



RWS ONGECLASSIFICEERD

Eerste analyse van opties voor waterafvoer en peilbeheer IJsselmeergebied

Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied fase 2

Datum maart 2017
Status definitief



Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat WVL
Informatie	Albert Remmelzwaal
Telefoon	06 53642529
Fax	
Uitgevoerd door	Albert Remmelzwaal, Arthur Kors, Ilka Tanczos, Jan Helmer & Herbert Berger.
Opmaak	
Datum	maart 2017
Status	definitief

Eerste analyse van opties voor waterafvoer en peilbeheer IJsselmeergebied

Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied fase 2

Inhoud

1	Inleiding—5
2	Aanpak van de analyse—7
3	Strategieën en klimaatscenario—11
3.1	Strategieën IJsselmeer—11
3.2	Strategieën Markermeer—12
3.3	Klimaatscenario—13
4	Fysische analyse van de strategieën—17
4.1	Pomp- en spuicapaciteit—17
4.2	Meerpeilstatistiek—21
4.2.1	IJsselmeer—21
4.2.2	Markermeer—23
4.3	Dijkbelasting—26
4.3.1	Effect van pompcapaciteit Afsluitdijk op dijkbelasting—28
4.3.2	Effect van peilstijging op dijkbelasting—29
4.4	Benodigde dijkversterkingen—32
5	Kosten van de strategieën—37
5.1	Uitgangspunten kostenramingen—37
5.2	Kosten van dijkversterkingen—38
5.3	Kosten van waterafvoer—41
5.4	Kostenvergelijking strategieën—44
6	Discussie en vervolg—47
6.1	Discussie—47
6.2	Vervolg—49
	Literatuur—53
Bijlage A	Het model DEZY voor bepaling meerpeilstatistiek—55
Bijlage B	Methodiek bepaling dijkversterkingsopgave—57
Bijlage C	Het KOSWAT instrumentarium voor bepaling dijkversterkingskosten.—63
Bijlage D	Resultaten berekeningen pompcapaciteit en –duur—65
Bijlage E	Overzicht doorgerekende varianten—66
Bijlage F	Berekende waterstanden en hydraulische belastingniveaus voor 2175—67
Bijlage G	Kosten waterafvoer per variant—68

1 Inleiding

De Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer (ISWP) heeft als doel het inzicht te vergroten in de relaties tussen waterafvoer, waterveiligheid en peilbeheer in het IJsselmeergebied. De studie richt zich op de situatie na het jaar 2050, wanneer de spuicomplexen in de Afsluitdijk technisch afgeschreven zijn en vervangen moeten zijn. Er zullen tegen die tijd keuzes gemaakt moeten worden voor de bouw van spuisluisen en gemalen voor de waterafvoer, in samenhang met keuzes voor het peilbeheer en maatregelen voor het handhaven van de waterveiligheid. Hierbij moet natuurlijk rekening worden gehouden met klimaatverandering en zeespiegelstijging. Op dit moment is onvoldoende bekend wat klimaatverandering, peilbeheer en keuzes voor de waterafvoer betekenen voor toekomstige dijkversterkingen.

Een uitgebreidere beschrijving van de achtergronden van de studie is gegeven in het rapport over fase 1 (Rommelzwaal et al, 2015). ISWP gaat uit van vastgesteld beleid. Dit betekent onder meer dat de vastgestelde beschermingsniveaus van dijken en het vastgestelde beleid voor het peilbeheer in het IJsselmeergebied niet ter discussie staan. De 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 ervan. Het project ISWP wordt uitgevoerd door RWS-WVL, in samenwerking met Deltares en adviesbureaus en in samenspraak met het CPB, de waterbeheerders in het gebied en het expertisenetwerk waterveiligheid (ENW).

In het project ISWP is gekozen voor een gefaseerde aanpak. Hierbij gaat kennisontwikkeling hand in hand met de ontwikkeling van modellen en methoden. Er is namelijk geen standaard modelinstrumentarium en/of methodiek beschikbaar om de complexe relaties tussen waterafvoer, peilbeheer en waterveiligheid te analyseren. De eerste fase (probleemanalyse) is afgerond in augustus 2015. Het tekstkader op de volgende pagina geeft een globaal overzicht van wat deze fase heeft opgeleverd. Dit rapport presenteert de resultaten van de tweede fase. In deze fase zijn samenhangende strategieën voor het peilbeheer na 2050 opgesteld en is een methodiek voor de analyse daarvan ontwikkeld. Met deze methodiek is een eerste analyse van de strategieën uitgevoerd. Deze analyse resulteert uiteindelijk in een globale en nog incomplete kostenvergelijking van de strategieën. In fase 3 wordt de methodiek verfijnd en uitgebreid en volgt een nadere analyse van de strategieën.

Hoofdstuk 2 beschrijft de methodiek die is ontwikkeld om de analyse in fase 2 uit te voeren. Dit rapport is opgebouwd volgens de stappen die daar beschreven zijn.

Leestip

Wie niet alle gedetailleerde informatie door wil werken raden we aan te starten met het lezen van hoofdstuk 2, de korte inleidingen van hoofdstuk 3, 4 en 5 en het afsluitende hoofdstuk 6. Vervolgens kunnen eventueel tekstdelen geselecteerd worden voor verdieping.

Resultaten eerste fase ISWP

De probleemanalyse omvatte drie activiteiten:

1. Een analyse van het watersysteem. Deze analyse geeft inzicht in de aan- en afvoer van water en in de verschillen in dijkbelasting binnen het IJsselmeergebied.
2. De ontwikkeling van het model DEZY. Met dit model kunnen de effecten van afvoercapaciteit, beheer en klimaatverandering op de meerpeilen van IJsselmeer en Markermeer worden berekend (zowel gemiddelde peilen als de frequentie waarmee pieken van bepaalde hoogtes kunnen optreden). Het model wordt kort beschreven in Bijlage A van dit rapport.
3. De doorrekening van een groot aantal varianten met DEZY, waarbij de effecten van veranderingen in het peilbeheer, de spuicapaciteit, de pompcapaciteit, zeespiegelstijging en klimaatverandering op de meerpeilen in beeld zijn gebracht.

Fase 1 heeft de volgende inzichten opgeleverd:

- Pompen is niet gelijk aan spuien. Waar de effectiviteit van spuien bij de Afsluitdijk bij hoge meerpeilen toeneemt, neemt die van pompen dan juist af. Dit betekent dat extreme pieken met pompen slecht te beheersen zijn.
- Om de aanleg van extreem grote pompcapaciteit te vermijden is het daarom van belang op de Afsluitdijk zo lang mogelijk ook van spuisluizen gebruik te kunnen maken.
- 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 zullen aanvullend ook keuzes moeten worden gemaakt over het beheersen van de pieken in de meerpeilen.
- 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.
- 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.
- Het maken van een grote opening in de Houtribdijk, of zelfs het geheel verwijderen daarvan, heeft grote gevolgen voor het peilregime op het Markermeer. Het peilregime op het Markermeer gaat sterk lijken op het peilregime op het IJsselmeer, de meerpeilen gaan dus flink omhoog. Omgekeerd verandert het peilregime van het IJsselmeer weinig, de peilen dalen licht. De andere peildynamiek op het Markermeer werkt flink door in de dijkbelastingen. Enerzijds doordat de waterstanden aan de dijk stijgen, maar ook door een toenemende golfbelasting.
- Tot slot is het inzicht vergroot in allerlei kentallen, zoals de doorwerking van klimaatverandering in de meerpeilen en het effect van keuzes m.b.t. stijging van het gemiddeld winterpeil en afvoercapaciteit.

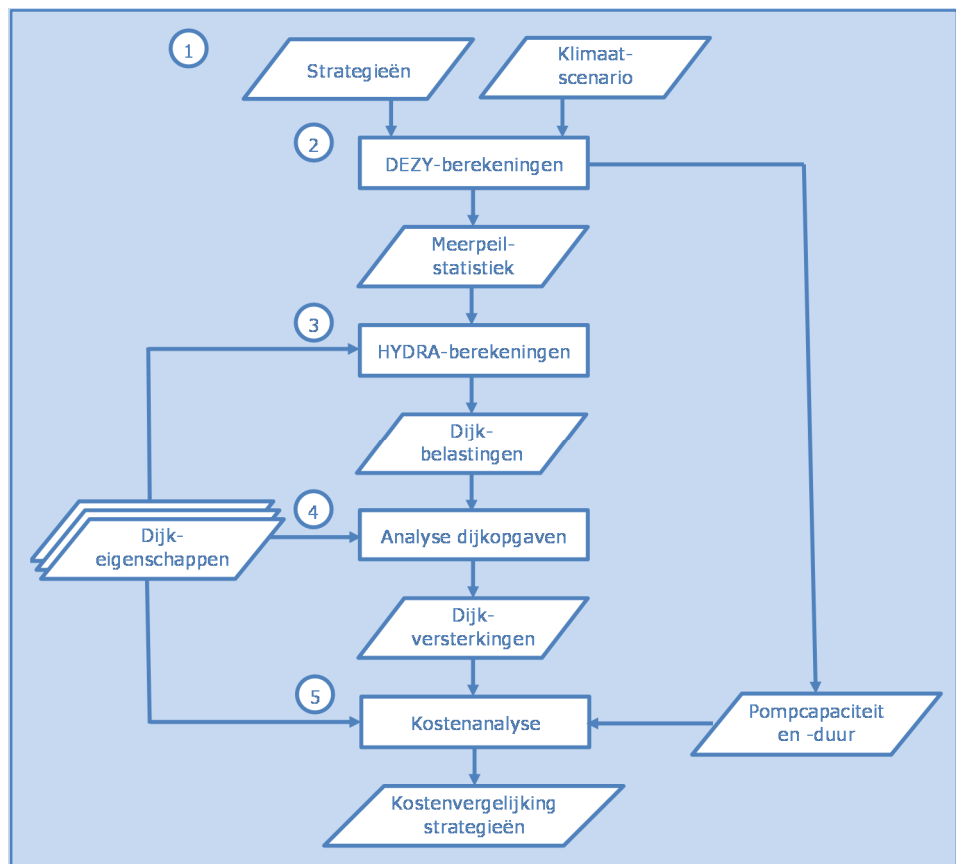
Deze inzichten zijn gebruikt bij de opzet van de tweede fase van ISWP.

2 Aanpak van de analyse

In fase 2 hebben we het instrumentarium (modellen en methoden) ontwikkeld, waarmee strategieën voor waterafvoer en peilbeheer kunnen worden geanalyseerd. Het is een combinatie van beproefde en nieuwe onderdelen. We hebben strategieën opgesteld voor de periode ná 2050 en die vervolgens met het instrumentarium geanalyseerd. Met deze eerste analyse zijn meerdere doelen bereikt. Al werkend hebben we het instrumentarium ontwikkeld en getest.

Met het instrumentarium hebben we verschillen tussen de strategieën in beeld kunnen brengen, zowel in waterhuishoudkundige effecten als in kosten. Het gaat om pilot-berekeningen: de analyse is nog niet op alle onderdelen voldoende om conclusies te kunnen trekken. De resultaten geven echter wel inzicht in het relatieve belang van onderdelen van de analyse, waardoor gefundeerde keuzes kunnen worden gemaakt bij de verdere uitwerking en detaillering ervan.

Figuur 2.1 geeft een overzicht van het ontwikkelde instrumentarium. De met nummers aangegeven stappen in de figuur worden hieronder kort besproken, waarbij wordt aangegeven in welke hoofdstukken van dit rapport ze aan de orde komen.



Figuur 2.1 Ontwikkelde methodiek voor de analyse van strategieën voor waterafvoer en peilbeheer. De nummering verwijst naar de stappen die in dit hoofdstuk kort worden besproken.

Stap 1: ontwikkelen strategieën en klimaatscenario

Als eerste stap hebben we strategieën ontwikkeld voor het peilbeheer tot 2175. Uitgaande van het bestaande beleid geven de strategieën voor Markermeer en IJsselmeer wat er gebeurt met het gemiddeld winterpeil, maar ook met de pieken in de meerpeilen. De strategieën hebben de vorm van ontwikkelpaden voor de periode 2050-2175. Naast de strategieën hebben we een klimaatscenario ontwikkeld, op basis van de KNMI-scenario's. Dit was nodig omdat deze studie veel verder vooruit kijkt dan de KNMI klimaatscenario's doen. De strategieën en het klimaatscenario worden besproken in hoofdstuk 3.

Stap 2: berekening pompcapaciteiten en meerpeilstatistiek

In de tweede stap hebben we geanalyseerd welke spui- en pompcapaciteit er op de Afsluitdijk en Houtribdijk nodig is om de strategieën te realiseren. Dit is gedaan door iteratieve berekeningen uit te voeren met het model DEZY (zie Bijlage A). Hierbij is voor ieder scenario en rekenjaar (bij een gekozen spuicapaciteit) de pompcapaciteit stapsgewijs verhoogd, tot voldaan werd aan de voorwaarden die in de strategie is beschreven. In de analyse gaan we uit van dijkversterkingen in de jaren 2025, 2075 en 2125 (voor zover noodzakelijk). Omdat de dijken een ontwerplevensduur van 50 jaar hebben moesten de DEZY berekeningen daarom worden uitgevoerd voor de jaren 2075, 2025 en 2175.

Bij de Houtribdijk hebben we alleen de bestaande spuicapaciteit gebruikt. De spuisluizen daar zijn nog lang niet afgeschreven en de analyse in fase 1 heeft aangetoond dat vergroting of verkleining ervan weinig invloed heeft op de meerpeilstatistiek. Bij de Afsluitdijk is gerekend met 50, 100 en 200% van de huidige spuicapaciteit.

De benodigde pomp- en spuicapaciteit komt aan de orde in paragraaf 4.1. Paragraaf 4.2 bespreekt vervolgens de frequentielijnen van de meerpeilen die met DEZY zijn berekend.

Stap 3: berekening dijkbelasting

De dijken in het gebied hebben we in trajecten opgedeeld. De trajecten zijn zo homogeen mogelijk en binnen het traject geldt overal dezelfde veiligheidsnorm. Voor bijna alle trajecten hebben we voor één punt de hydraulische belasting berekend in de drie rekenjaren, met behulp van het model Hydra-zoet. De met DEZY berekende meerpeilstatistiek van IJsselmeer en Markermeer (stap 2) is hierbij als invoer gebruikt. In paragraaf 4.3 wordt de dijkbelasting besproken.

Stap 4: bepaling benodigde dijkversterkingen

Per dijktraject hebben we ook voor één representatieve locatie de relatie tussen hydraulische belasting en faalkans geanalyseerd. De methode is beschreven in Bijlage B. Voor de jaren 2075, 2025 en 2175 hebben we vervolgens per strategie kunnen analyseren welke versterking nodig is om aan de veiligheidsnorm te voldoen. De benodigde dijkversterkingen worden besproken in paragraaf 4.4.

Stap 5: kostenanalyse

Met het KOSWAT-instrumentarium (zie Bijlage C) hebben we vervolgens de kosten van de benodigde dijkversterkingen op de drie versterkingsmomenten bepaald. KOSWAT is door de jaren uitgegroeid tot hét instrument waarmee een zelfde kostenbasis gegeven kan worden aan alle geplande maatregelen over programma's en projecten heen. De analyse van de dijkversterkingskosten is beschreven in paragraaf 5.2. Voor het ramen van de kosten van waterafvoer (pompen en spuien) hebben we een eigen spreadsheetmodel ontwikkeld. Op basis van de gegevens over benodigde spuicapaciteit, pompcapaciteit en draaiuren van pompen is daarmee een raming gemaakt van de kosten van de waterafvoer (paragraaf 5.3).

In paragraaf 5.4 is vervolgens een eerste vergelijking gemaakt van de kosten van de strategieën, gebaseerd op de kosten van waterafvoer en dijkversterkingen. Om-

dat het in deze fase nog maar om pilotberekeningen gaat mogen uit de kostenvergelijking nog geen definitieve conclusies worden getrokken. Verder geldt dat de getallen zijn bedoeld om de strategieën onderling te vergelijken, niet om een kostenraming te maken.

3 Strategieën en klimaatscenario

Voor de periode na 2050 hebben we strategieën ontwikkeld voor het peilbeheer van het IJsselmeer en het Markermeer.

In het IJsselmeer zijn er drie strategieën. In strategie 1 blijft het gemiddeld winterpeil gelijk, in strategie 2 neemt het met 30 cm toe in de periode 2050-2100 en stijgt vervolgens niet meer verder. Deze twee strategieën volgen het beleid. Omdat het beleid geen uitspraken doet over de periode ná 2100 is nog een derde strategie toegevoegd, waarin het gemiddeld winterpeil tot 2150 nog eens met 30 cm stijgt. Het beleid doet geen uitspraken over de beheersing van pieken in de meerpeilen. We hebben daarom voor elke strategie twee varianten gemaakt. In variant a is de pompcapaciteit groot, waardoor de extreme meerpeilpieken niet zullen toenemen (t.o.v. het gemiddeld meerpeil); in variant b is de pompcapaciteit klein, waardoor de lagere meerpeilpieken niet toenemen maar de extreme meerpeilpieken wel. Figuur 3.1 laat de strategieën voor het IJsselmeer zien.

Voor het Markermeer blijft in strategie 1 het gemiddeld winterpeil gelijk, terwijl het in strategie 2 met 8 cm mag stijgen. Strategie 1 kent twee varianten: a met pompen en spuien en b met alleen spuien. Strategie 2 voor het Markermeer wordt alleen toegepast bij stijgend IJsselmeerpeil en heeft, omdat het IJsselmeerpeil sterker stijgt dan dat van het Markermeer, altijd pompen nodig. De strategieën voor beide meren zijn afgeleid uit het waterbeleid. De varianten zijn ontwikkeld op basis van de inzichten die we in fase 1 hebben opgedaan.

In paragraaf 3 wordt een klimaatscenario gepresenteerd, dat tot stand gekomen is door extrapolatie van de KNMI-klimaatscenario's. Die extrapolatie was nodig omdat de KNMI-scenario's geen uitspraken doen voor de periode na 2100. In deze studie wordt met één klimaatscenario gewerkt.

3.1 Strategieën IJsselmeer

De studie ISWP richt zich primair op de winterperiode, die cruciaal is voor de waterafvoer en waterveiligheid in het IJsselmeergebied. Het Nationaal Waterplan zegt over de winterperiode het volgende: "Het gemiddelde winterpeil in het IJsselmeer stijgt in ieder geval tot 2050 niet mee met de zeespiegel. Waterafvoer naar de Waddenzee wordt veiliggesteld door middel van een combinatie van spuien en pompen. Beperkt meestijgen van het winterpeil met de zeespiegel wordt voor de periode na 2050 als optie opengehouden: het kabinet houdt rekening met een stijging van het winterpeil in het IJsselmeer na 2050 van maximaal 30 cm" (Ministerie van IenM & Ministerie van EZ, 2015).

Er zijn dus beleidsdoelen voor het gemiddeld winterpeil tot het jaar 2100. Voor de periode tot 2050 heeft het project Afsluitdijk als opdracht meegekregen om niet alleen het gemiddeld winterpeil te handhaven, maar ook te zorgen dat de pieken in de meerpeilen niet toenemen. Voor de periode na 2100 is geen beleid geformuleerd. In dit project gaan we uit van een levensduur van 100 jaar van de spuisluizen en/of pompen die rond 2050 gebouwd zullen worden en zullen we dus verder moeten kijken dan 2100.

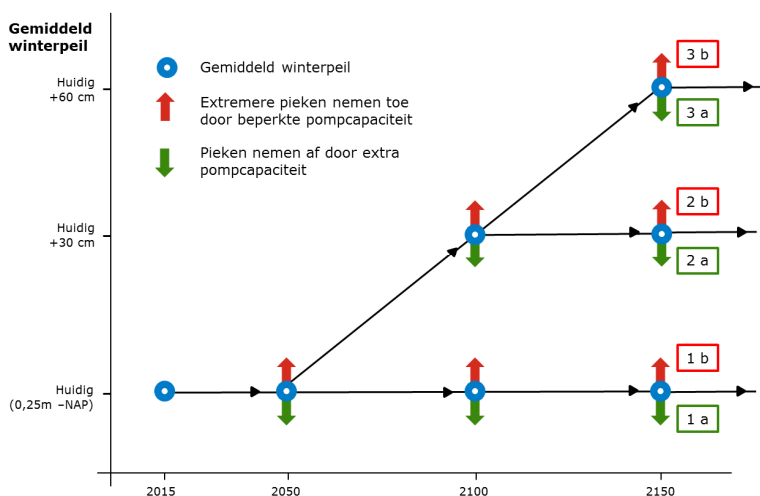
Uitgaande van de beleidsdoelen hebben we drie ontwikkelpaden voor het IJsselmeer opgesteld:

1. Het gemiddeld winterpeil blijft gelijk tot 2150.
2. Het gemiddeld winterpeil stijgt tussen 2050 en 2100 met 30 cm en blijft vervolgens gelijk.
3. Het gemiddeld winterpeil stijgt met 30 cm tussen 2050 en 2100 en vervolgens met nog eens 30 cm tussen 2100 en 2150.

In de loop der tijd zal het belang van pompen in de waterafvoer toenemen, als gevolg van de stijging van de zeespiegel. De eerste fase van deze studie heeft ons geleerd dat waterafvoer met pompen anders functioneert dan waterafvoer met spuisluizen. De pompcapaciteit die (aanvullend op de spuicapaciteit) nodig is om het gemiddeld winterpeil gelijk te houden is niet voldoende om te zorgen dat de hoogte van extreme meerpeilpieken niet toeneemt. We hebben daarom voor de drie ontwikkelpaden twee varianten geformuleerd:

- a. Een variant waarin de pompcapaciteit zodanig groot is dat de hoogte van extreme pieken in het meerpeil (die met een herhalingsjijd van 100.000 jaar) niet toeneemt. Het gaat hierbij om de hoogte van de piek t.o.v. het gemiddeld winterpeil. Dit betekent dat bij stijging van het gemiddeld winterpeil (strategie 2 en 3) de pieken evenredig mee mogen stijgen. In deze variant zullen de minder extreme pieken dalen.
- b. Een variant waarin de pompcapaciteit slechts voldoende is om de frequent optredende pieken (herhalingsjijd 1 jaar) gelijk te houden. Ook hier gaat het om de hoogte van de piek t.o.v. het gemiddeld winterpeil. Alle hogere (minder frequente) pieken zullen daardoor in hoogte toenemen.

De combinatie van drie ontwikkelpaden voor het gemiddeld winterpeil en twee varianten voor de pompcapaciteit levert zes strategieën voor het IJsselmeer. Deze zijn weergegeven in Figuur 3.1. In paragraaf 4.1 is uitgewerkt hoeveel pompcapaciteit er op verschillende momenten in de zes strategieën nodig is.



Figuur 3.1 Strategieën voor het gemiddeld winterpeil en de waterafvoer van het IJsselmeer.

3.2 Strategieën Markermeer

Het huidige gemiddeld winterpeil van het Markermeer is ca. -33 cm NAP. Het beleid gaat uit van een in principe gelijkblijvend gemiddeld winterpeil, waarbij echter wel een stijging tot het niveau van het huidige gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer (-25 cm NAP) mogelijk is (ministerie van IenM & ministerie van EZ, 2015). Op basis hiervan hebben we twee ontwikkelpaden voor het Markermeer geformuleerd:

1. Het gemiddeld winterpeil blijft gelijk tot 2150.
2. Het gemiddeld winterpeil stijgt tussen 2050 en 2100 van -33 naar -25 cm NAP.

Hierbij gaan we ervan uit dat het gemiddeld winterpeil van het Markermeer alleen zal stijgen als dat in het IJsselmeer ook gebeurt.

Aanvankelijk was het idee om ook voor het Markermeer onderscheid te maken tussen strategieën met grotere pompcapaciteit en kleinere pompcapaciteit. Doordat het Markermeer een veel kleinere wateraanvoer heeft dan het IJsselmeer bleek het verschil tussen de pompcapaciteit die nodig is voor het gelijk houden van alleen frequente pieken en het gelijk houden van incidentele pieken zo klein te zijn, dat daarvan is afgezien. Wanneer het IJsselmeerpeil niet stijgt, kan wel onderscheid gemaakt worden tussen afvoer met alleen spuien en afvoer met pompen. Wanneer het IJsselmeerpeil stijgt is afvoer met alleen spuien geen optie meer, omdat het gemiddeld winterpeil van het Markermeer dan teveel zou stijgen. Dit leidt tot de volgende varianten:

- a. Afvoer met pompen en spuien.
- b. Afvoer met alleen spuien (alleen als gemiddeld winterpeil IJsselmeer gelijk blijft).

Combinatie 2b is niet mogelijk. Deze combinatie zou een beperkte stijging van het gemiddeld winterpeil van het Markermeer zijn, bij een sterke stijging van het gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer en waterafvoer door alleen spuien. Deze combinatie is onmogelijk. Er resteren zo drie strategieën voor het Markermeer:

- 1a Het gemiddeld winterpeil blijft gelijk (net als die van het IJsselmeer) en de waterafvoer vindt plaats met pompen en spuien.
- 1b Het gemiddeld winterpeil blijft gelijk (net als die van het IJsselmeer) en de waterafvoer vindt plaats met alleen spuien.
- 2a Het gemiddeld winterpeil stijgt (bij stijgend IJsselmeer) en de waterafvoer vindt plaats met pompen en spuien.

3.3 **Klimaatscenario**

Om de hoeveelheid rekenwerk te beperken hanteren we maar één klimaatscenario. De effecten van sterkere of minder sterke klimaatverandering kunnen worden ingeschat door met de rekenresultaten te schuiven in de tijd. In fase 2 hebben we gekozen voor het WL klimaatscenario van het KNMI als uitgangspunt (KNMI, 2014). W staat voor warm. De W-scenario's gaan uit van een wereldwijde temperatuurstijging van 2 °C in 2050 en 3,5 °C in 2085. Naast de wereldwijde temperatuurstijging is ook de verandering van het luchtstromingspatroon van belang. In de L-scenario's is de invloed daarvan klein.

Het WL scenario hebben we gekozen omdat naar de laatste inzichten nu al een flink deel van de temperatuurstijging die daarin voor 2050 is voorzien, is gerealiseerd. Daarnaast biedt dit scenario de mogelijkheid om in de verdere toekomst met versterkte zeespiegelstijging te kunnen rekenen. De verwachting is namelijk dat zeespiegelstijging in de toekomst zich wel eens progressief zou kunnen ontwikkelen.

Het KNMI heeft berekeningen gemaakt voor ca. 2050 (het midden van de periode 2036-2065) en ca. 2085 (het midden van de periode 2071-2100). Voor de berekeningen in deze studie zijn gegevens nodig voor de jaren 2075, 2125 en 2175. Gegevens voor deze jaren hebben we verkregen door interpolatie tussen en extrapolatie van de KNMI waarden voor 2050 en 2085. In het vervolg van deze paragraaf beschrijven we op hoofdlijnen beschreven hoe we dat gedaan hebben.

Zowel de keuze voor 1 scenario als de vergaande extrapolatie van de beschikbare gegevens leidt tot grote onzekerheid rond de gehanteerde waarden. Dit is voor deze studie niet erg. Het gaat niet om een voorspelling, maar om het krijgen van inzicht in de manier waarop het watersysteem reageert op veranderingen.

Zeespiegelstijging

Voor de zeespiegelstijging in 2075 hebben we lineair geïnterpoleerd tussen de waarden voor 2050 en 2085, waarbij we zijn uitgegaan van het midden van de bandbreedte die het WL scenario voor de zeespiegelstijging geeft. Na 2085 zijn we uitgegaan van de bovengrens van de zeespiegelstijging per jaar zoals die is gepubliceerd voor het WL-scenario in 2085: 10,5 mm/jaar *extra* stijging ten opzichte van

de 2 mm/jaar stijgingssnelheid in de referentieperiode. Dit betekent dus 12,5 mm/jr zeespiegelstijging van 2085 tot 2175. De zeespiegelstijging is zodanig dat in de verschillende strategieën in de loop van de 22^e eeuw spuien niet of nauwelijks meer mogelijk is. De resulterende zeespiegelstijging is weergegeven in Tabel 3.1

Neerslag

Voor de DEZY berekeningen is de neerslag in de winterperiode nodig, per periode van 30 dagen. De KNMI klimaatscenario's geven de procentuele verandering van de gemiddelde neerslag in de hele winter en van de 10-daagse neerslagsom die in de winter eens per 10 jaar wordt overschreden. De procentuele verandering van de neerslag in 30-daagse periodes hebben we benaderd door het gemiddelde van deze twee waarden te nemen.

De verandering van de neerslag is gerelateerd aan de temperatuurverandering. In de klimaatscenario's geldt 1995 als basisjaar en is de temperatuurtoename 0 °C. In het WL scenario is de temperatuurstijging in 2050 2 °C en in 2075 3,5 °C. Voor 2175 is een temperatuurstijging van 4,5 °C aangenomen. Door deze punten is een vloeiende lijn geconstrueerd en vervolgens zijn de neerslagtoenames op basis van deze lijn temperatuurafhankelijk geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd. Het resultaat is weergegeven in Tabel 3.1.

Jaar	Zeespiegelstijging	Toename winterneerslag (30-daagse perioden)
1995	0 cm	0%
2015	10 cm	3%
2075	55 cm	14%
2125	115 cm	19%
2175	175 cm	20%

Tabel 3.1 Zeespiegelstijging en verandering in neerslag die in de berekeningen gebruikt zijn.

Rivierafvoer

De afvoer van de Vecht is afhankelijk van de neerslag in Nederland en Duitsland. We hebben daarom aangenomen dat de winterafvoer van de Vecht toeneemt met dezelfde waarden als de neerslag (zie Tabel 3.2).

Met het GRADE-instrumentarium (Generator of Rainfall and Discharge Extremes) is berekend wat de invloed is van de KNMI-klimaatscenario's op de afvoer van de Rijn (Deltares, 2015). Net als bij de neerslag hebben we de resultaten voor de jaren 2050 en 2085 temperatuurafhankelijk geïnterpoleerd en geëxtrapoleerd.

We gaan uit van KNMI2014 scenario's WL2050 en WL2085. In 2050 is de veronderstelde temperatuurstijging dan 2 °C en in 2085 3,5 °C. Net als bij de schatting van de ontwikkeling in de 30-daagse neerslag gaan we ervan uit dat de temperatuurstijging in 2175 4,5 °C bedraagt. Ook wordt de Rijnafvoer tot 2085 temperatuurafhankelijk geïnterpoleerd en na 2085 temperatuurafhankelijk geëxtrapoleerd. Omdat door overstromingen langs de Rijn in Duitsland er afvlakkingen in de lijnen voor 2050 en 2085 voorkomen is extrapolatie uit die lijnen lastig. De lijnen worden daarom eerst "gladgetrokken", om de effecten van deze overstromingen weg te nemen. In de keuze om dit te doen speelt mee dat de verwachting is dat in volgende versies van de lijnen die afvlakkingen minder geprononceerd zullen zijn¹. De waarde voor 1/1.000.000 per jaar wordt op 18.000 m³/s gesteld (maximaal mogelijke Rijnaf-

¹ Mondelinge mededeling Hendrik Buiteveld.

voer). Tabel 3.2 geeft de resultaten weer. Voor de berekeningen zijn uit de Rijnafvoeren IJsselafvoeren afgeleid, op basis van de huidige verdeling bij verschillende Rijnafvoeren.

herhalings-tijd (jaar)	Jaar				
	1995	2015	2075	2125	2175
1	5000	5300	7200	8000	8200
10	9100	9500	11700	12600	12800
30	10900	11400	13400	14300	14500
100	12600	13000	14600	15300	15400
300	13600	13900	15500	16200	16300
1000	14300	14700	16300	17000	17000
1250	14400	14800	16500	17200	17400
3000	14800	15200	16900	17600	178000
10000	15300	15700	17200	17700	17900
30000	15700	16000	17300	17800	17900
1000000	18000	18000	18000	18000	18000

Tabel 3.2 Afvoeren van de Rijn bij verschillende herhalingstijden van de Rijn, zoals die in de berekeningen gebruikt zijn (afgerond op 100 m³/sec).

4 Fysische analyse van de strategieën

In dit hoofdstuk worden de strategieën die in hoofdstuk 3 zijn beschreven geanalyseerd. Het gaat om de waterhuishoudkundige aspecten en om de vraag hoe die doorwerken in de dijkversterkingen die in de toekomst nodig zijn. Eerst hebben we geanalyseerd welke pompcapaciteit hoort bij de verschillende strategieën. Tabel 4.1 laat zien hoe groot die capaciteit is, wanneer de huidige spuicapaciteit in stand wordt gehouden. De benodigde pompcapaciteit neemt in de loop der jaren toe door zeespiegelstijging en klimaatverandering. Het is opvallend hoeveel extra pompcapaciteit nodig is om, naast het handhaven van het gewenste gemiddeld winterpeil, te zorgen dat de extreme meerpeilpieken niet toenemen.

Paragraaf 4.2 laat vervolgens zien hoe de meerpeilstatistiek van IJsselmeer en Markermeer zich in de verschillende strategieën ontwikkeld. In zekere zin weerspiegelen de grafieken hier de verschillen in benodigde pompcapaciteit in de strategieën. Bij lage pompcapaciteit nemen de extreme meerpeilpieken sterk toe. Bij hoge pompcapaciteit blijven de extreme pieken gelijk en worden de minder extreme pieken zelfs minder hoog.

In de paragraaf 4.3 wordt vervolgens zichtbaar hoe de verschillen in meerpeilstatistiek doorwerken in de dijkbelasting. De belasting van de dijken is het minst als het gemiddeld winterpeil niet stijgt en de meerpeilpieken kunnen worden beheerst met grote pompcapaciteit. Hoeveel de strategieën daarbij uiteen lopen verschilt echter sterk per locatie. Tot slot van dit hoofdstuk analyseren we hoe de strategieën doorwerken in de toekomstige dijkversterkingen. In het IJsselmeer is de versterkingsopgave het grootste bij kleine pompcapaciteit. Het effect van de pompcapaciteit in de strategieën is groter dan het effect van 60 cm stijging van het gemiddeld winterpeil.

4.1 Pomp- en spuicapaciteit

In hoofdstuk 3 beschrijven we de uitgangspunten voor de strategieën. Om te bepalen welke pompcapaciteit er in de verschillende peiljaren nodig is om de strategieën te realiseren hebben we berekeningen uitgevoerd met het model DEZY (versie 2.0). Na een aantal verkennende berekeningen hebben we gekozen voor een aanslagpeil van de pompen dat voor het IJsselmeer op 10 cm onder het gewenste gemiddeld winterpeil ligt en voor het Markermeer op 5 cm¹. Daarbij geldt dat pas gepompt wordt wanneer spuien niet mogelijk is.

Voor iedere combinatie van strategie en peiljaar zijn vervolgens iteratieve berekeningen uitgevoerd, waarbij de pompcapaciteit stapsgewijs werd opgevoerd totdat aan de uitgangspunten (gemiddeld winterpeil, hoogte meerpeilpiek) werd voldaan. Voor het IJsselmeer hebben we daarbij gewerkt met stappen van 100 m³/s, voor het Markermeer van 50 m³/s. Hierbij zijn we voor het Markermeer uitgegaan van handhaving van de huidige spuicapaciteit. Omdat in fase 1 is gebleken dat de capaciteit van de spuisluizen van het Markermeer van weinig invloed is op de meerpeilen en omdat de spuisluizen daar technisch nog niet zijn afgeschreven² was het niet zinvol om met varianten in de spuicapaciteit voor het Markermeer te werken. Voor het IJsselmeer hebben we dat wel gedaan, er is gerekend met 50%, 100% en 200% van de huidige spuicapaciteit.

¹ Er is alleen een aanslagpeil gehanteerd, geen afslagpeil. Omdat bij de DEZY berekeningen een tijdstap van 4 uur is gebruikt worden bij overschrijding van het aanslagpeil de pompen steeds voor 4 uur ingeschakeld.

² De sluisen in de Houtribdijk stammen uit 1976 en kunnen naar verwachting minimaal 100 jaar functioneren. Ter vergelijking: de uit 1932 stammende spuisluizen in de Afsluitdijk kunnen, na renovatie, nog mee tot 2050.

De benodigde pompcapaciteit voor het Markermeer bleek in bijna alle situaties uit te komen op 100 m³/s (in enkele gevallen werd 50 m³/s berekend). Bij een stapgrootte van 50 m³/s in de iteratie leiden de strategieën dus niet tot duidelijke verschillen in de benodigde pompcapaciteit. Voor het IJsselmeer varieerden de berekende pompcapaciteiten echter sterk tussen de strategieën en de peiljaren. Bijlage D geeft weer welke pompcapaciteiten berekend zijn, hoeveel procent van de tijd de pompen moeten draaien in de winter en hoeveel water met de pompen wordt afgevoerd¹. De waarden worden enigszins beïnvloed door de waterafvoer van het Markermeer (peilbeheer en pompcapaciteit op de Houtribdijk). Er is bij iedere strategie voor het IJsselmeer gerekend met de daarbij het best aansluitende strategie voor het Markermeer. De invloed van de strategie van het Markermeer op die van het IJsselmeer is echter klein: kleiner dan de invloed van het gekozen aanslagpeil.

Benodigde pompcapaciteit

Tabel 4.1 geeft een uitsnede van de resultaten van de iteratieve berekeningen voor het IJsselmeer: de pompcapaciteiten en pompduren in de drie peiljaren, bij de huidige spuicapaciteit.

Strategie	2075		2125		2175	
	Pompcapaciteit (m ³ /sec)	Pompduur winter	Pompcapaciteit (m ³ /sec)	Pompduur winter	Pompcapaciteit (m ³ /sec)	Pompduur winter
1a	1700	38%	2700	31%	3200	29%
1b	800	68%	1000	76%	1100	75%
2a	1400	36%	2300	34%	3000	29%
2b	600	64%	900	76%	1100	71%
3a	1400	36%	2100	34%	2700	31%
3b	600	64%	900	70%	1000	74%

Tabel 4.1 Berekende pompcapaciteit en pompduur voor de verschillende strategieën voor het IJsselmeer in de drie peiljaren (bij de huidige spuicapaciteit).

Uit de tabel blijkt dat in de a-strategieën (meerpeilpiek met een herhalingstijd van 100.000 jaar wordt gelijk gehouden t.o.v. het gemiddeld meerpeil) meer dan tweemaal de pompcapaciteit van de b-strategieën nodig is (meerpeilpieken met een herhalingstijd van 1 jaar wordt gelijk gehouden t.o.v. het gemiddeld meerpeil). Omdat de pompcapaciteit in de a-strategieën afgestemd is op situaties die slechts zeer zelden voorkomen (1:100.000 jaar) is het logisch dat de pompen gemiddeld minder draaiuren hoeven te maken dan in de b-strategieën.

Als gevolg van de klimaatverandering neemt de benodigde pompcapaciteit toe in de loop der tijd. Uit de berekeningen in fase 1 is gebleken dat de stijging van de zeespiegel (waardoor de spuumogelijkheden afnemen) daarvan de belangrijkste oorzaak is. Daarnaast speelt het grotere wateraanbod in pieksituaties een rol, veroorzaakt door grotere pieken in de IJsselafvoer en de neerslag.

De strategieën met peilstijging (2 en 3) "lopen achter" op strategie 1. De spuumogelijkheden worden namelijk bepaald door de relatieve zeespiegelstijging: de zeespie-

¹ De hoeveelheid water is berekend door de lengte van de winterperiode (in seconden) te vermenigvuldigen met de pompcapaciteit en het percentage van de tijd dat de pompen draaien. Daarbij is er geen rekening mee gehouden dat de feitelijke pompcapaciteit daalt als het water hoger moet worden opgepompt.

gelstijging t.o.v. het winterpeil van het IJsselmeer. Voor 2175 is uitgegaan van een zeespiegelstijging van 175 cm. In strategie 3 is in 2175 het gemiddeld meerpeil gestegen met 60 cm en is de relatieve zeespiegelstijging dus 115 cm. Dit is gelijk aan de relatieve zeespiegelstijging van strategie 1 in 2125. In de tabel is dan ook te zien dat de pompcapaciteiten en -duren voor strategie 3 in 2175 vrijwel gelijk zijn aan die van strategie 1 in 2125.

Omdat in het klimaatscenario voor 2175 er al nauwelijks meer gespuid kan worden zouden berekeningen met nog verdergaande klimaatverandering niet meer leiden tot grote toename van de benodigde pompcapaciteit in strategie 1. Dit betekent dat voor de lange termijn, afhankelijk van de keuze voor een a of b strategie, de benodigde pompcapaciteit voor het IJsselmeer globaal tussen de 1100 en 3200 m³/s zal liggen. Dit geldt ook voor de strategieën met stijgend IJsselmeerpeil, alleen duurt het in die strategieën langer totdat deze capaciteiten benodigd zijn. De voor het Markermeer berekende pompcapaciteit van 100 m³/s is veel kleiner dan die voor het IJsselmeer. Dit komt omdat de wateraanvoer naar het Markermeer veel geringer is.

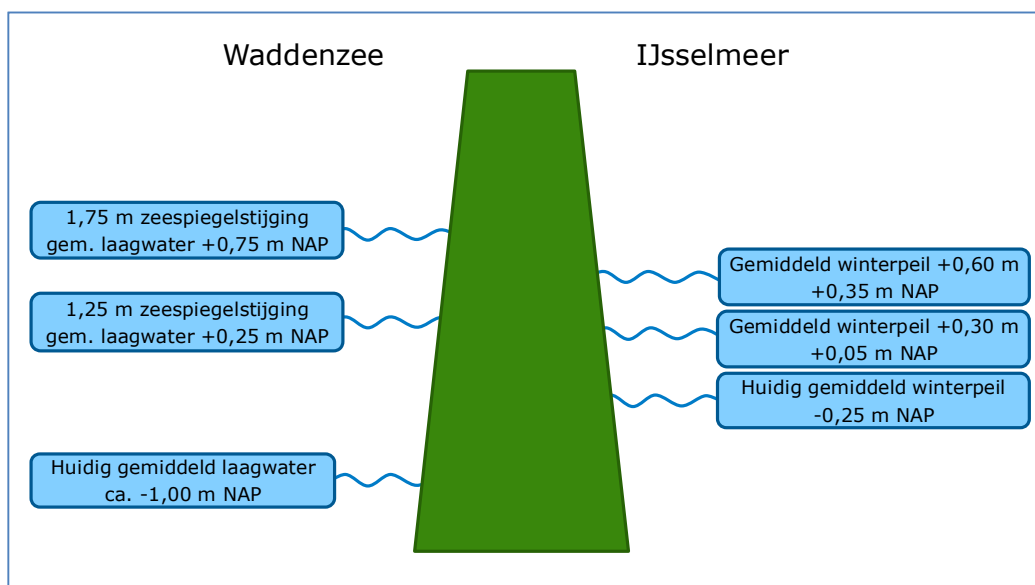
Met DEZY hebben we de functioneel benodigde pompcapaciteiten berekend, zonder rekening te houden met het niet beschikbaar zijn van pompen door beheer en onderhoud. Zeker in de b-strategieën, waarin de pompen rond de 70% van het winterseizoen draaien, zou dit kunnen betekenen dat meer pompcapaciteit geïnstalleerd moet worden om de beschikbaarheid van de berekende capaciteit te kunnen garanderen. Bij de kostenberekeningen is daar rekening mee gehouden.

Effect van spuicapaciteit bij veranderend klimaat

Tabel 4.2 (eveneens een uitsnede van Bijlage D) brengt het effect van de spuicapaciteit op de benodigde pompcapaciteit op de Afsluitdijk en de hoeveelheid water die verpompt wordt in beeld. De tabel geeft de rekenresultaten voor strategie 1 (gelijkblijvend gemiddeld winterpeil) en strategie 3 (toename van het gemiddeld winterpeil met 60 cm tussen 2050 en 2150).

In 2075 geldt dat de pompcapaciteit die nodig is en de hoeveelheid water die verpompt wordt afnemen als de spuicapaciteit toeneemt. Het effect op de verpompte hoeveelheid water neemt af met de (relatieve) zeespiegelstijging¹. Bij een relatieve zeespiegelstijging van 115 cm (strategie 1 in 2125, strategie 3 in 2175) is er vrijwel geen effect meer. Dit komt omdat er dan nauwelijks meer gespuid kan worden: het gemiddeld winterpeil ligt dan onder de gemiddelde laagwaterstand buiten de spuisluisen (zie figuur 4.1). Slechts bij extreem hoge meerpeilen zal er nog gespuid kunnen worden. Dit is de reden dat in de a-strategieën (waar de pompcapaciteit berekend is op het kunnen beheersen van extreme meerpeilen) vergroting van de spuicapaciteit ook in 2175 nog invloed heeft op de benodigde pompcapaciteit. De spui fungeert dan in deze strategieën als een soort noodoverloop. Het effect van spui als noodoverloop blijft bij stijgende zeespiegel dus langer in stand dan het effect op de benodigde inzet van de pompen. Het noodoverloopeffect komt ook tot uiting in de meerpeilstatistiek (zie Figuur 4.5 en de bespreking daarvan in paragraaf 3.2.1).

¹ De relatieve zeespiegelstijging is de zeespiegelstijging minus de stijging van het gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer.



Figuur 4.1 Verhouding van de stijging van het gemiddeld winterpeil in de strategieën en de zeespiegelstijging in het klimaatscenario.

		2075		2125		2175	
Strategie en spui-capaciteit		Pomp-capaciteit (m ³ /sec)	Verpompt water (*10 ⁹ m ³)	Pomp-capaciteit (m ³ /sec)	Verpompt water (*10 ⁹ m ³)	Pomp-capaciteit (m ³ /sec)	Verpompt water (*10 ⁹ m ³)
1a	50%	2700	11,2	3100	13,4	3300	14,3
	100%	1700	10,1	2700	13,3	3200	14,3
	200%	800	7,4	2300	13,2	3100	14,3
1b	50%	900	9,5	1000	12,0	1100	12,9
	100%	800	8,5	1000	11,9	1100	12,9
	200%	600	6,6	1000	11,8	1100	12,9
3a	50%	2500	9,9	2900	12,0	3100	13,1
	100%	1400	7,9	2100	11,4	2700	13,0
	200%	300	2,7	1400	10,1	2300	12,9
3b	50%	800	8,1	900	10,5	1000	11,8
	100%	600	6,0	900	9,9	1000	11,7
	200%	300	2,7	800	8,9	1000	11,5

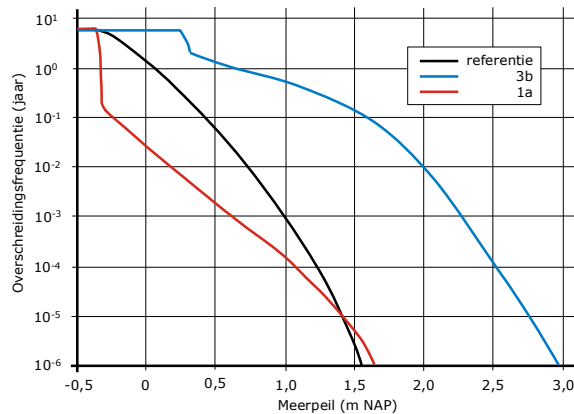
Tabel 4.2 Effect van spui-capaciteit en klimaatverandering op de benodigde pomp-capaciteit en de verpompte hoeveelheid water per winterseizoen in de strategieën 1 en 3.

4.2 Meerpeilstatistiek

Zowel de strategieën als de klimaatverandering werken door in de meerpeilstatistiek. De DEZY-berekeningen waarmee de benodigde pompcapaciteiten zijn berekend leveren ook frequentielijnen voor de meerpeilen op. Deze frequentielijnen worden hier besproken, in paragraaf 4.2.1 voor het IJsselmeer en paragraaf 4.2.2 voor het Markermeer. Tenzij anders is aangegeven is in de berekeningen uitgegaan van de huidige spuicapaciteit van IJsselmeer en Markermeer. De aangegeven pompcapaciteit is daar dus een aanvulling op.

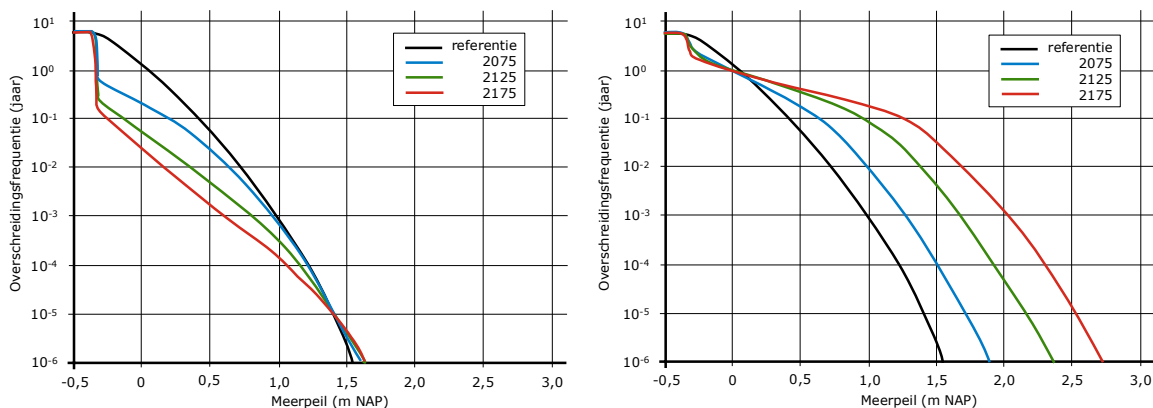
4.2.1 IJsselmeer

Figuur 4.2 geeft de bandbreedte weer van de meerpeilstatistiek van het IJsselmeer in 2175. De band wordt begrensd door de frequentielijn van de strategie met de laagste meerpeilpieken (1a) en die met de hoogste meerpeilpieken (3b). De grafiek laat zien dat bij de verschillende strategieën de meerpeilpieken ca. 1-2 meter in hoogte kunnen verschillen (afhankelijk van de overschrijdingsfrequentie). De strategiekeuze is dus van grote invloed op de peildynamiek van het IJsselmeer.



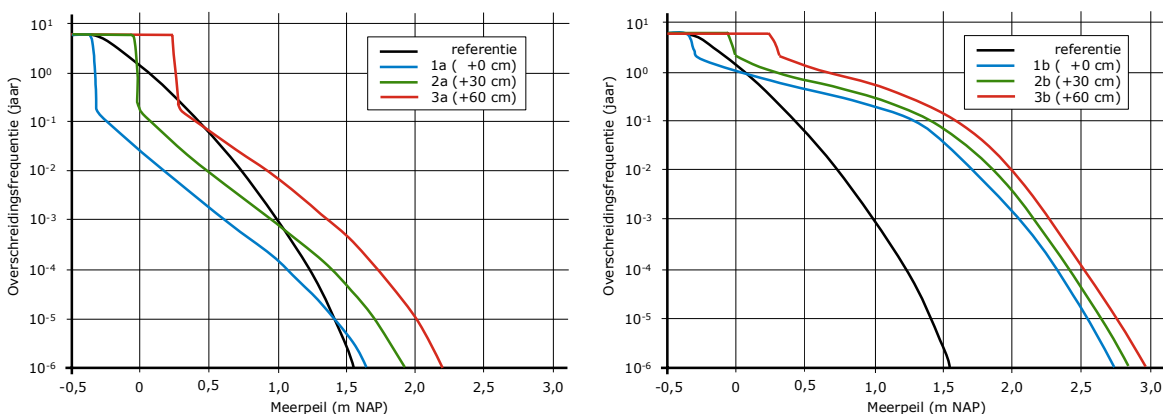
Figuur 4.2 Bandbreedte van de meerpeilstatistiek voor het IJsselmeer in 2175, bepaald door de strategie met de hoogste meerpeilpieken (3b) en de strategie met de laagste meerpeilpieken (1a). De referentie is de statistiek in peiljaar 2015.

Figuur 4.3 laat zien hoe de peildynamiek zich in de loop der tijd ontwikkelt, wanneer het gemiddeld winterpeil gelijk wordt gehouden. In strategie 1b (rechts in de figuur) wordt de pompcapaciteit steeds zodanig gekozen dat de hoogte van de pieken met een herhalingsstijd van 1 jaar gelijk worden gehouden aan de referentiesituatie. In deze strategieën nemen de extremere (minder vaak voorkomende) pieken in de loop der tijd in hoogte toe door de klimaatverandering, terwijl het gemiddeld winterpeil gelijk blijft. In strategie 1a wordt de pompcapaciteit zo gekozen dat de extreme pieken (1:100.000) in hoogte gelijk blijven. De pompcapaciteit is dan zo groot dat de frequenter optredende (lagere) pieken in hoogte afnemen. Ook wanneer het gemiddeld winterpeil gelijk gehouden wordt kunnen er dus, afhankelijk van de geïnstalleerde pompcapaciteit, forse verschillen optreden in de pieken die in de meerpeilen optreden.



Figuur 4.3 Frequentielijnen van het IJsselmeer in de strategieën met gelijkblijvend gemiddeld winterpeil in de drie peiljaren (uitgaande van de huidige spuicapaciteit). Links strategie 1 a (pompcapaciteit berekend op het gelijk houden van de 1:100.000 pieken), rechts strategie 1 b (pompcapaciteit berekend op gelijk houden van de 1:1 pieken). De referentie is de statistiek in peiljaar 2015.

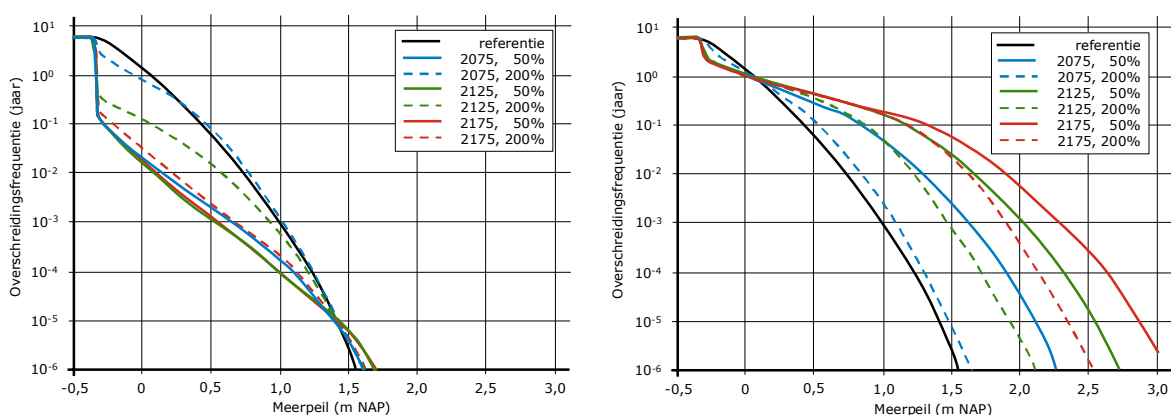
Figuur 4.4 brengt het effect van stijging van het gemiddeld winterpeil in beeld. De figuur geeft de frequentielijnen voor het jaar 2175. In de a-strategieën stijgen de meerpeilpieken ongeveer evenveel als het gemiddeld winterpeil. In de b-strategieën stijgen de pieken met minder dan de helft van de winterpeilstijging. Het valt op dat de keuze voor pompcapaciteit volgens de a of b strategie een grotere invloed heeft op de frequentielijn dan een stijging van het gemiddeld winterpeil met 30 of 60 cm.



Figuur 4.4 Frequentielijnen van het IJsselmeer in 2175 bij verschillende mate van stijging van het gemiddeld winterpeil. Links de a-varianten (pompcapaciteit berekend op het gelijk houden van de 1:100.000 pieken t.o.v. het gemiddeld winterpeil), rechts de b-varianten (pompcapaciteit berekend op gelijk houden van de 1:1 pieken t.o.v. het gemiddeld winterpeil). De referentie is de statistiek in peiljaar 2015.

Figuur 4.5 laat het effect van de spuicapaciteit op de meerpeilstatistiek zien. De figuur geeft de frequentielijnen bij gelijkblijvend gemiddeld winterpeil weer, links strategie 1a en rechts strategie 1b. In strategie 1b nemen de pieken met een overschrijdingskans van 1:100.000 toe met de zeespiegelstijging. Deze toename wordt

kleiner bij grotere spuicapaciteit. In de vorige paragraaf is dit het noodoverloopeffect genoemd. Het effect van de spuicapaciteit is kleiner bij de lagere pieken. In strategie 1a worden de 1:100.000 pieken worden door de spuicapaciteit niet beïnvloed, omdat grotere spuicapaciteit leidt tot verminderde pompcapaciteit. Te zien is hoe de in de tijd toenemende pompcapaciteit leidt tot verlaging van de pieken met een grotere overschrijdingskans. Grotere spuicapaciteit leidt aanvankelijk tot een nog verdere verlaging van deze pieken, maar dat effect neemt af met de zeespiegelstijging. In de strategieën met een stijgend gemiddeld winterpeil (niet afgebeeld) verloopt het effect van de zeespiegelstijging uiteraard trager, doordat de spuimogelijkheden afnemen met de *relatieve* zeespiegelstijging (zeespiegelstijging minus meerpeilstijging: zie paragraaf 4.1).

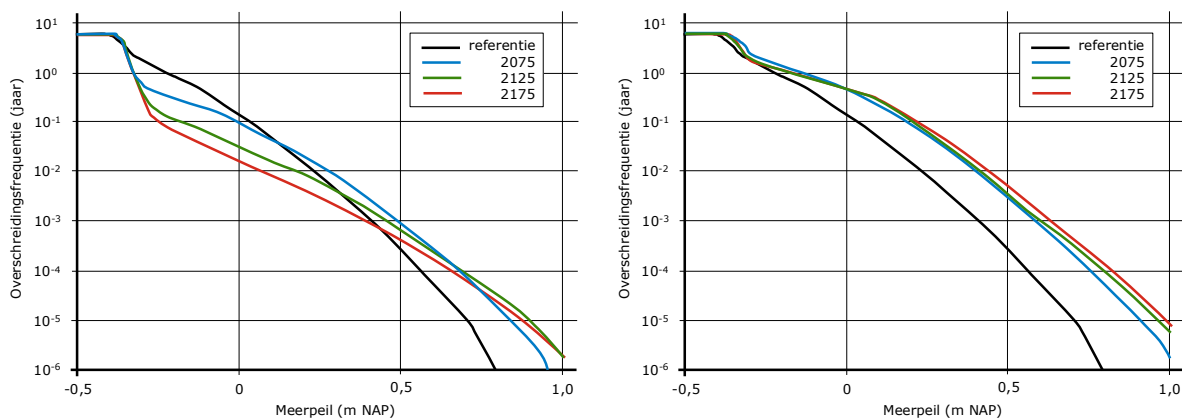


Figuur 4.5 Frequentielijnen van het IJsselmeer bij 50% en 200% van de huidige spuicapaciteit bij gelijkblijvend gemiddeld winterpeil. Links strategie 1a (pompcapaciteit berekend op het gelijk houden van de 1:100.000 pieken t.o.v. het gemiddeld winterpeil), rechts strategie 1b (pompcapaciteit berekend op gelijk houden van de 1:1 pieken t.o.v. het gemiddeld winterpeil). De referentie is de statistiek in peiljaar 2015.

4.2.2

Markermeer

De spuimogelijkheden van het Markermeer zijn afhankelijk van de strategie die voor het IJsselmeer wordt gekozen. In de strategieën waarin het gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer stijgt, zal dat van het Markermeer daarom ook stijgen. Dit past niet binnen de gekozen strategieën. Bij het doorrekenen van situaties voor het Markermeer waarin alleen gespuid kan worden zijn daarom alleen combinaties doorge-rekend waarin het gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer gelijk blijft (strategie 1a en 1b).

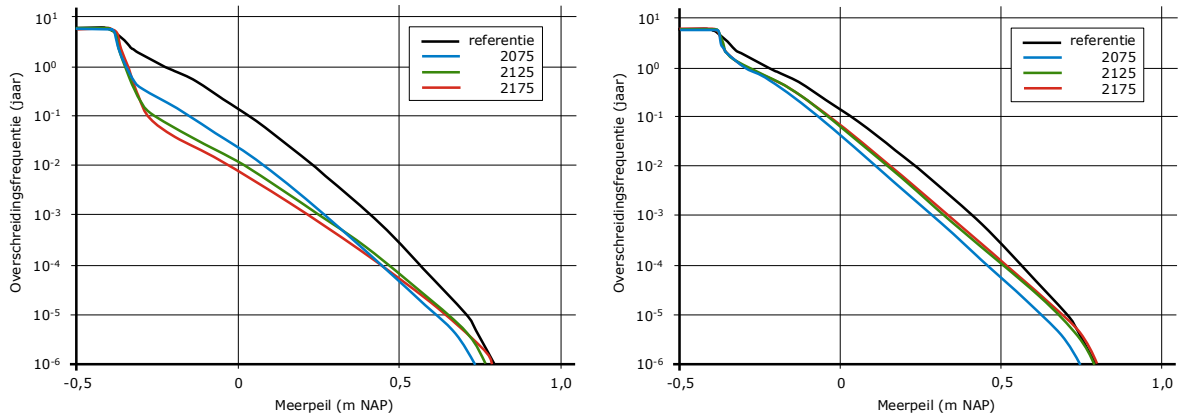


Figuur 4.6 Frequentielijnen van het Markermeer wanneer waterafvoer alleen door spuien plaatsvindt. Links bij IJsselmeerstrategie 1a (1:100.000 pieken worden gelijk gehouden) en rechts voor IJsselmeerstrategie 1b (1:1 pieken worden gelijk gehouden).

Figuur 4.6 laat de berekende frequentielijnen zien. De rechter grafiek toont het effect van IJsselmeerstrategie 1b (waarin de pieken met overschrijdingskans van 1:1 jaar gelijk blijven) op het Markermeer. Bij alle overschrijdingskansen nemen de meerpeilpieken in hoogte toe. Dit is in lijn met de resultaten voor het IJsselmeer (zie Figuur 4.3). De linker figuur laat het effect van IJsselmeerstrategie 1a zien (de strategie waarin de pieken met een overschrijdingskans van 1:100.000 gelijk worden gehouden). Uit de grafiek blijkt dat de lagere pieken op het Markermeer (die met een hogere frequentie) in de loop der tijd steeds verder afnemen. Dit correspondeert met het verloop van de frequentielijnen van het IJsselmeer voor strategie 1a (zie Figuur 4.3). Opvallend is echter dat de hogere (minder frequent optredende) pieken in hoogte toenemen. Dit is logisch te verklaren. Deze pieken worden bepaald door hoge wateraanvoer naar het Markermeer, in perioden dat er niet gespuid kan worden op het IJsselmeer. Door de klimaatverandering neemt de kans daarop toe en kan daardoor op het Markermeer een hogere piek ontstaan.

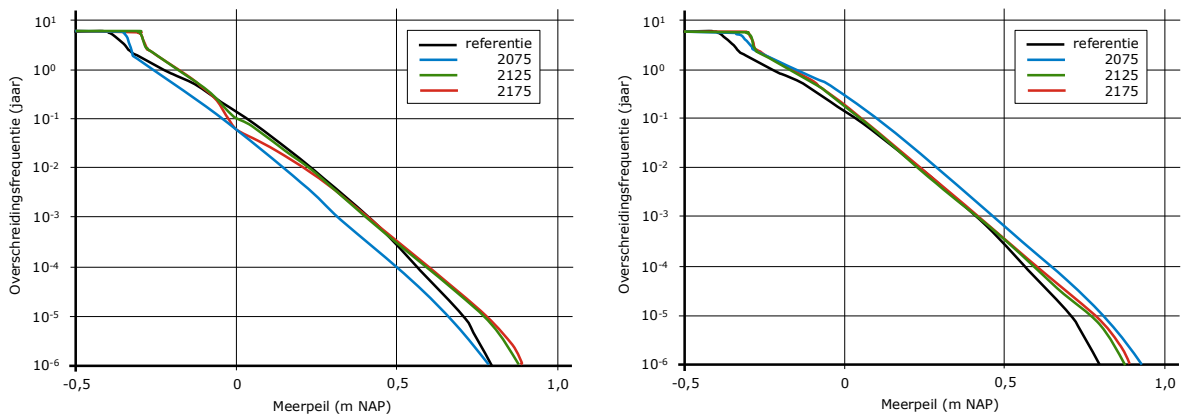
De figuur laat dus zien dat zonder pompen klimaatverandering voor het Markermeer altijd leidt tot verandering in de peildynamiek, waarbij in ieder geval de pieken met een kleinere overschrijdingskans in hoogte zullen toenemen.

Figuur 4.7 laat de frequentielijnen zien bij gelijkblijvend gemiddeld winterpeil en installatie van 100 m³/s pompcapaciteit (in aanvulling op de spuicapaciteit). Met deze pompcapaciteit kunnen, bij gelijkblijvend gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer, de pieken bij alle overschrijdingsfrequenties onder de huidige hoogtes gehouden worden. Dit geldt ook wanneer op het IJsselmeer de pieken in hoogte toenemen (strategie 1b, de rechter grafiek in Figuur 4.7).



Figuur 4.7 Frequentielijnen van het Markermeer bij gelijk blijvend gemiddeld winterpeil en 100 m³/s pompcapaciteit in aanvulling op de spuicapaciteit. Links bij IJsselmeerstrategie 1a (1:100.000 pieken worden gelijk gehouden) en rechts voor IJsselmeerstrategie 1b (1:1 pieken worden gelijk gehouden).

Figuur 4.8 toont de frequentielijnen voor het Markermeer bij een stijging van het gemiddeld winterpeil met 8 cm en de inzet van pompen in aanvulling op de spui-mogelijkheden. De lijnen zijn berekend in een situatie met stijgend gemiddeld winterpeil van het IJsselmeer (strategie 2a en 2b). In deze situaties kunnen de meerpeilpieken van het Markermeer vrijwel op het huidige niveau gehouden worden met een pompcapaciteit van 100 m³/s. (In de rechter grafiek nemen in 2075 de pieken iets in hoogte toe. Dit komt omdat voor die situatie gerekend is met 50 m³/s, het resultaat van het beschreven iteratieproces).

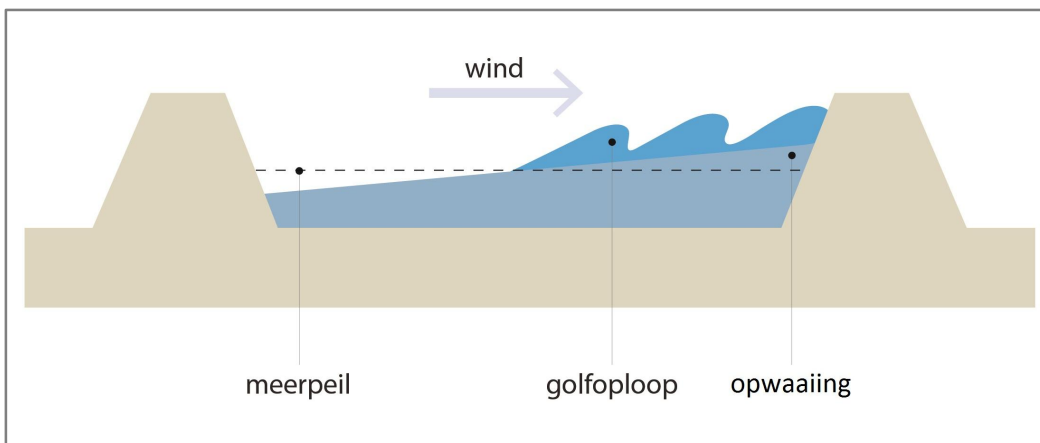


Figuur 4.8 Frequentielijnen van het Markermeer bij 8 cm stijging van het gemiddeld winterpeil en pompcapaciteit in aanvulling op de spuicapaciteit (pompcapaciteit 100 m³/s, alleen in 2075 in de rechtergrafiek 50 m³/s). Links bij IJsselmeerstrategie 2a (30 cm stijging gemiddeld winterpeil, 1:100.000 pieken worden gelijk gehouden) en rechts voor IJsselmeerstrategie 2b (30 cm stijging gemiddeld winterpeil, 1:1 pieken worden gelijk gehouden).

4.3

Dijkbelasting

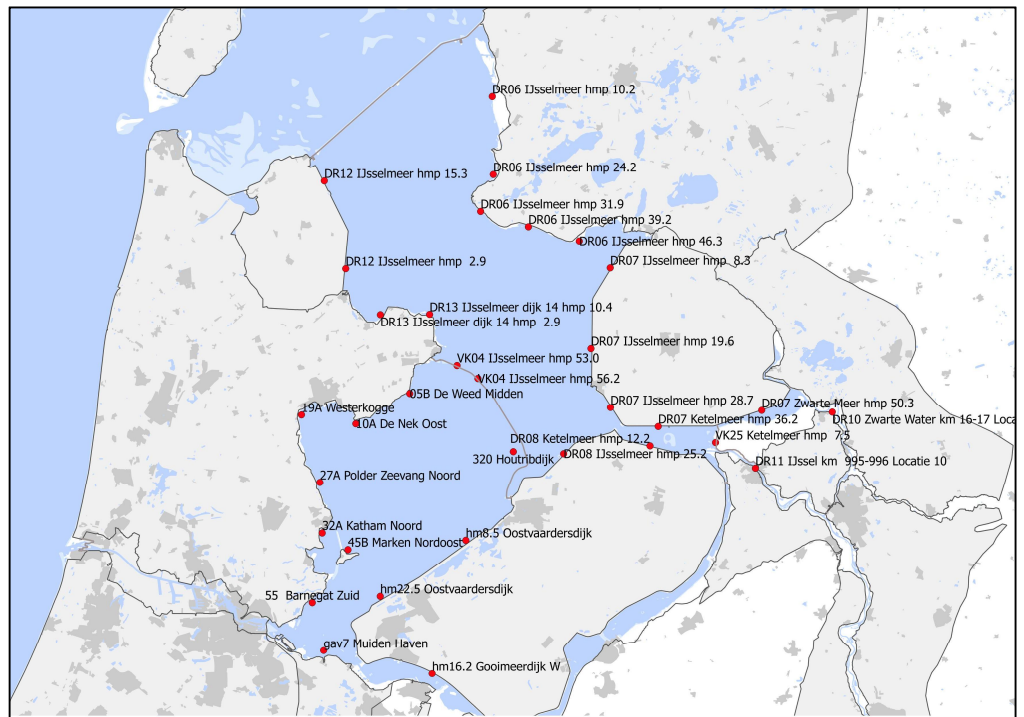
In de vorige paragraaf is het effect van de strategieën op de meerpeilen besproken. Het meerpeil is de ruimtelijk gemiddelde waterstand van een meer. Voor een dijklocatie is echter niet de gemiddelde waterstand van belang, maar de lokale waterstand. Als er geen wind is, is de lokale waterstand gelijk aan het meerpeil. Wind drijft het water echter op, waardoor het wateroppervlak scheef komt te staan. Bij wind is de lokale waterstand daarom het meerpeil plus de opwaaiing. Wind veroorzaakt daarnaast ook golven. Als golven in de richting van dijk bewegen, lopen ze tegen het dijktafval op. De helling en de ruwheid van het talud bepalen hoever een bepaald type golf kan oplopen. De totale hydraulische belasting van dijken is de som van meerpeil, opwaaiing en golfoploop (zie Figuur 4.9).



Figuur 4.9 De hydraulische belasting van meerdijken bestaat uit het gecombineerde effect van meerpeil, opwaaiing en golfoploop.

Met het model Hydra-zoet zijn, uitgaande van de meerpeilstatistiek en gegevens van de dijken, de statistiek van de lokale waterstanden en de hydraulische belastingniveaus berekend voor 33 locaties rond IJsselmeer, Markermeer en in de IJssel-Vechtdelta. Samen geven de locaties een representatief beeld van het effect van de strategieën op de dijkbelasting in het gebied. Figuur 4.10 geeft de locaties weer. De berekeningen zijn uitgevoerd voor minder varianten dan de DEZY berekeningen: er is gekozen voor 7 combinaties van strategieën van het IJsselmeer en Markermeer (zie Bijlage E).

Bijlage F geeft de rekenresultaten voor zes verschillende strategieën voor de locaties langs IJsselmeer en Ketelmeer weer, voor het jaar 2175 (de zevende strategie die is doorgerekend, met dubbele spuicapaciteit, is hier niet meegenomen). Het gaat om de lokale waterstanden bij de overschrijdingskansen 1:10 en 1:100.000 en de HBN's bij een overschrijdingskans van 1:100.000. Deze waarden vormen als het ware de hoekpunten van de range van relevante hydraulische belastingen gegeven de maximaal toelaatbare overstromingskansen die gelden voor de trajecten gelegen aan het IJssel- en Markermeer. Deze lopen van 1:100 per jaar voor Marken en IJburg tot 1:10.000 per jaar voor Flevoland. Doordat voor ieder traject verschillende faalmechanismen van belang zijn zoals overloop, overslag en macro stabiliteit waar de toegestane kans "over moet worden verdeeld" en er rekening moet worden gehouden met de lengte van een traject via het zogenaamde lengte-effect gaat het om belastingen die mogen voorkomen met een aanzienlijk kleinere kans. Vandaar dat ook is gekozen om te kijken naar de waterstanden en HBN met een overschrijdingsfrequentie van 1:100.000 per jaar.



Figuur 4.10 Dijklocaties waarvoor berekeningen van de hydraulische belasting zijn uitgevoerd.

De HBN's zijn berekend bij een toegestaan overslagdebiet van 5 l/m/s (zie het tekstkader over de invloed van het overslagdebiet). In de tabel zijn per strategie ook de over de locaties gemiddelde waarden weergegeven. Omdat de waarden tussen locaties sterk uiteenlopen hebben deze gemiddelde waarden in zichzelf weinig betekenis. Ze geven echter wel inzicht in het effect van de strategieën op de dijkbelasting. Bij de bespreking in dit hoofdstuk wordt daarom uitgegaan van de *verschillen* tussen de gemiddelde waarden voor de strategieën. Paragraaf 4.3.1 bespreekt het effect van de pomp- en spuicapaciteit op de Afsluitdijk en paragraaf 4.3.2 het effect van stijging van het gemiddeld winterpeil.

Effect overslagdebiet op hydraulisch belastingniveau

Tot nu toe wordt bij de bepaling van het hydraulisch belastingniveau (HBN) van de meerdijken gerekend met een vast toegestaan overslagdebiet van 1 l/m/s. In het nieuwe ontwerpinstrumentarium mag gerekend worden met waarden tussen de 1 en 10 l/m/s, afhankelijk van de conditie van de dijk. In deze studie is gerekend met drie overslagdebieten: 1, 5 en 10 l/m/s. Deze berekeningen geven inzicht in het effect van het overslagdebiet op het HBN. Het HBN is een indicator voor het effect op de benodigde dijkhoogte.

Voor een korte analyse van het effect van de keuze van het overslagdebiet is gekeken naar het jaar 2175 en het HBN dat een overschrijdingskans van 1:100.000 jaar heeft. Voor het IJsselmeer (inclusief Ketelmeer) blijkt (gemiddeld over alle strategieën en locaties) een toename van 1 naar 5 l/m/s het HBN met 76 cm te verlagen en een verdere toename naar 10 l/m/s geeft nog eens 33 cm verlaging. Op het Markermeer (incl. Gooimeer) is de verlaging resp. 52 en 22 cm. Daarbij moet in gedachten worden gehouden dat de HBN's op het Markermeer gemiddeld beduidend lager zijn dan die op het IJsselmeer.

Er is sprake van grote verschillen tussen locaties. De gemiddelde verlaging van het HBN op het IJsselmeer is 109 cm bij een toename van het toegestane overslagdebiet van 1 naar 10 l/m/s. De waarden lopen voor de onderzochte locaties uiteen van 36 tot 182 cm (nog steeds gemiddeld over de strategieën). Op het Markermeer (gemiddeld 74 cm verlaging) lopen de waarden voor de onderzochte locaties uiteen van 8 tot 214 cm. De 214 cm is voor locatie 320, in de bocht van de Houtribdijk bij Lelystad.

Het effect van het overslagdebiet op het HBN is het grootst op de plekken met grote scheefstand en golfbelasting, minder op plekken waar we veel scheefstand is maar de golfbelasting beperkt en het kleinst op de zg. peilgedomineerde locaties: plaatsen waar scheefstand en golfbelasting een kleine bijdrage geven aan het HBN. Het effect van golven en scheefstand wordt geïllustreerd door de extreme verandering in het HBN op de locatie in de bocht van de Houtribdijk. Hier spelen scheefstand en golven een grote rol.

4.3.1 *Effect van pompcapaciteit Afsluitdijk op dijkbelasting*

Tabel 4.3 geeft het effect van pompcapaciteit op de waterstanden en HBN's weer. De tabel toont de *verschillen* tussen de gemiddelde waarden voor de a-strategie (hoge pompcapaciteit) en b-strategie (lage pompcapaciteit), bij gelijkblijvend en stijgend gemiddeld winterpeil. Daarnaast zijn de minimale en maximale waarde van het verschil opgenomen, om een beeld te krijgen van de spreiding van de verschillen. Ter vergelijking zijn ook de verschillen in meerpeilen met een overschrijdingsfrequentie van 1:10 en 1:100.000 jaar weergegeven.

Uit de tabel blijkt dat, gemiddeld over de locaties, het effect van de pompcapaciteit groot is. Bij gelijkblijvend winterpeil leidt het verschil tussen de a en b variant tot een verschil in lokale waterstand (bij een overschrijdingskans van 1:10 jaar) en het HBN (bij een overschrijdingskans van 1:100.000 jaar) van ruim een meter. Het verschil neemt af bij stijgend gemiddeld winterpeil (strategie 2 en 3). Bij de lokale waterstanden blijkt het verschil bij een grotere overschrijdingskans ook af te nemen. De keuze voor de a of b variant van een strategie heeft dus flinke gevolgen heeft voor de dijkbelastingen.

De tabel laat zien dat er grote verschillen zijn tussen locaties in het effect van de pompcapaciteit. Als locaties uit Bijlage F nader worden geanalyseerd blijkt dat de pompcapaciteit het grootste effect op het HBN heeft op locaties waar scheefstand of

golfbelasting geen grote rol spelen (zie ook Figuur 4.11). Op deze locaties wordt het HBN sterk bepaald door de meerpeilen¹. In de spreiding van het effect op de lokale waterstand is geen duidelijk patroon te herkennen.

Verschil tussen strategie:		Meerpeil (m)		Waterstand (m)		HBN (bij 5 l/m/s)
		1:10	1:100.000	1:10	1:100.000	1:100.000
		gem.	max.	min.	gem.	max.
1b en 1a	gem.	1,46	1,26	1,09	0,57	0,99
	max.	-	-	1,39	0,79	1,65
	min.	-	-	0,63	0,24	0,25
2b en 2a	gem.	1,35	0,99	0,97	0,40	0,79
	max.	-	-	1,25	0,57	1,35
	min.	-	-	0,54	0,25	0,21
3b en 3a	gem.	1,17	0,85	0,85	0,27	0,61
	max.	-	-	1,10	0,41	1,04
	min.	-	-	0,48	0,14	0,21

Tabel 4.3 Overzicht van de verschillen in meerpeilen, lokale waterstanden en hydraulische belastingniveaus in 2175 tussen strategieën met een grote (a) en een beperkte (b) pompcapaciteit. Naast de over alle locaties gemiddelde waarden worden de waarden voor de locaties met het grootste (max.) en het kleinste (min.) effect gepresenteerd.

4.3.2 Effect van peilstijging op dijkbelasting

Tabel 4.4 laat zien wat peilstijging betekent voor de dijkbelasting in 2175. Net als in Tabel 4.3 zijn de verschillen tussen de gemiddelde waarden voor strategieën weergegeven. Strategie 1 heeft geen stijging van het gemiddeld winterpeil, strategie 2 30 cm en strategie 3 60 cm. Daarnaast zijn de minimale en maximale waarde van het verschil opgenomen, om een beeld te krijgen van de spreiding van de verschillen. Ter vergelijking zijn ook de verschillen in meerpeilen met een overschrijdingsfrequentie van 1:10 en 1:100.000 jaar weergegeven.

In de a-strategieën (grote pompcapaciteit) stijgen de HBN's en lokale waterstanden ruwweg evenveel als het gemiddeld winterpeil. In de b-strategieën (beperkte pompcapaciteit) is de toename maar ongeveer de helft van de stijging van het gemiddeld winterpeil. Dit laat zich verklaren uit de meerpeilstatistiek, waarin dit effect ook al zichtbaar is (zie naast de waarden in de tabel ook Figuur 4.4).

De verschillen tussen locaties zijn beperkt. Het HBN wordt het sterkst door de peilstijging beïnvloed op plaatsen waar de golfbelasting van de dijken hoog is. Vermoedelijk komt dit doordat er bij een hoger meerpeil hogere golven ontstaan. Bij de lokale waterstanden (met een overschrijdingskans van 1:100.000 jaar) blijkt de spreiding van het effect van peilstijging in de b-strategieën anders te zijn dan in de a-strategieën. In de b-strategieën heeft peilstijging het grootste effect op de zog. peilgedomineerde locaties: locaties waar scheefstand een beperkte rol speelt. In de a-strategieën blijkt daar het effect van peilstijging juist het kleinste te zijn. Het effect van de pompstrategie overheerst dus het effect van de peilstijging. Bij de lokale

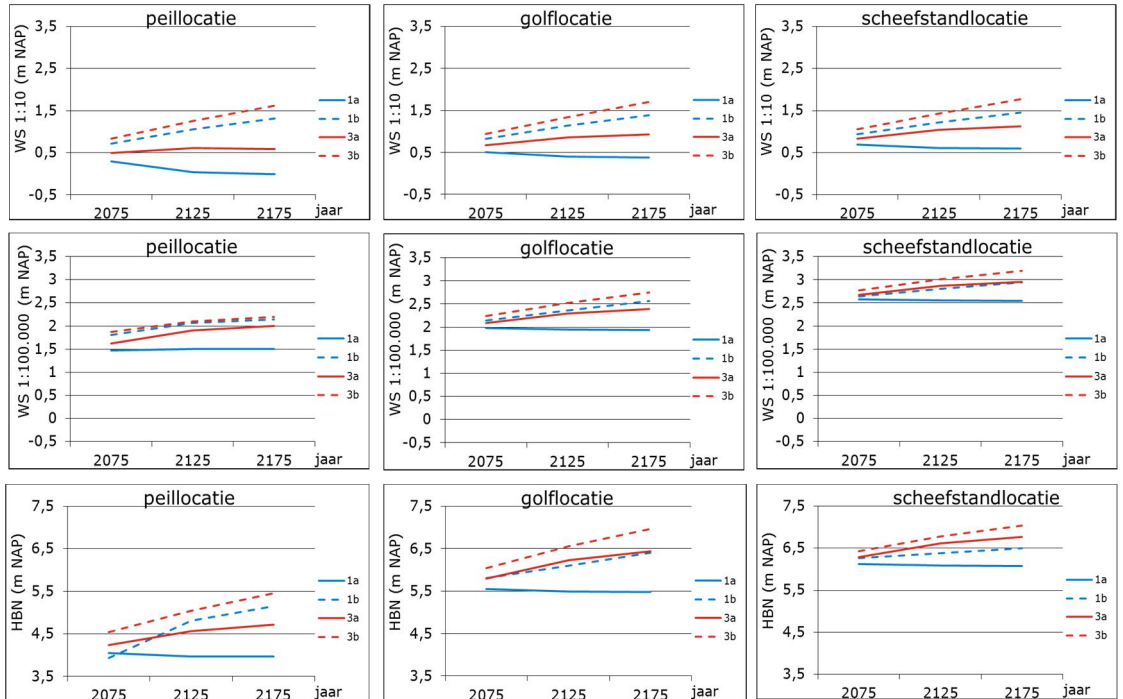
¹ In het rapport van fase 1 (Rommelzwaal et al, 2015) wordt een overzicht gegeven van de bijdrage van meerpeil, scheefstand en golfloop aan het HBN. Bij de hier geanalyseerde locaties zijn gaat het in het IJsselmeer o.m. om de zuid-westkust van Friesland, de dijk van de Wieringermeer en de westelijke locaties aan de IJsselmeerzijde van de Houtribdijk.

waterstanden met een overschrijdingskans van 1:10 jaar is er geen duidelijk patroon in de locatieverschillen te zien.

Figuur 4.11 geeft ter illustratie de ontwikkeling van lokale waterstanden en HBN's op drie locaties: een locatie met weinig windbelasting, een locatie met veel scheefstand, maar een beperkte golfbelasting en een locatie met grote golfbelasting. Bij het bekijken van de figuur moet er rekening mee worden gehouden dat het HBN niet alleen wordt bepaald door de belasting van de dijk, maar ook door dijkenschappen als taludhoek en ruwheid van de bekleding.

Verschil tussen strategie:	Verschil gem. winterpeil		Meerpeil		Waterstand		HBN (5 l/m/s)
			1:10	1:100.000	1:10	1:100.000	1:100.000
2a en 1a	30 cm	gem.	0,26	0,35	0,26	0,23	0,35
		max.	-	-	0,28	0,27	0,50
		min.	-	-	0,24	0,10	0,16
2b en 1b	30 cm	gem.	0,15	0,08	0,14	0,06	0,16
		max.	-	-	0,17	0,11	0,30
		min.	-	-	0,14	0,02	0,06
3a en 1a	60 cm	gem.	0,63	0,62	0,56	0,44	0,73
		max.	-	-	0,61	0,51	1,01
		min.	-	-	0,52	0,20	0,33
3b en 1b	60 cm	gem.	0,34	0,21	0,32	0,14	0,35
		max.	-	-	0,37	0,25	0,66
		min.	-	-	0,31	0,04	0,15

Tabel 4.4 Overzicht van de *verschillen* in meerpeilen, lokale waterstanden en hydraulische belastingniveaus in 2175 tussen strategieën met en zonder peilstijging. Naast de over alle locaties gemiddelde waarden worden de waarden voor de locaties met het grootste (max.) en het kleinste (min.) effect gepresenteerd.



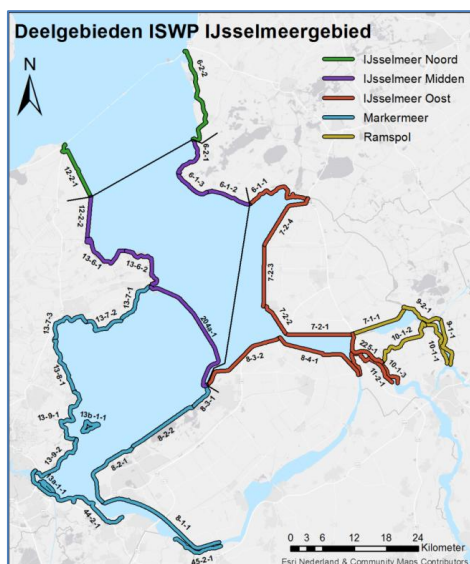
Figuur 4.11 Effect van peilstijging en pompcapaciteit op lokale waterstanden en HBN's op drie locaties: een peilgedomineerde locatie (DR12 IJsselmeer hmp 2,9), een golfgedomineerde locatie (DR07 IJsselmeer hmp 19,6) en een scheefstandgedomineerde locatie (DR07 Ketelmeer hmp 36,2).

4.4 Benodigde dijkversterkingen

Op basis van de berekende hydraulische belastingen en gegevens van de dijken en de ondergrond hebben we geanalyseerd welke dijkversterkingen in de toekomst noodzakelijk zijn in de verschillende strategieën. Hiervoor zijn de dijken in het studiegebied ingedeeld in 38 trajecten. We gaan uit van dijkversterkingen in 2025, 2075 en 2125. Met de laatste versterking zijn de dijken op orde tot 2175. Bij het analyseren van de benodigde dijkversterkingen is gekeken naar drie faalmechanismen van de dijken: overloop en overslag, piping en macrostabiliteit binnenwaarts (Houtribdijk alleen overloop en overslag). De methode waarmee de versterkingsopgaven zijn bepaald is beschreven in Bijlage B. In deze fase is bij de kosten nog geen rekening gehouden met de kosten van aanpassing van de dijkbekleding en bij het versterken van kunstwerken in de keringen.

Tabel 4.5 geeft een overzicht van de berekende versterkingsopgaven in vijf deelgebieden¹. Figuur 4.12 brengt deze deelgebieden in beeld. Het gaat in Tabel 4.5 om de totale opgave in de periode 2025 t/m 2125, voor drie faalmechanismen. De opgaven per faalmechanisme worden bij de versterking geïntegreerd in één nieuw ontwerp: zie daarvoor de toelichting in Bijlage C.

De tabel laat zien dat in de deelgebieden van het IJsselmeer de opgaven sterk variëren, zowel tussen de strategieën als tussen de deelgebieden. In de strategieën met hogere meerpeilpieken (b-strategieën) en/of stijging van het gemiddeld winterpeil kunnen de opgaven fors zijn. Om inzicht te krijgen in het effect van pompcapaciteit, spuicapaciteit en stijging van het gemiddeld winterpeil zijn in Tabel 4.6 voor de deelgebieden van het IJsselmeer de verschillen weergegeven tussen de opgaven in de verschillende strategieën. In het Markermeer lopen de opgaven weinig uiteen. Dit komt omdat de strategieën hier maar heel beperkt van elkaar afwijken. Het Markermeer is daarom niet in de verschildtabel opgenomen.



Figuur 4.12 Indeling van het IJsselmeergebied in vijf deelgebieden.

¹ Zoals in Bijlage E is beschreven worden "kleine opgaven" niet meegenomen. Het gaat om de opgaven die volgen uit een berekende faalkans voor waterstanden met een terugkeertijd van groter dan 1/10 per jaar. Verder is de berekende opgave voor het dijktraject Enkhuizen-Amsterdam voor 2025 niet meegenomen. Deze dijk is gedeeltelijk al versterkt en voor de rest is versterking in voorbereiding. Aangenomen is dat deze versterkingen precies voldoende zijn om de dijken tot 2075 aan de norm te laten voldoen.

		Variant						
		1	2	3	4	5	6	7
Strategie IJsselmeer:		1a	1b	2a	2b	3a	3b	3a
Strategie Markermeer:		1b	1a	1a	1a	2a	2a	2a
Hoogte (m)	IJssm. noord	0,00	0,38	0,00	0,48	0,02	0,62	0,04
	IJssm. midden	0,00	0,48	0,09	0,55	0,20	0,64	0,22
	IJssm. oost	0,67	1,23	0,90	1,39	1,22	1,62	1,24
	Ramspol	0,01	0,43	0,08	0,45	0,26	0,47	0,31
	Markermeer	0,26	0,28	0,28	0,29	0,33	0,33	0,33
Macrostabiliteit (m dijkvoetverbreding)	IJssm. noord	0,0	9,0	1,4	9,8	4,6	11,1	5,2
	IJssm. midden	0,0	1,3	0,2	1,6	0,5	2,1	0,6
	IJssm. oost	5,7	8,5	6,4	8,7	7,2	9,8	7,2
	Ramspol	8,1	10,0	8,6	10,1	9,1	10,3	9,3
	Markermeer	5,1	5,2	6,6	6,6	5,5	5,4	5,5
Piping (m dijkvoetverbreding)	IJssm. noord	36,5	87,7	46,2	93,3	60,4	100,7	64,9
	IJssm. midden	7,6	38,5	12,6	41,5	21,0	48,7	24,1
	IJssm. oost	21,4	38,5	25,4	39,4	30,9	42,3	31,1
	Ramspol	43,2	71,9	48,0	73,8	57,4	77,1	59,7
	Markermeer	23,1	23,8	24,0	24,0	24,4	24,3	24,3

Tabel 4.5 De versterkingsopgave per faalmechanisme voor de zeven varianten, gemiddeld per deelgebied, voor de gehele periode 2025 t/m 2125.

IJsselmeer		Effect pompcapaciteit			Effect stijging gem. winterpeil				Effect verdubbeling spui
		1b-1a	2b-2a	3b-3a	2a-1a	2b-1b	3a-1a	3b-1b	3a (2x) - 3a (1x)
Hoogte (m)	IJssm. noord	0,38	0,48	0,60	0,00	0,11	0,02	0,24	0,02
	IJssm. midden	0,48	0,46	0,44	0,09	0,07	0,20	0,16	0,03
	IJssm. oost	0,56	0,49	0,40	0,22	0,16	0,55	0,38	0,03
	Ramspol	0,43	0,37	0,21	0,07	0,02	0,26	0,04	0,04
Macrostabiliteit (m dijkvoetverbreding)	IJssm. noord	9,0	8,5	6,5	1,4	0,9	4,6	2,1	0,6
	IJssm. midden	1,3	1,4	1,6	0,2	0,3	0,5	0,8	0,1
	IJssm. oost	2,9	2,3	2,6	0,8	0,2	1,6	1,3	0,0
	Ramspol	1,9	1,5	1,2	0,5	0,2	1,0	0,3	0,2
Piping (m dijkvoetverbreding)	IJssm. noord	51,2	47,1	40,3	9,7	5,6	24,0	13,1	4,4
	IJssm. midden	30,9	28,9	27,7	5,0	3,0	13,4	10,2	3,2
	IJssm. oost	17,1	14,0	11,5	4,1	1,0	9,5	3,9	0,3
	Ramspol	28,7	25,8	19,7	4,8	1,9	14,2	5,2	2,3

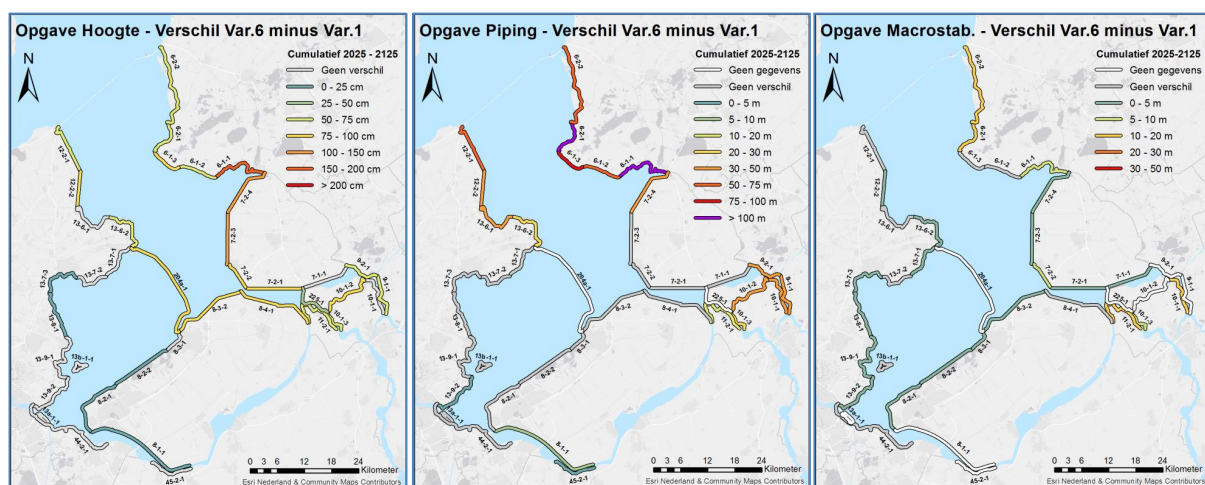
Tabel 4.6 Het effect van pompcapaciteit, peilstijging en spui capaciteit op de (per deelgebied gemiddelde) versterkingsopgaven binnen het IJsselmeergebied (periode 2025 t/m 2125).

Tabel 4.6 laat zien dat het effect van de pompcapaciteit op de versterkingsopgaven groter is dan het effect van 30 of 60 cm stijging van het gemiddeld winterpeil. Dit geldt voor alle drie de faalmechanismen en in alle deelgebieden. Verdubbeling van de spui capaciteit heeft nauwelijks invloed op de opgaven. Dit komt omdat bij dubbele spui capaciteit de berekende pompcapaciteit lager is. Er is daardoor nauwelijks verschil in hydraulische belasting tussen de variant met enkele en die met dubbele spui capaciteit (zie ook paragraaf 4.1).

In Figuur 4.13 zijn de locatieverschillen nog wat gedetailleerder in beeld gebracht. Deze figuur laat voor alle trajecten het verschil in opgave zien tussen de varianten 6 en 1. Voor het IJsselmeer gaat het daarbij om de strategieën 3b (beperkte pompcapaciteit en 60 cm stijging van het gemiddeld winterpeil) en 1a (grote pompcapaciteit en geen stijging van het gemiddeld winterpeil). Dit zijn de strategieën die het meest verschillen in hydraulische belasting. Uit deze kaarten valt niet gelijk een eenduidige conclusie te trekken. Duidelijk is wel dat het effect van de strategieën sterk verschilt per locatie en per faalmechanisme.

De versterkingsopgave wordt bepaald door veranderingen in hydraulische belasting (door klimaatverandering en de gekozen strategieën) en bodemdaling¹, maar ook door de nieuwe normering en beoordelingssystematiek die in 2017 worden ingevoerd. Het effect van de nieuwe normering en beoordelingssystematiek is daarbij groot. Dit komt tot uiting als de opgaven worden opgesplitst naar de versterkingsjaren 2025, 2075 en 2125. In Tabel 4.7 is dit gedaan voor de pipingopgave.

Bij strategie 1a neemt de hydraulische belasting in het IJsselmeer in de loop der tijd iets af. In deze strategie is te zien dat de pipingopgave vrijwel geheel in 2025 ligt. In de overige strategieën wordt bij de opgave voor 2025 al rekening gehouden met de toename van de belasting, die vanaf 2050 begint. De opgave voor 2025 is in die strategieën daardoor groter dan in strategie 1a. De verschillen tussen de deelgebieden hebben te maken met verschillen in bodemdaling, gevoeligheid voor piping en de doorwerking van de strategie in de lokale hydraulische belasting.



Figuur 4.13 Verschil in dijkversterkingsopgaven (voor de drie faalmechanismen) tussen variant 6 (strategie 3b voor het IJsselmeer, 2a voor Markermeer) en variant 1 (strategie 1a voor het IJsselmeer en 1b voor Markermeer).

¹ Tabel 1 in Bijlage E geeft per traject de bodemdaling waarmee gerekend is weer.

		Variant						
		1	2	3	4	5	6	7
Strategie IJsselmeer:		1a	1b	2a	2b	3a	3b	3a
Strategie Markermeer:		1b	1a	1a	1a	2a	2a	2a
IJssm. noord	2025	36,5	46,6	40,6	51,4	40,8	51,4	45,3
	2075	0,0	20,9	5,5	22,9	13,5	24,5	13,6
	2125	0,0	20,2	0,0	19,1	6,2	24,9	5,9
IJssm. midden	2025	6,1	13,2	8,2	15,6	8,2	15,6	11,0
	2075	0,8	14,6	3,6	16,6	7,9	17,5	8,6
	2125	0,7	10,7	0,8	9,3	4,8	15,6	4,6
IJssm. oost	2025	20,5	23,4	21,8	24,4	21,8	24,4	22,7
	2075	0,5	7,9	3,3	9,0	5,6	9,7	5,6
	2125	0,4	7,2	0,3	6,1	3,4	8,3	2,9
Ramspol	2025	38,7	41,5	39,9	42,5	40,0	42,5	40,7
	2075	1,8	17,2	7,1	19,1	11,4	20,2	12,7
	2125	2,7	13,2	1,0	12,2	6,0	14,5	6,4
Markermeer	2025	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
	2075	1,9	2,4	2,7	2,6	2,9	2,9	2,8
	2125	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4

Tabel 4.7 De pipingopgave per deelgebied (in m dijkvoetverbreding), uitgesplitst naar de versterkingsmomenten.

5 Kosten van de strategieën

In dit hoofdstuk bespreken we de kosten van de varianten voor waterafvoer en peilbeheer. In paragraaf 1 komen de algemene uitgangspunten voor de kostenberekeningen aan de orde. Hierna bespreken we in 5.2 de kosten voor waterafvoer (spuisluizen en gemalen), gebaseerd op de analyse van de benodigde afvoercapaciteit uit paragraaf 4.1. In paragraaf 5.3 komen de kosten van dijkversterkingen aan de orde, gebaseerd op de versterkingsopgave uit paragraaf 4.3. Het wordt duidelijk dat de strategieën sterk verschillen in enerzijds de kosten van waterafvoer en anderzijds de kosten van dijkversterking. De pilotberekeningen zijn nog niet geschikt om een definitieve kostenvergelijking te maken, maar het wordt al wel duidelijk dat de totale kosten veel minder uiteenlopen dan de losse kostenposten waterafvoer en dijkversterking. In varianten waar veel kosten voor waterafvoer worden gemaakt zijn de dijkversterkingskosten namelijk relatief laag en omgekeerd.

5.1 Uitgangspunten kostenramingen

De kostenraming van de strategieën bestaat uit twee onderdelen: de kosten van dijkversterkingen en de kosten van waterafvoer. Voor de kosten van de dijkversterkingen hebben we gebruik gemaakt van het KOSWAT-instrumentarium. KOSWAT is eerder gebruikt voor o.m. het bepalen van de economisch optimale veiligheidsnormen en voor de eerste programmaraming voor het HWBP. Het is het best beschikbare instrumentarium voor dit type kostenramingen. KOSWAT is beschreven in Bijlage C. In deze fase van ISWP is nog geen rekening gehouden met de kosten van dijkbekleding en het versterken van kunstwerken. Verder geldt dat met KOSWAT de kosten van standaard versterkingsmethoden worden geraamd (zie bijlage C). Er wordt in deze fase van ISWP nog geen rekening gehouden met lokale optimalisatiemogelijkheden en/of innovatieve versterkingstechnieken.

Voor de raming van de kosten van pompen en spuien hebben we een eigen spreadsheetmodel ontwikkeld. Dit model houdt rekening met benodigde investeringen, vervangingsinvesteringen (relevant gezien de lange zichttijd van het project), beheer en onderhoud en energiegebruik. De investeringskosten zijn gebaseerd op gegevens van de kostenpool van Rijkswaterstaat. In de berekeningen zijn alleen de kostenposten meegenomen waarin strategieën onderling verschillen. Zo zijn bijvoorbeeld niet de voor alle strategieën gelijke kosten van spuisluizen in de Houtribdijk meegenomen.

We zijn bij de kostenberekeningen uitgegaan van vaste investeringsritmes. De dijkversterkingen vinden plaats in 2025, 2075 en 2125, waarbij de dijken telkens zodanig worden versterkt dat ze na 50 jaar nog net voldoen aan de norm bij de dan verwachte belasting. De eerste investering in pompen en spuisluizen is in 2050, het moment waarop de spuisluizen in de Afsluitdijk technisch zijn afgeschreven. De afvoercapaciteit wordt dan afgestemd op de behoefte in 2075. Vervolgens wordt in 2100 en 2150 de benodigde pompcapaciteit (waar nodig) uitgebreid.

In het spreadsheetmodel is uitgegaan van de randvoorwaarden en grondslagen die voor KOSWAT zijn gesteld, zodat de kostenramingen zo uniform mogelijk zijn. KOSWAT is gebaseerd op het kader MKBA MIRT van Rijkswaterstaat en de Algemene Leidraad MKBA voor van CPB-PBL. Daarmee voldoet de studie aan de randvoorwaarden die Rijkswaterstaat en het ministerie aan MIRT-studies stellen. Het kader geeft een overzicht van de gehanteerde uitgangspunten.

Tot slot is een opmerking over onzekerheden op zijn plaats. In het algemeen wordt voor een studie in de fase van een MIRT onderzoek met een bandbreedte van 50% rond de berekende bedragen gerekend. Omdat de onzekerheden in alle varianten op een zelfde manier doorwerken zijn de resultaten toch geschikt om alternatieven te

vergelijken. Gezien de zeer lange zichttijd van deze studie zijn de onzekerheden natuurlijk extra groot. Op deze termijn kunnen bijvoorbeeld allerlei technische innovaties leiden tot sterk veranderende kosten. Ondanks de onzekerheden zijn de kosten van de strategieën in dit hoofdstuk weergegeven op 100 miljoen euro nauwkeurig.

Algemene uitgangspunten kostenramingen

- Er is gewerkt met prijspeil 2014.
- De kostenramingen en kostenprojecties zijn in reële prijzen.
- Er is verdisconteerd naar het jaar 2025.
- Conform de richtlijnen van de ministeries van Financiën en van Infrastructuur en Milieu is een discontovoet van 4,5% toegepast om bedragen te verdisconteren.
- Alle kosten zijn inclusief BTW.
- De kosten worden berekend tot het jaar 2175. De laatste investeringen hebben plaatsgevonden in 2125 (dijkversterking) en 2150 (pompen).
- In de kostenramingen zijn alleen die kosten opgenomen die per strategie (significant) kunnen verschillen. Kosten die vrijwel gelijk blijven tussen strategieën zijn buiten beschouwing gelaten, bijvoorbeeld het onderhoud aan waterkeringen of de apparaatskosten van beheerders.

5.2 Kosten van dijkversterkingen

De kosten van de benodigde dijkversterkingen zijn bepaald met het KOSWAT-instrumentarium (zie bijlage C). KOSWAT gaat uit van versterkingen met grondmaatregelen waar dat mogelijk is, omdat dat het goedkoopste is. Waar de ruimte voor grondmaatregelen ontbreekt wordt gerekend met de kosten van technische alternatieven, als kwelschermen, stabiliteitswanden of kistdammen.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de totale kosten van de dijkversterkingen in 2025, 2075 en 2125 (zie bijlage E voor de indeling van de varianten). De kosten zijn fors: ze variëren van ruim 3 miljard in variant 1 tot bijna 7 miljard in variant 6¹. Duidelijk is te zien dat de kosten in de varianten met beperkte pompcapaciteit (2,4,6) beduidend hoger zijn dan in die met een grote pompcapaciteit (1,3,5). Verder is te zien dat stijging van het gemiddeld winterpeil in het IJsselmeer leidt tot hogere kosten. De kosten nemen het sterkst toe in de variantenreeks met grote pompcapaciteit (1,3,5). In de reeks met beperkte pompcapaciteit (2,4,6) leidt de peilverhoging slechts tot beperkte meerkosten.

Tabel 5.1 laat ook zien dat de hoogste kosten zijn verbonden aan het eerste versterkingsmoment: 2025. De kosten hier worden sterk beïnvloed door de nieuwe normering en beoordelingssystematiek die in 2017 wordt ingevoerd.

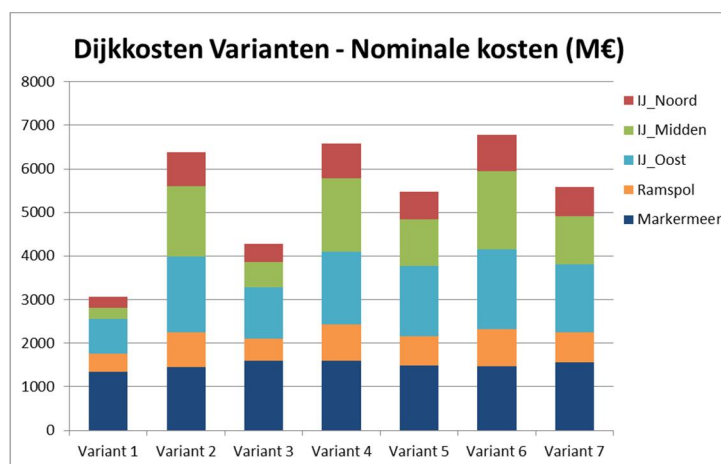
¹ Ook hier zijn "kleine opgaven" en de berekende opgave voor het dijktraject Enkhuizen-Amsterdam in 2025 niet meegenomen (zie par. 4.4).

Variant (tussen haakjes strategie IJ'meer en M'meer)	2025	2075	2125	Totaal
1 (1a + 1b)	2,2	0,4	0,5	3,1
2 (1b + 1a)	2,6	2,0	1,8	6,4
3 (2a + 1a)	2,4	1,5	0,4	4,3
4 (2b + 1a)	2,7	2,2	1,7	6,6
5 (3a + 2a)	2,4	1,7	1,4	5,5
6 (3b + 2a)	2,7	2,1	2,0	6,8
7 (3a + 2a, dubbele spui)	2,5	1,7	1,3	5,6

Tabel 5.1 De kosten van dijkversterkingen in de verschillende varianten op de drie versterkingsmomenten waarmee is gerekend (in miljarden euro's, afgerond op 100 miljoen).

In Figuur 5.1 zijn de kosten niet opgesplitst naar versterkingsmoment, maar naar deelgebied (zie figuur 4.11 voor de gebiedsindeling). In Figuur 5.1 wordt in de eerste plaats duidelijk dat de verschillen in kosten tussen de varianten vooral bepaald worden door het IJsselmeer. Dit lijkt logisch, omdat de verschillen in meerpeil en dijkbelasting tussen de strategieën voor het Markermeer klein zijn. Verder valt op dat de relatieve verschillen tussen de varianten het grootste zijn in het deelgebied IJsselmeer-midden. Dit gebied is meerpeilgedomineerd. Dit betekent dat de waterstanden bij de dijken hier vooral bepaald worden door het meerpeil: de rol van opwaaing is beperkt (zie Kramer, 2015). Deze waterstanden bepalen de versterkingsopgaven voor piping en macrostabiliteit. De varianten leiden tot verschillen in de meerpeilstatistiek, dus het is begrijpelijk dat juist in dit deelgebied de kosten het meest variëren met de varianten.

Tabel 5.2 geeft de gemiddelde kosten per kilometer dijk per versterkingsmoment weer. De besproken verschillen tussen de varianten en de versterkingsmomenten komen hier opnieuw in beeld. De verschillen tussen deelgebieden worden bepaald door de opgave (zoals besproken in paragraaf 4.4) en door de plaatselijke omstandigheden. De kosten per kilometer lopen namelijk op wanneer door ruimtegebrek meer gebruik moet worden gemaakt van technische maatregelen en wanneer er (bij dijkverhoging) een weg op de dijk aanwezig is.



Figuur 5.1 De kosten van dijkversterkingen in de verschillende varianten op de drie versterkingsmomenten waarmee is gerekend.

		Variant						
		1	2	3	4	5	6	7
Strategie IJsselmeer:		1a	1b	2a	2b	3a	3b	3a
Strategie Markermeer:		1b	1a	1a	1a	2a	2a	2a
IJ noord	2025	8	9	8	10	8	10	9
	2075	0	7	4	7	6	8	6
	2125	0	7	0	7	5	8	5
	totaal	0	23	13	24	19	25	20
IJ midden	2025	2	5	3	6	3	6	5
	2075	1	7	3	7	5	8	5
	2125	1	7	1	6	4	8	3
	totaal	3	19	7	19	12	21	13
IJ oost	2025	6	6	6	6	6	6	6
	2075	0	4	3	4	4	4	4
	2125	0	4	0	3	3	4	3
	totaal	6	14	9	13	13	14	12
Ramspol	2025	6	6	6	7	6	7	6
	2075	1	4	3	5	4	5	4
	2125	1	4	1	4	3	4	3
	totaal	8	15	9	15	12	16	13
Markermeer	2025	4	4	4	4	4	4	4
	2075	2	2	3	3	2	2	2
	2125	2	2	2	2	2	2	2
	totaal	7	8	9	9	8	8	8

Tabel 5.2 De kosten van dijkversterking per versterkingsmoment, gemiddeld per kilometer (in miljoenen euro's).

5.3

Kosten van waterafvoer

De kosten voor de waterafvoer bestaan uit de kosten van gemalen en die van spuisluizen. De kostenberekeningen van de gemalen zijn gebaseerd op de berekeningen voor de benodigde pompcapaciteit (zie paragraaf 4.1). Daarbij geldt dat voor de Afsluitdijk de benodigde capaciteit is verhoogd met 8%, om uitval door onderhoud en storingen te compenseren. De capaciteit is vervolgens omgerekend naar eenheden van 50 m³/s, de grootste pomp die op dit moment verkrijgbaar is. Deze pompen worden toegepast in zeer grote gemalen als dat bij IJmuiden en een nieuw gebouwd gemaal bij New Orleans.

Voor de Houtribdijk is gekozen voor 100 m³/s gemaalcapaciteit (twee pompen van 50 m³/s), in alle gevallen waarin pompen nodig zijn. Deze keuze is gemotiveerd in paragraaf 4.1. Er is geen toeslag toegepast i.v.m. de faalkans. Voor de Veluwerandmeren is in de varianten met stijgend IJsselmeerpeil een gemaal met een capaciteit van 10 m³/s gepland bij de toekomstige Reevedam. Tabel 5.3 geeft een overzicht van de aantallen pompen waarop de kostenberekeningen zijn gebaseerd.

Variant (tussen haakjes strategie IJ'meer en M'meer)	Afsluitdijk			Houtr. dijk	VRM
	2050	2100	2150	2050 e.v.	2050 e.v.
1 (1a + 1b)	35	57	67	0	0
2 (1b + 1a)	18	22	24	2	0
3 (2a + 1a)	31	50	65	2	1
4 (2b + 1a)	13	20	24	2	1
5 (3a + 2a)	31	46	59	2	1
6 (3b + 2a)	13	20	22	2	1
7 (3a + 2a, dubbele spui)	7	31	50	2	1

Tabel 5.3 Overzicht aantallen benodigde pompen in de varianten (in eenheden van 50 m³/s, voor Veluwe-randmeren (VRM) van 10 m³/s).

De uitgangspunten voor de kostenberekeningen van gemalen hebben we gekozen in overleg met de RWS Kostenpool (GPO/PPO) en de afdeling Tunnels en Natte Kunstwerken van GPO. Ze zijn samengevat in het eerste tekstkader op pagina 42.

Bij de spuisluizen zijn alleen de kosten van spui in de Afsluitdijk geraamd. De kosten van de spuisluizen van Markermeer en Veluwerandmeren (toekomstige vervanging bij einde levensduur, beheer en onderhoud) zijn niet meegenomen, omdat die voor alle varianten gelijk zijn. De uitgangspunten voor de kostenraming van de spuisluizen zijn samengevat in het tweede tekstkader op pagina 42. De kosten van spuisluizen zijn gelijk voor de varianten 1 t/m 6. In variant 7 zijn ze hoger, omdat daarin de spuicapaciteit van de Afsluitdijk verdubbeld wordt.

Uitgangspunten kostenramingen pompen

- De basisinvestering voor een pompeenheid van 50 m³/s is M€ 27 per unit en voor de 10 m³/s M€ 11 per unit. Het gaat om de totaalkosten van een gemaal met deze capaciteit en de energievoorziening die daarvoor nodig is. Voor de basisinvestering is een verdeling over civiel, werktuigbouw (WTB) en industriële automatisering (IA) geraamd van respectievelijk 60-30-10 procent.
- Gezien het iconisch karakter van de Afsluitdijk is de kans groot dat de gebouwen van gemalen daarbij moeten aansluiten. Om dit mogelijk te maken is voor de Afsluitdijk de basisinvestering met 10% verhoogd.
- Ten behoeve van vervangingsinvesteringen is uitgegaan van periodieke vervanging van de civiele en IA onderdelen iedere 100 en 10 jaar. Voor WTB-onderdelen is de vervangstermijn gesteld op 200.000 draaiuren. Door deze vervanging te koppelen aan het aantal draaiuren kan rekening worden gehouden met de grote verschillen in pompinzet tussen de strategieën.
- De basiskosten voor beheer en onderhoud, exclusief energie en vervanging, zijn geraamd voor civiele, WTB en IA onderdelen op respectievelijk 0,5%, 2,0% en 0,5% van de investering. Deze waarden worden echter aangepast op basis van het aantal draaiuren. Voor pompen is een normgetal aangenomen van 4000 uur/jaar en voor spuisluizen 250 uur/jaar. De genoemde waarde worden vermenigvuldigd met het aantal geschatte/berekende draaiuren gedeeld door de norm. De correctiefactor heeft daarbij een ondergrens van 0,67.
- Energieverbruik is geraamd op basis van benodigd vermogen en het berekende aantal draaiuren per jaar. Voor de pompunits van 50 m³/s is uitgegaan van een vermogen van 1600 kW, voor een unit van 10 m³/s 480 kW.
- De energieprijis is op €0,10 per kWh geraamd.
- De berekeningen geven alleen de draaiuren van de pompen in het winterseizoen. De draaiuren in het zomerseizoen zijn geschat door de draaiuren in het winterseizoen te vermenigvuldigen met de verhouding tussen waterafvoer in zomer en winter (wat leidt tot een maximumschatting van de pompinzet in de zomer).

Uitgangspunten kostenramingen spuisluizen Afsluitdijk

- De basisinvestering voor eenheden van 5.125 m² kokeroppervlak draagt respectievelijk M€ 149,5. Voor deze basisinvestering is een verdeling over civiel, werktuigbouw (WTB) en industriële automatisering (IA) geraamd van respectievelijk 75-12,5-12,5 procent.
- Voor het iconisch/esthetisch uitvoeren van de spuisluizen is 10% toegevoegd aan de basisinvestering.
- Ten behoeve van vervangingsinvesteringen is uitgegaan van periodieke vervanging van de civiele en IA onderdelen iedere 100 en 10 jaar. Voor WTB-onderdelen is de vervangstermijn gesteld op 200.000 draaiuren: een aantal uren dat echter niet gehaald wordt in de analyseperiode.
- Beheer en onderhoudskosten per jaar, exclusief energie en vervanging, zijn geraamd voor civiele, WTB en IA onderdelen op respectievelijk 0,5%, 2,0% en 0,5% van de investering.
- De energiekosten zijn geraamd op basis van dezelfde uitgangspunten als bij de pompen. De kosten zijn echter zeer gering in relatie tot de overige kosten.

Bijlage G geeft een overzicht van het totaal van de kosten van waterafvoer in de verschillende varianten; Tabel 5.4 geeft hiervan een samenvatting. Het gaat bij deze kosten dus alleen om de kostenposten die verschillen tussen de varianten en geeft dus geen beeld van de totaal benodigde middelen voor waterafvoer. Bij Tabel 5.4 vallen enkele dingen op te merken.

1. De a-strategieën voor het IJsselmeer brengen veel hogere kosten voor waterafvoer met zich mee dan de b-strategieën.
2. Bij peilstijging nemen de kosten van waterafvoer af, doordat de pompkosten lager zijn. De afname is echter heel beperkt. De peilstijging is te zien in de variantereksen 1,3,5 en 2,4,6.
3. De kosten van de gemalen domineren de waterafvoerkosten, de kosten van de spuisluizen in de Afsluitdijk hebben daarin maar een klein aandeel.
4. De kosten van gemalen nemen toe met de tijd, als gevolg van de toenemende pompcapaciteit die nodig is door klimaatverandering en zeespiegelstijging.
5. Het verdubbelen van de spuicapaciteit leidt, bij stijging van het gemiddeld winterpeil, tot een verlaging van de totale kosten voor waterafvoer. Het kosteneffect van verdubbeling van de spuicapaciteit is niet berekend bij gelijkblijvend winterpeil. Op basis van de berekeningen van de benodigde pompcapaciteiten in paragraaf 4.1 kan worden verwacht dat bij gelijkblijvend gemiddeld winterpeil het kostenvoordeel kleiner is.

Variant (tussen haakjes strategie IJ'meer en M'meer)	2025-2075		2076-2125		2126-2175		Totaal
	Pmp.	Sp.	Pmp.	Sp.	Pmp.	Sp.	
1 (1a + 1b)	2,1	0,3	3,5	0,3	5,0	0,4	11,7
2 (1b + 1a)	1,5	0,3	2,5	0,3	3,5	0,4	8,6
3 (2a + 1a)	2,0	0,3	3,2	0,3	4,9	0,4	11,1
4 (2b + 1a)	1,1	0,3	2,2	0,3	3,2	0,4	7,6
5 (3a + 2a)	2,0	0,3	3,0	0,3	4,6	0,4	10,6
6 (3b + 2a)	1,1	0,3	2,2	0,3	2,9	0,4	7,3
7 (3a + 2a, dubbele spui)	0,6	0,6	2,3	0,6	3,9	0,9	9,0

Tabel 5.4 Kosten van waterafvoer in de verschillende varianten (in miljarden euro's, afgerond op 100 miljoen) in de periode 2025 t/m 2175 (Pmp.=pompen, Sp. = spuisluizen). De kosten omvatten de kostenposten waarin tussen de varianten verschillen bestaan: gemalen Afsluitdijk, Houtribdijk en Veluwerandmeren en spuisluizen Afsluitdijk.

Omdat de kosten van gemalen domineren beschouwen we die nader. In Tabel 5.5 is weergegeven hoe de kosten van het gemaal op de Afsluitdijk in de verschillende strategieën zijn opgebouwd. In de tabel valt op dat de investeringen met 10-23% slechts een beperkt deel van de kosten vormen. De vervangingsinvesteringen liggen gemiddeld iets hoger dan de initiële investeringen (20-25% van de kosten). De grootste kostenpost is beheer en onderhoud (34-41%). Het aandeel van energie in de kosten is 20-27%. Bij vergelijking van de strategieën onderling blijkt dat:

- In de a-strategieën het aandeel van de investeringen (16-17%) groter is dan in de b-strategieën (11-13%). Dit is logisch, gezien de veel grotere pompcapaciteit die nodig is in de a-strategieën.
- In de b-strategieën de verhouding vervangingsinvesteringen/initiële investeringen groter is dan in de a-strategieën. Dit komt doordat in de b-strategieën de pompen veel meer draaiuren maken dan in de a-strategieën en dus eerder aan vervanging toe zijn.
- In de b-strategieën vorm energie 27% van de kosten, in de a-strategieën 20%. In absolute bedragen zijn de energiekosten in de a-strategieën echter iets hoger dan die van de b-strategieën. Het kostenverschil is echter veel

kleiner dan het verschil in geïnstalleerde pompcapaciteit: in de a-strategieën zijn er meer pompen, maar het gemiddeld aantal draaiuren per pomp is lager dan in de b-strategieën.

- Stijging van het gemiddeld winterpeil (te zien in de variantreeksen 1,3,5 en 2,4,6) en verdubbeling van de spuicapaciteit (variant 7 t.o.v. variant 5) leidt tot verlaging van de gemaalkosten, waarbij de verdeling over de kostenposten ongeveer gelijk blijft.

Variante (tussen haakjes strategie IJ'meer en M'meer)	Investeringen	Vervangingsinvesteringen	Beheer en onderhoud	Energie	Totaal
1 (1a + 1b)	2,0 19%	2,7 25%	3,8 36%	2,2 20%	10,6
2 (1b + 1a)	0,7 10%	1,6 22%	2,9 41%	1,9 27%	7,1
3 (2a + 1a)	1,9 20%	2,4 25%	3,4 35%	1,9 20%	9,6
4 (2b + 1a)	0,7 12%	1,3 21%	2,5 41%	1,6 27%	6,1
5 (3a + 2a)	1,8 19%	2,3 26%	3,2 35%	1,8 20%	9,1
6 (3b + 2a)	0,7 11%	1,1 20%	2,4 41%	1,5 27%	5,7
7 (3a + 2a, dubbele spui)	1,5 23%	1,3 21%	2,2 34%	1,4 21%	7,0

Tabel 5.5 Opbouw van de kosten van het gemaal op de Afsluitdijk in de verschillende strategieën (in miljarden euro's en als percentage van de totaalkosten van de strategie).

5.4 Kostenvergelijking strategieën

De som van de kosten van dijkversterkingen uit paragraaf 5.2 en die van waterafvoer uit paragraaf 5.3 bepaalt de totale kosten van de verschillende varianten die zijn geanalyseerd. Tenminste: voor zover kosten meegenomen zijn in de berekeningen. Zoals gezegd zijn kosten die voor alle varianten gelijk zijn niet geanalyseerd (zoals bijvoorbeeld de spuisluizen in de Houtribdijk en beheer en onderhoud van de dijken). Verder geldt dat bij de waterkeringen de kosten van dijkbekleding en versterking van kunstwerken nog niet zijn meegenomen. Tabel 5.4 geeft een overzicht van de totaalkosten. Doordat dus niet alle kosten zijn meegenomen is dit overzicht alleen bruikbaar om verschillen tussen de strategieën te analyseren en niet om een totale kostenraming te maken. Verder geldt dat het in deze fase nog om pilotberekeningen gaat, die vooral bedoeld zijn om de methodiek uit te proberen: niet alle onderdelen zijn nog volledig uitgekristalliseerd.

Met bovenstaande kanttekeningen is het overzicht van de kosten van waterafvoer in Tabel 5.4 bruikbaar om hoofdlijnen te signaleren, maar er mogen op grond hiervan nog geen definitieve conclusies over de verhouding van de kosten van de strategieën worden getrokken. Naast de hiervoor beschreven beperkingen is er nog de complicatie dat de kosten langs 2 sporen worden berekend (dijkversterkingen en waterafvoer) en dat de verhouding van deze twee kostencomponenten sterk verschillen tussen de strategieën. Dit betekent dat aanpassingen van de berekeningen in een

van de twee sporen makkelijk kunnen leiden tot een andere kostenverhouding tussen de strategieën.

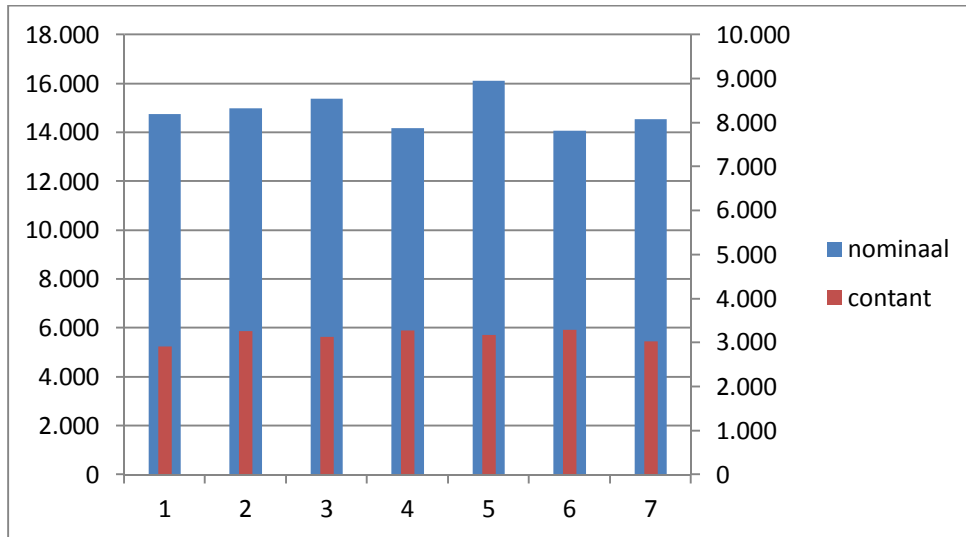
Tabel 5.6 laat zien dat de kosten van de varianten zeer dicht bij elkaar liggen. Dit komt omdat de kosten van dijkversterking en die van afvoermiddelen elkaar completeren: in de varianten met hogere kosten voor dijkversterking zijn de kosten voor afvoermiddelen juist lager en omgekeerd. Ook de verdeling over de drie investeringsperiodes (2025-2075, 2076-2125 en 2126-2175) wordt gelijkmatiger dan die van dijkversterkingen en waterafvoer afzonderlijk. De hoge kosten van de eerste dijkversterkingsronde (i.v.m. de nieuwe normering) worden gecompenseerd door de met de klimaatverandering toenemende kosten van waterafvoer. Gemiddeld bedragen de kosten ca 15 miljard, dat is 100 miljoen per jaar. Door de lange zichttermijn zijn de netto-contante bedragen slechts ca. 20% van de nominale bedragen¹.

In Figuur 5.2 zijn de kosten uit Tabel 5.6 grafisch weergegeven.

Variant	Nominaal				Netto contant
	2025- 2075	2076- 2125	2126- 2175	Totaal	Totaal
1 (1a + 1b)	4,6	4,3	5,9	14,8	2,9
2 (1b + 1a)	4,4	4,8	5,7	15,0	3,3
3 (2a + 1a)	4,6	5,0	5,8	15,4	3,1
4 (2b + 1a)	4,1	4,7	5,3	14,2	3,3
5 (3a + 2a)	4,6	5,0	6,5	16,1	3,2
6 (3b + 2a)	4,2	4,6	5,3	14,1	3,3
7 (3a + 2a, dubbele spui)	3,8	4,7	6,1	14,6	3,0

Tabel 5.6 Totaalkosten van de strategieën in miljarden euro's, nominaal en netto-contant (zie toelichting in de tekst).

¹ De verhouding tussen de netto-contante bedragen en de nominale bedragen is slechts indicatief. Dit komt doordat er met een sterk geschematiseerd investeringspatroon is gewerkt. Hierin worden de kosten voor dijkversterkingen steeds aan het begin van een periode gemaakt, de kosten voor waterafvoer in het midden van de periode. Dit betekent dat in de varianten waarin de dijkversterkingskosten hoog en de afvoerkosten laag zijn het netto contante bedrag relatief hoog uitvalt.



Figuur 5.2 De totaalkosten van de strategieën uit Tabel 5.4 grafisch weergegeven, nominaal en netto-contant (zie toelichting in de tekst).

6 Discussie en vervolg

In dit hoofdstuk blikken we terug op de resultaten van fase 2. Het gaat daarbij meer om de vraag waar we staan bij de ontwikkeling en analyse van strategieën dan om inhoudelijk conclusies over de strategieën. We concluderen dat de ontwikkelde strategieën en methodiek voor de analyse daarvan hun bruikbaarheid hebben bewezen. Er is echter nog wel een uitwerkingsslag nodig. Die zal plaatsvinden in fase 3. Het hoofdstuk eindigt met de vervolgstappen die in de derde fase zullen worden genomen. Fase 3 omvat het verder uitwerken en afronden van de strategieën en de analysemethodiek, de definitieve doorrekening van de strategieën en een uitgebreide gevoeligheidsanalyse daarvan. Pas na de afronding van fase 3 ligt de weg open naar conclusies en beleidsaanbevelingen.

6.1 Discussie

De discussie richt zich op twee onderdelen: de ontwikkelde methodiek en de strategieën waarop de methodiek is toegepast.

Methodiek

De pilotberekeningen tonen aan dat er een werkende methodiek is opgezet, waarmee de effecten van keuzes rond waterafvoer en peilbeheer kunnen worden geanalyseerd. De analyses geven inzicht in de waterhuishoudkundige gevolgen van keuzes rond waterafvoer en peilbeheer, de versterkingsopgave die daar voor de dijken in het gebied uit voortvloeit en de kosten. De methodiek is een goed hulpmiddel om inzicht in verschillen tussen strategieën te krijgen. De relaties die worden onderzocht zijn namelijk zodanig complex, dat intuïtief begrijpen van gevolgen van keuzes vaak niet mogelijk is.

De eerste stap bestaat uit analyses met het model DEZY. DEZY blijkt een krachtig hulpmiddel te zijn voor het bepalen van benodigde pompcapaciteit en meerpeilstatistiek in de strategieën.

Vervolgens worden in enkele stappen de in de toekomst benodigde dijkversterkingen bepaald. De systematiek blijkt tot uitlegbare versterkingsopgaven te leiden. Voor toepassing in de definitieve analyses moeten echter nog wel de ontbrekende onderdelen dijkbekleding en kunstwerken worden toegevoegd. Verder moet er nog voor worden gezorgd dat er een complete dataset komt, met representatieve dijkgegevens voor ieder dijktraject. Tot slot moeten nog wat rekentechnische zaken goed gecontroleerd worden. In de pilot is gekozen voor een indeling van de dijken in het gebied in 38 trajecten en is gewerkt met vaste versterkingsmomenten voor alle dijken tegelijk (eenmaal per 50 jaar). Voor deze beleidsstudie is er geen reden om de methodiek te verfijnen. De verwachting is dat verfijning tot veel extra werk leidt, zonder dat de resultaten betrouwbaarder worden.

Voor het berekenen van de benodigde dijkversterkingen is gebruik gemaakt van de standaard methoden uit het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI-2017). In bepaalde gevallen ontstaan er forse versterkingsopgaven. In de praktijk zal in zulke situaties worden gekeken naar specifieke lokale oplossingen. Dat is in onze berekeningen niet gebeurd. Bovendien is de indruk dat (zeker voor het faalmechanisme piping) de standaard methode tot een overschatting van de opgave leidt (wat ook door het ENW al is opgemerkt). Dit betekent dat de versterkingskosten mogelijk een overschatting zijn van de werkelijke opgave. Het is van belang op dit punt een gevoeligheidsanalyse te doen. Het valt te verwachten dat aanpassing van de methode leidt tot minder grote verschillen in versterkingsopgave tussen de strategieën, zonder dat daarbij de rangorde verandert.

Na het bepalen van de dijkversterkingsopgave worden de kosten daarvan berekend met het model KOSWAT. Dit model kiest voor maatregelen in grond waar dat mogelijk is. Waar de ruimte beperkend is of de grondmaatregel erg groot uitvalt kiest het model voor constructieve oplossingen. Bij het bekijken van de resultaten valt op dat de constructieve oplossingen een fors aandeel hebben in de totale dijkversterkingskosten. Daarnaast blijken wegen op de dijken (die bij verhoging moeten worden verwijderd en teruggelegd) veel invloed op de kosten te hebben. Dit roept de vraag op of hier optimalisatiemogelijkheden liggen. Ook op dit punt is daarom een gevoeligheidsanalyse nodig.

De kosten van de waterafvoer worden geraamd met een daarvoor opgezet spreadsheetmodel. Bij de toepassing daarvan moeten enkele cruciale keuzes worden gemaakt. Een daarvan is hoe er wordt omgegaan met vervangingsinvesteringen. Hoe lang gaan pompen etc. mee, en in welke mate hangt dat af van het aantal draaiuren? Een ander belangrijk punt is hoe wordt omgegaan met de energievoorziening. Zijn voor aansluiting van de pompen nog bijzondere voorzieningen nodig? Tot slot blijkt beheer en onderhoud de grootste kostenpost bij de pompen te zijn. Is deze post realistisch geraamd? Deze keuzes bepalen in sterke mate de kosten voor de waterafvoer, samen met de energieprijzen die worden gebruikt. Ook hier geldt dat gevoeligheidsanalyses nodig zijn. Net als bij de kosten van dijkversterking wordt verwacht dat bij andere keuzes de rangorde van de kosten van waterafvoer niet zal veranderen, maar de spreiding in kosten wel.

In de laatste stap van de analyse worden de totale kosten van de strategieën vergeleken. Gezien alle onzekerheden mogen de berekende kosten niet worden gezien als een raming van toekomstige investeringen, maar alleen als een middel om strategieën te vergelijken. Een probleem bij de kostenvergelijking is dat onzekerheden kunnen leiden tot een verandering van spreiding in de berekende dijkkosten en verandering in de spreiding van de berekende waterafvoerkosten. In beide gevallen zal, naar verwachting, de rangorde van de strategieën niet veranderen. Echter: de rangorde van de *totale* kosten van de strategieën zou hierdoor wel degelijk kunnen veranderen. Dit benadrukt nog eens extra het belang van gedegen gevoeligheidsanalyses.

Strategieën

Uit de pilotberekeningen die zijn uitgevoerd blijkt dat de ontwikkelde strategieën voor het IJsselmeer sterk onderscheidend zijn. Ze lopen uiteen in benodigde pompcapaciteit, meerpeilstatistiek, dijkbelasting en benodigde dijkversterkingen. Ze geven daardoor een goed inzicht in het speelveld van toekomstmogelijkheden. Uit de analyse blijkt dat de verschillen tussen strategieën met een grote en kleinere pompcapaciteit groter zijn dan tussen strategieën met gelijkblijvend gemiddeld winterpeil of met een stijging van maximaal 60 cm. De verschillen door de pompcapaciteit zijn zelfs zo groot dat het de moeite waard is om nog een "tussenvariant" te verkennen. Daarnaast geven de rekenresultaten uit fase 2 aanleiding meer in detail te kijken naar het effect van de spuicapaciteit. Wat betekent bijvoorbeeld verdubbeling van de spuicapaciteit in de strategieën met gelijkblijvend gemiddeld winterpeil en wat is het effect van de locaite (Den Over of Kornwerderzand) op het effect van vergroting van de spuicapaciteit?

Voor het Markermeer is de beleidsruimte beperkt, waardoor de strategieën veel minder onderscheidend zijn. De verschillen zijn zelfs zo klein dat in fase 3 het analyserwerk voor het Markermeer mogelijk ingeperkt kan worden.

Cruciaal in de strategieën is de vertaling van waterhuishoudkundige uitgangspunten in benodigde pompcapaciteiten. Op dit punt is mogelijk nog optimalisatie mogelijk. We denken hierbij aan aanpassingen in de aanslagpeilen, aan het (modelmatig) mogelijk maken om gelijktijdig te pompen en te spuien en aan het verkennen van mogelijkheden om bij de inzet van pompen gebruik te maken van voorspellingen.

Voor de strategieën voor het IJsselmeer geldt (in algemene termen) dat meer pompcapaciteit leidt tot kleinere versterkingsopgaven. Het gevolg is dat de strategieën sterk onderscheidend zijn in de kosten van dijkversterkingen en in de kosten van waterafvoer, maar veel minder in de som van deze twee kostenposten. Gezien de uitbreiding en optimalisatie van de methodiek die nog zal plaatsvinden en de gevoeligheidsanalyses die nog zullen worden uitgevoerd mogen op grond van de uitgevoerde pilotberekeningen nog geen conclusies worden getrokken over de verhouding van de totale kosten van de strategieën.

De kosten die met de ontwikkelde methodiek berekend worden zijn beperkt tot die van waterafvoer vanuit de meren en waterveiligheid. Er is echter nog een pallet aan andere effecten van de strategieën, met daaraan verbonden kosten en baten. Een volledige kwantitatieve analyse is binnen ISWP niet mogelijk, maar er zal in ieder geval een kwalitatief overzicht gemaakt moeten worden.

Tot slot merken we op dat er bij het werken met zeer lange termijnen altijd grote onzekerheden blijven. Zo kunnen innovaties grote impact hebben. Denk bijvoorbeeld aan goedkopere methoden van dijkversterking, geheel nieuwe pompconcepten of zeer goedkope energievoorziening. Daarnaast kunnen nieuwe inzichten op het gebied van dijkveiligheid doorwerken in normering en in de beoordeling van dijken. En natuurlijk is ook de snelheid van de klimaatverandering nog uitermate onzeker. In de vierde fase van ISWP zal bij het interpreteren en vertalen naar aanbevelingen van de resultaten uit fase 3 met dit soort onzekerheden rekening gehouden worden.

6.2

Vervolg

Mede op basis van de discussie in paragraaf 6.1 wordt fase 3 ingericht. Deze fase zal gericht zijn op het uitvoeren van de aanpassingen aan de strategieën en de methodiek en het uitvoeren van een definitieve set berekeningen. Hiermee wordt een consistente set basisgegevens gecreëerd, zodat in de eindrapportage van het project niet hoeft te worden teruggegrepen op berekeningen uit fase 1 en 2 (waarin de methodiek nog in ontwikkeling was). Op de rekenresultaten zullen uitgebreide gevoeligheidsanalyses worden uitgevoerd. De berekeningen zullen worden aangevuld met een kwalitatieve bespreking van andere kosten en baten dan die van waterafvoer en dijkveiligheid. Met fase 3 worden de methodiekontwikkeling en het analysewerk afgerond. De activiteiten in fase 3 zijn ingedeeld in drie categorieën, die hieronder globaal beschreven worden.

1-Optimalisatie van pompinzet in de strategieën

De uitgevoerde berekeningen laten zien dat in tussen de strategieën de benodigde pompcapaciteit sterk verschilt. De berekende pompcapaciteiten zijn echter sterk afhankelijk van de gekozen uitgangspunten. We willen daarom nagaan of optimalisaties mogelijk zijn, waardoor in sommige strategieën minder pompcapaciteit nodig kan zijn. Het gaat onder meer om het doorrekenen van de mogelijkheid om gelijktijdig te pompen en te spuien en om de pompinzet mede te laten sturen door voorspellingen van het wateraanbod. Daarnaast willen we nog tussenvarianten van de strategieën met hoge en lage pompcapaciteit strategieën te analyseren, omdat de verschillen in pompcapaciteit erg groot zijn. Verder willen we nader ingaan op het effect van vergroting van de spuicapaciteit en de locatie waar dat gebeurt. Tot slot moet rekening gehouden worden met de faalkansen van de pompen. Hierdoor zal de te installeren capaciteit wat groter moeten zijn dan de theoretisch benodigde capaciteit.

De benodigde pompcapaciteit in de strategieën kan snel en eenvoudig worden berekend door iteratieve berekeningen met het model DEZY. Er is daarom geen reden het aantal varianten hier sterk te beperken. Voor de daarna uit te voeren analyse van dijkversterkingen zal echter een selectie gemaakt worden uit de strategieën.

2-Optimalisatie methodiek dijkkostenbepaling

De dijkkostensystematiek zal worden gecontroleerd en afgerond. Er worden de volgende noodzakelijke aanpassingen gedaan:

- Gecontroleerd wordt in hoeverre de manier waarop Hydra omgaat met peilstatistiek doorwerkt in de resultaten. Gaat de manier waarop Hydra interpoleert en extrapoleert vanuit de beschikbare WAQUA-berekeningen nog steeds goed in strategieën waarin flink hogere peilen voorkomen?
- De kosten van dijkbekleding worden opgenomen.
- De kosten van de versterking van kunstwerken worden opgenomen.
- Er wordt gezorgd dat er voor ieder dijktraject gegevens voor piping en stabiliteitsberekeningen zijn.
- De gebruikte locatiegegevens per dijktraject worden gescand op "uitbijters", om te voorkomen dat gegevens van niet-representatieve locaties worden gebruikt voor berekeningen van een dijktraject.
- De documentatie van de gebruikte methode zal worden verbeterd.

Er zijn veel detailleringen mogelijk in de aanpak. Zo kan per dijktraject gedetailleerder worden geanalyseerd welke locatie het meest representatief is. Ook is het mogelijk te gaan werken met kleinere tijdstappen in de analyses. De verwachting is echter dat zulke verfijningen weinig invloed zullen hebben op de conclusies, terwijl ze wel veel inspanning vragen. Ze zijn daarom niet opgenomen in dit plan voor fase 3.

3-Verdere uitwerking kosten waterafvoer

De opzet van de kostenraming voor waterafvoer (pompen, spuisluizen, energievoorziening) zal worden getoetst en verbeterd op basis van bestaande studies en in overleg met deskundigen. Keuzes rond zaken als energievoorziening en vervangingstermijnen kunnen grote invloed hebben op de kostenraming.

Met de verbeterde opzet zullen vervolgens kostenramingen van de waterafvoermiddelen worden gemaakt voor de geselecteerde strategieën en zal voor deze strategieën vervolgens een kostenvergelijking worden gemaakt. Daarbij worden zowel de nominale als de netto-contante bedragen in beeld gebracht.

4-Gevoeligheidsanalyse

Er zal een gedegen gevoeligheidsanalyse worden gemaakt van alle onderdelen waarop de kostenvergelijking wordt gebaseerd. Het gaat daarbij om de uitgevoerde berekeningen, maar vooral ook om de gekozen uitgangspunten. Hierbij wordt in ieder geval aandacht besteed aan de volgende punten:

- Opgave macrostabiliteit en piping. De gebruikte methoden voor bepaling van de opgave voor stabiliteit en piping. Het zijn de op dit moment gangbare standaardmethoden, maar onderdelen daarvan staan ter discussie. Aanpassing zou flinke consequenties kunnen hebben voor de kosten van strategieën.
- Maatregelen macrostabiliteit en piping. Innovatieve maatregelen om stabiliteits- en pipingrisico's te beperken. Wanneer innovatieve maatregelen beschikbaar komen om stabiliteits- en pipingopgaven op te lossen kan dit grote invloed hebben op de kosten.
- Omgaan met infrastructuur op dijken. Effect van de manier waarmee wordt omgegaan met infrastructuur op dijken die moeten worden versterkt. Als de methodiek ertoe leidt dat deze infrastructuur iedere 50 jaar volledig vervangen moet worden, leidt dat tot onrealistische kosten.
- Inzet van technische maatregelen. Waar dijkversterking in grond niet mogelijk is door ruimtegebruik wordt in de methodiek gekozen voor technische oplossingen als kwalschermen en kistdammen. De technische oplossingen hebben veel invloed op de kosten.
- Energieprijzen. Energie wordt een steeds grotere kostenpost naarmate de zeespiegel stijgt. De energieprijs kan daarom het kostenniveau sterk beïnvloeden.
- Uitgangspunten kostenraming waterafvoer. Zaken als afschrijvingstermijnen, investeringsmomenten, keuzes voor energievoorziening pompen, energieprijzen

en discontovoet kunnen de kostenraming van de waterafvoermiddelen sterk beïnvloeden. Bij de aanscherping van de ramingen zullen relevante punten worden geselecteerd voor de gevoeligheidsanalyse.

- Snelheid van klimaatverandering. Er zal een uitgebreide beschouwing worden gemaakt over wat de consequenties zijn van een klimaatverandering die sneller of minder snel gaat.

5-Kwalitatieve uitwerking overige kosten/baten

Met de methodiek worden de kosten van waterafvoer en dijkversterkingen bepaald. In strategieën waarin hogere peilen voor gaan komen (hogere pieken en/of een hoger gemiddeld peil). Deze hogere peilen brengen ook andere kosten en baten met zich mee. Deze kosten en baten zijn moeilijk betrouwbaar te kwantificeren.

Op basis van gegevens uit het Deltaprogramma IJsselmeergebied en gesprekken met deskundigen zullen de kosten en baten kwalitatief in beeld worden gebracht. Op onderdelen waar vanuit DPIJ kostenramingen beschikbaar zijn zullen die worden benut, maar er zullen geen nieuwe kostenramingen worden gemaakt.

Speciale aandacht krijgen de balgstuw en het Reevediep. Er zal worden geanalyseerd of ze functioneel blijven met peilstijging in het IJsselmeer.

Literatuur

Deltares (2014). KOSWAT, KOSTen van het versterken van WATERkeringen: Systeem-documentatie.

Grave, P. de, G. Pleijter, N. Kramer, R. van der Meij, W. ter Horst en B. Kuijper (2016). Dijkkosten ISWP IJsselmeergebied: Pilotstudie methode en resultaten. Deltares/HKV.

KNMI (2015). KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland: leidraad voor professionals in klimaatadaptatie. Herziene uitgave 2015.

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

Meij, R. van der, W. ter Horst, W., S. van Vuren, S., J. Pol, R. Koopmans, O. Levelt, N. Asselman, P. de Grave & A. de Kruif (2016). Uitwerking methode voor bepaling kostenreductie rivierverruiming. Kostenreductie dijkverbeteringen door uitvoering rivierverruiming. Deltares, HKV lijn in water, Arcadis en Rijkswaterstaat WVL.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu en Ministerie van Economische Zaken (2015). Nationaal Waterplan 2016-2021.

Deltares (2015). Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse: comparison with earlier scenario studies.

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

Kuijper, B., C. Geerse & A. Remmelzwaal, 2017 (in prep.). Rapid calculation of lake level statistics in The Netherlands. Proceedings of the 85th annual meeting of the international commission on large dams.

Kuijper, B., J. Stijnen en E. van Velzen (2010). Rapportage kansenspoor WV21. HKV lijn in water i.o.v. Deltares, oktober 2010.

Levelt, O., S. van Vuren, J. Pol, R. van der Meij, P. de Grave, D. Nugroho, W. ter Horst, R. Koopmans, P. van der Scheer, & A. de Kruif (2016). Toepassing Methodiek Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming op Maas. Deltares, HKV lijn in water, Arcadis, RoyalHaskoningDHV en Rijkswaterstaat WVL.

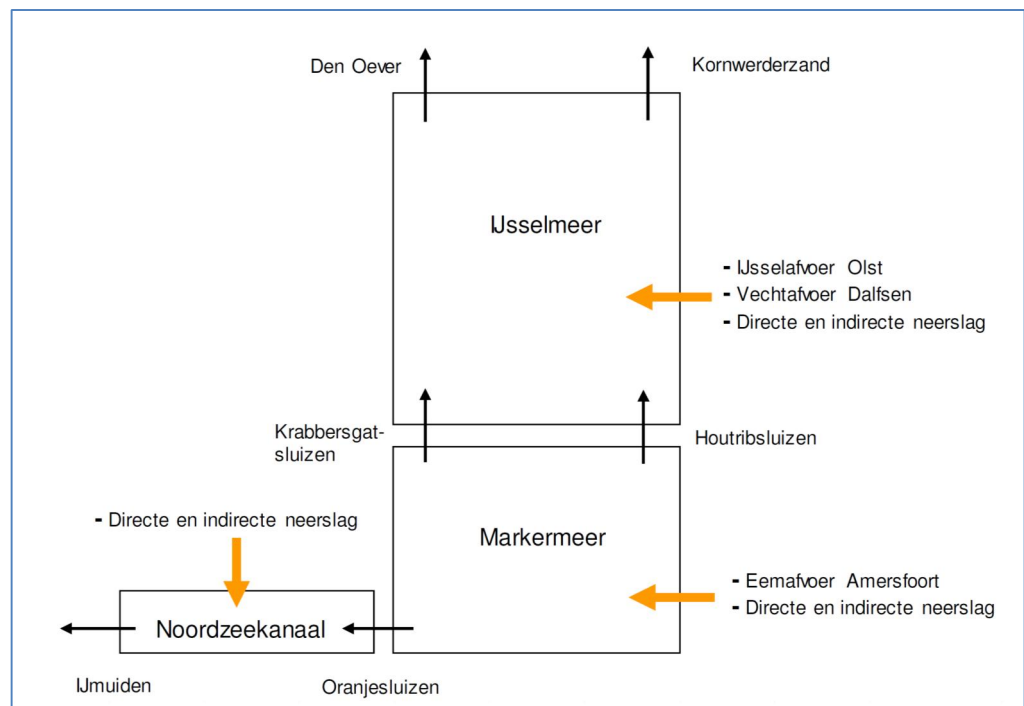
Remmelzwaal, A., A. Kors, I. Tanczos, A. Hebbink & J. Helmer (2015). Meerpeilen en waterveiligheid IJsselmeergebied: Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer fase 1. Rijkswaterstaat WVL.

Vuren, S. van, Levelt, O., J. Pol, R. van der Meij, P. de Grave, D. Nugroho, W. ter Horst, R. Koopmans, P. van der Scheer, & A. de Kruif (2016). Toepassing Methodiek Kostenreductie Dijkversterking door Rivierverruiming op Rijntakken. Deltares, HKV lijn in water, Arcadis, RoyalHaskoningDHV en Rijkswaterstaat WVL.

Bijlage A Het model DEZY voor bepaling meerpeilstatistiek

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 functioneert voor de winterperiode: de periode die van belang is voor de waterveiligheid.



Figuur A.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 A.1):

- Ijsselafoer te Olst.
- Vechtafoer 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 afvoercapaciteit (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, 2015 en Kuijper et al, 2017.

Rapid calculation of lake level statistics in The Netherlands
Bastiaan Kuijper^{1,a}, Chris Geerse^{1,b}, Albert Remmelzwaal^{2,c}.

Bijlage B Methodiek bepaling dijkversterkingsopgave

Deze bijlage beschrijft de methodiek die door Deltares is ontwikkeld voor de bepaling van de toekomstige dijkversterkingsopgaven in het IJsselmeergebied in verschillende strategieën en scenario's. Het is een samenvatting van de uitgebreidere beschrijving door de Grave et al (2016). De ontwikkelde methodiek is gebaseerd op de aanpak die in 2015-2016 is ontwikkeld om kostenreductie van dijkversterking door rivierverruiming te bepalen (Van der Meij et al 2016) en die is toegepast op de Waal en IJssel (Van Vuren et al 2016) en op de Maas (Levelt et al 2016).

Overzicht van de methodiek

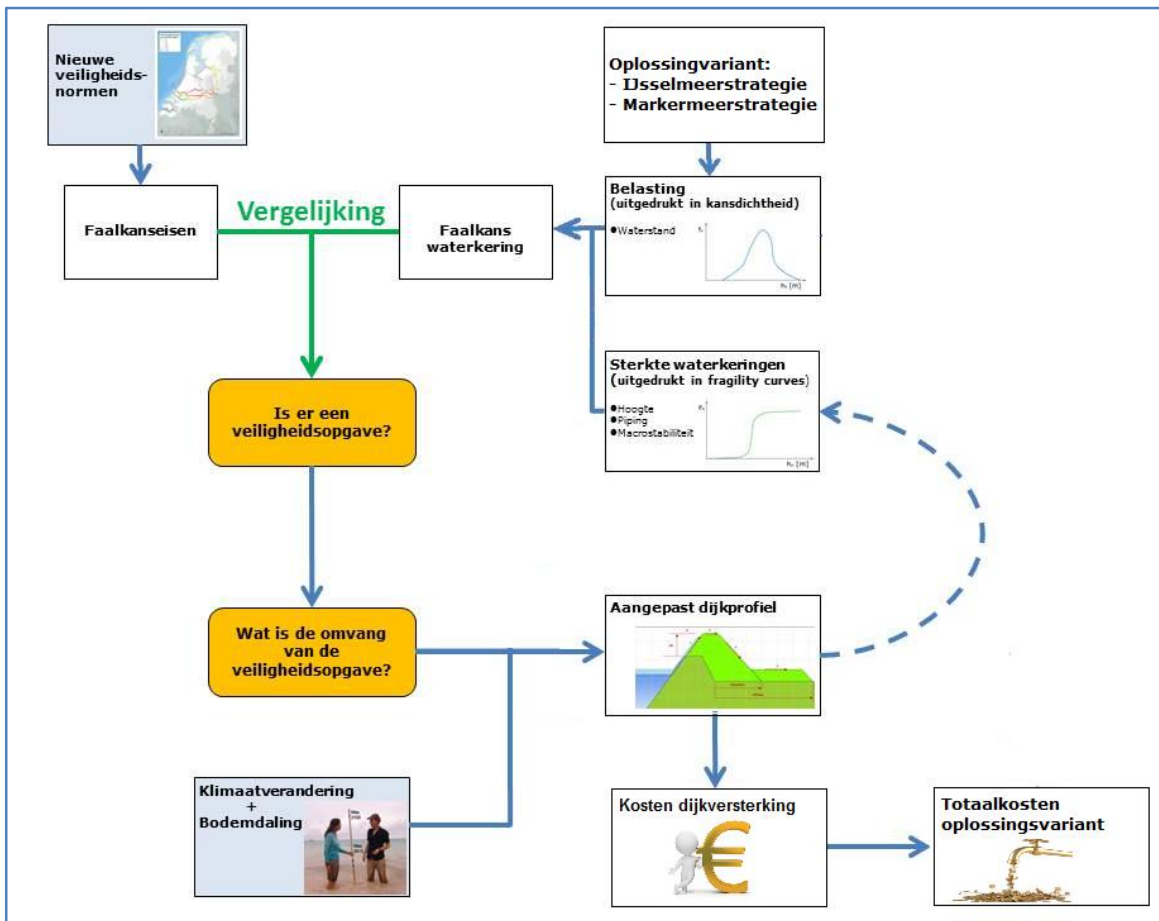
De eerste stap in de methodiek is het in kaart brengen van de huidige staat van de keringen. Vervolgens worden voor de situatie in 2025 per strategie de dijken getoetst aan de norm, om te bepalen of versterking nodig is. Wanneer dat voor een dijktraject het geval is wordt bepaald hoe het nieuwe dijkontwerp er uit moet zien, gegeven de gekozen ontwerplevensduur van 50 jaar. Daarbij wordt rekening gehouden met de ontwikkeling van de hydrologische belasting in de strategie en met bodemdaling. Er is uitgegaan van de nieuwe normering, die in 2017 van kracht wordt. De cyclus wordt herhaald voor de jaren 2075 en 2125.

De keuze om maar een maal per 50 jaar te toetsen en (waar nodig) te versterken is een pragmatische. Het beperkt sterk de hoeveelheid berekeningen die gemaakt moet worden. Het is bovendien weinig zinvol om in deze studie met meer toetsmomenten te werken. Ten eerste zal het algemene beeld dat de verschillende strategieën opleveren niet veranderen. Ten tweede is het praktisch nog niet mogelijk om met frequentere toetsing te werken. Veel dijken zullen namelijk niet voldoen aan de nieuwe normering. Ze zullen echter niet allemaal onmiddellijk versterkt worden: daar is tot 2050 tijd voor. Op dit moment is niet bekend in welke volgorde dat zal gebeuren.

Bij de toetsing wordt in deze studie gekeken naar drie faalmechanismen: overloop en overslag, piping en macrostabiliteit binnenwaarts. Onder het kopje *normering en toetsing* wordt daar verder op ingegaan.

De benodigde dijkversterkingen worden bepaald als verhoging (overloop en overslag) en verbreding van de dijkbasis (piping en macrostabiliteit). Bij de navolgende kostenbepaling wordt geanalyseerd of er op de betreffende locatie ruimte is voor deze versterkingen "in grond". Waar dat niet het geval is worden in plaats daarvan constructieve oplossingen als bijvoorbeeld damwanden gekozen.

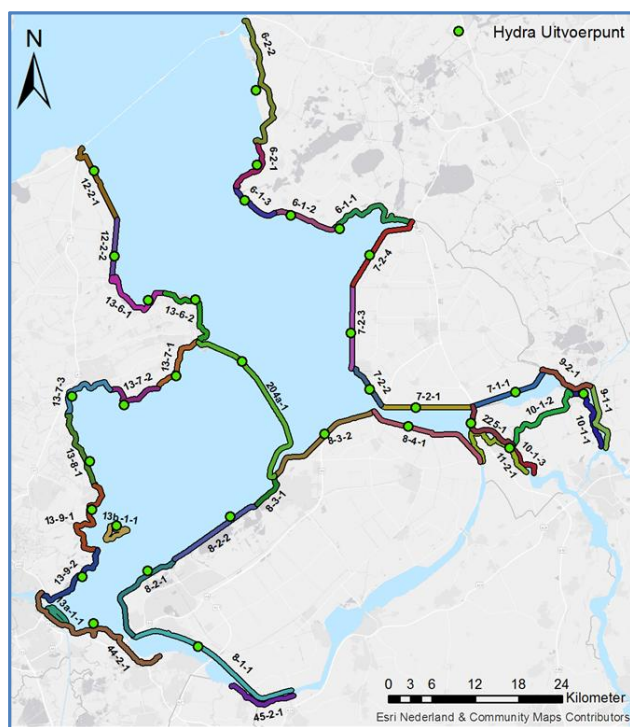
Figuur B.1 vat de methodiek voor het bepalen van de versterkingsopgaven samen. De figuur laat ook zien dat de berekende (fysieke) dijkversterkingsopgaven input zijn voor de kostenvergelijking van de varianten. Na de figuur worden enkele onderdelen meer in detail besproken.



Figuur B.1 Bepaling van de dijkersterkingsopgave

Dijktrajecten

In deze beleidsverkenning hebben we er voor gekozen om te werken met dijktrajecten waarvoor de versterkingsopgave berekend wordt. De dijktrajecten vallen binnen de normtrajecten, zodat binnen een dijktraject overal dezelfde veiligheidsnorm geldt. Verder zijn ze zo gekozen dat zowel de dijkopbouw als de hydrologische belasting binnen het traject redelijk homogeen zijn. Binnen het studiegebied zijn 38 trajecten gedefinieerd, met een gemiddelde lengte van 12,5 km. Binnen de meeste trajecten is een punt aanwezig waarvoor de dijkbelasting berekend is met het model Hydra-zoet. Omdat de Hydra-berekeningen zijn uitgevoerd voordat een definitieve trajectindeling was gemaakt is dat soms echter niet het geval. In die situaties hebben we voor een dijktraject de berekende belasting van een naastgelegen traject gebruikt. Figuur B.2 geeft de trajectindeling en de ligging van de Hydra uitvoerpunten weer. Voor ieder dijkvak zijn gegevens over de dijk en de ondergrond verzameld, vanuit verschillende bronnen.



Figuur B.2 Dijkstrajectindeling en Hydra-uitvoerlocaties.

Normering en toetsing

Vanaf 2017 zullen waterkeringen aan een wettelijk vastgestelde maximale overstromingskans. In de wet worden voor een normtraject twee verschillende normen vastgelegd, een zogenaamde signaleringswaarde, en een maximaal toelaatbare overstromingskans¹. In de methodiek wordt gewerkt met de maximaal toelaatbare overstromingskans. Op welk moment precies gesignaleerd wordt dat een dijk in de toekomst afgekeurd gaat worden is in de methodiek immers niet relevant.

De veiligheidsnormen leggen een faalkans vast waaraan dijken moeten voldoen. Omdat de totale faalkans wordt bepaald door de kansen van de verschillende faalmechanismen moet de faalkans per mechanisme kleiner zijn. Dit wordt aangeduid met de zogenaamde faalkansruimte. In de methodiek wordt de norm, ofwel de toegestane faalkans op normtrajectniveau, terugvertaald naar een toegestane faalkans per faalmechanisme op doorsnedeniveau (hier geldt ook een zogenaamd lengte-effect; hoe langer een dijkstrekking is, hoe kleiner de faalkans van een individuele doorsnede mag zijn). In deze studie beperken we ons tot de drie belangrijkste faalmechanismen: overloop en overslag, piping en macrostabiliteit binnenwaarts.

Bij de toedeling van faalkansruimte aan de dijkvakken gebruiken we de standaard faalkansboekhouding uit het WBI. Het faalmechanisme overloop en overslag krijgt een faalkansruimte van 24%. Opbarsten en piping krijgt eveneens 24% en macrostabiliteit binnenwaarts 4%. De resterende faalkansruimte wordt verdeeld over de

¹ De signaleringswaarde is de waarde die gebruikt wordt om op "af te keuren" bij de beoordeling. Aangezien een versterking daarna nog 15-20 jaar kan duren is een bepaalde "buffer" ingebouwd in de tijd. In die periode kan de faalkans van de dijk 'verslechteren' van de signaleringswaarde naar de afkeurkans (maximaal aanvaardbare faalkans). Typisch geldt dat de afkeurkans ongeveer gelijk is aan 3x de signaleringswaarde.

overige mechanismen. In deze studie hebben we ervoor gekozen om de faalkans-boekhouding niet locatiespecifiek te optimaliseren. In plaats daarvan verwijderen we kleine versterkingsopgaven simpelweg uit de uitkomsten. De gedachte hierbij is dat dit de opgaven zijn die wegvallen door meer "op maat" te beoordelen. Kruinverhogingen kleiner dan 10 centimeter, en dijkbasisverbredingen kleiner dan 3 meter voor macrostabiliteit en kleiner dan 5 meter voor piping zijn niet meegenomen.

Faalmechanisme overloop en overslag

Bij het bepalen van de faalkans en de versterkingsopgave voor het faalmechanisme *overloop en overslag* staat de overschrijdingsfrequentielijn van het hydraulische belasting niveau (HBN) centraal. Deze volgt uit de berekeningen met het model Hydra-Zoet, Bij het bepalen van het HBN is een overslagdebiet hebben we 5 l/m/s gehanteerd voor oude zeedijken en 10 l/m/s voor nieuwe polderdijken. We hebben in de berekening gebruik gemaakt van de VNK dijkprofielen.

Om de statistische en modelonzekerheden in belastingen te verdisconteren, wordt conform het ontwerpinstrumentarium OI2014 (RWS 2015) bovenop de overschrijdingsfrequentielijn een onzekerheidstoeslag van 40 cm gezet, zowel bij de toetsing als bij het ontwerp. We houden geen rekening gehouden met onzekerheid in de golven.

Bij het ontwerpen is het uitgangspunt dat de waterkering tijdens de hele levensduur (50 jaar) voldoet aan de norm. Door het plaatsen van extra pompen is het voor sommige locaties mogelijk dat de waterstand en het HBN in verloop van de tijd daált. Daarom wordt op twee momenten de ontwerphoogte bepaald: (1) op het moment van toetsen van de kering, t_0 , en (2) aan het eind van de levensduur van de kering, t_0+50 jaar. De hoogste ontwerphoogte is de basis voor de berekende hoogteopgave van de waterkering.

Voor de Houtribdijk en de verbindende kering Ramspol hebben we niet gewerkt met het HBN en een bepaald toelaatbaar overslagdebiet. Voor deze keringen is een zekere mate van overslag toegestaan zolang deze keringen maar voldoende standvast zijn. In deze analyse hebben we de hoogteopgave gelijk gesteld aan de waterstandsstijging.

Faalmechanisme macrostabiliteit

Macrostabiliteit is een mechanisme dat normaal gesproken getoetst en ontworpen wordt bij een vakgrootte van enkele honderden meters tot maximaal enkele kilometers: veel kleinere trajecten dus dan we in deze studie gebruiken. Voor macrostabiliteit zijn in het gebied niet voor elke locatie analyses beschikbaar. Voor ieder Hydra-uitvoerpunt (zie Figuur E.2) is in principe het dichtstbijzijnde punt gekozen waarvoor analyses beschikbaar zijn en daarvan is aangenomen dat het representatief is voor het hele dijktraject. Voor deze beleidsmatige gebiedsbrede verkenning lijkt dit een aanvaardbare methode, omdat afwijkingen die hierdoor per dijktraject kunnen ontstaan over het gebied zullen uitmiddelen. Voor enkele trajecten lag er geen punt met (bruikbare) gegevens in de buurt. Voor deze trajecten is geen macrostabiliteitsopgave berekend.

Voor macrostabiliteit hebben we met het model MStab zogenaamde fragility curves berekend. Deze curves geven de relatie weer tussen de faalkans en de hydraulische belasting van de dijk. Met behulp van deze curves kan de toetsing voor macrostabiliteit worden berekend en de ontwerpopgave bij dijkversterking worden bepaald. De fragility curve wordt afgeleid door te variëren met de buitenwaterstand. De curves hebben we ook bepaald voor situaties met een extra berm van 5, 10, 20, 40 en 80 meter, zodat bekend is hoe de fragility curve eruit komt te zien na versterking.

We houden in de methode rekening de zogenaamde bewezen sterkte van de waterkeringen. Dit doen we door voor macrostabiliteit de eventueel berekende faalkans voor waterstanden met een terugkeertijd van groter dan 1/10 per jaar niet mee te

nemen. Voor de verbindende keringen Houtribdijk en Ramspol is macrostabiliteit buiten beschouwing gelaten.

Faalmechanisme piping

Piping berekenen we in de methodiek volgens de vigerende WBI systematiek met de formule van Sellmeijer (met uplift/heave). Deze formule resulteert na de meest recente kalibratie in een groter ruimtebeslag dan voorheen. In combinatie met het toevoegen van het lengte-effect aan dit mechanisme is de opgave door dit mechanisme vaak groot.

Als maatregel tegen piping wordt standaard een berm ontworpen om de kwelweglengte te vergroten. Een bewezen alternatief is een kwelscherm. Er wordt op dit moment onderzoek gedaan naar kostenbesparende methodes zoals doorlatende doeken en grofzandbarrières. Mogelijke kostenbesparingen door deze innovatieve methodes hebben we niet meegenomen in deze studie.

De fragility curves voor piping hebben we opgesteld aan de hand van de VNK data. Alle parameters zijn hier beschikbaar voor het uitvoeren van een probabilistische analyse. We hebben, net als bij macrostabiliteit, gekozen voor het dichtstbijzijnde datapunt bij de Hydra-uitvoer om de fragility curve te construeren.

Voor een groot deel van de Flevopolder is piping binnen VNK als faalmechanisme uitgesloten omdat het intredepunt hier is dichtgeslibt, en zodoende piping niet kan voorkomen. Voor een klein deel van de vakken zijn geen gegevens beschikbaar omdat binnen VNK is geconstateerd dat piping hier niet dominant was in de bepaling van de faalkans. Dit wil echter niet zeggen dat het hier helemaal niet speelt. Deze vakken hebben we in de analyse buiten beschouwing gebleven. Voor deze trajecten hebben we dus geen opgave voor piping berekend. De standaard faalkansboekhouding hebben we echter niet aangepast.

Ook voor piping hebben we rekening gehouden met bewezen sterkte van de keringen. Net als voor macrostabiliteit nemen we de eventueel berekende faalkans voor waterstanden met een terugkeertijd van groter dan 1/10 per jaar niet mee. Voor de verbindende keringen Houtribdijk en Ramspol hebben we piping buiten beschouwing gelaten.

In de rekenregel voor piping wordt geen rekening gehouden met de tijdsduur van de belasting. Op windgedomineerde locaties kunnen de hoogwaters (incl. opwaaiing) vrij kort van duur (orde uren) zijn. Hierdoor is het mogelijk dat de faalkans bij een bepaald hoogwater in de fragility curve te hoog wordt ingeschat; het mechanisme (in dit geval de 'pipe' onder de dijk) heeft niet de tijd om zich volledig te ontwikkelen. In praktijk zal op deze plaatsen wanneer de dijk niet blijkt te voldoen een zogenaamde toetsing op maat worden uitgevoerd (toetslaag 3 binnen het WBI). Het verdient aanbeveling om in het vervolg van het project te kijken hoe we hier binnen deze beleidsstudie pragmatisch mee om kunnen gaan. Omdat in deze pilotstudie voornamelijk naar verschillen in dijkkosten bij verschillende peilvarianten wordt gekeken heeft dit naar verwachting geen groot effect op de conclusies. De absolute dijkkosten per variant worden wellicht wel overschat.

Bodemdaling

Bodemdaling zorgt ervoor dat de kruin van een dijk langzaam zakt, waardoor de kerende hoogte van de dijk afneemt. We hebben het effect van bodemdaling bij toetsing en ontwerp meegenomen als toeslag op de waterstanden. Tabel B.1 geeft de aangenomen snelheid van de bodemdaling per dijktraject aan. Deze gegevens zijn ontleend aan de studie WV21 (Kuijper et al, 2010). In deze studie is gekeken naar de periode 2000-2050. We hebben voor de uitgevoerde pilotberekeningen aangenomen dat de snelheid van bodemdaling daarna niet verandert.

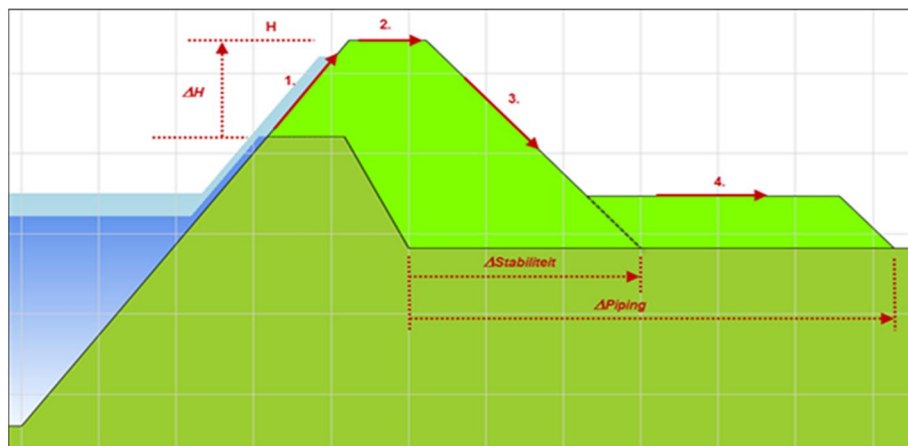
Traject	Bodemdaling (cm/jaar)	Traject	Bodemdaling (cm/jaar)	Traject	Bodemdaling (cm/jaar)
6-1-1	0,33	8-2-2	0,5	13-6-1	0,17
6-1-2	0	8-3-1	0,17	13-6-2	0,17
6-1-3	0,33	8-3-2	0,03	13-7-1	0,17
6-2-1	0,17	8-4-1	0,17	13-7-2	0,17
6-2-2	0,17	9-1-1	0,33	13-7-3	0,17
7-1-1	0,17	9-2-1	0,5	13-8-1	0,42
7-2-1	0,17	10-1-1	0	13-9-1	0,42
7-2-2	0,03	10-1-2	0,33	13-9-2	0,42
7-2-3	0,03	10-1-3	0,33	13a-1-1	0,08
7-2-4	0,03	11-2-1	0,08	13b-1-1	0,08
8-1-1	0,5	12-2-1	0,17	44-2-1	0
8-2-1	0,83	12-2-2	0,17	45-2-1	0,17

Tabel B.1 Jaarlijkse bodemdaling per dijktraject.

Bijlage C Het KOSWAT instrumentarium voor bepaling dijkversterkingskosten.

Voor het berekenen van de dijkversterkingskosten maakt de methodiek gebruik van het KOSWAT instrumentarium (KOSTen van versterken van WATERkeringen, zie ook Deltares 2014). KOSWAT is door de jaren heen uitgegroeid tot hét instrument waarmee een zelfde kostenbasis gegeven kan worden aan alle geraamde maatregelen en oplossingen over programma's en projecten heen. Het is gebruikt bij het bepalen van de economisch optimale veiligheidsnormen binnen het Deltaprogramma en bij het vaststellen van een eerste programmaring voor het HWBP.

Om tot een raming van de kosten te komen maakt KOSWAT gebruik van informatie over de dimensies van de huidige dijk, en de ligging van die dijk in zijn omgeving. Op basis van de benodigde toename van de kruinhoogte (ΔH), de toename van de dijkbasis ten behoeve van macrostabiliteit (ΔS) en de toename van dijkbasis ten behoeve van piping (ΔP) wordt een nieuw dijkontwerp vastgesteld (zie Figuur C.1). Deze drie parameters worden bepaald in de methodiek uit de vorige stap. Voor het dijkontwerp in grond wordt in KOSWAT de buitentaludhelling van het bestaande profiel doorgetrokken totdat de vereiste kruinhoogte is bereikt (1). De huidige kruinbreedte blijft ongewijzigd (2). Er wordt een taludverflauwing toegepast om een eventuele macrostabiliteitsopgave op te lossen¹ (3), en eventueel een berm aangelegd als oplossing voor de resterende pipingopgave (4).



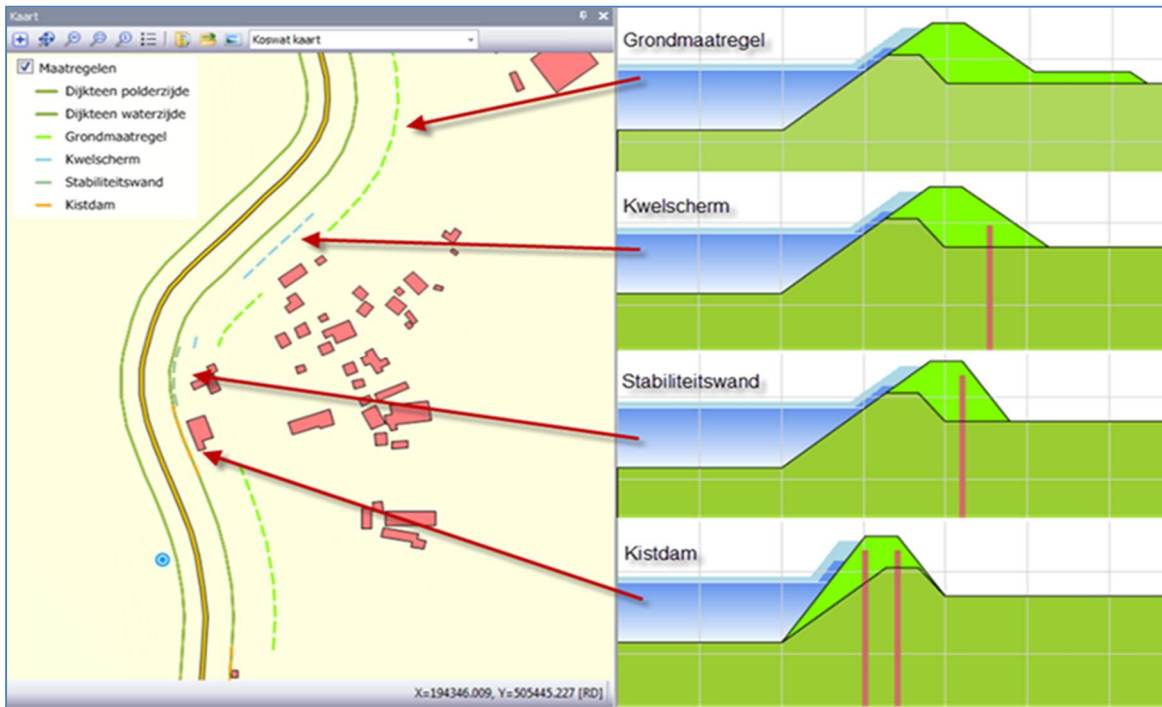
Figuur C.1 Dimensies van een versterkingsmaatregel in grond.

In KOSWAT wordt vervolgens bepaald op welke plaatsen in het dijkvak de dijkversterking daadwerkelijk in grond uitgevoerd kan worden. Op plaatsen waar bebouwing, spoorwegen of grote waterlichamen in de weg liggen, wordt gekozen voor een constructieve maatregel. Op de achtergrond wordt een omgevingsdatabase gebruikt om te bepalen waar deze objecten precies liggen.

Allereerst zal bij een ruimteprobleem getracht worden de opgave op te lossen met een licht kwelscherm (in plaats van de pipingberm), wanneer zelfs daar geen ruimte voor is wordt overgestapt op een stabiliteitswand of zelfs een kistdam. Dit wordt in KOSWAT aangeduid met de zogenaamde verdringingsreeks. De oplossingen vergen steeds minder ruimte, maar worden wel steeds duurder. KOSWAT ontwerpt op een dijksectie bij een versterking zodoende een mix van maatregelen. Dit betekent dat

¹ De binnentaludhelling blijft minimaal zo flauw als deze was in de oorspronkelijke dijk

oplossingen in grond en constructief versnipperd over het een dijkvak gelegen zijn, zie Figuur C.2. Bij de gevonden mix van maatregelen op een dijkvak worden uiteindelijk de kosten bepaald.



Figuur C.2 Mix van maatregelen op een dijkvak.

Bij het ramen van de kosten voor de aanleg van een dijk wordt in KOSWAT rekening gehouden met alle gemaakte kosten. Dus niet alleen de kosten voor het aan te leggen grondlichaam of constructie, maar ook de kosten voor het verwijderen van bekleding, vervangen van weginfrastructuur, aan te kopen gronden, etc. Vanuit de zogenaamde Benoemde Directe Bouwkosten (bepaald op basis van hoeveelheden en eenheidsprijzen) worden de totale investeringskosten bepaald met behulp van opslagfactoren volgens de Standaard Systematiek voor Kostenramingen in de Grond Water en Wegenbouw sector (SSK-2010).

In deze analyse worden in een database allerlei vooraf berekende combinaties van de drie parameters ΔH , ΔS en ΔP klaargezet. Vervolgens wordt vanuit de fragility-curves per mechanisme aangegeven wat de benodigde ΔH , ΔP en ΔS zijn. Uit de database wordt vervolgens bij de juiste combinatie de bijbehorende kostenraming gekozen (al dan niet lineair geïnterpoleerd).

Bijlage D Resultaten berekeningen pompcapaciteit en –duur

De tabel geeft de resultaten weer van de iteratieve berekeningen met het model DEZY waarin de benodigde pompcapaciteit en pompduur (als percentage van het winterseizoen) in drie peiljaren zijn berekend voor de strategieën van het IJsselmeer. Op basis van de pompcapaciteit en pompduur is een benadering gemaakt van de totaal verpompte hoeveelheid water in de winter. Hierbij is geen rekening gehouden met de afname van de pompcapaciteit bij een grotere opvoerhoogte (hoge zeewaterstand t.o.v. het meerpeil).

		2075			2125			2175		
Strategie en Spuicapaciteit		Pomp-capaciteit (m ³ /sec)	Pomp-duur winter	Verpompt water (*10 ⁹ m ³)	Pomp-capaciteit (m ³ /sec)	Pomp-duur winter	Verpompt water (*10 ⁹ m ³)	Pomp-capaciteit (m ³ /sec)	Pomp-duur winter	Verpompt water (*10 ⁹ m ³)
1a	50%	2700	26%	11,2	3100	27%	13,4	3300	28%	14,3
	100%	1700	38%	10,1	2700	31%	13,3	3200	29%	14,3
	200%	800	59%	7,4	2300	36%	13,2	3100	29%	14,3
1b	50%	900	67%	9,5	1000	76%	12,0	1100	75%	12,9
	100%	800	68%	8,5	1000	76%	11,9	1100	75%	12,9
	200%	600	70%	6,6	1000	75%	11,8	1100	75%	12,9
2a	50%	2500	25%	9,9	3000	27%	12,5	3200	27%	13,7
	100%	1400	36%	7,9	2300	34%	12,3	3000	29%	13,6
	200%	300	57%	2,7	1700	43%	11,6	2800	31%	13,6
2b	50%	800	65%	8,1	1000	70%	11,1	1100	71%	12,2
	100%	600	64%	6,0	900	76%	10,8	1100	71%	12,2
	200%	300	57%	2,7	900	73%	10,3	1000	73%	11,4
3a	50%	2500	25%	9,9	2900	26%	12,0	3100	27%	13,1
	100%	1400	36%	7,9	2100	34%	11,4	2700	31%	13,0
	200%	300	57%	2,7	1400	46%	10,1	2300	36%	12,9
3b	50%	800	65%	8,1	900	74%	10,5	1000	75%	11,8
	100%	600	64%	6,0	900	70%	9,9	1000	74%	11,7
	200%	300	57%	2,7	800	71%	8,9	1000	73%	11,5

Bijlage E Overzicht doorgerekende varianten

De tabel geeft een overzicht van de varianten die zijn doorgerekend met het model Hydra-zoet en waarvoor vervolgens de benodigde dijkversterkingen en de kosten daarvan zijn bepaald.

Nr.	Capaciteit spui Afsluitdijk	Strategie		Zicht-jaar	Pompen Afsluitdijk		Pompen Houtribdijk	
		IJss. meer	Mark. meer		m ³ /s	Aanslag peil	m ³ /s	Aanslag peil
1	huidig	1a	1b	2075	1600	-0,35	0	-
				2125	2600	-0,35	0	-
				2175	3100	-0,35	0	-
2	huidig	1b	1a	2075	800	-0,35	100	-0,38
				2125	1000	-0,35	100	-0,38
				2175	1100	-0,35	100	-0,38
3	huidig	2a	1a	2075	1400	-0,20	100	-0,38
				2125	2300	-0,05	100	-0,38
				2175	3000	-0,05	100	-0,38
4	huidig	2b	1a	2075	600	-0,20	100	-0,38
				2125	900	-0,05	100	-0,38
				2175	1100	-0,05	100	-0,38
5	huidig	3a	2a	2075	1400	-0,20	100	-0,34
				2125	2100	0,10	100	-0,30
				2175	2700	0,25	100	-0,30
6	huidig	3b	2a	2075	600	-0,20	100	-0,34
				2125	900	0,10	100	-0,30
				2175	1000	0,25	100	-0,30
7	dubbel	3a	2a	2075	300	-0,20	100	-0,34
				2125	1400	0,10	100	-0,30
				2175	2300	0,25	100	-0,30

Bijlage F

Berekende waterstanden en hydraulische belastingniveaus voor 2175

Deze tabel geeft de berekende waterstanden en hydraulische belastingniveaus in 2075 van 6 strategieën voor de locaties langs het IJsselmeer en Ketelmeer.

Locatie	Strategie 1a			Strategie 1b			Strategie 2a			Strategie 2b			Strategie 3a			Strategie 3b		
	Waterstand		HBN	Waterstand		HBN	Waterstand		HBN	Waterstand		HBN	Waterstand		HBN	Waterstand		HBN
	1:10 ¹	1:10 ⁵	1:10 ⁵	1:10 ¹	1:10 ⁵	1:10 ⁵	1:10 ¹	1:10 ⁵	1:10 ⁵	1:10 ¹	1:10 ⁵	1:10 ⁵	1:10 ¹	1:10 ⁵	1:10 ⁵	1:10 ¹	1:10 ⁵	1:10 ⁵
DR06 hmp 10.2	0,48	1,93	3,27	1,42	2,54	4,00	0,74	2,11	3,49	1,56	2,61	4,11	1,01	2,31	3,75	1,72	2,71	4,26
DR06 hmp 24.2	0,13	1,52	2,61	1,32	2,22	3,86	0,39	1,79	2,92	1,46	2,26	3,95	0,69	2,02	3,28	1,63	2,30	4,07
DR06 hmp 31.9	0,00	1,48	2,55	1,29	2,12	3,82	0,27	1,76	2,90	1,43	2,15	3,89	0,58	1,99	3,28	1,61	2,18	3,98
DR06 hmp 39.2	0,14	1,51	1,95	1,32	2,20	3,02	0,38	1,79	2,29	1,46	2,24	3,09	0,67	2,02	2,62	1,63	2,28	3,17
DR06 hmp 46.3	0,18	1,56	2,17	1,35	2,34	3,51	0,43	1,83	2,55	1,50	2,40	3,60	0,74	2,06	2,95	1,67	2,47	3,72
DR07 hmp 8.3	0,38	1,86	4,88	1,40	2,55	6,00	0,65	2,10	5,38	1,54	2,62	6,23	0,94	2,33	5,89	1,71	2,72	6,54
DR07 hmp 19.6	0,38	1,94	5,48	1,38	2,56	6,40	0,64	2,17	5,96	1,52	2,64	6,64	0,93	2,39	6,44	1,70	2,75	6,96
DR07 hmp 28.7	0,60	2,54	6,08	1,45	2,94	6,50	0,86	2,75	6,42	1,60	3,05	6,74	1,13	2,96	6,77	1,76	3,19	7,03
DR07 hmp 36.2	0,88	2,96	5,48	1,64	3,30	5,77	1,13	3,11	5,72	1,80	3,41	5,96	1,40	3,26	5,95	2,00	3,54	6,18
DR08 hmp 25.2	0,52	2,43	6,76	1,42	2,84	7,29	0,78	2,64	7,19	1,56	2,95	7,59	1,06	2,85	7,61	1,73	3,09	7,95
DR08 hmp 12.2	0,88	3,04	5,39	1,63	3,34	5,64	1,14	3,19	5,63	1,79	3,45	5,83	1,40	3,34	5,86	1,98	3,58	6,06
DR12 hmp 2.9	-0,01	1,50	3,94	1,31	2,14	5,15	0,26	1,77	4,31	1,45	2,17	5,29	0,58	2,00	4,71	1,62	2,20	5,45
DR12 hmp 15.3	0,08	1,52	2,97	1,33	2,18	4,38	0,35	1,79	3,34	1,47	2,21	4,49	0,66	2,02	3,77	1,64	2,26	4,64
DR13 hmp 2.9	-0,04	1,49	2,11	1,30	2,13	3,42	0,24	1,76	2,40	1,44	2,16	3,52	0,56	2,00	2,78	1,61	2,18	3,64
DR13 hmp 10.4	-0,11	1,47	4,54	1,28	2,07	5,83	0,17	1,74	4,96	1,42	2,09	5,98	0,50	1,97	5,40	1,59	2,11	6,19
VK04 hmp 53.0	-0,01	1,49	4,09	1,30	2,13	5,52	0,27	1,76	4,55	1,44	2,16	5,69	0,58	1,99	5,02	1,61	2,19	5,91
VK04 hmp 56.2	0,06	1,50	3,36	1,31	2,18	5,00	0,33	1,77	3,80	1,45	2,22	5,15	0,64	2,00	4,28	1,62	2,27	5,33
VK25 hmp 7.5	1,26	3,57	5,11	1,89	3,81	5,42	1,52	3,67	5,28	2,06	3,91	5,58	1,78	3,77	5,44	2,26	4,06	5,79
Gemiddeld	0,32	1,96	4,04	1,41	2,53	5,03	0,59	2,19	4,39	1,55	2,59	5,18	0,88	2,40	4,77	1,73	2,67	5,79

Bijlage G Kosten waterafvoer per variant

Variant 1 (strategie IJsselmeer 1a, Markermeer 1b) kosten in M€ <i>Om kleine bedragen zichtbaar te houden zijn de kosten niet afgerond.</i>					
	2025-2075	2076-2125	2126-2175	Totaal	% van sub totaal
gemaal Afsluitdijk					
Investering	1.040	653	297	1.990	19%
Vervanging	208	650	1.841	2.700	25%
B en O	540	1.390	1.851	3.780	36%
Energie	354	826	980	2.160	20%
Subtotaal	2.141	3.519	4.969	10.629	
Gemaal Houtribdijk					
Investering	0	0	0	0	
Vervanging	0	0	0	0	
B en O	0	0	0	0	
Energie	0	0	0	0	
Subtotaal	0	0	0	0	
Gemaal Veluwerandmeren					
Investering	0	0	0	0	
Vervanging	0	0	0	0	
B en O	0	0	0	0	
Energie	0	0	0	0	
Subtotaal	0	0	0	0	
Spuisluizen Afsluitdijk					
Investering	165	0	0	165	15%
Vervanging	41	123	247	411	38%
B en O	99	197	197	494	46%
Energie	0	0	0	1	0%
Subtotaal	305	321	445	1070	
Totaal variant 1	2.445	3.841	5.413	11.700	

Variant 2 (strategie IJsselmeer 1b, Markermeer 1a)					
kosten in M€					
<i>Om kleine bedragen zichtbaar te houden zijn de kosten niet afgerond.</i>					
	2025-2075	2076-2125	2126-2175	Totaal	% van sub totaal
gemaal Afsluitdijk					
Investering	535	119	59	713	10%
Vervanging	107	451	1.016	1.574	22%
B en O	473	1.120	1.341	2.933	41%
Energie	302	724	879	1.906	27%
Subtotaal	1.417	2.414	3.295	7.126	
gemaal Houtribdijk					
Investering	59	0	0	59	15%
Vervanging	12	30	83	125	31%
B en O	30	60	60	149	37%
Energie	14	28	29	70	17%
Subtotaal	115	117	172	404	
Gemaal Veluwerandmeren					
Investering	0	0	0	0	
Vervanging	0	0	0	0	
B en O	0	0	0	0	
Energie	0	0	0	0	
Subtotaal	0	0	0	0	
Spuisluizen Afsluitdijk					
Investering	165	0	0	165	15%
Vervanging	41	123	247	411	38%
B en O	99	197	197	494	46%
Energie	0	0	0	1	0%
Subtotaal	305	321	445	1070	
Totaal variant 2	1.836	2.853	3.911	8.599	

Variant 3 (strategie IJsselmeer 2a, Markermeer 1a)					
kosten in M€					
<i>Om kleine bedragen zichtbaar te houden zijn de kosten niet afgerond.</i>					
	2025-2075	2076-2125	2126-2175	Totaal	% van sub totaal
gemaal Afsluitdijk					
Investering	921	564	446	1.931	20%
Vervanging	184	573	1.660	2.418	25%
B en O	462	1.209	1.716	3.388	35%
Energie	278	715	925	1.918	20%
Subtotaal	1.846	3062	4.747	9.654	
gemaal Houtribdijk					
Investering	59	0	0	59	19%
Vervanging	12	30	65	107	34%
B en O	30	60	60	149	47%
Energie	0	0	0	0	0%
Subtotaal	101	89	125	316	
Gemaal Veluwerandmeren					
Investering	11	0	0	11	16%
Vervanging	2	6	12	20	28%
B en O	6	11	11	28	39%
Energie	2	5	5	12	17%
Subtotaal	21	21	28	70	
Spuisluizen Afsluitdijk					
Investering	165	0	0	165	15%
Vervanging	41	123	247	411	38%
B en O	99	197	197	494	46%
Energie	0	0	0	1	0%
Subtotaal	305	321	445	1070	
Totaal variant 3	2.272	3.494	5.344	11.110	

Variant 4 (strategie IJsselmeer 2b, Markermeer 1a)					
kosten in M€					
<i>Om kleine bedragen zichtbaar te houden zijn de kosten niet afgerond.</i>					
	2025-2075	2076-2125	2126-2175	Totaal	% van subtotaal
gemaal Afsluitdijk					
Investering	386	208	119	713	12%
Vervanging	77	350	846	1.274	21%
B en O	320	920	1267	2.506	41%
Energie	212	600	827	1.639	27%
Subtotaal	995	2.078	3.060	6.133	
gemaal Houtribdijk					
Investering	59	0	0	59	19%
Vervanging	12	30	65	107	34%
B en O	30	60	60	149	47%
Energie	0	0	0	0	0%
Subtotaal	101	89	125	316	
Gemaal Veluwerandmeren					
Investering	11	0	0	11	16%
Vervanging	2	6	12	20	28%
B en O	6	11	11	28	39%
Energie	2	5	5	12	17%
Subtotaal	21	21	28	70	
Spuisluizen Afsluitdijk					
Investering	165	0	0	165	15%
Vervanging	41	123	247	411	38%
B en O	99	197	197	494	46%
Energie	0	0	0	1	0%
Subtotaal	305	321	445	1070	
Totaal variant 4	1.422	2.510	3.657	7.589	

Variant 5 (strategie IJsselmeer 3a, Markermeer 2a)					
kosten in M€					
<i>Om kleine bedragen zichtbaar te houden zijn de kosten niet afgerond.</i>					
Variant 5	2025-2075	2076-2125	2126-2175	Totaal	% van sub totaal
gemaal Afsluitdijk					
Investering	921	446	386	1.752	19%
Vervanging	184	549	1.589	2.323	26%
B en O	463	1.149	1.567	3.179	35%
Energie	278	680	861	1.819	20%
Subtotaal	1.845	2.824	4.403	9.073	
gemaal Houtribdijk					
Investering	59	0	0	59	14%
Vervanging	12	30	83	125	30%
B en O	30	60	60	149	36%
Energie	14	34	39	87	21%
Subtotaal	116	123	182	420	
Gemaal Veluwerandmeren					
Investering	11	0	0	11	16%
Vervanging	2	6	12	20	28%
B en O	6	11	11	28	39%
Energie	2	5	5	12	17%
Subtotaal	21	21	28	70	
Spuisluizen Afsluitdijk					
Investering	165	0	0	165	15%
Vervanging	41	123	247	411	38%
B en O	99	197	197	494	46%
Energie	0	0	0	1	0%
Subtotaal	305	321	445	1070	
Totaal variant 5	2.287	3.290	5.058	10.634	

Variant 6 (strategie IJsselmeer 3b, Markermeer 2a)					
kosten in M€					
<i>Om kleine bedragen zichtbaar te houden zijn de kosten niet afgerond.</i>					
	2025-2075	2076-2125	2126-2175	Totaal	% van sub totaal
gemaal Afsluitdijk					
Investing	386	208	59	653	11%
Vervanging	77	350	719	1.146	20%
B en O	319	860	1.174	2.353	41%
Energie	211	561	763	1.536	27%
Subtotaal	993	1.979	2.715	5.688	
gemaal Houtribdijk					
Investing	59	0	0	59	13%
Vervanging	12	48	65	125	27%
B en O	36	66	60	161	35%
Energie	26	46	41	113	25%
Subtotaal	133	160	166	458	
Gemaal Veluwerandmeren					
Investing	11	0	0	11	16%
Vervanging	2	6	12	20	28%
B en O	6	11	11	28	39%
Energie	2	5	5	12	17%
Subtotaal	21	21	28	70	
Spuisluizen Afsluitdijk					
Investing	165	0	0	165	15%
Vervanging	41	123	247	411	38%
B en O	99	197	197	494	46%
Energie	0	0	0	1	0%
Subtotaal	305	321	445	1070	
Totaal variant 6	1.452	2.482	3.354	7.287	

Variant 7 (strategie IJsselmeer 3a met dubbele spui, Markermeer 2a)					
kosten in M€					
<i>Om kleine bedragen zichtbaar te houden zijn de kosten niet afgerond.</i>					
Variant 7	2025-2075	2076-2125	2126-2175	Totaal	% van sub totaal
gemaal Afsluitdijk					
Investering	208	713	564	1.485	23%
Vervanging	42	309	974	1.325	21%
B en O	152	704	1.298	2.155	34%
Energie	94	452	814	1.359	21%
Subtotaal	496	2.178	3.650	6.324	
gemaal Houtribdijk					
Investering	59	0	0	59	13%
Vervanging	12	30	83	125	28%
B en O	30	60	61	151	34%
Energie	21	43	44	108	24%
Subtotaal	122	132	188	443	
Gemaal Veluwerandmeren					
Investering	11	0	0	11	16%
Vervanging	2	6	12	20	28%
B en O	6	11	11	28	39%
Energie	2	5	5	12	17%
Subtotaal	21	21	28	70	
Spuisluizen Afsluitdijk					
Investering	329	0	0	329	15%
Vervanging	82	247	494	823	38%
B en O	197	395	395	987	46%
Energie	0	1	1	2	0%
Subtotaal	609	642	889	2.140	
Totaal variant 7	1.248	2.974	4.756	8.977	