



Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Technisch-fysische uitwerking Oplossingsrichting Beschermen Bijlagenrapport

Witteveen - Bos

HKV
LIJN IN WATER

Van Oord 
Marine Ingenuity

 **TU Delft**

 **Royal HaskoningDHV**
Enhancing Society Together

 **ARCADIS**

Deltares

SWECO 

 **TKI DELTA TECHNOLOGIE**

Bosch Glabbers

Kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor IV
Oplossingsrichting Beschermen
Bijlagenrapport



INHOUDSOPGAVE

1	METHODE EN UITWERKING HYDRAULISCHE BELASTINGEN	6
1.1	Inleiding	6
1.2	Eisen aan waterveiligheid	7
1.3	Hydraulische belastingen	9
	1.3.1 Waterstanden	11
	1.3.2 Golven	16
1.4	Kennisvragen	17
2	BOUWSTEEN: SCHUT- EN SPUISLUIZEN, VERDEELWERKEN, STORMVLOEDKERINGEN	18
2.1	Inleiding	18
2.2	Kenmerkende locaties binnen de strategieën	18
2.3	Ontwerpkeuzes bij 5 m zeespiegelstijging (2200)	23
2.4	Ontwerpkeuzes bij 2 m zeespiegelstijging (2200)	24
2.5	Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 5 m zeespiegelstijging (2200)	24
2.6	Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 2 m zeespiegelstijging (2100)	31
2.7	Uitvoering	31
2.8	Kosten	34
2.9	Ruimtebeslag	35
2.10	Kennisvragen	36
3	BOUWSTEEN: GEMALEN EN POMPEN	38
3.1	Inleiding	38
3.2	Kenmerkende locaties binnen de strategieën	39
3.3	Pomptypen	42
3.4	Ruimtebeslag	45
3.5	Ontwerpkeuzes bij 5 m zeespiegelstijging (2200)	47
3.6	Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 5 m zeespiegelstijging (2200)	48
3.7	Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 2 m zeespiegelstijging (2100)	53
3.8	Uitvoering	53
3.9	Energievraag en -voorziening	54
3.10	Kosten	55
3.11	Kennisvragen	58

4	BOUWSTEEN: (ZEE)DIJKEN EN DAMMEN	60
4.1	Inleiding	60
4.2	Kenmerkende locaties binnen de strategieën	60
4.3	Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 5,4 m zeespiegelstijging (2200)	63
4.4	Kosten en ruimtebeslag Waterkeringen	68
4.5	Maakbaarheid en bestuurlijke aanpassing	72
4.6	Kennisvragen	73
5	BOUWSTEEN: ZANDIGE KUST	74
5.1	Kenmerkende locaties	74
5.2	Ontwerpkeuzes	74
5.3	Bescherming kustlocaties bij 5 m zeespiegelstijging (2200)	76
5.4	Bescherming kustlocaties bij 2 m zeespiegelstijging (2100)	80
5.5	Uitvoering	81
5.6	Kosten	82
5.7	Kennisvragen	82
6	BOUWSTEEN: WATERVEILIGHEID BUITENDIJKSE GEBIEDEN	83
6.1	Inleiding	83
6.2	Kenmerkende locaties binnen de strategieën	84
6.3	Ontwerpkeuzes	85
6.4	Bescherming buitendijks gebied bij 5 m zeespiegelstijging (2200)	87
6.5	Bescherming buitendijks gebied bij 2 m zeespiegelstijging (2100)	89
6.6	Inrichting buitendijkse gebieden bij 5 m zeespiegelstijging	91
6.7	Uitvoering	95
6.8	Kosten	98
6.9	Kennisvragen	101
6.10	Buitendijks - aanvullende kaarten	102

7	ZOET WATER	108
7.1	Inleiding	108
7.2	Uitgangspunten	109
7.3	Zoetwaterbalans in 2100 en 2200	109
	7.3.1 Watervraag	109
	7.3.2 Wateraanbod	111
	7.3.3 Effecten van de strategieën op de waterbalans	111
7.4	Resultaten	113
7.5	Reflectie	114
7.6	Kennisvragen	115
8	RESERVOIRMODEL VOOR BESCHERMEN GESLOTEN EN ZEEWAARTS	116

1

METHODE EN UITWERKING HYDRAULISCHE BELASTINGEN

Auteurs: Bas Kolen, Ton Botterhuis, Ferdinand Diermanse, Robert Vos.

1.1 Inleiding

Overstromingen vormen van oudsher een bedreiging voor Nederland. Van oudsher is er aandacht voor bescherming tegen overstromingen, dit was en is een belangrijke voorwaarde om in Nederland te kunnen wonen en werken. De primaire waterkeringen beschermen tegen overstromingen uit de zee, de rivieren en de grote meren. Overstromingen kunnen worden veroorzaakt door extreme rivierafvoeren, door hoge zeestanden in combinatie met storm en door de combinatie van deze factoren. Op meren is een combinatie van een storm en een hoog meerpeil mogelijk gevaarlijk.

De bescherming tegen overstromingen is wettelijk geregeld. De bescherming tegen doorbraken van primaire keringen is verankerd in landelijke wetgeving, de bescherming voor doorbraken van regionale keringen en extreme neerslag in provinciale verordeningen. Momenteel wordt er ook gewerkt aan principes voor 'water en bodem sturend', waarbij er voor nieuwe ontwikkelingen wordt gekeken of er aanvullende eisen zijn die volgen uit lokale risicoprofielen.

Er bestaan geen harde eisen voor de zoetwaterbeschikbaarheid in Nederland in termen van kwantiteit; de waterschappen en Rijkswaterstaat streven continu naar een goede watervoorziening. Wel worden in droge jaren allerlei maatregelen genomen om de zoetwaterbeschikbaarheid te optimaliseren en zijn er programma's om water slim te sturen (als slim watermanagement). Denk bij maatregelen aan de alternatieve zoetwatervoorziening voor West-Nederland, en het gericht sturen op zoetwaterbuffers in de Hollandsche IJssel en de Lek. Ook is er al enige buffercapaciteit in het IJsselmeer en Markermeer, het Brielse Meer en de Zuidwestelijke Delta. Bij extreme zoetwatertekort wordt het watergebruik ook al beperkt. Op termijn (2050) is de ambitie van het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) om Nederland weerbaar te maken tegen watertekort. Rijkswaterstaat heeft dit vertaald in een ambitieniveau voor het hoofdwatersysteem: weerbaar tegen een droogte die gemiddeld eens per twintig jaar voorkomt in een scenario van sterke klimaatverandering en groeiende economie.

Het huidige systeem anno 2020 is de referentiesituatie ten opzichte waarvan veranderingen inzichtelijk worden gemaakt. Daarnaast is een goed begrip van de hedendaagse systeemwerking essentieel om de oplossingsrichting Beschermen op zinvolle wijze uit te kunnen werken. De VKS2015 geeft vervolgens weer wat de strategie is voor de komende tijd volgens het Deltaprogramma 2015 (VKS2015) beschrijft de strategie die in 2015 is gekozen voor de komende decennia. In de VKS2015 worden waterkeringen versterkt zodat deze blijven voldoen aan de normen. Versterkingen zijn nodig door bodemdaling, zeespiegelstijging en hogere rivierafvoer. In de praktijk kan dit betekenen dat meerdere versterkingen nodig zijn. Ook de stormvloedkeringen worden indien nodig vervangen zodat deze voldoen aan de huidige eisen. Binnen het kennisprogramma (spoor II) is de houdbaarheid van de VKS2015 voor verschillende tijdlijnen en scenario's van zeespiegelstijging verkend. In een volgende fase zal ook gekeken worden naar de oprekbaarheid van de VKS2015 waarbij kleinere veranderingen zoals extra waterbergingsgebieden toegestaan zijn, maar grote veranderingen als afsluiten van zeegaten niet onder vallen. Voorbeelden van mogelijke "oprekmaatregelen" zijn: waterberging, pompen, kleinere faalkans SVK, sluitpeilverhoging SVK, ander sluitprotocol SVK, enige aanpassing van de afvoerverdeling enz.

De randvoorwaarde voor waterveiligheid worden bepaald door systeemkeuzes en dijkversterkingen. Denk bij systeemkeuzes aan sluizen, dammen, gemalen en verdelingswerken. Gegeven deze keuzes kan bepaald worden wat de resterende versterkingsopgave is voor waterkeringen en buitendijks gebied. Op basis van deze versterkingsopgave kunnen ook kosten en ruimtebeslag worden bepaald.

De systeemkeuzes zijn reeds beschreven bij de strategieën. Gegeven deze systeemmaatregelen kunnen de hydraulische belastingen worden bepaald voor de zichtjaren 2100 en 2200 gegeven de klimaatscenario's uitgaande van de tijdlijn zeer extreem (met de grote toename van de zeespiegelstijging en rivierafvoer). Deze hydraulische belastingen bestaan uit waterstanden en golfbelastingen. Deze informatie is gebruikt om de benodigde dijkversterking (ruimtebeslag, kosten) te bepalen voor primaire waterkeringen maar ook wat nodig is voor de bescherming van buitendijks gebied.

1.2 Eisen aan waterveiligheid

Het beleid rondom hoogwaterveiligheid is gebaseerd op de risicobenadering. Hierbij zijn er verschillende maatregelen mogelijk om het risico tot op een aanvaardbaar niveau te houden. Op basis van het concept van meerlaagse veiligheid kunnen deze maatregelen worden ingedeeld in preventie (verkleinen van de kans op een overstroming), ruimtelijke inrichting (om de gevolgen van een overstroming te verkleinen) en crisisbeheersing om zowel de kans als de gevolgen te verkleinen.

De gevolgen van een doorbraak van primaire keringen in Nederland zijn veel groter dan die van doorbraken van regionale keringen of extreme neerslag. Het gaat dan zowel om economische schade als slachtoffers. In het Deltaprogramma is in 2014 geconcludeerd dat preventie in Nederland de belangrijkste laag is en dat de andere twee lagen (ruimtelijke inrichting en crisisbeheersing) aanvullend zijn. Deze conclusie is overgenomen door regering en parlement. Aandacht voor ruimtelijke inrichting en crisisbeheersing blijft echter nodig om de huidige en toekomstige overstromingsrisico's te beperken.

De normen in de Waterwet zijn overstromingskansen die zijn afgeleid van het overstromingsrisico dat aanvaardbaar wordt gevonden voor gebieden die bescherming genieten van primaire keringen. De normen voor deze gebieden berusten op de volgende twee principes:

1. Iedereen moet (binnendijks) kunnen rekenen op dezelfde minimale bescherming: het basisbeschermingsniveau, uitgedrukt in Lokaal Individueel Risico (LIR) waarbij rekening wordt gehouden met evacuatie.
2. Waar de gevolgen van een overstroming zeer groot zijn, is een kleinere overstromingskans passend, op basis van het groepsrisico en een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA).

De normen voor de dijktrajecten variëren van 1/100 tot 1/1.000.000 per jaar. Deze normen leiden ertoe dat het risico (kans maal gevolg) in de overstroombare delen van Nederland, na de huidige versterkingsronde, vrijwel gelijk is.

In Afbeelding 1.1 zijn de normen van waterkeringen opgenomen. Het verschil tussen opeenvolgende normklassen is een factor 3. Dat betekent dat een andere norm aan de orde kan zijn als de gevolgen ook een factor 3 zijn toegenomen door klimaatverandering. Dit kan zijn een hogere schade door een grotere overstroming, of een hogere mortaliteit.

Een schade die 10x hoger is door klimaatverandering wordt als zeer extreem gezien. Een dergelijke toename in schade is alleen mogelijk als nieuw gebied overstroomt. In bestaand gebied kan de schade vrijwel nergens meer dan een factor 10 stijgen omdat de schade is begrensd tot een maximum. Een factor 10 strengere norm (dus een 10xc kleinere faalkans) komt overeen met een extra hoogte die gelijk is aan de decimeringshoogte. Deze varieert tussen enkele decimeters tot 0,5-1 meter. De zeespiegelstijging in de zichtjaren die we beschouwen van 2 en 5,4m is al veel groter.

Afbeelding 1.1 Veiligheidsnormen voor waterkeringen (WBI 2017)



Er is in de huidige versterkingsronde geen rekening gehouden met eventueel strengere normen in de toekomst. De extra hoogte door een strengere norm (1 klasse strenger) is overigens beperkt in vergelijking met de extra hoogte als gevolg van de gemiddelde of extremere klimaatopgave (toename afvoeren, stijging zeespiegel) in de verschillende zichtjaren. De huidige normen, die aan de basis liggen van de huidige versterkingsronde, zijn gebaseerd op de verwachte situatie in 2050. Hierbij is gekeken naar een MKBA en Basisveiligheid (lokaal individueel risico).

Buitendijkse gebieden

In het rivieren- en deltagebied en langs de kust zijn diverse gebieden die buitendijks zijn gelegen. Deze gebieden worden niet beschermd door primaire waterkeringen en kunnen overstromen bij hoge zeespiegel of hoge waterstanden op de rivier. Het kan gaan om industriële gebieden (als de Botlek), bedrijventerreinen, stedelijke gebieden als de Kop van Zuid in Rotterdam, Noordereiland, Heijlplaat en delen van Dordrecht en om verspreide bebouwing langs de rivieren en meren.

1.3 Hydraulische belastingen

De kust en Waddengebied

De toename van de hydraulische belasting voor de kust als gevolg van ZSS is gelijk aan de toename van de ZSS. ZSS leidt tot een hogere waterstand. De golfbelasting blijft gelijk omdat het uitgangspunt volgens de VKS2015 is dat de bodem meegroeit met ZSS. Uitgegaan wordt van de uitwerking in spoor II van KPZSS voor zowel de harde¹ als de zandige keringen². Voor het Waddengebied geldt het uitgangspunt dat de bodem niet meegroeit met ZSS maar de huidige trend volgt nemen hier de golven ook toe. De toename van de hydraulische belasting is dus gelijk aan de toename van ZSS plus een extra toeslag voor golven. Uitgegaan wordt van de uitwerking in spoor II van KPZSS voor de Waddenzee en Eemsdollard³. Hydraulische belastingen voor de harde keringen kunnen ook worden bekeken in: <https://dmmangrove.hkvservices.nl/kpzss-systeemanalyse/>.

Rijnmaasmonding, Rivierengebied en Zuidwestelijke Delta (uitgezonderd Westerschelde)

De hydraulische belastingen worden hier sterk bepaald door de systeemkeuzes die gemaakt zijn. De hydraulische belastingen zijn geschat op basis van een benadering waarin gebruik is gemaakt van bestaande modellen en benaderingen. Deze aanpak leidt voor de uitwerking nu tot voldoende onderscheid en nauwkeurigheid waarmee de haalbaarheid en uitvoerbaarheid van een strategie kan worden bepaald. De nauwkeurigheid is nog onvoldoende voor concrete ontwerpen die hierna naar uitvoering kunnen gaan, hiervoor zijn aanvullende analyses nodig waarin de bestaande losse modellen nu niet voorzien:

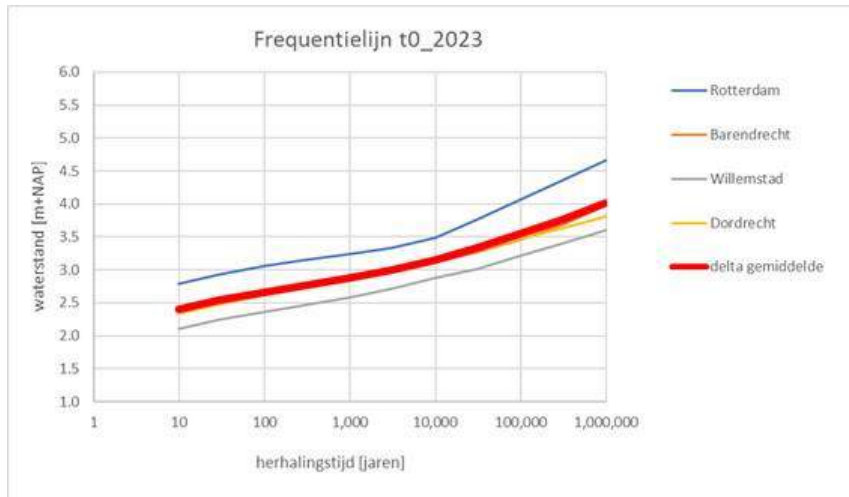
- onderscheid wordt gemaakt tussen een meerpeil, een overgangsgebied en het rivierengebied. Door het combineren van modellen zijn waterstandsverlopen geschat van de kust tot en met Nijmegen, Arnhem of Mook;
- de resultaten van spoor II waarin rekening is gehouden met toename van de rivierafvoer en ZSS;
- de impact van systeemmaatregelen die voor afgesloten situaties voor het meerpeil (strategie A1, A2 en deels B2) zijn bepaald met een reservoirmodel (zie bijlage 1). Het reservoirmodel is voor deze studie gevoed met gelijke afvoerstatistieken als in spoor II van KPZSS. Het reservoirmodel leidt tot 1 gemiddeld meerpeil. Dit peil is geldt voor wat we het deltagebied noemen. Het deltagebied loopt van de kunstwerken aan de kust tot en met rivierkilometer 970;
- binnen het Deltagebied maken we voor strategie A1, A2 en B1 nog onderscheid tussen een aantal delen vanwege de fysische werking van het systeem. Voor deze trajecten hanteren we een toeslag (of afslag) op de waterstand die is gebaseerd op waterstandsverschillen die nu ook zichtbaar zijn in waterstandstatistieken uit Hydra-NL):
 - waterstand Nieuwe Waterweg / Nieuwe Maas = meerpeil +0,5 (door afvoer van de Lek);
 - waterstand Oude Maas / Beneden Merwede = meerpeil;
 - waterstand Haringvliet en Hollands Diep = meerpeil – 0,5 m (door berging op Haringvliet).

¹ <https://www.deltaprogramma.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-harde-waterkeringen-kust---kp-zss/Systeemanalyse+waterveiligheid+Harde+waterkeringen+kust+-+KP+ZSS.pdf>

² <https://www.deltaprogramma.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-zandige-waterkeringen-kust---kp-zss/Systeemanalyse+waterveiligheid+Zandige+waterkeringen+kust+-+KP+ZSS.pdf>

³ <https://www.deltaprogramma.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-waddenzee-en-eems-dollard---kp-zss/Systeemanalyse+waterveiligheid+Waddenzee+en+Eems-Dollard+-+KP+ZSS.pdf>

Afbeelding 1.2 Frequentielijnen in het deltagebied (bron Hydra-NL)



- de resultaten van het reservoirmodel (die leiden tot een gemiddeld meerpeil "benedenstrooms") en spoor II "bovenstrooms" zijn aan elkaar verbonden via een stuwkromme over een gekozen overgangstraject. Dit traject is gekozen over het tracé tussen bovenstrooms de locatie waar de zeespiegel en de gekozen strategie geen invloed heeft (rivierkilometer 910) tot de meest benedenstroomse locatie waar nog verhang optreedt (~rivierkilometer 970);
- het effect op het HBN bij strategie B2 op de hoogwatercorridor is gebaseerd op QH relaties die volgen uit de gebruikte hydraulische databases binnen KPZSS spoor II;
- voor strategie B1 is het effect van de kleinere faalkans gebaseerd op de analyses voor de Holland Kering. Het waterstand verlagende effect van de Hollandkering is in deze studie bepaald voor ZSS 2,0 m. Aangenomen is dat dit effect bij ZSS 5,4 m gelijk is. Het effect van berging is overgenomen uit de analyse van de oprekmogelijkheden zoals onderzocht in spoor II. Het effect van de gemalen is geschat door te kijken naar de reductie in waterstand die haalbaar is gedurende een periode van stremming van de afvoer. Hiervoor is gebruik gemaakt van de probabilistische analyse uit spoor II en het effect van berging met een volume gelijk aan de maalcapaciteit maal de duur. Aangenomen is dat de reductie van waterstanden door deze maatregelen gesuperponeerd kan worden op het resultaat van KPZSSII.

De impact op waterstanden en hydraulische belastingen is voor een aantal tracés in detail uitgewerkt. Het gaat om Hoek van Holland tot en met Arnhem, Hoek van Holland tot en met Nijmegen, Haringvlietsluizen tot en met Nijmegen, Haringvlietsluizen tot en met Mook. Zie Afbeelding 1.3 voor deze tracés.

Afbeelding 1.3 Beschouwde riviertakken



Westerschelde

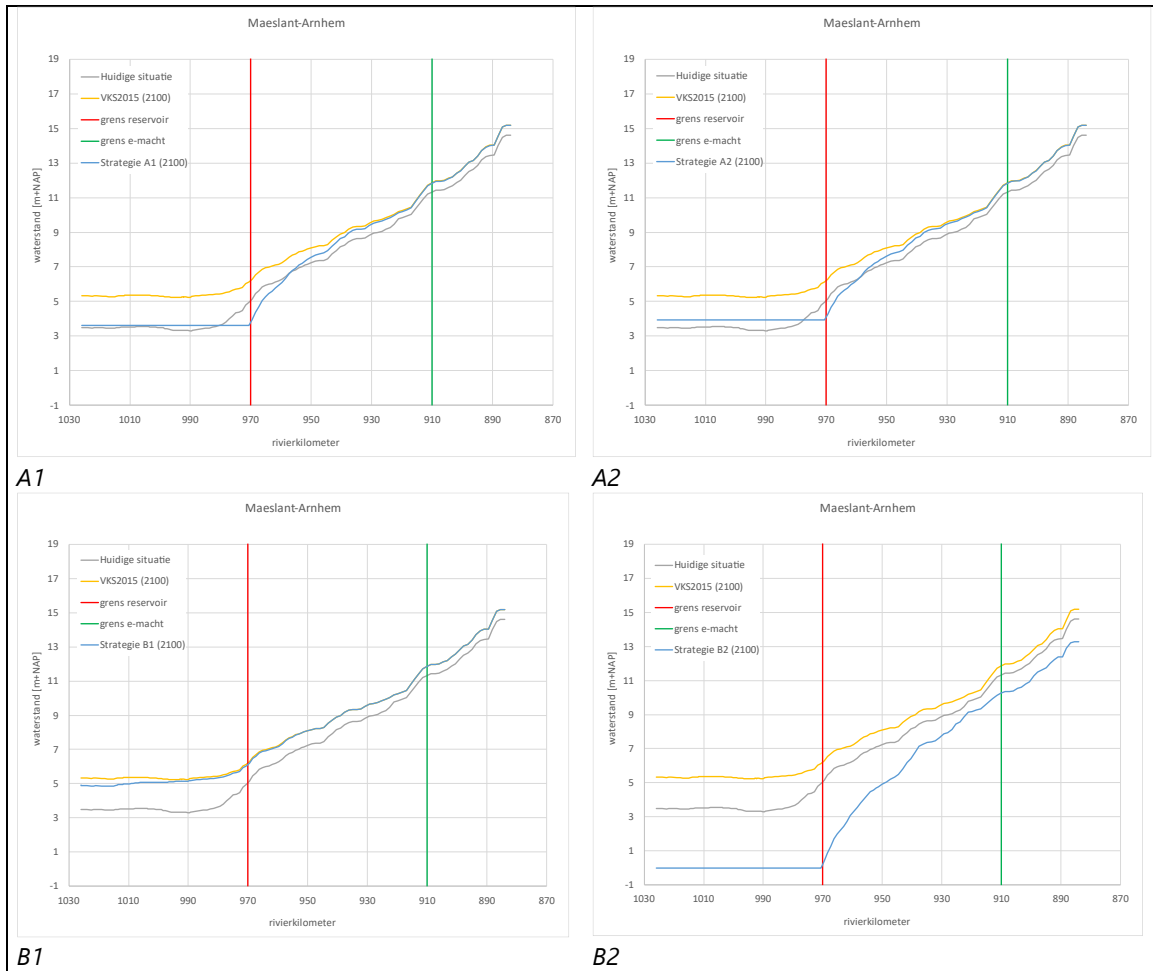
De HBN's voor de VKS2015 zijn uitgewerkt in spoor II. Hydraulische belastingen voor de harde keringen kunnen ook worden bekeken in: <https://dmmangrove.hkvservices.nl/kpzss-systeemanalyse/>. De effecten van de strategieën op deze waterstanden zijn niet uitgewerkt maar kunnen orde grootte wel worden geschat op basis van de systeemkeuzes.

1.3.1 Waterstanden

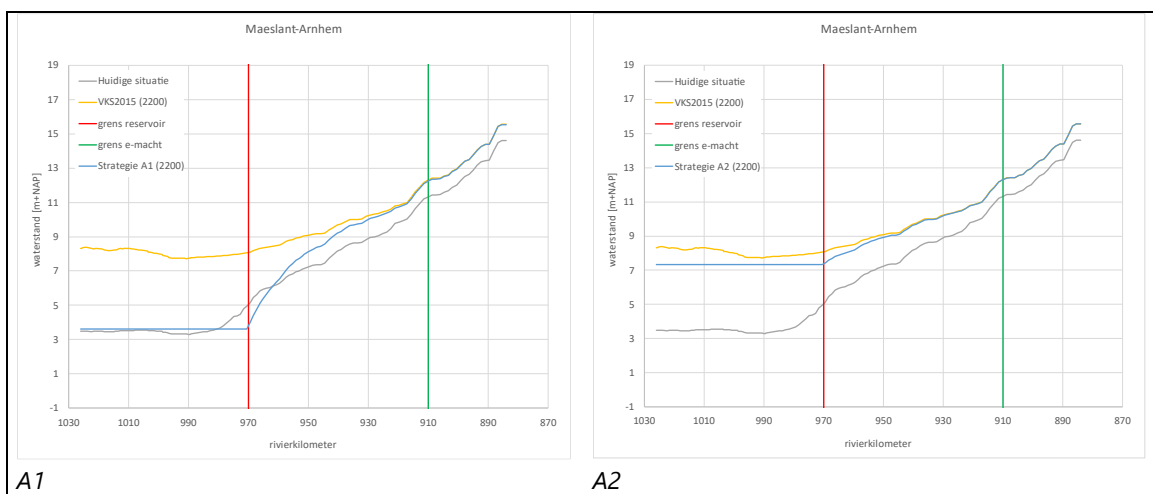
Voor het Rijn-Maasmonding, de rivieren (Voor de Waal en Lek tot Nijmegen en Arnhem en voor de Maas tot en met Mook) en de Zeeuwse meren zijn de hydraulische waterstanden en golven gekwantificeerd voor de verschillende strategieën. Deze waterstanden zijn bepaald voor de situaties 1/10, 1/100, 1/1.000, 1/10.000, 1/100.00 en 1/1.000.000 per jaar. De systeemmaatregelen (omvang berging en gemalen) voor de strategieën A1 en A2 zijn gedimensioneerd op de 1/10.000per jaar waterstand.

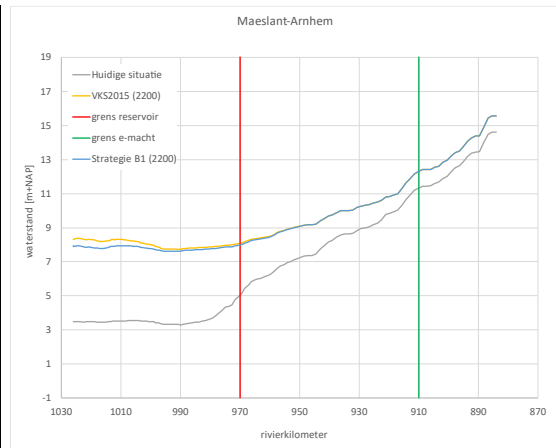
In de onderstaande afbeeldingen is voor de situatie 1/10.000 per jaar voor het traject Hoek van Holland tot Arnhem het waterstandsverloop opgenomen voor de strategieën met de blauwe lijn. De grijze lijn geeft het waterstandverloop weer van de huidige situatie, de gele lijn uit de VKS2015 uitgewerkt in KPZSSII conform de tijdlijn zeer extreem. Tussen de verticale rode en groene lijn is e-macht toegepast om het meerpeil te verbinden met rivierwaterstanden.

Afbeelding 1.4 Waterstandsverlopen traject Hoek van Holland (vanaf de kunstwerken die de zee scheiden van Rijn-Maasmonding) tot Arnhem bij 1/10.000 per jaar situatie voor de strategieën in 2100

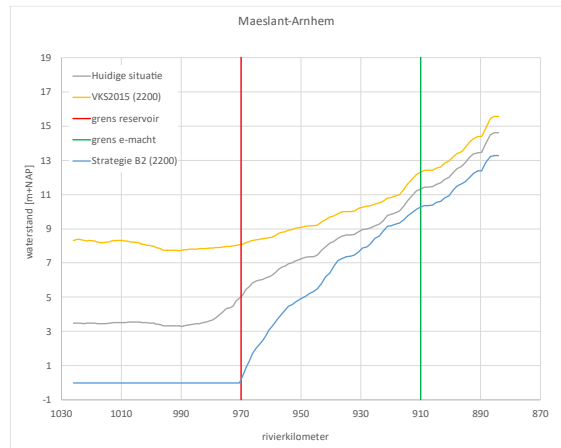


Afbeelding 1.5 Waterstandsverlopen traject Hoek van Holland (vanaf de kunstwerken die de zee scheiden van Rijn-Maasmonding) tot Arnhem bij 1/10.000 per jaar situatie voor de strategieën in 2200





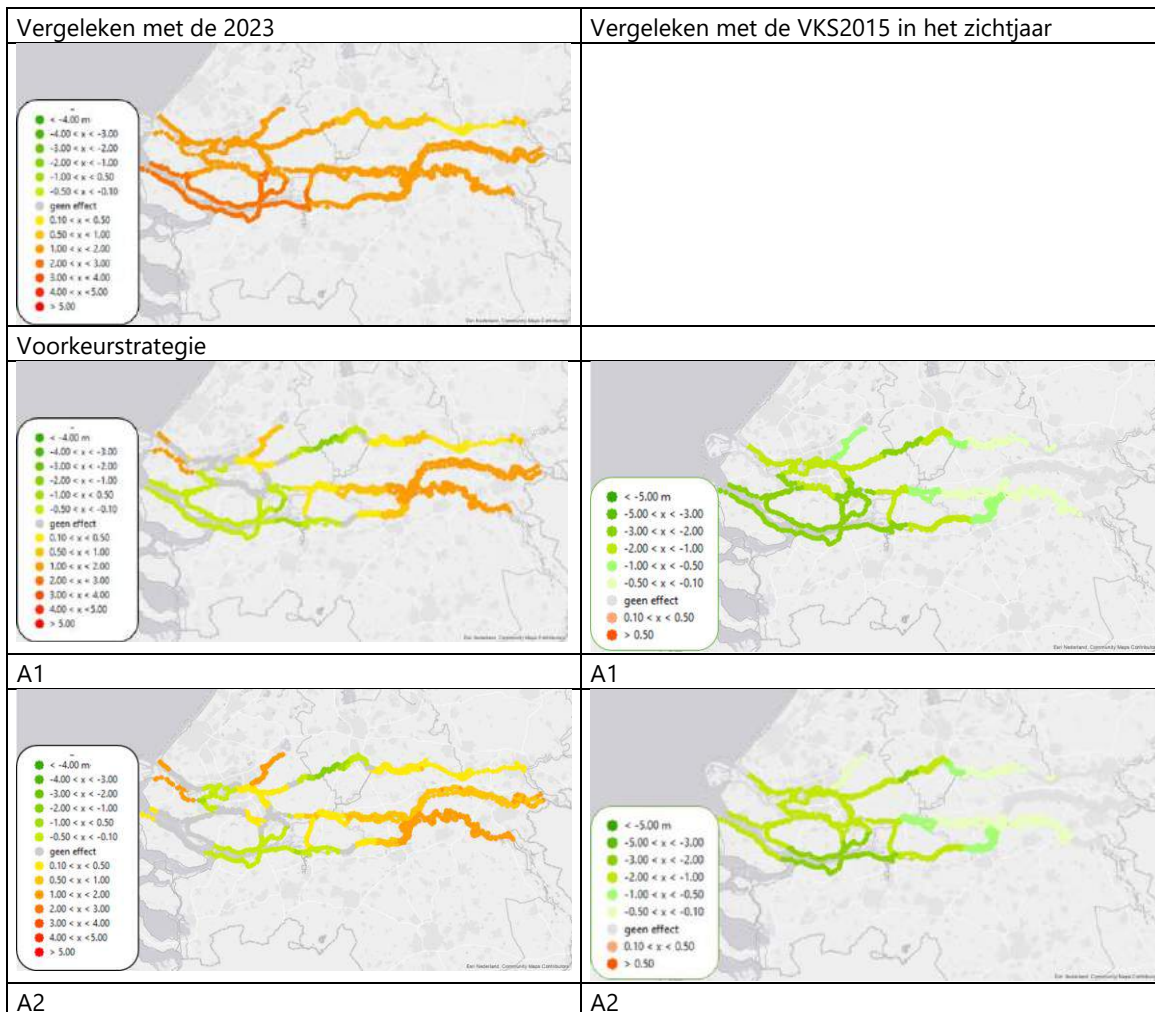
B1

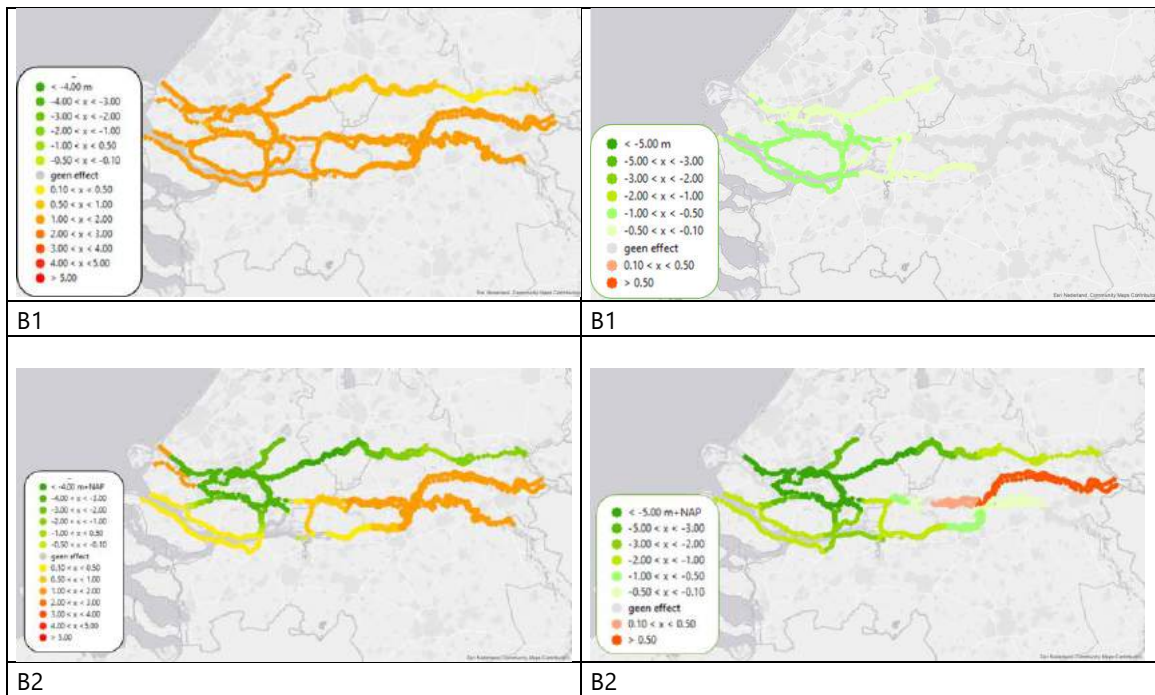


B2

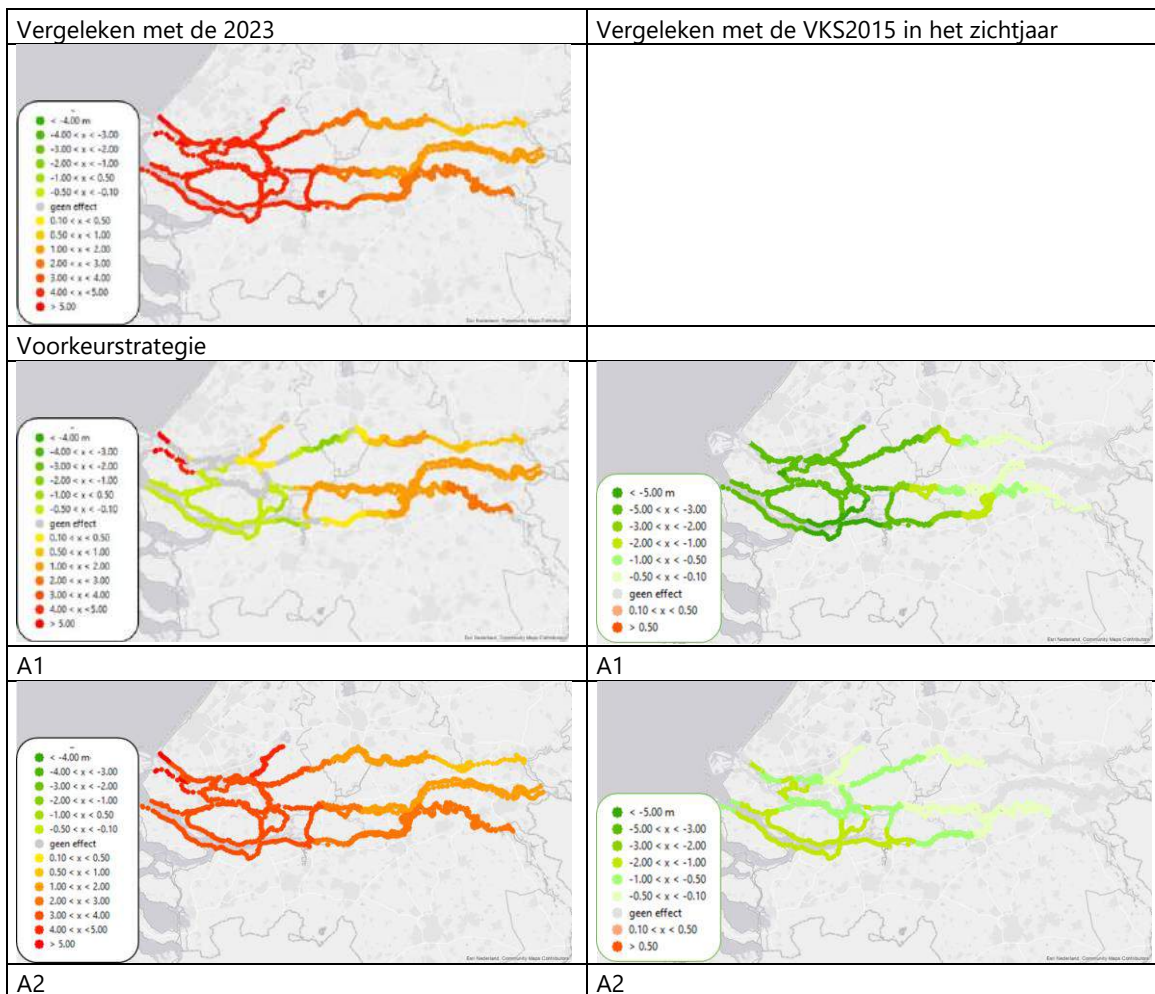
In de onderstaande afbeeldingen is de verandering in waterstand gepresenteerd ten opzichte van twee situaties: de huidige situatie (2023, let op dus niet 2050) en de VKS2015 in hetzelfde zichtjaar als het strategie.

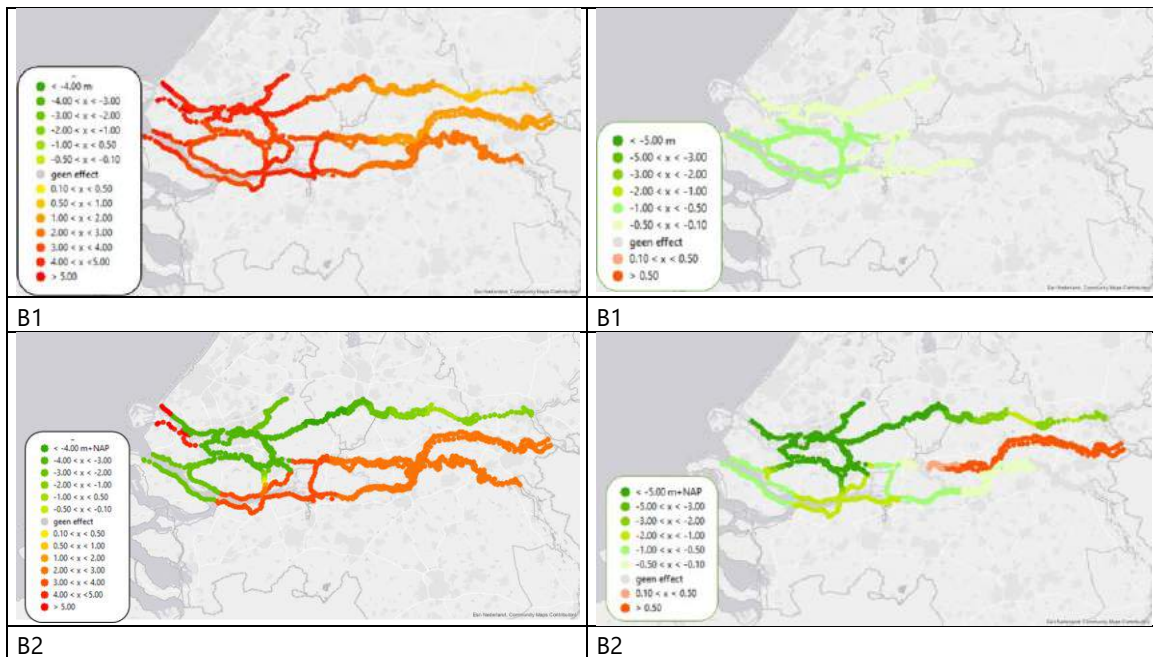
Afbeelding 1.6 Verandering piekwaterstand in Rijn-Maasmonding en Bovenrivieren (Maas, Waal, Nederrijn-Lek) bij 1/10.000 per jaar situatie voor de strategieën in 2100





Afbeelding 1.7. Verandering piekwaterstand in Rijn-Maasmonding en Bovenrivieren (Maas, Waal, Nederrijn-Lek) bij 1/10.000 per jaar situatie voor de strategieën in 2200 uitgaande van de tijdlijn zeer extreem





In strategie A1 is duidelijk zichtbaar dat de waterstand tot 1/10.000 per jaar situaties in het deltagebied gelijk is aan in de huidige situatie. Dit komt door de mix van berging en gemaalcapaciteit. De toename van de HBN's in het rivierengebied komt door de toename van de rivierafvoer. De HBN's in het deltagebied bij een 1/10 en 1/100per jaar situatie zijn lager dan in de huidige situatie (dus 2050). In Afbeelding 1.6 is een overzicht opgenomen van de waterstanden van west naar oost Nederland die eens in de 100 jaar optreden in 2200. Dat betekent dat de opgave voor buitendijks en voor dijkversterkingen beperkt is (let op, dijkversterking is ook nodig vanwege bodemdaling en rivierafvoer).

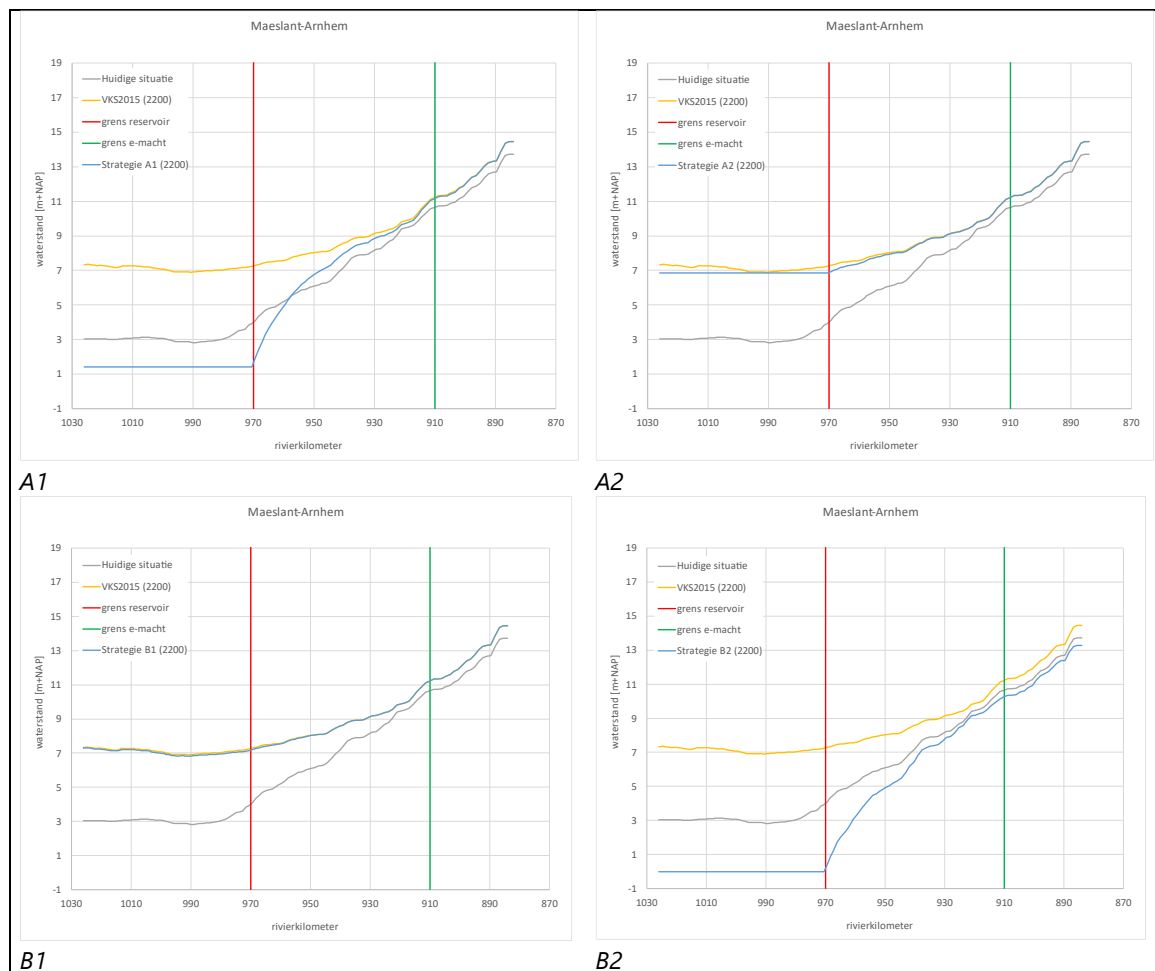
In strategie A2 neemt de waterstand in het deltagebied toe omdat deze meegroeit met ZSS. Voor zichtjaar 2100 zijn de HBN's in het deltagebied vergelijkbaar met de huidige situatie (en dus lager dan de voorkeursstrategie). Bij hogere ZSS en verdere toename van de rivierafvoer in 2200 neemt de waterstand flink toe. In vergelijking met de VKS2015 als berekend in Spoor II is het verschil in waterstand het grootst bij de extreemste situatie (tot orde 2 meter). Bij grotere terugkeertijden is het verschil met de VKS2015 beperkt tot enkele decimeters. Dat betekent dat er buitendijks een flinke opgave is. De toename van de HBN's in het rivierengebied komt door de toename van de rivierafvoer.

In strategie B1 wordt het effect ten opzichte van de VKS2015 van de kleinere faalkans per sluiting van de Euro-poortkering, extra berging in Grevelingen en Oosterschelde en extra gemaalcapaciteit groter bij extreme situaties. Dit is te zien in het verschil tussen een 1/100per jaar situatie en een 1/10.000per jaar situatie. Het effect beperkt zich voornamelijk tot het deltagebied, in het overgangsgebied is het effect snel afgenomen. Het effect is afhankelijk van de locatie beperkt tot 1 meter. De toename van de HBN's in het rivierengebied t.o.v. de huidige situatie komt door de toename van de rivierafvoer.

In strategie B2 is het effect van de afvoerverdeling zichtbaar. In de nieuwe Deltapolder (afgedamde deel rondom Rotterdam, Dordrecht en Haringvliet) zijn peilstijgingen vrijwel uitgesloten. Ook op de Lek daalt het HBN door de verhanglijn naar deze polder. Op de hoogwatercorridor op de Waal is de HBN hoger dan in de voorkeursstrategie. Dat is ook logisch want meer afvoer gaat over deze riviertak. Er ontstaat wel een groot verval van meer dan 5m tussen de hoogwatercorridor en de Deltapolder wat ontwerpvoorschriften zal stellen aan de 3 oostelijke rivierkeringen, mede omdat de container binnenvaart vanuit Rotterdam hier mogelijk ook zal moeten passeren. De waterstand in de Grevelingen wordt sterkt bepaald door de mate van ZSS. In 2100 zijn de HBN's vergelijkbaar met de huidige situatie, in 2200 nemen ze sterkt toe en benaderen ze de voorkeursstrategie.

De IJssel, het IJsselmeer en het ARK/NZK zijn niet in detail uitgewerkt. Voor het ARK/NZK blijft het peilbeheer vergelijkbaar met de huidige situatie en worden oplossingen gezocht in systeemmaatregelen en extra pompcapaciteit bij IJmuiden. Voor de IJssel kan het nodig zijn om waterkeringen te versterken om de extra rivierafvoer door klimaatverandering veilig af te kunnen voeren, met name nabij de steden langs de IJssel. Voor het IJsselmeer is er de ISWP studie, omdat de toename van de rivierafvoer in onderhavig onderzoek extremer is verondersteld kan het leiden tot extra gemaalcapaciteit die nodig is. Deze extra capaciteit is echter van een (veel) kleinere orde dan in de Rijn-Maasmonding regio en daarom niet verder uitgewerkt. Voor de Westerschelde kan gebruik worden gemaakt van de resultaten van spoor II (met een open verbinding zoals voorzien bij B2). Bij de uitwerking van A1 is er geen dijkversterking voorzien. Bij de uitwerking van A2 en B1 zal de vereiste dijkversterking kleiner zijn dan in de voorkeurstrategie.

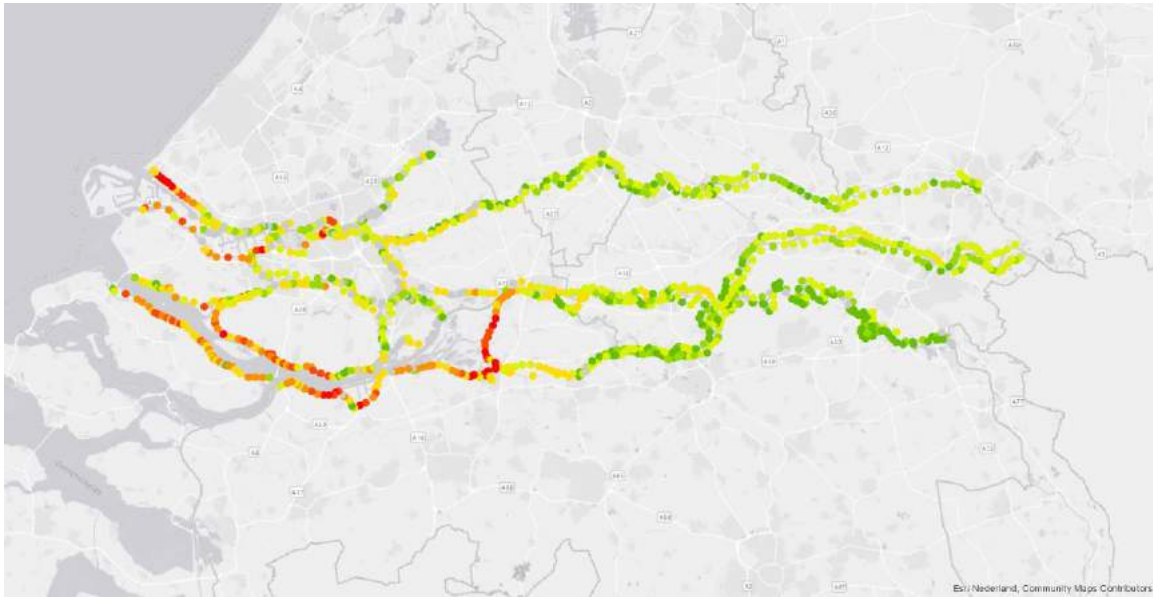
Afbeelding 1.8. Waterstandsverlopen traject Hoek van Holland (vanaf de kunstwerken die de zee scheiden van Rijn-Maasmonding) tot Arnhem bij 1/100 per jaar situatie voor de strategieën in 2200



1.3.2 Golven

De HBN's zijn de minimale benodigde dijkhoogten bij de norm (vertaald van traject naar vak) die volgen door golfoverslag en een kritiek golfoverslagdebiet in combinatie met de waterstand. Golfoverslag wordt veroorzaakt door een combinatie van waterstanden en golfbelastingen en beïnvloed door het dijkprofiel met eventueel een voorland. Voor de tracés zoals hierboven uitgewerkt is de toeslag voor golven op het HBN bepaald (op basis van KP ZSS spoor II waarin een standaard profiel is gebruikt) voor 1/10 – 1/1.000.000 per jaar situaties. In navolgende afbeelding is de toeslag voor de 1/10.000 per jaar situatie weergegeven.

Afbeelding 1.9 Toeslag golven op HBN voor 1/10.000 per jaar situatie



1.4 Kennisvragen

De opgestelde belastingen zijn gebaseerd op een combinatie van het reservoirmodel en de probabilistische analyses van spoor II van het kennisprogramma. Deze zijn alleen uitgewerkt voor het Rijn- Maasmonding gebied, het meerpeil in de Zuidwestelijke delta en het rivierengebied tot Nijmegen, Arnhem en Mook.

Het verdient aanbeveling om een nieuw landsdekkend model te ontwikkelen waarmee eenvoudig het effect van verschillende systeemkeuzes op hydraulische belastingen en de ontwikkeling van overstromingsrisico's kan worden verkend. Gezien de rol van de onzekerheden wordt hierin geadviseerd om dit model te baseren op het DEZY concept. Dit is een probabilistisch model, waarin de statistiek van afvoer, neerslag en zeewaterstand en overstromingsgevolgen wordt gecombineerd met reservoirmodellen voor verschillende deelgebieden om de fysica te beschrijven. De kracht van het model zit in de korte rekentijden, waardoor de effecten van klimaatverandering en systeemmaatregelen snel zichtbaar gemaakt kunnen worden. Nadrukkelijk wordt gezegd dat het model zich richt op de orde grootte van een gebied, en niet bedoeld is om op locatie x de exacte randvoorwaarden te bepalen voor een toekomstig ontwerp. Dit instrumentarium kan ook ingezet worden om verschillende varianten en oplossingsrichtingen door te rekenen.

2

BOUWSTEEN: SCHUT- EN SPUISLUIZEN, VERDEELWERKEN, STORMVLOEDKERINGEN

Auteurs: Henry Tuin, Stefan van den Berg, Bert van den Berg, Otto Weiler

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de schut- en spuisluisen, verdeelwerken en stormvloedkeringen die nodig zijn bij de verschillende strategieën zoals behandeld in het hoofdrapport.

2.2 Kenmerkende locaties binnen de strategieën

In deze paragraaf wordt ingegaan op de locaties en afmetingen voor de schut- en spuisluisen, verdeelwerken en keringen. Er zijn veel varianten binnen de strategieën te bedenken, dit is ook gebleken uit de verschillende hackathons die georganiseerd zijn. De veelheid aan varianten geldt met name voor de locatie van schutsluisen en de beoogde intensiteit door de schutsluisen. Ook is er een verschil tussen de kenmerken en locaties van schut- en spuisluisen bij 2 en 5,4m zeespiegelstijging. Deze paragraaf geeft een overzicht van de kenmerkende locaties en de mogelijke inrichtingsalternatieven.

Voor de beschrijving van mogelijke sluiscomplexen wordt geput uit een aantal standaardconfiguraties voor sluisen. Het type sluisen zijn onderstaand weergegeven waarbij de afkorting toegepast in de navolgende figuren per type is weergegeven. Elke schutting zorgt voor een zoutlast op het zoetwatersysteem. Het aantal schutsluisen, de afmetingen en het aantal schuttingen dient nader bepaald te zijn om de technische invulling aan te laten sluiten op het acceptabele zoutbezwaar. Deze afweging wordt meegegeven als kennisvraag voor nadere studie.

- zeer grote zeesluis (ZG), afmetingen bijvoorbeeld 550 m lang, 80 m breed, 26 m diepgang;
- grote zeesluis (G), afmetingen Panamakanaal/Terneuzen 427 x 55 x 18 m;
- normale zeesluis (M), afmetingen Middensluis IJmuiden 225 x 25 x 10 m;
- binnenvaart sluis (B), afmetingen Beatrixsluis 276 x 25 x 4 m;
- binnenvaartsluisencomplex (BC), afmetingen Volkeraksluisen: 3 kolken voor de beroepsvaart 330x24 m, 1 jachtensluis 135x16 m.

Rijn Maas monding (RMM)

In onderstaande afbeeldingen zijn de locaties voor de schutsluisen in de Rijn-Maasmonding weergegeven. Voor de strategieën A1, A2 en B2 zijn de locaties en afmetingen aan het zeefront gelijk. Enkel het verval aan het zeefront verschilt per strategie. Aanvullend op A1 en A2 zijn voor strategie B2 sluisen benoemd aan de oostzijde en zuidzijde van Rotterdam. In onderstaande opsomming zijn de schutsluisen beschreven die binnen de strategieën A1, A2 en B2 zijn voorzien:

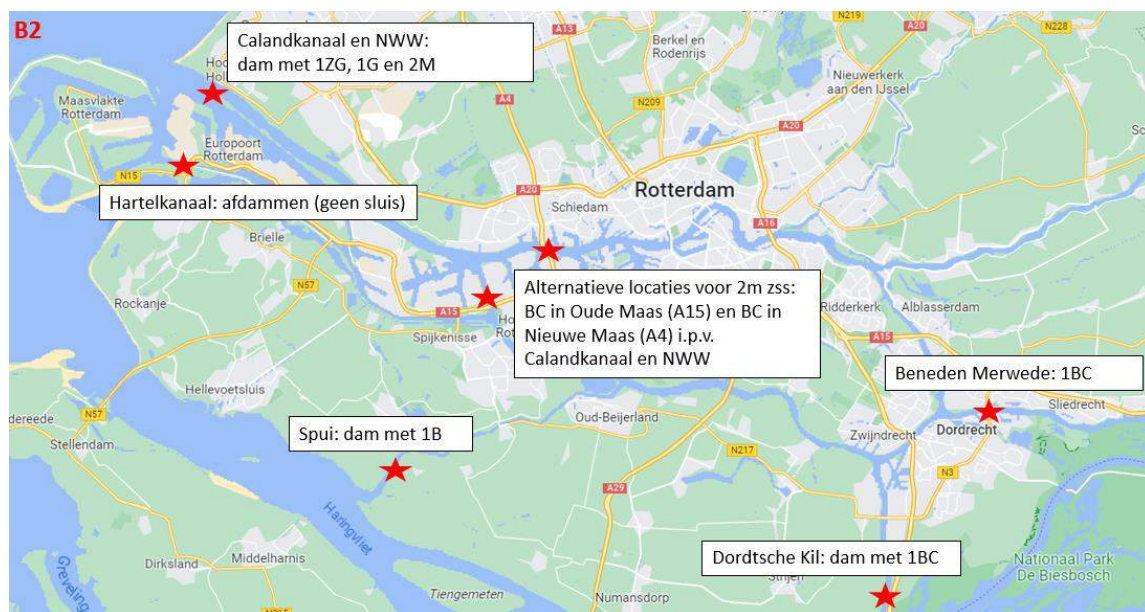
- afsluiting Callandkanaal en Nieuwe Waterweg met groot sluisencomplex bestaande uit een zeer grote zeesluis, een grote zeesluis en 2 normale zeesluizen:
 - een variant is om eerst bij 2m zeespiegelstijging te kiezen voor kleinere complexen meer landinwaarts bij Oude Maas (A15) en Nieuwe Maas (A4) en pas later voor de 'grote' afsluiting. De kleine complexen zouden dan bestaan uit sluisen voor voornamelijk binnenvaartschepen. Met deze configuratie wordt bij 5m zeespiegelstijging een getrappt systeem gecreëerd;
- Hartelkanaal afdammen (geen sluis) nabij Beerdam/A15;
- enkel voor B2 geldt:

- zuidkant van het Spui afdammen met een binnenvaartsluis;
- zuidkant Dordtsche Kill afdammen met binnenvaartsluizencomplex;
- Beneden Merwede afdammen met binnenvaartsluizencomplex.

Afbeelding 2.1. Locaties schutsluizen Rijn-Maasmondig strategieën A1 en A2



Afbeelding 2.2. Locaties schutsluizen Rijn-Maasmondig strategie B2



Een belangrijk aspect bij de zeeschutsluizen is de zoutindringing. De ambitie is dat de zoutindringing niet significant is. Dit wordt allereerst nagestreefd met technische maatregelen (zoals bijvoorbeeld een selectieve onttrekking). Als dat niet mogelijk is of de effectiviteit ontoereikend is, dan kan er gekozen worden om minder frequent te schutten. Een variant voor de gehele RIJN-MAASMONDING is dan om het aantal zeesluizen te verminderen passend aan de beschikbare technische maatregelen om de zoutindringing tot een acceptabel niveau terug te brengen. Doordat er veel minder geschut zal worden, zal er naar andere oplossingen voor de overslag van goederen moeten worden gevonden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan overslag van de zoute haven naar het zoete Hartekanaal. Uiteindelijk zal dit een optimalisatie zijn tussen technische maatregelen – beschikbaarheid zoetwater – landgebruik – havenactiviteiten.

Binnen strategie B1 wordt een stormvloedkering voorzien aan de Rijnmaasmonding in de Nieuwe Waterweg. Het grootste deel van de haven blijft, net als nu, buiten de stormvloedkering liggen. Gekozen kan worden om een kleinere stormvloedkeringen te kiezen t.o.v. de huidige stormvloedkering. Een kleiner en minder complex systeem verlaagd mogelijk de faalkans waardoor een robuuster systeem verkregen wordt. Voorwaarde binnen strategie B1 is namelijk dat de faalkans wordt verkleind ten opzichte van de huidige Euro-poortkering.

Als alternatieve op boven beschreven locatie kan gekozen worden om de stormvloedkering verder naar buiten te leggen en de gehele haven bij stormvloed af te sluiten. Hierdoor zal het havengebied minder hoeven te worden opgehoogd. Echter de kering zal groter zijn t.o.v. de eerdergenoemde locatie aangezien de schepen en de scheepvaartintensiteiten groter en hoger zijn..

Afbeelding 2.3. Locaties keringen Rijn-Maasmonding strategie B1



IJmuiden

Bij 2 meter zeespiegelstijging wordt voorzien in het handhaven van het huidige sluisencomplex en waar nodig deze op te waarden en versterken.

Bij 5m wordt voorzien in een nieuwe dam met sluisen voor het huidig complex. Grote zeeschepen blijven buiten het bestaande complex om de zoutlast te beperken. Door een verval te behouden over het huidige complex kan de bestaande inrichting van de bebouwing rondom de keringen zo veel mogelijk gehandhaafd blijven.

Inrichting nieuw voorliggend sluisencomplex:

- 1 normale zeesluis;
- 1 grote zeesluis.

Afbeelding 2.4 Locaties schutsluizen IJmuiden

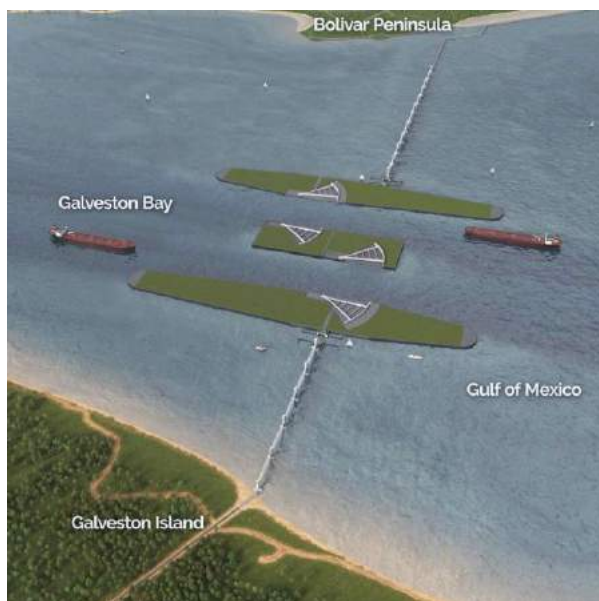


Westerschelde

Binnen de strategieën A1 en A2 wordt de Westerschelde afgesloten. Binnen strategie B1 (met stormvloedkering) en B2 blijft de Westerschelde open. Door het verschil in uitgangspunten zijn binnen de strategieën verschillende oplossingsrichtingen in te passen:

- binnen A1 blijft het peil in de Westerschelde gelijk en is het zeefront gesloten. Hierdoor zal een verval ontstaan over het afsluitmiddel en dient een kerende dam met sluiscomplexen gerealiseerd te worden. De waterstand op zee zal altijd significant hoger zijn dan in de Westerschelde. Schepen vanuit de Westerschelde worden altijd opgeschut met water vanuit zee waardoor per schutbeweging zout binnentreedt. De scheepsintensiteit is orde grootte gelijk aan de intensiteit bij Rotterdam. Dit betekent een zeer grote zeesluis, grote zeesluis en 2 normale zeesluizen;
- binnen A2 stijgt het peil mee en is het zeefront gesloten. Een dichte dam met spuiccomplexen en schutcomplexen bevindt zich op het grensvlak. Binnen A2 kan de gebiedsinrichting vergeleken worden met de huidige Grevelingendam of Afsluitdijk. Ook hier geldt dat er een sluiscomplex moet komen met een zeer grote zeesluis, grote zeesluis en 2 normale zeesluizen;
- binnen B1 is onder reguliere omstandigheden het zeefront open waardoor het binnenpeil meestijgt. Een dichte dam met een kleine stormvloedkering is binnen dit concept geen optie gegeven het grote getijslag en het grote bergend oppervlak van de Westerschelde. Om de stroomsnelheden beperkt te houden dient een open dam gerealiseerd te zijn waarbij een scheepvaartopening afgesloten kan worden met een stormvloedkering of met schutsluizen. Dit concept is vergelijkbaar met een combinatie van de huidige inrichting van de Oosterschelde en Nieuwe Waterweg gecombineerd. Ook de plannen voor de inrichting van Houston (Ike dike concept) hebben dit concept.

Afbeelding 2.5. Referentie gebiedsinrichting Westerschelde strategie B1



Spuimiddelen in Zeeuwse Delta

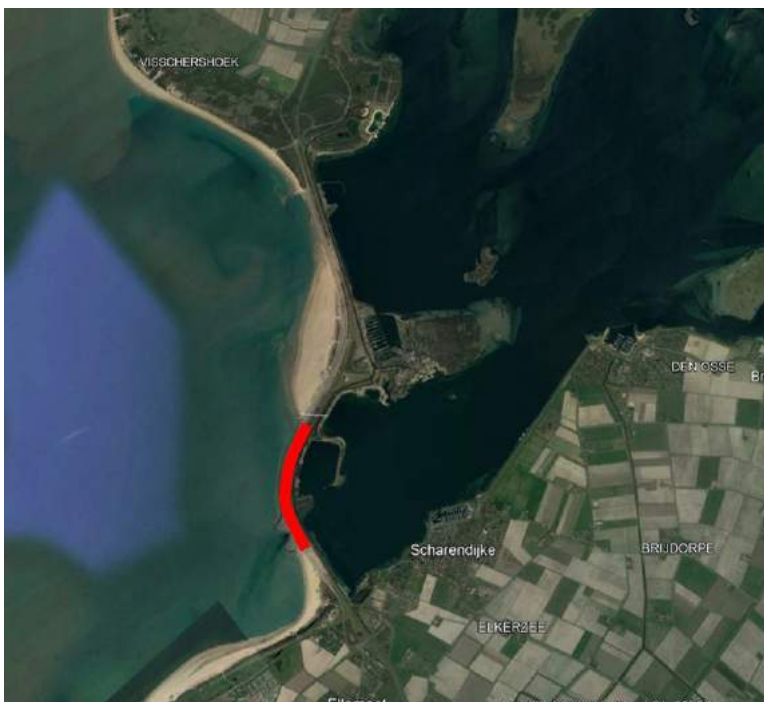
Voor de strategieën A2, B1 en B2 wordt voorzien in het spuien of afvoeren van water via het Haringvliet. Spuien via de Grevelingen kan hierop een variant zijn. Voor het type spuiconcept wordt aangesloten bij de bestaande Haringvlietssluzen. Voor de strategieën A2 en B2 is uitbreiding van de huidige capaciteit nodig. Aanleg van extra spuiopeningen wordt haalbaar geacht om de piekafvoeren te kunnen spuien indien het huidige verval of een hoger verval gefacilieerd wordt over de spuumiddelen.

De afvoerpiek gaat circa 50 % omhoog ten opzichte van de huidige situatie. De huidige lengte van de schuiven waarmee gespuid wordt is gelijk aan 1.000 m. Er dient daarmee ca. 500m extra spuumiddel gelijkvormig aan het Haringvliet spuumiddel ingepast te worden. In onderstaande afbeeldingen is een lengte van ca. 500 m bij de haringvliet en 1.500 m in de Grevelingendam aangegeven. Te zien is dat deze extra capaciteit in te passen is in de bestaande dammen. Indien inpasbaar kan deze lengte kan verkort worden door het verder opzetten van de binnenwaterstand.

Afbeelding 2.6. Inrichting Haringvlietsluizen. Rood = extra benodigd ruimtebeslag ter verhoging van spuidebiet (=500 m)



Afbeelding 2.7. Inrichting Grevelingensluizen. Rood = benodigd ruimtebeslag voor benodigd spuidebiet (=1.500 m)



Verdeelwerk

In strategie B2 is een nieuw verdeelwerk voorzien bij de Pannerdenschekop. Dit verdeelwerk zal de afvoer naar het westen leiden en zorgen voor een gereduceerd aanbod aan de IJssel, Nederrijn en Lek. Het verdeelwerk zal een deel van de afvoer door kunnen laten om de onderstaande functies te vervullen:

- borgen voor voldoende afvoer op de IJssel, Nederrijn en Lek en zoetwatermanagement in het noorden van het land bij lage afvoeren en maximaal garanderen van scheepvaart bij lage waterstanden;
- borgen voor voldoende waterstanden op de IJssel en Lek bij hoge afvoeren;
- hoge afvoeren over de Waal naar zee sturen.

2.3 Ontwerpkeuzes bij 5 m zeespiegelstijging (2200)

Op basis van de strategieën zijn in Tabel 2-1 de ontwerpkeuzes per locatie weergegeven.

Tabel 2-1 Uitgangspunten 5m zeespiegelstijging

Locatie	Strategie A1	Strategie A2	Strategie B1	Strategie B2
Schutsluizen en stormvloedkeringen RMM	Afsluiting Callandkanaal en Nieuwe Waterweg met groot sluizencomplex met een zeer grote zeesluis, grote zeesluis en 2 normale zeesluizen, afdammen Hartelkanaal bij Hoogvliet.		Nieuwe stormvloedkering Nieuwe Waterweg	Als A1/A2 met aanvullend binnenvaartsluis zuidkant Spui, binnenvaartsluizencomplexen zuidkant Dortse Kill en Benedenmerwede
Schutsluizen IJmuiden	Behoud huidige sluiscomplexen. Meestijden tot 2m zeespiegelstijging. Uitbouwen met nieuwe complexen zeewaarts voor >2m zeespiegelstijging. Scheiding binnenvaart/zeevaart om zoutlast te beperken.			
Schutsluizen en stormvloedkeringen Westerschelde	Afdammen met sluizencomplex (zeer grote zeesluis, grote zeesluis en 2 normale zeesluizen) (A1 huidig peil handhaven, A2 meestijden)		Stormvloedkering (Galveston achtige oplossing)	Geen afsluiting
Spuimiddelen Haringvliet	n.v.t.	Uitbreiden spuicapaciteit op Haringvliet met 500 meter extra spuumiddel.	Bestaande lengte spuumiddel handhaven (1000m).	Water afvoeren over Haringvliet met spuumiddel van 1.500m breedte.
Verdeelwerken	Gelijke afvoerverdeling	Gelijke afvoerverdeling	Gelijke afvoerverdeling	Beperken afvoer naar IJssel en Lek. Regelwerk op Panterdenschekop

2.4 Ontwerpkeuzes bij 2 m zeespiegelstijging (2200)

De kunstwerken die momenteel in Nederland worden gebouwd, zijn ontworpen op 1,5 m zeespiegelstijging. Verwacht wordt dat met beperkte versterkingsmaatregelen deze kunstwerken verhoogd kunnen worden zodat deze kunstwerken toegerust zijn om een halve meter extra te kunnen keren.

Verder zeespiegelstijging leidt tot het verder versterken van het zeefront. Binnen de diverse hackatons is de denklijn uitgewerkt dat complexen die tot 2 m kunnen keren gehandhaafd blijven. Voor deze keringen wordt een extra kunstwerk of kunstwerken gerealiseerd waardoor huidige inrichting gehandhaafd kan blijven. Het extra te bouwen kunstwerk kan dan toegerust worden op zeeschepen of coasters. De te behouden complexen kunnen afgewaardeerd worden tot binnenvaart of wellicht ook coasters. Door overslag plaats te vinden over de huidige complexen worden schutbewegingen tussen zout en zoet beperkt.

2.5 Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 5 m zeespiegelstijging (2200)

In onderstaande paragrafen zijn de bouwstenen voor schutsluizen, spuumiddelen, verdeelwerken en stormvloedkeringen nader geïllustreerd. Ongeacht de mate van zeespiegelstijging zullen de complexen een bepaalde afmeting op de kaart hebben die gedictieerd wordt door het gebruik van de constructies. De grootste verschillen tussen verschillende zeespiegelscenario's volgen zijn drempeldieptes, benodigde sterkte van keermiddelen, de bovenzijde van het maaiveld rondom de constructie en de inpassing in de omgeving.

Schutsluizen

Voor de schutsluizen wordt gebruik gemaakt van een aantal standaardconfiguraties zoals eerder al aangegeven, gebaseerd op sluizen die al in Nederland gerealiseerd zijn. Hiermee wordt ook de haalbaarheid aangetoond. Enkel de 'zeer grote' zeesluis heeft opgerekte afmetingen. De vergroting ten opzichte van de Nieuwe Zeesluis IJmuiden is beperkt en wordt daarmee haalbaar geacht.

Zeesluizen met groot verval en grote afmetingen zijn technisch haalbaar. Zo heeft de nieuwe Zeesluis Terneuzen een ontwerpverval van ca. 6,5 m bij extreem laag water op de Westerschelde. Het Panamakanaal overbrugt een hoogte van 26 m verdeeld over 3 sluizen. Dit geeft een te keren verval van bijna 9 m per sluis-hoofd.

Voor het ontwerp van binnenvaartcomplexen wordt verwezen naar de inrichting van de huidige Krammersluizencomplex en Zandkreekcomplex. Voor schutsluizen en keringen hangt de afmeting in grote mate af van het scheepvaartaanbod en type schepen. Eerder is aangegeven dat voor diverse scenario's het scheepvaartaanbod en de verziltingsproblematiek afgewogen moeten worden om te komen tot de juiste afmetingen van sluiscomplexen of doorvaartopeningen van keringen.

Afbeelding 2.8. Zandkreekcomplex (Bron: Cyclomedia)



Afbeelding 2.9. Krammersluizencomplex (Bron: Cyclomedia)

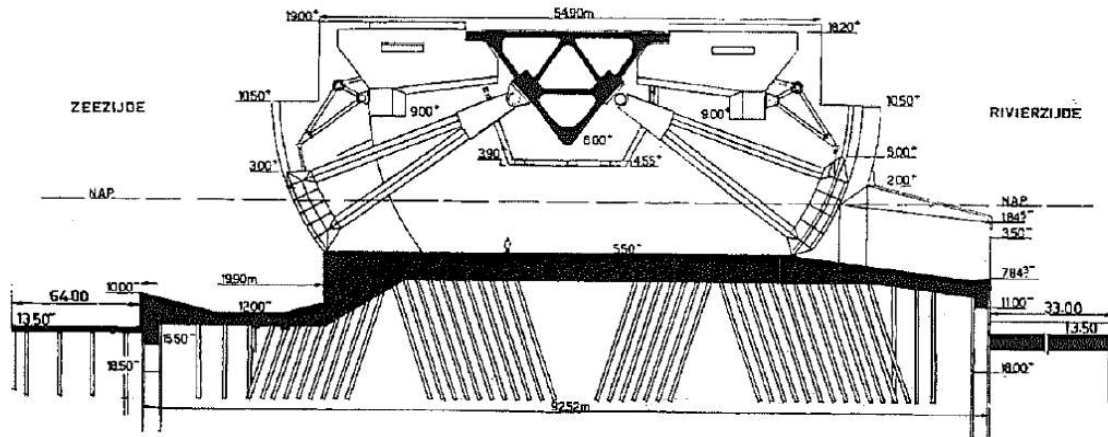


Spuimiddelen

Ter beoordeling van de haalbaarheid is op basis van de geometrische vormgeving van de Haringvlietsluizen een inschatting gemaakt van de te behalen spuicapaciteit. Een doorsnede van het een sluis is onderstaand weergegeven.

Vanaf 2018 functioneren de Haringvlietsluizen als stormvloedkering. Bij vloed gaan de sluisen op een 'kier' om het ecologisch functioneren van het Haringvliet, met name de vismigratie, te kunnen verbeteren. Door de kier ontstaat er namelijk een meer natuurlijke overgang tussen zoet en zout water. (Bron: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/haringvliet>)

Afbeelding 2.10. Doorsnede Haringvlietsluis



Afbeelding 2.11. Luchtfoto Stormvloedkering Haringvlietsluis.. 5 van de 17 spuiopeningen zichtbaar in uitsnede (Bron: Cyclomedia)



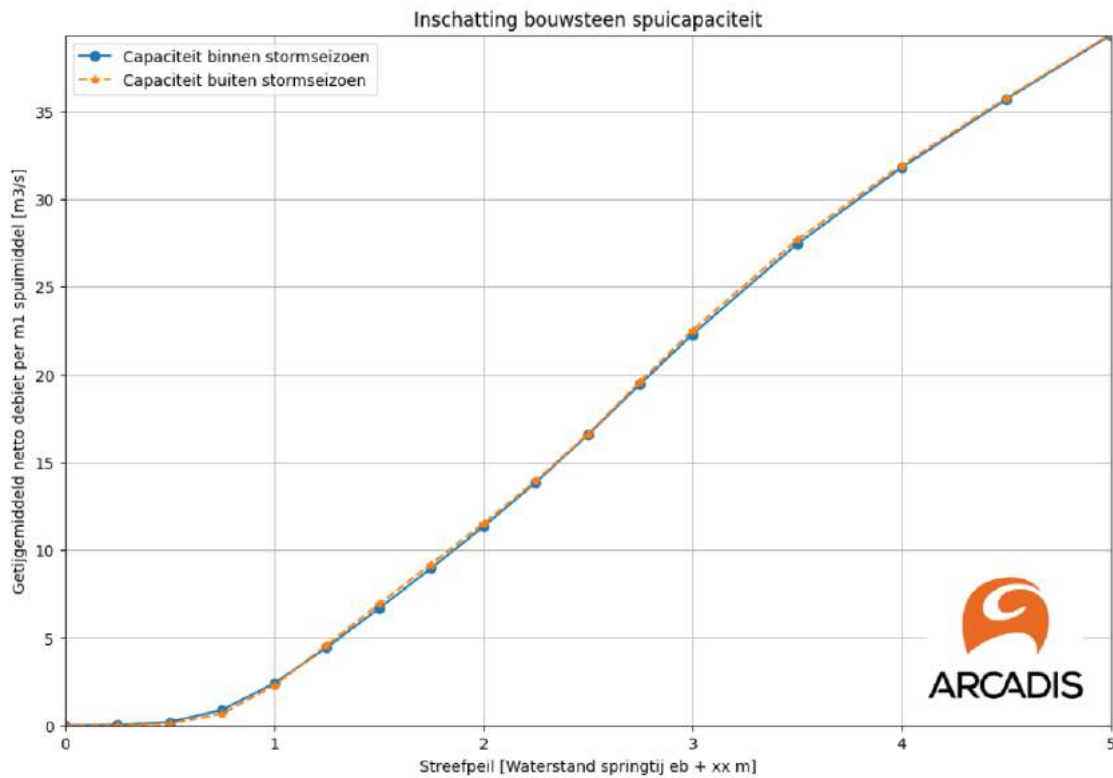
Het complex maakt gebruik van het verval (verschil in waterstand tussen 'rivierzijde' en 'zeezijde'), de drempeldiepte en de breedte van het spuimiddel. Voor het haringvlietcomplex is ca. 90 % van de lengte inzetbaar voor het spuien van water. 10% van de lengte bestaat uit tussenpijlers en landhoofden.

Hoe groter het verval hoe groter het te halen maximale debiet. Het huidig getijgemiddeld debiet bedraagt ca. 11.000 m³/s bij het huidige streefpeil. Tijdens de maximale ebwaterstand is dit debiet significant groter. Indien de waterstand op zee hoger staat dan in het Haringvliet kan er niet gespuid worden en is de kering gesloten.

In onderstaand afbeelding is het getijgemiddeld spuidebiet bepaald per strekkende meter spuimiddel. Op de horizontale as is de waterstand in het Haringvliet gegeven waarbij het streefpeil volgt uit de minimale

ebwaterstand vermeerderd met een verval. Op de verticale as is het gemiddeld netto spuidebiet per strekkende meter uitgezet. Bij een binnenpeil van NAP +0.6 m wordt aangesloten bij de huidige spuicapaciteit. Gegeven een springtij eb waterstand van NAP -1.450 m geeft dit een 2.05 m verschil tussen streefpeil en de minimale eb waterstand.

Afbeelding 2.12. Getijgemiddelde netto spuicapaciteit spuimiddel



Verdeelwerken

Voor het sturen van de afvoer is een regelbaar kunstwerk benodigd. Recent onderzoek wijst uit dat het aanpassen van het splitsingspunt zeer beperkt effect heeft.¹ Een referentie object dat ingezet kan worden als verdeelwerk is weergegeven de volgende afbeelding. Het ruimtebeslag volgt uit de breedte van de rivier waarin het object geplaatst zal worden. Te Pannerden bevindt zich momenteel een passief regelwerk in de uiterwaard. Indien deze locatie te Pannerden gekozen wordt voor een toekomstig regelwerk bedraagt de breedte tussen de primaire keringen ca. 600 m.

¹ Afvoerverdeling bij de Pannerdensche Kop: Een waterbouwkundige verkenning, TUDelft Bachelor eindproject; S. Rozenendaal 2023.

Afbeelding 2.13. Bovenaanzicht locatie verdeelwerk Pannerden



In onderstaand afbeelding is een grote stuw in de Zuid-Koreaanse Nakdong rivier weergegeven. Doormiddel van segmentschuijen kan de afvoer volledig doorgelaten, deels doorgelaten of volledig tegengehouden worden. Afhankelijk van de te keren hoogte in het rivierengebied kan voor deze vormgeving gekozen worden. Om bij hoge waterstanden de afvoer voldoende te kunnen keren kan aanvullend op het stuwontwerp de ruimte tussen de pylonen boven de drempels nader afgesloten worden zodat er tijdens lage afvoeren voldoende fijnregeling mogelijk is en bij hoge afvoeren voldoende kerende hoogte aanwezig is.

Afbeelding 2.14. Luchtfoto stuw in de Nakdong rivier



Afbeelding 2.15. Stuw in de Nakdong rivier, Zuid Korea



Stormvloedkeringen

Grote stormvloedkeringen zijn unieke objecten, eigenlijk allen prototypen. Ten tijde van de bouw van de Maeslantkering waren er verschillende concepten bedacht. Uiteindelijk heeft het huidige concept 'gewonnen'. Andere concepten hadden destijds ook potentie.

Afbeelding 2.16. Beoordelingsdocument van de prijsvraag voor de Maeslantkering



Het is de verwachting dat er de komende decennia nog een heel aantal stormvloedkeringen wereldwijd worden gebouwd waarvan enkele het formaat Maeslantkering danwel Oosterschelde kering zullen hebben. De meest concrete plannen zijn er in de Verenigde Staten om de Galveston Bay af te sluiten met een gigantische kering. Momenteel wordt gedacht dat die projecten haalbaar zijn waarmee ook aan kan worden getoond dat de opgave voor strategie B1 en B2 haalbaar zullen zijn.

De ervaringen met de Maeslantkering en mogelijk toekomstige stormvloedkeringen die gebouwd zullen worden, zullen ervoor zorgen dat dergelijke keringen betrouwbaarder worden.

2.6 Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 2 m zeespiegelstijging (2100)

Het ruimtebeslag per type object is vergelijkbaar met 5 m zeespiegelstijging. Bij een gelijke keuze voor ontwerpschepen, ontwerpdebieten voor spuien als de breedte van de rivier zijn de globale afmeting vergelijkbaar. Het beoogde gebruik dicteert het ontwerp. De te behalen capaciteiten of benodigde kolkafmetingen dicteren de afmeting van het object.

2.7 Uitvoering

Voor de realisatie van grootschalige waterbouwkundige kunstwerken is veel ruimte benodigd. In onderstaande afbeeldingen zijn de bouwkuipen van de Haringvliet spuisluisen en van de Nieuwe Sluis Terneuzen weergegeven. De fundering van de constructies ligt vaak dieper dan het aanwezige bodemniveau waardoor in de bouwkuip tot onder het fundatieniveau afgegraven dient te worden. Om tot dit niveau te komen dienen grootschalige grondwerken uitgevoerd te zijn in de vorm van taluds of damwandconstructies.

De constructies dienen veel kracht op te kunnen nemen. Om de grote vervallen op te kunnen nemen is gewapend en/of voorgespannen beton en staal benodigd. De volumes zijn te bepalen o.b.v. de grootte van de complexen, de schutkolken etc.

Aanvullend op de civiele constructie zijn bodem- en oeverbeschermingen benodigd. Deze bekledingen liggen over de volledige lengte van de keringen en/of spuumiddelen. Indien er onder hoog verval gespuid en/of genivelleerd wordt dient een bodembescherming voldoende ver doorgezet te zijn om stabiliteitsverlies van de civiele constructie te voorkomen.

Afbeelding 2.17. Droge bouwkuip Haringvliet. Bron: Beeldbank Rijkswaterstaat, Astado



Afbeelding 2.18. Droge bouwkuip Haringvliet. Bron: Beeldbank Rijkswaterstaat, Astado



Afbeelding 2.19. Bouwkuip sluis IJmuiden. Bron: <https://www.gww-bouw.nl/artikel/aanleg-bouwkuip-buitenhoofd-nieuwe-sluis-in-terneuzen-in-volle-gang/>



Afbeelding 2.20. Realisatie stuw Hagestein. Bron: Nationaal Archief, 2.24.01.04, 911-0494, licentie CC-BY-SA



2.8 Kosten

Onderstaand zijn per type kunstwerken de kosten ingeschat. De kosten volgen uit spoor II rapportage 'systeemanalyse waterveiligheid Harde waterkeringen kust'. De kosten uit spoor II bevatten 2 vervangingslagen naar 2200. Ofwel, voor 2100 zijn de helft van de kosten benodigd.

Schutsluizen

Gegeven de realisatiekosten van de Nieuwe Zeesluis IJmuiden en Terneuzen worden de kosten per grote sluis ingeschat op orde 1 miljard euro. Gegeven de grote impact van de algemene werkzaamheden wordt de differentiatie tussen 2 m en 5 m zeespiegelstijging als gering ingeschat. De grootste kosten worden gemaakt in de inrichting en de realisatie van de wanden, landhoofden en funderingen. Het laten toenemen van de kerende hoogte en verval zal kostenverhogend zijn maar niet leiden tot bijvoorbeeld verdubbeling of lineaire extrapolatie van de kosten.

In spoor II rapportage 'systeemanalyse waterveiligheid Harde waterkeringen kust' zijn in Bijlage B nominale cumulatieve kosten opgenomen. Voor zichtjaar 2200 tijdlijn 'Zeer Extreem' zijn kosten onderzocht voor 5,4m zeespiegelstijging. Voor de sluisen in complex IJmuiden zijn de kosten als volgt:

- Noordersluis: € 1.421.928.297;
- Middensluis: € 677.922.527;
- Zuidersluis: € 150.544.468;
- Kleine sluis: € 60.428.288.

Gegeven de investeringskosten voor de Nieuwe Zeesluis IJmuiden en Terneuzen van ca. 1 miljard kunnen o.b.v. deze kostenkennalen afhankelijk van het beoogde type sluiscomplex kosten per strategie ingeschat worden.

In spoor II rapportage 'systeemanalyse waterveiligheid Harde waterkeringen kust' zijn in bijlage B de nominale cumulatieve kosten opgenomen ter vervanging van de Volkeraksluisencomplex. De kosten bedragen ca 2 miljard euro.

- Volkeraksluis 1 en 2: € 752.964.280;
- Volkeraksluis 3: € 714.867.367;
- Volkerak jachtensluis € 197.963.269.

Spuisluizen

In spoor II rapportage 'Systeemanalyse waterveiligheid Rijn-Maasmonding en Rivierengebied' zijn de kosten voor zichtjaar 2200 tijdlijn zeer extreem per spuiopening voor het Haringvliet bepaald. Een vervanging van het Haringvlietcomplex is geraamd op 9 miljard euro (dit betreffen dus 2 vervangingsopgaven, een enkele vervanging is daarmee geraamd op 4,5 miljard euro).

Ter uitbereiding van de spuicapaciteit ligt het te reserveren bedrag een factor 1.5 hoger aangezien de spui-middelen over een breedte van 500 meter verbreed dienen te worden om de gewenste capaciteit te halen. De kosten zullen daarmee 13,5 miljard bedragen.

Stormvloedkeringen

In spoor II rapportage 'Systeemanalyse waterveiligheid Rijn-Maasmonding en Rivierengebied' zijn de kosten voor zichtjaar 2200 tijdlijn 'zeer extreem' voor diverse keringen bepaald. Onderstaand zijn voor enkele grote keringen de bedragen weergegeven.

- Kromme Nol Kering € 49.250.367;
- Maeslandtkering € 2.635.078.190;
- Hartelkering € 257.159.870;
- Hollandsche IJsselkering € 655.821.905.

Afhankelijk van het type kering en de grootte van de doorvaartopening van de kering kost een kering ca een half miljard voor binnenvaartschepen en/of coasters tot 2,5 miljard voor een Maeslantkeringtype.

Regelwerk

Eerder is in deze rapportage gesteld dat een groot regelwerk benodigd is om de afvoer op Pannerden te kunnen sturen. De afstand tussen de winterdijken is ca. 500 tot 600 m. Het afsluiten van deze opening zal vragen om een groot waterbouwkundig werk.

- een vergelijkbaar object betreft de Kromme Nol kering. Deze kering wordt gesloten bij hoog water in het rivierengebied en kent geen grote belastingen t.g.v. golven. Conform spoor II bedraagt de vervanging € 49.250.367. Met de kering wordt een opening van 60 meter afgesloten. Gegeven een benodigde lengte van 600 meter wordt uitgegaan van een 500 miljoen euro;
- voor de afsluiting van de Hollandsche IJssel is voorzien in 2 hefdeuren van elk ca 100 meter en schutsluizen. Conform spoor II bedragen de kosten 655 miljoen euro. Gegeven de te overbruggen afstand bij Pannerden zullen de kosten ca. 1 miljard bedragen.

Resumerend wordt ingeschat dat een regelwerk te Pannerden ca. 1 miljard euro zal bedragen.

Samenvattend

In onderstaande tabel is op hoofdlijnen van de grote kunstwerken een sommatie van de kosten gemaakt.

Tabel 2-2 Sommatie kosten op hoofdlijnen

	A1 aantal	mld€	A2 aantal	mld€	B1 aantal	mld€	B2 aantal	mld€
Zeer grote zeesluis	2	2	2	2	0	0	1	1
Grote zeesluis	3	3	3	3	1	1	2	2
Normale zeesluis	5	3,5	5	3,5	1	0,7	3	2,1
Binnenvaartsluis	0	0	0	0	0	0	1	0,7
Binnenvaartcomplex	0	0	0	0	0	0	2	4
Stormvloedkering	0	0	0	0	2	5	1	2,5
Spuimiddel	0	0	1500m	13,5	1000m	9	1500m	13,5
Regelwerk	0	0	0	0	0	0	1	1
Totaal		8,5		22		15,7		26,8

Voor de VKS2015 worden geen nieuwe kunstwerken gebouwd, maar huidige kunstwerken wel vervangen. Om een goede vergelijking te kunnen maken, worden die kosten wel in kaart gebracht. Het betreffen dan de volgende objecten:

- grote zeesluis (IJmuiden);
- 2 normale zeesluizen (een normale en kleine in IJmuiden);
- stormvloedkering (Maeslantkering);
- spuimiddel (1.000 m Haringvlietdam).

Totaal is dit 13,9 miljard euro voor de VKS2015 in 2200.

2.9 Ruimtebeslag

Ter bepaling van het ruimtebeslag wordt onderscheid gemaakt tussen 'lijnelementen' zoals spuimiddelen, verdeelwerken en stormvloedkeringen en 'puntobjecten' zoals sluiscomplexen.

De lijnelementen kenmerken zich als met een civiele constructie met een bodembescherming aan weerszijden. De civiele constructie is ca. 50 m breed (Haringvlietluiscomplex, Stevinssluisen). Afhankelijk van het operationele gebruik dient aan weerszijden een bodembescherming voorzien te zijn. Uitgegaan dient te worden van een bodembescherming van 100 tot 200 m waarachter een erosiekuil zich mag ontwikkelen. De

maximale erosiekuildiepte volgt uit de stabiliteitsrandvoorwaarden van het lijnelement als omliggende objecten of keringen.

De 'puntobjecten' zijn opgebouwd uit één of meer sluiskolken. Voor de sluisen wordt geput uit een aantal standaardconfiguraties voor sluisen. Te weten:

- zeer grote zeesluis (ZG), afmetingen bijvoorbeeld 550 m lang, 80 m breed, 26 m diepgang;
- grote zeesluis (G), afmetingen Panamakanaal/Terneuzen 427 x 55 x 18 m;
- normale zeesluis (M), afmetingen Middensluis IJmuiden 225 x 25 x 10 m;
- binnenvaart sluis (V), afmetingen Beatrixsluis 276 x 25 x 4 m;
- binnenvaartsluizencomplex (BC), afmetingen Volkeraksluizen: 3 kolken voor de beroepsvaart 330x24 m, 1 jachtensluis 135x16 m.

In Afbeelding 2.6 tot en met Afbeelding 2.14 zijn de locaties van objecten en de benodigde capaciteit indicatief weergegeven. Bij het Callandkanaal/Nieuwe Waterweg is een zeer grote zeesluis, een grote zeesluis en normale zeesluis voorzien. Uitgaande dat de sluisdeuren uitgevoerd worden als roldeuren dan dient de breedte minimaal 2 maal de kolkbreedte te bedragen. Uitgaande van overige installaties en onderdelen (omloopriolen, wegen, bediengebouwen, etc. wordt uitgegaan van 3 maal de kolkbreedte. De lengte van de objecten exclusief voorhavens en geleidewerken is ca. een factor 1.2 maal de kolk lengte. De effectief benodigde lengte hangt van de omgeving (mate van afschutting voor rivierafvoer of golven), de wensen (aantal wachtplaatsen/ligplaatsen) en overige onzekerheden. Deze dienen in een vervolgstudie per locatie uitgewerkt te zijn. Onderstaand is per type object het ruimtebeslag weergegeven:

Tabel 2-3 Ruimtebeslag sluiscomplexen

Codering	Omschrijving	Afmeting
1ZG, 1G, 2M	1 Zeer Grote zeesluis. Kolkafmeting 550m x 80m x 26m 1 Grote zeesluis. Kolkafmeting 427m x 55m x 18m 2 Middensluizen. Kolkafmeting 225m x 25m x 10m	Benodigde lengte: $550 \times 1.2 = 660\text{m}$ Benodigde breedte: $3 \times (80 + 55 + 25) = 480\text{m}$
1B	1 Binnenvaartsluis. 276m x 25m x 4m	Zie nieuwe kolk Beatrixsluis Benodigde lengte: $276 \times 1.2 = 330$, Benodigde breedte: $3 * 25 = 75\text{m}$
1BC	1 Binnenvaart sluiscomplex	Zie Volkerakcomplex Benodigde lengte: 500m Benodigde breedte: 250m

2.10 Kennisvragen

Om een stap te maken in het concept, keringen, spuismiddelen alsook de concretiseren van de zoutindringing en optimalisatie van het aantal sluisen, drempelhoogte, scheepvaartklasse, etc. kan de volgende werkwijze worden gevolgd:

- afweging aantal schuttingen, splitsing van zeegaande en binnenvaartschepen, grootte van sluiscomplexen en de bepaling van een acceptabele zoutlast. Enig voorwerk is tijdens de uitwerking van deze bouwsteen opgesteld door Deltares¹. Hieruit volgt dat zeesluizen voor zeevaart in de nieuwe waterweg niet haalbaar zijn bij beperkte afvoer. Alternatief hierop is de toepassing van binnenvaartsluizen verder

¹ Verkenning sluisen-zout-afvoer RMM 4 okt 2023 – Voorlopig.pdf
Deltares oktober 2023, Otto Weiler.

stroomopwaarts. Binnenvaartsluizen in de Oude Maas en Nieuwe Maas is mogelijk t.o.v. acceptabel zout-bezwaar waarbij deze sluizen voorzien worden met bellen schermen en selectieve onttrekking. Nadere kwantificering van de zoutlast en afweging t.o.v. de functie scheepvaart dient uitgewerkt te zijn:

- elke schutting zal leiden tot enige mate van indringing van zout water. Zoutindringing kan beperkt worden door het inzetten van zoetwaterbekkens, bellenschermen, afpompen van zoutwater en de kolk schutten met zoet water. Daarnaast kan voorzien worden in goederenoverslag van zout naar zoet waarbij er niet meer geschut wordt. Nadere uitwerking en afweging dient uitgewerkt te zijn om een beter gevoel voor het probleem van zoutindringing te krijgen;
- bepaal hoeveel schepen/type er op verschillende locaties voorbijkomen. Voor de Rotterdamse haven wordt dit uitvoerig bijgehouden en het Havenbedrijf bezit deze gegevens;
- bepaal hierbij welke afmetingen/aantal sluizen horen daarbij;
- ontwikkel een simpele tool om het verband tussen maximale saliniteit en schutbewegingen te onderzoeken. Op basis van de maximale saliniteit dienen varianten onderzocht te zijn t.b.v. de bepaling van het aantal schuttingen;
- reken een aantal varianten met afnemende intensiteit/diepgang (bijvoorbeeld de helft minder, 90 % minder, 99 % minder);
- link dit aan de beschikbaarheid van zoetwater en optimaliseer eventueel verder;
- hoe ziet de inpassing van de voorgestelde complexen locatie-specifiek eruit? Tot welke uitdagingen leidt een potentiële inpassingsopgave?
- in welke mate geeft een te behalen faalkans restricties aan de vormgeving van een complex (grootte van doorvaartopening, beweegbare onderdelen, etc.);
- nadere ontwikkeling van kosten voor spuisluisen o.b.v. de kosten voor een constructie kuub per seconde getijgemiddeld spuidebiet;
- afweging optimalisatie spuicapaciteit; extra spuicapaciteit zoeken in de breedte van het doorlaatmiddel of in de hoogte van de waterkolom;
- het afsluiten van de Westerschelde is een significante ingreep, technische lijkt dit haalbaar, maar geldt dit voor andere invalshoeken ook?

3

BOUWSTEEN: GEMALEN EN POMPEN

Auteur: Jan Kollen, Anton de Fockert

3.1 Inleiding

Nederland ligt voor **26 %** beneden zeeniveau. Dit deel wordt bemalen en beschermd door dijken en duinen. Van het land dat boven zeeniveau ligt wordt ook nog 29 % beschermd door dijken. In totaal is 55 % van Nederland kwetsbaar voor overstromingen. Als gevolg van zeespiegelstijging zal dit percentage in de komende jaren alleen maar toenemen.

Een hoger zeeniveau brengt risico's mee voor een laaggelegen land als Nederland. In de eerste plaats gaat het om kustveiligheid waar Nederland beschermd wordt door duinen en dijken. Een bijkomend risico is het afwateren van de grote rivieren naar zee. Nu gebeurt dat grotendeels met uitwateringsluizen doordat het rivierwaterpeil hoger is dan het zeeniveau, maar als de zeespiegel gaat stijgen, dan zal de waterscheiding naar het binnenland verplaatsen. Dit zal dan een grote investering vergen voor het ophogen van de rivierdijken en extra pompcapaciteit om de polders droog te houden. Om de waterscheiding tussen rivieren en zee op de locatie van de huidige kustlijn te houden zal het rivierwater naar zee moeten worden gepompt. Om al het rivierwater in Nederland naar zee te kunnen verpompen zijn zeer grote pompstations nodig. Dit hoofdstuk gaat verder in op de uitdagingen van het pompen van het rivierwater voor het lange termijn scenario "*beschermen gesloten*".

Naast het spuien van water naar zee wordt er in Nederland ook veel water gepompt om de polders droog te houden. Dit gebeurt op zeer grote schaal in Nederland en vindt al plaats sinds de middeleeuwen. Door bodemdaling en zeespiegelstijging wordt de noodzaak voor pompen in de komende jaren groter.

Historisch perspectief

In de dertiende eeuw ontstonden in Nederland de eerste polders¹. Deze waterden nog af via spuisluisjes. Als dat niet lukte werd ook water afgevoerd met hoosvaten, handmolens, tredmolens en paardmolens. De eerste melding van een windwatermolen was in 1408. Deze werd pas breder ingezet vanaf midden 15e eeuw. In 1856 werd het eerste stoomgemaal Mastenbroek in gebruik genomen. Vanaf ca. 1910 werd stoom vervangen door diesel en elektriciteit. De laatste decennia is aandrijving met elektriciteit gangbaar.

In de afgelopen eeuwen zijn er steeds meer nieuwe gemalen gebouwd omdat onder vrij-verval spuien of afvoeren steeds moeilijker wordt. Enkele voorbeelden van boezemgemalen die nodig zijn omdat er niet meer voldoende kan worden gespuid zijn:

Tabel 3.1. Bestaande boezemgemalen omdat er anders onvoldoende kan worden gespuid

Gemaal	Boezem	Jaar installatie	afvoerdebiet
Rijksgemaal IJmuiden) ¹ ,	Noordzeekanaal	1975	220 m ³ /s (4*30 m ³ /s en 2* 50 m ³ /s)
Cees Mantel	Schermerboezem	2016	33,3 m ³ /s (4 * 8,33 m ³ /s)
Helsdeur	Schermerboezem	1972	50 m ³ /s (2*10 m ³ /s en 2 * 15 m ³ /s)
Woudagemaal	Friese boezem	1915	66,7 m ³ /s, (4 * 16,7 m ³ /s)#
Koning Willem Alexander Kat- wijk	Rijnland boezem	1954	94 m ³ /s (4* 23,5 m ³ /s)

Enkele voorbeelden van gemalen die nodig zijn omdat het gebied niet meer voldoende onder vrij verval kan afstromen zijn:

Tabel 3.2. Voorbeelden gemalen die nodig zijn omdat onder vrij verval afstromen niet meer mogelijk was

Gemaal	Boezem	Jaar installatie	afvoerdebiet
De Waterwolf	Electraboezem	1920	75 m ³ /s (4*16,7 m ³ /s en 1*8,33 m ³ /s)
Zedemuden	Meppelerdiep / drentse beken	1973	127,5 m ³ /s (3* 42,5 m ³ /s)
Afsluitdijk Den Oever (in voorbereiding)	IJsselmeer	2025	300 m ³ /s (6* 50 m ³ /s)

3.2 Kenmerkende locaties binnen de strategieën

Het lage deel van Nederland wordt bemalen. Hierbij wordt het water uit de polders uiteindelijk naar de grote rivieren gepompt. De grote rivieren stromen nu nog grotendeels vrijuit naar zee tussen die lage delen door. Bij hoge zeewaterstanden stagneert de vrije afvoer naar zee, dan worden de rivierafvoeren gedurende enkele dagen opgevangen in de bekkens bij de uitstroomzijde van de rivieren. Dat zijn het IJsselmeer en de Zuidwestelijke delta (Haringvliet). De vrije afstroom via spuien is voor het IJsselmeergebied al een probleem, omdat er alleen bij laag water op zee gespuid kan worden. Om deze reden wordt daar op dit moment een gemaal gebouwd in de Afsluitdijk bij Den Oever van 300 m³/s om het water dat vanuit de IJssel komt te allen tijde af te kunnen voeren naar zee.

De afvoer van water in het IJsselmeer is door de nieuwe pompstations in de Afsluitdijk voor de meeste scenario's gegarandeerd. Dit geldt echter nog niet voor de afvoer van grote rivieren die tot op heden nog onder vrij verval uitstromen bij het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg. Bij een zeespiegel stijging van 2 en 5,4 m is vrije afvoer van de grote rivieren in de huidige situatie (nagenoeg) niet meer mogelijk en moet het water ook worden weggepompt

Op hoofdlijnen zijn er binnen het concept beschermen dan twee oplossingsrichtingen/ strategieën om Nederland naar de toekomst te vrijwaren van overstromingen:

¹ De Nederlandse Gemalen Stichting.

- A Gesloten zeefront en water verpompen (van de grote rivieren);
- B Open zeefront met rivieren met zeer hoge rivierdijken en het water via de rivieren vrij laten uitstromen.

Voor beide strategieën geldt een nuance. Het is waarschijnlijk niet mogelijk is om tijdens extreme stormvloed, wanneer het water op zee nog verder gestegen is, een vrije afvoer te kunnen garanderen. Daarnaast kan een tijdelijke berging ervoor zorgen dat er geen extreem grote pompcapaciteit geïnstalleerd hoeft te worden voor een extreem hoge rivierafvoer. In beide strategieën is dan tijdelijke berging van water in de Zuidwestelijke Delta nodig.

In de strategieën zijn de in onderstaande tabel aangegeven pompcapaciteiten nodig. De geïnstalleerde capaciteit moet de maximaal aangegeven debieten kunnen verpompen.

Tabel 3.3. Benodigde pompdebieten

Strategie		2 m ZSS		5,4 m ZSS	
		gemiddeld	maximaal	gemiddeld	maximaal
A1	Pomplocatie	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
	Afvoer Rijn, Maas en Schelde	2.000	5.000	2.000	16.000 + 600 voor de Schelde
A2	Afvoer Rijn, Maas en Schelde	0	3.000	0	3.000
B1	Afvoer Rijn, Maas		3.000		3.000
B2	Debiet Lek pompen thv Euro-poortkering	420	2500 (30) ¹⁾	420	2500 (30) ¹⁾

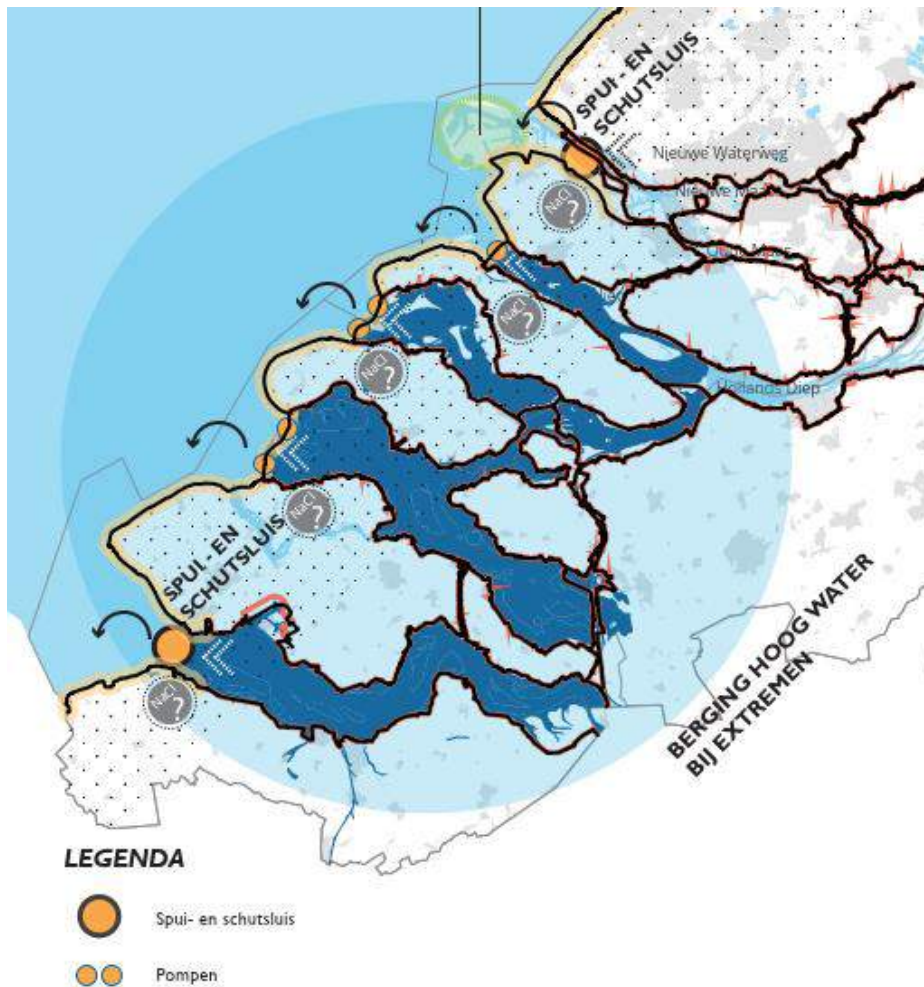
¹⁾ Hier is nog verondersteld dat de afvoerverdeling richting Nederrijn ook bij extreme afvoeren intact blijft. Als dat water ook grotendeels via de Waal wordt afgevoerd is minder pompcapaciteit nodig. Dan kan volstaan worden met minimaal 30 m³/s (t.b.v. scheepvaart en zoetwatervoorziening).

In alle strategieën komen daarnaast aanvullende gemalen op 1) het ARK/NZK met additionele capaciteit circa 100 m³/s en 2) benodigde gemaalcapaciteit op het IJsselmeer van ± 1.250 m³/s (met mogelijk een factor 3 hoger als men verdere dijkversterking wil voorkomen). In het voorliggende hoofdstuk wordt gefocust op de gemalen in de Rijnmaasmonding, omdat daar de grootste capaciteit benodigd is en omdat daar onderscheid zit tussen de verschillende strategieën.

Voor de strategieën ‘gesloten’ zijn de locaties aan de huidige kustlijn in de kunstwerken van het Deltawerken kenmerkende locaties voor pompsystemen. Hierbij is een waterbouwkundige constructie nodig tussen de binnenwateren en de zee. Voor het Haringvliet, de Grevelingen en de Oosterschelde zijn hier reeds bestaande waterbouwkundige constructies. Bij de toegang naar de Westerschelde en de Nieuwe Waterweg zijn, in verband met de achterliggende havens Antwerpen en Rotterdam, nog geen waterbouwkundige constructies beschikbaar. Voor de strategieën ‘open’ zijn de kenmerkende locaties voor pompstations daar waar de boezems en de polders uitwateren op de grote rivieren.

In de volgende afbeelding zijn de mogelijke locaties van de pompen en spui en schutwerken aangegeven op de kaart van de Zuidwestelijke Delta. Hierbij zijn de waterbouwkundige constructies van de Deltawerken logische locaties voor grootschalige pompsystemen bij het strategie ‘gesloten’. De pompen kunnen ook naast de spui en schutwerken geplaatst worden.

Afbeelding 3.1. Mogelijke locaties van pompen en spui en schutwerken



Voor de strategieën A1 en A2 'beschermen-gesloten' kan de keuze worden gemaakt hoe de pompcapaciteit verdeeld moet worden over de Zuidwestelijke Delta. De vraag is of alle benodigde pompcapaciteit op één locatie moet worden geïnstalleerd of juist verdeeld over de locaties (Nieuwe Waterweg, Haringvliet, Grevelingen, Oosterschelde). In het geval van een laag rivierwaterpeil en pompstations aan de kust zal de zuidwestelijke Delta volledig worden afgesloten met dammen. Het is dus mogelijk om door de positionering van de pompsystemen de rivierafvoer te concentreren op een locatie of te verdelen over de verschillende zeearmen. Hieronder een aantal perspectieven voor de verdeling van pompsystemen:

1. Waterkwaliteitsperspectief

Doordat de zeearmen worden afgesloten ontstaan er grote bekkens in de Zuidwestelijke Delta zoals het Grevelingen reeds is. Vanuit het strategie gesloten zijn er een aantal consequenties voor de waterkwaliteit in deze bekkens:

- de pompen worden in kunstwerken in de Oosterschelde, de Grevelingen, het Haringvliet en de Nieuwe waterweg geïnstalleerd. Dat betekent dat het rivierwater door deze 4 armen wordt afgevoerd. Al deze rivierarmen zullen daarmee zoet worden;
- de pompen worden alleen in het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg geïnstalleerd en er komen geen pompen in de Grevelingen en Oosterschelde. Dit zorgt ervoor dat de zout-zoet verdeling blijft zoals hij nu is. Door regenval zal de waterkwaliteit in het Grevelingen en Oosterschelde veranderen;
- er worden pompen in het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg geïnstalleerd en er worden inlaatwerken in de Oosterschelde en de Grevelingen gemaakt en pompen in de Westerschelde. De pompen in het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg zorgen ervoor dat het zoete rivierwater wordt afgevoerd. De inlaatwerken in de Grevelingen en Oosterschelde en de pompen in de Westerschelde zorgen ervoor dat het zoute water in beide bekkens wordt ververs (zie Afbeelding 3.2). Voor een optimale doorstroming van de Oosterschelde moet een extra kanaal nabij Rilland worden gegraven. Het is ook mogelijk

om het kanaal bij Wemeldinge-Hansweert te gebruiken, maar dit zorgt waarschijnlijk voor een stagnerend bekken in de Oostelijke Oosterschelde.

Afbeelding 3.2. Zout en zoet water in de zuidwestelijke delta



2. Waterveiligheidsperspectief

Vanuit het perspectief van het afvoeren van het rivierwater zijn er een aantal mogelijkheden die hieronder zijn beschreven:

- d. indien de pompcapaciteit wordt verdeeld over de verschillende kunstwerken van de Deltawerken, dan zorgen de pompen ervoor dat er zoet water door alle bekkens van de Zuidwestelijke Delta kan worden geleid. Hiermee wordt het risico voor pompstations gespreid, omdat er meerdere pompstations met meerdere elektriciteitsvoorzieningen nodig zijn;
- e. vanuit oogpunt van efficiency is het juist wenselijk om de pompen op één locatie te concentreren. Dat heeft schaalvoordelen en zorgt voor een concentratie van de onderhoudsinspanning bij één complex. Het Haringvliet zou hiervoor bij uitstek geschikt zijn;
- f. er zou ook een verdeling kunnen worden gemaakt waarbij de afvoer wordt verdeeld tussen het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg, zodat eventueel intredend zout (eventueel met behulp van een Selectieve Onttrekking) weggespoeld kan worden;
- g. het is ook mogelijk om een combinatie van de bovenstaande opties toe te passen. Hierbij wordt de piekcapaciteit die nodig is voor een extreme rivierafvoer op één locatie gepositioneerd en wordt de dagelijkse afvoer over de verschillende zeearmen verdeeld (combinatie van de mogelijkheden zoals hierboven beschreven bij a. en b.).

Gezien de bovenstaande afwegingen en de interactie met waterkwaliteit is het niet mogelijk om de beste keuze te adviseren. De keuze moet gebaseerd worden op onder andere beschikbaarheid van ruimte, beschikbaarheid van elektriciteit, gewenste waterkwaliteit en kosten.

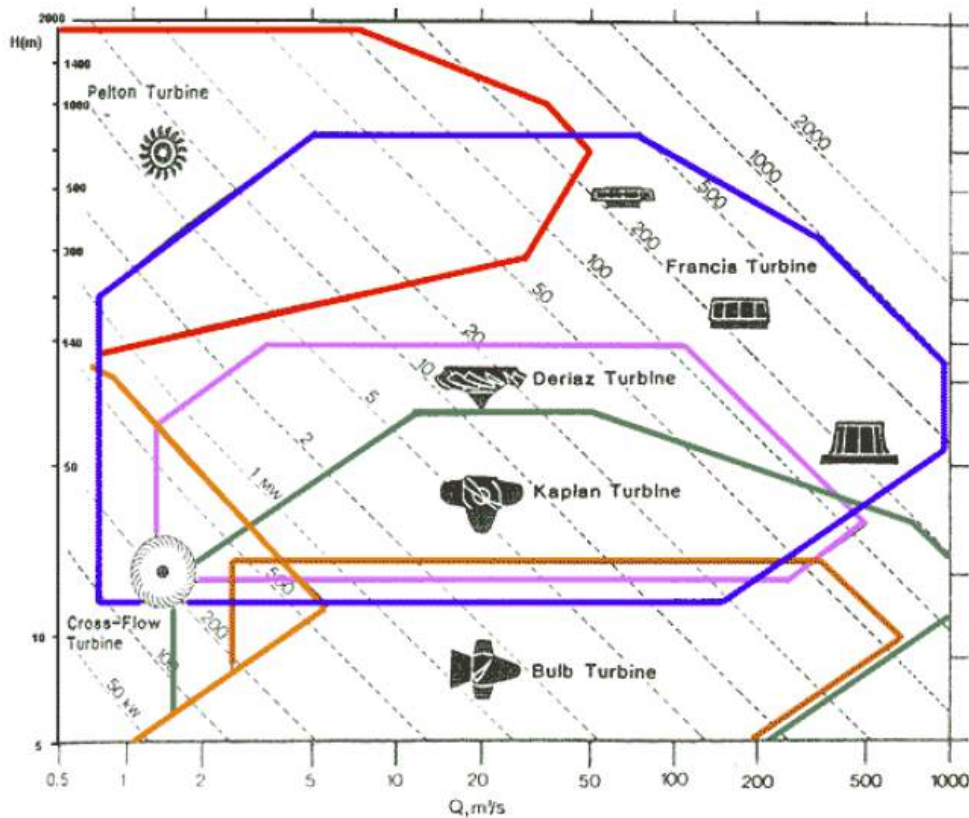
3.3 Pomptypen

Er zijn verschillende typen pompen die kunnen worden toegepast voor uitwatering. De belangrijkste typen die worden toegepast zijn vijzels en waaierpompen. Binnen de waaierpompen zijn met name de axiaalpompen geschikt voor de afvoer van water. Kenmerkend voor axiaalpompen is het grote debiet en de beperkte

opvoerhoogte van dit type pomp. Waaiers van axiaalpompen zien eruit als propellers. Door de beperkte opvoerhoogte worden axiaalpompen vaak toegepast in de Nederlandse pompsystemen en gemalen.

De pompen met de grootste afvoercapaciteit ter wereld kunnen zo'n 50 m³/s verpompen. Dit soort (axiaal) pompen worden onder andere toegepast bij het pompstation in New Orleans en in het gemaal bij IJmuiden. Naast pompen hebben turbines ook de mogelijkheid om water te verpompen. Zo kunnen bulbturbines zowel pompen als turbineren. Dit soort turbines worden onder andere toegepast in de getijdenenergie. Zo zijn er in de getijdencentrales in La Rance (Frankrijk) en Shiwa (Zuid Korea) bulbturbines toegepast met een afvoercapaciteit van zo'n 250 - 300 m³/s. Dit soort turbines zijn daarmee ook groter dan de axiaalpompen zoals hierboven beschreven. De diameter van van de waaier van zo'n bulbturbine is dan ook zo'n 7 m, terwijl dit voor een axiaalpomp 'slechts' 3m is. Zie ook de onderstaande afbeeldingen.

Afbeelding 3.3. Range van inzetbaarheid van verschillende turbine types¹



¹ Haas, Rachael; Hiebert, Michael; Hoatson E 2014 Francis-Turbines, Fundamentals and Everything Else You Didn't Know that You Wanted To Know Wasserkraftmaschinen 62–119.



Afbeelding 3.4. Bulbturbine getijdenplant Shiwa in Zuid Korea (bron: Andritz Hydro)



Afbeelding 3.5. Foto pomp IJmuiden (bron: Fairbank Nijhuis – Pentair)

Visvriendelijkheid is een belangrijke functie van pompen en zeker als er pompen nodig zijn voor dagelijks gebruik waarbij het volledige rivierdebiet wordt afgevoerd. Het grootste deel van de pompen is op dit moment niet visvriendelijk. Vijzelpompen hebben als voordeel dat ze wel visvriendelijk zijn. Er bestaan echter nog geen vijzelpompen die grote debieten kunnen verpompen (grootste vijzelpompen die bestaan kunnen zo'n 5-10 m³/s verpompen). Om axiaalpompen visvriendelijk te maken zijn vaak aanpassingen in de rotatiesnelheid en de vorm van de pompwaaier nodig. Dit heeft effect op de grootte van de pomp. Het is voor een pompleverancier vaak goed mogelijk om pompen voor een belangrijk deel visvriendelijk te maken. Om pompen echter 100 % visvriendelijk te maken vereist vaak grotere aanpassingen. Hier moet in het ontwerp rekening mee worden gehouden.

Voor drie pomptypes zijn de kenmerken in tabel 3-1 weergegeven. Benadrukt wordt dat de kenmerken indicatief zijn weergegeven. Met voetnoten zijn enkele opmerkingen over de pomptypes weergegeven.

Tabel 3-4 Enkele kenmerken van de pomptypes

Type pomp	Debiet per m keringlengte	ruimtegebruik	Flexibele positionering (1)		Ervaring in praktijk	onderhoudbaarheid	Pomphuis ruimte per pomp (breedte over kruin)	energiegebruik	Vismigratie (2)	Uitstroom (3)	Instroom (4)	Zeezoogdieren (5)	Gevoeligheid golfaanval
Axiaal	4.2 m ³ /s/m*	0	++		ja	++	45 m	idem	+	idem	idem	n.v.t.	weinig
Bulb turbine (Kaplan)	20 m ³ /s/m**	+	++		ja	+	60 m	idem	+	idem	idem	n.v.t.	nauwelijks
Archimedes	1-2 m ³ /s/m***	0	0		Alleen kleinschalig	+	30 à 45 m	idem	++	-	idem	n.v.t.	wel

*: ref: gemaal IJmuiden / New Orleans

** : ref: getijdenturbine Shiwa / La Rance

***: ref: York, rivier Ousse

- ’) Waarschijnlijk is hier meer ruimte voor nodig.
- (1) het gemak waarmee gekozen kan worden om de pomp horizontaal of verticaal te plaatsen
- (2) Hier moet de pomp (of pompturbine) op worden gedimensioneerd. Dit heeft een licht effect op het ontwerp.
- (3) gewoon een ontwerpogave. De uitstroom van de vijzel is een aandachtspunt. Deze moet verticaal meebewegen met de buitenwaterstand. Bovendien ligt de uitstroom van de vijzel boven water, waardoor hij gevoelig is voor golfaanvallen. (4) De instrooming moet zo gestroomlijnd mogelijk worden gemaakt. Voor de pomp moet het pomphuis worden geoptimaliseerd voor de pompfunctie. Dit is een ontwerpogave.
- (5) Bij Oosterschelde is gedurende 2 jaar gemeten of zeezoogdieren gewond zijn geraakt door een vrij opgehangen turbine. Dit is niet geconstateerd(ref: <https://doi.org/10.18174/470409>). Het is onduidelijk of dit ook het geval is voor axiaal pompen / bulbturbines.

3.4 Ruimtebeslag

In Tabel 3-5 is de breedte van de verschillende zeearmen gegeven. In dit hoofdstuk wordt verder onderzocht of de waterbouwkundige constructies met de pompen in deze zeearmen passen.

Tabel 3-5 Lengte van de dammen zeezijde

Locatie	Lengte dam zeezijde (km) (inclusief eventueel spuiwerk)
Rijn Maas monding ^{’)}	2,5 (Haringvlietdam) 0.58 (Nieuwe Waterweg)
Grevelingen	5,7 (Brouwersdam)
Volkerak	n.v.t.
Oosterschelde	7,8 (Oosterschelddedam)
Totaal	16

^{’)} bron: *stysteemanalyse en waterveiligheid en rijnmond, spoor II*

De Westerschelde is op het smalste punt 4,1 km breed. Omdat er een relatief klein debiet uit de Schelde komt wat via de Westerschelde moet worden afgevoerd is hier waarschijnlijk voldoende ruimte aanwezig. De focus van dit hoofdstuk ligt daarom op de Rijn-Maasmonding.

Afbeelding 3.6. Kaart Deltawerken (<https://www.hollandlandofwater.com/nl/deltawerken/>)



Het ruimtebeslag wordt sterk bepaald door het type pomp en het pompvermogen. Het ruimtebeslag van pompen is grofweg ingeschat op:

Axialpompen	4.2 m ³ /s per m' keringlengte (ref: IJmuiden)
Bulb turbines (Kaplan) ¹	20 m ³ /s per m' keringlengte (ref: Shiwa / la Rance)
Archimedes pompen	ca. 1-2 m ³ /s per m' keringlengte (geen bestaande referentieprojecten bekend)

Axialpompen en Bulb turbines (Kaplan) zijn al eerder toegepast in vergelijkbare situaties. Van Archimedes pompen is dat niet bekend. De grootste Archimedes pomp ter wereld heeft een maximaal debiet van 11.5m³/s. Bovendien kan dit type pomp niet omgaan met tegendruk. Doordat de waterstand bij een stormopzet niet bekend zijn, is deze constructie dus minder robuust (Er zou een speciale constructies nodig om de in en uitstroom te laten meebewegen met de wisselende waterstanden. Dergelijke constructies zijn echter kwetsbaar). Om deze reden is deze pompoplossing niet verder beschouwd in dit onderzoeks-stadium. In Tabel 3-6 zijn is een inschatting gemaakt van het ruimtebeslag van de pomptypes voor de verschillende strategieën. Hierbij is voor de axialpompen de bulbturbines weergegeven wat de benodigde breedte is van de pompconstructie (excl. Landhoofden, spuisluizen, etc) en hoeveel pompen er nodig zouden zijn om het debiet te kunnen verpompen. Uit Tabel 3-6 blijkt het dat het is niet mogelijk om de maximale afvoer van 16.000 m³/s alleen door het Haringvliet af te voeren met behulp van axiaal pompen. Dit is wel mogelijk met bulbturbines. Voor alle andere strategieën is het wel mogelijk om het water door via het Haringvliet af te voeren

¹ Een bulb turbine is een type Kaplan turbine voor een laag verval. De stroming bij een bulb turbine is vaak axiaal (horizontale instroom en uitstroom), terwijl het bij een Kaplan turbine vaak verticaal instroomt en de turbine na een uitlaatbocht horizontaal verlaat.

Tabel 3-6 Ruimtebeslag en het aantal pompen voor de verschillende strategieën voor de axiaalpompen en de bulbturbines. Bij de pomptypen is ook aangegeven of het mogelijk is om al die pompen in een zeearm (HV: haringvliet, GR: Grevelingen, OS: Oosterschelde) te plaatsen

Strategie	Pomp-capaciteit	beschrijving	Ruimtebeslag ¹⁾ Axiaal			Ruimtebeslag ¹⁾ Bulbturbine		
			Breedte (bij 4.2 m ³ /s per m')	Aantal	Zeearmen	Breedte (bij 20 m ³ /s per m')	Aantal	Zeearmen
A1	16.000 m ³ /s (5,4 m ZSS)	nagenoeg volledige rivier(piek)afvoer verpompen	3.810 m'	320	HV + GR''	800 m'	53	HV
A1	5.000 m ³ /s (2 m ZSS)	nagenoeg volledige rivier(piek)afvoer verpompen	1.190 m'	100	HV	250 m'	17	HV
A2	3.000 m ³ /s (beide)	spui plus rivierpiekafvoer verpompen	715 m'	60	HV	150 m'	10	HV
B1	3.000 m ³ /s (beide)	vrije spui, alleen bij extreme afvoeren ook pompen	715 m'	60	HV	150 m'	10	HV
B2	2.500 m ³ /s (beide)	Alleen afvoer Deltapolder	595 m'	50	NWW	125 m'	8	NWW
B2	30 m ³ /s (+ ??)	Alleen doorvoer Nederrijn plus aangesloten polders	7 m' (+?)	1	NWW	1,5 m' (+?)	-	NWW

Let op! Dit is sec het ruimtebeslag wat de pompen vragen. Andere bijkomende randvoorwaarden leiden vaak tot een groter ruimtebeslag. Dit kan maximaal een factor 2 groter zijn.

¹⁾ exclusief benodigde overcapaciteit van ca. 10 %, dus ca. 10 % meer ruimtebeslag

²⁾ in dit geval wordt er zoet water door het zoute Grevelingen afgevoerd. Dit is waarschijnlijk vanuit waterkwaliteitsoogpunt onwenselijk.

Als de beschikbare ruimte (zie Tabel 3-5) vergeleken wordt met de benodigde ruimte blijkt dat inpassing in de dam van de zeearm mogelijk is. Bovendien blijkt dat Bulb turbine/pompen verreweg het minste ruimtebeslag hebben. Dat betekent ook dat de omvang van gemalen met Bulb turbine/pompen het kleinst zijn. De gemalen zullen dan ook naar verwachting voordeliger zijn. Overigens kunnen axiaalpompen ook verder worden opgeschaald, waardoor ze vergelijkbaar worden met Bulb / Kaplan pompen (turbines). Voor de verdere uitwerking wordt uitgegaan van Bulb turbine/pompen.

3.5 Ontwerpkeuzes bij 5 m zeespiegelstijging (2200)

Verreweg de belangrijkste ontwerpkeuze is de noodzaak tot aanleg van gemaalcomplexen. Per strategie verschilt de benodigde capaciteit enorm. Deze zijn al in tabel 5-3 aangegeven.

Omdat de benodigde gemaalcapaciteiten groot zijn, heeft het de voorkeur om van bulb-turbines uit te gaan, deze combineren een groot pompcapaciteit met een relatief gering ruimtebeslag. Door dat relatief geringe ruimtebeslag is het pompcomplex beter inpasbaar en kunnen de civiele kosten enigszins beperkt blijven.

3.6 Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 5 m zeespiegelstijging (2200)

In de voorgaande paragraaf is ingegaan op het ruimtebeslag van de pompsystemen die nodig zijn. De pompsystemen kunnen in de Nieuwe Waterweg en in de zeearmen in Zeeland worden gebouwd. Het is mogelijk om deze constructies in of nabij de huidige constructies van de Deltawerken te bouwen. In de onderstaande paragraaf wordt verder ingegaan op de keuze voor de constructie in de Nieuwe Waterweg en in het Haringvliet.

Spuien versus pompen

De meest efficiënte manier om het rivierwater af te voeren is door het water te spuien (orde 5-10 keer efficiënter dan pompen voor een vergelijkbare grootte van de constructie). Dit kan alleen als het rivierpeil hoger is dan de zeewaterstand. Een hoge rivierwaterstand heeft echter als nadeel dat het steeds moeilijker is om de polders uit te wateren naar de rivier en omdat de polderpompsystemen hier niet op zijn ingericht.

In dit rapport wordt er daarom vanuit gegaan dat er tijdens normale afvoer niet gespuid kan worden omdat het niet wenselijk is dat de rivierwaterstand te veel stijgt (strategie A1). Tijdens een hoogwatergolf op de rivier van enkele dagen kan de rivierwaterstand wel stijgen, waardoor er in dit geval gespuid zou kunnen worden. De verschillende mogelijkheden zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 3.7. Aanpak bij verschillende waterstanden

Scenario	waterstand -zee	waterstand-rivier	Aanpak
	Zee	Zee	
Stormvloed	Hoog	Hoog	Pompen
Stormvloed + Hoge rivierafvoer	Hoog	Hoog	Spuien / Pompen*
Hoge rivierafvoer	Laag	Laag	Spuien
Normale operatie	Laag	Laag	Spuien / Pompen*

Tijdens een storm en een hoge rivierafvoer zou het mogelijk kunnen zijn om de waterstand binnendijks gereguleerd te laten stijgen, zodat spuien mogelijk is en het pompen beperkt blijft. Bij een stormvloed op zee is dit niet mogelijk en is pompen de enige optie.

Benodigd aantal pompen

In paragraaf 5 is een overzicht gegeven van het ruimtebeslag en het aantal pompen dat benodigd is bij de verschillende strategieën. In deze paragraaf wordt er verder ingegaan op het gebruik van bulbturbines, omdat deze turbines het kleinste ruimtebeslag hebben. Dit soort turbines is goed bruikbaar voor lage vervallen. Het ontwerp van een gemaal met een bulbturbine/pompen is voor de scenario's van 2 m en 5,4 m ZSS vergelijkbaar. Alleen het aantal te installeren pompen verschilt, omdat de af te voeren debieten hoger zijn bij 5,4m ZSS (Tabel 3-8). Dat maakt uitbreidbaarheid goed mogelijk mits er voldoende ruimte is voor plaatsing van extra pompen. Hier wordt uitgegaan van bulb turbine/pompen met een capaciteit van 300 m³/s. Per pomp is een inlaatbreedte van ca. 15 m nodig.

Tabel 3-8 Benodigd aantal pompen en inlaatbreedte per strategie

strategie	2 m ZSS	Aantal pompen	Inlaat breedte	5,4 m ZSS	Aantal pompen	Inlaat breedte

strategie	2 m ZSS	Aantal pompen	Inlaat breedte	5,4 m ZSS	Aantal pompen	Inlaat breedte
A1	5.000	17 (19)	255 (285)	15.500	53 (59)	810 (890)
A2	3000	10 (11)	150 (165)	3.000	10 (11)	150 (165)
B1	3000	10 (11)	150 (165)	3.000	10 (11)	150 (165)
B2	2.500	9 (10)	135 (150)	2.500	9 (10)	135 (150)
B2	30 - 100	1 (2)	15 (30)	30 - 100	1 (2)	15 (30)

Vanwege onderhoud en eventuele uitval is het nodig om ca. 10% meer pompen te installeren. Dit getal staat tussen haakjes in Tabel 3-8.

Uitwatering Haringvliet

Omdat de maximale afvoer van de Rijn Maasmonding mogelijk is via het Haringvliet, wordt er verder gekeken naar een pompstation van 16.000 m³/s in het Haringvliet (strategie A1). Om de maximale afvoer via het Haringvliet te verpompen is er een derde van de breedte van de Haringvliet nodig voor het pompstation. Naast het pompstation is het waarschijnlijk ook wenselijk om een aantal spuisluizen te installeren, zodat er bij een hoge binnenwaterstand gespuid kan worden. De waterbouwkundige constructie moet over de gehele breedte van het Haringvliet worden aangelegd. Door de grootte van de pompturbines is het wenselijk om deze verdiept aan te leggen, zodat ze volledig onder water staan op het moment dat ze in operatie moeten worden genomen. Het is belangrijk dat de bestaande kering geen blokkade vormt voor de stroming boven of benedenstrooms van het pompstation. Het moet verder worden onderzocht of de nieuwe pompconstructies kunnen worden samengevoegd met de huidige stormvloedkeringen.

Het is mogelijk om de getijdenlagune van het concept van Delta21 te combineren met uitwateringssluizen aan het Haringvliet. Hierbij zou de getijdenlagune tijdens normale rivierenafvoer worden afgesloten van het Haringvliet waardoor het gebruikt kan worden voor energieopslag. Tijdens extreme afvoeren kan het water dan via een overlaat door de getijdenlagune stromen waarna het door de pompturbines wordt weggepompt. Dat betekent dat de maximale pompturbinecapaciteit aan de zeezijde in de lagune moet worden geplaatst (zie Afbeelding 3.7). Het voordeel van deze combinatie is dat de pompturbines regelmatig in bedrijf zijn waardoor ze minder storingsgevoelig zijn. Dit idee is in de onderstaande afbeelding verder geschetst:

Afbeelding 3.7. Combinatie van pompturbines en de getijdenlagune van het Delta21 concept



Hieronder zijn een aantal referentieontwerpen gegeven voor de constructie van het pomphuis voor het Haringvliet.

A) Referentie: Brouwersdam

Afbeelding 3.8. Doorlaatmiddel in Brouwersdam voor herintroductie getij (bron: Sweco RWS, onderzijde is zeezijde)



In Afbeelding 3.8 is een recent ontworpen doorlaatmiddel in de Brouwersdam geschetst (2022). Dit ontwerp kan indicatief als referentie dienen. In dit doorlaatmiddel zitten dubbele schuiven. Uiteraard moet voor een gemaal met pompen later een ander ontwerp worden gemaakt. Hier dient het alleen als indicatie. Dit doorlaatmiddel bestaat uit 11 openingen van elk 14,3 m breed (dagmaat tussen de betonnen wanden). Dit stemt overeen met de benodigde breedte van een pomp van 300 m³/s. De breedte van het gehele doorlaatmiddel is ca. 220 m. Dat is inclusief de ca. 5 m brede tussenwanden en eindwanden. De drempel ligt op NAP -6,0 m. De in Tabel 3-8 genoemde inlaatbreedte moeten ook nog de breedtes van de landhoofden worden opgeteld.

B) Referentie Sihwa dam met getijde turbine

Als voorbeeld voor een getijdenstation met zowel turbinepompen en spuisluizen zijn hieronder enkele plaatjes van de waterbouwkundige constructie van de getijdencentrale van Shiwa (Zuid Korea) gegeven.

Afbeelding 3.9. Satellietbeeld van de Siwa getijdencentrale (https://en.wikipedia.org/wiki/Sihwa_Lake_Tidal_Power_Station)

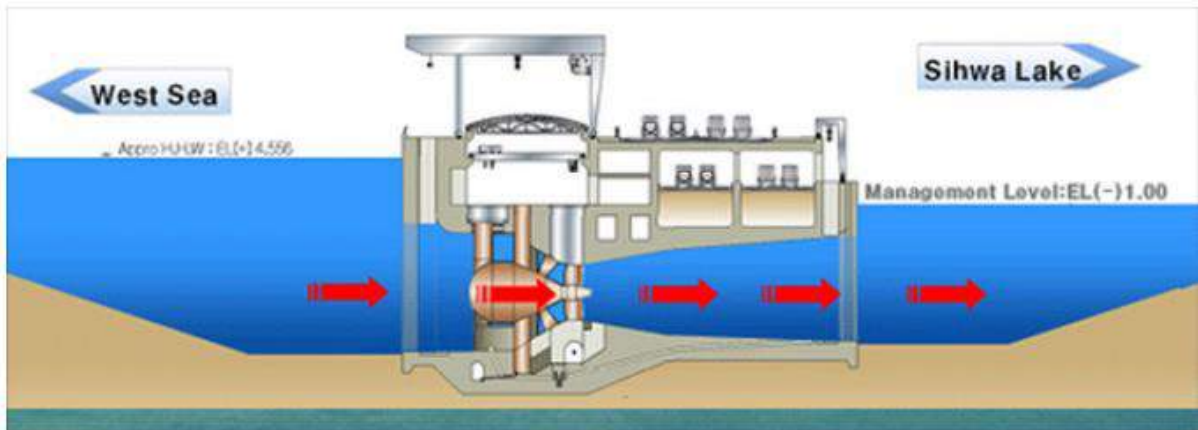


In Zuid-Korea zijn in de Sihwa dam, die het 43 km² grote estuarium afsluit, 10 bulbturbines en 8 sluizen gebouwd om de waterkwaliteit in het lagoon te verbeteren. Deze turbines hebben een vermogen van 25,4 MW per stuk. Het totale vermogen is 254 MW. De turbines functioneren bij een gemiddelde getij amplitude van 5,6 m en een springtij van 7,8 m. Het ruimtebeslag over de kruin gemeten is 200 m'. Het debiet van de turbines is zo'n 480 m³/s per turbine wat in het geval van Sihwa neerkomt op zo'n 25 m³/s per m'. Het geheel is gebouwd in 2011 en heeft US\$ 560 miljoen gekost. Dat is overigens inclusief de naastgelegen spuilsuizen. De koers was destijds Eur/ US \$ = 1,35 dus het koste destijds ca. 730 M€¹.

¹ <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/sihwa-tidal-power-plant>

Afbeelding 3.10. Doorsnede Sihwa dam

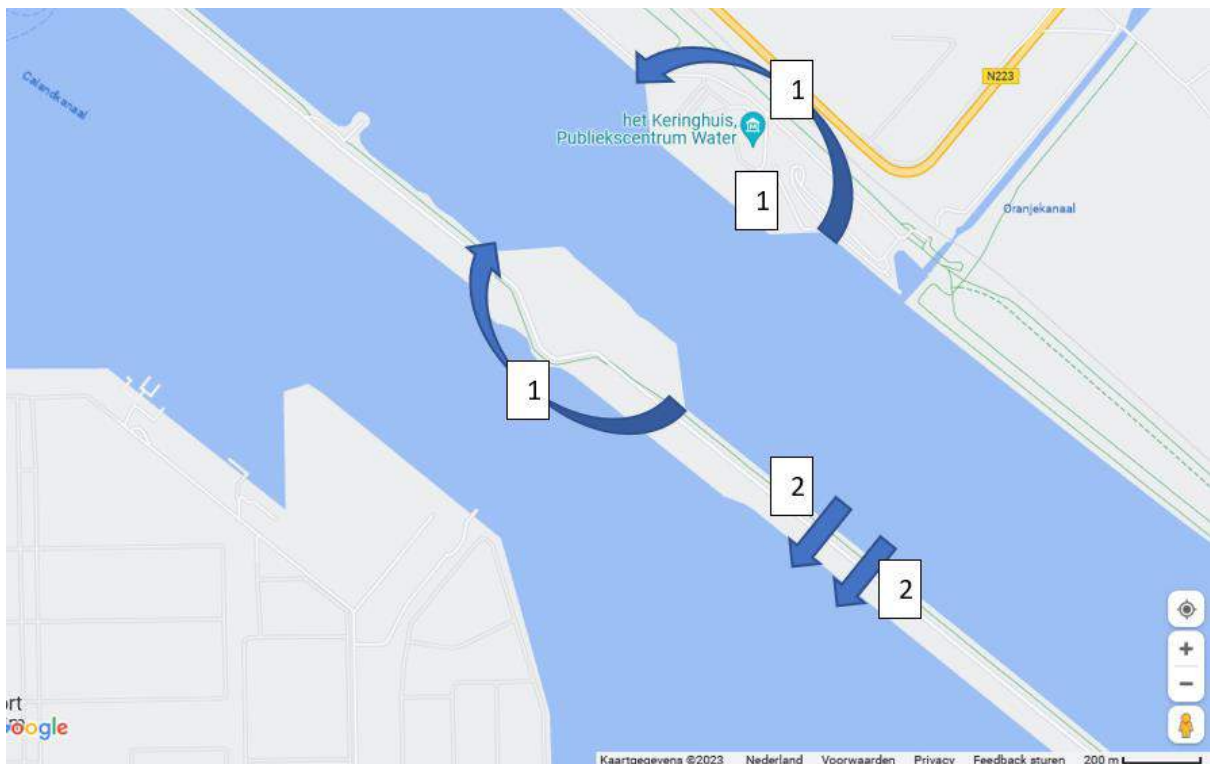
Generation System



Uitwatering Nieuwe Waterweg

In de Nieuwe Waterweg kan gekozen worden voor een pompsysteem in een nieuw te bouwen constructie of in een (dubbele) bypass constructies (1, vergelijkbaar met waterkrachtcentrales bij Maurik en Lith). Deze dubbele bypass wordt dan alleen in het werk gesteld als er hoog water op zee is en de Maaslandkering gesloten is (strategie B1). Een andere optie (2) is om pompen op de dam zetten tussen Nieuwe Waterweg en Calandkanaal.

Afbeelding 3.11. Oplossingsrichtingen Nieuwe Waterweg



Referentie: Bypass systeem bij vizierstuwen Maurik

De waterkrachtcentrale bij Maurik is naast de bestaande rivierloop in de Nederrijn geplaatst. Bij normale operatie zijn de vizierstuwen gesloten en wordt het grootste deel van het rivierwater door de waterkrachtcentrale geleid om energie op te wekken. De instroom en de uitstroom zijn aangesloten op de rivier.

Afbeelding 3.12. Satellietbeeld van de waterkrachtcentrale bij Maurik in de Nederrijn. De gele stippellijn laat de normale rivierloop zien. De waterkrachtcentrale is buiten de normale rivierloop geplaatst



3.7 Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 2 m zeespiegelstijging (2100)

In het vorige hoofdstuk is geschetst hoe een pompcomplex kan worden ingepast. In principe maakt het voor een pompcomplex weinig uit of het water 2 of 5,4 m moet worden opgepompt. Het verschil zit namelijk in de benodigde vermogens voor de pomp en minder in de grootte van pomp of pompcomplex.

Essentieel is wel het moment waarop moet worden overgestapt van spuien naar pompen. Dat verschilt voor de strategieën. Bij 2 m zeespiegelstijging kan nog steeds een fors deel van het rivierwater worden gespuid. Maar ook voor strategie A2 en B2 is bij 5,4 m zeespiegelstijging nog uitgegaan van een groot deel van de rivierafvoer spuien. In die strategieën moeten de rivierdijken wel zeer fors verhoogd worden om dat te kunnen blijven doen.

3.8 Uitvoering

Het gehele werk kan in een bouwput worden uitgevoerd. In Afbeelding 3.13 staat een uitvoeringsmoment van de getijde centrale in de Sihwa dam. Andere uitvoeringswijzen zijn ook mogelijk, bijvoorbeeld het afzinken van elementen. Voor andere voorbeelden van uitvoering zie ook de bijlage over schut- en spuisluizen e.d.

Afbeelding 3.13. Uitvoeringsmoment van de getijdencentrale in de Sihwa dam



Restlevensduur van onderdelen (uiteraard sterk afhankelijk van ontwerpen) is ca.:

- civiel 50 – 100 jaar;
- mechanisch 25 jaar;
- elektrisch 10 jaar.

3.9 Energievraag en -voorziening

Dit hoofdstuk beschrijft de benodigde elektriciteitsvoorziening voor de pompen. Voor kleine vermogens zou de elektra uit het bestaande elektriciteitsnet gehaald kunnen worden. Bij grotere vermogens dient een aparte energievoorziening beschikbaar te zijn. Omdat het hier gaat om kritieke infrastructuur is het van belang om meerdere elektriciteitsvoorzieningen te gebruiken (denk aan elektriciteitscentrales, batterijen, groene energie) om het risico op het uitvallen van elektriciteit tijdens een hoge rivierafvoer te beperken.

In de onderstaande tabellen zijn de vermogens en energieverbruiken voor de verschillende scenario's berekend.

Benodigd Vermogen

Het benodigd vermogen is berekend voor de situatie met 2 m en 5.4 m zeespiegelstijging. Hierbij is het piekvermogen gegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 3.9. Benodigd vermogen

strategie	2 m ZSS	piek	5,4 m ZSS	piek
A1	5.000	140	16.000	1.121
A2	3.000	84	3.000	227
B1	3.000	84	3.000	227
B2	2.500	70	2.500	189
B2	30 -100	1-3	30 - 100	3-9

Het huidige productie vermogen is in Nederland 31.500 MW. Bij tekorten wordt vermogen geïmporteerd. Grote windturbines op zee leveren ca. 10 MW piekvermogen. Dus 20 à 100 windturbines kunnen voldoende energie leveren om de piekafvoer weg te pompen. Hierbij wordt wel opgemerkt dat het voldoende hard moet waaien, wat vaak het geval is in extreme situaties) en mits het niet te hard waait en de turbines worden stilgezet (N.B. dit is slechts toegevoegd voor de beeldvorming, voor een zo essentieel onderdeel in de Nederlandse veiligheid moeten altijd meerdere back-ups beschikbaar zijn voor de energievoorziening). Bij stormvloed, dus bij extra verhoogde waterstand op zee is extra vermogen nodig (lineair met extra opvoerhoogte).

Let op: dit gaat alleen om de vermogens die nodig zijn om de 'rivieren' te verpompen. De nu al bestaande polders zullen het water ook naar een grotere hoogte moeten gaan afvoeren. Die extra vermogens zijn niet beschouwd.

Elektriciteitsgebruik

Het jaarlijkse elektriciteitsverbruik wordt het sterkst bepaald door de gemiddelde afvoer, omdat de piekafvoeren vaak maar enkele dagen voorkomen terwijl de gemiddelde afvoer elke dag optreedt. In de onderstaande tabel is de elektriciteitsbehoefte en een bijbehorende elektriciteitsprijs gegeven op basis van een kWh prijs van 0,07 € (groothandelsprijs 2030 volgens de Klimaat en Energieverkenning 2022).

Tabel 3.10. Elektriciteitsgebruik

strategie	2 m ZSS	normaal	Elektrici- teit per dag	Kosten per jaar	5,4 m ZSS	normaal	Elektrici- teit per dag	Kosten per jaar
	m ³ /s	MW	MWh	M€	m ³ /s	MW	MWh	M€
A1	2000	56	1345	34	2000	151	3633	93
A2	2000	56	1345	34	2000	151	3633	93
B1	2000	56	1345	34	2000	151	3622	93
B2	420	12	283	7	420	32	763	19
B2	30 - 100	1-3	24-70	1-2	30 -100	3-9	65-195	2-4

Zoals te zien is in de tabel zijn elektriciteitskosten om het rivier water te verpompen bij een zeespiegelstijging van 5.4 m onder de 100M€.

De geschiedenis herhaalt zich

In de 16e eeuw werden op initiatief van de molenmaker en waterbouwkundige Jan Adriaanszoon Leeghwater verschillende plassen in Noord Holland drooggelegd. Hij deed dit door middel van molens die aangedreven werden door wind. Door middel van de droogmakerijken kon men extra polders ontginnen en kon de waterwolf getemd worden. Dit was ook het geval bij de Haarlemmermeer. Deze werd uiteindelijk 2 eeuwen later leeggepompt door pompstations die werden aangedreven door stoomkracht.

Bij een stijgende zeespiegel dient er zich een nieuwe waterwolf aan. Ditmaal is het de rivierafvoer die niet afgevoerd kan worden via vrij verval. Door middel van grote pompen die worden aangedreven door wind-energie kan ook deze waterwolf getemd kan worden.

3.10 Kosten

De kosten van de pompinstallaties zijn zeer indicatief geraamd. Als basis is een recente raming van een doorlaatmiddel van de Brouwersdam gebruikt. De kosten daarvan zijn geëxtrapoleerd naar de omvang van de verschillende strategieën. Aan de raming zijn de kosten van de schuiven en pompen toegevoegd. Daarbij is verondersteld dat de verhouding tussen civiel en schuiven/mechanisch/elektrisch 1 op 1 is. De raming van de Brouwersdam is dus simpelweg verdubbeld.

Om de kosten te bepalen zijn verder de volgende aannames gedaan:

- onderhoudspercentage als vast percentage van totale investering (3% per jaar);
- vervanging civiel 100 jaar;
- vervanging schuiven 100 jaar;
- vervanging mechanisch 50 jaar;
- vervanging elektrisch 25 jaar;
- bovenstaand is haalbaar mits regelmatig onderhoud schuiven (om de ca. 20 jaar eruit);
- mits grootschalige revisies pompen om de 20 jaar;
- er is geen rente meegenomen.

Gerekend is vanaf 2050. Tot 2100 dus 50 jaar en tot 2200 dus 150 jaar.

Onderstaande tabel geeft de investeringskosten tot 2100.

Afbeelding 3.14. Kosten tot het jaar 2100

strategie	2 m ZSS	Civiel	Schuiven	Mechanisch	Elektrisch	Totaal SME	Totaal investering	Vervanging	Onderhoud	Totale jaarkosten	Totale kosten tot 2100	Totale kosten tot 2100
levensduur (jaar)		100	100	50	25			50		50		
aanleg en vervangingen in 50 jaar		1,5	1,5	2	3							
	m3/s	M€	M€	M€	M€	M€	M€	M€/jaar	M€/jaar	M€/jaar	M€	Miljard €
			40%	40%	20%	100%	afgerond		3%			
A1	5.000	958	383,2	383	192	958	2000	67	60	127	5000	5
A2	3.000	568	227,2	227	114	568	1200	40	36	76	3000	3
B1	3.000	568	227,2	227	114	568	1200	40	36	76	3000	3
B2	2500	529	211,6	212	106	529	1050	37	31,5	69	2625	3
B2	30-100	150	60	60	30	150	300	11	9	20	750	1

In de laatste kolom staat de som van de investeringskosten, vervangingskosten en onderhoudskosten over de periode 2050 – 2100.

Over de periode 2050 – 2100 moet rekening gehouden worden met de volgende energiekosten.

prijs elektrisch 0,07 € / kWh ref KEV 2022

Afbeelding 3.15 geeft een overzicht van de elektriciteitskosten tot 2100.

Afbeelding 3.15. Elektriciteitskosten

strategie	gemiddelde afvoer	2 m	jaarkosten	Kosten tot 2100
	m3/s	MWh/dag	euro/jaar	Miljard euro
A1	2000	1345	€ 34.364.750	1,7
A2	2000	1345	€ 34.364.750	1,7
B1	2000	1345	€ 34.364.750	1,7
B2	429	283	€ 7.230.650	0,4
B2	100	66	€ 1.685.466	0,1

Onderstaande tabel geeft de investeringskosten tussen 2100 en 2200. De kosten tot 2100 dienen daarbij te worden opgeteld om de totale kosten tot 2200 te verkrijgen.

Afbeelding 3.16. Kosten tussen 2100 en 2200

strategie	5,4 m ZSS	civiel	Schuiven	Mechanisch	Elektrisch	Totaal SME	Totaal investering	Vervanging	Onderhoud	Jaarkosten	Totale kosten tot 2200	Totale kosten tot 2200
levensduur (jaar)		100	100	50	25			100		100		
aanleg en vervangingen in 150 jaar		2	2	3	5							
	m3/s	M€	M€	M€	M€	M€	M€	M€	M€	M€	M€	Miljard €
			40%	40%	20%	100%	afgerond		3.0%			
A1	15,500	2323	929.2	929	465	2323	4500	116	135	251	18000	18
A2	3,000	568	227.2	227	114	568	1200	28	36	64	4800	5
B1	3,000	568	227.2	227	114	568	1200	28	36	64	4800	5
B2	2500	529	211.6	212	106	529	1050	26	31.5	58	4200	4
B2	30 - 100	150	60	60	30	150	300	8	9	17	1200	1

In de laatste kolom staat de som van de investeringskosten, vervangingskosten en onderhoudskosten over de periode 2100-2100.

Over de periode 2100-2200 moet rekening gehouden worden met de volgende energiekosten.

Afbeelding 3.17. Elektriciteitskosten tussen 2100 en 2200

strategie	gemiddelde afvoer	5,4 m	jaarkosten	Kosten tot 2200
	m3/s	MWh/dag		Miljard euro
A1	2000	3633	€ 92,823,150	9.3
A2	2000	3633	€ 92,823,150	9.3
B1	2000	3633	€ 92,823,150	9.3
B2	420	763	€ 19,494,650	1.9

De kosten in het jaar 2200 bij 5,4m zeespiegelstijging worden verkregen door de kosten tussen 2050-2100 en de kosten tussen 2100 en 2200 bij elkaar op te tellen.

In deze raming is voornamelijk verondersteld dat alle pompen op één locatie worden geplaatst. Dat betekent dat maar één keer rekening is gehouden met zijwanden en in- en uit-stroom begeleiding. Voor elke locatie extra moeten deze extra worden toegevoegd. Dat is voor de grotere locaties in de zeearmdammen ca. 100 M€ per locatie extra.

Benadrukt wordt dat de raming zeer indicatief is. Toch verwachten we geen grotere afwijking dan ca. – 25 % of + 50 %. Bijkomende functionele eisen op gebied van infrastructuur, inpasbaarheid of ecologie kunnen nog wel tot fors hogere kosten leiden.

Om de hierboven gehanteerde raming enigszins te verifiëren is ook naar een paar andere vergelijkbare projecten gekeken. Bovenstaande raming komt neer op 400 M€ tot 1300 M€ per 100 MW vermogen.

Studie Spaargaren (mondelijke mededeling)

50 – 100 M€ per 100 m³/s pompcapaciteit.

Shiwa Tidal Power Plant (Zuid Korea)

560 M US\$ (2011) = 730 M€ (2011) voor 10 turbines met een gezamenlijk vermogen van 240 MW en 8 spuisluizen. Dus ca. 300 M€ / 100 MW prijspeil 2011. Stel index 1,3 dan, 400 M€ / 100 MW

Swansea Bay, Tidal Lagoon (Engeland, niet gebouwd)

1,8 Miljard € (2022) voor 16 turbines gezamenlijk 320 MW, 8 spuisluizen en bijbehorende dammen en golfbrekers.

Verdeeld over ca. 475M€ dammen/golfbrekers, 625 M€ Pompen en 700 M€ civiel.

Stel 1,3 Miljard voor pompen, sluisen en civiel, met 320 MW vermogen, dan is dat 410 M€ per 100 MW.

[Tidal Lagoon Swansea Bay - Wikipedia](#)

1,3 Miljard Engelse ponden, raming 2015 met koers 1 pond = 1,16 € en index 1,2 dan 1,8 Miljard €

3.11 Kennisvragen

- Bij een hoge rivierafvoer tijdens een hoogwatergolf gaat de waterstand aan de rivierzijde verder omhoog. Dit maakt het mogelijk om te spuien. Omdat spuien veel efficiënter is dan pompen is het wenselijk om in het ontwerp naast pompen ook spuisluizen op te nemen. Hierbij moet het ontwerp van de spuisluis worden afgeregeld op basis van de op te treden waterstanden aan de rivierzijde. Dit bepaald de hoogtes van de vloer en het dak van de spuiokers. Het is goed om de te verwachte waterstanden en mogelijke kansen op spuien in meer detail te onderzoeken. Bij hoge rivierafvoer (als het water net onder de dijkrand staat), is het water in bepaalde strategieën voldoende hoog aan de binnenzijde om te kunnen spuien (zeker bij het 2m scenario en waarschijnlijk ook bij het 5.4 m scenario).
- De hoeveelheid beschikbare / benodigde berging is al in een aparte beschouwing onderzocht. Als het maximale afvoerdebiet 16.000 m³/s is en het Haringvliet, Grevelingen en de Oosterschelde samen als berging neemt, kan het een paar dagen (dag of 3) een hoge afvoer bergen (water komt dan hoog tegen de dijken te staan, maar daar zijn dijken op ontworpen). Dit zorgt ervoor dat je minder pompcapaciteit nodig hebt en niet hoeft te ontwerpen op de maximale afvoer. In een later stadium moet onderzocht worden wat het optimum is.
- Tijdens een hoog waterafvoer van de rivieren kan het water worden weggepompt via een enkele zeearm (bv. Haringvliet), maar het kan ook worden verdeeld over meerdere zeearmen (bv: Haringvliet, Grevelingen en Oosterschelde). De laatste optie heeft grote invloed op de waterkwaliteit in de zoute zeearmen zoals het Grevelingen en de Oosterschelde. Deze zullen door een grote zoete instroom verzoeten. Vanuit ontwerpperspectief kunnen beide opties worden toegepast. Echter vanuit waterkwaliteits oogpunt kan er een voorkeur zijn voor een bepaalde variant. Het is daarom belangrijk om ecologen te betrekken in deze discussie.

- Zeespiegelstijging zorgt voor meer kweldruk. Indien in het scenario beschermen de waterstand aan de rivierzijde niet verder wordt verhoogd, dan zal de kweldruk vergroten. Door de inlaat van de pompturbines zo laag mogelijk te leggen, wordt er zoveel mogelijk kwel weer afgevoerd door de pompen.
- Tijdens een storm is de waterstand op zee hoger dan aan de rivierzijde. Er mag geen water lekken naar de zeezijde via de pompen of spuisluizen. De pompen en spuisluizen moeten dus afgesloten kunnen worden. In bulb turbines zijn vaak leischoppen aanwezig die de stroming beïnvloeden. Het moet onderzocht worden of deze leischoppen als ze volledig dicht worden gezet het lekverlies van zee naar de rivier kan beperken.
- De huidige waterbouwkundige constructies mogen geen obstakel vormen voor de aanstroming van de pompstations. Er kan verder worden onderzocht in hoeverre de bestaande waterbouwkundige constructies kunnen worden gebruikt in het ontwerp van de pompstations. Door opzet tijdens een storm wordt de waterstand aan de zeezijde hoger. Dit zorgt voor extra tegendruk en gaat extra pompenergie kosten. De krachten van de golven op de axiaalpompe en de bulbturbine zullen waarschijnlijk beperkt zijn door de hogere waterstand aan de zeezijde, terwijl de uitstroom diep in de waterkolom zit. Hierdoor kan tijdens een storm door gegaan worden met pompen.
- De opvoerhoogte (dus energievraag) is afhankelijk van binnenwaterstand en buitenwaterstand. Deze verandert door zeespiegelstijging (relatief langzaam), door afvoerverschillen van de rivieren, door getij en door extreem weer op de Noordzee. Bij het ontwerp van de gemalen moet daarmee rekening worden gehouden. Het is aan te raden om de civiele constructie (grote kostenpost) te ontwerpen voor zowel de ZZS van 2 m als die van 5,4 m.
- Wellicht verstandig om vanuit bedrijfszekerheid meerdere typen pompen/verschillende leveranciers te gaan gebruiken.
- Standaard is uitgegaan van tweezijdige schuiven (afsluitdeuren) voor het droogzetten van de pompkelder. Achter een pomp kan een terugslagklep worden geplaatst om retourstroming te voorkomen en bij bulbturbines worden de leischoppen vaak gebruikt om retourstroming te voorkomen.
- Terrorismegevoeligheid moet worden onderzocht.
- In strategie A1 '(5,4 m ZSS) moet veel water verpompt worden. De pompen moeten voldoende diep worden opgesteld, zodat er altijd voldoende waterdekking is bij de pompinlaat. De wateraanvoer naar de pompen moet hierin ook in detail worden onderzocht, zodat de pompen deze hoge capaciteiten kunnen halen.
- Er hoeven voor de pompfunctie geen elementen boven de kering uit te steken. De in- en uitstroom zit ook onder water en is daarmee niet zichtbaar. De constructie kan dus net als de huidige Deltawerken gebruikt worden voor een weg tussen de Zeeuwse Eilanden.
- Voor de kerende functie van de dam met pompen kan het wel nodig zijn om elementen toe te voegen die boven de dam uitsteken (bijv. schuiven die bij stormvloed dichtgezet worden).

4

BOUWSTEEN: (ZEE)DIJKEN EN DAMMEN

Auteur: Peter van der Scheer, Corstiaan van Dam, Johanna Bouma
met bijdragen van Beau Smit, Ton Botterhuis en Bas Kolen

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk richt zich op de impact van zeespiegelstijging op de dijken langs de kust en de rivieren. Daarbij maken we voor dijken langs de rivieren onderscheid tussen dijken in landelijk en stedelijk gebied en de dijken rondom estuaria, zoals bijvoorbeeld de Westerschelde.

De (verbindende) dammen tussen Zeeuwse eilanden en de Afsluitdijk vertonen grote gelijkenis met zeedijken qua uitbreidbaarheid. Daarom is in deze studie niet gekeken naar de versterkingsmogelijkheden van de dammen. Ten behoeve van de kosteninschatting om dammen aan te passen is gebruik gemaakt van de beschikbare kennis van bestaande projecten aan de dammen.

Voorliggend hoofdstuk beschouwt niet alle dijken van Nederland in detail. De aard en omvang van deze studie laat dat niet toe. Er is een aantal kenmerken locaties geïdentificeerd voor het in kaart brengen van de mogelijkheden tot versterking. Deze versterkingsmogelijkheden staan model voor de mogelijkheden elders in Nederland. Bij het ontwerp van de versterkingsmogelijkheden is een tweetrapstrategie gehanteerd. In eerste instantie is er gekeken naar de versterkingsopgave voor 2200 bij een zeespiegelstijging van 5,4m en daarnaast is gekeken naar de benodigde versterkingsopgave voor 2100 bij zeespiegelstijging van 2,0m. De versterkingsmogelijkheden zijn voor de afzonderlijke strategieën beschouwd.

In het ontwerpproces was waterveiligheid creëren het basisuitgangspunt. Daarbij is ook per locatie gekeken naar het zo goed mogelijk invullen van nevenfuncties als wonen en recreëren.

4.2 Kenmerkende locaties binnen de strategieën

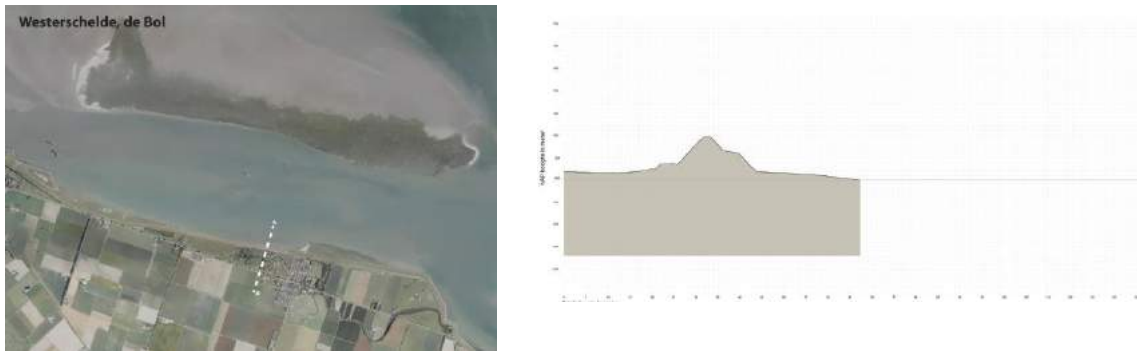
In deze paragraaf zijn een aantal kenmerkende locaties gekozen die zijn uitgewerkt voor de verschillende strategieën. Het doel van deze uitwerkingen zijn om het toekomstbeeld en de versterkingsopgave inzichtelijk te maken.

Zeedijken

De zeedijken in Nederland zijn gesitueerd langs de Waddenzee en in de provincie Zeeland. De waterkering langs de kust van Noord- en Zuid-Holland is beschouwd in het hoofdstuk zandige kust.

Voor het identificeren van de versterkingsmogelijkheden van de zeedijken ten gevolge van toekomstige zeespiegelstijging een locatie aan de Westerschelde beschouwd omdat hier de strategieën leiden tot veranderingen in de opgave. Het betreft locatie "De Bol" aan de zuidkust van de Westerschelde. Deze locatie is meegenomen, omdat het open of gesloten maken van de zeearmen significante impact heeft op de totale versterkingsscope.

Afbeelding 4.1. Situering beschouwde locatie nabij de De Bol incl. schematische voorstelling van de bestaande dijk



Voor de dijken langs de Waddenzeedijk is geen locatie uitgewerkt omdat hier strategieën niet van invloed zijn op de versterkingsopgave.

Rivierdijken

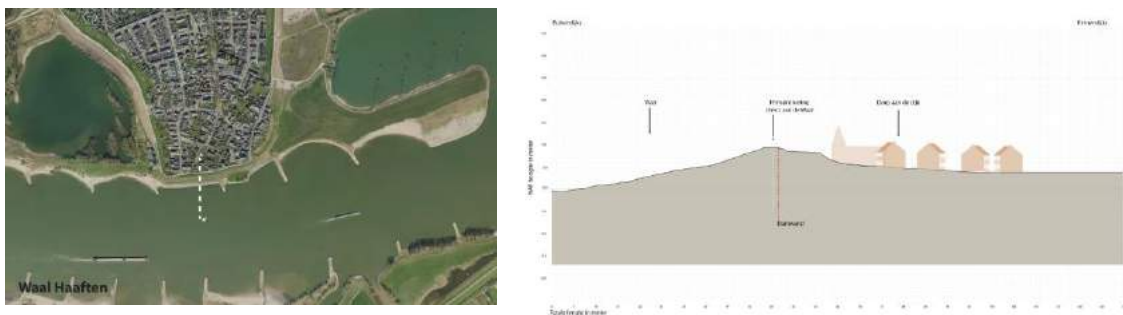
Voor de rivierdijken onderscheiden we een tweetal gebieden: landelijk en stedelijk gebied. Deze gebieden onderscheiden zich vanwege de complexiteit van de dijkversterkingsmogelijkheden. Zonder significant in te grijpen op de bestaande functies is er in stedelijk gebied immers minder ruimte beschikbaar voor een dijkversterking. Hierbij wordt opgemerkt dat in het landelijk gebied ook veel dorpen en lintbebouwing langs de dijk zijn gesitueerd waar de aanpassing van de dijk richting 2200 een grote opgave is.

Landelijk gebied:

Voor het landelijk gebied zijn de volgende locaties beschouwd: de noordelijke Waaldijk bij het dorp Haaften, de noordelijke Lekdijk bij het Eiland van Schalkwijk en de zuidelijke Maasdijk bij het dorp Oud-Empel, zie hiernavolgende figuren.

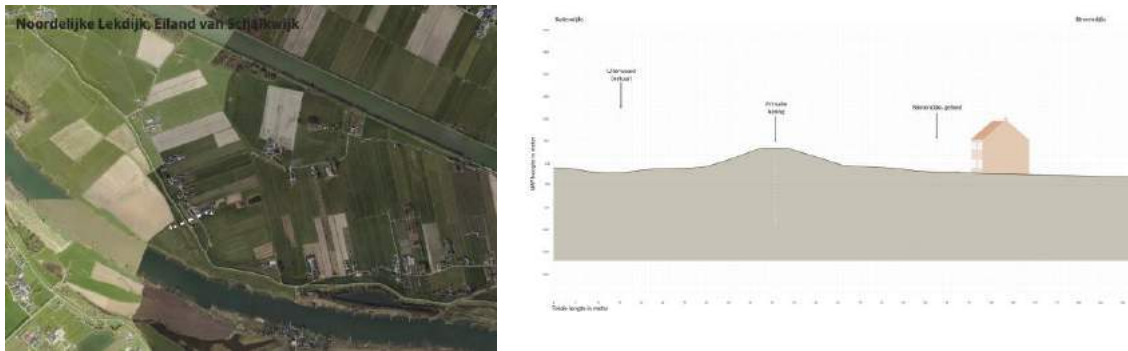
Het dorp Haaften ligt aan de noordelijke Waaldijk. De oude dorpskern ligt deels op de waterkering.

Afbeelding 4.2. Situering locatie Haaften langs de noordelijke Waaldijk incl. schematische voorstelling van de bestaande dijk



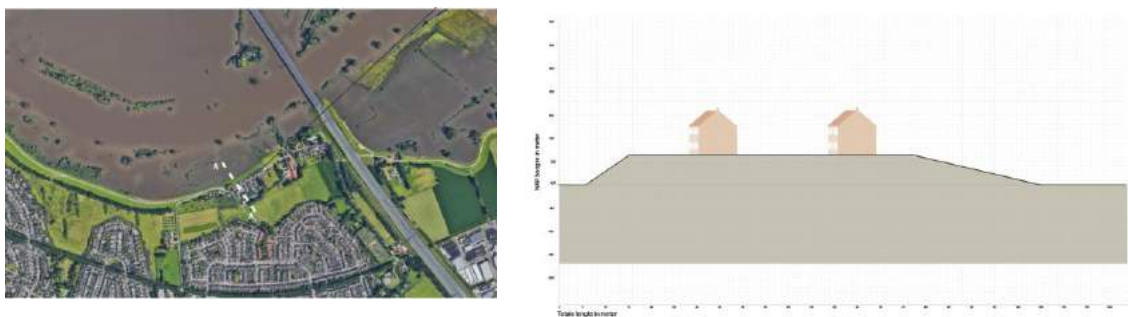
Het Eiland van Schalkwijk ligt aan de noordelijke Lekdijk in een agrarisch gebied met boerderijen op enige afstand van de dijk.

Afbeelding 4.3. Situering Eiland van Schalkwijk langs de noordelijke Lekdijk incl. schematische voorstelling van de bestaande dijk



Het dorp Oud-Empel ligt aan de zuidelijke Maasdijk. Op de dijk zijn dijkwoningen aanwezig.

Afbeelding 4.4. Situering Oud-Empel langs de zuidelijke Maasdijk incl. schematische voorstelling van de bestaande dijk

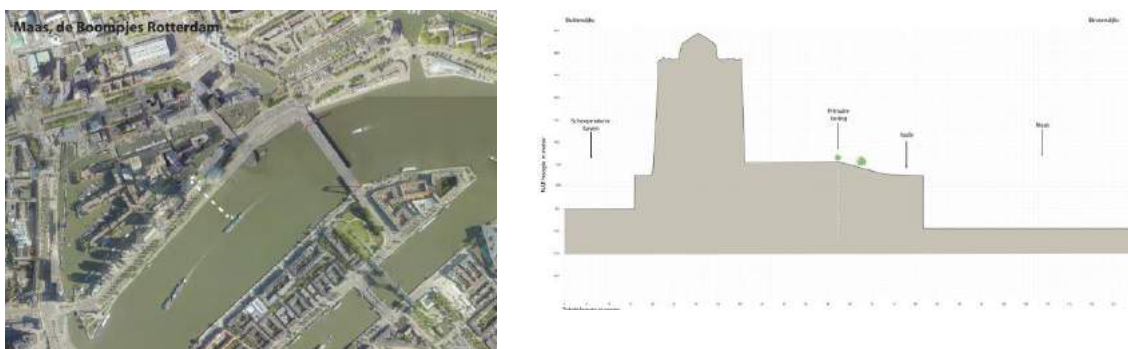


Voor deze gebieden geldt dat aan de binnenzijde van dijk op verschillende afstanden woningen aanwezig zijn. Daarnaast zijn deze locaties gekozen, omdat ze aan verschillende rivieren gelegen zijn en ook op verschillende wijze beïnvloed worden door zeespiegelstijging in de beschouwde strategieën.

Stedelijke gebied

Voor het stedelijk gebied is de kade aan de noordelijke Maasoever in Rotterdam bij De Boompjes als kenmerkende locatie beschouwd. Kenmerken voor deze locatie is het de dichte bebouwing nabij de waterkering en de daarmee gepaard gaande complexe lokale versterkingsopgave per beschouwd strategie.

Afbeelding 4.5. Situering Rotterdam-De Boompjes langs de noordelijke Maasoever incl. schematische voorstelling van de bestaande dijk



4.3 Schetsontwerp en ruimtebeslag bij 5,4 m zeespiegelstijging (2200)

In de derde Hackaton zijn de gekozen locaties beschouwd en zijn bouwstenen uitgewerkt. Hierbij is primair naar de situatie in 2200 gekeken bij 5,4 m zeespiegelstijging en hogere rivierafvoeren. De bouwstenen zijn beschouwd met de opgave van 2200 en eindsituatie voor ogen. Om de versterkingsopgave te duiden wordt in de basis naar de toename van de kruinhoogte gekeken. Daarbij wordt ook aangenomen dat grondbermen ten behoeve van macrostabiliteit en piping proportioneel meegroeien met de dijk.

In deze paragraaf is per kenmerkende locatie op basis van de waterstanden een maatgevend profiel uitgewerkt om het ruimtebeslag en de kosten inzichtelijk te krijgen. Dit is gedaan voor de traditionele oplossingen in grond. Naast traditionele oplossingen zijn er ook overige bouwstenen beschouwd (specials, klimaatdijken, waterkerende landschappen etc.) deze zijn meer conceptueel weergegeven en ter inspiratie aan het eind van deze paragraaf. Dit is gedaan voor het landelijk gebied, en dorp in het landelijk gebied en hoogstedelijk gebied van Rotterdam.

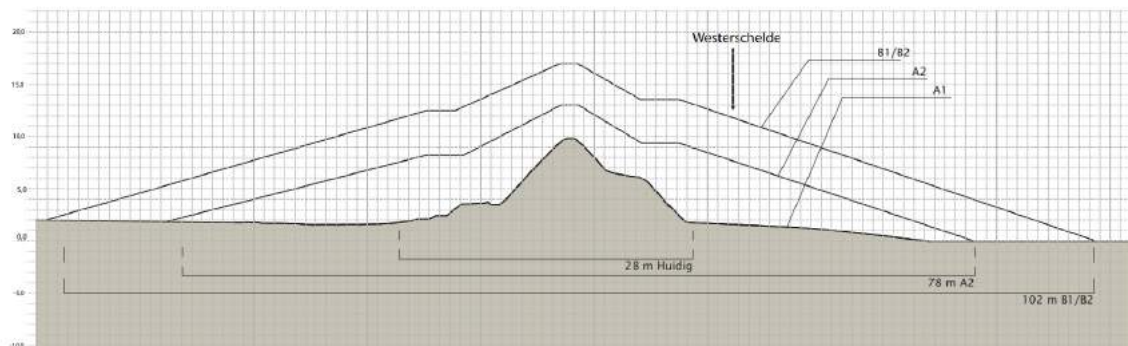
Traditionele bouwstenen (in grond)

Voor de vijf kenmerkende locaties (zie paragraaf 4.2) zijn factsheets uitgewerkt met daarin een beschrijving van de locatie, de gevolgen van de vier strategieën ten aanzien van de te verwachten stijging van de maatgevende waterstand en de benodigde kruinhoogte voor een maatgevend profiel.

Westerschelde, De Bol

De versterkingsopgave bij De Bol aan de Westerschelde is sterk afhankelijk van het al-dan-niet afsluiten van de zeearmen. In strategie A1 is er geen opgave. De strategieën A2, B1 en B2 leiden tot een kruinverhoging van 3 à 7m.

Afbeelding 4.6. Illustratie van de Westerscheldedijk bij De Bol in het jaar 2200 voor de verschillende strategieën

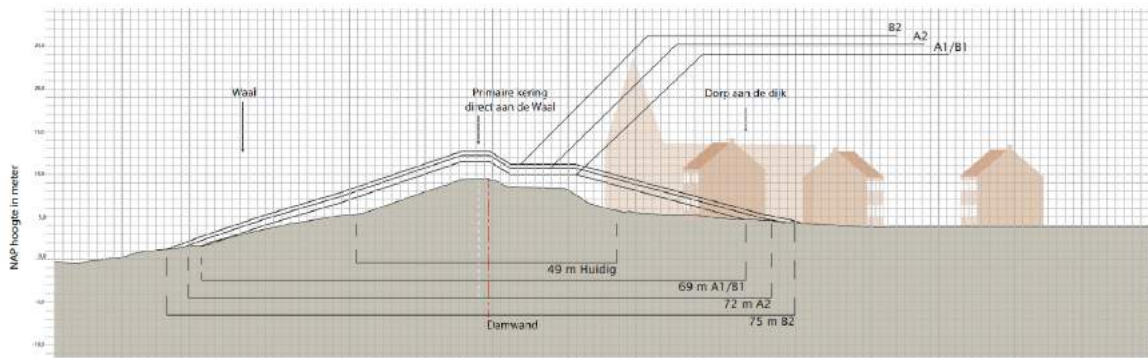


Rivierdijken

Haften, Noordelijke Waaldijk

De waterstanden hebben bij alle strategieën invloed op het ruimtebeslag van de dijk. Bij de strategieën A1 en A2, een (deels) gesloten situatie, is de verhoging van de dijk afhankelijk van de waterstanden bij de afvoer van het rivierwater. Strategie B1 lijkt qua watersysteem op deze locatie het meest op de bestaande situatie waarbij de afvoerverdeling behouden blijft en het zeefront niet permanent gesloten is. De waterstand neemt met 2 à 3 m toe.

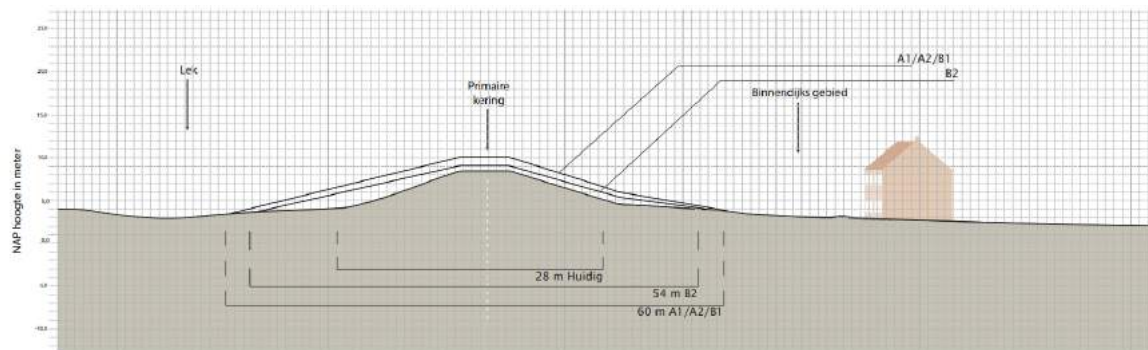
Afbeelding 4.7. Illustratie van de Waaldijk bij Haften in het jaar 2200 voor de verschillende strategieën



Eiland van Schalkwijk, Noordelijke Lekdijk

Door de hogere rivierafvoeren en de zeespiegelstijging van 5,4 m in 2200 zal de dijk bij de strategieën A1, A2 en B1 met 1 m verhoogd moeten worden. Bij strategie B2 verandert de afvoerverdeling en kan het peil in de Lek gestuurd worden, wat niet leidt tot een toename in waterstand.

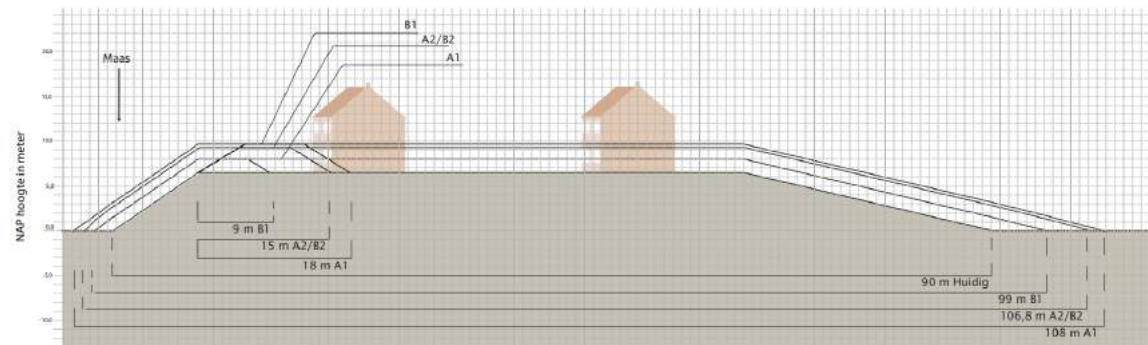
Afbeelding 4.8. Illustratie van de Lekdijk bij het Eiland van Schalkwijk in het jaar 2200 voor de verschillende strategieën



Oud-Empel, Zuidelijke Maasdijk

Bij alle strategieën is de verhoging van de dijk noodzakelijk. De waterstand stijgt met 1,3 à 2,8 m door de zeespiegelstijging en de toename van de afvoeren van de Maas. Bij strategie A1 is de stijging het kleinst.

Afbeelding 4.9. Illustratie van de Maasdijk bij Oud-Empel in het jaar 2200 voor de verschillende strategieën

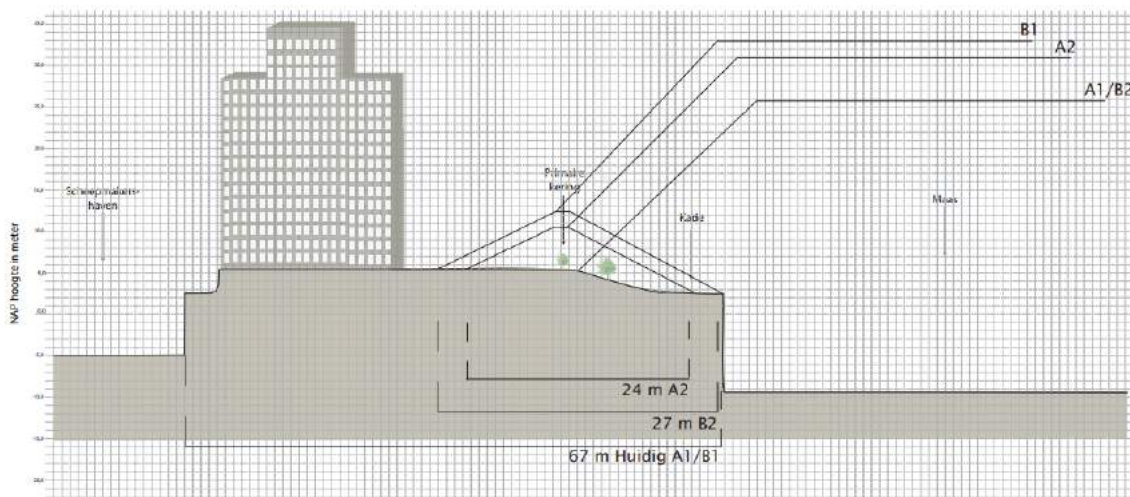


Stedelijke gebieden

Rotterdam, de Boompjes, Noordelijke Maasdijk

Een zeespiegelstijging van 5,4 m in 2200 leidt ertoe dat de dijk bij de strategieën A2 en B1 verhoogd moeten worden. Bij strategie A1 en B2 is geen verhoging nodig. In A1 wordt het zeefront gesloten en is er geen getijdewerking meer op deze locatie. De extra afvoer van rivierwater zorgt niet voor hogere waterstanden t.o.v. de huidige situatie. Bij strategie B2 wordt bij de Rijn-Maas-Monding een polder gecreëerd waardoor het peil gestuurd kan worden.

Afbeelding 4.10. Illustratie van de Maasboulevard in Rotterdam in het jaar 2200 voor de verschillende strategieën



Overige bouwstenen voor dijken/waterkeringen

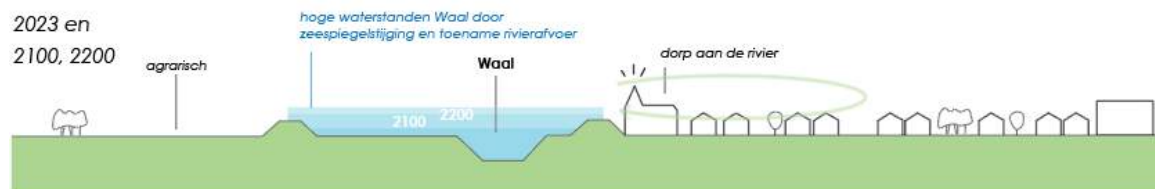
Op de locaties landelijk gebied, dorp in het landelijk gebied en hoogstedelijk gebied van Rotterdam zijn ter inspiratie een aantal bouwstenen uitgewerkt, anders dan de traditionele oplossing in grond. De drie gebieden hebben andere kenmerken en ruimtelijke ontwikkeling waardoor andere bouwstenen passend zijn.

Dorp in het landelijk gebied

Dorpen in het landelijk gebied worden vaak gekenmerkt door de ligging dicht bij de dijk en gericht op de rivier. Deze dorpen zijn van oudsher ontstaan op de oeverwallen, de hoge delen, langs de rivier. In de casus die hieronder is weergegeven staan historische gebouwen langs de dijk een ligt het dorp op korte afstand van de Waal.

Afbeelding 4.11. Effecten zeespiegelstijging waterkering dorp in landelijk gebied

EFFECTEN ZEEPIEGELSTIJGING WATERKERING DORP IN LANDELIJK GEBIED

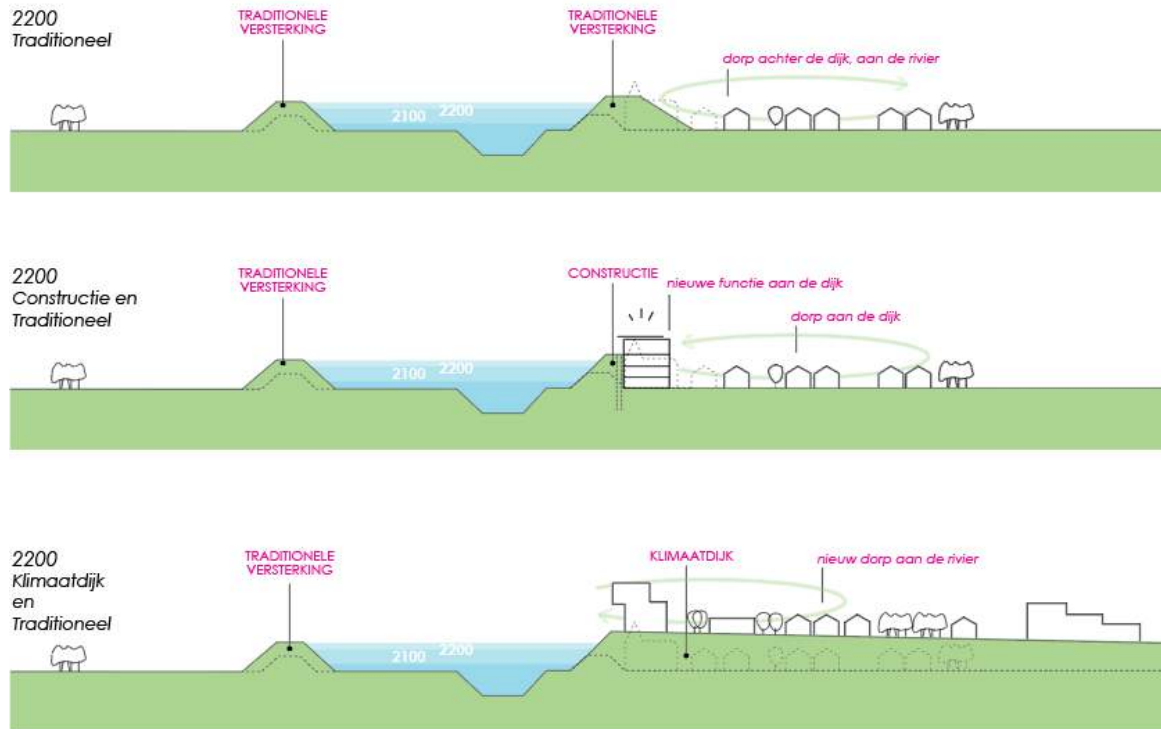


In de verbeeldingen hieronder zijn verschillende bouwstenen in doorsnede en conceptueel uitgewerkt. Een traditionele versterking in grond zal ervoor zorgen dat de bebouwing direct langs de dijk zal verdwijnen. Hiermee wordt de oriëntatie van het dorp aan de rivier aangetast. Het plaatsen van een constructie kan op verschillende wijze worden toegepast en ingepast. Eén optie is het combineren van een constructie met bebouwing langs de dijk, waardoor het dorp via deze nieuwe functie aan de dijk alsnog en oriëntatie aan de

rivier behoudt. De bouwsteen klimaatdijk zorgt voor een robuuste dijkversterking waarbij het dorp als geheel zal worden herontwikkeld; hiermee ontstaat een nieuw dorp aan de rivier.

Afbeelding 4.12. Bouwstenen beschermen dorp in landelijk gebied, eindsituatie

BOUWSTENEN BESCHERMEN DORP IN LANDELIJK GEBIED, eindsituatie



Landelijk gebied

Landelijk gebied wordt gekenmerkt door een vaak open landschap met boerderijen en agrarisch gebruik binnendijks. Langs de rivier zijn uiterwaarden aanwezig, die een bestemming hebben voor natuur of in mindere mate voor agrarisch gebruik. Bij ingrepen van de waterkering met een groot ruimtebeslag hoeven minder woningen geamoveerd te worden.

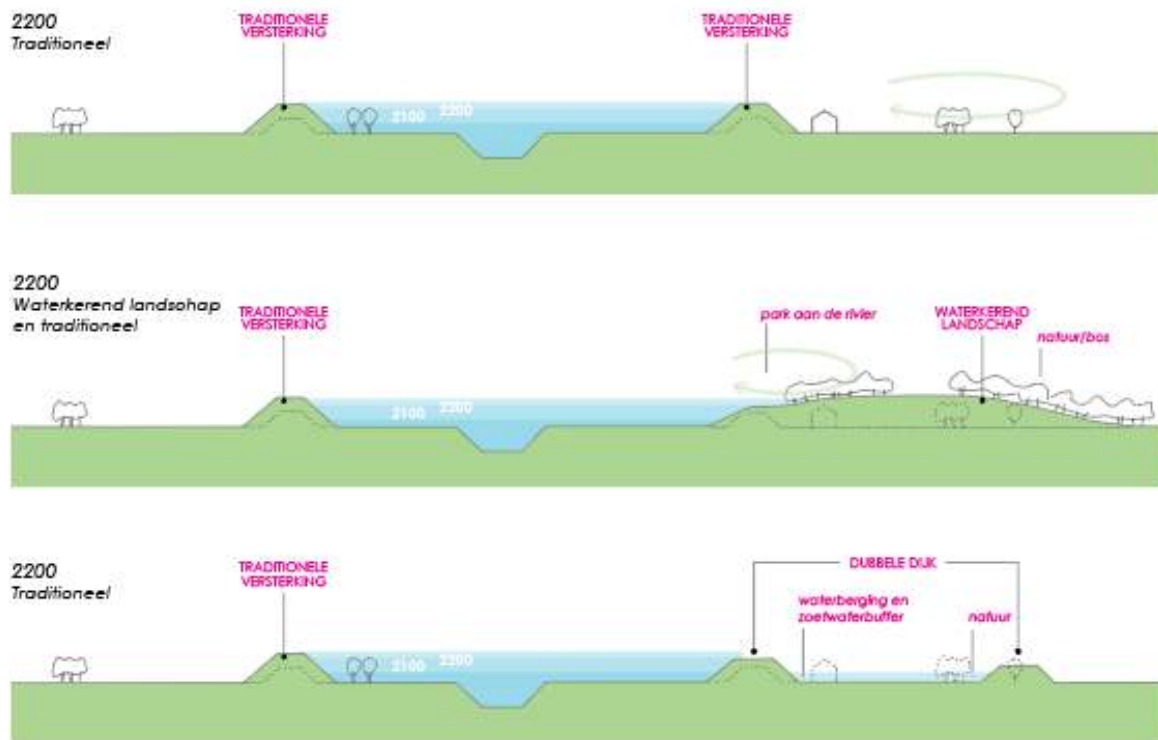
Afbeelding 4.13. Effecten zeespiegelstijging waterkering landelijk gebied
EFFECTEN ZEESPIEGELSTIJGING WATERKERING IN LANDELIJK GEBIED



Traditionele oplossingen lijken goed inpasbaar in het landschap, omdat er weinig bebouwing langs de dijk aanwezig is. Daarbij moet wel worden benoemd dat agrarische functies en natuur negatieve effecten onder vinden van deze bouwsteen. Daarbij kan ook worden gedacht aan een waterkerend landschap, waarbij het landschap een functie krijgt voor natuur, recreatie en/of agrarisch gebruik. De bouwsteen van de 'dubbele dijk' is ingegeven door het concept dat de configuratie van dijken mogelijkheid biedt voor het bergen van zoetwater. Deze laatste bouwsteen is geïnspireerd op de 'kwelkades' die van oudsher werden toegepast langs verschillende rivieren.

Afbeelding 4.14. Bouwstenen beschermen landelijk gebied, eindsituatie

BOUWSTENEN BESCHERMEN LANDELIJK GEBIED, eindsituatie

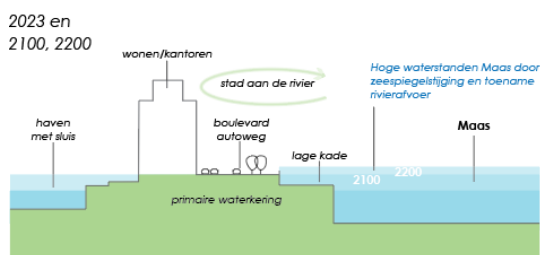


(Hoog)stedelijk gebied

In de stedelijke gebieden zijn dijkversterkingsmaatregelen met een groot ruimtebeslag alleen te realiseren als ook transformatie van het stedelijk gebied plaatsvindt. De schaarse ruimte is vaak in gebruik voor bebouwing (wonen, kantoren) en infrastructuur. Het stedelijke gebied van Rotterdam is georiënteerd op de Maas en langs de rivier is veel hoogbouw aanwezig. Verder zijn oude havens nog steeds in gebruik en via sluisen verbonden met de Maas.

Afbeelding 4.15. Effecten zeespiegelstijging waterkering stedelijk gebied

EFFECTEN ZEEPIEGELSTIJGING WATERKERING STEDELIJK GEBIED



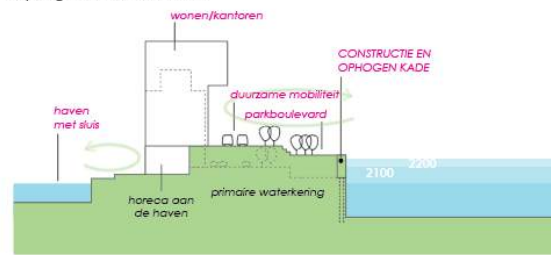
Bij het uitwerken van de bouwstenen is de toekomstige stedelijke ontwikkeling ook in beschouwing genomen. Een traditionele dijkversterking in grond zal de volledige boulevard in beslag nemen en er is ook minder ruimte voor de combinatie met overige functies. Bij de bouwsteen 'ophogen en transformatie' wordt het gebied volledig opgehoogd, waarbij ook integraal een transformatie van de bebouwing en mobiliteit mogelijk is. Een nieuwe parkboulevard langs de Maas kan ruimte bieden aan duurzame en gezonde mobiliteit. Bij het ophogen van de kade langs de Maas (hiervoor is een constructie nodig), is het ruimtebeslag minimaal en kan een nieuwe boulevard worden ontwikkeld. De autoweg kan in stand worden gehouden, maar de relatie van de bebouwing met de rivier wordt aangetast. Ook is er een optie op het verkeer onderdeel uit te laten maken van de waterkering in de vorm van een tunnel. In het laatste geval verdwijnt het verkeer langs de bebouwing, wat kans biedt voor de ontwikkeling van een grote openbare ruimte tussen bebouwing en rivier.

Afbeelding 4.16. Bouwstenen beschermen stedelijk gebied, eindsituatie
BOUWSTENEN BESCHERMEN HOOGSTEDELIJK GEBIED, eindsituatie

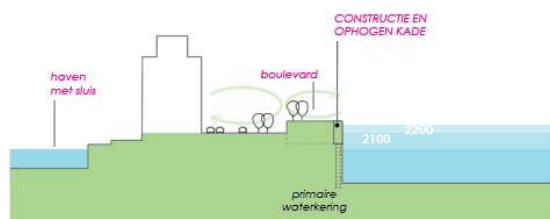
2200
Traditioneel



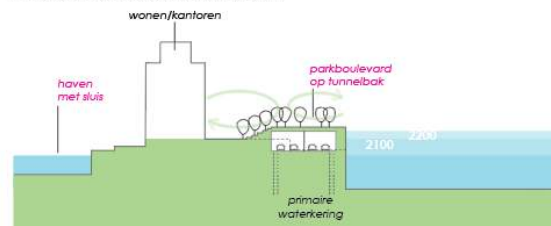
2200
Ophogen en transformatie



2200
Constructie en ophogen kade



2200
Constructie en transformatie mobiliteit



4.4 Kosten en ruimtebeslag Waterkeringen

Voor het uitwerken van de Spoor IV strategieën is een aantal Hackathons georganiseerd waarin gesproken is over de mogelijkheden om Nederland waterveilig te houden. In de voorgaande paragrafen is beschreven welke typen versterkingen voor de verschillende kenmerkende locaties zijn geïdentificeerd. Daarnaast zijn in Spoor IV nog een viertal Strategieën bepaald die ingrijpen op het Watersysteem van Nederland.

Een doel van dit Spoor IV is om per strategie een kostenindicatie af te geven. Binnen de scope van het project is het niet mogelijk om per locatie de verschillende versterkingsmogelijkheden te beschouwen. Het kernteam heeft er daarom voor gekozen om voor de bepaling van de kosten en het ruimtebeslag van waterkeringen (dijken en kunstwerken) zoveel mogelijk aan te sluiten bij de resultaten van spoor II. Daarom is voor het afleiden van de kosten in de Rijn-Maasmondig gebruik gemaakt van de kostenmethodiek van Spoor II. Het resultaat is beschreven onder het kopje "Beschouwing kosten Rijn-Maasmondig".

Om een totale kostenindicatie te verkrijgen voor alle dijken en dammen is de beschouwing van alleen de Rijn-Maasmondig onvoldoende. Op basis van reeds uitgevoerde kostencomputaties zijn de volgende kosten meegenomen voor de afzonderlijke deelgebieden:

Tabel 4-1 Totale nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken per getoond watersysteem voor de zichtjaren 2100 (zeespiegelstijging 2m) en 2200(zeespiegelstijging 5,4m), afgeleid uit: Systeemanalyse waterveiligheid, Bovenregionale rapportage, kennisprogramma Zeespiegelstijging Spoor II, rapportnr: PR4682.10, d.d. 9 juni 2023. *: Getoonde kosten zijn een factor 2 hoger dan afgeleid in Spoor II, omdat in voorliggende studie van Spoor IV bij alle vier de Strategieën het waterpeil in het IJsselmeergebied 1m hoger wordt opgezet als zoetwaterbuffer

Zichtjaar	Waddengebied	IJsselmeergebied*	Zuid-Westelijke Delta	Totaal
2100	9,0	7,8	9,0	26,8
2200	17,5	12,8	9,0	39,3

Getoonde kosten van deze deelgebieden zijn niet afhankelijk van de strategieën uit voorliggende studie van Spoor IV. Deze totale kosten per zichtjaar kunnen daarom opgeteld worden bij de afgeleide kosten voor de Rijn-Maasmonding (per Strategie). Dit betekent dus ook dat alleen de kosten voor de Rijn-Maasmonding onderscheidend zijn ten gevolge van de Spoor IV strategieën.

Beschouwing kosten Rijn-Maasmonding

In deze studie is voor de dijken op de in detail uitgewerkte tracés gebruik gemaakt van OKADER waarbij de kosten zijn gebaseerd op KOSWAT. Bij het bepalen van de vereiste versterkingen is ook rekening gehouden met de effecten van bodemdaling. Deze bodemdaling kan leiden tot extra dijkversterking, ook wanneer in een strategie wordt aangehouden dat de afvoer op een riviertak niet toeneemt (zoals bijvoorbeeld langs de IJssel in strategie B2.). De kosten zijn in kaart gebracht als de extra kosten ten opzichte van 2050 die nodig zijn om in 2100 en 2200 aan de norm te voldoen (in spoor II wordt dit aangeduid als nominale kosten). Hierbij is er geen rekening gehouden met een discontovoet, een euro die geïnvesteerd wordt in 2050 is evenveel waard als een euro in 2199. Deze kosten dienen vooral als een relatieve maat te worden gezien ten opzichte van een basisvariant (hier de Voorkeurstategie2015 KPZSSII)

De kosten van dijkversterking zijn vertaald naar de kosten die nodig zijn om in dat zichtjaar exact aan de norm te voldoen. In de praktijk worden waterkeringen versterkt met een horizon van 50 tot 100 jaar. Het kan dus voorkomen dat waterkeringen 1 jaar voor het zichtjaar worden versterkt, conform spoor II is hiervoor een correctie uitgevoerd zodat de extra kosten nu niet worden beschouwd.

Voor de waterkering is er in spoor II onderscheid gemaakt in verschillende type dijkversterkingen. Gebruik is gemaakt van de kosten voor twee type waterkeringen:

1. groene dijken. Indien woningen geamoveerd moeten worden zijn deze in kaart gebracht;
2. constructieve oplossingen daar waar groene dijken leiden tot amoveren van bebouwing. Voor deze variant is het aantal te amoveren gebouwen marginaal. Hierbij wordt opgemerkt dat dit puur vanuit waterveiligheid een aanname is, maar dat de inpassing van een constructieve oplossing die ook de keurende hoogte verzorgt een grote impact heeft op de leefomgeving.

Voor de verschillende zichtjaren is vervolgens op basis van een lineaire inter (en extra)polatie geschat wat de kosten zijn voor de verschillende strategieën op deze tracés. Hierbij is rekening gehouden met dijkversterking vanwege ZSS, extra rivierafvoer maar ook door bodemdaling.

Uiteindelijk moeten de totale kosten van een type aan dijkversterkingen, dammen en sluizen en stormvloedkeringen per strategie worden berekend. Daarin is namelijk meegenomen dat dijkversterkingen kunnen voorkomen door te investeren in kunstwerken aan de voordeur. Deze totalen geven een relatief beeld tov de VKS2015. Merk op dat kosten niet de enige indicator vormen voor een succesvolle strategie, het gaat ook om andere effecten (bv natuur of scheepvaart of bebouwing buitendijks) en waarden (bv solidariteit).

In Tabel 4-2 zijn de kosten opgenomen met onderscheid in de groene dijken en de variant met constructieve oplossingen. Het ruimtebeslag voor de groene dijken is het grootst, zie Tabel 4-3. Ook het aantal te amoveren woningen is dan het grootst (zie Tabel 4-4). De constructieve oplossingen zijn een alternatief voor groene dijken waarbij er voor de dijkversterking geen woningen geamoveerd hoeven te worden (en zo er dus ook een kleiner ruimtebeslag is). In de praktijk kan het nog wel nodig zijn woningen aan te passen of te amoveren vanwege de leefbaarheid.

Tabel 4-2 Kosten in MLD om in het zichtjaar voor het klimaatscenario aan de norm te voldoen ten opzichte van situatie 2050 en gecorrigeerd voor de restwaarde na 2100 en 2200 waarin alle keringen voldoen aan de dan geldende eisen in Rijn-Maasmonding en Rivierengebied (Maas, Waal, Nederrijn-Lek)

Kosten Rijn-Maasmonding regio	VKS2015 KPZSSII	Strategie A1	Strategie A2	Strategie B1	Strategie B2
Kosten (mld) groene dijken in zichtjaar 2100	44	26	30	40	22
Kosten (mld) groene dijken in zichtjaar 2200	68	30	62	65	29
Kosten (mld) constructieve oplossingen + groene dijken in zichtjaar 2100	11	6	8	10	6
Kosten (mld) constructieve oplossingen + groene dijken in zichtjaar 2200	34	21	32	33	20

Uit Tabel 4-2 volgt dat de investering vanaf 2050 tot 2100 tussen de 22 tot 40 miljard Euro voor de groene dijken is. Het vertrekpunt is dat de dijken in 2050 aan de norm voldoen en in de huidige ontwerpen wordt al rekening gehouden met zeespiegelstijging. Het verschil tussen de strategieën is niet groot, de kosten bij strategie B1 zijn het hoogst en vergelijkbaar met de VKS2015. In de periode 2100 tot 2200 nemen de kosten toe tot 29-65 miljard Euro. Dit is logisch omdat er in de huidige ontwerpen nog geen rekening wordt gehouden met klimaatontwikkelingen die leiden tot een zeespiegelstijging van 5,4 m en ook de rivierafvoer neemt verder toe. Tevens blijkt dat met de strategieën A1 en B2 de kosten van de dijkversterkingen sterk kunnen worden gereduceerd t.o.v. de VKS2015 en strategieën A2 en B1. Tevens blijkt dat de toepassing van een constructieve oplossing een kosteneffectieve maatregel is in vergelijking met een volledige versterking in grond (groene dijk) omdat bij de constructieve oplossingen geen rekening wordt gehouden met het amoveren en herbouw van woningen en het ruimtebeslag sterk wordt beperkt.

Het ruimtebeslag benodigd voor de versterkingsopgave staat in Tabel 4-3. Het ruimtebeslag laat hetzelfde patroon zien als de kosten al is het ruimtebeslag van de groene dijken tot 2100 wel fors groter procentueel gezien t.a.v. 2200 dan bij de kosten. Het ruimtebeslag kan worden verkleind door constructieve oplossingen maar ook door pipingvoorzieningen, dat is nu niet verwerkt.

Tabel 4-3 Ruimtebeslag in km2 om in het zichtjaar voor het klimaatscenario aan de norm te voldoen ten opzichte van situatie 2050 waarin alle keringen voldoen aan de dan geldende eisen in Rijn-Maasmonding en Rivierengebied (Maas, Waal, Nederrijn-Lek)

Ruimtebeslag (km2) groene dijken in zichtjaar	VKS2015 KPZSSII	Strategie A1	Strategie A2	Strategie B1	Strategie B2
2100	80	55	60	75	60
2200	145	70	130	140	95

Tabel 4-4 Te amoveren gebouwen om in het zichtjaar voor het klimaatscenario aan de norm te voldoen ten opzichte van situatie 2050 waarin alle keringen voldoen aan de dan geldende eisen in Rijn-Maasmonding en Rivierengebied (Maas, Waal, Neder-Rijn-Lek)

Te amoveren gebouwen groene dijken In zichtjaar	VKS2015 KPZSSII	Strategie A1	Strategie A2	Strategie B1	Strategie B2
2100	32.000	22.000	25.000	30.000	16.000
2200	38.000	26.000	37.000	37.000	24.000

In Tabel 4-4 zijn de te amoveren gebouwen beschouwd. Het uitgangspunt is dat de duurdere constructieve oplossingen worden toegepast om te voorkomen dat gebouwen worden geamoveerd en hiervoor kosten worden gemaakt. Hierbij is geen rekening gehouden met de leefbaarheid van het gebied wat kan leiden tot extra ingrepen aan gebouwen en infrastructuur. Verder valt op dat de strategieën A1 en vooral B2 leiden tot fors minder te amoveren gebouwen dan de VKS2015 en strategieën A2 en B1. Dat komt omdat in de piekwaterstanden in deze strategieën niet sterk toenemen. Een belangrijke constatering is ook dat de te amoveren woningen tot 2100 al 70 tot 85 % is van het totaal dat richting 2200 is voorzien. Vanuit dit oogpunt is het dus belangrijk om in de periode tot 2100 al goed na te denken over de versterking richting 2200.

De gepresenteerde kosten, ruimtebeslag en te amoveren gebouwen gaan uit van een puur waterbouwkundige opgave. Het inpassen van dijken horende bij een zeespiegelstijging van 5,4m vraagt om een grote nieuwe gebiedsinrichting waardoor de gepresenteerde kosten in de praktijk hoger zullen liggen. Ook het ruimtebeslag en de te amoveren gebouwen zal veranderen aangezien het gebied achter de dijk ook leefbaar moet blijven.

Totale kosten dijken en dammen

Op basis van de geschatte kosten voor de afzonderlijke deelgebieden in Spoor II en de afgeleide kosten voor de Rijn-Maasmonding uit voorliggende Spoor IV-studie is het volgende overzicht gemaakt per zichtjaar:

Tabel 4-5 Totale nominale kosten in miljard euro voor alle dijken en kunstwerken per getoond watersysteem voor de zichtjaren 2100 (zeespiegelstijging 2 m) en 2200 (zeespiegelstijging 5,4 m)

	Wadden- gebied	IJsselmeer- gebied	Zuid-Westelijke Delta	Rijn- Maasmonding	Totaal
2100	9,0	7,8	9,0	A1: 6-26 A2: 8-30 B1: 10-40 B2 20-22	32,8-66,8
2200	17,5	12,8	9,0	A1: 21-30 A2: 32-62 B1: 33-65 B2 20-29	59,3-104,3

Uit Tabel 4-5 blijkt dat de totale kosten een significant uiteen lopen en dat de benodigde investeringen in de Rijn-Maasmonding dominant zijn, zeker in het zichtjaar 2200.

Kosteninschatting overige bouwstenen

Bij het opstellen schetsontwerpen zijn voor de kenmerkende locaties ook varianten beschouwd die de gebiedsinrichting meenemen zoals klimaatdijken en multifunctionele dijken. In deze varianten wordt meer integraal gekeken naar de versterking van de dijk in de leefomgeving. Er is geen inschatting gemaakt van de kosten van deze varianten. Qua ruimtebeslag en te amoveren woningen zijn de aantallen vergelijkbaar met het zichtjaar 2200. Voor de klimaat- en multifunctionele dijken is het volume grond wel groter dan voor de standaard dijken. Hierbij wordt opgemerkt dat de kosten van het volume grond maar zeer beperkt zijn t.o.v. de kosten van het amoveren en opnieuw bouwen van gebouwen. Het verschil tussen een standaard dijkversterking en een multifunctionele dijk is vooral de plek waarop de herbouw van de gebouwen plaats vindt. Indien dit in de tijd richting 2200 integraal wordt opgepakt hoeft de aanleg van een multifunctionele dijk niet tot veel hogere kosten te leiden dan de totale kosten van een standaard dijk met herbouw elders en kan mogelijk zelfs goedkoper zijn omdat er minder grond verworven hoeft te worden.

4.5 Maakbaarheid en bestuurlijke aanpassing

Het maken van dijken met een zeer forse kruinverhoging is een grote opgave. Deze opgave roept veel vragen op bij met name de stakeholders nabij de dijk. Kruinverhogingen tot wel 5 m in het rivierengebied en aan de kust soms nog hoger vragen een andere aanpak dan nu vaak wordt gehanteerd met name bij dorpen en steden langs de dijken. Vanuit een technisch oogpunt is het maken van deze dijken haalbaar. Dijken van deze orde grootte zijn reeds aangelegd in de wereld, bijvoorbeeld de tsunami dijken op locaties in Japan. Uiteraard zijn er grote technische uitdagingen bij het ontwerpen van dergelijke grondlichamen, bijvoorbeeld over hoe om te gaan met zettingen.

De grootste uitdaging zit echter in het benodigde ruimtebeslag en hoe deze te reserveren richting de toekomst. Voor dijken in een landelijke omgeving zal dit geleidelijk kunnen gaan in meerdere ophoogslagen. Voor steden en dorpen langs de dijk zal het om een integrale gebiedsopgave vragen waarbij het versterken van dijk gepaard gaat met de herbouw van huizen of eventueel het opvijzelen van historische panden. In het laatste geval is het aan te bevelen om de waterkering niet voor een tijdshorizon van 50 jaar te kijken zoals nu vaak gebruikelijk is maar om naar een langere tijdshorizon te kijken.

Het beschouwen van een dijkversterking als een integrale gebiedsopgave waarbij ook de herbouw van woningen wordt meegenomen vraagt bestuurlijk draagvlak. Hierbij valt te denken aan het reserveren van ruimte in een zone van 50-200 m rondom de waterkering in een plan dat als blueprint geldt voor de integrale opgave van dijkversterking en leefomgeving. Door tijdig te starten met de gebiedsopgave in samenhang met de dijkversterking kunnen opgaven als vervanging van woningen en gebiedsinrichting gecombineerd worden met de versterking van de kering waardoor kosten vermeden kunnen worden.

Het combineren van opgaven vraagt wel om een verandering in het bestuurlijke proces. Het combineren van opgaven vraagt veel voorbereidingstijd en langere planning dan nu gebruikelijk is. De aansturing en financiering vanuit verschillende sectorale programma's, zoals het HWBP staat nu vaak een integrale gebiedsinrichting in de weg.

Vanwege de grote impact is het dan ook verstandig om meer dan 50 jaar vooruit te kijken en niet meer uit te gaan van 3 à 4 versterkingsslagen tot 2200. Met name bij dorpen en steden aan de dijk met een zicht op het waterfront zijn deze processen belangrijk. Wil je de ruimtelijke kwaliteit behouden dan zal naar alle waarschijnlijkheid ook de kern van de dorpen en steden integraal verhoogd moeten worden en moeten gebouwen herbouwd worden, ook kan gedacht worden aan het opvijzelen van historische/monumentale panden. Deze ingrepen zijn fors en het is niet effectief om deze binnen een cyclus van 50 jaar adaptief op te pakken. Het is logischer om dit in grotere slagen uit te voeren en te combineren met een herinrichting van het gebied. Hierbij kan goed worden aangesloten bij reeds geschreven plannen die een nieuwe kijk op ruimtereservering hebben, bijvoorbeeld "Water en bodem stuurt" en de Nationale Omgevingsvisie (NOVI).

4.6 Kennisvragen

De volgende kennisvragen zijn benoemd:

- hoe kan de bestuurlijke aansturing zo worden georganiseerd zodat de versterking van dijken wordt meegenomen in de integrale gebiedsinrichting van met name dorpen en steden langs de waterkering. Kunnen we een transitie inzetten van 'Sober en doelmatig' naar 'Doelmatig en toekomstgericht'?
- om de impact van zeespiegelstijging op de benodigde dijkhoogte te reduceren is in voorliggende studie de creatie van ondiepe voorlanden ten gevolge van opslibbing (dubbele dijken) niet nader onderzocht. Deze optie is in potentie alleen mogelijk nabij de kust en het Waddengebied. De stabiliteit van deze optie tijdens maatgevende omstandigheden is echter nog onbekend als ook de specifieke eisen aan vegetatiebeheer. Voordat deze optie volwaardig kan worden meegenomen in het vervolg dient hier meer duidelijkheid over te worden verkregen;
- hoe benut je de tijd vanaf nu tot 2200 efficiënt om de integrale gebiedsopgave te ontwikkelen en de realisatie te faseren. Het belangrijkste is hierbij om perspectief te kunnen bieden aan bewoners en stakeholders langs de dijk. Welke instrumenten zijn ervoor nodig om ruimtereserveringen voor de verre toekomst mogelijk te maken zonder dat er direct een claim op het gebied wordt gelegd?
- hoe kan het historische karakter van veel steden en dorpen langs de rivieren het beste behouden worden in combinatie met een dijkversterking. Kunnen monumentale panden opgevijzeld worden zodat deze behouden kunnen blijven zonder dat de samenhang tussen stad en rivier verloren gaat?

5

BOUWSTEEN: ZANDIGE KUST

Auteur: Roelof Moll

5.1 Kenmerkende locaties

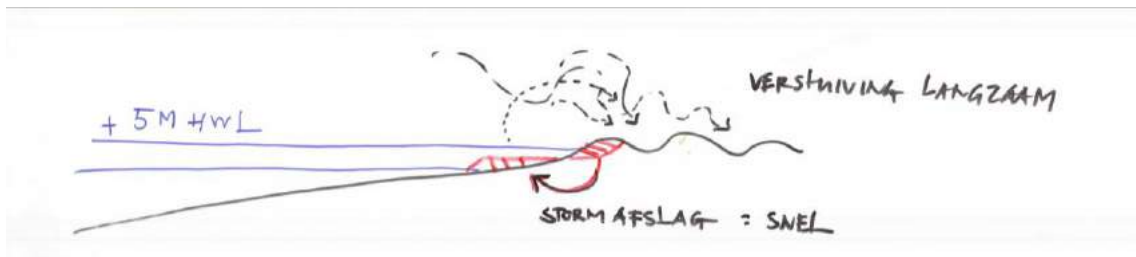
De zandige kust in Nederland kan opgedeeld worden in het deltagebied in Zeeland en Zuid-Holland, de Hollandse Kust, en het Waddengebied. Het deltagebied kenmerkt zich door sterk gekromde kustlijnen met invloeden van zoetwater vanuit het riviergebied. Hierbij reiken invloeden van de zee bij de Westerschelde verder landinwaarts door het ontbreken van een kering of dam. De Hollandse kust is relatief recht, met een doorlopende duinenrij als primaire verdediging. Het Waddengebied bestaat uit de Waddeneilanden met daarachter de Waddenzee.

Langs de gehele zandige kust liggen badplaatsen, met name langs de Zeeuwse en Hollandse Kust. Deze verdienen extra aandacht binnen dit rapport vanwege scheepsvaart en visserij, bebouwing op de duinenrij, en toerisme.

5.2 Ontwerpkeuzes

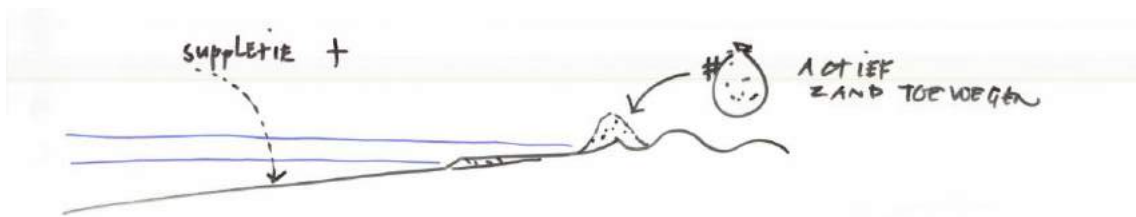
De zandige kust kan beschouwd worden als een systeem met een dynamisch evenwicht (Afbeelding 5.1). Duinen groeien aan gedurende kalmere condities, waarbij golven en stromingen zand brengen naar het in-tergetijdegebied, het gebied dat gedurende laagwater droog komt te liggen. De wind blaast dit zand vervolgens richting de duinen. Duinen verliezen sediment gedurende stormen. Een tijdelijke verhoogde waterspiegel door stormopzet zorgt ervoor dat grotere golven verder landinwaarts reiken. Deze golven vallen de duinen aan, woelen sediment op, en transporteren dit sediment zeewaarts door hun sterkte terugstroming. Dit zeewaarts getransporteerde sediment vormt vervolgens een nieuw evenwichtsprofiel met betrekking tot de stormcondities (Afbeelding 5.1). Erosie van het duinfront duurt voort totdat de duinen voldoende sediment voor het evenwichtsprofiel hebben geleverd. Zo zal een hogere duin dus minder ver terugtrekken tijdens een storm, omdat de hoogte van de duin zorgt voor meer beschikbare kuubs zand per strekkende meter dan lage duinen. Na een storm wordt het zeewaarts getransporteerde sediment weer kustwaarts getransporteerd gedurende kalmere condities en herbegint de cyclus. Over het algemeen zijn de tijdschalen waarop verstui-ving plaatsvindt relatief lang. Stormafslag gebeurt snel (Afbeelding 5.1).

Afbeelding 5.1. Dynamisch evenwicht: verstuiving brengt zand naar de duinen en zorgt voor aangroei. Tijdens stormen neemt het duin volume weer af door stormafslag. Verstuiving speelt op lange tijdschalen, terwijl stormafslag relatief snel plaatsvindt



Het huidige beleid van Rijkswaterstaat schrijft voor dat we de basiskustlijn (BKL) willen behouden, en een landwaartse terugtrekking van de kustlijn niet accepteren. Bij dynamische kustevenwicht zou de BKL op zijn plaats blijven. Echter, in de realiteit is er een constante behoefte aan extra zand binnen het dynamische systeem om de BKL te behouden en terugtrekking hiervan te voorkomen. Dit komt onder andere door zeespiegelstijging, die de zandbehoefte vergroot, of door bijvoorbeeld een verlies van sediment binnen het dynamische systeem door (getijde) stromingen in langsrichting. Op dit moment wordt de constante behoefte aan extra zand gecompenseerd door middel van zandsuppleties. Deze suppleties zorgen ervoor dat de BKL behouden wordt, en het dynamische evenwicht in stand gehouden worden (Afbeelding 5.2).

Afbeelding 5.2. Suppleties worden uitgevoerd om de basiskustlijn (BKL) te behouden. Suppleties op zee zijn relatief goedkoper dan actief zand toevoegen aan het duinprofiel



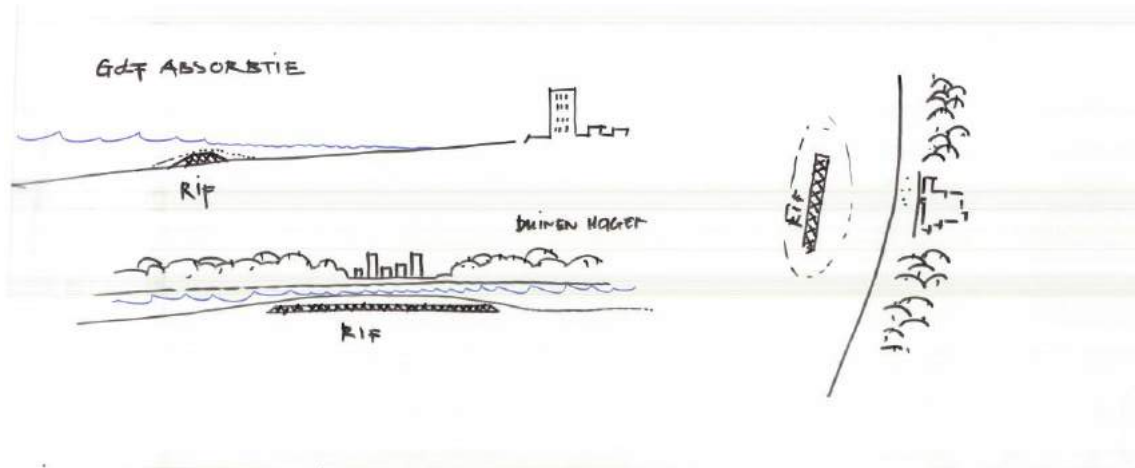
Wanneer harde constructies worden toegepast in de primaire kering dan wordt dit dynamische systeem verstoord. Tijdens duinaangroei worden transporten bemoeilijkt, al dan niet verhinderd, waardoor er minder of geen sediment beschikbaar is voor groei. Tijdens stormen wordt het zeewaartse transport bemoeilijkt of verhinderd, waardoor er geen nieuw evenwichtsprofiel vormt en de golven niet afnemen in sterkte. Het advies is daarom om aan de zandige kust versterkingen zacht (zandig) uit te voeren. Daarbij komt ook het feit dat harde constructies aanzienlijk hogere kosten met zich meebrengen.

Mochten er plekken zijn langs de zandige kust met onvoldoende ruimte voor zachte versterkingen, dan kan gekeken worden naar een harde constructie als oplossing. Hier kan gekeken worden naar een hybride constructie, waarbij een harde constructie de kern vormt van de zachtere duinen, en enkel tijdens extreme condities bloot kan komen te liggen. Denk hierbij aan de Hondsbossche en Pettemer Zeewering, of de parkeergarages in duinen bij meerdere badplaatsen. Tijdens kalmere en gemiddelde condities blijft deze kern bedekt en wordt het dynamische systeem niet verstoord.

Golfdempers en/of -brekers op zee kunnen de inkomende stormcondities verzachten (Afbeelding 5.3). Desondanks blijft het advies om te kiezen voor een versterking van de zachte kust, met voornaamste reden dat deze constructies ook de natuurlijke stromingen en condities verstoren. Daarnaast zijn harde golfbrekers op zee relatief onaantrekkelijk aangezien: (1) Golfbrekers ontworpen moeten worden voor stormcondities met een stormopzet van 5 m (randvoorwaarden Hollandse Kust 2020). Gedurende kalme condities zonder opzet betekent dit dat er een muur van enkele meters uitsteekt boven het water, vooral wanneer de 5 m zeespiegelstijging nog niet bereikt is; (2) De verschillen in de hoek van inval van golven en golfdraaiing kunnen ervoor zorgen dat een gebied achter een golfdemper nog steeds door golven bereikt kan worden. Om dit te

voorkomen moet de golfdemper voldoende lang zijn, hetgeen hoge kosten met zich meebrengt; (3) Golvenbrekers verhinderen door hun lengte scheeps- en pleziervaart, flora, en fauna. Drijvende golfdempers lossen enkele van deze problemen op, maar brengen mogelijk wel een grotere faalkans en hogere kosten met zich mee door de complexiteit van de constructie.

Afbeelding 5.3. Golf absorberende constructies zoals een kunstmatig aangelegd rif kunnen inkomende golven verzwakken voor kust plaatsen

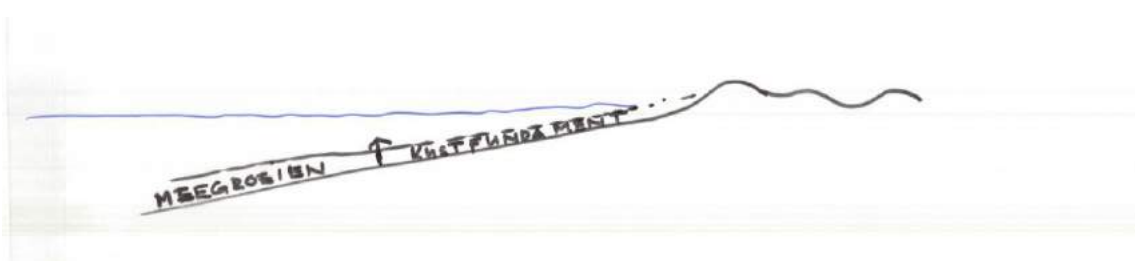


Bij badplaatsen zijn de ontwerpkeuzes moeilijker door scheepsvaart en visserij, bebouwing op de duinenrij, en toerisme. Hier is een zandige versterking niet altijd de oplossing. Allereerst kan een doorgang door de duinenrij voor de scheepsvaart naar het achterland gewenst zijn. Ten tweede verhindert bebouwing een verhoging van de duinenrij op de plaats van bebouwing. Tenslotte brengt toerisme extra (esthetische) eisen met zich mee waaraan de duinen moeten voldoen. Hier zijn complexere oplossingen nodig.

5.3 Bescherming kustlocaties bij 5 m zeespiegelstijging (2200)

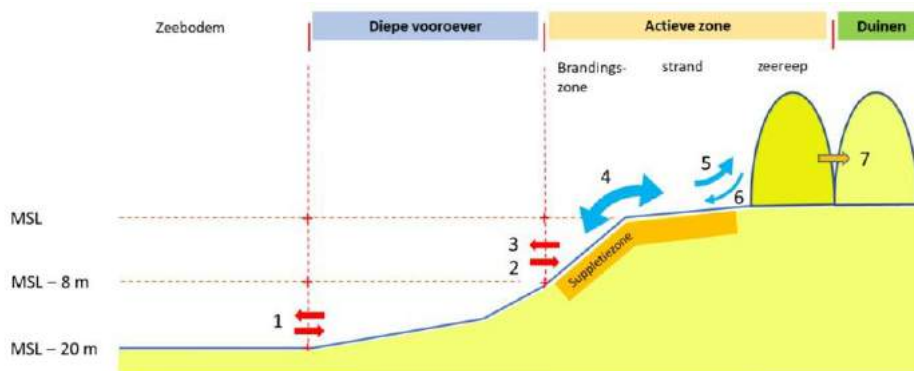
Om de zandige Nederlandse kust te beschermen tegen 5 m zeespiegelstijging moet het 'actieve' gedeelte van de kust 5 m in hoogte meegroeien (Afbeelding 5.4). Het actieve gedeelte kan gezien worden als het gebied waarbinnen het dynamisch evenwicht heerst. Dit loopt vanaf ca de NAP -8 m tot en met de eerste duinenrij. Wanneer dit gebied meegroeit blijft het dynamische evenwicht gewaarborgd. Voor het deltagebied zal het totale oppervlak aan zandige kust groter uitvallen dan enkel het kustvak, omdat gedeeltes langs de rivieren die nog steeds beïnvloed worden door de zee ook in hoogte moeten meegroeien. Voor de Nederlandse kust zal het voornamelijk het kustvak betreffen. Voor het waddengebied moet de gehele Waddenzee meegroeien. Dit gebied is bij uitstek het grootst, waardoor de sedimentbehoefte hier het grootst zal zijn.

Afbeelding 5.4. Het actieve gedeelte van het kustprofiel zal moeten meegroeien om de Nederlandse kust voldoende te beschermen in het geval van zeespiegelstijging



Deltares heeft een onderzoek uitgevoerd naar de totale sedimentbehoeften van de actieve gedeeltes langs de Nederlandse kust. Zie 'Rapport Sedimentbehoefte Nederlandse kuststelsysteem, Deltares 31 maart 2023'. Hieronder wordt een beknopte samenvatting gegeven.

Afbeelding 5.5. Kustdwarse schematisatie met daarin de 'actieve zone'. De transporten binnen de actieve zone (4, 5 en 6) zijn veel groter dan de transporten naar de andere zones (2, 3 en 7). De uitwisseling met de zeebodem (zeewaartse kustfundament), pijl 1, heeft geen of zeer kleine invloed op de ontwikkeling van de actieve zone. Figuur en bijschrijft uit rapport Sedimentbehoefte Nederlandse kuststelsysteem, Deltares 31 maart 2023



De totale sediment behoefte van de zandige Nederlandse kust kan bereken worden met de volgende formule:

$$V_{wens} = A_{mee} \cdot ZSS + S_{trans}$$

met V_{wens} de sedimentbehoefte, A_{mee} de oppervlakte van de gebieden die moeten meegroeien, ZSS de zeespiegelstijging, en S_{trans} het netto transport van sediment uit de gebieden die mee moeten groeien. De totale behoefte, inclusief onzekerheden, zijn weergegeven in Tabel 1. Bij de totalen zijn ook onzekerheden in de sedimentbehoefte opgeteld (deel 4 Tabel 1). Deze onzekerheden hebben betrekking op (1) de bepaling van de actieve zone; en (2) het gebrek aan kennis over het transport van sediment uit de actieve zone naar de Westerschelde.

Door het totaal aantal benodigde kubieke meters zand te delen door de tijdsperiode over welke deze hoeveelheid bereikt moet worden, kunnen de jaarlijks benodigde volumes berekend worden. Voor 2 m in 2100 is dit $59 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Voor 5 m in 2190 is dit $69 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$.

Voor het monitoren hoe de verschillende kustvakken sinds 1990, toen gestart is met de jaarlijkse zandsuppleties, meegroeien met de zeespiegel is een 'Blokkeendoos-levende-kust' als viewer ontwikkeld: <https://dmmangrove.hkvservices.nl/blokkendoos-levende-kust/>. Met deze viewer kan ook worden bekeken op hoe de snelheid van meegroeien zich verhoudt tot de snelheid van zeespiegelstijging vanaf de periode dat is gestart met suppleren van zand.

Afbeelding 5.6. Viewer 'Blokkenoos-levende-kust'



Tabel 5-1 Totale sedimentbehoefte Nederlandse kust per zichtwaarde in 2100/2200 (mln m3). Achtereenvolgens actieve zones, onzekere zones, en andere gekwantificeerde onzekerheden

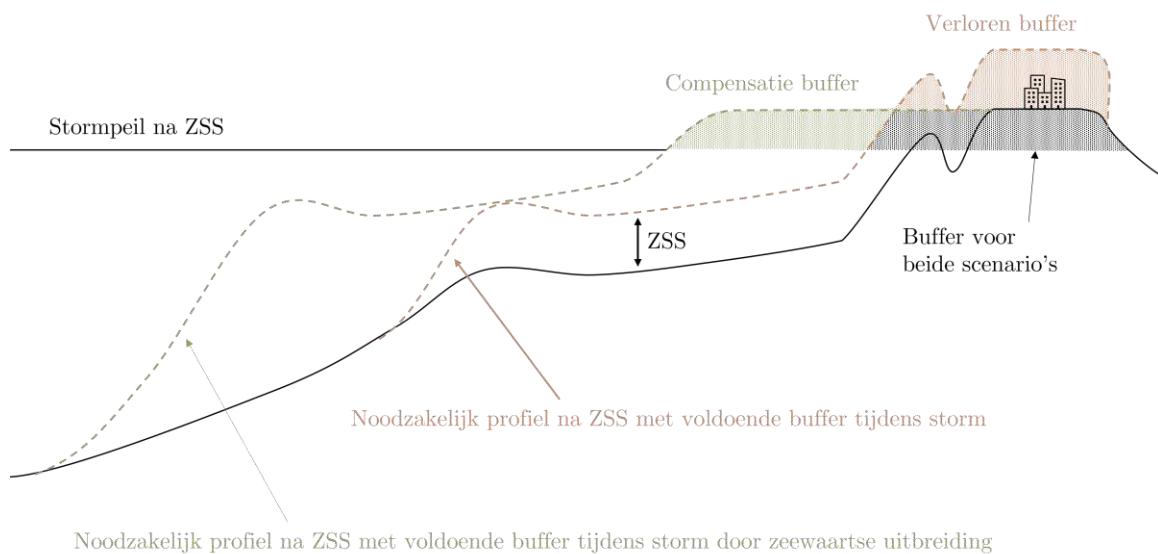
Sedimentbehoefte Nederlandse kust - totaal							
zichtwaarde	0,5 m	1 m	2 m	1 m	2 m	3 m	5 m
scenario zeespiegelstijging	laag	hoog	extreem	laag	mid	hoog	extreem
eindjaar	2100	2100	2100	2200	2200	2200	2190 ²⁹
1. Meegroeien actieve zones – met kustlijnzorg, inclusief export							
Wadden	930	1311	2078	2093	3006	3740	5084
Hollandse kust	264	327	455	577	705	832	1062
Delta	158	236	392	336	492	647	949
TOTAAL	1351	1875	2924	3007	4202	5220	7095
2. Meegroeien actieve zones – ZONDER kustlijnzorg, inclusief export							
Groninger Wad	54	193	482	113	449	761	1379
3. Mogelijk actieve zones in toekomst							
buitendelta's Deltakust	187	373	746	373	746	1119	1866
Vlakte van de Raan	164	248	415	348	515	683	1008
4. Onzekerheden in sedimentbehoefte							
extra breedte actieve zone	31	63	125	63	125	188	313
Meer transport naar Westerschelde uit actieve zone	80	80	80	180	180	180	170
Totaal meegroeien zones en onzekerheden	1.787	2.751	4.692	3.903	6.037	7.970	11.660

²⁹ In de aangeleverde scenario's treedt de 5 meter op in 2190.

De kustplaatsen vergen een iets complexere bescherming. Als de bestaande zandige kering niet verhoogd kan worden door bestaande bebouwing, of vanuit esthetisch oogpunt in verband met toerisme, dan kan de duinversterking gerealiseerd worden door de actieve zone zeewaarts uit te bereiden. Afbeelding 5.7 tracht deze uitvoering te verduidelijken. Een dergelijke zeewaartse uitbreiding vergt aanzienlijk meer sediment. Daarnaast introduceer je hiermee variabiliteit van het kustprofiel in langsricting: bij kustplaatsen steekt het

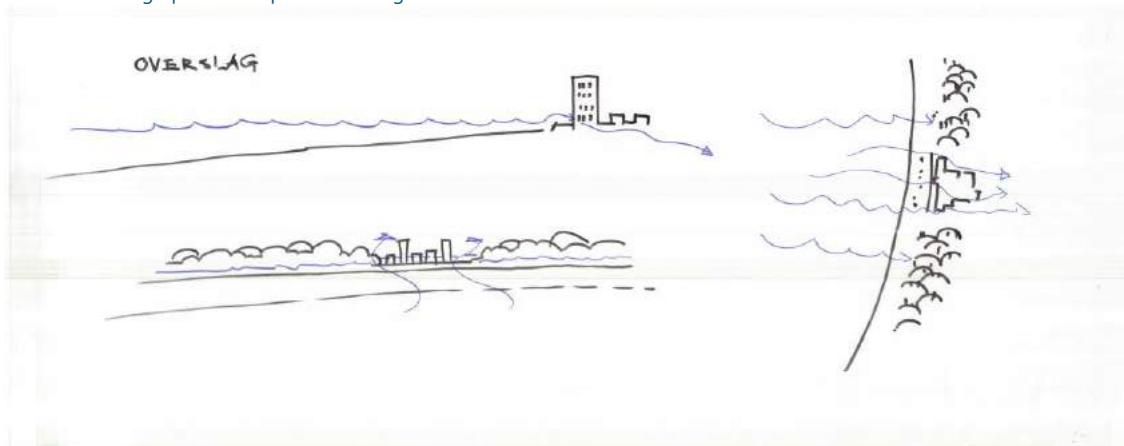
profiel immers meer uit dan bij gebieden zonder bebouwing waar is gekozen voor een ophoging van het actieve profiel. Deze variabiliteit introduceert secundaire stromingen in langsrichting, welke zand van de uitstulping van de kustplaats naar omliggend gebied zullen verplaatsen. De uitstulping is daarmee kwetsbaarder voor erosie dan omliggend onbebouwd gebied waar is gekozen voor enkel een ophoging. Een voorbeeld van deze situatie is de zandmotor bij Kijkduin. Deze uitstulping is erosiever dan de omliggende kustlijn, en zal na verloop van tijd verdwijnen (huidige prognose is 2040), waarna de kustlijn weer uniform is in langsrichting.

Afbeelding 5.7. Zeewaartse uitbreiding door bestaande bebouwing of toerisme. Door de zeespiegelstijging moet het actieve profiel in zijn geheel meegroeien (bruin profiel). Hierdoor ontstaat er een nieuw profiel dat in dynamisch evenwicht is. Echter, als de duin niet verhoogd kan worden door bestaande bebouwing ontbreekt er zand dat kan afslaan gedurende een storm (de bruine 'verloren' buffer). Deze buffer kan gecompenseerd worden met een zeewaartse uitbreiding (groen profiel met groene 'compensatie'). Deze zeewaartse uitbreiding vergt veel meer sediment dan de normale verhoging van het profiel



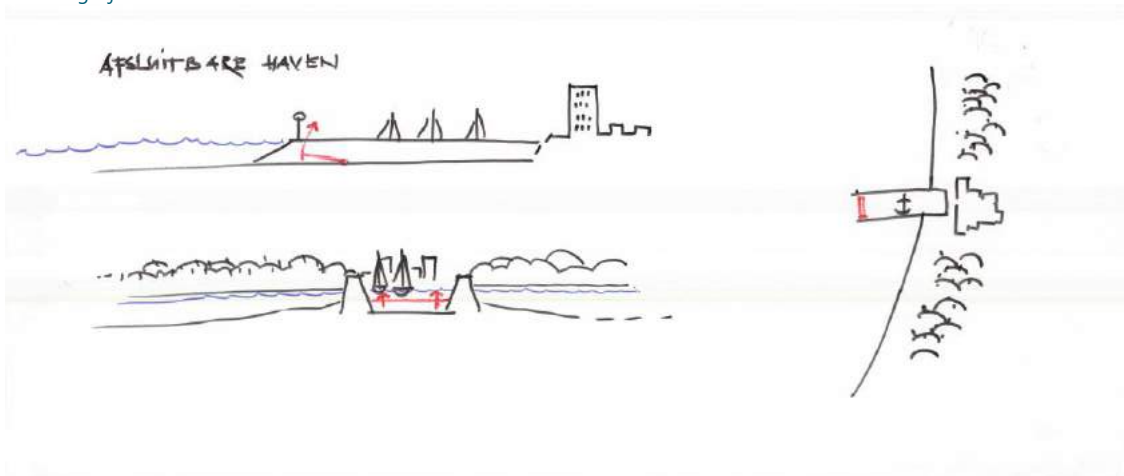
Een andere mogelijke oplossing is een hybride (harde) kering, de welke in de vorige sectie kort is toegelicht. Er kan een harde kern worden toegebracht aan de duin. Deze kern wordt alleen blootgesteld aan golven tijdens extreme condities. De harde kern kan bijvoorbeeld bestaan uit (1) een damwand, (2) de onderste verdiepingen van bestaande bebouwing, of (3) ondergrondse infrastructuur waarvan is toegelaten dat deze tijdelijk onder water kan komen te staan (parkeergarage, tunnel voor openbaar vervoer, et cetera). Belangrijk is om te beseffen dat bij blootstelling van de harde kern overslag kan optreden (Afbeelding 5.8). Hieraan zijn eisen met betrekking tot de maximaal toelaatbare overslagvolumes verbonden.

Afbeelding 5.8. Golfoverslag kan optreden bij een kustplaats in het geval dat het kustprofiel niet voldoende wordt opgehoogd en een harde kering optreedt als primaire kering



Voor de scheepsvaart en visserij kunnen kleine havens en ligplaatsen aanwezig zijn bij kustplaatsen. Voor deze havens en ligplaatsen is een ophoging van het duinprofiel erachter wellicht ongewenst voor de doorstroom. Een mogelijke oplossing hiervoor is een afsluitbare set van opgehoogde havenhoofden. De ophoging zorgt ervoor dat ze als primaire waterkering kunnen fungeren. Door de opening tussen beide havenhoofden afsluitbaar te maken met behulp van een klep of (rol)deur, krijg je een stormvloedkering die de haven of legplaats afsluit ten tijde van een storm (Afbeelding 5.9).

Afbeelding 5.9. Door een haven afsluitbaar te maken kunnen de havenhoofden dienen als primaire waterkering zodat het achterland mogelijk versterkt hoeft te worden



5.4 Bescherming kustlocaties bij 2 m zeespiegelstijging (2100)

Voor het scenario van 2 m zeespiegelstijging per 2100 is er $59 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ nodig voor de versterking van de zandige kust exclusief kustplaatsen. Dit is $10 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ minder dan het scenario met 5 m zeespiegelstijging, welke $69 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ vraagt.

De jaarlijkse hoeveelheid te suppleren zand kan eenvoudig aangepast worden om te voldoen aan de sedimentbehoefte. Door de werkelijke zeespiegelstijging in de komende decennia te monitoren, kunnen de benodigde sedimentvolumes aangepast worden naar de daadwerkelijke vraag. Een fasering van 2 m zeespiegelstijging naar 5 m zeespiegelstijging van de hoeveelheid te suppleren zand behoort daarom zeker tot de opties.

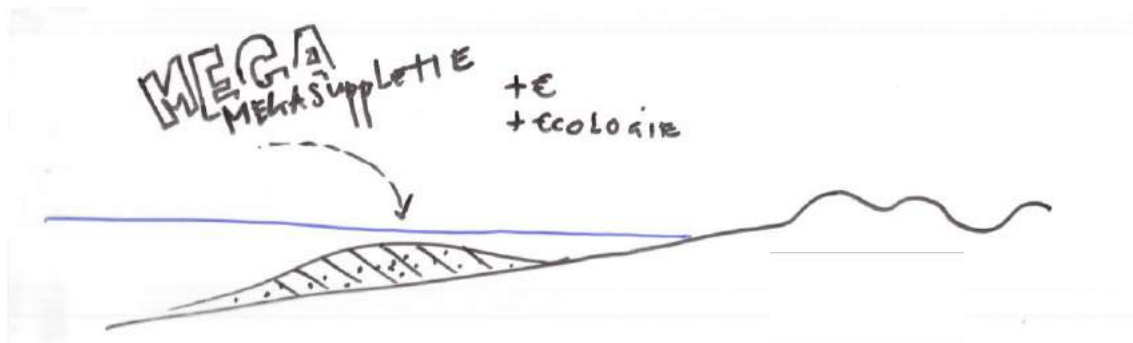
Voor harde constructies is een dergelijke fasering ingewikkelder. Bij hybride keringen met een harde kern binnen de duinen kan gekozen worden om versterkingen tot het scenario van 2 m zeespiegelstijging zacht uit te voeren, en de harde constructie toe te voegen aan de zeewering wanneer zacht suppleren niet meer

tot de opties behoort. Wanneer er al bij 2 m zeespiegelstijging behoefte is aan een harde constructie zal men moeten afwegen of het aantrekkelijker is om eenmalig een versterking aan te brengen voor het scenario van 5 m zeespiegelstijging, of een versterking voor 2 m aan te brengen die na 100 jaar versterkt zal moeten worden om 5 m aan te kunnen. De gefaseerde oplossing kan onaantrekkelijk zijn voor locaties waarbij de harde constructie lastig toegankelijk is: denk hierbij aan een harde kern binnen een duin.

5.5 Uitvoering

De groei van het actieve gedeelte van de zandige kusten in het deltagebied, de Hollandse Kust, en de Waddenzee kan gerealiseerd worden met suppleties in de actieve zone, gebruikmakend van zand uit de Noordzee. Natuurlijke processen zullen het gesuppleerde zand rechtmatig verdelen over de actieve zone. Er kan gekozen worden voor periodieke suppleties of mega-suppleties. Bij mega-suppleties wordt het gewenste suppletievolume voor enkele decennia in één keer gesuppleerd in plaats van periodiek (bvb. Zandmotor, Prins-Hendrik Zanddijk). Dit is relatief goedkoper en minder belastend voor de omgeving omdat ze minder frequent uitgevoerd hoeven te worden.

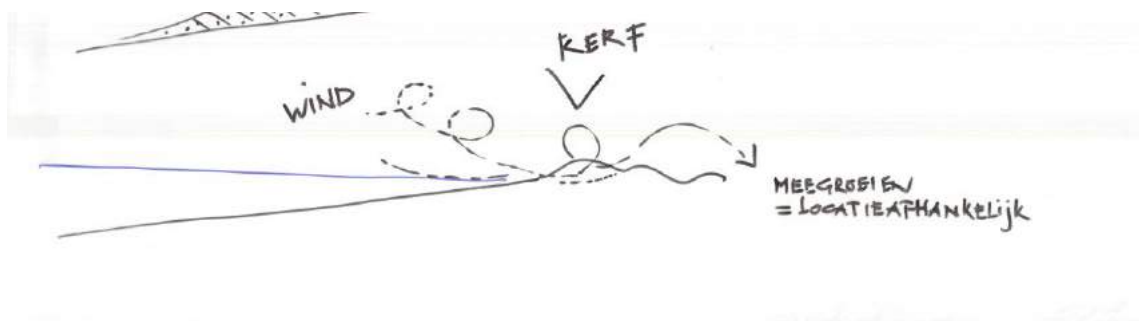
Afbeelding 5.10. Mega-suppleties belasten de omgeving minder omdat ze minder vaak toegepast worden en zijn relatief aantrekkelijk door lagere kosten



Op dit moment is de eerste duinenrij een gesloten systeem langs het grootste gedeelte van de Nederlandse kust. Zand getransporteerd door wind blijft daardoor binnen de eerste duinenrij. Door het aanbrengen van kerven zou zand verder het land in geblazen kunnen worden. Hierdoor zal het achterliggende landschap ook deel gaan uitmaken van de actieve zone en als geheel meegroeien. Deze groei gaat ten koste van de hoogte van de eerste duinenrij, aangezien het totale volume aan zand dat door wind wordt getransporteerd nu over een groter oppervlak uitgesmeerd moet worden.

Bij een dergelijke vergroting van de actieve zone blijft het van belang dat golfoverslag en overstroming van het meest landwaartse punt in deze actieve zone te allen tijde voorkomen wordt. Wanneer dit gebeurt zal zand namelijk wegspoelen uit het dynamische systeem naar het achterliggende gebied. Dit zand kan niet terugkeren naar de actieve zone en is dus verloren.

Afbeelding 5.11. Door het toebrengen van een kerf kan verstoven zand verder landinwaarts reiken. Zo kan een uitgestreker gebied meegroeien met zeespiegelstijging. Desondanks moet het mee te groeien gebied wel hoog genoeg worden om golfoverslag in het duingebied te voorkomen



5.6 Kosten

De totale kosten kunnen geschat worden met behulp van de totaal benodigde volumes zand per jaar. Mits er gerekend wordt met een vaste prijs van €5 per kuub komt dit neer 295 M€/jaar voor 2 m en 345 M€/jaar voor 5 m zeespiegelstijging. Ter referentie: op dit moment zijn de kosten circa 60 M€/jaar.

Hieraan moet wel worden toegevoegd dat deze berekening uitgaat van de aanname dat de gehele sedimentbehoefte geldt voor zand. In werkelijkheid zal een deel van de behoefte worden afgevangen door slib waardoor deze kosten lager kunnen uitvallen.

De kosten voor de kustplaatsen zijn ingewikkelder en vragen een meer uitgebreide berekening, afhankelijk van de gekozen oplossing.

Merk op dat in Spoor II van het kennisprogramma Zeewering ook kosten zijn gegeven.. Daar zijn echter niet de hoeveelheden opgenomen voor het jaarlijkse onderhoud en het meegroeien van de kust. Deze kosten zijn derhalve niet te vergelijken met de bovenbenoemde kosten.

5.7 Kennisvragen

Blijft de zandhonger van de Waddenzee in evenwicht met de zandaanvoer met het afgeslagen zand van de Hollandse kust bij ZSS?

6

BOUWSTEEN: WATERVEILIGHEID BUITENDIJKSE GEBIEDEN

Auteur:	Cees Oerlemans
Visualisaties van:	Stijn Koole (BoschSlabbers) en Johanna Bouma (Royal Haskoning)
Aanwezigen Hackaton Buitendijks:	Marc Eisma (Havenbedrijf Rotterdam), Marcel van der Doef (Waterschap Brabantse Delta), Stijn Koole (BoschSlabbers), Stephan van der Biezen (Witteveen+Bos), Cees Oerlemans (TU Delft / HKV), Dook Ligthart (Gemeente Rotterdam) en Thomas Dillon Peynado (Raad voor de leefomgeving en infrastructuur), e.a.

6.1 Inleiding

De kans op overstromingen van buitendijkse gebieden neemt toe door de combinatie van zeespiegelstijging, verhoogde piekafvoer en bodemdaling. Buitendijkse gebieden hebben uiteenlopende gebruiksfuncties: wonen, natuur, landbouw, bedrijven, havens en industrie. Daarmee verschillen ook de afwegingen van maatregelen op het overstromingsrisico te beperken. Zo is er in een landbouwgebied doorgaans minder schade dan stedelijk gebied. Buitendijkse gebieden zijn, over het algemeen, niet beschermd door een waterkering. Wel zijn de buitendijkse gebieden beschermd doordat door een hogere ligging dan veel binnendijkse gebieden.

Buitendijkse gebieden liggen verspreid over Nederland (zie aanvullende kaart **Error! Reference source not found.**). Meer dan een half miljoen personen wonen in buitendijkse gebieden, met name in oude havens rond Rotterdam en Amsterdam¹. In totaal gaat het om ongeveer 85 000 objecten uit de Basisregistraties Adressen en Gebouwen (BAG) waarvan 76 000 een woonfunctie hebben en ongeveer 9000 een industrie-functie².

Tabel 6-1 Aantal buitendijkse objecten voor verschillende gebieden in Nederland

Gebied	Woningen	Industrie	Totaal
Rijn-Maasmonding & rivierengebied	47 656	4951	52 607
Maas, bovenstrooms van Mook	1374	133	1507
IJssel, Bovenrijn en IJsselmeergebied	15 499	1760	17 259
Zuidwestelijke Delta	1 222	285	1507
Kust	10 337	1624	11 961

¹ ENW Achtergrondrapport bij advies aan DGWB inzake woningbouw en klimaatadaptatie <https://www.enwinfo.nl/publish/pages/218841/enw-23-04-achtergrondrapport-bij-advies-aan-dgwb-inzake-woningbouw-en-klimaatadaptatie.pdf>.

² Eigen GIS-analyse met de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG).

Gebied	Woningen	Industrie	Totaal
Totaal	76 088	8753	84 841

Buitendijkse gebieden hebben een uitzonderingspositie wat betreft het beleid rond waterveiligheid:

- buitendijks gebied heeft geen wettelijke normen voor bescherming. Wel is er aanvullend beleid (vb. uitgiftepeilen) wat indirect uitgaat van een bepaald niveau van bescherming;
- bewoners en beheerders van buitendijkse gebieden zijn zelf verantwoordelijk voor het nemen van gevolgbepalende maatregelen en dragen zelf het risico voor waterschade;
- de beoordeling van de veiligheid en de noodzaak van aanvullende maatregelen ligt bij regionale en lokale overheden;
- buitendijks bouwen in uiterwaarden van rivieren is nu doorgaans niet toegestaan op basis van de Beleidsregels Grote Rivieren¹. Dit wordt verder onderschreven door de brief Water en Bodem Sturend², waarin staat dat bouwen in buitendijks gebied vermeden dient te worden.

Over de lange termijn is dan ook de verwachting dat bebouwing in buitendijks gebied niet sterk zal toenemen. De analyse en maatregelen in dit hoofdstuk richten zich op het beschermen van de huidige woningbouwvoorraad en industrie.

In dit hoofdstuk laten we de volgende zaken en gebieden buiten beschouwing:

- de invloed van klimaatveranderingen en maatregelen ter bescherming van buitendijkse natuur. Denk hierbij aan de uiterwaarden in het rivierengebied en de Biesbosch. Dit komt aan bod in Hoofdstuk Effectbeschrijving van het hoofdrapport;
- buitendijkse gebieden die ingezet worden voor de landbouw;
- buitendijkse gebieden langs de kust. Dit gaat om badplaatsen (vb. Katwijk en Scheveningen) en om de Waddeneilanden. Deze gebieden vallen onder Hoofdstuk 5: Zandige Kust.

6.2 Kenmerkende locaties binnen de strategieën

Buitendijkse gebieden zijn erg verschillend van aard, wat doorwerkt in de mate van kwetsbaarheid en mogelijkheden voor adaptatie. We onderscheiden een aantal typen buitendijkse gebieden, met bijbehorende kenmerkende locaties. Deze typen schetsen niet alleen een beeld wat mogelijk is voor deze locaties, maar ook voor vergelijkbare locaties in andere regio's in Nederland. De kenmerkende locaties die beschouwd zijn liggen voornamelijk in de regio Rijnmond-Drechtsteden. Deze keuze is tot stand gekomen doordat in deze regio 1) zeespiegelstijging het snelst en meest doorwerkt, 2) hier de dichtstbevolkte buitendijkse gebieden liggen, 3) de waterstanden over de strategieën het meest verschillen en 4) de grootste economische belangen spelen. Voor buitendijks gaat het om de volgende typen locaties:

- havengebied buitengaats (Kenmerkende locatie: 2e Maasvlakte). Deze gebieden worden gedomineerd door havenactiviteiten, zoals containeroverslag, distributie en chemische industrie;
- havengebied binnengaats (Kenmerkende locatie: Wilhelminahaven Dordrecht). Dit zijn (zee)havens die meer in het binnenland liggen. De focus van deze gebieden ligt op industrie en bedrijvigheid, vaak gaat het om de overslag van droge en natte bulk, logistiek, distributie en maakindustrie;
- binnenstedelijk historisch (Kenmerkende locatie: Historische binnenstad Dordrecht). Een aantal buitendijkse gebieden zijn al eeuwen lang bewoond, zoals het historische centrum van Dordrecht, de Kop van Feijenoord en het Noordereiland in Rotterdam. In deze historische binnensteden zijn veel Rijksmonumenten en beeldbepalende panden te vinden;
- binnenstedelijk nieuwbouw (Kenmerkende locatie: Merwe-Vierhavens). De havengebieden zijn voortdurend in ontwikkeling. Over het algemeen is er een beweging gaande waarbij schepen steeds groter worden en meer diepgang hebben. Om die diepgang te realiseren breidt de haven uit in zeewaartse richting.

¹ Beleidsregels Grote Rivieren (2020). <https://wetten.overheid.nl/BWBR0020040/2020-07-15>.

² Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2022). Water en Bodem sturend. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-c35e65eba0903d738ae26dab222462337b0d8de7/pdf>

Dit betekent ook dat oostelijk gelegen havengebieden herontwikkeld worden en een andere functie krijgen, bijvoorbeeld van industrie naar woningbouw;

- ruraal (kenmerkende locatie: Numansdorp, Hoeksche Waard). Langs de meren en rivieren staan ook buitendijkse objecten. Dit varieert van hele wijken tot verspreide woningen.

6.3 Ontwerpkeuzes

Waterstanden

Allereerst is gekeken welke lokale waterstandsstijgingen bij buitendijkse objecten te verwachten zijn voor 2 m en 5,4 m ZSS. Hiervoor zijn de waterstandsberekeningen gekoppeld aan de BAG-dataset. Daarmee krijgen we een beeld van de lokale waterstandsstijging per buitendijks object voor de strategieën. Aangezien buitendijkse gebieden direct verbonden zijn met de waterlichamen, heeft een stijging van de extreme waterstanden vrijwel direct gevolgen voor de overstromingskans. We hanteren de volgende uitgangspunten in de analyse van de waterstanden:

- vanuit de wens om consistent te zijn met de terugkeertijden die gebruikt worden in de rest van het rapport, concentreren we ons op de waterstandsverschillen - strategie versus huidige situatie – voor een herhalingsperiode van 10 000 jaar. Daarbij moet opgemerkt worden dat dit niet betekent dat lagere herhalingsperiodes niet interessant zijn voor buitendijkse gebieden; lagere terugkeertijden kunnen juist voor buitendijkse gebieden interessant zijn vanwege de relatief grote overstromingskans;
- de (extra) invloed van golven op de overstromingskans is buiten beschouwing gelaten. We stellen de invloed van klimaatverandering op de hydraulische belastingen in de buitendijkse gebieden gelijk aan de verschillen in de waterstand;
- bovenstrooms van Nijmegen (rijntakken) en bovenstrooms van Mook (maastakken), de IJssel en het IJsselmeergebied zijn buiten beschouwing gelaten.

Adaptatiemaatregelen

Maatregelen voor het reduceren van overstromingskans kan je op verschillende lagen toepassen binnen meerlaagse veiligheid. Het consortium Beschermen richt zich op laag 1 (preventie). Laag 2 (ruimtelijke inrichting) en laag 3 (crisisbeheersing) komen minder nadrukkelijk naar voren in dit consortium. Toch zijn er, zeker voor buitendijks gebied, interessante 'mengvormen' denkbaar waarbij niet alles wordt opgelost in laag 1.

Twee categorieën maatregelen liggen het meest voor de hand om de overstromingskans van buitendijkse gebieden gelijk te houden.

Maaiveldverhoging

Door het maaiveld te verhogen kan de overstromingskans van de buitendijkse gebieden beperkt worden. Voor een aantal buitendijkse gebieden is deze strategie ingezet, denk aan het uitgiftepeilenbeleid voor nieuwbouw en renovatie in Rotterdam en Amsterdam. De Staart in Dordrecht is een mooi voorbeeld waar diversificatie in maaiveldhoogte wordt toegepast¹.

Belangrijke voorwaarde om de overstromingskans voor de buitendijkse gebieden gelijk te houden is dat de maaiveldverhoging gelijke tred houdt met de lokale waterstandsverhoging. Om dit te realiseren en op de lange termijn te laten werken is een strategie nodig waarbij je trapsgewijs delen van het buitendijks gebied verhoogd.

- voordelen van deze categorie:
 - aangezien hoger gelegen buitendijkse gebieden verder worden opgehoogd, gaat dit beperkt ten koste van het stroombergende deel van de rivier;
 - zowel de overstromingskans als de overstromingsdiepte, en de bijbehorende schade, wordt beperkt;
- nadelen:

¹ <https://groenblauwdordrecht.nl/nieuws/de-staart-als-schuillocatie/>

- biedt geen, of maar beperkt, bescherming voor bestaande bouw. Voor grote lokale waterstandsstijgingen is het onontkoombaar dat delen van bestaande bouw geamoveerd of gerenoveerd moeten worden;
- kan leiden tot afwentelen, bijvoorbeeld in het geval dat delen van Buitendijks gebied verhoogd worden en nabijgelegen delen niet.

Waterkeringen

Door waterkeringen te plaatsen kan buitendijks gebied beschermd worden, zelfs in zodanige mate dat buitendijks gebied binnendijks komt te liggen. Dit kan doormiddel van vaste constructies, zoals dijken en kademuren, maar ook door middel van (innovatieve) mobiele keringen¹. De opvolgende analyse gaat uit van vaste keringen, maar daarbij moet opgemerkt worden dat tijdelijke keringen (vb. schotten, zandzakken, etc) in veel gevallen een vergelijkbaar beschermingsniveau kunnen bieden. Daarnaast kunnen deze tijdelijke keringen goedkoper en/of beter inpasbaar zijn. Havengebieden kunnen in het geheel, maar ook gedeeltelijk afgesloten worden door middel van keringen en/of sluizen (Antwerpen model). Daarnaast zijn combinaties mogelijk waarbij woningen onderdeel uitmaken van de waterkering. Voor uiterwaarden kan gedacht worden aan het ophogen van zomerkades. Lijst met maatregelen van de Rotterdamse Haven².

- voordelen van deze categorie:
 - bestaande woningbouw en industrie wordt beschermd;
 - wanneer buitendijkse waterkering onderdeel wordt van primaire kering hoeft de huidige primaire kering niet meer versterkt te worden;
 - met verschillende type maatregelen kan maatwerk geleverd worden voor buitendijkse gebieden. Denk bijvoorbeeld aan een combinatie van vaste en tijdelijke waterkeringen;
- nadelen van deze categorie:
 - afhankelijk van de maatregel is het ruimtegebruik aanzienlijk. Zeker voor de gevallen waar wordt gekozen voor constructies met een flauw talud;
 - het gaat ten koste van het stroombergende (en/of stroomvoerende) delen van de rivier of het waterbergende deel van de delta. Dit kan leiden tot opstuwing en hogere waterstanden, en daarmee een grotere overstromingskans voor andere (buitendijkse) gebieden (afwentelen).

Het huidige overstromingsrisico voor de buitendijkse gebieden verschilt sterk. Voor de bescherming van 5 m zeespiegelstijging en 2 m zeespiegelstijging gaan we uit van het handhaven van de huidige overstromingskans. Dit is een sterk versimpelde aanpak, waarbij we niet gebruik maken van inundatiepatronen en schademodelering om te komen tot overstromingsrisico.

Adaptatiepaden

Voor de bescherming is het belangrijk om niet alleen naar individuele maatregelen te kijken, maar ook naar de combinatie en de volgorde van verschillende maatregelen. Dit zijn de zogenaamde adaptatiepaden. De adaptatiepaden beschrijven de volgorde van maatregelen en bieden flexibiliteit om, wanneer de lokale waterstandsstijging doorzet, over te stappen op alternatieve oplossingen.

Voor kleine lokale waterstandsstijgingen liggen lokale maatregelen voor de hand om de overstromingskans niet te laten toenemen. Dit zijn maatregelen uit de categorie waterkeringen. Voor grote lokale waterstandsstijgingen is maaiveldverhoging onvermijdelijk, tenzij de primaire kering wordt verlegd waarmee buitendijks binnendijks komt te liggen. De uitdaging voor buitendijks is om de adaptatiepaden – combinatie van maaiveldverhoging en lokale maatregelen – aan te sluiten op het tempo van de gebiedsontwikkeling van de haven- en woongebieden. Anders gezegd, je wil voorkomen dat maaiveldverhoging leidt tot enorme kapitaalvernietiging omdat de bebouwing en landinrichting nog niet is afgeschreven.

Daarvoor dient een adaptatiepad ontwikkelt te worden wat een cyclisch karakter heeft, waarbij de periode tussen maaiveldverhogingen overbrugd wordt met (tijdelijke) waterkeringen of vormen van meebewegen (acceptatie hogere overstromingskans). Dit vraagt een andere manier van ontwerpen en bouwen. Zo kunnen uitgiftepeilen tijdelijk uitgegeven worden (voor bijvoorbeeld een periode van 50 – 100 jaar) en of het

¹ <https://www.deingenieur.nl/artikel/flexibele-waterkering-in-spakenburg-1>

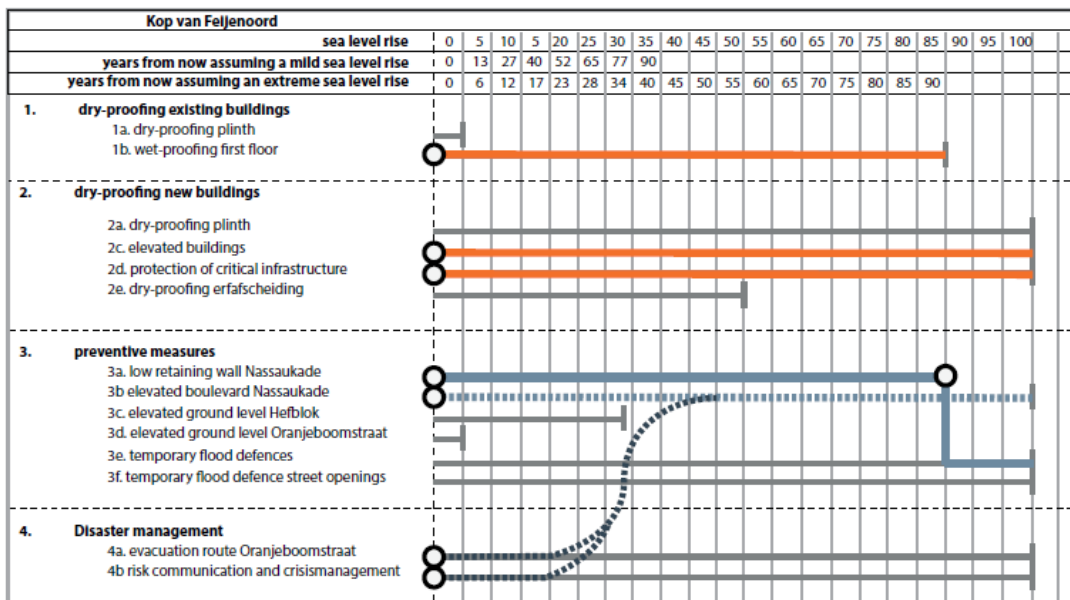
² Port of Rotterdam. <https://www.portofrotterdam.com/nl/waterveiligheid-overzicht>

expliciet (gedeeltelijk) overstroombaar inrichten van buitendijkse gebieden (zie de voorbeelden van het De Staart of het Maasterras) in Dordrecht. Een voorbeeld voor hoe zo'n adaptatiepad voor buitendijkse gebieden eruit kan zien is gegeven in onderstaand kader.

Voorbeeld adaptatiepad voor de Kop van Feijenoord

Ter illustratie is een mogelijke adaptatiepad opgenomen voor de Kop van Feijenoord¹. Te zien is dat voor een bepaalde zeespiegelstijgingen het mogelijk is verschillende maatregelen te nemen. Deze maatregelen hebben een bereik tot een bepaalde mate van zeespiegelstijging, aangegeven met de lijntjes voor elke maatregel. Gegeven een klimaatscenario is deze mate van stijging terug te vertalen naar een aantal jaar. Mocht het maaiveld dus niet voldoende hoog zijn en aanvullende bescherming nodig zijn om de overstromingskans te beperken, dan zijn verschillende combinaties van maatregelen mogelijk. Het is niet haalbaar (of wenselijk) om grote stijgingen (1 m <) op te vangen met lokale maatregelen. Op termijn zal dus, bij grotere waterstandsstijgingen, een nieuwe ronde aan maaiveldverhoging nodig zijn. Dit voorbeeld illustreert hoe de bescherming van buitendijks gebied, in de periode tussen maaiveldverhogingen, vorm gegeven kan worden.

Afbeelding 6.1. Voorbeeld Adaptatiepad voor beschermen tegen overstroming bij Kop van Feijenoord¹



6.4 Bescherming buitendijks gebied bij 5 m zeespiegelstijging (2200)

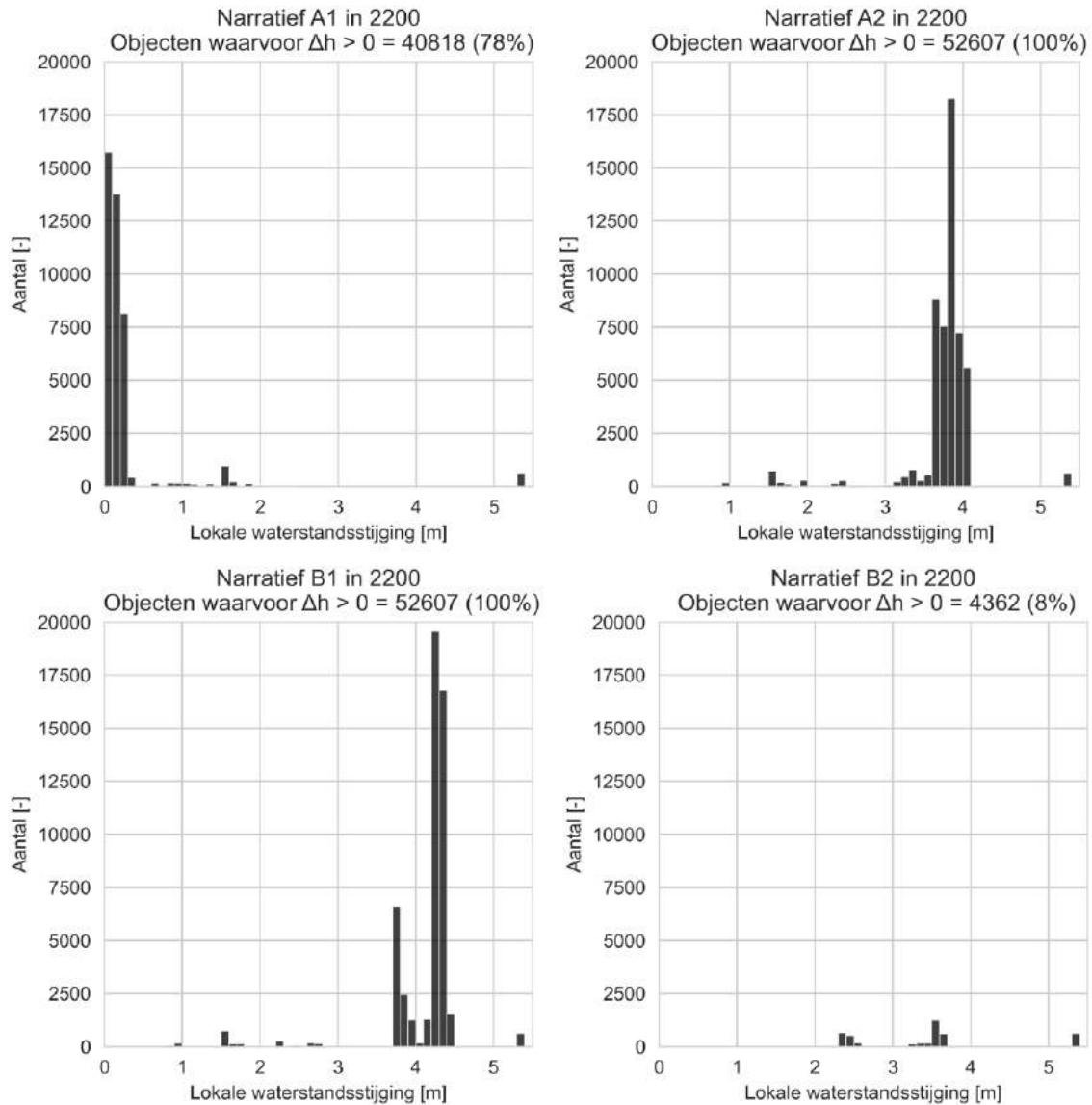
Waterstanden

Voor de buitendijkse objecten in het rivierengebied (n=52607) is geanalyseerd wat de lokale waterstandsstijging is voor de verschillende strategieën. Merk op dat, zoals eerder vermeld, de buitendijkse gebieden langs de IJssel, het IJsselmeergebied, de Kust en de Zuidwestelijke Delta buiten beschouwing zijn gelaten. In de paragraaf met extra kaarten is weergegeven hoe de objecten, met bijbehorende waterstandsstijgingen, ruimtelijk zijn verdeeld over de Rijn-Maasmonding (paragraaf 6.10).

De lokale waterstanden nemen het meest toe voor strategie A2 en B1. Alle buitendijkse objecten krijgen respectievelijk te maken met een lokale waterstandsstijging van 3,7 en 4,1 m. Voor A1 krijgt ongeveer 80 % van de objecten te maken met een waterstandsstijging, maar deze waterstandsstijging blijft voor het merendeel van de objecten beperkt tot enkele decimeters. In strategie wordt het binnenpeil niet beheerst, wat leidt tot

een waterstijging bij alle objecten. In strategie B2 worden de Rijnmond-Drechtsteden ontzien, waardoor maar een kleine 10 procent van de objecten te maken krijgt met een waterstandsstijging. In deze regio worden de waterstanden zelfs sterk verlaagd, wat betekent dat de overstromingskans omlaag gaat. De objecten die wel te maken krijgen met een lokale waterstandsstijging bevinden zich rond de 2^e Maasvlakte, Euro-poortgebied, de Waal, het Haringvliet en Hollandsch Diep.

Afbeelding 6.2. Lokale waterstandsstijging (T=10 000) t.o.v. huidige situatie voor buitendijkse objecten bij een ZSS in 2200 van 5,4 m. Per strategie is te zien hoeveel objecten te maken krijgen met een bepaalde waterstandsstijging. Zo is bijvoorbeeld in de figuur linksboven te zien dat ruim 15 000 objecten te maken krijgen met een waterstandsstijging van 0-0,1 m



In Tabel 6-2 zijn de waterstanden, en waterstandsstijgingen, voor de kenmerkende locaties weergegeven. Deze waarden geven een beeld van de lokale waterstandsstijgingen op basis waarvan kenmerkende langsdorsneden gemaakt kunnen worden. De waterstanden buitengaats – 2^e Maasvlakte en Europort – volgen direct de zeespiegelstijging. Voor de kenmerkende locaties Wilhelminahaven, historische binnenstad van Dordrecht en Merwe-Vierhavens geven A2 en B1 de grootste lokale waterstandsstijgingen. Voor Numansdorp, Hoeksche Waard, stijgen de waterstanden sterk voor de strategieën A2, B1 en B2.

Tabel 6-2 Stijging van de waterstand voor de kenmerkende locaties per strategie met een ZSS van 5,4m in 2200.

Typologie	Ref	A1	A2	B1	B2
Kenmerkende locatie	.				
Havengebied buitengaats 2 ^e Maasvlakte	5,2	10,6 (+5,4)	10,6 (+5,4)	10,6 (+5,4)	10,6 (+5,4)
Havengebied binnengaats Wilhelminahaven, Dordrecht	3,1	3,1 (+0,0)	6,8 (+3,7)	6,9 (+3,8)	0,0 (-3,1)
Binnenstedelijk historisch Historische binnenstad Dordrecht	3,1	3,1 (+0,0)	6,8 (+3,7)	6,9 (+3,8)	0,0 (-3,1)
Binnenstedelijk nieuwbouw Merwe-Vierhavens	3,6	3,6 (+0,0)	7,3 (+3,7)	7,9 (+4,3)	0,0 (-3,6)
Ruraal Numansdorp, Hoeksche Waard	2,9	2,6 (-0,3)	6,3 (+3,4)	6,8 (+3,9)	6,6 (+3,7)

Maatregelen en adaptatiepaden

Uit bovenstaande analyse blijkt dat de vereiste aanpassingen aan buitendijks gebied erg verschilt tussen de strategieën. In sommige strategieën moet voor de buitendijkse gebieden rekening gehouden worden met ruim 4 m waterstandsstijging, bij andere strategieën zijn geen aanpassingen nodig. Tot 2200 zijn er maar een aantal momenten waarop maaiveldverhoging, gezien de afschrijving van de bebouwing en infrastructuur, voor de hand ligt. Uitgaande van een cyclus van 50 -100 jaar zijn dit 2-3 momenten. Om extreme lokale waterstandsstijgingen op te vangen met maaiveldverhoging zijn dus drastische ophogingen van het uitgiftepeil nodig. Waarbij het uitgiftepeil per cyclus zo'n 1-3 m verhoogd dient te worden. Voor deze situatie is beschermen alléén realistisch wanneer wordt overgestapt naar een andere strategie waarbij de lokale waterstandsstijging voor buitendijkse gebieden beperkt blijft. Een alternatief zou kunnen zijn om gebieden binnendijks te leggen, dit zal alleen haalbaar zijn voor grotere stedelijke kernen en niet voor verspreide bebouwing.

6.5 Bescherming buitendijks gebied bij 2 m zeespiegelstijging (2100)

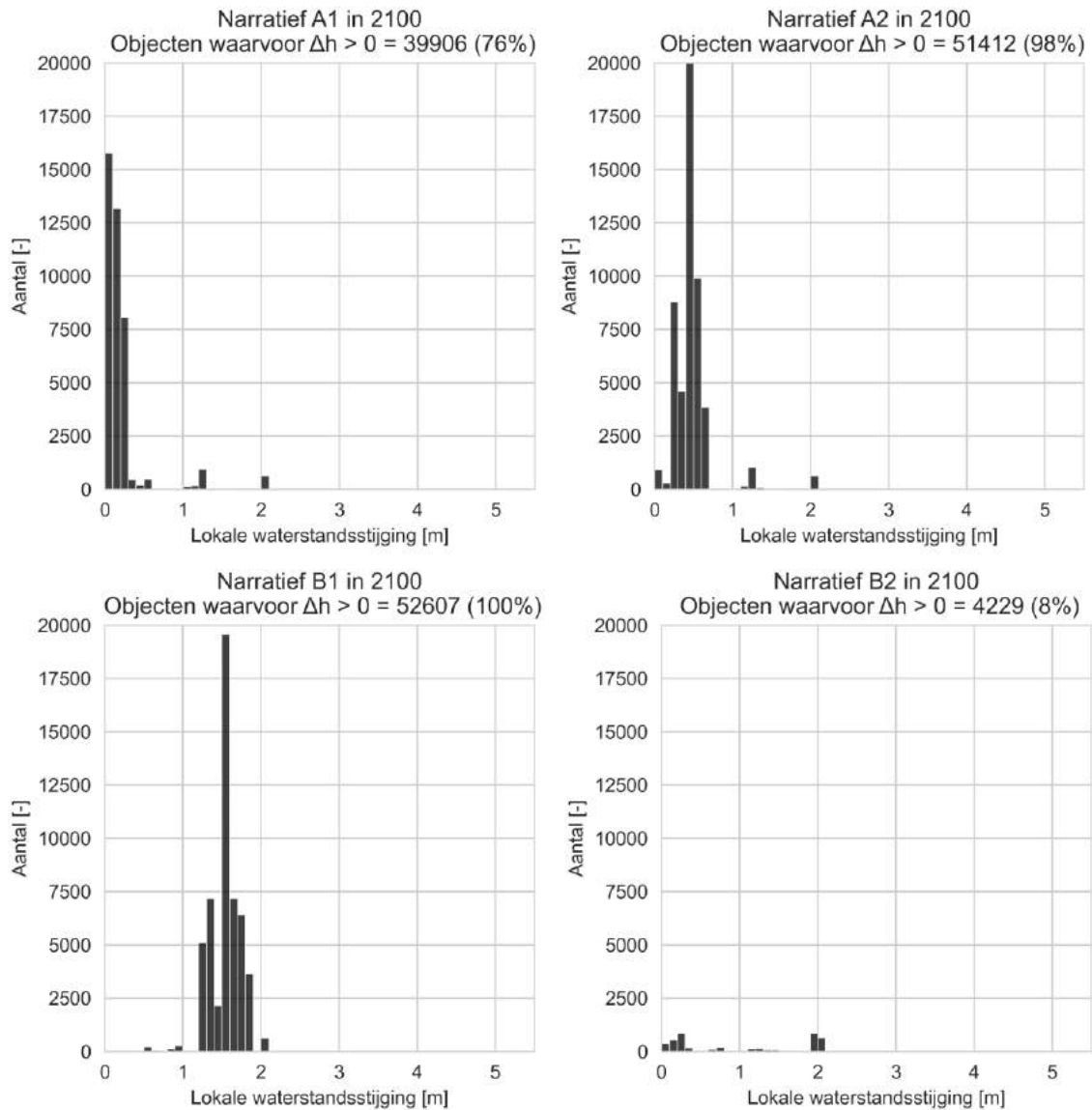
Waterstanden

Voor 2,0 m ZSS is dezelfde analyse uitgevoerd als voor 5,4 m ZSS. De percentages van objecten die te maken krijgen met een lokale waterstandsstijging voor 2,0 ZSS en 5,4 ZSS zijn vergelijkbaar (Afbeelding 6.3). Wel zitten er verschillen in de grootte van de lokale waterstandsstijging. Voor A1 blijft de gemiddelde waterstandsstijging beperkt tot 0.1 m en bij A2 tot 0.5 m. Waar de verschillen tussen A1 en A2 in lokale waterstandsstijgingen voor 5,4 m ZSS klein waren, zijn de verschillen in waterstandsstijging voor 2,0 m dus aanzienlijk. Voor B1 kunnen we een gemiddelde stijging van 1,5 meter verwachten. Bij B2 wordt opnieuw een groot deel van de objecten ontzien, wat resulteert in een beperkte stijging van lokale waterstanden. In de paragraaf met extra kaarten is weergegeven hoe de objecten, met bijbehorende waterstandsstijgingen, ruimtelijk zijn verdeeld over de Rijn-Maasmonding (paragraaf 6.10).

Over het algemeen kunnen we zien dat de ZSS van 2,0 m relatief ongeveer evenveel doorwerkt als voor 5,4 m. Voor ZSS 2,0 m zien we de grootste gemiddelde lokale waterstandsstijging bij strategie B1 met 1,5 m. Dit komt overeen met 75 % (1,5/2,0) van de zeespiegelstijging. Voor 5,4 m is de grootste gemiddelde lokale waterstandsstijging gelijk aan 4,1 m. Dit levert opnieuw een percentage van 75 % (4,1/5,4) op.

Afbeelding 6.3. Lokale waterstandsstijging (T=10 000) t.o.v. huidige situatie voor buitendijkse objecten bij een ZSS in 2100 van 2,0 m.

Per strategie is te zien hoeveel objecten te maken krijgen met een bepaalde waterstandsstijging. Zo is bijvoorbeeld in de figuur linksonder te zien dat bijna 20 000 objecten te maken krijgen met een waterstands-stijging van 1.5 – 1.6 m



De waterstandsstijgingen bij de kenmerkende locaties vormen een vergelijkbaar patroon als de waterstandsstijgingen in het geval van 2,0 m ZSS (zie volgende tabel). Wat opvalt is dat B1 eruit springt als hoogste waarde, waar voor 5,4 m ZSS de strategieën A2 en B1 vergelijkbare lokale waterstandsstijgingen opleverde.

Tabel 6-3 Stijging van de waterstand voor de kenmerkende locaties per strategie met een ZSS van 2,0 m in 2100. Het gaat hier om de lokale waterstanden in m+NAP voor T=10 000. Tussen haakjes is de stijging t.o.v. van de huidige situatie 2023 aangegeven. Waterstanden zijn uitgelezen uit de resultaten van het reservoirmodel

Typologie	Ref.	A1	A2	B1	B2
Kenmerkende locatie					
Havengebied buitengaats 2 ^e Maasvlakte	5,2	7,2 (+2,0)	7,2 (+2,0)	7,2 (+2,0)	7,2 (+2,0)
Havengebied binnengaats Wilhelminahaven, Dordrecht	3,1	3,1 (+0,0)	3,4 (+0,3)	4,4 (+1,3)	0,0 (-3,1)
Binnenstedelijk historisch Historische binnenstad Dordrecht	3,1	3,1 (+0,0)	3,4 (+0,3)	4,4 (+1,3)	0,0 (-3,1)
Binnenstedelijk nieuwbouw Merwe-Vierhavens	3,6	3,6 (+0,0)	3,9 (+0,3)	4,9 (+1,3)	0,0 (-3,6)
Ruraal Numansdorp, Hoeksche Waard	2,9	2,6 (-0,3)	2,9 (+0,0)	4,3 (+1,4)	3,1 (+0,2)

Maatregelen en adaptatiepaden

Tot 2 m ZSS lijkt het haalbaar om de meeste buitendijkse objecten te beschermen met een combinatie van maaiveldverhoging en lokale maatregelen, zoals eerder beschreven. Voor het merendeel van de gebieden blijft de stijging in de extreme waterstanden beperkt tot ongeveer 1.5 m, wat betekent dat lokale maatregelen een groot deel van deze stijging kunnen opvangen. Dit heeft natuurlijk wel grote invloed op het ontwerp en manier van bouwen van nieuwe woningen, infrastructuur en industrie. Hierbij moet rekening gehouden worden met periodiek ophogen van het maaiveld en/of een robuust ontwerp waarbij rekening gehouden wordt met sterke waterstandsstijgingen. Bij de verspreide bebouwing langs de rivieren en gebieden zal maatwerk uit moeten wijzen of bescherming haalbaar is. Het is lastig om hier generiek uitspraken over te doen, aangezien de bebouwing langs rivieren heel verschillend is evenals de bereidheid en (financiële) haalbaarheid om (verregaande) aanpassingen te doen.

6.6 Inrichting buitendijkse gebieden bij 5 m zeespiegelstijging

In de derde Hackaton zijn de gekozen locaties beschouwd en zijn bouwstenen uitgewerkt. Hierbij is primair naar de situatie in 2200 gekeken bij 5,4 m zeespiegelstijging. De bouwstenen zijn beschouwd met de opgave van 2200 en eindsituatie voor ogen. Om de versterkingsopgave te duiden wordt in de basis naar de toename van de kruinhoogte gekeken. Daarbij wordt ook aangenomen dat grondbermen ten behoeve van macrostabieliteit en piping proportioneel meegroeien met de dijk.

In deze paragraaf is voor twee kenmerkende locaties op basis van de waterstanden een maatgevend profiel uitgewerkt om het ruimtebeslag en de kosten inzichtelijk te krijgen. Dit is gedaan voor de traditionele oplossingen en in grond. Naast traditionele oplossingen zijn er ook overige bouwstenen beschouwd (specials, maaiveldverhogingen, waterkerende gebouwen etc.) deze zijn meer conceptueel weergegeven en ter inspiratie aan het eind van deze paragraaf. Dit is gedaan voor een historisch centrum van een buitendijks gebied.

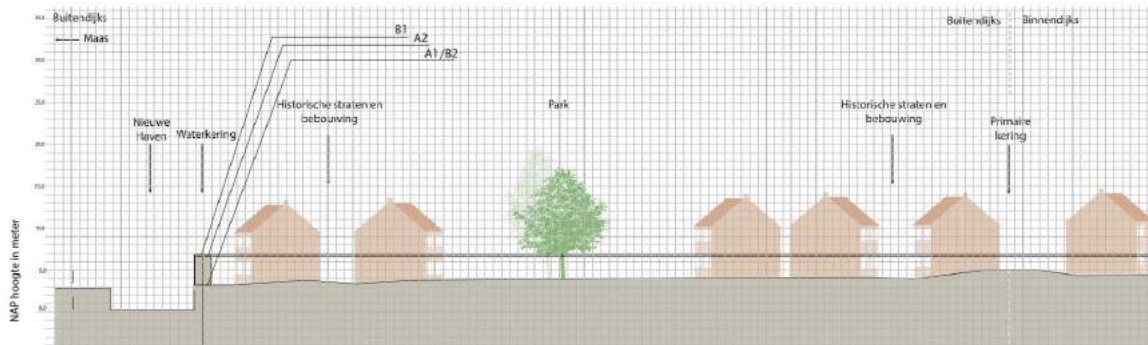
Traditionele bouwstenen (in grond)

Voor de twee kenmerkende locaties zijn factsheets uitgewerkt met daarin een beschrijving van de locatie, de gevolgen van de vier strategieën en een maatgevend profiel.

Maas, Dordrecht, Nieuwe haven

De toename van de waterstanden wisselt enorm tussen de verschillende strategieën. In het geval van 5,4 m zeespiegelstijging, in combinatie met een meegroeiend binnenpeil (strategie A2 en B1), gaat het om lokale waterstandsstijgingen van rond de 4 m. Bij de strategieën met een gecontroleerd binnenpeil wordt geen waterstandsstijging op deze locatie verwacht.

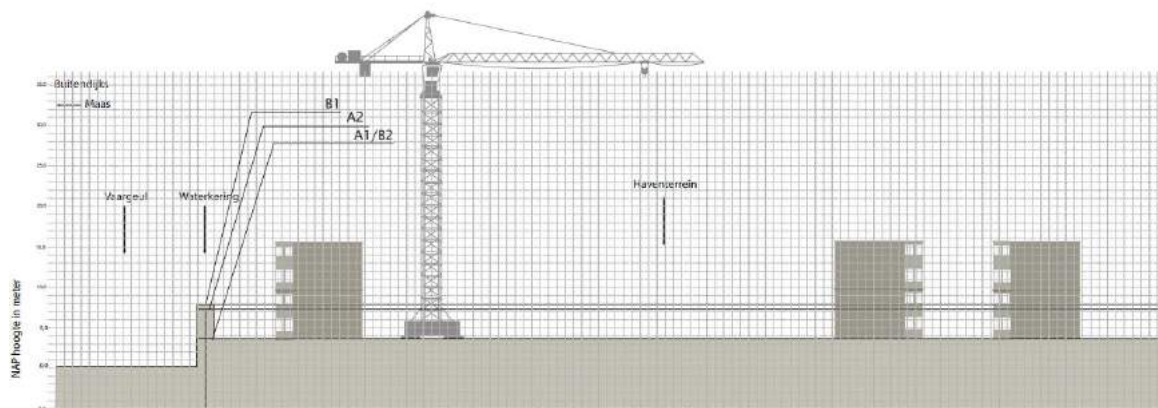
Afbeelding 6.4. Illustratie van de Nieuwe haven in Dordrecht in het jaar 2200 voor de verschillende strategieën



Maas, Rotterdam, Merwe-Vierhavens

In het geval van 5,4 m zeespiegelstijging, in combinatie met een meegroeiend binnenpeil (strategie A2 en B1), gaat het om lokale waterstandsstijgingen van rond de 4 m. Dit heeft drastische gevolgen voor de herontwikkeling van de MerweVierhavens. Bij de strategieën met een gecontroleerd binnenpeil wordt geen lokale waterstandsstijging verwacht voor dit gebied.

Afbeelding 6.5. Illustratie van de Merwe-Vierhavens in Rotterdam in het jaar 2200 voor de verschillende strategieën



Overige bouwstenen

Op de locatie Dordrecht (historisch centrum) zijn ter inspiratie een aantal bouwstenen uitgewerkt, anders dan de traditionele oplossing d.m.v. een constructie.

Buitendijks gebied, Dordrecht

In buitendijks stedelijk gebieden zijn dijkversterkingsmaatregelen met een groot ruimtebeslag alleen te realiseren als ook transformatie van het stedelijk gebied plaatsvindt. De schaarse ruimte is vaak in gebruik voor

historische bebouwing en infrastructuur. Het stedelijke gebied van Dordrecht wordt gekenmerkt door historische bebouwing die gericht is op de Maas. Woningen zijn aangepast aan hogere waterstanden op de kade, wat zichtbaar is aan de hogere ligging van de ingangen van de woningen (toegankelijk met trappen).

Een meer traditionele oplossing is het ophogen van de kades langs de stad in combinatie met een constructie. Dit betekent een klein ruimtebeslag maar het zicht vanaf de kade en woningen op de rivier verdwijnt hiermee. Ook kan gedacht worden aan het plaatsen van waterkerende bebouwing langs de stadsranden. Deze nieuwe bebouwing keert het water tegen bij hoge waterstanden, maar zorgt ook dat de relatie van de stad met de rivier behouden blijft.

Andere ingrepen met een groter ruimtebeslag zijn het integraal ophogen van de kade en het toevoegen van een constructie. Hierbij zouden twee verschillende opties mogelijk zijn: het behouden van de bestaande bebouwing, waarbij de begane grond achter de waterkering komt te liggen en de functie van een souterrain krijgt. In alle gevallen is een aanpassing nodig bij de haven: een nieuwe sluis maakt het mogelijk dat de bestaande waterstand in de haven behouden kan blijven.

BOUWSTENEN BESCHERMEN BUITENDIJKS GEBIED, eindsituatie

2200

Traditioneel, oonstruotie



2200

Nieuwe bebouwing als waterkering en en nieuwe sluis



2200

Constructie en ophogen kade



2200

Constructie en ophogen kade, opvijzelen



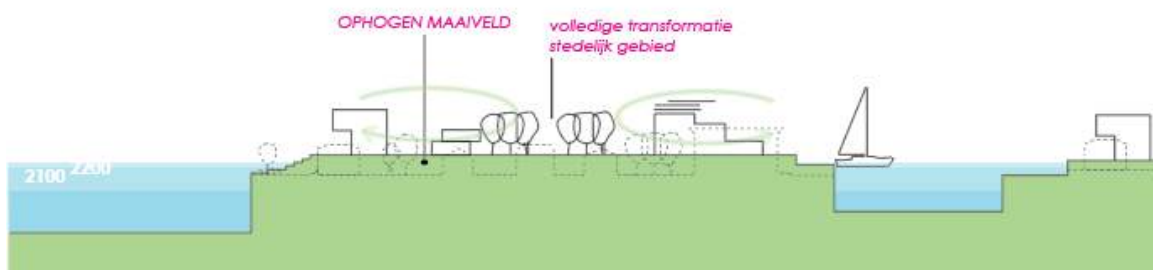
De laatste twee bouwstenen gaan niet over relatief kleine aanpassingen van de kade en/of bebouwing. Bij de eerste bouwsteen wordt een drijvende waterkering aangebracht, waardoor de huidige situatie in stand kan worden gehouden. De drijvende waterkering kan een functie krijgen als boulevard. De tweede optie voorzint en transformatie van het buitendijkse gebied: het maaiveld wordt robuust opgehoogd en het gebied zal volledig opnieuw worden ingericht, met ruimte voor nieuwe bebouwing en functies.

Afbeelding 6.7. Bouwstenen buitendijks

2200
Drijvende waterkering en nieuwe sluis



2200
Ophogen en transformatie stedelijk gebied



Afbeelding 6.8. Drijvende waterkering of 'boulevardkering' rondom de binnenstad van Dordrecht¹



6.7 Uitvoering

Maatregelen zijn niet overal makkelijk uit te voeren. Zo is het kostbaar om het maaiveld te verhogen in zones die nu al bebouwd zijn, denk aan de historische binnenstad van Dordrecht en kapitaalintensieve installaties

¹ <https://flowsplatform.nl/#/samen-sterk---een-verkenning-1671050833982>

in de haven. Bovendien hebben zijn er veel verschillende gebruikers en eigenaren in de buitendijkse gebieden, wat het moeilijk maakt om eenduidig beleid af te stemmen en het risico meebrengt van lange procedures. Zeker voor de zeespiegelstijging van 5 m begint adaptatietijd een cruciale voorwaarde te worden voor de haalbaarheid. Doordat het tempo van ZSS toeneemt dienen omvangrijkere adaptatiemaatregelen uitgevoerd te worden in een korter tijdsbestek. In dit deel van de analyse gaan we nader in op het ruimtebeslag en de volumes die nodig zijn voor maaiveldverhoging. Voor het schatten van het ruimtebeslag en de volumes gaan we uit van twee hoofdstrategieën waarbij we uitgaan van de combinatie van een kademuur en maaiveldverhoging.

Op welke manier de uitvoerbaarheid onder druk staat zien we bijvoorbeeld in het geval van de Maasvlakte 2. Aangezien dit havengebied buitengaats ligt betekent het dat de volledige zeespiegelstijging van 5,4 m in 2200 opgevangen moet worden met adaptatiemaatregelen. Gezien de afschrijfduur van infrastructuur en haveninstallaties is het niet realistisch om vaker dan eens in de 50 jaar het maaiveld te kunnen verhogen zonder kapitaal vernietiging. Dat betekent dat mogelijk het maaiveld maar 2 keer verhoogd kan worden tussen 2100 en 2200, om het gebied gereed te maken voor de ruim 3 m zeespiegelstijging die dan plaatsvindt.

Voor andere gebieden zal dit op een vergelijkbare manier gelden. Dit vraagt om een vergroting van de adaptiviteit van veel gebieden, met name voor de strategieën A2 en B1 waarbij het binnenpeil meegroeit. Voor de strategieën A1 en B2 wordt minder beroep gedaan op de adaptiviteit van de bebouwde omgeving, aangezien voor deze strategieën lagere of helemaal geen lokale waterstandsstijgingen plaatsvinden. De verschillen in de strategieën komen terug in Tabel 6-4 en Tabel 6-5 waar de verschillen in ruimtebeslag zijn weergegeven. In beide tabellen is het ruimtebeslag voor A1 en B2 een stuk kleiner dan het ruimtebeslag voor A2 en B1. Voor welke gebieden we een

Tabel 6-4 Ruimtebeslag van de verschillende strategieën in km2 met een ZSS van 2,0 m in 2100. Per strategie is het ruimtebeslag voor maaiveldverhoging, kademuur en totaal gegeven. Wanneer maaiveldverhoging moet worden toegepast is het ruimtebeslag gelijk aan de oppervlakte van het gebied

Locatie	A1			A2			B1			B2		
	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.
Woningbouw												
Dordrecht	0	0	0	0	0.1	0.1	1	0.1	1.1	0	0	0
Rotterdam	0	0	0	0	0.2	0.2	8.5	0.2	8.7	0	0	0
Subtotaal	0	0	0	0	0.3	0.3	9.5	0.3	9.8	0	0	0
Industrie												
Rotterdam buitengaats	65.0	0	65.0	65.0	0	65.0	65.0	0	65.0	65.0	0	65.0
Rotterdam binnengaats	0	0	0	35.2	0	35.2	35.2	0	35.2	0	0	0
Dordrecht + Ablasserdam	0	0	0	7.8	0	7.8	7.8	0	7.8	0	0	0
Moerdijk	0	0	0	0	0	0	13.0	0	13.0	13.0	0	13.0
Subtotaal	65.0	0	65.0	108.0	0	108.0	121.0	0	121.0	78.0	0	78.0
Totaal	65.0	0	65.0	108.0	0.3	108.3	130.5	0.3	130.8	78.0	0	78.0

Tabel 6-5 Ruimtebeslag van de verschillende strategieën in km2 met een ZSS van 5,0 m in 2200. Per strategie is het ruimtebeslag voor maaiveldverhoging, kademuur en totaal gegeven. Wanneer maaiveldverhoging moet worden toegepast is het ruimtebeslag gelijk aan de oppervlakte van het gebied

Locatie	A1			A2			B1			B2		
	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.
Woningbouw												
Dordrecht	0	0	0	1	0.1	1.1	1	0.1	1.1	0	0	0

Rotterdam	0	0	0	8.5	0.2	8.7	8.5	0.2	8.7	0	0	0
Subtotaal	0	0	0	9.5	0.3	9.8	9.5	0.3	9.8	0	0	0
Industrie												
Rotterdam buitengaats	65.0	0	65.0	65.0	0	65.0	65.0	0	65.0	65.0	0	65.0
Rotterdam binnengaats	0	0	0	35.2	0	35.2	35.2	0	35.2	0	0	0
Dordrecht + Ablasser- dam	0	0	0	7.8	0	7.8	7.8	0	7.8	0	0	0
Moerdijk	0	0	0	13.0	0	13.0	13.0	0	13.0	13.0	0	13.0
Subtotaal	65.0	0	65.0	121.0	0	121.0	121.0	0	121.0	78.0	0	78.0
Totaal	65.0	0	65.0	130.5	0.3	130.8	130.5	0.3	129.8	78.0	0	78.0

Naast het ruimtebeslag speelt ook het benodigde volume voor maaiveldverhoging een rol. De totale oppervlakte van de buitendijkse gebieden die is beschouwd bedraagt ruim 130 km². De locaties, en hoeveelheid, maaiveldverhoging verschilt over de verschillende strategieën (Tabel 6-4 en Tabel 6-5). De grote constante in volumes komt voort uit de maaiveldophoging voor de buitengaatsse havengebieden, die onafhankelijk is voor alle naratieven. In het meest conservatieve geval, strategie B1 met 5 m ZSS, zou jaarlijks zo'n 3 miljoen kub m zand benodigd zijn om de buitendijkse gebieden te kunnen ophogen.

De schattingen wat betreft ruimtebeslag en volume's komen voort uit twee hoofdstrategieën waarbij wordt uitgegaan van (een combinatie van) maaiveldverhoging en een kademuur. Hiermee kan dit gezien worden als een conservatieve schatting. Door andere maatregelen toe te passen is het mogelijk om het ruimtebeslag terug te brengen.

Tabel 6-6 Volume zand, in miljoen m³, voor maaiveldverhoging voor de verschillende strategieën met een ZSS van 2,0 m in 2100

Locatie	A1	A2	B1	B2
Woningbouw				
Dordrecht	0	0	0.3	0
Rotterdam	0	0	2.5	0
Ruraal	-	-	-	-
Subtotaal	0	0	2.8	0
Industrie				
Rotterdam buitengaats	129.9	129.9	129.9	129.9
Rotterdam binnengaats	0	10.6	35.2	0
Dordrecht + Ablasserdam	0	7.6	33.0	0
Moerdijk	0	0	18.2	2.6
Subtotaal	129.9	148.1	216.3	132.5
Totaal	129.9	148.1	219.1	132.5

Tabel 6-7 Volume zand, in miljoen m³, voor maaiveldverhoging voor de verschillende strategieën met een ZSS van 5,0 m in 2200

Locatie	A1	A2	B1	B2
Woningbouw				
Dordrecht	0	2.8	2.8	0
Rotterdam	0	22.8	27.9	0
Ruraal	-	-	-	-

Subtotaal	0	25.6	30.7	0
Industrie				
Rotterdam buitengaats	350.6	350.6	350.6	350.6
Rotterdam binnengaats	0	32.5	32.5	0
Dordrecht + Ablasserdam	0	28.7	30.7	0
Moerdijk	0	35.1	41.6	39.0
Subtotaal	350.6	446.9	455.4	389.6
Totaal				
Totaal	350.6	472.5	486.1	389.6

6.8 Kosten

Om goed inzicht te krijgen in de kosten voor het buitendijks gebied is het belangrijk om onderscheid te maken tussen kosten voor de maatregelen zelf, zoals de kosten van een kuub zand voor maaiveldverhoging, en de kosten die te maken hebben met de landinrichting, zoals amoveren/renoveren van een woonwijk vanwege om maaiveldverhoging mogelijk te maken. De eerste kostenpost wordt gedomineerd door materiaal en grondstofprijzen waarvoor het volume – vb. hoeveel hogen we op? – belangrijk is. De tweede kostenpost wordt gedomineerd door het moment van maatregelen – vb. wanneer hogen we op? En is dat voordat het object (woning/industrie) einde levensduur is? Voor het schatten van de kosten voor buitendijks gebied zijn we enkel uitgegaan van de eerste kostenpost. Dus er zijn alleen kosten meegenomen voor het beschermen van het gebied zelf, en niet voor het aanpassen, renoveren en/of amoveren van bestaande gebouwen en overige landinrichting.

Uitgangspunten kosten

De kosten van buitendijkse maatregelen laten zich lastig schatten. Dit komt onder andere doordat 1) precieze adaptatiepaden onbekend zijn, 2) de functies van buitendijks gebied divers zijn (denk alleen al aan de Rotterdamse haven) en 3) maatwerkoplossingen, zoals mobiele keringen, nog maar beperkt zijn toegepast in het verleden. Om toch een ordegrootte van de kosten te geven gaan we uit van verschillende beschermingsstrategieën, en bijbehorende kostenfuncties, per gebied.

Maaiveldverhoging van de havengebieden met als huidige functie industrie. Voor de volgende havengebieden wordt de lokale waterstandsstijging volledig opgevangen met maaiveldverhoging:

- Rotterdam buitengaats, bestaande uit Maasvlakte2 en Europoort;
- Rotterdam binnengaats, bestaande uit Botlek, Petroleum-, Waal- en Eemhaven en havens rond Krimpen a/d IJssel;
- Dordrecht, bestaande uit Lindthaven, Wilhelminahaven en Merwedehaven;
- Moerdijk, bestaande uit havengebieden rond Moerdijk.

Voor de berekening van de kosten van maaiveldverhoging is volgende kostenfunctie gebruikt:

$$K_{\text{maaiveldverhoging industrie}} = K_{\text{eenheidsprijs maaiveld industrie}} * A_{\text{industrie}} * \Delta h_{\text{gebied}}$$

Waar:

$K_{\text{maaiveld industrie}}$	kosten voor industrie, per gebied, per strategie
$K_{\text{eenheidsprijs maaiveld industrie}}$	kosten ophogen maaiveld industrie, €27,- ¹ , prijspeil 2023 [€/m ² /m]
$A_{\text{industrie}}$	oppervlakte havengebied [m ²]
Δh_{gebied}	lokale waterstandsstijging [m]

¹ Jonkman (2013). Costs of Adapting Coastal Defences to Sea-Level Rise— New Estimates and Their Implications.

Combinatie van **maaiveldverhoging** en **kademuur** voor dichtbevolkte woningbouwgebieden. Voor de volgende gebieden wordt de lokale waterstandsstijging opgevangen met een kademuur (tot 1 m waterstandsstijging) en met een combinatie van maaiveldverhoging en een kademuur (vanaf 1 m lokale waterstandsstijging). Deze strategie sluit dus aan bij het cyclisch ophogen van buitendijks gebied en lokale waterkeringen en is toegepast voor de gebieden:

- buitendijkse woningbouw Rotterdam;
- buitendijkse woningbouw Dordrecht.

Voor de berekening van de kosten van maaiveldverhoging en kademuur is volgende kostenfunctie gebruikt:

Voor $\Delta h_{\text{gebied}} < 1$:

$$\begin{aligned} K_{\text{maaiveld woningbouw}} &= 0 \\ K_{\text{kademuur woningbouw}} &= K_{\text{eenheidsprijs kademuur}} * L_{\text{waterkant woningbouw}} \\ K_{\text{woningbouw totaal}} &= K_{\text{kademuur woningbouw}} \end{aligned}$$

Voor $\Delta h_{\text{gebied}} > 1$:

$$\begin{aligned} K_{\text{maaiveld woningbouw}} &= K_{\text{eenheidsprijs maaiveld woningbouw}} * A_{\text{gebied}} * (\Delta h_{\text{gebied}} - 1) \\ K_{\text{kademuur woningbouw}} &= K_{\text{eenheidsprijs kademuur}} * L_{\text{waterkant woningbouw}} \\ K_{\text{woningbouw totaal}} &= K_{\text{maaiveld woningbouw}} + K_{\text{kademuur woningbouw}} \end{aligned}$$

Waar:

$K_{\text{maaiveld woningbouw}}$	kosten voor maaiveldverhoging, per gebied, per strategie
$K_{\text{kademuur woningbouw}}$	kosten voor kademuur, per gebied, per strategie
$K_{\text{eenheidsprijs kademuur}}$	kosten voor kademuur, €5000,- ¹ per strekkende meter, onafhankelijk van lokale waterstandsstijging, prijspeil 2023 [€/m]
$L_{\text{waterkant woningbouw}}$	lengte waterkant, per gebied [m]
$K_{\text{woningbouw totaal}}$	kosten totaal woningbouw, per gebied, per strategie [€]
$K_{\text{eenheidsprijs maaiveld woning.}}$	kosten maaiveldverhoging woningbouw, €19,- ^{2 3} , prijspeil 2023[€/m ² /m]
A_{gebied}	oppervlakte gebied [m ²]
Δh_{gebied}	lokale waterstandsstijging [m]

Hierbij laten we een hoop zaken buiten beschouwing:

- zoals opgemerkt bij de adaptatiestrategieën zijn er allerlei tussenvarianten mogelijk. Voor deze studie voert het te ver om de kosten van deze varianten te kwantificeren;
- de kosten zijn onafhankelijk van moment, frequentie en volgorde. Alleen de marginale kosten zijn berekend. Het is voorstelbaar dat meerdere rondes van maatregelen (vb. maaiveldverhoging) nodig zijn. Daarnaast zou overinvestering plaats kunnen vinden wanneer wordt uitgegaan van een hogere zeespiegelstijging dan de zeespiegelstijging die daadwerkelijk optreedt;
- de berekende kosten zijn onafhankelijk van het moment van investeren, er is dan ook geen netto constante waarde berekend;
- de objecten in rurale gebieden (langs rivieren en meren) hebben we niet meegenomen in de kosten-schatting;
- uitkopen van landeigenaren en kosten voor de landinrichting zijn niet meegenomen. Deze kosten kunnen aanzienlijk zijn, zeker wanneer bebouwing (industrie/woning) geamoveerd moet worden die nog niet volledig is afgeschreven.

¹ Van Veelen (2016). Adaptive planning for resilient coastal waterfronts. Proefschrift TU Delft.

² R.C.B. van Ham, december 2012, Kostenvergelijking van adaptieve bouwstrategieën in buitendijkse gebieden, stadsbeheer Rotterdam. Originele rapport niet gevonden.

³ Royal HaskoningDHV (2017). KBA terreinhoogte buitendijks – concept.

Kosten 2 m ZSS

De totale kosten worden gedomineerd door de kosten voor industriële havengebieden. Binnen de kosten voor deze havengebieden is het merendeel toe te rekenen aan de buitengaats havengebieden; de 2^e Maasvlakte en Europoort. Dit komt doordat deze gebieden zowel in oppervlakte (65 km²) en op te vangen lokale waterstandsstijging (volledige zeespiegelstijging) het grootst zijn. Strategie B1 resulteert in de grootste kosten, bijna 5.8 miljard euro. De kosten voor A2 liggen 2 miljard lager, wat voornamelijk komt doordat de waterstanden rond Rotterdam meer beheerst worden waardoor minder aanpassing nodig is aan de binnengaats havengebieden. Wel zijn nog steeds aanpassingen nodig aan de woningbouwgebieden rond Rotterdam en Dordrecht. In de strategieën A1 en B2 is het binnenpeil beheerst, wat leidt tot kosten rond de 3 miljard euro omdat voor buitengaats gebieden nog steeds maatregelen nodig zijn. Daarnaast wordt het havengebied in Moerdijk wel beschermd in strategie A1 en niet in B2, wat leidt tot een verschil van 70 miljoen tussen deze strategieën.

Tabel 6-8 Kosten, in Meuro, van de verschillende strategieën met een ZSS van 2,0 m in 2100. Per strategie is de kosten voor maai- veldverhoging, kademuur en totaal gegeven

Locatie	A1			A2			B1			B2		
	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.
Woningbouw												
Dordrecht	0	0	0	0	63	63	5	63	68	0	0	0
Rotterdam	0	0	0	0	159	159	48	159	207	0	0	0
Subtotaal	0	0	0	0	222	222	53	222	275	0	0	0
Industrie												
Rotterdam buitengaats	3506	-	3506	3506	-	3506	3506	-	3506	3506	-	3506
Rotterdam binnengaats	0	-	0	285	-	285	1235	-	1235	0	-	0
Dordrecht + Ablasser- dam	0	-	0	62	-	62	272	-	272	0	-	0
Moerdijk	0	-	0	0	-	0	492	-	492	70	-	70
Subtotaal	3506	-	3506	3853	-	3853	5505	-	5505	3576	-	3576
Totaal	3506	-	3506	3853	222	4055	5558	222	5780	3576	0	3576

Kosten 5 m ZSS

Voor 5 meter ZSS is het relatieve beeld vergelijkbaar en zijn de kosten uitvergroet. Opnieuw zijn de hoogste kosten voor strategie A2 en B1, respectievelijk 15.5 en 16 miljard euro. Ongeveer 9.5 miljard komt voort uit de kosten voor de buitengaats gebieden en is gelijk voor alle strategieën. De kosten voor de bebouwde gebieden van Rotterdam en Dordrecht lopen op naar 700 miljoen euro. In de strategieën A1 en B2 is het binnenpeil beheerst, wat leidt tot kosten rond de 9.5 miljard euro omdat voor buitengaats gebieden nog steeds maatregelen nodig zijn.

Tabel 6-9 Kosten, in Meuro, van de verschillende strategieën met een ZSS van 5,0 m in 2200. Per strategie is de kosten voor maai- veldverhoging, kademuur en totaal gegeven

Locatie	A1			A2			B1			B2		
	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.	Maai.	Kade	Tot.

Woningbouw												
Dordrecht	0	0	0	51	63	114	5	63	68	0	0	0
Rotterdam	0	0	0	434	159	593	531	159	690	0	0	0
Subtotaal	0	0	0	485	222	707	536	222	758	0	0	0
Industrie												
Rotterdam buitengaats	9464	0	9464	9464	0	9464	9464	0	9464	9464	0	9464
Rotterdam binnengaats	0	0	0	3562	0	3562	3779	0	3779	0	0	0
Dordrecht + Ablasser- dam	0	0	0	775	0	775	832	0	832	0	0	0
Moerdijk	0	0	0	948	0	948	1124	0	1124	1053	0	1053
Subtotaal	9464	0	9464	14749	0	14749	15199	0	15199	10517	0	10517
Totaal	9464	0	9464	15234	222	15456	15735	222	15957	10517	0	10517

Reflectie op de kosten

Zoals onder de uitgangspunten beschreven gaan we voor de kostenschatting uit van een vereenvoudigde strategie. Het is dus heel goed mogelijk om de genoemde strategieën verder te optimaliseren waarmee aanzienlijke kostenbesparingen mogelijk zijn. Een deel van de gestelde maaiveldverhoging is dat geval misschien niet nodig en kan vervangen worden door andere en goedkopere maatregelen. Daarnaast ligt de focus in deze analyse op de Rijn-Maasmonding, daarmee zijn grote delen buiten beschouwing gelaten in de kostenschatting. Voor een volledig beeld is het dus aan te bevelen om ook naar de adaptatie van deze gebieden te kijken.

6.9 Kennisvragen

Onderstaande lijst met vragen is niet uitputtend, maar geeft wel een overzicht van de belangrijkste aspecten om (op korte termijn) te onderzoeken:

Adaptiepaden: verhouding maatregelen ruimtelijk en in de tijd

1. Buitendijkse gebieden hebben een aparte status in waterveiligheidsbeleid. Hoe verandert het beleid van buitendijkse gebieden en wat betekent dat voor de adaptatiemogelijkheden?
2. Mocht het wonen in buitendijkse gebieden in de toekomst niet mogelijk zijn. Hoe organiseer je "managed retreat" van buitendijkse gebieden? Waar gaan de half miljoen mensen die nu buitendijks wonen heen? Verantwoordelijkheden in ontwerp en gebiedsontwikkeling. Hoe zorg je dat je het kan handhaven? Voorkomen van afwentelen?
3. De huidige analyse focust op het rivierengebied en de Rijn-Maasmonding. Delen van Nederland zijn daarmee buiten beschouwing gelaten. Wat betekent zeespiegelstijging de buitendijkse gebieden voor de andere gebieden, zoals het IJssel en IJsselmeergebied?

Secundaire effecten van klimaatverandering en -adaptatie

Het vertrouwen van de Nederlander, zowel van bedrijven als individuen, op het vlak van waterveiligheid is hoog. Klimaatverandering en -adaptatie kunnen invloed hebben op aspecten als risicoperceptie en aantrekkelijkheid (vb. vrij uitzicht op het water) van het wonen in buitendijkse gebieden.

4. Wat betekent dit voor huizenprijzen in buitendijkse gebieden?
5. Hoe hangt adaptatie samen met de verzekerbaarheid en onverzekerbaarheid van risico's in buitendijkse gebieden? Kan de overheid het volhouden om schade niet te vergoeden?

Verandering in dynamiek gerelateerd aan natuurgebieden

Buitendijkse natuurgebieden en uiterwaarden dreigen te verdrinken door ZSS.

6. Tot welke zeespiegelstijging (mm/j) zijn natuurgebieden en uiterwaarden in staat om mee te groeien (natuurlijk opslibben)?

7. Huidige ecosystemen zijn afhankelijk van een bepaald regime droog/nat. Wat is de invloed (positief/negatief) op buitendijkse natuurgebieden van een verandering in het regime droog/nat door ZSS?

Relatie tussen buitendijks gebied en ontwikkeling havens

De havens in Nederland zijn continu in beweging. Dit zal de komende jaren doorgaan en waarschijnlijk versnellen door de energie transitie.

8. Hoe ontwikkelt het watersysteem zich in de toekomst. Zet de verdieping in de toegangskanalen (vb. Nieuwe Waterweg) door?
9. Hoe ontwikkelt de scheepvaart zich in de toekomst? Komen er meer/minder schepen in de toekomst door invloed van de energietransitie? Wat doen periodes van droogte i.c.m. met zeespiegelstijging voor de bevaarbaarheid van het achterland?
10. Welk ruimtebeslag vraagt de havens van Nederland in de toekomst? Het is voor te stellen dat gedurende de transitiefase extra ruimte nodig is omdat petrochemische en groene industrie naast elkaar actief zijn.

6.10 Buitendijks - aanvullende kaarten

Buitendijkse objecten in Nederland

Afbeelding 6.9. Landelijk beeld van buitendijkse objecten. Dit zijn objecten uit de BAG-dataset¹ die in het winterbed² van de hoofwatersysteem liggen. Combinatie van wonen, industrie en bedrijven. Objecten zijn gemarkeerd met verschillende kleuren om onderscheid tussen woonplaatsen aan te geven



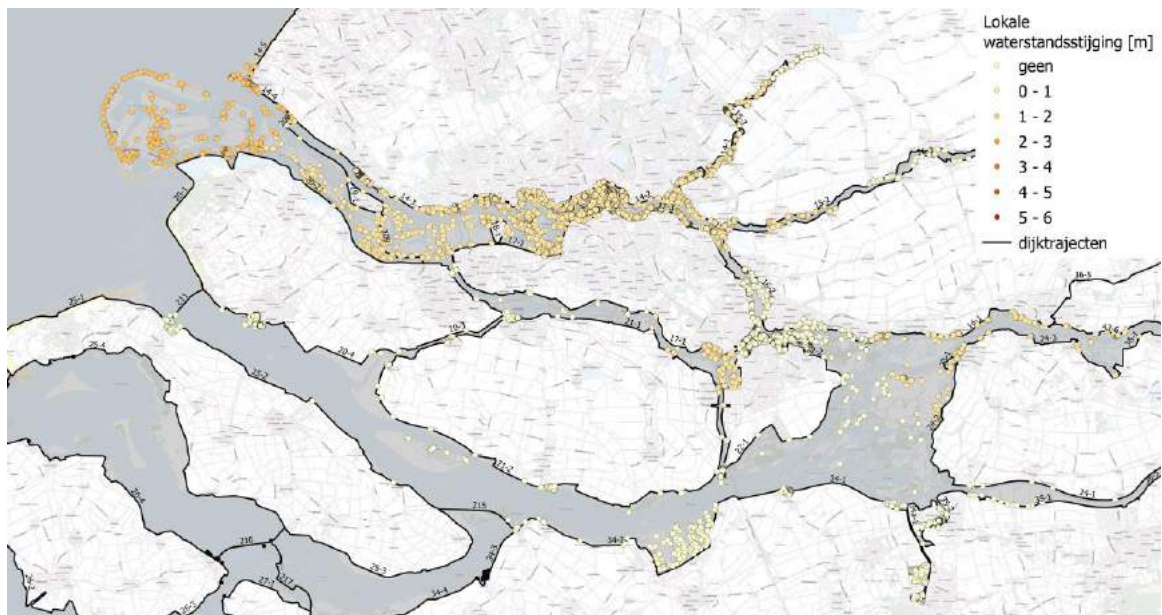
¹ Basisregistraties Adressen en Gebouwen. <https://data.overheid.nl/en/dataset/basisregistratie-adressen-en-gebouwen--bag->

² Winterbed BOI2023.

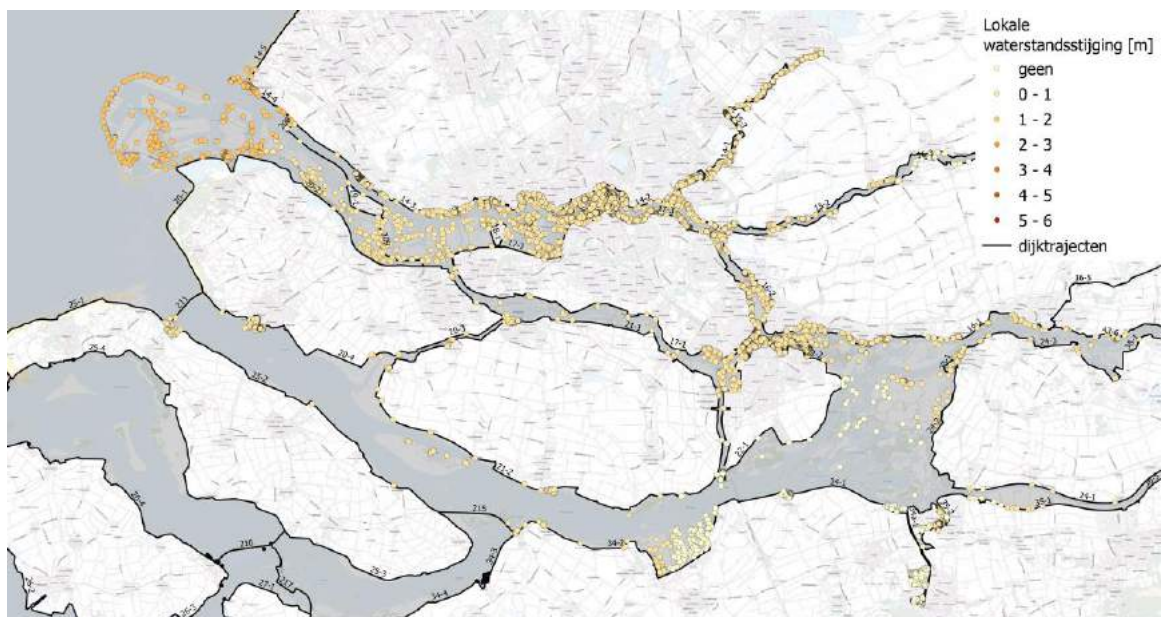
Kaarten waterstandsstijgingen in Rijn-Maasmonding

Zeespiegelstijging 2,0 m in 2100

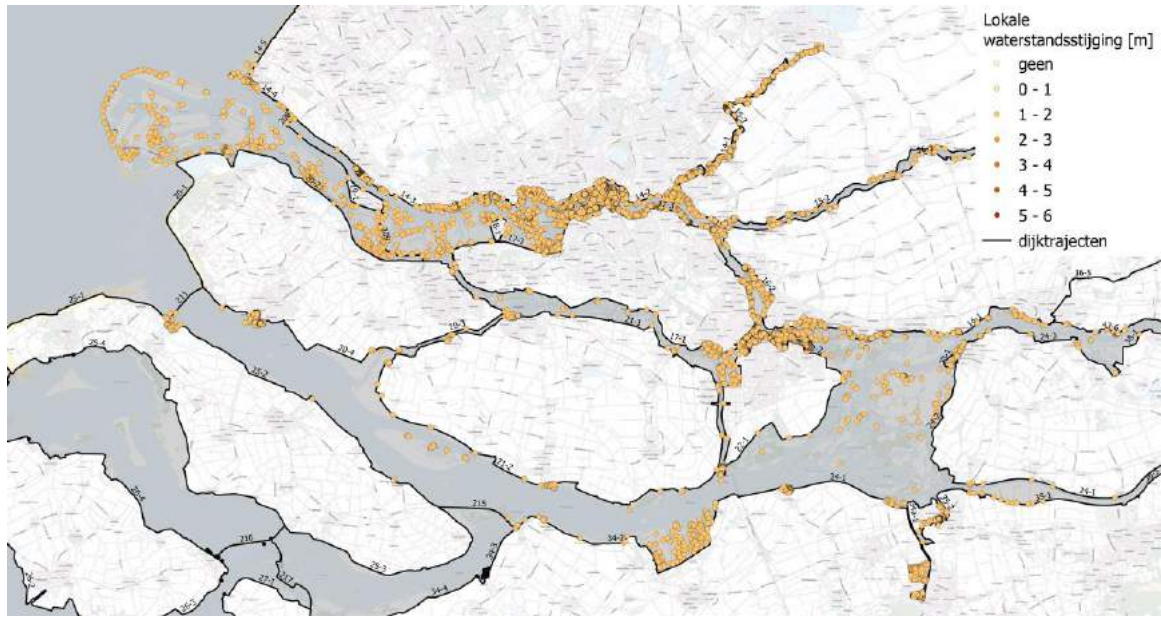
Afbeelding 6.10. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie A1 in 2100



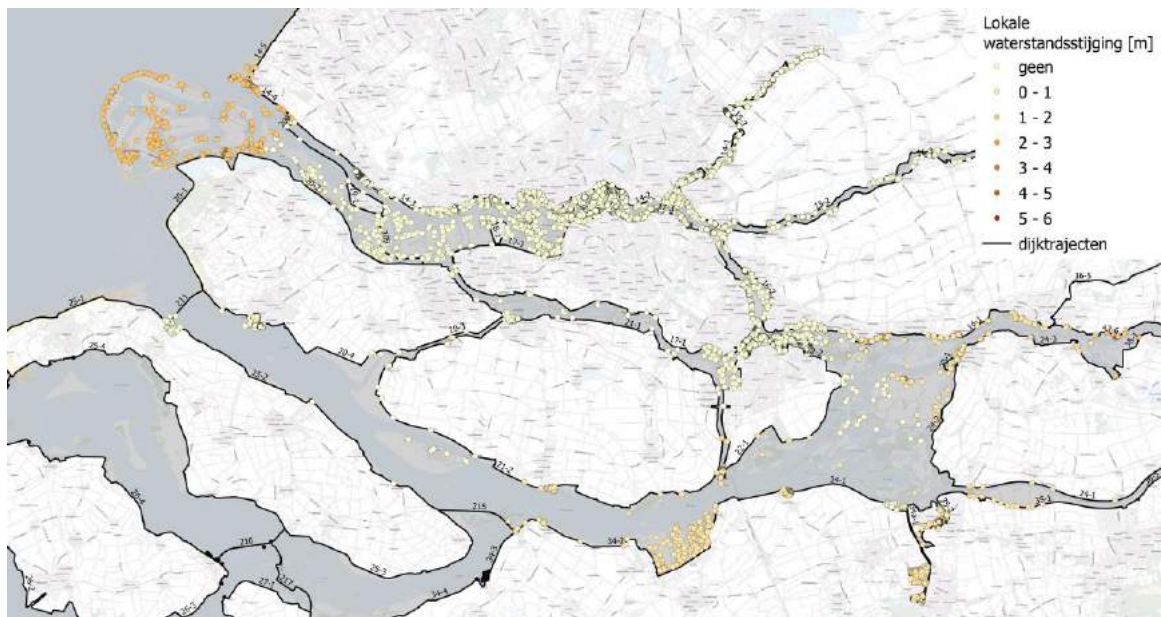
Afbeelding 6.11. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie A2 in 2100



Afbeelding 6.12. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie B1 in 2100

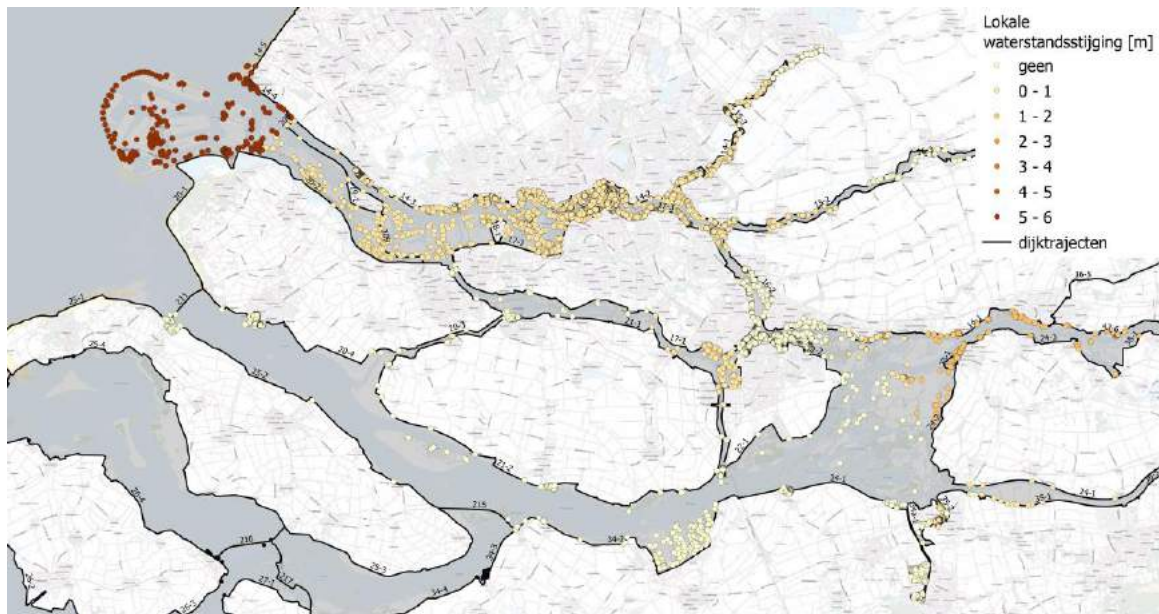


Afbeelding 6.13. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie B2 in 2100

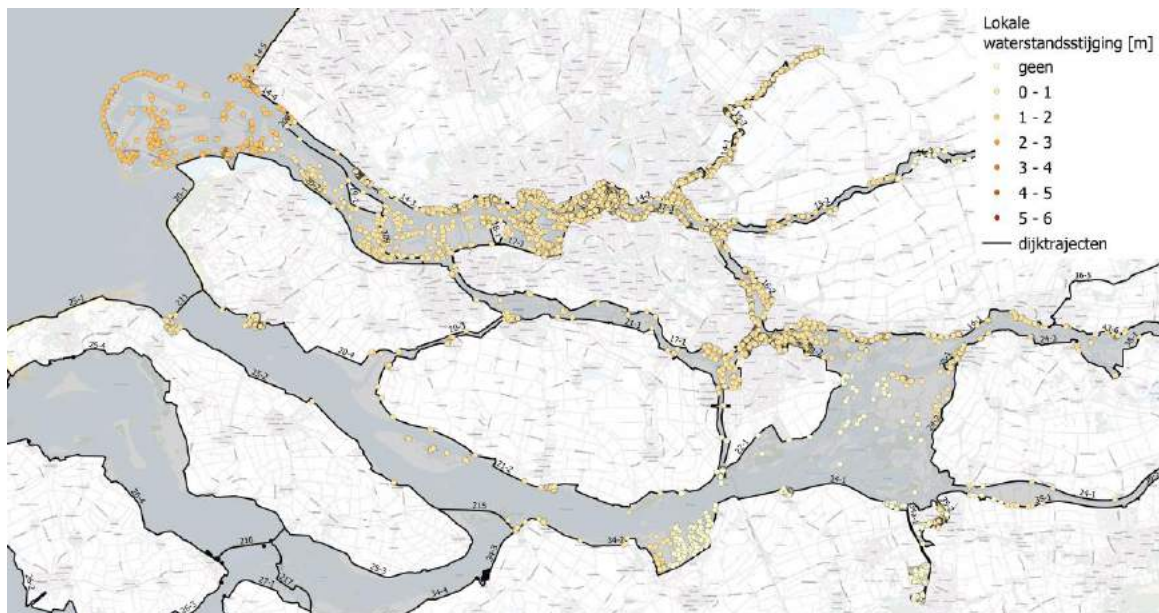


Zeespiegelstijging 5,4 m in 2200

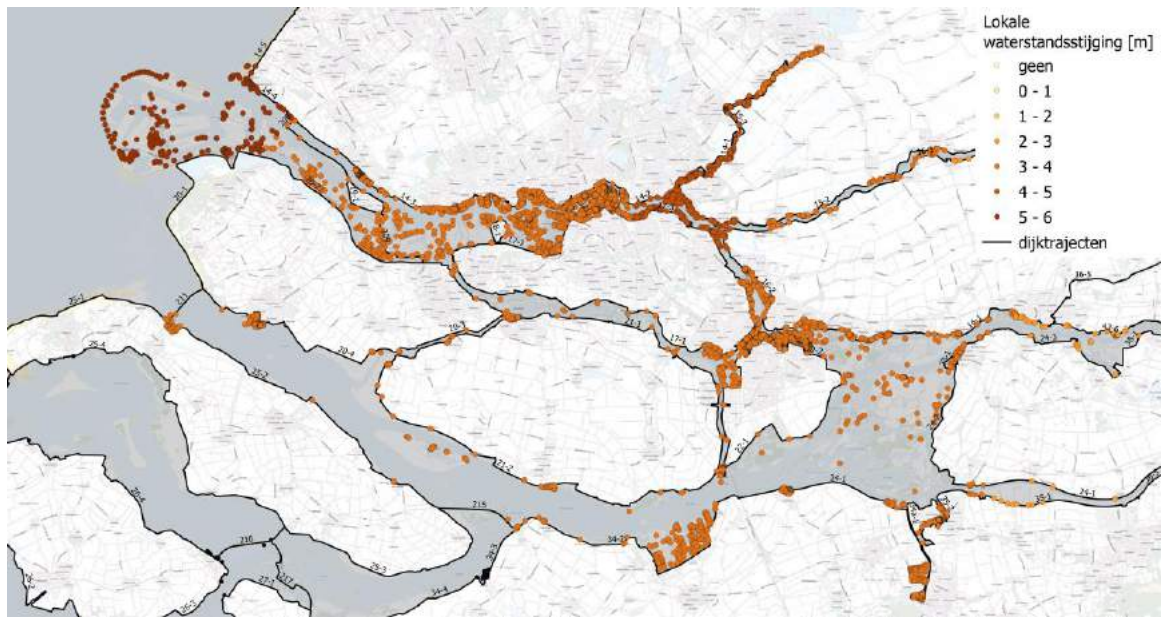
Afbeelding 6.14. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie A1 in 2200



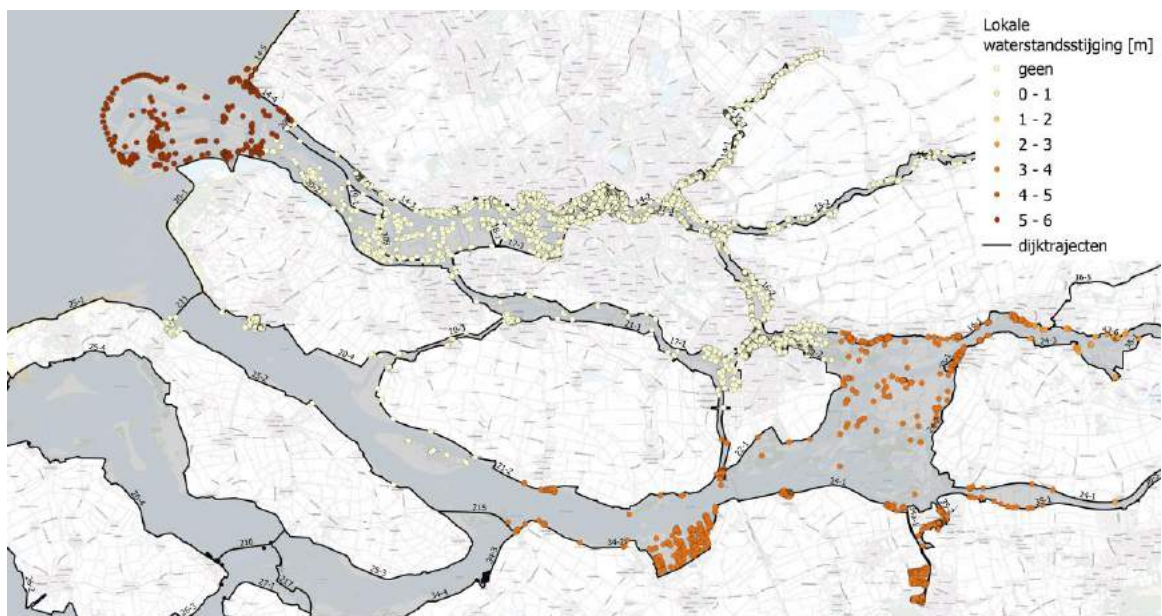
Afbeelding 6.15. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie A2 in 2200



Afbeelding 6.16. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie B1 in 2200



Afbeelding 6.17. Waterstandsstijging buitendijkse objecten strategie B2 in 2200



7

ZOET WATER

Auteur: Bas Kolen, Michiel Pezeij (HKV) Marjolein Mens, Janneke Pouwels, Femke Schasfoort (Deltares)

7.1 Inleiding

Er bestaan geen harde eisen voor de zoetwaterbeschikbaarheid in Nederland in termen van kwantiteit; de waterschappen en Rijkswaterstaat streven continu naar een goede watervoorziening. Wel worden in droge jaren allerlei maatregelen genomen om de zoetwaterbeschikbaarheid te optimaliseren. Denk aan de alternatieve zoetwatervoorziening voor West-Nederland, en het gericht sturen op zoetwater'buffers' in de Hollandse IJssel en de Lek. Ook is er een afwegingskader (een verdringingsreeks) om in een droog jaar bepaalde functies voorrang te geven in de waterverdeling op andere functies. Op termijn (2050) is de ambitie van het Deltaprogramma Zoetwater (DPZW) om Nederland weerbaar te maken tegen watertekort. Rijkswaterstaat heeft dit vertaald in een ambitieniveau voor het hoofdwatersysteem: weerbaar tegen een droogte die gemiddeld eens per twintig jaar voorkomt in een scenario van sterke klimaatverandering en groeiende economie.

In de uitwerking van de oplossingsrichting Beschermen gaan we uit van het huidige grondgebruik en de huidige watervraag als referentie (met hierbij dus ook de huidige eisen aan chloridegehalten). Om de zoetwaterbeschikbaarheid te vergroten is aandacht besteed aan de opslagcapaciteit van zoetwaterbuffers in het hoofdwatersysteem. Om te bepalen of deze extra opslagcapaciteit significant is, is een waterbalans opgesteld vanuit het perspectief van het hoofdwatersysteem. Hierbij is gekeken naar de watervraag van het regionale (water)systeem (i.e. onttrekkingen van waterschappen uit de grote rivieren, meren en kanalen ten behoeve van peilbeheer, waterkwaliteit en beregening), de watervraag van hoofdwatersysteem zelf (doorspoelvraag om de grote meren en de Rijn-Maasmonding zoet te houden) en naar het wateraanbod (hoeveel rivierwater Nederland binnenkomt en de beschikbare voorraad zoetwater in buffers die gedurende deze periode ook kan worden benut).

De watervraag voor doorspoeling van het hoofdwatersysteem splitst zich uit naar de benodigde afvoer om zoutindringing via de Nieuwe Waterweg tegen te gaan in de Rijn-Maasmonding) en de benodigde afvoer van de afgesloten systemen om zoutindringing via sluizen tegen te gaan: Amsterdam-Rijnkanaal/Noordzeekanaal (ARK/NZK), IJsselmeer, Volkerak-Zoommeer (VZM) en het Brielse meer).

Neerslag en verdamping zijn buiten beschouwing gelaten om dubbeltellingen te voorkomen. We kijken naar de gemiddelde balans over 90 dagen in een zeer droog jaar. De netto verdamping (die toeneemt door klimaatverandering) is verdisconteerd in de regionale watervraag watervraag voor beregening, peilhandhaving van regionale watersystemen en doorspoeling van boezems en polders.

De 'watervraag' voor scheepvaart is buiten beschouwing gelaten, maar je zou kunnen stellen dat de watervraag van het hoofdwatersysteem al zo groot is dat, wanneer daarin voorzien wordt, scheepvaart ook mogelijk blijft. Als noodmaatregel kunnen ook extra stuwen worden geplaatst.

7.2 Uitgangspunten

De waterbalans is opgesteld voor een droge zomerperiode zoals voorkwam in 1976. Deze combinatie van een hoog neerslagtekort en lage rivierafvoeren heeft een geschatte terugkeertijd van 30 tot 50 jaar in het huidige klimaat. We hebben de waterbalans over een periode van 3 maanden (90 dagen) bepaald. In droge zomers is dit grofweg de tijdsduur van een watertekortsituatie. In de zomermaanden is doorgaans de watervraag het grootst en de aanvoer via de rivieren het laagst. De getallen zijn gemiddeld over de zomerperiode (juli-aug-sept) en uitgedrukt in m³/s. Het verschil tussen de watervraag en het wateraanbod via de rivieren kan binnen die periode van 90 dagen wel groter zijn dan het getoonde gemiddelde. We gaan ervan uit dat als de waterbalans sluitend is in deze periode van 90 dagen, dat de kortere periodes van watertekorten kunnen worden 'opgevangen' door deze buffers tijdelijk meer aan te spreken en in uiterste gevallen tijdelijke tekorten te accepteren.

De focus ligt dus op het hoofdwatersysteem. Tekorten als gevolg van verdamping of een grote regionale watervraag worden meegenomen door de posten beregening, peilhandhaving en het watergebruik als drinkwateronttrekkingen en voor industrie.

Voor de huidige situatie (referentie 2020) is er over een periode van 90 dagen volgens de getoonde waterbalans geen watertekort. De gemiddelde rivierafvoer over een periode van 90 dagen is 1.050 m³/s, de gemiddelde watervraag over deze periode is 850 m³/s waarbij bijna 60 % van de afvoer wordt gebruikt voor bestrijding van verzilting in het hoofdwatersysteem en 13 % voor peilhandhaving en regionale watersystemen. De andere gebruiksfuncties hebben een kleinere watervraag. Over een kortere periode dan 90 dagen kan er echter wel een watertekort ontstaan door de beperkte omvang van de buffers. Dit zien we nu al in de praktijk.

Er is al rekening gehouden met de nu al aanwezige buffercapaciteit in het IJsselmeer en Markermeer van 400 Mm³ (wat gelijk is aan een peilvariatie van 20 cm). Ook in de Zuidwestelijke Delta (ao Volkerak-Zoommeer) en Brielse Meer is ook al buffercapaciteit aanwezig. De totale buffercapaciteit is geschat met behulp van de Basisprognoses 2018 (berekend met het Nationaal Water Model) op 57 m³/s uitgaande van 20 cm bufferschijf op het IJsselmeer, Markermeer, Volkerak-Zoommeer en Grevelingen 1.

7.3 Zoetwaterbalans in 2100 en 2200

De klimaatverandering met de hogere zeespiegelstijging, toenemende droogte en veranderde rivierafvoer heeft invloed op zowel de watervraag- als wateraanbodkant van de waterbalans. Naast de toename van het watergebruik en de vraag voor extra peilhandhaving en beregening zijn de voornaamste effecten:

- een grote toename van de watervraag voor doorspoeling tegen zoute kwel in regionale polders;
- een grote toename van de watervraag voor peilbeheer van de veengebieden (waarbij in deze uitwerking nog geen rekening is gehouden met extra peilopzet);
- een grote toename van de watervraag voor bestrijding van de verzilting op het hoofdwatersysteem;
- een afname van de rivierafvoer van de Rijn en de Maas in de zomerperiode.

7.3.1 Watervraag

In Tabel 7-1 is een overzicht opgenomen van de geschatte watervraag voor verschillende functies voor de zichtjaren 2100 en 2200. In Afbeelding 7.1 is een overzicht opgenomen van de verwachte afvoer op de rivieren over een periode van 90 dagen voor deze zichtjaren.

¹ <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/nationaal-water-model/basisprognoses/basisprognoses-2018-zoetwater/uitvoer-bp-2018-zw/>

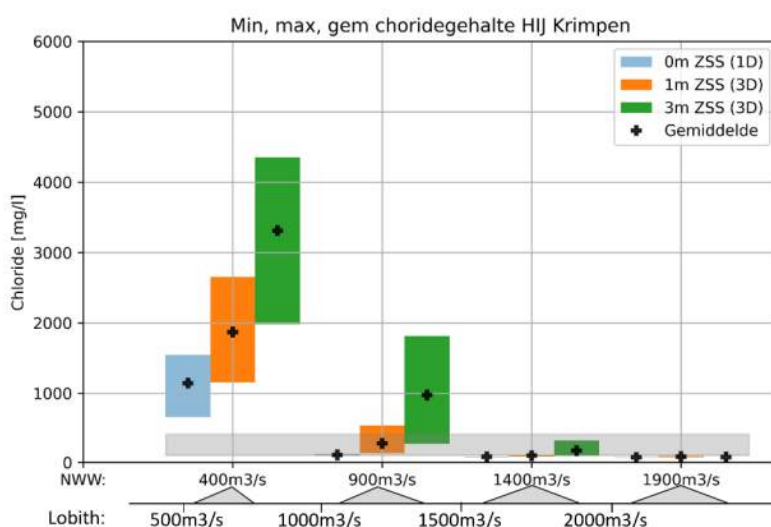
Tabel 7-1 Verandering van de watervraag aan het hoofwatersysteem in 2100 en 2200 bij de gekozen klimaatscenario's

	Huidig	2100	2200
Doorspoeling zoute kwel in regionale polders [m ³ /s]	20	150	1000
Doorspoeling boezemsystemen [m ³ /s]	54	60	100
Benodigde afvoer RMM voor doorspoeling vanwege zoutindringing uit zee [m ³ /s]	500	1000	1850
Benodigde afvoer overige systemen voor doorspoeling vanwege zoutindringing uit zee (als ARK/NZK, IJsselmeer, VZM en het Brielse meer) [m ³ /s]	95	240	385
Overige functies:			
- watergebruik industrie en drinkwater [m ³ /s]	18	24	33
- berekening landbouw [m ³ /s]	53	101	149
- regionaal peilbeheer [m ³ /s]	133	157	181
Totaal [m ³ /s]	873	1732	3698

De doorspoeling van zoute kwel in regionale polders is gebaseerd op de studie naar grondwaterverzilting en watervraag van spoor II van KPZSS¹. Dit water wordt aangevoerd via de boezemsystemen en het hoofwatersysteem. In deze studie van KPZSS is de watervraag voor doorspoeling van de regionale polders en de boezemsystemen geschat voor 1 en 3 m ZSS. De watervraag voor 2 en 5,4 m ZSS is gebaseerd op expert-schattingen rekening houdend met een meer dan lineaire toename van de watervraag. In de studie van KPZSSII is al opgemerkt dat de onzekerheidsmarge van de schattingen orde 25 % is.

De benodigde afvoer om het Rijn- Maasmonding (door zoutindringing uit zee) door te spoelen is gebaseerd op de systeemanalyse van KPZSS in spoor II voor zoetwater uitgaande van de locatie Krimpen aan de IJssel². In deze systeemanalyse is gekeken naar 1 en 3m ZSS en hoeveel afvoer zowel bij Lobith als het Rijn- Maasmonding nodig is om het hoofwatersysteem door te spoelen zodat voldaan wordt aan de chloride-eis van 250mg/l.

Afbeelding 7.1. Benodigde afvoer RMM gebied voor een chloride gehalte van 250 mg/l bij Krimpen aan de IJssel (bron KPZSSII)



¹ <https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-kpzss-grondwaterverzilting-watervraag-bij-een-stijgende-zeespiegel>

² <https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyses-kpzss-zoetwater-regio-rijn-maasmonding>

De benodigde afvoeren voor de andere systemen is opgenomen in 1 post. Het gaat hierbij om het volume water dat nodig is voor tegengaan verzilting op bijvoorbeeld het IJsselmeer (40 m³/s in de huidige situatie), ARK/NZK (35 m³/s), en de Zeeuwse Delta (b.v. Haringvliet en Volkerak Zoommeer) (20 m³/s). Deze benodigde afvoer is significant minder dan de hoeveelheid nodig voor het Rijn- Maasmonding of voor doorspoeling van de regionale polders. Ook de watervraag in 2100 en 2200 voor overige functies is natuurlijk groter dan in 2023. Deze schattingen zijn gebaseerd op Deltascenario's zoals deze zijn toegepast in de Basisprognoses 2018¹, de spoor II van het kennisprogramma Zeespiegelstijging en een analyse gepresenteerd op het Delta Future Congres van Deltares. De toename tussen 2200 en 2100 is voor al deze posten even groot verondersteld als die van 2100 en de huidige situatie, alleen het watergebruik voor industrie en drinkwater neemt in zowel 2100 als 2200 toe met 35 %.

Conform de uitgangspunten is geen rekening gehouden met andere ontwikkelingen of beleid die de watervraag kunnen beïnvloeden, zoals:

1. er wordt gesproken over het opzetten van (grond-) waterpeilen voor bodemdalingsbestrijding of voor drinkwaterwinning. Dit zal in de veengebieden leiden tot meer verdamping en dus tot een grotere watervraag in de lage polders. Voor de zandgebieden leidt een hogere grondwaterstand (in lijn met water en bodem sturend) tot een beperkte toename van de watervraag aan het hoofwatersysteem maar deze is niet significant voor de waterbalans;
2. een groter beroep op zoetwater als in de Zeeuwse Delta minder brak water beschikbaar is. Als in de varianten grote buffers worden gecreëerd dan is de verwachting dat de watervraag ook zal stijgen omdat juist in de Zeeuwse Delta nu al een hoger chloride gehalte wordt geaccepteerd.

De watervraag kan ook afnemen door meer maatwerk in de doorspoeling van regionale polders en gebruik van meer zouttolerante gewassen. Deze mogelijke maatregelen worden beschouwd als 'meebewegen'. Nu is het uitgangspunt het huidige grondgebruik en bijbehorende watervraag.

7.3.2 Wateraanbod

De schattingen van de lage zomerafvoeren van de Rijn en Maas zijn gebaseerd op de resultaten van de hackaton zoetwater die door KPZSS IV is georganiseerd (zie @). We hebben deze afvoeren vervolgens getoetst aan modelinvoer van het Nationaal Water Model die past bij het Stoom-scenario uit de Deltascenario's. De 90-daagse gemiddelde rivierafvoer in een zeer droog jaar is bijgesteld naar 750 m³/s voor zichtjaar 2100.

Tabel 7-2 Gemiddelde afvoer op de rivieren Rijn en Maas in huidig klimaat en zichtjaren 2100 en 2200 bij de gekozen klimaatscenario's over een periode van 90 dagen

	Huidig	2100	2200
Afvoer van de rivieren [m ³ /s]	1050	750	600

7.3.3 Effecten van de strategieën op de waterbalans

De systeemkeuzes (de buffers, sluizen en afvoerverdeling) voor zoetwater hebben invloed op zowel de zoetwateraanbod als de zoetwatervraag, tezamen de zoetwaterbalans.

Het zoetwateraanbod wordt vergroot door de buffers. Hierbij is verondersteld dat deze dus gevuld zijn op het moment dat deze nodig zijn. De gekozen maatregelen hebben ook invloed op de watervraag. Het opzetten van de waterstand in de buffers heeft invloed op de zoute kwel om de omliggende gebieden. Door de

¹ <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/watermanagementmodellen/nationaal-water-model/basisprognoses/basisprognoses-2018-zoetwater/uitvoer-bp-2018-zw/>

veranderende waterdruk als gevolg van waterpeilen in deze buffers tov de omgeving kan de uitspoeling van zout in het omliggend gebied ook veranderen. De strategieën hebben ook invloed op de watervraag die nodig is om de zoutindringing op de rivieren en meren terug te dringen. Voor gesloten situaties is aangenomen dat er geen significante zoutindringing is door de sluizen (al dan niet met veel minder schutten). Hierdoor vervalt dan deze vraag naar zoetwater.

Tabel 7-3 Impact strategieën op zoetwaterbeschikbaarheid tov VKS2015

	Zoetwaterbeschikbaarheid	Watervraag voor doorspoeling	Watervraag voor verziltingsbestrijding
Strategie A1	IJsselmeer en Markermeer: 2000 Mm ³ Zuidwestelijke Delta: 2000 Mm ³	IJsselmeer en Markermeer: Toename doorspoelbehoefte Zuidwestelijke delta: Afname doorspoelbehoefte door lagere peilopzet dan bij autonome ontwikkeling. Netto effect op de waterbalans is nul geschat.	Daalt omdat er geen significante zoutindringing is door de gesloten kunstwerken bij alle zeefronten (dus zowel RMM als de overige gebieden). Wel is er nog een beperkte watervraag om zoute kwel bij de zeemondingen tegen te gaan. Deze is geschat op 100 m ³ /s in 2100 en 150 m ³ /s in 2200. De watervraag voor doorspoeling van het hoofwatersysteem (RMM plus overige systemen) vervalt hiermee.
Strategie A2	IJsselmeer en Markermeer: 2000 Mm ³ Zuidwestelijke Delta: 2000 Mm ³ (zichtjaar 2100) 5400 Mm ³ (zichtjaar 2200) door de mogelijkheid dat het peil uitzakt.	IJsselmeer en Markermeer: Toename doorspoelbehoefte Zuidwestelijke delta: Vergelijkbare doorspoelbehoefte als bij autonome ontwikkeling. Het netto effect is een kleine toename van de watervraag. Deze toename is geschat op 30 m ³ /s in 2100 en 100 m ³ /s in 2200.	Daalt omdat er geen significante zoutindringing is door de gesloten kunstwerken bij alle zeefronten (dus zowel RMM als de overige gebieden). Wel is er nog een beperkte watervraag om zoute kwel bij de zeemondingen tegen te gaan. Deze is geschat op 100 m ³ /s in 2100 en 150 m ³ /s in 2200. De watervraag voor doorspoeling van het hoofwatersysteem (RMM plus overige systemen) vervalt hiermee.
Strategie B1	IJsselmeer en Markermeer: 2000 Mm ³ Zuidwestelijke Delta: -	IJsselmeer en Markermeer: Toename doorspoelbehoefte Zuidwestelijke delta: Vergelijkbare doorspoelbehoefte als bij autonome ontwikkeling. Netto effect is een kleine toename van de watervraag conform strategie A2.	Vergelijkbare watervraag als bij autonome ontwikkeling. Ook op het ARK/NZK en IJsselmeer blijft bestrijding verzilting nodig vanwege zoutindringing door schutten. Er is geen verandering in de watervraag voorzien.
Strategie B2 (gebied exclusief corridor en deltapolder)	IJsselmeer en Markermeer: 2000 Mm ³ Zuidwestelijke Delta: 160 Mm ³	IJsselmeer en Markermeer: Toename doorspoelbehoefte Zuidwestelijke delta: De lagere peilen in de Deltapolder hebben een gunstig effect ten opzichte van VKS2015. De Zeeuwse meren zullen meestijden met ZSS wat leidt tot een vergelijkbare doorspoelbehoefte als bij autonome ontwikkeling.	Verzilting op de hoogwatercorridor leidt niet tot een grote watervraag (al dan niet met extra drempels of opslibbing om zoutindringing tegen te gaan en in het uiterste geval verplaatsen van inlaten). De watervraag voor doorspoeling van het Rijn- Maasmonding vervalt hiermee grotendeels. Voor tegengaan zoute kwel is deze geschat op 40m ³ /s in 2100 en 75m ³ /s in 2200.

		Netto effect is een kleine afname van de watervraag. Deze is geschat op 15m ³ /s in 2100 en 50m ³ /s in 2200.	Op het ARK/NZK en IJsselmeer blijft bestrijding verzilting nodig vanwege zoutindringing door schutten. Deze watervraag voor doorspoeling veranderd dus niet.
--	--	---	--

7.4 Resultaten

Voor de gekozen periode van 90 dagen voor een droog jaar kan een waterbalans worden opgesteld waarin het effect van de strategieën is verwerkt. Deze waterbalans is weergegeven in m³/s, gemiddeld over 90 dagen. De waterbalans voor 2100 is opgenomen in Tabel 7-4 en Tabel 7-5.

Opgemerkt wordt dat de gehanteerde schattingen natuurlijk onzeker zijn. De onderstaande getallen moeten dan ook niet worden geïnterpreteerd als exacte waardes, maar als orde groottes van getallen. Om een indruk te geven van de benodigde extra berging op het IJsselmeer en Markermeer kan als vuistregel worden aangehouden dat 100 m³/s over een periode van 90 dagen overeenkomt met 40 cm extra bufferschijf.

Tabel 7-4 Effect strategieën op de waterbalans voor 2100 bij gekozen klimaatscenario

	Huidige situatie	VKS2015 2100	A1 2100	A2 2100	B1 2100	B2 2100
Wateraanbod (m ³ /s)	1107	750	1321	1321	1064	1084
Watervraag (m ³ /s)	873	1732	592	622	1762	757
Totaal (m ³ /s)	234	-982	729	699	-699	327

Uit de waterbalans voor 2100 blijkt duidelijk dat de watertekorten zonder ingrepen in het watersysteem (VKS2015) significant zijn. Alle strategieën leiden tot een verbetering ten opzichte van de VKS2015 in 2100 (en 2200), maar ook tot een flinke verslechtering ten opzichte van het heden. Over een periode van 90 dagen is er in de huidige situatie nog geen watertekort berekend, maar dat komt door het gekozen tijdvak van 90 dagen. Zoals eerder opgemerkt treden binnen die 90 dagen wel tijdelijke en aanzienlijke tekorten op voor een deel van de gebruikers. Zowel in de VKS2015 als in strategie B1, waarin er een afsluitbaar/open verbinding is met zee, is er een aanzienlijk tekort aan zoetwater. Dit tekort is dermate groot dat het ook niet oplosbaar is met extra buffercapaciteit in het IJsselmeer en Markermeer. De vereiste bufferschijf zou meerdere meters zijn buiten de meter die al is verondersteld in B1.

Dat betekent dat er grote keuzes nodig zijn om de watervraag te verkleinen. De systeemkeuzes A1, A2 en B2 geven hier invulling aan door een combinatie van een grote buffercapaciteit en met name het verkleinen van de watervraag voor doorspoeling van het hoofdwatersysteem. Deze verandering in de doorspoeling heeft wel grote impact op de overslag van goederen omdat die vrijwel geheel 'via land' zou moeten plaatsvinden. Een andere keuze kan zijn om de watervraag te beïnvloeden (wat onder meebewegen wordt verstaan). Denk hierbij aan het accepteren van hogere zoutconcentraties in (een deel van) de regionale watersystemen, waardoor de doorspoelvraag van polders en boezems afneemt. Dit maatwerk zal echter niet voldoende zijn om het tekort weg te werken omdat de doorspoelvraag van boezemsystemen en regionale polders kleiner is dan de omvang van het tekort. Een andere maatregel is een hoger chloridegehalte toestaan in het hoofdwatersysteem (en daarmee ook de regionale systemen). Hierdoor daalt de watervraag van zowel het hoofdwatersysteem als boezemsystemen en regionale polders voor doorspoeling. Dit betekent wel dat er meer zouttolerante gewassen nodig zijn en dat sommige zoetwaterafhankelijke natuurgebieden moeten worden opgegeven. Ook kan het betekenen dat veengebieden worden natgehouden met brakker water; het is niet voldoende bekend wat de gevolgen hiervan zouden zijn.

De systeemkeuzes in strategie A1, A2 en B2 leiden tot een overschot aan zoetwater in een droog jaar dat eens in de 30 tot 50 jaar voorkomt. Hiermee kan dus worden voorzien in de watervraag zonder meebewegen van gebruikers van zoetwater, maar wel met veel effect voor scheepvaart tussen zee en het achterland. Hierbij wordt opgemerkt dat deze systeemkeuzes voor waterveiligheid wellicht nog niet nodig zijn. De belangrijkste parameter voor afname van de watervraag komt omdat er minder water nodig is voor bestrijding van verzilting op het hoofdwatersysteem. Opvallend is dat het overschot van zoetwater in de waterbalans voor al deze strategieën groter is dan de aangelegde buffercapaciteit. Dat kan betekenen dat deze buffercapaciteit pas later in de tijd hoeft te worden gerealiseerd. Een andere optie is dat er meer zoetwater beschikbaar voor doorspoeling van het hoofdwatersysteem waardoor er meer schuttingsmogelijkheden zijn en de impact op havens kleiner wordt. Hiervoor zijn verdere optimalisaties mogelijk.

Tabel 7-5 Effect strategieën op de waterbalans voor 2200 bij gekozen klimaatscenario

	Huidige situatie	VKS2015 2200	A1	A2	B1	B2
Wateraanbod (m ³ /s)	1107	600	1171	1557	914	934
Watervraag (m ³ /s)	873	3698	1575	1675	3760	1835
Totaal(m ³ /s)	234	-3098	-404	-118	-2846	-900

Voor het zichtjaar 2200 blijkt dat de waterbalans voor alle strategieën tot een tekort aan zoetwater leidt, waarbij A2 qua orde grootte niet veel afwijkt van de huidige situatie. De buffercapaciteit is in alle strategieën onvoldoende en de afname van de waterbehoefte voor bestrijding voor verzilting op het hoofdwatersysteem weegt niet op tegen de toename van de watervraag voor de andere functies. Als de watervraag voor doorspoeling van regionale polders en boezemsystemen kan worden gereduceerd met 90 % (meebewegen) dan kan de waterbalans wel sluitend worden gemaakt voor de strategieën A1, A2 en B2. De omvang van oplossingsrichting 'meebewegen' is het grootst bij B1. Voor strategie A1 hoeft de watervraag voor doorspoeling van regionale polders en boezemsystemen maar met orde 40 % te worden gereduceerd voor een sluitende waterbalans over 90 dagen, voor strategie A1 maar met 10 %.

7.5 Reflectie

De getallen in de waterbalans bevatten een flinke mate van onzekerheid. De gekozen waardes zijn gebaseerd op een combinatie van bestaande studies aangevuld met expertschattingen. Dat was nodig omdat schattingen voor de beschouwde klimaatscenario's niet altijd beschikbaar waren.

De belangrijkste posten in de watervraag in 2100 en 2200 hebben te maken met doorspoeling van het hoofdwatersysteem en het regionale watersysteem. De andere posten vallen hierbij vrijwel in het niet. De omvang van de watervraag voor beregning, peilhandhaving en watergebruik is zelfs in 2200 net meer dan 50 % dan de afvoer van de Rijn en Maas gedurende 90 dagen. Maatregelen waar men nu aan denkt voor opzetten van grondwater tegen bodemdaling en voor infiltratie kunnen dit percentage licht laten stijgen, maar zal naar verwachting niet leiden tot een totaal andere orde grootte.

De posten voor de waterbeschikbaarheid zijn gebaseerd op schatting van de afvoer op de Rijn en Maas, en op basis van de aan te leggen buffers. Rondom de schattingen op de Rijn en Maas is er natuurlijk ook onzekerheid. Echter deze onzekerheid valt in het niet bij de toename van de watervraag voor doorspoeling conform de huidige criteria.

Met de buffers kan een aanzienlijke hoeveelheid extra berging worden gecreëerd. Deze extra berging zal leiden tot extra dijkversterkingen met name op het IJsselmeer en Markermeer omdat de gemaalcapaciteit hier beperkt is vergeleken met de berging in dit gebied. De buffers zullen ook impact hebben op de omgeving en functies. Rondom het IJsselmeer is er een peilfluctuatie voorzien van orde 1-1,4 m. Deze peilfluctuatie zal iedere zomer optreden waarbij het voorjaar de berging maximaal is gevuld en in de zomer het peil uitzakt. In

de winter zal het peil weer opgezet moeten worden. In de Zeeuwse Delta en Rijn- Maasmonding zijn de peilfluctuaties groter. Deze zijn 2 m bij strategie A1, B2 en alleen in 2100 bij A2. In 2200 is de peilfluctuatie 5,4 m voor strategie A2. Ook hiervoor geldt dat in het voorjaar het peil maximaal is en in de zomer het laagst. De vraag is wat dit betekent voor de ecologie op de oevers, toerisme en cultuurhistorie. Daarnaast zal er voor alle buffers aandacht nodig zijn voor de waterkwaliteit, bijvoorbeeld door het stimuleren van stroming.

De kosten en het ruimtebeslag van de maatregelen voor zoetwater zijn niet in kaart gebracht. De buffer op het IJsselmeer en Markermeer zal leiden tot extra dijkversterking, maar gezien de opgaves elders is deze opgave beperkt. Wel zal het ruimtebeslag (en dus mogelijk te amoveren woningen) toenemen en de impact op havens, recreatie en cultuurhistorie. Het ruimtebeslag van de buffers zelf is beperkt omdat de buffers worden gerealiseerd op de bestaande meren. Echter bij de oevers zal de impact aanzienlijk zijn.

7.6 Kennisvragen

1. Hoe kan de watervraag significant worden verkleind, in het bijzonder door minder water te gebruiken voor doorspoeling van regionale polders en het hoofdwatersysteem?
2. Onderzoek de hoe schut- en spuisluizen kunnen worden ingezet zonder de zoutindringing te vergroten.
3. Hoe kunnen de nieuwe waterbuffers leefbaar worden ontworpen (cultuurhistorie, waterkwaliteit, natuur, recreatie etc), en vervolgens hoe kan het water uit deze buffers worden verdeeld over Nederland (noot, deze vraag is pas relevant als ook de watervraag is gereduceerd).
4. Wat is de impact van de buffer op het IJssel- en Markermeer op de hydraulische belastingen (en waterkeringen) op de IJssel inclusief aanwezige kunstwerken als op de morfologie en scheepvaart in relatie tot doorvaarhoogtes.
5. Aanbevolen wordt onderzoek en experimenten te doen naar zouttolerante gewassen.

8

RESERVOIRMODEL VOOR BESCHERMEN GESLOTEN EN ZEEWAARTS

Auteur: Ferdinand Diermanse, Deltares.

Inleiding

In de strategieën Beschermen Gesloten en Zeewaarts wordt de Rijn-Maas monding afgesloten van de Noordzee. Als gevolg daarvan ontstaat in het benedenrivierengebied en/of voor de kust een binnenmeer, waar de rivieren (Waal, Lek en Maas) op afwateren. In het geval van de oplossingsrichting Zeewaarts is dit een groot kustrandmeer. In beide oplossingsrichtingen kunnen de Waal, Lek en Maas niet meer vrij afwateren op de Noordzee en moet al het overtollige water naar zee gepompt en/of gespuid worden. Bij meer dan 1m zeespiegelstijging zal spuien onder gemiddelde condities niet mogelijk zijn, tenzij het streefpeil van het nieuw te vormen binnenmeer 'mee groeit' met de zeespiegelstijging, wat bij grote mate van zeespiegelstijging gevolgen heeft de waterveiligheid van buitendijkse gebieden en hogere eisen stelt aan de dijken langs de benedenrivieren.

Om het streefpeil in het nieuw ontstane binnenmeer gedurende het grootste deel van het jaar te kunnen handhaven op een lager peil dan de buitenwaterstand zullen pompen geïnstalleerd moeten worden met een capaciteit die groter is dan de gemiddelde gezamenlijke afvoer van de Lek, Waal en Maas. Het Plan Sluizen (Rijkswaterstaat, 2015) gaat bijvoorbeeld uit van een pompcapaciteit van 3.000 m³/s. Tijdens hoogwaters op de Rijn en Maas is die capaciteit onvoldoende en zal een deel van de afvoer geborgen en/of gespuid moeten worden. Dat laatste is alleen mogelijk door het peil aan de binnenzijde van de sluizen tijdelijk te laten stijgen. Hoe groter de zeespiegelstijging, des te hoger het binnenpeil¹ (meerpeil) zal moeten zijn om te kunnen spuien. Als gelijktijdig een substantiële stormopzet op zee plaatsvindt zal het binnenpeil nog verder moeten stijgen om te kunnen spuien. Om inzicht te krijgen in (extreme) peilen in het gebied is een reservoirmodel ontwikkeld waarmee een hoogwatergebeurtenis op het binnenmeer gesimuleerd kan worden. Een hoogwatergebeurtenis is een gebeurtenis met een grote Rijn- en Maasafvoer, eventueel in combinatie met een hoge zeewaterstand. De instroom van het meer is de gecombineerde afvoer van de Maas, Waal en Lek, de uitstroom is een combinatie van pompen en spuien.

Afbeelding 8.1. Schematische weergave van de instroom- en uitstroomdebiëten



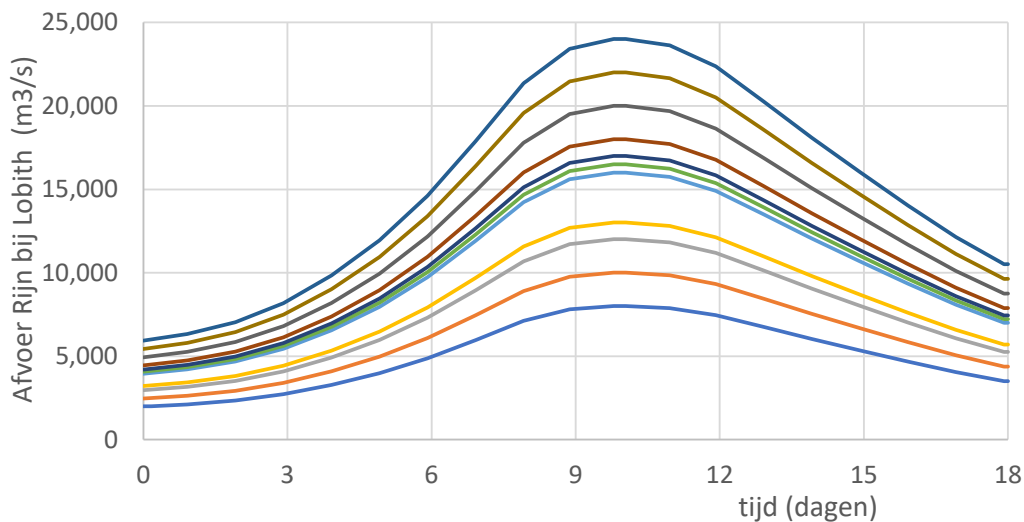
¹ In deze analyse wordt de dynamiek van het binnenpeil gemodelleerd voor de situatie van een gesloten zeezijde. Dat is nadrukkelijk niet hetzelfde als de waterstand. Als gevolg van scheefstand bij harde wind kan de waterstand lokaal hoger/lager uitvalen dan het binnenpeil.

Simulaties van hoogwatergebeurtenissen

Modelopzet

Voor de rivierafvoer worden standaard afvoergolfvormen gehanteerd zoals een trapezium of een meer 'gladde' golfvorm zoals gedefinieerd in spoor 2 van het kennisprogramma zeespiegelstijging. De totale simulatieduur van een dergelijke afvoerloop is 30 dagen. Afbeelding 8.2 toont als voorbeeld de golfvormen met verschillende piekafvoeren bij Lobith zoals gehanteerd in het spoor 2 van KP-ZSS. Ten behoeve van het reservoirmodel worden deze golfvormen aan de voorzijde en achterzijde verlengd om te komen tot een golfvorm met een duur van 30 dagen. In het model is de piekafvoer een door de gebruiker te kiezen variabele.

Afbeelding 8.2. Golfvormen van de Rijn bij Lobith uit KP-ZSS spoor 2



Voor de beschrijving van het tijdsverloop van de zeewaterstand heeft het model twee opties:

1. een geschematiseerd verloop, waarin een trapeziumvormig stormopzet-verloop van 48 uur wordt gesuperponeerd op een "standaard" getijverloop bij Hoek van Holland;
2. historisch gemeten tijdreeksen van zeewaterstanden bij Hoek van Holland.

In beide gevallen wordt het waterstandverloop in het model opgehoogd met de aangenomen zeespiegelstijging.

Naast de Rijn- en Maasafvoer en de zeewaterstand (inclusief zeespiegelstijging) zijn de volgende systeemkenmerken van invloed op de gesimuleerde meerpeilen:

1. het streefpeil in het gebied achter de sluisen (startwaarde van de simulatie);
2. de totale oppervlakte van het waterbergingsgebied;
3. de capaciteit van de pompen waarmee water naar zee gepompt kan worden;
4. de totale breedte van de spuigaten (als representant van de spuicapaciteit); en
5. het afvoerpercentage van de Rijn dat richting de IJssel wordt afgevoerd (en dus niet het benedenrivierengebied bereikt);

Deze 5 systeemkenmerken zijn parameters die eenvoudig aan te passen zijn in het model en waarmee de invloed van mogelijke toekomstige maatregelen verkend kunnen worden.

Het inkomende water van de Lek, Waal en Maas wordt uit het gebied gepompt met de aanwezige gemalen om de waterstand zoveel mogelijk op streefpeil te houden. De totale capaciteit van de gemalen is een modelparameter die gevarieerd kan worden. Als het meerpeil boven streefpeil is, wordt de volledige pompcapaciteit ingezet. Indien de waterstand aan de binnenzijde van het gebied hoger is dan de buitenzijde kan onder vrij verval gespuid worden. De spuicapaciteit is in de basisvariant gelijk genomen aan de spuicapaciteit van

de Haringvlietsluizen, maar deze capaciteit kan in het model eenvoudig aangepast worden. De Haringvlietsluizen bestaan uit 17 sluizen met elk een breedte van 56,4 m en een drempelhoogte van NAP -5,5 m. Het totale debiet door de spuisluizen wordt bepaald met de volgende formule:

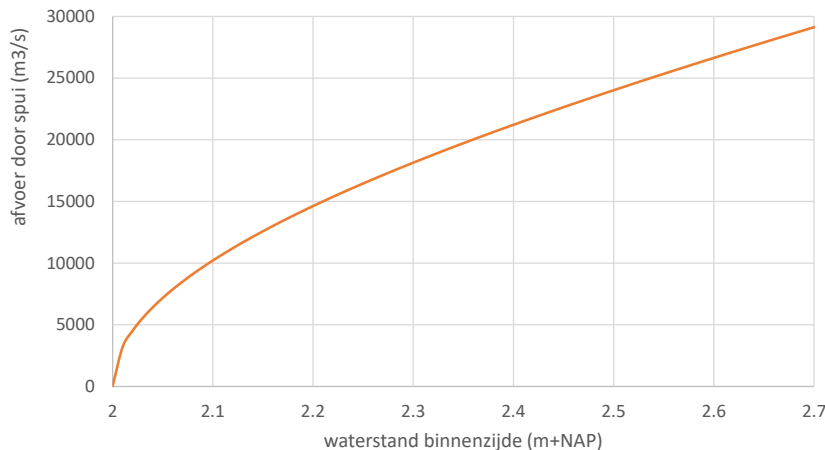
$$Q_{sluis} = ncb(h_{buiten} - z_{drempel})\sqrt{2g(h_{binnen} - h_{buiten})}$$

waarin:

Q_{sluis}	=	Gecombineerde spuicapaciteit sluizen	[m ³ /s]
n	=	Aantal sluizen (n=17 voor de Haringvlietsluizen)	-
c	=	Afvoercoëfficiënt (aanname: c=1)	[-]
b	=	Breedte van één sluis (56,4 m voor de Haringvlietsluizen)	
$z_{drempel}$	=	Drempelhoogte sluis (NAP-5,5 m voor de haringvlietsluizen)	m+NAP
g	=	Gravitatieconstante	[ms ⁻²]
h_{binnen}	=	Waterstand aan de binnenzijde van de sluis	[m]
h_{buiten}	=	Waterstand aan de buitenzijde van de sluis	[m]

Afbeelding 8.3 toont ter illustratie de spuicapaciteit als functie van de waterstand op het meer, bij een zee-waterstand van NAP +2 m. Hieruit blijkt dat de spuicapaciteit al snel heel groot wordt. Zodra het binnenpeil enkele decimeters hoger is dan de buitenwaterstand zal het binnenpeil relatief snel afnemen omdat de uitstroom dan (veel) groter is dan de instroom.

Afbeelding 8.3. Spuicapaciteit als functie van de waterstand op he meer, bij een zeewaterstand van NAP +2 m



Voor de herleiding van het beregingsoppervlak van het gebied wordt verwezen naar Tabel 8-1. Het bergende oppervlak van het noordelijk deltabekken (Zuid-Hollandse wateren plus Volkerak Zoommeer) is in de orde van grootte van 450 km². Indien de Zeeuwse wateren als bergend oppervlak worden toegevoegd is het totale oppervlak ongeveer 1.000 km². Bij een zeewaartse variant ontstaat een kustmeer en kan mogelijk nog 1.000 tot 4.000 km² extra bergend vermogen worden toegevoegd. Er zijn daarom simulaties uitgevoerd met het model voor een breed bereik aan oppervlakten om te bepalen wat het effect is van de grootte van het bergend oppervlak op extreme meerpeilen.

Tabel 8-1 Oppervlakte van open wateren in het gebied (bron: WL | Delft Hydraulics, 1997)

Zuid-Hollandse wateren	hectare
Uiterwaard Lek	690
Uiterwaard Krimpen	370
Nieuwe Maas	5.080
Merwede	3.340
Oude Maas	2.660
Hollands Diep	11.660
Waal	1.050
Haringvliet	10.740
Totaal Zuid Holland	35.600
Zeeuwse Wateren	
Volkerrak	9.050
Oosterschelde	35.465
Grevelingen	14.180
Veerse meer	4.150
Totaal Zeeland	62.850
Totaal	98.440

Voorbeeldsimulaties

Afbeelding 8.5 toont de resultaten van een modelsimulatie met 2m zeespiegelstijging, een hoogwater op de Rijn met een piekafvoer van 10.000 m³/s, een duur van de afvoergolf van 30 dagen en een stormopzet van 2 m op een zeer ongunstig tijdstip, namelijk als de afvoer op/rond de piekwaarde is (zie Afbeelding 8.4. De beschikbare pompcapaciteit in deze simulatie is gelijk aan 3.000 m³/s, de overige modelaannames staan in Tabel 8-2 (bij 'simulatie 1').

Na ongeveer drie dagen is de inkomende afvoer in het gebied groter dan de pompcapaciteit van de gemalen. Het binnenpeil is lager dan de buitenwaterstand (zelfs bij eb) zodat er niet gespuid kan worden. Als gevolg daarvan neemt de waterstand in het gebied toe. De snelheid van de toename is omgekeerd evenredig met het bergend oppervlak in het gebied (450 km² in deze simulatie; vergelijkbaar aan het huidige oppervlakte in het benedenrivierengebied inclusief Volkerak-Zoommeer). Dit zet door tot het moment dat het peil hoger wordt dan de buitenwaterstand bij eb. Vanaf dat moment kan er bij eb gespuid worden¹ en is er min of meer sprake van een evenwichtssituatie.

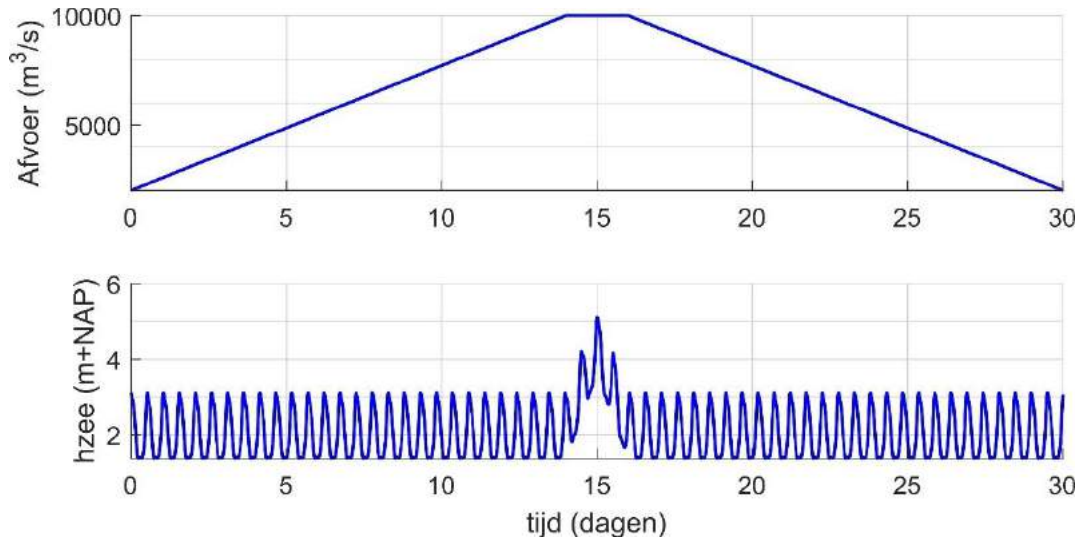
Na 14 dagen begint het te stormen met als resultaat een stormopzet aan de buitenzijde van de spui. Als gevolg daarvan kan weer enige tijd niet gespuid worden en neemt het binnenpeil snel toe tot het moment dat dat het peil hoger wordt dan de buitenwaterstand bij eb. Het binnenpeil bereikt een maximale waarde van ongeveer NAP +3,25 m. Na 2 dagen is de storm gaan liggen en neemt het binnenpeil snel af (rond dag 16) doordat er gespuid kan worden. Vervolgens blijft het peil een tijd lang redelijk constant, totdat de afvoer onder het niveau van de pompcapaciteit zakt. Vanaf dat moment daalt de binnenwaterstand binnen ongeveer een week terug naar het streefpeil.

Een maximaal binnenpeil van NAP +3,25 m is hoog en zou in de huidige omstandigheden tot inundaties in het buitendijkse gebied leiden, vooral als de waterstand lokaal hoger is als gevolg van scheefstand. Dit

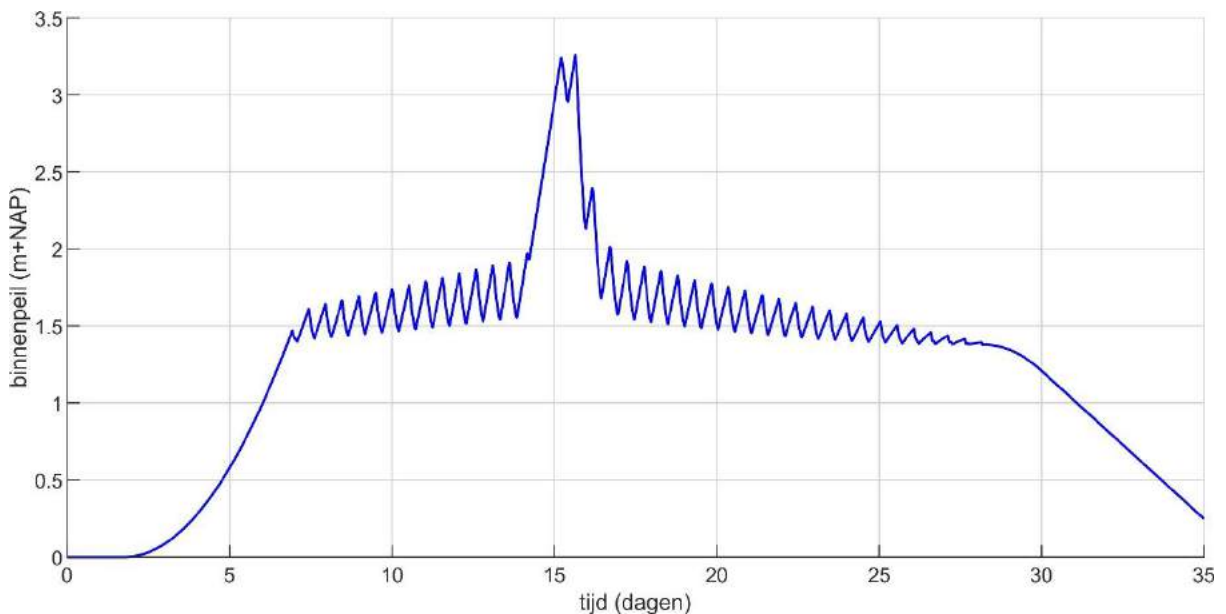
¹ In het model is geen rekening gehouden met mogelijke scheefstand. In werkelijkheid kan de waterstand nabij de sluisen lager staan dan het gemiddelde peil over het hele gebied als gevolg van harde westenwind. Als de waterstand daardoor bijvoorbeeld 0,2 m lager staat dan het peil kan pas gespuid worden zodra het peil 0,2 m hoger is dan de zee-waterstand.

rekenvoorbeeld heeft echter betrekking op een situatie met 2 m zeespiegelstijging; bij de huidige gemiddelde zeespiegelstand zouden de gevolgen marginaal zijn. Verder betreft dit een zeer ongunstige hoogwatergebeurtenis waarbij de piek van de Rijnafvoer precies samenvalt met een hoge stormopzet. De kans op een dergelijke extreme gebeurtenis is relatief klein.

Afbeelding 8.4. Afvoer en zee­waterstand in simulatie 1



Afbeelding 8.5. Gesimuleerd peilverloop gedurende een synthetische hoogwatergebeurtenis van 10.000 m³/s op de Rijn, 2 m zeespiegelstijging met daarboven op een storm met een duur van 2 dagen en een stormopzet van 2 m



Afbeelding 8.6 toont ter illustratie de peildynamiek van vijf mogelijke combinaties van hoogwatergebeurtenissen en systeemtoestanden. Tabel 8-2 toont de gekozen parameters van de simulaties. Simulatie 2 is vergelijkbaar met simulatie 1, maar dan zonder stormopzet. Daaruit blijkt dat in dat geval het maximale binnenpeil “slechts” tot NAP +1,94 m komt, ruim 1,3 m lager dan in simulatie 1. Dit toont aan dat het ook in gesloten toestand niet voldoende is om alleen afvoergebeurtenissen te beschouwen; de zee­waterstand speelt nog

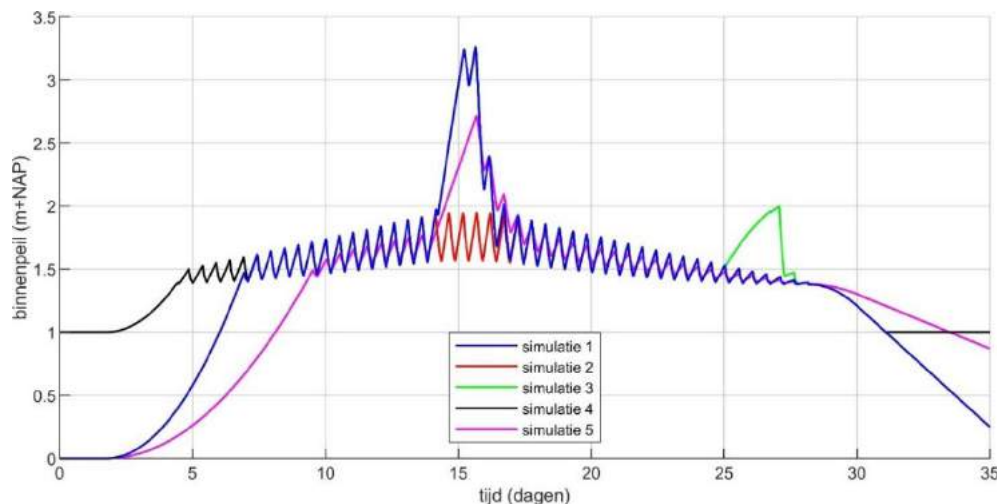
steeds een belangrijke rol vanwege de invloed op de mogelijkheid om te spuien. Als de stormopzet 10 dagen later zou plaatsvinden (simulatie 3) zou het maximale binnenpeil tot ongeveer NAP +2,00 m komen, ruim 1,2 m lager dan in simulatie 1. Uit simulatie 4 blijkt dat de invloed van het gekozen streefpeil op het maximale peil bij deze hoogwatergebeurtenis nihil is. De hogere startwaarde van NAP+1m in deze simulatie heeft tot gevolg dat er minder bergingsvolume beschikbaar is bij de start van de hoogwatergebeurtenis in vergelijking met simulatie 1. Echter, het hogere startpeil betekent ook dat er eerder gespuid kan worden, waardoor na ongeveer 7 dagen het peil gelijk is aan dat van simulatie 1. Een groter bergend oppervlak van 1.000 km² (simulatie 5) resulteert in dit geval tot een reductie van ongeveer een halve meter in het hoogste meerpeil.

Tabel 8-2 Overzicht van modelberekeningen van Afbeelding 8.6. Grijs gemarkeerd zijn de afwijkingen ten opzichte van modelberekening 1

beschrijving	eenheid	Modelsimulatie				
		1	2	3	4	5
<i>Hoogwatergebeurtenis</i>						
Piekafvoer van de Rijn	m ³ /s	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Piek van de stormopzet	m	2,0	0,0	2,0	2,0	2,0
Start stormopzet	dagen	14	-	25	14	14
<i>Systeemtoestand</i>						
Zeespiegelstijging	m	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Streefpeil binnenmeer	m+NAP	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
Pompcapaciteit	m ³ /s	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Oppervlakte bergingsgebied	km ²	450	450	450	450	1.000
Afvoerpercentage IJssel	% van Q _{Lobith}	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3
Drempelbreedte spui	m	958	958	958	958	958
<i>Uitvoer</i>						
Maximale binnenpeil	m+NAP	3,26	1,94	2,00	3,26	2,71

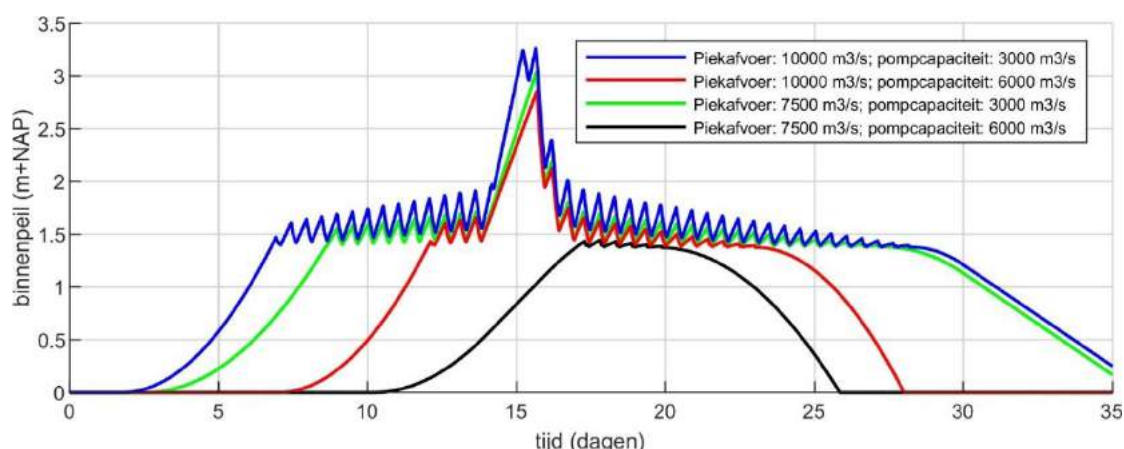
De dynamiek en pieken van het binnenpeil kunnen dus sterk verschillen per hoogwater en zijn daarnaast afhankelijk van "systeemkenmerken" zoals pompcapaciteit, bergingsoppervlak, spuicapaciteit en streefpeil.

Afbeelding 8.6. Peilverloop van de simulaties



Afbeelding 8.7 vergelijkt het peilverloop van simulatie 1 (blauwe grafiek) in combinatie met peilverlopen van drie aanvullende simulaties. Dit zijn variaties van de piekafvoer bij Lobith ($7.500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$) en de beschikbare pompcapaciteit ($3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Uit deze grafiek blijkt de verdubbeling van de pompcapaciteit een veel groter reducerend effect te hebben op de piek van het meerpeil bij een piekafvoer van $7.500 \text{ m}^3/\text{s}$ dan bij een piek van $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Meer algemeen geldt dat de impact van een maatregel, zoals het vergroten van de pompcapaciteit, op (extreme) meerpeilen sterk kan verschillen per hoogwatergebeurtenis. Het is dus belangrijk om meerdere hoogwatergebeurtenissen te beschouwen bij het evalueren van potentiële strategieën. Om die reden is een probabilistische rekenschil geïmplementeerd rondom het reservoirmodel.

Afbeelding 8.7. Simulaties van hoogwaters met piekafvoeren bij Lobith van $7.500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en pompcapaciteiten van $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$



Probabilistische berekeningen

Model en statistieken

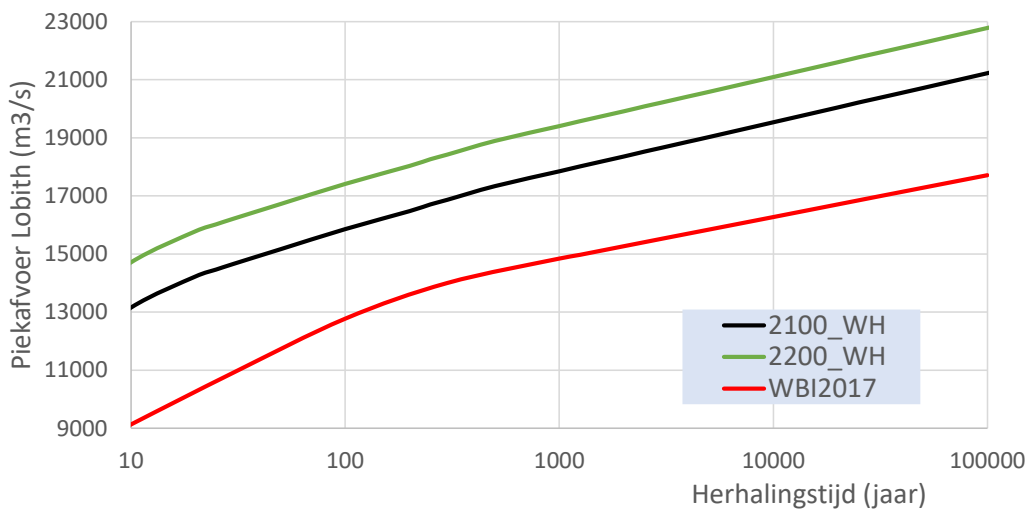
Zoals aangegeven in het vorige hoofdstuk is het bij het afwegen van strategieën relevant om alle mogelijke hoogwatergebeurtenissen in beschouwing te nemen. Daarom is een probabilistische rekenschil geïmplementeerd rondom het reservoirmodel. Het probabilistische rekenmodel heeft twee stochastische variabelen: de rivierafvoer en de zeewaterstand. Van beide variabelen is het gehele tijdsverloop nodig om een hoogwatergebeurtenis te kunnen simuleren.

Rivierafvoeren worden beschreven door een combinatie van statistieken van piekafvoeren en gestandaardiseerde golfvormen. Afbeelding 8.8 en Afbeelding 8.9 bevatten drie varianten van afvoerstatistieken voor respectievelijk de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen:

1. de afvoerstatistiek volgens WBI2017 (BOI);
2. de afvoerstatistiek volgens klimaatscenario 2100_WH;
3. de afvoerstatistiek volgens klimaatscenario 2200_WH.

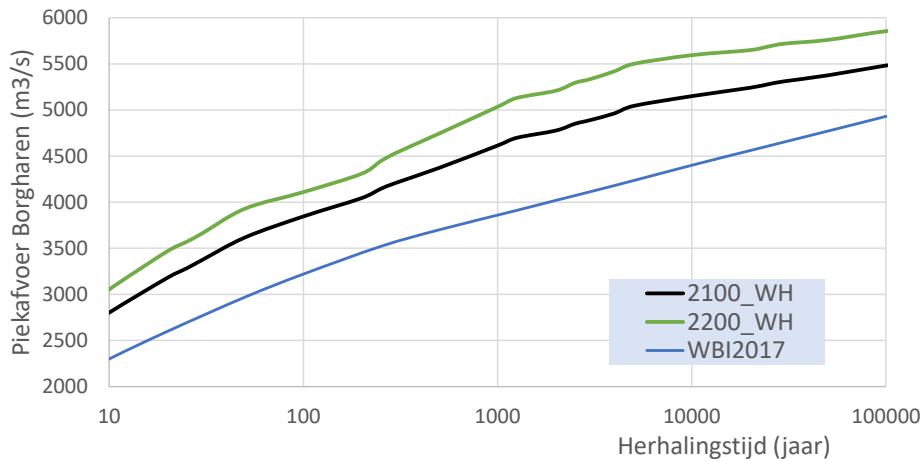
De statistieken van 2100_WH en 2200_WH worden binnen het kennisprogramma zeespiegelstijging verondersteld representatief te zijn voor situaties met 2m zeespiegelstijging (in 2100) en 5,4 m zeespiegelstijging (in 2200). Uit de beide figuren blijkt dat deze scenario's in vergelijking met de huidige condities leiden tot een substantiële toename van piekafvoeren (frequentie en absolute waarde).

Afbeelding 8.8. Statistieken van piekafvoeren van de Rijn bij Lobith

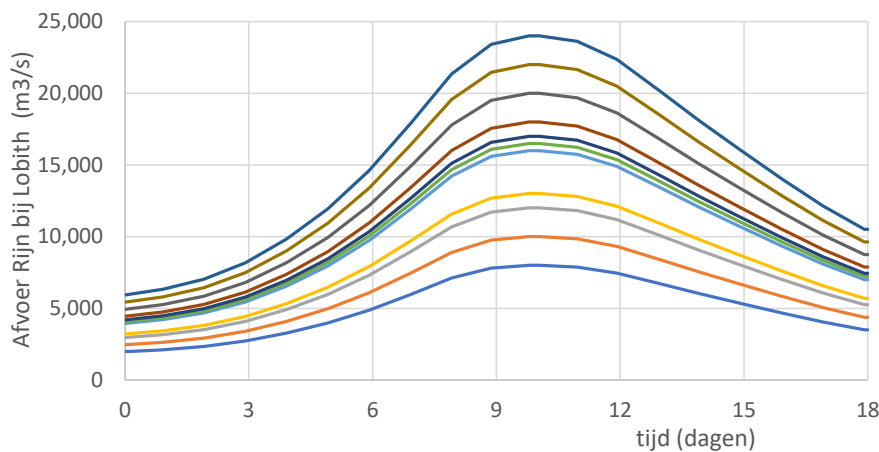


Afbeelding 8.11 en Afbeelding 8.10 tonen afvoergolfvormen bij verschillende afvoerpieken voor respectievelijk de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen. Deze golfvormen worden gebruikt om tijdseries te genereren voor elke willekeurige afvoerpiek. Voor 'tussengebied' afvoerpieken wordt geïnterpoleerd tussen de golfvormen behorende bij de dichtstbijzijnde afvoerpieken waarvoor golfvormen beschikbaar zijn. Voor afvoerpieken van meer dan 4.500 m³/s op de Maas wordt de hoogste afvoergolfvorm uit Afbeelding 8.11 toegepast en deze wordt verticaal "opgerekt" tot deze uitkomt op de betreffende afvoerpiek. Voor de Rijn hoeft geen gebruik gemaakt te worden van een dergelijke extrapolatie omdat de golfvormen tot 24.000 m³/s gaan.

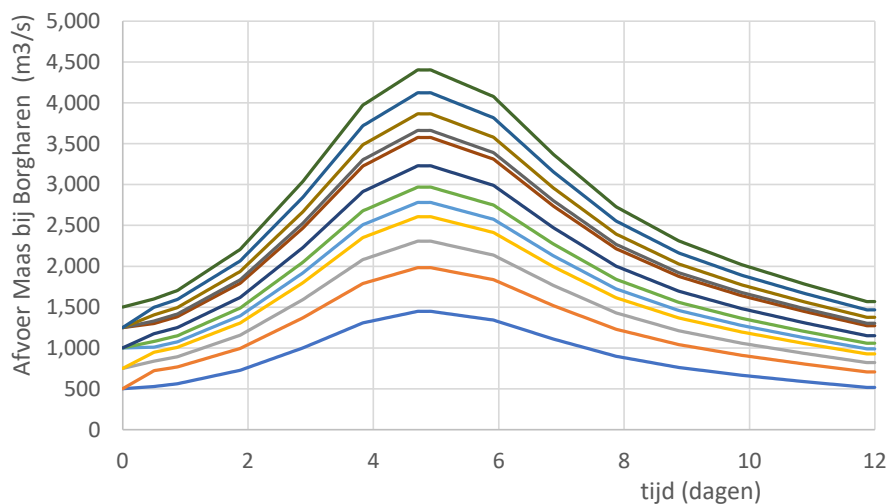
Afbeelding 8.9. Statistieken van piekafvoeren van de Maas bij Borgharen



Afbeelding 8.10. Afvoergolfvormen voor de Rijn bij Lobith voor verschillende afvoerpieken



Afbeelding 8.11. Afvoergolfvormen voor de Maas bij Borgharen voor verschillende afvoerpieken



Voor de modellering van de stochastische variabele “zeewaterstand” zijn metingen van waterstanden verzameld uit de periode 1987-2020. Uit de winterhalfjaren van deze periode zijn ongeveer 500 perioden van 30 dagen geselecteerd. Deze waterstanden zijn gecorrigeerd om rekening te houden met de opgetreden zeespiegelstijging in deze periode, waarbij is uitgegaan van een gemiddelde zeespiegelstijging van 2 mm/jaar.

In de probabilistische rekenmethode worden deze opgetreden zeewaterstanden, opgeteld bij de beschouwde mate van zeespiegelstijging, gecombineerd met synthetische gebeurtenissen van de rivierafvoer. Het bereik van mogelijke piekafvoeren van de Rijn wordt daarbij stapsgewijs doorlopen. Voor elk van deze piekafvoeren wordt een corresponderende golfvorm samengesteld uit de beschikbare standaard golfvormen van Afbeelding 8.11 en Afbeelding 8.10. De afvoer van de Maas wordt verondersteld volledig gecorreleerd te zijn met de afvoer van de Rijn. Dat betekent dat een piekafvoer Rijnafvoer met een herhalingsstijd van 100 jaar altijd gezamenlijk optreedt met een Maasafvoer met een herhalingsstijd van 100 jaar (en idem voor andere herhalingsstijden). Het percentage van de Rijnafvoer dat over de Lek en de Waal gaat wordt vervolgens opgeteld bij de Maasafvoer om de totale invoer van het reservoirmodel te bepalen.

Vervolgens worden deze hoogwatergolven gecombineerd met de ongeveer 500 tijdseries van de zeewaterstand. Anders gezegd: voor elke combinatie van piekafvoer en golfvorm worden 500 simulaties met het

reservoirmodel uitgevoerd, telkens met een ander tijdsverloop van de zeewaterstand. In elke simulatie wordt het tijdsverloop van het binnenpeil afgeleid en daaruit wordt weer het maximale peil bepaald. Overschrijdingskansen van het binnenpeil worden berekend op basis van de rekenmethode "numerieke integratie".

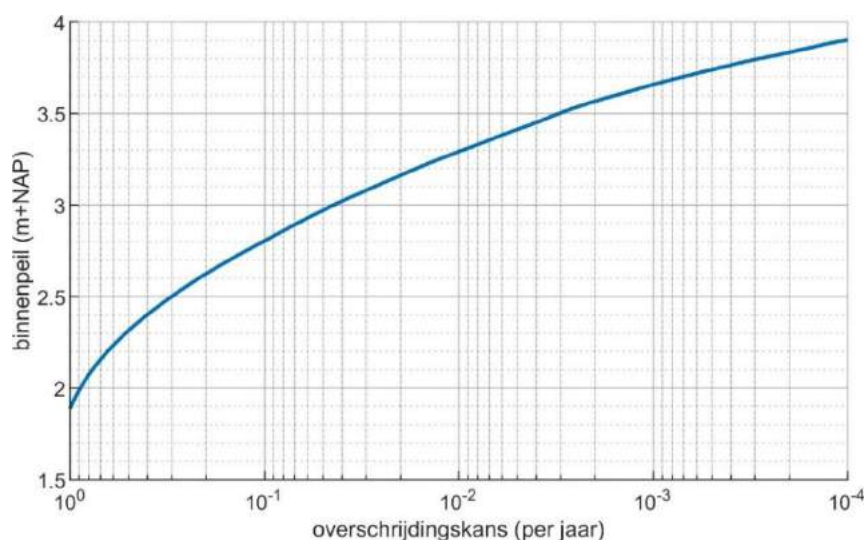
Voorbeeldsimulaties

De voornaamste uitvoer van een probabilistische berekening is een frequentielijn die de relatie weergeeft tussen hoge meerpeilen en de corresponderende jaarlijkse overschrijdingskans.

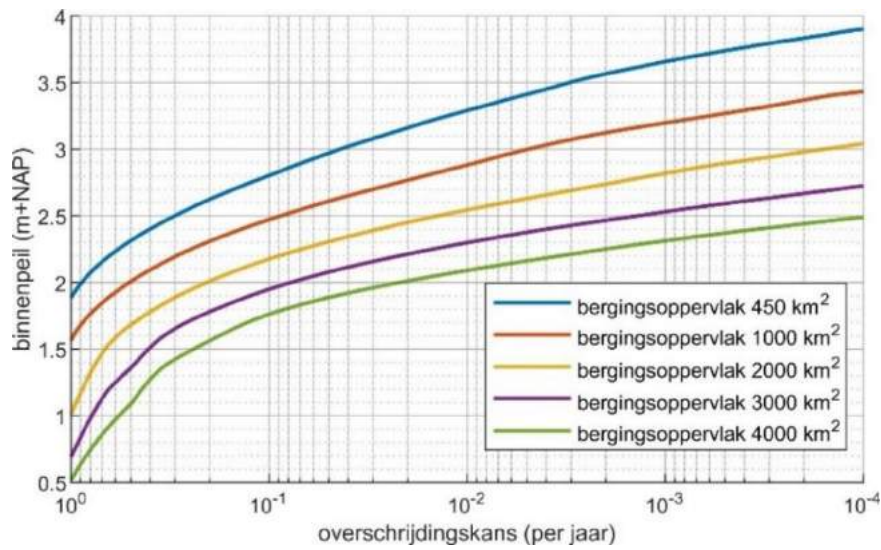
geeft het voorbeeld van een dergelijke frequentielijn die is afgeleid voor de systeemtoestand van simulatie 1 uit Tabel 8-2. In deze simulatie is de zeespiegelstijging 2 m, en daarom is de daarmee corresponderende afvoerstatistiek van scenario 2100_WH toegepast (zie Afbeelding 8.8 en Afbeelding 8.9). Uit [Afbeelding 8.12](#) kan afgeleid worden wat het meerpeil is dat correspondeert met overschrijdingskansen die corresponderen met of in dezelfde orde van grootte zijn als de normen van de primaire waterkeringen.

Afbeelding 8.13 toont wederom de frequentielijnen het binnenpeil voor de systeemtoestand van simulatie 1, waarbij dit keer het bergingsoppervlak is gevarieerd. Deze afbeelding maakt inzichtelijk hoe extreme meerpeilen gereduceerd kunnen worden door een toename van het bergingsoppervlak. Noot: de aldus getoonde reductie is alleen geldig voor deze systeemtoestand. Indien bijvoorbeeld een andere pompcapaciteit wordt geïnstalleerd dan de 3.000 m³/s van deze simulatie zal het effect van het bergingsoppervlak op maximale meerpeilen gebied anders zijn. In een extreem geval is bijvoorbeeld de pompcapaciteit groot genoeg om alle rivierafvoeren uit te pompen en is het effect van het bergingsoppervlak op maximale meerpeilen nihil. Het is, kortom, van belang om de impact van mogelijk ingrepen in het systeem in samenhang te beschouwen.

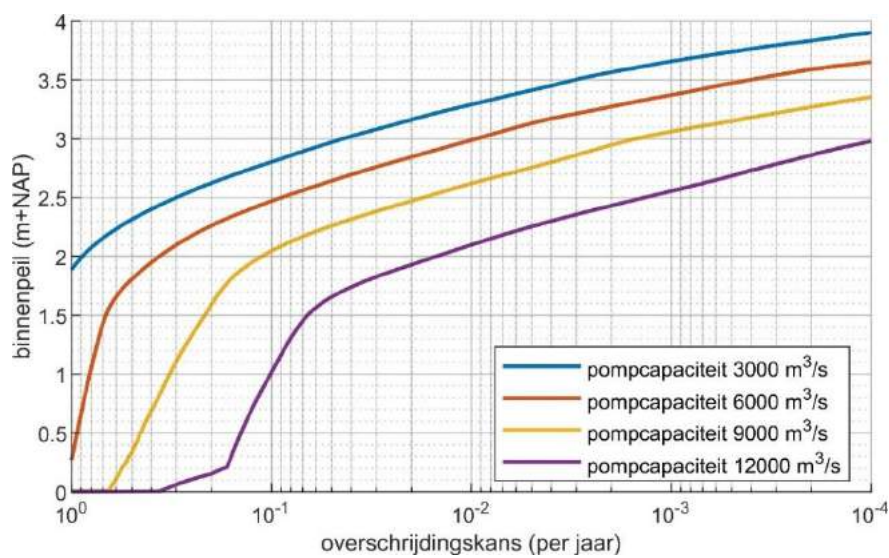
Afbeelding 8.12. Toont vergelijkbare grafieken; in dit geval is de pompcapaciteit gevarieerd. Ook hier geldt weer dat het effect van de pompcapaciteit op hoge meerpeilen afhankelijk is van andere systeemkenmerken



Afbeelding 8.13. Overschrijdingsfrequentie van het binnenpeil voor de systeemtoestand van simulatie 1 uit Tabel 8-2



Afbeelding 8.14. Overschrijdingsfrequentie van het binnenpeil voor de systeemtoestand van simulatie 1 uit Tabel 8-2, waarbij vervolgens het bergingsoppervlak is gevarieerd



Simulaties voor de consortia in 2023

Consortium Beschermen

Voor het consortium Beschermen zijn vier strategieën ontwikkeld voor de Rijn-Maasmonding:

Strategie A1: de Maeslantkering en Hartelkering worden vervangen door een gesloten variant. Het streefpeil in de Rijn-Maasmonding is lager dan de gemiddelde zeewaterstand. Onder dagelijkse omstandigheden wordt het rivierwater via gemalen afgevoerd; tijdens hoogwaters kan gespuid worden zodra het binnenpeil hoger is dan het buitenpeil.

Strategie A2: de Maeslantkering en Hartelkering worden vervangen door een gesloten variant. Het streefpeil in de Rijn-Maasmonding is gelijk aan de gemiddelde zeewaterstand. Onder dagelijkse omstandigheden wordt het rivierwater tijdens perioden van eb afgevoerd via spuisluizen. Bij stormopzet op zee kan het water deels gepompt worden.

Strategie B1: deze strategie is min of meer gelijk aan de huidige VKS2015 met een stormvloedkering. Het reservoirmodel is voor dit strategie niet toepasbaar.

Strategie B2: In deze strategie wordt naast verbeteringen van zeefront, berging en gemaalcapaciteit ook de rivierafvoer omgeleid. In de delta is een verbeterd zeefront aanwezig dit bestaat uit:

1. een nieuwe deltabekken (RMM) waarop de Lek loost en de afvoer naar zee wordt gepompt;
2. een hoogwatercorridor via de Waal + de Maas (naar zuiden Biesbosch / Hollansch Diep / Grevelingen) met spui bij Grevelingen naar Noordzee;

Strategie B1 is dus niet met het model doorgerekend. Voor de overige strategieën toont Tabel 8-3 de onderlinge verschillen in modelparameters voor de bij 2 en 5,5 m zeespiegelstijging.

Tabel 8-3 Overzicht van onderlinge verschillen in modelparameters voor de strategieën bij 2 en 5,5 m zeespiegelstijging

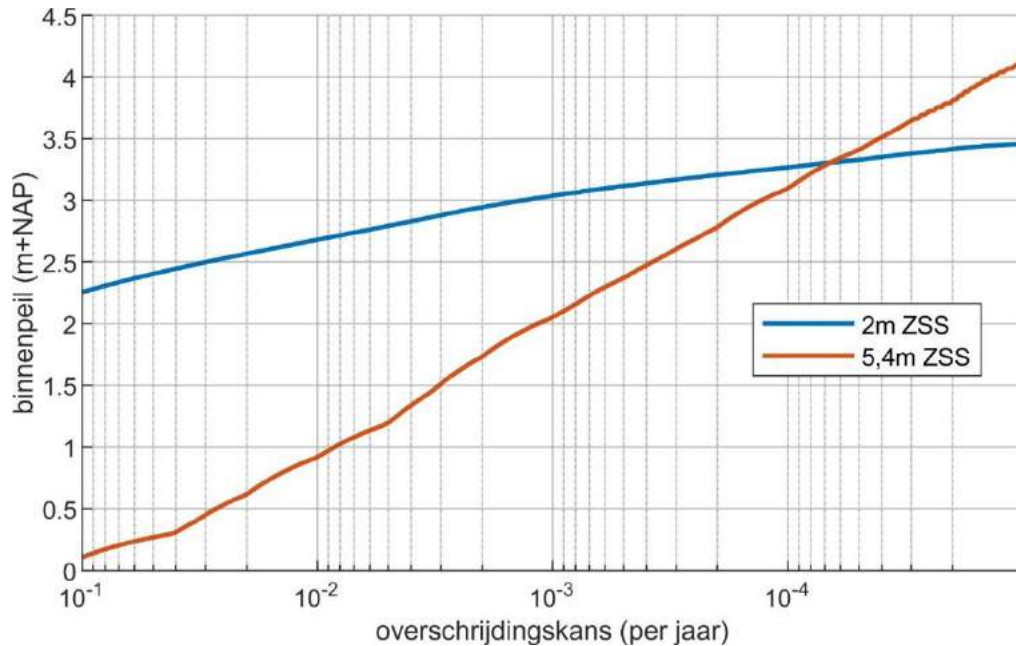
Variabele	Eenheid	A1		A2		B2; deltabekken		B2; corridor	
		2m ZSS	5,4m ZSS	2m ZSS	5,4m ZSS	2m ZSS	5,4m ZSS	2m ZSS	5,4m ZSS
Streefpeil	m+NAP	0	0	2	5,4	0	0	2	5,4
Bergingsopp.	km ²	1.000	1.000	1.000	1.000	200	200	800	800
Rivieren	-	W+L+M	W+L+M	W+L+M	W+L+M	L	L	W+M	W+M
Pompcapaciteit	m ³ /s	5.000	15.500	3.000	3.000	2.500	2.500	0	0

De pompcapaciteiten voor strategie A1 (5000 m³/s en 15.500 m³/s) zijn iteratief bepaald met het reservoirmodel. Deze capaciteiten zijn zó gekozen dat het meerpeil met een herhalingsjijd van 10.000 jaar bij benadering overeenkomt met het ruimtelijke gemiddelde van waterstanden met dezelfde herhalingsjijd in het benedenrivierengebied (NAP+3,16m) in de referentiesituatie (het jaar 2023). Om het peil onder de NAP +3,16 m te houden moet bij 5,4 m zeespiegelstijging al het uitgaande water gepompt worden, terwijl bij 2 m zeespiegelstijging tijdens hoogwaters in de regel (ook) gespuid kan worden. Dat verklaart grotendeels waarom bij 5,4 m zeespiegelstijging een veel grotere pompcapaciteit nodig is dan bij 2 m zeespiegelstijging. Een andere oorzaak van het verschil is dat 5,4 m zeespiegelstijging gepaard gaat met grotere afvoeren, zie Afbeelding 8.8 en Afbeelding 8.9. Het ontbreken van spui mogelijkheden is ook de oorzaak dat de frequentielijn bij 5,4 m zeespiegelstijging veel steiler is dan de frequentielijn bij 2m zeespiegelstijging, zie Afbeelding 8.14. De frequentielijn bij 2 m zeespiegelstijging is relatief vlak doordat in de regel gespuid kan worden zodra het meerpeil tijdens hoogwaterperioden in de buurt komt van NAP +2 m. Alleen als tijdens het optreden van hoge afvoeren ook een stormopzet op zee plaats vindt kan tijdelijk niet gespuid worden. Dergelijke gebeurtenissen zijn de oorzaak dat de blauwe lijn in Afbeelding 8.14 niet volledig vlak verloopt.

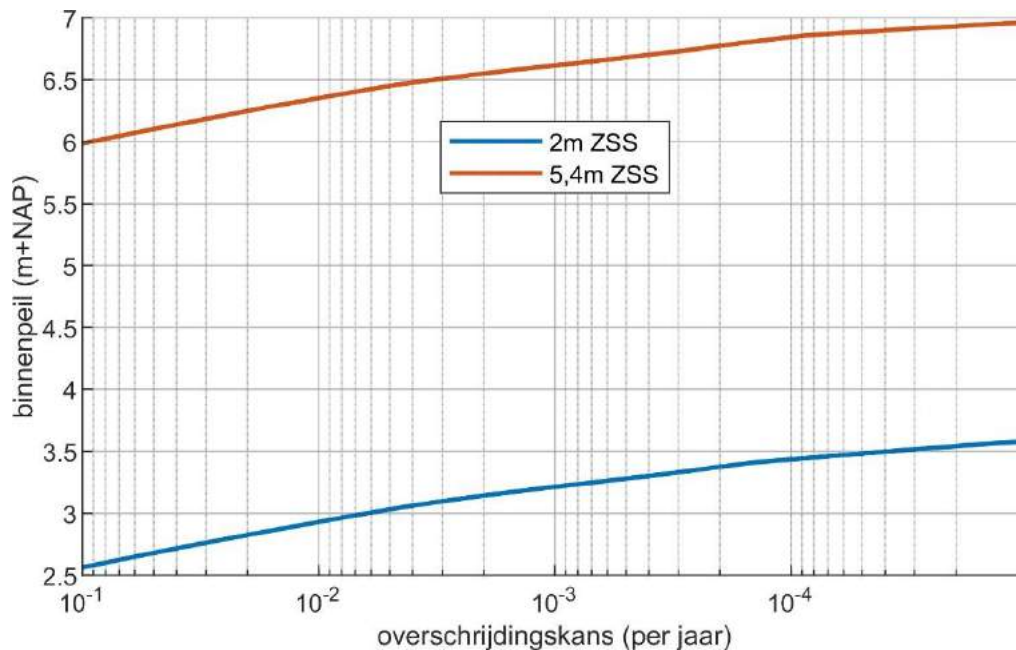
In strategie A2 is spuien vrijwel altijd mogelijk en hebben beide frequentielijnen (bij 2 m en 5,4 m zeespiegelstijging, zie Afbeelding 8.15) daardoor een vergelijkbaar vlak verloop als de frequentielijn bij 2 m

zeespiegelstijging in strategie A1. Echter, de frequentielijn voor 5,4 m zeespiegelstijging ligt in strategie A2 exact 3,4 m hoger dan de frequentielijn voor 2 m zeespiegelstijging. De meerpeilen zijn in dit strategie zelfs onder dagelijkse omstandigheden erg hoog in vergelijking met de huidige situatie.

Afbeelding 8.15. Berekende frequentielijnen van het meerpeil bij 2 m en 5,4 m zeespiegelstijging voor **strategie A1**



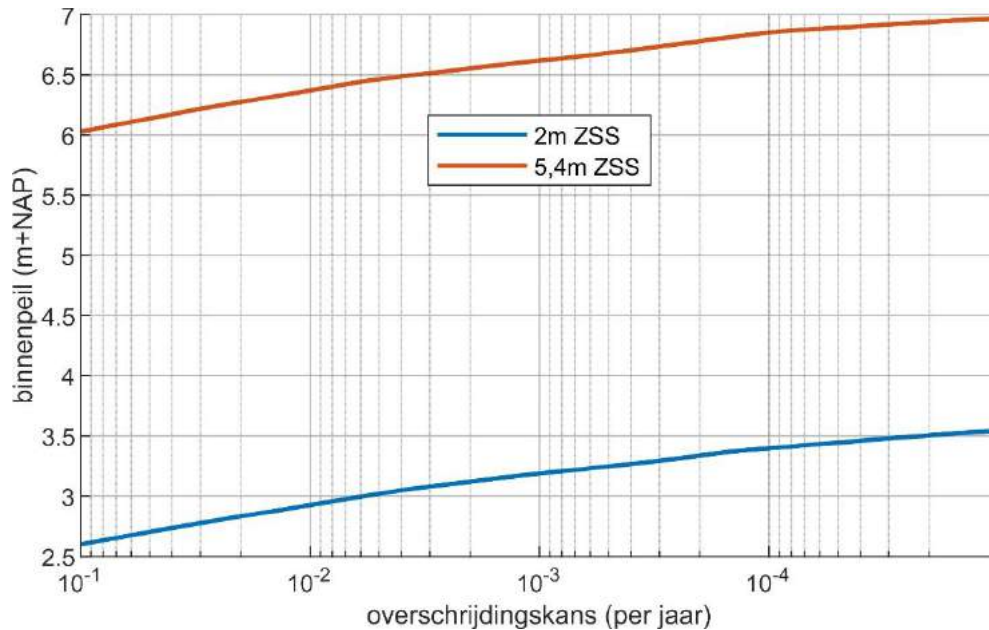
Afbeelding 8.16. Berekende frequentielijnen van het meerpeil bij 2 m en 5,4 m zeespiegelstijging voor **strategie A2**



In Strategie B2 worden twee gebieden onderscheiden: het 'deltabekken' en de 'corridor'. Voor het deltabekken is aangenomen dat de rivierafvoer (van de Lek) begrensd is en dat de pompcapaciteit altijd groot genoeg is om het maximale debiet instantaan uit te pompen. Voor dit gebied is het meerpeil dus in principe altijd gelijk aan NAP+0m en zijn daarom geen simulaties uitgevoerd. Voor de corridor zijn de berekende frequentielijnen (Afbeelding 8.16) nagenoeg gelijk aan die van strategie A2 (Afbeelding 8.15). Dit is het gevolg

van het feit dat in de strategieën A2 en B2 de extreme meerpeilen vooral worden bepaald door de (on)mogelijkheid tot spuien.

Afbeelding 8.17. Berekende frequentielijnen van het meerpeil bij 2m en 5,4m zeespiegelstijging voor de corridor in **strategie B2**

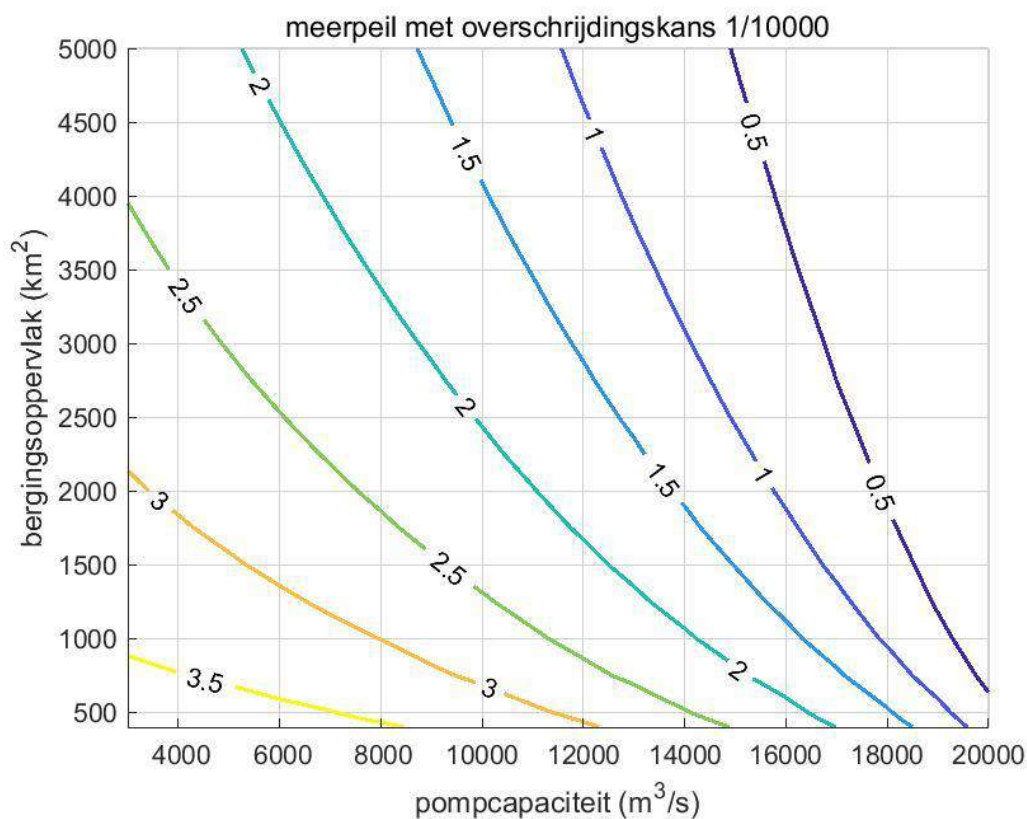


Consortium Zeewaarts

In het consortium Zeewaarts wordt uitgegaan van een streefpeil dat niet mee stijgt met de zeespiegelstijging. Het lijkt in die zin op strategie A1 van het consortium Beschermen, met als belangrijkste verschil de beschikbaarheid van extra bergingsoppervlak vanwege het kustrandmeer. De grootte van het extra bergingsoppervlak van het kustrandmeer (900 km²) is mede bepaald op basis van simulaties met het reservoirmodel. Daartoe zijn simulaties uitgevoerd met verschillende combinaties van de pompcapaciteit en het bergingsoppervlak. De overige systeemkenmerken (spuicapaciteit, afvoerverdeling en streefpeil) zijn gelijk genomen aan simulatie 1 (zie Tabel 8-2). Voor elke doorgerekende combinatie van bergingsoppervlak en pompcapaciteit is een frequentielijn van het meerpeil bepaald met het probabilistische model. Daaruit zijn meerpeilen gedestilleerd met een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar. Deze 1/10.000 jaar meerpeilen zijn vervolgens in een contourplot weergegeven als functie van de pompcapaciteit en het bergingsoppervlak.

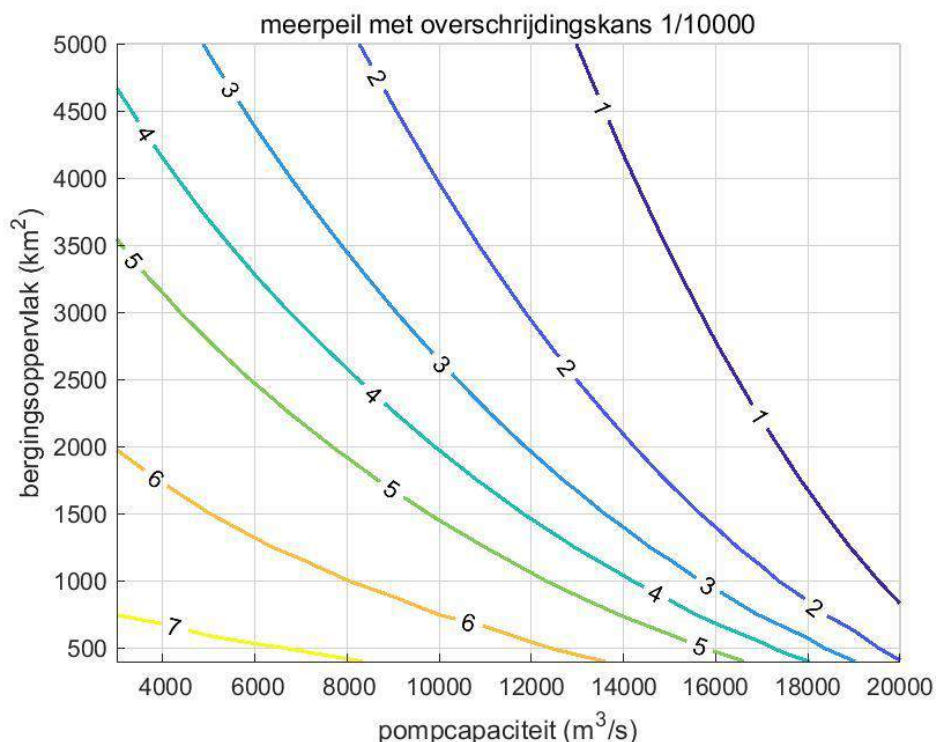
Afbeelding 8.17 toont de resulterende contourlijnen bij 2m zeespiegelstijging. De oranje lijn toont combinaties van de pompcapaciteit en het bergingsoppervlak die resulteren in een 1/10.000 jaar meerpeil van NAP +3 m. In het consortium Zeewaarts is als doel gesteld om het 1/10.000 jaar meerpeil niet hoger dan NAP +3 m te laten zijn. Als we uitgaan van het bestaande bergingsoppervlak in het benedenrivierengebied van (ongeveer) 450 km², dan is een pompcapaciteit nodig van 11.900 m³/s. Als de Zeeuwse delta als extra bergingsgebied wordt ingezet (totale bergingsoppervlak van 1.000 km²) volstaat een pompcapaciteit van 7.900 m³/s. Indien een aanvullend kustbassin van 900 km² wordt aangelegd (totale bergingsoppervlak = 1.900 km²) volstaat een pompcapaciteit van 3.800 m³/s.

Afbeelding 8.18. Contourlijnen van meerpeilen met overschrijdingskans 1/10.000 per jaar, als functie van de pompcapaciteit (horizontaal) en het bergingsoppervlak (verticaal) voor **een zeespiegelstijging van 2 m**



Afbeelding 8.18 toont de resulterende contourlijnen van het 1/10.000 jaar meerpeil bij een zeespiegelstijging van 5,4 m. Om deze niet boven NAP +3 m uit te laten komen zijn bij de eerder genoemde bergingsoppervlakten van 450, 1.000 en 1.900 km² pompcapaciteiten nodig van respectievelijk 18.700, 15.700 en 12.200 m³/s. Om de pompcapaciteit 'beperkt' te kunnen houden tot 8.000 m³/s is een totaal bergingsoppervlak nodig van 3.450 km². Uitgaande van een totaal bergingsoppervlak van 1.000 km² in het benedenrivierengebied en de Zeeuwse delta, betekent dit dat een kustbassin met een bergingsoppervlak van 2.500 km² aangelegd zou moeten worden. Binnen het consortium Zeewaarts is geconcludeerd dat dat onwenselijk is.

Afbeelding 8.19. Contourlijnen van meerpeilen met overschrijdingskans 1/10.000 per jaar, als functie van de pompcapaciteit (horizontaal) en het bergingsoppervlak (verticaal) voor **een zeespiegelstijging van 5,4 m**



In het consortium Zeewaarts is geopperd om voor te pompen, voorafgaand aan een hoogwater, om het benodigde bergingsoppervlak en de benodigde pompcapaciteit bij 5,4 m zeespiegelstijging te kunnen reduceren. Dat betekent dat, zodra een hoogwater wordt voorspeld in het stroomgebied van de Rijn (en Maas), de pompen op volle capaciteit aangezet worden om het peil in het meer te verlagen en zo extra bergingsvolume te creëren. Hoeveel peilverlaging daarmee bereikt kan worden hangt voornamelijk af van de volgende factoren:

1. de 'lead time', ofwel het aantal dagen dat vooruit voorspeld kan worden dat een hoogwater op komt is. Hoe groter de lead time, hoe meer water voorgepompt kan worden en dus hoe lager het meerpeil bij aanvang van het hoogwater;
2. de beschikbare pompcapaciteit: hoe groter de pompcapaciteit, hoe meer water voorgepompt kan worden en dus hoe lager het meerpeil bij aanvang van het hoogwater;
3. het bergingsoppervlak: hoe groter meerpeil, hoe langer het duurt om een gewenste hoeveelheid peilverlaging te realiseren.

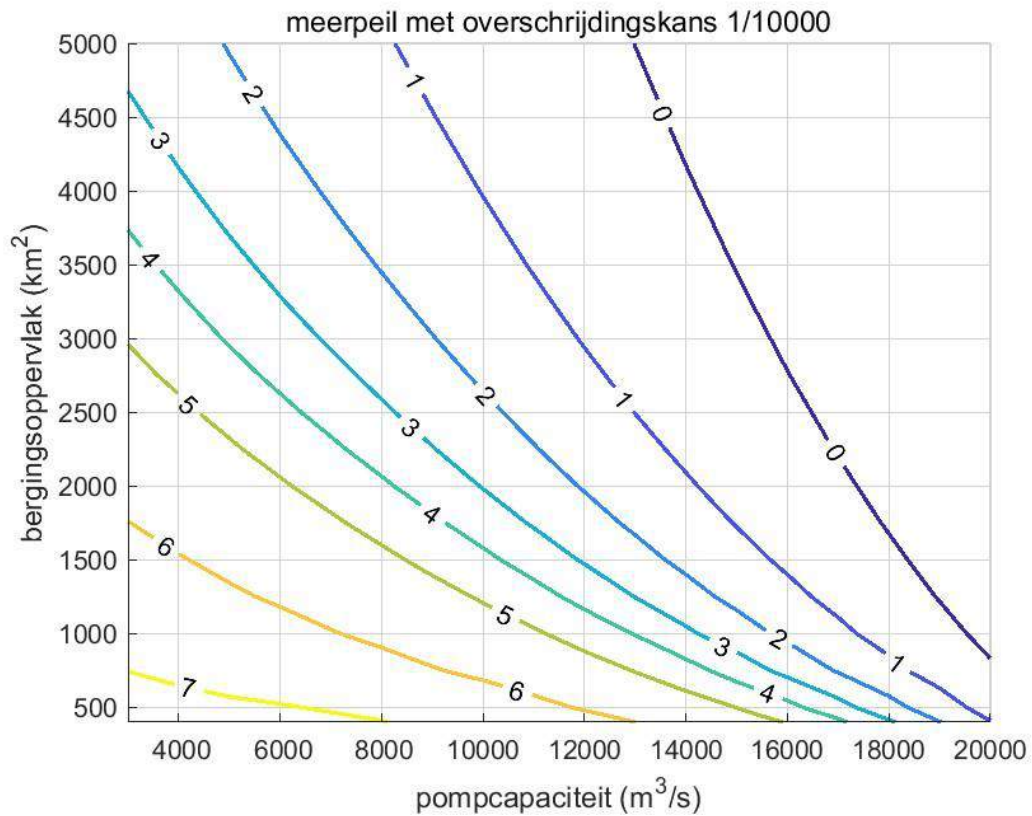
De pompcapaciteit en het bergingsoppervlak zijn in deze studie (binnen grenzen van het betamelijke) te kiezen systeemkenmerken en de invloed van deze keuzes op de te bereiken peilverlaging van deze twee factoren zijn relatief eenvoudig uit te rekenen met het model. De lead-time is minder eenvoudig in te schatten en hangt ook sterk af van de strategie die gehanteerd wordt. Als bij het geringste vermoeden van een mogelijk op komst zijnde (extreem) hoogwater direct voorgepompt wordt, kan extra tijd gewonnen worden in vergelijking met de strategie waarin gewacht wordt tot er meer zekerheid is dat daadwerkelijk een (extreem) hoogwater op komst is. Het nadeel van de eerste strategie is dat er meer 'false positives' zijn, d.w.z. situaties waarin voorgepompt wordt terwijl er uiteindelijk geen, of slechts een beperkt, hoogwater optreedt. Het is echter de vraag of dat erg is. Mogelijk treedt een dergelijke situatie slechts één keer in de paar jaar op. Bovendien kan het meerpeil waarschijnlijk relatief snel weer teruggebracht worden naar streefpeil omdat ook een 'bescheiden' hoogwater op de Rijn een surplus aan water genereert waarmee het meer opgevuld kan worden.

In welke mate het meerpeil daadwerkelijk verlaagd kan worden voorafgaand aan een hoogwater is vooralsnog een kennisvraag. Om een gevoel te krijgen van de mogelijke voordelen zijn aanvullende simulaties gedraaid met het model waarin is aangenomen dat het meerpeil met respectievelijk 1 m en 2 m verlaagd wordt voorafgaand aan het hoogwater. Op basis van die simulaties zijn weer contourlijnen afgeleid (Afbeelding 8.19 resp. Afbeelding 8.20), Tabel 8-4 geeft een overzicht van mogelijke combinaties van bergingsoppervlak en pompcapaciteit waarmee in die situaties bereikt wordt dat het 1/10.000 jaar meerpeil gelijk is aan NAP +3 m. Voor het systeem met 1.900 km² bergingsoppervlak (benedenrivierengebied + zuidwestelijke delta + kustrandmeer van 900 km²) levert het voorpompen tot NAP-1m een reductie op in de benodigde pompcapaciteit van 1.900 m³/s (afname van 12.200 m³/s naar 10.300 m³/s). Het voorpompen tot NAP -2 m levert een reductie op in de benodigde pompcapaciteit van 3.500 m³/s (afname van 12.200 m³/s naar 8.700 m³/s). Het voorpompen kan dus (in theorie) een substantiële besparing opleveren op de benodigde pompcapaciteit. Het is dus een relevante om verder te onderzoeken in hoeverre het naar verwachting daadwerkelijk mogelijk is om het meerpeil tot NAP -1 m of NAP -2 m te verlagen voorafgaand aan een hoogwater (**kennisvraag**).

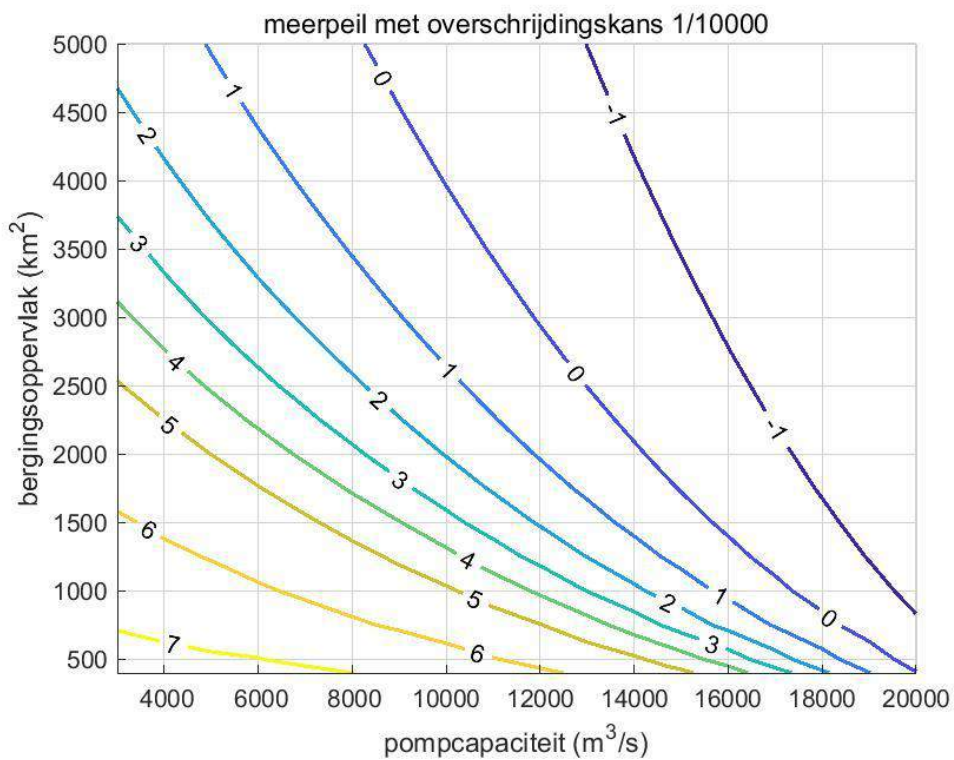
Tabel 8-4 Mogelijke combinaties van bergingsoppervlak en pompcapaciteit waarvoor het 1/10.000 jaar meerpeil gelijk is aan NAP +3 m

ZSS [m]	Startpeil [m NAP]	Bergingsoppervlak [km ²]	Pompcapaciteit [m ³ /s]
2	0	450	11.900
2	0	1.000	7.900
2	0	1.900	3.800
5,4	0	450	18.700
5,4	0	1.000	15.700
5,4	0	1.900	12.200
5,4	0	3.450	8.000
5,4	-1	450	17.700
5,4	-1	1.000	14.200
5,4	-1	1.900	10.300
5,4	-2	450	16.900
5,4	-2	1.000	13.000
5,4	-2	1.900	8.700

Afbeelding 8.20. Contourlijnen van meerpeilen met overschrijdingskans 1/10.000 per jaar, als functie van de pompcapaciteit (horizontaal en het bergingsoppervlak (verticaal) voor een zeespiegelstijging van 5,4 m. In deze simulatie is een startwaarde van het meerpeil van NAP -1 m aangenomen



Afbeelding 8.21. Contourlijnen van meerpeilen met overschrijdingskans 1/10.000 per jaar, als functie van de pompcapaciteit (horizontaal en het bergingsoppervlak (verticaal) voor een zeespiegelstijging van 5,4m. In deze simulatie is een startwaarde van het meerpeil van NAP-2m aangenomen



Referenties

Rijkswaterstaat (2015) Motie Geurts, Deltaprogramma: onderzoek naar de effecten van sluizen in de Nieuwe Maas en Oude Maas op de waterveiligheid en zoetwatervoorziening. 'Nader onderzoek variant afsluiting Nieuwe Waterweg'. 19 november 2015, Definitief concept.

