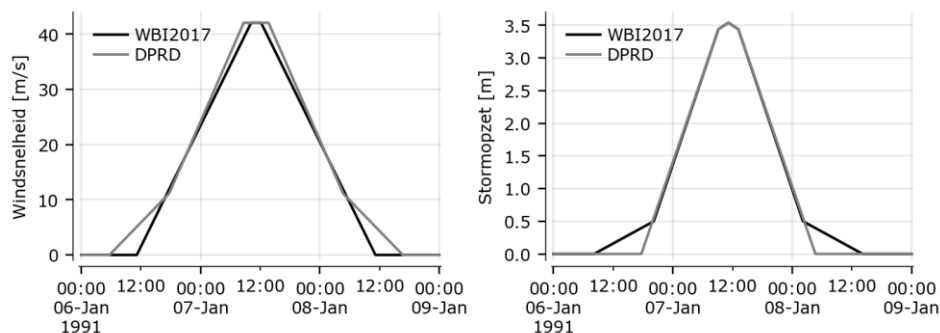


B.2

Aanpassing opzet- en windverlopen

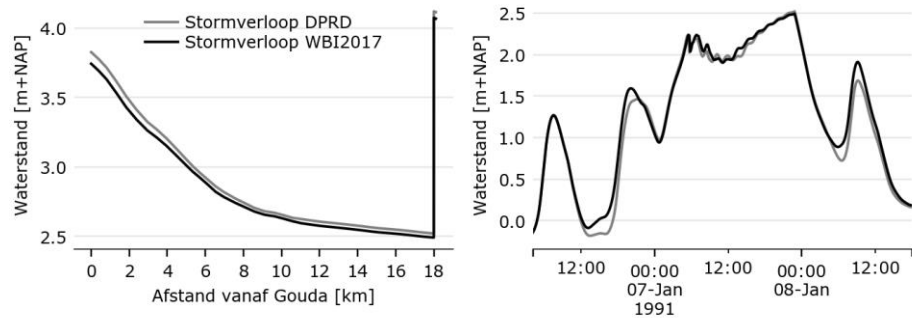
De WBI2017- en DPRP-verlopen zijn weergegeven in Figuur 29. De belangrijkste aanpassing is de kortere piekduur die in het WBI2017 wordt gehanteerd.

*Figuur 29
Verloop van
windsnelheid in
stormopzet voor
WBI2017 en DPRD.*



Het effect op de waterstanden is gegeven in Figuur 30. Door de kortere topduur zal het water minder richting Gouda opgestuwd worden, waardoor de waterstand vooral bij Gouda wat lager is. De bredere flanken in het opzetverloop zijn te zien in de rechter figuur. Dit heeft echter weinig effect op de maximale waterstand.

Figuur 30
Effect aanpassing
windverloop op
maximale
waterstand (links)
en
waterstandsverloop
achter de kering
(rechts).



B.3

Winddragafkapping

De tweede vergelijking gaat over het toepassen van winddragafkapping. In SOBEK-RE wordt de schuifspanning door de wind berekend met de volgende formule (SOBEK-RE, 2012):

$$\tau_{wi} = -\rho_{air} C_{wi} \gamma_{wi} u_{wi}^2 \cos(\phi_{wi}) \quad (1)$$

Waarin:

- τ_{wi} : Schuifspanning [N/m^2]
- ρ_{air} : Luchtdichtheid [kg/m^3]
- C_{wi} : Wrijvingscoëfficiënt [N/m^2]
- γ_{wi} : Wind hiding factor (standaard 1)
- u_{wi} : Windsnelheid [m/s]
- ϕ_{wi} : Hoek tussen wind vector en plaatselijke rivier oriëntatie [graden]

De wrijvingscoëfficiënt wordt berekend met de volgende formule:

$$C_{wi} = \alpha_{wi,1} + \alpha_{wi,2} u_{wi} \quad (2)$$

Waarin $\alpha_{wi,1}$ en $\alpha_{wi,2}$ twee in te stellen coëfficiënten zijn, die afhangen van het watersysteem (zee, rivier of meer). Wanneer we winddragafkapping toepassen neemt bij windsnelheden boven de 30 m/s het effect van de windsnelheid in de dragformulering ($\alpha_{wi,2} u_{wi}$) niet meer toe.

Omdat de windsnelheid varieert tijdens een storm is het niet mogelijk om de winddragafkapping via de coëfficiënten toe te passen, deze zijn namelijk constant tijdens een simulatie. We rekenen daarom uit wat de schuifspanning zou zijn tijdens een storm met een aangepaste vergelijking voor de wrijvingscoëfficiënt:

$$C_{wi}^* = \alpha_{wi,1} + \alpha_{wi,2} \min(u_{wi}, 30) \quad (3)$$

De gewenste schuifspanning wordt daarmee:

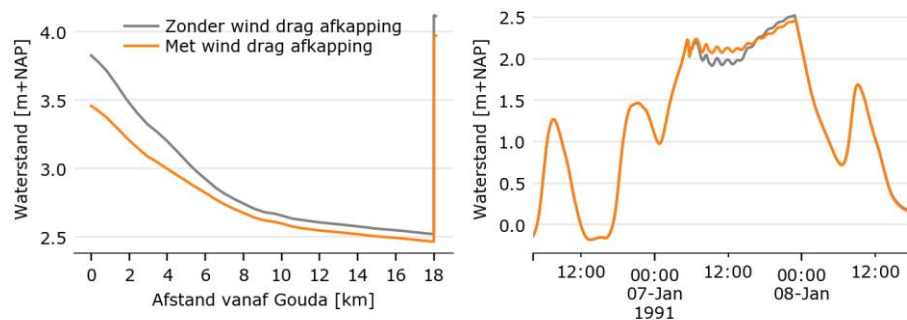
$$\tau_{wi} = -\rho_{air} C_{wi}^* \gamma_{wi} u_{wi}^2 \cos(\phi_{wi}) = -\rho_{air} C_{wi} \gamma_{wi} (u_{wi}^*)^2 \cos(\phi_{wi}) \quad (4)$$

En de windsnelheid die aan het model opgelegd moet worden:

$$u_{wi}^* = \sqrt{\frac{-\rho_{air} C_{wi}^* \gamma_{wi} u_{wi}^2 \cos(\phi_{wi})}{-\rho_{air} C_{wi} \gamma_{wi} \cos(\phi_{wi})}} = \sqrt{\frac{C_{wi}^* u_{wi}^2}{C_{wi}}} \quad (5)$$

Een probleem ontstaat bij het verwerken van de hiding-factor, wat lokaal gebeurt. Deze vermindert namelijk de windsnelheid op open water, waardoor de winddragafkapping wellicht al bij lagere windsnelheden begint. Omdat de focus in deze studie op de Hollandsche IJssel ligt, hebben we gekozen de correctie op basis van de potentiële windsnelheid toe te passen. Het verschil in resulterende waterstand is gegeven in Figuur 31. De winddragafkapping heeft een relatief groot effect. Het kan tot een verschil van 30 cm bij Gouda leiden. Dit geldt echter alleen voor windsnelheden groter dan 30 m/s. In de meeste gevallen zal de maatgevende belasting een lagere windsnelheid hebben, en heeft de winddragafkapping dus geen effect.

*Figuur 31
Effect toepassen
wind drag afkapping
op maximale
waterstand (links)
en
waterstandsverloop
achter de kering
(rechts).*



B.4

Open water windsnelheid en potentiële windsnelheid

Omdat de windsnelheid zich boven de Hollandsche IJssel niet volledig kan ontwikkelen, wordt hier de potentiële windsnelheid gebruikt. Deze komt in plaats van de open water windsnelheid, waarvan het gebruik een uitgangspunt is binnen het WBI2017 (en tevens ook WTI2011). Merk op dat de DPRD uitgangspunten voorschreven om de potentiële windsnelheid te gebruiken, dus ten opzichte hiervan wordt de windsnelheid juist buiten de Hollandsche IJssel aangepast. Omdat er maar één windsnelheid in het SOBEK-model gebruikt kan worden, passen we de hidingfactoren boven de Hollandsche IJssel aan. Zo is de effectieve windsnelheid de potentiële windsnelheid. Analoog aan de winddragafkapping kunnen we via vergelijking (1) uitrekenen wat de hiding factor moet zijn. De gewenste schuifspanning boven de Hollandsche IJssel is:

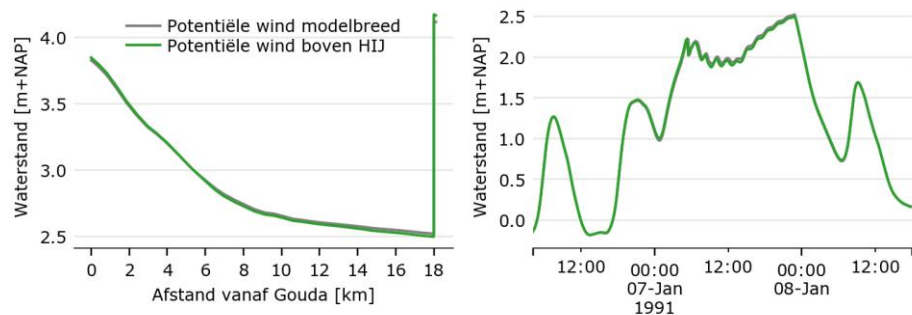
$$\tau_{wi} = -\rho_{air} C_{wi} \gamma_{wi} u_{pot}^2 \cos(\phi_{wi}) = -\rho_{air} C_{wi} \gamma_{HIJ} u_{ow}^2 \cos(\phi_{wi}) \quad (6)$$

De op te leggen hiding factor wordt daarmee:

$$\gamma_{HIJ} = \frac{-\rho_{air} C_{wi} \gamma_{wi} u_{pot}^2 \cos(\phi_{wi})}{-\rho_{air} C_{wi} u_{ow}^2 \cos(\phi_{wi})} = \frac{u_{pot}^2}{u_{ow}^2} \quad (7)$$

Het verschil in de resulterende waterstand is weergegeven in Figuur 32. De verschillen zijn erg klein en voor een windsnelheid van 40 m/s vrijwel verwaarloosbaar (de verhouding tussen potentiële en open water windsnelheid varieert per windsnelheid). Dit is te verwachten, gezien het verschil van enkele procenten tussen open water windsnelheid en potentiële windsnelheid.

*Figuur 32
Effect gebruik open
water windsnelheid
op maximale
waterstand (links)
en
waterstandsverloop
achter de kering
(rechts).*



B.5

Nieuwe tabel koppeling zeewaterstand en wind

In het belastingmodel van de Hollandsche IJssel is de windsnelheid geen losse stochast, maar is deze gekoppeld aan de zeewaterstand. Deze koppeling gebeurt op basis van de verwachte windsnelheid gegeven een windrichting en zeewaterstand, waarmee deze dus afhankelijk is van de statistiek voor deze stochasten. Binnen het WBI2017 wordt andere statistiek gebruikt dan binnen DPRD. Bij deze statistiek hoort dus ook een nieuwe tabel. Deze is afgeleid door Duits (2019) en weergegeven in Tabel 6. Ten opzichte van de oude tabel zijn de verwachte windsnelheden wat hoger.

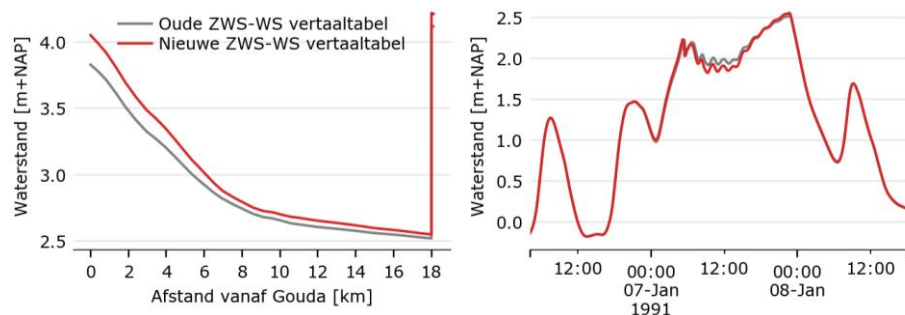
Tabel 6
Koppeltabel tussen
zeewaterstand en
windsnelheid (Duits,
2019).

Zeewater- stand [m+NAP]	Windrichting						
	225° ZW	247.5° WZW	270° W	292.5° WNW	315° NW	337.5° NNW	360° N
1,140	4,59	4,95	4,62	3,55	4,22	4,37	4,77
2,138	16,26	14,74	12,94	11,90	11,45	11,33	9,51
3,139	29,55	24,99	20,37	19,52	18,48	18,22	16,25
4,102	43,30	35,47	29,28	27,00	24,68	24,67	23,63
5,096	57,49	46,03	38,15	34,32	30,44	30,83	30,64
6,083	71,57	56,50	47,01	41,23	35,84	36,65	37,53

Merk op dat bij zeespiegelstijging de gemiddelde zeewaterstand stijgt, maar de verwachte windsnelheden niet. Voor de klimaatdatabases zijn dus dezelfde waarden voor de windsnelheid aangehouden, en zijn de getallen in de linker kolom dus verhoogd.

Het effect op de resulterende waterstand is weergegeven in Figuur 33. Doordat de verwachte windsnelheden hoger zijn, stijgen ook de resulterende waterstanden.

Figuur 33
Effect nieuwe
koppeltabel op
maximale
waterstand (links)
en waterstands-
verloop achter de
kering (rechts).

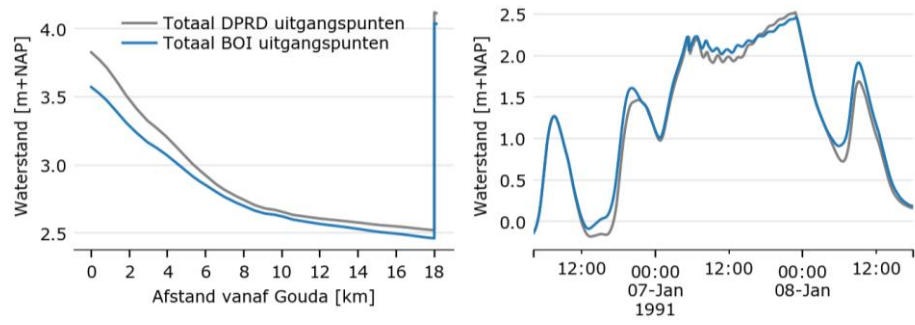


B.6

Totaaleffect

Als we alle aanpassingen bij elkaar optellen komen we uit op het resultaat in Figuur 34. Al met al leiden de aanpassingen tot een verlaging van de waterstanden. Dit komt voornamelijk door de winddragafkapping die alleen geldt boven de 30 m/s, al speelt de kortere duur van de maximale windsnelheid ook een rol. Voor lagere windsnelheden zullen de aanpassingen ook tot een verhoging van de maximale waterstand kunnen leiden.

*Figuur 34
Totaal effect van
aangepaste
uitgangspunten op
maximale
waterstand (links)
en waterstands-
verloop achter de
kering (rechts).*



C Sluitprocedures Hollandsche IJsselkering

C.1 Inleiding

Een van de systeemmaatregelen die binnen deze systeemanalyse wordt onderzocht is het aanpassen van de sluitingen van de Hollandsche IJsselkering in het DPRD model (SOBEK-RE). Deze bijlage beschrijft de verschillende sluitmogelijkheden, en hoe deze in SOBEK zijn verwerkt.

C.2 Sluitingen

In de praktijk komen twee typen sluiting voor. De sluiting op kentering (keren van getijstroming) en de sluiting op peil. De eerste komt voor wanneer waterbezwaar verwacht wordt, of de verwachte waterstand bij Hoek van Holland groter is dan 3,0 m+NAP. De peilsluiting komt voor in de overige gevallen.

Deze sluitvarianten kunnen op verschillende manieren ingevuld worden, waarmee er in totaal 5 mogelijkheden zijn voor sluitingen. Dit zijn:

- geen sluiting;
- snelle peilsluiting;
- langzame peilsluiting;
- sluiting op kentering;
- sluiting op kentering met spuien.

In de volgende paragrafen wordt het principe van elk van deze sluitingen kort toegelicht. Daarnaast lichten we toe hoe deze sluiting in SOBEK plaatsvindt.

C.2.1 Geen sluiting

Er zijn twee mogelijkheden waarbij geen sluiting plaatsvindt, namelijk wanneer het sluitpeil niet wordt gehaald, of wanneer de kering faalt. Beide worden op dezelfde manier gesimuleerd: door de kering niet te sluiten. Er wordt dus geen onderscheid gemaakt in de mogelijkheden hoe de kering kan falen, zoals (alleen) het falen van de schutsluis.

In SOBEK-RE wordt deze sluiting gemodelleerd door de sluitcriteria van de kering inactief te maken. De kering zal dus altijd de open toestand handhaven, ongeacht de buitenwaterstand of het verval over de kering.

C.2.2 Snelle peilsluiting

Bij de 'snelle' peilsluiting wordt de kering in 15 minuten gesloten, zodat de waterstand bij sluiten rond de 2,0 m+NAP bij Krimpen a/d IJssel uitkomt.

In SOBEK wordt de kering gesloten wanneer de waterstand bij Krimpen a/d/ IJssel 1,80 m+NAP bereikt EN het verval over de kering negatief is (buitenwaterstand hoger). De sluiting zelf duurt 15 minuten waarmee de waterstand bij sluiten ongeveer 2,0 m+NAP is. Wanneer de waterstand weer onder de 1,80 m+NAP komt OF het verval positief is, gaat de kering weer open.

SOBEK Sluitcriteria:

- Kering dicht (0 m boven drempel) **als** buitenwaterstand > 1,80 m+NAP **en** verval negatief;
- Kering open (9 m boven drempel) **als** buitenwaterstand < 1,80 m+NAP **of** verval positief.

C.2.3

Langzame peilsluiting

In werkelijkheid wordt de kering niet in één keer gesloten, omdat dit een grote translatiegolf veroorzaakt. Om deze golf te voorkomen, laat men de schuif snel tot 3 meter boven de drempel zakken (12,5 minuten), waarna de laatste 3 meter in 40 minuten en met 10 stappen wordt gesloten. Het stapsgewijs sluiten van de laatste 3 meter (en niet in één beweging) doet men omdat de kering maar twee sluitsnelheden heeft, die beide te hoog zijn. Het voordeel van deze vertraagde sluiting is dat de stroomsnelheid rustiger afneemt, waardoor de translatiegolf kleiner is. Daar staat tegenover dat men eerder de sluitprocedure in gang moet zetten om de waterstand bij Krimpen na sluiting op 2,0 m+NAP te houden.

Ten opzichte van de snelle peilsluiting wordt de langzame peilsluiting gesimuleerd door een extra sluitcriterium toe te voegen.

SOBEK Sluitcriteria:

- Kering snel dicht (3 m boven drempel) **als** buitenwaterstand > 1,80 m+NAP **en** verval negatief **en** schuifhoogte > 3,0 m+NAP;
- Kering langzaam dicht (0 m boven drempel) **als** buitenwaterstand > 1,80 m+NAP **en** verval negatief **en** schuifhoogte <= 3,0 m+NAP;
- Kering open (9 m boven drempel) **als** buitenwaterstand < 1,80 m+NAP **of** verval positief.

Voor beide peilsluitingen is gekozen om ze op basis van de voorspelde waterstand uit te voeren. Vooral een sluitpeil van 1,50 m+NAP wordt regelmatig overschreden zonder dat de 2,25 m+NAP bij Krimpen gehaald wordt.

C.2.4

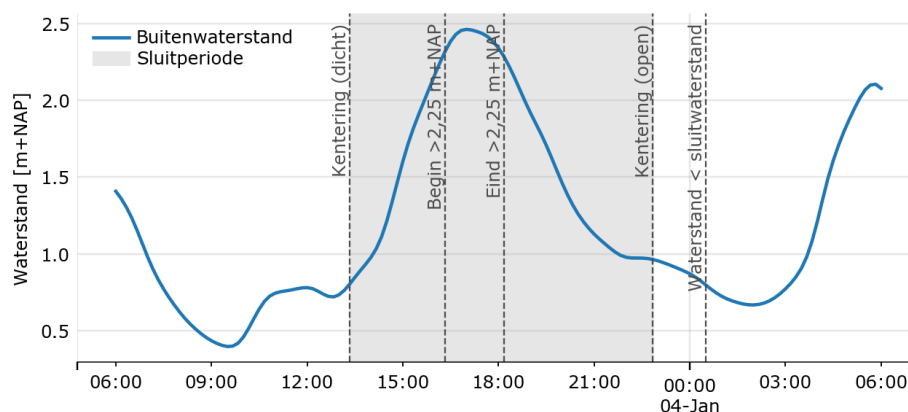
Sluiting op kentering

Wanneer er waterbezwaar vanuit de aangrenzende polders wordt verwacht, of de voorspelde waterstand bij Hoek van Holland groter is dan 3,0 m+NAP, wordt er op kentering (het keren van de getijstrooming) gesloten. Dit gebeurt als de verwachte waterstand bij Krimpen groter is dan 2,25 m+NAP. Dit type sluiting heeft twee voordelen:

- De waterstand bij Krimpen na sluiten is lager, waardoor er meer ruimte is voor waterbezwaar.
- Omdat de stroomsnelheid bij sluiten klein is, is de optredende translatiegolf ook minder groot.

In SOBEK-RE is deze sluiting lastiger te simuleren, omdat in de simulatie nog niet bekend is welke waterstanden op zullen treden (de voorspelling). Hierdoor kan tijdens de berekening het moment van kentering voorafgaand aan de overschrijding van 2,25 m+NAP niet bepaald worden. Om dit op te lossen wordt de 'open' som (geen sluiting) gebruikt. Deze berekening wordt eerst gedraaid, waarna de sluitperiodes geselecteerd worden. Dit is de periode waarin 2,25 m+NAP overschreden wordt, vervroegd tot het moment van kentering, en verlaat na het volgende moment van kentering of het moment dat de waterstand onder de sluitwaterstand zakt. Om dit te verduidelijken is deze periode in Figuur 35 weergegeven.

*Figuur 35
Tijdstippen in het
waterstandsverloop
waarop de
kenteringsluiting
bepaald wordt. Het
grijs gearceerde
gebied geeft de
sluitperiode aan.*



Omdat de kenteringsluiting plaatsvindt in een periode met weinig stroomsnelheid, kan de kering snel worden gesloten zonder dat dit een translatiegolf veroorzaakt.

SOBEK Sluitcriteria:

- Kering snel dicht (0 m boven drempel) **als** tijdstip binnen sluitperiode;
- Kering open (9 m boven drempel) **als** tijdstip buiten sluitperiode.

C.2.5

Sluiten op kentering met spuien

In geval van waterbezwaar kan het voorkomen dat tijdens de geselecteerde sluitperiode de binnenwaterstand hoger is dan de buitenwaterstand. In dit tijdsvenster kan er gespuid worden, waardoor de binnenwaterstand weer wat zakt en er meer ruimte voor waterbezwaar wordt gecreëerd.

In het SOBEK-model simuleren we dit door een extra conditie toe te voegen voor het verhang over de kering. Wanneer dit positief is (binnenwaterstand > buitenwaterstand) gaat de kering weer open om te spuien. Wanneer in deze periode de buitenwaterstand weer stijgt gaat de kering weer dicht, waarvoor we ook een conditie toevoegen. Het positieve verval kan ook op het moment

van kentering voorkomen. De conditie zorgt er dan voor dat de kering nog even niet dichtgaat, iets dat we niet willen. Om deze reden geldt de conditie alleen in het tijdsvenster tussen $[Begin > 2,25 \text{ m+NAP}]$ en $[Kentering (open)]$, zoals weergegeven in Figuur 35.

SOBEK Sluitcriteria:

- Kering snel dicht (0 m boven drempel) **als** tijdstip tussen $[Kentering (open)]$ en $[Begin > 2,25 \text{ m+NAP}]$;
- Kering open (9 m boven drempel) **als** tijdstip tussen $[Kentering (open)]$ en $[Begin > 2,25 \text{ m+NAP}]$;
- Kering snel dicht (0 m boven drempel) **als** tijdstip tussen $[Begin > 2,25 \text{ m+NAP}]$ en $[Kentering (open)]$ **en** verval negatief;
- Kering open (9 m boven drempel) **als** tijdstip tussen $[Begin > 2,25 \text{ m+NAP}]$ en $[Kentering (open)]$ **en** verval positief.

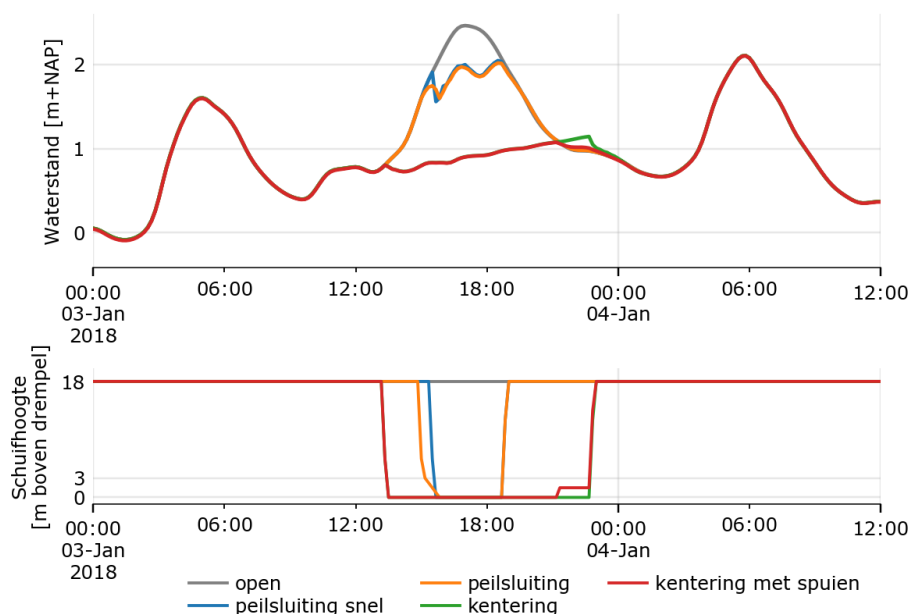
In de productiesommen zijn slecht drie van de vijf sluitmogelijkheden gebruikt. Dit zijn de vertraagde peilsluiting, de sluiting op kentering met spuien, en geen sluiting.

c.3

Effect op binnenwaterstand

Figuur 36 geeft voor de 5 typen sluitingen de resulterende waterstand bij Krimpen, aan de binnenzijde van de kering. Het hoogwater op 3 januari 2018 is als voorbeeld gebruikt. Het is duidelijk te zien dat de translatiegolf bij de getrapte peilsluiting (oranje) kleiner is dan bij de snelle peilsluiting (blauw). De kenteringsluiting geeft significant meer ruimte voor waterbezwaar. In deze situatie 1 meter, wat overeenkomt met 10 uur continu $75 \text{ m}^3/\text{s}$ spuien.

*Figuur 36
Binnenwaterstand
bij Krimpen
(bovenste figuur) en
hoogte van de deur
(onderste figuur)
voor de
verschillende
sluitprocedures
tijdens de storm van
3 januari 2018.*



D

Partieel falen Hollandsche IJsselkering

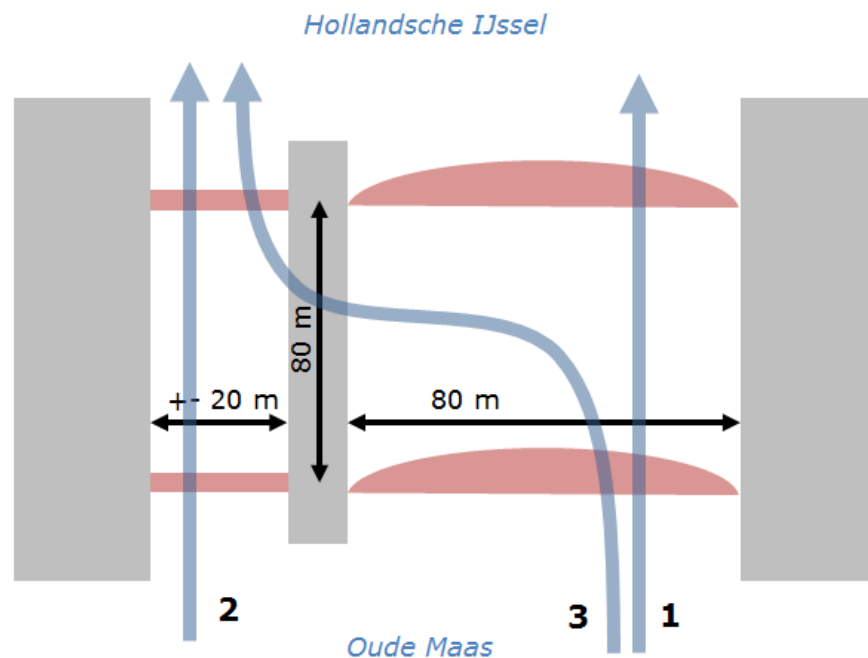
Eén van de systeemmaatregelen die in deze studie is onderzocht, is het verkleinen van de faalkans van de Hollandsche IJsselkering. De huidige faalkans wordt geschat op eens per 200 sluitvragen, wat verkleind zou worden naar eens per 1000 of 5000 sluitvragen. Het helpt hiervoor om een inschatting te krijgen wat het effect is van verschillende faalconfiguraties op de binnenwaterstand.

D.1

Faalconfiguraties

In Figuur 37 is de Hollandsche IJsselkering schematisch weergegeven, met daarin blauwe pijlen die de verschillende faalconfiguraties aangeven. Pijl 1 geeft het falen van de twee schuiven aan. Deze manier van falen is in de productieberekeningen aangehouden, waarbij het water door een doorstroombreedte van 80 meter stroomt. Een tweede mogelijkheid is dat de Algerasluis naast de stormvloedkering faalt. Deze schutsluis wordt tijdens een sluiting gebruikt om schepen te verplaatsen. De schutsluis is ruim 20 meter breed. Daarnaast zou het kunnen dat één stormvloedschuif, en één deur van de schutsluis faalt, pijl 3. Hiervoor moet het water over het middeneiland stromen, dat een hoogte heeft van 3 m+NAP. Als laatste zouden de stormvloedkering en de schutsluis beide kunnen falen, 1 en 2 samen dus. De doorstroombreedte wordt hierbij ruim 100 meter.

*Figuur 37
Schematische weergave van de Hollandsche IJsselkering, met onderzochte faalconfiguraties (blauwe pijlen)*



Effect op waterstanden

Om de resulterende binnenwaterstand voor de verschillende faalconfiguraties te bepalen zijn extra SOBEK-berekeningen uitgevoerd. Voor de verschillende varianten is dit op de volgende wijze gemodelleerd:

1. Falen schuiven

Referentie, geen aanpassingen.

2. Falen schutsluis

De breedte van de stormvloedkering is tijdens falen op 20 meter gezet.

3. Water over middeneiland

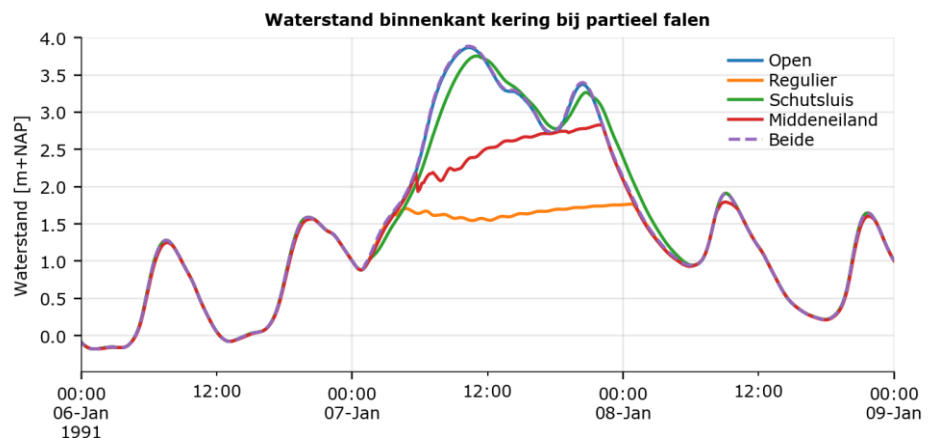
Er is een overlaat met hoogte 3,0 m+NAP en breedte 80 meter achter de Hollandsche IJsselkering geplaatst. Deze wordt als meest beperkende factor voor de doorstroming gezien, de stroming door de schutsluis is verder niet gemodelleerd.

4. Falen van schuiven en schutsluis

De breedte van de stormvloedkering is tijdens falen op 100 meter gezet.

De waterstanden achter de kering (op de Hollandsche IJssel) bij een storm van 4 m+NAP zijn weergegeven in Figuur 38.

*Figuur 38
Waterstanden op de
Hollandsche IJssel
achter de
stormvloedkering
voor verschillende
faalconfiguraties*



De oranje lijn geeft de waterstand bij een reguliere peilsluiting. De waterstanden binnen blijven beperkt. De blauwe lijn geeft de open situatie, de reguliere faalconfiguratie. Deze is vrijwel gelijk aan de paars gestippelde lijn, met een doorstroombreedte van 100 meter. De groene lijn geeft de waterstand wanneer de schutsluis faalt en de doorstroombreedte 20 meter is. Deze beperkte doorstroomcapaciteit geeft echter weinig reductie in de waterstand, die is ongeveer 10 cm lager dan bij een doorstroombreedte van 80 of 100 meter.

Wanneer het water via één schuif en één deur van de schutsluis loopt heeft dit wel een beperkend effect op de binnenwaterstand. Voor een stormopzet van 4,0 m+NAP stijgt de waterstand slechts tot 2,8 m+NAP, waar dit bij geheel falen zeker een meter hoger is. De maatgevende situaties voor de waterstand zoals ze in deze studie zijn bepaald, zijn meestal een falende Hollandsche IJsselkering terwijl de Maeslantkering niet hoeft te sluiten. De waterstand voor de Hollandsche IJsselkering komt hierbij niet boven de 3,0 m+NAP uit. In deze situaties blokkeert het middeneiland dus de

doorstroming, en keert de kering als geheel nog steeds het water. Daar staat tegenover dat het een vrij specifieke faalconfiguratie is met een kleine kans van voorkomen. Eén schuif en één schutsluisdeur moeten falen, en de andere beide niet. In deze faalconfiguratie voorkomt de HIIK als geheel dus hoge binnenwaterstanden bij de (momenteel) maatgevende situatie, maar de kans dat deze configuratie optreedt gegeven dat de HIIK faalt is waarschijnlijk klein.

E

Plan van aanpak waterbezwaar

Dit hoofdstuk beschrijft een opzet voor het plan van aanpak om tot een nauwkeurigere maalstopfrequentie te komen. Dit plan is opgezet aan de hand van drie stappen:

1. In eerste instantie moet worden bepaald hoe significant de berekende maalstopfrequentie is. Dit hangt af van de berekende kans, en hoe gevoelig deze is voor een ander waterbezwaar en kans van voorkomen.
2. Als uit de eerste stap blijkt dat het waterbezwaar relevant is. Kan de maalstopfrequentie verder worden aangescherpt. Dit kan in eerste instantie door nadere analyses, maar ook door de in deze studie gekozen aanpak met Hydra-NL uit te breiden.
3. Als het onderzoeken van oplossingsrichtingen als een belangrijk punt wordt ervaren, kan hiervoor een instrumentarium worden ingericht. Hiermee zou de interactie tussen het primaire en regionale systeem kunnen worden onderzocht, net als de gevoeligheid voor klimaatscenario's.

Deze laatste twee hoeven niet beide uitgezocht worden, wellicht is maar behoefte aan één van de twee.

E.1

Relevantie

In onderstaande analyse is geen rekening gehouden met onzekerheid, in de zin zoals dit wordt meegenomen in het WBI en OI. Als onderstaande analyse is afgerond, zal dit aspect moeten worden beschouwd.

In eerste instantie moet worden bepaald of de berekende maalstopfrequentie relevant is. Dit doen we aan de hand van de volgende vragen:

- Is de situatie die nu wordt doorgerekend de bovengrens van waterbezwaar en correlatie?
- Is het waterbezwaar significant voor huidige en toekomstige situaties?
- Hoe significant is het waterbezwaar bij een halvering van het volume of de kans?

Is de situatie die nu wordt doorgerekend de bovengrens van waterbezwaar en correlatie?

Momenteel rekenen we met een waterbezwaar van 75 m³/s en een 1/3 kans op waterbezwaar. De werkelijke gemaalcapaciteit ligt hoger, maar het is niet aannemelijk dat die in elk van de situaties met waterbezwaar volledig wordt ingezet.

Zware of langdurige neerslag leidt tot waterbezwaar in de het beheersgebied van Rijnland, Stichtse Rijnlanden en Schieland/Krimpenerwaard. Een

dergelijk waterbezwaar leidt niet zonder meer tot waterbezwaar op de Hollandse IJssel. Voor met name Rijnland (en ook Stichtse Rijnlanden) is het mogelijk om dit waterbezwaar op andere wateren uit te slaan. Niet alleen de relatie tussen zeewaterstand (wind + getij) en de neerslag, maar ook een mogelijke relatie tussen zeewaterstand en bemalingsregime moet mogelijk worden onderzocht (de relatie tussen neerslag en zeewaterstand is hierbij een bovengrens).

In de productieberekeningen is aangenomen dat als sprake is van waterbezwaar een constant debiet van $75 \text{ m}^3/\text{s}$ als conditie op de Hollandse IJssel wordt opgelegd. Gedurende een gehele productieberekening geldt deze conditie, behalve als de waterstand achter de kering bij Krimpen a/d IJssel het maalstoppeil overschrijdt. Als het maalstoppeil wordt overschreden, dan wordt het debiet in de conditie teruggebracht tot $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Is het waterbezwaar significant voor huidige en toekomstige situaties?

Voor de huidige situatie speelt waterbezwaar geen grote rol. De kenteringsluiting leidt tot genoeg ruimte voor waterbezwaar (orde 16 uur tot maalstop). De Hollandsche IJsselkering zal haast nooit langer dan 1 getijcyclus gesloten hoeven worden door een hoge waterstand op de Oude Maas. Hiervoor is namelijk een falende Europoortkering en een stormopzet van rond de $4,0 \text{ m+NAP}$ nodig.

Voor het huidige klimaat en de gebruikte uitgangspunten ($75 \text{ m}^3/\text{s}$ waterbezwaar, en een $1/3$ kans van optreden), rekenen we een maalstopfrequentie van $1/20.000$ per jaar uit. Dit is een zeer kleine kans als je bedenkt dat een maalstop wateroverlast kan veroorzaken, maar geen direct risico is voor de waterveiligheid (tenzij een regionale kering bezwijkt).

Wanneer de zeespiegel stijgt, stijgt de sluitwaterstand mee en zal de kering langer gesloten zijn. Voor 2050 rekenen we met 35 cm zeespiegelstijging, ter hoogte van Krimpen is de sluitwaterstand dan 25 cm hoger dan in het huidige klimaat. De maatgevende waterstanden nemen hiermee met ruim een decimeter toe, waarmee de maalstopfrequentie een factor 10 toeneemt (tot $1/2.000$ per jaar).

Hoe significant is het waterbezwaar bij een halvering van het volume of de kans?

Om hier wat meer grip op te krijgen lopen we na wat nodig is voor het bereiken van een maalstop:

1. De waterstanden op de Hollandsche IJssel stijgen bij waterbezwaar ongeveer 10 cm per uur. Een sluiting van 12 uur leidt dus tot $1,2 \text{ m}$ waterstandstijging.
2. De gemiddelde sluitwaterstand bij een kenteringsluiting is ongeveer $1,0 \text{ m+NAP}$, hiermee duurt het rond de 16 uur tot een maalstop wordt bereikt;

3. Zulke lange sluitingen vinden plaats bij zeewaterstanden van 4,0 m+NAP en hoger en een open Europoortkering.
4. Onder de aanname dat deze waterstand eens per 100 jaar voorkomt, de Europoortkering eens per 100 jaar faalt, en er in 1/3 van de gevallen waterbezwaar is, leidt dit tot een kans van 1/30.000 per jaar op een maalstop.

Dit komt ordegrrootte overeen met de berekende frequentie. Bij een halvering van het waterbezwaar is dus een nog grotere storm nodig (5,0 m+NAP) die de HIIK dubbel zo lang dicht houdt. Het verkleinen van het waterbezwaar leidt dus tot een flinke afname van de frequentie. Andersom kan een substantieel groter waterbezwaar ertoe leiden dat een maalstop een stuk eerder voorkomt. Wanneer we de correlatie halveren (1/6 kans op waterbezwaar i.p.v. 1/3) daalt de kans op een maalstop met dezelfde factor.

De maalstopfrequentie is dus vooral gevoelig voor de sluitwaterstand en de hoeveelheid waterbezwaar.

De volgende paragrafen zijn in concept uitgewerkt. Doordat de berekende maalstopfrequentie niet problematisch is bevonden, zijn deze paragrafen in overleg met de opdrachtgever niet verder uitgewerkt. Mocht dit in de toekomst veranderen, dan kunnen de onderstaande paragrafen als opzet worden gebruikt voor een verdere uitwerking.

E.2

Nader bepalen maalstopfrequentie

Om de maalstopfrequentie beter te bepalen zouden de volgende acties kunnen worden ondernomen:

- *Ten behoeve van de correlatie: Wat is de correlatie tussen zware neerslag en storm op zee?*
Uit meetreeksen kan deze correlatie worden afgeleid. Hiervoor moet bepaald worden welke neerslaghoeveelheid tot een groot waterbezwaar leidt.
- *Ten behoeve van de correlatie: analyse inzet 'Gouda' door HHR en HDSR uit DEZY-berekeningen*
Bij welke windrichting, windsnelheid, neerslagintensiteit wordt 'Gouda' ingezet? Deze uitvoer wordt momenteel niet weggeschreven in de DEZY-sommen. Daarnaast is het de vraag of het neerslagafvoermodel tot de Hollandsche IJssel doorloopt. DEZY zou dus wellicht aangepast moeten worden om dit te onderzoeken.
- *Ten behoeve van afvoerpatroon: analyse inzet 'Gouda' door HHR en HDSR uit SOBEK-berekeningen*
Hoe ziet het afvoerpatroon eruit, wanneer treedt afvoer op (t.o.v. storm op zee), is dit patroon afhankelijk van windrichting, windsnelheid en neerslagintensiteit? Als deze informatie nog niet beschikbaar is, wat is

nodig om dit te kunnen analyseren? Het huidige uitgangspunt is dat de neerslag dusdanig langdurig of groot is dat er continu 14.4 mm per dag wordt bemaald. Vandaar dat in de productieberekeningen met een continue afvoer wordt gerekend.

- *Uitbreiden Hydra-NL*

Het is mogelijk nog een stap verder te gaan door de in deze studie gekozen aanpak met Hydra-NL uit te breiden. Momenteel is een kans aan al dan niet waterbezwaar gekoppeld, maar het is ook mogelijk het waterbezwaar afhankelijk te maken van de belastingcombinatie (zeewaterstand, windrichting, etc.).

E.3

Onderzoeken oplossingsrichtingen

Wanneer na het beter uitwerken van de maalstopfrequentie de resultaten problematisch worden geacht, kan gekozen worden om meerdere oplossingsrichtingen uit te werken. Denk hierbij aan een DEZY-achtige applicatie die de interactie tussen het primaire en secundaire systeem simuleert. Hiermee zouden beheersmaatregelen en klimaatscenario's onderzocht kunnen worden.



Hoofdkantoor

HKV lijn in water BV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad
Postbus 2120
8203 AC Lelystad

Nevenvestiging

Informaticalaan 8
2628 ZD Delft

0320 29 42 42
info@hkv.nl
www.hkv.nl