

Meerpeilen en waterveiligheid IJsselmeergebied

Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied fase 1

RWS ONGECLASSIFICEERD

september 2015
Status: definitief



Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat WVL
Informatie	Albert Remmelzwaal
Telefoon	06 53642529
Fax	
Uitgevoerd door	Albert Remmelzwaal, Arthur Kors, Ilka Tanczos, Arnold Hebbink en Jan Helmer.
Opmaak	
Datum	september 2015
Status	definitief

Inhoud

1	Inleiding—5
2	Het watersysteem IJsselmeergebied—9
2.1	Waterveiligheid—9
2.2	Waterhuishouding en peilbeheer—14
2.3	Dijkbelastingen—21
3	Meerpeilen onder invloed van klimaat, inrichting en beheer—29
3.1	Effecten van klimaatverandering—29
3.2	Effecten van vergroting waterafvoer—32
3.2.1	Vergroting spuicapaciteit—32
3.2.2	Pompen—33
3.2.3	Vergroting spuicapaciteit in combinatie met pompen—35
3.3	Effecten van aanpassing wateraanvoer—36
3.3.1	Beperking waterafvoer uit de regio—36
3.3.2	Verandering afvoer IJssel—38
3.4	Effecten van vergroting van de buffercapaciteit—40
3.5	Effecten van verwijderen van de Houtribdijk—42
4	Doorwerking meerpeilen in de dijkbelasting—45
4.1	Klimaatverandering—45
4.2	Maatregelen IJsselmeer—46
4.3	Maatregelen Markermeer—48
5	Discussie, conclusies en vervolg—49
5.1	Discussie—49
5.2	Conclusies en vervolg—52
Bijlage A	Literatuur—55
Bijlage B	Beleidskader water en waterveiligheid—56
Bijlage C	Het model DEZY—57
Bijlage D	Klimaatscenario's—59

1 Inleiding

Met de tussentijdse wijziging van het Nationaal Waterplan in december 2014 zijn de resultaten van het Deltaprogramma vastgelegd in het nationaal waterbeleid. Samen met de besluiten die genomen zijn rond het project Afsluitdijk zijn er nu duidelijke kaders voor het waterbeheer en de waterveiligheid in het IJsselmeergebied (zie Bijlage B). Voor het waterbeheer is er daarbij verschil tussen de periode tot 2050 en de periode daarna. Tot 2050 zijn de beleidsdoelen en de manier waarop die zullen worden gerealiseerd volledig vastgelegd. Voor de periode na 2050 is dat minder het geval, in ieder geval voor de doelen en middelen voor het peilbeheer. Dit betekent dat er op dit gebied na 2050 beleidsruimte is: komt er een peilstijging op het IJsselmeer? Word het zomerpeil verder geflexibiliseerd? Willen we misschien de pieken in de peilen van het IJsselmeer en/of Markermeer beperken met extra pompcapaciteit? Vervolgens is ook de vraag hóe we het beleid gaan realiseren: welke afvoermiddelen we daarvoor gaan inzetten (hoeveelheid spui- en pompcapaciteit op Afsluitdijk en Houtribdijk). De vraag naar de afvoermiddelen is rond 2050 ook actueel omdat dan de spuiccomplexen in de Afsluitdijk aan het eind van hun technische levensduur zijn. Dit betekent dat rond die tijd een belangrijke investeringsbeslissing genomen moet worden.

Rond 2050 ligt er dus een cruciaal beslispunt. De afweging die gemaakt moet worden is complex, omdat de verschillende keuzes rond peilbeheer onderling samenhangen, maar ook samenhangen met de waterveiligheid. Bovendien moet rekening gehouden worden met grote onzekerheden in de klimaatverandering. Tot nu toe zijn waterveiligheid en peilbeheer nooit volledig in samenhang geanalyseerd. In het Deltaprogramma IJsselmeergebied is daarom bepleit om een integrale studie naar waterveiligheid en peilbeheer uit te voeren. Dit natuurlijk binnen de context van de laatste inzichten over klimaatverandering en zeespiegelstijging en met oog voor de relatie tussen de meren en de omliggende watersystemen. Deze studie is opgenomen in de kennisagenda van het deltaprogramma voor de periode 2015-2018. Eind 2014 heeft het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (Directoraat Generaal Ruimte en Water) opdracht gegeven aan RWS-WVL voor de uitvoering van de Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied (ISWP).

Doel van het project ISWP

De Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied gaat over de situatie na 2050 en richt zich op de meren van het IJsselmeergebied, het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal, in relatie met de omliggende regionale watersystemen. Het doel van de studie is **het vergroten van het inzicht in de relaties tussen waterafvoer, waterveiligheid en peilbeheer in het IJsselmeergebied**. Het inzicht wordt toegepast in het:

1. Ontwikkelen van kansrijke varianten voor de waterhuishoudkundige inrichting en beheer voor de periode na 2050.
2. In beeld brengen van de technische, financiële en ruimtelijke consequenties van deze kansrijke varianten.
3. Ontwikkelen van een adaptieve strategie (op basis van de kansrijke varianten), waarin ook de investeringsbeslissingen vóór 2050 worden meegenomen.
4. Het analyseren van de waterhuishoudkundige functie van de Houtribdijk in de verschillende kansrijke varianten voor de periode na 2050.

De studie wordt uitgevoerd binnen de vastgestelde beleidskaders. Deze kaders staan niet ter discussie. Dit geldt voor de vastgestelde marges voor het peilbeheer, voor de dijknormering zoals die in de waterwet zal worden vastgelegd en voor de actualisatie van het Wettelijk Toetsinstrumentarium (WTI) die 1 januari 2017 gereed moet zijn.

Zoals in het kader is aangegeven, is de studie bedoeld om kennis en inzicht in de complexe samenhang te vergroten, niet om op basis hiervan een investeringsbeslissing te kunnen nemen. Daarbij kan wel meer duidelijk worden over de kansrijkheid van verschillende opties. Aanvullend op de vragen die voortvloeien uit het Deltaprogramma heeft DGRW gevraagd om te analyseren wat het waterhuishoudkundige belang van de Houtribdijk is. Dit in verband met de wens die bij sommige partijen leeft om een grote opening in deze dijk te creëren, om daarmee de ecologische uitwisseling tussen IJsselmeer en Markermeer te verbeteren. Het project ISWP wordt uitgevoerd door RWS-WVL, in samenwerking met Deltares, CPB en adviesbureaus en in samenspraak met de waterbeheerders in het gebied en het expertisenetwerk waterveiligheid (ENW).

In het project ISWP is gekozen voor een gefaseerde aanpak. Hierin gaat kennisontwikkeling hand in hand met de ontwikkeling van modellen en methoden. Het vraagstuk is te complex om zo maar even een aantal varianten te kunnen doorrekenen en te vergelijken. Dit rapport gaat over de eerste fase: de probleemanalyse. In deze fase staat de invloed van beschikbare afvoercapaciteit en peilbeheer op de meerpeilen centraal (bij verschillende scenario's). Deze waterhuishoudkundige analyse vergroot het algemene inzicht in zowel het watersysteem als in de effecten van verschillende opties voor inrichting en beheer van het gebied. Het geeft inzicht in wat er gebeurt als je aan één van de "regelknoppen" van het watersysteem gaat draaien.

De eerste fase is gestart met het laten ontwikkelen van een computermodel, waarmee de effecten van allerlei ontwikkelingen en ingrepen op de peilen van IJsselmeer en Markermeer kunnen worden berekend. Dit model, DEZY genoemd, is een krachtig instrument geworden (zie bijlage C voor een beschrijving ervan). Met DEZY is vervolgens een groot aantal varianten doorgerekend, bij verschillende klimaatscena-

rio's. Parallel hieraan is een analyse uitgevoerd van de waterveiligheid in het IJsselmeergebied.

De uitgevoerde berekeningen en analyses helpen om het kennisfundament te versterken, waarop in de volgende fasen verder wordt gebouwd. Ze zijn niet bedoeld om nu al uitspraken te kunnen doen over de kansrijkheid van bepaalde keuzes voor de situatie na 2050. Op basis van de inzichten uit fase 1 kunnen in volgende fasen varianten worden gekozen voor een verdergaande analyse, waarbij niet alleen naar meerpeilen wordt gekeken maar vooral ook naar de betekenis daarvan voor de veiligheid. Ook hier geldt dat, om de volgende analysestap mogelijk te maken, verder gewerkt moet worden aan de ontwikkeling van modellen en methoden. Een complicatie daarbij is dat in de nieuwe veiligheidsbenadering de uitwerking van de systematiek voor ontwerp en toetsing van dijken nog volop in ontwikkeling is.

Dit rapport geeft een beknopte beschrijving van het watersysteem, met vervolgens de uitgevoerde analyse van de waterveiligheid (hoofdstuk 2). Hierna volgen de resultaten van de berekeningen met DEZY (hoofdstuk 3). Dit hoofdstuk geeft inzichten in de effecten van klimaatverandering op de meerpeilen en op de mogelijkheden hierin te sturen. Er wordt vervolgens een eerste doorkijk gegeven naar de gevolgen die verandering in de meerpeilen hebben voor de belasting waaraan dijken blootstaan (hoofdstuk 4). Het rapport sluit af met discussie, conclusies en een doorkijk naar het vervolg (hoofdstuk 5).

Markermeerdijken Noord-Holland

Eén van de opties die is geanalyseerd in deze studie is het plaatsen van pompen op de Houtribdijk, om daarmee de waterpeilen in het Markermeer strakker te kunnen sturen. Los van deze studie is door bewoners van Noord-Holland, die niet blij zijn met de voorgenomen versterking van de Markermeerdijken, deze optie naar voren gebracht als mogelijkheid om de versterking te voorkomen (of de versterkingsopgave te beperken). De Adviesgroep van het dijkversterkingsproject achtte het voorjaar 2015 wenselijk deze optie te onderzoeken. Rijkswaterstaat heeft vervolgens de vraag opgepakt wat pompen kunnen betekenen voor het reduceren van de hydraulische belasting van dijken; Hollands Noorderkwartier heeft de gevolgen voor de dijken geanalyseerd. De analyse van Rijkswaterstaat kon goed worden gekoppeld aan het project ISWP. Het model DEZY was net op tijd gereed voor het uitvoeren van berekeningen. Het op de lange termijn gerichte project ISWP kon zo in het eerste jaar al bijdragen aan het beantwoorden van concrete vragen uit de praktijk. Vanuit de actualiteit van de Markermeerproblematiek zouden de komende tijd besluiten genomen kunnen worden genomen over peilbeheer en waterveiligheid in het Markermeer die de beleidsruimte na 2050 inperken, waarmee de scope van ISWP beperkt wordt.

2 Het watersysteem IJsselmeergebied

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving en analyse van het watersysteem IJsselmeergebied. Daarbij ligt het accent op de relatie tussen waterveiligheid en peilbeheer. De eerste paragraaf geeft een algemene beschrijving van waterveiligheid in merengebieden. In paragraaf 2 wordt vervolgens ingegaan op de waterhuishouding en het peilbeheer in het IJsselmeergebied. In de derde paragraaf wordt de relaties tussen de thema's uit de eerste twee paragrafen gelegd. Hier wordt een uitgebreide analyse gemaakt van de verschillen in dijkbelasting die er binnen het IJsselmeergebied zijn, onder invloed van meerpeil en wind.

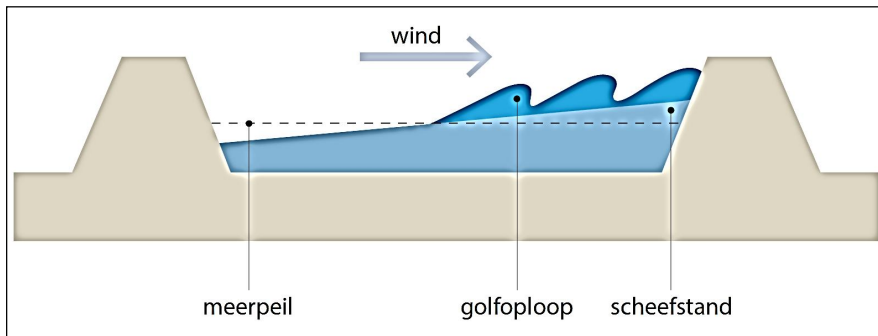
2.1 Waterveiligheid

Dijken beschermen tegen overstroming. Het falen van een dijk betekent dat er een overstroming van het achterliggende gebied optreedt. Dijken falen als de waterstand of de golfbelasting van de dijk hoger is dan de dijk aankan.

Er zijn verschillende mechanismen waardoor een dijk kan falen. Als een dijk te laag is, kan er overloop plaatsvinden: het water stroomt over de dijk. Het gevaar bestaat dat door overloop en golfoverslag de dijk aan de binnenzijde uitgehold wordt, waardoor de dijk bezwijkt. Het kan ook zijn dat de macrostabiliteit binnenwaarts onvoldoende is. Er kunnen dan delen van de dijk gaan afschuiven bij hoge grondwaterstanden in het dijklichaam. Een dijk kan ook worden aangetast door piping. Dit gebeurt wanneer water dat onder de dijk stroomt grond meeneemt, waardoor de dijk verzwakt. Er zijn meer manieren waarop een dijk kan falen, maar voor het IJsselmeergebied zijn dit de belangrijkste mechanismen.

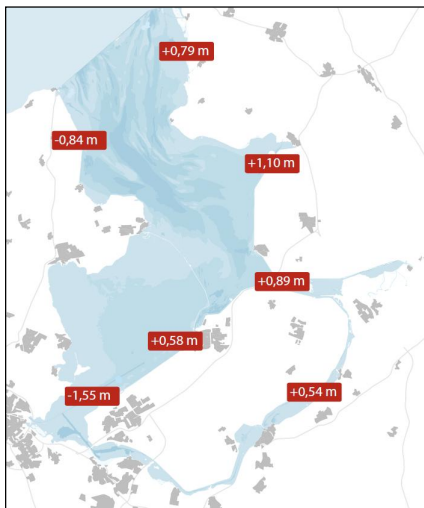
Dijken moeten dus voldoende hoog en sterk zijn om hun functie te vervullen. De eisen waaraan een dijk op een bepaalde locatie moet voldoen zijn afhankelijk van de belasting die daar kan optreden. De belasting van meerdijken hangt af van enerzijds de meerpeilen die voor kunnen komen en anderzijds van de effecten van wind. Wind zorgt voor scheefstand (waardoor lokale waterstanden sterk kunnen afwijken van het meerpeil) en voor het ontstaan van golven (zie Figuur 2.10). De dynamiek van meerpeil en wind zijn sterk verschillend. De totale duur van een piek in de meerpeilen, van het moment dat het meerpeil begint te stijgen tot het moment dat het meerpeil teruggekomen is op een niveau rond het gemiddelde peil, is vaak enkele weken (zie het tekstkader aan het eind van 2.2). De tijdsduur van een storm is slechts enkele uren tot ca. twee dagen.

Met de term meerpeil wordt dus het over een meer gemiddelde waterpeil bedoeld. De waterstand waarmee dijken te maken krijgen is de som van meerpeil en scheefstand. Als er wind staat kunnen de waterstanden bij specifieke dijklocaties sterk van elkaar verschillen, net als de golven waaraan de dijken worden blootgesteld.



Figuur 2.10: De hydraulische belasting van meerdijken bestaat uit het gecombineerde effect van meerpeil, scheefstand en golfooploop.

De scheefstand is afhankelijk van factoren als de strijklengte van de wind over het water, het diepteverloop van het meer en het verloop van de oeverlijn (in trechtervormig vernauwde delen van het meer is er meer opstuwing dan langs een langgestrekte oever). Ter illustratie geeft Figuur 2.11 een beeld van de scheefstand die is opgetreden tijdens een zuidwesterstorm. In paragraaf 2.3 wordt een systematische analyse van de verschillen binnen het gebied uitgevoerd.



Figuur 2.11: Gemeten waterstanden (m NAP) tijdens een zuidwesterstorm op 18 januari 2007 (Deltaprogramma IJsselmeergebied, 2014).

Het ontstaan van golven op de meren wordt door dezelfde factoren beïnvloed als het ontstaan van scheefstand. Hoe hoog golven vervolgens tegen een dijk oplopen hangt vervolgens niet alleen af van de golfeigenschappen, maar ook van de expositie van de dijk op de golfrichting en van het profiel en de ruwheid van de dijk. Als de dijk parallel ligt aan de golfrichting is er geen sprake van golfooploop (de golven lopen langs de dijk). Wanneer de dijk een hoek maakt met de golven lopen de golven tegen de dijk op. (Dit lijkt tenminste zo: in feite vindt door reflectie versterking van de golfhoogte plaats). Tegen een steile dijk met gladde bekleding is de golfooploop hoger dan tegen een dijk met een minder steil profiel en een grove steenbestorting.

In de IJssel-Vechtdelta stromen IJssel en Vecht in het IJsselmeer. Vanuit het gezichtspunt van de waterveiligheid zijn er drie invloedgebieden te onderscheiden. Op de rivieren is er een deel waar stormopzet vanuit de meren (vrijwel) geen invloed meer heeft op de waterstanden, waterstanden worden (vrijwel) geheel door de rivierafvoer bepaald. Omgekeerd is er op de meren een gebied waar de rivierafvoer geen (directe) invloed heeft op de waterstanden. Waterstanden worden bepaald door het meerpeil, in combinatie met wind. (Er is wel een indirecte invloed van de rivierafvoer, omdat bij beperkingen in de spuimogelijkheden de rivierafvoer het meerpeil bepaalt). In het overgangsgebied hebben zowel rivierafvoer als stormopzet invloed. Het overgangsgebied in de IJssel-Vechtdelta omvat het Zwarte Meer en de benedenlopen van de IJssel (ongeveer tot de oude brug van Kampen) en de Overijsselse Vecht (tot de stuw Vechterweerd).

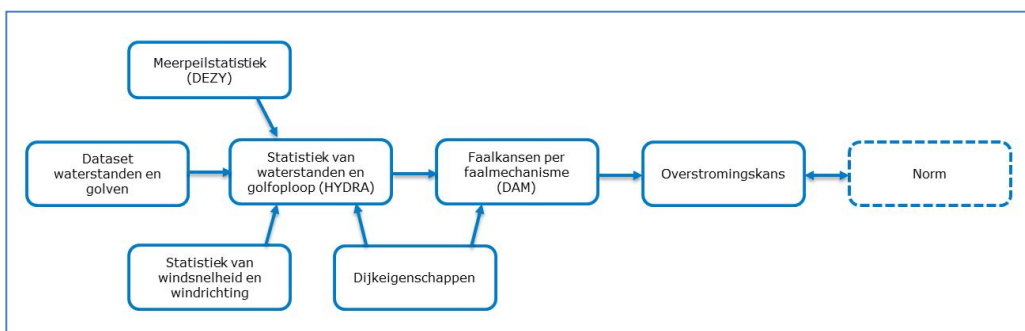
Voor de benodigde *hoogte* van een meerdijk is het hydraulisch belastingniveau (HBN) van belang: de combinatie van meerpeil, scheefstand en golfoploop. Omdat de wind hierin een belangrijke rol speelt gaat het om omstandigheden die slechts kort duren (enkele uren tot dagen). Voor bepaling van de benodigde *sterkte* van de dijken wordt gerekend met de maatgevende hoogwaterstand (MHW): de lokale waterstand die een combinatie is van het meerpeil en de scheefstand die optreedt. Daarbij is niet alleen de hoogte, maar ook de duur van de waterstanden die kunnen optreden van belang. Afhankelijk van de locatie in het gebied is hierbij de trage dynamiek van het meerpeil of de snellere dynamiek van de door wind gestuurde scheefstand het meest bepalend. Voor dijkstabiliteit zijn met name waterstanden die langere tijd kunnen aanhouden van belang. Dit betekent dat op locaties waar meerpeil een grote rol speelt het MHW direct van invloed is op de sterkte. Speelt op een locatie juist de scheefstand een grote rol in het MHW, dan is het MHW op zich een relatief kortdurend verschijnsel. Op die locaties is het MHW als bepalende factor voor de dijksterkte een erg veilige, maar mogelijk te conservatieve keuze. Het is dan vaak mogelijk om voor de dijksterkte uit te gaan van een lagere waterstand die ontstaat bij een hoog meerpeil en relatief weinig scheefstand.

In de huidige normeringssystematiek worden per dijkvak zogenaamde maatgevende omstandigheden gedefinieerd. Voor de meren zijn dit de combinaties van meerpeilen en windsnelheden met een vastgestelde kans van voorkomen. Bij deze maatgevende omstandigheden horen HBN en MHW waarden, die de dijk "veilig moet kunnen keren", oftewel zonder schade moet kunnen doorstaan. De norm bepaalt dus de HBN- en MHW-waarden en deze bepalen vervolgens hoe sterk en hoog een kering moet zijn. De systematiek is dus gebaseerd op de *overschrijdingskansen* van de belastingen die kunnen optreden. De nieuwe normeringssystematiek werkt anders. Deze stelt een eis aan de totale *overstromingskansen* (de som van de faalkansen die bij de verschillende mechanismen horen) van een dijktraject (dat kan bestaan uit meerdere dijkvakken). Voor het combineren van de individuele faalkansen voor de verschillende mechanismen is een faalkansenboekhouding nodig, die weergeeft wat het aandeel van de verschillende faalmechanismen in de overstromingskans is. Hiermee is de relatie tussen de hydrologische belastingen en de norm complexer geworden dan in de huidige systematiek.

Figuur 2.12 geeft aan welke analysestappen in de nieuwe systematiek nodig zijn om een dijkvak in het IJsselmeergebied te toetsen of om een ontwerp voor een dijkversterking te maken. Daarbij geldt dat bij toetsing de belasting en dus meerpeilstatistiek aan het eind van de toetsperiode van belang is en bij ontwerpen de verwachte veranderingen in de meerpeilstatistiek (door bijvoorbeeld klimaatveranderingen) over de beoogde levensduur meegenomen moeten worden. Op dit moment wordt nog gewerkt aan een concretisering van de rekenstappen die hier zijn aangegeven.

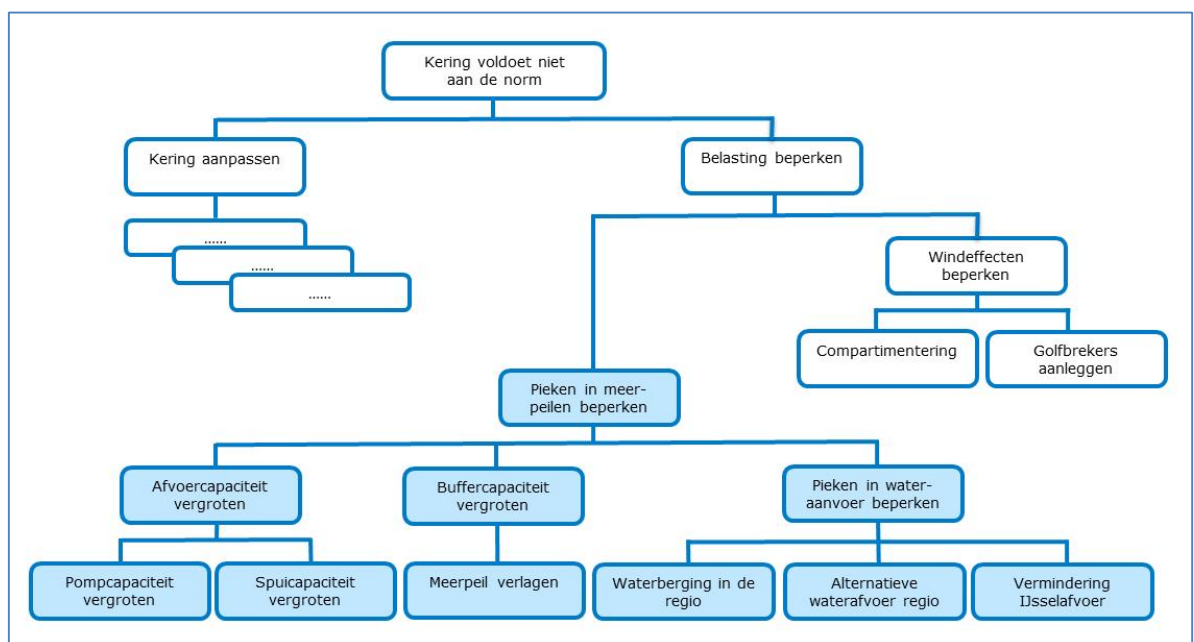
Achter elk van de blokjes van het eenvoudige schema in Figuur 2.12 gaat heel wat schuil. Hieronder wordt dat kort beschreven.

1. Er is een basis-dataset met, per dijkvak, waterstanden en golfkarakteristieken die horen bij bepaalde combinaties van omstandigheden. Deze omstandigheden zijn meerpeilen, windsnelheden, windrichtingen en IJssel- en Vechtafvoeren. De dataset is gemaakt door het doorrekenen van een groot aantal combinaties van omstandigheden met hydraulische modellen. Deze berekeningen hoeven in principe niet herhaald te worden.
2. Op basis van de statistiek van de sturende omstandigheden (meerpeilen, windsnelheden, windrichtingen en afvoeren) worden met het model Hydra zoet per dijkvak de *kansen* berekend van de waterstanden en golfcondities die kunnen voorkomen. Door combinatie van de golfkarakteristieken met dikeigenschappen wordt ook de bijbehorende golfoploop tegen de dijk berekend (met de bijbehorende kansverdeling). In Hydra zijn de statistische gegevens van de huidige omstandigheden opgenomen. Voor de analyse van toekomstscenario's moet nieuwe statistieken worden afgeleid. De afleiding van nieuwe meerpeilstatistiek kan nu eenvoudig met het model DEZY.
3. Vervolgens wordt per dijkvak voor ieder faalmechanisme voor de hele range van mogelijke waterstanden en golven nagegaan hoe groot de kans is dat de dijk die belasting niet kan keren. Door het optellen van de kansen van de verschillende mogelijke belastingen wordt de totale faalkans per faalmechanisme voor het dijkvak berekend. Voor het bepalen van de faalkansen per mechanisme kan onder meer het model DAM worden gebruikt.
4. De totale faalkans voor een dijktraject wordt weer bepaald door de faalkansen per dijkvak. Deze is niet per se gelijk aan de som omdat er rekening moet worden gehouden met de correlaties die er bestaan tussen de faalkansen van verschillende vakken. De totale faalkans mag niet hoger zijn dan de norm die voor het betreffende traject is vastgesteld.



Figuur 2.12: Analysestappen bij het toetsen of ontwerpen van een dijkvak in het IJsselmeergebied en bij het analyseren van toekomstscenario's.

Als dijken in het IJsselmeergebied op een bepaald moment niet meer aan de normen voldoen kan er gekozen worden voor dijkverbetering. Er bestaan echter ook mogelijkheden om de belasting van dijken te beperken. Figuur 2.13 geeft een schematisch overzicht van de verschillende mogelijkheden daarvan. In essentie gaat het om het beperken van pieken in de meerpeilen en om het beperken van windeffecten. Deze studie geeft aandacht aan de relatie tussen de meerpeilen en de dijkveiligheid (blauw ingekleurd in de figuur). Belangrijke vragen daarbij wat de mogelijkheden zijn om de meerpeilen te sturen en welke effecten dit voor de versterkingsopgave heeft. Die effecten kunnen sterk uiteen lopen tussen locaties en zijn ook voor de verschillende faalmechanismen niet gelijk.

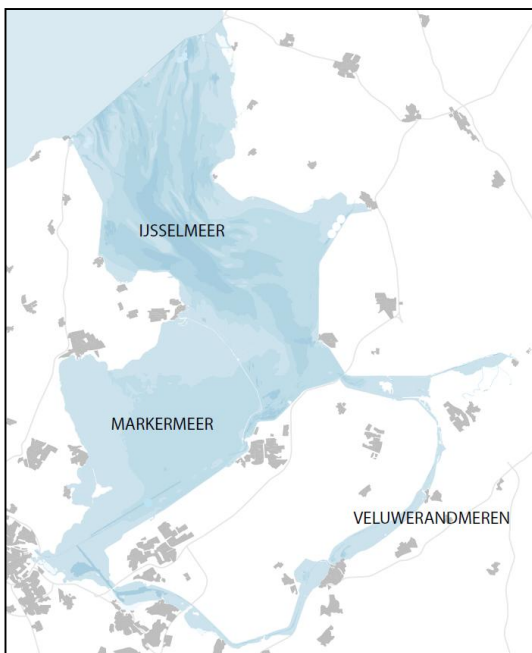


Figuur 2.13: Mogelijke maatregelen wanneer dijken (bijvoorbeeld door klimaatverandering) niet meer voldoen aan de norm. De blauw opgevulde tekstvakken geven aan welke onderdelen in deze studie aan de orde komen.

2.2 Waterhuishouding en peilbeheer

Het wateroppervlak van de meren van het IJsselmeergebied is bijna 2000 km². De meren van het IJsselmeergebied vervullen een belangrijke rol in zowel de afwatering als de watervoorziening van een groot deel van Nederland.

Het merengebied bestaat uit drie compartimenten, die door dijken van elkaar zijn gescheiden: het IJsselmeer (inclusief Ketelmeer, Zwarte Meer en Vossemeer), het Markermeer (met daarmee verbonden het Eemmeer en het Gooimeer) en de Veluwerandmeren. De Afsluitdijk vormt de grens met de Waddenzee (Figuur 2.1).



Figuur 2.1 Overzicht van het IJsselmeergebied

Er wordt naar de meren water aangevoerd door de IJssel, de Overijsselse Vecht, de Eem en door regenval, door afwatering van de omliggende gebieden en door kwel vanuit hoger gelegen gebieden in de omgeving. Uit de meren verdampt water en wordt, in droge perioden in de zomer, water ingelaten naar omliggende gebieden. Het resterende wateroverschot wordt vrijwel geheel via de spuisluizen in de Afsluitdijk naar de Waddenzee afgevoerd. Het wateroverschot van het Markermeer moet daarvoor eerst via de spuisluizen in de Houtribdijk op het IJsselmeer worden gebracht. Het wateroverschot van de Veluwerandmeren wordt deels op het Markermeer (via de spuisluizen bij Nijkerk) en deels op het IJsselmeer (via de Roggebotsluis tussen Dronten en Kampen) gebracht.

Binnen enkele jaren zullen in een aantal spuiopeningen in de Afsluitdijk pompen worden geplaatst, om de waterafvoermogelijkheden te vergroten. Met behulp van deze pompen kan voorkomen worden dat bij stijgende zeespiegel het waterpeil in het IJsselmeergebied stijgt.

Waterbeheer

Rijkswaterstaat beheert de waterafvoer vanuit de drie compartimenten op basis van het in 1992 vastgestelde peilbesluit voor het IJsselmeergebied. Hierin staat welk peil op welk moment wordt nagestreefd, afgestemd op de functies in het betreffende gebied. Voor elk van de drie compartimenten van het IJsselmeergebied is een streefpeil voor de zomer- en de winterperiode vastgesteld (Tabel 2.1). Voor het

IJsselmeer en het Markermeer zijn de streefpeilen gelijk. De Veluwerandmeren hebben een iets hoger streefpeil. Er is besloten dat in ieder geval tot 2050 het winterpeil in het gebied niet zal veranderen. Na 2050 kan het gemiddeld winterpeil (dat is: het over de winterperiode gemiddelde meerpeil) eventueel beperkt meestijgen met de zeespiegelstijging. De stijging is maximaal 30 cm tot 2100. In de zomer krijgen het IJsselmeer en het Markermeer een flexibeler peilbeheer dan het huidige (Ministerie van I&M, 2014). Vanwege de flexibilisering van het zomerpeil en vanwege de komst van de pompen op de Afsluitdijk is een nieuw peilbesluit in voorbereiding.

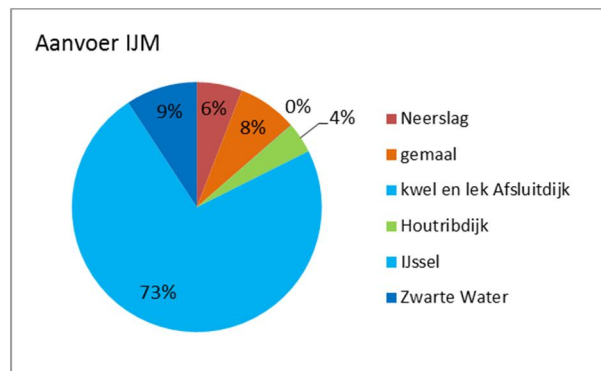
Tabel 2.1: Streefpeilen voor de drie compartimenten van het IJsselmeergebied

	Streefpeil winter	Streefpeil zomer
IJsselmeer (incl. Ketelmeer, Zwarte Meer, Vossemeer)	NAP -0,40 m	NAP -0,20 m
Markermeer (incl. Gooi-Eemmeer)	NAP -0,40 m	NAP -0,20 m
Veluwerandmeren	NAP -0,30 m	NAP -0,05 m

Waterbalansen

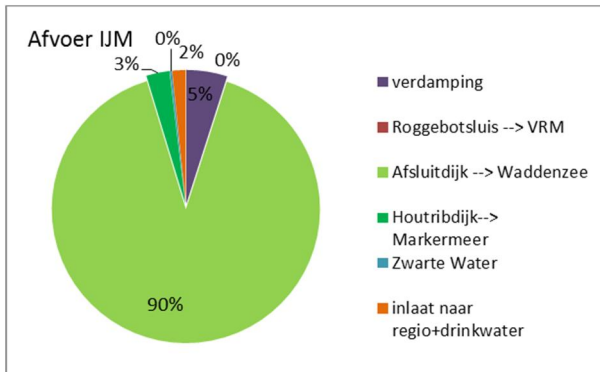
De aan- en afvoer van water in de drie compartimenten van het IJsselmeergebied verschilt sterk. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de jaargemiddelde waarden. Dit geeft niet meer dan een allereerste indruk van de situatie. Ten eerste is er sprake van een systematisch verschil tussen de zomer en de winterperiode. In de winter is er sprake van een groot wateroverschot, dat moet worden afgevoerd. In de zomer is het wateroverschot klein, of kan er zelfs sprake zijn van een watertekort. Verder zeggen de gemiddelde waarden niets over de situatie in bijzondere situaties (extreme wateraanvoer of extreme droogte). De getallen maken echter wel duidelijk dat de drie compartimenten van het gebied een eigen dynamiek hebben. De gegevens van de waterbalansen zijn overgenomen uit Kramer, 2015, waarin een samenvattend overzicht is gemaakt van gegevens van Rijkswaterstaat over de periode 2005-2012.

Het *IJsselmeer* heeft, samen met de daarmee in open verbinding staande meren, een oppervlakte van ca. 1200 km². Naar dit peilcompartiment wordt op jaarbasis gemiddeld ruim 16 miljard kubieke meter water aangevoerd. Figuur 2.2 laat zien waar dit water vandaan komt. Driekwart is afkomstig van de IJssel. De rest is voornamelijk afkomstig van de Overijsselse Vecht (via het Zwarte Water), directe neerslag op de meren, waterafvoer uit de omgeving ("gemalen") en de afvoer vanuit het Markermeer.



Figuur 2.2: Verdeling van de aanvoer op het IJsselmeer in de periode 2005-2012.

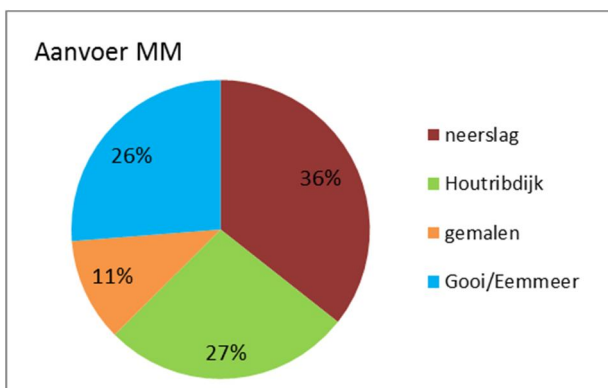
Verreweg de belangrijkste afvoerpost is de spui naar de Waddenzee (Figuur 2.3). Verdamping, en de inlaat van water (naar de omgeving, naar het Markermeer en naar de Veluwerandmeren: alleen in droge perioden in de zomer) en drinkwaterwinning zijn de overige afvoerposten.



Figuur 2.3: Verdeling van de afvoer op het IJsselmeer in de periode 2005-2012.

Het Markermeer heeft (inclusief IJmeer en Gooi-Eemmeer) een oppervlakte van ongeveer 750 km². De wateraanvoer bestaat grotendeels uit waterafvoer uit de omgeving (onder vrij verval afvoer en via gemalen) en uit regenval op de meren zelf. Daarnaast wordt in periodes met een verdampingoverschot water uit het IJsselmeer ingelaten via de spuisluizen in de Afsluitdijk. Met gemiddeld ca. 1,8 miljard kubieke meter per jaar is de gemiddelde wateraanvoer veel kleiner dan die op het IJsselmeer, ook per oppervlakte-eenheid.

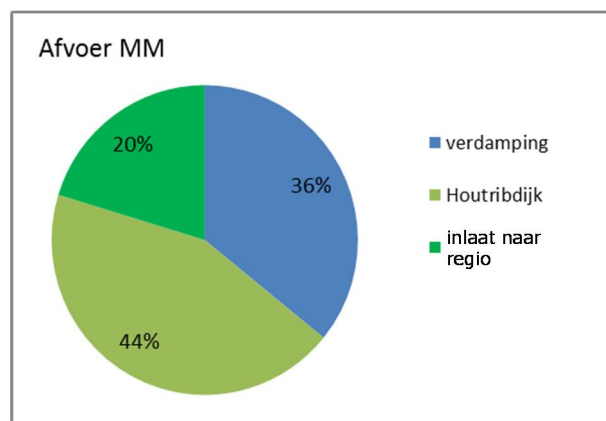
Figuur 2.4 geeft de aanvoerposten op het Markermeer. De belangrijkste aanvoerposten zijn de neerslag, aanvoer via de Houtribdijk (in de zomer), en de toestroming vanuit het Gooi- en Eemmeer. Onder Gooi en Eemmeer wordt de afvoer van de Eem, maar ook de aanvoer vanuit de Veluwerandmeren via de Nijkerkersluis bedoeld.



Figuur 2.4 Verdeling van de aanvoer op het Markermeer in de periode 2005-2012.

Water wordt uit het Markermeer afgevoerd door spui naar het IJsselmeer, door verdamping en door wateraanvoer naar de omgeving in droge perioden. Figuur 2.5 geeft de gemiddelde verdeling weer op jaarbasis. De belangrijkste afvoerpost van het Markermeer is de Houtribdijk. Hierbij wordt water onder vrij verval van het Markermeer naar het IJsselmeer gespuid. Op jaarbasis gaat het gemiddeld om 44% van

de waterafvoer. In het winter ligt dit percentage op 77% (en gaat er geen water naar de omgeving) en in de zomer op slechts 14%.



Figuur 2.5 Verdeling van de afvoer van het Markermeer in de periode 2005-2012.

De *Veluwerandmeren* hebben een gezamenlijk oppervlakte van ca. 75 km². De wateraanvoer naar deze meren is gemiddeld 400 miljoen kubieke meter op jaarbasis. De aanvoer per eenheid van oppervlakte is daarmee nog weer minder dan de helft dan die van het Markermeer. Hiervan komt 78% uit de omgeving (34% van het "oude land" en 44% uit Flevoland via gemaal Lovink tegenover Harderwijk), 14% uit neerslag op de meren en 8% uit kwel vanuit de hoger gelegen gronden van de Veluwe. Waterafvoer vindt plaats door spui naar IJsselmeer en Markermeer (52%), wegzijging in de richting van Flevoland (34%) en verdamping (11%).

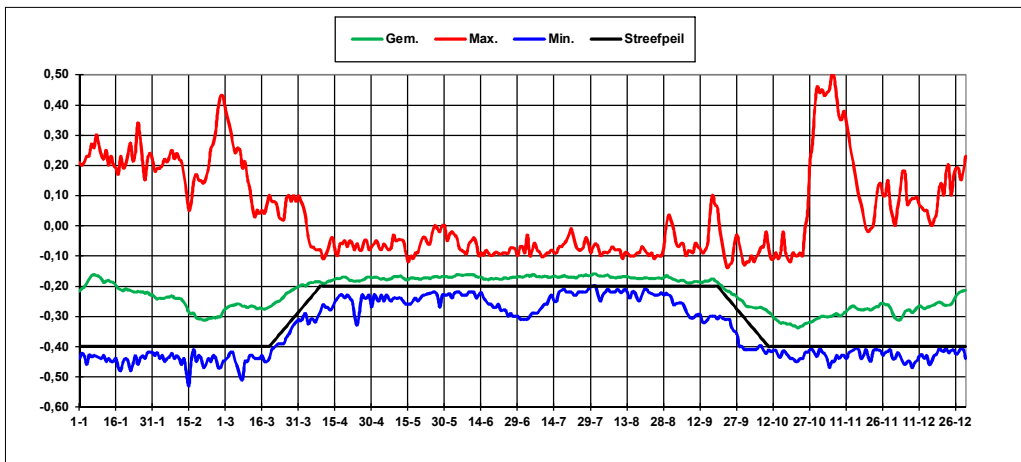
Meerpeilen

De daadwerkelijke meerpeilen kunnen sterk afwijken van de streefpeilen. Vooral in de winterperiode kunnen de afwijkingen groot zijn. De meerpeilen lopen op wanneer de wateraanvoer de afvoermogelijkheden voor water overtreffen. De afvoermogelijkheden van het IJsselmeer worden beperkt als door harde wind uit westelijke tot noordelijke richting de Waddenzee wordt opgestuwd. Als het IJsselmeerpeil dan stijgt, kunnen vervolgens het Markermeer en de Veluwerandmeren ook geen water meer afvoeren. Het moment waarop geen afvoer meer mogelijk is hangt echter niet direct af van de meerpeilen van beide meren, maar van de actuele waterstanden bij de spuisluizen. Deze waterstanden worden beïnvloed door de wind. Bij harde wind ontstaat er namelijk scheefstand van de meren door opwaaiing. Bij een harde zuidwestenwind bijvoorbeeld waait het water van het Markermeer op in de richting van de Houtribdijk, terwijl de waterstand van het IJsselmeer daar dan juist verlaagd wordt. Het is daardoor in die situatie zelfs mogelijk water van het Markermeer naar het IJsselmeer te spuien, terwijl het meerpeil van het Markermeer onder dat van het IJsselmeer ligt. Omdat wind uit (zuid)westelijke richtingen overheerst, is de wind over het algemeen gunstig voor de afvoermogelijkheden van het Markermeer. Voor de Veluwerandmeren geldt voor de spui bij Roggebot (noordzijde) het zelfde. Daarnaast hebben deze meren nog de mogelijkheid bij Nijkerk aan de zuidzijde te spuien, op het Gooi-Eemmeer. Hier leveren vooral oostelijke windrichtingen een spuivoordeel op.

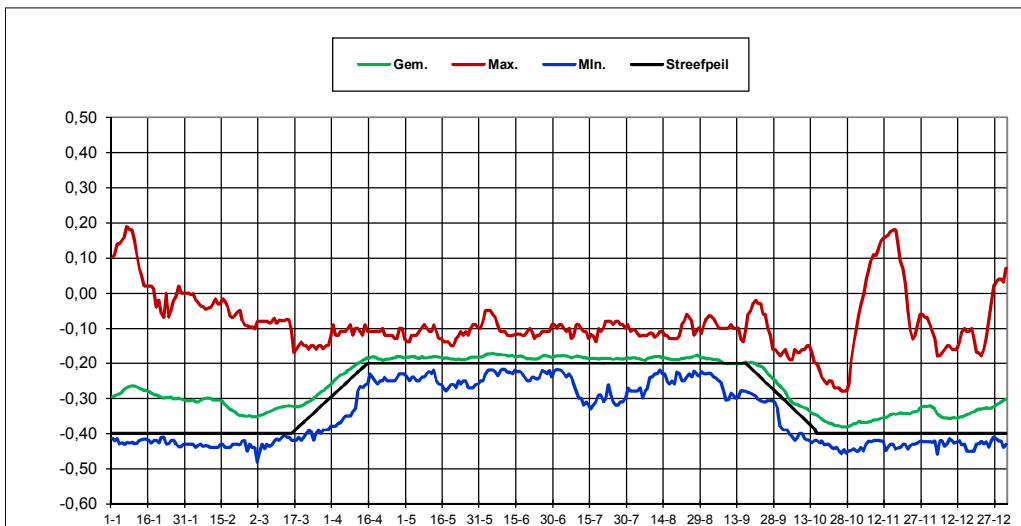
In de figuren 2.6 t/m 2.8 wordt, voor een meerjarige periode, aangegeven wat voor iedere dag van het jaar de hoogste en laagste gemeten meerpeil is. Uit de grafieken blijkt dat de afwijkingen voor het IJsselmeer het grootst zijn (hoogst gemeten waterpeil ooit 51 cm NAP gemiddeld over het meer, dat is 91 cm boven streefpeil). Zoals bij de bespreking van de waterbalansen al duidelijk werd, is het IJsselmeer

het meest dynamische compartiment. Dit komt door de grote hoeveelheden water die de IJssel (en in mindere mate de Overijsselse Vecht) naar het gebied afvoeren.

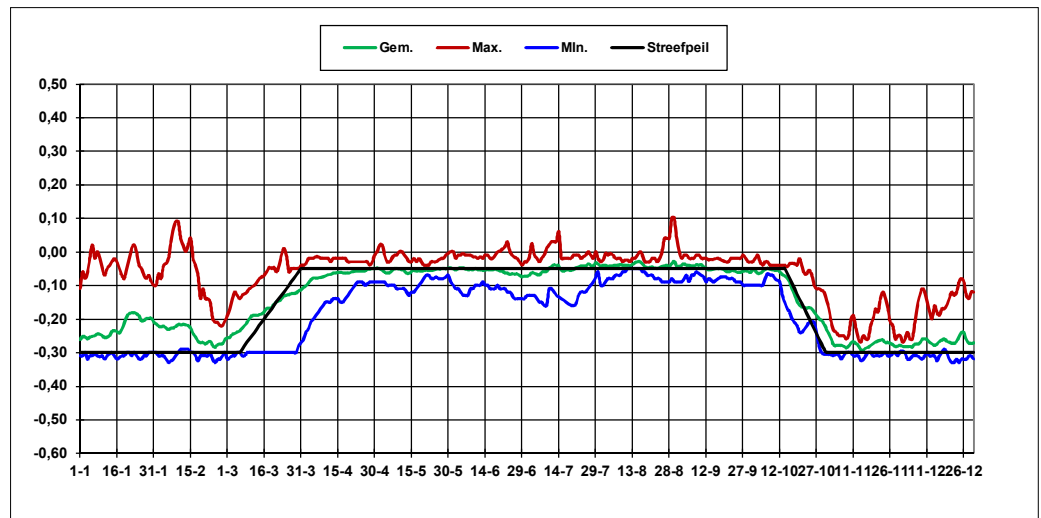
Voor het Markermeer zijn de afwijkingen minder (hoogst gemeten peil 20 cm +NAP), wat past bij de veel kleinere wateraanvoer naar het meer. De afwijkingen voor de Veluwerandmeren zijn het kleinst. Dit past bij de kleine wateraanvoer. Bovendien geven het hogere streefpeil en de mogelijkheid om zowel aan de noord- als aan de zuidzijde te spuien meer mogelijkheden om het waterpeil te beheersen.



Figuur 2.6: IJsselmeer – Minimum, maximum en gemiddeld meerpeil (in m NAP) per dag in de periode 1976 t/m 2012.



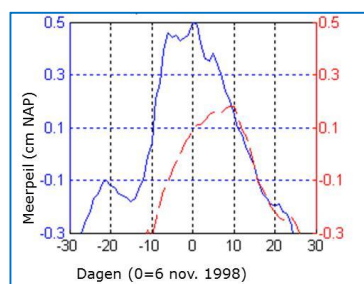
Figuur 2.7: Markermeer - Minimum, maximum en gemiddeld meerpeil (in m NAP) per dag in de periode 1976 t/m 2012.



Figuur 2.8: Veluwerandmeren - Minimum, maximum en gemiddeld meerpeil (in m NAP) per dag in de periode 2003 t/m 2012 (in verband met de invloed van de vervanging van de sluis bij Harderwijk door een aquaduct is hier een kortere reeks jaren gebruikt dan bij de andere meren).

Het ontstaan van pieken in de meerpeilen kan een complexe combinatie van gebeurtenissen zijn. Van de vier hoogste pieken die ooit gemeten zijn in het IJsselmeerpeil is het ontstaan geanalyseerd (Kramer en Klerk, 2015). Deze pieken bleken een vergelijkbare opbouw te hebben. Eerst steeg het IJsselmeerpeil door een combinatie van verhoogde waterstand op de Waddenzee (beperkte spui mogelijkheden) en veel regen in en rond het IJsselmeergebied (vergrootte wateraanvoer). Vervolgens kwam daar een afvoergolf van de IJssel overheen. In het tekstkader aan het einde van deze paragraaf is dit patroon en de verklaring daarvoor beschreven.

Pieken in het Markermeer zijn minder hoog dan in het IJsselmeer. Bovendien ligt hun top later dan in het IJsselmeer. Het peil van het Markermeer blijft namelijk stijgen totdat het IJsselmeerpeil zoveel gedaald is dat vanuit het Markermeer weer spui mogelijk is (Eigenlijk: totdat de waterstanden aan de Markermeerzijde van de spuisluizen hoger zijn dan die aan de IJsselmeerzijde. Deze waterstanden worden bepaald door zowel de meerpeilen als de op- en afwaaiing.) Vervolgens kan het Markermeerpeil dan samen met het IJsselmeerpeil verder dalen in de richting van het streefpeil. Figuur 2.9 geeft als voorbeeld het verloop van de piek van november 1998, de hoogst gemeten piek voor beide meren. De grafiek maakt gelijk inzichtelijk dat de op- en afbouw van een piek een periode van enkele tientallen dagen kan beslaan.



Figuur 2.9 Verloop van de peilen van het IJsselmeer (blauw) en het Markermeer (rood) tijdens de piek die op 6 november 1998 zijn hoogtepunt had (Geerse & Kuijper, 2015).

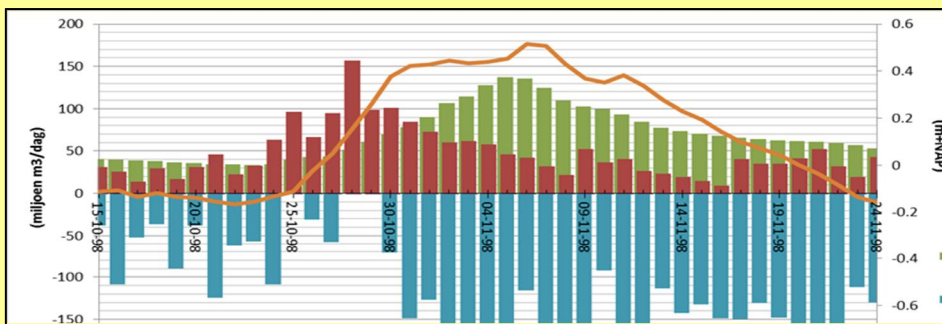
Het ontstaan van meerpeilpieken

Het meerpeil stijgt als de wateraanvoer naar het IJsselmeer groter is dan de waterafvoer. Uit analyses (zie Kramer & Klerk, 2015, van Haaren & Geerse, 2015) is gebleken dat er correlaties bestaan tussen grote wateraanvoer en beperking van de afvoermogelijkheden. Er is een directe correlatie tussen windopzet in de Waddenzee (die de spuimogelijkheden beperkt) en regenval in het IJsselmeergebied. Daarnaast blijkt er ook een correlatie te bestaan tussen die windopzet en de afvoer van de IJssel zes tot zeven dagen later.

De correlaties worden veroorzaakt door fronten die vanaf de Atlantische oceaan over noordwest Europa trekken. Deze fronten veroorzaken eerst regen in (het noorden van) Nederland en, wanneer de wind bij het overtrekken van de depressie van zuid(west) naar noord(west) ruimt, waterstandverhoging op de Waddenzee. De neerslag die meer stroomopwaarts in het stroomgebied van de Rijn valt wordt afgevoerd via de Rijn en komt ongeveer een kleine week na het overtrekken van de depressie via de IJssel voor een deel in het IJsselmeer terecht.

Van de vier hoge gemeten meerpeilpieken in het IJsselmeer is geanalyseerd hoe die hoge meerpeilen tot stand zijn gekomen (Kramer & Klerk, 2015). Daarbij komt duidelijk het effect van de hierboven beschreven verbanden naar voren. Als voorbeeld is in onderstaande grafiek de opbouw van de piek van november 1998 weergegeven. De blauwe balken onder de X-as geven per dag aan hoeveel water er gespuid kon worden. De bruine balken geven de aanvoer van regenwater aan (direct op het meer en afvoer uit de omgeving), de groene balken geven de IJsselaanvoer weer. De lijn, tenslotte, geeft het IJsselmeerpeil weer. Duidelijk is te zien hoe het peil vanaf 25 november gaat stijgen, door een combinatie van veel regen en beperkingen in de spuimogelijkheden. Vanaf 30 oktober kan er weer meer gespuid worden. De regen neemt af, maar nu neemt de IJsselaanvoer zodanig toe dat het meerpeil hoog blijft. Het meerpeil neemt rond 6 november zelfs nog iets toe wanneer bij zeer hoge IJsselaanvoer er niet maximaal gespuid kan worden.

In de vier geanalyseerde pieken waren de patronen vergelijkbaar. Dit betekent natuurlijk niet dat pieken niet ook door andere combinaties van gebeurtenissen kunnen ontstaan, maar het patroon is waarschijnlijk wel kenmerkend.



2.3 Dijkbelastingen

In paragraaf 2.1 is beschreven dat voor de dijkveiligheid zowel de meerpeilen als de effecten van wind (scheefstand en golven) van belang zijn. Omdat de effecten van wind zeer sterk variëren binnen het gebied, verschilt ook het relatieve belang van het meerpeil sterk. Om meer inzicht te geven in de verschillen binnen het gebied zijn met het model Hydra-Zoet voor een groot aantal locaties de maatgevende hoogwaterstanden (MHW's) en hydraulische belastingniveaus (HBN's) berekend met een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar (Kramer, 2015). Het model Hydra-zoet geeft daarbij ook z.g. illustratiepunten weer. De illustratiepunten geven weer welke combinaties van windrichting, windsterkte en meerpeil kunnen leiden tot het berekende MHW of HBN. Het hoofdillustratiepunt is daarbij de belastingscombinaties met de grootste kans van voorkomen¹. Hiermee wordt per locatie meer inzicht gekregen in het relatieve belang van meerpeil, scheefstand en golfoploop in de dijkbelasting.

In deze paragraaf worden de hoofdillustratiepunten (voortaan gewoon illustratiepunten genoemd) besproken. Er mag niet uit het oog verloren worden dat ook andere combinaties van wind en meerpeil relevant zijn voor de dijkbelasting: de illustratiepunten geven alleen de combinatie met de hoogste kans van voorkomen (vandaar ook de term *illustratiepunt*). Voor de dijkbelasting zijn ook de andere combinaties relevant. Deze worden ook allemaal meegenomen in de berekeningen rond de dijkveiligheid. Het is echter niet mogelijk de volledige resultaten van probabilistisch rekenen in kaartbeelden weer te geven. Verder moet er rekening mee worden gehouden dat de illustratiepunten gebonden zijn aan de doorgerekende situatie. Als de omstandigheden veranderen door bijvoorbeeld aanpassing van het dijkprofiel, klimaatverandering of de inzet van pompen kan het zijn dat een andere belastingscombinatie (bij een bepaalde overschrijdingskans) de hoogste kans van voorkomen krijgt.

Golfoploop wordt beïnvloed door het profiel en de bekleding van de dijk. Dit betekent dus ook dat het HBN (de som van meerpeil, scheefstand en golfoploop) beïnvloed wordt door de dikeigenschappen. Om een zo goed mogelijk algemeen beeld van het watersysteem te geven zijn de berekeningen uitgevoerd met een standaard dijkprofiel van 1:3. Lokaal kan dit leiden tot meters verschil in het HBN vergeleken met berekeningen met de werkelijke dijkprofielen (met name op locaties waar veel golfwerking is), maar het rekenen met een standaardprofiel helpt om het inzicht in het functioneren van het watersysteem te vergroten. Om dezelfde reden is ook uitgegaan van een standaard overschrijdingskans (1:10.000), zonder rekening te houden met de verschillen in veiligheidsnormen binnen het gebied.

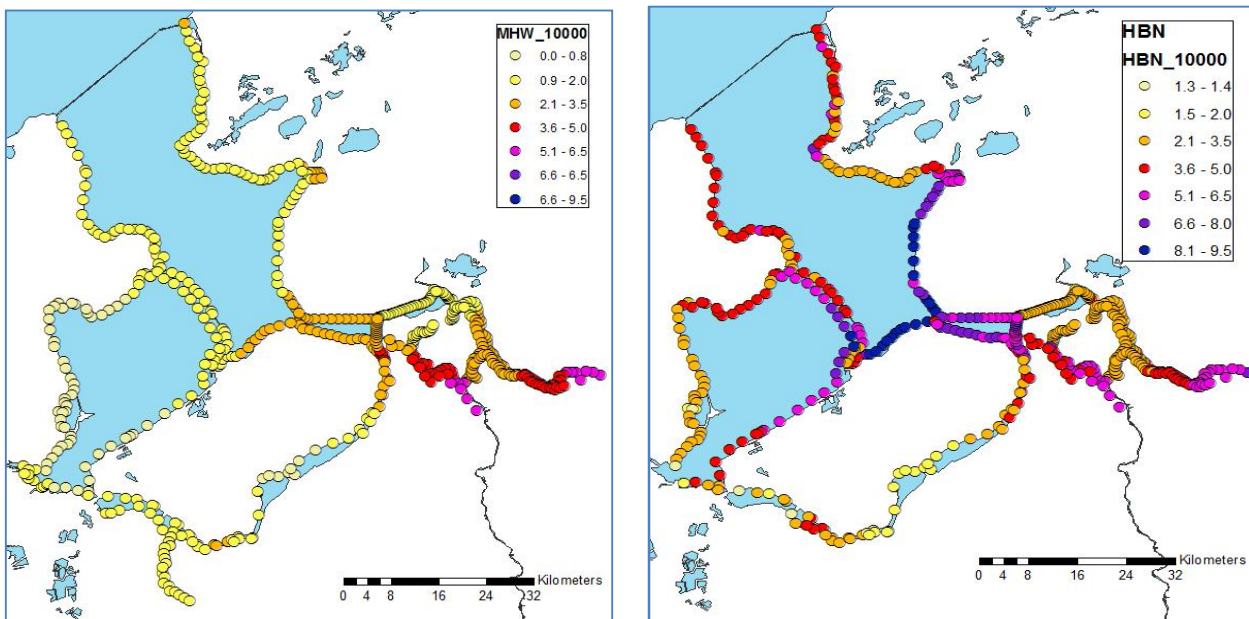
De bespreking van de rekenresultaten begint met de berekende HBN's en MHW's voor de illustratiepunten. Ter herinnering: de MHW is de som van meerpeil en opwaaiing, het HBN de som van meerpeil, opwaaiing en golfoploop. Na de bespreking van de MHW's en HBN's wordt aan de hand van kaartbeelden ingezoomd op de bijdrage van respectievelijk het meerpeil, opwaaiing en golfoploop daaraan. Daarna worden voor enkele voorbeeldlocaties de gegevens in detail weergegeven. De paragraaf eindigt met een korte beschouwing over de IJssel-Vechtdelta. Dit deelgebied wordt in de rest van de paragraaf niet meegenomen.

¹ De belastingcombinatie met de grootste kans van voorkomen is vaak niet identiek voor de berekening van de MHW en het HBN. Het is dus niet zo dat het verschil tussen MHW en HBN precies gelijk is aan de golfoploop.

MHW en HBN

Figuur 2.14 worden de berekende MHW's en HBN's weergegeven, bij een overschrijdingskans van 1:10.000 en een standaard dijkprofiel van 1:3. De MHW's variëren van ca. 70 cm tot meer dan 3 meter NAP. De hoogste waarden zijn in het zuidoosten van het IJsselmeer en in het Ketelmeer te vinden. Door de combinatie van de lange strijk lengte (bij noordwesten wind) en het min of meer trechtervormige verloop van de kustlijn is hier de opwaaiing het sterkste. Er vindt verder opwaaiing plaats tegen de Houtribdijk (noordoosthoek van het Markermeer), de Afsluitdijk (noordoosthoek van het IJsselmeer) en in de randmeren tegen de sluisen bij Nijkerk en Roggebotzand.

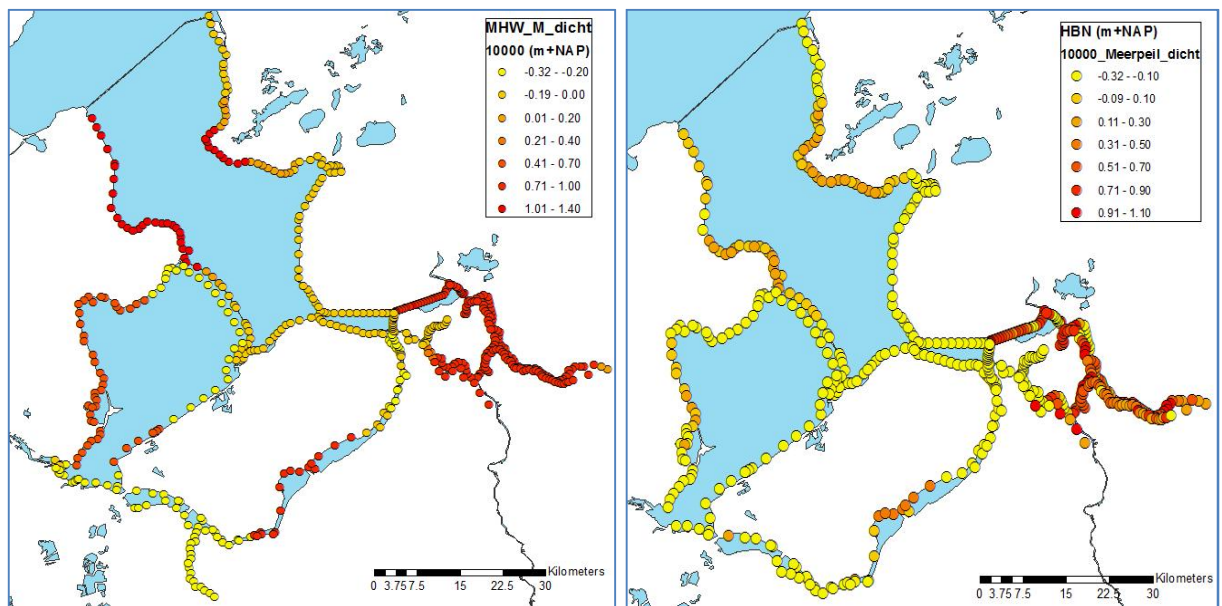
De HBN's rond de meren lopen uiteen van minder dan 1,5 tot meer dan 9 meter NAP. De variatie in absolute waarde is daarmee groter dan in de MHW. De hoogste waarden komen voor langs de IJsselmeerdijken ten noorden van Lelystad en de westzijde van de Noordoostpolder. Hier speelt, naast scheefstand, de golfbelasting een grote rol. De figuur met de HBN's maakt ook duidelijk dat dicht bij elkaar gelegen locaties flink kunnen verschillen in HBN. Dit heeft te maken met de ligging van de dijk ten opzichte van de windrichting. De verschillen van naast elkaar gelegen punten binnen de randmeren hebben te maken met de ligging op de ene of andere oever (die bij de smalle delen op de gekozen kaartschaal niet goed zichtbaar is).



Figuur 2.14: MHW (links) en HBN (rechts) bij een herhalingstijd van 1/10.000 jaar (in m NAP). (Kramer, 2015).

Bijdrage meerpeil

In Figuur 2.15 is aan de linkerkant te zien dat de meerpeilen van de illustratiepunten van de MHW sterk kunnen variëren binnen het gebied. De meerpeilen onder de maatgevende omstandigheden met de hoogste kans van voorkomen zijn het hoogste langs de westkust van het IJssel- en Markermeer, rond Stavoren, langs de Markermeerkust bij Almere en in de Veluwerandmeren. De rechterhelft van de figuur laat de meerpeilen van de illustratiepunten van het HBN zien. Het patroon is vergelijkbaar. De hoogste waarden liggen echter veel lager dan bij de MHW. Dit laat zien dat de maatgevende omstandigheden van het HBN veel meer worden bepaald door de windeffecten (scheefstand en golven) dan door hoge meerpeilen. Dat wil zeggen dat het HBN wordt bereikt onder omstandigheden met extreme wind, zonder extreem hoge meerpeilen. Het gaat daarom om omstandigheden die zich maar een korte tijd voordoen (enkele uren tot ca. twee dagen). Natuurlijk leidt de situatie met zowel extreme meerpeilen als extreme wind tot de hoogste belasting, maar de kans dat deze twee extremen zich gelijktijdig voordoen is bijzonder klein.

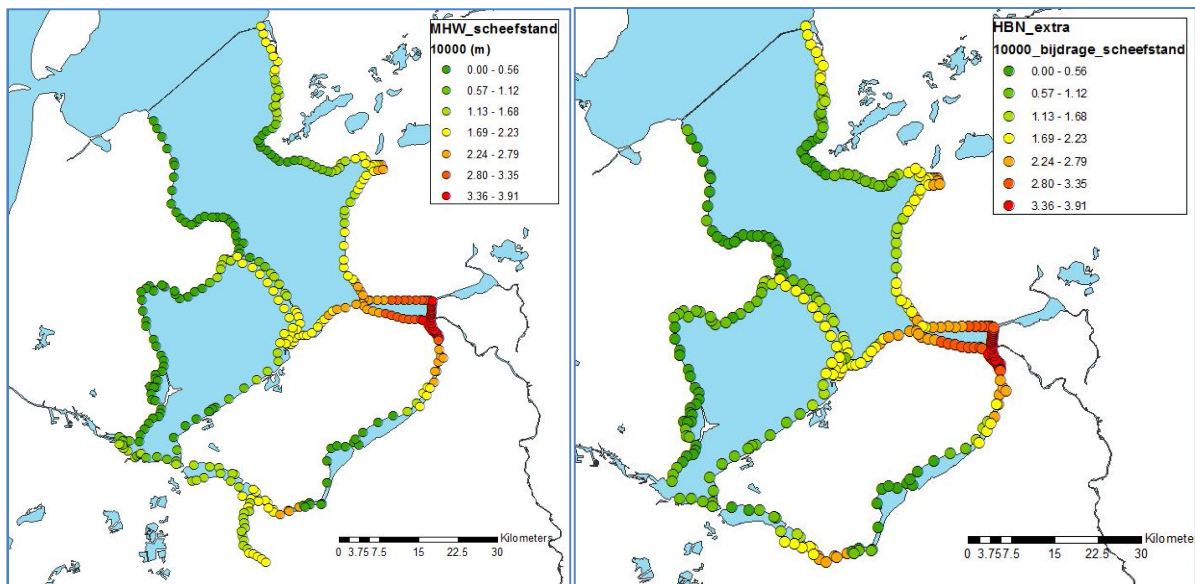


Figuur 2.15: Meerpeilen van de illustratiepunten van de MHW (links) en het HBN (rechts). Let op: de legenda-eenheden van de twee kaartjes verschillen enigszins. (Kramer, 2015).

Bijdrage opwaaiing

Figuur 2.16 laat het aandeel van opwaaiing in de MHW's (links) en de HBN's (rechts) zien. De kaarten zijn vrijwel identiek: de rol van opwaaiing is (in meters) ongeveer even groot in de MHW als in het HBN (procentueel is de rol groter in de MHW, zoals later bij de bespreking van voorbeeldlocaties aan de orde komt). De hoogste opwaaiing is te vinden in het oostelijke deel van het Ketelmeer. Bij noordwestenwind is er een grote strijklengte van de wind over het water, terwijl het water daar bovendien sterk versmalt. De opwaaiing is verder sterk in alle "hoeken en baaien" van de meren met een expositie op het noordwesten tot zuidwesten (Afsluitdijk bij Kornwerderzand, Lemmer, zuidpunt IJsselmeer bij Lelystad), de zuidzijde van de Houtribdijk en tegen de (zuid)westzijde van de sluizen die de randmeren begrenzen (Nijkerk en Roggeboezem).

Bij vergelijking van de figuren 2.16 en 2.15 valt op dat waar de bijdrage van het meerpeil in het illustratiepunt hoog is, die van opwaaiing laag is. Het is dus waarschijnlijker dat óf de wind óf het meerpeil extreem hoog is dan dat ze dat beide tegelijk zijn. De illustratiepunten zijn immers de belastingscombinaties met de hoogste kans van voorkomen bij een bepaald belastingsniveau.

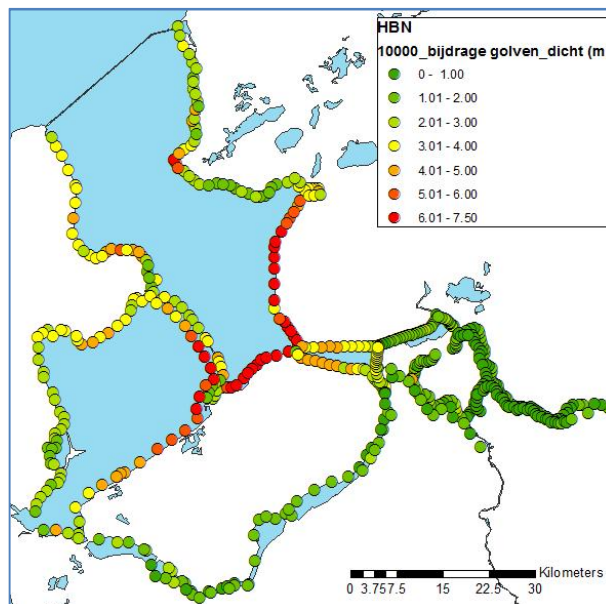


Figuur 2.16: Bijdrage (in meters) van scheefstand in de illustratiepunten van de MHW (links) en het HBN (rechts). (Kramer, 2015).

Bijdrage golfloop

Figuur 2.17 laat de bijdrage van golfloop zien in het HBN. Zoals eerder gezegd is dit de theoretische golfloop, bij een dijprofiel van 1:3. De golfloop kan in de praktijk kleiner zijn doordat een dijk een flauwer talud heeft, een bestorting met breuksteen of doordat er voorlanden voor de ijk liggen.

De golfloop in de illustratiepunten varieert van 0 tot meer dan 7 meter. Hij is het grootst langs de westkust van de Noordoostpolder, de IJsselmeerkust ten noorden van Lelystad en de oostelijke hoek van het Markermeer (bij Lelystad). Daarnaast speelt de golfloop bij de landpunt waarop Stavoren ligt een grote rol. Het gaat allemaal om locaties aan groot open water, met een expositie op het zuidwesten tot noordwesten.



Figuur 2.17: Bijdrage van golfloop (in meters) in de illustratiepunten van het HBN (berekend bij een standaard dijprofiel van 1:3). (Kramer, 2015).

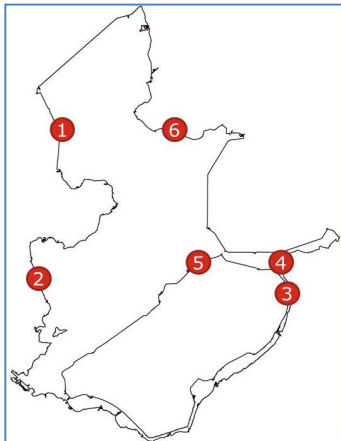
Voorbeeldlocaties

Voor een aantal karakteristieke voorbeeldlocaties zijn de illustratiepunten meer gedetailleerd gepresenteerd in de tabellen 2.2 en 2.3. De ligging van de voorbeeldlocaties is weergegeven in Figuur 2. 18. Het zijn:

5. De dijk van de Wieringermeer: een luwe (westelijke) oever van het IJsselmeer.
6. De Markermeerdijk bij Edam: een luwe (westelijke) oever van het Markermeer.
7. Roggebotsluis: de dijk naast de sluis aan het einde van de Veluwerandmeren: een locatie met veel opwaaiing¹.
8. De dijk aan het oostelijke eind van het Ketelmeer: een locatie met veel opwaaiing.

¹ Opvallend is dat er hier geen sprake is van golfloop (waardoor HBN en MHW gelijk zijn). Dit komt omdat er bij zuidwesten wind sterk opwaaiing is in de richting van de Roggebotsluis. Deze wind is voor de dijk van Flevoland echter aflandig en daardoor is er geen sprake van golfbelasting. De bijzondere situatie dat de sterkste dijkbelasting optreedt bij aflandige wind komt slechts op enkele plaatsen binnen de meren voor.

9. De IJsselmeerdijk ten noorden van Lelystad: een locatie met veel golfbelasting.
10. De dijk bij Rijs, aan de zuidwestkust van Friesland, die in veel opzichten een middenpositie inneemt.



Figuur 2.18: Ligging van de voorbeeldlocaties waarvan de rekenresultaten zijn samengevat in Tabel 2.2 en 2.3.

Tabel 2.2 geeft voor de voorbeeldlocaties het meerpeil, de windcondities, de scheefstand en de golfoploop van de illustratiepunten van HBN en MHW. In Tabel 2.3 zijn de meerpeilen, scheefstand en golfoploop omgerekend naar een percentage van het niveau van de MHW's/HBN's boven het winterstreefpeil van de meren. Zo is in locatie 1 bijvoorbeeld het HBN 4,12 m +NAP. Dit is 4,52 meter boven het winterstreefpeil van -40 cm NAP. Het meerpeil ligt 0,41 m boven het streefpeil en draagt daarmee $0,41/4,52=9\%$ bij. De bijdrage van scheefstand en golfoploop is resp. 10% ($0,47/4,52$) en $(3,64/4,52)$ 81% . Het totale effect van de wind is 91% : de som van de bijdrage van scheefstand en golfoploop.

Uit Tabel 2.2 en 2.3 blijkt dat de bijdrage van meerpeil, scheefstand en golfoploop sterk verschillen tussen locaties. De MHW wordt op de luwe locaties (1 en 2) grotendeels bepaald door hoge meerpeilen. Er is sprake van een vrij krachtige wind, maar die draagt weinig bij aan de MHW. In het HBN speelt op deze locaties de wind een grotere rol. Er is sprake van een combinatie van vrij hoge meerpeilen en stormachtige wind. De gecombineerde bijdrage van opwaaiing en golfoploop is 80 tot 90%. De luwe locaties worden vaak meerpeilgedomineerd genoemd. Voor wat betreft de MHW (en daarmee de dijkstabiliteit) is dat terecht, voor het HBN (waaraan de dijkhoogte gerelateerd is) ligt het iets genuanceerder.

Op de overige voorbeeldlocaties hoort een wind met orkaankracht bij de maatgevende omstandigheden, zowel voor de MHW als voor het HBN. In de meeste gevallen is er geen sprake van sterk verhoogde meerpeilen: alleen de locatie in Friesland neemt wat dat betreft een tussenpositie in. De locaties 3, 4 en 5 kunnen daarom met recht windgedomineerd worden genoemd. Daarbij bestaat er echter wel een groot verschil tussen windgedomineerde locaties waarin de golfoploop domineert (5-Lelystad) en windgedomineerde locaties waarin de opwaaiing domineert (3-Roggebotsluis en 4-Ketelmeer). De rol van de opwaaiing wordt bepaald door de locatie, die van golfoploop door de oriëntatie van de dijk op de windrichting.

Tabel 2.2: Berekende HBN's en MHW's bij een overschrijdingskans van 1:10.000 en de bijdragen van meerpeil, wind en scheefstand daarin bij de belastingscombinatie met de grootste kans van voorkomen.

	HBN/MHW (m NAP)	Meerpeil (m NAP)	Wind (m/s)*, wind richting	Scheef- stand (m)	Golf- oploop (m)
HBN					
1-Wieringermeer	4,12	0,01	22, ONO	0,47	3,64
2-Markermeer NH	2,83	0,21	17, NO	0,15	2,47
3-Dijk bij Roggebotsluis	2,62	-0,19	34, ZW	2,81	0
4-Ketelmeer	6,57	-0,22	36, NW	3,45	3,34
5-Lelystad Noord	9,12	-0,21	33, NW	2,26	7,07
6-ZW Friesland	3,05	0,13	36, WZW	0,86	2,06
MHW					
1-Wieringermeer	1,12	1,04	9, ONO	0,08	n.v.t.
2-Markermeer NH	0,68	0,61	8, ONO	0,07	n.v.t.
3-Roggebotsluis	2,62	-0,19	34, ZW	2,81	n.v.t.
4-Ketelmeer	3,23	-0,19	36, NW	3,42	n.v.t.
5-Lelystad Noord	2,10	-0,16	34, NW	2,26	n.v.t.
6-ZW Friesland	1,16	0,09	36, WZW	1,07	n.v.t.

* 8-11 m/sec=vrij krachtige wind, 17-21 m/sec=stormachtige wind, >33 m/sec=orkaan.

Tabel 2.3: De waarden voor meerpeil, scheefstand en golfoploop uit Tabel 2.2 omgerekend naar een percentage van de hoogte van het HBN en MHW boven streefpeil (zie toelichting in de tekst).

	HBN/MHW in m boven streefpeil	Meerpeil	Windeffecten		
			Scheef- stand	Golfoploop	Totaal Wind- effect
HBN					
1-Wieringermeer	4,52	9%	10%	81%	91%
2-Markermeer NH	3,23	9%	5%	76%	81%
3-Dijk bij Roggebotsluis	2,92	4%	96%	0%	96%
4-Ketelmeer	6,97	3%	49%	48%	97%
5-Lelystad Noord	9,52	2%	24%	74%	98%
6-ZW Friesland	3,45	15%	25%	60%	85%
MHW					
1-Wieringermeer	1,52	95%	5%	n.v.t.	5%
2-Markermeer NH	1,08	94%	6%	n.v.t.	6%
3-Roggebotsluis	2,92	4%	96%	n.v.t.	96%
4-Ketelmeer	3,63	6%	94%	n.v.t.	94%
5-Lelystad Noord	2,50	10%	90%	n.v.t.	90%
6-ZW Friesland	1,56	31%	69%	n.v.t.	69%

IJssel-Vechtdelta

De IJssel-Vechtdelta omvat het Zwarte Meer en de benedenlopen van de IJssel en de Overijsselse Vecht. In paragraaf 2.1 is al beschreven dat het gebied vanuit het gezichtspunt van de waterveiligheid een overgangsgebied is tussen de riviersystemen en de meren van het IJsselmeergebied. Stroomopwaarts neemt de invloed van stormopzet op de waterstanden af en die van de rivierafvoer toe.

Het Zwarte meer, Zwarte Water en de benedenloop van de Vecht verkeren daarbij in een bijzondere situatie. Tussen het Ketelmeer en het Zwarte meer ligt namelijk de Ramspolkering (balgstuw). Deze kering beschermt het Zwarte Meer en de benedenloop van de Vecht tegen stormopzet vanuit het IJsselmeer/Ketelmeer. De kering sluit als de waterstand op het Ketelmeer boven de 0,5 m +NAP komt en het water bij de kering in oostelijke richting stroomt. Dit gebeurt in situaties met harde noordwestenwind. De kering opent weer wanneer de waterstand aan de buitenzijde lager wordt dan de waterstand aan de binnenzijde.

Wanneer de Ramspolkering geopend is, is het Zwarte meer windgedomineerd. De scheefstand die in het Ketelmeer optreedt, werkt verder door in het Zwarte meer. Bij gesloten kering valt dit effect weg. Het meerpeil neemt dan toe door de afvoer van de Vecht en van regenwater uit de omgeving. Deze factoren zijn dan dominant voor de waterstanden die kunnen voorkomen. Bij langdurige storm uit het noordwesten en/of bij grote wateraanvoer kan er makkelijk een probleem ontstaan. De buitenpolders langs het Zwarte Meer en Zwarte Water (waaronder Kampereiland) lopen dan de kans te overstromen. Deze gebieden zijn bekaad, maar liggen formeel buitendijks. Ze functioneren in extreme gevallen als extra komberging voor het Zwarte Meer en Zwarte Water. Als ze overstromen wordt daarmee een te hoge belasting van de primaire keringen langs het gebied voorkomen.

3 Meerpeilen onder invloed van klimaat, inrichting en beheer

Dit hoofdstuk brengt in beeld wat de gevolgen van klimaatverandering en van mogelijke maatregelen zijn voor de meerpeilen in IJsselmeer en Markermeer. De gevolgen zijn doorgerekend met het model DEZY, dat staat voor **D**agelijkse en **E**xtrême waarden voor het **Z**uyder Zee gebied. DEZY is in opdracht van RWS-WVL door bureau HKV ontwikkeld. Met het model kunnen snel de effecten van zaken als zeespiegelstijging, spuicapaciteit, pompcapaciteit, etc. worden doorgerekend op de meerpeilen van het IJsselmeer en het Markermeer (Geerse & Kuijper, 2015a). Het model berekent het gemiddelde winterpeil en de kans dat bepaalde pieken optreden. Die kans wordt weergegeven met een frequentielijn. Deze frequentielijn geeft aan wat de kans is dat het waterpeil gelijk aan of hoger dan een bepaalde waarde is. Waar pompen worden ingezet bepaalt DEZY ook de gemiddelde pompduur per winterseizoen. Het model is beschreven in Bijlage C.

In dit hoofdstuk worden eerst de effecten van klimaatverandering op de meerpeilen beschreven. Vervolgens komen de verschillende mogelijkheden om deze meerpeilen te beïnvloeden aan de orde, zoals die weergegeven zijn in Figuur 2.13: vergroten afvoercapaciteit, aanpassing wateraanvoer en vergroten buffercapaciteit. Tot slot wordt nog specifiek ingegaan op de invloed die het maken van een grote opening in de Houtribdijk zou hebben op de meerpeilen.

3.1 Effecten van klimaatverandering

Voor deze studies zijn uit de KNMI-klimaatscenario's rekenaarsscenario's afgeleid (zie Bijlage D). Ze zijn weergegeven in Tabel 3.1. Zoals in Bijlage D is besproken zijn deze scenario's een hulpmiddel voor de analyse van klimaateffecten, maar geen voorspelling van de meest waarschijnlijke klimaatontwikkeling. De analyseresultaten moeten daarom niet zozeer worden gekoppeld aan de jaartallen in de scenario's, maar aan de klimaatveranderingen die voor deze jaartallen zijn aangenomen.

Tabel 3.1: Scenario's ten behoeve van berekening van klimaateffecten in de eerste fase van ISWP. Veranderingen zijn t.o.v. het referentiejaar 1990¹.

	Zichtjaar		
	2050	2100	2150
Zeespiegel	+20 cm (+10 cm t.o.v. 2015)	+70 cm (+60 cm t.o.v. 2015)	+140 cm (+130 cm t.o.v. 2015)
Winterneerslag	+10%	+15%	+20%
IJsselafvoer*	+6,25%	+12,5%	+20%

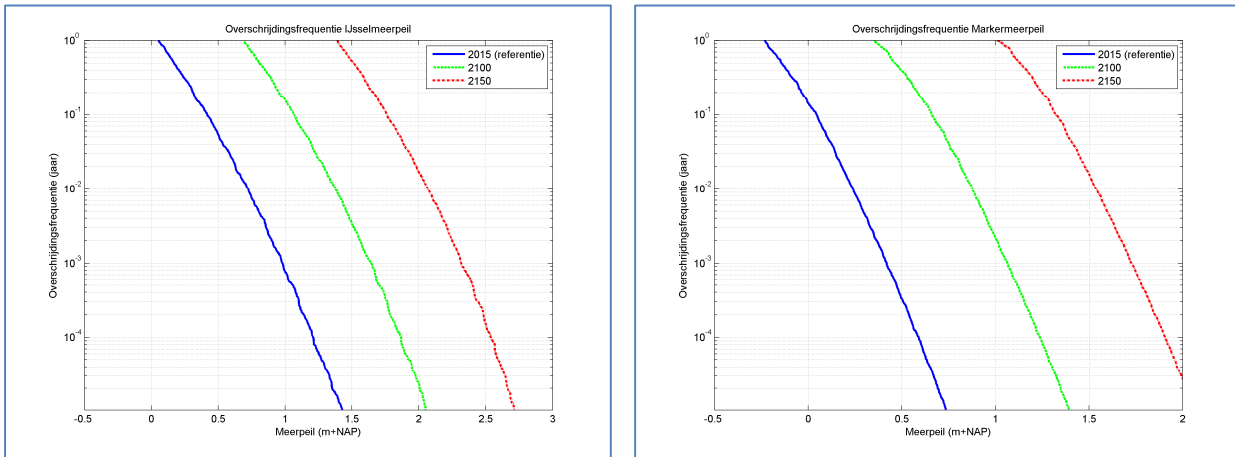
* In alle gevallen wordt de IJsselafvoer afgetoet op 3130 m³/sec bij Olst, de afvoer die correspondeert met 18.000 m³/sec Rijnaafvoer bij Lobith.

Met het model DEZY zijn de klimaatscenario's voor de zichtjaren 2100 en 2150 doorgerekend (Geerse en Kuijper, 2015b). Daarbij is uitgegaan van de huidige spuicapaciteit, zonder pompen op Afsluitdijk of Houtribdijk. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.1. De stijging is voor de verschillende overschrijdingsfrequenties vrijwel gelijk: de lijnen lopen ongeveer parallel. Ook is de stijging voor IJsselmeer

¹ In de berekeningen wordt als referentiejaar 2015 gehanteerd. Daarbij wordt er vanuit gegaan dat in de periode 1990-2015 de zeespiegel 10 cm gestegen is, maar dat neerslag en IJsselafvoer niet veranderd zijn.

en Markermeer vrijwel gelijk. De stijging is ca. 65 cm in 2100 en 135 cm in 2150. De gemiddelde meerpeilen nemen minder sterk toe.

Gem. winterpeil	referentie	2100	2150
IJsselmeer	-0,26	0,30	0,98
Markermeer	-0,36	0,13	0,77



Figuur 3.1 Effect van klimaatverandering in de zichtjaren 2100 en 2150 op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer. (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

Er zijn ook berekeningen gemaakt om na te gaan wat de afzonderlijke bijdragen zijn van zeespiegelstijging, toename van de neerslag en toename van de IJsselafvoer. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3.2, de grafieken voor de IJsselafvoer zijn te vinden in figuur 3.8. In Tabel 3.2 zijn de effecten op het gemiddelde meerpeil en op één punt uit de frequentielijn opgenomen (1:10.000). Uit de tabel blijkt dat het grootste deel van het klimateffect op de meerpeilen wordt veroorzaakt door de zeespiegelstijging. Door de zeer forse stijging van de zeespiegelstijging in het scenario voor 2150 is die dominantie in dat jaar nog sterker dan in 2100.

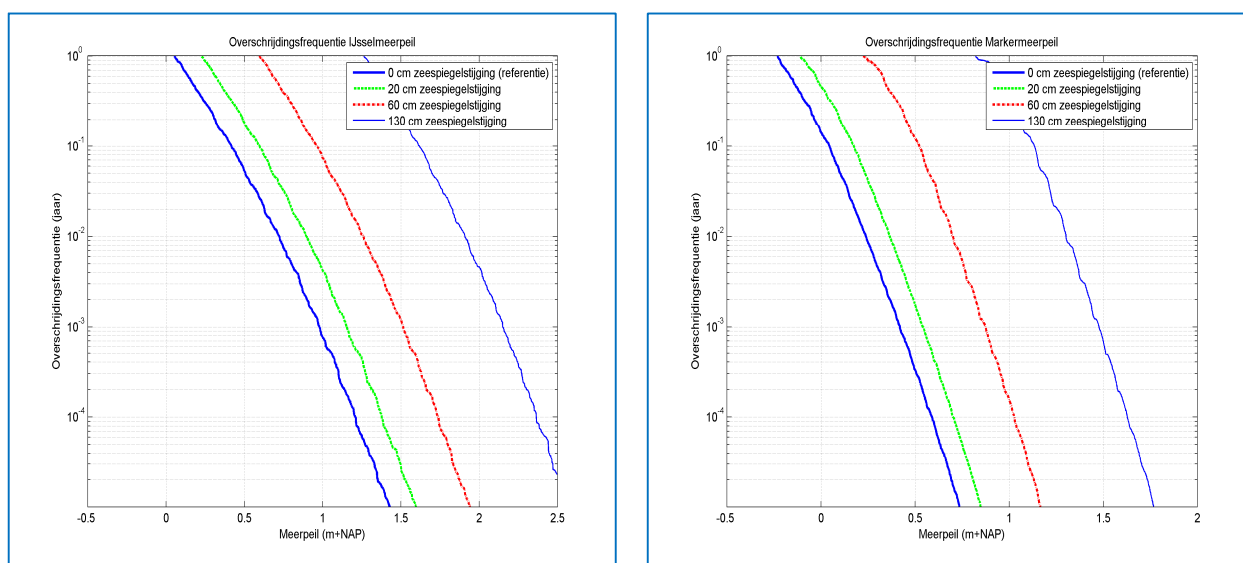
Tabel 3.2: Aandeel van zeespiegelstijging, toename van de neerslag en toename van de IJsselafvoer in de effecten van klimaatverandering op de meerpeilen (gemiddelde meerpeil en meerpeil met een overschrijdingsfrequentie van 1:10.000).

		2100				2150			
		totaal	ZSS	IJssel	Neerslag	totaal	ZSS	IJssel	Neerslag
IJM	Gem.	56cm	89%	5%	2%	124	93%	3%	2%
	T10000	66cm	80%	14%	9%	134	87%	9%	6%
MM	Gem.	49cm	84%	2%	2%	113	89%	2%	2%
	T10000	65cm	69%	2%	20%	131	81%	2%	13%

(n.b. de percentages tellen niet op tot 100, omdat de getallen uit afzonderlijke berekeningen komen waardoor combinatie-effecten ontbreken)

Figuur 3.2 geeft weer in welke mate de zeespiegelstijging doorwerkt in de frequentielijnen van het IJsselmeer en Markermeer. De zeespiegelstijging werkt in het IJ-

selmeer voor ca. 90% door (de lijn schuift op met 90% van de zeespiegelstijging). De doorwerking op het Markermeer is bij beperkte zeespiegelstijging wat minder, maar ligt bij 130 cm stijging ook rond de 90%. Tabel 3.3 laat zien wat het effect is op de gemiddelde meerpeilen. Bij kleine zeespiegelstijging is de doorwerking nog beperkt, bij sterke zeespiegelstijging neemt de doorwerking toe tot bijna 90% voor het IJsselmeer en 80% voor het Markermeer. Bij beperkte zeespiegelstijging is er dus verschil tussen de reactie van het gemiddelde meerpeil en de pieken in de meerpeilen.



Figuur 3.2: Effect van zeespiegelstijging op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer. (Geerse en Kuijper, 2015b). De zeespiegelstijging is aangegeven t.o.v. het referentiejaar 2015.

Tabel 3.3: Toename van de gemiddelde meerpeilen van IJsselmeer en Markemeer onder invloed van zeespiegelstijging (ZSS). De zeespiegelstijging is aangegeven t.o.v. het referentiejaar 2015.

	30 cm ZSS			60 cm ZSS			130 cm ZSS		
	M NAP	cm	% van ZSS	M NAP	cm	% van ZSS	M NAP	cm	% van ZSS
IJM	-0,12	14	47%	0,24	50	83%	0,89	115	88%
MM	-0,27	9	30%	0,05	41	68%	0,65	101	78%

Er is een controleberekening uitgevoerd om na te gaan wat het effect van aftoppen van de IJsselafvoer is. In de gekozen klimaatscenario's wordt de IJsselafvoer namelijk afgetopt op 3130 m³/sec¹, terwijl in de referentie geen aftopping plaatsvindt.

¹ Er wordt in de klimaatscenario's vanuit gegaan dat de Rijnafvoer nooit boven de 18.000 m³/sec kan komen, omdat overstromingen in Duitsland een limiet stellen aan de afvoer. Een Rijnafvoer van 18.000 m³/sec komt overeen met 3130 m³/sec IJsselafvoer. In de huidige systematiek wordt met deze fysieke beperking van de afvoer geen rekening gehouden.

Aftoppen van de afvoer in de referentiesituatie blijkt de frequentielijn van het IJsselmeer niet te beïnvloeden (zie Figuur 3.8).

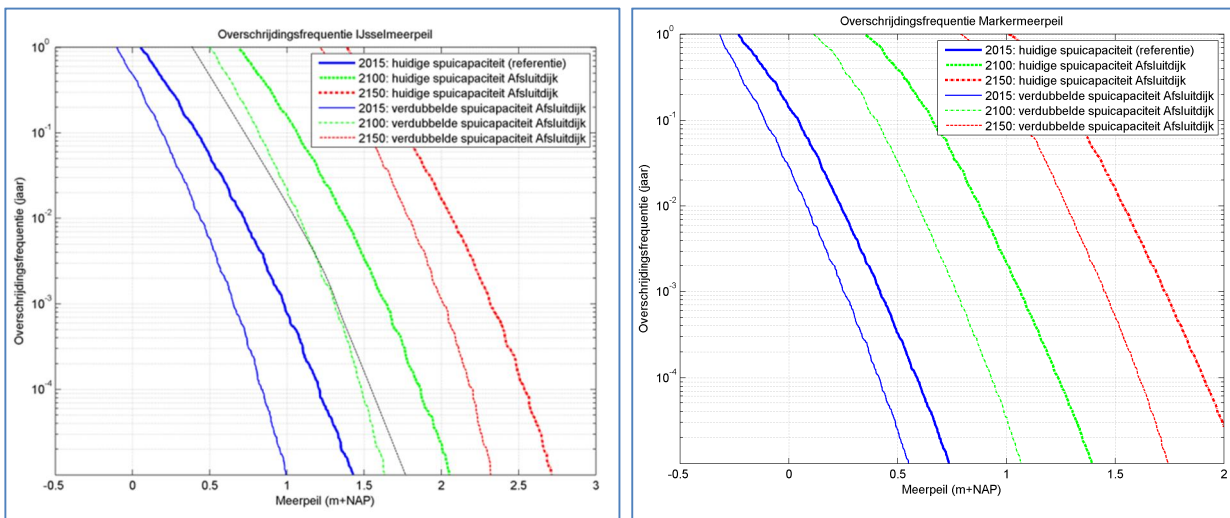
3.2 Effecten van vergroting waterafvoer

In deze paragraaf komen achtereenvolgens het vergroten van de spuicapaciteit, het aanleggen van pompcapaciteit en een combinatie van beide aan de orde.

3.2.1 Vergroting spuicapaciteit

Er zijn berekeningen uitgevoerd met verdubbeling van de bestaande spuicapaciteit op de Afsluitdijk, voor de jaren 2015, 2100 en 2150 (Geerse en Kuijper, 2015b). Figuur 3.3 geeft de resultaten weer. Verdubbeling van de spuicapaciteit leidt in alle jaren tot verlagingen van de meerpeilen over de hele linie. De verlaging is het grootst bij de hogere meerpeilen. Dit weerspiegelt het gegeven dat de capaciteit van spuinmiddelen toeneemt bij hogere meerpeilen. De gemiddelde meerpeilen worden wat minder sterk verlaagd dan niveaus van de pieken zoals die in de frequentielijn worden weergegeven. Het peilverlagend effect werkt door in het Markermeer.

Gem. winterpeil	Huidige spuicapaciteit			Dubbele spuicapaciteit		
	referentie	2100	2150	2015	2100	2150
IJsselmeer	-0,26	0,30	0,98	-0,36	0,08	0,77
Markermeer	-0,36	0,13	0,77	-0,39	-0,10	0,56



Figuur 3.3 Effect van verdubbeling van de spuicapaciteit op de Afsluitdijk in 2015, 2100 en 2150 op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer. De dunne zwarte stippellijn geeft de met 30 cm verhoogde referentie (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

De verdubbeling van de spuicapaciteit is niet voldoende om in het gekozen scenario voor 2100 (met 60 cm zeespiegelstijging t.o.v. 2015) de klimaateffecten te compenseren: in Figuur 3.3 ligt de lijn van 2100 met dubbele spuicapaciteit rechts van de lijn voor 2015 met enkele spuicapaciteit.

Voor na 2050 wordt een verhoging van het IJsselmeerpeil met maximaal 30 cm tot 2100 niet uitgesloten. In Figuur 3.3 is voor het IJsselmeer met een zwarte stippellijn

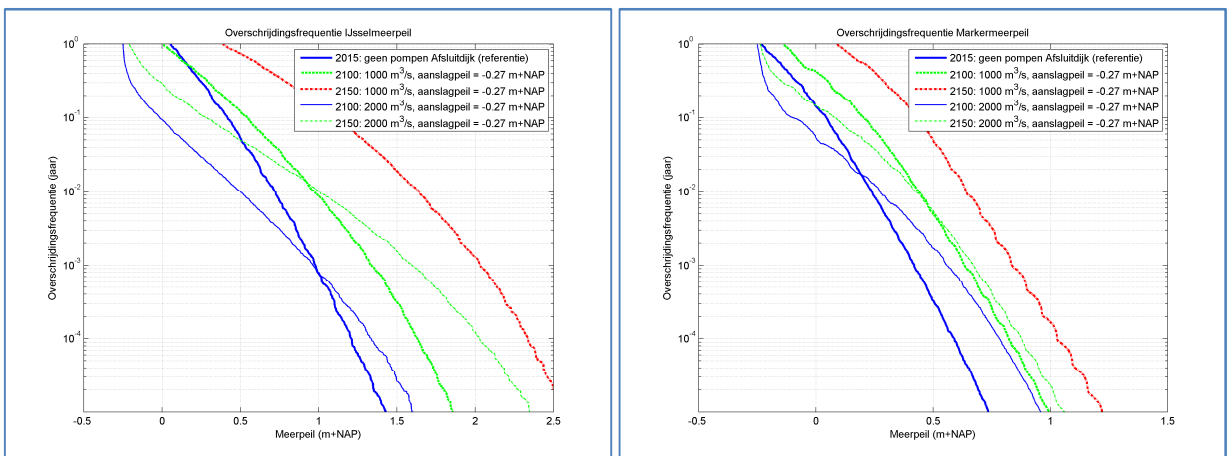
de 30 cm verhoogde referentiesituatie weergegeven. Deze lijn valt ongeveer samen met de lijn van 2100 met verdubbelde spuicapaciteit. Dit laat zien dat bij een verhoogd meerpeil met verdubbeling van de spuicapaciteit tot ongeveer 2100 (in het aangenomen klimaatscenario) voldoende afvoercapaciteit beschikbaar is.

Er zijn ook berekeningen uitgevoerd met aanpassing van de spuicapaciteit in de Houtribdijk (alleen voor de situatie 2015). Zowel verdubbeling als halvering van de spuicapaciteit heeft geen noemenswaardige invloed op de meerpeilen. Dit toont aan dat de afvoer van het Markermeer niet wordt beperkt door de capaciteit van de spuisluizen, maar door de tijd dat er gespuid kan worden.

3.2.2 Pompen

Er zijn berekeningen uitgevoerd met pompen op de Afsluitdijk, in aanvulling op de bestaande spuicapaciteit (Geerse en Kuijper, 2015b). In Figuur 3.4 zijn de resultaten weergegeven voor pompcapaciteiten van resp. 1000 en 2000 m³/sec voor de jaren 2100 en 2150. Er is uitgegaan van een aanslagpeil van -0,27 cm (ongeveer het huidige gemiddelde meerpeil). De pompen slaan daarbij alleen aan op momenten dat er niet gespuid kan worden.

Gem. winterpeil	referentie	2100/1000m ³	2100/2000m ³	2150/1000m ³	2150/2000m ³
IJsselmeer	-0,26	-0,21	-0,27	-0,03	-0,25
Markermeer	-0,36	-0,30	-0,34	-0,17	-0,33



Figuur 3.4 Effect van pompcapaciteit op de Afsluitdijk (aanvullend op de bestaande spuicapaciteit) in 2100 en 2150 op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

Bij vergelijking met Figuur 3.1 is te zien dat met de pompen de meerpeilen sterk verlaagd kunnen worden. Het effect neemt enigszins af bij de lagere frequenties (hogere meerpeilen), omdat die gepaard gaan met hogere wateraanvoer (en de pompcapaciteit gelijk blijft). Het effect van pompen verschilt dus met dat van uitbreiding van de spuicapaciteit. De extra spui geeft immers juist een sterker effect bij hogere meerpeilen.

Een pompcapaciteit van 2000 m³/sec is voldoende om het gemiddelde meerpeil in het aangenomen klimaatscenario voor 2100 gelijk te houden en om over het groot-

ste deel van de frequentielijn de meerpeilen onder de huidige meerpeilen te houden. Slechts in heel extreme situaties (overschrijdingsfrequentie kleiner dan 1:1000) komen de peilen van het IJsselmeer iets hoger te liggen. (Voor het Markermeer is dat al vanaf 1:100. Dit komt vermoedelijk doordat het gekozen aanslagpeil ongeveer het gemiddelde winterpeil van het IJsselmeer is, maar 9 cm boven het gemiddelde winterpeil van het Markermeer). In 2150 kan het gemiddelde meerpeil hiermee ook nog gehandhaafd blijven, maar worden vanaf een frequentie van minder dan 1:100 de meerpeilen flink hoger. Een pompcapaciteit van 1000 m³/sec is in 2100 al onvoldoende voor het handhaven van de huidige situatie. De figuur laat zien dat de effecten doorwerken in het Markermeer.

Naarmate het aandeel van pompen in de afvoer toeneemt verandert dus het model van de frequentielijn. Een systeem met pompen heeft andere karakteristieken dan een systeem met spuisluizen. Dit heeft uiteraard gevolgen voor de hydraulische belasting van de dijken (MHW en HBN) waarmee rekening moet worden gehouden (zie hoofdstuk 4).

Er is geanalyseerd in hoeverre het aanslagpeil van de pompen de meerpeilen beïnvloedt. Het aanslagpeil blijkt vooral door te werken in het hoogfrequente deel van de overschrijdingscurves (de lagere meerpeilen dus), maar nauwelijks op de extremere meerpeilen. Een lager aanslagpeil leidt tot een sterke vergroting van het aantal draaiuren van de pompen.

Er is verder gekeken naar wat er gebeurt als het mogelijk wordt gemaakt de pompen ook in te schakelen op momenten dat er gespuid kan worden (en het water wel boven het aanslagpeil staat). Het effect van pompen kan daarmee iets vergroot worden. Bij de extremere meerpeilen kan het leiden tot een verlaging van 10-20 cm ten opzichte van de situatie waarin er alleen gepompt wordt als spuien onmogelijk is. Bij de nu voorgenomen plaatsing van pompen worden deze uithijsbaar in een deel van de spuikokers geplaatst. De pompen worden alleen in de koker gebracht als er niet gespuid kan worden: gelijktijdig pompen en spuien wordt daarmee uitgesloten. Om op de langere termijn gelijktijdig pompen en spuien mogelijk te maken zou er een zelfstandig gemaal, los van de spuikokers, gebouwd moeten worden.

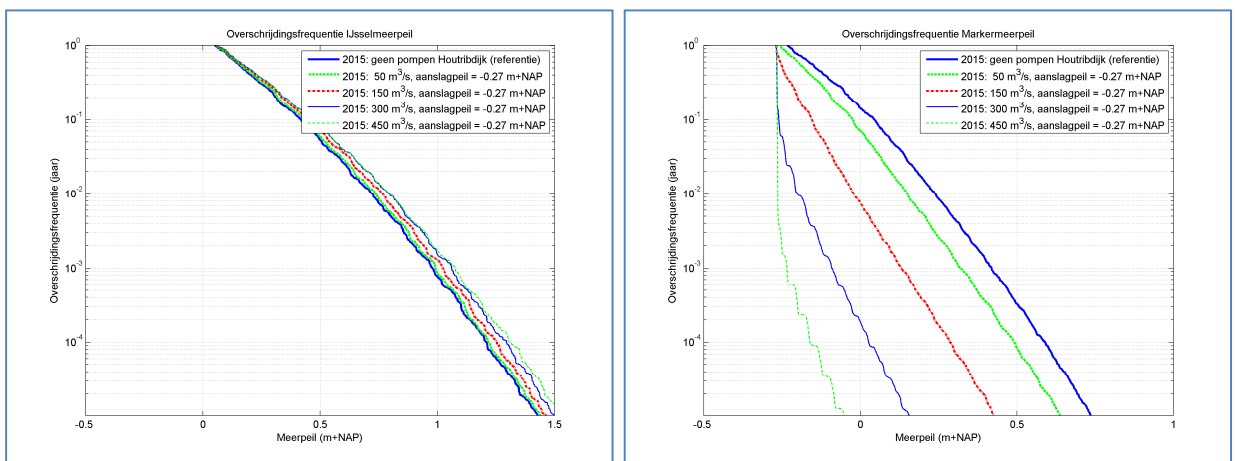
Ook voor pompen op de Houtribdijk, eveneens aanvullend op de bestaande spuicapaciteit, zijn berekeningen gemaakt. Figuur 3.5 laat de effecten zien van pompcapaciteiten variërend van 50 tot 150 m³/sec. Het blijkt heel goed mogelijk te zijn om met pompen de meerpeilen onder extreme omstandigheden te verlagen. Waar bij het IJsselmeer het verlagend effect van pompen afneemt bij hogere meerpeilen blijkt in het Markermeer het tegendeel het geval te zijn. Hierin komen de grote verschillen in de waterhuishouding van beide meren naar voren. Het IJsselmeer heeft bij pieken te maken met zeer grote aanvoer van water, waarbij tijdens een deel van de piek wel gespuid kan worden, maar de spuicapaciteit onvoldoende is. De pompcapaciteit is daar veel kleiner dan de spuicapaciteit (op de momenten dat er gespuid kan worden). Bij het Markermeer is in de eerste plaats de wateraanvoer tijdens pieken veel lager dan in het IJsselmeer. Daarnaast is tijdens pieken de spuicapaciteit niet beperkend, maar wordt de afvoer onmogelijk omdat er geheel niet gespuid kan worden. Het wegpompen van water is dan wel mogelijk.

De pompen op de Houtribdijk leiden tot een kleine verhoging van de peilen van het IJsselmeer, met name die van de hogere peilen. Het effect is heel beperkt, want de extra wateraanvoer vanuit het Markermeer is klein vergeleken met de wateraanvoer naar het IJsselmeer die er tijdens een piek al is. Om dit effect voor alle meerpeilen

volledig te kunnen compenseren zou op de Afsluitdijk extra pompcapaciteit moeten komen, gelijk aan die op de Houtribdijk.

Zolang het IJsselmeerpeil niet stijgt zouden pompen op de Houtribdijk alleen gebruikt kunnen worden om de pieken in de meerpeilen (en daarmee de hydraulische belasting van de dijken waarmee rekening moet worden gehouden) te beperken. Wanneer gekozen wordt voor peilstijging in het IJsselmeer worden pompen noodzakelijk om de zorgen dat het Markermeer niet meestijgt. De pompen zouden dan tevens gebruikt kunnen worden om de pieken in het Markermeer te beperken.

Gem. winterpeil	referentie	50m ³	150m ³	300m ³	450m ³
IJsselmeer	-0,26	-0,26	-0,26	-0,26	-0,26
Markermeer	-0,36	-0,36	-0,37	-0,37	-0,37



Figuur 3.5 Effect van pompcapaciteit op de Houtribdijk (aanvullend op de bestaande spuicapaciteit) op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

3.2.3

Vergroting spuicapaciteit in combinatie met pompen

Klimaatverandering leidt tot een verschuiving van de frequentielijn, waarbij de vorm van de lijn vrijwel gelijk blijft. Door vergroting van de spuicapaciteit of door het realiseren van pompcapaciteit kan deze verschuiving worden voorkomen. Daarbij valt op dat de lijn wel van vorm verandert. Bij extra spuicapaciteit wordt de lijn steiler, omdat het effect groter is bij hogere meerpeilen. Met pompen wordt de lijn juist vlakker, omdat bij hogere meerpeilen er wel veel wateraanvoer is, maar de pompcapaciteit niet toeneemt¹. Door deze verschillende karakteristieken van pompen en spuien is het interessant om ook naar de combinatie van beide te kijken.

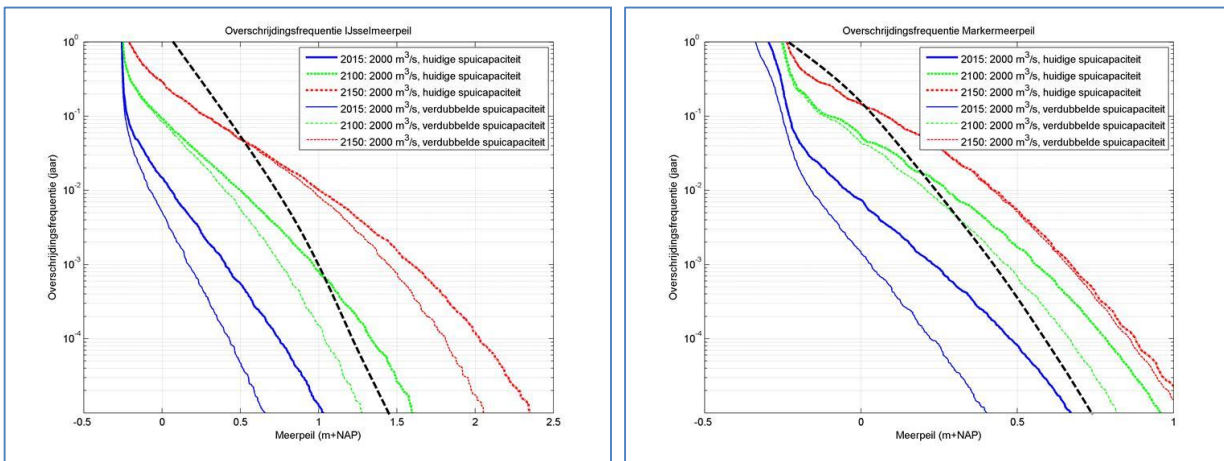
In Figuur 3.6 zijn de resultaten weergegeven van de combinatie van verdubbeling van de spuicapaciteit en 2000 m³/sec pompcapaciteit op de Afsluitdijk (Geerse en Kuijper, 2015b). Hierin is te zien hoe de extra spuicapaciteit de hogere meerpeilen verlaagt. Dit effect neemt geleidelijk af bij stijgende zeespiegel, omdat dan de spui mogelijkheden steeds minder worden. Zelfs bij een zeespiegelstijging van 130

¹ In een systeem met pompen en spuien neemt dit effect iets af wanneer het mogelijk is om gelijktijdig te pompen en te spuien.

cm t.o.v. 2015 (scenario voor 2150) blijkt de spui nog effect te hebben op de extreem hoge meerpeilen (overschrijdingsfrequentie < 1:1000).

In het aangenomen klimaatscenario voor 2100 kan door een combinatie van 2000 m³/sec pompcapaciteit en verdubbeling van de spuicapaciteit gezorgd worden dat de meerpeilen voor alle waarden van de frequentielijn onder de referentie liggen. In het scenario voor 2150 is dat voor de lagere frequenties (hoge peilen) niet meer het geval. Het verschil met de referentie (bij T=10.000) is 60 cm. Als gekozen zou worden voor een peilstijging van 30 cm (en dat dat betekent dat de hele frequentielijn van de referentie 30 cm wordt opgeschoven), dan nog zou in het scenario 2150 een combinatie van verdubbelde spui en 2000 m³/sec pompcapaciteit niet voldoende zijn om over het hele traject niet boven de referentielijn uit te komen.

Gem. winterpeil	referentie	2015 2000m ³ /1x	2015 2000m ³ /2x	2100 2000m ³ /1x	2100 2000m ³ /2x	2150 2000m ³ /1x	2150 2000m ³ /2x
IJsselmeer	-0,26	-0,34	-0,38	-0,27	-0,28	-0,25	-0,25
Markermeer	-0,36	-0,38	-0,40	-0,34	-0,35	-0,33	-0,33



Figuur 3.6 Effect van 2000 m³/sec pompcapaciteit op de Afsluitdijk, in combinatie met verdubbeling van de spuicapaciteit op de Afsluitdijk op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De zwarte onderbroken lijn geeft de referentiesituatie 2015 weer. De X-as van beide figuren verschilt.

3.3 Effecten van aanpassing wateraanvoer

De wateraanvoer naar het IJsselmeergebied tijdens pieken kan worden beïnvloed door aanpassingen van de waterafvoer uit de regio (tijdelijke berging, afvoer rechtstreeks naar zee) en door aanpassing van de IJsselafvoer. Voor dat laatste moet de verdeling van water over de Rijntakken worden aangepast.

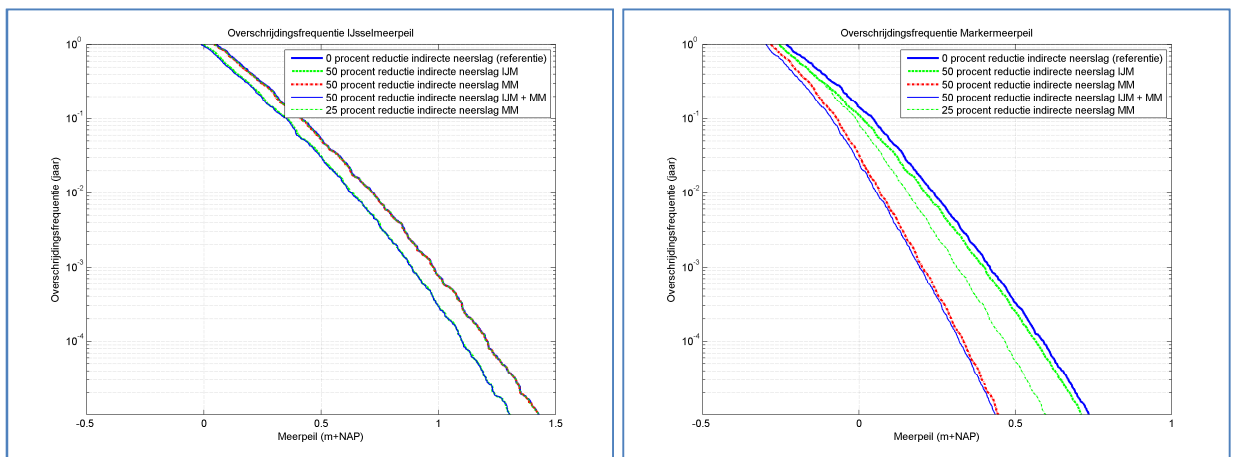
3.3.1 Beperking waterafvoer uit de regio

Het is denkbaar dat er maatregelen worden genomen waardoor de afvoer van overtollig water uit de gebieden rond de meren wordt beperkt of vertraagd. Beperking van de wateraanvoer vanuit de regio kan door het wateroverschot daar meer af te voeren in de richting van de Noordzee en de Waddenzee. Vertraging kan door tijdelijke berging in de regionale watersystemen. Als deze vertraging goed wordt geti-

med kan de waterafvoer tijdens een piek op de meren worden beperkt. Niet iedere vertraging werkt echter positief uit. In het tekstkader in paragraaf 2.1 is beschreven dat pieken in het IJsselmeerpeil vaak ontstaan wanneer na een periode met beperkte spuimogelijkheden en hoge regenval de IJsselafvoer sterk toeneemt. Een beperkte vertraging van de waterafvoer uit de regio zou er voor kunnen zorgen dat het water op de meren wordt gebracht op het moment dat de IJsselafvoer juist heel hoog is.

Het is moeilijk in te schatten wat in de praktijk de mogelijkheden zijn om de wateraanvoer vanuit de regio te beïnvloeden. Om zicht te krijgen op het nut van vertraging of beperking van de wateraanvoer uit de regio zijn berekeningen uitgevoerd (Geerse en Kuijper, 2015b). Hierbij is de afvoer van de neerslag uit de omgeving beperkt met 25% (Markermeer) of 50% (IJsselmeer en Markermeer). Daarbij zijn de afvoer van de Overijsselse Vecht en Eem niet beperkt. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.7.

Gem. winterpeil	referentie	-50% IJM	-50% MM	-50% IJM&MM	-25% MM
IJsselmeer	-0,26	-0,29	-0,27	-0,29	-0,27
Markermeer	-0,36	-0,37	-0,37	-0,38	-0,36



Figuur 3.7 Effect van beperking van de waterafvoer uit de omliggende regio op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

Bij het IJsselmeer leidt 50% reductie van de afvoer uit de omgeving tot een verschuiving van de frequentielijn van 6 tot 11 cm (de hoogste waarde hoort bij de hoogste meerpeilen). Ondanks de zeer grote reductie van de afvoer is het effect dus heel beperkt. Dit komt door de dominante rol van de afvoer van IJssel en Overijsselse Vecht in de watertoevoer naar het meer. Reductie van de afwatering op het Markermeer heeft geen enkele invloed op de peilen in het IJsselmeer. Dit is logisch, omdat tijdens pieken er geen water van het Markermeer naar het IJsselmeer kan worden gespuid. Reductie van de regionale aanvoer naar het IJsselmeer werkt nauwelijks door in het Markermeer.

Reductie van de aanvoer uit de regio heeft op het Markermeer een veel grotere invloed dan op het IJsselmeer. Het effect neemt sterk toe met de hoogte van het meerpeil. Bij een overschrijdingsfrequentie van 1:10.000 is het effect 12 cm bij

25% reductie en 25 cm bij 50% reductie. Het relatief grote effect op het Markermeer komt doordat de neerslag uit de regio hier een veel groter aandeel heeft in het totale wateraanbod.

Bij beide meren neemt het effect toe bij de lagere overschrijdingsfrequenties. Daarbij moet natuurlijk in het oog gehouden worden dat de doorgerekende reductie een theoretische optie is. Juist onder de extreme omstandigheden zal het beperken van de waterafvoer uit de regio minder realistisch zijn. De toename van het effect bij lagere overschrijdingsfrequenties heeft dus waarschijnlijk geen waarde voor de praktijk van het waterbeheer.

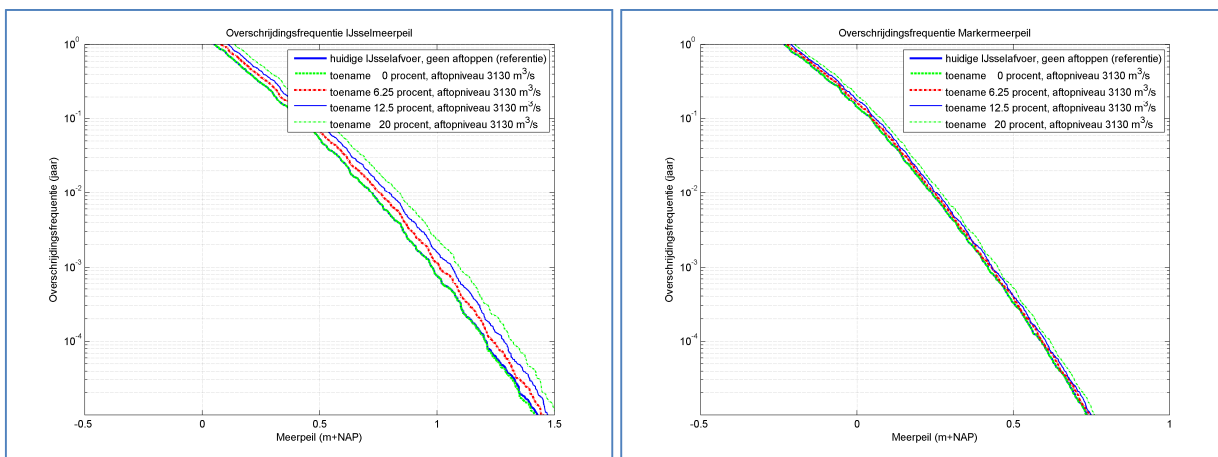
3.3.2 Verandering afvoer IJssel

In paragraaf 3.1 is een verhoging van de IJsselafvoer aan de orde geweest in het licht van de klimaatverandering. Hier komt de IJsselafvoer nog specifiek aan de orde, omdat de IJsselafvoer ook bewust kan worden aangepast. Dit zou kunnen gebeuren om de Lek te ontzien (hogere IJsselafvoer) of juist om het IJsselmeer te ontzien (lagere IJsselafvoer).

Er is een reeks doorgerekend waarin de IJsselafvoer (voor alle overschrijdingsfrequenties) is verhoogd met 6,25, 12,5 en 20%: de waarden die zijn gebruikt in de klimaatscenario's (Geerse en Kuijper, 2015b). De IJsselafvoer is daarbij begrensd op 3130 m³/sec. Daarnaast is een aangepaste afvoerverdeling over de Rijntakken doorgerekend, waarbij (om de Lek te ontzien) zoveel mogelijk water over de IJssel wordt geleid. Hoewel er geen varianten met een verlaagde afvoer zijn doorgerekend, kan op basis van de rekenresultaten toch ook wel iets worden gezegd over de mogelijkheden om meerpeilen te beperken door een andere IJsselafvoer.

Figuur 3.8 brengt de gevolgen van een integrale verhoging van de IJsselafvoer in beeld.

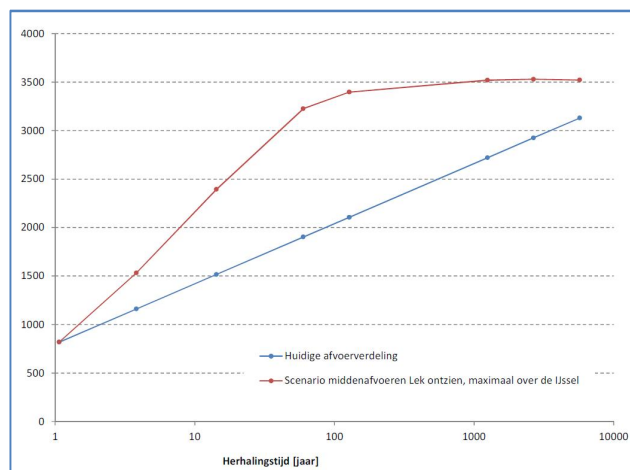
Gem. winterpeil	referentie	+6,25%	+12,5%	+20%
IJsselmeer	-0,26	-0,25	-0,24	-0,22
Markermeer	-0,36	-0,35	-0,35	-0,34



Figuur 3.8 Effect van verhoging van de IJsselafvoer op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

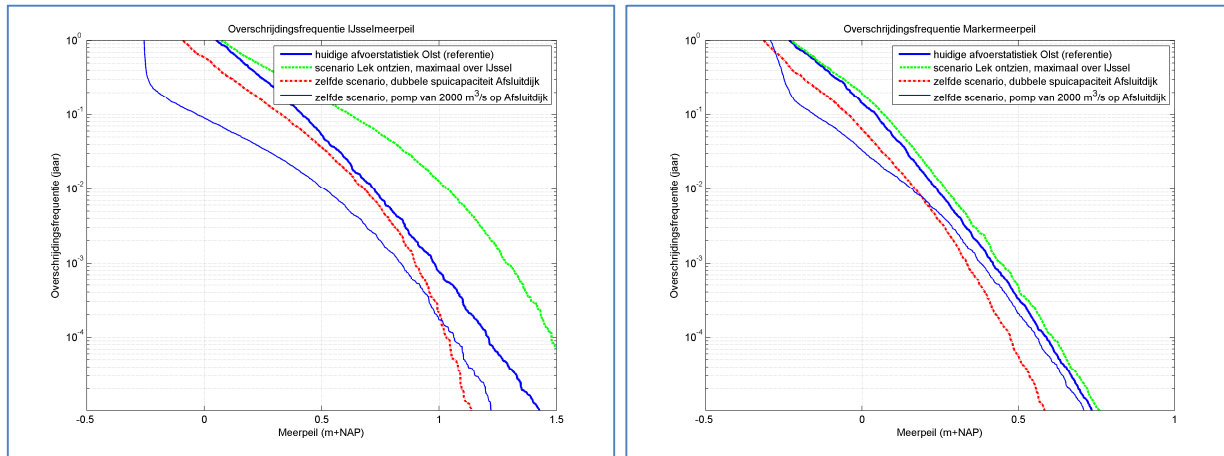
Verandering in de wateraanvoer van de IJssel werkt door in de meerpeilstatistiek van het IJsselmeer en (in beperktere mate) het Markermeer. Als de IJsselaanvoer 20% toeneemt, verschuift de frequentielijn met ongeveer 11 cm naar boven. Er kan worden aangenomen dat met een integrale *verlaging* van de IJsselaanvoer met 20% een verschuiving van de frequentielijn naar beneden zal plaatsvinden, in de zelfde orde van grootte. Wanneer alleen de pieken in de IJsselaanvoer worden beperkt zal het effect zich vermoedelijk beperken tot het laagfrequente deel van de frequentielijn (hoge meerpeilen).

Er is de afgelopen jaren verkend wat de mogelijkheden zijn om de veiligheidsopgave rond de Lek aan te pakken. Eén van de mogelijkheden daarbij is de afvoerverdeling van de Rijntakken zodanig te herzien, dat de Nederrijn/Lek wordt ontlast. Daarbij zal er dus meer water over de Waal en/of IJssel worden geleid. Ten Brinke (2013) geeft een overzicht van varianten die de afgelopen jaren in beeld zijn geweest. De variant waarin de IJssel het meest wordt belast ("Lek ontzien, maximaal over de IJssel") is doorgerekend voor het IJsselmeergebied. Figuur 3.9 geeft de aangepaste afvoerverdeling weer. De toename in de IJsselaanvoer is het grootste in het midden-deel van de frequentielijn (rond de 1:100). Figuur 3.10 laat zien wat de effecten zijn op de frequentielijnen van IJsselmeer en Markermeer. Het effect op de IJsselmeerpeilen is aanzienlijk; de peilen van het Markermeer worden nauwelijks beïnvloed. Het effect op de IJsselmeerpeilen blijkt het grootst te zijn in het middengebied, wat overeenkomt met het gebied waarin de afvoer van de IJssel het sterkste is aangepast. De figuur laat verder zien dat het effect kan worden gecompenseerd met extra spui- of pompcapaciteit. Een keuze om de Lek te ontzien door meer water over de IJssel te voeren heeft dus nadrukkelijk consequenties voor de benodigde afvoercapaciteit in het IJsselmeergebied.



Figuur 3.9 De afvoer van de IJssel in het scenario "Lek ontzien, maximaal over de IJssel" vergeleken met de huidige afvoer, zoals gebruikt in de referentie (Geerse en Kuijper, 2015b).

Gem. winterpeil	referentie	Lek ontzien
IJsselmeer	-0,26	-0,25
Markermeer	-0,36	-0,35



Figuur 3.10 Effect van aanpassing van de IJsselafvoer volgens het scenario "Lek ontzien, maximaal over de IJssel" op de peilen van het IJsselmeer en het Markermeer (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

3.4

Effecten van vergroting van de buffercapaciteit

De buffercapaciteit van het IJsselmeer kan worden vergroot door te zorgen dat het meerpeil laag is op het moment dat er een piek aankomt. Met de huidige afvoermogelijkheden van water bestaan hiervoor praktisch geen mogelijkheden. Met pompen wordt dat anders en zijn er op hoofdlijnen zijn er drie mogelijkheden:

1. Verlaag het streefpeil en het minimumpeil in de winterperiode (beide nu -40 cm NAP).
2. Kies de hele winter een aanslagpeil voor de pompen dat dicht in de buurt van het streefpeil ligt, waardoor dat beter kan worden gehandhaafd.
3. Verlaag het peil zo veel mogelijk, wanneer een piek verwacht wordt (vóór-pompen).

Het effect van deze drie varianten neemt af in de volgorde 1-3. De eerste optie vraagt de grootste inzet van de pompen (energiekosten). Om daadwerkelijke peilverlaging te kunnen realiseren zal ook meer pompcapaciteit geïnstalleerd moeten worden dan bij handhaven of zelfs stijging van het peil (investeringskosten). Een lager peil heeft verder negatieve consequenties voor de scheepvaart. Optie 1 is de duurste optie.

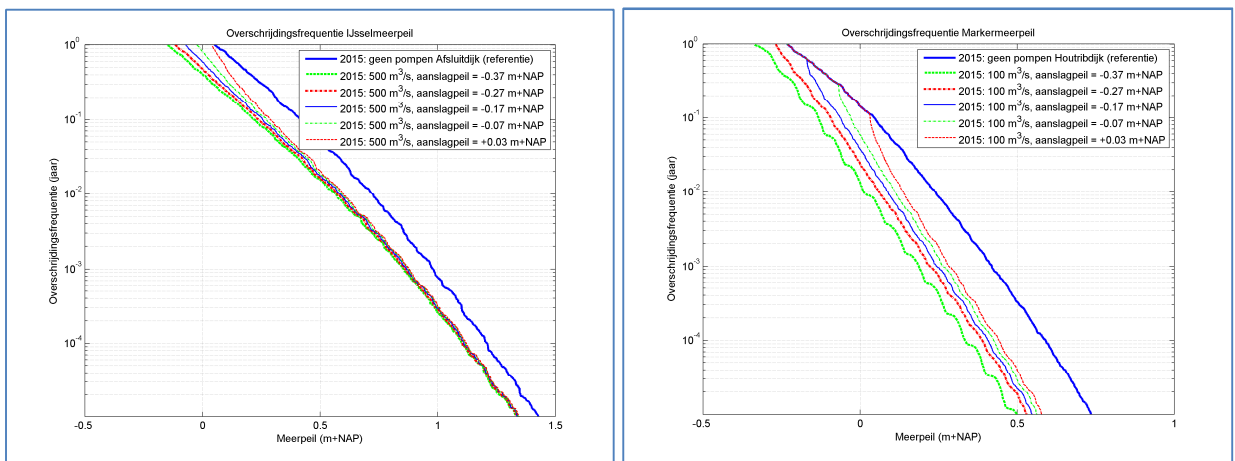
Het belangrijkste kenmerk van optie 3 is de mate van onzekerheid. Het voorspellen van een afvoerpiek is afhankelijk van weersvoorspellingen: windsterkte, windrichting en neerslag. Hierin is altijd een forse onzekerheid aanwezig. Deze onzekerheid wordt groter door de complexe interactie tussen windopzet, neerslag in het IJsselmeergebied en neerslag meer stroomopwaarts in het Rijnstroomgebied (zie tekstkader in paragraaf 2.1). Vervolgens is het de vraag hoeveel onbenutte pompcapaciteit er beschikbaar is op het moment dat een piek wordt voorspeld. Het is goed mogelijk dat de beschikbare capaciteit al grotendeels nodig is om het wateroverschot op dat moment af te voeren. Tot slot geldt dat de peilverlaging die in de korte voorspel-

lingsperiode kan worden gerealiseerd altijd beperkt zal zijn. Ter illustratie: om het peil van het Markermeer en IJsselmeer met een centimeter per dag te laten dalen is 226 m³/sec "vrije" pompcapaciteit nodig (pompcapaciteit die op dat moment niet nodig is om het peil te handhaven).

Er is uiteindelijk gekozen voor het maken van berekeningen voor optie 2: de waarschijnlijk meest realistische variant van de drie. Het effect van vóórpompen (optie 3) zal namelijk altijd minder zijn dan dat van het verlagen van het aanslagpeil en biedt minder zekerheid. In Figuur 3.12 wordt links het effect van het aanslagpeil van pompen met een capaciteit van 500 m³/sec op de Afsluitdijk weergegeven. In de figuur blijkt dat er effect is bij lage meerpeilen (hoge frequenties) en ook op het gemiddelde meerpeil. Bij lagere frequenties verdwijnt het effect snel. In een berekening met 2000 m³/sec was het patroon gelijk, maar blijft er bij de hogere meerpeilen wat meer effect over. De gekozen pompcapaciteit van 100 m³/sec op de Houtribdijk is, in verhouding tot de wateraanvoer daar, veel groter dan de 500 m³/sec op de Afsluitdijk. Bovendien geldt voor het Markermeer dat er tijdens pieken niet gespuid kan worden (terwijl dat op het IJsselmeer vaak wel het geval is). Het gevolg is dat er meer effect van het aanslagpeil zichtbaar blijft bij de lagere frequenties (hogere meerpeilen). Om een effect te hebben over de hele frequentielijn moet de pompcapaciteit voldoende groot zijn in relatie tot de wateraanvoer tijdens pieken.

Naarmate de zeespiegel stijgt, wordt de waterafvoer van het IJsselmeer meer afhankelijk van pompen. Het deel van de frequentielijn dat beïnvloed wordt door het aanslagpeil neemt dan toe. Wanneer de waterafvoer volledig afhankelijk is van pompen zal iedere aanpassing van het aanslagpeil volledig doorwerken in de hele frequentielijn.

Gem. winterpeil	referentie	-0,37 m NAP	-0,27 m NAP	-0,17 m NAP	-0,07 m NAP	+0,03 m NAP
IJsselmeer	-0,26	-0,35	-0,31	-0,29	-0,27	-0,27
Markermeer	-0,36	-0,38	-0,36	-0,36	-0,36	-0,36



Figuur 3.11 Effect van het aanslagpeil van pompen op de Afsluitdijk (2000 m³/sec) op het IJsselmeerpeil en pompen op de Houtribdijk (100 m³/sec) op het Markermeerpeil (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafieken met frequentielijnen. De X-as van beide figuren verschilt.

In een systeem met een combinatie van pompen en spuien hebben de aanslagpeilen grote invloed op de uren dat de pompen moeten draaien. In Tabel 3.4 zijn voor de verschillende varianten de pompduren weergegeven, als percentage van de duur van het winterseizoen (in de klimaatomstandigheden van 2015). Bij zeespiegelstijging zullen de pompduren voor het IJsselmeer toenemen en zullen de verschillen tussen de varianten verminderen.

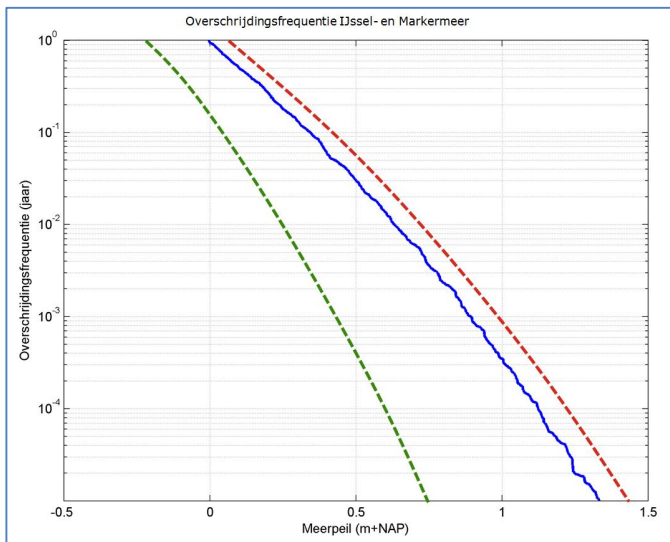
Tabel 3.4 Pompduren (als percentage van de duur van het winterseizoen) bij verschillende aanslagpeilen van de pompen op de Afsluitdijk (500 m³/sec) en de Houtribdijk (100 m³/sec). (Geerse en Kuijper, 2015b).

	-0,37 m NAP	-0,27 m NAP	-0,17 m NAP	-0,07 m NAP	+0,03 m NAP
Afsluitdijk	38%	22%	12%	6%	3%
Houtribdijk	23%	8%	3%	1%	0,4%

3.5 Effecten van verwijderen van de Houtribdijk

Vanuit ecologische overwegingen wordt soms bepleit om een grote opening (van honderden meters tot enkele kilometers) in de Houtribdijk te maken. Om een eerste gevoel te krijgen voor wat dit zou betekenen voor de waterveiligheid in het gebied is een berekening gemaakt van de meerpeilen die zouden optreden wanneer de dijk volledig verwijderd zou zijn. Figuur 3.12 geeft de resultaten.

Gem. winterpeil	referentie	Zonder Houtribdijk
IJsselmeer	-0,26	-0,27
Markermeer	-0,36	-0,27



Figuur 3.12 Effect van het verwijderen van de Houtribdijk op de meerpeilstatistiek (Geerse en Kuijper, 2015b). Gemiddelde meerpeilen zijn weergegeven in de tabel, pieken in de grafiek met frequentielijnen. De blauwe lijn geeft de frequentielijn voor het gecombineerde meer weer. De groene lijn is de referentiesituatie voor het Markermeer, de rode voor het IJsselmeer.

Het gecombineerde meer blijkt eigenschappen te hebben die veel dichter liggen bij die van het IJsselmeer dan die van het Markermeer. Hierbij speelt een rol dat het IJsselmeer het grootste meer van de twee is en dat de wateraanvoer naar het IJsselmeer veel groter is dan die naar het Markermeer. De belangrijkste reden is echter dat de afvoer naar de Waddenzee geheel bepaald wordt door de spuimogelijkheden bij de Afsluitdijk. Deze "stuurknop" van het IJsselmeer wordt in de nieuwe situatie de stuurknop voor het gecombineerde meer.

Dat het Markermeergebied een "IJsselmeerkarakter" krijgt, betekent dat alle peilen hoger worden. Het gemiddeld winterpeil neemt toe met 9 cm. De pieken nemen echter sterker toe: oplopend van 22 cm bij een overschrijdingsfrequentie van een maal per jaar, tot maar liefst 53 cm bij een overschrijdingsfrequentie van eenmaal per 10.000 jaar. Deze waarden gelden voor de situatie 2015. Bij klimaatverandering zal het Markermeergebied meegaan met de ontwikkelingen van het IJsselmeer. Dit betekent dat de optie om alleen het IJsselmeer beperkt mee te laten stijgen met de zeespiegel verdwijnt. Bij niet-meestijgen met de zeespiegel wordt het gebied steeds afhankelijker van pompen voor de waterafvoer. In paragraaf 3.2.2 is aan de orde geweest dat daardoor de frequentielijn afvlakt. Dit betekent dat in het voormalige Markermeer daardoor de extremere pieken nog meer in hoogte zullen toenemen.

Verwijderen van de Houtribdijk heeft natuurlijk ook gevolgen voor scheefstand en het ontstaan van golven (zowel in het Markermeer als in het IJsselmeer). Deze effecten zijn nog niet geanalyseerd.

4 Doorwerking meerpeilen in de dijkbelasting

In hoofdstuk 3 zijn de effecten van klimaatverandering en mogelijke maatregelen op de peilstatistiek van het IJsselmeer en Markermeer geanalyseerd. In dit hoofdstuk worden de resultaten gerelateerd aan de inzichten uit hoofdstuk 2. De centrale vraag is wat nu al gezegd kan worden over de effecten van veranderingen in de peilstatistiek op de belasting van dijken.

De bespreking in hoofdstuk 2 is gebaseerd op *illustratiepunten* uit de berekeningen: deze geven (bij een bepaalde overschrijdingskans) de belastingscombinaties met de grootste kans van voorkomen weer. Voor de dijkbelasting is echter het totale spectrum van belastingscombinaties van belang (met de bijbehorende kansen). Dit betekent dat dit hoofdstuk niet meer kan zijn dan een eerste indicatie van de gevolgen van veranderingen in de peilstatistiek voor de belasting van dijken. In een volgende fase van het project zullen voor geselecteerde varianten de dijkbelastingen volledig worden doorgerekend met Hydra-zoet.

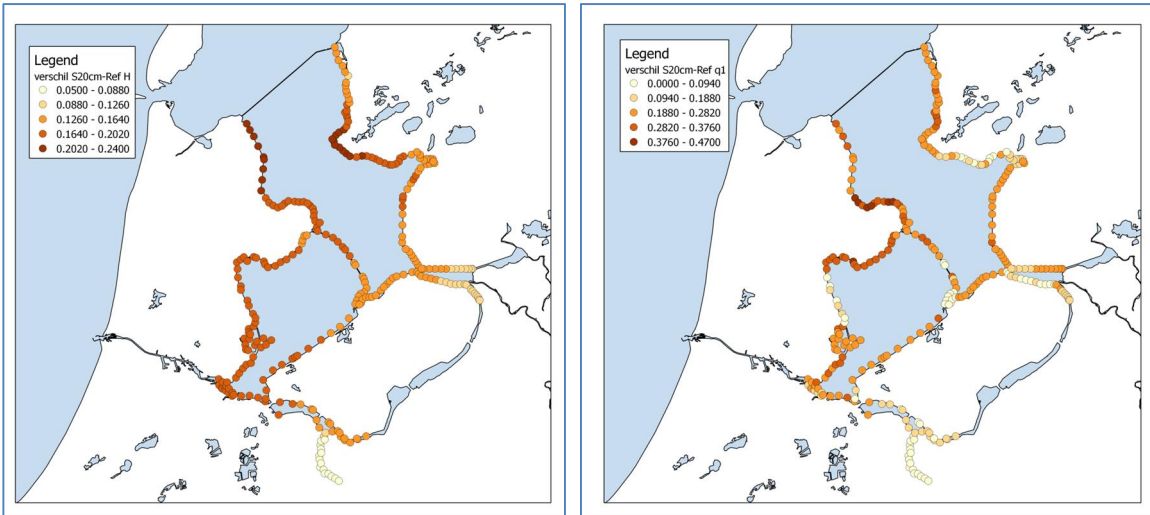
In paragraaf 1 worden de effecten van klimaatverandering op de dijkbelastingen besproken. Vervolgens komen de effecten van mogelijke ingrepen in het watersysteem aan de orde: voor het IJsselmeer in paragraaf 2 en voor het Markermeer in paragraaf 3.

4.1 Klimaatverandering

Zonder ingrijpen leidt klimaatverandering tot peilstijging. De effecten van een peilverhoging van 20 cm zijn doorgerekend in het kader van het Deltaprogramma IJsselmeergebied (Snippen, 2014). Deze peilverhoging treedt op in een klimaatscenario met ca. 20 cm zeespiegelstijging¹.

Figuur 4.2 (links) laat het effect van 20 cm peilstijging zien op de MHW-waarden. In tegenstelling tot de berekeningen die in hoofdstuk 2 zijn gepresenteerd, is hier gerekend met de voor de verschillende dijkvakken geldende wettelijke normen. Omdat figuur 4.2 een verschilkaart is, valt het effect van de verschillende normen echter weg. Bij 20 cm peilverhoging nemen de MHW-waarden 5-24 cm toe. In de meeste gevallen is de toename dus minder dan de peilverhoging. Dit komt omdat bij hogere peilen de scheefstand iets afneemt. Waar de opwaaiing maximaal is (het oosten van het Ketelmeer) is het effect op de MHW dan ook het kleinst. De toename is het grootst op de zogenaamde meerpeilgedomineerde locaties (hoge meerpeilen en weinig opwaaiing in de illustratiepunten). Het algemene patroon van Figuur 4.2 komt sterk overeen met het patroon in Figuur 2.16 (dat de bijdrage van opwaaiing in de MHW aangeeft). Op de meerpeilgedomineerde locaties in het IJsselmeer (westkust en gebied rond Stavoren) zijn de effecten groter dan op die in het Markermeer. De dijkstabiliteitseisen zijn gerelateerd aan de MHW. De gevolgen van peilverhoging voor de stabiliteitseisen zijn dus het grootst op de meerpeilgedomineerde locaties en in het IJsselmeer groter dan in het Markermeer.

¹ In paragraaf 3.1 is geconcludeerd dat zeespiegelstijging voor ca. 90% doorwerkt in een verschuiving van de frequentielijn voor het IJsselmeer: $20/0,9=22$ cm zeespiegelstijging. Daarnaast is geconcludeerd dat de verschuiving door klimaatverandering (in de gekozen scenario's) voor ca. 80% wordt veroorzaakt door zeespiegelstijging: $(0,8*20)/0,9=18$ cm zeespiegelstijging. Voor het Markermeer geldt $20/0,6=33$ cm zeespiegelstijging (zonder verandering neerslag) en $(0,7*20)/0,6=23$ cm bij verandering neerslag.

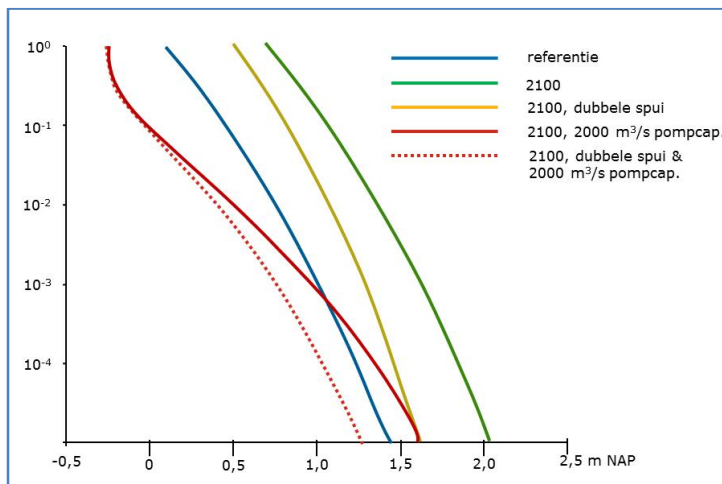


Figuur 4.2: Verschil in MHW (links) en HBN (rechts) tussen de situatie met een peilverhoging van 20cm en de referentie (m).

Figuur 4.2 laat in het rechterkaartje het effect van 20 cm peilverhoging op de MHW-waarden zien. De MHW-waarden worden verhoogd met minder dan tien tot meer dan 40 cm. In het kaartbeeld zijn geen logische patronen te vinden. Dit komt enerzijds doordat de oriëntatie van de dijk op de wind een grote rol speelt. Daarnaast is er in de studie van Snippen gerekend met de werkelijke dijkprofielen en niet, zoals in deze studie, met een standaarddijkprofiel. Dit betekent dat ook verschillen in dijkprofiel een rol spelen. Dat de verhoging van het HBN groter kan zijn dan de peilverhoging komt doordat in dieper water door de wind hogere golven kunnen worden opgebouwd. De benodigde dijkhoogte wordt afgeleid van het HBN. Een peilverhoging leidt dus in het gebied tot sterk verschillende effecten voor de benodigde dijkhoogte. De extra benodigde dijkhoogte kan minder zijn dan de peilverhoging, maar ook meer dan het dubbele.

4.2 Maatregelen IJsselmeer

In hoofdstuk 3 zijn de effecten voor de meerpeilen doorgerekend van de verschillende manieren waarop met klimaatverandering kan worden omgegaan. In figuur 4.1 zijn de resultaten van verschillende berekeningen samengebracht.



Figuur 4.1 Samenvattend overzicht van de belangrijkste effecten van de in hoofdstuk 3 geanalyseerde ontwikkelingen en maatregelen op de peilstatistiek van het IJsselmeer.

De grafiek laat een aantal zaken zien:

1. Klimaatverandering leidt tot opschuiven van de frequentielijn, waarbij de vorm van de lijn nauwelijks verandert (groene lijn).
2. Met verdubbeling van de spuicapaciteit kan het klimaateffect (deels) worden gecompenseerd. De grafiek geeft het effect voor het scenario 2100 (gele lijn). Doordat bij zeespiegelstijging de spuumogelijkheden bij lagere meerpeilen afnemen en doordat de spuicapaciteit toeneemt met het peilverschil tussen IJsselmeer en Waddenzee wordt de frequentielijn iets steiler dan de referentie. Bij verdere zeespiegelstijging wordt het effect van extra spui steeds meer beperkt tot de extremere meerpeilen (kleine overschrijdingsfrequentie) en wordt de lijn nog steiler.
3. Ook met pompen kunnen peilverlagingen worden gerealiseerd (rode lijn). De afvoercapaciteit van pompen neemt niet toe bij hogere meerpeilen (en tegenstelling tot die van spuisluizen). De pomplijn is daardoor vlakker dan de referentie. De lijn wordt bij verdere zeespiegelstijging nog vlakker, omdat het effect van spui steeds beperkter wordt.
4. Pompen en extra spui blijken elkaar in het scenario voor 2100 goed aan te kunnen vullen (rode stippellijn). De peilverlaging is groter dan bij inzet van een van beide afzonderlijke maatregelen. Bovendien wordt de afvlakking van de pomplijn door de extra spui voor een groot deel voorkomen.

In 4.1 is besproken wat het effect is van verhoging van de meerpeilen (het "opschuiven van de frequentielijn") op de MHW's en HBN's. Nu resteert de wat afvlakking van de frequentielijn als gevolg van het eer afhankelijk worden van pompen betekent voor de dijkbelasting. Deze afvlakking betekent dat met pompen de lagere meerpeilen sterker worden verlaagd dan de hogere. Er zijn twee opties: er wordt zoveel pompcapaciteit geïnstalleerd dat ook de meerpeilen met een kleine overschrijdingskans (hoge peilen) niet toenemen ten opzichte van de referentie. Dit vraagt een grotere pompcapaciteit dan nodig is om het gemiddeld winterpeil en de lagere pieken in de meerpeilen te beheersen. De andere optie is dat geaccepteerd wordt dat hogere pieken een hogere overschrijdingskans krijgen. Dit heeft vooral gevolgen voor de MHW-waarden op de peilgedomineerde locaties. Op deze locaties zijn de MHW-waarden in de illustratiepunten gerelateerd aan hoge meerpeilen. In het IJsselmeer zijn gaat het om de westkust en het gebied rond Stavoren (zie Figuur 2.15). Naarmate de zeespiegel stijgt (en daarmee rol van spuien afneemt en die van pompen toeneemt) zullen deze gebieden rekening moeten houden met een toename van de MHW waarden, of zal zoveel pompcapaciteit geïnstalleerd moeten worden dat ook het laagfrequente deel van de frequentielijn onder de referentie komt te liggen.

Afvlakking van de frequentielijn leidt in theorie tot een verlaging van het HBN en daarmee de benodigde dijkhoogte. De illustratiepunten voor het HBN hebben namelijk allemaal relatief lage meerpeilen en liggen daarbij dus in het deel van de curve waarin de overschrijdingsfrequenties lager worden. Het effect is echter heel beperkt, omdat de bijdrage van het meerpeil klein is vergeleken met die van scheefstand en golfoploop (zie Tabel 2.3).

Wanneer de pompcapaciteit groter wordt gekozen, kan er bij klimaatverandering voor worden gezorgd dat de hele frequentielijn onder de referentie blijft liggen. Dit betekent dat de peilen met lage frequenties niet hoger worden. Het gevolg is dat het (afhankelijk van de aansturing van de pompen) mogelijk wordt om de peilen met hogere frequenties meer te verlagen. Mogelijk kan deze verlaging zo sterk zijn, dat het effect voor de HBN's en ook voor de MHW's op de windgedomineerde locaties praktisch relevant wordt.

4.3 Maatregelen Markermeer

Veranderingen in de peildynamiek van het IJsselmeer werken door in het Markermeer. Dit geldt voor een eventuele peilstijging in het IJsselmeer, maar ook voor het vlakker worden van de frequentielijn bij een toenemende rol van pompen in de waterafvoer. Als er een grote opening komt in de Houtribdijk betekent dit dat het markermeer een peildynamiek krijgt die sterk gaat lijken op de huidige dynamiek van het IJsselmeer.

Spuicapaciteit.

De berekeningen tonen aan dat vergroting van de spuicapaciteit van het Markermeer geen zin heeft. De waterafvoer door de spuisluizen wordt niet beperkt door de capaciteit ervan, maar door de tijdsduur dat het daadwerkelijk mogelijk is om te spuien.

Pompen

Met pompen kunnen de waterpeilen op het Markermeer beheerst worden. Door de andere eigenschappen van het Markermeer hebben pompen op de Houtribdijk andere gevolgen voor het beheersen van de meerpeilen dan pompen op de Afsluitdijk. In het Markermeer kunnen met de pompen de waterpeilen over het hele bereik van de frequentielijn worden verlaagd. Dit betekent dat pompen zowel op de MHW als op het HBN een verlagend effect hebben, en daarmee op de eisen die aan dijken worden gesteld voor stabiliteit en hoogte. Pompen op de Houtribdijk kunnen gebruikt worden:

1. Om peilstijging op het Markermeer te voorkomen, als de keuze wordt gemaakt om het IJsselmeer beperkt met de zeespiegel te laten meestijgen.
2. Om het effect van een vlakkere frequentielijn te voorkomen, die kan ontstaan wanneer het IJsselmeer voor de waterafvoer meer van pompen afhankelijk wordt.
3. Om de pieken in het Markermeerpeil (en daarmee de dijkbelasting) te beperken ten opzichte van de huidige situatie.

Voor de opties 2 en 3 is het in theorie ook mogelijk om de wateraanvoer uit de regio te beperken of te vertragen. Er is nog geen zicht op de praktische mogelijkheden daarvan.

Opening in Houtribdijk

Een eventuele grote opening in de Houtribdijk zou grote gevolgen hebben voor de belasting van de dijken in het Markermeergebied. De berekeningen laten zien dat de meerpeilen toenemen over de hele frequentielijn. Daarnaast kan er over het samengevoegde meer extra scheefstand ontstaan. Bij het geheel verwijderen van de Houtribdijk kan ook nog eens de opbouw van golven toenemen. Het gehele Markermeer krijgt hierdoor te maken met een forse verhoging van zowel de MHW's als de HBN's (met sterke verschillen tussen locaties). In het IJsselmeer is er een heel beperkte verlaging van de meerpeilen, die op meerpeilgedomineerde locaties de MHW iets kunnen verlagen. Daar tegenover staat dat in delen van het IJsselmeer de effecten van scheefstand en golfoploop zullen toenemen, met als gevolg een toename van de MHW's en de HBN's.

Het hogere gemiddelde winterpeil en de hogere pieken hebben in het Markermeergebied niet alleen gevolgen voor de dijkveiligheid, maar ook voor afwatering van de omgeving (regionale watersystemen en Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal), wateroverlast in buitendijkse gebieden en natuur in ondiep water en oeverzones.

5 Discussie, conclusies en vervolg

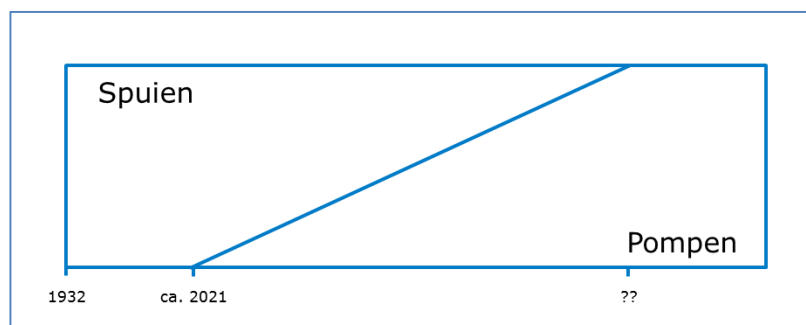
Dit hoofdstuk bespreekt wat uit de eerste fase van het project ISWP geconcludeerd kan worden en zet hoofdlijnen voor de volgende fase uit.

5.1 Discussie

De nieuwe normeringsystematiek, gebaseerd op overstromingskansen, maakt de relatie tussen hydraulische belasting en de eisen waaraan dijken moeten voldoen complexer dan die in het verleden was. De overstromingskans is de som van de faalkansen bij verschillende faalmechanismen. In principe kan aan de norm worden voldaan door verschillende combinaties van faalkansen van de relevante faalmechanismen (zie de toelichting bij Figuur 2.12). De hele systematiek rond ontwerp en toetsing van dijken, waarin wordt uitgewerkt hoe met deze complexe relatie om moet worden gegaan, is nog in ontwikkeling. Dit betekent dat er nog geen kant en klare methode op de plank ligt om een relatie te leggen tussen de meerpeilstatistiek en de eisen waaraan dijken moeten voldoen. Als gevolg hiervan beperkt de discussie hier zich vrijwel geheel tot de mogelijkheden om de meerpeilen te sturen en kan er nog weinig worden gezegd over de doorwerking daarvan op de waterveiligheid. In deze discussie komen achtereenvolgens het IJsselmeer, het Markermeer en de Velluwerandmeren aan de orde.

IJsselmeer

De zeespiegel stijgt en blijft stijgen, slechts de snelheid waarmee dit gebeurt is onzeker. Dit heeft grote gevolgen voor de waterafvoer, de meerpeilen en de dijkveiligheid van het IJsselmeer. Van een systeem waarmee de waterafvoer volledig gebeurt door spuien onder vrij verval ontwikkelt het zich naar een situatie waarin de rol van pompen geleidelijk toeneemt. Op de zeer lange termijn zal de waterafvoer waarschijnlijk geheel met pompen gebeuren. Hoe lang dit duurt is afhankelijk van enerzijds de klimaatontwikkeling en anderzijds beleidskeuzes die worden gemaakt. Figuur 5.1 brengt dit schematisch in beeld.



Figuur 5.1 Waterafvoer van het IJsselmeer: van enkel spuien, via een combinatie van pompen en spuien naar enkel pompen.

De periode waarin er zowel gepompt als gespuid kan worden wordt het kortste als er rond 2050 besloten zou worden om de bestaande spuicomplexen te vervangen door enkel gemalen. Deze studie laat echter zien dat spuimiddelen nog lange tijd een belangrijke rol kunnen spelen in de waterafvoer. Eerst in de totale waterafvoer, later meer beperkt tot de waterafvoer in perioden met extreem hoge meerpeilen.

Spuien werkt daarbij sterk aanvullend op pompen, omdat de capaciteit toeneemt met het meerpeil. De berekeningen met enkele en dubbele spuicapaciteit in combinatie met pompen (Figuur 3.6) laten zien dat zelfs in het extreme scenario dat is aangenomen voor 2150 spui nog een belangrijke rol kan spelen bij het beperken van de hogere meerpeilen. Bovendien kunnen de spuumiddelen fungeren als een vorm van noodoverloop. Wanneer de pompen uit mochten vallen bestaan er met spuisluizen nog mogelijkheden om het oplopen van de meerpeilen te beperken. Een snelle overgang op alleen pompen lijkt daarom op voorhand niet logisch.

De periode waarover spui substantieel kan bijdragen aan de waterafvoer is afhankelijk van de zeespiegelstijging. Deze periode kan verlengd worden door het IJsselmeerpeil te laten stijgen, zodat er langer sprake is van een peilverschil tussen het IJsselmeer en de Waddenzee (bij eb). De mogelijkheden zijn echter beperkt. In het klimaatscenario voor 2100 is er bij een verdubbelde spuicapaciteit al een stijging van de meerpeilen (gemiddeld winterpeil en pieken) van meer dan 30 cm. Een peilstijging heeft natuurlijk gevolgen voor de dijkbelastingen (MHW en HBN). De MHW neemt het sterkst toe (ongeveer gelijk aan de peilstijging) op de zogenaamde peilgedomineerde locaties: langs de westkust van het IJsselmeer en rond Stavoren. De toename van het HBN varieert sterk van locatie tot locatie.

De afvoercapaciteit van pompen neemt niet substantieel toe bij hogere meerpeilen. Daarin verschillen pompen nadrukkelijk van spuisluizen. Met pompen is het daarom moeilijker om de extreme meerpeilen te beheersen. Er zijn drie mogelijkheden om daarmee om te gaan:

1. De pompcapaciteit zodanig groot maken dat de meerpeilen bij lage overschrijdingsfrequenties niet toenemen (of eventueel zelfs afnemen). De waterpeilen kunnen zo goed beheerst worden, maar er moet extra geïnvesteerd worden in pompen en de bijbehorende infrastructuur.
2. Beperken van de (toename in de) piekafvoeren van de IJssel. Deze maatregel is effectief, maar kan een ingrijpende gevolgen hebben voor de Rijn-tak(ken) waarover dan in extreme situaties meer moet worden afgevoerd.
3. Aanpassing van de dijken aan hogere meerpeilen bij de lage overschrijdingsfrequenties. Dit vraagt extra investeringen in de dijken.

De verschillende opties sluiten elkaar niet uit. Zo is het bijvoorbeeld goed denkbaar dat eerst gekozen wordt voor een beperkte peilstijging, met de bijbehorende aanpassing van de dijken. Dit is geen definitieve oplossing, maar er wordt wel tijd mee gewonnen. Het is mogelijk dat in deze tijd nieuwe, innovatieve technieken beschikbaar komen (bijvoorbeeld pompen met een veel grotere capaciteit). Ook kunnen zich bijvoorbeeld in het rivierengebied ontwikkelingen voordoen die aanpassing van de afvoerverdeling eenvoudiger of juist moeilijker maken. Na de periode van peilverhoging kan dan gekozen worden voor een van de drie routes die passen bij een steeds meer van pompen afhankelijk systeem. Om goede afwegingen te maken is een integrale koste-batenafweging voor de verschillende beslismomenten nodig.

Een belangrijke beleidsvraag is welke spui- en pompcapaciteit voor de periode na 2050 wenselijk zijn. Deze vraag is nog niet te beantwoorden. Het antwoord is afhankelijk van de snelheid van de klimaatverandering, van de vraag of al dan niet gekozen wordt voor peilstijging van het IJsselmeer en van een kosten-batenafweging van de verschillende opties. Deze studie laat wel zien dat de benodigde pompcapaciteit al snel groot wordt. In het scenario voor 2100 is een pompcapaciteit van 2000 m³/sec al nauwelijks meer voldoende om effecten binnen het gebied te voorkomen. Een pompcapaciteit van 1000 m³/sec vraagt in dat scenario al nadruk-

kelijk aanvullende maatregelen (extra spuicapaciteit, dijkversterking en/of beperken afvoerpieken IJssel).

De beleidsdoelstelling voor de periode 2050-2100 is dat het gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer maximaal 30 cm zal stijgen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Ministerie van Economische Zaken, 2014). Vooral als gekozen wordt om het peil niet te laten stijgen zullen pompen in deze periode een steeds grotere rol in de waterafvoer gaan spelen. Door de verschillende afvoercharacteristieken van pompen en spuien is het niet voldoende om alleen een doelstelling te formuleren voor het gemiddeld winterpeil. Bij een groter aandeel pompen kan er namelijk, ook als het gemiddeld winterpeil gelijk blijft, sprake zijn van een toename in de pieken van de meerpeilen. Dit heeft consequenties voor de eisen waaraan dijken moeten voldoen. Een doelstelling in alleen termen van gemiddeld winterpeil geeft daarom onvoldoende duidelijkheid voor het gebied.

Markermeer

Voor het Markermeer is besloten dat het peil niet zal stijgen. Gecombineerd met de opties voor het IJsselmeer tekenen zich dan de volgende opties af:

1. Het winterpeil van het IJsselmeer stijgt niet. Waterafvoer van het Markermeer blijft gebeuren met spuisluizen.
2. Het winterpeil van het IJsselmeer stijgt niet. Waterafvoer van het Markermeer gebeurt geheel of gedeeltelijk met pompen. Dit om de dijkbelasting te beperken (of vergroting van de dijkbelasting door een andere afvoercharacteristiek van het IJsselmeer) te voorkomen.
3. Het winterpeil van het IJsselmeer stijgt. Waterafvoer van het Markermeer gebeurt geheel of gedeeltelijk met pompen.

Technisch gezien zijn alle drie de opties goed mogelijk. In aanvulling op optie 1 is het misschien mogelijk de hoogte van de pieken in de meerpeilen te beperken door de waterafvoer uit de regio te vertragen of te beperken door meer rechtstreeks naar zee af te wateren. Er is nog geen zicht op de praktische mogelijkheden hiervan. Vergroten van de capaciteit van de spuisluizen op de Houtribdijk is niet zinvol gebleken. Voor een definitieve keuze is een integrale afweging van kosten en baten noodzakelijk.

De uitgevoerde berekeningen tonen aan dat, bij huidige de peildynamiek van het IJsselmeer de meerpeilpieken op het Markermeer met pompen beperkt worden. Uitgaande van de pieken met een overschrijdingsfrequentie 1:10.000 is deze verlaging 14, 37, 66 of 85 cm bij pompcapaciteiten van respectievelijk 50, 150, 300 en 450 m³/sec.

In verband met vragen rond de voorgenomen dijkversterkingen aan de Noordhollandse Markermeerkust is een studie uitgevoerd naar de effecten van verlaging van de pieken op de versterkingsopgave (Rijkswaterstaat WVL & Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 2015). Aan de westzijde van het Markermeer is de MHW peilgedomineerd, dus hier mogen de sterkste effecten van het verlagen van de meerpeilen verwacht worden, temeer daar deze dijken voornamelijk op stabiliteit/piping zijn afgekeurd. De hoogte van de dijken, waarvoor het HBN bepalend is, is op slechts enkele locaties onvoldoende gebleken. Er is specifiek gekeken naar het effect van 300m³/sec pompcapaciteit, waarmee de MHW-waarde ca. 60 cm verlaagd kan worden. Uit de studie blijkt dat hiermee de versterkingsopgave inderdaad beperkt kan worden. Er zijn aangepaste ontwerpen gemaakt, waarvan geraamd is dat die 40-100 miljoen euro minder zullen kosten dan het oorspronkelijke ontwerp. Hiertegenover staan extra geraamde kosten van 150-300 miljoen euro voor pompen op de Houtribdijk en extra pompen met dezelfde capaciteit op de Afsluitdijk (om

afwenteling te voorkomen). Binnen de gehanteerde uitgangspunten wegen de baten dus niet tegen de kosten op.

In bovenstaande analyse is geen rekening gehouden met effecten van klimaatverandering. Uit de voor de analyse gemaakte berekeningen kan worden afgeleid dat, om op langere termijn dezelfde effecten te bereiken als met een pomp van $300\text{m}^3/\text{sec}$ in de huidige situatie, nog zo'n $100\text{m}^3/\text{sec}$ extra capaciteit nodig is. Voor het handhaven van de huidige peildynamiek is een pompcapaciteit van $300\text{m}^3/\text{sec}$ (ook nog in het klimaatscenario voor 2150) meer dan voldoende.

Veluwerandmeren

In deze studie is geen specifieke aandacht gegeven aan de Veluwerandmeren. De randmeren wateren zowel af op het IJsselmeer, als op het Markermeer. Vanwege de doorspoeling van het systeem is het wenselijk dat dit zo blijft. Dit betekent dat er bij peilstijging van het IJsselmeer pompen moeten komen bij Roggebotsluis. Gezien de beperkte wateraanvoer naar de Veluwerandmeren is het met beperkte pompcapaciteit al snel mogelijk om de meerpeilen goed te beheersen. Het systeem is wat dat betreft nog beter beheersbaar dan het Markermeer.

5.2

Conclusies en vervolg

De eerste fase van het project ISWP heeft het model DEZY opgeleverd en heeft het inzicht in het functioneren van het watersysteem IJsselmeergebied vergroot.

Met DEZY kunnen snel en eenvoudig de gevolgen van maatregelen en ontwikkelingen op de meerpeilstatistiek van het IJsselmeer en het Markermeer worden doorgerekend. Het model is in fase 1 benut om het algemene inzicht in het systeem te vergroten. Het kwam bovendien precies op tijd beschikbaar om in te kunnen zetten bij actuele vragen rond de Markermeerdijken. In de volgende fasen van ISWP zal het een belangrijke rol vervullen in een "modeltrein", waarin de ontwikkelingen in de meerpeilstatistiek (door klimaatontwikkelingen en maatregelen) worden doorvertaald in de belasting van dijken. Vanuit die dijkbelastingen worden vervolgens de benodigde maatregelen voor dijkversterking bepaald en aan deze maatregelen wordt een kostenplaatje verbonden. Het gaat hierbij om het in een logische structuur toepassen van bestaande modellen (DEZY, DAM, Hydra-zoet, KOSWAT), passend bij de nieuwe waterveiligheidsbenadering. Het model DEZY wordt daarbij zodanig aangepast dat het rechtstreeks de benodigde invoergegevens voor het model Hydra-zoet levert. Met het instrumentarium kunnen uiteindelijk de kosten voor dijkversterkingen in allerlei varianten worden bepaald: een belangrijke component voor de kosten-batenafwegingen die moeten worden gemaakt.

De inzichten die zijn verkregen in het systeem zijn kort samengevat:

1. Pompen is niet gelijk aan spuien. Waar de effectiviteit van spuien bij de Afsluitdijk onder extreme situaties toeneemt, neemt die van pompen op de Afsluitdijk juist af. Dit betekent dat extreme pieken met pompen slecht te beheersen zijn.
2. Om extreem grote pompcapaciteit te vermijden is het daarom van belang op de Afsluitdijk zo lang mogelijk ook van spuisluizen gebruik te kunnen maken. Er mag niet lichtvaardig overgeschakeld worden op alleen pompen als afvoermogelijkheid. Een beperkte stijging van het gemiddeld winterpeil verlengt de periode waarin spui een rol kan spelen in de waterafvoer.
3. Het beleid voor de periode na 2050 geeft een maximale stijging van het gemiddeld winterpeil aan. Omdat pompen een steeds grotere rol gaan spelen in de waterafvoer en pompen andere afvoercharacteristieken blijken te hebben dan spuisluizen zegt de doelstelling voor het gemiddeld winterpeil nog

niets over de pieken in de meerpeilen die kunnen optreden. Dit punt zal in het beleid nog uitgewerkt moeten worden. Het project ISWP zal hier in het vervolg nadrukkelijk aandacht aan besteden.

4. Het Markermeer is niet gelijk aan het IJsselmeer. Door de beperktere waterafvoer op het Markermeer kunnen pieken in de meerpeilen daar eenvoudiger met pompen beheerst worden. (Of het beheersen van de pieken kosteneffectief is zal later moeten blijken. In een studie voor de Markermeerdijken bleken, bij de gehanteerde uitgangspunten, de besparingen op de benodigde dijkversterking niet op te wegen tegen de kosten van pompen.)
5. De ene locatie is niet gelijk aan de andere. Kijkend naar maatgevend hoogwater is er sprake van kusten die peilgedomineerd of windgedomineerd zijn, dan wel een tussenpositie innemen. Dit betekent dat het effect van veranderingen in (pieken van) de meerpeilen sterk uiteen loopt van locatie tot locatie.
6. Het maken van een grote opening in de Houtribdijk, of zelfs het geheel verwijderen daarvan, heeft grote gevolgen voor de waterstanden die kunnen optreden in het Markermeer. Door de andere peildynamiek, maar ook door toename in scheefstand en golfontwikkeling, zullen de dijkbelastingen fors toenemen. De laatste twee factoren zullen ook in delen van het IJsselmeer de dijkbelasting vergroten. Het effect van kleine en/of deels afsluitbare openingen is niet onderzocht.
7. Tot slot is het inzicht vergroot in allerlei kentallen, zoals de doorwerking van klimaatverandering in de meerpeilen, de effectiviteit van verschillende maatregelen en het effect van verschillende aansturingmogelijkheden van pompen (aanslagpeil, het al dan niet gelijktijdig kunnen spuien en pompen).

De complexiteit van enerzijds de nieuwe veiligheidsbenadering en anderzijds het watersysteem maakt het een uitdaging om in de volgende fasen van het project enerzijds niet te snel tot conclusies te komen en anderzijds om niet vast te lopen in teveel details. De gekozen stapsgewijze aanpak zal daarbij helpen.

Bijlage A Literatuur

Brinke, W. ten, 2013. Factfinding afvoerverdeling Rijntakken. Blueland consultancy.

Deltaprogramma IJsselmeergebied, 2014. Een veilig en veerkrachtig IJsselmeergebied: synthesesdocument.

Geerse, C. & B. Kuijper, 2015a. Probabilistisch model frequentielijnen IJsselmeergebied: hoofdrapport van het model DEZY. HKV lijn in water.

Geerse, C. & B. Kuijper, 2015b. Varianten waterhuishouding IJsselmeergebied: modelresultaten DEZY. HKV lijn in water.

Haaren, D. van & C. Geerse, 2015. Correlaties neerslag, afvoer en zeewaterstand IJsselmeergebied. HKV lijn in water.

Klein Tank, J., J. Beersma, J. Bessembinder, B. van den Hurk & G. Lenderink, 2014. KNMI '14-klimaatscenario's voor Nederland: leidraad voor professionals in klimaatadaptatie. KNMI.

Kramer, N., 2015. Basisinformatie waterveiligheid IJsselmeergebied. Deltares.

Kramer, N. & W.J. Klerk, 2015. Verkenning IJsselmeer – afhankelijkheid aanvoeren spuicapaciteit IJsselmeer. Deltares.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu & Ministerie van Economische Zaken, 2014. Tussentijdse wijziging van het Nationaal Waterplan.

Rijkswaterstaat WVL & Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, 2015. Syntheserapport pompen Markermeerdijken HWBP2.

Snippen, E., 2014. Resultaten basiscases en strategie DPIJ. Deltares.

Bijlage B Beleidskader water en waterveiligheid

Beleidskeuzes, zoals vastgelegd in de tussentijdse wijziging van het Nationaal Waterplan (2014). Deze beleidskeuzes vormen het kader voor waterveiligheid en waterbeheer in het IJsselmeergebied.

Geselecteerde beleidskeuzes waterveiligheid:

- Het kabinet kiest voor een fundamenteel ander waterveiligheidsbeleid en zal hiertoe een wetsvoorstel met nieuwe normen voorbereiden. De normen hebben een andere vorm (van overschrijdingskans naar overstromingskans) en een nieuwe hoogte.
- Het streven is om in 2050 overal aan deze nieuwe normen te voldoen.
- De volgende landelijke toetsing van de primaire waterkeringen vindt (vanaf 2017) plaats op basis van het nieuwe waterveiligheidsbeleid en bijpassend vernieuwd toetsinstrumentarium.

Beleidskeuzes IJsselmeergebied:

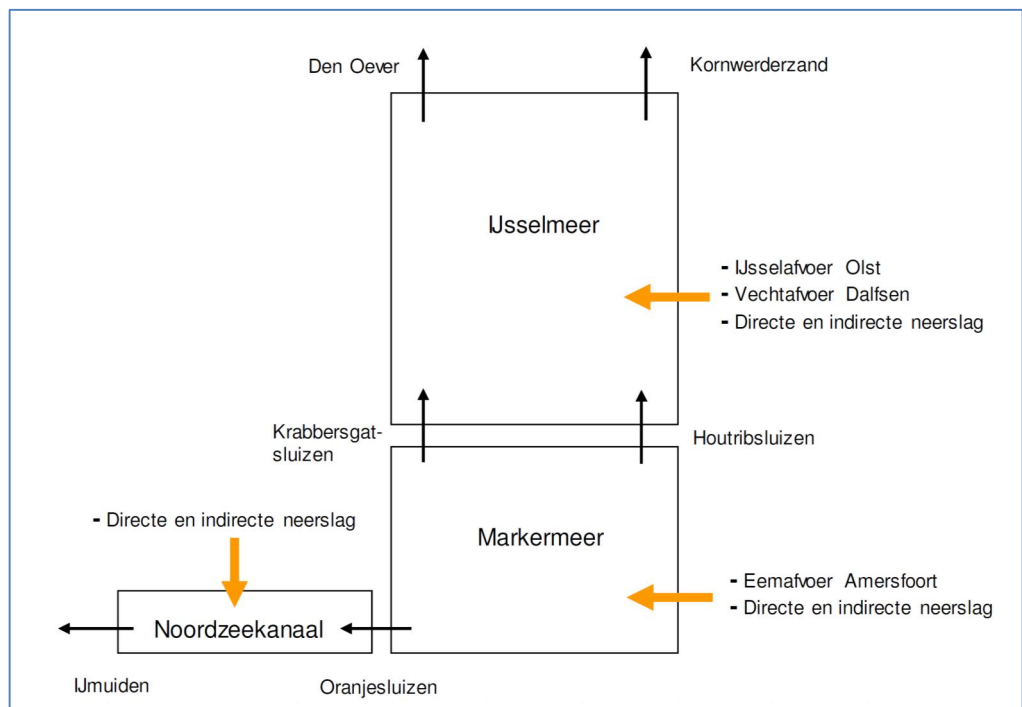
- Het kabinet kiest ervoor om het gemiddeld winterpeil in het IJsselmeer tot 2050 niet mee te laten stijgen met de zeespiegel. Waterafvoer naar de Waddenzee wordt veiliggesteld door middel van een combinatie van pompen en spuien¹.
- Beperkt meestijgen van het winterpeil met de zeespiegel na 2050 wordt door het kabinet als optie opengehouden, omdat dit mogelijk kosteneffectief is.
- Het huidige beleid waarbij nog rekening wordt gehouden met een noodzakelijke stijging van het winterpeil over deze eeuw van 1 meter vervalt en wordt vervangen door nieuw beleid dat rekening houdt met een stijging van het winterpeil na 2050 van maximaal 30 cm. Voor de andere meren in het IJsselmeergebied blijft het gemiddelde winterpeil na 2050 gehandhaafd.
- Om aan de nieuwe normen voor de waterveiligheid in het IJsselmeergebied te gaan voldoen, wordt primair gekozen voor dijkversterkingen.
- Het kabinet kiest ervoor om de strategische zoetwaterfunctie van het IJsselmeergebied te versterken door een flexibeler peilbeheer van het IJsselmeer, het Markermeer-IJmeer en de daarmee in open verbinding staande Zuidelijke Randmeren (Gooimeer, Eemmeer en Nijkerkernauw). De eerste stap in flexibel peilbeheer leidt tot een zoetwatervoorraad van 400 miljoen m³ in het voorjaar en zomerseizoen, dat naar verwachting toereikend is tot 2050. Het kabinet wil de maatregelen in het hoofdwatersysteem stapsgewijs uitvoeren in samenhang met maatregelen in de regionale systemen en bij de gebruikers.

¹ Aanvullend is in de besluitvorming rond het project Afsluitdijk vastgelegd dat de pieken in de meerpeilen tot 2050 ook niet mogen toenemen.

Bijlage C Het model DEZY

Voor het bepalen van Hydraulische Randvoorwaarden en voor allerlei beleidsstudies voor het IJsselmeergebied is statistiek nodig van de meerpeilen voor het IJssel- en Markermeer. Tot nu toe werd dergelijke statistiek bepaald door statistische extrapolatie van gemeten meerpeilen (voor de bestaande situatie) of van zogenaamde synthetische meerpeilen (voor scenariostudies). De praktijk heeft uitgewezen dat deze extrapolaties vaak op problemen stuiten, waarbij subjectieve keuzes sterk bepalend zijn voor de afgeleide meerpeilstatistiek. Bovendien kosten ze veel tijd.

In opdracht van Rijkswaterstaat WVL heeft HKV een model ontwikkeld waarmee de meerpeilstatistiek voor IJsselmeer en Markermeer kan worden berekend, uitgaande van stochasten op de randen van het gebied. Met het model kunnen frequentielijnen voor de meerpeilen van het IJsselmeer en Markermeer worden afgeleid, voor allerlei scenario's. Daarbij kan gevarieerd worden met bijvoorbeeld klimaatverandering, spuicapaciteit, pompcapaciteit en peilbeheer. Het model heeft de naam DEZY gekregen: **D**agelijkse en **E**xtrême waarden voor het **Z**uyder Zee gebied. Het model funktioneert voor de winterperiode: de periode die van belang is voor de waterveiligheid.



Figuur B.1: Schematische weergave watersystemen, spuilocaties en aanvoeren, inclusief richting van de spui, in het model DEZY (in winterhalfjaren)..

In model DEZY worden de volgende stochasten opgenomen (zie Figuur B.1):

- IJsselafvoer te Olst.
- Vechtafvoer te Dalfsen.

- De neerslag die afwatert op het IJsselmeer, voor zover niet inbegrepen in de afvoeren voor Olst en Dalfsen.
- Buitenwaterstand te Den Oever.
- Buitenwaterstand te Kornwerderzand.
- Windsnelheid station Schiphol.
- Windrichting station Schiphol.
- Eemafvoer te Amersfoort.
- De neerslag die afwatert op het Markermeer, voor zover niet inbegrepen in de Eemafvoer.
- De neerslag die afwatert op het Noordzeekanaal.
- Buitenwaterstand te IJmuiden.

Het model is gericht op het berekenen van de frequentielijnen van de meerpeilen in IJsselmeer en Markermeer. Het Noodzeekanaal is op een vereenvoudigde manier meegenomen in het model, om waterafvoer van het Markermeer via dit kanaal te kunnen simuleren. Door de vereenvoudigde benadering levert het model geen betrouwbare frequentielijnen voor het Noordzeekanaal.

In het model kunnen de invoergegevens worden aangepast (bijvoorbeeld om klimaateffecten te berekenen). Daarnaast kan er gevarieerd worden met de afvoer capaciteit (pompen en spuien) op de Afsluitdijk en Houtribdijk en met het peilbeheer (streefpeilen en aanslagpeilen pompen).

Volgens de ontwikkelaars zijn de resultaten van berekeningen met DEZY aanmerkelijk betrouwbaarder dan statistische extrapolaties van meetreeksen of synthetische reeksen. Dit omdat in DEZY, naast statistiek van aanvoeren, *fysica* van het systeem gebruikt wordt om de meerpeilstatistiek uit te rekenen.

Het model DEZY draait op een gewone PC en varianten kunnen er heel snel mee worden doorgerekend. Een uitgebreide beschrijving van het model is te vinden in Geerse & Kuijper, 2015a.

Bijlage D Klimaatscenario's

Het KNMI heeft vier scenario's ontwikkeld, die beschrijven welke klimaatveranderingen in Nederland plausibel zijn (Klein Tank et al., 2014). De scenario's verschillen in de mate waarin de wereldwijde temperatuur stijgt ('Gematigd' en 'Warm') en de mogelijke verandering van het luchtstromingspatroon ('Lage waarde' en 'Hoge waarde'). De voor deze studie belangrijkste gegevens zijn samengevat in Tabel C.1.

De klimaatscenario's laten een beeld zien van hogere temperaturen, een sneller stijgende zeespiegel, nattere winters, heviger buien en kans op drogere zomers. Er worden weinig veranderingen in windsnelheid voorzien. Zowel de veranderingen in gemiddelde windsnelheid als die tijdens stormen in de winter vallen binnen de natuurlijke variabiliteit. Naast de sterkte is ook de richting van de wind van belang voor de waterveiligheid, speciaal die bij krachtige wind in het winterseizoen. In de scenario's verandert de frequentie van sterke noordenwinden niet veel. Windrichtingen tussen zuid en west, die in het huidige klimaat overheersen, komen in de winter vaker voor bij de GH- en WH-scenario's en minder vaak bij de GL- en WL-scenario's (Figuur 12).

Tabel C.1: Samenvatting van de KNMI- 2014 klimaatscenario's. Veranderingen zijn t.o.v. de referentieperiode 1981-2010.

	GL	GH	WL	WH	GL	GH	WL	WH
temp. wereldwijd	+1 °C	+1 °C	+2 °C	+2 °C	+1,5 °C	+1,5 °C	+3,0 °C	+3,0 °C
luchtstroming	laag	hoog	laag	hoog	laag	hoog	laag	hoog
jaar	2036 – 2065				2071 – 2100			
	(2050 als middenwaarde)				(2085 als middenwaarde)			
Zeespiegelstijging (cm)	15-30	15-30	20-40	20-40	25-60	25-60	45-80	45-80
temperatuur	+1 °C	+1,4 °C	+2 °C	+2,3 °C	+1,3 °C	+1,7 °C	+2,8 °C	+3,7 °C
neerslag	+4%	+2,5%	+5,5%	+5%	+5%	+5%	+6%	+7%
verdamping	+3%	+5%	+4%	+7%	+2,5%	+5,5%	+6%	+10%
winter								
temperatuur	+1,1 °C	+1,6 °C	+2,1 °C	+2,7 °C	+1,3 °C	+2 °C	+3,5 °C	+3,5 °C
neerslag	+3%	+8%	+8%	+17%	+4,5%	+12%	+11%	+30%
10-daagse neerslag	+6%	+10%	+12%	+17%	+8%	+12%	+16%	+25%
windsnelheid	-1,1%	+0,5%	-2,5%	+0,9%	-2%	+0,5%	-2,5%	+2,2%
zomer								
temperatuur	+1 °C	+1,4 °C	+1,7 °C	+2,3 °C	+1,2 °C	+1,7 °C	+2,7 °C	+3,7 °C
neerslag	+1,2%	-8%	+1,4%	-13%	+1%	-8%	-4,5%	-23%
verdamping	+4%	+7%	+4%	+11%	+3,5%	+8,5%	+8%	+15%

Deze studie is gericht op de situatie na 2050, het moment waarop de spuicplexen in de Afsluitdijk volgens de huidige inzichten aan het einde van hun technische levensduur zijn. Voor nieuwe kunstwerken wordt veelal uitgegaan van een levensduur

van 100 jaar. Dit betekent dat rekening gehouden moet worden met ontwikkelingen tot het jaar 2150. De KNMI-scenario's lopen niet zo ver door. Bovendien zijn de effecten van de KNMI-scenario's op de afvoer van de Rijn nog niet doorgerekend. Er zijn daarom voor deze studie op een pragmatische manier klimaatscenario's opgesteld, waarbij de KNMI-scenario's als uitgangspunt zijn genomen. Daarbij geldt het volgende:

1. Er wordt uitgegaan van drie zichtjaren: 2050, 2100 en 2150.
2. De waarden van de KNMI-klimaatscenario's worden tot deze jaren geëxtrapoleerd, waarbij voor 2050 wordt uitgegaan van het G-H scenario en voor 2100 en 2150 van het W-L scenario.
3. Bij de zeespiegelstijging wordt voor 2100 uitgegaan van de gemiddelde waarden in de gekozen scenario's. Omdat de zeespiegelstijging zich volgens het KNMI progressief ontwikkelt (mondelijke mededeling Beersma en Drijfhout) wordt voor 2150 de bovengrens in het W-L scenario voor 2085 geëxtrapoleerd.
4. Er wordt geen rekening gehouden met veranderingen in de wind.
5. De verandering van de afvoer van de Overijsselse Vecht en de Eem (die een beperkt stroomgebied hebben) wordt gelijk gesteld aan de verandering in de neerslag.
6. Voor de verandering van de afvoer van de IJssel wordt de benadering uit het Deltaprogramma Rivieren gebruikt¹.
7. De gevonden waarden worden afgerond.

Op deze manier ontstaat de in Tabel C.2 weergegeven set van scenario's, die onderling duidelijk verschillen en ook de extreme ontwikkelingen goed meenemen. Deze scenario's mogen dus niet worden gezien als een beschrijving van de meest waarschijnlijke klimaatontwikkelingen, maar zijn een hulpmiddel om de effecten van klimaatverandering te kunnen analyseren. De resultaten van de berekeningen die op basis van deze gegevens zijn uitgevoerd moeten daarom niet zozeer worden gekoppeld aan de jaartallen, maar aan de klimaatverandering die voor deze jaartallen aangenomen is.

Tabel C.2: Scenario's ten behoeve van berekening van klimaateffecten in de eerste fase van ISWP.

	Zichtjaar		
	2050	2100	2150
Zeespiegel	+20 cm	+70 cm	+140 cm
Winterneerslag	+10%	+15%	+20%
IJsselafvoer*	+6,25%	+12,5%	+20%

* In alle gevallen wordt de IJsselafvoer afgetopt op 3130 m³/sec bij Olst, de afvoer die correspondeert met 18.000 m³/sec Rijnaafvoer bij Lobith.

¹ In de huidige situatie is de Rijnaafvoer van 16.000 m³/sec, bij een herhalingstijd van 1250 jaar. Er wordt vanuit gegaan dat deze afvoer toeneemt tot 17.000 m³/sec in 2050 en 18.000 m³/sec in 2100. Daarbij geldt dat bij de huidige inrichting geen afvoeren boven de 18.000 m³/sec mogelijk zijn, omdat bij hoger wateraanbod overstromingen in Duitsland de afvoer naar Nederland zullen aftoppen. Op basis van deze getallen is gekozen voor een toename van de IJsselafvoer van 6,25% in 2050 (=17.000/16.000), 12,5% in 2100 (=18.000/16.000) en een extrapolatie tot 20% in 2150. In alle gevallen wordt de afvoer afgetopt op 3130 m³/sec: de IJsselafvoer bij Olst die correspondeert met een Rijnaafvoer van 18.000 m³/sec.