Deltares

IJsselmeerpeil bij zeespiegelstijging

Waterveiligheid IJsselmeergebied

ir. G.J. ter Maat
dr.ir. G.A.M. van Meurs

1200163-003

© Deltares, 2010

Titel
IJsselmeerpeil bij zeespiegelstijging

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS-Waterdienst	1200163-003	1200163-003-VEB-0007-sr	83

Samenvatting

Klimaatverandering heeft gevolgen voor het niveau van de zeespiegel en de intensiteit van neerslag, verdamping en afvoer van water door de rivieren. Klimaatverandering heeft dan ook gevolgen voor de waterveiligheid en de waterhuishouding in het IJsselmeer. Mogelijkheden tot aanpassen van het watersysteem zijn onderzocht om te blijven voldoen aan de eis van waterveiligheid.

Mogelijke strategieën in het omgaan met de gevolgen van klimaatveranderingen voor het IJsselmeer bestaan uit (1) meestijgen van het IJsselmeerpeil met de stijging van de zeespiegel of (2) handhaven van bestaande peilen met behulp van gemalen. De eerste strategie heeft gevolgen voor maatgevende hoogwateromstandigheden en leidt tot een veiligheidsopgave. Het vraagt om aanpassing van het watersysteem door waterkeringen hoger en sterker te maken, gemalen rondom het IJsselmeer uit te breiden en schutsluizen en havens aan te passen. De tweede strategie vraagt om het plaatsen van grote gemalen op de Afsluitdijk om overtollig water te lozen; de veiligheidsopgave is beperkt. In beide strategieën zijn de gevolgen voor de zoetwatervoorziening een punt van aandacht. Mengvormen van beide strategieën zijn uiteraard denkbaar.

De gevolgen van de strategie meestijgen van het IJsselmeerpeil op waterveiligheid zijn ingrijpend. Deze veranderingen bieden kansen om ze af te stemmen op de lokale ambities voor de ruimtelijke ontwikkeling van een gebied; doorbraakbestendige dijk daar waar woningbouw voorzien is, een overslagbestendige dijk in samenhang met binnendijkse natte natuurontwikkeling, en de aanleg van vooroevers en luwtedammen om buitendijkse natuurontwikkeling te stimuleren. Een overzicht van mogelijke oplossingsrichtingen wordt gepresenteerd.

De gevolgen van een verhoging van het meerpeil in het IJsselmeer laten zich vooral gelden bij de delta van de rivieren de IJssel en de Vecht en de verschillende steden die aan het water liggen. Dit rapport geeft een beeld van de specifieke aanpak die nodig is. Verder wordt kort stil ingegaan bij de veiligheidsopgave van de Afsluitdijk en de Houtribdijk.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	mei 2010	Ir. G.J. ter Maat		ir. G. Lenselink		ing. M. Huttemen	
		dr.ir. G.A.M. van Meurs					

Status
definitief

Inhoud

Lijst van Tabellen i

Lijst van Figuren iii

1 Inleiding 1
1.1 Achtergrond en context 1
1.2 Probleembeschrijving veiligheid IJsselmeer 1
1.3 Klimaatbestendigheid Nederland Waterland 2
1.4 Doelstelling studie 'meestijgen IJsselmeerpeil bij zeespiegelstijging' 2
1.5 Aanpak van de studie op hoofdlijnen 3

2 Nieuw peilbeheer in het IJsselmeer 5
2.1 Spuien onder vrij verval 5
2.2 Strategie meestijgen van het waterpeil in het IJsselmeer 6
2.2.1 Huidige versus verruimde spuicapaciteit bij huidige omstandigheden 7
2.2.2 Situatie in 2050 bij een stijging van de zeespiegel met 0,35 m 8
2.2.3 Situatie in 2100 bij een stijging van de zeespiegel met 1,3 m 9
2.2.4 Conclusies voor 2100 voor waterveiligheid 11
2.2.5 Conclusies voor zoetwatervoorraad 11
2.3 Strategie pompen op de Afsluitdijk 12

3 Veiligheid rondom het IJsselmeer 15
3.1 Faalmechanismen 15
3.2 Benadering van de waterveiligheid 17
3.3 Drie varianten 18
3.4 Maatgevend hoogwater IJsselmeer: resultaten 20
3.4.1 IJsselmeer 20
3.4.2 Rivier de IJssel 22
3.4.3 Rivier de Vecht 22
3.4.4 Indeling in klassen 22
3.4.5 Maatregelen 23
3.5 Traditionele dijkverhoging uit te voeren in grond 24
3.6 Innovatieve aanpassing van de waterkering 24
3.7 Constructieve oplossingen voor stedelijk gebied 26
3.8 Innovatieve constructieve oplossingen 26
3.9 Overslagbestendige dijk 27
3.10 Doorbraakbestendige dijk 28
3.11 Uitvoering – oplossing afhankelijk van lokale omstandigheden 29
3.12 Kostenkentallen dijkophoging 33

4 Oplossingsrichting Afsluitdijk en Houtribdijk 35
4.1 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen voor Houtribdijk 35
4.2 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen voor Afsluitdijk 37
4.2.1 WATERmachine: overslagdijk en binnenmeer 38
4.2.2 Natuurlijk Afsluitdijk: zeewering en natuurlijk 38
4.2.3 Monument in Balans: betonnen stormschild en ontwikkeling van de koppen 38

4.2.4 WaddenWerken: kwelders in de waddenzee 39

5 Oplossingsrichting IJsseldelta 41
5.1 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen 41
5.1.1 Oplossingsrichting hoogwaterbescherming – huidig peilbeheer IJsselmeer 41
5.1.2 Oplossingsrichting hoogwaterbescherming – meestijgen IJsselmeerpeil 41
5.1.3 Nadere toelichting verhogen dijken 44
5.1.4 Nadere toelichting keringen 44
5.1.5 Nieuwe stormvloedkering Ketelbrug 45
5.2 Kostenkentallen van mogelijke maatregelen 46

6 Oplossingsrichting Markermeer-IJmeer 49
6.1 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen 49

7 Oplossingsrichting overige infrastructuur en constructies 51

8 Uitkomsten integrale varianten voor klimaatbestendig NL 53
8.1 NUL-variant, autonoom beleid en beheer 53
8.1.1 Tot het jaar 2020 53
8.1.2 Tot het jaar 2050 53
8.1.3 Tot 2100 54
8.2 Variant I, Maximale zoetwatervoorziening 55
8.3 Variant II, Zee-invloed maximaal buiten houden 55
8.3.1 Tot 2050 55
8.3.2 Tot 2100 56
8.4 Variant III, Maximale spuimogelijkheden 56
8.4.1 Tot 2050 56
8.4.2 Tot 2100 56
8.5 Variant IV, Rijnmonding en IJsselmeer pompen, Zeeuwse Delta open riviermonding 56
8.5.1 Tot 2050 56
8.5.2 Tot 2100 57

Literatuurlijst 59

Bijlage(n)

A Quick scan benodigde pompcapaciteit IJselmeer bij klimaatscenario's A-1
A.1 Inleiding A-1
A.2 Methode A-1
A.3 Klimaatscenario's A-1
A.4 SOBEK-BEKKEN Modelbeschrijving A-3
A.4.1 Bestaande model A-3
A.4.2 Modelaanpassingen A-4
A.4.3 Doorgerekende cases A-5

A.5 Resultaten A-6
A.5.1 T0 A-6
A.5.2 TW+2050 A-7
A.5.3 TW+2100 A-9
A.5.4 TW+2100 met 1.3 m ZSS (i.p.v. 0.85 m) A-11
A.6 Conclusies A-13
A.7 Aanbevelingen A-13
A.8 Literatuur A-14

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1 Overzicht van de belangrijkste cases. Case B is de referentiecase. 7

Tabel 2.2 Benodigde pompcapaciteit (m^3/s) voor het W+ scenario, bij bepaald jaar en bepaalde zeespiegelstijging. 13

Tabel 2.3 De geraamde kosten voor de benodigde pompcapaciteit in miljoen euro voor het W+ scenario in het jaar 2100 bij 85 respectievelijk 135 cm zeespiegelstijging. 13

Tabel 3.1 Samenvatting van de uitgangspunten en aannames van de drie varianten. 19

Tabel 3.2 Dijklengtes ingedeeld in klassen dijkverhoging: variant met een peilopzet van 1,5 m (Deltacommissie). De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10) 22

Tabel 3.3 Dijklengtes ingedeeld in klassen dijkverhoging: variant met peilopzet 1,1 m (flexibel peil). De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10 op bladzijde 20) 23

Tabel 3.4 Dijklengtes ingedeeld in klassen dijkverhoging: variant met peilopzet 0,2 m (pompen). De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10) 23

Tabel 3.5 Percentages Bebouwd en Onbebouwd langs de verschillende waterkeringen 31

Tabel 3.6 Mogelijke maatregelen zijn afhankelijk van de locatie van het dijkvak en de omgeving van het dijkvak 32

Tabel 3.7 Combinatie van gebieden en mogelijke maatregelen. De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10) 32

Tabel 3.8 Kosten dijkverhoging in miljard euro (deze studie) 33

Tabel 3.9 Kosten voor dijkverhoging elders gevonden 33

Tabel 5.1 Oplossingsrichtingen voor lange termijn hoogwaterbescherming in de IJsseldelta en de Vechtmonding (bron: Toekomstvastheid van de hoogwatergeul in de IJsseldelta pp. 29, Rijkswaterstaat, 2009) 43

Tabel 5.2 Maatgevend Hoogwater (MHW) en dijkhoogten in de IJsseldelta 44

Tabel 5.3 Kenmerken kering Ramspol 45

Tabel 5.4 Globale kosten van mogelijke maatregelen voor de toekomstvastheid van de IJsseldelta 47

Tabel 8.1 Benodigde dijkverhoging voor de verschillende gebieden. De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot [10] op bladzijde 20) 53

Tabel 8.2 Benodigde dijkverhoging bij peilopzet van 1,1 m. De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10) 55

Tabel A.1 Toename [%] neerslag A-2

Tabel A.2 Toename [%] verdamping A-2

Tabel A.3 Toename [%] Rijnafvoer A-3

Tabel A.4 Zeespiegelstijging [cm] A-3

Tabel A.5 Overzicht van de doorgerekende cases. Nummer 2 is de referentie. A-6
Tabel A.6 Overzicht inzet gemalen voor cases 4 t/m 6 ..... A-9
Tabel A.7 Overzicht inzet gemalen voor cases 8 t/m 10 ..... A-11
Tabel A.8 Overzicht inzet gemalen voor cases 12 t/m 14 ..... A-12

Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Het verloop van het getij bij Den Oever (13 juli 2009, 12:00 uur). (http://www.actuelewaterdata.nl/waterstand/)	6
Figuur 2.2	Het verloop van het getij bij Kornwerderzand (13 juli 2009, 12:00 uur). (http://www.actuelewaterdata.nl/waterstand/)	6
Figuur 2.3	Vergelijking van het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer per dag voor Case A en Case B.	8
Figuur 2.4	Vergelijking van het maximum waterpeil in het IJsselmeer per dag tussen Case A en Case B.	8
Figuur 2.5	Vergelijking van het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer per dag voor Case B en Case C.	9
Figuur 2.6	Vergelijking van het maximum waterpeil in het IJsselmeer per dag tussen Case B en Case C.	9
Figuur 2.7	Vergelijking van het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer per dag voor Case B en Case D.	10
Figuur 2.8	Vergelijking van het maximum waterpeil in het IJsselmeer per dag tussen Case B en Case D.	10
Figuur 3.1	Dijkringen grenzend aan het IJsselmeergebied	15
Figuur 3.2	Verloop van de kwaliteit van een waterkering als functie van de tijd, mede onder invloed van onderhoud aan de kering.	17
Figuur 3.3	Locaties voor de verschillende dijkringen (DR) waar rekenresultaten voor beschikbaar zijn	19
Figuur 3.4	Benodigde dijkverhoging voor de drie varianten (kust West-Friesland).	20
Figuur 3.5	Benodigde dijkophoging voor de drie varianten (oostelijke oever IJsselmeer).	21
Figuur 3.6	Benodigde dijkverhoging bij de kust van Flevoland.	21
Figuur 3.7	Aanpassing van de waterkering door kruinverhoging.:	24
Figuur 3.8	Biotopen van een laaglandmeer.	24
Figuur 3.9	Golfbreker nabij de kust plus profiel van de dwarsdoorsnede	25
Figuur 3.10	Impressie van een vooroever vanaf een bestaande dijk	25
Figuur 3.11	Keermuur aansluitend op een damwand. Wapening wordt op een werkvloer gemaakt	26
Figuur 3.12	De technieken Mixed in Place (l) en Dijkvernageling (r)	27
Figuur 3.13	Proef voor een overslagbestendige dijk	28
Figuur 3.14	Voor de kust van het IJsselmeergebied is onderscheid gemaakt tussen het landelijke gebied (onbebouwde stukken dijk) en het stedelijke gebied (bebouwde stukken dijk)	30
Figuur 4.1	De Houtribdijk: verbinding van Enkhuizen met Lelystad	35

Figuur 4.2	Een stukje van de Houtribdijk	36
Figuur 4.3	De Afsluitdijk	37
Figuur 7.1	Overzicht van de verschillende havens die gelegen zijn rondom het IJsselmeer.	51
Figuur A.1	WINBOS schematisatie	A-4
Figuur A.2	De gehanteerde aan- en afslagpeilen voor de gemalen Den Oever en Kornwerderzand	A-5
Figuur A.3	Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 1 en 2	A-7
Figuur A.4	Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 1 en 2	A-7
Figuur A.5	Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 t/m 6	A-8
Figuur A.6	Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 t/m 6	A-9
Figuur A.7	Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 7 t/m 10	A-10
Figuur A.8	Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 7 t/m 10	A-10
Figuur A.9	Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 11 t/m 14	A-12
Figuur A.10	Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 11 t/m 14	A-12

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en context

Het rijk streeft naar een samenhangende en integrale aanpak van de waterveiligheid (NWP, 2009). Deze aanpak is gericht op het leggen van verbindingen met de andere opgaven voor een klimaatbestendige inrichting zoals natuur, landbouw en waterbeheer. Het kabinet onderschrijft daarmee de samenhangende visie van de Deltacommissie (Deltacommissie, 2008) en neemt dit advies als uitgangspunt voor verdere uitwerking.

De beleidsopgave is om tijdig maatregelen te nemen voor de gevolgen van klimaatverandering. Het gaat erom waterveiligheid te blijven waarborgen en een verhoogde aanvoer van de rivier te blijven afvoeren naar de zee bij een stijgende zeespiegel. De maatregelen moeten houdbaar zijn tot 2100. De beleidsopgave is verder om, bij vermindering van aanvoer van water via de rivier en door vermindering van neerslag, de toenemende vraag naar zoetwater te blijven voorzien.

(NWP, 2009) stelt dat het peil in het IJsselmeer met maximaal 1,50 m wordt verhoogd en bouwt hiermee voort op aanbeveling 11 uit het rapport van de Deltacommissie ‘Samen werken met Water’ (Deltacommissie, 2008). Verondersteld wordt dat daarmee tot na 2100 onder vrij verval kan worden gespuid naar de Waddenzee. Het peil in het Markermeer wordt niet verhoogd en op termijn losgekoppeld van het IJsselmeer. Het IJsselmeer behoudt zijn huidige strategische functie als zoetwatervoorraad voor Noord-Nederland en Noord-Holland. Overwogen wordt om de strategische functie verder te vergroten en ook West Nederland te gaan bedienen om de effecten van de dieper indringende zouttong in de Nieuwe Waterweg tegen te gaan.

1.2 Probleembeschrijving veiligheid IJsselmeer

Er zijn twee strategieën voor handen om het gebied veilig te houden:

- *Meestijgen van het IJsselmeerpeil met de zeespiegelstijging*
  Vasthouden aan de huidige lijn van spuien onder vrij verval. De peilen van het IJsselmeer stijgen dan mee met de zeespiegel. Extra maatregelen voor het waarborgen van de veiligheid zullen moeten worden genomen.
- *Gemalen bij de Afsluitdijk*
  Overstappen op het bemalen van het IJsselmeergebied. Grote gemalen op de Afsluitdijk zorgen voor het lozen van overtollig water.

In dit rapport wordt ingegaan op beide strategieën. Bij de strategie ‘meestijgen van het IJsselmeerpeil met de zeespiegelstijging’ wordt stil gestaan bij de gevolgen voor de veiligheid. Om de veiligheid in het gebied te waarborgen zullen de dijken voldoende hoog en sterk moeten zijn[1]. Dit kan worden gerealiseerd door verhoging van de kruin van de dijk en door versterking van de dijk. Deze maatregelen kunnen volgens traditionele oplossingen of met alternatieve oplossingen worden gerealiseerd. Als alternatief voor verhoging van de kruin van de dijk kan gedacht worden aan de aanleg van vooroevers of golfbrekers. Beide oplossingen zorgen dat golfoploop en dus ook golfoverslag afnemen.

Ook de Afsluitdijk en de Houtribdijk, twee grote dijken die aan twee zijden water keren, zullen op sterkte gebracht moeten worden. Het effect van meestijgen van het waterpeil in het IJsselmeer met de zeespiegel is naar verwachting het grootst in de IJsselVechtdelta. Daarom

1. *In deze studie wordt niet ingegaan op de aanbeveling van de Deltacommissie om de veiligheid 10x te verhogen.*

wordt in deze studie aandacht besteed aan de veiligheidsituatie in dit gebied. Verder wordt, in beperkte mate, ingegaan op natuurontwikkeling, op de waterbouwkundige constructies (zoals haven en sluizen) en op binnendijks waterbeheer, waaronder kwel, en op de uitwisseling van water met de belendende waterschappen door het inlaten of lozen van water.

Als alternatief voor de strategie 'meestijgen' geldt de strategie 'gemalen bij de Afsluitdijk'. Als bij deze strategie aanvullend gekozen wordt voor een beperkte peilstijging om een voldoende voorraad aan zoetwater te beschikken, dan zal ook bij deze strategie dijkverhoging nodig zijn. Daarbij wordt gedacht aan een beperkte peilstijging van maximaal 0,2 m in het IJsselmeergebied. Tevens is een studie uitgevoerd naar de benodigde pompcapaciteit voor het bemalen van het IJsselmeer.

De belangrijkste inzichten die volgen uit de studie zijn opgenomen in Hoofdstuk 2. Met de resultaten kunnen de effecten van de twee strategieën onderling vergeleken worden.

1.3 Klimaatbestendigheid Nederland Waterland

De studie voor het IJsselmeer is uitgevoerd binnen het werkpakket 'Veiligheid IJsselmeer' als onderdeel van het project Klimaatbestendigheid Nederland Waterland. Dit project bevindt zich in de tweede fase en liep tot oktober 2009. Het werkpakket levert bouwstenen aan voor de integrale varianten voor een klimaatbestendig Nederland, die binnen de overall studie zijn opgesteld.

Ook uit andere werkpakketten worden bouwstenen aangedragen. Deze werkpakketten richten zich onder meer op de zoetwatervoorraad, de natuur, het beoordelingskader, het gebied van de Benedenrivieren, het gebied van de Zuidwestelijke Delta.

1.4 Doelstelling studie 'meestijgen IJsselmeerpeil bij zeespiegelstijging'

Het doel van het werkpakket "Veiligheid IJsselmeer" is inzicht verschaffen in de gevolgen van klimaatverandering voor wat betreft het waarborgen van de veiligheid tegen overstromen in het IJsselmeergebied.

De studie geeft antwoord op de volgende vragen:

1. Hoe ziet het nieuwe peilbeheer eruit volgens de strategie "meestijgen 'van het IJsselmeerpeil bij zeespiegelstijging" en volgens de strategie "extra pompen op de Afsluitdijk"? (Hoofdstuk 2). Hierin is ook bepaald hoeveel het IJsselmeerpeil moet meestijgen om te kunnen blijven spuien onder vrij verval bij een bepaalde zeespiegelstijging.
2. Wat is de benodigde (sterkte en/of) hoogte van de dijken bij de strategie 'meestijgen van het IJsselmeerpeil bij zeespiegelstijging'? Waar is (dijkversterking of) dijkverhoging nodig? Wat zijn de kosten en het ruimtebeslag dat wordt ingenomen bij toepassing van traditionele technieken? (Hoofdstuk 3).
3. Wat is de omvang van benodigde vooroevers en/of overslagbestendige dijken als alternatief voor traditionele dijkophoging? (Hoofdstuk 3).
4. Wat zijn lopende ontwikkelingen rondom de versterking van de Houtribdijk en de Afsluitdijk? (Hoofdstuk 4).
5. Welke maatregelen worden op dit moment voorzien voor de IJssel/Vechtdelta om dit gebied te beschermen? Wat zijn de kosten? Wat kosten de voorzieningen om sluizen/noodkeringen aan te passen in de oude IJsselkop? Wat betekent het knijpen van de IJsselafvoer voor waterstanden bij een gesloten kering ter hoogte van de Ketelbrug op het Ketelmeer en in de monding van de rivier de IJssel. (Hoofdstuk 5).

6 Wat zijn de effecten op het waterbeheer in het Markermeer-IJmeer? Wat is het effect van een peilstijging met 0,20 m in het IJsselmeer op de waterhuishouding in het Markermeer-IJmeer? Als het waterpeil in het IJsselmeer stijgt met 1,50 m, moet het water vanuit het Markermeer dan via een pompconstructie naar het IJsselmeer worden geleid? Is afvoer van water via het Noordzeekanaal (NZK) dan een logisch alternatief? (Hoofdstuk 6).
7 Wat te doen met oude haventjes? (Hoofdstuk 7).

Tot slot worden de uitkomsten van bovenstaande vragen vertaald naar bouwstenen IJsselmeergebied voor de integrale varianten zoals die zijn gepresenteerd in het project Klimaatbestendigheid Nederland Waterland (Hoofdstuk 8).

1.5 Aanpak van de studie op hoofdlijnen

In het onderzoek naar de strategie “meestijgen van het IJsselmeerpeil met de zeespiegelstijging” zijn achtereenvolgens de volgende stappen doorlopen:

1. Nieuw peilbeheer IJsselmeer:
   - Simulatie van het toekomstige peilverloop met het SOBEK-bekken-model.
   - Bepalen van mogelijke alternatieven voor het peilbeheer (peilvarianten) in het jaar 2100 (Deltacommissie, flexibel peilbeheer, 0,2 m stijging in combinatie met pompen).
2. Veiligheid rondom het IJsselmeer:
   - Berekenen van het maatgevende hoogwater en toetsen van de kruinhoogte van de bestaande waterkeringen voor de drie peilvarianten.
   - Bepalen van mogelijke oplossingen bij onvoldoende kruinhoogte (zes varianten, drie deelgebieden).
3. Inventariseren van oplossingsrichtingen voor enkele specifieke locaties:
   - Afsluitdijk, Houtribdijk, IJsseldelta, Markermeer - IJmeer en haveninfrastructuur.
4. Vertalen van de uitkomsten naar bouwstenen betreffende de integrale analysevarianten voor een klimaatbestendig Nederland.

In de strategie “extra gemalen op de Afsluitdijk” zijn de volgende werkzaamheden[2] verricht:

1. Berekenen van de pompcapaciteit met het SOBEK-bekken-model om de huidige streefpeilen bij stijgende zeespiegel te kunnen handhaven.
2. Opstellen van een kostenraming voor het pompen bestaande uit de benodigde investeringen, het onderhoud en beheer, en het energieverbruik.

2. *De resultaten van deze werkzaamheden zijn eerder in een aparte memo gepresenteerd (Verhoeven, 2009). Op verzoek van de Waterdienst zijn in juli 2009 aanvullende berekeningen uitgevoerd en ramingen opgesteld met oog op de afweging tussen het realiseren van verruimde spuicapaciteit [ES]2 of het installeren van pompcapaciteit op de Afsluitdijk. De memo’s zijn opgenomen in de bijlage, terwijl de belangrijkste uitkomsten worden genoemd in de hoofdtekst. Het NWP (V&W, 2009) vermeldt dat in 2012 wordt gestart met de realisatie van de extra spuicapaciteit, die uiterlijk in 2016 operationeel moet zijn.*

2 Nieuw peilbeheer in het IJsselmeer

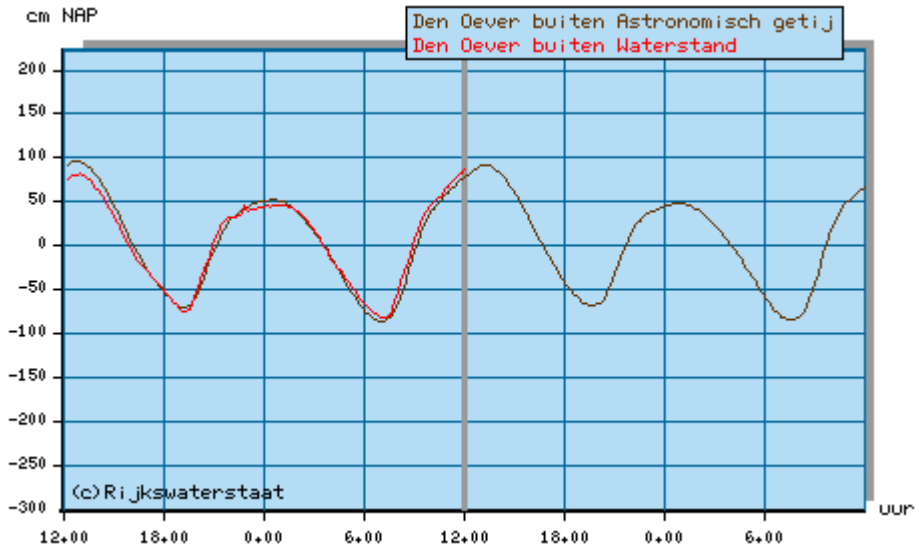
Verandering in neerslag- en verdampingspatronen, verhoogde rivierafvoeren en zeespiegelstijging zorgen ervoor dat de condities voor ons watersysteem veranderen. Het huidige streefpeil in de winter- en zomerperiode in Nederlands grootste zoetwaterbekken is op termijn niet meer te handhaven, indien, overeenkomstig de huidige strategie, overtollig water onder vrij verval via de Afsluitdijk gespuid wordt op de Waddenzee. Het is daarom nodig om op termijn een nieuw peilregime in te stellen. Hogere waterpeilen maken extra voorraadvorming mogelijk, waarmee extra water geleverd kan worden vanuit het IJsselmeer voor de zoetwatervoorziening. Door het vaker optreden van langere droge periodes in de zomer en door de economische ontwikkeling neemt de toekomstige vraag naar zoetwater toe.

2.1 Spuien onder vrij verval

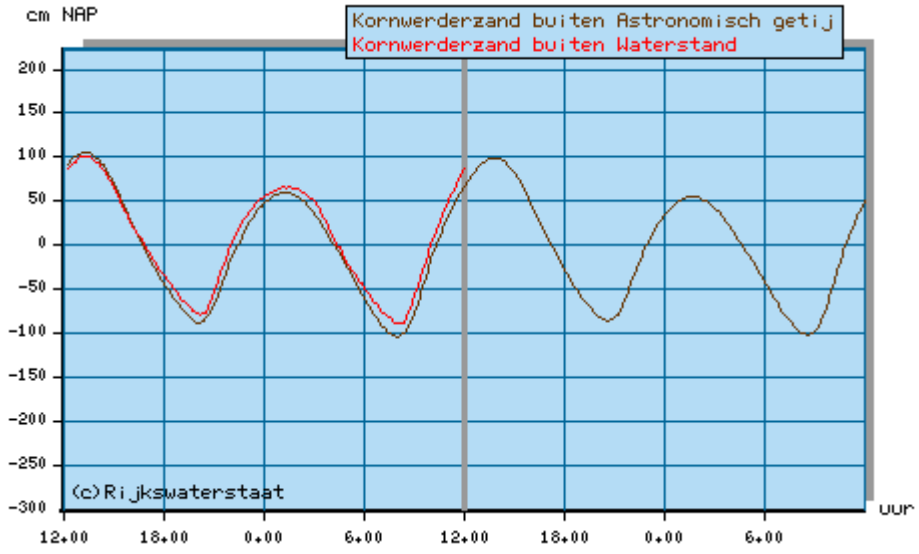
In de eerste fase van het project ‘Klimaatbestendigheid Nederland Waterland’ is onderzoek gedaan naar het peilbeheer en het peilverloop in het IJsselmeer. Het onderzoek is uitgevoerd door eenvoudige modelsimulaties naar de waterhuishouding in het IJsselmeer. De resultaten laten onder meer zien dat de maximale waterstand in het IJsselmeer veel gevoeliger is voor een stijging van de zeespiegel dan voor een toename van aanvoer van water via de rivier de IJssel. Het nieuwe peilbeheer zal daarom vooral bepaald gaan worden door de prognose ten aanzien van de stijging van de zeespiegel en dus meer afgestemd moeten worden op voldoende spuicapaciteit bij de Afsluitdijk. Doordat er gespuid wordt bij eb, kan de stijging van het waterpeil in het IJsselmeer lager zijn dan de stijging van de zeespiegel.

In de Afsluitdijk zijn twee spuicomplexen aanwezig; bij Den Oever de Stevinsluizen en bij Kornwerderzand de Lorentzsluizen. Gebaseerd op de meetreeks van 1992 tot en met 1999, bedraagt de gemiddelde waterstand in de Waddenzee bij Kornwerderzand ongeveer NAP 0 m en de waterstand bij eb bedraagt ongeveer NAP - 0,9 m. Figuur 2.2 geeft een indruk van de variatie van het waterpeil in de loop van een dag.

Naar verwachting zal volgens het W^+-scenario uit KNMI’06 rond 2050 de zeespiegel met maximaal 0,35 m gestegen zijn. In de periode tot 2100 zal de zeespiegel verder stijgen tot maximaal 0,85 m. De 2^e Deltacommissie (2008) geeft aan dat voor het jaar 2100 echter rekening moet worden gehouden met een stijging van de zeespiegel tot maximaal 1,3 meter. De waterstand bij eb zal in 2100 dan stijgen tot circa NAP +0,4 m volgens het scenario van de Deltacommissie. Dit waterpeil is hoger dan de huidige streefpeilen voor het IJsselmeer (winterpeil NAP -0,4 m en zomerpeil NAP -0,2 m), waardoor lozen van overtollig water onder vrij verval niet meer mogelijk is zonder aanpassing van het peilbeheer in het IJsselmeer. De waterstand bij eb bij Den Oever (Figuur 2.1) ligt dan ook hoger dan bij Kornwerderzand (Figuur 2.2). Dat betekent dat als het waterpeil in het IJsselmeer voor de locaties Den Oever en Kornwerderzand vergelijkbaar is, het spuien bij Kornwerderzand effectiever verloopt. Twee redenen zijn daarvoor op te noemen. Allereerst is bij eb het waterpeil in de Waddenzee bij Kornwerderzand lager dan bij Den Oever. Ten tweede is de periode waarover gespuid kan worden langer.



Figuur 2.1 *Het verloop van het getij bij Den Oever (13 juli 2009, 12:00 uur).*
(http://www.actuelewaterdata.nl/waterstand/)



Figuur 2.2 *Het verloop van het getij bij Kornwerderzand (13 juli 2009, 12:00 uur).*
(http://www.actuelewaterdata.nl/waterstand/)

Het voornemen is om extra spuicapaciteit in de Afsluitdijk aan te brengen. De nieuwe spuiopening moet een capaciteit krijgen van 4.000 m^3/s (Rijkswaterstaat, 2002), bijna evenveel als de huidige sluizen bij Den Oever en Kornwerderzand samen. De locatie van de toekomstige uitbreiding zal vermoedelijk in de nabijheid van de Lorentzsluizen van Kornwerderzand zijn.

2.2 Strategie meestijgen van het waterpeil in het IJsselmeer

Berekeningen[3] zijn uitgevoerd naar de waterhuishouding in het IJsselmeer voor de korte en de langere termijn om het toekomstige peilverloop te voorspellen onder de condities van het

3. *De berekeningen zijn uitgevoerd met het stromingsmodel veiligheid uit WINBOS, het zogenaamde SOBEK bekkenmodel. Het WINBOS (Waterhuishouding In het Natte hart – Beslissings Ondersteunend Systeem) is een beslissingsondersteunend systeem voor het IJsselmeer, het Markermeer, de Veluwe randmeren, het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal.*

huidige peilbeheer, dat wil zeggen benutten van de spuicapaciteit om de streefpeilen in de winter- en zomerperiode te bereiken (NAP-0,4 m resp. NAP -0,2 m), maar met andere omstandigheden als gevolg van een veranderend klimaat.

Verschillende cases zijn doorgerekend. De cases zijn gebaseerd op veranderingen in de spuicapaciteit in de Afsluitdijk en op verschillende klimaatscenario's. In de eerste case is een berekening uitgevoerd met de huidige (beperkte) spuicapaciteit ter plaatsen van de beide sluizencomplexen. Bij de overige cases is gerekend met de verruimde spuicapaciteit in de Afsluitdijk[4]. Bij de gevolgen van klimaatverandering is uitgegaan van het meest extreme scenario van de KNMI'06, het W^+ scenario, voor de zichtjaren 2050 en 2100. Daarnaast is voor het zichtjaar 2100 een variant gehanteerd waarbij de zeespiegelstijging niet 0.85 m is (KNMI W+ scenario) maar 1.30 m (conform de maximale relatieve zeespiegelstijging volgens de Deltacommissie). Voor een uitgebreid overzicht van alle bestudeerde cases wordt verwezen naar de bijlage. De belangrijkste cases in het kader van "meestijgen met de zeespiegel" worden hier besproken (zie ook Tabel 2.1):

- T0: gebaseerd op het huidige klimaat en met de huidige bestaande spuicapaciteit in de Afsluitdijk.
- TW^+ 2050: klimaatscenario volgens W^+ (KNMI'06) voor het zichtjaar 2050 (dit is inclusief 0,35 m zeespiegelstijging uit het W^+ scenario)
- TW^+ 2100 + 1,3 m ZSS[5]: ·klimaatscenario W^+ voor het zichtjaar 2100 met de aangepaste zeespiegelstijging van +1,3 m volgens de Deltacommissie (in plaats van 0,85 m volgens het W^+ scenario)

	Spuicapaciteit Lorentzsluizen		Klimaatscenario
	huidig	verruimd	
A	x		T0
B		**x**	**T0**
C		x	TW^+ 2050 + 0,35 m ZSS
D		x	TW^+ 2100 + 1,3 m ZSS

Tabel 2.1 Overzicht van de belangrijkste cases[6]. Case B is de referentiecase.

Als invoergegevens zijn de omstandigheden gebruikt zoals die gedurende de periode van 1951 tot en met 1998, een periode van 48 jaar, zijn opgetreden. Vervolgens is voor iedere dag het maximum en de gemiddelde waarde voor het waterpeil in het IJsselmeer berekend. De resultaten van de berekeningen worden in de vorm van grafieken gepresenteerd. In iedere grafiek staan de huidige streefpeilen weergegeven. Uiteraard kan er alleen maar gespuid worden als het waterpeil in het IJsselmeer hoger is dan het waterpeil in de Waddenzee. Voor de berekeningen die toekomstige omstandigheden simuleren, spelen de huidige streefpeilen dus geen rol. Ze zijn zuiver bedoeld als vergelijkingsmateriaal.

2.2.1 Huidige versus verruimde spuicapaciteit bij huidige omstandigheden

De resultaten voor Case A en Case B (Figuur 2.3 en Figuur 2.4) laten duidelijk zien dat het verruimen van de spuicapaciteit bij de Lorentzsluis effect heeft op het gemiddelde waterpeil en het maximum waterpeil in het IJsselmeer. Met de verruimde spuicapaciteit komt het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer in de winterperiode circa 10 cm lager te liggen dan met de huidige spuicapaciteit. De uitkomsten komen dan dichter te liggen bij het streefpeil voor de winterperiode zijnde NAP – 0,40 m.

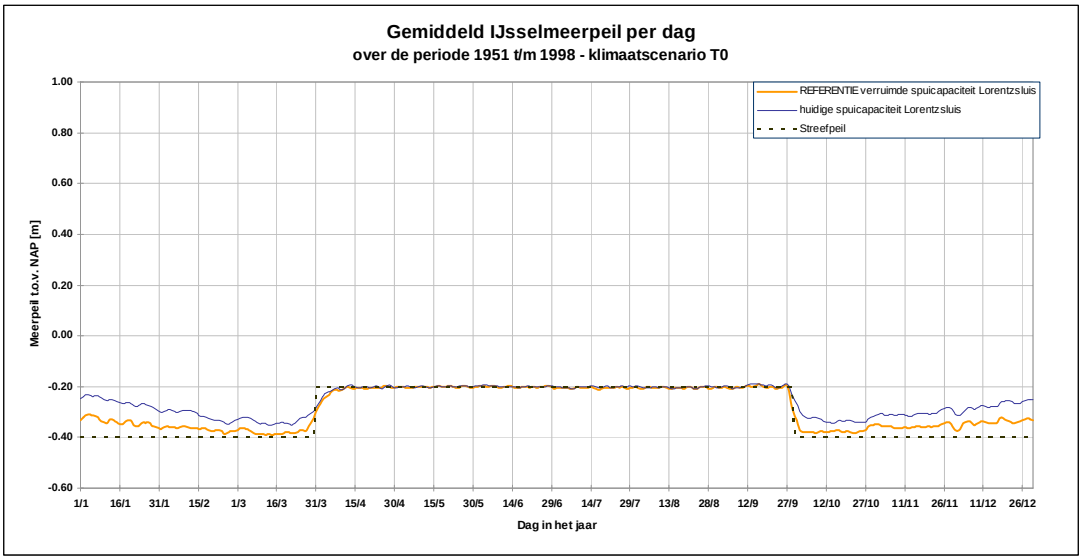
---

[4] *Er zijn ook cases doorgerekend waarbij sprake is van de installatie van pompcapaciteit nabij de sluizen van Kornwerderzand en Den Oever. Deze cases worden behandeld in de eerder genoemde notitie (Verhoeven, 2009).*

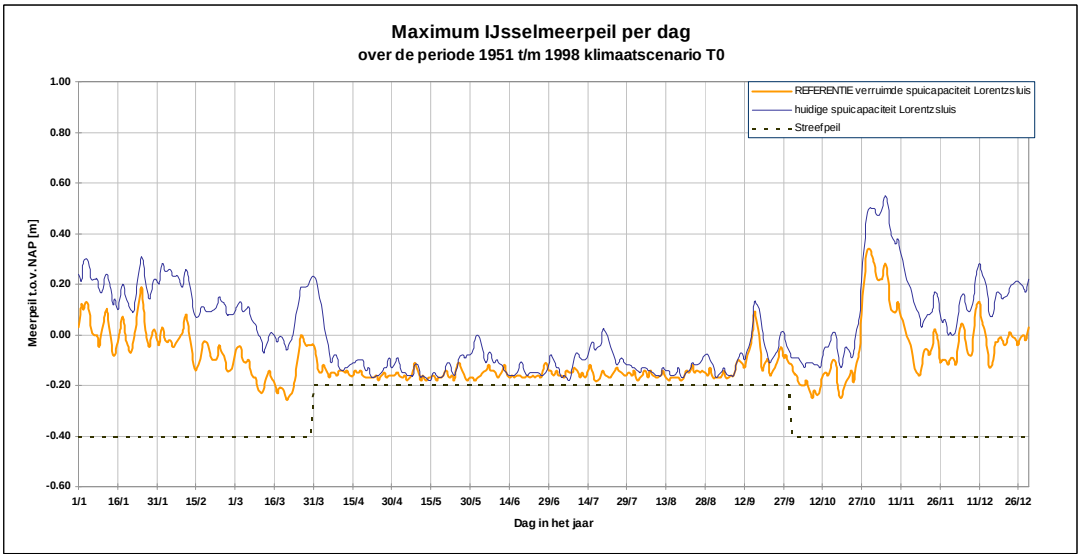
[5] *ZSS staat voor Zeespiegelstijging.*

[6] *A=1, B=2, C=3 en D=11 in (Verhoeven, 2009)*

Bij de verruimde spuicapaciteit komt het maximum waterpeil in het IJsselmeer in de winter circa 20 cm lager te liggen dan met de huidige spuicapaciteit. Het maximum waterpeil vormt de basis van de beschouwing over de omstandigheden die horen bij een maatgevend hoogwater. Een lager niveau voor MHW heeft tot gevolg dat het veiligheidsniveau van de kering enigszins toeneemt.



Figuur 2.3 Vergelijking van het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer per dag voor Case A en Case B.



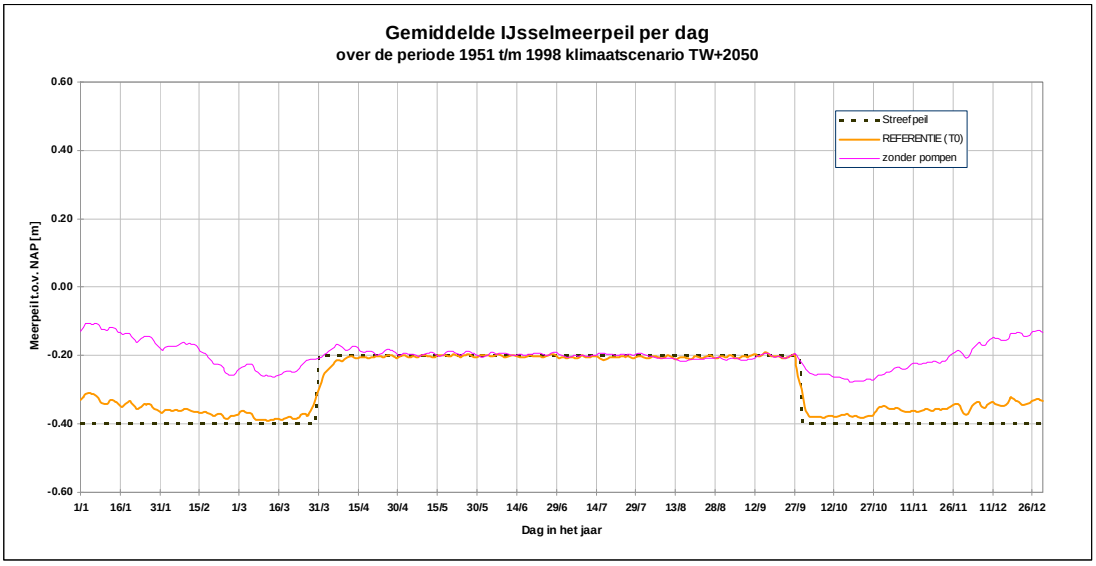
Figuur 2.4 Vergelijking van het maximum waterpeil in het IJsselmeer per dag tussen Case A en Case B.

2.2.2 Situatie in 2050 bij een stijging van de zeespiegel met 0,35 m

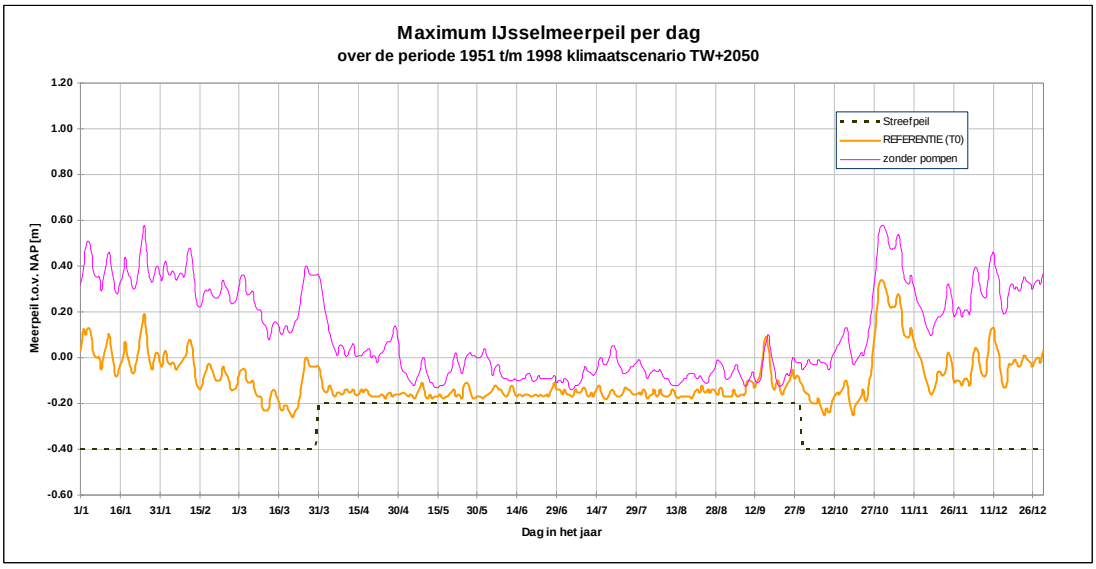
Voor de situatie in 2050 bij een stijging van de zeespiegel met 0,35 m zijn de resultaten vergeleken tussen Case B (referentiesituatie met verruimde spuicapaciteit) en Case C ($TW^{+}2050$) (Figuur 2.5 en Figuur 2.6).

De resultaten voor het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer laten zien dat het streefpeil in de winterperiode niet langer gehaald kan worden. Het gemiddelde waterpeil zal midden in de winterperiode iets boven NAP-0,20 m uitkomen. De variatie over het jaar is dan vrij gering. Het maximale meerpeil dat per dag berekend wordt voor het IJsselmeer zal in de winterperiode gemiddeld 30 tot 40 cm hoger komen te liggen. Het waterpeil varieert in de loop

van het jaar. De maximale waarde voor Case B (referentie) bedraagt NAP + 0,34 m en valt eind oktober.



Figuur 2.5 Vergelijking van het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer per dag voor Case B en Case C.



Figuur 2.6 Vergelijking van het maximum waterpeil in het IJsselmeer per dag tussen Case B en Case C.

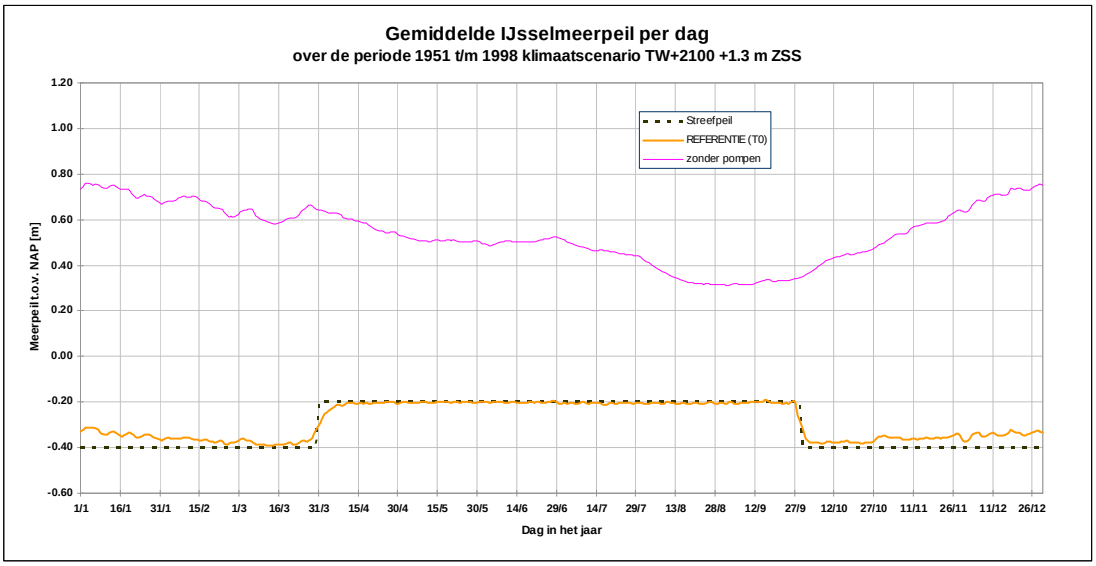
Het maximumpeil in het IJsselmeer bedraagt NAP + 0.58 m onder het TW^{+}2050 scenario. Dit niveau is 24 cm hoger dan onder de referentiesituatie. Verder blijkt dat de verruimde spuicapaciteit bij Den Oever (Lorentzsluis) onvoldoende is om het huidige gemiddelde winterpeil van -0,4 m te handhaven.

2.2.3 Situatie in 2100 bij een stijging van de zeespiegel met 1,3 m

Voor de situatie in het jaar 2100 volgens het W^{+}-scenario en een stijging van de zeespiegel met 1,30 m (Case D) zijn de resultaten gepresenteerd in (Figuur 2.7 en Figuur 2.8).

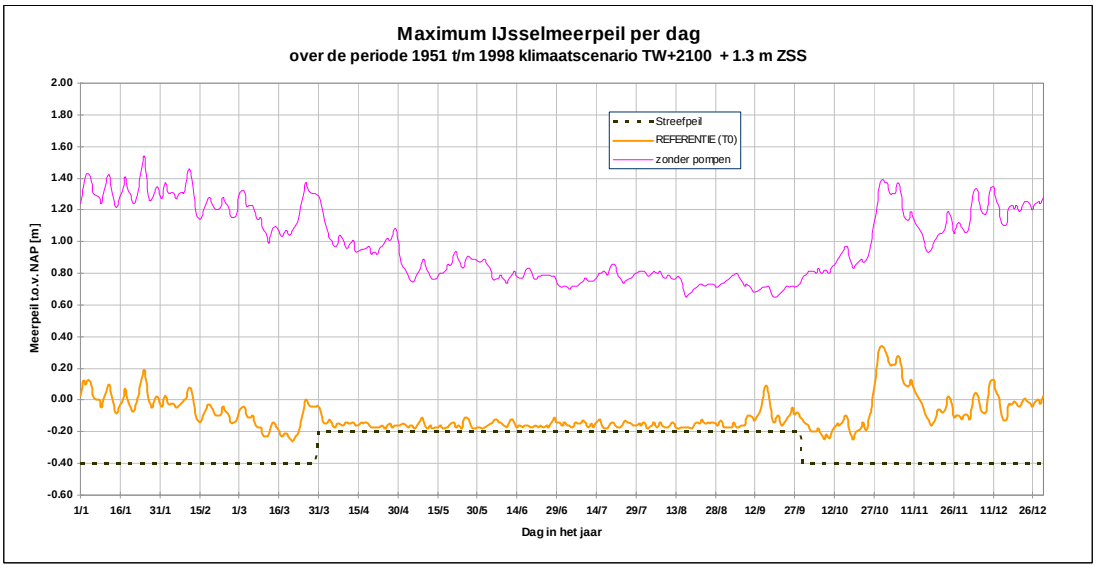
De resultaten voor het gemiddelde meerpeil in het IJsselmeer (Figuur 2.7) laten zien dat het streefpeil in de zomerperiode en in de winterperiode absoluut niet meer gehandhaafd kan worden. De berekende peilen komen uit tussen NAP +0,30 m en NAP +0,76 m. De berekende peilen weerspiegelen een natuurlijk evenwicht tussen de aanvoer van water naar

het IJsselmeer en de afvoer via de Afsluitdijk naar de Waddenzee onder vrij verval. Bij een zeespiegelstijging van 1,30 m zal onder gemiddelde omstandigheden in de nazomer nauwelijks meer gespuid worden. Het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer zakt dan geleidelijk onder NAP + 0,35 m.



Figuur 2.7 Vergelijking van het gemiddelde waterpeil in het IJsselmeer per dag voor Case B en Case D.

De vergelijking tussen Case B (referentie met verruimde spuicapaciteit) en Case D laat zien dat in het jaar 2100 bij een stijging van de zeespiegel met 1,30 m het maximum waterpeil in het IJsselmeer in de winterperiode ongeveer 110 à 120 cm hoger uit komt te vallen dan bij de referentiesituatie (Case B). Het maximum peil bij de referentiesituatie bedraagt dan NAP + 0,34 m tegen NAP + 1,54 m voor het $TW^{+}2100$ scenario. Dat is dus 120 cm hoger.



Figuur 2.8 Vergelijking van het maximum waterpeil in het IJsselmeer per dag tussen Case B en Case D.

Het spreekt voor zich dat aandacht moet worden besteed aan de waterveiligheid. De waterkeringen moeten worden verhoogd en versterkt.

2.2.4 Conclusies voor 2100 voor waterveiligheid

De resultaten van de berekeningen voor het scenario TW$^+$2100 met 1,3 m zeespiegelstijging (Case D), laten duidelijk zien dat het berekende gemiddelde waterpeil voor het IJsselmeer in het zichtjaar 2100 duidelijk lager uitvalt dan de 1,5 m peilverhoging die (Deltacommissie, 2008) voorziet.

Op basis van de berekeningen wordt voorzichtigheidshalve geconcludeerd dat een peilopzet van 1,5 m vanuit het oogpunt van spuien onder vrij verval niet strikt noodzakelijk is. *Een verhoging met 1,10 m tot een (streef)peil van ongeveer NAP + 0,7 m lijkt voldoende te zijn om in het jaar 2100 overtollig water af te voeren naar de Waddenzee*. Hierbij is als strategie gehanteerd meestijgen van het waterpeil in het IJsselmeer met de zeespiegel, spuien van water onder vrij verval met een verdubbelde capaciteit van de spuisluizen, een stijging van de zeespiegel met 1,30 m en aanvoeren via de rivieren en via neerslag die horen bij het klimaatscenario W$^+$.

2.2.5 Conclusies voor zoetwatervoorraad

Bij de zoetwatervoorziening wordt onderscheid gemaakt tussen de zoetwatervoorziening op de korte termijn (periode van 2015 tot 2035) en op de lange termijn (periode van 2035 tot 2100) (NWP, 2009).

Voor de zoetwatervoorziening voor de korte termijn, en dat zal vermoedelijk zijn vanaf 2015, wordt de ruimte benut die het huidige watersysteem biedt (NWP 2009). Een beperkte aanpassing in het peilbeheer volstaat. In 2013 wordt daartoe een nieuw peilbesluit genomen voor het gehele IJsselmeergebied. Ten behoeve van het nieuwe peilbesluit wordt op dit moment onderzocht wat de consequenties zijn van een zogenaamd seizoensgebonden peil uitgaande van de bestaande infrastructuur.

De bovengrens van de bandbreedte zal maximaal 0,30 m hoger (NWP, 2009) komen te liggen dan het huidige zomerpeil en komt dan uit op NAP + 0,10 m. Als ondergrens van de bandbreedte wordt het huidige streefpeil (NAP - 0,40 m) in de winterperiode aangehouden. Op deze wijze komt in het IJsselmeergebied (IJsselmeer, Markermeer en IJmeer) een zoetwatervoorraad beschikbaar met een schijfdikte van maximaal 0,50 meter. Kortom, de ruimte in het watersysteem om scheefstand en golfoploop in de winter te keren wordt nu in de zomer gebruikt om een hoger meerpeil te accommoderen.

Voor de zoetwatervoorziening voor de langere termijn, periode van 2035 tot 2100, (V&W, 2009) wordt de strategische zoetwatervoorraad[7] vergroot door gebruik te maken van een extra zoetwaterschijf die door peilverhoging in het IJsselmeer ontstaat. Daartoe zal in 2015 een besluit worden genomen over peilopzet voor het IJsselmeer.

Het besluit over een mogelijk peilopzet in het IJsselmeer betreft de mate en de snelheid (fasering) van de verhoging van het meerpeil in de daaropvolgende planperiodes. Als maximum hanteert het kabinet een peilverhoging van 1,50 m in het jaar 2100 (NWP, 2009) conform de aanbeveling van de Deltacommissie (Deltacommissie, 2008). Ook zal in 2015 worden besloten om in het IJsselmeer door te gaan met een vorm van flexibel peilbeheer na 2035 (V&W, 2009). Als deze tekst letterlijk wordt gelezen, betekent dit dat handhaving van seizoensgebonden peilbeheer in het Markermeer-IJmeer mogelijk blijft. Primair wordt flexibel peil dan ingezet voor het ecologische systeem. Het is nu dan ook nog niet duidelijk of (een deel van) het flexibele peilbeheer in het Markermeer-IJmeer beschikbaar blijft voor de zoetwatervoorziening op de lange termijn. Als dat wel zo is, kan met minder peilverhoging in de zomerperiode in het IJsselmeer worden volstaan. Het voordeel is dan dat de

[7] *Het begrip 'strategische zoetwatervoorraad' is opgenomen in de Beleidsnota IJsselmeergebied (V&W, 2009) maar is op dit moment nog niet ingevuld.*

zoetwatervoorziening niet alleen afhankelijk is van het IJsselmeer maar ook (voor een klein deel) van het Markermeer-IJmeer.

Om in 2100 over voldoende zoetwater in het IJsselmeer te beschikken, hanteert het kabinet een maximale peilverhoging van 1,50 meter ten opzichte van het huidige winterpeil. De peilverhoging heeft de volgende achtergronden (NWP, 2009). Volgens de laatste inzichten van de Deltacommissie is 6 °C temperatuurstijging in 2100 een waarschijnlijke bovengrens. Bij deze opwarming is in het gehele IJsselmeergebied een extra waterschijf met een dikte van ongeveer 1 meter nodig om voldoende watervoorraad te hebben voor de verwachte extra vraag uit het huidige voorzieningsgebied en 0,10 meter voor de verwachte vraag uit West-Nederland. Wanneer deze voorraad alleen in het IJsselmeer wordt aangelegd, betekent dit voor het IJsselmeer nog eens een extra waterschijf met een dikte van 0,40 meter. De dikte van de waterschijf in het IJsselmeer moet dan 1,5 m bedragen om te voldoen aan de vraag naar zoetwater. Derhalve komt de totale peilverhoging uit op 1,50 m.

Een alternatief is te kijken naar de natuurlijke evenwichtssituatie die hoort bij een stijging van de zeespiegel van 1,3 m. Bij deze stijging komt het waterpeil in het IJsselmeer te liggen op ongeveer NAP + 0,70 m in de winterperiode. Dit is de natuurlijke evenwichtssituatie die hoort bij de dan geldende hoeveelheden aan rivierwater dat het IJsselmeer instroomt in de winterperiode. Het gebied zal dan zodanig ingericht moeten gaan worden dat de waterveiligheid in de winterperiode is gegarandeerd. Bij de veiligheid wordt dan rekening gehouden met het meerpeil en scheefstand en golfoploop onder invloed van de wind. Ook bij dit toekomstige peilbeheer zal er in de zomerperiode ruimte in het watersysteem aanwezig zijn om extra water te bergen zonder dat de veiligheid in gevaar komt. Of dat dan ook precies 0,50 m zal zijn, is uiteraard nog een belangrijk punt van onderzoek. Vooralsnog is een mogelijke veronderstelling dat deze dikte 0,50 m kan zijn. Uitgaande van een meerpeil in de winterperiode van NAP + 0,70 m, zal het (maximale) meerpeil in de zomerperiode NAP + 1,2 m bedragen.

Het huidige streefpeil in de winterperiode bedraagt NAP - 0,40 m. Ook in de toekomst zou het mogelijk moeten zijn om als ondergrens minimaal dit waterpeil in de zomerperiode aan te houden, met het oog op drempels van inlaten en sluizen, als de actuele vraag naar zoetwater dit nodig maakt.

De maximale voorraad aan zoetwater bestaat dan uit het verschil tussen het maximale (NAP + 1,2 m) en minimale (NAP - 0,4 m) meerpeil in de zomerperiode. Deze zoetwaterschijf heeft een dikte van 1,6 m.

2.3 Strategie pompen op de Afsluitdijk

Een alternatieve strategie is het plaatsen van gemalen op de Afsluitdijk. Het overtollige water wordt dan door deze gemalen naar de Waddenzee gepompt. Wederom zijn berekeningen uitgevoerd om een indicatie te krijgen hoeveel pompcapaciteit nodig is om het huidige streefpeil van het IJsselmeer ook in de toekomst te kunnen handhaven. De berekeningen zijn wederom uitgevoerd met het model SOBEK.

De pompen worden actief als het waterpeil in het IJsselmeer hoger is dan het streefpeil plus een drempelwaarde; het zogenaamde aanslagpeil. Onderscheid is gemaakt tussen een basiscapaciteit en een maximale capaciteit. Het gemaal bij Den Oever wordt ingezet als de basiscapaciteit en slaat aan als het meerpeil vijf centimeter boven het streefpeil komt. Het gemaal slaat af als het meerpeil weer vijf centimeter onder het streefpeil komt. Het gemaal Kornwerderzand slaat aan bij een extremer meerpeil (maximale capaciteit) namelijk als het meerpeil 25 centimeter hoger is dan het streefpeil. Het gemaal slaat weer af als het meerpeil lager wordt dan vijftien centimeter boven het streefpeil. Een uitgebreide weergave van de resultaten is opgenomen in Bijlage A.

De benodigde pompcapaciteit staat opgenomen in Tabel 2.2 .

[8]	**W+ 2050 *(35 cm)***	**W+ 2100 *(85 cm)***	**W+ 2100 *(130 cm)***
Den Oever	250	750	1.000
Kornwerderzand	250	750	1.000
Totaal	*500*	*1.500*	*2.000*

Tabel 2.2 Benodigde pompcapaciteit (m^3/s) voor het W+ scenario, bij bepaald jaar en bepaalde zeespiegelstijging.

De kosten voor het installeren, beheer en onderhoud en verbruik van energie zijn geraamd. De resultaten staan vermeld in Tabel 2.3 .

	W+ 2100 *(85 cm)*	**W+ 2100 *(130 cm)***
Pompcapaciteit	**1.500** (m^3/s)	**2.000** (m^3/s)
a) Investeringen[9]		
totaal 2030-2100	1.344	1.706
contante waarde (2009)	328	395
b) Onderhoud & beheer		
totaal 2030-2100	76	92
contante waarde (2009)	16	18
c) Energiekosten		
totaal 2030-2100	160	207
contante waarde (2009)	30	36
Totaal		
totaal 2030-2100	*1.579*	*2.005*
contante waarde (2009)	*374*	*449*

Tabel 2.3 De geraamde kosten voor de benodigde pompcapaciteit in miljoen euro voor het W+ scenario in het jaar 2100 bij 85 respectievelijk 135 cm zeespiegelstijging.

Enkele belangrijke conclusies zijn:

- De al geplande verruiming van de spuicapaciteit nabij de Lorentzsluizen zorgt voor een verlaging van de maximum IJsselmeerpeilen met ongeveer 0,2 m.
- Zonder pompen kan bij het TW^+2050 scenario het gemiddelde waterpeil van het IJsselmeer in de winterperiode al niet meer gehandhaafd blijven. In 2050 is een pompcapaciteit nodig van 500 m^3/s.
- Afhankelijk van het scenario voor de zeespiegelstijging (volgens KNMI'06 + 0,85 m en volgens de Deltacommissie +1,3 m) is in 2100 een pompcapaciteit nodig van 1.500 tot 2.000 m^3/s.
- Ter vergelijking: het grootste pompgemaal in NL en in Europa heeft momenteel een capaciteit van 260 m^3/s en staat bij IJmuiden. De gemiddelde afvoer van de Rijn bedraagt 2.000 m^3/s. Het gaat dus om een forse pompcapaciteit, die kan worden gerealiseerd door meerdere gemalen te plaatsen.
- De pompen bij Den Oever (basiscapaciteit) staan circa 50% van de tijd aan. De pompen bij Kornwerderzand (maximale capaciteit) staan slechts 5 à 10% van de tijd aan.

[8] *Twee tijdstippen, 2050 of 2100, zijn genomen en tussen haakjes de veronderstelde zeespiegelstijging.*

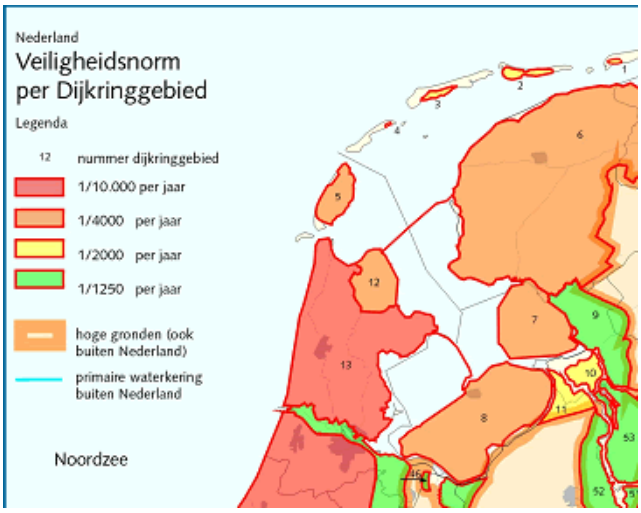
[9] *Inclusief vervangingsinvesteringen in de periode tot en met 2100.*

3 Veiligheid rondom het IJsselmeer

De strategie meestijgen van het IJsselmeerpeil met een stijgende zeespiegel leidt tot een forse veiligheidsopgave. Lokaal hoeft een kleine verhoging nog niet te leiden tot de noodzaak van dijkversterking. Naarmate de verhoging van het waterpeil toeneemt en dus de belasting, zal op een zeker moment een faalmechanisme actueel gaan worden, wordt de waterkering mogelijk bedreigd en dient deze te worden versterkt.

Als de belasting van een waterkering toeneemt, zijn er meerdere faalmechanismen die kunnen optreden. Voorbeelden zijn macro-instabiliteit (binnendijks of buitendijks), piping of de kruin blijkt onvoldoende hoog te zijn. Onderzoek naar de sterkte van bestaande waterkeringen leert dat lokale bodemopbouw samen met het aanwezige dijkprofiel bepalend zijn voor het optreden van een specifiek faalmechanisme.

De veiligheidsnormen zijn in Nederland vastgesteld per dijkring. Voor de dijkringen die grenzen aan het IJsselmeer, zijn verschillende veiligheidsnormen van toepassing (Figuur 3.1). Als het waterpeil in het IJsselmeer verhoogd wordt, dienen de dijken te worden aangepast om te blijven voldoen aan de huidige norm[1]. Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende faalmechanismen die kunnen optreden. Tevens wordt aangegeven welke maatregelen mogelijk zijn en welke kosten daarmee gepaard gaan.



Figuur 3.1 Dijkringen grenzend aan het IJsselmeergebied

3.1 Faalmechanismen

De veiligheidseisen, gesteld in de leidraden, ten aanzien van de verschillende faalmechanismen zijn terug te voeren op de norm dat de dijk een waterstand met een zekere frequentie van overschrijding moet kunnen weerstaan. Iedere 5 jaar moet worden getoetst of de dijk aan de gestelde eis voldoet.

Als de belasting van een waterkering toeneemt, zijn er meerdere faalmechanismen die kunnen optreden. Stijging van het waterpeil, leidt ertoe dat de kern van de dijk geleidelijk natter wordt. We zien dat de waterstand in de dijk, of wel de freatische lijn, omhoog gaat. Bij het omhoogkomen van de grondwaterstand in een smalle dijk zal na verloop van tijd aan de

binnenzijde van de dijk water uit de dijk sijpelen. Het uittreepunt is dan hoger komen te liggen dan het maaiveld van het land achter de dijk. Door het sijpelen van water uit de dijk, kunnen gronddeeltjes uitspoelen. Dit faalmechanisme wordt micro-instabiliteit genoemd.

Als de dijk onvoldoende hoog is, kan overloop of overslag optreden. Overloop wil zeggen dat de waterstand buitendijks hoger is dan de kruinhoogte van de dijk. Het gevolg is dat water over de dijk stroomt. Bij overslag zorgt de wind voor golfoploop. Door de golfoploop 'slaat' water over de dijk. Beide fenomenen kunnen aan de binnenzijde van de dijk leiden tot erosie en / of afschuiving van de bekleding en daardoor uiteindelijk tot het afkalven van dijk en dus tot reductie van de kruinhoogte.

Piping is de naam van het proces waarbij erosie optreedt als gevolg van grondwaterstroming onder het dijklichaam door. Onder andere tijdens de hoge waterstanden in 1995 zijn op verschillende plaatsen langs de grote rivieren zandmeevoerende wellen, het begin van het pipingproces, geconstateerd. Uit het project Veiligheid Nederland in Kaart, VNK, blijkt dat het fenomeen piping een grote bijdrage levert aan het overstromingsrisico. Via piping wordt de dijk geleidelijk aan ondergraven met uiteindelijk afschuiving tot gevolg (macro-instabiliteit).

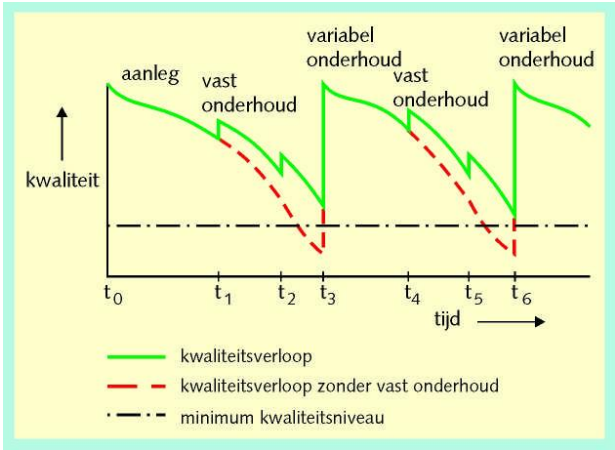
Een stijgend waterpeil zorgt voor het oplopen van de waterspanning in en onder de dijk. Een gevolg is dat de korrelspanning afneemt en er zich schuifvlakken in de dijk en ondergrond kunnen ontwikkelen. Macro-instabiliteit treedt dan op in de vorm van een cirkelvormig glijvlak aan de binnenzijde van de dijk. Macro-instabiliteit kan ook optreden aan de buitenzijde van de dijk als het waterpeil snel lager wordt en de natte dijk water naar de buitenzijde van de dijk draineert.

Een dijk is een grondconstructie aangebracht op een ondergrond. Bij de traditionele versterking van de dijk worden bermen aangebracht om de stabiliteit te verbeteren. Door de belasting van deze versterking op de bestaande dijk en op de ondergrond treedt consolidatie en zetting op. Het gevolg kan zijn dat de waterspanning in de, slecht drainerende, ondergrond oploopt en maar langzaam weer kan afnemen. Bij een hoge waterdruk in de ondergrond is de dijk minder stabiel.

Op lange termijn treedt ook nog kruip op van de dijk. Onder invloed van het eigen gewicht zakt de dijk als het ware wat in elkaar. Consolidatie, zetting en kruip zorgen gezamenlijk voor een verlaging van de kruinhoogte. Door het aanbrengen van een overhoogte bij de aanleg van een dijk wordt met deze fenomenen vaak al rekening gehouden.

Andere faalmechanismen zijn verder nog instabiliteit en zettingsvloeiing van onderwatertaluds nabij de dijk, en instabiliteit van de bekleding op het buitentalud. Vooral zettingsvloeiing kan grote schades veroorzaken. Het treedt op als het zand in de ondergrond van een dijk los gepakt is en deze laag via de (onderwater) oever direct in contact staat met het oppervlakte water. Zodra de waterspanning oploopt, gaat het grondwater in de betreffende laag harder stromen. De korrelspanning neemt daardoor af en grondwater en zand gaan als een dikke mud stromen. Op deze wijze wordt de dijk ondergraven en grote delen van het talud met het dijklichaam vloeien als het ware weg in het oppervlakte water.

Bij de aanleg van waterkeringen wordt vaak rekening gehouden met een overhoogte (Figuur 3.2). Onderhoud aan de kering moet er in de loop van de tijd dan voor zorgen dat de kwaliteit van de waterkering op een verantwoord niveau blijft. Onderscheid wordt daarbij gemaakt tussen *vast onderhoud (of dagelijks onderhoud)* en *variabel onderhoud (groot onderhoud)*. Door dagelijks onderhoud neemt de kwaliteit toe en wordt het bereiken van het interventieniveau (het niveau waarbij ingegrepen moet worden) uitgesteld. Daarmee wordt ook het groot onderhoud uitgesteld.



Figuur 3.2 *Verloop van de kwaliteit van een waterkering als functie van de tijd, mede onder invloed van onderhoud aan de kering*

Onderzoek naar de sterkte van bestaande waterkeringen leert dat lokale bodemopbouw samen met het aanwezige dijkprofiel bepalend zijn voor het optreden van een specifiek faalmechanismen. Dat vraagt dus om veel locatie specifieke kennis. Daarom is bij dit onderzoek er voor gekozen om alleen de kruinhoogte van de dijk als mogelijk faalmechanisme mee te nemen.

De huidige hoogte van de waterkeringen gelegen rondom het IJsselmeer is dan ook als uitgangspunt genomen. Vervolgens zijn verschillende mogelijke alternatieven / varianten voor peilopzet gebruikt om te bekijken wat de gevolgen zijn van het betreffende waterpeil voor de maatgevende hoogwater (MHW) omstandigheden. De waarde van de MHW is vervolgens vergeleken met de bestaande kruinhoogte van de waterkering.

3.2 Benadering van de waterveiligheid

In 2007 heeft Alkyon in opdracht van Rijkswaterstaat een studie uitgevoerd naar de bestaande hoogte van de dijken rondom het IJsselmeergebied (Alkyon, 2007). Als onderdeel van de studie is een database (Excel bestand) aangelegd waarin verschillende gegevens over de dijken zijn opgenomen. De database geeft per dijkvak (gekoppeld aan GIS coördinaten) inzicht in onder meer de veiligheidsnorm, de bestaande kruinhoogte, het toetspeil en het hydraulische belastingsniveau (HBN) bij verschillende overslagdebieten. De gegevens in de database zijn als uitgangspunt genomen voor deze studie.

De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd bij de berekeningen. Gerekend is met de huidige veiligheidsnormen voor dijken. Kortom, er is geen rekening gehouden met de nieuwe veiligheidsnormen zoals die waarschijnlijk in 2011 voor dijken worden opgesteld. Tevens is er vanuit gegaan dat de statistiek ten aanzien van het optreden van hoogwateromstandigheden niet verandert als het waterpeil hoger komt te liggen. De uitkomsten kunnen dan op een relatief eenvoudige wijze tot stand komen door een conversiefactor te hanteren. Hiermee komen resultaten beschikbaar die een eerste indicatie geven van de gevolgen van een bepaalde keuze voor peilopzet. Sterkte van de waterkeringen is volledig buiten beschouwing gelaten alleen de hoogte is maatgevend.

Om de benodigde nieuwe dijkhoogten te berekenen zijn drie stappen gevolgd. Bij de eerste stap is de huidige minimaal benodigde dijkhoogte berekend voor de bestaande situatie. Deze

dijkhoogte is gebaseerd op het hydraulische belastingsniveau (HBN) en een overhoogte of waakhoogte. HBN is gelijk aan de waterhoogte met een overschrijdingskans gelijk aan de normfrequentie van de betreffende waterkering. De waarde voor HBN is mede vastgesteld op basis van golfoverslag waarbij als overslagdebiet 1 liter per seconde is gehanteerd. Voor de waakhoogte is 0,50 m aangehouden. In de waarde voor HBN is rekening gehouden met het waterpeil, de scheefstand van het water door windopzet en tenslotte golfoploop tegen de waterkering. Het toetspeil is de waarde voor HBN minus de bijdrage van golfoploop. De bijdrage van golfoploop is berekend en dus vervolgens ook het toetspeil voor de huidige situatie.
Bij de tweede stap is de minimaal benodigde dijkhoogte vergeleken met de bestaande kruinhoogte van de dijk. Steeds is de vraag beantwoord of de dijk locaal beschikt over overhoogte of juist hoogte tekort komt. Als dit laatste het geval is, dient de kruin verhoogd te worden.
Bij de derde stap is de situatie voor het jaar 2100 genomen. Gerekend is met peilopzet die hoort bij een bepaalde variant. Vervolgens is met een conversie factor de vereiste hoogte van de dijk vastgesteld. Een gedetailleerdere beschrijving volgt in de volgende paragraaf.

3.3 Drie varianten

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een drietal varianten. De eerste variant is een opzet van het waterpeil in het IJsselmeer met 1,50 m in overeenstemming met de aanbeveling van de tweede Deltacommissie (Deltacommissie, 2008). De variant wordt aangeduid als ‘2100_DC’.
De tweede variant is een verhoging van het waterpeil in het IJsselmeer met 1,10 m. Deze verhoging is het gevolg van de situatie waarbij het waterpeil meestijgt met het peil in de Waddenzee en een natuurlijk evenwicht in het meerpeil ontstaat door de instroom van water afkomstig van de IJssel-Vecht delta en spuien onder vrijverval ter plaatse van de Afsluitdijk (2100_Flexibel). Deze variant is gelijk aan case D uit paragraaf 2.2.3.
De derde variant is een verhoging van het waterpeil in het IJsselmeer met 0,20 m. Deze variant is gebaseerd op een pompstrategie (2100_Pompen) waarbij, voor de zoetwatervoorziening een peilopzet van 0,20 m wordt doorgevoerd.

Als peilopzet plaatsvindt, is het water dieper. Dieper water zorgt voor hogere golven en daarom is de golfoploop tegen de waterkering ook hoger. Echter, bij dieper water is de scheefstand als gevolg van windopzet lager.

Bij de eerste variant is de verhoging van het waterpeil met 1,50 m dan ook niet één op één doorgevoerd in het toetspeil. Als verhoging van het toetspeil is 1 m aangehouden. Tevens is verondersteld dat de benodigde overslaghoogte met 30 % toeneemt in vergelijking met de overslaghoogte in de huidige situatie als gevolg van een toename in de golfoploop. Voor de waakhoogte is 0,50 m aangehouden. Vervolgens is de minimaal benodigde dijkhoogte vergeleken met de bestaande kruinhoogte van de dijk.

Bij de tweede variant is de verhoging van het waterpeil met 1,10 m ook niet één op één doorgevoerd in het toetspeil. Als verhoging van het toetspeil is 0,70 m aangehouden. Tevens is verondersteld dat de benodigde overslaghoogte wederom met 30 % toeneemt in vergelijking met de overslaghoogte in de huidige situatie als gevolg van een toename in de golfoploop. Voor de waakhoogte is ook weer 0,50 m aangehouden. Vervolgens is wederom de minimaal benodigde dijkhoogte vergeleken met de bestaande kruinhoogte van de dijk.

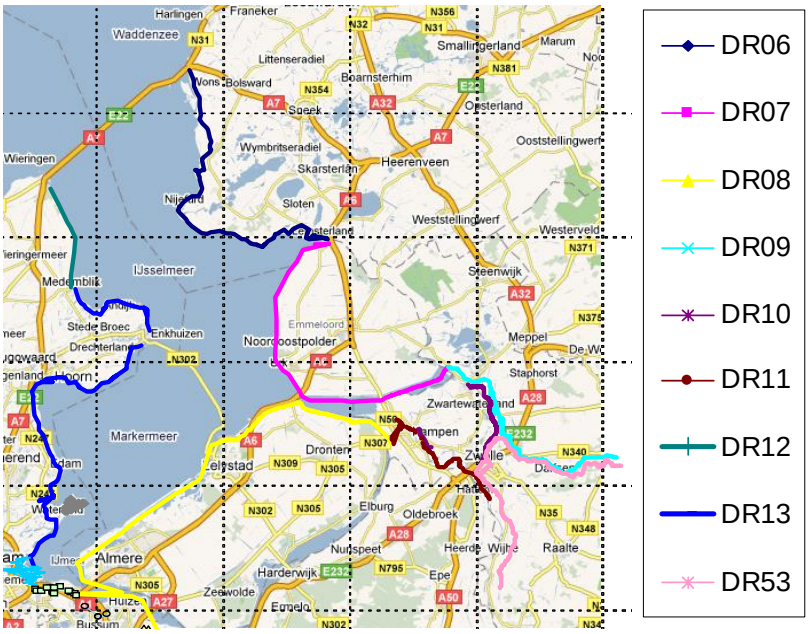
Bij de derde variant is de verhoging van het waterpeil met 0,20 m niet doorgevoerd in het toetspeil maar wel één op één in de overslaghoogte. Voor de waakhoogte is ook weer 0,50 m aangehouden. Vervolgens is wederom de minimaal benodigde dijkhoogte vergeleken met de

bestaande kruinhoogte van de dijk. Een samenvatting van de drie varianten is gegeven in tabel.

	Dimensie	Huidig peilbeheer	Varianten situatie 2100		
			DC	Flexibel	Pompen
Meestijgen met zeewaterspiegel en rivierafvoeren	m		1,5	1,1	0,2
Extra opzet in de zomer	m		0	0,5	0
Uitzakken tijdens zomer	m		1,5	1,5	0
Winter streefpeil	m+NAP	-0,4	1,1	0,7	-0,2
Zomer streefpeil (maximaal)	m+NAP	-0,2	1,1	1,2	0
Zomer streefpeil (minimaal)	m+NAP	-0,2	-0,4	-0,3	0
Extra hoogte toetspeil	% van meestijgen		67%	67%	0%
Extra hoogte t.o.v. toetspeil in huidige situatie	m		1	0,7	0
Extra benodigde overslaghoogte	als % overslaghoogte huidige situatie		30%	30%	0%
Benodigde minimum waakhoogte	m	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabel 3.1 Samenvatting van de uitgangspunten en aannames van de drie varianten.

De berekeningen naar de gevolgen voor dijkverhoging zijn uitgevoerd voor de verschillende dijkringen gelegen rondom het gebied van het IJsselmeer en de IJssel- en Vechtdelta (Figuur 3.3). Als uitgangspunt is gekozen dat de waterkeringen onder de huidige situatie voldoende hoog zijn. Alleen de resultaten voor de dijkringen gelegen aan het IJsselmeer worden in de volgende paragraaf gepresenteerd.



Figuur 3.3 Locaties voor de verschillende dijkringen (DR) waar rekenresultaten voor beschikbaar zijn

3.4 Maatgevend hoogwater IJsselmeer: resultaten[10]

De resultaten zijn gepresenteerd voor de drie varianten:

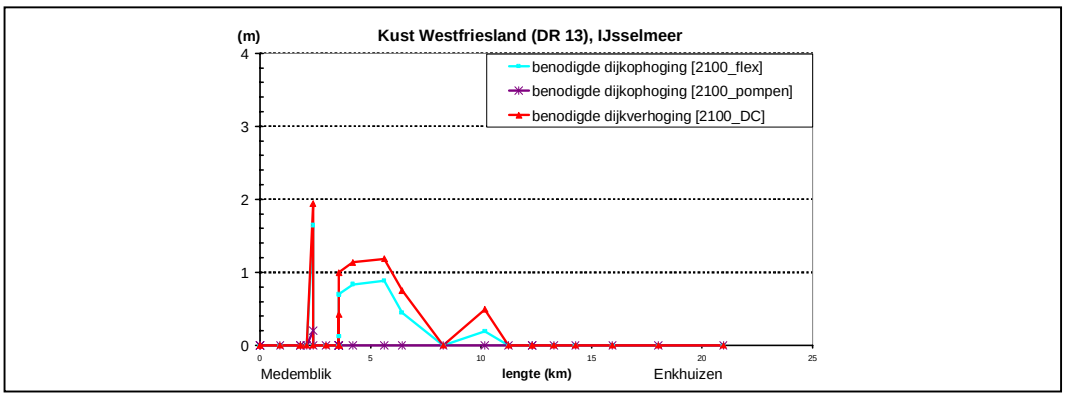
1. Peilopzet met 1,50 m en spuien onder vrij verval (2100_DC) conform voorstel Deltacommissie.
2. Peilopzet met 1,10 m en spuien onder vrij verval (2100_flexibel).
3. Peilopzet met 0,20 m en pompen op de Afsluitdijk (2100_pompen).

De dijkverhoging is berekend ten opzichte van de huidige situatie. Steeds zijn de resultaten gepresenteerd in de lengterichting van de dijk. De volgende onderverdeling is gemaakt bij de presentatie:

- IJsselmeer:
  - westelijke oever (DR12 en DR13)
  - oostelijke oever (DR06 en DR07)
  - kust Flevoland (DR08).
- Rivier de IJssel:
  - linker oever[11] (DR11)
  - rechter oever (DR10)
- Rivier de Vecht:
  - linker oever (DR10)
  - rechter oever (DR09)

3.4.1 IJsselmeer

Voor het IJsselmeer zijn resultaten beschikbaar voor de oostelijke en de westelijke oever. Voor de oostelijke oever van het IJsselmeer zijn voldoende locaties beschikbaar en leiden de resultaten tot een inzichtelijke grafiek. Voor de westelijke oever is dat alleen het geval voor de kust van West-Friesland (Figuur 3.4). Bij een peilopzet van 1,5 m bedraagt de benodigde verhoging minder dan 1,5 m. De dijkverhoging voor de varianten met 1,5 m en 1,1 m peilopzet ontlopen elkaar niet veel. Bij de variant met pompen is op enkele plaatsen een geringe tot geen verhoging nodig. Opvallend is dat in de nabijheid van Enkhuizen geen dijkverhoging nodig is; ook niet bij een peilopzet van 1,5 m. Relatief gezien is de noodzaak voor dijkverhoging van de kust van West-Friesland gering.



Figuur 3.4 Benodigde dijkverhoging voor de drie varianten (kust West-Friesland)

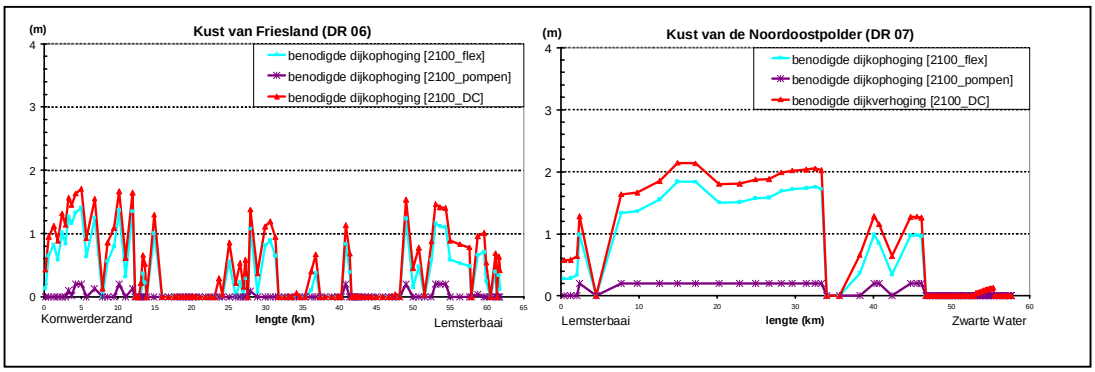
[10] *Hou er rekening mee dat de resultaten een eerste indicatie geven. Bij de verdere uitwerking zal een meer gedetailleerde aanpak met modellen als WAQUA en HYDRA-VIJ moeten volgen.*

[11] *De stroming van een rivier bepaalt de linker- en rechteroever.*

Voor de kust van Friesland liggen de locaties tussen Kornwerderzand en de Lemsterbaai (Figuur 3.5). Voor de kust van de Noordoostpolder liggen de locaties tussen de Lemsterbaai en het Zwarte Water.

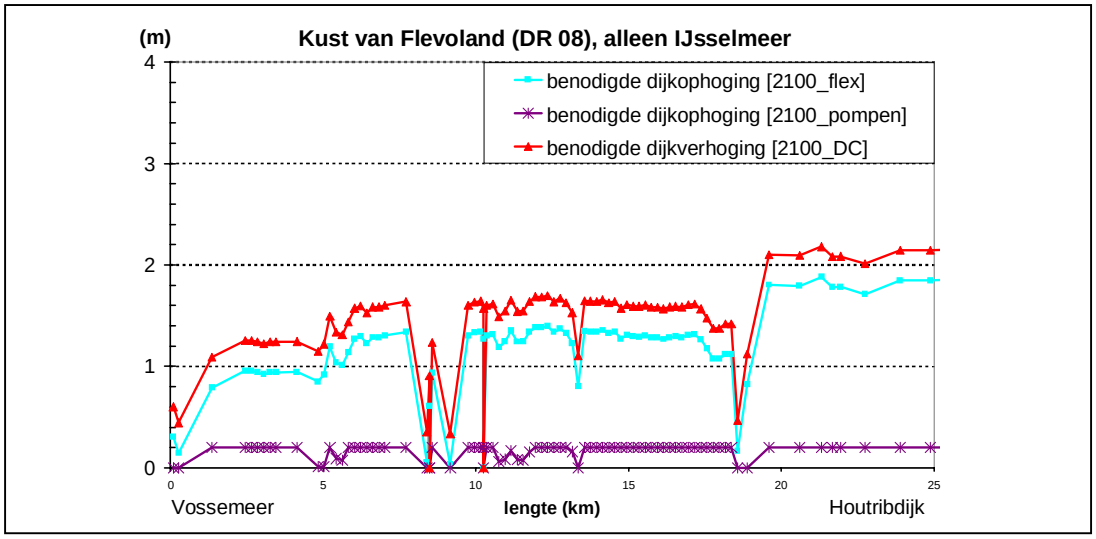
Peilopzet met 1,50 m betekent voor de Friese kust een grillig beeld als het gaat over het dijkhoogte tekort. Op verschillende plaatsen is een verhoging van de waterkering nodig terwijl op andere plaatsen dat totaal niet nodig is. Op sommige plaatsen dient de verhoging van de kruin van de waterkering meer dan anderhalve meter te bedragen. Peilopzet met 0,20 m en pompen betekent dat op slechts enkele plaatsen de waterkering in beperkte mate, namelijk minder dan 10 cm, verhoogd moet worden.

Peilopzet met 1,50 m betekent ook voor de kust van de Noordoostpolder dijkverhoging. Verhoging is noodzakelijk tot aan de Ramspolkering. Op sommige plaatsen dient de verhoging ongeveer twee meter te bedragen. De resultaten voor de beide varianten waarbij gespuid wordt, ontlopen elkaar niet veel. Peilopzet met 0,20 m en pompen betekent ook hier een geringe verhoging van de waterkering.



Figuur 3.5 Benodigde dijkophoging voor de drie varianten (oostelijke oever IJsselmeer.

De resultaten voor de kust van Flevoland laten zien (Figuur 3.6) dat bij een peilopzet van 1,5 m de dijk op de meeste plaatsen meer dan 1,5 m verhoogd dient te worden. Nabij de Houtribdijk zelfs meer dan 2 m.



Figuur 3.6 Benodigde dijkverhoging bij de kust van Flevoland

3.4.2 Rivier de IJssel

De benodigde verhoging van de waterkering in de rivier de IJssel bedraagt in de monding ongeveer 1,5 m en verder stroomopwaarts ongeveer 1 m. Hierbij dient te worden opgemerkt dat op iedere locatie gelegen langs de rivier, is uitgegaan van een zelfde verhoging van de waterstand in de rivier de IJssel als in het IJsselmeer. In werkelijkheid is sprake van een afname van de invloed van een verhoging van het meerpeil in het IJsselmeer naarmate de afstand tot de monding van de IJssel toeneemt. Dit aspect is meegenomen in de studie naar de by-pass waarvan de resultaten zijn opgenomen in Paragraaf 5.1.

3.4.3 Rivier de Vecht

Langs de rivier de Vecht is op een groot aantal plaatsen een verhoging van de dijken nodig van meer dan 1 m. Ook hier dient te worden opgemerkt dat de invloed van een peilverhoging in het IJsselmeer afneemt naarmate de afstand ten opzichte van de monding van de Vecht toeneemt.

3.4.4 Indeling in klassen

De benodigde dijkverhoging is ingedeeld in verschillende klassen. Bij een peilopzet met 1,5 m, conform de Deltacommissie, is de grootste dijkverhoging nodig langs de kust van Flevoland en de Noordoostpolder. Langs de kust van Friesland en Westfriesland is dat minder. Dat geldt eveneens voor de oevers langs de monding van de rivieren IJssel en Vecht. Voor de kust van de Wieringermeerpolder, Flevoland en Noordoostpolder is een dijkverhoging nodig van 1 tot 2 m, en soms zelfs nog meer.

			Percentage dijklengte verdeeld over klassen van dijkverhoging					
Peilopzet 1,5 m (cf. Deltacommissie)	**Dijk-Ring**	**Dijklengte (km)**	**0 m**	**0 tot 0,5 m**	**0,5 tot 1 m**	**1 tot 1,5 m**	**1,5 tot 2 m**	**2 tot 2,5 m**
Friesland	DR06	~ 62	39	14	23	15	9	0
Noordoostpolder	DR07	~ 58	23	4	11	11	33	17
Flevoland[12]	DR08	~ 35	3	2	17	38	14	26
Westfriesland[13]	DR13	~ 21	76	9	4	10	1	0
Wieringermeerpolder	DR12	~ 17	0	0	31	32	37	0
IJssel - linkeroever	DR11	~ 28	2	2	12	79	4	0
IJssel - rechteroever	DR10	~ 19	0	0	8	90	2	0
Vecht – linkeroever	DR10	~ 17	5	43	45	7	0	0
Vecht – rechteroever	DR09	~ 20	19	17	23	41	0	0

Tabel 3.2 Dijklengtes ingedeeld in klassen dijkverhoging: variant met een peilopzet van 1,5 m (Deltacommissie). De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10)

Bij een peilopzet van 1,1 m (flexibel peil) is de benodigde dijkverhoging wederom het grootst langs de kusten van het nieuwe polders (Wieringermeerpolder, Noordoostpolder en Flevoland).

[12] *Van de Roggebotsluis tot aan Lelystad (Houtribdijk)*

[13] *Van Medemblik tot aan Enkhuizen (Houtribdijk)*

			Percentage dijklengte verdeeld over klassen van dijkverhoging					
Peilopzet 1,1 m (flexibel peil)	**Dijk-Ring**	**Dijklengte (km)**	**0 m**	**0 tot 0,5 m**	**0,5 tot 1 m**	**1 tot 1,5 m**	**1,5 tot 2 m**	**2 tot 2,5 m**
Friesland	DR06	~ 62	48	16	23	14	0	0
Noordoostpolder	DR07	~ 58	28	11	11	9	41	0
Flevoland	DR08	~ 35	3	15	31	22	26	4
Westfriesland	DR13	~ 21	76	13	10	0	1	0
Wieringermeerpolder	DR12	~ 17	0	31	32	16	12	0
IJssel - linkeroever	DR11	~ 28	4	8	72	16	0	0
IJssel - rechteroever	DR10	~ 19	0	0	90	10	0	0
Vecht – linkeroever	DR10	~ 17	21	64	15	1	0	0
Vecht – rechteroever	DR09	~ 20	31	20	36	13	0	0

Tabel 3.3 Dijklengtes ingedeeld in klassen dijkverhoging: variant met peilopzet 1,1 m (flexibel peil). De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10 op bladzijde 20)

Bij een peilopzet van 0,2 m is op veel plaatsen toch nog een beperkte verhoging van de dijken nodig. Alleen voor de kust van het oude land van Friesland en Westfriesland zijn de waterkeringen op de meeste plaatsen voldoende hoog.

			Percentage dijklengte verdeeld over klassen van dijkverhoging					
Peilopzet 0,2 m (pompen)	**Dijk-Ring**	**Dijklengte (km)**	**0 m**	**0 tot 0,5 m**	**0,5 tot 1 m**	**1 tot 1,5 m**	**1,5 tot 2 m**	**2 tot 2,5 m**
Friesland	DR06	~ 62	84	16	0	0	0	0
Noordoostpolder	DR07	~ 58	39	61	0	0	0	0
Flevoland	DR08	~ 35	30	70	0	0	0	0
Westfriesland	DR13	~ 21	99	1	0	0	0	0
Wieringermeerpolder	DR12	~ 17	63	37	0	0	0	0
IJssel - linkeroever	DR11	~ 28	16	84	0	0	0	0
IJssel - rechteroever	DR10	~ 19	0	100	0	0	0	0
Vecht – linkeroever	DR10	~ 17	89	11	0	0	0	0
Vecht – rechteroever	DR09	~ 20	58	42	0	0	0	0

Tabel 3.4 Dijklengtes ingedeeld in klassen dijkverhoging: variant met peilopzet 0,2 m (pompen). De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10)

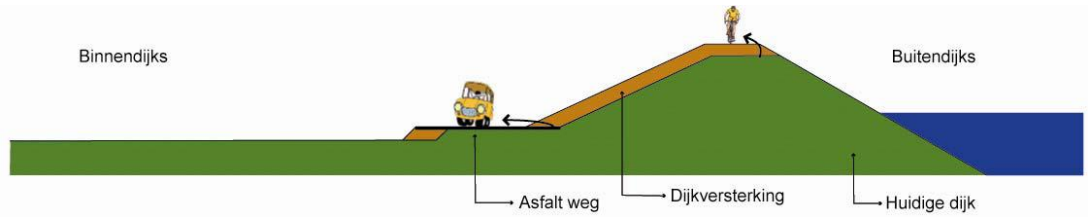
3.4.5 Maatregelen

Indien de kruinhoogte van de dijk onvoldoende is, zijn er verschillende maatregelen mogelijk. De volgende mogelijkheden zijn onderscheiden:

1. traditionele dijkverhoging uit te voeren in grond.
2. innovatieve aanpassing waterkering in de vorm van een vooroever/golfbreker.
3. traditionele constructieve oplossing.
4. innovatieve constructieve oplossing.
5. doorbraakbestendige dijk (brede dijk, delta dijk, multifunctionele dijk).
6. overslagbestendige dijk.

3.5 Traditionele dijkverhoging uit te voeren in grond

Traditionele dijkverhoging betekent dat de dijk niet alleen hoger maar daardoor ook breder moet worden uitgevoerd. De verbreding van de dijk vindt in eerste instantie landinwaarts plaats. Dit betekent wel dat er voldoende ruimte moet zijn om deze aanpassing mogelijk te maken.

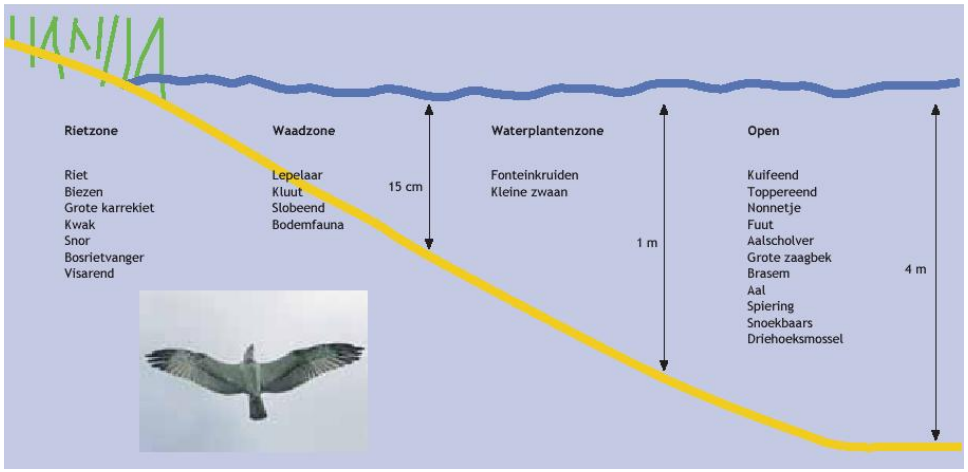


Figuur 3.7 Aanpassing van de waterkering door kruinverhoging.:

3.6 Innovatieve aanpassing van de waterkering

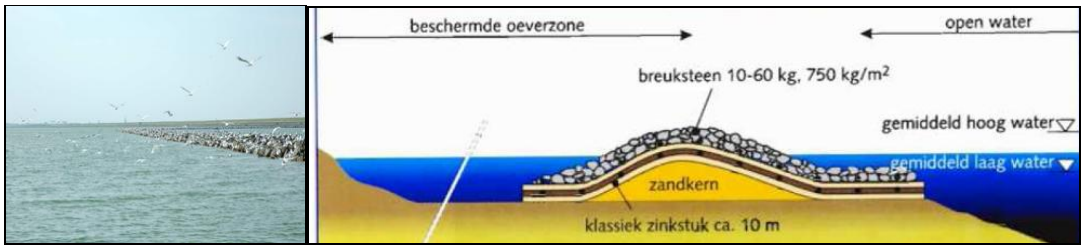
Bij peilopzet van het water in het IJsselmeer is in veel gevallen kruinverhoging van de dijk nodig. Kruinverhoging kan echter ook worden vervangen door de aanleg van een vooroever, ook wel voorland genoemd, of door de aanleg van een golfbreker. Dit is nuttig in geval de golfoploop bepalend is voor de benodigde kruinhoogte. Immers de vooroever of golfbreker reduceert de golfhoogte, en hiermee de golfoploop op de achterliggende dijk. De (primaire) waterkering bestaat dan in het vervolg uit de bestaande dijk én de vooroever of golfbreker. Beiden zullen uit veiligheidsoverwegingen moeten worden onderhouden en iedere vijf jaar moeten worden getoetst. De parallel met een olietanker wordt dan vaak gelegd. Een olietanker is namelijk met een dubbele wand uitgerust en de bovenstaande uitbreiding van de waterkering is ook min of meer ‘dubbelwandig’.

Naast het voldoen aan de doelstelling voor veiligheid kan dan ook de kwaliteit van het ecosysteem worden verbeterd. De sleutelfactor bij dat laatste is vermoedelijk het realiseren van variatie in verschillende habitats en dus variatie in biotopen. Voorbeelden daarvan zijn diep versus ondiep water, plas versus dras, harde oever versus zachte oever. Figuur 3.8 geeft een impressie voor een laaglandmeer. Voorwaarde voor het ontstaan van een goede biotoop is de ontwikkeling van waterplanten. Daarvoor is het nodig om luwte te creëren zodat het zwevende slib kan bezinken. Het water wordt dan helder en krijgt meer doorzicht voor zonlicht. De verwachting is dat voor het IJsselmeergebied waterplanten zich ontwikkelen tot op een diepte van ongeveer drie meter.



Figuur 3.8 Biotopen van een laaglandmeer.

In het IJsselmeergebied zijn zachte overgangen tussen water en land moeilijk te realiseren. Vroeg of laat zal de golfwerking, onder invloed van wind, voor erosie zorgen van zachte materialen zoals zand en slib. Dat is dan ook de reden dat onze kust beschermd is; eerst met houten palen en later met Noorse steen. Één van de alternatieven voor kruinverhoging is de aanleg van een golfbreker (Figuur 3.9). De golfbreker haalt energie weg uit de golfoploop en de strijklengte van de wind op het water wordt kleiner. Aan de landzijde van de golfbreker kan dan zacht bodemmateriaal worden neergelegd om een geleidelijke overgang te realiseren van ondieper water naar dieper water. Voor het profiel van de golfbreker zijn verschillende mogelijkheden beschikbaar zoals een kern van zand, eventueel ingepakt in een geotextiel, een kern van slib ingepakt in een geotextiel of een kern geheel opgebouwd uit breuksteen.



Figuur 3.9 Golfbreker nabij de kust plus profiel van de dwarsdoorsnede

Als een flauw talud wordt gerealiseerd met contrasten in de vorm van diep versus ondiep en nat versus droog, dan ontstaan ook droogvallende stukken. Als de juiste hydraulische voorwaarden aanwezig zijn voor het laten kiemen van zaad en het verhinderen van wilgengroei ontstaat er een moerassig gebied. Figuur 3.10 geeft een impressie van het uitzicht vanaf een bestaande dijk. Deze biotopen tref je vaak aan in een getijde gebied. Invoering van het seizoensgebonden peil geeft variatie over seizoenen en kan dat wellicht gedeeltelijk compenseren.

Figuur 3.10 Impressie van een vooroever vanaf een bestaande dijk

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) voert dijkversterking uit in het kader van het hoogwater beschermingsprogramma (HWBP). Bij het dijktraject Edam-Amsterdam wordt momenteel en proefproject uitgevoerd om te onderzoeken naar mogelijkheden van synergie voor het combineren van veiligheid met natuurontwikkeling.

De waterdiepte in het IJsselmeer varieert; ondieptes bij enkele kusten en diepe geulen in het midden. Nabij de polders, bijvoorbeeld Wieringermeer, Noordoost Polder en Flevoland, ligt de waterbodem dieper dan nabij de kust van het oude land van Friesland en Noord-Holland. In

ondiepe zones van de kust van het oude land is de aanleg van een vooroever dan eenvoudiger en dus minder kostbaar.

3.7 Constructieve oplossingen voor stedelijk gebied

In stedelijke gebieden, zoals de oude Zuiderzeestadjes, is vaak weinig ruimte aanwezig om de dijk met grond op traditionele wijze te versterken. Om in dergelijke gebieden de waterkering toch op voldoende sterkte of hoogte te brengen, zijn in het verleden constructieve oplossingen ontwikkeld. Voorbeelden van traditionele oplossingen zijn de aanleg van een keermuur, de toepassing van diepwanden of het aanbrengen van een kistdam.

Een keermuur of *keerwand* is een stijve, grondkerende constructie dat door een groot gewicht en een brede voet een grote standzekerheid kan bereiken. Een keermuur is meestal van gewapend beton. Verschillende mogelijkheden zijn beschikbaar. De keermuur kan bestaan uit geprefabriceerde elementen die langs elkaar geplaatst staan waardoor een betonnen muur ontstaat met een groot draagvermogen. Kenmerkend voor een dergelijke kademuur bestaande uit een L-vorm is dat een deel van het benodigde gewicht wordt geleverd door de grond die op de fundatieplaat rust. Een andere mogelijkheid is dat de keermuur wordt vastgemaakt aan een damwand en in het werk wordt opgebouwd (Figuur 3.11).

Figuur 3.11 Keermuur aansluitend op een damwand. Wapening wordt op een werkvloer gemaakt

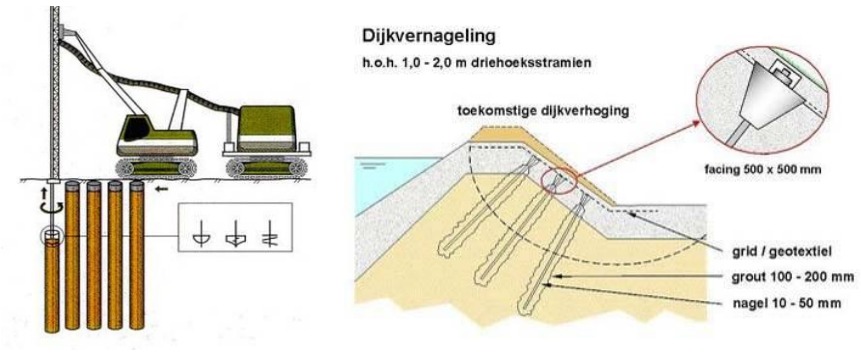
Diepwanden bestaan uit beton en worden geplaatst in de binnen- of buitenberm. De diepwand dient om afschuiving van de dijk te voorkomen en dus om de macrostabiliteit te vergroten. Ook kan de diepwand worden ingezet als erosiescherm. Vaak wordt dan een lichtere constructie toegepast.

Een kistdam bestaat uit twee damwanden die door een anker met elkaar zijn verbonden. Een kistdam kan worden ingebouwd of aangelegd in een dijk om de interne sterkte van de dijk te verbeteren.

3.8 Innovatieve constructieve oplossingen

Op het gebied van constructieve oplossingen zijn de laatste jaren ook de nodige ontwikkelingen te melden. Een drietal voorbeelden van zogenaamde Inside oplossingen zijn te melden: Mixed in Place (MiP), Dijkvernageling en Expanding Columns.

MIP (Figuur 3.12) een methode van grondverbetering die in Scandinavië en Japan al een aantal jaar wordt toegepast. Met een avegaar wordt de grond als het ware los geboord. De los gemaakte vochtige grond wordt tijdens het boren vermengd met droog bindmiddel, bijvoorbeeld cement. Na verharding ontstaat een hard blok. De blokken versterken de dijk en geven de dijk een hogere macro-stabiliteit.



Figuur 3.12 De technieken Mixed in Place (l) en Dijkvernageling (r)

Een andere manier om de dijk te versterken is door middel van dijkvernageling (Figuur 3.12) Bij de techniek van dijkvernageling worden stalen nagels van veertien meter lang in de dijk geboord. De nagels staan ongeveer twee meter van elkaar af. Deze versterkingstechniek zorgt ervoor dat tijdens hoogwater de dijk stabiel blijft. Doordat de nagels dwars in de dijk worden gezet, en de dijk zo bij elkaar houden, is de kans klein dat de dijk afschuift.

De techniek Expanding Columns maakt gebruik van stalen buizen omhuld met een geotextiele mantel, die gevuld zijn met een cementmengsel. Om de buizen heen zit een soort kous gemaakt van synthetisch materiaal. De buis wordt in de slappe grond onder de dijk geplaatst. De cement wordt onder druk via de buizen ingebracht. Op plaatsen met slappe grond, wordt de grond verdrongen, zet de kous uit en komt meer cement terecht. Hierdoor wordt de slappe grond ter plaatse versterkt. Door de posities van de columns slim te kiezen wordt het draagvermogen van de dijk vergroot en het ontstaan van schuifvlakken wordt tegengegaan.

3.9 Overslagbestendige dijk

Een overslagbestendige dijk is een traditionele dijk waar speciale aandacht geschonken is aan de bekleding van de dijk. De bestaande bekleding wordt dan vervangen of geoptimaliseerd. Gras wordt bijvoorbeeld vervangen door open steen asfalt. Een ander mogelijkheid is om de wortels van het gras te beschermen door het aanbrengen van kunststof matten of doeken. Door de aanleg van deze voorzieningen wordt het mogelijk om een groter waterbezwaar over de dijk te tolereren zonder dat het binnentalud erodeert. Kortom, het binnentalud wordt erosiebestendiger en daardoor mag er meer water over de dijk zonder dat de dijk onder uit gaat.

Uiteraard moet bij een overslagbestendige dijk wel worden nagegaan of de dijk veilig is ten aanzien van andere faalmechanismen. Denk daarbij speciaal aan het infiltreren van overslaand water en het relatief hogere waterpeil in de dijk. Bij een overslagbestendige dijk kan verhoging van de kruinhoogte wellicht achterwege blijven. Vaak zal achter de overslagbestendige dijk een natte zone worden ingericht. In deze zone dient het overtollige water te worden afgevoerd en als gevolg van de vernatting kan de zone als natuurgebied worden ingericht, het zogenaamde achteroever-concept.

De gevolgen van de aanleg van een overslagbestendige dijk op het landschap is mede afhankelijk van de omvang van de dijk plus het daarachter gelegen gebied. Het aanpassen

van de bekleding alleen, heeft een ander effect dan gelijktijdig een nat natuurgebied realiseren achter de dijk.

Momenteel lopen verschillende proeven naar een overslagbestendige dijk. Interessant is te melden dat de eerste, voorlopige uitkomsten van het project “IJkdijk” verrassende resultaten laten zien. Pas bij een hoeveelheid water van 75 l/s/m die over de dijk stroomt, treedt zeer beperkte schade op aan de grasmat. Deze hoeveelheid is beduidend meer dan de hoeveelheid van 30 l/s/m die tot dusver in de toetsregel wordt aangenomen en de hoeveelheid van 0,1 l/s/m die bij het ontwerpen van nieuwe dijken wordt aangehouden. Geconstateerd kan dan ook worden dat de belastbaarheid van de bestaande dijken ten aanzien van overslag van water naar boven bijgesteld mag worden.

Figuur 3.13 Proef voor een overslagbestendige dijk

Mocht in de toekomst blijken dat het overslag bestendig maken van een dijk aan de orde is als alternatief voor het ophogen van de dijk, dan kan dit door het binnentalud van de dijk een talud te geven van maximaal 1:3 en te bekleden met geotextiel. Het flauwe talud voorkomt afschuiving van de dijk door infiltratie van water dat over de dijk stroomt. De bekleding zorgt ervoor dat de dijk bestand is tegen grotere overslagdebieten. Een dijk bekleed met geotextiel, kan een hoeveelheid water verwerken van maximaal 100 l/s/m zonder dat erosie optreedt, terwijl een dijk bedekt met een gezonde, stevige grasmat bestand is tegen een overslagdebiet in de orde van 30 l/s/m. Om nog grotere debieten te tolereren, is bekleding met openasfaltbeton een mogelijkheid. Duidelijk is dat bij de afweging om over te gaan tot een overslagbestendige dijk ook aspecten moeten worden meegenomen als ruimtelijke kwaliteit en dus inpassing in het bestaande landschap.

De aanleg van een overslagbestendige dijk kan een goed alternatief zijn voor delen van de kust van het IJsselmeer grenzend aan de nieuwe polders (Wieringermeerpolder, Noordoostpolder en Flevoland). Op zulke locaties sluit een dergelijke dijk aan bij het bestaande kwaliteit van het landschap met een strakke en ferme dijk om het achterland te beschermen. Wel dient rekening te worden gehouden met de situatie indien op de dijk een weg is aangelegd.

3.10 Doorbraakbestendige dijk

Een doorbraakbestendige dijk is een verbrede of breder aangelegde dijk. De dijk is dan zo breed geworden dat bij een buitendijkse afschuiving (macro-instabiliteit) nog voldoende grond

aanwezig is met de vereiste, kerende hoogte. De breedte van de dijk is zodanig uitgevoerd dat het verhang in de zandige ondergrond van de dijk te gering is om zandkorrels mee te voeren en dus zal er geen piping optreden.

Naast de naam doorbraakbestendige dijk komen ook andere namen voor: doorbraakvrije dijk, delta dijk, super dijk of de niet bezwijkbare dijk. Binnen het project Waterveiligheid 21ste eeuw (WV21) wordt veel onderzoek gedaan naar een doorbraakbestendige dijk. Het doorbraakbestendig maken van een kering, betekent dat er maatregelen genomen worden om de dijk sterker te maken en de kans op een dijkdoorbraak met een factor 10 tot 100 af te laten nemen ten opzichte van de huidige situatie. De overstromingskans zal nooit 0 worden. Een kans van eens in de 100.000 jaar of eens in de 1.000.000 jaar is natuurlijk zo klein dat de dijk gerust bestempeld kan worden als ‘doorbraakbestendig’.

De maatregelen bestaan vooral uit het verbreden en verhogen van de berm aan de binnenzijde van de dijk en het verflauwen van het talud (tot minimaal 1:3). Dit voorkomt problemen met de macrostabiliteit, bijvoorbeeld als gevolg van opdrijven, en piping.

Bij een doorbraakbestendige dijk is het niet nodig om golfoploop mee te nemen in de berekening om te komen tot de randvoorwaarden bij het ontwerp van de dijk. Een doorbraakbestendige dijk kan dan ook lager worden uitgevoerd. Wel dient het vervolgrisico onderkend te worden als water over de dijk loopt of door golfoploop over de dijk slaat. Indien de dijk breed genoeg is zal de schade ten gevolge van afkalving door het overslaande water beperkt zijn. Bij een lagere kruinhoogte moeten wel voorzieningen worden getroffen om het waterbezwaar te verwerken en om erosie tegen te gaan. Verflauwen van het binnentalud zal erosie doen afnemen. De breedte en hoogte van de benodigde berm zijn afhankelijk van locale kenmerken en daarom niet op voorhand te voorspellen. In het kader van het project WV21 worden momenteel door Deltares berekeningen uitgevoerd voor een aantal voorbeeld locaties.

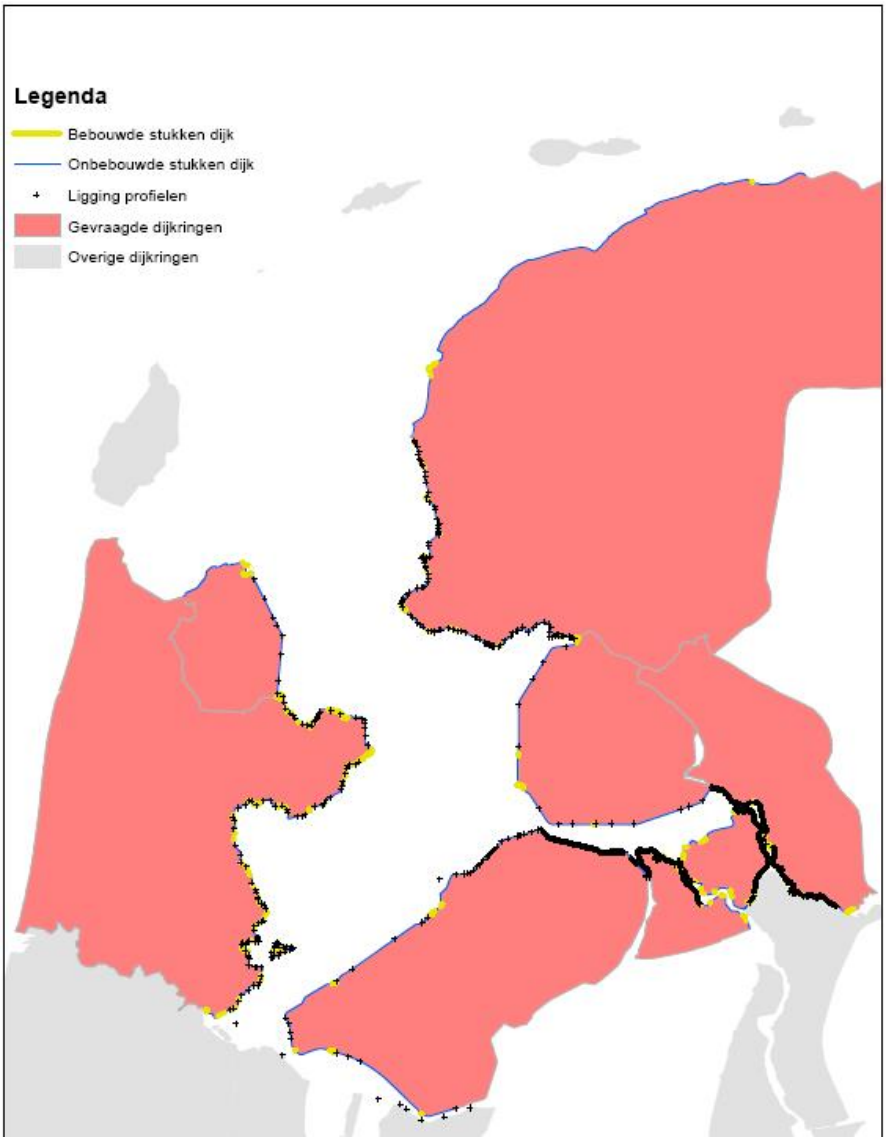
De kruin van een doorbraakbestendige dijk kan voor meerdere functies gebruikt worden. Het deel van de kruin gelegen aan het water heeft uiteraard de functie van primaire waterkering. De rest van het oppervlak van de kruin, kan gebruikt worden voor bijvoorbeeld de functie wonen. De bewoners kunnen genieten van een weids uitzicht over het water. De aanleg van een doorbraakbestendige dijk vraagt om een gedegen inpassing in de planontwikkeling van een gebied. In een stedelijk gebied waar ruimte aanwezig is, of gemaakt kan worden, kan een doorbraakbestendige dijk functioneel zijn.

De aanleg van een doorbraakbestendige dijk kan een goed alternatief zijn voor delen van de kust van het IJsselmeer grenzend aan de nieuwe polders (Wieringermeerpolder, Noordoostpolder en Flevoland). Op zulke locaties sluit een dergelijke dijk aan bij het bestaande kwaliteit van het landschap met een strakke en ferme dijk om het achterland te beschermen.

3.11 Uitvoering – oplossing afhankelijk van lokale omstandigheden

De wijze waarop uitvoering wordt gegeven aan dijkversterking is mede afhankelijk van de lokale omstandigheden. Zoals eerder al is aangegeven spelen meerdere factoren daarbij een rol.

Voor het IJsselmeer is onderscheid gemaakt tussen ‘Oud Land’, zijnde de kusten van Westfriesland, Friesland en de IJssel- Vechtdelta, en ‘Nieuw Land’, zijnde de kusten van de Wieringermeerpolder, de Noordoostpolder en Flevoland.



Figuur 3.14 Voor de kust van het IJsselmeergebied is onderscheid gemaakt tussen het landelijke gebied (onbebouwde stukken dijk) en het stedelijke gebied (bebouwde stukken dijk)

Onderscheid is ook gemaakt naar de omgeving van de kust; welke ruimtelijke functie neemt de omgeving in. Behoort een dijkvak tot het landelijke gebied, en is het dus onbebouwd, of behoort het tot het stedelijke gebied, en is het dus bebouwd. De onderverdeling is gemaakt op grond van beschikbare informatie (Arcadis, 2008) (Figuur 3.14). De basis voor deze onderverdeling bestaat uit de locaties gelegen op de dijkvakken waar informatie over de hoogte van de waterkering beschikbaar is. Op sommige dijkvakken is de dichtheid van locaties beperkt. De benadering is dan vrij grof. Op dergelijke dijkvakken dient, in een vervolgstudie, dan ook het aantal locaties te worden uitgebreid.

Aan ieder punt op de dijk is een representatieve lengte toegekend. Vervolgens zijn deze lengtes per categorie, bebouwd versus onbebouwd, opgeteld. De resultaten staan in Tabel 3.5 . Wat opvalt, is dat langs het IJsselmeer het merendeel van de waterkering

onbebouwd is. Echter, het oude land van Friesland en Westfriesland is meer bebouwd dan van de nieuwe polders zoals de Wieringermeerpolder, Flevoland en de Noordoostpolder. Bij de rivieren de IJssel en de Vecht valt op dat langs de Vecht beduidend meer bebouwing voorkomt dan langs de IJssel.

Gebied	DijkRing	Dijklengte	SG[14]	LG[15]
		(km)	(%)	
Friesland	DR06	~ 62	9	91
Noordoostpolder	DR07	~ 58	4	96
Flevoland[16]	DR08	~ 35	0	100
Westfriesland[17]	DR13	~ 21	15	85
Wieringermeerpolder	DR12	~ 17	0	100
IJssel - linkeroever	DR11	~ 28	10	90
IJssel - rechteroever	DR10	~ 19	13	87
Vecht – linkeroever	DR10	~ 17	41	59
Vecht – rechteroever	DR09	~ 20	31	69

Tabel 3.5 Percentages Bebouwd en Onbebouwd langs de verschillende waterkeringen

In de lengterichting van een dijkvak zijn van locatie tot locatie verschillen aanwezig in bodemopbouw en dijkprofiel. In deze studie zijn echter slechts drie profielen onderscheiden. Dat zijn de volgende drie profielen:

- Nieuw Land: één profiel als representatie van de kust van de Wieringermeerpolder, Flevoland en de Noordoostpolder (NL_WFN).
- Oud Land: profiel als representatie van de kust van Westfriesland (OL_WFL).
- Oud Land: profiel als representatie van de kust van Friesland (OL_FL).

Onderscheid is gemaakt in zes verschillende maatregelen om te komen tot dijkversterking. Dit zijn de volgende maatregelen:

1. Traditionele dijkversterking uit te voeren in grond (TD); innovatieve dijkversterking in de vorm van een vooroever / golfbreker (ID).
2. Traditionele constructieve oplossing (TCO).
3. Innovatieve constructieve oplossing (ICO).
4. Doorbraakbestendige dijk (brede dijk, delta dijk, multifunctionele dijk) (DBD).
5. Overslagbestendige dijk (OBD).

Gebaseerd op locale omstandigheden kunnen per dijkvak dan verschillende maatregelen mogelijk zijn.

[14] *SG: Stedelijk Gebied, bebouwd*

[15] *LG: Landelijk Gebied, onbebouwd*

[16] *Van de Roggebotsluis tot aan Lelystad (Houtribdijk)*

[17] *Van Medemblik tot aan Enkhuizen (Houtribdijk)*

		Maatregelen					
Locatie dijkvak	**Omgeving dijkvak**	TD	ID	TCO	ICO	DBD	OBD
Nieuw Land	Stedelijk Gebied	x	x	x	x	x	
	Landelijk Gebied	x					x
Oud Land Westfriesland	Stedelijk Gebied	x		x	x		
	Landelijk Gebied	x	x				x
Oud Land Friesland	Stedelijk Gebied	x		x	x		
	Landelijk Gebied	x	x				x

Tabel 3.6 Mogelijke maatregelen zijn afhankelijk van de locatie van het dijkvak en de omgeving van het dijkvak

Voor de verschillende gebieden is vervolgens de combinatie gemaakt tussen omstandigheden en mogelijke maatregelen (Tabel 3.7).

Gebied	**DijkRing**	**Dijklengte**	**TD[18]**	**ID[19]**	**TCO[20]**	**ICO[21]**	**DBD[22]**	**OBD[23]**
		(km)	**percentage (%)**					
Friesland	DR06	~ 62	100	91	9	9	0	91
Noordoostpolder	DR07	~ 58	100	4	4	4	4	96
Flevoland	DR08	~ 35	100	0	0	0	0	100
Westfriesland	DR13	~ 21	100	85	15	15	0	85
Wieringermeerpolder	DR12	~ 17	100	0	0	0	0	100
IJssel - linkeroever	DR11	~ 28	100	90	10	10	10	90
IJssel - rechteroever	DR10	~ 19	100	87	13	13	0	87
Vecht – linkeroever	DR10	~ 17	100	59	41	41	0	59
Vecht – rechteroever	DR09	~ 20	100	69	31	31	0	69

Tabel 3.7 Combinatie van gebieden en mogelijke maatregelen. De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10)

Voor alle locaties zijn meerdere maatregelen beschikbaar. De uiteindelijke keuze welke maatregel het zal worden, hangt dan af van de, huidige of toekomstige, ruimtelijke ambities in de nabije omgeving en de kosten en baten die met de genoemde maatregel gepaard gaan. Bij ruimtelijke ambities kan gedacht worden aan eventuele functies die in het gebied moeten worden ondergebracht; bebouwing, recreatie, natuur en dergelijke.

Bij herinrichting van het IJsselmeer om de gevolgen van klimaatverandering te accommoderen gaat het over een lange tijdsperiode; het NWP laat ons immers voor het jaar 2100 rekening houden met een maximale peilopzet van 1,50 m. Om de veiligheid ook in deze situatie te borgen zal de noodzakelijke versterking van de waterkeringen gelegen rondom het IJsselmeer vermoedelijk gefaseerd plaatsvinden. Gedacht aan worden aan meerdere fasen.

[18] *TD: Traditionele Dijkversterking uit te voeren in grond*

[19] *ID: Innovatieve Dijkversterking in de vorm van vooroever / golfbreker*

[20] *TCO: Traditionele Constructieve Oplossing in Stedelijk Gebied*

[21] *ICO: Innovatieve Constructieve Oplossing in Stedelijk gebied (INSIDE technieken e.d.)*

[22] *DBD: Doorbraak bestendige Dijk, voornamelijk in stedelijk gebied waar ruimte is of gemaakt kan worden; ook wel genoemd Brede Dijk, Delta Dijk, Multifunctionele Dijk*

[23] *OBD: Overslagbestendige Dijk voorzien van robuuste bekleding, vooral in Landelijk Gebied*

3.12 Kostenkentallen dijkophoging

Verhoging van het meerpeil in het IJsselmeer, leidt tot maatgevend hoogwater omstandigheden die een verhoging van de dijken noodzakelijk kan maken. In deze paragraaf wordt ingegaan op de kosten die gemaakt moeten worden om dijkverhoging te realiseren.

De kosten zijn gebaseerd op een traditionele verhoging van de dijken. Bij de kosten is onderscheid gemaakt tussen vaste en variabele kosten. Als vaste kosten is onder andere meegenomen het weghalen van een weg op de dijk en het verwijderen van de bekleding op de dijk.

Onderscheid is gemaakt tussen de kosten voor het aanpassen van de dijken rondom het IJsselmeer en van de dijken gelegen langs de rivieren de IJssel en de Vecht. De lengte van de dijken rondom het IJsselmeer bedraagt 194 km en langs de IJssel - Vecht 74 km. Ook is onderscheid gemaakt in de drie varianten. De kosten vormen een indicatie van de kosten die verwacht mogen worden. Momenteel ontbreekt voldoende scherpte op de verschillende vaste en variabele kosten om tot een absolute uitspraak te komen. In een vervolgstudie zal ook worden gekeken naar de kosten van toepassing van meer innovatieve oplossingen zoals de aanleg van een vooroever.

Variant	IJsselmeer	IJssel en Vecht	Samen
Peilopzet 0,2 m & pompen	0,9	0,8	1,7
Peilopzet 1,1 m	1,2	0,9	2,1
Peilopzet 1,5 m	1,3	0,9	2,2

Tabel 3.8 Kosten dijkverhoging in miljard euro (deze studie)

Ook elders zijn kosten geraamd voor het ophogen van de dijken rondom het IJsselmeer bij een stijging van het meerpeil in het IJsselmeer (Tabel 3.9). Bij de verschillende studies zijn steeds andere uitgangspunten gehanteerd voor de peilstijging in het IJsselmeer; variërende van 0,6 to 1,2 m. Geconcludeerd kan worden dat bij een verhoging van het meerpeil met 1,5 m de kosten voor traditionele dijkversterking aanzienlijk zullen zijn. Kosten in de orde van 2,5 à 3 miljard euro lijken reëel. Bovenop de kosten voor het versterken van de waterkeringen komen dan nog de kosten voor de aanpassing van de kunstwerken.

Referentie	Stijging meerpeil	Kosten
(Ecorys, 2007)	0,6 m	0,4 miljard euro
(Aerts et al., 2008)	1,2 m	0,6 miljard euro
(de Haan et al., 2009)	1,0 m	2,4 miljard euro

Tabel 3.9 Kosten voor dijkverhoging elders gevonden

4 Oplossingsrichting Afsluitdijk en Houtribdijk

4.1 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen voor Houtribdijk

De Houtribdijk is gerealiseerd in 1975 als onderdeel van de Zuiderzeewerken. De dijk verbindt de steden Lelystad en Enkhuizen en scheidt het IJsselmeer van het Markermeer.

Het IJsselmeer en het Markermeer worden volgens de Wet op de waterkering (Wow) beschouwd als buitenwater. Dit houdt in dat de Houtribdijk de dijkringgebieden die aan het IJssel- en Markermeer grenzen beschermt tegen buitenwater. Het gaat daarbij om Dijkring 8 (Flevoland), Dijkring 13 (Noord-Holland), Dijkring 44 (Kromme Rijn), Dijkring 45 (Gelderse Vallei) en Dijkring 46 (Eempolder). Als zodanig is de Houtribdijk een voorliggende primaire waterkering die buitenwater keert, categorie b. Daarnaast beschermt de Houtribdijk het Markermeer tegen hoge waterstanden op het IJsselmeer en vice versa. De Houtribdijk, heeft volgens de Wet op de waterkering een veiligheidsnorm met een gemiddelde overschrijdingskans van eens per 10.000 jaar op bezwijken. De waterkering is 29,2 km lang (RWS-IJsselmeergebied, 2006).

Figuur 4.1 De Houtribdijk: verbinding van Enkhuizen met Lelystad

In de Houtribdijk zijn vijf kunstwerken aanwezig. Nabij Enkhuizen ligt in de Houtribdijk het sluizencomplex Krabbersgat en bij Lelystad het sluizencomplex Houtribsluizen. In 2003 is het Naviduct nabij het Krabbersgat in gebruik genomen. De Houtribdijk, ligt tussen de provincies Flevoland en Noord-Holland. Over de Houtribdijk loopt de provinciale weg N302 van Lelystad naar Enkhuizen.

De doelstelling veiligheid vertaalt zich in een aantal functie-eisen ten aanzien van de hoogte, sterkte en stabiliteit van alle onderdelen (dijklichaam, spui- en schutsluis) van de waterkering. Deze dienen onder maatgevende hydraulische omstandigheden te voldoen aan de sterkte- en stabiliteitseisen vastgelegd in de “Leidraad Toetsen op Veiligheid “ van de TAW. Hierbij dient rekening te worden gehouden met een maatgevende significante golfhoogte en de bijbehorende golfperiode met een gemiddelde overschrijdingskans van eens in de 10.000 jaar.

Momenteel voldoet de Houtribdijk niet aan de veiligheidsnorm. Vooral grote delen van de bekleding zijn afgekeurd, maar ook een aanzienlijk deel van de hoogte heeft als score “geen oordeel” gekregen. De belasting vanaf de Markermeerzijde, als gevolg van de overheersende windrichting, is momenteel het zwaarst en dus maatgevend. Als de dijk moet worden verhoogd, is er echter weinig ruimte beschikbaar op het bestaande dijkprofiel vanwege de aanwezigheid van een cunet met een beperkte breedte. Over de exacte breedte van het

cunet is maar weinig informatie beschikbaar. In de toetsing is echter aangenomen dat sprake is van een breed cunet. Bij een smaller cunet en het aanbrengen van grond tegen de dijk om de stabiliteit te verbeteren, ontstaan oplopende waterspanningen in de slappe ondergrond, vooral naast het cunet, en is de dijk dus minder stabiel.

Figuur 4.2 Een stukje van de Houtribdijk

Het dijklichaam bestaat uit een grondverbetering, een zandlichaam met daarop een Kleilaag en een taludbekleding. De grondverbetering ontbreekt gedeeltelijk aan de Markermeerzijde, omdat het dwarsprofiel breder is uitgevoerd dan in eerste instantie de bedoeling was. Dit laatste komt door de aanleg van de wegverbinding, die in het oorspronkelijke ontwerp niet was voorzien.

Naast de zorg voor veiligheid is het tevens de ambitie om gelijktijdig te kijken naar het combineren van veiligheid met natuurontwikkeling. Dat geldt ook voor de Houtribdijk. In het lopende hoogwater beschermingsprogramma (HWBP) zal het kabinet dan ook kansen onderzoeken voor synergie tussen veiligheid en ecologie (Rijksoverheid, 2008).

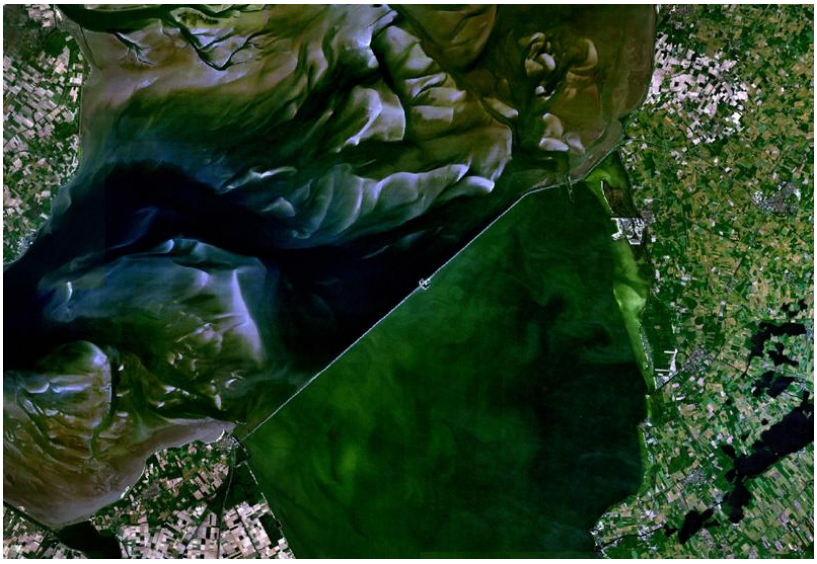
Eén van de projecten uit het Projectenplan Natuurontwikkeling IJsselmeergebied 2002-2010 is het project Houtribdijk. In dit project is het volgende streefbeeld omschreven:
Door de aanleg van een aantal dammen en het her en der opspuiten van zandplaten en het aanleggen van verondiepingen aan zowel de noord als de zuidzijde van de dijk ontstaan gebieden waar door de golfluwte de waterkwaliteit sterk kan verbeteren. Slib wordt niet langer opgewerveld en het water kan helderder worden. Achter de dammen en tussen de zandplaten groeien grote velden waterplanten die de helderheid vergoten, als paaigebied en opgroeihabitat voor vissen dienen en die in de winter voedsel vormen voor zwanen op de ondiepere delen. Tussen de velden is op de zandige bodem weer ruimte voor de ontwikkeling van driehoeksmosselen. De zandplaten, die tot maximaal zomerpeil worden opgebracht bieden plaats voor grote groepen waadvogels. Ook bij winden uit het zuiden biedt het gebied golfluwte voor vele duikeenden die ter plaatse foerageren. Het project wordt aangevuld met recreatief medegebruik: daar waar de natuurwaarden dat toelaten kunnen aanlegplaatsen voor kanovaart gerealiseerd worden.

Enkele jaren geleden zijn aan de zuidwestkant van de Houtribdijk een tweetal boogvormige dammen aangelegd; de zogenaamde hockeysticks. Achter één van deze dammen is grond opgespoten en zijn riet en biezen aangeplant. In totaal gaat het hier om circa 95 hectare. Deze dammen hebben tot doel de Houtribdijk tegen golfslag en ijsgang te beschermen. Een

bijkomend effect is dat achter de dammen natuurontwikkeling heeft plaatsgevonden. Inmiddels wordt het gebied door vele vogelsoorten bezocht.

4.2 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen voor Afsluitdijk

De Afsluitdijk is onderdeel van de Zuiderzeewerken en gerealiseerd in 1932. De dijk is 31,4 km lang, verbindt Noord-Holland met Friesland en scheidt de Waddenzee van het IJsselmeer. Verder omvat de Afsluitdijk vier waterkerende kunstwerken verdeeld over twee complexen. De Stevinsluizen bij Den Oever bestaan uit vijftien spuisluizen en een schutsluis en de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand uit tien spuisluizen en twee schutsluizen. Als het waterpeil in het IJsselmeer hoger is dan het streefpeil, wordt tijdens laagwater (eb) in de Waddenzee overtollig water via de spuisluizen uitgeslagen naar de Waddenzee.



Figuur 4.3 De Afsluitdijk

De verwachting is dat de zeespiegel zal gaan stijgen. Stijging van de zeespiegel heeft gevolgen voor de veiligheid van het IJsselmeer. Enerzijds wordt het uitslaan van water uit het IJsselmeer naar de Waddenzee lastiger omdat er een kortere periode beschikbaar is gedurende welke het peil in het IJsselmeer hoger is dan in de Waddenzee en bovendien wordt dit peilverschil kleiner. Anderzijds heeft een stijging van de zeespiegel in de Waddenzee direct effect op de veiligheid van de dijk.

Het voornemen van de rijksoverheid is om in 2010 het besluit te nemen tot verdubbeling van de spuicapaciteit en om vervolgens de uitbreiding in 2013 af te ronden. De verwachting is dat de verdubbelde spuicapaciteit voldoende is om de huidige streefpeilen in het IJsselmeer te handhaven tot 2035. In 2035 dien een besluit te zijn genomen tussen meestijgen met de zeespiegel of het plaatsen van pompen in de Afsluitdijk om het overtollige water af te voeren naar de Waddenzee.

Bij het verschijnen van de Wet op de waterkering (Wow) is voor de Afsluitdijk een veiligheidsnorm vastgelegd van 1 keer per 1.430 jaar (Noord-Holland, 2006). Later is de norm verhoogd. Momenteel heeft de Afsluitdijk een gemiddelde overschrijdingskans van 1 keer per 10.000 jaar op bezwijken van de kant van de Waddenzee (Rijkswaterstaat, 2006). Verhoging van de norm heeft nog niet geleid tot verhoging dan wel versterking van de dijk. De dijk is in de jaren twintig van de vorige eeuw ontworpen om een maximaal peil van NAP + 3,5 m.
Uit de veiligheidstoetsing van de Afsluitdijk is gebleken dat het grondlichaam over nagenoeg de hele lengte niet voldoet aan de vereiste hoogte. Onder toetsomstandigheden is de kruin

van de dijk 2,5 m te laag (Rijkswaterstaat 2008). Dit kan mogelijk voor overslag van water zorgen en vervolgens voor erosie van de grasbekleding op de kruin en het talud.

RWS-IJG heeft het initiatief genomen om te komen tot een integrale visie op de Afsluitdijk in het licht van de verwachte effecten van de klimaatverandering. Marktpartijen zijn uitgenodigd om te komen met oplossingen waarbij waterveiligheid is gecombineerd met gebiedsontwikkeling. De oplossingen worden getoetst op haalbaarheid, betaalbaarheid en uitvoerbaarheid. Bij gebiedsontwikkeling dient gedacht te worden aan de functies natuur, recreatie en economische aspecten zoals mobiliteit en opwekking van (duurzame) energie. Bij de veiligheid kan het vooral interessant zijn om de functies waterveiligheid te combineren met natuurontwikkeling. De bedoeling is dat de dijk na realisatie weer geruime tijd mee kan. Gesproken wordt daarbij over het jaar 2075.

Acht consortia, bestaande uit ruim 30 bedrijven, hebben hun integrale visie gepresenteerd. In de eerste fase zijn vervolgens vier consortia gekozen die hun visie in een tweede fase nader hebben mogen uitwerken. De vier consortia hebben ieder een pakket aan maatregelen voorgesteld. Onderstaand wordt kort ingegaan op de maatregelen ingebracht door de vier consortia en passende binnen de combinatie waterveiligheid en natuurontwikkeling (Rijkswaterstaat et al., 2009).

4.2.1 WATERmachine: overslagdijk en binnenmeer

(Arcadis, Dredging International, NUON, H+N+S en Alkyon)

Dit consortium heeft gekozen om van de Afsluitdijk een overslag(bestendige) dijk te maken. In het ontwerp wordt achter de Afsluitdijk een tussenmeer gecreëerd. Het tussenmeer vervult meerdere functies; vangt overslaand zout water op, maakt de waterhuishouding van het IJsselmeer flexibeler en biedt ruimte voor meerdere ontwikkelingen. Bij het laatste kan gedacht worden aan onder andere de ontwikkeling van brakke en estuariene natuur in het tussenmeer en van zoete natuur aan de zuidzijde van het tussenmeer.

4.2.2 Natuurlijk Afsluitdijk: zeewering en natuurlijk

(Wubbo Ockels, Royal Haskoning, Rabobank, van Oord, BAM, Lievense en Eneco)

Dit consortium heeft gekozen voor een gefaseerde aanleg van een tweede dijk in de vorm van een natuurdijk achter de Afsluitdijk in het IJsselmeer. Tevens wordt de bestaande Afsluitdijk verbreed en wordt een zogenaamd valmeer aangelegd tussen de Afsluitdijk en de natuurdijk. Een valmeer bestaat uit twee meren met een verschil in waterstand. Tussen de meren wordt dan een pomp / turbine systeem geplaatst. Bij een overschot aan energie wordt water naar het hogere meer gepompt en bij een vraag naar energie stroomt water via een turbine naar het meer met het lagere peil.

Bij de fasering wordt nadrukkelijk gekeken naar werk met werk maken; grond afkomstig uit het valmeer wordt gebuikt voor de aanleg van de natuurdijken, de versterking van de Afsluitdijk en de aanleg van benodigde kunstwerken.

4.2.3 Monument in Balans: betonnen stormschild en ontwikkeling van de koppen

(Noordpeil Landschap en Stedenbouw, GD Architecten, Oranjewoud en CE Delft)

Dit consortium kijkt naar de Afsluitdijk als de verbinding tussen Noord-Holland en Friesland en dus ook naar het betrekken van een deel van de Wieringermeer en westelijk Friesland bij de integrale ontwikkeling van de dijk. Deze gebieden worden als zogenaamde ‘halters’ gezien. Gekozen is voor plaatsing van een stormschild op de huidige dijk om te voldoen aan de basis functionaliteit voor veiligheid. Voor het stimuleren van de natuur wordt in het IJsselmeer een brakke zone voorzien. Ruimte voor duurzame energie is voorzien in de vorm van blue energy, zonne-energie en windenergie.

In de visie van ‘Monument in Balans’ wordt geen combinatie van veiligheid met natuurontwikkeling voorzien.

4.2.4 WaddenWerken: kwelders in de waddenzee

(DHV, Wageningen IMARES en Bureau Ale Hosper)

Dit consortium wil niet de dijk verhogen maar verbreden. Aan de kant van de Waddenzee is de aanleg voorzien van een kweldergebied van enkele honderden meters breed. Door de verbreding wordt de oploop van de golven verminderd. De kwelder levert dan een bijdrage aan de veiligheid en groeit letterlijk mee met de stijging van de zeespiegel. De omvang van de kwelder zal ongeveer 1.500 hectare bedragen.

Voorzien is dat het spuiwater van het IJsselmeer (gedeeltelijk) in het kweldergebied komt, zodat een brakke zone ontstaat en dus brakke natuur tot ontwikkeling kan komen.

De kwelder wordt gescheiden van de Afsluitdijk door de aanleg van een zogenaamde ‘keldernok’; een soort ‘voordijk’. Tussen ‘keldernok’ en Afsluitdijk ontstaat vervolgens een vallei zodat een visuele scheiding aanwezig is.

Kijkende naar de verschillende visies zijn er twee die nadrukkelijk de combinatie verbetering veiligheid combineren met natuurontwikkeling. Dat zijn ‘WATERmachine’ met een overslagbestendige Afsluitdijk met daarachter een brak natuurgebied en ‘WaddenWerken’ met een uitgestrekt kweldergebied aan de kant van de Waddenzee. Met deze combinatie zijn voordelen van synergie te behalen. Beide andere visies hebben wel de beide elementen veiligheid en natuur meegenomen, maar dan apart van elkaar.

De kosten verbonden aan het uitvoeren van de veiligheidsmaatregelen zijn omvangrijk. In een vervolgonderzoek zal meer duidelijkheid verkregen moeten worden over de precieze maatschappelijke kosten en baten (MKBA). Gewerkt wordt aan een plan-mer. De resultaten van MKBA en de plan-mer moeten leiden tot een voorkeursalternatief (VKA). Verwacht wordt dat het VKA najaar 2010 beschikbaar komt.

5 Oplossingsrichting IJsseldelta

Bij een significante opzet van het waterpeil in het IJsselmeer zijn vooral de IJsseldelta en de Vechtmonding kwetsbare gebieden. De gevolgen voor de hoogwaterbescherming en inrichting zijn groot. In haar aanbeveling 11 vraagt de Deltacommissie expliciet aandacht voor dit probleem: *Onderzocht moet worden welke maatregelen nodig zijn om de inrichting van de benedenloop van de IJssel en het Zwarte Water aan te passen aan een verhoging van het IJsselmeerpeil met 1,5 m. In dit hoofdstuk is gebruik gemaakt van de uitkomsten van de quick-scan "Toekomstvastheid van de hoogwatergeul in de IJsseldelta" (Rijkswaterstaat, 2009a) en (Rijkswaterstaat, 2009b).*

5.1 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen

In de PKB Ruimte voor de Rivier (2006) is vastgelegd dat er maatregelen in het rivierengebied moeten worden genomen die resulteren in voldoende waterstanddaling om de doelstelling met betrekking tot de veiligheid tegen overstromen bij een afvoer van 16.000 m^3/s in de Rijn bij Lobith te halen. Een deel van de maatregelen moet op de korte termijn zijn uitgevoerd, in 2015.

Als hoogwatermaatregel bij Kampen is in de PKB op de korte termijn een zomerbedverlaging van de IJssel opgenomen en een ruimtelijke reservering voor een toekomstige hoogwatergeul en een dijkverlegging bij Noorddiep. De regio heeft echter de voorkeur voor de aanleg van een hoogwatergeul op de korte termijn als uitwissel-maatregel voor de zomerbedverdieping, zgn. de "bypass". Onder meer omdat het gebied een integrale opgave kent wat betreft weg- en railinfrastructuur en woningbouw die met de bypass gecombineerd dan wel afgestemd moeten worden om te komen tot een goede ruimtelijke invulling en kwaliteit. Als aangetoond kan worden dat de bypass voldoet aan de hydraulische taakstelling en de oplossing binnen tijd en budget gerealiseerd kan worden, dan kan de Staatssecretaris een zogenaamd "omwisselbesluit" nemen. Uit een eerste toetsing in 2008 volgt dat de aanleg van een hoogwatergeul niet de verlaging van de waterstand haalt om tot omwisseling over te gaan. Bovendien ontbreekt een voorstel voor financiering nog. Het omwisselbesluit is daarom uitgesteld.

Het omwisselbesluit is complexer geworden en in een iets ander daglicht komen te staan na de aanbevelingen van de commissie Veerman. De Staatssecretaris heeft daarop haar ambtenaren opdracht gegeven de effectiviteit van de hoogwatergeul te onderzoeken (afvoer van 18.000 m^3/s in de Rijn bij Lobith op de lange termijn), ook bij een eventuele verhoging van het IJsselmeerpeil. Bovendien wordt de inpassing van de hoogwatergeul in verschillende toekomstscenario's onderzocht als mogelijke oplossingsrichtingen voor de lange termijn ten behoeve van hoogwaterbescherming in de IJssel- en vechtdelta).

5.1.1 Oplossingsrichting hoogwaterbescherming – huidig peilbeheer IJsselmeer

Bij een gelijkblijvend IJsselmeerpeil zijn plannen die voorgesteld worden in de PKB afdoende, waarbij eventueel de zomerbedverdieping op initiatief van de regio na goedkeuring door de Staatssecretaris wordt omgewisseld voor de aanleg van de bypass op de korte termijn. Zoals gezegd zorgt de hoogwatergeul echter (nog) niet voor dezelfde verlaging van de waterstand als zomerbedverdieping. Het lange termijn pakket zorgt echter dat voor vrijwel de gehele IJsseldelta een voldoende veiligheidsniveau wordt bereikt.

5.1.2 Oplossingsrichting hoogwaterbescherming – meestijgen IJsselmeerpeil

Een eventuele verhoging van het IJsselmeerpeil heeft gevolgen voor het PKB maatregelpakket. De dijken langs het benedenstroomse deel van de IJssel tot aan de

monding zullen verhoogd moeten worden, ondanks de verdieping van het zomerbed verdieping. Verder wordt de maatregel zomerbedverdieping minder effectief vanwege hogere waterstanden. Het alternatief, de hoogwatergeul, verliest echter ook aan effectiviteit bij een hoger meerpeil. Het traject van de IJsseldelta waar de storm de maatgevende hoogwaterstanden bepaald, wordt groter - in de bovenstroomse richting.

Het onderzoek dat Rijkswaterstaat heeft uitgevoerd in 2009 toont aan dat bij een verhoging van het IJsselmeerpeil met in ieder geval 0,5 m of meer in de IJsseldelta en in de Vechtmonding ingrijpende maatregelen nodig zijn, vooral voor de hoogwaterbescherming onder stormgedomineerde omstandigheden. Het lange termijn pakket PKB is dan niet meer afdoende. In de studie zijn zes oplossingsrichtingen geïdentificeerd (Tabel 5.1):

1. Stormkering Ketelbrug.
2. Vechtboezem.
3. Compartimenteringsdam.
4. Nieuwe Deltadijken.
5. Huidige dijkringen.
6. Verdiepen van het IJsselmeer.

Oplossingsrichting en strategie	Beschrijving (een uitgebreide beschrijving is opgenomen in Bijlage A)	Inpasbaarheid van de hoogwatergeul (toekomstvastheid)	Kaartbeeld in postzegelformaat
1. Stormkering Ketelbrug (afsluiten)	Stormkering bij Ketelbrug, waarmee de hele IJsseldelta en Vechtmonding bij noordwesterstorm kunnen worden afgesloten van het IJsselmeer.	De hoogwatergeul is complementair aan een stormkering en blijft effectief want stormopzet werkt niet door in de IJsseldelta.	
2. Vechtboezem (afsluiten)	Permanente kering met schutsluis bij het depot IJsseloog, waardoor de Vechtboezem geheel wordt afgesloten. Vechtwater wordt via het randmeer Noordoostpolder omgeleid, het tracé van de hoogwatergeul wordt de hoofdgeul voor de IJssel.	De hoogwatergeul wordt de hoofdgeul van de IJssel via het tracé van de hoogwatergeul, waardoor Kampen wordt afgesloten voor stormopzet.	
3. Compartimen-teringsdam (afsluiten)	Dam van Houtribdijk naar Noordoostpolder met stormkering. Bij storm wordt de stormkering richting IJsselmeer gesloten zodat de delta beschermd is tegen stormopzet. Afvoer IJssel en Vecht kan tijdelijk via Houtribsluizen worden afgevoerd naar Markermeer.	De hoogwatergeul is complementair aan compartimentering van het IJsselmeer en blijft effectief want stormopzet werkt niet door in de IJsseldelta.	
4. Nieuwe deltadijken (versterken)	Kampen/Zwolle en Vechtsteden worden beschermd door deltadijken. Hoofdstroom van de IJssel via het tracé van de hoogwatergeul, Vecht omleiden door de polder Mastenbroek.	De hoogwatergeul wordt de hoofdgeul van de IJssel, waardoor Kampen beschermd is tegen stormopzet en hoge afvoeren.	
5. Huidige dijkringen (versterken)	Bestaande dijken en kunstwerken versterken zodat achterland wordt beschermd bij zowel stormgedomineerde als rivierafvoergedomineerde maatgevende omstandigheden.	De hoogwatergeul is niet noodzakelijk, maar vormt ook geen belemmering.	
6. Verdiepen IJsselmeer (compenseer stormopzet)	Meerbodem tot 2100 gefaseerd verdiepen, zodat stormopzet ondanks peilverhoging geheel wordt gecompenseerd. Aanleg van vooroevers om de extra golfbelasting door de grotere meerdiepte te reduceren.	De hoogwatergeul is complementair aan het verdiepen van het IJsselmeer.	

Tabel 5.1 Oplossingsrichtingen voor lange termijn hoogwaterbescherming in de IJsseldelta en de Vechtmonding (bron: Toekomstvastheid van de hoogwatergeul in de IJsseldelta pp. 29, Rijkswaterstaat, 2009)

Wat betreft de toekomstvastheid van de hoogwatergeul geldt, dat alleen bij het versterken van de huidige dijkringen een hoogwatergeul achterwege kan blijven; bij de andere alternatieven is hij nodig voor het bergen en afvoeren van de rivierafvoer.
In geen van de alternatieven is het huidige ontwerp voor de hoogwatergeul echter robuust voor de lange termijn oplossing. In alle alternatieven waarbij als strategie gekozen wordt voor "afsluiten" of "compenseren", d.w.z. stormkering Ketelbrug, Vechtboezem en Compartimenteringsdam, kan een stormkering bij Roggebot uit de plannen komen te vervallen. Voor de overige twee alternatieven zijn grote aanpassingen aan de hoogwatergeul nodig, omdat deze geul dan de hoofdafvoer van de IJssel wordt; de afvoer door de bypass wordt vier keer zo groot (circa 2.800 m^3/s)).

5.1.3 Nadere toelichting verhogen dijken

In onderstaande tabel zijn de nieuwe MHW standen weergegeven voor de huidige situatie en de nieuwe situatie in aanwezigheid van de hoogwatergeul en bij een peilstijging van 1,5 m in het IJsselmeer (en dus ook het Ketelmeer en het Vossemeer). Als de hoogwatergeul achterwege wordt gelaten, ligt de waarde voor het maatgevende hoogwater (MHW) bij Kampen en Zwolle hoger. Er zullen in dat geval ingrijpende, rivierverruimde maatregelen bijvoorbeeld bij de brug van Kampen nodig zijn, evenals omvangrijkere dijkversterkingen langs de IJssel tussen Zwolle en Kampen.

Locatie	Huidige MHW [m+NAP][24]	Toekomstig MHW bij 1,5 m peilstijging in het IJsselmeer en aanleg hoogwatergeul [m+NAP]
Zwolle	ca. 5	ca. 5,1[25]
Kampen	ca. 3,1	ca. 3,5 a 3,6[25]
Keteldiep	ca. 3	ca. 3,57[26]

Tabel 5.2 Maatgevend Hoogwater (MHW) en dijkhoogten in de IJsseldelta

5.1.4 Nadere toelichting keringen

Huidige Ramspolkering

Huidig peilbeheer: Zolang het IJsselmeerpeil niet wordt verhoogd, is de Ramspolkering afdoende. In geval van stormopzet en een gesloten kering, onder maximale Vechtafvoer, kan de Ramspolkering in de huidige situatie namelijk circa 9 uur dicht blijven, voordat het maximale peil van 0,5 m + NAP wordt bereikt.

Peilverhoging: Bij een stijging van het IJsselmeerpeil met 1,5 m is de Ramspolkering echter altijd gesloten, aangezien het nieuwe IJsselmeerpeil (en dus het Ketelmeerpeil) dan 1,1m + NAP bedraagt. Er zal dan dus altijd water gespuid moeten worden uit het Zwarte Water om aan het maximum peil te voldoen. Daarnaast is bij storm de kering waarschijnlijk net niet toereikend: de hoogte van de kering (3,55 m + NAP) is net te laag bij een IJsselmeerpeil met stormopzet van 3,57m + NAP.

24. *'Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van de waterkeringen', Ministerie van Verkeer en Waterstaat, september 2007*
25. *geschat naar figuur 8 uit (Rijkswaterstaat, 2009b)*
26. *gebaseerd op een nieuw streefpeil NAP+1,1 m (als gevolg van 1,5 m peilstijging) op het IJsselmeer en een stormopzet van 2,47 m (Rijkswaterstaat, 2009a)*

Ramspolkering	
Sluitpeil:	0,5 m+NAP
Hoogte kering:	6,30m+NAP
Dijkhoogte:	3,55m+NAP
Gewicht balg:	33 ton
Sluitingstijd:	60 min
Te bieden veiligheid/Inundatiefrequentie:	1/2000 per jaar
Huidig IJsselmeerpeil, storm 1/2.000 per jaar, windsnelheid 34 m/s, richting NW	
o Huidig winterpeil: -0,4m+NAP	
o Stormopzet IJsseldelta: 3,13 m, resulterend in MHW van 2,73 m+NAP	
o Maatgevende waterstand bij IJsseldelta: 2,73 m+NAP	
o Maximaal peil Zwarte Water: 0,5 m+NAP	
o Maximaal te stijgen: 0,9 m	
o Maximale Vechtafvoer: 470 m^3/s (HR categorie C-kering[27])	
o Oppervlakte Zwarte Water: 1.765 ha	
IJsselmeer + 1,50 m, storm 1/2.000 per jaar, windsnelheid 34 m/s, richting NW	
o Winterpeil 1,1m+NAP	
o Stormopzet IJsseldelta: 2,47m (zonder maatregelen)	
o MHW IJsseldelta: 1,1 m+NAP +2,47m = 3,57m+NAP (zonder maatregelen)	

Tabel 5.3 Kenmerken kering Ramspol

5.1.5 Nieuwe stormvloedkering Ketelbrug

Huidig peilbeheer: Een indicatieve, verkennende berekening (zie tekstbox) voor een nieuwe stormvloedkering laat zien dat het Ketelmeer, het Vossemeer en het Zwarte Water voor voldoende bergingscapaciteit zorgen in geval dat de kering 2 dagen gesloten wordt uitgaande van een storm met een kans op voorkomen van 1/2.000 per jaar en een jaarlijks voorkomende afvoer. De peilstijging achter de kering overschrijdt niet de huidige MHW-standen. Wel geldt hierbij de kanttekening dat het wel heel gelukkig zou zijn als de kering precies sluit bij - 0,4m NAP, in de praktijk is men meestal wat later. Echter een sluiting van 2 dagen is erg lang. Belangrijk is in ieder geval dat de kering relatief snel sluit en ook weer snel open kan.

Situatie bij sluiting stormvloedkering Ketelbrug

Laten we uitgaan van een storm met kans 1/2.000. Bij een jaarlijks voorkomende IJsselafvoer van 900 m^3/s is na 2 dagen sluiting dan 900*60*60*24*2=155.520.000 m^3 water door de IJssel aangevoerd.

Wordt dit ruwweg verdeeld over de oppervlakte van het Ketelmeer+Vossemeer+Zwarte Water (5.517 ha= 55.170.000m^2) dan kom je uit op een absolute peilstijging achter de kering van 2,82 m. Het huidige winterpeil is -0,4m + NAP. We nemen aan dat dit peil geldt in het Ketelmeer, omdat het Ketelmeer in het geval van een werkende kering niet onderhevig is aan de storminvloed. Het peil achter de kering wordt dan 2,42 m + NAP na 2 dagen sluiten. Indien rekening wordt gehouden met het effect van scheefstand van de waterspiegel als gevolg van opwaaiing, dan ligt het peil hoogstwaarschijnlijk nog een paar decimeter hoger. In totaal is dit peil lager dan de MHW in het gebied van 3 m + NAP.

Peilverhoging: Ook hier is de bergingscapaciteit achter de kering weer afhankelijk van het moment en de snelheid van sluiten (begin waterstand achter de kering), de MHW van de omgrenzende dijken (maximum waterstand achter de kering) en het openwateroppervlak.
Indicatieve berekeningen laten zien dat de bergingscapaciteit Vossenmeer, Ketelmeer en Zwarte Water onvoldoende is voor een sluitingsduur van 2 dagen. Afhankelijk van de snelheid van het zakken van de waterstand op het IJsselmeer, is extra bergingscapaciteit in de vorm van een randmeer Noordoostpolder of bestaande randmeren nodig. Hier moeten dan ook de dijken op voldoende hoogte gebracht worden.

[27] *(Ministerie Verkeer en Waterstaat, 2008)*

Met de invloed van wind op het peil in het bergingsgebied is in de berekeningen vooralsnog geen rekening gehouden (zorgt voor hogere peilen, eerder bereiken MHW).

De hier gepresenteerde indicatieve berekeningen zijn slechts een opstapje voor (uitgebreide) probabilistische berekeningen die nodig zijn in vervolgonderzoeken. Ze zijn in dit Hoofdstuk gepresenteerd om inzicht te bieden in de problematiek.

Situatie bij sluiting stormvloedkering Ketelbrug

Bij een toekomstig IJsselmeerpeil (+1,5 m = 1,1m + NAP) en bij een 1/2000 per jaar storm hoort een stormpeil van 3,57 m + NAP. We nemen aan dat het peil op het Ketelmeer niet onderhevig is aan wind en dus 1,1m+NAP bedraagt. Hier treedt het eerste probleem al op: de Ramspolkering komt nu in werking bij een meerpeil van 0.5m+NAP en zou daarom altijd dicht moeten staan, wat de bergingscapaciteit van het gebied verkleint.

Laten we aannemen dat de problematiek met betrekking tot de Rampspolkering geen probleem is. Bovendien nemen we aan dat de stormvloedkering snel sluit bij +1,1 m + NAP wanneer storm op komst is (optimistische schatting). Na 2 dagen sluiten van de stormvloedkering, wordt het peil achter de kering dan 1.1m + NAP + 2.82m peilstijging = 3.92m + NAP, wanneer uitgegaan wordt van een jaarlijks voorkomende IJsselafvoer van 900 m3/s en berging in het Vossemeer, Zwarte Water en Ketelmeer. Dit is hoger dan de huidige MHW van het gebied en de kering zou dus eerder open moeten, namelijk wanneer het peil 3 m+NAP in het bekken wordt bereikt. Dit is na 32 uur al, bij een bergingscapaciteit van 104 miljoen m^3. Echter, de kering kan alleen open wanneer de buitenwaterstand inmiddels voldoende gezakt is tot beneden 3m + NAP.

In het andere geval treedt hier dus een probleem op, en het water moet dan inderdaad ergens anders langs afgevoerd of geborgen worden om aan normpeilen te kunnen voldoen. Voor 2 dagen sluiting is een extra bergingsoppervlak benodigd van ruim 8000 ha. Als zoekgebied kan gedacht worden aan bijvoorbeeld het ‘vergeten’ randmeer langs de Noordoostpolder en/of de Veluwerandmeren.

De kans dat zowel een storm met kans 1/2000 als een IJsselafvoer met kans 1/2000 voorkomen is erg klein (theoretisch 1/2000*1/2000), en daarom hoeft ook niet gerekend te worden met een IJsselafvoer van 2876 m3/s maar is 900 m3/s voldoende. Als deze situatie zich toch zou voordoen, moet rekening gehouden worden met een peilstijging van 9 m achter de kering. Wat wel kan worden meegenomen in de berekeningen, is een hogere afvoer dan de jaarlijkse afvoer van 900m3/s waar nu mee gerekend wordt. Grote stormen komen namelijk vaak voor in lente en herfst, en in de lente zijn de afvoeren gemiddeld hoger. De kans dat een storm dan tegelijk met een hogere afvoer voorkomt, is groter dan die 1/2000*1/2000. Dit kan zorgen voor een mogelijk kortere sluitingsduur dan nu wordt berekend.

5.2 Kostenkentallen van mogelijke maatregelen

In de studie naar de toekomstvastheid van de hoogwatergeul in de IJssel zijn een zestal oplossingsrichtingen geschetst (Tabel 5.1). In de Bijlage van het rapport (Rijkswaterstaat, 2009), staat voor iedere variant een indicatie van de kosten vermeld. Nadrukkelijk wordt aangegeven dat het om globale kosten gaat.

Variant		Kosten (miljard euro)		Strategie
1	Stormkering Ketelbrug	0,6	2	Afsluiten en omleiden via nieuw RM NOP[28]
		0,4	1,2	Afsluiten en omleiden via VRM[29]
2	Vecht boezem	0,7	1,5	Afsluiten en omleiden via nieuw RM NOP
3	Compartimenteringsdam	0,5	1,4	Afsluiten
4	Nieuwe deltadijken	1,2	2,2	Versterken
5	Huidige dijkringen	0,8	1,8	Versterken
6	Verdiepen IJsselmeer	45	70	Compenseren stormopzet

Tabel 5.4 Globale kosten van mogelijke maatregelen voor de toekomstvastheid van de IJsseldelta

De kosten voor de variant om het IJsselmeer te verdiepen komen duidelijk het ongunstigst uit de bus. De kosten voor de andere varianten liggen in dezelfde orde grootte. Verdere studie dient het onderscheid duidelijker in kaart te brengen.

[28] *Randmeer Noordoostpolder (RM NOP)*

[29] *Veluwerandmeren (VRM)*

6 Oplossingsrichting Markermeer-IJmeer

6.1 Autonome ontwikkeling en alternatieve oplossingen

Peilbeheer van het Markermeer-IJmeer wordt losgekoppeld wordt van het peil van het IJsselmeer (Nationaal Waterplan). Het nieuwe peilregime in het Markermeer-IJmeer dient voor de lange termijn beter tegemoet te komen aan de ontwikkeling van een veerkrachtig en samenhangend ecosysteem (natuurlijke dynamiek) en de wensen voor (beperkte) buitendijkse ontwikkeling nabij IJburg en Almere. Voor de korte termijn dient het zogenoemde seizoensgebonden peil in het Markermeer-IJmeer bij te dragen aan de zoetwatervoorziening voor de omliggende regio.

Het verschil tussen het huidige peilbeheer en seizoensgebonden peilbeheer zit vooral in het waterpeil in de zomerperiode. Bij seizoensgebonden peilbeheer wordt het waterpeil na afloop van het stormseizoen hoger opgezet. Afhankelijk van de vraag naar zoetwater zakt het waterpeil in de zomer vervolgens uit. Het uitzakken is mede afhankelijk van de eisen die de ecologie stelt. Voor de lange termijn is deze zomerberging- en benutting ontoereikend om te kunnen voldoen aan de groeiende watervraag in de omliggende regio, zodat water uit het IJsselmeer gehaald moet worden.

De rol van het IJsselmeer en Markermeer-IJmeer voor de zoetwatervoorziening en voor de natuurwaarden variëren in de tijd. Tabel 6.1 geeft deze variatie weer en is afkomstig uit de quick scan naar seizoensgebonden peil voor Markermeer-IJmeer (Deltares, 2009). In deze tabel worden drie momenten in de tijd onderscheiden:

- Na 2013 – het moment waarop een nieuw peilbesluit in werking kan treden en een korte termijn strategie voor zoetwatervoorziening kan worden gevolgd.
- Na 20xx – het moment waarop grootschalige natuurontwikkeling in het Markermeer-IJmeer is gerealiseerd. Vanaf dit moment kan een seizoensgebonden peilverloop pas echt bijdragen aan het functioneren van het ecosysteem van het Markermeer-IJmeer.
- Na 20yy – het moment waarop het peil in het IJsselmeer gaat meestijgen met zeespiegelstijging. De verwachting is dat dit op zijn vroegst gebeurt in 2035. Het Markermeer is losgekoppeld van het IJsselmeer en stijgt niet mee.

	Na 2015	Na 20xx	Na 20yy
IJsselmeer	Ya1) Zoetwater leidend	Ya2) Zoetwater leidend	Yb) Zoetwater leidend
Markermeer	Ma) Zoetwater leidend met zo min mogelijk neg. effect op natuurwaarden	Mb) Zoetwater / natuurwaarden gelijkwaardig	Mc) Natuurwaarden leidend
VRM[30]	VRMa) Natuurwaarden leidend	VRMb[31]) Natuurwaarden leidend?	VRMc) Natuurwaarden leidend?

Tabel 6.1 Differentiatie van functies van het IJsselmeergebied in de tijd (bron: effecten van peilveranderingen in het IJsselmeer en Markermeer-IJmeer, Deltares, 2009)

Gebruik maken van de ‘ruimte’ in de bestaande infrastructuur van het watersysteem is bij het onderzoek naar seizoensgebonden peil als uitgangspunt gekozen. Dat betekent dat voor het instellen van seizoensgebonden peil geen dijkversterking nodig is. De waterveiligheid bepaalt dan de bovengrens van het waterpeil.

[30] *VRM: Veluwerandmeren*

[31] *Vooralsnog niet duidelijk of VRMa = VRMb = VRMc*

Verwacht wordt dat in het vroege voorjaar het peil mogelijk opgezet kan worden tot - 0,10 m + NAP. Vanaf mei, na afloop van het stormseizoen, kan het peil verder opgezet worden tot + 0,10m + NAP. Tegelijkertijd wordt de ondergrens van -0,30 m + NAP bepaald door grenzen die aanwezig zijn bij schutsluizen en bij waterinlaten waarbij zoetwater onder vrij verval binnenkomt.

Rekening moet worden gehouden met de effecten van peilveranderingen op de verschillende functies zoals veiligheid, scheepvaart, natuurwaarden en het grondwaterregime. Deze effecten geven de grenzen aan waarbinnen fluctuatie van het waterpeil mag plaatsvinden. Voor het Markermeer-IJmeer volgt daaruit een seizoensgebonden peil met een fluctuatie van het waterpeil met 0,40 m; tussen 0,10 m + NAP en 0,30 m - NAP.

Overtollig water kan het Markermeer-IJmeer verlaten via de Oranjesluizen en stromen naar het boezemsysteem van het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) of naar het Noordzeekanaal (NZK). Stroomt het naar het NZK dan kan het vervolgens via het spuicomplex in IJmuiden naar de Noordzee gespuid worden. Onder de huidige condities voorkomt het spuien van een minimale hoeveelheid van vijf kubieke meter water per seconde dat een ‘tong’ van zoutwater afkomstig van de Noordzee via het Noordzeekanaal binnendringt. Bij het stijgen van de zeespiegel zal te spuien hoeveelheid zoetwater toe moeten nemen om de zoutwatertong terug te dringen en dus hetzelfde effect te krijgen.

In bijzondere gevallen kan door regionale waterbeheerders op dit moment bij hoogwater in het Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal gespuid worden op het IJsselmeer. Hierover bestaan afspraken tussen Rijkswaterstaat en de regionale waterbeheerders. De afspraken zijn vastgelegd in waterakkoorden. Om deze oplossing ook in de toekomst mogelijk te laten zijn zal er een pomp op de Houtribdijk geplaatst moeten worden zodra het waterpeil in het IJsselmeer ontkoppeld wordt van het Markermeer. Verwacht wordt dat een capaciteit van ongeveer 50m^3/s benodigd zal zijn.

In geval van een grote aanvoer van water naar het IJsselmeer via het IJssel-Vecht systeem en geen mogelijkheid tot spuien onder vrijverval nabij de Afsluitdijk, zal het waterpeil in het IJsselmeer oplopen. Voor een dergelijke uitzonderlijke situatie kan er voor gekozen worden om water vanuit het IJsselmeer in te laten naar het Markermeer en het af te voeren via ARK of NZK.

7 Oplossingsrichting overige infrastructuur en constructies

Peilstijging in het IJsselmeer zal ook gevolgen hebben voor de scheepvaart en de recreatievaart. Een grotere waterdiepte in de vaargeulen werkt uiteraard positief door; schepen kunnen dan namelijk zwaarder worden beladen.

Een apart punt van aandacht betreft de haventjes en marina van de voormalige Zuiderzeestadjes gelegen aan het IJsselmeer. Voorzieningen zoals aanlegplaatsen zullen namelijk moeten worden aangepast. Bij tijdige melding van peilstijging, zullen sommige aanpassingen kunnen worden meegenomen bij het groot onderhoud van havens dat eens in de veertig à vijftig jaar plaatsvindt. Ook de sluizen voor de scheepvaart bij de Houtribdijk, bij Enkhuizen (inclusief naviduct) en bij Ramspol moeten worden aangepast op de nieuwe situatie.

Figuur 7.1 Overzicht van de verschillende havens die gelegen zijn rondom het IJsselmeer.

Het regionale watersysteem ondervindt ook de gevolgen van een hoger meerpeil op het IJsselmeer. De aanpassing van pompgemalen, inlaatwerken en regionale keringen zijn onderwerp voor vervolgstudie.

8 Uitkomsten integrale varianten voor klimaatbestendig NL

In de studie klimaatbestendig Nederland Waterland worden naast de autonome ontwikkeling vier varianten onderscheiden. De varianten kunnen als volgt worden getypeerd:

- Autonoom + logische voortzetting huidig beleid (NUL-Variant).
- Maximale zoetwatervoorziening (Variant I).
- De zee-invloed maximaal buiten houden (Variant II).
- Maximale spuimogelijkheden (Variant III).
- IJsselmeer en Rijnmonding pompen, Haringvliet open riviermonding (Variant IV).

8.1 NUL-variant, autonoom beleid en beheer

Bij de NUL-Variant zal worden gekozen voor traditionele dijkversterking.

8.1.1 Tot het jaar 2020

Het huidige beleid (Rijkswaterstaat, 2001) is dat het waterpeil in het IJsselmeer meestijgt met de stijging van de zeespiegel. Bij een stijging van de zeespiegel met 0,35 m (maximum onder W^+ in 2050), stijgt het waterpeil in het IJsselmeer met 0,2 m. Bij de stijging van het waterpeil in het IJsselmeer is rekening gehouden met een verdubbeling van de spuicapaciteit in de Afsluitdijk. De Afsluitdijk, als waterkering, wordt vóór het jaar 2020 aangepast. Hiermee voldoet de kering aan de veiligheidsnormen tot voorbij het jaar 2075.

Als het waterpeil in het IJsselmeer met 0,20 m stijgt, moet de waterkering langs het IJsselmeer op een aantal dijkvakken worden aangepast; de dijk is daar namelijk onvoldoende hoog (Tabel 8.1). Voor het merendeel van de kustlijn van het oude land van Friesland en Westfriesland hoeft geen aanpassing plaats te vinden. Dat geldt wel voor de nieuwe polders van de Wieringermeerpolder, Flevoland en de Noordoostpolder.

			Benodigde dijkverhoging als percentage (%) van de dijklengte					
Peilopzet 0,2 m (pompen)	**Dijk-Ring**	**Dijklengte (km)**	**0 m**	**0 tot 0,5 m**	**0,5 tot 1 m**	**1 tot 1,5 m**	**1,5 tot 2 m**	**2 tot 2,5 m**
Friesland	DR06	~ 62	84	16	0	0	0	0
Noordoostpolder	DR07	~ 58	39	61	0	0	0	0
Flevoland	DR08	~ 35	30	70	0	0	0	0
Westfriesland	DR13	~ 21	99	1	0	0	0	0
Wieringermeerpolder	DR12	~ 17	63	37	0	0	0	0
IJssel - linkeroever	DR11	~ 28	16	84	0	0	0	0
IJssel-rechteroever	DR10	~ 19	0	100	0	0	0	0
Vecht–linkeroever	DR10	~ 17	89	11	0	0	0	0
Vecht–rechteroever	DR09	~ 20	58	42	0	0	0	0

Tabel 8.1 Benodigde dijkverhoging voor de verschillende gebieden. De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot [10] op bladzijde 20)

8.1.2 Tot het jaar 2050

In het jaar 2050 wordt onder het W^+ scenario een zeespiegelstijging verwacht van maximaal 0,35 meter. Het meerpeil in het IJsselmeerpeil zal dan vermoedelijk met ongeveer 0,20 meter zijn gestegen in vergelijking met het huidige peil. De mate van dijkverhoging is dan vergelijkbaar met wat gepresenteerd is in Tabel 8.1.

Afhankelijk van de werkelijke zeespiegelstijging kan het nodig zijn om rond 2035-2050 te starten met een eerste ronde versterking van de dijken gelegen langs het IJsselmeer, De Houtribdijk is nu al afgekeurd en zal versterkt gaan worden. Deze versterking zal vermoedelijk voldoende zijn om de verwachte stijging te ondervangen. Hiermee worden de dijken voldoende hoog om een stijging van het waterpeil tot 2075 aan te kunnen. Binnen de NUL-variant worden de dijken op een traditionele manier versterkt en / of verhoogd om deze toekomstige stijging van het waterpeil te kunnen weerstaan.

Verhoging van het waterpeil in het IJsselmeer en ontkoppeling van de peilen tussen IJsselmeer en Markermeer-IJmeer betekent dat er een peilverschil ontstaat tussen het IJsselmeer en het Markermeer. Het Markermeer kan het overtollige water dan niet meer onder vrij verval lozen op het IJsselmeer. Een mogelijkheid voor de afvoer kan zijn het installeren van pompcapaciteit op de Houtribdijk. Verwacht wordt dat een capaciteit van ongeveer 50m^3/s benodigd zal zijn. Een alternatief is om het overtollige water af te voeren via het Noordzeekanaal (NZK) en IJmuiden naar de Noordzee.

In het kader van Ruimte voor de Rivier wordt er gewerkt aan een oplossing voor het omleiden van de IJsselafvoer rond Kampen; de zogenaamde bypass. Verwacht wordt dat deze maatregel in de toekomst zal worden uitgevoerd. Tevens wordt er ruimte gereserveerd voor verdergaande toekomstige maatregelen. In de volgende paragraaf zal daar nader op worden in gegaan.

8.1.3 Tot 2100

In de periode van 2050 tot 2100 wordt verwacht dat de versnelde zeespiegelstijging doorgaat. Rekening wordt gehouden met een maximale zeespiegelstijging van 1,3 meter in 2100 (Deltacommissie, 2008). Als het meerpeil in het IJsselmeer meestijgt met de zeespiegel, dan zullen de dijken rondom het IJsselmeer weer aangepast moeten worden om deze stijging van het waterpeil te weerstaan.

Berekeningen voor de waterhuishouding van het IJsselmeer, geven aan dat bij een verdubbeling van de spuicapaciteit op de Afsluitdijk en een stijging van de zeespiegel met 1,3 m tot gevolg heeft dat het waterpeil in het IJsselmeer stijgt met 1,1 m ten opzichte van het huidige streefpeil in de winterperiode van 0,4 m onder NAP. Bij dit waterpeil is het mogelijk om overtollig water onder vrij verval te blijven lozen. Het nieuwe streefpeil komt dan uit op ongeveer NAP + 0,7 m [2100_flex].

De hoogte en sterkte van de waterkering rondom het IJsselmeer moet vervolgens worden afgestemd op dit waterpeil inclusief scheefstand en golfoploop onder invloed van windopzet. De aanbeveling van de Deltacommissie is om het peil in het IJsselmeer met 1,50 m te verhogen [2100_DC]. Beide varianten hebben gevolgen voor de hoogte (en de sterkte) van de waterkering om de veiligheid te borgen. De benodigde dijkverhoging varieert. Op sommige dijkvakken moet de dijk met ruim twee meter worden verhoogd (Tabel 8.2). Kortom, op sommige plaatsen werkt een peilverhoging van het meerpeil meer dan evenredig door in de vereiste verhoging van de waterkering om de waterveiligheid te blijven waarborgen.

			Benodigde dijkverhoging als percentage (%) van de dijklengte					
Peilopzet 1,1 m (flexibel peil)	**Dijk-Ring**	**Dijklengte (km)**	**0 m**	**0 tot 0,5 m**	**0,5 tot 1 m**	**1 tot 1,5 m**	**1,5 tot 2 m**	**2 tot 2,5 m**
Friesland	DR06	~ 62	48	16	23	14	0	0
Noordoostpolder	DR07	~ 58	28	11	11	9	41	0
Flevoland	DR08	~ 35	3	15	31	22	26	4
Westfriesland	DR13	~ 21	76	13	10	0	1	0
Wieringermeerpolder	DR12	~ 17	0	31	32	16	12	0
IJssel - linkeroever	DR11	~ 28	4	8	72	16	0	0
IJssel - rechteroever	DR10	~ 19	0	0	90	10	0	0
Vecht – linkeroever	DR10	~ 17	21	64	15	1	0	0
Vecht – rechteroever	DR09	~ 20	31	20	36	13	0	0

Tabel 8.2 Benodigde dijkverhoging bij peilopzet van 1,1 m. De uitkomsten vormen een eerste indicatie (zie voetnoot 10)

Bij een stijging van het peil in het IJsselmeer met 0,5 m zal het gebied van de kop van de IJssel een probleem krijgen met de veiligheid van de waterkeringen. In het huidige beleid is al voorzien in een zogenaamde bypass bij de stad Kampen. Rond 2075 zal de bypass moeten worden verbreed zodat al het water van de IJssel via deze bypass kan worden afgevoerd. Om dat te realiseren dient de oude IJsselloop aan twee kanten met keersluizen te worden afgesloten.

De kop van de IJssel moet vanaf 2075 ook beschermd worden tegen stormopzet vanaf het IJsselmeer in combinatie met een verhoogde IJsselafvoer. Hiervoor moet een stormvloedkering bij de Ketelbrug aangelegd worden. In het Ketelmeer moet voldoende berging aanwezig zijn om een afvoer van 2.000 m^3/s gedurende de duur van een storm tijdelijk te kunnen bufferen.

8.2 Variant I, Maximale zoetwatervoorziening

Bij Variant I wordt een afweging gemaakt tussen traditionele dijkversterking en innovatieve dijkversterking. De afweging zal worden gemaakt op basis van de kosten. De goedkoopste zal worden gekozen. Verder zijn er geen wijzigingen ten opzichte van het nulalternatief.

8.3 Variant II, Zee-invloed maximaal buiten houden

Bij Variant II wordt de invloed van de zee maximaal buiten gehouden in het IJsselmeer door het plaatsen van gemalen op de Afsluitdijk.

8.3.1 Tot 2050

In het W^+ scenario bereikt de stijging van de zeespiegel in het jaar 2050 het niveau van maximaal + 0,35 m. Door de geplande uitbreiding van de spuicapaciteit zal tot 2035 bij een stijging van het waterpeil in het IJsselmeer nog onder vrij verval gespuid kunnen worden. Echter, na 2035 dient een besluit te worden genomen over het peilbeheer: meestijgen of pompen. De omvang van de pompcapaciteit is vooral afhankelijk van de berging in het IJsselmeer en de maximale afvoer van de IJssel. De omvang van de hoeveelheid water die dan moet worden uitgeslagen vanuit Noord Nederland zal beperkt zijn. Verwacht wordt dat een pompcapaciteit vereist is tussen de 250 en 500 m^3/s.

De dijken rondom het IJsselmeer zullen dan getoetst moeten worden op hun vermogen om een peilstijging van + 0,2 m te kunnen weerstaan. De dijken die niet voldoen, zullen versterkt moeten worden. De aanpassing van de Afsluitdijk zal in de periode tot 2020 anders aangepakt moeten worden omdat er nu geen rekening gehouden hoeft te worden met een stijging van het waterpeil aan de meerzijde van de dijk met + 1,3 meter, maar met een stijging van slechts + 0,2 meter. De kop van de IJssel kan door het uitvoeren van de maatregelen die al voorzien zijn in het kader van het project Ruimte voor de Rivier, voldoende beschermd worden.

Door het huidige minimumpeil te handhaven, in overeenstemming met bijvoorbeeld het huidige streefpeil in de winterperiode, kan een extra berging gecreëerd van 0,20 m voor de zoetwatervoorziening tijdens droge zomers of om verwachte piekafvoeren tijdelijk te bergen.

Als het waterpeil in het Markermeer-IJmeer hoger staat dan het peil in het IJsselmeer, dat zou kunnen aan het eind van de zomer, dan kan overtollig water uit het Markermeer onder vrij verval worden gespuid in het IJsselmeer.

8.3.2 Tot 2100

Door de aanwezigheid van gemalen op de Afsluitdijk zal het peilbeheer van het IJsselmeer voor hoge afvoeren niet aangepast hoeven te worden. In 2100 zal bij een peilstijging in de Waddenzee met 1,3 m, een pompcapaciteit op de Afsluitdijk nodig zijn van 1.500 tot 2.000 m^3/s. Bij hoge peilen op het IJsselmeer kan het regelwerk bij Pannerden zoveel mogelijk water via de Waal sturen om daarmee de kosten van pompen in de Afsluitdijk te beperken.

8.4 Variant III, Maximale spuimogelijkheden

8.4.1 Tot 2050

De oplossingsrichting van de strategie bij Variant III is meestijgen en dus gelijk aan het nulalternatief. De belangrijkste wijziging ten opzichte van het nulalternatief is de keuze voor alternatieve maatregelen om te komen tot dijkversterking. De oplossing wordt gezocht in maatregelen die de golfoploop verkleinen en het effect van golfoverslag verminderen. Een maatregel om dat te bereiken is de aanleg van vooroevers en \ of luwtedammen.

8.4.2 Tot 2100

In de periode tot 2100 wordt bij de tweede ronde van aanpassingen van de waterkeringen om de keringen voldoende weerstand te laten bieden tegen het gestegen waterpeil, gekozen voor het doorbraakbestendig maken van de dijken.

Door te kiezen voor de maatregel bij Pannerden is het mogelijk de IJsselafvoer te knijpen. Bij de kop van de IJssel zijn nu minder omvangrijke maatregelen, ten opzicht van het nulalternatief, noodzakelijk. De IJssel wordt nog steeds omgeleid via de bypass ten zuiden van de stad Kampen. Ook wordt de stormvloedkering bij de Ketelbrug aangelegd. De berging in het gebied gelegen tussen de kering bij de Ketelbrug en de IJssel zal echter iets minder groot hoeven te zijn doordat de afvoer van de IJssel tijdens stormopzet afgetopt wordt op 1.000 m^3/s, in plaats van 2.000 m^3/s). De omvang van de bypass blijft gedimensioneerd op de piekafvoeren volgens Ruimte voor de Rivier $^+$.

8.5 Variant IV, Rijnmonding en IJsselmeer pompen, Zeeuwse Delta open riviermonding

8.5.1 Tot 2050

In de periode tot 2050 zal de zeespiegelstijging de kritieke drempel van + 0,35 m kunnen bereiken. Door de geplande verdubbeling van de spuicapaciteit (ESA) zal bij een stijging van het waterpeil in het IJsselmeer met maximaal + 0,2 m nog onder vrij verval gespuid kunnen worden. Echter, bij een verdere stijging van zeespiegel zal overgegaan moeten worden op

het installeren van pompcapaciteit op de Afsluitdijk om het waterpeil op het IJsselmeer te beheersen. De omvang van de pompcapaciteit is vooral afhankelijk van de berging in het IJsselmeer en de maximale afvoer van de IJssel (naast de afvoer vanuit Noord Nederland). Inleidende berekeningen laten zien dat met een pompcapaciteit in de Afsluitdijk van 250 á 500 m^3/s het waterpeil in het IJsselmeer beheerst kan worden.

De dijken rondom het IJsselmeer zullen getoetst moeten worden op hun vermogen om een peilstijging van + 0,2m te kunnen weerstaan. De dijken die niet voldoen, zullen versterkt moeten worden. De aanpassing van de Afsluitdijk in de periode tot 2020 zal anders moeten zijn omdat nu geen rekening gehouden hoeft te worden met een stijging van het waterpeil aan de meerzijde van de dijk met + 1,3 meter, maar met slechts + 0,2 meter.

De IJsselkop zal naar verwachting door het uitvoeren van de maatregelen van Ruimte voor de Rivier voldoende beschermd blijven.

Handhaven van het huidige minimumpeil zorgt voor een extra berging tijdens droge zomers of voor een extra buffer om verwachte piekafvoeren te bergen. Deze ruimte in het watersysteem van het IJsselmeer bedraagt dan 20 cm.

Op dit moment wordt overtollig water afkomstig uit het Markermeer gespuid op het IJsselmeer. Toekomstig peilbeheer in Markermeer en IJsselmeer zal dan bepalen of deze weg nog begaanbaar is in geval het waterpeil in het IJsselmeer stijgt met 0,2 m.

8.5.2 Tot 2100

Bij een verdere stijging van het waterpeil in de Waddenzee zal de pompcapaciteit op de Afsluitdijk uitgebreid moeten worden om het waterpeil in het IJsselmeer te beheersen. De omvang van de pompcapaciteit is vooral afhankelijk van de berging in het IJsselmeer en de maximale afvoer van de IJssel (naast de afvoer vanuit Noord Nederland). Inleidende berekeningen laten zien dat met een pompcapaciteit in de Afsluitdijk van 1.500 á 2.000 m^3/s het waterpeil in het IJsselmeer beheerst kan worden.

Literatuurlijst

Aerts J., Sprong T., Bannick B. (2008)
Aandacht voor veiligheid
Rapportnummer 009/2008, pp 200

Alkyon (2007)
Meren-dijken in-zicht: Berekeningen overstromingskansen en dijkhoogtetekorten in het merengebied en IJssel-Vecht delta,
Rapport, A1817 en A1818, status concept, september 2007, pp. 21.

Arcadis (2008)
Trajectindeling dijken – categorie A,
Rapport, CO3011.200011,

Deltacommissie (2008)
Samen werken met water: een land dat leeft bouwt aan zijn toekomst,
Rapport, Den Haag, september 2008, pp. 134

De Haan T. et al. (2009)
Gevoeligheid kosten hoger IJsselmeerpeil
Notitie 27 februari 2009, pp. 5.

Ecorys (2007)
Quick scan van kosten van waterbeheersvarianten voor het IJsselmeergebied
Rapport, Rotterdam 15 januari 2008, pp. 24

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007)
Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van de waterkeringen,
Rapport, Den Haag, september 2007.

Ministerie Verkeer & Waterstaat (2008)
Hydraulische randvoorwaarden voor categorie c-keringen: Achtergrondrapport
Vollenhove-Noordoostpolder (dijkring 7) en Vollenhove-Friesland/Groningen (dijkring 6)
HKV Lijn in Water, Rapport PR 132, november 2008, pp. 17

Ministerie Verkeer en Waterstaat et al. (NWP, 2009)
Nationaal Waterplan: 2009-2015
Rapport, Den Haag, 22 december 2009, pp. 240

Ministerie Verkeer en Waterstaat et al. (2009)
Beleidsnota IJsselmeergebied: 2009-2015,
Rapport, Den Haag, 22 december 2009, pp. 44.

Noord-Holland (2006)
Provinciaal verslag veiligheid Afsluitdijk,
Notitie, januari 2006, pp. 10.

RWS-IJsselmeergebied (2006)
Beheerplan Waterkering Houtribdijk: planperiode 2006-2010,
Rapport, Lelystad, september 2006, pp 68.

Rijkswaterstaat (2001)
Waterhuishouding in het Natte Hart: WIN-strategie als leidraad voor toekomstig waterkwantiteitsbeheer van het Natte Hart
Rapport, april 2001, Lelystad, 129 bladzijden

Rijkswaterstaat (2002)
Procesplan voor planstudie [ES]2-Afsluitdijk
Extra Spuicapaciteit en versterking van de Ecologische Samenhang langs de Afsluitdijk
Rapport, augustus 2002, pp 48.

Rijkswaterstaat (2006)
Beheerplan Waterkering Afsluitdijk; planperiode 2006-2010',
Rapport, 11 september 2006, pp 93.

Rijkswaterstaat (2008)
Technisch Informatiedocument: bijlage bij informatiedocument Marktverkenning Afsluitdijk,
Versienummer 0,6, 4 juni 2008, pp. 16.

Rijkswaterstaat (2009)
Toekomstvastheid van de hoogwatergeul in de IJsseldelta: Quick scan naar de consequenties van het advies van de Deltacommissie voor de hoogwatergeul bij Kampen, rapportnummer 2009.005, 8 april 2009, pp. 66

Rijkswaterstaat (2009)
De gevolgen van de IJsselmeerpeilstijging en een verhoogde rivierafvoer voor de IJsseldelta: inzicht in de waterstanden en het effect van maatregelen,
Rapport, 3 mei 2009, pp. 30.

Rijkswaterstaat, provincie Friesland, provincie Noord-Holland (2009)
Dijk en Meer: Toekomst Afsluitdijk,
Eindrapportage Verkenning, Den Haag, maart 2009, pp. 103.

Verhoeven, G.F. et. al, (2009)
Quick scan benodigde pompcapaciteit IJsselmeer bij klimaatscenario's,
Rapport, februari 2009, pp 15.

http://www.netwerkstormvloedkeringen.nl, Ministerie van Verkeer en Waterstaat

A Quick scan benodigde pompcapaciteit IJselmeer bij klimaatscenario's

A.1 Inleiding

In het in september 2008 uitgebrachte rapport van de Deltacommissie "Samen werken met water" wordt de aanbeveling gedaan het peil van het IJsselmeer te verhogen met maximaal 1.5 m, om zo lang mogelijk zonder pompen te kunnen spuien naar de Waddenzee en om het IJsselmeer als zoetwaterreservoir te beschouwen waarin de opslagcapaciteit dient te worden vergroot. Deze peilopzet van 1.5 m wordt nodig geacht omdat door de verwachte zeespiegelstijging het onder vrij verval spuien naar de Waddenzee steeds moeilijker zal worden. En om te voorzien in de toekomstige zoetwaterbehoefte.

In december is de ontwerp Beleidsnota IJsselmeergebied gepubliceerd. Het kabinet onderschrijft de samenhangende visie van de Deltacommissie en neemt dit advies als uitgangspunt voor verdere uitwerking. De beleidsopgave is om tijdig maatregelen te nemen om de groeiende piekafvoeren van de rivier te kunnen blijven afvoeren naar stijgende zee. De maatregelen moeten houdbaar zijn tot 2100. Verder is het de beleidsopgave om bij toenemende droogte en toenemende vraag op een adequate manier te blijven voorzien in de vraag naar zoet water.

In deze studie is gekeken naar een alternatieve oplossing waarbij niet een peilopzet van het IJsselmeer als oplossing dient, maar door middel van pompen het overtollige water naar de Waddenzee wordt afgevoerd. In deze studie is een eerste aanzet gedaan om vast te stellen welke pompcapaciteiten nodig zijn om het huidige streefpeil van het IJsselmeer te kunnen handhaven in de toekomst. Hierbij is uitgegaan van het meest extreme scenario van de KNMI'06 klimaatscenario's, het W+ scenario, voor de zichtjaren 2050 en 2100. Daarnaast is voor het zichtjaar 2100 nog een variant gehanteerd waarbij de zeespiegelstijging niet 0.85 m is (KNMI W+ scenario) maar 1.30 m (cf maximale relatieve zeespiegelstijging volgens de Deltacommissie).

A.2 Methode

- Met het SOBEK- BEKKEN model wordt het IJsselmeerpeil voor de periode 1951 tot 1998 gesimuleerd op basis van gemeten randvoorwaarden (zeespiegel, rivierafvoeren, neerslag verdamping etc.). Deze simulatie fungeert als de referentiesituatie. Voor deze referentiesituatie wordt het maximum en gemiddelde IJsselmeerpeil per dag bepaald.
- De randvoorwaarden worden opgeschaald aan de hand van correctiefactoren die representatief zijn voor de verschillende klimaatscenario's. Zo wordt opnieuw het IJsselmeerpeil gesimuleerd voor de periode 1951 tot 1998. Het maximum en gemiddelde IJsselmeerpeil per dag van deze simulaties wordt vergeleken met die van de referentiesituatie.
- Voor elk doorgerekend klimaatscenario's worden verschillende pompcapaciteiten toegepast bij de in het model aangebrachte gemalen ter hoogte van Den Oever en Kornwerderzand. Er wordt hierbij getracht de maximaal optredende IJsselmeerpeilen terug te brengen naar de maximale IJsselmeerpeilen behorende bij de referentiesituatie.

A.3 Klimaatscenario's

Voor de verschillende klimaatscenario's is de tijdreeks van afvoer, zeewaterstand, neerslag en verdamping aangepast op basis van het W+ klimaatscenario (KNMI) voor de twee zichtjaren 2050 en 2100.

De klimaatscenario's hebben betrekking op de verwachte meteorologische veranderingen en de daarbij horende toename van de zeespiegelstijging en rivierafvoeren. Voor de analyse van het IJsselmeerpeil zijn de veranderingen van de volgende vier klimaatsafhankelijke factoren meegenomen:

1. Neerslag.
2. Verdamping.
3. Rijnafvoer.
4. Zeespiegelstijging.

Voor de neerslag, de verdamping en de Rijnafvoer is voor elke maand in het jaar een procentuele verandering toegepast, behorende bij een bepaald klimaatscenario. De veranderingen staan weergegeven in de tabellen A.1 t/m A.3 en deze zijn toegepast op de simulatie-periode van 1951-1998. Voor de zeespiegelstijging is gebruik gemaakt van de absolute stijging per klimaatsscenario. Deze zijn weergegeven in Tabel A.4. Voor alle klimaatscenario's zijn modelsimulaties uitgevoerd met de aangepaste meetreeksen.

	2050	**2100**
Maand	**W+**	**W+**
Januari	14.7	29.4
Februari	15.3	30.6
Maart	14.3	28.6
April	7.8	15.7
Mei	-3.8	-7.7
Juni	-14.6	-29.1
Juli	-21.2	-42.4
Augustus	-21.4	-42.9
September	-16.3	-32.6
Oktober	-5.7	-11.4
November	4.0	8.0
December	12.5	25.1

Tabel A.1 Toename [%] neerslag

	2050	**2100**
Maand	**W+**	**W+**
Januari	0.0	0.0
Februari	0.3	0.7
Maart	3.0	6.0
April	6.0	12.0
Mei	9.3	18.5
Juni	13.8	27.6
Juli	15.3	30.6
Augustus	15.8	31.7
September	13.2	26.4
Oktober	10.0	20.0
November	6.6	13.1
December	0.4	0.8

Tabel A.2 Toename [%] verdamping

	2050	2100
Maand	**W+**	**W+**
Januari	14.3	26.3
Februari	18.1	35.1
Maart	16.1	33.4
April	11.9	25.1
Mei	1.7	5.1
Juni	-11.8	-21.5
Juli	-24.4	-43.2
Augustus	-34.3	-57.0
September	-37.3	-61.9
Oktober	-32.9	-56.4
November	-17.9	-32.9
December	2.5	4.1

Tabel A.3 Toename [%] Rijnafvoer

2050	2100	
W+	**W+**	**Deltacommissie**
35	85	130

Tabel A.4 Zeespiegelstijging [cm]

A.4 SOBEK-BEKKEN Modelbeschrijving

A.4.1 Bestaande model

De berekeningen worden uitgevoerd met het WINBOS waterbalansmodel. Het WINBOS (Waterhuishouding in het Natte Hart – Beslissings Ondersteunend Systeem) is een beslissingsondersteunend systeem voor het IJsselmeer, Markermeer, de randmeren, Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal. WINBOS is eind jaren negentig in opdracht van RWS ontwikkeld met als doel verschillende waterbeheerstrategieën onder verschillende klimaatscenario's te kunnen beoordelen. Het WINBOS bestaat uit een serie rekenmodellen. De centrale modellen zijn modellen voor de waterbeweging veiligheid en een ecologisch model. WINBOS bevat verder modules om (financiële en overige) effecten in beeld te brengen voor de recreatievaart, beroepsscheepvaart, beroepsvisserij, drinkwater, (binnendijkse) landbouw, en buitendijks grondgebruik (landbouw, wonen, verblijfsrecreatie, werken).

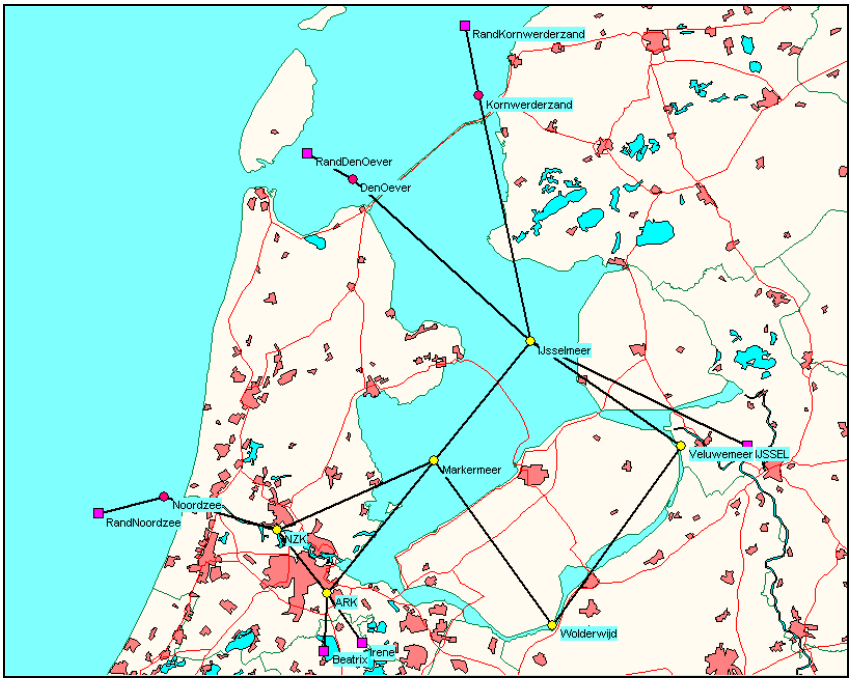
In de huidige studie gebruiken we het waterbewegingsmodel uit WINBOS in de bestaande configuratie. Dit is het zogenaamde SOBEK-BEKKEN model. Dit model bevat een relatief eenvoudige SOBEK-schematisatie van het merengebied waarin elk meer is weergegeven door één knoop (zie Figuur A.1) . Verder zijn alle kunstwerken tussen de meren in de schematisatie opgenomen. De randen van het model bestaan uit:

- De IJssel nabij het Ketelmeer.
- De inlaat bij de Beatrixsluizen op het Amsterdam-Rijnkanaal.
- De inlaat van de Irenesluizen op het Amsterdam-Rijnkanaal.
- Buitenwaterstanden bij Kornwerderzand, Den Oever (Waddenzee).
- De buitenwaterstand op de Noordzee bij IJmuiden.

De afvoer van de Vecht wordt samen met enkele andere regionale wateren als één cumulatieve laterale toevoer gemodelleerd. In de SOBEK-BEKKEN schematisatie is het volume van de meren volledig geconcentreerd in de knopen. De meren zijn gemodelleerd als rechte bakken met een constant oppervlak. Het debiet over de takken wordt bepaald met behulp van een speciale formulering bij kunstwerken. De windopzet aan weerszijden van een kunstwerk wordt bepaald met behulp van een reprofunctie van de vorm $dh = c.\ u^a_{wind} / h_0^b$, waarin:

- a,b,c = reprocoëfficiënten (per windrichting, per kunstwerk op te geven).
- h_0 = lokale waterdiepte.
- u = windsnelheid (m/s).

In SOBEK-BEKKEN wordt vervolgens met behulp van het opgegeven windveld (windrichting en windsnelheid) bepaald wat de waterstanden aan weerszijden van het kunstwerk zijn, en wat het debiet over het kunstwerk is.



Figuur A.1 WINBOS schematisatie

De rekentijdstap van het WINBOS model is een half uur. De uitvoer wordt ook per half uur gegenereerd. Na de modelrun worden in de nabewerking de daggemiddelde IJsselmeerpeilen bepaald. Deze worden vervolgend gebruikt voor de verdere analyse.

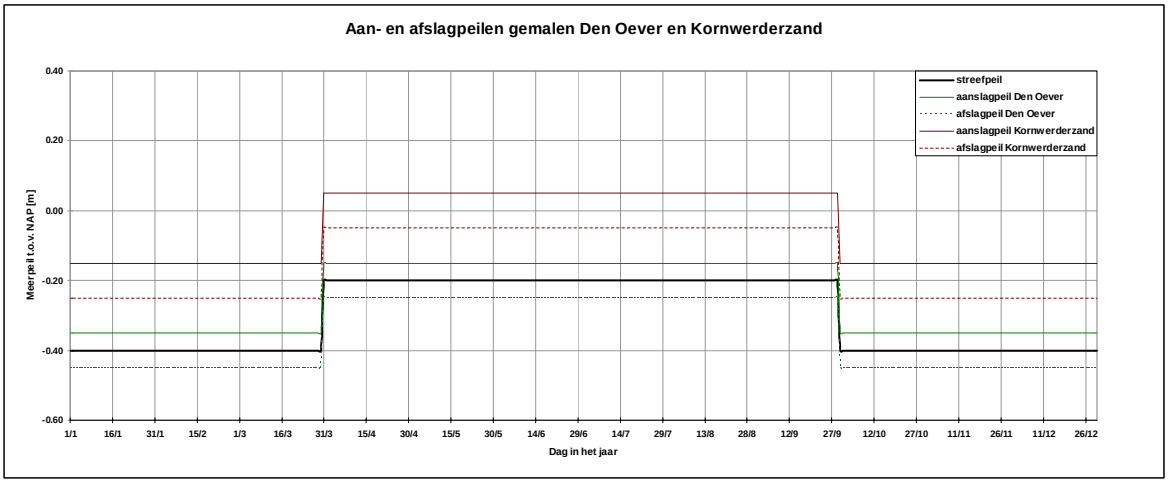
In [WL, 1997] is aangetoond dat de met WINBOS berekende waterstanden een voldoende goede fit vertonen met de gemeten waterstanden.

A.4.2 Modelaanpassingen

Voor de uitgevoerde modelsimulaties zijn een aantal aanpassingen verricht aan het SOBEK-BEKKEN model.

Voor de referentiesituatie is de verruimde spuicapaciteit bij de Lorentzsluis toegepast. Dit houdt in dat de afmetingen van de Lorentzsluis in het model zijn gewijzigd. De breedte is vergroot van 120 m naar 270 m.

Voor de berekeningen met pompcapaciteiten zijn de gemalen bij Den Oever en Kornwerderzand geactiveerd in het model (deze waren al in de bestaande modelschematisatie opgenomen maar met pompcapaciteit nul). De aan- en afslagpeilen van de gemalen zijn gerelateerd aan het streefpeil van het IJsselmeer. Aangezien er voor de gemalen slechts één gemaalcapaciteit kan worden ingevoerd is er voor gekozen om verschillende aan- en afslagpeilen te hanteren voor beide gemalen. Zodoende kan er onderscheid worden gemaakt in een basis gemaalcapaciteit die bij normale peilverhogingen wordt ingezet en een maximale gemaalcapaciteit die bij meer extreme peilverhogingen wordt ingezet. In het model wordt het gemaal bij Den Oever ingezet voor de basiscapaciteit. Dit gemaal slaat aan als het IJsselmeerpeil 5 cm boven het streefpeil uit komt en slaat het gemaal af als het IJsselmeerpeil weer 5 cm onder het streefpeil uit komt. Het gemaal Kornwerderzand wordt ingezet als de peilverhogingen extremer zijn en slaat pas aan als het IJsselmeerpeil 25 cm boven het streefpeil uit komt en slaat weer af als het IJsselmeerpeil is gezakt tot 15 cm boven het streefpeil. Zie Figuur 2 voor de gehanteerde aan- en afslagpeilen voor de gemalen Den Oever en Kornwerderzand.



Figuur A.2 De gehanteerde aan- en afslagpeilen voor de gemalen Den Oever en Kornwerderzand

A.4.3 Doorgerekende cases

In totaal zijn er 14 verschillende cases doorgerekend. Alleen in de eerste case is een berekening uitgevoerd met de huidige (beperkte) spuicapaciteit van de Lorentzsluis, bij alle overige cases is gerekend met de verruimde spuicapaciteit. Er zijn in totaal 4 verschillende klimaatscenario's toegepast:

- T0: huidige klimaat (geen aanpassingen aan de invoergegevens).
- TW+2050: klimaatscenario W+ voor het zichtjaar 2050.
- TW+2100: klimaatscenario W+ voor het zichtjaar 2100.
- TW+2100 + 1.3 ZSP: klimaatscenario W+ voor het zichtjaar 2100 met de aangepaste zeespiegelstijging van +1.3 m volgens de Deltacommissie.

Als laatste onderscheid tussen de cases zijn er de verschillende gemaalcapaciteiten die zijn toegepast voor de gemalen Den Oever en Kornwerderzand. Tabel A.5 geeft het overzicht weer van de 14 cases. Case nummer 2 fungeert als de referentiesituatie.

Nr	Spuicapaciteit Lorenzsluis		Klimaatscenario	Gemaalcapaciteit [m^3/sec]	
	huidig	verruimd		Den Oever	Kornwerderzand
1	x		T0	0	0
2		**x**	**T0**	**0**	**0**
3		x	TW+2050	0	0
4		x	TW+2050	250	0
5		x	TW+2050	500	0
6		x	TW+2050	250	250
7		x	TW+2100	0	0
8		x	TW+2100	1.000	0
9		x	TW+2100	2.000	0
10		x	TW+2100	750	750
11		x	TW+2100 + 1.3m ZSS	0	0
12		x	TW+2100 + 1.3m ZSS	1.000	0
13		x	TW+2100 + 1.3m ZSS	1.000	1.000
14		x	TW+2100 + 1.3m ZSS	500	1.000

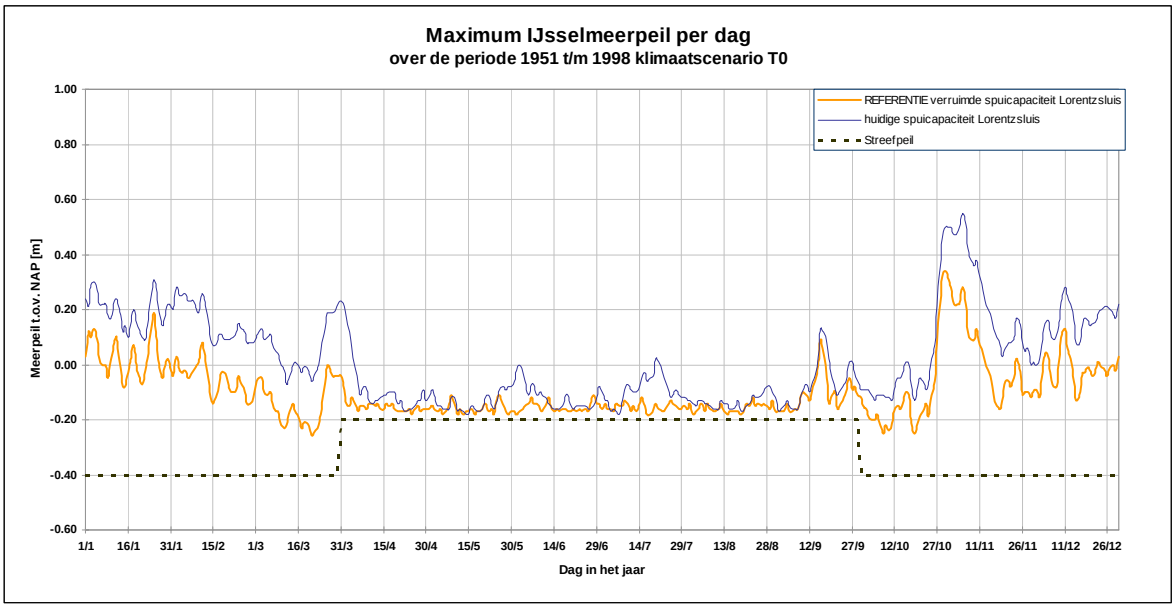
Tabel A.5 Overzicht van de doorgerekende cases. Nummer 2 is de referentie.

A.5 Resultaten

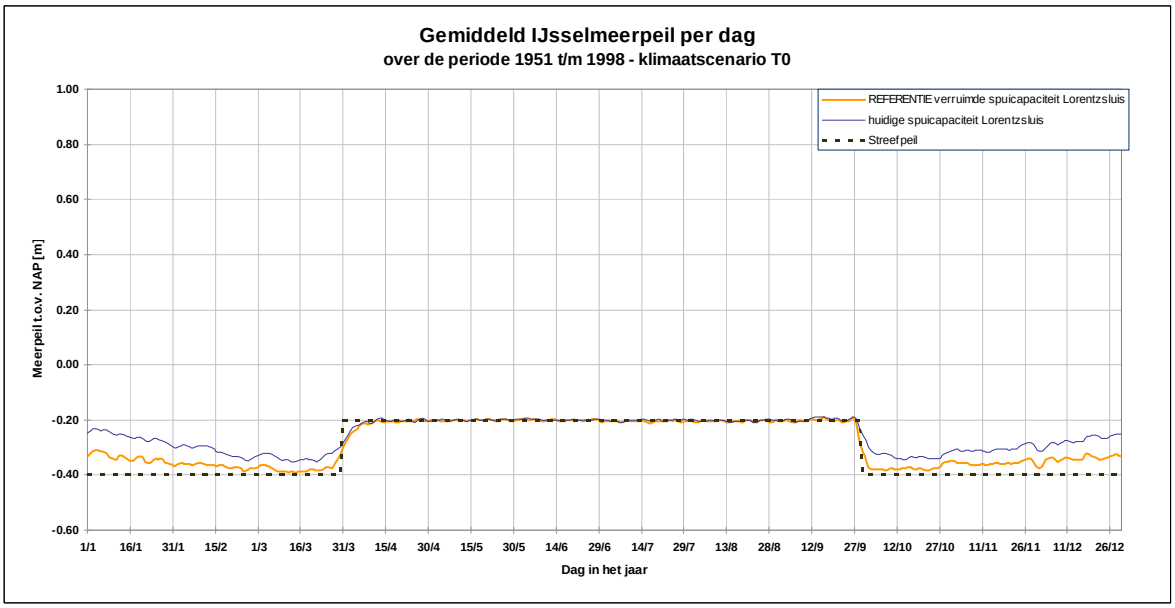
De resultaten worden weergegeven in maximum en gemiddelde waarden per dag. Voor de door berekende periode van 48 jaar wordt dus voor elke dag in het jaar de maximum waarde en de gemiddelde waarde bepaald. De door het model weggeschreven waarden zijn de gemiddelde waarden per tijdstap.

A.5.1 T0

In Figuur A.3 en A.4 worden de resultaten weergegeven voor de cases 1 en 2. Duidelijk is te zien dat het verruimen van de spuicapaciteit bij de Lorentzsluis effect heeft op de maximum en gemiddelde IJsselmeerpeilen. Bij de verruimde spuicapaciteit zijn de maximum IJsselmeerpeilen in de winter ca 20 cm lager dan met de huidige spuicapaciteit. Ook de gemiddelde IJsselmeerpeilen in de winter liggen met de verruimde spuicapaciteit ca 10 cm lager dan met de huidige spuicapaciteit en liggen hierdoor dichter bij het winterstreefpeil.



Figuur A.3 Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 1 en 2



Figuur A.4 Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 1 en 2

A.5.2 TW+2050

In Figuur A.5 en A.6 worden de resultaten weergegeven voor de cases 2 t/m 6. Duidelijk is te zien dat zonder pompen de maximum IJsselmeerpeilen in de winter ca 40 cm hoger liggen dan bij de referentiesituatie. Er zijn grote pompcapaciteiten (250 – 500 m3/s) nodig om de maximale IJsselmeerpeilen terug te brengen in de buurt van de maximum peilen behorende bij de referentiesituatie.

Case 3

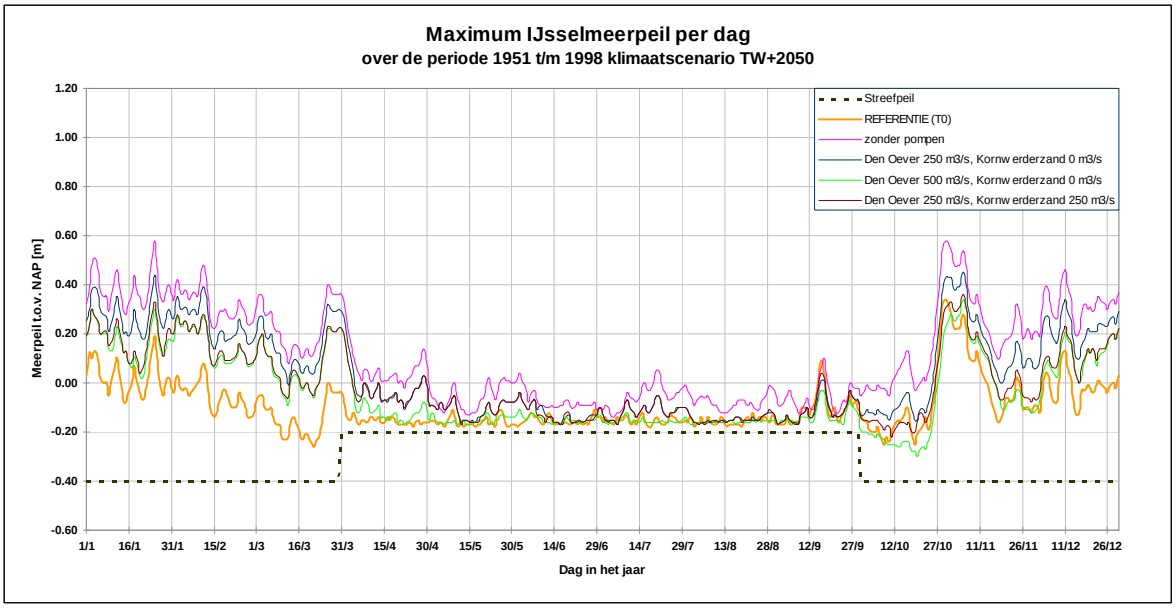
Het maximum peil bij de referentiesituatie is NAP + 0.34 m. Als er geen pompen worden gebruikt is het maximumpeil voor het TW+2050 scenario NAP + 0.58 m, dus 24 cm hoger dan bij de referentiesituatie. Daarnaast blijkt uit het gemiddelde peil dat zonder te pompen het winterstreefpeil niet meer gehandhaafd kan worden.

Case 4
Het aanbrengen van een gemaalcapaciteit van 250 m3/s bij Den Oever geeft een verlaging van de maximum peilen, maar deze is nog niet afdoende. Het maximum IJsselmeerpeil is met deze gemaalcapaciteit NAP + 0.45 m, 11 cm hoger dan de referentiesituatie.

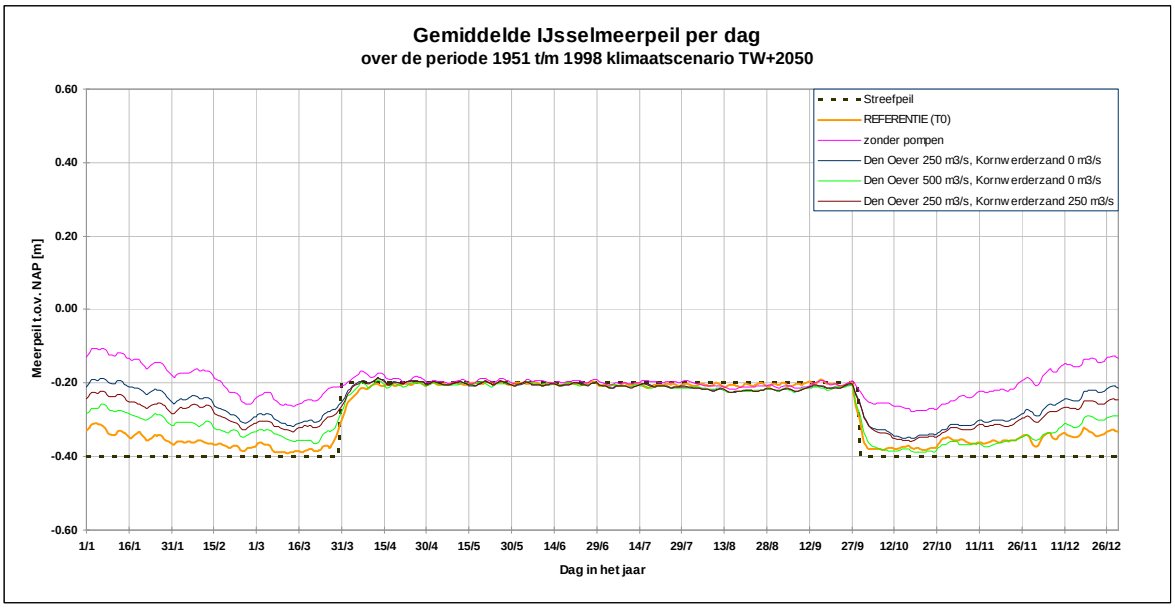
Case 5
Het aanbrengen van een gemaalcapaciteit van 500 m3/s bij Den Oever verlaagt de maximumpeilen ca 20 cm. Het maximum IJsselmeerpeil is met deze gemaalcapaciteit NAP + 0.34 m en dus gelijk aan de referentiesituatie. Wel liggen de maximumpeilen in de winter nog gemiddeld hoger dan bij de referentiesituatie.

Case 6
Als laatste is er gekeken naar het opsplitsen van de totale gemaalcapaciteit van 500 m3/s tussen de twee gemalen Den Oever en Kornwerderzand. Waarbij elk gemaal een capaciteit heeft van 250 m3/s. Hierbij wordt het gemaal Kornwerderzand alleen gebruikt voor de meer extreme verhogingen en slaat het gemaal pas aan als het peil 0.25 cm boven het streefpeil komt. Het maximumpeil is bij deze gemaalcapaciteit van 2 x 250 m3/s NAP + 0.36 m en is dus vrijwel gelijk aan het maximum van case 5. De overige maximumpeilen per dag liggen vrijwel gelijk of iets hoger dan bij case 5.

Tabel A.6 geeft een overzicht van de tijd dat de gemalen aan staan in de verschillende cases, uitgedrukt in percentage van de totale tijd.



Figuur A.5 Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 t/m 6



Figuur A.6 Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 t/m 6

Case	Gemaalcapaciteit [m3/s]		Gemaal aan [% van de tijd]	
	Den Oever	Kornwerderzand	Den Oever	Kornwerderzand
4	250	0	51.2	0
5	500	0	39.6	0
6	250	250	51.0	10.3

Tabel A.6 Overzicht inzet gemalen voor cases 4 t/m 6

A.5.3 TW+2100

In Figuur A.4 en A.5 worden de resultaten weergegeven voor de cases 7 t/m 10. Zonder te pompen liggen de maximum IJsselmeerpeilen ca 80 cm hoger dan bij de referentiesituatie. Er zijn grote pompcapaciteiten (1000 – 1500 m3/s) nodig om de maximale IJsselmeerpeilen terug te brengen in de buurt van de maximum peilen behorende bij de referentiesituatie. Daarnaast blijkt uit de resultaten van de gemiddelde IJsselmeerpeilen dat in de zomer er een watertekort ontstaat, waardoor het IJsselmeerpeil onder het streefpeil zakt. Dit wordt veroorzaakt door het verdampingsoverschot in combinatie met de laterale onttrekkingen uit het IJsselmeer.

Case 7

Het maximum peil bij de referentiesituatie is NAP + 0.34 m. Als er geen pompen worden gebruikt is het maximumpeil voor het TW + 2100 scenario NAP + 1.11 m, dus 77 cm hoger dan bij de referentiesituatie. Daarnaast blijkt uit het gemiddelde peil dat zonder te pompen het zomer- en winterstreefpeil niet meer gehandhaafd kan worden en tussen de NAP - 0.12 m en NAP 0.34 m ligt.

Case 8

Het aanbrengen van een gemaalcapaciteit van 1000 m3/s bij Den Oever geeft een verlaging van de maximum peilen, maar deze is nog niet afdoende. Het maximum IJsselmeerpeil is met deze gemaalcapaciteit NAP + 0.62 m, 28 cm hoger dan de referentiesituatie.

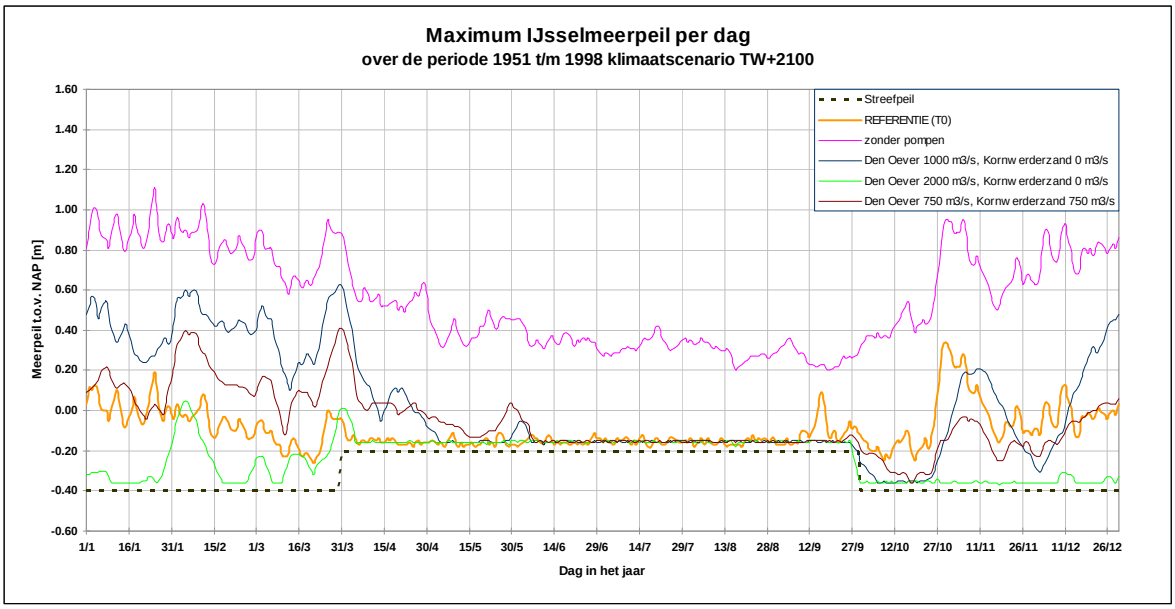
Case 9

Het aanbrengen van een gemaalcapaciteit van 2000 m3/s bij Den Oever zorgt ervoor dat de maximumpeilen lager komen te liggen dan in de referentiesituatie. Het maximum

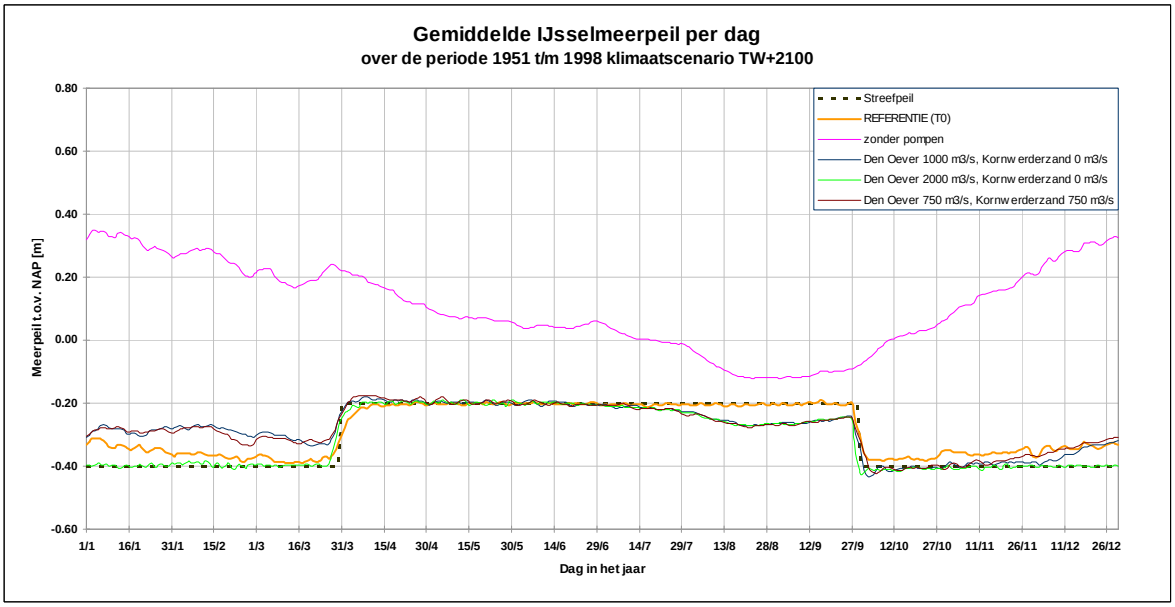
IJsselmeerpeil is met deze gemaalcapaciteit NAP + 0.03 m en dus 31 cm *lager* dan bij de referentiesituatie. Deze gemaalcapaciteit is duidelijk groter dan noodzakelijk is. De maximumpeilen wijken hierbij nauwelijks meer af van het streefpeil.

Case 10
Als laatste is er gekeken naar het opsplitsen van een totale gemaalcapaciteit van 1500 m3/s tussen de twee gemalen Den Oever en Kornwerderzand. Waarbij elk gemaal een capaciteit heeft van 750 m3/s. Hierbij wordt het gemaal Kornwerderzand alleen gebruikt voor de meer extreme verhogingen en slaat het gemaal pas aan als het peil 0.25 cm boven het streefpeil uit komt. Het maximumpeil bij deze gemaalcapaciteit van 2 x 750 m3/s is NAP + 0.41 m en ligt dus nog steeds iets hoger (7 cm) dan bij de referentiesituatie.

Tabel A.7 geeft een overzicht van de tijd dat de gemalen aan staan in de verschillende cases, uitgedrukt in percentage van de totale tijd.



Figuur A.7 Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 7 t/m 10



Figuur A.8 Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 7 t/m 10

Case	Gemaalcapaciteit [m3/s]		Gemaal aan [% van de tijd]	
	Den Oever	Kornwerderzand	Den Oever	Kornwerderzand
8	1000	0	38,89	0
9	2000	0	24,46	0
10	750	750	47,69	5,14

Tabel A.7 Overzicht inzet gemalen voor cases 8 t/m 10

A.5.4 TW+2100 met 1.3 m ZSS (i.p.v. 0.85 m)

In Figuur A.9 en A.10 worden de resultaten weergegeven voor de cases 11 t/m 14. Zonder te pompen liggen de maximum IJsselmeerpeilen ca 130 cm hoger dan bij de referentiesituatie. Er zijn extreem grote pompcapaciteiten (1500 – 2000 m3/s) nodig om de maximale IJsselmeerpeilen terug te brengen in de buurt van de maximum peilen behorende bij de referentiesituatie. Daarnaast blijkt uit de resultaten van de gemiddelde IJsselmeerpeilen dat, net als bij het TW+2100 scenario met de zeespiegelstijging van 0.85 m, in de zomer er een watertekort ontstaat, waardoor het IJsselmeerpeil onder het streefpeil zakt. Dit wordt veroorzaakt door het verdampingsoverschot in combinatie met de laterale onttrekkingen uit het IJsselmeer.

Case 11

Het maximum peil bij de referentiesituatie is NAP + 0.34 m. Als er geen pompen worden gebruikt is het maximumpeil voor het TW+2100 scenario NAP + 1.54 m, dus 120 cm hoger dan bij de referentiesituatie. Daarnaast blijkt uit het gemiddelde peil dat zonder te pompen het zomer- en winterstreefpeil absoluut niet meer gehandhaafd kan worden en tussen de NAP 0.30 m en NAP 0.76 m ligt.

Case 12

Het aanbrengen van een gemaalcapaciteit van 1000 m3/s bij Den Oever geeft een verlaging van de maximum peilen, maar deze is nog niet afdoende. Het maximum IJsselmeerpeil is met deze gemaalcapaciteit NAP + 1.02 m, 68 cm hoger dan de referentiesituatie.

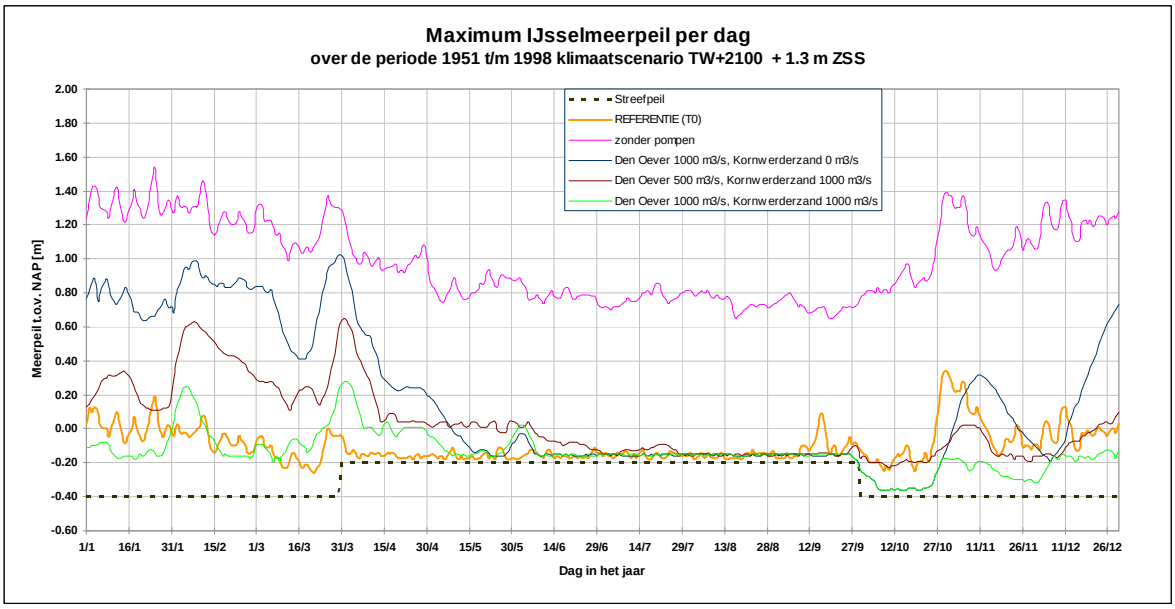
Case 13

Het aanbrengen van een totale gemaalcapaciteit van 2000 m3/s tussen de twee gemalen Den Oever en Kornwerderzand zorgt ervoor dat de maximumpeilen lager komen te liggen dan in de referentiesituatie. Elk gemaal heeft in deze case een capaciteit van 1000 m3/s. Hierbij wordt het gemaal Kornwerderzand alleen gebruikt voor de meer extreme verhogingen en slaat het gemaal pas aan als het peil 0.25 cm boven het streefpeil uit komt. Het maximumpeil is bij deze gemaalcapaciteit van 2 x 1000 m3/s NAP + 0.28 m en ligt dus iets *lager* (6 cm) dan bij de referentiesituatie.

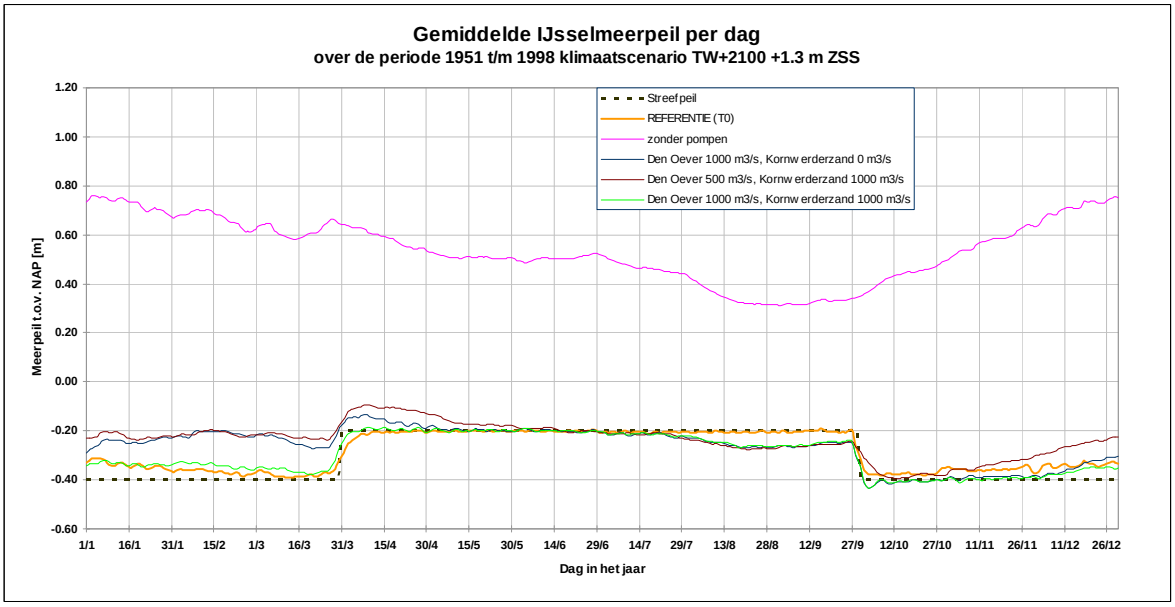
Case 14

Als laatste is er gekeken naar het opsplitsen van een totale gemaalcapaciteit van 1500 m3/s tussen de twee gemalen Den Oever en Kornwerderzand. Waarbij Den Oever een capaciteit heeft van 500 m3/s en Kornwerderzand een capaciteit heeft van 1000 m3/s. Hierbij wordt het gemaal Kornwerderzand op dezelfde wijze ingezet als bij case 13. Het maximumpeil bij deze gemaalcapaciteit van 500 + 1000 m3/s is NAP + 0.64 m en ligt dus nog 30 hoger dan bij de referentiesituatie.

Tabel A.8 geeft een overzicht van de tijd dat de gemalen aan staan in de verschillende cases, uitgedrukt in percentage van de totale tijd.



Figuur A.9 Vergelijking maximum IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 11 t/m 14



Figuur A.10 Vergelijking gemiddelde IJsselmeerpeil per dag voor cases 2 en 11 t/m 14

Case	Gemaalcapaciteit [m3/s]		Gemaal aan [% van de tijd]	
	Den Oever	Kornwerderzand	Den Oever	Kornwerderzand
12	1000	0	41,20	0
13	1000	1000	40,08	1,95
14	500	1000	63,27	10,1

Tabel A.8 Overzicht inzet gemalen voor cases 12 t/m 14

A.6 Conclusies

- De extra spuicapaciteit bij de Lorentzsluis, die op dit moment gerealiseerd wordt, zorgt voor een verlaging van de maximum IJsselmeerpeilen van ca. 20 cm.
- Zonder pompen kan bij het TW+2050 het gemiddelde winterpeil al niet meer gehandhaafd worden.
- Voor het klimaatscenario TW + 2050 is een maximale gemaalcapaciteit nodig van minimaal 500 m3/s om de maximum IJsselmeerpeilen niet hoger te laten komen dan in de huidige (referentie) situatie.
- Voor het klimaatscenario TW + 2100 is een maximale gemaalcapaciteit nodig van ca 1500 m3/s om de maximum IJsselmeerpeilen niet hoger te laten komen dan in de huidige situatie.
- Voor het klimaatscenario TW + 2100 met een zeespiegelstijging van 1.3 m (volgens de Delta commissie) is een maximale gemaalcapaciteit nodig van 1500-2000 m3/s om de maximum IJsselmeerpeilen niet hoger te laten komen dan in de huidige situatie.
- De zeespiegelstijging is in veel grotere mate bepalend voor het toenemen van de IJsselmeerpeilen dan de verhoogde rivierafvoeren. Dit blijkt duidelijk uit het verschil tussen het TW + 2100 en het TW + 2100 +1.3 m ZSS scenario, waarin alleen de zeespiegelstijging verschillend is. Het is ook duidelijk verklaarbaar omdat bij een toename van de zeespiegel er minder vaak onder vrij verval gespuid kan worden. Bij een zeespiegelstijging van 1.3 m en een IJsselmeerstreefpeil van N.A.P. -0.4 m kan er überhaupt nauwelijks meer onder vrij verval gespuid worden omdat zelfs bij laagtij de zeewaterstand boven de N.A.P. - 0.4 m blijft.
- Als de gemalen geactiveerd zijn staan deze gemalen ook erg vaak aan. Bij een aanslagpeil van +/- 5 cm t.o.v. streefpeil staat het gemaal ca 50% van de tijd bij de verschillende klimaatscenario's. Het gemaal dat wordt ingezet bij meer extreme verhogingen (25 cm boven streefpeil) staat ca 5-10 % van de tijd aan.
- Om de maximum IJsselmeerpeilen niet hoger te laten komen dan in de huidige situatie zijn veel grotere gemaalcapaciteiten nodig dan de huidige grootste gemaalcapaciteit in Nederland, die bij het gemaal in IJmuiden met 260 m3/s.
- Voor het TW+2100 en het TW+2100 +1.3 m ZSS scenario geven de resultaten aan dat er in de zomer een droogteprobleem ontstaat omdat het IJsselmeerpeil onder het streefpeil zakt. Echter hier kunnen geen harde conclusies aan worden verbonden omdat het Winbos model is ingesteld op een optimale afvoer en er dus geen rekening wordt gehouden met de mogelijkheid van het vasthouden van water in de zomer of andere droogtebestrijdingsmaatregelen.

A.7 Aanbevelingen

- Aanbevolen wordt om het huidige Winbos model over te zetten naar een SOBEK-CF model. Dit aangezien het huidige Winbos model grote beperkingen heeft met betrekking tot het maken van aanpassingen in de modelschematisatie. Voor meer geavanceerde sturingen van kunstwerken of meer variaties in de te hanteren gemaalcapaciteiten zijn functionaliteiten nodig die in het Winbos model niet mogelijk zijn maar die wel kunnen worden ingevoerd in de huidige SOBEK-CF versie.
- Aanbevolen wordt om voor droogtestudies gebruik te maken van een instrumentarium dat speciaal gericht is op de droogteproblematiek en niet het huidige Winbos model te gebruiken.

A.8 Literatuur

- Deltacommissie, 2008. Samen werken met water.
- Deltares, 2008. Analyse veiligheid en zoetwatervoorziening IJsselmeergebied, in opdracht van Rijkswaterstaat – RIZA.
- WL, 1997. Onafhankelijk onderzoek Markermeer, Rapport H3211, WL | Delft Hydraulics in opdracht van DWW, december 1997.
- Ontwerp Beleidsnota IJsselmeergebied (onderdeel ontwerp Nationaal WaterPlan), 2008, Ministerie van Verkeer en Waterstaat