

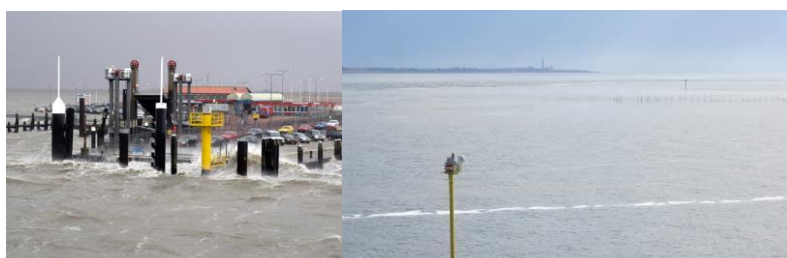
Monitoringplan Deltaprogramma

Waddengebied

**Advies voor het toekomstbestendig maken van
het monitoringsysteem voor waterveiligheid in
het Waddengebied**

*A.V. de Groot, J. Vroom, A.P. Oost, G. Burgers, C. van
Oeveren, S.R. Smith, J.E. Tamis*

Rapport C121/14



IMARES Wageningen UR

(IMARES - Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies)



Oprichtgever:

Deltaprogramma Waddengebied
Ministerie van Economische Zaken
Rick Hoeksema
Postbus 2003, 8901 JA Leeuwarden

Ministerie van Economische Zaken
Jan Huinink, Thamar Kok
Postbus 20401, 2500 EK Den Haag

BO-11-015-048 Deltaprogramma Waddengebied

Publicatiedatum:

12 september 2014

IMARES is:

- Missie Wageningen UR: *To explore the potential of marine nature to improve the quality of life.*
- IMARES is hét Nederlandse instituut voor toegepast marien ecologisch onderzoek met als doel kennis vergaren van en advies geven over duurzaam beheer en gebruik van zee- en kustgebieden.
- IMARES is onafhankelijk en wetenschappelijk toonaangevend.

Foto omslag: Rijkswaterstaat (links), Alma de Groot (rechts)

Affiliatie auteurs

*A.V. de Groot, S.R. Smith, J.E. Tamis
J. Vroom, A.P. Oost, C. van Oeveren
G. Burgers*

IMARES
Deltares
Rijkswaterstaat WVL

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het EZ-programma Beleidsondersteunend Onderzoek Deltaprogramma Waddengebied.

P.O. Box 68 1970 AB IJmuiden Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)317 48 73 26 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl	P.O. Box 77 4400 AB Yerseke Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)317 48 73 59 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl	P.O. Box 57 1780 AB Den Helder Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)223 63 06 87 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl	P.O. Box 167 1790 AD Den Burg Texel Phone: +31 (0)317 48 09 00 Fax: +31 (0)317 48 73 62 E-Mail: imares@wur.nl www.imares.wur.nl
--	--	---	--

© 2014 IMARES Wageningen UR

IMARES, onderdeel van Stichting DLO.
KvK nr. 09098104,
IMARES BTW nr. NL 8113.83.696.B16.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

De Directie van IMARES is niet aansprakelijk voor gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van IMARES; opdrachtgever vrijwaart IMARES van aanspraken van derden in verband met deze toepassing.
Dit rapport is vervaardigd op verzoek van de opdrachtgever hierboven aangegeven en is zijn eigendom. Niets uit dit rapport mag weergegeven en/of gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden zonder schriftelijke toestemming van de opdrachtgever.

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
Samenvatting.....	7
1 Inleiding.....	11
1.1 Aanleiding en context.....	11
1.2 Doel en afbakening.....	13
1.3 Aanpak en opzet.....	14
1.3.1 Monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's.....	14
1.3.2 Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots.....	15
1.3.3 Quick Reaction Force.....	15
1.4 Leeswijzer.....	16
2 Te verwachten veranderingen in het Waddengebied.....	17
2.1 Inleiding.....	17
2.2 Meteorologie.....	17
2.2.1 Wind 18.....	17
2.2.2 Temperatuur, verdamping en neerslag.....	19
2.3 Waterstandsvariatie op de Noordzee.....	20
2.3.1 Zeespiegel.....	20
2.3.2 Getijdeslag.....	21
2.3.3 Golfklimaat.....	22
2.3.4 Windopzet.....	22
2.4 Bodemdaling.....	23
2.5 Antropogene invloeden.....	23
2.6 Morfodynamische respons.....	24
2.6.1 Inleiding.....	24
2.6.2 Huidige stand.....	24
2.6.3 Verwachtingen voor de toekomst.....	25
3 Deltathema: Sturende factoren.....	28
3.1 Inleiding.....	28
3.2 Meteo 28.....	28
3.2.1 Relevantie.....	28
3.2.2 Werking relevante onderdelen systeem.....	28
3.2.3 Informatiebehoefte.....	29
3.2.4 Indicatoren.....	29
3.2.5 Databehoefte.....	30
3.2.6 Huidige monitoring.....	31
3.3 Zeespiegel.....	32
3.3.1 Relevantie.....	32
3.3.2 Werking relevante onderdelen systeem.....	32
3.3.3 Informatiebehoefte.....	33
3.3.4 Indicatoren.....	33
3.3.5 Databehoefte.....	33
3.3.6 Huidige monitoring.....	34
3.4 Waterbeweging op de Noordzee.....	34
3.4.1 Relevantie.....	34
3.4.2 Werking relevante onderdelen systeem.....	34
3.4.3 Informatiebehoefte.....	35
3.4.4 Indicatoren.....	35
3.4.5 Databehoefte.....	35
3.4.6 Huidige monitoring.....	36

3.5	Bodemdaling en seismiciteit	36
3.5.1	Relevantie	36
3.5.2	Werking relevante onderdelen systeem	37
3.5.3	Informatiebehoefte	37
3.5.4	Indicatoren	38
3.5.5	Databehoefte	38
3.5.6	Huidige monitoring.....	38
3.6	Menselijke activiteiten	38
3.6.1	Relevantie	38
3.6.2	Werking relevante onderdelen systeem	39
3.6.3	Informatiebehoefte	40
3.6.4	Indicatoren	41
3.6.5	Databehoefte	41
3.6.6	Huidige monitoring.....	41
3.7	Aanbevelingen.....	42
4	Deltathema: Morfologische ontwikkeling en meegroeivermogen	43
4.1	Inleiding.....	43
4.2	Relevantie	43
4.3	Werking van het systeem.....	44
4.3.1	Het sedimentdelende zeegatsysteem	44
4.3.2	Invloed van beleid en beheer.....	44
4.3.3	Toekomstige ontwikkelingen.....	45
4.4	Informatiebehoefte	45
4.5	Indicatoren	46
4.5.1	Indicatoren voor het behoud van (droog) areaal	46
4.5.2	Indicatoren voor de beschermende functie.....	47
4.5.3	Indicatoren voor de abiotische karakteristieken	48
4.6	Databehoefte	50
4.7	Aanbevelingen.....	51
5	Deltathema: Belastingen en waterkering	53
5.1	Inleiding.....	53
5.2	Belastingen	53
5.2.1	Relevantie	53
5.2.2	Beschrijving van het systeem	53
5.2.3	Informatiebehoefte	57
5.2.4	Indicatoren	57
5.2.5	Databehoefte	60
5.3	Waterkering	62
5.3.1	Relevantie	62
5.3.2	Beschrijving van het systeem	63
5.3.3	Informatiebehoefte	71
5.3.4	Indicatoren	71
5.3.5	Databehoefte	75
5.4	Aanbevelingen.....	76
6	Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots.....	77
6.1	Inleiding.....	77
6.2	Relevantie	78
6.3	Informatiebehoefte	79
6.4	Indicatoren	79
6.5	Databehoefte	80
6.5.1	Metingen voor de indicatoren.....	80
6.5.2	Procesmetingen	80

7	Quick Reaction Force	82
	7.1 Relevantie	82
	7.2 Werking relevante onderdelen systeem	82
	7.3 Informatiebehoefte	83
	7.4 Indicatoren	84
	7.5 Databehoefte en rapportagebehoefte	84
	7.6 Huidige monitoring.....	86
	7.7 Opzet QRF	86
	7.8 Aanbevelingen.....	87
8	Synthese	88
	8.1 Doel 88	
	8.2 Inventarisatie monitoringbehoefte.....	88
	8.3 Prioritering nieuwe monitoringvragen.....	88
	8.3.1 Overzicht.....	88
	8.3.2 Nieuwe monitoring ontwikkelingen en risico's Waddengebied (reguliere monitoring).....	89
	8.3.3 Nieuwe monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots	91
	8.4 Nieuwe (toepassing van) monitoringtechnieken	92
9	Inbedding en organisatie.....	94
	9.1 Inleiding.....	94
	9.2 Voorkeursstrategie Waddengebied, Onderzoeksplan en Adaptieve Monitoring .	95
	9.3 Relevante organisaties.....	95
	9.3.1 Beleid- en beheerorganisaties	95
	9.3.2 Andere relevante organisaties en samenwerkingsverbanden.....	96
	9.4 Bestaande en geplande programma's.....	97
	9.5 Implementatie Monitoringplan DPW	98
	9.5.1 Aansluiting bij programma's RWS.....	98
	9.5.2 Bijdrage door ander partijen.....	99
	9.5.3 Coördinatie	99
	9.5.4 Adaptief monitoringprogramma.....	100
	9.6 Ontsluiting en toegankelijkheid	100
10	Conclusies en aanbevelingen	102
	10.1 Aanleiding monitoringplan	102
	10.2 Doel en afbakening	102
	10.3 Noodzaak extra monitoring	102
	10.4 Opgave monitoring	103
	10.4.1 Opgave monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's.....	103
	10.4.2 Opgave monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots	103
	10.5 Conclusies en aanbevelingen	103
	10.5.1 Algemeen	103
	10.5.2 Monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's.....	103
	10.5.3 Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots.....	104
11	Kwaliteitsborging	105
	Referenties	106
	Dankwoord	111

Verantwoording	112
Bijlage A. Specificaties meteorologische databehoeft	113
Bijlage B. Inventarisatie monitoringbehoefte	117
Bijlage C. Overzicht bestaande meetstations	128

Samenvatting

Opgave DPW

Het Nationaal Deltaprogramma heeft tot doel het garanderen van een duurzame veiligheid tegen overstromingen en de beschikbaarheid van zoet water voor de komende eeuw. Het deelprogramma Deltaprogramma Waddengebied (DPW) heeft een voorkeursstrategie geformuleerd waarin werking en toekomstige veranderingen van het zandig systeem en het versterken van natuurlijke en landschappelijke waarden van de dijken centraal staan. Als belangrijk onderdeel van de voorkeursstrategie DP 2014, heeft DPW dit monitoringplan opgesteld.

Het Waddengebied krijgt de komende eeuw te maken met klimaatverandering. Naarmate de zeespiegel verder stijgt, vraagt het intergetijdengebied van de Waddenzee meer zand en onttrekt dat naar verwachting aan de buitendelta's en de eilandkusten. Het is dan de vraag of het meegroeivermogen van het gebied voldoende is om de zeespiegelstijging bij te houden. De Voorkeursstrategie geeft aan dat er zonder passende maatregelen op een tijdschaal van vijftig tot honderd jaar een aantal problemen op ons af komt:

- De geulen worden actiever en vragen mogelijk meer onderhoud.
- De erosie van de eilandkusten neemt toe, wat we moeten compenseren met zandsuppleties.
- De buitendelta's krimpen en daarmee ook de bufferende en dempende werking bij noordwesterstormen.
- De dijken van het vasteland krijgen het zwaarder te verduren.

Het is goed nu al in actie te komen, omdat nog niet precies bekend is wanneer, waar en hoe welke maatregelen nodig zullen zijn. De strategie richt zich op behoud van de bufferende werking van eilanden, buitendelta's en intergetijdengebied, en om de basiskustlijn te handhaven en het kustfundament duurzaam in evenwicht te houden met de zeespiegelstijging. De strategie van DPW is om sterk in te zetten op het ontwikkelen van nieuwe kennis en het monitoren van de veranderingen. Hiervoor is ook samenwerking opgezet met de Duitse en Deense partners van het trilaterale samenwerkingsverband voor de Waddenzee.

Monitoring van het Waddensysteem

De ambitie is om met de juiste monitoring en kennisontwikkeling relevante morfologische ontwikkelingen als gevolg van klimaatverandering tijdig te kunnen voorspellen, en ook om de effecten van grotere zandsuppleties te kunnen modelleren en voorspellen. Naast het advies voor monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's wordt daarom ook geadviseerd monitoring uit te voeren voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots (de zandsuppletie pilots die onderdeel uitmaken van de kennisontwikkeling) en een Quick Reaction Force op te zetten om van extreme gebeurtenissen te kunnen leren.

De doelen van het monitoringsplan zijn:

- een tijdig signaal te geven als de huidige beleidsdoelstellingen in gevaar komen,
- waarnemingen leveren om gefundeerde keuzes te kunnen maken voor nieuwe strategieën om veiligheid en duurzaamheid te borgen,
- waarnemingen leveren die nodig zijn voor het uitvoeren van bestaande en nieuwe strategieën.

Het Monitoringplan begint met een analyse van wat de verwachte veranderingen in het Waddengebied die relevant zijn voor DPW. Een deel daarvan is te begrijpen en volgen met de huidige kennis, maar het is ook nodig om de kennis over de werking van het Waddengebied en effectieve beheermaatregelen verder te ontwikkelen. Daarom wordt in het Monitoringplan een onderscheid gemaakt tussen enerzijds monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's, en anderzijds monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots.

DPW adviseert om de huidige monitoring uit te breiden om in te kunnen spelen op de veranderingen die de komende eeuw verwacht worden. Tabel A geeft een overzicht van de voorgestelde aanvullende monitoring, toegelicht in de volgende paragrafen.

Tabel A. Overzichtstabel extra monitoring

Doel	Doorlopend/ Project	Prioriteit	Mogelijk programma/ Financiering
Voldoende monitoring meteorologie golven	doorlopend	urgent	LMW
Voldoende monitoring stroming	doorlopend	urgent	programma's als Kustgenese 2.0 ¹
Gericht frequent bathymetrie meten in dynamische gebieden	doorlopend	hoog	DPW
LIDAR metingen eilanden	doorlopend	urgent	programma's als Kustgenese 2.0
Bijdrage Jason-CS satelliet zeespiegelstijging	doorlopend	hoog	I&M
Meetprogramma bodemeigenschappen	doorlopend	hoog	programma's als Kustgenese 2.0
Voldoende vegetatiemetingen en kwelderhoogtemetingen	doorlopend	interessant	EZ
Dijkstabiliteit	doorlopend	hoog	Waterschappen
Meteorologie, stromingen en golven zeegeagsysteem Ameland	project	urgent	WTI en vervolg
Continuering Seadarq radarmetingen zeegeagsysteem Ameland	project	urgent	WTI en vervolg
Bodemmetingen kennisontwikkeling en kleine zandsuppletie pilots: zoals de voorgenomen geulwandsuppletie Ameland, geulwandsuppletie Vlieland Oost (Stortemelk) en geulverlegging Vierhuizergat	project	urgent	programma's als Kustgenese 2.0
Metingen tijdens en na stormen	doorlopend (basis) en project (uitgebreid)	hoog	ontwikkeling: programma's als Kustgenese 2.0; uitvoering: beheerorganisaties
Kennisontwikkeling lucht-zee-wad wisselwerking tijdens stormen	project	hoog	I&M / Water en Klimaat

Monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's

Voor de eerste categorie is in dit plan gewerkt vanuit vakinhoudelijke thema's, hier Deltathema's genoemd, die elk een karakteristiek deel van het systeem representeren. Binnen deze thema's zijn beleidsrelevante en verwachte ontwikkelingen, de informatiebehoefte en de behoefte aan waarnemingen uitgewerkt. De thema's zijn:

- Sturende factoren.

Dit zijn randvoorwaarden op het gebied van meteorologie, zeespiegel, oceanografie Noordzee, door natuurlijke en door menselijke activiteiten geïnduceerde bodemdaling en seismiteit, en activiteiten als zandsuppleties, baggeren/storten, grondwaterwinning en spuien. Veranderingen in deze factoren kunnen direct en indirect effect hebben op de waterveiligheid.

¹ Thematische programma's voor onderzoek en monitoring van de waterveiligheid van de zandige kust.

- **Morfologische ontwikkeling en meegroeivermogen**
Dit omvat de fysieke ondergrond. Het sedimentdelend systeem bestaat uit verscheidene morfologische eenheden, zoals eilanden, buitendelta's en kombergingsgebieden. Naar verwachting zullen morfologie en sedimenthuishouding veranderen door versnelde zeespiegelstijging en klimaatverandering, wat samenhangt met het meegroeivermogen van het Waddengebied. Dit werkt weer door in de belastingen en waterkering.
- **Belastingen en waterkering.**
De waterkering is de fysieke barrière tussen de zee en het binnendijkse land, en bestaat voor het grootste deel uit duinen en dijken. Dit is het meest tastbare onderdeel van de waterveiligheid. De monitoringsbehoefte die aan belastingen gerelateerd is betreft monitoring van golven, wind, waterstanden en stromingen in het buitendijkse gebied. Ook de bepaling van het overstromingsrisico is in dit Hoofdstuk opgenomen.

De Deltathema's onderbouwen de monitoringbehoefte op lange termijn. Gecombineerd leiden ze tot een aantal aanbevelingen over zowel de bestaande als over noodzakelijke aanvullende monitoring. Deze zijn:

- Huidige monitoring van meteorologie en golven in overeenstemming met behoeftes brengen en houden. De huidige monitoring dekt het merendeel van de behoefte maar staat onder druk. In het Eems-Dollard gebied, waar de kwaliteit van de waterstandverwachtingen te wensen over laat, is vooralsnog een substantiële monitoringinspanning gewenst. Ook voor de golfbelasting van de kust van het vasteland zijn metingen nodig om de golfmodellen te valideren. Als het WTI programma beëindigd wordt, zijn extra LMW locaties nodig om gaten van meer dan 50 km in het netwerk langs de Noordzeekust en de kust van het vasteland op te vullen.
- Extra structurele stromingsmetingen zijn nodig voor het verbeteren van de waterstands- en golfmodellen, noodzakelijk voor een betere bepaling van de hydraulische randvoorwaarden.
- Bodemligging gericht frequenter opnemen in dynamische gebieden en gebieden die grote invloed op de hydraulische randvoorwaarden hebben. Het gaat hier met name om voorlanden.
- LiDAR metingen voor de jaarlijkse kusthoogtemetingen (Jarkus) op de eilanden uitbreiden om zo inzicht in meegroeivermogen en de sedimentbalans van de eilanden te krijgen.
- Bijdrage aan Jason-CS satelliet voor metingen zeespiegelstijging, zodat trends en patronen in zeespiegelstijging eerder gedetecteerd worden. Dit heeft hoge prioriteit.
- Opstellen meetprogramma bodem/sedimenteigenschappen zoals korrelgrootteverdeling, noodzakelijk voor (operationele) morfologische voorspellingsmethoden, inzicht in de sedimenthuishouding (meegroeivermogen), en als indicator voor het beoordelen van ecosysteemfunctioneren (natuurwaarden).
- Metingen maaiveldhoogtes en vegetatiesamenstelling van de kwelders uitbreiden naar Dollard- en eilandkwelders, en voor vegetatiesamenstelling naar duinen en groene stranden. Deze uitbreiding is zeker van belang wanneer kwelders en voorlanden een grotere rol in de formele waterkering gaan vervullen.
- Bodemdaling door gaswinning wordt gemonitord. Meer recent is het inzicht dat nagegaan moet worden of waterkeringen tegen door gaswinning geïnduceerde aardbevingen bestand zijn, en of het daarom zinvol is schade aan waterkeringen na aardbevingen te monitoren.

Nieuwe monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots

Onderdeel van de Voorkeursstrategie DPW is het uitvoeren van zandsuppletie pilotprojecten, waaronder een grote pilot bij het Amelander zeegat met een doorlooptijd van 15 jaar. Deze pilots zullen kennis leveren over de werking van het zeegatsysteem, de effecten van zandsuppleties op morfologie en ecologie, en over de impact van extreme stormen. Het Amelanderzeegat is als voorkeursgebied gekozen mede vanwege de grote hoeveelheid historische monitoringsgegevens en lopende monitoring. Hierdoor zijn er alleen nog extra metingen nodig voor meteo, golven, stromingen, waterstanden, en vooral de bodemmorfologie. Tevens dient de morfologische situatie vooraf (T=0) goed in kaart gebracht te worden over een groter gebied dan van de pilots alleen.

Voor de ontwikkeling van een nauwkeurig voorspellingsmodel en om de in- en uitgaande sedimentstromen van het Waddengebied beter in beeld te krijgen, is een hogere frequentie van monitoring noodzakelijk. De aanbeveling is om eerst de focus te leggen op het Amelander zeegatsysteem en dit gefaseerd op langere termijn uit te breiden naar de andere zeegatsystemen.

De wisselwerking tussen lucht, zee en bodem tijdens stormen, en de impact daarvan op de morfologie is nog onvoldoende bekend. Daarom is er behoefte aan meetcampagnes die speciaal hierop zijn gericht.

Om in kennisleemtes op het gebied van meteorologie en hydraulische belastingen te voorzien, met name bij extreme omstandigheden, wordt aanbevolen de metingen van het WTI 2017 programma te continueren en ook gebruik te maken van radarmetingen van het golfveld. Dit betreft meteo, golf-, waterstands- en stromingsmetingen. In het Amelander zeegat kunnen metingen voor WTI, DPW modelontwikkeling en DPW pilots goed gecombineerd worden.

Nieuwe monitoringtechnieken

Deltaprogramma Waddengebied onderkent het belang van investeren in innovatieve monitoringtechnieken om voorbereid te zijn op toekomstige gebruikersvragen naar betere en/of efficiëntere monitoring.

Quick Reaction Force

Van extreme gebeurtenissen, zoals stormen, kan veel geleerd worden voor de lange-termijn veiligheid. In dit monitoringplan wordt geadviseerd een *Quick Reaction Force* op te zetten om in de extra monitoringbehoefte te voorzien die extreme gebeurtenissen zoals grote stormen met zich meebrengen. De QRF moet zorgen voor effectief inwinnen, delen en rapporteren van gegevens en informatie voor relevante stakeholders. Daarnaast moet de QRF het initiatief nemen tot instellen van Task Forces voor het snel uitvoeren van aanvullende studies of monitoring.

Inbedding en organisatie

De bestuurlijke implementatie van de Voorkeursstrategie loopt via het Regionaal Overleg Kust (ROK) en het Bestuurlijk Overleg Deltaprogramma Waddengebied (BODPW). De implementatie van het Monitoringsplan DPW zal worden opgepakt door de beleids- en beheerorganisaties die over het Waddengebied gaan. Rijkswaterstaat is als uitvoeringsorganisatie voor water- en kustbeheer in het Waddengebied een belangrijke centrale partner. Samenwerking zal worden gezocht met WaLTER, het door het Waddenfonds gefinancierd programma (2011 – 2015) rond de monitoring van het Waddengebied, voor de ontsluiting van de data en voor uitbreiding van de monitoring naar de ecologie en socio-economie.

Het is voorzien dat monitoring ten behoeve van de kennisopbouw van de Voorkeursstrategie DPW ondergebracht zal worden in het programma Kustgenese 2.0 (hierin is de uitvoering van de Beslissing Zand van het Deltaprogramma belegd), of een vergelijkbaar programma. Ook het opzetten van de QRF zou een plaats kunnen krijgen in een programma als Kustgenese 2.0. De extra voorgestelde reguliere monitoring hoort thuis in de reguliere programma's van de partners, zoals het LMW programma van RWS. De monitoring voor overige systeemkennis, bijvoorbeeld op het gebied van hydraulische randvoorwaarden, kan mogelijk bij programma's zoals WTI 2017 of bij onderdelen van het programma Water en Klimaat worden ondergebracht.

Adaptief Monitoringplan

Dit plan is opgesteld als een adaptief monitoringprogramma. De intentie is dat de implementatie door de betrokken monitoringpartners zal worden ingevuld. Ook zijn zij degenen die zorg moeten dragen voor adequate kwaliteitsmanagementsystemen en gebruikersdiensten, en regelmatige bijstellingen van het monitoringprogramma. Omdat de kennis voor de uitvoering van het Deltaprogramma nog volop in ontwikkeling is, verdient het aanbeveling eens in de 5 of 6 jaar het Monitoringplan bij te stellen op de nieuwe inzichten en ontwikkelingen. Overwogen kan worden om dit in fase te doen met de WTI programmeringscyclus.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en context

Het Deltaprogramma Waddengebied (DPW) is onderdeel van het Deltaprogramma, dat is opgezet op advies van de Tweede Deltacommissie (*zie kader*). Nederland heeft te maken met zeespiegelstijging, klimaatverandering en aanzienlijke sociaaleconomische veranderingen. Het Deltaprogramma heeft tot doel het garanderen van een duurzame veiligheid tegen overstromingen en de beschikbaarheid van zoet water voor de komende eeuw. De ambitie van Deltaprogramma Waddengebied is om de risico's en onzekerheden die de stijgende zeespiegelstijging met zich mee brengt tijdig in beeld te hebben om hierop adequaat te anticiperen, en daarbij kansen te creëren voor robuuste en veerkrachtige natuur en duurzaam menselijk gebruik. Monitoring van ontwikkelingen en risico's zijn essentieel om de doelstellingen van het Deltaprogramma te bereiken. Dit Monitoringplan beschrijft het monitoringspoot van de DPW voorkeursstrategie die in 2014 is vastgesteld.

Het Deltaprogramma

Het Deltaprogramma heeft een bewogen voorgeschiedenis. De Watersnoodramp in 1953 leidde tot de vaste maatschappelijke en politieke wil: 'Dit nooit meer'. Het daaruit volgende Deltaplan bracht veiligheid in de Zuidwestelijke Delta. In de loop van de tijd groeide het inzicht dat het grootste deel van Nederland is te beschouwen als delta van Eems, Rijn, Maas en Schelde. Na de extreem hoge rivierwaterstanden in 1993 en 1995 kreeg het pakket van te nemen maatregelen dan ook de naam 'Deltaplan grote rivieren'.

Kort daarna leidde nieuwe kennis over de gevolgen van de klimaatverandering tot het instellen van de Deltacommissie (ook bekend als de Commissie Veerman). Deze commissie adviseerde in 2008 de oprichting van een Nationaal Deltaprogramma. Een landelijk programma gericht op waterveiligheid op de lange termijn en op voldoende beschikbaarheid van zoetwater. Het Deltaprogramma Waddengebied is één van de gebiedsgerichte programma's van het Nationaal Deltaprogramma.

De Waddeneilanden en de Waddenzee zijn een natuurlijke buffer tussen de Noordzee en de vastelandskust van Groningen, Friesland en Noord-Holland, en zijn daarmee een belangrijke schakel in de veiligheid voor Noord-Nederland. Daarnaast is het Waddengebied een uniek natuurgebied dat zowel Natura 2000-gebied is als Werelderfgoed (Unesco World Heritage).

De doelen van het Deltaprogramma Waddengebied zijn:

- Het ontwikkelen van een integrale aanpak die de veiligheid van de kust van de Waddeneilanden en het vasteland moet waarborgen. Het is daarbij de insteek om waterveiligheid te integreren met de functies natuur, recreatie en met duurzame economische activiteiten.
- Het monitoren van ontwikkelingen in het Waddengebied en de effecten op het ecosysteem als gevolg van klimaatverandering.

In 2014 heeft DPW zijn zogenaamde Voorkeursstrategie vastgesteld. De Voorkeursstrategie heeft het volgende doel: "Beschermen van inwoners en economische activiteiten in het Waddengebied tegen overlast door water." In de Voorkeursstrategie worden strategieën voorgesteld om dit doel te bereiken.

Het Waddengebied is een dynamisch sedimentdelend systeem, waar de morfologie en waterbeweging voortdurend invloed op elkaar uitoefenen. De komende eeuw krijgt het Waddengebied te maken met veranderingen in meteorologie, waterstand en bodem. Veranderingen in het stormklimaat zijn niet uit te sluiten. Naarmate de zeespiegel verder stijgt, vraagt het intergetijdengebied van de Waddenzee meer zand en onttrekt dat aan de Noordzee, naar verwachting met name aan de buitendelta's en de eilandkusten. Het is dan de vraag of het meegroeivermogen van het gebied voldoende is om de zeespiegelstijging bij te benen. Schattingen van het meegroeivermogen en zeespiegelstijging vertonen grote onzekerheid, maar de mogelijkheid dat versnelde zeespiegelstijging tot problemen leidt is reëel.

Lokaal is door bodemdaling de relatieve zeespiegelstijging nog sterker. De Voorkeursstrategie van DPW geeft aan dat de volgende problemen dan kunnen optreden:

- De geulen worden actiever en vragen mogelijk meer onderhoud.
- De erosie van de eilandkusten neemt toe, wat we moeten compenseren met zandsuppleties.
- De buitendelta's krimpen en daarmee ook de bufferende en dempende werking bij noordwesterstormen.
- De dijken van het vasteland krijgen het zwaarder te verduren.

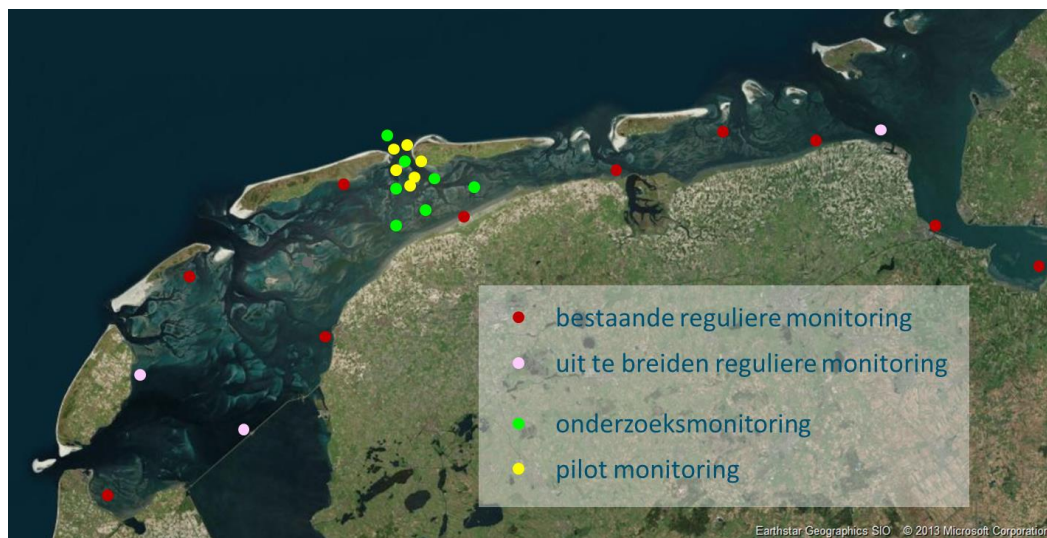
Het meegroeivermogen van eilanden en vasteland is al kleiner dan de zeespiegelstijging, o.a. vanwege de indijkingen uit het verleden.

Voor het zandige systeem is de Voorkeursstrategie DPW gericht op behoud van de bufferende werking van eilanden, buitendelta's en het intergetijdengebied, en om zo de basiskustlijn te handhaven en het kustfundament duurzaam in evenwicht te houden. Ander elementen van de Voorkeursstrategie omvatten de implementatie van het nieuwe waterveiligheidsbeleid, gebruik van de innovatieve aanpak harde keringen, en toepassen van het 'zacht waar het kan hard waar het moet' principe voor de eilanden. Om dit op een goede en efficiënte wijze te verwezenlijken investeert de Voorkeursstrategie in 3 kennissoorten:

- monitoring;
- systeemonderzoek;
- pilotprojecten.

De pilotprojecten testen nieuwe vormen van zandsuppleties. De ambitie is om relevante morfologische ontwikkelingen decennia van te voren te kunnen verwachten, evenals de effecten van grote zandsuppleties. Dit Monitoringplan werkt het monitoringspoor van DPW uit. Het betreft de monitoring van zowel nieuwe ontwikkelingen en risico's die relevant zijn voor de Voorkeursstrategie als ter ondersteuning van systeemonderzoek en pilotprojecten van de kenniscomponent van DPW.

In *Figuur 1.1* is op basis van een hypothetische parameter het onderscheid zichtbaar gemaakt tussen monitoring voor verschillende kennissoorten en tussen bestaande en extra monitoring.



Figuur 1.1 Schematisch overzicht bestaande en aanvullende monitoring. De rode punten staan voor een fictieve verdeling van de bestaande reguliere monitoring. Met een paar kleine aanvullingen kan het hele netwerk verbeteren (lichtroze punten). Voor modelontwikkeling, systeemkennis en pilots wordt de monitoringdichtheid rond een zeegatsysteem geïntensiveerd (groene en gele punten).

Monitoring in het Waddengebied is niet nieuw. Het Waddengebied omvat de Waddenzee, de Waddeneilanden, de Eems-Dollard en de kustzones van Fryslân, Groningen en Noord-Holland grenzend aan de Waddenzee en de Eems-Dollard, en er zijn dan ook vele instanties betrokken bij beleid, beheer en monitoring van dit gebied.

Deze monitoringactiviteiten volgen deels uit de wet- en regelgeving die voor het gebied geldt. Het integrale Rijksbeleid voor de Waddenzee is verankerd in de Planologische Kernbeslissing Derde Nota Waddenzee (MinVrom, 2007). De structuurvisie Infrastructuur en Milieu (MinI&M, 2012) verwijst naar de PKB. Nederland heeft het Waddengebied aangewezen als beschermd Natura2000 gebied. De EU Kaderrichtlijn Water (KRW) voor waterkwaliteit en ecologie is ook van toepassing op het Waddengebied evenals de Kaderrichtlijn Mariene Strategie. De beleidsnota Waterveiligheid (Postma, 2009) geeft het beleidskader voor het nieuwe waterveiligheidsbeleid in Nederland. Het water- en kustbeheer wordt uitgevoerd Rijkswaterstaat en de Waterschappen. Het natuurbeheer en het beheer van de openbare ruimtes valt weer onder andere instanties. De voornaamste beheerders werken samen in de Beheerraad Waddenzee en in het Regionaal Overleg Kust (ROK). Belangrijke bestaande monitoring programma's van Rijkswaterstaat zijn LMW voor quasi real-time metingen (onder meer waterstanden) en programma's voor metingen op het gebied van bodemdiepte en waterkwaliteit die achteraf beschikbaar komen.

De bestaande monitoring is afgestemd op de huidige verplichtingen en vragen. Het DPW brengt de nieuwe behoeftes in kaart om in de toekomst de duurzame veiligheid van het Waddengebied te blijven borgen. Het voorliggende monitoringplan geeft deze nieuwe behoeftes een plaats in de bestaande monitoring.

1.2 Doel en afbakening

Het doel van het voorliggende rapport is het beschrijven van een plan voor een monitoringplan dat in de monitoringbehoefte van DPW voorziet.

Het plan geeft:

- informatiebehoefte;
- programma van eisen op hoofdlijnen aan de waarnemingen om in de informatiebehoefte te voorzien;
- omschrijving huidige monitoringinspanning;
- aanbevelingen en prioritering voor extra monitoring t.o.v. de huidige monitoring;
- aanbevelingen voor onderbrengen van de extra monitoring in bestaande en nieuwe monitoringprogramma's.

De reikwijdte van het plan sluit aan bij de Voorkeursstrategie DPW en omvat:

- monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's die relevant zijn voor de Voorkeursstrategie DPW;
- monitoring ter ondersteuning van systeemonderzoek en pilotprojecten van de kenniscomponent van DPW.

De focus van het plan is op de lange termijn waterveiligheidsdoelen van DPW. Dit betekent dat de afbakening van het plan als volgt is:

- Alleen monitoring van fysische parameters wordt beschreven. Als fysische parameters mede van belang zijn voor andere doelen, zoals ecologie, dan wordt dit wel vermeld.
- Monitoring van de socio-economische factoren wordt slechts aangestipt waar die voor waterveiligheid van belang zijn.

Specifieke monitoring van ecologische en socio-economische parameters wordt niet beschreven. Parallel aan het schrijven van dit Monitoringplan heeft WaLTER (Wadden Sea Long-Term Ecosystem Research), het door het Waddenfonds gefinancierd programma (2011 – 2015) rond de monitoring van het Waddengebied, gewerkt aan het ontwikkelen van plannen voor ecologische monitoring. Dit werk is, gezien het tijdsfad van WaLTER, niet geïntegreerd in het huidige Monitoringplan. Het streven is wel om DPW en WaLTER plannen samen beschikbaar te maken op het WaLTER portal.

Ook de Zoetwatervoorziening valt buiten het bestek van de Voorkeursstrategie DPW en wordt daarom niet meegenomen in het voorliggende monitoringplan.

1.3 Aanpak en opzet

Dit plan is geschreven door een team van onderzoekers van IMARES en Deltares, later aangevuld vanuit Rijkswaterstaat. Uitgangspunt is om vanuit de beleidsvragen en de systeemeigenschappen eerst de informatiebehoefte helder te krijgen. Daarna is nagegaan met wat voor databehoefte in de informatiebehoefte kan worden voorzien, en is een programma van eisen op hoofdlijnen geformuleerd. Vergelijking van het programma van eisen met de reeds bestaande monitoring leidt tot het identificeren van lacunes in de monitoring. Deze behoeftes aan nieuwe monitoring zijn vervolgens geprioriteerd, en naar aanleiding hiervan zijn aanbevelingen geformuleerd voor nieuw uit te voeren monitoring ten opzichte van de huidige inspanning. Ook is aandacht besteed aan hoe deze extra monitoring kan worden ingebed in bestaande en toekomstige programma's van organisaties die bij monitoring van het Waddengebied zijn betrokken, en worden veelbelovende innovatieve technieken voor monitoring kort besproken.

Zoals eerder vermeld heeft de Voorkeursstrategie DPW drie kennissporen: monitoring, systeemonderzoek en pilotprojecten. Op praktische grond is bij het monitoringplan onderscheid gemaakt tussen monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's, en monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots.

1.3.1 Monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's

Voor de eerste categorie is in dit plan gewerkt vanuit vakinhoudelijke thema's, hier Deltathema's genoemd. Binnen deze thema's zijn beleidsrelevante en verwachte ontwikkelingen, de informatiebehoefte en de behoefte aan waarnemingen uitgewerkt.

Per Deltathema's is een vaste opbouw gekozen die afgeleid is van de opzet van andere monitoringplannen (zoals de Scheldemonitor²):

- waarom moet deze variabele voor dit thema worden gemeten;
- wat was het gedrag van deze variabele in het verleden
- en wat voor knelpunten verwachten we in de toekomst;
- waar, wanneer en hoe moet er worden gemeten.

Deltathema's (*Figuur 1.2*):

1. Sturende factoren.

Dit zijn grootschalige factoren van 'buitenaf', die niet direct te beïnvloeden zijn met ingrepen in het sedimentdelend systeem van het Waddengebied. Hieronder vallen (storm)klimaat, zeespiegelstijging, waterstanden, bodemdaling en menselijke activiteiten als gaswinning.

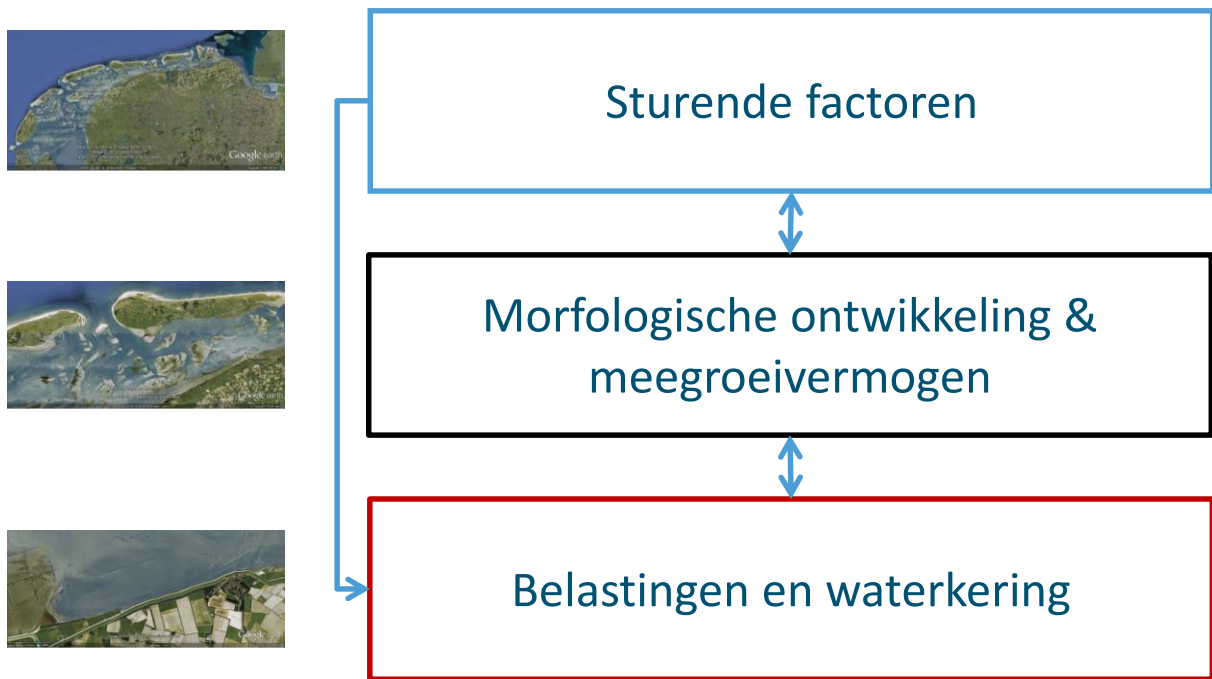
2. Morfologisch of sedimentdelend systeem van het Waddengebied.

Dit omvat de fysieke ondergrond en is de drager van de waterkering. Het sedimentdelend systeem bestaat uit verscheidene morfologische eenheden, zoals eilanden (met stranden, zandplaten, duinbogen en kwelders), buitendelta's en kombergingsgebieden (met platen en geulen en kwelders). Dit zijn dynamische eenheden die worden gevormd, en met elkaar verbonden zijn, door sedimenttransporten.

3. Belastingen en waterkering (incl. duinen) en voorland.

De waterkering is de fysieke barrière tussen de zee en het binnendijkse land, en bestaat voor het grootste deel uit duinen en dijken. De kering kan dus onderdeel zijn van het sedimentdelend systeem (duinen) of niet (dijken). De monitoring van de waterkering wordt gebruikt voor het beoordelen van de staat van de waterkering en voorland, en voor de kalibratie en validatie van modellen die gebruikt worden bij het toetsen van primaire keringen. In dit plan wordt onder het thema waterkeringen ook de monitoringsbehoefte beschreven die aan belastingen gerelateerd is. Dit betreft monitoring van golven, wind, waterstanden en stromingen in het buitendijkse gebied. Ook de bepaling van het overstromingsrisico is in dit Hoofdstuk opgenomen.

² <http://www.scheldemonitor.org/>



Figuur 1.2. Samenhang Deltathema's.

1.3.2 Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots

Voor de monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots wordt in dit plan aangegeven wat er nodig is om een start te kunnen maken met de pilots. De ambitie is om op termijn relevante morfologische ontwikkelingen decennia van te voren te kunnen verwachten, evenals het kunnen voorspellen van de effecten van grote zandsuppleties. Bij dit onderzoek wordt samenwerking gezocht met de Duitse en Deense partners van het trilaterale samenwerkingsverband voor de Waddenzee.

1.3.3 Quick Reaction Force

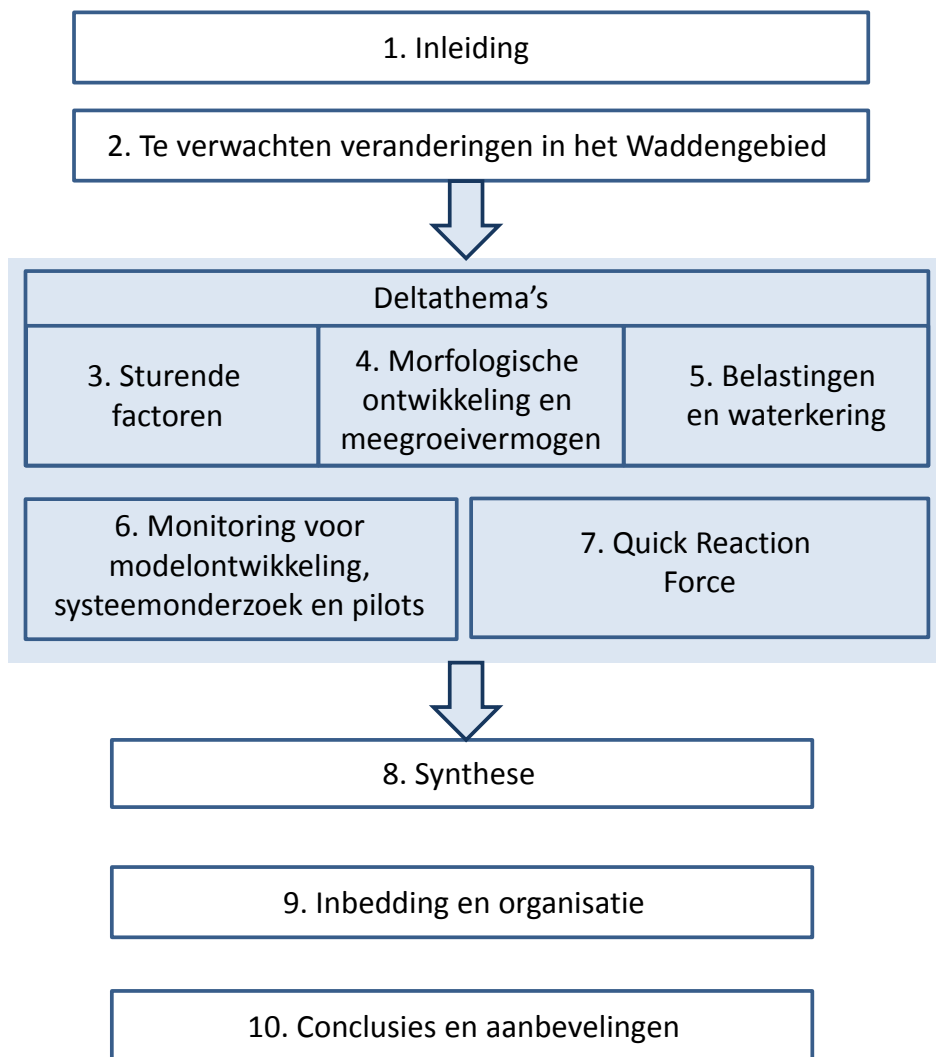
Zoals eerder genoemd heeft het Deltaprogramma onder andere tot doel het garanderen van een duurzame veiligheid tegen overstromingen. Bij waterveiligheid gaat het vooral om de effecten van zware stormen, en zware stormen kunnen ook voor spronggewijze veranderingen in het morfologische systeem zorgen. Daarom wordt er apart aandacht besteed aan het goed monitoren van bijzondere gebeurtenissen zoals extreme stormen. Er wordt verkend hoe een *Quick Reaction Force* (QRF) waardevol kan zijn om in de extra monitoring behoefte te voorzien die extreme gebeurtenissen zoals grote stormen met zich meebrengen, en hoe dat op een efficiënte manier te doen.

Dit plan is opgesteld als een adaptief monitoringprogramma. De intentie is dat de implementatie door de betrokken monitoringpartners zal worden ingevuld. Ook zijn zij degenen die zorg moeten dragen voor adequate kwaliteitsmanagementsystemen en gebruikersdiensten, en regelmatige bijstellingen van het monitoringprogramma. Omdat de kennis voor de uitvoering van het Deltaprogramma nog volop in ontwikkeling is, verdient het aanbeveling eens in de 5 of 6 jaar het Monitoringplan bij te stellen naar aanleiding van voortschrijdende nieuwe inzichten en ontwikkelingen. Overwogen kan worden om dit in fase te doen met de Wettelijk Toetsingsinstrumentarium (WTI) programmeringscyclus.

1.4 Leeswijzer

De opbouw van dit rapport staat schematisch weergegeven in *Figuur 1.3*. In Hoofdstuk 2 worden de toekomstige veranderingen die van invloed (kunnen) zijn op het Monitoringplan voor het Waddengebied beschreven. Dit vormt de context waarin de Deltathema's (Hoofdstuk 3 t/m 5) zijn uitgewerkt, die de monitoring beschrijven voor het beleid en beheer nodig is.

Het DPW onderzoeksprogramma en de daaraan gerelateerde pilots voor kustbescherming staan kort beschreven in Hoofdstuk 6, met daarbij de benodigde monitoring. De event-gebaseerde monitoring (Quick Reaction Force) staat beschreven in Hoofdstuk 7. Een synthese van de afzonderlijk beschreven monitoringbehoefte (hoofdstuk 3 t/m 7) staat in Hoofdstuk 8, inclusief een samenvattende tabel voor de extra monitoringsbehoefte. In Hoofdstuk 9 worden organisatie en inbedding van de monitoring besproken. Tenslotte geeft Hoofdstuk 10 conclusies en aanbevelingen.



Figuur 1.3 Opbouw van het rapport.

2 Te verwachten veranderingen in het Waddengebied

2.1 Inleiding

Het Waddengebied is een dynamisch gebied, waar morfologie en de waterbeweging voortdurend invloed op elkaar uit oefenen. Dit leidt bijvoorbeeld tot de verplaatsing, erosie, ophoging en/of aanlanding van geulen, zandbanken en platen. De algemene verwachting is dat klimaatverandering deze eeuw een sterke invloed gaat uitoefenen op de ontwikkeling van het Waddengebied. In het Waddengebied treden niet alleen natuurlijke, maar ook door mensen veroorzaakte ontwikkelingen op. Omdat de respons van het systeem op natuurlijke veranderingen vaak gelijksoortig is aan de respons op menselijke invloeden, is het vaak moeilijk de verschillende oorzaken van een bepaalde ontwikkeling te onderscheiden. Bovendien kunnen verschillende oorzaken elkaar versterken.

In verband met de veranderingen die op het Waddengebied af kunnen komen is het noodzakelijk om het beleid en beheer tijdig te kunnen afstemmen aan een nieuwe situatie. Wanneer we hier niet op zouden anticiperen, zou het beheer te laat kunnen zijn met reageren op de ontwikkelingen, en zou de veiligheid van het Waddengebied in het geding kunnen komen.

In dit Hoofdstuk behandelen we de veranderingen die naar verwachting de komende decennia op het Waddengebied af zullen komen. Dit betreffen in eerste instantie de veranderingen in de sturende factoren (grootschalige invloeden van buitenaf, die niet direct te beïnvloeden zijn), zoals:

- meteorologie (wind, temperatuur, verdamping en neerslag), in paragraaf 2.2;
- waterstand op de Noordzee (gemiddelde zeespiegel, getijdeslag, golfklimaat, windopzet, etc.), in paragraaf 2.3;
- bodemdaling als gevolg van natuurlijke processen, in paragraaf 2.4.

De directe menselijke invloeden in het Waddengebied, zoals (onder andere) de grootschalige aanleg van dijken en de afsluiting van kombergingsgebieden, worden beschreven in paragraaf 2.5. De betreffende paragrafen geven aan welke variaties er in de afgelopen decennia zijn waargenomen, en welke veranderingen er voor de komende decennia worden verwacht. Al deze invloeden zullen in meer of mindere mate een morfodynamische respons opwekken, ofwel doordat zij direct ingrijpen op de morfologie, ofwel doordat zij invloed hebben op de waterbeweging. De verwachtingen voor deze respons worden behandeld in paragraaf 2.6.

Wat deze veranderingen allemaal betekenen voor de monitoring van het Waddengebied, wordt behandeld in de volgende Hoofdstukken (de Deltathema's).

2.2 Meteorologie

Het klimaat vertoont natuurlijke variaties op allerlei tijdschalen: winterhalfjaar-zomerhalfjaar; de onregelmatige invloeden van Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) op tijdschalen van maanden tot meerdere decennia, de 18,6 jarige nodale cyclus en de helft ervan (9,3 jaar) en op nog langere tijdschaal verschijnselen als de Kleine IJstijd en de afwisseling van de glacialen met de interglacialen.

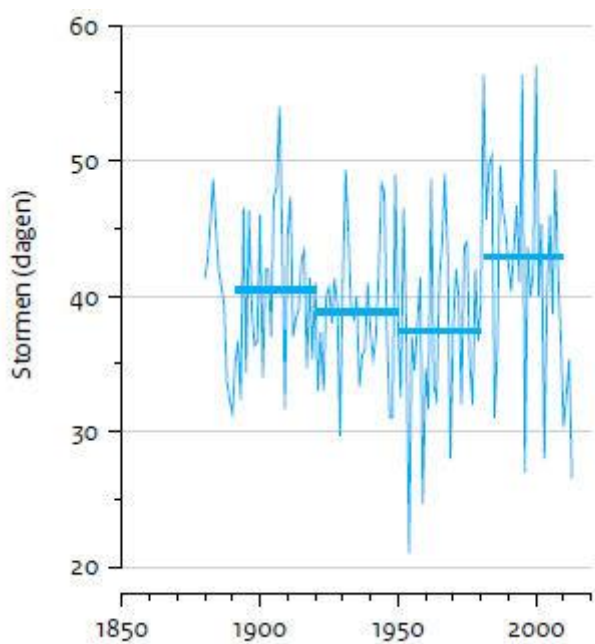
Hieronder volgt een overzicht van de waargenomen veranderingen over de periode 1901-2013. Dit betreft een samenvatting van <http://www.knmi.nl/klimaat/klimaatverandering/deel11.html>.

Sinds een aantal jaren publiceert het KNMI klimaatscenario's (<http://www.klimaatscenarios.nl/>). Dit zijn de officiële bewerkingen van de internationaal gepubliceerde klimaatscenario's, toegespitst op de Nederlandse situatie.

De KNMI'14-klimaatscenario's (KNMI, 2014) voor klimaatverandering in Nederland zijn gebaseerd op de resultaten van het International Panel for Climate Change (IPCC, 2013) en aanvullende analyses en berekeningen van het KNMI. Deze scenario's geven aan wat de verwachte ontwikkelingen zijn voor het Nederlandse klimaat voor de komende eeuw.

2.2.1 Wind

Langlopende waarnemingsreeksen van de wind zijn schaars. Directe metingen zijn gevoelig voor veranderingen in meetinstrumenten en niet beschikbaar boven open zee³. Daarom wordt veel gebruik gemaakt van andere, indirecte waarnemingen, zoals luchtdrukmetingen. Op basis van dit soort waarnemingen is geconstateerd dat er zowel aan het begin als aan het einde van de twintigste eeuw meer stormen boven het Noordzeegebied waren dan halverwege de eeuw. Ook in recente jaren is het aantal stormen weer lager (Figuur 2.1). De gemeten windsnelheden langs de kust zijn sinds de jaren zestig niet gedaald.



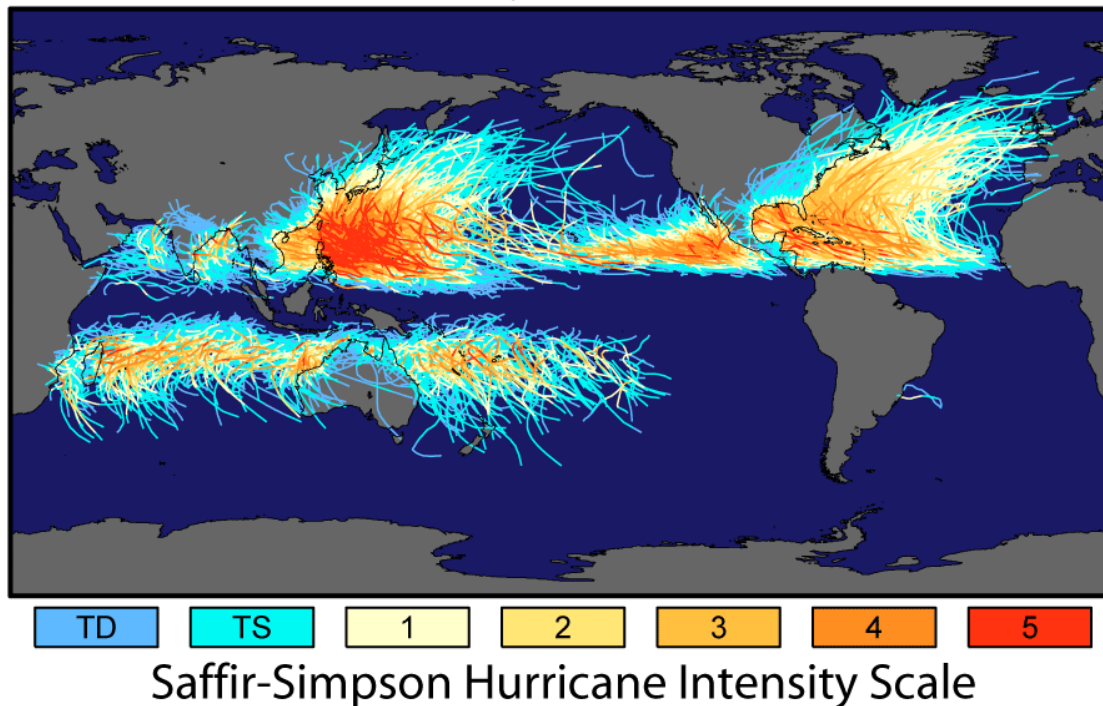
Figuur 2.1 Indicator voor stormcondities boven de Noordzee. Horizontale lijnen: gemiddelden over 30 jaar (www.knmi.nl).

Wat betreft de windrichting, blijkt uit onderzoek van Oldenborgh & van Ulden (2013, in: Stepek *et al.*, 2013) dat in de afgelopen decennia de wind vaker uit het zuidwesten is gaan waaien en minder vaak uit het noordoosten. Deze verandering kan een natuurlijke langetermijnschommeling zijn. Maar sinds het begin van de metingen 110 jaar geleden, is de verandering nog nooit zo sterk geweest als in de afgelopen decennia. Deze verandering is in lijn met de klimaatverandering door toename van broeikasgassen die door veel klimaatmodellen wordt berekend (van den Hurk *et al.*, 2006). Omdat de wind uit zuidwestelijke richting gemiddeld sterker is dan de wind uit noordoostelijke richting zou deze verandering van windrichting geassocieerd kunnen zijn meteen toename van de gemiddelde windsnelheid. Maar, zoals in de vorige alinea aangegeven, is een dergelijke toename in windsnelheid nog niet waargenomen.

³Schepen meten wel, maar op niet vaste locaties. Meetreeksen van platforms en boeien over zee gaan veel minder ver terug dan over zee.

De verwachte veranderingen in het windklimaat zijn daarom klein, ook voor de extremen. Aan de andere kant is er een KNMI studie (Haarsma *et al.*, 2013) die erop wijst dat de kans bestaat dat grote orkanen vanaf de Atlantische Oceaan vaker het Noordzeegebied kunnen bereiken (Figuur 2.2). Daarbij kunnen extreem hoge windsnelheden optreden. Als dit het geval is, kan dit consequenties hebben voor de maatgevende condities voor de waterkeringen, en de mate van erosie aan de Nederlandse kust.

Tracks and Intensity of All Tropical Storms

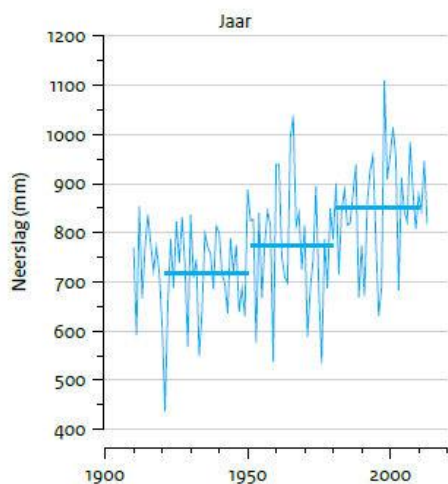


Figuur 2.2 Banen van cyclonen in Atlantisch-Pacifische gebied: kleuren geven intensiteit van de cycloon aan hoe roder hoe intenser (Bron: http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Tropical_Storm_Map.png).

2.2.2 Temperatuur, verdamping en neerslag

De temperatuur is tussen 1901 en 2013 toegenomen met 1,8 °C. Door de toename van de temperatuur is ook de hoeveelheid waterdamp in de lucht toegenomen sinds 1950. Tussen 1958 en 2013 nam in De Bilt de potentiële verdamping in de zomer toe met 12 procent⁴. De toename in de hoeveelheid waterdamp in de lucht verklaart deels de waargenomen toename in de jaarlijkse hoeveelheid neerslag. Deze is tussen 1910 en 2013 in Nederland toegenomen met 26 procent. Tussen 1951 en 2013 bedroeg de toename 14 procent (Figuur 2.3). Het effect op zware buien is nog groter. Uit waarnemingen blijkt dat bij de meest extreme buien de hoeveelheid neerslag per uur toeneemt met ongeveer 12 procent per graad opwarming.

⁴ De potentiële verdamping is de verdamping die optreedt, bij onbeperkt aanbod van water vanuit de bodem. Dit kan verschillen van de werkelijke verdamping, omdat deze laatste wordt beperkt door de beschikbaarheid van water in de bodem.



Figuur 2.3 Waargenomen jaarlijkse neerslag in Nederland. Horizontale lijnen: gemiddelden over 30 jaar (www.knmi.nl).

Volgens de klimaatscenario's van het KNMI is de verwachting dat de temperatuur blijft stijgen, en dat zachte winters en hete zomers vaker voor zullen komen. Wat betreft de neerslag is de verwachting dat de gemiddelde neerslag en de extreme neerslag in de winter zullen toenemen. Ook de intensiteit van extreme regenbuien in de zomer zal toenemen, hagel en onweer worden heviger. Anderzijds komt, door de toegenomen verdamping, sinds 1951 ook droogte iets vaker voor in Nederland.

De ontwikkelingen in de verdamping en de neerslag zijn van belang voor het plantendek, die verantwoordelijk is voor de vastlegging van duinzanden. Verder kan een grotere hoeveelheid neerslag zorgen voor een sterkere afvoer van zoetwater naar de Waddenzee, en daarmee ook de estuariene circulatie versterken. Dit laatste heeft een groter netto import van sediment tot gevolg.

2.3 Waterstandsvariatie op de Noordzee

De waterstandsvariatie op de Noordzee is de som van verschillende afzonderlijke bijdragen. Hierbij onderscheiden we het gemiddeld zeeniveau (of zeespiegel), en de eventuele (lokale of globale) waterstandsverhogingen door het getij, het golfklimaat en de windopzet⁵.

2.3.1 Zeespiegel

Uit waarnemingen blijkt dat de gemiddelde zeespiegel aan de Nederlandse kust sinds 1900 stijgt met een gemiddeld tempo van 1,8 millimeter per jaar. Voor de Noordzee is de laatste jaren geen duidelijke versnelling zichtbaar in deze stijging, zoals die wel zichtbaar is in het wereldgemiddelde. Dit komt vooral doordat voor de Noordzee, de natuurlijke variaties in de snelheid van zeespiegelstijging (die samenhangen met variaties in de wind), veel groter zijn dan die voor de wereldgemiddelde zeespiegel. Hierdoor is het moeilijker om een duidelijke verandering (versnelling) in de trend te onderscheiden.

De verwachting is dat de zeespiegelstijging zal versnellen in de loop van de 21e eeuw, maar er heerst nog grote onzekerheid omtrent deze prognoses. Volgens de prognose zal de zeespiegel rond 2050 met 15 tot 40 cm zijn gestegen ten opzichte van de referentieperiode 1995. Rond 2085 zal de stijging 25 - 80 cm bedragen en rond 2100 tussen 35 en 100 cm (95% band rond gemiddelde). De zeespiegelstijgingsnelheid zal naar verwachting liggen tussen 1 - 7,5 mm/jaar in 2050 en 1 - 10,5 mm/jaar in 2085 (Katsman *et al.*, 2011; Dillingh *et al.*, 2010; KNMI, 2014).

⁵ Met windopzet wordt hier de opstuwing bedoeld door wrijving van de wind over het wateroppervlak en door luchtdrukverschillen.

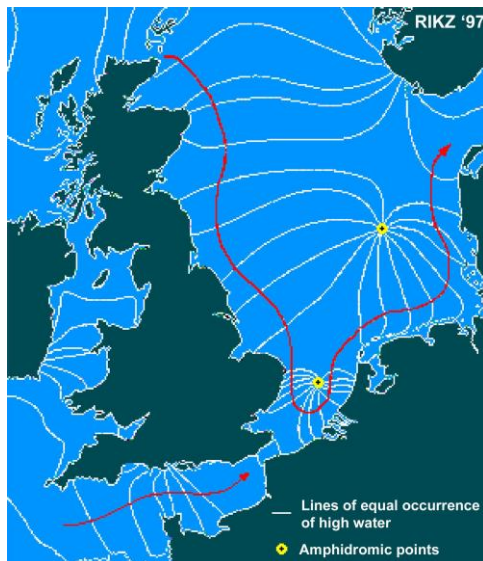
Het gemiddelde hoogwater (GHW), gemiddelde laagwater (GLW) en het gemiddelde zeeniveau (GZN) stijgen niet evenveel. *Tabel 2.1* geeft een overzicht van de boven- en ondergrens van de zeespiegelstijgingsscenario's, zoals ook afgesproken in het trilaterale overleg tussen Nederland, Denemarken en Schleswig-Holstein. De onzekerheid in hoeveel de stijging in GLW en GHW afwijkt van GZN is substantieel. De KNMI-2014 scenario's voor het gemiddelde zeeniveau liggen iets hoger.

Tabel 2.1 Overzicht van de gehanteerde zeespiegelstijgingsscenario's voor het gemiddelde zeeniveau (GZN), gemiddeld laagwater (GLW) en gemiddeld hoogwater (GHW)

	1990 – 2050			1990 – 2100		
	GZN	GLW	GHW	GZN	GLW	GHW
Ondergrens [m]	+0.15	+0.125	+0.175	+0.35	+0.30	+0.40
Bovengrens [m]	+0.35	+0.325	+0.375	+0.85	+0.80	+0.90

2.3.2 Getijdeslag

De getijslag langs de Nederlandse kust is niet overal hetzelfde. Door de aanwezigheid van continenten en eilanden wordt de getijgolf, komende vanaf de oceaan, vervormd. Als een gevolg hiervan draait de getijgolf op de Noordzee om twee punten heen, de zogeheten amfidromische punten. Op deze punten is de getijdeslag vrijwel nul, en deze neemt toe met de afstand vanaf het punt. Eén van deze punten ligt voor de westkust van Nederland en één ligt voor de westkust van Denemarken, zie *Figuur 2.4*. Langs de Nederlandse Waddeneilanden neemt hierdoor de gemiddelde getijslag toe van ongeveer 1,4 m bij Den Helder tot ongeveer 3 m bij Delfzijl.



Figuur 2.4 Ligging van de amfidromische punten in de Noordzee. De rode lijn geeft de richting van de voortplanting van de getijgolf langs de Nederlandse kust weer (bron: www.getij.nl).

Volgens schattingen is tijdens het Holoceen de getijdeslag langs de kust van de zuidelijke Noordzee van 0 – 2 m toegenomen naar de huidige, meer uiteenlopende, getijdeslag (Jelgersma, 1979; Franken, 1987; Van der Molen & De Swart, 2001). Deze differentiatie heeft waarschijnlijk te maken met het ontstaan en verschuiven van de amfidromische systemen in de Noordzee (vgl. van der Molen & de Swart, 2001; Pickering *et al.*, 2012; Church *et al.*, 2013; Mudersbach *et al.*, 2013; Bol, 2014).

In de periode 1955-1980 is de getijdeslag met ca. 15 cm toegenomen langs de Nederlandse en de Duitse Noordzeekust.

In de periode daarvóór en daarna in de 20^e eeuw was daarentegen geen sprake van een sterke toename, ondanks dat er ook in deze perioden sprake was van zeespiegelstijging (Hollebrandse, 2005; Dilling, 2006; Dilling *et al.*, 2010).

Er is nog steeds geen sluitende verklaring voor de geobserveerde toename van de getijslag in de 20^e eeuw. Volgens Hollebrandse (2005) moet deze waarschijnlijk gezocht worden in de meteorologische en astronomische veranderingen. Wat dit betekent in het kader van de huidige verwachte meteorologische veranderingen, is nog niet duidelijk.

Bij de Duitse Bocht wordt de toename van de getijslag wordt vooral veroorzaakt door een verhoging van de hoogwaters, terwijl de laagwaters weinig verandering tonen (Jeuken *et al.*, 2007). Een hogere hoogwaterstand betekent ook een hogere stormvloedstand. Verder leidt een verandering van de getijslag ook tot een verandering in het getijvolume in een getijdebekken, wat consequenties kan hebben voor de sedimentbehoefte van het bekken. Hoe dit precies zal verlopen is met de huidige kennis nog niet goed te voorspellen.

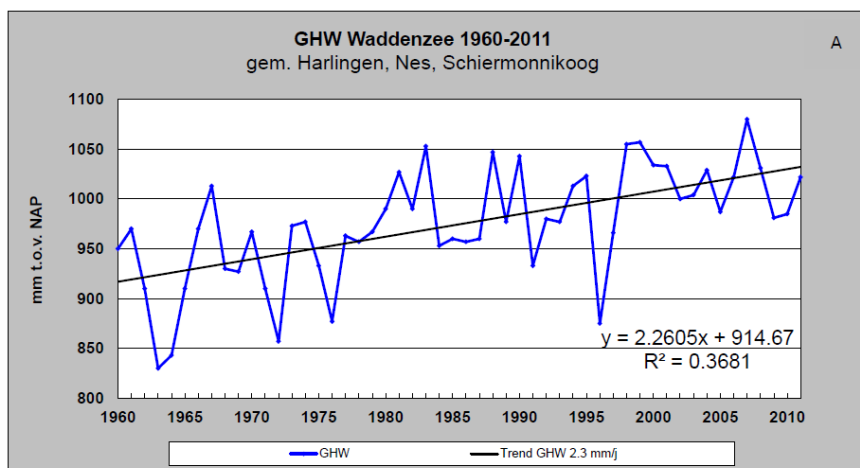
2.3.3 Golfklimaat

Bij de beschrijving van de meteorologie is al uitgelegd dat het windklimaat is gedraaid naar meer zuidwestenwinden. Hierdoor is ook het golfklimaat gewijzigd. Een vergelijking laat zien dat het golfklimaat van 1989-1998 iets frequenter golven uit zuidwestelijke en iets minder golven uit noordwestelijke richting te zien geeft t.o.v. de periode 1980-1988. De gemiddelde golfhoogte aan de Hollandse Kust is redelijk constant in de tijd (Van De Rest, 2004).

De verwachting is dat het golfklimaat niet noemenswaardig verandert. Of de eerder genoemde toename in de kans op orkanen van groot belang is, zal afhangen van de frequentie waarmee ze optreden.

2.3.4 Windopzet

Windopzet ten gevolge van windsterkte- en windrichtingvariaties en luchtdrukverschillen leidt tot variaties in de waterstand, zowel van dag tot dag maar ook van jaar tot jaar. Dit kan voor de Nederlandse Waddenzee leiden tot gemiddelde variaties in het zeeniveau van jaar op jaar in de orde van een kleine 20 cm (Figuur 2.5, Dijkema *et al.*, 2013).



Figuur 2.5 Jaargemiddelde hoogwaters voor de stations Harlingen, Nes plus Schiermonnikoog (Dijkema *et al.*, 2013).

Het is de verwachting dat de waargenomen variaties in de windopzet blijven bestaan in de toekomst. Omdat geen significante toename van de windsnelheid wordt verwacht, wordt hiervan verder ook geen invloed op de windopzet verwacht.

De voorspellingen voor de wind geven wel een toename weer van wind uit zuidwestelijke richtingen, maar dit zal niet voor een extra windopzet ter plaatse van de Wadden zorgen. Ook hiervoor geldt dat dit afhangt van de mate waarin de toegenomen orkaankans een rol gaat spelen.

2.4 Bodemdaling

Tektonische daling en isostatisch terugveren van de aardkorst na het afsmelten van de Pleistocene ijskap zorgen beide voor kleine, maar op langere termijn merkbare effecten. Het noordwesten van Nederland daalt hierdoor ten minste 25 millimeter per eeuw

(<http://www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl/i000331.html>). Deze natuurlijke bodemdaling zorgt voor een versterkt effect van de zeespiegelstijging. Deze twee factoren worden daarom vaak samengenomen in het begrip 'relatieve zeespiegelstijging', zoals gemeten op getijdestations. Daarnaast kan daling optreden door klink en compactie van de jongere sedimentlagen. Dit effect kan lokaal sterk verschillen, omdat het afhangt van het soort ondergrond.

Lokale bodemdaling als gevolg van menselijke activiteiten, zoals gaswinning, wordt behandeld in de volgende paragraaf.

2.5 Antropogene invloeden

Sinds het verleden hebben vele grootschalige menselijke ingrepen plaatsgevonden of vinden nu nog steeds plaats in het Waddengebied, zoals inpoldering en bedijking, afsluiting van zeearmen, verkweldering, baggeren en storten, delfstofwinning, steenwerk, zandsuppleties en de regulering van de zoetwaterafvoer. Deze ingrepen hebben een grote invloed op hoe het systeem zich gedraagt en ontwikkelt. Sommige van deze ingrepen zijn van dusdanig formaat geweest, dat zij gedurende lange tijd een bepalende invloed hebben gehad op het systeemgedrag, of dat de invloed ervan nog steeds na-ijlt (zoals de afsluiting van de Zuiderzee).

De belangrijkste menselijke invloeden op de morfologie van het Waddengebied zijn:

- Het vastleggen van de begrenzingen van het Waddengebied, doordat Noordzeekusten, eilandkoppen en vastelandskusten op een bepaalde positie worden gehandhaafd. De dynamiek van het Waddengebied is daardoor gedwongen om zich binnen die huidige begrenzingen te voltrekken.
- Het afsluiten van grote delen van de kombergingsgebieden (zoals de Zuiderzee en de Lauwerszee). Dit heeft de sedimentbehoefte van de huidige kombergingsgebieden vergroot. Omdat de kombergingsgebieden afhankelijk zijn van de sedimentaanvoer vanaf de Noordzeekust (buitendelta's en de eilanden), zorgt deze sedimentbehoefte voor een extra druk op de zandvoorraad van de Noordzeekust. Het effect hiervan is nog steeds merkbaar.
- De delfstofwinning (van zand, gas, schelpen en zout) veroorzaakt bodemdaling in de Waddenzee. Ook dit leidt tot een vergroting van de sedimentbehoefte in het getijdebekken.
- Een vierde punt is het vergroten van de afvoer van zoetwater naar de Waddenzee. Dit is sterk gereguleerd door sluizen en pompen. In de afgelopen eeuw is de afvoer van de sluiscomplexen op de Afsluitdijk met circa 12% toegenomen. Daarbij is het management van het zoetwater een belangrijke invloed. De twee grootste veranderingen (aanleg Afsluitdijk en toename van de afvoer van de Rijn van 12 naar 17%) zijn duidelijk waarneembaar in de saliniteit gemeten op het permanente meetpunt in het Marsdiep, bij 't Horntje. In totaal daalde de saliniteit in de periode 1860-2000 van 31,5 naar 28,5 promille (van Aken, 2008). De vergrote afvoer zal waarschijnlijk de estuariene circulatie versterken (zie Flöser *et al.*, 2013).

In de volgende paragraaf gaan we verder in op de gevolgen hiervan voor het morfodynamisch systeem van het Waddengebied.

2.6 Morfodynamische respons

2.6.1 Inleiding

Het Waddengebied is opgebouwd uit zeegatsystemen. Zeegatsystemen kunnen worden beschouwd als sediment-delende systemen, waarin alle elementen (bijv. geulen en platen) zijn gekoppeld en sediment met elkaar uitwisselen. Deze elementen worden verondersteld in een quasi-dynamisch evenwicht te zijn met de hydrodynamica of zich daarnaar toe te ontwikkelen. Dit betekent dat een verandering (of verstoring) in de waterbeweging ergens in het zeegatsysteem, leidt tot verandering in het sedimenttransport van of naar de andere delen van hetzelfde systeem. Als gevolg hiervan vinden er bodemveranderingen plaats, die uiteindelijk weer zijn terugslag hebben op de waterbeweging.

Wanneer de verstoringen tijdelijk en beperkt zijn, zal uiteindelijk het oude dynamische evenwicht worden hersteld. Als de verstoringen meer permanent of van grotere omvang zijn, zal zich een nieuw dynamisch evenwicht instellen na verloop van tijd. Vooral in deze situatie kan sediment worden geïmporteerd van, of geëxporteerd naar, gebieden buiten het zeegatsysteem. De tijd die nodig is om een nieuw dynamisch evenwicht te bereiken is afhankelijk van de omvang van de verstoring. De effecten van grootschalige ingrepen zoals de sluiting van de Zuiderzee en de Lauwerszee werken bijvoorbeeld nog steeds door, terwijl kleinere verstoringen zoals lokale baggergaten al binnen een paar maanden kunnen worden hersteld (Oost *et al.*, 2012).

Als de morfologische kenmerken en de positie van een zeegatsysteem ruwweg blijven zoals het is, zullen de effecten van zeespiegelstijging, bodemdaling door delfstofwinning en de afsluitingen van zeearmen leiden tot een extra sedimentvraag voor zowel de Waddenzeezijde als de Noordzeezijde van het Waddengebied. De Waddenzee is voor zijn aanvoer van sediment afhankelijk van de hoeveelheid sediment die vanaf de Noordzeezijde door het zeegat kan worden getransporteerd. De Noordzeekant ontvangt geen aanzienlijke hoeveelheden zand en zou zich landwaarts terugtrekken als hier geen zandsuppleties zouden plaatsvinden.

2.6.2 Huidige stand

Uit grootschalige sediment-balansanalyses voor complete getijde-zeegatsystemen, uitgevoerd in het trilaterale Waddengebied, kunnen enkele algemene conclusies worden getrokken:

- Het grootste deel van de Waddenzeebekkens vangt sediment in als gevolg van de zeespiegelstijging en door de mens veroorzaakte interventies in het verleden (Elias *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012; Oost *et al.*, 2012). De Waddenzee is dus een belangrijk lange-termijn depositiegebied voor sediment. Dit sediment wordt vooral onttrokken uit de voorliggende Noordzee-kustgebieden (Stive *et al.*, 1987; Oost *et al.*, 1998; Hoeksema *et al.*, 2004).
- Het huidige tempo van de sedimentatie in de meeste van de kombergingsgebieden is hoger dan de waargenomen zeespiegelstijging (CPSL, 2010; Elias *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012). Meerdere van de buitendelta's tonen een erosieve trend in de afgelopen decennia (Elias *et al.*, 2012, trilaterale bijeenkomsten: Hofstede pers. comm.). De oorzaken lijken regionaal te variëren en zijn niet altijd begrepen (bv., de diverse verklaringen over de erosie en heroriëntatie van de Nederlandse buitendelta (Elias *et al.*, 2012; Ridderinkhof *et al.*, submitted, 2013 & 2014).
- Er zijn verschillen in de ontwikkeling van de Waddeneilanden, die niet altijd worden begrepen. Sommige eilanden hebben de neiging om landwaarts te migreren (Trischen, Rottumeroog) en/of in een down-drift richting (Schiermonnikoog, Spiekeroog), anderen zijn vrij stabiel (Terschelling), of bouwen zeewaarts uit (Schiermonnikoog, Rømø) (Oost *et al.*, 2012).
- De morfologische ontwikkeling van de eilanden is sterk beïnvloed door erosiebestrijdingsmaatregelen zoals harde constructies op kusten, stuifdijken en zandsuppleties (NWKLN, 2010; Löffler *et al.*, 2011; Oost *et al.*, 2012).
- Afgezien van lokale uitzonderingen, hogen getijdeplaten en kwelders gelijk of sneller op dan de zeespiegel stijgt (Wang *et al.*, 2012).

2.6.3 Verwachtingen voor de toekomst

Volgens de nieuwe KNMI scenario's wordt voor de komende eeuw een aanzienlijke versnelling van de zeespiegelstijging voorzien. Deze versnelling zal op langere termijn een grote invloed op het Waddengebied kunnen hebben. Naar verwachting zal de sedimentbehoefte toenemen met de toename in de zeespiegelstijgingsnelheid, tot een bepaald maximum. Het toetsen van deze hypothese, en de vertaling ervan naar implicaties voor het beleid en beheer vallen binnen de scope van onderzoeksprogramma's zoals Beheer en Onderhoud Kust (Ministerie van I&M). Voor meer informatie over de relatie tussen zandbehoefte en zeespiegelstijging zie paragraaf 4.2.

De volgende ontwikkelingen worden belangrijk geacht voor het Waddengebied:

- A. Extra druk op de zandvoorraad van de Noordzeekust
Een aanhoudende versnelling van zeespiegelstijging, zoals voorzien voor deze eeuw, zal ook een aanhoudende verandering in sturende factoren betekenen. Het Waddengebied zal hierop reageren met het invangen van extra sediment om de relatieve verdieping op te vangen. Het sediment dat hiervoor nodig is binnenin de Waddenzee zal aangevoerd worden via het zeegat, voor zover de herverdeling van het zand door erosie en sedimentatie binnen kombergingsgebied zelf dat niet oplevert. Het grootste deel van dit sediment bestaat uit zand, dat wordt onttrokken uit de Noordzeekust van het Waddengebied (buitendelta's en eilandkusten). De Noordzeekust van het Waddengebied wordt daardoor dubbel belast door de zeespiegelstijging: enerzijds vanwege de relatieve verdieping van het profiel, en anderzijds door toenemende zandvraag vanuit de Waddenzee.
- B. Invloed van veranderingen van de buitendelta op de omliggende kusten
Op plaatsen waar al een grote sedimentbehoefte aanwezig is in het achterliggende kombergingsgebied, vindt nu al erosie en heroriëntatie van de buitendelta's plaats. Het is nog onduidelijk wat dit betekent voor het sedimenttransport naar de kombergingsgebieden en de aangrenzende eilandkusten. Ook is het onduidelijk wat voor effect het wegvallen van de luwte van de buitendelta heeft op de erosie van de kusten en het direct achterliggende deel van het kombergingsgebied. Als deze luwte lokaal wegvalt, leidt dit tot een zwaardere golfbelasting van de omringende eilandkust. Het verschijnsel van terugtrekkende buitendelta's kan een grotere rol gaan spelen door een grotere sedimentbehoefte in het kombergingsgebied, als gevolg van een versnelde zeespiegelstijging.
- C. Meegroeivermogen eilanden en vasteland
Het meegroeivermogen van de Waddeneilanden is nu al lager dan de zeespiegelstijging. Dit wordt ten eerste veroorzaakt doordat de polders geen sediment meer ontvangen door overstroming. Daarnaast wordt er onvoldoende zand vanaf de Noordzeestranden over het eiland verspreid als gevolg van het aanleggen van (stuif)dijken en het vastleggen van duinen. Een versnelde zeespiegelstijging leidt in zulke situaties tot een geleidelijke verdieping van duingebieden (duinen en achterliggende laagten) ten opzichte van de stijgende zeespiegel. Op korte termijn zal dit nog geen groot probleem zijn, maar op langere termijn kan dit betekenen dat de gebieden relatief dieper komen te liggen en gevoeliger worden voor overstromingen. Dit betekent dat er voortdurend meer moeite zal moeten worden gedaan om het zeewater te weren, door grotere duinen en dijken, maar ook door meer bemaling.
- D. Meegroeivermogen getijdeplaten
De verwachting is dat de getijdeplaten nog een vrij groot (maar niet onbeperkt) meegroeivermogen zullen hebben ten opzichte van de zeespiegelstijging, en dat problemen met zeespiegelstijging binnen de Nederlandse kombergingsgebieden waarschijnlijk pas vrij laat zullen optreden (na 2050). De limiet voor het meegroeivermogen wordt vooral bepaald door sedimentimport door de zeegaten, en in mindere mate door het netto sedimenttransport vanuit de geulen naar de getijdeplaten.

Hoewel veel van de mechanismen hierachter al wel bekend zijn, is het nog niet duidelijk wat het relatieve belang is van elk van deze mechanismen en wat de invloed van de versnelde zeespiegelstijging hierop is. Het is daarom ook niet zeker bij welke snelheid van zeespiegelstijging het wad de zeespiegel niet meer kan bijhouden. Dit wordt momenteel geschat op tenminste 60 cm/eeuw voor kleine kombergingsgebieden en 30 cm/eeuw voor de grote (Oost *et al.*, 1998). Meer optimistische schattingen geven aan dat dit pas bij ca. 1 m/eeuw het geval zou zijn (Van Goor *et al.*, 2001).

E. Meegroeivermogen kwelders

De kwelders aan het vasteland hogen gemiddeld ongeveer 1 cm/jaar op, de precieze ophoging is afhankelijk van het sedimentaanbod, de hoogteligging op de kwelder, afstand tot het wad en beheer. De eilandkwelders hogen met gemiddeld 0,5 cm/jaar op. Gezien de scenario's voor zeespiegelstijging zal het dus vrij lang duren voordat het maximum in het meegroeivermogen is bereikt. Kwelderdelen verder van het wad kunnen eerder achter gaan lopen. Kwelders zijn vrij goed stuurbaar (De Groot *et al.*, 2013), en bij eventueel achterblijven bestaan er manieren om de aanslibbing te versterken.

F. Opdringende getijdegeulen nabij de waterkering

De al bestaande problematiek van verschuivende geulen die de veiligheid van waterkeringen aantasten zou sterker kunnen worden als de geulen dynamischer worden, bijvoorbeeld door een toename van het getijvolume (als gevolg van een grotere getijslag, of een verdieping van het wad).

G. Tipping points

Het is mogelijk dat veranderingen in de hydrodynamische- of windcondities een zodanige invloed gaan hebben dat eilandkusten, buitendelta's en kombergingsgebieden zich wezenlijk anders gaan ontwikkelen. Hierdoor zou bijvoorbeeld de ophoging van de platen de zeespiegelstijging niet langer kunnen bijhouden en geleidelijk onder de laagwaterlijn verdwijnen. Daarmee zou een groot deel van de morfologische en ecologische karakteristieken van het Waddengebied wezenlijk veranderen. We spreken dan van een 'tipping point'. Over het algemeen wordt verwacht dat een morfologische verandering na het passeren van een tipping point zich langzaam zal voltrekken. Dit komt omdat daar vaak grote verplaatsingen van sediment voor nodig zijn, die meerdere decennia in beslag kunnen nemen (bijvoorbeeld het geleidelijke verdwijnen van de platen in de Oosterschelde, na de aanleg van de Oosterscheldekering). Alleen van duingebieden is bekend dat zij zeer snel kunnen veranderen na het passeren van een tipping point. Dit heeft te maken met het falen van de vegetatie (zoals het verstuiven van West-Vlieland en West-Terschelling), of juist het snel uitbreiden van de vegetatie na een aantal natte jaren (zoals het verstarren van de wandelduinen van De Westhoek in België).

Ook bestaat er de mogelijkheid van het passeren van een zogeheten *adaptation* tipping point (Kwadijk *et al.*, 2010). Dit is een kantelpunt waarbij de huidige beleidsstrategie niet meer voldoet, of niet meer tot haalbare oplossingen leidt. Zo kunnen dijken bijvoorbeeld niet eindeloos worden opgehoogd. De mogelijkheid bestaat dat, na het passeren van een adaptation tipping point, beleid en managementstrategie moeten worden aangepast (bijvoorbeeld dat gaswinning niet langer mogelijk is als de intergetijdeplaten dreigen te veranderen in subgetijdeplaten). Over de mogelijkheid tot het terugdraaien van een tipping point valt met de huidige kennis nog weinig te zeggen.

H. Effect toename stormvloedkans

Mochten stormvloeden van groter belang worden, dan is nog niet geheel duidelijk wat dit betekent voor de Noordzeekust. Langetermijnmodellen suggereren erosie en Waddenzee-gericht transport (van Goor, 2001); kortetermijnmetingen (Ruessink *et al.*, 2012) en modelberekeningen (De Leeuw, 2005) duiden op een eilandwaarts transport. Waarnemingen op de buitendelta van het Hörnum zeegat gaven een verlaging van de hoge platen te zien onder invloed van frequentere stormvloeden vanuit het westen (Hofstede, 1999b; in Wehrmann & Tilch, 2008). Dit zou ook voor de Nederlandse buitendelta's het geval kunnen zijn, wanneer stormvloeden frequenter vanuit het noorden komen, alhoewel dit voor de komende decennia niet de verwachting is.

Voor de vastelandsdijken zal met name het voorland en haar vorm van belang zijn waar het gaat om de ontwikkeling: zolang er voldoende platen en kwelders zijn zullen de lokaal opgewekte golven worden gedempt.

Een belangrijke constatering uit bovenstaande is dat klimaatverandering, zeespiegelstijging en autonoom systeemgedrag tot situaties kunnen leiden waarin de huidige waterveiligheidsstrategieën niet meer voldoen. Ondanks dat we al veel over het systeem weten, is de stand van kennis nog niet goed genoeg om te voorspellen hoe de zeegatsystemen over langere periodes (25 jaar en meer) zullen reageren op deze invloeden.

3 Deltathema: Sturende factoren

3.1 Inleiding

De sturende factoren worden hier gedefinieerd als: "autonoom veranderende factoren, die invloed hebben op de morfologie en veiligheid van het Waddengebied, en die niet (eenvoudig) te beïnvloeden zijn." Inzicht in sturende factoren en veranderingen daarin is zowel van belang voor lange-termijn planning als voor operationele activiteiten.

De sturende factoren zijn onderverdeeld in:

- meteo: weer en klimaat;
- zeespiegel;
- waterbeweging op de Noordzee: golven en getij;
- bodemdaling en seismiciteit, als gevolg van menselijke activiteit en natuurlijke processen;
- menselijke activiteiten, die invloed hebben op de morfologische ontwikkeling en veiligheid zoals delfstoffenwinning, baggeren/storten, en spuien.

In dit Hoofdstuk worden de sturende factoren per stuk als volgt stapsgewijs beschreven:

- relevantie;
- beschrijving / werking van het systeem;
- informatiebehoefte (voor beheer en beleid (toestandsmetingen) en kennisontwikkeling (onderzoeksprogramma & pilots));
- indicatoren;
- databehoefte.

3.2 Meteo

3.2.1 Relevantie

De meteorologische forcering is één van de belangrijkste sturende factoren voor het Waddengebied. Veranderingen in het klimaat beïnvloeden de morfologie, ecologie en maximale hydraulische belastingen. Op korte termijn bepaalt de forcering de wateropzet bij het overtrekken van stormen.

3.2.2 Werking relevante onderdelen systeem

Voor het Waddengebied zijn de belangrijkste meteorologische grootheden wind, neerslag en verdamping, temperatuur, en straling.

- *Wind* forceert golven, stromingen, het sedimenttransport over land (eolisch transport) en via stroming het sedimenttransport in water. Tijdens *extreme stormen* is de wind op tijdschalen van uren en langer de cruciale factor voor het bepalen van hydraulische randvoorwaarden. *Windstoten* tijdens stormen zijn verantwoordelijk voor de grootste directe gevaren van wind (KNMI 2012).
- *Neerslag* en *verdamping* hebben invloed op de zoetwaterbalans van het Waddenzee (RIKZ 2005).
- *Temperatuur* beïnvloedt de watertemperatuur en de ecologie. De temperatuur van het zeeoppervlak van de Noordzee heeft invloed op het weer in het Waddengebied.
- *Straling* is een belangrijke variabele voor onder meer verdamping.

Andere veel gebruikte meteorologische grootheden zijn *druk*, *type neerslag*, *bewolking*, *zicht*, *weertype*, *gladheid*, *blikseminslagen*, *sneeuwbedekking*, *ijsbedekking*.

De verwachte veranderingen in de 21^e eeuw in meteorologische forcering zijn beschreven in de KNMI'14-klimaatscenario's (KNMI, 2014, zie paragraaf 2.2). De temperatuur blijft stijgen.

Er zijn geen overtuigende aanwijzingen voor door de mens veroorzaakte veranderingen van het windklimaat en het stormklimaat, al zijn zulke veranderingen niet uit te sluiten.

Naast mondiale klimaatveranderingen kunnen ook lokale veranderingen de meteorologische forcering in het Waddengebied beïnvloeden.

Omgekeerd kunnen toekomstige morfologische veranderingen, en veranderingen van oppervlakte eigenschappen zoals vegetatie, landgebruik en bebouwing, lokaal effect hebben op de meteorologische forcering, vooral op de wind.

3.2.3 Informatiebehoefte

Meteorologische informatie in de context van het Deltaprogramma Waddengebied is nodig voor:

- beleid, klimaatstudies en klimaatsimulaties;
- kennisontwikkeling (onderzoeksprogramma en pilots);
- operationele monitoring en verwachtingen (*real-time* volgen, bewaken en verwachten van het weer).

Voor deze doeleinden zijn diverse typen informatie nodig:

- karakterisering weer en klimaat;
- tijdreeksen;
- velden (afhankelijk van ruimte en tijd), en die onder meer noodzakelijke input zijn voor golf- en waterstandsmodellen;
- statistische informatie, met name over de kans op bijzondere situaties.

Er is niet alleen informatie nodig over de Waddenzee, maar ook over de Noordzee, omdat de hydraulische belastingen van de Waddenzee in belangrijke mate door de meteorologische omstandigheden op de Noordzee worden bepaald.

Voor kennisontwikkeling is meteorologische informatie nodig, vooral op de volgende twee terreinen die voor het Waddengebied van belang zijn:

- Wind forcering golven en waterstanden in de vorm van meer betrouwbare hoge resolutie meteorologische simulaties. Zo laat de kwaliteit van de huidige stormvloedverwachtingen bij Delfzijl te wensen over, mede omdat de huidige meteorologische simulaties kleinschalige fenomenen in de Noordzee, waarvoor het gebied rond Delfzijl relatief gevoelig is, niet goed genoeg kunnen weergeven.
- Processen lucht-zee wisselwerking en dragrelatie wind boven ondiep water en inhomogeen terrein. De dragrelatie geeft aan hoe sterk de lucht-zee wisselwerking is bij een gegeven windsnelheid. Met name bij de extreme windsnelheden die voor waterveiligheid van belang zijn is de onzekerheid in de dragrelatie groot.

3.2.4 Indicatoren

Eventuele langjarige veranderingen in de volgende klimaatindicatoren kunnen reden zijn voor beleidswijziging:

- aantal en sterkte stormen;
- luchttemperatuur en zeewatertemperatuur;
- neerslag en verdamping;
- aantal dagen met ijsbedekking op de Waddenzee.

Voor de karakterisering van weer en klimaat worden vaak *gemiddelden*, *extremen* en *trends* gebruikt.

Belangrijke kengetallen zijn:

- langjarige gemiddeldes, vaak uitgesplitst naar maand of seizoen;
- variabiliteit rond gemiddelde waardes;
- verdeling wind over windsterkte en windrichting;

- extremen met terugkeer tijd van 10 jaar etc.;
- trends in temperatuur, neerslag, wind, aantallen stormen etc.

Drempelwaarden voor meteorologische verschijnselen die van belang zijn voor DPW zijn:

- Windkracht 10 is het meteorologische criterium dat het Water Management Centrum Nederland van RWS hanteert om experts op te roepen voor het volgen en bewaken van de waterveiligheid.
- IJsdag, dag waarbij de maximumtemperatuur onder nul ligt.

3.2.5 Databehoefte

Meteorologische informatie bestaat ten eerst uit waarnemingen. Daarnaast wordt ook veel gebruik gemaakt van modellen. Bij het genereren van modeldata wordt informatie van waarnemingen op verschillende tijden en plaatsen met behulp van systeemkennis geïntegreerd tot één samenhangend beeld. Op die manier zijn er ook op plaatsen waar niet gemeten is, meteorologische gegevens beschikbaar. Onafhankelijke waarnemingen worden gebruikt om modellen te verifiëren.

Standaard meteorologische waarnemingen worden verricht voor meerdere toepassingen:

- volgen van het weer door experts, maken verwachtingen enige uren vooruit, uitgeven van waarschuwingen;
- maken van korte termijn verwachtingen;
- opstellen van waarschuwingen;
- voorzien in invoergegevens voor weerverwachtingsmodellen;
- voorzien in invoergegevens voor modellen waterbeweging, golfmodellen en andere toepassingen;
- verifiëren van modelresultaten, en vaststellen van systematische fouten van het model;
- klimatologische dienstverlening en klimaatmonitoring;
- beschikbaar maken van waarnemingen voor commerciële weerproviders;
- het *a*/gemeen publiek een beeld geven van het weer en klimaat in robuuste en begrijpelijke termen.

Extra of projectmatige meteorologische waarnemingen worden verricht voor:

- processtudies die meteorologische kennisleemtes adresseren;
- ondersteunende metingen voor onderzoek en pilots op het gebied van golven, waterbeweging, morfologie, ecosysteem etc.

De invoer voor hydrologische modellen en applicaties heeft meestal de vorm van tijdsafhankelijke *velden* van wind, druk en andere grootheden. De huidige generatie van meteorologische modellen gebruikt gridcellen die in grootte variëren van 2.5 km (korte-termijn verwachtingen) tot 100 km (mondiale klimaatsimulaties), en tijdstappen die variëren van minuten tot uren.

De databehoefte aan meteorologische data betreft: windsnelheid, windrichting, druk, temperatuur, zicht, neerslag, dagsom neerslag, straling, dagsom verdamping. Niet-meteorologische waarnemingen die nodig zijn voor invoer van meteorologische modellen betreffen zeewatertemperatuur, land-zee masker (topografie) en bodemhoogte, bodemvocht, ijsbedekking, sneeuw en ruwheid land. De gebruikerseisen die aan meteorologische waarnemingen en het bijbehorende waarnemingssysteem zijn gekoppeld worden uitgebreid beschreven in Bijlage A. Hier volgt een korte samenvatting.

De gewenste uitgiftefrequentie is eens per 10 minuten tot dagelijks. De gewenste ruimtelijke dekking van weerstations is 50 km op land en 200 km op zee. Voor wind (RWS criterium) is ook een dekking van 50 km gewenst langs de kust van de eilanden en langs de kust van het vasteland. De motivatie hiervoor is dat wind, de belangrijkste variabele voor waterveiligheid, sterk verandert bij overgangen van land naar zee. Voor radarsystemen zijn twee systemen binnen 150 km van enig punt in de Waddenzee gewenst. De motivatie hiervoor is dat dit betere monitoring van neerslag mogelijk maakt en dat bij stormen radarbeelden voor experts een belangrijke bron van informatie zijn voor het vormen van een samenhangend weerbeeld.

3.2.6 Huidige monitoring

Internationale samenwerking op het gebied van waarnemingen is standaard in de meteorologie. Dit komt omdat weersystemen zoals depressies grote tijd en ruimte schalen hebben en landen elkaars waarnemingen nodig hebben om die goed te kunnen voorspellen. De kwaliteit van het nationale systeem is wel doorslaggevend voor het waarnemen van systemen met een kleinere schaal, zoals extreme buien.

Het meteorologisch waarneemsysteem bestaat uit verschillende componenten die elkaar aanvullen. De belangrijkste componenten worden hieronder beschreven. Meer uitgebreide informatie is te vinden op de website van de WMO (World Meteorological Organization), <http://www.wmo.int/>. Een overzicht van de bestaande meetstations is terug te vinden in Bijlage C.

Weerradarsystemen leveren informatie over neerslagintensiteit en over wind in de richting van de radarantenne. De resolutie in de ruimte (pixel grootte 1 km) is hoger dan die van alle andere componenten van het waarneemsysteem. Het is de belangrijkste bron van informatie bij het uitgeven van weerwaarschuwingen. In Nederland zijn twee radarsystemen, in De Bilt en Den Helder. Vooral de radar in Den Helder en de Duitse radar in Emden is relevant voor het Nederlandse Waddengebied.

Meteorologische satellieten worden zowel gebruikt voor het volgen van het weer als voor het leveren van invoergegevens voor weermodellen. Dat betreft temperatuur van het zeewateroppervlakte, zeegolven, oppervlaktewinden boven zee, vegetatie, sneeuwbedekking en bodemdeformatie. Satellietbeelden van geostationaire satellieten worden vooral gebruikt voor het volgen van het weer: evolutie van lage druksystemen, wolkenbedekking/zonnestraling en soorten wolken, onweercomplexen etc. Polaire satellieten geven spectrale informatie en zijn tegenwoordig de belangrijkste bron van informatie voor weermodellen.

Radiosondes ("weerballonnen") meten profielen van druk, temperatuur, vocht en wind als functie van hoogte tot circa 15 km hoog. Hoewel minder belangrijk dan vroeger, blijft het een belangrijke referentie. In Nederland wordt tegenwoordig een radiosonde per dag opgelaten, in De Bilt omstreeks middernacht (wanneer er weinig vliegtuigwaarnemingen zijn).

Vliegtuigwaarnemingen betreffen profielen van druk, temperatuur en wind bij het opstijgen en landen, en doen dat goedkoper dan radiosondes. In Europa regelt het E-AMDAR programma welke vliegtuigen gaan meten zodat er een redelijke dekking tegen aanvaardbare kosten ontstaat. Daarnaast verrichten vliegtuigen metingen op kruishoogte (luchtdruk 200 mb).

Een netwerk van *weerstations* meet 'het weer aan de grond' in termen van druk, temperatuur, vochtigheid, neerslag, wind, bewolking, zonnestraling, weertype en zicht (www.knmi.nl). In Nederland en op het Nederlands deel van het continentaal plat in de Noordzee zijn zo'n 40 weerstations. Voor het Waddengebied zijn ook de Duitse stations op Borkum en bij Emden van belang.

Aanvullende metingen zijn nodig omdat de 30-50 km afstand tussen de weerstations te groot is om relevante structuren met een kleine ruimtelijke schaal te vatten. Dit speelt met name bij wind, en nog meer bij neerslag. Voor wind zijn er daarom een aantal *windpalen* van RWS die het netwerk van windwaarnemingen bij de kust en op het IJsselmeer verdichten. Voor neerslag is een hogere dichtheid gewenst dan met klassieke stations kan worden bereikt. Dit wordt ondervangen met waarnemingen van weerradars, die echter kwantitatief minder goed zijn. Daarom wordt in Nederland ook gebruik gemaakt van het netwerk van meer dan 300 neerslagstations waar *vrijwillige waarnemers* 1x per dag de hoeveelheid neerslag bepalen die in de dag daarvoor is gevallen. Recent hebben een aantal waterschappen en gemeenten het initiatief genomen voor de ontwikkeling van nationaleregenradar.nl waarin regenradargegevens van Nederlandse, Duitse en Belgische weerstations worden gecombineerd. Daarmee zijn zowel de neerslaginformatie als de neerslagvoorspellingen betrouwbaarder geworden.

Ook *satellietinformatie* (zie boven) wordt gebruikt om ruimtelijk detail toe te voegen dat door grondwaarnemingen niet geleverd wordt.

Aandachtspunten van de databehoeftte ten opzichte van de huidige monitoring zijn:

- Behoud voldoende stationsmetingen, met name voor wind met behulp van windpalen, om aan de noodzakelijke ruimtelijke resolutie langs de kust te voldoen (zie Bijlage A).
- Behoud minimaal 2 weerradars in het Waddengebied (nu Den Helder en Emden).
- Continueer projectmatige metingen van WTI 2017 (Wenneker 2014; zie ook Bijlage A, onder projectmatige metingen) zolang niet in alle kennisleemtes is voorzien, door voort te bouwen op metingen bij Amelanders zeegeat.

Extra behoefte ten opzichte van de huidige monitoring bestaat uit:

- Anticipeer op de behoefte aan een hogere-resolutie waarneemnetwerk, door gebruik te maken van nieuwe technieken, zoals het benutten van nieuwe aardobservatie gegevens.
- Meteorologische meetcampagnes voor kennisontwikkeling van lucht-zee wisselwerking, met name in extreme condities. De kosten voor dergelijke campagnes zijn hoog, en daarom wordt aanbevolen synergie te zoeken met meetcampagnes van waterbeweging en morfologie, en samen te werken met internationale partners.
- Metingen tijdens en na stormen. De kennis van de impact van extreme stormen is suboptimaal omdat die stormen zo zeldzaam zijn. De aanbeveling is een plan te ontwikkelen voor *Quick Reaction Force (QRF)* die rond extreme stormen gericht informatie in wint en zorgt voor effectief delen en toegankelijk maken van deze informatie. Dit wordt verder besproken in Hoofdstuk 7, Quick Reaction Force.

3.3 Zeespiegel

3.3.1 Relevantie

Met de zeespiegel wordt het gemiddelde zeeniveau bedoeld, zonder fluctuaties door invloeden van golven, getij, luchtdruk en wind. De stijging van de zeespiegel is op lange termijn een belangrijke aandrijving voor de morfologische ontwikkeling van het Waddengebied. Als respons op de zeespiegelstijging zal de Waddenzee sediment gaan importeren, om mee te groeien met de zeespiegel (zie ook Hoofdstuk 4). Daarnaast zal een stijgende zeespiegel ook leiden tot een hoger springvloedniveau, waardoor de belasting op de kering toeneemt.

3.3.2 Werking relevante onderdelen systeem

Zeespiegelstijging heeft effect op de waterbeweging in het Waddengebied en daarmee op het sedimenttransport. Wanneer deze veranderen, bestaat de kans dat de Waddenzee onvoldoende sediment importeert om mee te kunnen groeien met de zeespiegelstijging. Hiermee verandert de morfologie van het gebied (platen kunnen bijvoorbeeld verdrinken, geulen in omvang veranderen, zie Hoofdstuk 4), wat consequenties kan hebben voor de golf- en getijdoordringing, en daarmee voor de belastingen op de waterkering (Hoofdstuk 4). Ook zorgen veranderingen in zeespiegel direct voor veranderingen in de belastingen.

De afgelopen eeuw is de zeespiegel langs de Nederlandse kust met zo'n 20 cm gestegen (Dillingh 2013). Dit is in lijn met het wereldgemiddelde van de zeespiegelstijging. De variaties in waterstanden zijn echter zo groot dat de jaar-tot-jaar fluctuaties in het jaargemiddelde van een waarnemingsstation veel groter (orde 10 cm) zijn dan de gemiddelde stijging per jaar (enkele mm). Daarnaast zorgen de langjarige getijcomponenten (zoals de 18,6 jaarlijkse cyclus) voor significante variaties die uitgemiddeld moeten worden om betrouwbaar de zeespiegelstijging vast te kunnen stellen. Om deze beide redenen is lange-termijn monitoring nodig.

De verwachting van het IPCC is dat de zeespiegelstijging zeer waarschijnlijk versnelt in de loop van de 21^e eeuw (IPCC 2013). De prognoses hebben echter een grote onzekerheid.

Daarnaast kan de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust enigszins (orde 10%) afwijken van de wereldgemiddelde zeespiegelstijging (Slangen *et al*, 2012).

De KNMI'14 klimaatscenario's (KNMI 2014) geven voor de Nederlandse kust rond 2050 een zeespiegelstijging van 15 – 40 cm ten opzichte van de periode 1981 – 2010, en rond 2085 tussen 25 – 80 cm (95% interval); voor 2100 is een bovenwaarde van 100 cm berekend. Het tempo van de zeespiegelstijging ligt volgens de KNMI'14 scenario's tussen 1 – 7,5 mm/jaar rond 2050, en tussen 1 – 10,5 mm/jaar rond 2085.

Lokale veranderingen in morfologie of geometrie van het bekken (dat laatste bijvoorbeeld ten gevolge van menselijke activiteiten zoals de aanleg van de Afsluitdijk) kunnen invloed hebben op de amplitude van het getij binnen (een deel van) de Waddenzee. Deze veranderingen kunnen ook enige invloed op het gemiddelde waterniveau hebben. Het gebied dat beïnvloed wordt hangt af van de locatie en de grootte van de verandering.

3.3.3 Informatiebehoefte

Monitoring van de *wereldgemiddelde zeespiegelstijging* is van belang omdat een trend van versnelde zeespiegelstijging eerder in het wereldgemiddelde kan worden waargenomen dan de lokale zeespiegelstijging in de Waddenzee, en omdat de combinatie van lokale en wereldgemiddelde stijging kan helpen in de interpretatie van de opgetreden zeespiegelstijging. Ook het *wereldwijde ruimtelijke patroon* van variaties in zeespiegelstijging bevat informatie die gebruikt kan worden voor de schatting van het verloop van zeespiegelstijging in de toekomst.

Monitoring van de *zeespiegel in de Noordzee rond het Waddengebied* geeft informatie over directe stuurvariabele van het Waddengebied en van de hydraulische belastingen. Voor het Waddengebied zijn vooral de gemiddelde hoogwaterstand (GHW) en laagwaterstand (GLW) relevant. Zoals in het Hoofdstuk Belastingen (Hoofdstuk 5) is besproken wijkt de verandering in GHW en LHW bij het Waddengebied enigszins af van de verandering in het gemiddelde zeeniveau (GZN), zie ook Tabel 2.1.

Scenario's voor de *toekomstige zeespiegelstijging in de Waddenzee* worden gebruikt bij het vaststellen van hoe hydraulische belastingen zich in de toekomst ontwikkelen en als input voor studies naar de ontwikkeling van de morfologie van de Waddenzee in de toekomst.

3.3.4 Indicatoren

De belangrijkste indicatoren voor zeespiegelstijging zijn de:

- gemiddelde zeespiegelstijging in de Noordzee rond het Waddengebied- de wereldgemiddelde zeespiegelstijging;
- het ruimtelijke patroon van wereldwijde zeespiegelstijging.

3.3.5 Databehoefte

De databehoefte aan waterstandmetingen in het Waddengebied en de Noordzee staat beschreven in Hoofdstuk 5 (Deltathema Belastingen). Bij stationmetingen is het gewenst om dit met meerdere stations te doen omdat (i) fluctuaties op de trend in het gemiddelde van stations enigszins uitmiddelen (ii) er lokaal afwijkingen in de zeespiegelstijging kunnen zijn van het gemiddelde (iii) er lokale afwijkingen kunnen zijn in de bewegingen in de diepe ondergrond. Er vinden op dit moment voldoende metingen in het Waddengebied plaats. Voor de interpretatie is het nodig ook het wereldwijde patroon van zeespiegelstijging te (blijven) meten.

3.3.6 Huidige monitoring

Het wereldwijde systeem voor het meten van het zeespiegelstijging heeft 2 belangrijke componenten: *tide gauges* en satellieten.

Tide gauges (waterstandstations, bijlage C) meten de waterstand ter plaatse langs de kust. Voor het vaststellen van zeespiegelstijging (en meerjarige componenten van het getij) is een goede referentie nodig. In Nederland is de ligging van de ondergrond op een diepte van enige tientallen meters. In feite meet het waterstandstation dus de combinatie van zeespiegelstijging en de bodemhoogteverandering van de ondergrond. Een aantal meetreeksen gaan terug tot de 18^e eeuw. Een voordeel van waterstandstations is dat je in ondiep water overal kan meten, dus ook in havenbekkens of vlak bij de kade als dat gewenst is.

Voor globale zeespiegelstijging en het globale patroon van zeespiegelstijging verzamelt de *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL) zeespiegelgegevens van een groot aantal waterstandstations in de gehele wereld. Op de site van PSMSL zijn ook de gegevens van een viertal Waddenstations te vinden (<http://www.psmsl.org/data/data/obtaining/>): Den Helder, West Terschelling, Harlingen en Delfzijl.

Satellietaltimeters meten zeeniveau sinds het begin van de jaren 90 van de twintigste eeuw. Satellieten hebben het voordeel dat ze wereldwijd meten, en niet alleen bij kusten, dat ze verschillende locaties direct met elkaar in verband brengen, en dat de meting op een uniforme manier gebeurt. Het principe van de meting is simpel: met een radar de afstand tussen satelliet en zeeoppervlak meten. Maar de meting is minder direct dan die van een waterstandstation: een heel aantal correcties is nodig om van de afstand tot het zeeoppervlak te komen tot het zeeniveau. Een beperking die voor het Waddengebied relevant is dat satellietaltimeters een voldoende groot stuk open water nodig hebben om ongestoord te kunnen meten, voor de huidige generatie van altimeters ligt dat in de orde van 10 x 10 km.

Voor het vaststellen van zeespiegelstijging en getij is een speciale klasse van satellietaltimeters geschikt die met hoge precisie en nauwkeurigheid meet en dat telkens over dezelfde locaties doet zodat een goede vergelijking mogelijk is. Dit is de reeks die in 1991 begonnen is met de *Topex/Poseidon* satelliet, en is voortgezet door *Jason-1* en *Jason-2*. De lancering van *Jason-3* staat voor 2015 gepland, en die van *Jason-CS* voor 2018.

Het *Nederlandse netwerk van waterstandstations* is dichter dan dat van PSMSL omdat het ook stormvloed en details van getij langs de kust van Nederland goed moet kunnen weergeven. Het criterium is dat als een station uitvalt met behulp van interpolatie van de omliggende stations een acceptabele schatting van het waterniveau kan worden verkregen. Acceptabel wil zeggen in normale omstandigheden een afwijking van 2,5 tot 5 cm, en bij zware stormen een hogere afwijking, tot 20 cm in extreme gevallen. In het Nederlandse Waddengebied zijn ruim 15 stations.

3.4 Waterbeweging op de Noordzee

3.4.1 Relevantie

De waterbeweging op de Noordzee heeft consequenties voor het gedrag van en hydraulische belasting op de Noordzeekust en werkt door in de waterbeweging van de Waddenzee, en daarmee op het gedrag van en hydraulische belastingen in de Waddenzee. Dit is bijvoorbeeld van groot belang bij stormvloed.

3.4.2 Werking relevante onderdelen systeem

Golven, waterstanden, temperatuur en zoutgehalte van de Noordzee vormen belangrijke randvoorwaarden voor het Waddengebied. Een hogere waterstand zorgt voor een verhoging van de hydraulische belasting op de waterkering, hier wordt in het Deltathema Belastingen en waterkering (Hoofdstuk 5) verder op ingegaan.

Een stijgende zeespiegel op de Noordzee kan invloed hebben op de getijslag, die vooral wordt gekenmerkt door een verhoging van de hoogwaters, zoals besproken in Hoofdstuk 2.

Vanuit de Noordzee komt deze getijdegolf de Waddenzee binnen door de zeegaten. Vervolgens wordt het getij vervormd in de ondiepe bekkens van de Waddenzee en is daarmee afhankelijk van de grootschalige en lokale bodemligging en de geometrie van de bekkens. Daarnaast speelt de ruwheid van de bodem (korrelgrootte, bodemvormen, vegetatie) een rol.

De grootste golven en hoogste waterstanden (stormvloed) komen voor bij noordwester stormen, omdat dan de afstand waarover de windforcering op het water werkt het grootst is. Veranderingen in klimaat, bijvoorbeeld stijging van de temperatuur, veranderingen in neerslag en mogelijke veranderingen in windklimaat, kunnen ook impact hebben op de waterbeweging in de Noordzee.

3.4.3 Informatiebehoefte

Er is behoefte aan informatie over golven en waterstanden op de Noordzee voor:

- beleid, klimaatstudies en klimaatsimulaties over golven, waterstanden en stromingen, inclusief extremestatistiek;
- randvoorwaarden voor modellen van belastingen van waterkeringen langs Noordzeekust van het Waddengebied;
- randvoorwaarden voor morfologische (en ecologische) modellen Waddenzee;
- actuele verwachtingen en waarschuwingen voor Waddenzee en Noordzeekust.

De informatiebehoefte bestaat uit:

- (veranderingen in) getijkaracteristieken die doorwerken op hydraulische randvoorwaarden en morfologische ontwikkeling;
- golven, waterstanden en stromingen in de Noordzee als randvoorwaarden voor modellen (zie Hoofdstuk 5, Deltathema Waterkering);
- bodemdiepte en bodemeigenschappen zijn nodig als input voor (deels operationele) modellen voor golven, waterstanden en morfologie;
- zeewatertemperatuur en saliniteit in de Noordzee zijn randvoorwaarden voor de toestand van de Waddenzee.

3.4.4 Indicatoren

Indicatoren voor waterbeweging op de Noordzee zijn:

- waterstanden: (gemiddeld) hoog- en laagwater, gemiddeld hoog- en laagwater spring, windopzet bij stormen;
- golven: significante golfhoogte, golfperiode, golfrichting;
- stroming: snelheden.

Langjarige veranderingen in deze indicatoren geven reden tot het bijstellen van scenario's en morfologische voorspellingen. Actuele waarnemingen kunnen (via operationele modellen) reden zijn om calamiteitenorganisaties op te starten.

3.4.5 Databehoefte

Om de Noordzee goed te kunnen modelleren is om te beginnen informatie nodig over:

- bodemdiepte;
- bodemeigenschappen (korrelgrootte en bedvormen i.v.m. hydraulische ruwheid voor modellen).

Verder zijn voldoende metingen nodig van:

- oppervlaktetemperatuur (ook voor meteo modellen);
- saliniteit;
- golven;
- waterstanden.

De databehoeftte wordt gespecificeerd in *Tabel 3.1*. De databehoeftte aan waterstandmetingen wordt toegelicht in Hoofdstuk 5 (Deltathema Belastingen). Er is vooral behoefte aan 'upstream' stations, dwz langs de kust van het Verenigd Koninkrijk omdat afwijkingen in waterstanden tegen de klok in langs de kust van de Noordzee bewegen.

3.4.6 Huidige monitoring

In de Noordzee worden goed bemeten:

- onder andere golven, watertemperatuur en zoutgehalte, gemeten op *platforms* en boeien;
- onder andere profielen van temperatuur en zoutgehalte, waterdiepte, bodemeigenschappen, en bio-geochemische parameters die worden gemeten door *onderzoeksschepen* op vaartochten.;
- oppervlaktetemperatuur, *ocean color*, golven en zeeniveau door *satellieten*.

Een overzicht van de bestaande meetstations is terug te vinden in Bijlage C.

Deze metingen dekken de databehoefttes van *Tabel 3.1*

<i>Tabel 3.1</i> Overzicht databehoeftte in Noordzee buiten Waddengebied (vanaf -20 m en dieper) Variabele	<i>Frequentie</i>	<i>Resolutie</i>	<i>Opmerkingen</i>
Bodemdiepte	10 jaar	5 km	Voor vaarroutes langs de Waddenzee wellicht vaker (jaarlijks) ivm zandgolven, met name op baggerlocaties ivm bevaarbaarheid
Bodemtype	10 jaar	10 km	
Golven in situ	uurlijks	volgens huidige opzet	Spectrum, golfhoogte, deining (10 sec)
Golven satelliet	2x per dag	10 km (along track)	alleen langs tracks
Wind	Continue	Volgens huidige opzet; mogelijk iets verfijnen	Snelheid en richting
Zeeoppervlaktetemperatuur in situ	uurlijks	volgens huidige opzet meetnet	
Zeeoppervlaktetemperatuur satelliet	dagelijks	10 km	indien onbewolkt
Waterstand	10 minuten	volgens huidige opzet	
Saliniteit in situ	1x per dag	volgens huidige opzet	

3.5 Bodemdaling en seismiciteit

3.5.1 Relevantie

Bodembeweging en seismiciteit kunnen zowel door natuurlijk processen (isostasie, tektoniek, compactie) als door menselijke activiteiten zoals gas- en zoutwinning ontstaan. Bodemtrillingen kunnen gevolgen hebben voor de dijken in de omgeving en daarmee ook voor de waterveiligheid van het gebied (zie Hoofdstuk 5, Korff *et al.*, 2014). Bodemdaling kan effect hebben op de morfologie en de waterdiepte en daarmee doorwerken in de hydraulische belastingen.

3.5.2 Werking relevante onderdelen systeem

In Nederland heeft de natuurlijke bodemdaling twee componenten. Ten eerste de beweging van de diepere ondergrond, die zich in Nederland nog aanpast op het verdwijnen van landijs massa's na de laatste IJstijd (*post-glacial rebound*). In het Waddengebied komt zeker 25 mm per eeuw van de waargenomen daling van de ondergrond door dit effect.

De tweede component is dunner worden van veenachtige lagen door inklinking en oxidatie. Het dalen van de bodem betekent dat ook de keringen dalen.

Daarnaast kunnen gas- en zoutwinning lokaal bodemdaling in het Waddengebied veroorzaken (Waddenacademie, 2009). Als gevolg van gaswinning ontstaan aan het aardoppervlak schotelvormige depressies. Deze schotels zijn in het centrum centimeters tot decimeters diep, en hebben karakteristieke stralen van enkele tot meerdere kilometers (de Ronde, 2008). Deze dalingschotels kunnen in de Waddenzee weer worden aangevuld met sediment, waardoor de bodem tot nu toe mee heeft kunnen groeien. Hierdoor neemt de totale zandhonger van de Waddenzee wel toe. In combinatie met relatieve zeespiegelstijging, is de vraag of de wadbodem lokaal kan meegroeien. Daarvoor moet in de toekomst mogelijk meer zand gesuppleerd worden (De Ronde, 2008). De grens voor meegroeien is voor delen van de kwelder op Oost-Ameland bereikt: delen blijken niet in staat om de bodemdaling door opslibbing te compenseren (Dijkema *et al.* 2011). Dit leidt echter niet tot problemen voor de waterveiligheid.

Ten gevolge van de gaswinning treden ook regelmatig aardbevingen op. Omdat het hypocentrum van de geïnduceerde aardbevingen relatief ondiep ligt, is de bodembeweging relatief sterk (KNMI, 2010). Een punt van aandacht is dat de waterkeringen in de Waddenzee bestand dienen te zijn tegen door gaswinning geïnduceerde bevingen. In recente jaren is het aantal relatief sterke aardbevingen in het Groninger gasveld toegenomen, en de verwachting is dat dit zo blijft. In Korff *et al.* (2014) wordt aanbevolen voor het effect van aardbevingen een normering en toetsmethode op te stellen, aangezien deze tot op heden nog ontbreekt. Er wordt ook aanbevolen om extra metingen te doen waarbij de trillingen en het verloop van waterspanningen worden gemeten.

Zoutwinning vindt vooral plaats rond Harlingen. De bodemdaling als gevolg hiervan is tot nog toe verwaarloosbaar, maar een eventuele toekomstige toename van de zoutwinning kan leiden tot grotere effecten (de Ronde, 2008).

3.5.3 Informatiebehoefte

Informatie over bodemdaling in het Waddengebied is noodzakelijk voor de beantwoording van vragen als:

- Welke effecten heeft de door gas- en zoutwinning geïnduceerde bodemdaling op de sedimenthuishouding van de Waddenzee?
- Wordt de door gas- en zoutwinning geïnduceerde bodemdaling voldoende gecompenseerd door sedimentatie?
- Zijn er consequenties voor de waterveiligheid?

Het is wenselijk beide componenten van natuurlijke bodemdaling (beweging van de diepere ondergrond en het dunner worden van veenachtige lagen, zie voorgaande paragraaf) afzonderlijk te bepalen om juiste voorspellingen te kunnen doen. Verder zijn van belang: locaties, volume, snelheid, diepte bodemdaling, vorm van dalingsgebied, gedrag van wederom gevulde cavernes.

Bij seismiteit is de centrale vraag met wat voor aardbevingen rekening moet worden gehouden in de toekomst. Dat bestaat zowel uit het inschatten of bevingen heviger worden, als wat dat voor consequenties dat heeft voor de calamiteitenorganisatie. Verder is belangrijk om te weten wat de door gaswinning geïnduceerde aardbevingen voor de stabiliteit van de waterkeringen betekenen, zie ook Hoofdstuk 5.

De kennis van gaswinning geïnduceerde aardbevingen is voor een groot deel empirisch en wordt nog opgebouwd. Daarom is het nuttig Hiervoor gaat het KNMI binnenkort ook voor kleinere aardshokken zorgvuldig locatie, diepte, sterkte en oppervlakte amplitude bepalen.

3.5.4 Indicatoren

Voor bodemdaling is de bodemdalingssnelheid de belangrijkste informatie. Deze wordt bij de zeespiegelstijgingsnelheid opgeteld om de relatieve zeespiegelstijgingsnelheid te bepalen. Deze wordt vergeleken met de snelheid waarmee sediment in het Waddensysteem kan worden geïmporteerd (zie Hoofdstuk 4).

De belangrijkste indicatoren voor seismiciteit zijn sterkte en frequentie. Deze worden vergeleken met de waarden waarop de keringen berekend zijn.

3.5.5 Databehoefte

Bodemdaling:

- beweging in diepere ondergrond en hoe deze uitwerkt aan het oppervlakte: peilmerken in combinatie met modellen voor interpolatie in ruimte en extrapolatie in tijd;
- bodemligging/bathymetrie en effecten op duinen en kwelders: zijn zelfde als voor algemene gedrag, zie Hoofdstuk 4.

Aardbevingen: bodemtrillingen.

3.5.6 Huidige monitoring

Voor bodemdaling is er in Nederland een standaard geodetisch instrumentarium dat voldoet en in dit plan niet verder wordt besproken. De metingen die gebruikt kunnen worden om de effecten van bodemdaling op de morfologie en bathymetrie te bepalen vallen onder Hoofdstuk 4

Voor aardbevingen zijn de volgende metingen beschikbaar (*Tabel 3.2*):

Tabel 3.2 Metingen beschikbaar voor aardbevingen

<i>Type</i>	<i>Bron</i>	<i>Aantal stations</i>	<i>Meetfrequentie</i>	<i>Opmerkingen</i>
Seismometer	Nationaal netwerk KNMI	10	Continu	Met name gericht op natuurlijke seismiciteit.
Boorgat station	KNMI, voornamelijk Noord Nederland	18	Continu	Met name gericht op geïnduceerde bevingen in Noord Nederland.
Accelerometer	KNMI, voornamelijk Noord Nederland	30	Deels continu, deels getriggerd	

Het KNMI is in staat alle aardbevingen in Noord Nederland te registreren als die een magnitude van ongeveer 1,5 of meer hebben. Een forse uitbreiding van het netwerk rond het Groningen gasveld (waar bijvoorbeeld de dijken langs de Eems-Dollard boven liggen) is in voorbereiding.

3.6 Menselijke activiteiten

3.6.1 Relevantie

In het Waddengebied vindt een verscheidenheid aan menselijke ingrepen plaats, o.a. gas- en zoutwinning (zie hierboven voor de effecten op bodemdaling en seismiciteit), baggeren en storten, zandsuppleties, spuien, grondwaterwinning en visserij.

Dergelijke ingrepen kunnen invloed hebben op de morfologische ontwikkeling en daarmee de veiligheid van het Waddengebied. In het verleden hebben grote afsluitingen van zeearmen plaatsgevonden (Zuiderzee, Lauwerszee), die nog steeds invloed hebben op de morfologische ontwikkeling van het Waddensysteem.

3.6.2 Werking relevante onderdelen systeem

(a) Historische ingrepen

In het verleden zijn grootschalige ingrepen uitgevoerd in het Waddengebied ter bevordering van de veiligheid, voor landaanwinning en voor andere economische activiteiten. Enkele voorbeelden hiervan zijn de Afsluitdijk, het Lauwersmeer, het Emssperwerk, stuifdijken, inpolderingen en kwelderwerken (de voormalige landaanwinningswerken).

De Afsluitdijk (1932) en het Lauwersmeer (1969) zijn gerealiseerd om de veiligheid tegen overstromen te vergroten en de zoetwatervoorziening voor komende generaties te garanderen. De afsluitingen hadden ook effecten op de hydrodynamiek en het morfologisch systeem. Zo is de getijslag in de bekkens van het Marsdiep en het Vlie toegenomen. Geulen die met de aanleg van de Afsluitdijk werden afgesneden zijn verzand. De zandhonger als gevolg van afsluitingen en relatieve zeespiegelstijging heeft geleid tot import van sediment door de zeegaten. Dit sediment wordt door de natuur onttrokken van de buitendelta's, de eilandkoppen en de kust van Noord-Holland. De huidige import van sediment door het Marsdiep wordt geschat op ongeveer 5 a 6 miljoen m³/jaar (Elias *et al.*, 2006). De afsluiting van de Lauwerszee resulteerde in het kleiner worden van de hoofdgeulen door opvulling met zand, een afname in volume van de buitendelta, verplaatsing van het wantij en mogelijk de zeewaartse uitbreiding en langer worden van Schiermonnikoog.

Het Emssperwerk, in Duitsland in de rivier de Eems gelegen, is een afsluitbare kering, die niet alleen de waterveiligheid dient, maar kan ook gebruikt worden als stuw, waardoor de bevaarbare diepte groter wordt ten voordele van het scheepvaartverkeer (Raad voor de Wadden, 2010). Sluiting van het Emssperwerk bij stormen resulteert in hogere waterstanden in de Eems-Dollard dan voorheen. Uit modellering van de Allerheiligenvloed van 2006 blijkt dat de waterstand bij Delfzijl en Nieuwe Statenzijl ca. 15-20 cm hoger is als het Emssperwerk gesloten is (de Lima Rego en Dillingh, 2010).

Grote ingrepen in de kust buiten de Waddenzee kunnen het gebied ook beïnvloeden, bijvoorbeeld Maasvlakte 2 (Wang *et al.* 2012).

(b) Huidige menselijke activiteiten

Menselijke activiteiten die vandaag de dag nog worden uitgevoerd zijn gas- en zoutwinning, baggeren/storten en zandsuppleties, spuien, grondwaterwinning en visserij.

- De vaargeulen en havens in de Waddenzee worden op diepte gehouden door baggeren. Het gebaggerde materiaal wordt of elders teruggestort op verspreidingslocaties, of als het bruikbaar zand is, uit het systeem gehaald en verkocht. Zandwinning buiten het vaargeulonderhoud om is sinds 1998 niet meer toegestaan. Baggeren en verspreiding van baggerspecie verandert de abiotische omgeving die effect heeft op habitats, flora en fauna. Jaarlijks wordt uit vaargeulen en havens respectievelijk 1,6 miljoen m³ en 4.1 miljoen m³ gebaggerd (Arcadis, 2011).
- Zandsuppleties worden langs de eilandkusten uitgevoerd om de Basis KustLijn (BKL) in stand te houden. De afgelopen 10 jaar is er bij Ameland, Vlieland en Texel 37 miljoen m³ gesuppleerd. Aan de Noord-Hollandse kust (Den Helder – IJmuiden) is in het afgelopen decennium ook 37 miljoen m³ gesuppleerd.
- Spuien kan de saliniteit van Waddenzeewater verlagen. Horizontale dichtheidsgradiënten, als gevolg van saliniteits- en temperatuurgradiënten, kunnen significant bijdragen aan de accumulatie van SPM in de Waddenzee (Burchhard *et al.* 2008).

- Grondwaterwinning. Onttrekking van grondwater, voor drinkwatervoorziening, industriële activiteiten of voor het bemalen van polders beïnvloedt het grondwaterpeil en kan bodemdaling tot gevolg hebben wanneer er geen evenwicht is tussen onttrekking en aanvulling van grondwater. In veengebieden, leidt het onttrekken van water tot veenoxidatie waarbij CO₂ vrijkomt en die bodemdaling veroorzaakt.

(c) Toekomstige/verwachte veranderingen

Als gevolg van veranderende neerslagpatronen kan het *spuiregime* van zoet water in de toekomst veranderen. Zowel het spuiregime als veranderende neerslag- en droogtepatronen, hebben invloed op de saliniteit en dichtheidsstromingen in de Waddenzee en de uitwisseling met de Noordzee.

Andere menselijke activiteiten die in de toekomst plaatsvinden of mogelijk gaan plaatsvinden zijn:

- Suppleties op nieuwe plekken, zoals buitendelta's. Ook zouden suppleties in een andere vorm kunnen worden aangelegd, bijvoorbeeld als zandmotor.
- Nieuwe dijkconcepten, bijvoorbeeld inclusief kwelders, kunnen leiden tot aanpassingen van de Waddenzeezijde van de huidige dijken (op plekken waar nu nog geen kwelders zijn).
- Havenuitbreidingen of verruimingen van de havens in het Waddengebied (www.waddenzeehavens.nl) om de steeds groter wordende schepen te kunnen bergen, hebben invloed op de baggerhoeveelheden en daarmee ook op de storthoeveelheden. Dit heeft invloed op de morfologische ontwikkeling.
- Aanpassen van de Afsluitdijk. De Afsluitdijk voldoet niet meer aan de normering voor waterveiligheid en moet daarom worden aangepast. De op handen zijnde aanpassing maakt ook discussie los over de Afsluitdijk zelf, waarbij ook wordt gekeken naar meer 'Building with Nature'-achtige oplossingen.
- Het verwijderen van (delen van) stuifdijken (ref). Stuifdijken zijn vanaf de Middeleeuwen aangelegd om eilanden te stabiliseren door washover tegen te gaan. In de twintigste eeuw zijn zo veel eilandstaarten uitgebreid. Intussen wordt vermoed dat de aanwezigheid van stuifdijken het meegroeien van eilanden met de zeespiegelstijging verhindert en de biodiversiteit verlaagt. Om natuurlijke dynamiek te laten terugkeren, wordt gekeken naar de mogelijkheden om delen van stuifdijken te verwijderen. Dit zal effect hebben op de dynamiek en morfologie van de eilandstaarten en mogelijk ook de achterliggende kombergingsgebieden (zie ook Hoofdstuk4).
- Installaties voor het winnen van duurzame energie. Gedacht kan worden aan het plaatsen van windmolenparken (hoewel nu niet gewenst in de Waddenzee zelf), getijdencentrales en aardwarmtewinning. Aardwarmtewinning staat steeds meer in de belangstelling als duurzame energiebron voor de nabije toekomst (Waddenacademie, 2009).
- Het gebruik van de ondergrond voor gas- en/of CO₂-opslag kan invloed hebben op de ondergrond van het Waddengebied (Waddenacademie, 2009)

3.6.3 Informatiebehoefte

Een actueel overzicht van menselijke activiteiten in het Waddengebied samen met inzicht in de effecten van deze ingrepen is noodzakelijk om de risico's voor de waterveiligheid en de kustveiligheid i.r.t. toekomstige ontwikkelingen, zoals klimaatverandering en zeespiegelstijging, in te kunnen schatten.

Belangrijke informatievragen zijn:

- Welke ingrepen vinden er plaats en hebben er plaats gevonden en wat is de omvang en het effect van deze ingrepen?
- Wat is het effect op morfologie en sedimentvraag?

Informatie nodig voor kennisontwikkeling:

- Beter begrip van de mechanische eigenschappen van de ondergrond in het Waddengebied.
- Hoe werken de door de mens -geïnduceerde veranderingen in de ondergrond door naar het aardoppervlak/Waddenzeebodem? (Waddenacademie, 2009)
- Hoe beïnvloeden bagger- en verspreidingswerkzaamheden de draagkracht van de Waddenzee?

- Welke effecten hebben zandsuppleties op de morfologie van de het Waddengebied en dragen ze bijdragen aan het meegroeivermogen van het Waddengebied?
- Beïnvloedt het winnen van grondwater de waterkeringen?
- Welke effecten hebben veranderingen in spuiregime op de veiligheid van het Waddengebied?

3.6.4 Indicatoren

Indicatoren voor menselijke activiteiten die invloed hebben op de sturende factoren in de Waddenzee zijn:

- daling van de grondwaterspiegel (grondwaterwinning);
- een toename in ontgrondingsgaten (spuien);
- indicator zandsuppleties?;
- grondwaterkwantiteit (Verhagen *et al.* 2010; huidige metingen):
 - o waterbalans (evenwicht onttrekking en aanvulling);
 - o stijghoogten metingen van grondwaterlichamen;
 - o oppervlaktewater (effect verandering grondpeilwater op toestand oppervlaktewater);
 - o terrestrische ecosystemen (effect verandering grondpeilwater op grondwaterafhankelijke terrestrische ecosystemen);
 - o intrusies (ontstaan van (zout)intrusies door verandering in grondwaterpeil.

3.6.5 Databehoefte

Zandsuppletie:

- suppletievolume;
- suppletielocatie;
- moment.

Grondwaterwinning

- volume;
- grondwaterspiegel.

Baggeren/storten:

- volume per tijd;
- locatie;
- moment.

Spuien:

- spui volumes (dag- of uurwaardes);
- saliniteit buitengebied;
- bathymetrie: detaillodingen.

3.6.6 Huidige monitoring

Jaarlijks vindt er een registratie plaats van alle baggeractiviteiten door beheerders (hoeveelheid gebaggerd materiaal, kwaliteit, samenstelling sediment, verspreidingslocatie, -periode en -diepte, effecten monitoring steekproefsgewijs, motivering baggeren en verspreiden buiten winterperiode). Aanvullend wordt respectievelijk jaarlijks en 3 jaarlijks een quickscan uitgevoerd of aanpassing van de verspreidingslocaties nodig is en een evaluatie van baggerspecies (afstemming op natuurlijke dynamiek) (Arcadis, 2011).

De volumes, locaties en momenten van suppleren worden bijgehouden door RWS. Het programma "ecologisch gericht suppleren, nu en in de toekomst" is een onderzoeks- en monitoringsprogramma voor de middellange termijn (2009-2014) met als doelstelling meer inzicht te krijgen of, en in welke mate, zandsuppleties van invloed zijn op natuurwaarde en op welke wijze zandsuppleties in de nabije toekomst kunnen bijdragen aan de opgaven van veiligheid samen met natuurbehoud en ontwikkeling (Holzhauer *et al.* 2009).

3.7 Aanbevelingen

Meteo

Aandachtspunten van de meteorologische databehoeftes ten opzichte van de huidige monitoring zijn:

- Behoud voldoende stationsmetingen, met name voor wind met behulp van windpalen, om aan de noodzakelijke ruimtelijke resolutie langs de kust te voldoen (zie Bijlage A). Zorg ook voor 3 a 4 referentiemeetpunten van zeewatertemperatuur in het Waddengebied (zie Bijlage A).
- Behoud minimaal 2 weerradars in het Waddengebied (nu Den Helder en Emden).
- Continueer projectmatige metingen van WTI 2017 (zie Bijlage A onder projectmatige metingen) zolang niet in alle kennisleemtes (zie paragraaf 3.2.3 informatiebehoefte) is voorzien, door voort te bouwen op metingen bij Amelander zeegat.
- Meer ruimtelijk detail neerslag, bodemvocht, sneeuw en zicht. Omdat de DPW niet de belangrijkste behoeftesteller is aan deze gegevens wordt deze behoeftes niet binnen dit Monitoringplan geprioriteerd.

Extra behoefte aan meteorologische data ten opzichte van de huidige monitoring bestaat uit:

- Anticipeer op de behoefte aan een hogere-resolutie waarneemnetwerk, door gebruik te maken van nieuwe technieken, zoals aardobservatie.
- Meteorologische meetcampagnes voor kennisontwikkeling van lucht-zee wisselwerking, met name in extreme condities. De kosten voor dergelijke campagnes zijn hoog, en daarom wordt aanbevolen synergie te zoeken met meetcampagnes van waterbeweging en morfologie, en samen te werken met internationale partners.
- Metingen tijdens en na stormen. De kennis van de impact van extreme stormen is suboptimaal omdat die stormen zo zeldzaam zijn. De aanbeveling is een plan te ontwikkelen voor *Quick Reaction Force (QRF)* die rond extreme stormen gericht informatie in wint en zorgt voor effectief delen en toegankelijk maken van deze informatie. Dit wordt verder besproken in Hoofdstuk 7, Quick Reaction Force.

Waterbeweging Noordzee

- Anticipeer op de behoefte aan een hogere-resolutie waarneemnetwerk, door gebruik te maken van nieuwe technieken, zoals aardobservatie.

Zeespiegel

- Draag bij aan Jason-CS satelliet voor metingen zeespiegelstijging. Met satellietmetingen kunnen trends en patronen in zeespiegelstijging eerder gedetecteerd worden en de onzekerheid in de verwachte zeespiegelstijging vermindert. Omdat de hoge prioriteit van satellietmetingen voor monitoring van het Waddengebied uit te drukken voorziet dit plan in een bijdrage aan de Jason-CS satelliet.
- Zet bijdrage Nederland voort aan Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL).

Bodemdaling en seismiciteit

- Inspecteer staat van dijken na zwaardere aardbevingen. Breng dit onder in een Quick Reaction Force zodat resultaten efficiënt gedeeld worden (zie verder Hoofdstuk 7, Quick Reaction Force).

Menselijke invloeden

- Zorg dat alle bovengenoemde gegevens voor menselijke invloeden toegankelijk zijn.

4 Deltathema: Morfologische ontwikkeling en meegroeivermogen

4.1 Inleiding

Dit Hoofdstuk beschrijft eerst het belang van het monitoren van de morfologische ontwikkelingen van het Waddengebied voor het Deltaprogramma Wadden (paragraaf 4.2). In paragraaf 4.3 geven we een beknopte systeembeschrijving, in het licht van een veranderend klimaat en menselijke invloeden.

Om tot een goed overzicht te komen van de te verzamelen gegevens ('wat we willen *meten*'), moeten we ons eerst bewust zijn van de doelstellingen omtrent beleid en beheer. Deze doelstellingen vormen de informatiebehoefte (paragraaf 4.4), ofwel: 'wat we willen *weten*'. Deze doelstellingen of beheervragen kunnen worden uitgewerkt tot een set aan indicatoren, die informatie geven over de toestand van een bepaald onderdeel van het systeem (paragraaf 4.5). In sommige gevallen zijn deze indicatoren direct te meten in het veld, maar meestal volgen zij uit een analyse van meerdere gegevens. Dit is uiteindelijk de primaire databehoefte waaraan de monitoring moet voldoen (paragraaf 4.6).

4.2 Relevantie

Het Waddengebied is drager van een groot aantal functies. Deze functies zijn voor een belangrijk deel afhankelijk van de morfologische ontwikkeling in interactie met de water- en wind-bewegingen. Ook de (relatieve) zeespiegelstijging en menselijke ingrepen hebben hier invloed op.

De hoogteligging van alle onderdelen in het Waddengebied speelt een grote rol bij de veiligheid van het gebied tegen overstromingen. De platen, kwelders, kusten en buitendelta's zorgen ervoor dat golven worden gebroken en stroomsnelheden worden afgeremd. De duinen en dijken beschermen de bewoonde delen van de eilanden tegen overstroming. De hoogteligging van de diverse gebieden kan bij een stijgende zeespiegel alleen gehandhaafd worden als deze kunnen "meegroeien" met de zeespiegelstijging. Ook lokale erosie kan leiden tot een aantasting van de veiligheid. Een voorbeeld hiervan is de erosie door een geul die aan de teen van een dijk is komen te liggen.

Verder vervult het Waddengebied een aantal belangrijke ecologische functies (kraamkamer voor vissen en schaal- en schelpdieren, fourageergebied voor vogels, rustplaats voor zeehonden, en diverse habitats, zoals kwelders en duingebieden). Deze functies zijn in sterke mate afhankelijk van de abiotische karakteristieken van het gebied, waaronder ook de morfologie.

Dit Hoofdstuk behandelt de monitoring die nodig is om zicht te hebben op de morfologische ontwikkelingen in het Waddengebied. De morfologische ontwikkeling is als volgt gerelateerd aan de Deltathema's in de andere Hoofdstukken:

- De sturende factoren, in Hoofdstuk 3, zijn in grote mate bepalend voor de morfologische ontwikkeling. Veranderingen in de meteorologie, in de waterstanden op de Noordzee of in de bodemdaling, veroorzaken een verstoring van het dynamische evenwicht in het zeegatsysteem, wat een morfologische respons teweegbrengt. Hetzelfde geldt voor de (grootschalige) menselijke ingrepen in het verleden, heden en toekomst.
- De hoogte, breedte en lengte van het voorland voor de waterkering kan grote invloed hebben op de belastingen die op de kering werken. Verder kan een verdieping van de bodem nabij de teen van een waterkering (bijvoorbeeld door een opdringende geul) consequenties hebben voor de stabiliteit van de kering. De belastingen op de waterkering en de staat van de kering zelf zijn behandeld in het Hoofdstuk Belastingen en waterkering, Hoofdstuk 5.

- Het Waddengebied is een complex en dynamisch systeem, en er bestaan nog veel kennisleemten die het maken van betrouwbare langetermijnvoorspellingen van ontwikkelingen in de morfologie nog lastig maken. Dergelijke voorspellingen zijn noodzakelijk, vooral in het kader van een veranderend klimaat. Dit vereist verder onderzoek, wat aan bod komt in Hoofdstuk 6.

4.3 Werking van het systeem

4.3.1 Het sedimentdelende zeegatsysteem

Het Waddengebied kan beschouwd worden als een keten van sedimentdelende zeegatsystemen. De morfologische onderdelen ervan (eilanden, buitendelta en kombergingsgebied) worden verondersteld in dynamisch evenwicht te zijn met de hydrodynamica of ernaar toe te ontwikkelen. Dit is goed uit te leggen aan de hand van de situatie in een geul: als de stroomsnelheden in de geul toenemen, dan zal meer sediment in beweging worden gebracht, waardoor erosie en verdieping van de geul optreden. Door deze verdieping wordt het doorstroomoppervlak van de geul groter, met als gevolg dat de stroomsnelheden weer afnemen tot sedimentatie en erosie weer met elkaar in evenwicht zijn. Voor veel delen van het sedimentdelende zeegatsysteem zijn dergelijke evenwichten tussen morfologische eenheden en hydrodynamische parameters aangetoond. In Eysink (1991) en Eysink & Biegel (1992) zijn enkele van deze (empirische) evenwichtsrelaties gekwantificeerd.

Dit impliceert dat een verstoring in de hydrodynamica, via aanpassingen in het sedimenttransport, een morfologische respons teweeg zal brengen, en andersom. Bij tijdelijke of kleine verstoringen (zoals zandwinning) zal het oude evenwicht worden opgezocht. Bij meer permanente of grote verstoringen (zoals de afsluiting van een zeearm) zal meestal een nieuw evenwicht worden gezocht. In alle gevallen zal in eerste instantie sedimentuitwisseling plaatsvinden binnen het eigen (deel)systeem, maar uiteindelijk kan ook netto uitwisseling plaatsvinden met de omringende systemen (met name de Noordzee). De afgelopen eeuwen heeft het Waddengebied de zeespiegelstijging kunnen volgen door sediment in te vangen en mee te groeien in hoogte. Dit sediment wordt in het zeegatsysteem geïmporteerd vanuit de buitendelta en de omringende Noordzeekust.

Ook op kleinere schalen binnen het sedimentdelend systeem, wordt voortdurend gereageerd op de veranderingen in het aansturende krachtenspel. Zo vindt op de eilanden uitwisseling plaats van sediment tussen vooroevers, stranden en duinen, en wordt een deel van het sediment uit deze gebieden weer doorgegeven aan de achterliggende kwelders. Op de buitendelta vindt uitwisseling plaats tussen geulen en subgetijde- en intergetijdeplaten; in de Waddenzee tussen platen, geulen en kwelders.

4.3.2 Invloed van beleid en beheer

Met de komst van Rijkswaterstaat in de 19^e eeuw op de eilanden brak een periode aan waarbij men probeerde de kustachteruitgang tot staan te brengen door duinvorming zoveel mogelijk te stimuleren. De aldus in kalme jaren opgebouwde voorraad moest dienen als buffer bij stormvloedafslag. Dit was niet altijd voldoende, waardoor de kust achteruit bleef gaan op een aantal eilanden. Na de beslissing in 1990 om de kustlijn te handhaven wordt, op die plekken waar een Basiskustlijn (BKL) is vastgesteld, kustachteruitgang gecompenseerd door middel van zandsuppleties. Het gesuppleerde zand erodeert en maakt op die manier deel uit van het sedimentdelende zeegat- en kustsysteem. De onbeschermd gebied waar geen BKL is vastgesteld (zoals buitendelta's en eilandstaarten) kunnen zich nog wel terugtrekken.

Naast het uitgangspunt van de Basiskustlijn is bovendien gesteld dat ook de zandvoorraad in het dieper gelegen kustprofiel op peil moet worden gehouden. Het structurele zandverlies in deze zone zou op termijn kunnen leiden tot een toename van het zandverlies in de ondiepe kustzone. Daarom besloot de regering in 2001 dat het voor een duurzame handhaving van veiligheid en functies in het duingebied nodig was om het zandverlies in het gehele kustfundament te compenseren.

Het kustfundament loopt van de binnenduinrand tot aan de doorgaande -20m NAP dieptelijn; het actieve zandvolume in dit hele kustfundament moet meegroeien met de zeespiegel. Het kustfundament omvat niet alleen de Noordzeekust van het Waddengebied, maar de gehele Nederlandse Noordzeekust, vanaf de Zuidwestelijke delta tot en met het Waddengebied.

Tussen al deze gebieden vindt sedimentuitwisseling plaats. Het handhaven van het volume in het kustfundament draagt daarom ook bij aan de zandvoorraad voor het Waddengebied.

Nederbragt (2006) komt op basis van de aanname van een gesloten, zanddelend kuststelsel bestaande uit kustfundament, Waddenzee en Westerschelde tot een schatting van ongeveer 12 miljoen m³/jaar bij een zeespiegelstijging van 18 cm/eeuw via de formule 'oppervlakte maal zeespiegelstijging'. Dit volume is gereflecteerd in de suppletiehoeveelheden voor het onderhoud van de kust. Op het volume van het kustfundament zelf vindt geen toetsing plaats, vooral omdat er geen kaders bestaan voor de verdeling van het zand in het kustfundament. De verdeling van het suppletiezand wordt gedaan op basis van de resultaten van de jaarlijkse kustlijnmeting.

4.3.3 Toekomstige ontwikkelingen

De toekomstige ontwikkelingen zullen, zoals ook al in Hoofdstuk 2 is geschetst, sterk afhangen van de snelheid waarmee de (relatieve) zeespiegel stijgt. Dit heeft invloed op alle onderdelen van het systeem. In Hoofdstuk 2 (paragraaf 2.6), zijn de belangrijkste verwachte ontwikkelingen voor het Waddengebied al benoemd, hieronder worden deze puntsgewijs nog eens kort herhaald:

- A. Extra druk op de zandvoorraad van de Noordzeekust, door de toegenomen zandvraag vanuit de kombergingsgebieden.
- B. Veranderingen (terugtrekking en heroriëntatie) van de buitendelta's, door de toegenomen zandvraag. Hierdoor zouden delen van de omringende eilandkusten en eilandkoppen meer blootgesteld kunnen worden aan golfbelasting.
- C. Beperkt meegroeivermogen van eilanden en vasteland, omdat de doorvoer van zand vanaf zee wordt verhinderd door aangelegde (stuif)dijken en duinen.
- D. Meegroeivermogen getijdeplaten en kwelders voorlopig nog voldoende om de zeespiegel bij te houden, maar niet onbeperkt. Bovendien nog veel onzekerheid over de invloed van de zeespiegelstijging op de verantwoordelijke sedimenttransportmechanismen.
- E. Toename van de geuldynamiek door toename in getijvolume, waardoor mogelijk frequenter problemen kunnen ontstaan met geulen in de buurt van waterkeringen.
- F. Het mogelijke passeren van tipping points (kantelpunten), waarna het systeem zich op een wezenlijk andere manier gaat ontwikkelen. Deze veranderingen zullen relatief langzaam gaan, maar over de mogelijke consequenties ervan is nog te weinig bekend.

4.4 Informatiebehoefte

Het Waddengebied biedt ruimte aan vele functies. In het kader van de morfologische ontwikkelingen is het van belang om te weten of het Waddengebied op peil kan blijven met de (relatieve) zeespiegelstijging, zodanig dat het de belangrijke functies kan handhaven. We onderscheiden hierbij op hoofdlijnen de volgende functies, met specifieke informatiebehoefte:

- 1) Behoud van areaal op de eilanden en het vasteland. Dit betekent in eerste instantie dat de kust niet achteruit mag gaan. Hiervoor is informatie nodig over de ontwikkeling van de kustlijnpositie van de zandige kust. Ten tweede is informatie over de hoogteontwikkeling van het achterland (achter de dijken en duinen) van belang. Bij een relatieve stijging van de zeespiegel komt het achterland steeds dieper te liggen, waardoor het gevoeliger wordt voor overstromingen.

- 2) Beschermende functie van het voorland en de duinen. Het voorland betreft aan de Noordzeekust de vooroever met de buitendelta's, en aan de Waddenzeekust de wadplaten en kwelders voor de dijken. Om deze functie in de toekomst te kunnen waarborgen, is informatie nodig over de volume- en hoogteveranderingen van deze gebieden, in relatie tot de zeespiegelstijging.
- 3) Natuurwaarden en ecosysteemdiensten. Om te kunnen weten of het Waddengebied in de toekomst ruimte kan blijven bieden aan dezelfde ecosysteemdiensten, is het van belang dat de abiotische karakteristieken van het systeem zo goed mogelijk behouden blijven. Hiervoor is informatie nodig over de ontwikkelingen in de morfologische karakteristieken, zoals het oppervlak aan intergetijdengebieden, kwelders en geulen. Ook veranderingen in sedimentsamenstelling kunnen hierbij van belang zijn.

4.5 Indicatoren

De hierboven genoemde informatiebehoefte voor het beheer, ten aanzien van de morfologische ontwikkeling, is te vatten in een aantal indicatoren. Deze indicatoren geven informatie over de toestand van het systeem, en zijn in sommige gevallen zelfs verbonden aan concrete beleidsdoelstellingen, of vastgestelde grenswaarden. Hieronder geven we per functiecategorie de belangrijkste indicatoren.

4.5.1 Indicatoren voor het behoud van (droog) areaal

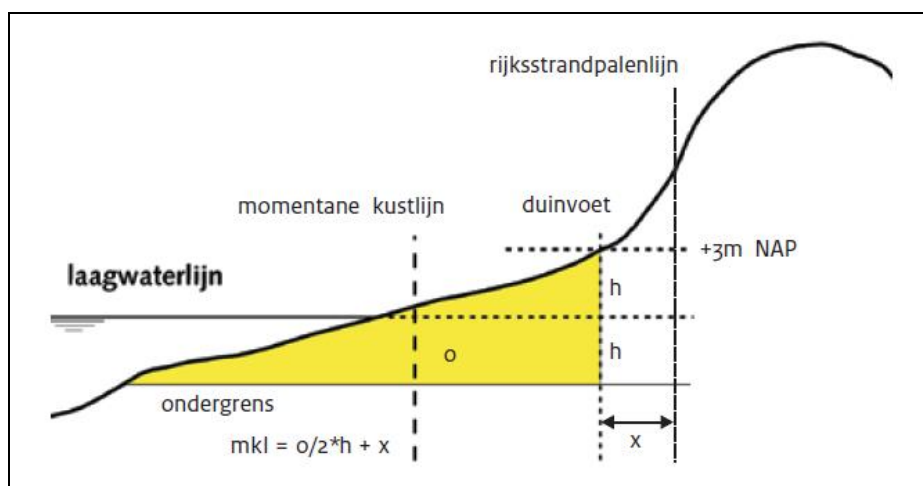
Momentane kustlijn

Jaarlijks wordt de momentane kustlijn (MKL) opgemeten, aan de hand van de profielmetingen van de kustzone (Jarkus). Op basis van een trendberekening van de MKL van de voorgaande jaren wordt de verwachte MKL voor het komende jaar bepaald. Dit is de "te toetsen kustlijn" (TKL), die niet landwaarts mag liggen van de BKL. Hierbij wordt niet alleen gekeken naar de positie van de TKL ten opzichte van de BKL, maar wordt ook gekeken of de kustlijn een landwaartse of zeewaartse trend heeft. Een klein percentage van de BKL mag overschreden worden, wanneer er geen directe sprake is van een veiligheidsrisico (bijvoorbeeld omdat de trend zeewaarts is).

De kustlijnpositie wordt bepaald aan de hand van de ligging van een bepaald zandvolume in het profiel.

Figuur 4.1 toont de gehanteerde begrenzingen voor dit zandvolume, de zogeheten rekenschijf. De kustlijnpositie is het oppervlak van de rekenschijf, gedeeld door de hoogte van de rekenschijf. Deze wordt uitgedrukt ten opzichte van de Rijksstrandpalenlijn.

Het handhaven van de kustlijn met behulp van zandsuppleties zorgt niet alleen voor een behoud van areaal, maar is bovendien ook faciliterend voor de veiligheidsfunctie van de kustzone. Het suppletiezand draagt direct bij aan de zandvoorraad in de vooroever en op het strand. Daarnaast 'verdwijnt' een deel van het suppletiezand ook naar de duinen. Het gesuppleerde zand draagt dus direct bij aan het gehele kustfundament.



Figuur 4.1 De gehanteerde rekenshijf voor de bepaling van de kustlijnpositie. De bovengrens wordt aangegeven door de duinvoet, op NAP + 3 m. De ondergrens wordt bepaald door de afstand (h) tussen de duinvoet en de gemiddelde laagwaterlijn. De ondergrens ligt vervolgens op eenzelfde afstand beneden de laagwaterlijn.

Hoogteligging achterland

De hoogteligging van het achterland is niet direct van belang voor het behoud van areaal, aangezien het achterland in eerste instantie nog beschermd ligt achter de primaire waterkering. Toch is het goed om het de hoogteontwikkelingen te monitoren: een geleidelijke verdieping van het achterland ten opzichte van de zeespiegel legt een grotere druk op de waterkering en vergroot de gevoeligheid van het gebied voor overstromingen (zie ook Hoofdstuk 5, Belastingen en waterkering).

4.5.2 Indicatoren voor de beschermende functie

Bij de beschermende functie onderscheiden we de volgende onderdelen:

- vooroever Noordzeekust (als onderdeel van het kustfundament);
- buitendelta's;
- voorland Waddenkust (platen en kwelders);
- duinen.

De beschermende functie van het voorland van de Waddenkust heeft een sterke relatie met de belastingen op de waterkering. Dit onderwerp wordt daarom behandeld in Hoofdstuk 5, Deltathema Belastingen en waterkering. Omdat de duinen onder de wettelijke toetsing van de waterkering vallen, wordt ook voor dit onderdeel verwezen naar Hoofdstuk 5.

Buitendelta

Voor het monitoren van de toestand van een buitendelta is het zinvol om de oriëntatie van de geulen, het totale volume, sedimentatie-erosie kaarten en de hoogteverdeling te evalueren. Ook de geuloriëntatie kan iets zeggen over de toestand van het zeegatsysteem, zoals bijvoorbeeld beschreven in Sha (1989).

Volumeveranderingen op de buitendelta zeggen iets over de zandimport richting het getijdebekken. De hoogteverdeling en de sedimentatie-erosiekaarten geven informatie over de eventuele vormverandering en hoogteverandering van de buitendelta. De vorm en de hoogte van de buitendelta kunnen van belang zijn voor de mate van golfdemping voor de omringende kust.

Indicatoren voor de veranderingen aan de buitendelta zijn:

- totale zandvolume buitendelta. In de officiële berekeningswijze volgens Dean & Walton (1975) wordt het kustprofiel tot -20 m aan weerskanten van de buitendelta genomen en als een doorgaand (denkbeeldig) profiel over het zeegat doorgetrokken. Dit vlak vormt het referentievlak voor de buitendelta, waarbij geulen een negatief zandvolume opleveren en platen een positief zandvolume. Het aldus berekende buitendeltavolume kan gekoppeld worden aan de empirische evenwichtsrelaties tussen buitendelta en getijprisma, zoals beschreven in Eysink & Biegel (1992). De beperking van deze methode is dat het geen vast referentievlak is, zodat het geen informatie geeft over de absolute volumeveranderingen op de buitendelta. Het definiëren van een vast referentievlak voor de begrenzing van de buitendelta is erg complex, vanwege de veranderlijkheid van de buitendelta. Naar een goede methodologie zou in de toekomst nog onderzoek naar gedaan kunnen worden, gezien de vele vragen omtrent de buitendelta's;
- totaal areaal buitendelta;
- gemiddelde en maximale hoogteligging buitendelta, ten opzichte van GZN;
- oriëntatie van de hoofdgeulen (bijvoorbeeld NW – ZW, etc.).

Volumeontwikkelingen Kustfundament Waddengebied en Noord-Holland

Zoals eerder uitgelegd, zijn de volumeontwikkelingen van het kustfundament in het Waddengebied van belang voor de veiligheid. Omdat de buitendelta van het zeegat van Texel doorloopt in het kustfundament van Noord-Holland, moet Noord-Holland ook meegenomen worden bij de analyse van de volumeontwikkelingen.

Als verticaal referentievlak voor de volumeontwikkelingen is GZN aan te houden. Voor een beter inzicht in de verdeling van dit zandvolume over de verschillende dieptezones, kunnen we dit nog opsplitsen in de zandvolumes van de volgende deelgebieden:

- vooroever, vanaf de NAP – 20 m dieptelijn tot de gemiddelde laagwaterlijn;
- nat en droog strand, vanaf de gemiddelde laagwaterlijn tot de duinvoet (NAP + 3 m contour);
- duingebieden, vanaf de duinvoet tot aan de binnenduinrand.

4.5.3 Indicatoren voor de abiotische karakteristieken

Voor het behoud van de natuurlijke karakteristieken, en de diversiteit aan habitats die daarbij horen, is het van belang dat het dynamische evenwicht in het getijdebekken zo goed mogelijk gehandhaafd blijft. De volgende indicatoren kunnen hierbij van belang zijn.

Getijdewaterstanden

Het verloop van het getij heeft een grote invloed op het zeegatsysteem. Enkele belangrijke indicatoren hierbij zijn:

- De grootte van de getijslag. Een verandering in de getijslag veroorzaakt een verandering in het getijvolume en is daarmee een belangrijke sturende factor voor morfologische veranderingen in het zeegatsysteem.
- Het verschil tussen de duur van de eb- en vloedperiode is een indicator voor de snelheden van de eb- en de vloedstroom in de geulen, en geeft aan of een (deel)systeem eb- of vloedgedomineerd is. Dit heeft vervolgens invloed op de hoeveelheid import versus export. Veranderingen in de verhouding tussen eb en vloed zijn daarom een belangrijke indicator voor het functioneren van het systeem.

Hoogteverdeling

Een belangrijke karakteristiek voor een kombergingsgebied is de hoogteverdeling, uitgedrukt in het areaal aan kwelders, intergetijdenplaten en geulen. Er bestaan empirische relaties voor het morfologische evenwicht tussen het oppervlak aan intergetijdengebied en het totale bekkenoppervlak of het geuloppervlak (Eysink, 1991). Deze verhouding kan voor elk bekken enigszins verschillen.

Wel is er een duidelijk verschil te zien tussen de zeegatsystemen in de westelijke Waddenzee (vooral Marsdiep en Vlie) en die in de oostelijke Waddenzee.

Door de afsluiting van de Zuiderzee is een relatief groot deel van het oppervlak aan ondiep gebied afgesloten van de westelijke bekkens, waarmee het oude dynamische evenwicht verstoord raakte. Veranderingen in de verhouding tussen intergetijdengebied en geuloppervlak kunnen aangeven dat het morfodynamische evenwicht van het systeem is verstoord, en dat morfologische aanpassingen te verwachten zijn.

Voor de hoogteverdeling in het bekken zijn de volgende indicatoren van belang (waarbij het gemiddeld zeeniveau als verticaal referentievlak wordt aangehouden):

- arealen en volume aan diepe geulen, beneden -5 m ten opzichte van GZN;
- arealen en volume aan ondiepe geulen, tussen -2 en -5 m ten opzichte van GZN;
- arealen en gemiddelde hoogte van subgetijde platen, tussen GLW en -2 m beneden GZN;
- arealen en gemiddelde hoogte van intergetijde platen, tussen GHW en GLW;
- arealen en gemiddelde hoogte van hoge platen en kwelders, boven GHW.

Sedimentsamenstelling

De sedimentsamenstelling op de platen is een indicator voor de hydrodynamiek en biologische activiteit op de plaat. Een vergroving van de korrel diameter kan duiden op een toename van de dynamiek (stroming, golven), en vice versa. Dit kan optreden als gevolg van (natuurlijke) verschuivingen van delen binnen het sedimentdelend systeem, zoals de migratie van geulen en platen. Dergelijke variaties zijn ook aanwezig in een 'gezond' systeem dat in dynamisch evenwicht is. Maar wanneer op grote schaal (bijvoorbeeld in het gehele zeegatsysteem) een vergroving of verfijning van het sediment wordt waargenomen, kan dit een teken zijn van een grootschalige verandering in de dynamiek van het systeem.

Indicatoren voor de sedimentsamenstelling zijn:

- mediane korrelgrootte van de zandfractie (D50);
- percentages van de verschillende fracties:
 - o klei en slib ($D < 63 \mu\text{m}$);
 - o zeer fijn zand ($63 \mu\text{m} < D < 150 \mu\text{m}$);
 - o gemiddeld zand ($150 \mu\text{m} < D < 300 \mu\text{m}$);
 - o zeer grof zand ($300 \mu\text{m} < D < 2000 \mu\text{m}$);
 - o grover materiaal ($D > 2000 \mu\text{m}$).

Sedimentatiesnelheid platen en kwelders

De sedimentatiesnelheid (of ophoogsnelheid) van platen en kwelders is niet alleen van belang voor het behoud van de natuurlijke karakteristieken, maar draagt (met name voor de kwelders) ook bij aan de beschermende functie van het voorland. De sedimentatiesnelheid wordt afgezet tegen de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt, om het al dan niet verdrinken op lange termijn vast te kunnen stellen. Ook eventuele veranderingen in de sedimentatiesnelheid zijn van belang, evenals de onderlinge verschillen tussen gebieden.

De sedimentatiesnelheid wordt over het algemeen gemiddeld over een kombergingsgebied veelal met weglating van de kwelders. De kwelders worden vaak apart beschouwd waarbij dan vaak nog een onderverdeling volgt van lage, midden en hoge kwelders. Vegetatieontwikkeling is een goed early-warning signaal voor het op termijn verdrinken van een kwelder: structurele regressie (teruggang in de vegetatiesuccessie ten opzichte van de normale ontwikkeling) over grote oppervlaktes, die niet geweten kan worden aan beheer, wijst op het onvoldoende meegroeien van de kwelder.

4.6 Databehoefte

De databehoefte voor de morfologische ontwikkeling en het meegroeivermogen van het Waddengebied is onderverdeeld in bodemligging en volumina (Tabel 4.1), sedimentkarakteristieken (Tabel 4.2), waterstanden (Tabel 4.3) en vegetatie (Tabel 4.4).

Tabel 4.1 Bodemligging en volumina

Grootheid	Nodig voor	Huidige metingen	Voldoet?	Extra metingen nodig?
Bodemligging op kustraaien	Momentane kustlijn	Jarkus en LiDAR, jaarlijkse profielmetingen op kustraaien in Noordzee kustzone, elke 200 m.	Ja	Nee
Bodemmetingen Noordzee kustzone	Volume-ontwikkelingen kustfundament, indicatoren voor de buitendelta	Vaklodingen. Elke 3 jaar op de Noordzeekust en buitendelta's. Singlebeam metingen, raaiafstand 200 m op de buitendelta's, raaiafstand 1000 m op de stabiele kust.	Ja, wel voor regulier beheer (niet voor onderzoek en pilots, zie Hoofdstuk 6)	Nee
Bodemmetingen Waddenzee	Indicatoren voor hoogteverdeling in het bekken (arealen, volume en gemiddelde hoogte van verschillende dieptezones)	Vaklodingen. Elke 6 jaar single-beam metingen binnen de kombergingsgebieden. Raaiafstand 200 m	Nee. Resolutie en nauwkeurigheid van singlebeam zijn onvoldoende	Multibeam opnamen voor nauwkeurigere diepte bepaling
Hoogteligging achterland	Hoogte van het achterland ten opzichte van de stijgende zeespiegel.	AHN: Laseraltimetrie, per gebied elke 5 tot 8 jaar. NAM: peilmerkdalingen, elke 5 jaar.	Redelijk, maar hogere nauwkeurigheid wenselijk	Nauwkeurigheid AHN metingen blijven vergroten
Hoogteligging wadplaten en kwelders	Sedimentatiesnelheid	AHN, NAM (langdurige projectmetingen), en 3-jaarlijkse hoogtemeting kwelderwerken Noord-Groningen en Friesland (RWS)	Nee. nauwkeurigheid is onvoldoende. Op de wadplaten ook onvoldoende vlakdekkend.	Uitbreiding 3-jaarlijkse nauwkeurige metingen kwelders naar Dollard en eilandkwelders (vaste raaien). Uitbreiden in-situ wadmetingen
Hoogteligging eilandstaarten en -koppen	Bepalen meegroeivermogen eilanden	1x per jaar kusthoogtemeting (LiDAR ten behoeve van Jarkus), AHN.	Nee, vaak missen delen van koppen en staarten	Uitbreiding jaarlijkse LiDAR met volledige buitendijkse gebieden van eilanden (kop en staart)
Suppletievolumes en locaties	Sedimentbeschikbaarheid, volumeontwikkeling	Wordt bijgehouden door RWS	Ja	Nee

Tabel 4.2 Sedimentkarakteristieken

Grootheid	Nodig voor	Huidige metingen	Voldoet?	Extra metingen nodig?
Korrelgrootteverdeling op de platen	Sedimentkarakteristieken: mediane korrelgrootte, slibgehalte, percentages van de verschillende (zand)fracties	Geen structurele meetprogramma's. Op projectbasis (o.a. NAM) SIBES bemonstering, 500 m x 500 m handmatig op wadplaten (Compton <i>et al.</i> , 2013).	Omvat alleen intergetijdengebied.	Uitbreiden naar subgetijdegebied, frequentie kan lager (bijvoorbeeld elke 6-10 jaar)

Tabel 4.3 Waterstanden (vertikaal getij)

Grootheid	Nodig voor	Huidige metingen	Voldoet?	Extra metingen nodig?
Waterstandsverloop (tijdreeks)	Tijdstip en hoogte van HW, LW en GWS. Duur van de eb- en vloed.	Tijdreeksen met gemiddelde waterstand per minuut op de getijdestations in het bekken en aan de Noordzeekust	Idealiter zou bij elk zeegat tenminste 1 getijdestation bij de keel, en 1 getijdestation achterin het bekken moeten zijn. Dat is nu niet overal het geval.	1) De Cocksdoorp, als getijstation voor het Eierlandse Gat 2) Holwerd, als getijstation voor het Amelander zeegat en het westelijke deel van het Friesche zeegat. 3) Voor de spreiding van de stations langs de Friese kust zou een extra getijstation tussen Harlingen en Holwerd gunstig zijn. (voor het westelijke deel van het Amelander zeegat)

Tabel 4.4 Vegetatie

Grootheid	Nodig voor	Huidige metingen	Voldoet?	Extra metingen nodig?
vegetatiesamenstelling op kwelders	early-warning voor meegroeivermogen kwelder	VEGWAD-kartering (elke 6 jaar), meetvakken in vastelandskwelders (jaarlijks)	meetvakken omvatten niet alle relevante gebieden	Meetvakken uitbreiden naar Eems-Dollard

4.7 Aanbevelingen

Behoud lodingen op Noordzee en Jarkusraaien in minimaal in huidige frequentie.

Extra behoefte:

- Hogere resolutie en nauwkeurigheid bodemmetingen Waddenzee. Singlebeam is onvoldoende, multibeam opnamen zijn gewenst voor het bereiken van een nauwkeurigere dieptebepaling.
- Hoogteligging wadplaten en kwelders: uitbreiding 3-jaarlijkse nauwkeurige metingen kwelders naar Dollard en eilandkwelders, in de vorm van vaste raaien. Uitbreiden nauwkeurige metingen van wadplaten, bijvoorbeeld met spijkermetingen of handmatige DGPS-metingen.

- Korrelgrootteverdeling op de platen wordt nu niet structureel gemeten. Recente gegevens zijn alleen uit het SIBES-project beschikbaar (Compton *et al.*, 2013). Om dit bruikbaar te maken voor het doel van DPW, is uitbreiding naar het subgetijdegebied nodig, al kan de frequentie voor DPW doelen omlaag naar bijvoorbeeld elke 6 jaar (gelijk lopend met lodingen) of 10 jaar.
- Waterstanden: idealiter zou bij elk zeegat tenminste één getijdestation bij de keel, en één getijdestation achterin het bekken moeten zijn. Dat is nu niet overal het geval. Uitbreiding zou bijvoorbeeld kunnen gebeuren bij: De Cocksdorp, als getijstation voor het Eierlandse Gat; Holwerd, als getijstation voor het Amelander zeegat en het westelijke deel van het Friesche zeegat; Voor de spreiding van de stations langs de Friese kust zou ook een extra getijstation tussen Harlingen en Holwerd gunstig zijn. (voor het westelijke deel van het Amelander zeegat).
- Om het meegroeivermogen van de eilanden te bepalen is het van belang goede vlakdekkende hoogtekarten te hebben. Daarom wordt voorgesteld om de jaarlijkse kusthoogtemetingen (LiDAR bedoeld voor Jarkusraaien) uit te breiden met de koppen en staarten van de eilanden, van Noordzee tot Waddenzee inclusief kwelder.
- Beter inzicht in de sedimentbudgetten (zand en slib) is wenselijk, maar de praktische uitvoerbaarheid is beperkt. Accurate hoogtemetingen zijn op dit moment de beste manier om sedimentbalansen te bepalen.

5 Deltathema: Belastingen en waterkering

5.1 Inleiding

Dit Deltathema behandelt de twee aspecten die van belang zijn voor het waarborgen van de veiligheid tegen overstromen: (1) de belasting op de kering en (2) de sterkte van de kering. De twee onderwerpen van dit Deltathema worden in dit Hoofdstuk afzonderlijk behandeld, waarbij per onderdeel dezelfde indeling wordt aangehouden als in de andere Deltathema's (zie ook de leeswijzer in Hoofdstuk 1.4). Relatief nieuwe ontwikkelingen in DPW zoals innovatieve dijkconcepten, meerlaagsveiligheid en de veiligheid van buitendijkse gebieden is niet of slechts beperkt meegenomen, omdat de besluitvorming hierover nog moet plaatsvinden.

5.2 Belastingen

5.2.1 Relevantie

Het Waddengebied is met dijken en duinen (de waterkering) beschermd tegen overstroming door de zee. Dijken beschermen de vastelandskust van Friesland, Groningen en Noord-Holland, en de waddenzijde van de dijkeringen op de eilanden. Duinen beschermen de Noordzeezijde van de eilanden. Bij het waarborgen van de veiligheid tegen overstromen zijn twee aspecten van belang: (1) de belasting op de kering en (2) de sterkte van de kering. De belasting op de kering is verder uitwerkt in deze paragraaf. De sterkte van de kering komt aan bod in paragraaf 5.3.

De hydraulische randvoorwaarden zijn de belastingen door golven en waterstand op de waterkeringen onder maatgevende omstandigheden. De maatgevende omstandigheden zijn de omstandigheden die horen bij het gekozen veiligheidsniveau. Dit is een berekende belasting, waartegen de waterkering bestand moet zijn, bijvoorbeeld de eens in de 4.000-jaar storm. Hydraulische randvoorwaarden zijn aan verandering onderhevig, omdat er (1) veranderingen in het fysische systeem (de zogenaamde sturende factoren) kunnen plaatsvinden (zoals bodemveranderingen en relatieve zeespiegelstijging), (2) voortschrijdend inzicht kan leiden tot aanpassing van de berekeningsprocedure en het bijbehorende instrumentarium, en (3) extreme gebeurtenissen kunnen optreden die de statistieken beïnvloeden. Dit is reden dat bij wet is vastgelegd dat de Hydraulische Randvoorwaarden periodiek moeten worden afgeleid en vastgesteld. In de Waterwet (2009) staat een periode van 6 jaar vermeld, waarin een toetsing van alle primaire keringen moet zijn uitgevoerd met het voor de start van de toetsperiode beschikbaar gestelde toetsinstrumentarium. In de nieuwe Waterwet wordt overgegaan op een continue toetsing, waarbij een rapportage verplichting van eens per 12 jaar geldt. Per 1 januari 2017 moeten daartoe nieuwe HR zijn vastgesteld.

Omdat een van de doelen van het deltaprogramma is de veiligheid op langere termijn (50-100 jaar) te garanderen, is het ook zaak vinger aan de pols te houden bij trends in sturende factoren en morfologie die de grootte van de hydraulische belastingen beïnvloeden, vooral op de langere termijn. Als trends in sturende factoren en morfologische ontwikkeling tijdig worden gesignaleerd, kan worden bekeken wat voor effect (extrapolatie van) deze trend betekent voor de hydraulische belasting op de waterkeringen. Hier kan dan met een herontwerp van waterkeringen op worden geanticipeerd. Het Deltathema 'Belastingen en Waterkering' heeft daarom een sterke link met het Deltathema 'Sturende Factoren' (Hoofdstuk 3), en het Deltathema 'Morfologische ontwikkeling' (Hoofdstuk 4).

5.2.2 Beschrijving van het systeem

Maatgevende omstandigheden

De maatgevende omstandigheden, waaraan de kering moet voldoen, zijn afhankelijk van het gekozen veiligheidsniveau.

Door de Tweede Deltacommissie (2008) zijn aanbevelingen gedaan om het beschermingsniveau van waterkeringen te vergroten, teneinde de kans op overstroming en daarmee het risico te verkleinen. De veiligheidsnormen per dijkkringgebied zullen in de nabije toekomst worden gewijzigd in overstromingskansen per dijkkringtraject. Een voorstel daarvoor is geformuleerd in het Deltaprogramma, deelprogramma Veiligheid (DP 2015 en DP Veiligheid⁶). De voorgestelde aanpassing van de veiligheidsnormen kan nog wijzigen wanneer de reacties van de betreffende regionale overheden daartoe aanleiding geven.

De overstromingskans vormt de basis voor de eisen die we aan de waterkering stellen. Dit is de kans dat een waterkering rond een gebied op één of meer plaatsen faalt. Hierbij kijken we dus niet alleen naar de kans dat de waterstand hoger komt te staan dan de ontwerpwaterstand, maar kijken we ook explicieter naar de bezwijkmechanismen die kunnen leiden tot het falen van de kering. Voor elk dijkkringgebied zijn overstromingsscenario's op te stellen. Een scenario wordt gekarakteriseerd door het optreden van bepaalde (combinaties van) faalmechanismen en/of het falen van bepaalde (combinaties van) dijkvakken. Ook de belastingcondities waarbij dit gebeurt kunnen verschillen. Voor elk scenario geldt dat aan het gekozen veiligheidsniveau moet worden voldaan. Uitgaande van de verwachte gevolgen per scenario, leidt dit voor elk scenario tot een maximaal toelaatbare overstromingskans.

Typen belastingen op de waterkering

De hydraulische belasting op waterkeringen is een combinatie van een waterstand en een golfbelasting. De waterstand wordt gevormd door de astronomische waterstand en eventuele verhogingen (verlagingen) als gevolg van wind, luchtdruk en (op kleinere schaal) de golven. Vooral gedurende stormen kan de waterstand significant hoger zijn dan de astronomische waterstand. De golven resulteren bij dijken in een bepaalde golfloop ('tong' van water tegen de dijk) en eventueel golfoverslag. Een beperkte mate van golfoverslag kan toelaatbaar zijn en hoeft niet meteen te leiden tot het falen van de dijk. Onder invloed van golven kan er duinafslag optreden. Dat betekent dat een deel van het duin 'in de golven verdwijnt'.

De astronomische waterstand, ook wel getij genoemd, is sterk afhankelijk van de grootschalige en lokale bodemligging en de geometrie van de bekkens. Daarnaast speelt de ruwheid van de bodem (korrelgrootte, bodemvormen, vegetatie) een rol. De grootschalige bodemligging in combinatie met de geometrie van de bekkens beïnvloedt de voortplanting van het getij in het Waddengebied. Convergentie en gedeeltelijke reflectie aan de landwaartse zijde van het bekken zorgen voor een verhoging van de getijslag, terwijl bodemwrijving tot demping van het getij leidt. Per saldo zijn de astronomische waterstanden daardoor achter in het bekken (dus aan de Friese en Groningse kust, en de Afsluitdijk) hoger dan in het zeegat (vgl. getijslag Den Helder 1,4 m met Harlingen 1,9 m). Het getij wordt gevormd door een groot aantal sinusvormige golven, ook wel componenten genoemd, met elke een eigen lengte (frequentie), amplitude en fase. Sommatie van deze componenten leidt o.a. tot langdurigere variaties in het getij, zoals de spring-doodtij cyclus en de 18,6-jarige cyclus. Bij het analyseren van langjarige meetreeksen en het afleiden van trends is het van belang om ook rekening te houden met de laatstgenoemde.

Windopzet is het gevolg van de kracht die de wind uitoefent op het water, waardoor het water wordt opgestuwd. Dit veroorzaakt een gradiënt in de waterstand. Op andere plekken kan de waterspiegel als gevolg hiervan juist dalen, maar dit is vanuit het oogpunt van waterveiligheid niet relevant. De windopzet is afhankelijk van de strijklengte van de wind, d.w.z. de afstand waarover de wind over het water waait, de windsnelheid, de windrichting, de duur dat de wind een bepaalde snelheid en richting heeft, en de waterdiepte. De strijklengte wordt bepaald door de vorm van het bekken in combinatie met de windrichting. Verder is het van belang te melden dat voor de uiteindelijke waterstand in de Waddenzee zowel de windopzet in de Waddenzee zelf als ook de windopzet op de Noordzee van belang is.

⁶ Beschikbaar na 16 september 2014 op www.deltacommissaris.nl

De windopzet op de Noordzee kan enkele meters bedragen (ongeveer 3 m tijdens de 1953-storm), terwijl de windopzet in de Waddenzee zelf enkele decimeters kan bedragen, bovenop de windopzet op de Noordzee. Onder extreme omstandigheden is de bijdrage van de windopzet aan de totale waterstand beduidend groter dan de bijdrage van het getij.

Verschillen in atmosferische druk leiden op grotere ruimteschaal tot verhogingen en verlagingen in de waterstand. Het wateroppervlak zou bij afwezigheid van getij en wind daardoor niet horizontaal zijn, maar bestaan uit een heuvelachtig landschap, met bergen en dalen van honderden kilometers in doorsnede en een verticale uitwijkingen in de orde van decimeters.

Korte golven (windgolven) ontstaan door windwerking op het wateroppervlak. De golven die de kust bereiken kunnen lokaal opgewekt zijn, of van verder weg komen (deining). De Noordzeezijde staat onder invloed van beide, maar de buitendelta's houden de Noorzeegolven grotendeels buiten de Waddenzee. Golven die lokaal in de Waddenzee worden opgewekt zijn afhankelijk van de windsnelheid en de strijklengte, en hebben een relatief korte periode, in de orde van 3-5 seconden. De golven worden vlak voor de dijk diepte-gelimiteerd, dat wil zeggen dat ze steiler worden en breken wanneer de golven te groot worden ten opzichte van de waterdiepte. Naast de lokaal opgewekte korte golven zijn er in de Waddenzee ook langere golven met een periode in de orde van 5 -10 seconden, die vanaf de Noordzee door de zeegaten kunnen komen. In de Oostelijke Waddenzee kunnen deze golven het vasteland bereiken, in de Westelijke Waddenzee vormen de buitendelta's een natuurlijke buffer en dringt een beperkt deel de zeegaten in om vervolgens snel te dissiperen op de ondiepe platen. Deze lange golven verliezen energie door bodemwrijving en worden daardoor vooral beïnvloed door de grootschalige bodemligging (inclusief complexe structuren van platen en geulen), door bodemvormen en door sedimenteigenschappen (ruwheid). Daardoor, en vanwege de genoemde afscherpende werking van de buitendelta's, hebben deze lange golven minder energie dan de lokaal opgewekte golven en daardoor een kleinere bijdrage aan de significante golfhoogte. Hun aanwezigheid leidt tot een verhoging van de gemiddelde golfperiode, wat op zijn beurt resulteert in een verhoogde golfoploop en eventuele golfoverslag. Daarnaast leiden niet-lineaire wisselwerkingen tussen diverse golfcomponenten in ondiep water tot een herverdeling van energie over de frequentieruimte. Dat betekent dat zowel korte golven als lange golven (*infra-gravity waves*) worden gegenereerd. Deze laatste klasse heeft een typische periode variërend van 20 tot 100 s en kan dus gezien worden als een mechanisme dat aanleiding geeft tot een korte periodieke verhoging en verlaging van de waterstand voor de dijk. Op die manier hebben ze ook weer invloed op de golfaanval van korte golven op de dijk.

Golfopzet is een extra verhoging van de waterstand tegen duin of dijk (dicht bij de landwaartse begrenzing van de watermassa) als gevolg van het breken van golven. De afname van golfenergie wordt gecompenseerd door een toename in de waterstand (Holthuijsen, 2007). De orde grootte van golfopzet bedraagt typisch enkele decimeters.

Golfoploop vindt plaats op de dijk, en is een dunne waterlaag in een oplopende tong. De hoogte van de golfoploop is afhankelijk van:

- de golfhoogte aan de teen van de dijk,
- de golfperiode aan de teen van de dijk,
- de invalshoek van golfaanval,
- de hellingshoek van het talud van de dijk,
- de aan- of afwezigheid van een berm,
- de ruwheid van het talud,

De hoogte van de golfoploop die door 2% van de golven wordt overschreden is vaak in de orde van de golfhoogte.

Golfoverslag is alleen van belang bij dijken en wordt naast de factoren genoemd bij golfoploop ook bepaald door de vrije kruinhoogte van de dijk. Voor de toetsing van dijken wordt uitgegaan van de golfoploop die door 2% van de golven wordt overschreden. Als de kruinhoogte van de dijk lager is dan de golfoploophoogtes van de hoogste golven, vindt er golfoverslag plaats.

De hoeveelheid golfoverslag die toelaatbaar is, hangt af van de bekleding van het binnentalud van de dijk en varieert tussen de 0,1 l/m/s tot 10 l/m/s.

Afleiding extreme waterstand

Voor verschillende dijkeringen zijn verschillende overstromingsrisico's afgeleid. Risico is gedefinieerd als kans op een overstroming vermenigvuldigd met de gevolgen van deze overstroming, uitgedrukt in slachtoffers en economische schade. De waterstanden behorende bij de gekozen overschrijdingsfrequentie (nagenoeg gelijk aan de genoemde kans) zijn bepaald volgens de extreme waarden-theorie op basis van de beschikbare meetreeksen van waterstanden sinds omstreeks 1885.

Een belangrijke beperking is dat de extreme waarde-statistiek weinig inzicht geeft in de fysieke karakteristieken van de achterliggende stormen die deze veroorzaken. We weten dat stormen in Nederland vanuit het noordwesten het meest gevaarlijk zijn, maar hoe deze stormen eruit zien in termen van luchtdruk, omvang en baan van de storm, is niet goed bekend. Probabilistische benaderingen gebaseerd op Monte Carlo weersimulaties vormen een veelbelovende aanpak om schattingen van extreme belastingen te verbeteren. Daartoe zijn dan gedetailleerde monitoringsdata van de stormen op de Noordzee van belang. Extra metingen in de Waddenzee zouden, naast metingen op de Noordzee zelf, een kleine bijdrage aan kunnen leveren aan het karakteriseren van extreme stormen.

Het basispeil is het stormvloedpeil behorende bij een overschrijdingsfrequentie van 1/10.000 jaar en is voor het eerst afgeleid na het optreden van de watersnoodramp in 1953. In 1985 heeft een herziening van de basispeilen aan de hand van de op dat moment beschikbare meetreeksen en modelleringstechnieken plaatsgevonden. De basispeilen zijn beschikbaar voor een aantal stations langs de Nederlandse kust, zie *Tabel 5.1*. Het ontwerppeil is het stormvloedpeil behorende bij de normfrequentie van de dijkkring. Bovenop de basis- en ontwerppeilen wordt een toeslag berekend voor de stijging in Gemiddelde HoogWaterstanden (GHW) in de periode van 1985 tot heden. De stijging in GHW is iets groter dan de zeespiegelstijging zelf. Dit komt door de amplificatie van het getij in de bekkens. Het ontwerppeil verhoogd met de stijging in GHW wordt het toetspeil genoemd (HR2006: Min. V&W, 2007a). Bij duinen spreken we van een rekenpeil. Het rekenpeil is gelijk aan het toetspeil plus 2/3 deel van de decimeringshoogte. De decimeringshoogte is het verschil tussen het toetspeil en de waterstand bij een 10x lagere overschrijdingsfrequentie dan de normfrequentie (HR2006: Min. V&W, 2007a). Opgemerkt moet worden dat deze definities relevant waren in de overschrijdingskansbenadering zoals deze tot WT12011 is gehanteerd. Bij de overstap naar overstromingskansen en nieuwe normen is het vooralsnog onduidelijk of deze peilen nog worden gehanteerd. Mogelijk dat ze als referentiewaarden worden gebruikt.

Tabel 5.1 Basispeilen 1985 voor alle stations

Station	Basispeil 1985
Terneuzen	NAP + 6.00 m
Hansweert	NAP + 6.25 m
Vlissingen	NAP + 5.45 m
Hoek van Holland	NAP + 5.00 m
IJmuiden	NAP + 5.10 m
Den Helder	NAP + 4.40 m
Harlingen	NAP + 5.00 m
Delfzijl	NAP + 6.15 m
West Terschelling	NAP + 4.30 m

Toekomstige ontwikkelingen

Toekomstige ontwikkelingen in de sturende factoren (zie ook Hoofdstuk 2 en 3), zoals zeespiegelstijging en meteo, kunnen leiden tot een verandering in hydraulische randvoorwaarden: het toetspeil op de dijk en het rekenpeil bij duinen zal direct veranderen. Hieronder vatten we de mogelijke effecten van deze veranderingen samen.

Het verkleinen van buitendelta's kan leiden tot minder demping van golven vanaf de Noordzee, waardoor er meer golfaanval komt op de eilandkoppen en meer/hogere golven de bekkens in kunnen propageren. Het zal ook invloed hebben op de getijdoordringing.

Zeespiegelstijging kan leiden tot een verschuiving van de amfidromische punten (plaatsen waar het verticale getij ongeveer 0 is) in de Noordzee, waardoor de getijslag langs de kust kan veranderen (Weisse et al., 2012). Dit effect kan nog versterkt worden verder in de bekkens (Weisse et al., 2012). Een goede kwantificering van dit effect ontbreekt nog.

In hoeverre zeespiegelstijging leidt tot een verhoging van de golfhoogte tijdens stormen, is afhankelijk van de lokale waterdiepte en dus de vraag in welke mate de bekkens mee kunnen groeien met zeespiegelstijging. Grotere windopzet tijdens stormen kan wel direct leiden tot hogere golven tijdens stormen, aangezien deze tijdelijke stijging in waterstand niet wordt gecompenseerd in een eventuele verhoging van de bodemligging (Weisse et al., 2012).

Grootschalige veranderingen in de atmosfeer kunnen leiden tot verschuiving van de positie van de North Atlantic storm track, de baan waarlangs stormen zich voortplanten in het noordelijke deel van de Atlantische zee, met verandering in stormklimaat als gevolg. Of dit daadwerkelijk zal optreden is nog onzeker. Momenteel zijn er geen aanwijzingen in de waarnemingen of in de klimaatscenario's voor een systematische trend in stormen, wel is de natuurlijke variabiliteit groot.

5.2.3 Informatiebehoefte

De informatiebehoefte die volgt uit de wettelijke toetsing van de waterkeringen (WTI project) betreft het nauwkeurig kunnen bepalen van waterstanden, golfcondities, wind en stroming onder extreme omstandigheden. Deze gegevens (ook onder niet-maatgevende omstandigheden) zijn ook nodig voor de kalibratie en validatie van de rekenmodellen die worden gebruikt voor de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden.

Daarnaast is er een verbeteringslag nodig voor de modellen, bijvoorbeeld om de golfvoortplanting onder extreme omstandigheden beter te voorspellen. Het verbeteren van de modellen (zowel qua nauwkeurigheid als het reduceren van modelonzekerheden) voor stormomstandigheden is een van de doelen van het programma WTI (Wettelijk Toets Instrumentarium, voorheen SBW). Om de modellen te verbeteren, zijn verschillende parameters van belang. Hieronder worden de parameters golven, wind, bodemligging en stroming toegelicht.

5.2.4 Indicatoren

De hydraulische randvoorwaarden per waterkeringsvak bestaan uit:

- het toets- of rekenpeil,
- de golfcondities:
 - de significante golfhoogte (H_{m0} of H_s),
 - de gemiddelde golfperiode ($T_{m-1,0}$),
 - de piekperiode T_p
 - en de hoek van golfinval.

Voor het toets- en rekenpeil zijn de basispeilen nodig en de gemiddelde stijging in GHW. De basispeilen kunnen wijzigen bij het optreden van extreme waterstanden, waardoor de analyse van opgetreden waterstanden wijzigt. Voor de toetsing van duinen zijn ook waterstanden met een kans van optreden die 10x lager is dan de wettelijke overschrijdingsfrequentie nodig.

De golfcondities (golfhoogte, golfperiode en golfrichting) worden bepaald met het golfmodel SWAN, veelal geforceerd door een uniform windveld. Met behulp van een probabilistische rekenmethode worden de maatgevende golfcondities bepaald.

Binnen de probabilistische aanpak worden de combinaties van waterstand en golfcondities bepaald die een faalkans gelijk aan de overschrijdingskans hebben. Veelal wordt de combinatie met de grootste kans van voorkomen beschouwd als de maatgevende combinatie. Het komt ook voor dat die golfcondities op de faalgrens worden beschouwd waarbij de waterstand gelijk wordt gekozen aan het toetspeil. In de operationele voorspellingen wordt niet met een uniform windveld gerekend. Daar maakt men gebruik van de actuele wind, voorspeld door het atmosfeermodel HIRLAM of HARMONIE. Momenteel zitten we in een transitiefase naar het meer geavanceerde model HARMONIE.

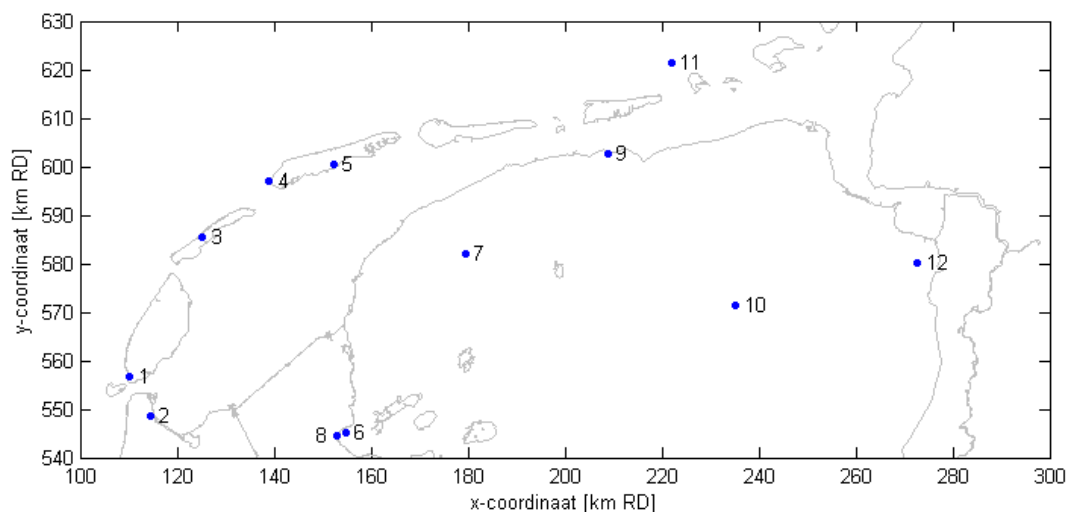
Golven

De golfmetingen in het Waddengebied binnen het LMW (Landelijk Meetnet Water) bestaan uit twee stations bij de Noordzeekust, waar richtingsafhankelijke golfspectra worden gemeten (zie golfboeien Eierlandse Gat en Schiermonnikoog Noord). Daaruit kunnen golfparameters als significante golfhoogte, periodematen als bv. de piekperiode en gemiddelde golfrichting en richtings spreiding worden bepaald. In het kader van het WTI project worden aanvullende golfmetingen uitgevoerd in de Waddenzee, om meer inzicht te krijgen in de golfdoordringing van Noordzeegolven in de Waddenzee en opwekking en voortplanting van lokale golven.

Wind

Wind heeft een grote invloed op de opgewekte golven en de windopzet. Daarom is het belangrijk om een goed ruimtelijk beeld van de windsnelheid en -richting te hebben. Het effect van stormen en daarmee de hydraulische belastingen varieert in ruimte en in de tijd (Caires et al., 2012). De ruwheid van het wateroppervlak heeft grote invloed op de windsnelheid. Deze ruwheid is verschillend voor land en water, maar zelfs boven open water is geen uniforme waarde aan te geven. Hogere golven leiden tot een hogere ruwheid.

De windgegevens (van KNMI en WTI) worden onder meer gebruikt voor de validatie van hoge resolutie atmosferische modellen (zoals HARMONIE), die na WTI 2017 worden gebruikt voor het afleiden van de hydraulische randvoorwaarden (Caires et al., 2012). Ook het temperatuurverschil tussen lucht en water/ondergrond is van invloed op de windsnelheden (Caires et al., 2012). Voor WTI 2017 zal de vigerende aanpak worden gehanteerd en zullen modellen voor waterbeweging en golven met een uniforme windsnelheid worden aangestuurd.



- | | | |
|------------------|--------------------------|-------------------|
| 1 = TEXELHORS MM | 5 = HOORN (TERSCHELLING) | 9 = LAUWERSOOG |
| 2 = DE KOOY | 6 = STAVOREN | 10 = EELDE |
| 3 = VLIELAND | 7 = LEEUWARDEN | 11 = HUIBERTGAT |
| 4 = TERSCHELLING | 8 = STAVOREN | 12 = NIEUW BEERTA |

Figuur 5.1 Huidige meetstations van het KNMI voor wind in en om het Waddengebied (zie ook bijlage C).

Bodemligging

Momenteel wordt de bodemligging in de bekkens elke zes jaar opgenomen en aan de buitenzijde van de eilanden elke 3 jaar. Daarnaast worden jaarlijks bodemmetingen van de duinen tot ongeveer 5 m diepte (JarkUS-metingen) en lodingen van de vaarwegen uitgevoerd. Aangezien de hydraulische randvoorwaarden hooguit eens per zes jaar worden afgeleid, wordt de bodemligging ten behoeve hiervan vaak genoeg opgenomen. In verband met de capaciteit van meetschepen en de hoge kosten wordt de bodemligging echter niet in één jaar voor het hele gebied opgenomen, maar wordt elk jaar een deel gedaan. Daarbij bestaat het risico dat de morfologie tussen opname en berekeningen veranderd is. Daarom is het aan te bevelen om dynamische gebieden en gebieden die grote invloed op de hydraulische randvoorwaarden hebben, in sommige gevallen vaker op te nemen. Het gaat hier met name om voorlanden.

Stroming

Waterstand en golven in de Waddenzee worden beïnvloed door stroming. Het meten van stroming kan gebruikt worden voor verbetering van de waterstands- en golfmodellen. Daarnaast zijn stromingsmetingen van belang voor vraagstukken rondom sedimenttransporten, troebelheid en ecologie. Het metingen van stroming is praktisch gezien wel lastig, door grote variatie in tijd en ruimte. In Hoofdstuk 6 wordt aanbeveling gedaan voor extra monitoring ten behoeve van modelontwikkeling.

Bodemruwheid

Bodemruwheid wordt nu uit praktische overwegingen meestal gebruikt als kalibratieparameter (en niet als invoerparameter) bij modellering van de hydrodynamica. Veranderingen in de bodemsamenstelling, bijvoorbeeld verslibbing of begroeiing door vegetatie, kunnen wel leiden tot een gladdere of ruwere bodem. Het effect hiervan is onder maatgevende omstandigheden voor golven secundair ten opzichte van de bodemligging zelf (voor de waterkering worden golven onder maatgevende omstandigheden gelimiteerd door de waterdiepte). Voor getij kan dit wel belangrijk zijn.

Er zijn voor de hydraulische randvoorwaarden in dit Deltathema geen grenswaarden omschreven, omdat uit de toetsing van keringen aan de hydraulische randvoorwaarden moet blijken of er knelpunten optreden en de waterkering wordt afgekeurd.

5.2.5 Databehoefte

Waterstanden

- Analysevariabelen: waterstanden
- Meetvariabelen: waterstand
- Meetlocaties: huidige locaties LMW
- Meetfrequentie: continue (elke 10 minuten)
- Meettermijn: doorlopend
- Meetmethode: stappenbaak
- Databronnen/-beheer: RWS
- Datatoegang: live.waterbase.nl, openearth.deltares.nl, helpdesk water
- Huidige meetinspanning voldoet: ja
- Aanbeveling: In het Waddengebied zelf wordt de waterstand op voldoende locaties gemeten. Aandachtspunt: continuïteit van de satellietmetingen. Tot dusver zijn deze niet in standaard programma's opgenomen maar wordt elke satelliet *ad-hoc* gepland.

Zeeniveau

De databehoefte aan zeeniveau metingen in het Waddengebied is aangegeven in *Tabel 5.2*. Omdat juist de mate van zeespiegelstijging van uitzonderlijk belang is voor de toekomst van het Waddengebied staan in *Tabel 5.3* de behoeftes vanuit het Deltaprogramma Wadden aan wereldwijde zeeniveaumetingen.

Tabel 5.2 Gebruikerseisen aan waterstand/zeeniveau metingen in het Waddengebied

<i>Soort criterium</i>	<i>Gebruikerseisen</i>	<i>Opmerkingen</i>
doel	meten storm surges, relatieve zeespiegelstijging, veranderingen in getij	
ruimtelijke resolutie	orde 20 km + belangrijke locaties zoals havens	Uitval van 1 station bij storm moet kunnen worden opgevangen door metingen andere stations.
resolutie in tijd	10 min voor stormvloed product 1 maand voor zeeniveau product	
beschikbaar binnen	10 min voor stormvloed product 2 maanden voor zeeniveau product	
variabelen	relatief waterniveau t.o.v. referentie	
nauwkeurigheid	5 cm voor 10 min waardes 1 cm in jaargemiddeldes systematisch verloop t.o.v. referentie minder dan 5mm / 10 jaar	Voldoet voor stormvloeden. Anders versnelde zeespiegelstijging slecht detecteerbaar

Tabel 5.3 Gebruikerseisen aan metingen gemiddelde en patroon mondiale zeespiegelstijging

Soort criterium	Gebruikerseisen	Opmerkingen
doel	meten wereldwijde zeespiegelstijging, veranderingen getij Noordzee	Primair zeespiegelstijging Veranderingen getij Noordzee helpen bij bepalen hydraulische randvoorwaardes.
type	- minimaal 1 satelliet in Jason klasse - mondiaal netwerk tide gauges	Satelliet voor wereldwijde dekking, patroon en extra precisie, tide gauges voor referentie.
ruimtelijke resolutie	300 km	Nodig om link met Noordzee en Waddengebied te kunnen leggen
resolutie in tijd	1 maand	
beschikbaar binnen	1 maand	
variabelen	waterniveau tov geoïde (satelliet) waterniveau tov referentie (tide gauges)	
nauwkeurigheid	5mm / 10 jaar in wereldgemiddeld zeeniveau 5 cm in gemiddelde niveau op schalen 300 km 2 cm in getij Noordzee	

Golven

- Analysevariabelen: significante golfhoogte, piekperiode, golfrichting
- Meetvariabelen: golfspectrum incl. golfrichting
- Meetlocaties: Op de Noordzee bij Eierlandse Gat, Schiermonnikoog Noord, Borkum en Amelander Zeegat (AZB11, verplaatsing zeewaarts), en minimaal 3 locaties in de Waddenzee
- Meetfrequentie: continue (elke 20 minuten)
- Meettermijn: doorlopend
- Meetmethode: (directional) waverider (nabij de dijk ook andere instrumenten mogelijk)
- Databronnen/-beheer: RWS, WTI

- Datatoegang: live.waterbase.nl, openearth.deltares.nl, helpdesk water, WTI
- Huidige meetinspanning voldoet: niet in LMW, i.c.m. WTI wel.
- Aanbeveling: opnemen van enkele WTI golfboeien in het permanente LMW (Wenneker, 2014).

Meteo (zie ook Deltathema 'Sturende factoren')

- Analysevariabelen: windkracht, windrichting, buistoten, luchttemperatuur, watertemperatuur
- Meetvariabelen: windsnelheid gemiddeld per 10 minuten, windrichting gemiddeld per 10 minuten, luchttemperatuur, watertemperatuur
- Meetlocaties: in elk geval: DZGT (Dantziggat), NBLG (Noorderbalgen), L9, TSNZ (Terschelling Noordzee), AWG (Ameland Wierumergronden), Terschelling-Hoorn, Nes) (zie bijlage C).
- Meetfrequentie: continue
- Meettermijn: doorlopend
- Meetmethode: anemometer
- Databronnen/-beheer: RWS, WTI
- Datatoegang: live.waterbase.nl, openearth.deltares.nl, helpdesk water, WTI

- Huidige meetinspanning voldoet: KNMI niet, i.c.m. WTI wel.
- Aanbeveling: handhaven van de WTI meetstations bij Dantziggat en Noorderbalgen (Wenneker, 2014).

Bodemligging (zie ook Deltathema 'Morfologie')

- Analysevariabelen: bodemligging
- Meetvariabelen: bodemhoogte
- Meetlocaties: ruimtelijk dekkend
- Meetfrequentie: buitenzijde eilanden: elke 3 jaar, bekkens: elke zes jaar, vaargeulen: minstens eens per jaar. Voor dynamische gebieden: hogere frequentie wenselijk.
- Meettermijn: doorlopend
- Meetmethode: lodingen en LiDAR
- Databronnen/-beheer: RWS
- Datatoegang: openearth.deltares.nl, helpdesk water
- Huidige meetinspanning voldoet: ja, maar de datasets zijn niet coherent in de tijd.
- Aanbeveling: frequenter opnemen van de bodemligging in dynamische gebieden en gebieden die grote invloed op de hydraulische randvoorwaarden hebben. Het gaat hier met name om voorlanden.

Stroming

- Analysevariabelen: stroming, watertemperatuur, saliniteit
- Meetvariabelen: stroomsnelheid, stroomrichting, watertemperatuur, saliniteit
- Meetlocaties: Eemsmonding
- Meetfrequentie: stroomsnelheid 13-uursmetingen of projectgebonden, watertemperatuur en saliniteit: continue (elke 10 minuten)
- Meettermijn: doorlopend
- Meetmethode: ADCP, thermometer, geleidendheidsmeter
- Databronnen/-beheer: RWS
- Datatoegang: live.waterbase.nl, openearth.deltares.nl, helpdesk water
- Huidige meetinspanning voldoet: nee, meer metingen nodig voor verbetering waterstands- en golfmodellen.
- Aanbeveling: zie Hoofdstuk 6

5.3 Waterkering

5.3.1 Relevantie

Het Waddengebied is met dijken en duinen beschermd tegen overstroming door de zee. Dijken beschermen de vastelandskust van Friesland, Groningen en Noord-Holland, en de waddenzijde van de dijkkringen op de eilanden. Duinen beschermen de Noordzezijde van de eilanden. Voor deze bescherming moet de fysieke staat van de keringen in orde zijn, dat wil zeggen: voldoen aan de eisen die er wettelijk aan gesteld worden. In de Waterwet (voorheen Wet op de waterkering) is vastgelegd dat periodiek (eerst elke 5 jaar, later elke 6 jaar, wordt elke 12 jaar) "de relatie tussen de hoogwaterstanden en overschrijdingskansen" moet worden vastgesteld "waarvan de beheerder van de desbetreffende primaire waterkering moet uitgaan bij de bepaling van het waterkerend vermogen". De periodieke vaststelling van de hydraulische randvoorwaarden voor de toetsing is ingevoerd om nieuwe inzichten, extreme situaties die de statistieken beïnvloeden en ontwikkelingen in het fysische systeem te kunnen meenemen in de toetsing. Bij de komende eerste formele 12-jaarlijkse formele toetsing in 2017 in het kader van de Waterwet en de continue toetsing in het kader van de actieve zorgplicht wordt gekeken of de sterkte van primaire waterkering voldoet aan de hydraulische belasting behorende bij het gewenste veiligheidsniveau (de vastgestelde overschrijdingsfrequentie).

Daarbij zal tevens de overstap worden gemaakt van normering op basis van overschrijdingsfrequenties van hoogwaterstanden per dijkkringgebied naar overstromingskansen per dijkkringtraject.

De toetsing voor dijken is anders dan die voor duinen, maar voor beide toetsingen moeten hydraulische randvoorwaarden worden afgeleid.

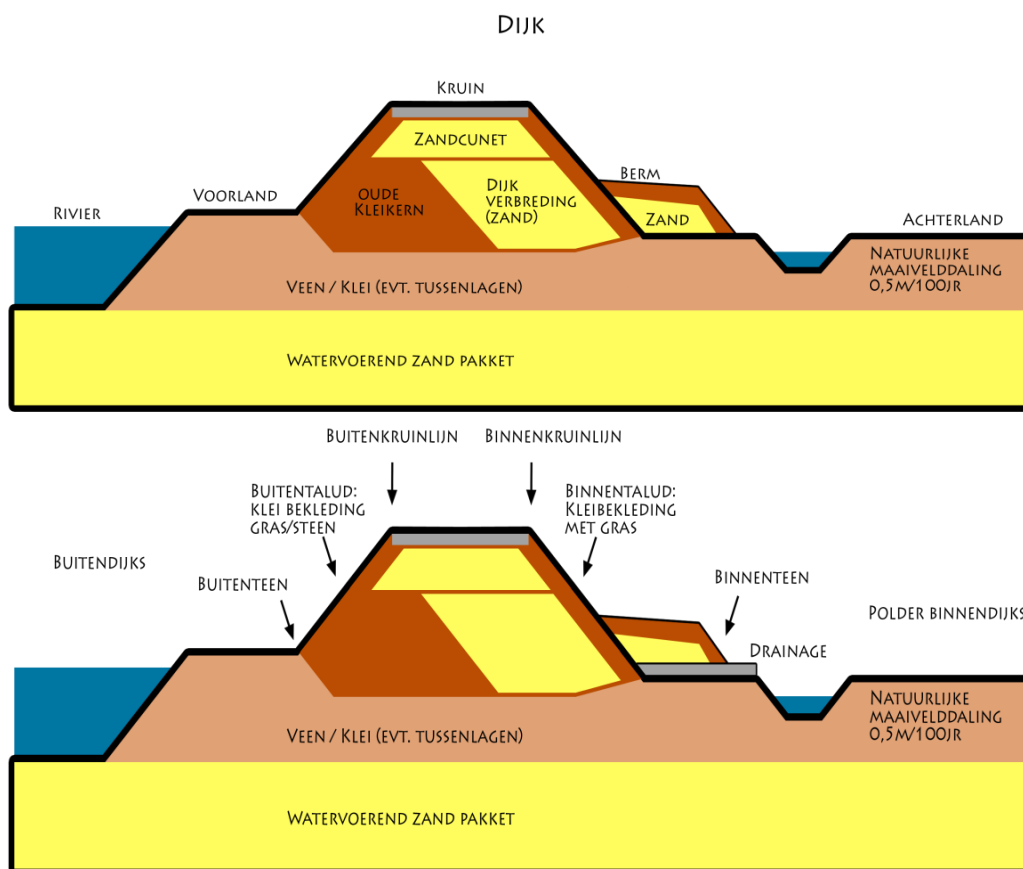
Op de langere termijn moeten dijken en duinen hoog en sterk genoeg moet zijn om de effecten van (relatieve) zeespiegelstijging te kunnen opvangen. De conditie van dijken en duinen moet ook op korte termijn gewaarborgd zijn. Als door stormschade de bekleding van de dijk beschadigd is, moet dit tijdig signaleerd en hersteld worden, zodat de dijk weer in conditie is als er een nieuwe storm plaatsvindt. Het zelfde geldt voor duinafslag.

5.3.2 Beschrijving van het systeem

De waterkeringen in het Waddengebied bestaan uit dijken, duinen en een aantal schut- en spuisluizen en coupures. De dijken in het Waddengebied zijn lichamen met een kern van zand, die is afgedekt met een kleilaag en een steen-, asfalt of grasbekleding. Onder de waterkering duinen wordt de onderwateroever, het strand en de eerste duinenrij verstaan. Het voorland van dijken en duinen is van belang voor de hydraulische belasting op de waterkering. De grote kunstwerken in het Waddengebied zijn de sluisen bij Lauwersoog, Kornwerderzand en Den Oever. Daarnaast zijn er nog kleinere spuisluizen. In deze paragraaf wordt beschreven uit welke onderdelen de waterkering bestaat en welke faalmechanismen er kunnen optreden bij dijken (onderdeel I) en duinen (onderdeel II). Het belang van de ontwikkeling van het voorland wordt besproken in onderdeel III. Daarnaast wordt de sterkte en stabiliteit van kunstwerken kort aangestipt (onderdeel IV).

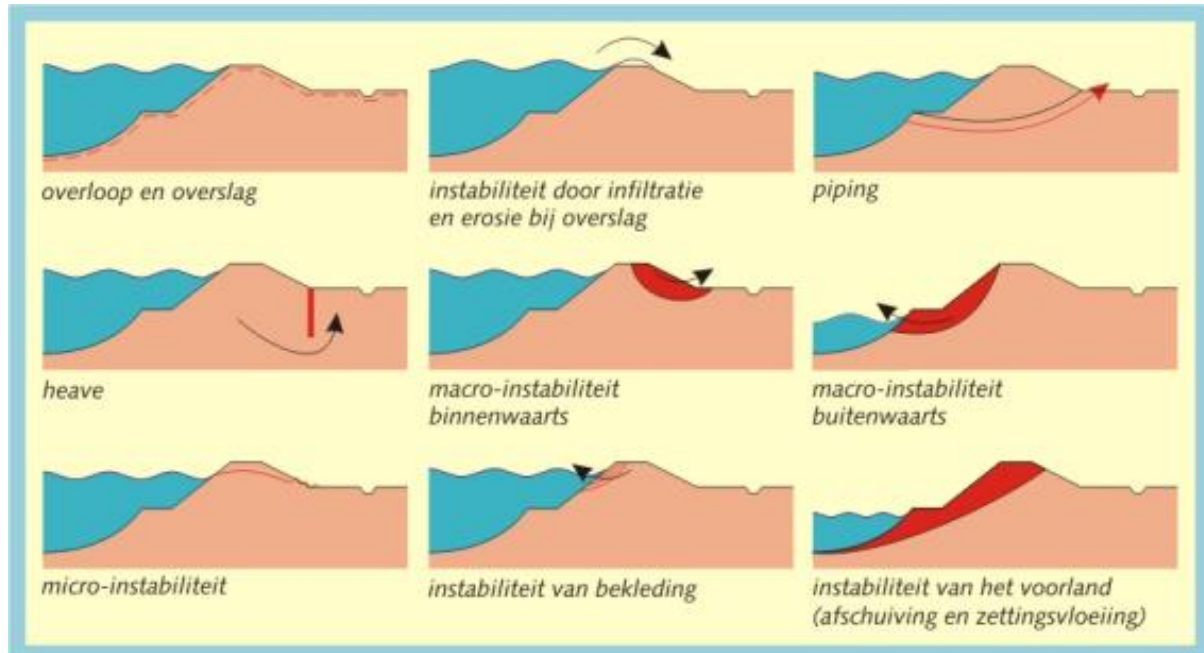
I. Dijken

In *Figuur 5.2* zijn de belangrijkste onderdelen met bijbehorende terminologieën van een dijk weergegeven.



Figuur 5.2 Onderdelen en terminologieën van een dijk.

De sterkte van een dijk wordt bepaald door de hoogte en de stabiliteit. Voor de toetsing van zowel de hoogte als de stabiliteit zijn verschillende aspecten van belang. *Figuur 5.3* geeft de belangrijkste faalmechanismen voor grondconstructies zoals dijken weer. De begaanbaarheid van de dijk is van belang voor eventuele noodreparaties aan de dijk. Hier kan in de toetsing op een kwalitatieve manier rekening mee worden gehouden.



Figuur 5.3 Faalmechanismen grondconstructies (Min. V&W, 2007b).

Andere oorzaken die de waterkerende functie kunnen beïnvloeden zijn zettingsvloeiing, de aanwezigheid of het falen van niet-waterkerende objecten (zoals bebouwing, begroeiing en pijpleidingen), kruierend ijs, aanvaring, muskusratten en terrorisme. Deze oorzaken worden hier verder niet behandeld.

Om de invloed van de mechanismen overloop en golfoverslag (zie ook *Figuur 5.3*, *Figuur 5.4*, *Figuur 5.5*) te beperken moet de kruin van de dijk voldoende hoog zijn. De hoogte van de kruin wordt meestal bepaald ter plaatse van de buitenkruinlijn, bijvoorbeeld met behulp van lengtewaterpassing, laseraltimetrie of radarmetingen.

Door zetting en klink kan de kruinhoogte afnemen. Daarom wordt bij de toetsing hiervoor vaak een correctie toegepast, bijvoorbeeld door extrapolatie van gemeten kruinniveaus over de jaren. De dijk moet ook voldoende bestand zijn om kruinhoogteverlies of afschuiving als gevolg van micro-instabiliteit te voorkomen. Micro-instabiliteit kan optreden bij het opbarsten van kleibekleding en het uitspoelen van de grond. Het gewicht en de schuifsterkte van het kleipakket en de waterdoorlatendheid en de schuifweerstand van de grond zijn hierbij de belangrijkste parameters. De toetsing hiervan hangt af van het type bekleding (materiaal, dikte en kwaliteit) en de helling van het binnentalud.



Figuur 5.4 Overloop van de dijk voor het Molengors bij Stellendam (23-12-1954). Bron: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat.



Figuur 5.5 Houtribdijk tijdens storm. Incidentele golfoverslag (26-2-1990). Bron: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat.

Bij macro-instabiliteit binnenwaarts of buitenwaarts schuift een gedeelte van de dijk af. De weerstand tegen deze afschuiving wordt bepaald door maximaal te mobiliseren schuifspanning langs het glijvlak. De schuifspanning is gerelateerd aan de korrelspanning, die op haar beurt weer afhankelijk is van het volumegewicht van de grond, de grondwaterstand, waterspanningen en de belastinghistorie (bijv. overconsolidatie).

Piping of zandmeevoerende wellen is het ontstaan van kleine kanaaltjes als gevolg van een waterstroming onder de dijk, waardoor materiaal uit de ondergrond wordt afgevoerd. Heave is het ontstaan van drijfzand bij verticaal uittredend water. Beide mechanismen zijn afhankelijk van een aantal parameters:

- De kwelweglengte, dit is de afstand tussen het punt waar water op het voorland de dijk binnendringt (intreepunt) en het punt waar water aan de achterzijde van de dijk weer naar buiten treedt (uittreepunt). De aanwezige kwelweglengte moet voldoende groot zijn.
- De dikte en de kwaliteit van de afdekkende lagen op het voorland.
- De korrelgrootteverdeling ter plaatse van het uittreepunt. Dit bepaalt de weerstand tegen (interne) erosie en daarmee het ontstaan van piping en heave.
- De dikte, het gewicht en de doorlatendheid van het watervoerende pakket onder de dijk en
- de aanwezigheid en afmetingen van een kwelsloot.

Heave wordt ook nog beïnvloed door de afstroming of drainage van kwelwater.



Figuur 5.6 Piping bij de Waal (1995). Bron: www.geo.uu.nl/fg/palaeogeography/results/applications

Bodemdaling als gevolg van gaswinning kan gepaard gaan met aardbevingen. In Korff et al. (2014) wordt aanbevolen voor het effect van aardbevingen een normering en toetsmethode op te stellen, aangezien deze tot op heden nog ontbreekt. Er wordt ook aanbevolen om extra metingen te doen waarbij de trillingen en het verloop van waterspanningen worden gemeten.

Bekledingen

Bekledingen van dijken in het Waddengebied worden gevormd door een combinatie van gras, asfalt en steenzettingen (zoals basaltblokken, etc.) of stortsteen, zie *Figuur 5.7 t/m Figuur 5.9* (foto's van Google Earth). Het bezwijken van de bekleding hoeft niet te leiden tot falen van de dijk, zolang de dijk zelf maar bestand blijft tegen de optredende hydraulische belastingen (**H**), in elk geval gedurende de periode tot nieuwe bekleding wordt aangebracht. Het type faalmechanisme hangt af van het type bekleding. Het type bekleding en de oppervlakteruwheid kan ook de maximale golfoploop en hiermee de noodzakelijke kruinhoogte beïnvloeden.



Figuur 5.7 Asfalt bekleding op de Rinkwielsedijk (bij Wieringen)



Figuur 5.8 Basaltblokken en stortsteen op de Afsluitdijk



Figuur 5.9 Stortsteen, asfalt en gras op Schiermonnikoog

Steenzettingen

Steenzettingen bestaan uit meerdere lagen. De toplaag kan *instabiel* worden onder golfaanval of door langsstroming of wateroverdrukken, wat wordt bepaald door de significante golfhoogte en piekperiode, of de dieptegemiddelde stroomsnelheid aan de voet van de dijk en turbulentie. Voor dit faalmechanisme zijn de dikte en dichtheid van de toplaag, de wrijving/klemming van de elementen en de taludhelling ook van belang.

Afschuiving van de steenzetting kan worden veroorzaakt door golfaanval. Voor de toetsing hiervan is de significante golfhoogte en de piekperiode nodig. De weerstand tegen afschuiving wordt bepaald door de dikte en dichtheid van de toplaag, de dikte van de granulaire en de cohesieve laag en de korrelgrootte van het zand onder de cohesieve laag.

Het *uitwassen van materiaal* uit de ondergrond en granulaire lagen kan ook leiden tot falen van de bekleding en wordt getoetst aan de hand van de significante golfhoogte en eigenschappen van het materiaal. Deze eigenschappen zijn de korrelgrootte van de onderste laag en de poriegrootte in de bovenste laag. Tot slot kan erosie van de onderlagen leiden tot falen van de bekleding. Dit mechanisme wordt beïnvloed door het tijdsverloop van de waterstand tijdens storm, in combinatie met het golfklimaat (significante golfhoogte, piekperiode en hoek van inval), de dikte van de bekledingslaag en de erosiebestandigheid van de klei. Steenzettingen kunnen worden getoetst met het programma STEENTOETS (Klein Breteler, 2012). Maatgevende waarden voor de golfparameters en waterstand worden gegeven in de Hydraulische Randvoorwaarden (HR2006: Min. V&W, 2007a).

Asfaltbekleding

Er bestaan verschillende soorten asfaltbekledingen, elk met verschillende weerstand tegen bezwijken. De bekledingen bestaan uit een bovenlaag, optioneel met onderlagen. Bepaalde faalmechanismen worden alleen verwacht in specifieke zones van het dijklichaam, afhankelijk van de belasting op het dijklichaam en de bekleding. De toetsing van de asfaltbekleding op deze faalmechanismen wordt dus alleen in die specifieke zones uitgevoerd.

De faalmechanismen zijn:

- 1) het bezwijken van de bovenlaag door golfklappen;
- 2) het opdrukken van de bovenlaag door wateroverdruk/de onderlaag;
- 3) het uitspoelen van grond van het dijklichaam onder de bekleding (mede beïnvloed door de teenconstructie)
- 4) het bezwijken van de onderlaag als gevolg van het bezwijken van de bovenlaag

Het optreden van ernstige schade, waardoor direct materiaaltransport door stromend water (als gevolg van golfoploop) plaatsvindt of het optreden van faalmechanisme 3, wordt nagegaan middels dijkinspecties. Tijdens de inspectie wordt gekeken naar scheuren in de bekleding, openstaande naden, aangetast oppervlak, schade door constructiefouten of bijzondere belastingen en begroeiing op de bekleding. De weerstand tegen falen bij deze twee mechanismen wordt bepaald door de grootte van het gat in de toplaag en de grootte van het loskorrelige materiaal in de onderlaag. De golfklap wordt berekend aan de hand van het waterstandsverloop tijdens storm, de significante golfhoogte en de gemiddelde golfperiode met behulp van het programma GOLFKLAP (de Loeff, 2009). De weerstand tegen golfklappen wordt gevormd door de dikte van de asfaltlaag en de kwaliteit hiervan. De weerstand tegen wateroverdruk wordt bepaald door de dikte en dichtheid van de asfaltlaag en eventuele kleilagen die zich direct onder de asfaltlaag bevinden. Het bezwijken van de onderlaag hangt af van het type bekleding en wordt meestal bepaald door de erosiebestendigheid en de dikte van de onderlagen.

Voor het toetsen van asfaltbekledingen zijn vooral gegevens nodig over de laagdikte en materiaaleigenschappen. Dit kan op verschillende manieren worden verkregen. Als er weinig schade is kunnen aanleg- of bestekgegevens worden gebruikt. Als er wel schade is kunnen boorkernen worden genomen die worden geanalyseerd in een lab, en/of enkele proeven kunnen in situ worden uitgevoerd (zoals grondradarmetingen en valgewicht-deflectiemetingen).

Grasbekleding

Grasbekleding op dijken kan worden toegepast op zones van de dijk die niet permanent onder water staan. Het vormt een ethisch aantrekkelijke bekleding, met grote sterkte. De grasbekleding bestaat uit een zode met een onderlaag van klei grond, die weerstand vormt tegen verdergaande erosie nadat het gras verdwenen is. De faalmechanismen van grasbekledingen zijn:

- 1) Het geleidelijk wegspoelen van afzonderlijke gronddeeltjes tussen de wortels uit. Als dit leidt tot grote grondverplaatsingen kan de vegetatie verstoord worden of de deklaag oneffen worden.
- 2) Het uitspoelen van grotere brokken ten gevolge van waterdrukverschillen, dit kan worden bevorderd door oneffenheden in de deklaag.
- 3) Het doorbreken van de graszode door plaatselijk sterkere erosie.
- 4) Het opbreken/oprollen van de zode door golfwerking of langsstroming.
- 5) Erosie van alle onderlagen van klei na verdwijning van de graszode.
- 6) Afschuiving van de grasmat langs een glijvlak ten gevolge van verzadiging of grondwaterstromingen.

De graszode kan eroderen (faalmechanisme 1 t/m 4) door golfklappen, golfoploop, golfoverslag en stroming. Voor het toetsen van de grasbekleding is ook een zonering over het dijklichaam aangebracht, zodat niet in alle zones op alle mechanismes hoeft te worden getoetst (analoog aan asfalt). Om de golfklappen te kunnen berekenen is de significante golfhoogte aan de buitenteen van de dijk nodig, evenals de golfperiode, de taludhelling, het waterstandsverloop tijdens storm en de belastingduur. De belastingen ten gevolge van golfoploop bestaan uit erosie, golfklappen en overdrukken, worden beïnvloed door de waterdiepte, het waterstandsverloop, de invalshoek van de golven, de golfhoogte, de stroomsnelheid tijdens een golfperiode, de geometrie en ruwheid van het buitentalud, en de belastingduur. Bij belasting ten gevolge van golfoverslag is het overslagdebiet, wat afhankelijk is van de erosiebestendigheid van de bekleding op de kruin en het binnentalud of de toelaatbare wateroverlast in het achterliggende gebied. De belastingen kunnen leiden tot aantasting van de zode en de kleilaag. Afschuiving van het talud is afhankelijk van de steilheid van het talud, de buitenwaterstand en de grondwaterstand/-spanningen in de dijk.

De sterkte van de grasmatten is van veel factoren afhankelijk, o.a. de dikte van de deklaag, de kleisamenstelling en –erosiebestendigheid, de taludhelling, de soortensamenstelling en leeftijd van het gras, het seizoen, de dichtheid van vegetatiebedekking en wortels en beschadigingen in de grasmatten (door dieren, bomen). De aansluitingen van grasmatten op harde constructies zijn kwetsbare punten. Grasmatten kunnen worden getoetst met het programma GRASSTOETS (van Nieuwenhuijzen, 2005).

II. Duinen (Zeereep)

Duinen zijn al sinds eeuwen onderdeel van de waterkering op de eilanden. Er zijn daarom ontwerpregels in de Leidraad Zandige Kust, het Technisch Rapport Zandige Kust en een wettelijk toetsinstrumentarium voor de periodieke toetsing van de duinenkust⁷. Dit geldt op de Waddeneilanden alleen voor de duinen die onderdeel uitmaken van de primaire kering. De duinen op de eilandstaarten hebben geen formeel waterkerende functie. Wanneer het duin voldoende hoog en breed is, wordt het zeewater en daarmee de stormvloed door het duin tegengehouden. Golfreductie tijdens stormvloeden vindt plaats op het strand en tegen de duinvoet. De veiligheid van de zandige kust wordt beoordeeld op de faalmechanismen duinafslag, winderosie en niet-waterkerende objecten in het grensprofiel. Bij niet-waterkerende objecten wordt nagegaan of deze niet leiden tot extra erosie of afslag rondom het object

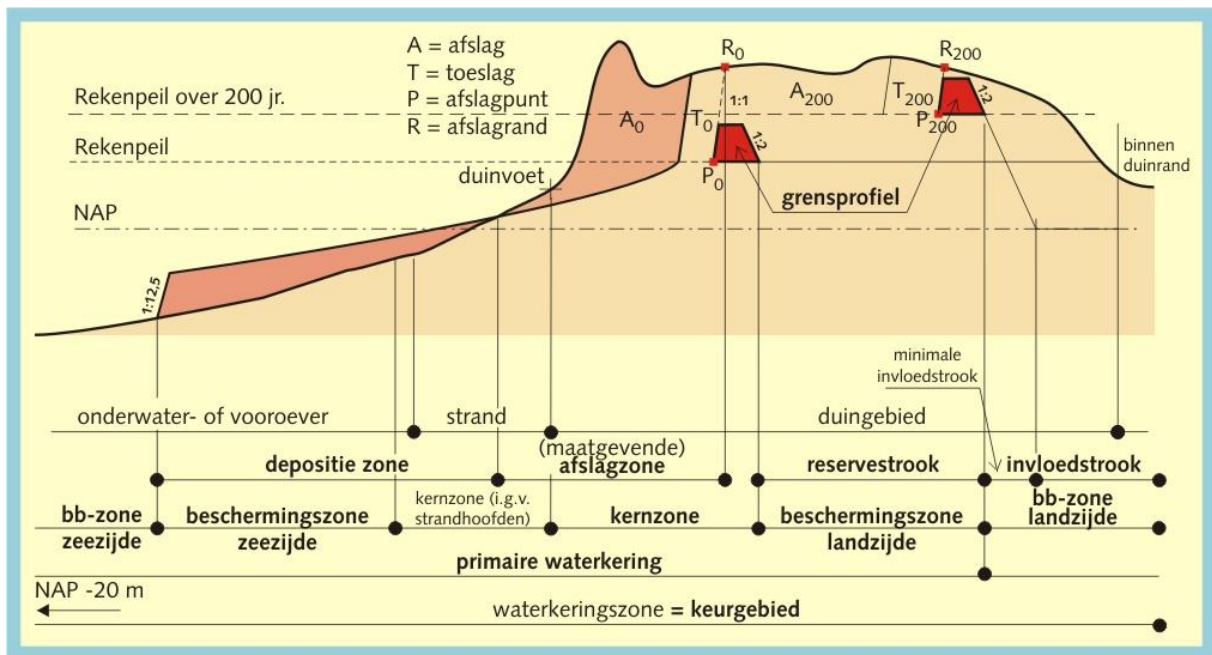
Duinafslag

Op landelijke schaal worden de aanwezige kustprofielen periodiek ingemeten. Zowel bij het ontwerp als bij de toetsing van de zandige kust wordt uitgegaan van een beoordeling van de huidige, Momentane Kust Lijn (MKL) op basis van een afslagbenadering. Daarbij worden met een rekenmodel op basis van de vigerende hydraulische randvoorwaarden en de lokale korreldiameter van het zand, afslagprofielen en afslaglijnen bepaald (*Figuur 5.10*). Binnen het duinprofiel moet door de beheerder een zogenoemd grensprofiel worden bepaald. Dit is het minimaal vereiste duinprofiel dat nog als waterkering aanwezig moet zijn. Bij de aanwezigheid van een duinvoetverdediging wordt deze ook bij de beoordeling betrokken. Als het grensprofiel wordt doorsneden door het afslagprofiel is er te weinig zand in het kustprofiel aanwezig en moet er extra zand worden gesuppleerd. Vanuit kustonderhoud vinden er dan ook geregeld kustsuppleties plaats, die worden uitgevoerd als de afslaglijnen de Basiskustlijn (BKL) doorsnijden. De basiskustlijn is gebaseerd op de kustlijn van 1990. In het huidige beleid is afgesproken dat de kustlijn zich niet landwaarts ten opzichte van de BKL mag verplaatsen. (zie Hoofdstuk 4).

Winderosie

Als er sprake is van een beperkte ruimte tussen het grensprofiel en het afslagprofiel of de achterzijde van het duin, moet ook een toetsing op winderosie plaatsvinden. Daarbij vormen de kwaliteit, dichtheid en oppervlakte van de begroeiing een maatstaf voor de beoordeling van de sterkte. Hierbij worden ook de begroeiing op het duin en de aanwezige open plekken betrokken.

⁷ http://www.rijkswaterstaat.nl/water/veiligheid/bescherming_tegen_het_water/organisatie/wettelijk_toetsinstrumentarium/



Figuur 5.10 Begrippen en zones in het kustprofiel (bron: Leidraad Zandige Kust, TAW, 2002).

III. Voorland

Het voorland vormt tezamen met de ondergrond de fundering waarop de kering rust (in geval van dijken) of is met de kering verbonden voor de uitwisseling van zand (in geval van duinen), en kan daarmee een rol hebben in het versterken of verzwakken van de kering. Het voorland heeft invloed op de faalmechanismen overloop/golfoverslag (hoogteligging in relatie tot waterdiepte), macrostabiliteit buitenwaarts (hoogteligging en bodemopbouw) en piping (ligging intreepunt en dikte en kwaliteit afsluitende dekklagen). Daarnaast worden de hydraulische randvoorwaarden (zie paragraaf 5.2) deels bepaald door de vorm van het voorland, bijvoorbeeld door golfdemping op een ondiep voorland. Het meenemen van voorlanden in de toetsing van dijken en/of duinen kan dus leiden tot goedkopere keringen, omdat ofwel de sterkte van de kering vergroot kan worden ofwel de belastingen verkleind worden. Daarnaast kunnen voorlanden meegroeien met zeespiegelstijging, wat voor de toekomst aantrekkelijk is.

In het Waddengebied kan het voorland voorkomen in de vorm van een strand(vlakte), geul, kwelder of wad, of in sommige gevallen een combinatie daarvan. Duinen grenzen altijd aan een strand, wat vervolgens kan overgaan in een strandvlakte, een geul of een vooroever met eventuele intergetijdenbanken. Dijken kunnen direct grenzen aan kwelders, wadplaten, of geulen. Hoe dieper het voorland voor de kering, hoe kwetsbaarder de kering voor golfaanval en ondermijning, en hoe steviger de kering dus moet zijn. Soms zijn er nog harde constructies op het voorland aangebracht, bijvoorbeeld om een geulwand te versterken of vast te leggen of de buitenteen van de waterkering te beschermen.

Voorlanden zijn in de meeste gevallen dynamische gebieden. Geulen migreren; stranden en wadplaten veranderen onder invloed van het weer en beschikbaarheid van sediment; en kwelders slibben op en kunnen door kliferosie afkalven. De snelheden van deze processen zijn verschillend per voorland en locatie. Ook kunnen voorlanden sterk veranderen tijdens stormen. Omdat voorlanden onder invloed staan van de zee, hebben ze bij voldoende sedimentaanbod de mogelijkheid om mee te groeien met de zeespiegel. Dit wordt in het Deltathema Morfologie uitgewerkt.

Stranden & vooroever

Stranden en zandige vooroevers vormen de sedimentbron voor duinen, zowel op lange termijn als voor de aanvulling van stormschade op de termijn van binnen een jaar. Daarnaast breken golven op stranden en vooroevers, zowel aan de Noordzeekust als binnen de Waddenzee. De jaarlijkse kustlijntoetsing (zie Hoofdstuk 4), is in feite een toetsing van het zandvolume van het kustnabije voorland. Wanneer de momentane kustlijn landwaarts ligt van de Basiskustlijn, wordt het zandvolume in de vooroever en op het strand aangevuld met zandsuppleties.

Geulen

Geulen kunnen de stabiliteit van het voorland ondermijnen door landwaarts te verschuiven of door te verdiepen. Bij zeegaten en op buitendelta's kan dit leiden tot kustafslag (Zuidwest-Texel, Oost-Vlieland, Oost-Terschelling, West-Ameland) en uiteindelijk tot aantasting van de waterkeringszones of het profiel van de primaire kering. Omdat deze kusten veelal uit sediment bestaan (voornamelijk zand, alleen de Helderse kust, Zuidoost-Texel en West-Ameland zijn bestort) kan daar de erosie relatief snel verlopen, tot tientallen meters per jaar. Dit kan in principe worden tegengehouden door harde maatregelen zoals bestortingen. In hoeverre zachte maatregelen zoals suppleties ook zouden kunnen functioneren om de geul 'uit de kant' te houden is nog niet goed bekend. Binnen DPW worden pilots voor geulwandsuppleties (Stortemelk Vlieland en Borndiep West-Ameland) voorgesteld. Deze pilots zouden vergezeld moeten worden van een monitoringprogramma om een bijdrage te kunnen leveren aan het vergroten van het systeembegrip, inzicht in de actuele staat van het systeem, en een optimaal beheer (zie Hoofdstuk 6). Ook binnen in het kombergingsgebied kunnen geulen zich landwaarts verplaatsen en/of verdiepen. Als dit bij een dijk gebeurt, kan dit leiden tot afschuiving of zettingsvloeiing. In de afgelopen honderd jaar is dit voorgekomen op Vlieland, Ameland, in het Vierhuizergat (Lauwersmeergebied) en bij de Afsluitdijk.

Ontgrondingsgaten

Op plaatsten waar veel water door een kleine opening stroomt, kunnen ontgrondingskuilen ontstaan: het sediment op de bodem wordt door de kracht van het water meegevoerd. De bodem op en rond de spuiwerken is verstevigd om uitschuring als gevolg van het spuidebiet te voorkomen, maar op de overgang tussen bestorting en onbeschermd geulbodem kunnen alsnog gaten ontstaan. Zo lang deze op enige afstand van het kunstwerk blijven is er geen probleem, maar als ze erg diep zijn of de bestorting gaan ondergraven kan dat tot instabiliteit van het kunstwerk leiden. Om tijdig in te kunnen grijpen moeten ontgrondingskuilen geregeld gemonitord worden. Als de spuivolumes in de toekomst omhoog gaan, moet de bodembescherming in de gaten worden gehouden.

Kwelders en wadplaten

Kwelders en onbegroeide wadplaten reduceren golven door diepte-gelimiteerd breken. Daarnaast zorgen ze voor macrostabiliteit (tegenwicht) voor de dijk, en vergroten de intreeweerstand tegen kwel en piping (De Groot et al., 2014 in prep.). Daarnaast kan in geval van kwelders de vegetatie de erosie onder maatgevende omstandigheden verminderen. De ordegraote van de dynamiek van kwelders is enkele mm tot cm per jaar in hoogte en enkele meters per jaar in de breedte. Wadplaten hebben een grotere dynamiek dan kwelders. Kwelders vertonen over het algemeen geen grote stormschade. Het actief volgen daarvan zal dus in de meeste gevallen niet noodzakelijk zijn.

IV. Kunstwerken

Bij keermuren en keerwanden moeten de sterkte en de stabiliteit van de constructie worden beoordeeld. Daarnaast moet bij sluzen en coupures ook de betrouwbaarheid van de sluiting van de keermiddelen worden beoordeeld. Bij de monitoring ligt het accent vooral op de beoordeling van de degradatie en de vervormingen van het kunstwerk, de standzekerheid en de functionaliteit van de keermiddelen als deze moeten worden gesloten.

Verwachte toekomstige ontwikkelingen

Belangrijkste bedreigingen met betrekking tot waterkeringen (met name dijken), zijn zeespiegelstijging, en bodemdaling en aardbevingen als gevolg van gaswinning door de NAM.

De (relatieve) zeespiegelstijging heeft de discussie over deltadijken en alternatieve dijkconcepten aangezwengeld (bijvoorbeeld Van Loon-Steensma & Schelfhout, 2013). Deze nieuwe dijkconcepten bieden kansen voor ontwikkeling van natuur en dijkvormen waar het voorland (meestal een kwelder) mee kan groeien met zeespiegelstijging. De innovatieve dijkconcepten die in 2014 onder de aandacht zijn gebracht, zijn: overslagbestendige dijk, deltadijk, multifunctionele kering, parallelle kering (slaperdijken, havendammen, oesterriffen, wisselpolders), dijk met kwelder en brede groene dijk. Daarnaast zijn er ook hybride keringen, die bestaan uit een combinatie van harde en zachte onderdelen. Voorbeelden daarvan zijn de dijk-in-duin en de dijk-in boulevard. Voor nieuwe dijkconcepten kan het nodig zijn om de toetsing, en daarmee monitoring, aan te passen. Bijvoorbeeld bij dijkconcepten waarin het voorland onderdeel uitmaakt van de kering, zal ook gemonitord moeten worden of het voorland nog aan de eisen voldoet. Als het stormklimaat verandert, kan dit invloed hebben op de ontwikkeling van de voorlanden.

Op de langere termijn kan uitdroging van dijken en/of grasbekledingen als gevolg van langere droogteperiodes door klimaatverandering een rol spelen. Bij meer gebruik van de natuur bij het ontwerpen van dijken moet ook rekening gehouden worden met aantasting/ziektes in bomen/plantensoorten en plagen.

Duinen kunnen te maken krijgen met veranderingen in windklimaat (en daarmee aanvoer van sediment), suppletievolumen en -vorm, droogteperiodes, andere patronen van afslag door veranderingen in het weer, en met een toename van dynamisch kust- en duinbeheer.

5.3.3 Informatiebehoefte

Om bescherming van het achterland tegen overstromingen te kunnen waarborgen, is het voor de beheerder noodzakelijk de fysieke staat van de waterkering te kennen en deze regelmatig te controleren. De hoofdvraag is hierbij: "Voldoet de waterkering nog aan de veiligheidsnormen tegen overstroming, op dit moment en in de toekomst?".

Bij het beantwoorden van deze beheervraag dienen we dus rekening te houden met de veranderingen in de toestand van de waterkering zelf (geleidelijk of na een gebeurtenis), en veranderingen in de belasting op de waterkering.

In dit Deltathema focussen we op de informatiebehoefte met betrekking tot de toestand van de waterkering zelf. Het voorland vatten we hierbij ook op als onderdeel van de waterkering. De informatiebehoefte voor het kwantificeren van de hydraulische randvoorwaarden is in paragraaf 5.2 beschreven.

De eerdergenoemde bedreigingen voor de staat van de kering kunnen geleidelijk of instantaan optreden. Op lange termijn betreft dit de daling van de kering als gevolg van bodemdaling en op de korte termijn gaat het om beschadigingen onder extreme omstandigheden.

5.3.4 Indicatoren

De staat van de kering en voorland wordt geëvalueerd in de toetsingen die regelmatig worden uitgevoerd. Deze worden hieronder beschreven. We onderscheiden hierbij twee typen indicatoren: indicatoren die uit de reguliere toetsrondes volgen en indicatoren die aangeven dat schade is opgetreden als gevolg van een gebeurtenis. De reguliere toetsrondes focussen vooral op de langere termijn invloeden, terwijl schade als gevolg van gebeurtenissen een korte-termijn effect hebben. Daarnaast wordt in de toetsrondes de waterkering getoetst aan eventueel veranderde (verzwaarde) belasting. Dit gebeurt met behulp van het probabilistische programma Hydra-K.

Toetsing voor dijken

De hydraulische randvoorwaarden leveren voor verschillende locaties langs de dijkkring een toetspeil, significante golfhoogte en -periode waar de dijk tegen bestand moet zijn. De beheerders van waterkeringen moeten verifiëren of de dijk bestand is tegen deze randvoorwaarden. De hoogte van dijken moeten voldoen aan het toetspeil, vermeerderd met een marge voor overloop/golfoploop en lokale opwaaiing die niet in de stormvloedstatistiek is opgenomen. De faalmechanismen van dijken en bekledingen worden door de dijkbeheerder getoetst aan de hand van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor primaire waterkeringen; het VTV-2006 (Min. V&W, 2007a). De belastingen worden bepaald met het probabilistisch rekenmodel Hydra-K. Bij de toetsing van dijkbekledingen worden ook golfcondities bij lagere waterstanden dan GHW meegenomen. Deze werkwijze zal bij de volgende toetsronde in het kader van de verbetercyclus gelden voor de faalmechanismen, die direct tot overstroming kunnen leiden.

Toetsing voor duinen

Voor de zandige delen van de kust wordt de kustlijn 'dynamisch gehandhaafd'. Dit houdt in dat niet wordt ingegrepen in de natuurlijke dynamiek van de kust zolang 1) de veiligheid en 2) de andere functies en waarden van het strand- en duingebied worden gewaarborgd. Beide aspecten hangen samen met een bepaald zandvolume in het kustprofiel. Uitgangspunt bij de toetsing voor veiligheid is dat na afslag onder maatgevende omstandigheden een restprofiel overblijft, waardoor een duindoorbraak gedurende de toetsperiode niet kan optreden. De hydraulische randvoorwaarden zijn maatgevende omstandigheden op de -20 m dieptelijn, zodat de hydrodynamica in geringe mate beïnvloed is door de lokale bodemligging. Het afslagprofiel behorende bij deze hydraulische randvoorwaarden wordt berekend met het model DUROS (met stationaire buitenwaterstand) of DUROSTA (met tijdsafhankelijke buitenwaterstand).

Meer in detail bestaat de toetsing uit de bepaling van het afslagprofiel onder maatgevende omstandigheden (rekenpeil, zie ook *Figuur 5.10*) bij elk jaarlijks gemeten kustprofiel. Omdat duinen een jaarlijkse cyclus van afslag tijdens stormen en aangroei onder rustige omstandigheden kennen, zijn jaarlijkse metingen over het algemeen voldoende. Bij zware stormen kan de afslag dermate zijn, dat na de storm door de beheerder (HHNK op Texel en RWS voor de overige eilanden) extra hoogtemetingen gedaan worden ter inspectie. Indien nodig kan het profiel dan aangevuld worden met zand. Bij het afslagprofiel wordt een toeslag toegevoegd (T0), zie *Figuur 5.10*. Het snijpunt van het rekenpeil met het afslagprofiel inclusief toeslag is afslagpunt P0. De trend in de ligging van dit afslagpunt over meerdere jaren kan geëxtrapoleerd worden. De extrapolatie van dit punt mag in de toetsperiode (dus voorliggende vijf jaar) niet voorbij het grensprofiel komen.

Voor de toetsing t.b.v. andere functies wordt jaarlijks gekeken hoe de kust zich ontwikkelt ten opzichte van de Basis KustLijn (BKL = ligging van de kustlijn in 1990, die sindsdien wordt gehandhaafd) en waar suppleties nodig zijn om de kust te handhaven. Hierbij wordt gekeken naar de trend (over maximaal 10 jaar) in kustlijnligging. Voor de toetsing worden de metingen vertaald naar de verwachte afslaglijn op de voor de toetsing relevante peildatum. Zolang daarbij het grensprofiel niet door het afslagprofiel wordt doorsneden is er geen veiligheidsprobleem. Als dat wel het geval is zijn maatregelen nodig, bijvoorbeeld extra zandsuppleties.

Voorland

Het voorland refereert naar stranden, vooroevers, geulen, ontgrondingsgaten, wadplaten en kwelders. De monitoring van stranden en vooroevers is expliciet opgenomen in de toetsing van duinen. De toetsing van wadplaten en kwelders kan relevant worden als deze in de toekomst bij het ontwerp als onderdeel worden van de waterkering worden meegenomen.

Voor het effect van geulen op de faalkans van waterkeringen bestaat geen vastgelegde toetsing. In een recente studie (Oost et al., 2014) is aanbevolen om een *early-warning* systeem op te zetten om de stabiliteit van het voorland in kaart te brengen en tijdig in te kunnen grijpen.

Daarbij zou gedacht kunnen worden aan toetsing analoog aan de BKL, m.b.v. een MOLK (Momentane OeverLijn Kust, De Groot, 2002), waarbij een basis oeverlijn is gedefinieerd, waar de geul buiten moet blijven.

Daarvoor is op risicolocaties een uitgebreider monitoringssysteem noodzakelijk. Ook is op zulke locaties monitoring van de dijk zelf voorgesteld, om instabiliteit direct te kunnen constateren. Bij het Vierhuizergat (Lauwersmeer) bevindt zich zo'n opdringende geul. Deze locatie zou geschikt zijn om een pilot uit te voeren waarin de geulsystemen deels worden verlegd en waar verdieping van de geul wordt tegengegaan (morfologisch baggeren). Deze pilot zou gecombineerd moeten worden met grondige monitoring (zie het Hoofdstuk 'Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots', Hoofdstuk 6).

De waterkering kan afgekeurd worden door de staat van de kering zelf (bijvoorbeeld verlaging van de kruinhoogte door klink), maar ook door verhoogde belasting op de kering. Indicatoren die worden gebruikt in de reguliere toetsrondes (verbetercyclus) zijn opgenomen in *Tabel 5.4*. Indicatoren die aangeven dat er schade is als gevolg van gebeurtenissen, zijn weergegeven in *Tabel 5.5*.

Tabel 5.4 Indicatoren waterkering voor reguliere toetsrondes

Indicator	Toetswaarde	Actie
Kruinhoogte (sterkte)	Kruinhoogte, verschillend per dijkvak	Als gemeten kruinhoogte < toetswaarde, herontwerp of verhoging
Klink van het dijklichaam	Kruinhoogte, verschillend per dijkvak	Kruinhoogte mag door extrapolatie van de klink van het dijklichaam in de periode tot de volgende toetsing niet onder de grenswaarde komen.
Dijkprofiel dat veranderd is ten opzichte van het ontwerp (kruin, bermen en taludhellingen) (stabiliteit)	Geometrie dijkprofiel	Als gemeten geometrie afwijkt van ontwerp / toetswaarde, herontwerp of aanpassing grondlichaam
Bekleding (sterkte/stabiliteit)	Vervormingen, ontbrekende elementen, kiervorming/verklemming, aanwezigheid vulmateriaal	Als sterkte of stabiliteit bekleding onvoldoende is, nieuwe bekleding/bekleding toevoegen. in de regel worden er elk jaar visuele inspecties uitgevoerd op basis waarvan schade wordt hersteld. Ook de toetsing voorziet in een eerste beoordelingsstap o.b.v. visuele inspectie van de bekleding
Zandvolume in het profiel (duin)	Minimum zandvolume per duinvak	Als gemeten volume < toetswaarde, suppletie
Laagste punt in duinenrij (bij gekerfde kusten)	minimumhoogte volgend uit overstromingsstatistiek en hoogteligging achterland.	ingrepen.
MKL	BKL	Bij landwaartse verplaatsing Als BKL moet extra zand worden gesuppleerd (onderhoudsbehoefte t.b.v. handhaving BKL)

Indicator	Toetswaarde	Actie
Migratie van geulen in nabijheid van dijk (voorland)	MOLK: grens opstellen adhv stabiliteitsbrekeningen en snelheid verplaatsing geul. Beginnen met extra monitoring als geul 500 m van kering is en richting dijk beweegt.	Meerdere opties, o.a. geulwandverdediging, morfologische ingreep als baggeren. Goede afstemming verschillende beheerders nodig.
stabiliteit van het voorland - Kwelders; hoogte, breedte, snelheid kliferosie. Evt. BKL-achtige aanpak - Wad: hoogte	afhankelijk van eventueel in te voeren toetsing.	Zit momenteel enkel voor afschuiving en zettingsvloeiing en via invloed op HR in de toetsing. Evt. BKL-achtige aanpak
Veranderende vegetatiezonering op het voorland	regressie van vegetatietype en landwaartse verschuiving van vegetatietypen duidt (als andere factoren zoals beweiding zijn uitgesloten) op dat kwelder zss niet bij kan houden. Regressie van lage kwelder naar pionierzone duidt op verdrinking. => beheeringrepen	Als maat voor verlaging voorland en stabiliteit kwelders en groene stranden, zit momenteel nog niet expliciet in toetsing.

Tabel 5.5 Indicatoren waterkering voor gebeurtenissen

Indicator	Toetswaarde	Actie
Beschadiging aan de bekleding (dijk) (Aanwezigheid van scheuren in de bekleding, openstaande naden, aangetast oppervlak, schade door constructiefouten of bijzondere belastingen en begroeiing op de bekleding.)	Kan een faalmechanisme optreden als gevolg van de beschadiging?	(Direct) herstel, afhankelijk van ernst van de beschadiging
Aanwezigheid van wellen (dijk)	0	Direct herstel
Afschuifvlakken in de dijk	Vervormingen	Direct herstel
Duinafslag	Zandvolume	Bij veel stormen en afslag tussentijdse opname en eventueel aanvulling zandvolume/suppletie
Stabiliteit kwelder	snelheid eventuele kliferosie	Zit momenteel nog niet in toetsing. Zowel bescherming voorland als aanpassing dijkontwerp kan worden toegepast.

Een deel van de indicatoren en variabelen is afhankelijk van de nieuwe dijkconcepten die worden ontwikkeld binnen DPW. Als het voorland expliciet meegenomen wordt als onderdeel van de waterkering, moet hier ook een toetsing met bijbehorende grenswaardes voor worden opgesteld. Dit is nog in ontwikkeling, voor kwelders zijn hierboven al enige suggesties gegeven.

Dijkringen zijn zo sterk als de zwakste schakel. Daarom is op zwakke plekken, maar in principe voor de hele dijkkring, monitoring nodig. Tijdens storm wordt er dijkbewaking ingesteld om te signaleren of de dijk geen zwakke plekken vertoont.

5.3.5 Databehoefte

Dijkhoogte

- Analysevariabelen: Hoogte van de dijk, gemiddelde zetting en klink van de dijk over een bepaalde periode
- Meetvariabelen: dijkhoogte (m t.o.v. NAP) ter plaatse van de buitenkruinlijn
- Meetlocaties: langs alle dijken
- Meetfrequentie: gekoppeld aan uitvoering continu toets i.h.k.v. de zorgplicht

Dijkprofiel

- Analysevariabelen: Dijkgeometrie (kruin, bermen en taludhellingen)
- Meetvariabelen: dijkhoogte/-breedte (m t.o.v. NAP) over het dijkprofiel
- Meetlocaties: langs alle dijken
- Meetfrequentie: gekoppeld aan uitvoering continu toets i.h.k.v. de zorgplicht

Conditie van de bekleding

- Analysevariabelen: dikte, dichtheid en kwaliteit toplaag, wrijving/klemming elementen (bij steenzettingen), dikte en poriegrootte granulaire lagen, dikte en erosiebestendigheid cohesieve/klei laag, korrelgrootte van het zand onder de bekleding, scheurvorming, openstaande naden, aangetast oppervlak, schade door constructiefouten/bijzondere belasting/begroeiing.
- Meetvariabelen: afhankelijk van beschouwde variabele
- Meetlocaties: langs alle dijken
- Meetfrequentie: jaarlijks voor aanvang stormseizoen

Begaanbaarheid van de dijk: eenmalige kwantificering

Stabiliteit van de dijk

- Analysevariabelen: korrelspanning, volumegewicht van de grond, waterspanning, belastinghistorie (bijv. overconsolidatie), dikte, gewicht en de schuifsterkte van afdekkende (klei)pakket, waterdoorlatendheid en de schuifweerstand van de grond, dikte en doorlatendheid watervoerende pakket onder de dijk, dimensies kwelsloot, kwelweglengte, korrelgrootteverdeling bij het uittreepunt, afstroming/drainage kwelwater.
- Meetvariabelen: afhankelijk van beschouwde variabele
- Meetlocaties: langs alle dijken
- Meetfrequentie: gekoppeld aan uitvoering continu toets i.h.k.v. de zorgplicht
- Meettermijn: doorlopend
- Meetmethode: informatie van dijkontwerp of innovatieve technieken
- Databronnen/-beheer: waterschappen
- Datatoegang: via waterschappen
- Huidige meetinspanning voldoet: ja

Duinvolume

- Analysevariabelen: duinvolume, MKL
- Meetvariabelen: hoogteligging van -20 m NAP lijn tot achter eerste duinenrij.
- Meetlocaties: Jarkusraaien (voortzetting huidige). In toekomst kan ook LiDARbeelden als geheel gebruikt worden, m.n. bij gekerfde kust.
- Meetfrequentie: Jaarlijks

Kunstwerken: ontgrondingskuilen, vervormingen en scheuren, degradatie

- o Meetvariabelen: bodemligging
- o Meetlocaties: lokaal bij kunstwerken
- o Meetfrequentie: Afhankelijk van ouderdom, ontwikkeling bodemligging, spuivolume etc.

- o Huidige meetinspanning voldoet: ja, afhankelijk van de toename in spuivolumes
- o Aanbeveling: bij toename van de spuivolumes moet er regelmatig extra controle aan de ontwikkeling van ontgrondingskuilen plaatsvinden.

Voorland

- o Meetvariabelen: hoogteligging, vegetatiebedekking (kwelder en groen strand), bodemligging, bodemopbouw (dikte en kwaliteit afsluitende deklagen)
- o Meetlocaties: daar waar voorlanden onderdeel zijn van de waterkering
- o Meetfrequentie: Eens in 6 jaar. Bij migrerende of diepe geulen vaker (vanaf 200 m uit de kust twee keer per jaar of gekoppeld aan de frequentie van de continue toets i.k.v. de actieve zorgplicht).
- o Huidige meetinspanning voldoet: ja, behalve ter plaatse van geulen
- o Aanbeveling: definitie en toetsing van een Momentane Oeverlijn Kust (MOLK, De Groot, 2002). Te combineren met een uitgebreider monitoringssysteem en *early-warning* systeem op risicolocaties.

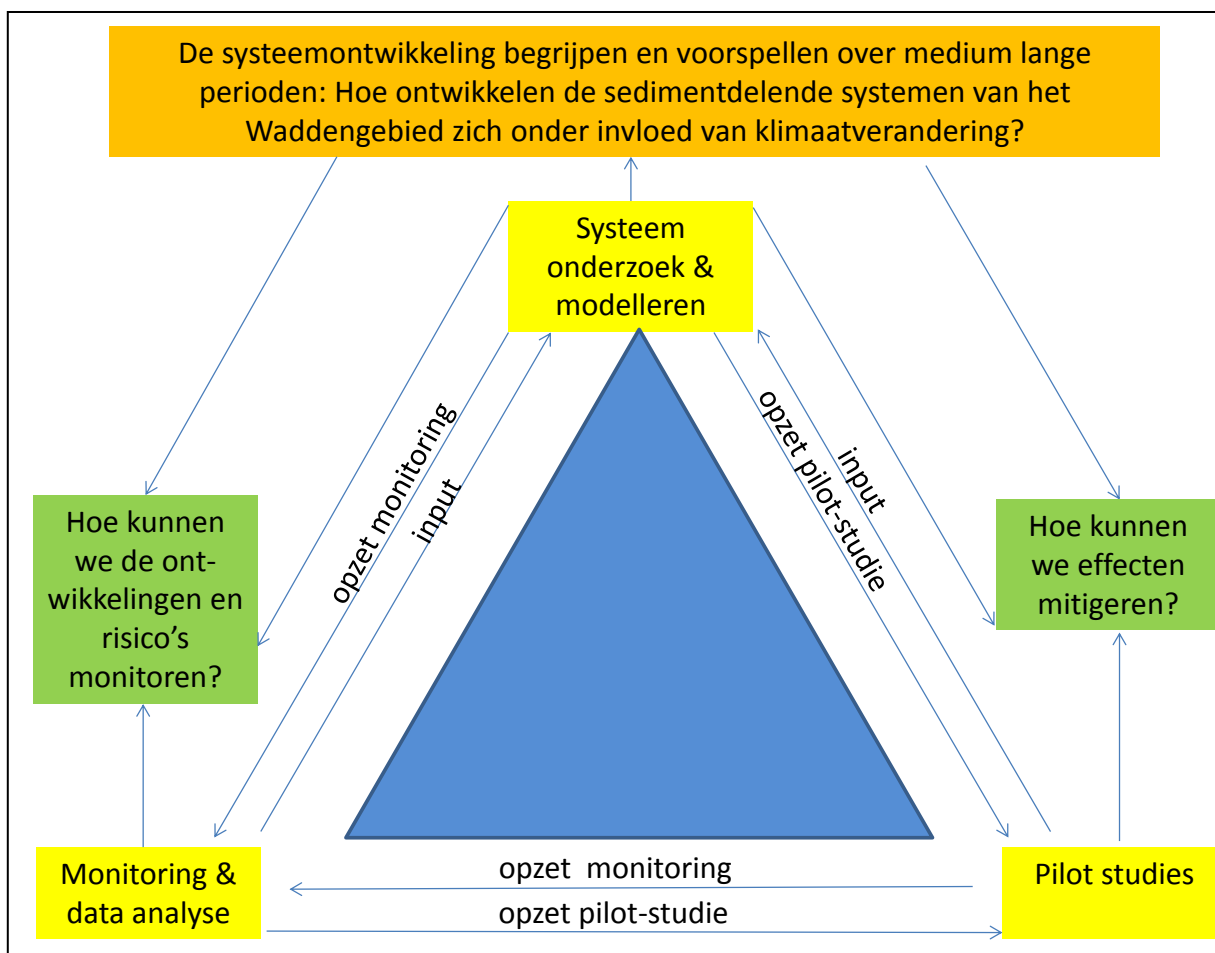
5.4 Aanbevelingen

- Bodemligging: in sommige gevallen vaker opnemen van dynamische gebieden en gebieden die grote invloed op de hydraulische randvoorwaarden hebben. Het gaat hier met name om voorlanden.
- Waterstanden: zorg voor continuïteit van satellietmetingen op de Noordzee. Tot dusver zijn deze niet in standaard programma's opgenomen maar wordt elke satelliet *ad-hoc* gepland.
- Golven: door huidige meetinspanning uit LMW te combineren met WTI is deze voldoende, LMW zelf is onvoldoende. Ten behoeve van een betere ruimtelijke dekking voor het bepaling van de golfstatistiek op diep water, wordt geadviseerd om de twee bestaande LMW golfboeien (Eierlandse Gat en Schiermonnikoog Noord) te handhaven en twee golfboeien bij het Amelander zeegat (AZB11, zeewaarts verplaatst) en Borkum toe te voegen aan het vaste meetnet.
- Uitbreiden van de stromingsmetingen zorgt voor verbetering van de waterstands- en golfmodellen, en daarmee tot een nauwkeurigere bepaling van de hydraulische randvoorwaarden. Deze metingen worden voorgesteld in Hoofdstuk 6, 'monitoring voor kennis-, modelontwikkeling en pilots'.
- Zorg voor behoud goed ruimtelijk beeld van windsnelheid en -richting. Daartoe wordt aanbevolen om de WTI-windpalen bij Dantziggat en Noorderbalg te handhaven.
- Een toekomstige toename in de spuivolumes kan tot een verdieping van de ontgrondingskuilen leiden. De huidige bodembescherming voldoet dan mogelijk niet meer. Om hier tijdig op te kunnen ingrijpen, moeten de ontgrondingskuilen en de aanwezige bodembescherming (bij een toename van de spuivolumes) extra gemonitord worden.
- Kwelders:
 - o Kwelders vertonen over het algemeen geen grote stormschade. Het actief volgen daarvan zal dus in de meeste gevallen niet noodzakelijk zijn.
 - o Als wadplaten en kwelders in de toekomst bij het ontwerp als onderdeel worden van de waterkering worden meegenomen, moet de monitoring op de dan geldende toetsing worden afgestemd. Dit kan betekenen dat nieuwe parameters, zoals dikte van de kleilaag, moeten worden bepaald.
- Het verdient aanbeveling om bij opdringende geulen bij keringen een *early-warning* systeem op te zetten, om de stabiliteit van het voorland in kaart te brengen en tijdig in te kunnen grijpen. Daarvoor is op risicolocaties een uitgebreider monitoringssysteem (met name frequentere lodingen) noodzakelijk dan nu bestaat. Monitoring van de dijk zelf kan helpen om instabiliteit direct te kunnen constateren.
- Voor eventuele nieuwe dijkconcepten die binnen DPW worden ontwikkeld, moet de monitoring worden aangepast op de dan vigerende toetsing.

6 Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots

6.1 Inleiding

De kennis die voor het toekomstig beheer van het Waddengebied nodig is, bevat nog aanzienlijke lacunes, zoals geconstateerd in het onderzoeksplan (Oost *et al.*, 2014). Het gaat hier met name om de werking van de sedimentdelende zeegatsystemen. Hierdoor kunnen we voor de diverse onderdelen het morfologische langetermijngedrag (tientallen jaren of meer) niet voldoende gedetailleerd en nauwkeurig modelleren en voorspellen (Hoofdstuk 2; Oost *et al.*, 2014). Het voorgestelde onderzoek zal deze open vragen deels kunnen oplossen. Het onderzoek is gefocust op de Nederlandse problemen. De bedoeling is daarbij om te komen tot voldoende kennis om een suite van modellen te kunnen ontwikkelen die de langetermijnontwikkeling kunnen voorspellen. In Nederland kan dit deels binnen het voorgenomen Kustgenese 2.0 of vergelijkbare programma's worden opgepakt. Daarin wordt voorgesteld om een grote meetcampagne te houden in een zeegat en op grond van de waarnemingen na te gaan of een vervolgonderzoek met een suppletieproef na 2020 nuttig wordt geacht. Daarnaast is het de verwachting, ook gezien de ministeriële aanbevelingen van de trilaterale Waddenzee-bijeenkomst 2014, dat ook in Duitsland en Denemarken gewerkt wordt aan de verwachte problemen in relatie tot klimaatverandering.



Figuur 6.1 Overzicht van de driehoek monitoring/data analyse, pilot studies en systeem onderzoek/modellering.

Het idee is om de kennisontwikkeling vorm te geven via systeemonderzoek & modelontwikkeling; monitoring & data-analyse en pilot studies (Figuur 6.1).

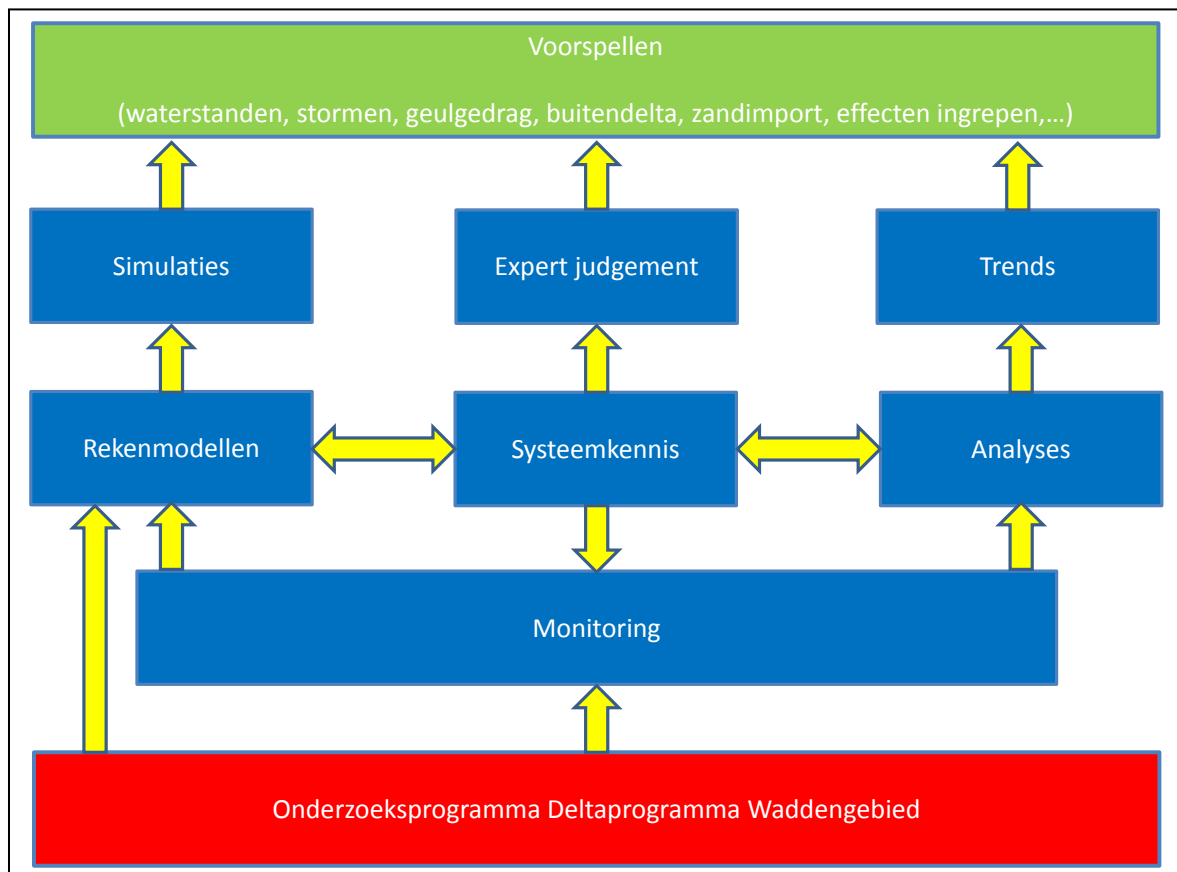
Het is belangrijk om te beseffen dat deze drie onderdelen nauw met elkaar zijn verbonden, maar daarnaast ook nog eigen doelstellingen dienen (*Figuur 6.2*). Monitoring & data analyse moeten de veranderingen registreren die optreden als gevolg van klimaatverandering in combinatie met antropogene invloeden.

Het moet echter ook helpen bij de opzet van de pilot-studies, terwijl omgekeerd de pilotstudies vooral de opzet van de daarbij behorende monitoring en analyse van gegevens zullen bepalen. De lange-termijn monitoring en de monitoring gerelateerd aan pilot-studies moeten ook de benodigde data leveren voor modellering en systeemonderzoek. Het systeemonderzoek moet antwoorden op de belangrijkste kwesties, geïdentificeerd als relevant voor het beheer. Pilot-studies, tenslotte, zijn niet alleen bestemd voor kennisontwikkeling maar moeten ook uitwijzen of innovatieve maatregelen de effecten van klimaatverandering kunnen mitigeren. Met andere woorden: werkt een bepaalde maatregel in de praktijk wel?

6.2 Relevantie

De focus van systeemonderzoek & modelontwikkeling is gericht op de veiligheidsgerelateerde lange-termijn ontwikkeling van de diverse onderdelen van het sedimentdelende zeegatsysteem. Zo moeten relevante lacunes in de kennis (zie Hoofdstuk 2 en Oost *et al.*, 2014) opgevuld worden. Daarbij wordt vooral ingezet op het ontwikkelen van een operationele suite van modellen voor de lange-termijn morfodynamiek van de sedimentdelende zeegatsystemen van het Waddengebied. Zo kunnen voorspellingen gedaan worden en de effecten/doelmatigheid van nieuwe beheermaatregelen worden doorgerekend. De modelontwikkelingen zullen langs drie lijnen worden gedaan: semi-empirisch (ASMITA), 2D/3D-procesgebaseerd en (nieuw) 1D-procesgebaseerd. Hier is in 2014 mee begonnen. Vooral de ontwikkeling van modellen met een proces-gebaseerde aanpak zullen meerjarige inspanning vereisen. Modelontwikkeling is geen doel op zich: het is een middel om kennis over de werking van het systeem nauwkeurig vast te leggen en voorspellingen mee te doen. Daarnaast zal het onderzoek ook weer nieuwe systeemkennis opleveren (*Figuur 6.2*).

Pilot studies kunnen twee doelen dienen: 1) kijken of en op welke wijze een bepaalde innovatieve maatregel werkt; 2) informatie toeleveren ten behoeve van systeemonderzoek & modelontwikkeling. De huidige ontwikkelingen laten zien dat sommige morfologische ontwikkelingen in het Waddengebied nu al optreden, terwijl andere zich veel langzamer voltrekken. Op grond daarvan kunnen we een aanbeveling doen voor de prioritering van de diverse mogelijke pilots.



Figuur 6.2 Schematisch overzicht van de relaties tussen de diverse onderdelen van het onderzoeksprogramma.

6.3 Informatiebehoefte

Voor het systeem- en modelonderzoek, betreft de informatiebehoefte vooral waarnemingen aan de sturende factoren (zie aldaar) en aan de morfodynamiek (hier behandeld) van de grote eenheden (buitendelta's, eilanden en kombergingsgebieden) van alle zanddelende zeegatsystemen van de Waddenzee.

Voor modelontwikkeling zijn bovendien monitoringdata nodig voor de randvoorwaarden, voor kalibratie en voor validatie. Dit spitst zich bij voorkeur (en voor zover mogelijk) toe op steeds één sedimentdelend zeegatsysteem. Omdat het om een operationeel model gaat, zullen de randvoorwaarden steeds bijgewerkt moeten worden met recente gegevens. Daarnaast zijn er ook de pilot-studies die specifieke informatie voor bepaalde onderdelen kunnen opleveren.

6.4 Indicatoren

Indicatoren vormen een hulpmiddel om snel (globaal) informatie te geven over de toestand van een systeem. Ze worden daarom vaak toegepast bij het bepalen van de te volgen strategie voor het beheer van het systeem, en kunnen daarbij zijn gekoppeld aan beleidsdoelen of wettelijke criteria.

Indicatoren hebben een beperking: ze geven geen (of zeer beperkt) informatie over de reden waaróm het systeem in een bepaalde toestand verkeert, en juist die informatie is bij kennis- en modelontwikkeling van belang.

Hiervoor zijn vaak de gedetailleerde data nodig, om een specifiek onderdeel of proces van het systeem te leren begrijpen. Voor de kennis- en modelontwikkeling heeft het dus geen zin om indicatoren te definiëren, maar gaan we specifiek in op de benodigde *procesmetingen*.

In het geval van pilot-ingrepen kan wel gebruik gemaakt worden van informatie uit indicatoren. Bijvoorbeeld om de effectiviteit van de ingreep te kwantificeren voor het beheer. In dat geval gaat het vaak om dezelfde indicatoren die in de voorgaande Hoofdstukken vanuit het beheer zijn gedefinieerd. Voor elke specifieke pilot-ingreep kunnen mogelijk andere indicatoren relevant zijn. Hieronder geven we een opsomming van de belangrijkste. Dit overzicht is niet uitputtend, mogelijk worden er in de toekomst pilots gedefinieerd waarvoor nog andere indicatoren van belang kunnen zijn.

Omdat pilot-ingrepen vaak ook worden gekoppeld aan specifieke kennisvragen, zullen er naast de metingen ten behoeve van de indicatoren ook procesmetingen nodig zijn.

De belangrijkste indicatoren voor pilot-ingrepen ten aanzien van de effectiviteit van de ingreep zijn:

- volumeveranderingen (sedimentatie en erosie) in het gesuppleerde gebied en de omliggende gebieden;
- ontwikkeling van de kustlijn in de omgeving (MKL positie).

De belangrijkste indicatoren voor pilot-ingrepen ten aanzien van de impact op het ecosysteem zijn:

- biodiversiteit indices (KRW indices);
- totale biomassa;
- kenmerkende soorten (zowel biomassa als aantal individuen);
- aanwezigheid en areaal van biogene structuren (schelpdierbanken, etc.);
- aanwezigheid van fossiele schelpenbanken (dienen vaak als substraat voor nieuwe populaties).

6.5 Databehoefte

6.5.1 Metingen voor de indicatoren

Databehoefte voor het monitoren van de impact van een pilot op het ecosysteem:

- Valt buiten dit monitoringplan.

Databehoefte voor het monitoren van de effectiviteit van de pilot-ingreep:

- voor de kustlijnligging: verdichte Jarkus (met één extra raai tussen de reguliere raaien) op de omringende kust, afhankelijk van het volume van de pilot gedurende 5 jaar tot 10 jaar na de ingreep.;
- voor de volumeveranderingen: zie voorgestelde bodemmetingen bij de procesmetingen.

6.5.2 Procesmetingen

Het uitvoeren van procesmetingen zijn van belang bij een pilot, alleen op die manier kan de pilot een wezenlijke bijdrage leveren aan de kennis- en modelontwikkeling. Maar ook zónder een pilot zijn extra metingen nodig. Een meetprogramma ten behoeve van kennis- en modelontwikkeling vereist veel inspanning. Beschikbaar budget zal hierin de beperkende factor zijn. Voorgesteld wordt daarom om de inspanningen te concentreren op één zeegat, zoals het Amelander Zeegat.

Om de veranderingen op verschillende schaalniveaus te kunnen bestuderen, is er grote behoefte aan een coherente (zowel in tijd als in ruimte) dataset van de bodemligging en de belangrijkste fysische processen.

De hieronder voorgestelde lijst met extra procesmetingen is niet uitputtend, maar dient als eerste voorzet voor het identificeren van de belangrijkste databehoefte voor zowel pilots als kennis- en modelontwikkeling.

Bodemligging:

- op de buitendelta: continue metingen met X-band Radar, aanvullen met enkele meetcampagnes (bijvoorbeeld met Jet-Ski's) voor ground-truth;
- in het bekken: frequente metingen met grond-laser (vanaf een vast punt, een auto of boot).

Bodemsamenstelling:

- op de buitendelta: ruimtelijke verdeling korrelgrootte en de variatie in de tijd (voor bepalen seizoensvariatie, effecten van stormen en herstel daarna). Mogelijke techniek: Flying Eyeball (vallende camera, USGS, Rubin *et al.*, 2006);
- in het bekken: hiervoor zou ook de bovengenoemde Flying Eyeball camera gebruikt kunnen worden, maar is mogelijk wel extra kalibratie voor nodig.

Golfmetingen:

Gebruik blijven maken van de bestaande WTI-palen en boeien. In het kader van onderzoek van golfpropagatie van diep naar ondiep water, wordt aanbevolen om een viertal golfboeien in de Eemsmonding te handhaven, ten minste nog voor een periode van 10 jaar.

Windmetingen:

Ook voor windmetingen kan gebruik worden gemaakt van de WTI palen, door deze uit te rusten met extra windmeters.

Stromingen (snelheid, debiet en transport):

- aantal permanente stations (tripods) gebruiken voor continue snelheidsvertikalen. Aantal hangt af van het hiervoor vrij te maken budget, zoveel als mogelijk;
- 13-uurs snelheidsmetingen over de geulen. Ter plaatse van het zeegat tenminste in 2 geulen, voor een nauwkeurige debietbepaling. Minstens 1x per jaar.;
- bovengenoemde 13-uurs metingen ook uitrusten met een OBS, om een schatting te kunnen maken van het sedimenttransport door de geulen.

7 Quick Reaction Force

7.1 Relevantie

De op korte termijn, event-gedreven monitoring wordt binnen het Deltaprogramma Waddengebied de 'Quick Reaction Force' (QRF) genoemd. Vanuit het Programmteam DPW is aangegeven dat een QRF een waardevolle bijdrage kan leveren aan het beleid en beheer van de Wadden met betrekking tot de effecten van extreme omstandigheden zoals grote stormen. Dit Hoofdstuk verkent de verschillende aspecten van extremen die door een QRF gevolgd zouden kunnen worden. Het geeft hiermee een voorlopige inventaris van de mogelijke effecten, wat daaraan gemonitord kan worden en waarom dat nuttig zou zijn.

Veel van de in de vorige Hoofdstukken genoemde monitoring moet regelmatig in de tijd worden uitgevoerd, van eens per 10 minuten tot eens per 10 jaar. Er zijn echter ook bijzondere (weers)omstandigheden die om monitoring voor, tijdens en/of na de gebeurtenis vragen. Zulke extreme gebeurtenissen zijn bijvoorbeeld stormvloed, extreem laag water, sterke ijsgang of aardbevingen. Afgezien dat extra monitoring nodig kan zijn om acute risico's in te schatten (cf. dijkwacht door de waterschappen), geeft het bijvoorbeeld tijdens stormvloed meer inzicht in het onder extreme omstandigheden functioneren van het systeem.

Het zal belangrijk zijn dat resultaten van QRF beschikbaar zijn voor het beheer van de Waddenzee; daartoe dienen deze resultaten voor andere specifieke gebruikers opengesteld te worden.

7.2 Werking relevante onderdelen systeem

Stormvloed

Tijdens stormen ontstaat er opzet van de waterspiegel door de wind en door de verlaagde barometrische druk en worden golven opgewekt door de wind. Stormen uit het Noordwesten zorgen voor verhoging van de waterspiegel en tot een grotere golfaanval op de keringen en kans op schade en kans op grote morfologische veranderingen.

Extreem laag water

Extreem laag water treedt vooral tijdens sterke oostenwind, wanneer het water in de Noordzee richting Engeland wordt geblazen. Hierdoor vallen extra veel platen droog, waardoor observaties op deze platen soms makkelijker worden dan wanneer ze onder water staan. Ook is er meer van zichtbaar van keringen die direct aan dieper water liggen.

Ijsgang

Bij langdurige vorst kan kruisend ijs ontstaan. Wanneer dit door wind en getij richting de dijken wordt gestuwd, kan schade aan de dijken ontstaan. Vanwege de verwachte algemene temperatuurstijging (KNMI, 2014) zal de frequentie van ijsgang waarschijnlijk lager worden.

Aardbevingen

Recent is duidelijk geworden dat door gaswinning geïnduceerde aardbevingen schade aan waterkeringen in het Waddengebied kunnen veroorzaken. Korff *et al.*, 2014 hebben hiervan een uitgebreide inventarisatie gemaakt. Zie ook Hoofdstuk 3 Sturende Factoren.

7.3 Informatiebehoefte

Vanuit het DPW is de QRF vooral interessant voor de lange termijn: het geeft informatie over cruciale gebeurtenissen die bepalend zijn voor het overstromingsrisico en voor de evolutie van het Waddensysteem, en over de impact hiervan op de maatschappij (sluiting keringen, schade etc.). Uiteraard heeft de informatie die een QRF verzamelt ook betekenis voor de korte termijn (bijvoorbeeld schade aan een waterkering, kwaliteit verwachtingen, of grote sedimentverplaatsingen).

Stormvloeden

Op dit moment is de monitoring rond stormvloeden grotendeels decentraal geregeld, deels bij RWS, deels bij de waterschappen, en de meteo ook bij KNMI. De taak van de QRF is om informatie samen te brengen en te analyseren, voor afstemming te zorgen, en de resultaten breed beschikbaar te maken.

Om deze taak uit te voeren heeft de QRF de volgende informatie nodig:

- eigenschappen stormvloed;
- hoogste golfploop bij waterkering, optreden van overslag;
- kwaliteit verwachtingen en simulaties;
- operatie waterkeringen: sluiten keringen (coupures, sluizen, etc.) en dijkbewaking;
- berichtgeving en waarschuwingen: stormvloedwaarschuwingen, uitvallende verbindingen (veerboten), gevaarlijke situaties langs de kust (strand, havendammen), acties die bij calamiteitenorganisaties worden ondernomen;
- afslagprofielen van duinen, te toetsen aan kritische profielen; grote sedimentverplaatsingen bijvoorbeeld over platen de geul in.;
- schade aan dijken en kunstwerken; eventuele onvolkomenheden bij de operatie van keringen en kunstwerken.

Extreem laag water

Het grote areaal droogvallende platen biedt de mogelijkheid om vanuit de lucht waarnemingen aan deze platen te doen. In voorkomende gevallen is het van groot nut een LiDAR vlucht te maken. Een deel van keringen en kunstwerken dat normaal onder water staat kan bij extreem laagwater eenvoudig worden geïnspecteerd om de staat ervan vast te stellen. Beoordeling daarvan gaat volgens de reguliere methoden (Hoofdstuk 5).

Ijsgang

Voor waterbeheer is van belang om te weten wat de relatie is tussen meteo en ijsgang (en/of hoe goed modellen zijn die ijsgang uit de meteo forcing berekenen), en tussen ijsgang en schade. Monitoring van ijsgang tijdens vorstperiodes is van belang voor de waterkeringbeheerder vanwege de kans op schade aan de kering.

Aardbevingen

Bodemdaling als gevolg van gaswinning kan gepaard gaan met aardbevingen. In Korff *et al.* (2014) wordt aanbevolen aandacht te besteden aan het effect van aardbevingen op waterkeringen. In het calamiteitenplan bij aardbevingen van de Veiligheidsregio Groningen (Veiligheidsregio Groningen, 2014) is inspectie van de dijken als item opgenomen.

Het is niet goed bekend of aardbevingen plaatvallen kunnen doen ontstaan. Dat komt vooral door de lage frequentie waarmee bathymetrie van de Waddenzee opgenomen wordt. Van dijkvallen is veel meer bekend (Korff *et al.*, 2014).

7.4 Indicatoren

Er zijn twee soorten indicatoren voor QRF:

- (1) Wanneer moet de QRF in stelling worden gebracht;
- (2) Wat gaat de QRF dan meten.

Stormvloeden

Actie bij:

- bereiken kritische waterniveaus zoals vastgelegd bij calamiteitenorganisaties;

Metten:

- herhalingstijden, inclusief schatting hoe die beïnvloed wordt door zeespiegelstijging;
- kwaliteit verwachtingen voldoet niet aan de norm;
- optreden van schade die aanleiding geeft tot herstelactie (zie Hoofdstuk 5 Belastingen en Waterkering);
- indicator voor QRF actie: stormvloed met herhalingstijd van 2 jaar of meer.

Extreem laag water

Actie bij:

- niveau laagwater aanmerkelijk lager dan minimaal astronomische getij niveau, vooraf vast te stellen waarde.

Metten:

- waterlijn bij extreem laag water;
- schade aan voet keringen;

IJsgang

Actie bij:

- indicator voor QRF actie: beginnende ijsbedekking in IJsselmeer en Waddenzee in combinatie met verwachte aanhouding van periode met strenge vorst.

Metten:

- ijsbedekking IJsselmeer (vanwege Afsluitdijk) groter dan percentage bepaald door keringbeheerders;
- ijsbedekking Waddenzee groter dan percentage bepaald door keringbeheerders;
- optreden van schade die aanleiding geeft tot herstelactie (zie Hoofdstuk 5 Belastingen en Waterkering);

Aardbevingen

Actie bij:

- Magnitude van de aardbeving: in het calamiteitenplan van de provincie Groningen (Veiligheidsregio Groningen, 2014) is magnitude 3 als drempel gekozen; horizontale piekversnellingen met een terugkeertijd van 475 jaar (zie Korff *et al.*, 2014; cf. Europese norm).

Metten:

- optreden van schade die aanleiding geeft tot herstelactie (zie Hoofdstuk 5);

7.5 Databehoefte en rapportagebehoefte

Stormvloeden

- visuele inspectie (dijkbewaking, tijdens en na een storm, o.a. van veekranden om niveau maximale golfoploop vast te stellen). Zwakke plekken in dijken kunnen online bewaakt worden met sensoren.
- waterstanden, golven en belastingen;
- meteorologische situatie;
- bodemligging:
 - o duinen en strand (voor na een storm);
 - o geulen nabij keringen op bekende kritieke punten (na een storm);

- bathymetrie voor en na de storm op bekende kritieke punten en op meer plekken wanneer daar aanleiding voor is;
- uitgevallen sensoren en dataverbindingen.

Ten behoeve van DPW onderzoeksplan (zie Hoofdstuk 6 Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots):

- golfdoordringing van lange golven en bijbehorend sedimenttransport tot aan de duinvoet; waterstanden, transport en morfologische veranderingen tijdens overwash; duinafslag;
- waterbeweging op platen en geulen, keel van het zeegat, over kwelder;
- sedimenttransport over wantijen (cf. metingen ooit verricht op het wantij van Ameland. Er is hierbij groot risico apparatuur te verspelen en de haalbaarheid is discutabel);
- golfaanval en –oploop op dijken (WTI);
- kliferosie op kwelder, sedimenttransport tussen kwelder, pionierzone en wad.

Op geaggregeerd niveau wordt de informatie samengebracht in *Stormvloedrapportages*. Deze worden systematisch opgesteld na elke grote stormvloed (bv. voor elke stormvloed met een herhalingstijd van 2 jaar of meer). Het doel van de rapportages is meervoudig:

- Toets of het stormvloedwaarschuwingssysteem op orde is.
- Het analyseren van mogelijke oorzaken van tekortkomingen in stormsimulaties.
- Het overzichtelijk en toegankelijk vastleggen van bijzondere situaties die van invloed kunnen zijn op de veiligheid.
- Het afleggen van publieke verantwoording.

De QRF beschikt over middelen om een *task force* in te zetten om zo nodig binnen gepaste tijd extra analyses en studies uit te laten voeren door kennispartners om urgente kennisvragen te beantwoorden.

Om in de informatiebehoefte van onderzoek te voorzien wordt de onderliggende data beschikbaar gemaakt in *Stormvloed-databases*. Het gaat hier onder meer om gegevens die inzicht leveren in het gedrag van:

- karakterisering meteo en waterstanden storm, inclusief vaststellen herhalingstijd;
- buitendelta's, zeegaten, platen in de Waddenzee;
- eilanden: duinerosie, eilandkop-erosie en washovers;
- kombergingsgebied: sedimenttransport over wantijen; veek op dijken (veek = aanspoelsel na een stormvloed); effecten van golfaanval op dijken;
- reactie van kwelders (erosie aan de kwelderrand, ophoging op de kwelder zelf).

Extreem laag water

- Laag water biedt de gelegenheid om luchtfoto's te maken, bijvoorbeeld multispectrale foto's voor sedimentsamenstelling.
- Inspectie gedeeltes van keringen die normaal onder water liggen.

IJsgang

- opgetreden weer (temperatuur, duur vorstperiode, windsterkte en -richting);
- kaart gemeten watertemperatuur en % ijsbedekking;
- waargenomen ijsgang en –ophoping langs keringen;
- schade aan keringen na afsmelten ijs: visuele inspectie, foto's (handmatig of gestandaardiseerd vanuit auto), via luchtfoto's (bijv. drones).

Aardbevingen

- inspectie coupures zeedijk in Delfzijl en de bekende zwakke punten langs de kust (voor kaart: zie Visschedijk *et al.* fig. 2.2);
- inspectie sluizen Eemskanaal;

- inspectie uitbreiden naar zeedijken als schade wordt geconstateerd aan interne waterkeringen in provincie Groningen (bv. langs Damsterdiep).

7.6 Huidige monitoring

Organisaties (RWS, Deltares, Waterschappen, KNMI, etc) voeren nu al evaluaties uit van de effecten stormvloeden en de kwaliteit van stormvloedverwachtingen. Extra metingen tijdens en na stormen vinden op beperkte schaal plaats. Tijdens extreme stormen is er uiteraard dijkbewaking door de Waterschappen, en als daar aanleiding toe is worden er kort na de storm inspecties uitgevoerd om niveau van golfoploop vast te stellen (uit veekranden) en tekenen van overspoelen. Bij extreme afslag of waterindringing worden soms extra waarnemingen verricht; dat heeft overigens vooral zin als de situatie voor de storm goed bekend is.

Bij RWS wordt na elke zitting van het Watermanagementcentrum Nederland – Kust (WMCN-Kust, de voormalige SVSD, de instantie die operationele stormvloedverwachtingen en waarschuwingen uitgeeft) binnen 1 of 2 dagen een *stormvloedflits* uitgebracht met de belangrijkste karakteristieken van de storm en de uitgegeven verwachtingen. Bij extreme stormen (i.e. met een herhalingstijd van twee jaar of langer) wordt binnen 3 maanden een *stormvloedrapportage* uitgebracht door RWS en Deltares, met als daar aanleiding toe is bijdrages van andere organisaties zoals de Waterschappen en het KNMI. Een voorbeeld is de rapportage over de Allerheiligenvloed in 2006 (den Heijer *et al.* 2007). De stormvloedflitsen en stormvloedrapportages worden toegezonden aan geïnteresseerden. De focus van de rapportages ligt op de opgetreden stormvloed en de kwaliteit van de verwachtingen. Bij grote afwijkingen tussen verwachte en opgetreden stormvloed kan vervolgens een nog grote *evaluatie* worden uitgevoerd.

7.7 Opzet QRF

Voor de lange-termijn monitoring en het onderzoeksprogramma van DPW is het zaak de impact van extreme gebeurtenissen goed vast te leggen en te documenteren, zoals eerder in dit Hoofdstuk betoogd. Op dit moment houden een aantal organisaties (RWS, Deltares, KNMI, Waterschappen) zich al bezig met de evaluatie van stormvloeden, veelal vanuit operationeel perspectief. Wellicht hebben ook natuurbeheerders in het Waddengebied behoefte aan beter inzicht in het effect van extreme omstandigheden op de ecologie.

Het idee van de QRF is dat hierin de diverse stakeholders effectief samenwerken en informatie delen. Zo'n QRF zou in het kader van een programma als Kustgenese 2.0 ontwikkeld kunnen worden. Begonnen kan worden met het in kaart te brengen van stakeholders en overleg te initiëren waar dit nog niet bestaat. Het doel hiervan is een plan voor het afstemmen van metingen en het opstellen van rapportages door de verschillende partijen, zowel tijdens een gebeurtenis als daarna. Een bijkomend voordeel is dat door stroomlijning en afspraken over data opslag en data uitwisseling dubbel werk voorkomen kan worden. De daadwerkelijke uitvoering van de QRF activiteiten zou in de reguliere programma's van de partners worden ondergebracht, zoals LMW en MWTL van RWS.

Wellicht is een regionale aanpak het meest praktisch, en te beginnen met een pilot QRF voor dijkkring 6, inclusief de eilanden.

Betrokkenheid van kennispartners zoals Deltares en Imares bij *ad-hoc* evaluaties dient goed geborgd te worden in afspraken tussen de opdrachtgevers zoals RWS en de kennisinstellingen. Hiervoor is gewenst dat de QRF ook de middelen heeft om zo nodig een *task force* binnen gepaste tijd extra analyses en simulaties uit te laten voeren.

7.8 Aanbevelingen

- Ontwikkel in het kader van programma's zoals Kustgenese 2.0 een *Quick Reaction Force (QRF)* die de extra monitoringsbehoefte rond extreme gebeurtenissen voorziet, en zorgt voor effectief delen en toegankelijk maken van deze informatie. De QRF zou daarna ondergebracht kunnen worden in bestaande programma's van de deelnemende partners, zoals LMW en MWTL.
- Maak middelen beschikbaar zodat de QRF in bijzondere gevallen een *task force* binnen gepaste tijd extra analyses en simulaties kan laten voeren.

8 Synthese

8.1 Doel

In dit Hoofdstuk maken wordt een inventarisatie gemaakt van alle monitoringbehoefes uit de vorige Hoofdstukken. Daarbij worden monitoringtypes gekoppeld aan gebruiksdoelen, en wordt nagaan of de huidige monitoring in die behoeftes voorziet. Wanneer dit laatste niet het geval is, worden voorstellen voor nieuwe monitoring gedaan. Dit wordt – in tegenstelling tot de eerdere Hoofdstukken- gedaan per monitoringgrootte (meteo, waterbeweging, etc.). Bijvoorbeeld: bodemligging is zowel voor sturende factoren, als voor morfologische ontwikkeling, als voor staat van de kering nodig. Door deze bundeling ontstaat de basis voor een monitoringplan dat door uitvoeringsinstanties zoals Rijkswaterstaat kan worden geïmplementeerd. Monitoring kan mogelijk in bepaalde gevallen beter en efficiënter door de inzet van relatief nieuwe monitoringstechnieken. Aan het eind van dit Hoofdstuk staan hiervoor een aantal voorbeelden van toepassing op de DPW monitoring.

8.2 Inventarisatie monitoringbehoefte

Om te kunnen zien waarvoor de diverse types monitoring plaats vinden, en waarin wel en waarin niet wordt voorzien, is een inventarisatie gemaakt die doelen koppelt aan te meten grootheden. Daarbij staat aangegeven of de huidige monitoring daarin voldoet. Deze inventarisatie heeft de vorm een tabel, die vanwege de lengte is ondergebracht in Bijlage B. Daarin is per monitoringgrootte/mmeetvariabele (op alfabetische volgorde gerangschikt) verder aangegeven in welk Hoofdstuk die behoefte is beargumenteerd. Ook worden gewenst aantal meetpunten/resolutie, meetfrequentie, meetmethode en gegeven.

8.3 Prioritering nieuwe monitoringvragen

8.3.1 Overzicht

De huidige monitoring dekt niet de volledige monitoringbehoefte van het Deltaprogramma Waddengebied. DPW adviseert daarom een aanvulling in de monitoring. In deze sectie worden voorstellen gedaan om deze leemtes op te vullen, en wordt deze aanvullingen geprioriteerd (Tabel 8.1). Het idee van het Deltaprogramma is dat de uitvoering de verantwoordelijkheid is van de bestaande uitvoeringsorganisaties. Daarom worden ook suggesties genoemd voor programma's en uitvoeringsorganisaties waar de monitoring zou kunnen worden ondergebracht.

In de volgende deelhoofdstukken wordt Tabel 8.1 verder toegelicht. We maken hierbij een indeling in 2 categorieën:

- Monitoring ontwikkelingen en risico's Waddengebied (reguliere monitoring), die in principe geen einddatum heeft;
- Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots (projectmatige monitoring), die een beperkte looptijd heeft.

Tabel 8.1. Overzichtstabel gewenste aanvullende monitoring

Doel	Doorlopend/ Project	Prioriteit	Mogelijk programma/ Financiering
Voldoende monitoring meteorologie golven	doorlopend	urgent	LMW
Voldoende monitoring stroming	doorlopend	urgent	programma's als Kustgenese 2.0 ⁸
Gericht frequent bathymetrie meten in dynamische gebieden	doorlopend	hoog	DPW
LiDAR metingen eilanden	doorlopend	urgent	programma's als Kustgenese 2.0
Bijdrage Jason-CS satelliet zeespiegelstijging	doorlopend	hoog	I&M
Meetprogramma bodemeigenschappen	doorlopend	hoog	programma's als Kustgenese 2.0
Voldoende vegetatiemetingen en kwelderhoogtemetingen	doorlopend	interessant	EZ
Dijkstabiliteit	doorlopend	hoog	Waterschappen
Meteorologie, stromingen en golven zeegatsysteem Ameland	project	urgent	WTI en vervolg
Continuering Seadarq radarmetingen zeegatsysteem Ameland	project	urgent	WTI en vervolg
Bodemmetingen kennisontwikkeling en kleine zandsuppletie pilots: zoals de voorgenomen geulwandsuppletie Ameland, geulwandsuppletie Vlieland Oost (Stortemelk) en geulverlegging Vierhuizergat	project	urgent	programma's als Kustgenese 2.0
Metingen tijdens en na stormen	doorlopend (basis) en project (uitgebreid)	hoog	ontwikkeling: programma's als Kustgenese 2.0; uitvoering: beheerorganisaties
Kennisontwikkeling lucht-zee-wad wisselwerking tijdens stormen	project	hoog	I&M / Water en Klimaat

8.3.2 Nieuwe monitoring ontwikkelingen en risico's Waddengebied (reguliere monitoring)

- Huidige monitoring van meteorologie en golven in overeenstemming met behoeftes brengen en houden (Hoofdstuk 3 en 5). De huidige monitoring dekt het merendeel van de behoefte maar staat onder druk. In het Eems-Dollard gebied, waar de kwaliteit van de waterstandverwachtingen te wensen over laat, is vooralsnog een substantiële monitoringinspanning gewenst. Ook de golfbelasting van de kust van het vasteland verdient meer aandacht om mogelijke veranderingen goed te kunnen bepalen. Daar zijn metingen nodig om de golfmodellen te valideren. Als het WTI programma (zie Hoofdstuk 9 Inbedding) beëindigd wordt, zijn extra LMW (Landelijk Meetnet Water, zie Hoofdstuk 9 Inbedding) locaties nodig om gaten van meer dan 50 km in het netwerk langs de Noordzeekust en de kust van het vasteland op te vullen (indicatie: 3 windpalen + zeewatertemperatuur, en 4 golfboeien). Aanbevolen wordt daarom om enkele WTI locaties op te nemen in het LMW. De kosten zijn beperkt omdat bestaande instrumenten hergebruikt kunnen worden, en de eerste jaren nog ten laste van WTI 2017 komen. Zie ook verdere aanbevelingen in Wenneker (2014).

⁸ Thematische programma's voor onderzoek en monitoring van de waterveiligheid van de zandige kust.

- Stromingen (buiten pilotprojecten). Extra structurele stromingsmetingen zijn nodig voor het verbeteren van de waterstands- en golfmodellen, noodzakelijk voor een betere bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (Hoofdstuk 5 en 6).
- Bodemligging gericht frequenter opnemen in dynamische gebieden en gebieden die grote invloed op de hydraulische randvoorwaarden hebben. Het gaat hier met name om voorlanden (Hoofdstuk 5).
- LiDAR metingen voor de jaarlijkse kusthoogtemetingen (Jarkus) op de eilanden uitbreiden om dynamische ontwikkelingen in voldoende ruimtelijk detail te volgen. Het gaat om de buitendijkse delen van de eilanden: eilandkoppen en –staarten, inclusief duinen, kwelders en groene stranden, om zo inzicht in meegroeivermogen en de sedimentbalans van de eilanden te krijgen (Hoofdstuk 4 en 6). Omdat deze behoefte vooral uit onderzoek voortkomt kan ook overwogen worden deze metingen onder te brengen in programma's als Kustgenese 2.0.
- Bijdrage aan Jason-CS satelliet voor metingen zeespiegelstijging (Hoofdstuk 3). Met satellietmetingen kunnen trends en patronen in zeespiegelstijging eerder gedetecteerd worden zodat de onzekerheid in de verwachte zeespiegelstijging vermindert. Dit heeft hoge prioriteit.
- Opstellen meetprogramma bodem/sedimenteigenschappen zoals korrelgrootteverdeling. De morfologische modellen die in het Onderzoeksplan Deltaprogramma Waddengebied worden ontwikkeld, en daarna operationeel worden, gebruiken bodemeigenschappen zoals sedimentsamenstelling als invoerparameter. Veranderingen van bodemeigenschappen geven inzicht in de sedimenthuishouding, en zijn een belangrijke indicator voor het beoordelen van ecosystemefunctioneren (natuurwaarden). In de huidige monitoring worden bodemeigenschappen zeer beperkt gemeten. Voor het bepalen van de seizoensvariatie, het effect van stormen en het herstel daarna is monitoring met goede ruimtelijke en temporele dekking nodig (Hoofdstuk 6). Aanbevolen wordt het programma in de ontwikkelingsfase onder te brengen in programma's als Kustgenese 2.0.
- Metingen maaiveldhoogtes en vegetatiesamenstelling van de kwelders uitbreiden naar Dollard- en eilandkwelders, en voor vegetatiesamenstelling naar duinen en groene stranden. Op dit moment worden alleen specifieke meetvakken in de kwelderwerken van Friesland en Noord-Groningen gemonitord in opdracht van EZ (Wettelijke Onderzoekstaken) en RWS. Deze uitbreiding is zeker van belang wanneer kwelders en voorlanden een grotere rol in de formele waterkering gaan vervullen (Hoofdstuk 5).
- De dijkstabiliteit waar het kritische situaties betreft (bijvoorbeeld steil profiel, losse pakking zandlagen) is vaak nog onvoldoende bekend. Dit wordt voor een belangrijk deel opgepakt in programma's zoals WTI 2017 en in onderzoek naar de aardbevingsgevoeligheid van dijken. Toch blijkt dat er kritische situaties kunnen optreden bijvoorbeeld waarbij de dijkstabiliteit ondermijnd wordt door snel opdringende of verdiepende geulen. Het zijn niet zozeer tekortkomingen als gevolg van toetsingscriteria als wel ten gevolge van de ontoereikende toetsingsfrequentie die kunnen leiden tot verminderde veiligheid. Daarbovenop komt nog de beïnvloeding van dijkstabiliteit door aardbevingen. Op kritische locaties zou een standaardprotocol moeten worden opgezet voor frequenter loden van de vooroever en eventueel ook het meten van tijdsafhankelijke waterspanningen en vervormingen in de dijk. Deze metingen zouden gecombineerd moeten worden met stabiliteitsberekening binnen een continue toetsing (het toetsingsinstrumentarium daartoe zal in 2017 beschikbaar zijn) of met een real-time stabiliteitsvoorspelling in de tijd. Aanbevolen wordt om een proeflocatie te overwegen waar de genoemde monitoringdata (ligging vooroever, deformaties, waterspanningen) wordt verzameld en vervolgens gecombineerd met systemen voor directe stabiliteitscontrole.
- Meer ruimtelijk detail neerslag, bodemvocht, sneeuw en zicht. Omdat de DPW niet de belangrijkste behoeftesteller is aan deze gegevens wordt deze behoeftes niet binnen dit Monitoringplan geprioriteerd.

8.3.3 Nieuwe monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots

De nieuwe monitoring die wordt voorgesteld voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots zijn projecten voor kennisontwikkeling en zandsuppletiepilots. Hieronder wordt deze monitoring nader toegelicht.

- Monitoring van meteorologie, stromingen en golven zeegatsysteem Amelanders zeegat (*in situ*). Gezien de over het algemeen beperkte middelen wordt het aanbevolen de monitoring t.b.v. kennisontwikkeling en pilots zoveel mogelijk in één gebied te laten plaatsvinden, en daarvoor het Amelanders zeegat te kiezen. Daarmee kan worden voortgebouwd op de huidige en vroegere WTI meetcampagnes. Het waarnemingssysteem dient in staat te zijn in combinatie met modellen tot betrouwbare schattingen van de meteorologische forcering en het stromingsveld in het zeegatsysteem te komen. Voor de monitoring van golven en wind kunnen de bestaande WTI-palen worden aangehouden, die dan extra moeten worden uitgerust met windmeters. Voor de monitoring van stromingen en sedimenttransport wordt aanbevolen om enkele permanente stations te gebruiken voor continue snelheidsvertikalen. Aanvullend zou, op minstens twee plaatsen in het zeegat, één keer per jaar een 13-uurs snelheidsmeting in de geulen moeten worden gedaan. Door daarbij ook een troebelheidsmeter (OBS) in te zetten, kan een inschatting worden gemaakt van het sedimenttransport.
- Continuering WTI radarmetingen in het zeegatsysteem Ameland en omgeving (*remote sensing*; Swinkels *et al.*, 2012). De Seadarq software maakt gebruik van de reeds aanwezig radar op de vuurtoren van Ameland en levert gecombineerd met de in-situ waarnemingen een aanzienlijke meerwaarde op voor het bepalen van het golfveld in het Amelanders zeegat, en biedt perspectieven op het beter schatten van het stromingsveld.
- Bodemmetingen zeegatsysteem Ameland en kleine zandsuppletiepilots. Op het moment van verschijnen van dit rapport zijn drie pilotlocaties voorzien: de twee geulwandsuppleties West-Ameland en Vlieland Oost (Stortemelk), en een geulverlegging van het Vierhuizergat. De effecten en de efficiëntie van dergelijke pilots kunnen alleen betrouwbaar worden vastgesteld als er voldoende bodemmetingen zijn van zowel de specifieke locaties als de wijdere omgeving. Ook om het gedrag van het omliggende zeegat beter te begrijpen zijn frequentere lodingen nodig dan nu het geval is. Deze combinatie van monitoring voor pilots en onderzoek vereist een combinatie van technieken zoals singlebeam lodingen, multibeam lodingen van ondieptes met bijvoorbeeld jetski's, LiDAR metingen en X-band radar (Hoofdstuk 6). Aanbevolen wordt om de extra monitoring voor pilots in programma's als Kustgenese 2.0 onder te brengen.
- Metingen tijdens en na stormen, en andere extremen. De kennis van de impact van extreme stormen is niet optimaal omdat die stormen zo zeldzaam zijn. Het is zaak om als zo'n storm optreedt daar maximaal lering uit te trekken. Nu wordt er veel extra informatie na een storm ingewonnen en opgeslagen, maar die informatie wordt niet altijd wijd en toegankelijk gedeeld. De aanbeveling is een *Quick Reaction Force (QRF)* te implementeren, dat rond extreme stormen gericht informatie inwint en zorgt voor effectief delen en toegankelijk maken van deze informatie. Ook bij andere extreme situaties zoals aardbevingen zou de QRF in actie kunnen komen. De QRF zou ook in bijzondere gevallen een *task force* binnen gepaste tijd extra analyses en simulaties moeten kunnen laten uitvoeren. Het opzetten van een QRF past goed binnen een programma's als Kustgenese 2.0. De QRF zou daarna ondergebracht kunnen worden in bestaande programma's van de deelnemende partners, zoals LMW.
- De wisselwerking tussen lucht, zee en bodem tijdens stormen, en de impact daarvan op de morfologie is nog onvoldoende bekend. Daarom is er behoefte aan meetcampagnes die speciaal hierop zijn gericht. Om dergelijke uitgebreide onderzoek en monitoring op te zetten, is het aan te bevelen samen te werken met de Duitse en Deense partners uit het Trilaterale Onderzoeksprogramma, en programma's zoals Water en Klimaat.

8.4 Nieuwe (toepassing van) monitoringtechnieken

Nieuwe ontwikkelingen in informatietechnologie, cameratechnieken en automatisering van metingen leveren geregeld innovatiemogelijkheden voor monitoring. Aanbevolen wordt om –zoals in de praktijk vaak al gebeurt- het gebruik van nieuwe technieken in te zetten als dit de monitoring beter en efficiënter maakt. Hier worden enkele suggesties gegeven van technieken die in de toekomst mogelijk kunnen worden ingezet voor monitoring voor DPW.

Steeds vaker wordt *remote sensing* ingezet voor het verzamelen van monitoringdata. *Remote sensing* is het verzamelen van informatie op afstand, zoals vanuit satellieten of vliegtuigen. Mogelijkheden voor het DPW monitoringplan zijn bijvoorbeeld:

- sedimentclassificatie, d.w.z. korrelgrootte van het sediment, in het intergetijdengebied. Hiervoor zijn wolkeloze opnames nodig tijdens laag water, met hoge resolutie. Daarvoor zijn verscheidene satellieten geschikt.
- Van kwelders en duinen kunnen vegetatie en morfologische veranderingen gemeten worden, zowel met satellietdata als met drones (UAV's, Uninhabited Aerial Vehicles, oftewel onbemande vliegtuigjes).
- Van mossel- en oesterbanken op de voorlanden kunnen locatie, grootte en oppervlakteruwheid worden bepaald, zowel met satellietdata als met drones.
- Morfologie en morfologische veranderingen kunnen –vooral met foto's tijdens laagwater – worden bepaald. Dit kan met satellietfoto's, luchtfoto's vanuit vliegtuigen, drones en met het Argus-systeem. Het Argus videosysteem, dat op een hoog punt wordt gemonteerd, is vooral geschikt voor het volgen van een specifieke locatie met een omvang tot enkele kilometers over een periode van jaren, met meestal een resolutie van eens per uur tijdens daglicht. Daarom is Argus met name geschikt voor locaties voor pilots en/of waar nader onderzoek gewenst is.
- Met radar (bijvoorbeeld in combinatie met SeaDarQ) kunnen wind, stroming en oppervlakteruwheid door golven worden geschat.
- Terrestrial Laser Scanner (TLS) kan in groot detail objecten scannen en daarmee hoogte en vorm bepalen. De methode kan interessant zijn voor het volgen van pilots, op plaatsen waar gedetailleerde veranderingen worden verwacht.

Voor alle metingen geldt dat kalibratie met veldgegevens (*groundtruthing*) noodzakelijk is, en dat de algoritmes geschikt moeten zijn voor de Waddenzee. De toepasbaarheid is onder andere afhankelijk van de lengte van de tijdseries, de ruimtelijke resolutie, de banden (golflengtes), gewenste nauwkeurigheid, de wolkenbedekking, of de foto's met laagwater zijn of niet, en de beschikbare satellieten (de data van elke satelliet heeft weer andere specificaties). Een uitgebreide beschrijving van mogelijkheden voor *remote sensing* in het Waddengebied is te vinden in Davaasuren *et al.* (2012).

Andere mogelijke meetmethoden zijn bijvoorbeeld:

- Het meten van de natuurlijke gammastraling van sediment is in potentie bruikbaar om de sedimentsamenstelling (zand – slib) van wadplaten en geulen te meten, in een hogere dichtheid en in kortere tijd dan met traditionele sedimentmonsters (Venema & De Meijer, 2001; Van Wijngaarden *et al.*, 2002; De Groot, 2009).
- Binnen het project FloodControl 2015 is in 2010 onderzoek uitgevoerd naar het gebruik van sensortechnologie voor dijken (Bultsma, 2010). Het blijkt dat dit vooral kostenefficiënt is bij twijfelachtige dijkstrekkings (net goed- of afgekeurd), mits de onzekerheden samenhangen met tijdsafhankelijke parameters zoals waterspanningen.
- Waterstanden kunnen mogelijk uit GPS gegevens van boten worden afgeleid.
- De veerboten van de Teso (Texel) zijn uitgerust met meetapparatuur waarmee hydrodynamica, temperatuur, zoutgehalte en sedimenttransporten worden gemeten (<https://teso.nl/en/teso-mainmenu-70/teso-en-duurzaamheid/teso-schepen-verrichten-onderzoek-voor-het-nioz>). Versies hiervan zijn mogelijk ook op andere veerboten toepasbaar. Aandachtspunten daarbij zijn hoe vaak de veerboot vaart, de route, en de inpassing van de meetinstrumenten op de boot.
- Een groter publiek kan via *crowdsourcing*, zoals met (mobiele) *apps*, worden ingezet voor het opnemen van temperatuur, luchtvochtigheid, morfologie, plantengroei, hoogteligging, of fotomateriaal.

Een aandachtspunt is dat technisch-methodologische innovaties vaak tot *extra* data leiden en daarmee wellicht betere informatie, maar niet automatisch tot het efficiënter maken van monitoringsinspanningen: voor het uitwerken van grote hoeveelheden data kunnen extra inspanning en budget nodig zijn.

Ook is het van belang dat de continuïteit van de meetreeksen bewaard blijft, dat wil zeggen dat de resultaten van nieuwe en oude metingen naast elkaar gebruikt kunnen worden en dat er geen grote veranderingen in uitkomst optreden door een verandering in meetmethode (tenzij dit een grote verbetering betreft natuurlijk).

9 Inbedding en organisatie

9.1 Inleiding

De implementatie van het Monitoringsplan DPW zal worden opgepakt door de beleid- en beheerorganisaties die over het Waddengebied gaan. In dit Hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de afspraken en plannen die door deze organisaties zijn overeengekomen in overleg met het Deltaprogramma.

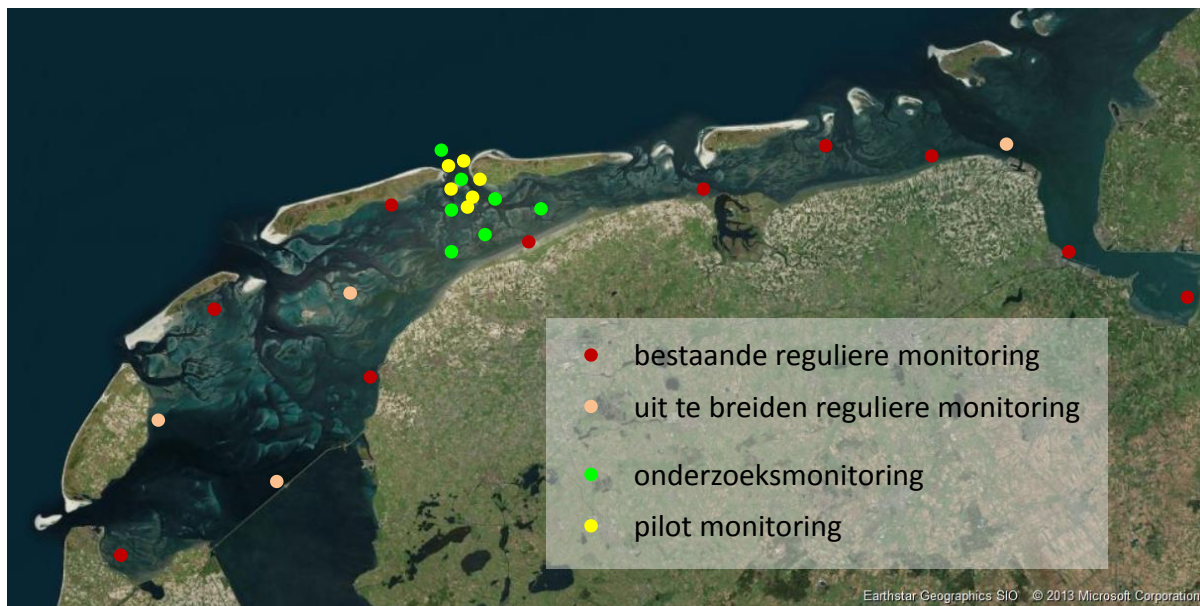
In *Figuur 9.1* is de structuur van het Monitoringplan schematisch weergegeven. Uitgangspunt is de monitoring zoals die nu plaats vindt door met name Rijk en Waterschappen. Met enige aanvullingen is de bestaande monitoring ook geschikt voor veiligheidsmonitoring op lange termijn, 50 – 100 jaar vooruit. In een sedimentdelend zeegatsysteem wordt het meetsysteem verdicht voor de voorspelling van autonome ontwikkelingen van o.a. geulgedrag op middellange termijn, 5 tot 25 jaar vooruit en tevens het meten en verwachten van de impact van zandsuppletie pilots gedurende 20 jaar. Alle metingen worden gebruikt in het *Trilateral Monitoring and Assessment Programme* (TMAP; zie paragraaf 9.3 en in de pilots van het Deltaprogramma. De metingen aan het zeegatsysteem en zandsuppletiepilots zijn specifiek voor onderzoeksdoeleinden. Het onderzoeksprogramma zelf valt buiten het bestek van dit monitoringplan.

Rijkswaterstaat is de uitvoeringsorganisatie voor water- en kustbeheer in het Waddengebied. Omdat het Monitoringplan DPW zich concentreert op monitoring voor waterveiligheid en het sedimentdelend systeem zal Rijkswaterstaat het merendeel van de monitoring uitvoeren of laten uitvoeren. De aanvullingen op de bestaande monitoring zullen deels worden opgenomen in bestaande programma's, en deels in de nieuwe programma's die de komende jaren opgezet worden op het gebied van waterveiligheid en kustlijn zorg. Er komt bij RWS geen apart programma om het Monitoringplan uit te voeren. Op hoofdlijnen wordt de inbedding van het Monitoringplan DPW in programma's van RWS volgens *Tabel 9.1*.

Tabel 9.1 Inbedding van het Monitoringplan DPW in programma's van RWS op hoofdlijnen

Onderdeel Monitoringplan DPW	RWS programma	
Reguliere monitoring	LMW en MWTL	Bestaand. Doorlopende basis monitoring.
Pilot en kennis sedimentdelend systeem, gerelateerd aan onderzoeksprogramma DPW	Programma's als Kustgenese2.0	Nieuw. Gericht op zandige kust, in ontwerpfasen.
Overige systeemkennis	WTI 2017 en voorzetting daarvan. Eventueel ook in niet-RWS programma's.	Bestaand. Gericht op hydraulische belastingen en waterkeringen. Vorm voortzetting 2018 en verder is nog onderwerp van discussie.
Quick Reaction Force (QRF)	LMW en MWTL, in samenhang met bijdragen niet-RWS programma's.	Grotendeels bestaand, afstemming tussen verschillende monitoringpartijen noodzakelijk.

In principe zijn de data toegankelijk via de bronhouders en gebruikelijke kanalen zoals de informatiehuizen IHW en IHM. Het voornemen is om de data via het WaLTER portal te ontsluiten. Het voordeel van het WaLTER portal is dat er dan één ingang is voor alle typen data van het Waddengebied.



Figuur 9.1 Schematische weergave van de opzet van het Monitoringplan DPW (NB: punten zijn illustratief en corresponderen niet precies met de invulling van het Monitoringplan). De bestaande monitoring is het uitgangspunt (rode punten), DPW gaat met enige aanvullingen 50 – 100 jaar veiligheidsonzekerheden monitoren (roze punten). In een zeegatsysteem wordt het meetsysteem verdicht voor de voorspelling van autonome ontwikkelingen op middellange termijn van o.a. geulgedrag tot 25 jaar vooruit (groene punten) en het meten en voorspellen van de impact van menselijke activiteiten gedurende 20 jaar (gele punten).

9.2 Voorkeursstrategie Waddengebied, Onderzoeksplan en Adaptieve Monitoring

Het kader van dit Monitoringplan wordt gegeven door de Voorkeursstrategie Waddengebied (Programmateam DPW 2014) van het DPW. De Voorkeursstrategie bevat een Kennisopgave met drie sporen: Monitoring, Systeemonderzoek en Pilotprojecten. De bestuurlijke implementatie van de Voorkeursstrategie loopt via het Regionaal Overleg Kust (ROK) en het Bestuurlijk Overleg Deltaprogramma Waddengebied (BODPW).

De plannen hiervoor zijn uitgewerkt in dit Monitoringplan en in het DPW Onderzoeksplan (Oost *et al.*, 2014). De behoeftes aan monitoring voor onderzoek en pilots sluiten aan bij het onderzoeksplan. Het is de verwachting dat het Onderzoeksprogramma en Monitoringprogramma in de loop der tijd regelmatig geconcretiseerd en aangepast worden. In die zin is dit Monitoringplan een voorstel voor een adaptief Monitoringprogramma.

9.3 Relevante organisaties

9.3.1 Beleid- en beheerorganisaties

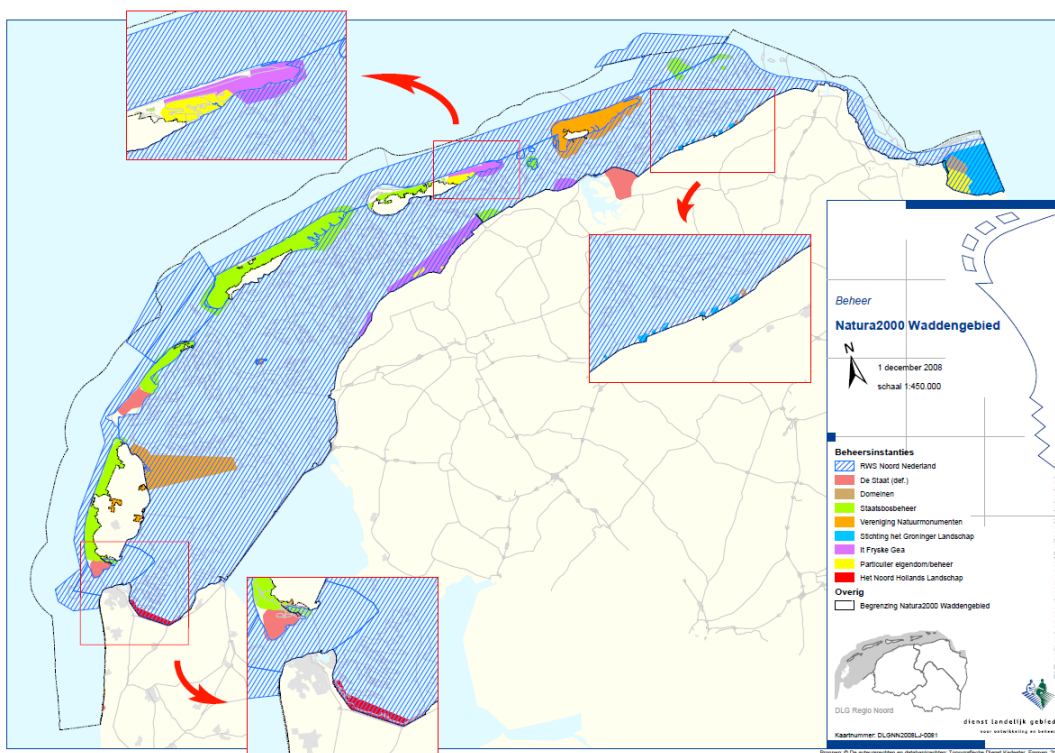
Voor de in dit plan beschreven monitoring van waterveiligheid en het sedimentdelend systeem is het ministerie van I&M de belangrijkste beleidsorganisatie. Het Deltaprogramma is het nationale programma waarin Rijksoverheid, provincies, gemeentes en waterschappen dit beleid samen invulling geven. De EU heeft de Kaderrichtlijn Water (KRW) en Kaderrichtlijn Marien (KRM) vastgesteld voor de monitoring van waterkwaliteit en ecologie, en de Habitatrichtlijn voor bescherming van habitattypen en soorten en de Vogelrichtlijn voor bescherming van vogels. Het Natura2000 netwerk omvat de gebieden die op grond EU richtlijnen beschermd worden. Nederland heeft het Waddengebied aangewezen als Natura2000 gebied. Op nationaal niveau zijn EZ als I&M betrokken bij het beleid ten aanzien van monitoring van chemie, biologie en ecologie. Het Nederlandse beleid ten aanzien van het Waddengebied is vastgelegd in de Derde Nota Waddenzee (Min. VROM, 2007).

Het water- en kustbeheer van het Waddengebied wordt uitgevoerd door de dienst Rijkswaterstaat van het ministerie van I&M en door de Waterschappen. Deze organisaties hebben ook interne calamiteitenorganisaties die actief zijn bij bijvoorbeeld zware stormen. Het natuurbeheer in dit Natura2000 gebied wordt uitgevoerd door Staatsbosbeheer, Natuurmonumenten, de Provinciale Landschappen, particuliere oevereigenaren en de Waddenunit van EZ; in combinatie met landbouw ook door de boeren in het gebied. Het beheer van de openbare ruimtes en infrastructuur wordt uitgevoerd door de Gemeenten, Havenschappen, Provincies en Ministeries. De voornaamste beheerders werken samen in de Beheerraad Waddenzee en in het Regionaal Overleg Kust. In *Figuur 9.2* is aangegeven welke beheerder waar het beheer uitvoert (bron: www.waddenzee.nl).

9.3.2 Andere relevante organisaties en samenwerkingsverbanden

Het *Regiecollege Waddengebied* (RCW) is een forum waarin overheden, bedrijfsleven en natuurorganisaties die betrokken zijn bij Waddengebied elkaar ontmoeten, informeren. Het RCW ontwikkelt geen beleid maar zoekt praktische oplossingen.

De *Waddenacademie* richt zich op het ontwikkelen van een duurzame kennishuishouding van het Waddengebied door identificeren van kennisleemtes, bevorderen van samenhangende onderzoeksprogrammering en het bevorderen van informatievoorziening en kennisuitwisseling (bron: www.waddenzee.nl).



Figuur 9.2 Overzicht van welke beheerder waar in het Waddengebied het beheer uitvoert. De begrenzing van het Natura2000 Waddengebied is aangegeven door de zwarte lijn.

WaLTER is een door het Waddenfonds gefinancierd programma (2011 – 2015) rond de monitoring van het Waddengebied. Dit betreft de ecologische, socio-economische en fysische monitoring. Het doel van *WaLTER* is om een geïntegreerd en goed toegankelijk meetnet voor de Waddenzee op te zetten. De 'LTER' staat voor Long Term Ecosystem Research die aangeeft dat *WaLTER* zich aansluit bij de internationale organisaties ILTER en LTER-Europe.

Doelen van *WaLTER* zijn onder meer:

Opzetten en beheren van een dataportal voor monitoringdata over het Waddengebied.
In kaart brengen van de informatie- en meetbehoefte vanuit verschillende partijen binnen themadossiers, op wetenschappelijke wijze.

- Opstellen van een monitoringplan per themadossier.
Het monitoringplan DPW wordt onderdeel van het WaLTER themadossier "Klimaat en Veiligheid". Op dit moment (2014) wordt gewerkt aan het voortzetten van het WaLTER programma na 2015.

Het *Trilateral Monitoring and Assessment Programme* (TMAP, <http://www.waddensea-secretariat.org/monitoring-tmap>) is een Deens – Duits – Nederlands samenwerkingsverband voor monitoring van het internationale Waddengebied dat wordt gecoördineerd door het *Common Wadden Sea Secretariat* (CWSS). De TMAP monitoring omvat een groot aantal gebieden, van klimatologie tot biologie tot economie. De focus van TMAP ligt op de ecologie.

Water en Klimaat is een groot nationaal koepelprogramma voor onderzoek aan water en klimaat dat zal starten in 2014/2015. Het heeft een vergelijkbare ambitie als het in 2014 afgesloten programma Kennis voor Klimaat. Waarschijnlijk zal Water en Klimaat vanuit NWO worden bestuurd.

De Project Overstijgende Verkenning Waddengebied (dijkring 6) is een vier jaar durend onderzoeksprogramma binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma, gestart in 2014. Hierin werken de noordelijke waterschappen grenzend aan het Waddenzee grenzende gedeelte van Dijkring 6. Tevens is er nauw contact met de andere overheden, beheer- en kennisorganisaties die in dat gebied een rol hebben. Het doel van de POV is om kennis en technieken te vinden die toegepast kunnen worden, zodat de toekomstige keringsversterkingen maximale doelmatigheid en minimale kosten hebben. Op de resultaten van DP Waddengebied, bijvoorbeeld over nieuwe keringsconcepten, wordt in POV voortgebouwd.

9.4 Bestaande en geplande programma's

De bestaande en geplande programma's voor uitvoering monitoring op het gebied van waterveiligheid en het sedimentdelend systeem zijn:

LMW meetnet RWS. LMW is het RWS meetnet dat gegevens zoals waterstanden real-time beschikbaar stelt.

MWTL meetnet RWS. MWTL is het overkoepelend RWS programma dat niet naast LMW programma's op het gebied van waterkwaliteit en bodem bevat die analyses doen die achteraf beschikbaar komen.

WTI 2017. WTI 2017 is het bestaande programma van I&M voor het bepalen van hydraulische randvoorwaarden en normen voor waterkeringen in Nederland. WTI 2017 heeft een monitoringcomponent met onder meer extra wind, waterstand en golfmetingen in het Waddengebied.

NAM. De NAM monitort bodemdaling en effecten op morfologie en ecologie in het Waddengebied rond locaties voor gaswinning: Ameland, Moddergat-Lauwersmeer-Vierhuizen en Slochteren.

Kustgenese 2.0

Kustgenese 2.0 is een voorgenomen onderzoeks- en monitoringprogramma gericht op het invullen van kennisleemtes met betrekking tot de zandige kust. Kustgenese 2.0 wordt opgezet in het kader van de realisatie van de Beslissing Zand van het Deltaprogramma die in najaar 2014 door het kabinet zal worden vastgesteld. Mogelijk wordt Kustgenese2.0 ingebracht in het programma Water en Klimaat (zie sectie hierboven). In Kustgenese2.0 zullen onder meer uitvoering van de extra onderzoeks- en monitoring activiteiten worden ondergebracht van DPW en DPK op het gebied van kustgenese en kustdynamiek.

Baggeractiviteiten: Jaarlijkse registratie van alle baggeractiviteiten door beheerders (hoeveelheid gebaggerd materiaal, kwaliteit, samenstelling sediment, verspreidingslocatie, -periode en -diepte, effecten monitoring steekproefsgewijs, motivering baggeren en verspreiden buiten winterperiode). Jaarlijks en 3 jaarlijks een quickscan of aanpassing van de verspreidingslocaties nodig is en een evaluatie van baggerspecies (afstemming op natuurlijke dynamiek) (Arcadis, 2011).

Zandsuppleties: Het programma "ecologisch gericht suppleren, nu en in de toekomst" (2009-2014) heeft als doelstelling meer inzicht te krijgen of, en in welke mate, zandsuppleties van invloed zijn op natuurwaarde en op welke wijze zandsuppleties in de nabije toekomst kunnen bijdragen aan de opgaven van veiligheid samen met natuurbehoud en ontwikkeling (Holzhauer *et al.* 2009) (Deltafact Effect zandsuppletie op kust en Waddenzee).

9.5 Implementatie Monitoringplan DPW

9.5.1 Aansluiting bij programma's RWS

In deze paragraaf wordt de implementatie van het Monitoringplan DPW door aansluiting bij programma's van RWS beschreven.

Het Monitoringplan DPW concentreert zich op monitoring voor waterveiligheid en het sedimentdelend systeem, en neemt ook de monitoring van fysische parameters mee die van belang zijn voor het ecosysteem en economie. De opzet van het Monitoringplan gaat uit van het zo mogelijk optimaliseren van bestaande monitoring, het zo efficiënt mogelijk uitbreiden voor het voorspellen van lange-termijn risico's van autonome ontwikkelingen, en het monitoren van pilots om inzicht te krijgen op de effecten op de menselijke activiteiten voor het behoud van de lange-termijn veiligheid.

Voor de toestand- en trendvolging van waterveiligheid en het sedimentdelend systeem vormen de huidige monitoringprogramma's *LMW* en *MWTL* van RWS een goede basis, al is een op aantal terreinen aanvulling nodig. In de praktijk draagt ook het *WTI 2017* programma bij aan toestand- en trendvolging.

De monitoring van de impact en efficiency van grote menselijke activiteiten in het zandige kuststelsel zoals mega zandsuppleties zal projectmatig plaatsvinden en zal voor het merendeel worden ondergebracht in programma's als *Kustgenese 2.0*. Hieronder valt ook monitoring voor de ontwikkeling van systeemkennis voor beter verwachten van autonome ontwikkelingen van morfologie en de impact van ingrepen daarop. *Kustgenese 2.0* is het voorgenomen programma van I&M/DGRW dat inhoud moet gaan geven aan de cruciale beslissing zand van de Deltabeslissing Veiligheid. De monitoring projecten vallen onder of hebben een directe relatie met de projecten die uit het Onderzoeksplan DPW voortkomen.

Voor de ontwikkeling van systeemkennis op het gebied van hydraulische belastingen en sterkte waterkeringen, en de daarvoor benodigde extra monitoring, blijft vooralsnog het programma *WTI 2017* leidend. *WTI 2017* is het bestaande programma van I&M voor het bepalen van hydraulische randvoorwaarden en normen voor waterkeringen. De aanwezigheid van een aantal meetlocaties van *WTI 2017* is nodig om aan de gebruikerseisen te voldoen van het Monitoringplan op het gebied van toestand- en trendvolging, de continuïteit van deze metingen na 2017 is dus van belang. Het voornemen is dat er na 2017 een vervolg van *WTI 2017* komt, de vorm daarvan is nog onderwerp van discussie. Daarnaast hebben KNMI en Deltares een meteorologisch *Kennisprogramma Wind* opgesteld, met voorstellen voor meteorologisch onderzoek voor waterveiligheid en waterberichtgeving. Uiteraard zal naar maximale synergie tussen *Kustgenese*, *WTI 2017* en *Kennisprogramma Wind* worden gestreefd. Meetcampagnes die speciaal gericht zijn op de ontwikkeling van systeemkennis kunnen ook worden ondergebracht EU kader programma's en Nederlandse onderzoeksprogramma's zoals *Water en Klimaat*.

Voor DPW is de monitoring van ecologische parameters van wezenlijk belang. In elk geval zal aan de eisen van de KRW (Waddenzee) en KRM (Noordzee) voldaan dienen te worden. Echter, de uitwerking van de behoefte aan chemische en biologische monitoring vormt geen onderdeel van dit Monitoringplan.

Voor een verdere uitwerking van de monitoringbehoefte kan gebruik worden gemaakt van de plannen die door bestaande initiatieven zoals WaLTER worden ontwikkeld. Het is wenselijk om deze initiatieven goed te laten aansluiten op de uitvoering van het Deltaprogramma Waddengebied.

9.5.2 Bijdrage door andere partijen

Naast RWS leveren de volgende partijen belangrijke bijdrages aan de monitoring voor veiligheid en het sedimentdelend systeem, en van fysieke parameters die van belang zijn voor ecologie en economie.

Het KNMI draagt met meteorologische en seismologische gegevens bij aan de toestand- en trendvolging van het Waddengebied en de Noordzee. RWS en KNMI werken nauw samen op het gebied van meteorologische metingen en de meteorologische meetnetten van KNMI en RWS vormen in feite een geheel.

De Waterschappen leveren aanvullende water- en weergegevens.

De Dienst der Hydrografie van het ministerie van Defensie verzorgt de bathymetrie van het Nederlands continentaal plat van de Noordzee.

Het NIOZ heeft een aantal programma's die van belang zijn voor de monitoring van het Waddengebied, waaronder de Ferrybox metingen in het Marsdiep en SIBES dat als nevenproduct sedimentsamenstelling levert. Dit zijn programma's op projectbasis.

Stationsmetingen van Duitse nationale diensten zijn een essentieel voor de monitoring van het Eems-Dollard gebied. De weerradar in Emden is voor het Waddengebied van groot belang.

Internationale organisaties zoals EUMETSAT meten met satellieten zeevatertemperatuur, wind, golven, zeeniveau en het wereldwijde patroon van zeespiegelstijging. PSMSL is een internationale organisatie die in-situ zeespiegelgegevens verzamelt.

De huidige NAM monitoring draagt bij aan het voorzien in de behoefte aan monitoring van de morfologie uit het Monitoringplan DPW, door de LiDARmetingen die twee maal per jaar gedaan worden in het gebied rond Lauwersoog, Ameland en Schiermonnikoog. Zesjaarlijkse wadmelingen dragen bij aan meer gedetailleerde informatie over de hoogteontwikkeling van het wad (Natuurcentrum Ameland). Ook worden jaarlijks gegevens over kwelderhoogte- en vegetatie verzameld op zowel Ameland als in een deel van de vastelandskwelders (IMARES), en de Amelandse duinen (Alterra).

9.5.3 Coördinatie

Er zou overwogen kunnen worden om de monitoring die in het Waddengebied plaats vindt voor DPW te laten coördineren vanuit één (bestaande) organisatie. Door het gelijkschakelen van protocollen en het centraal beschikbaar stellen van de data stijgt de bruikbaarheid van de data. De Waddenacademie zou een rol kunnen spelen in de kwaliteitsborging, met WaLTER als dataportal.

De Quick Reaction Force zal in eerste instantie voortbouwen op de evaluaties die het Watermanagementcentrum Nederland – Kust van RWS organiseert met Deltares en de Waterschappen. Mogelijk kan de Waddenacademie een rol vervullen bij het betrekken van meer partijen bij de QRF.

9.5.4 Adaptief monitoringprogramma

Dit plan is opgesteld als een adaptief monitoringprogramma. De intentie is dat de implementatie door de betrokken monitoringpartners zal worden ingevuld. Ook zijn zij degenen die zorg moeten dragen voor adequate kwaliteitsmanagementsystemen en gebruikersdiensten, en regelmatige bijstellingen van het monitoringprogramma.

Omdat de kennis voor de uitvoering van het Deltaprogramma nog volop in ontwikkeling is, verdient het aanbeveling eens in de 5 of 6 jaar het Monitoringplan bij te stellen op de nieuwe inzichten en ontwikkelingen. Overwogen kan worden om dit in fase te doen met de WTI programmeringscyclus.

9.6 Ontsluiting en toegankelijkheid

Dit monitoringplan hanteert de volgende uitgangspunten voor ontsluiting en toegankelijkheid:

- Bronhouders blijven verantwoordelijk voor de archivering van de oorspronkelijke data en de primaire beschikbaarstelling.
- Op de monitoringgegevens van dit monitoringplan is het Open Data beleid van toepassing.
- Bestaande nationale en internationale initiatieven worden benut voor het breed en goed toegankelijk maken van monitoringgegevens.
- Het WaLTER portal wordt ondersteund in zijn streven om alle relevante monitoringgegevens voor het Waddengebied via één portal toegankelijk te maken.

Er lopen verscheidene initiatieven van waaruit monitoringdata van het Waddengebied beschikbaar gemaakt (kunnen) worden. Belangrijke nationale initiatieven zijn:

- Waterdatanet: dit is de beoogde nieuwe distributielaag van onder meer RWS watergegevens. Waterdatanet is nog in ontwikkeling. Monitoringdata van RWS kunnen bij de Helpdesk Water van RWS worden aangevraagd.
- Meteorologische en klimatologische data zijn via het KNMI websites data.knmi.nl en climexp.knmi.nl beschikbaar.
- Het Informatiehuis Water (IHW) is een samenwerkingsverband van Rijk, Interprovinciaal Overleg en Waterschappen dat werkt aan toegankelijke en bruikbare informatie op het gebied waterkwaliteit in waterlichamen die onder de Kader Richtlijn Water vallen, waaronder de Waddenzee. Het voornemen is dit uit te breiden naar de domeinen waterkwantiteit en waterveiligheid. Het Waterkwaliteitsportaal dat IHW heeft opgezet is een rapportagetool voor KRW. IHW heeft de ambitie om publieke inzage in het Waterkwaliteitsportaal te realiseren.
- Het Informatiehuis Marien (IHW, www.informatiehuismarien.nl) is een samenwerkingsverband van de ministeries van I&M en EZ. Het IHW en ontsluit alle mariene rijksdata en –informatie en onderzoeksgegevens over de Noordzee en maakt deze toegankelijk op één portal voor belangstellenden, overheden en professionals.
- Het WaLTER portal (www.walterproject.nl) ontsluit monitoringgegevens van het Waddengebied van zo veel mogelijk partijen. Het portal bevat gegevens voor waterveiligheid en het sedimentdelend systeem, en ook gegevens op het gebied van chemie, biologie, ecologie, sociologie en economie. WaLTER geeft daarmee een integraal beeld van het Wadden gebied. Een eerste versie van het WaLTER portal zal naar verwachting eind 2014 publiek beschikbaar worden.

Belangrijke internationale initiatieven die benut kunnen worden voor het breed toegankelijk maken van monitoring data van het Wadden gebied:

- NODC is een nationaal platform voor mariene en oceanografische data waarin de belangrijkste Nederlandse spelers op dit gebied samenwerken. Het NODC data portal bevat metadata van Nederlandse mariene datasets.
- EuroGOOS is een Europese organisatie van nationale diensten en onderzoeksinstituten voor samenwerking op het gebied van operationele oceanografie. Monitoring is een van de aandachtsgebieden van EuroGOOS.

- EMODNet is een initiatief van de EU om mariene data, metadata en producten ter beschikking te stellen. EMODNet heeft een 7-tal portals, onder voor bathymetrie en fysica.
- SeadataNet is een organisatie van oceanografische instituten en data centra voor een Europese infrastructuur voor mariene data waarbij uit Nederland onder meer Maris en NODC zijn aangesloten.

10 Conclusies en aanbevelingen

10.1 Aanleiding monitoringplan

Deze eeuw worden grote veranderingen voor het Waddengebied verwacht die consequenties kunnen hebben voor de waterveiligheid en de natuurwaarden in het Waddengebied. Dit betreffen versnelde zeespiegelstijging, klimaatverandering en voortgaande autonome ontwikkelingen. Het Deltaprogramma Wadden heeft een strategie (Oost *et al.*, 2014) geformuleerd om deze problematiek aan te pakken. Het opstellen van dit monitoringplan is een onderdeel van deze strategie.

10.2 Doel en afbakening

De doelen van de monitoring die in het voorliggende monitoringsplan is beschreven zijn:

- een tijdig signaal te geven als de huidige beleidsdoelstellingen in gevaar komen,
- waarnemingen leveren om gefundeerde keuzes te kunnen maken voor nieuwe strategieën om veiligheid en duurzaamheid te borgen,
- waarnemingen leveren die nodig zijn voor het uitvoeren van bestaande en nieuwe strategieën.

Dit Monitoringplan beperkt zich tot de fysische componenten van het Waddengebied: meteo, waterbeweging, morfologie, en waterkeringen. Monitoring van ecologie, natuurwaarden en socio-economie valt niet binnen het bestek van dit Monitoringplan, maar worden uitgewerkt binnen het WaLTER project.

In dit monitoringplan is het hele scala van sturende factoren (Hoofdstuk 3), via het gedrag van het systeem (Hoofdstuk 4), via de keringen (Hoofdstuk 5), naar de werkelijke veiligheid (overstromingsrisico, Hoofdstuk 5) meegenomen. Door de kenmerkende dynamiek van de Waddenzee heeft de morfologische ontwikkeling (gedrag van het systeem) een grote rol in dit geheel. Het plan is zo opgezet dat de metingen zo veel mogelijk voor meerdere doelen bruikbaar zijn.

10.3 Noodzaak extra monitoring

Doordat er de komende eeuw allerlei veranderingen verwacht worden in het Waddengebied, is de huidige monitoring niet toereikend om de Voorkeursstrategie DPW uit te voeren. Alleen al door zeespiegelstijging kunnen ontwikkelingen optreden als:

- De geulen worden actiever en vragen mogelijk meer onderhoud.
- De erosie van de eilandkusten neemt toe, wat we moeten compenseren met zandsuppleties.
- De buitendelta's krimpen en daarmee ook de bufferende en dempende werking bij noordwesterstormen.
- De dijken van het vasteland krijgen het zwaarder te verduren.

Besluiten nemen voor handhaving van de basiskustlijn en het duurzaam meegroeien van het kustfundament kan niet zonder adequate informatie. Daarvoor is extra monitoring nodig. Zowel voor monitoring van ontwikkelingen en risico's (reguliere monitoring) als voor kennisontwikkeling en pilots die ons in staat stellen tijdig te anticiperen op veranderingen in de toekomst.

10.4 Opgave monitoring

10.4.1 Opgave monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's

DPW stelt ten eerste extra opgaves aan de monitoring van het morfologisch systeem. Naarmate de zeespiegel verder stijgt, vraagt het intergetijdengebied van de Waddenzee meer sediment en onttrekt dat aan de Noordzee, naar verwachting met name aan de buitendelta's en de eilandkusten. De opgave voor de monitoring is om dit te volgen en bepalen of het meegroeivermogen van het gebied voldoende is om de zeespiegelstijging bij te houden.

Daarnaast blijft monitoring van de hydraulische belastingen en de waterkeringen nodig voor duurzaam borgen van de waterveiligheid van het Waddengebied. De uit DPW voortkomende vraag is het kunnen onderkennen van de invloeden van veranderingen in zeespiegel, stormklimaat en morfologische ontwikkelingen op de hydraulische belastingen.

10.4.2 Opgave monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots

Op dit moment kunnen veel relevante morfologische ontwikkelingen niet tijdig (10 jaar of meer van tevoren) onderkend worden, vanwege de dynamiek van de Waddenzee. Om in deze lacune te voorzien heeft de voorkeursstrategie een onderzoekspoor. De ambitie van het onderzoekspoor is om relevante morfologische ontwikkelingen decennia van te voren te kunnen verwachten, evenals het kunnen voorspellen van de effecten van grote zandsuppleties op deze tijdschaal.

Het adresseren van kennisleemtes in de werking van het Waddengebied en het effect van menselijke ingrepen kan niet zonder substantiële meetinspanningen. Dit Monitoringplan identificeert een drietal kennisgebieden met behoefte aan gerichte monitoring:

- werking zeegatsystemen
- effecten zandsuppleties
- impact extreme stormen

Werking zeegatsystemen is relevant omdat beter begrip hiervan de sleutel vormt tot werking van het Waddengebied als geheel. *Effecten zandsuppleties* wordt naar voren gebracht omdat het intussen technisch mogelijk is om grotere zandsuppleties dan nu uit te voeren, maar niet bekend is hoe effectief dat is. *Impact van extreme stormen* is van belang omdat de uiterst relevante effecten minder goed bekend zijn vanwege de zeldzaamheid.

10.5 Conclusies en aanbevelingen

10.5.1 Algemeen

- Breng monitoring voor pilots en voor het DPW onderzoeksprogramma onder in programma's zoals het beoogde programma Kustgenese 2.0.
- Zorg dat de monitoring resultaten beschikbaar en toegankelijk zijn conform het Open Data beleid van de Overheid. Investeer in het toegankelijk maken van data waar dat nog niet het geval is (bijvoorbeeld spuigegevens en historische kwelderhoogtes)
- Laat op basis van de monitoring resultaten regelmatig, bijvoorbeeld eens per vijf jaar, een rapportage maken van de toestand van het Waddengebied.
- Complementeer dit Monitoringplan, dat zich beperkt tot het fysische systeem, met een plan voor de monitoring van ecologie en natuurwaarden.
- Betrek bij de implementatie van de monitoring, ontsluiting van de data, en completering van het Monitoringplan de partijen van de Samenwerkingsagenda Verbetering Waddenzee.

10.5.2 Monitoring van nieuwe ontwikkelingen en risico's

De totale monitoringbehoefte is systematisch in kaart gebracht en vergeleken met de huidige monitoring. Hieruit blijkt dat de huidige monitoring van meteorologie en waterbeweging in het Waddengebied op hoofdlijnen voldoet aan de aangegeven behoeftes in dit rapport. Met name voor morfologie zijn enige aanvullingen wenselijk.

- Wereldwijde monitoring van zeespiegelstijging door satellieten heeft meerwaarde voor het Waddengebied.
- De monitoring van bodemligging, sedimentuitwisseling en bodemeigenschappen dient geïntensiveerd te worden om aan de doelstellingen van het Deltaprogramma Wadden te voldoen.
- Indien in de toekomst in de toetsing van keringen ook het voorland wordt betrokken, bijvoorbeeld bij innovatieve dijkconcepten, dient de monitoring van het voorland daarop te worden aangepast.
- Besteed aandacht aan innovatieve nieuwe technieken voor monitoring om voorbereid te zijn op toekomstige gebruikersvragen naar betere en/of efficiëntere monitoring.
- Voor de komende periode is het advies prioriteit te geven aan:
 - Huidige monitoring meteo en golven in overeenstemming met behoeftes brengen en houden;
 - Gericht frequent meten in dynamische gebieden zoals zeegaten;
 - Aanvullende LiDAR eilandkoppen en -staarten;
 - Bijdrage aan Jason-CS satelliet voor metingen zeespiegelstijging;
 - Opstellen programma meten bodemeigenschappen;
- Zet een *Quick Reaction Force* op die tijdens en na stormen metingen verzamelt en toegankelijk maakt. Zo nodig kunnen onderzoekinstellingen extra simulaties en/of analyses uitvoeren.

10.5.3 Monitoring voor modelontwikkeling, systeemonderzoek en pilots

- Zorg voor focus en massa door monitoring voor kennis en zandsuppletiepilots zoveel mogelijk op één zeegatsysteem te concentreren. Het Amelanders zeegat is hiervoor geschikt.
- Gebruik waar mogelijk dezelfde metingen en meetsystemen voor projecten uit verschillende programma's (bv. WTI 2017, het voorgenomen Kustgenese 2.0, H2020, ...).
- Voer alleen pilots uit waarvoor een samenhangend onderzoeks- en monitoringprogramma is vastgesteld.
- Stimuleer onderzoeksprogramma's die processen meten die relevant zijn voor extreme stormen.
- Voor de komende periode is het advies prioriteit te geven aan:
 - Meteo en waterbeweging zeegatsysteem Ameland;
 - Bodemmetingen zeegatsysteem Ameland en omgeving;
 - Plan maken voor metingen tijdens en na stormen, en deze efficiënter te delen en te rapporteren;
 - Kennisleemtes bij lucht-zee-wad wisselwerking tijdens stormen.

11 Kwaliteitsborging

IMARES beschikt over een ISO 9001:2008 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem (certificaatnummer: 124296-2012-AQ-NLD-RvA). Dit certificaat is geldig tot 15 december 2015. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV Certification B.V.

Referenties

- Arcadis (2011). Nadere effectenanalyse Natura 2000-gebieden Waddenzee en Noordzeekustzone beheerplankader voor baggeren, Arcadis rapport 075248083 / IMARES rapport C172/11, 2011
- Boers, R., F. Bosveld, G. Burgers, S. Caires en J. Groeneweg (2014). Definitiestudie Kennisontwikkeling Wind. in voorbereiding
- Bol, R. (2014). Effect of deepening and sea level rise on tidal range in the Elbe estuary. University of Amsterdam, Faculty of Sciences, BSc thesis. A research conducted at the Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht.
- Bultsma, M. (2010). Feasibility study of smart levees concepts. Stichting Flood Control, pp. 55.
- Burchard, H., Flöser, G., Staneva, J. V., Badewien, T. H. and Riethmüller, R. (2008). Impact of density gradients on net sediment transport into the Wadden Sea, *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 566-587.
- Caires, S.; H. de Waal; J. Groeneweg; G. Groen; N. Wever; C. Geerse; M. Bottema, 2012. Assessing the uncertainties of using land-based wind observations for determining extreme open-water winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Volume 110, p. 70 – 85.
- Church, J. A., P. U. Clark, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. A. Merrifield, S. A. Milne, S. R. Nerem, P. D. Nunn, A. J. Payne, W. T. Pfeffer, D. Stammer & A. S. Unnikrishnan (2013). Sea level change. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Compton, T.J., Van Der Meer, J., Holthuijsen, S., Kolhaas, A., Dekinga, A., Ten Horn, J., Klunder, L., McSweeney, N., Brugge, M., Van der Veer, H.W., Piersma, T. (2013). Synoptic intertidal benthic surveys across the Dutch Wadden Sea. NIOZ 2013-1.
http://www.nioz.nl/files/afdelingen/MEE/SIBES/Publications%20and%20reports/Comptonetal_SIBES2008to2011_May13.pdf
- CPSL (2010). CPSL Third Report. The role of spatial planning and sediment in coastal risk management. Wadden Sea Ecosystem No. 28. Common Wadden Sea Secretariat, Trilateral Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise (CPSL), Wilhelmshaven, Germany.
- Davaasuren, N., Stapel, J., Smit, C., Dankers, N. (2012). The use of remote sensing as a monitoring tool for coastal defence issues in the Wadden Sea. Report / IMARES Wageningen UR;C057/12. IMARES Wageningen UR, IJmuiden [etc.].
- De Groot, A.V. (2002). Kustlijnhandhaving Onrustpolder; Evaluatie van de effecten van morfologisch baggeren en strandsuppleties. MSc. Thesis, Universiteit Utrecht, Rijkswaterstaat Directie Zeeland, Utrecht.
- De Groot, A.V. (2009). Salt-marsh sediment; Natural gamma-radioactivity and spatial patterns. PhD Thesis, University of Groningen, Groningen, 208 pp.
- De Groot, A.V., van Wesenbeeck, B.K., Van Loon-Steensma, J.M. (2013). Stuurbaarheid van kwelders, IMARES Wageningen UR, IMARES report C004/13, IJmuiden etc., 49 pp. <http://edepot.wur.nl/245652>
- De Groot, A.V., Brinkman, A.G., Van Sluis, C.J., Fey, F.E., Oost, A.P., Dijkman, E.M. (in prep. 2014). Biobouwers als onderdeel van een kansrijke waterveiligheidsstrategie voor Deltaprogramma Waddengebied, IMARES Wageningen UR, IJmuiden, 81 pp.
- De Leeuw, C. (2005). Model predictions of wave-induced sediment transport on the shoreface, M.Sc. Thesis University of Twente.
- De Lima Rego, J. en Dillingh, D. (2010). Effect of Ems sperrwerk on surge level in Eems-Dollard estuary. WTI - HR Zout: Update Toets- en rekenpeilen. Deltares report 1202341.
- De Loeff, A. (2009). Werkwijzebeschrijving voor het uitvoeren van een gedetailleerde toetsing op golfklappen op een bekleding van waterbouwasfaltbeton, april 2009.
- Deltacommissie (2008). Samen werken met water – bevindingen van de deltagcommissie 2008.
- De Ronde, J. (2008). Toekomstige langjarige suppletiebehoefte. Deltares, rapport Z4582.24.
- Dean, R.G. & Walton, T.L. (1975). Sediment transport processes and morphological behaviour Sediment transport processes in the vicinity of inlets with special reference to sand trapping. In: Cronin, L.E. (Ed.): *Estuarine Research, Vol. 2: Geology and Engineering: 129-150*; New York, Academic Press.

- Den Heijer, F., J. Noort, H. Peters, P. de Grave, A. Oost en M. Verlaan (2007). Allerheiligenvloed 2006, Achtergrondverslag van de stormvloed van 1 november 2006. Rijkswaterstaat RIKZ, 2007.
- Dijkema, K. S., H. F. Van Dobben, E. C. Koppelaar, E. M. Dijkman and W. E. Van Duin (2011). Kweldervegetatie Ameland 1986-2010: effecten van bodemdaling en opslibbing op Neerlands Reid en De Hon. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost. B. M. B. Ameland.
- Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman, A. Nicolai, H. Jongerius, H. Keegstra & J.J. Jongsma (2013). Friese en Groninger kwelderwerken Monitoring en beheer 1960 – 2010; WOT Natuur & Milieu, Wageningen UR. WOt-rapport 122.
- Dillingh, D. (2013). Veranderingen in gemiddelde zeeniveaus in de Nederlandse kustwateren. Deltares rapport 1206182-000-ZKS-0003, Deltares 2013.
- Dillingh, D. (2006). Waterstanden Nederlandse kust en estuaria. Statistieken t.b.v. de hydraulische randvoorwaarden 2006. Rapport RIKZ / 2006.012.
- Dillingh, D., Baart, F. & De Ronde, J.G. (2010). Definitie zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament Deltares, 1201993-002.
- Elias, E.P.L., J. Cleveringa, M.C. Buijsman, J.A. Roelvink en M.J.F. Stive (2006). Field and model data analysis of sand transport patterns in Texel Tidal inlet (the Netherlands), *J. Coast. Eng.* 53 (2006) 505-529.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. & De Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw*, 91.
- Eysink, W.D. & Biegel, E.J. (1992). Impact of sea-level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function. ISOS*2 Project, phase 2. Report H1300, WL | Delft Hydraulics (Delft), 47 pp.
- Eysink, W.D. (1991). ISOS*2 Project: Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, phase 1. Delft Hydraulic report H1300, Delft, The Netherlands.
- Flöser, G., Nauw, J., Burchard, H., Riethmüller, R. (2013). Observational evidence for the inward transport of suspended matter by estuarine circulation in the Wadden Sea. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), *Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1527-1532, ISSN 0749-0208.
- Franken, A.F. (1987). Rekonstruktie van het Paleo-Getijdklimaat in de Noordzee. Ms thesis. Delft Hydraul. Lab. Neth.
- Haarsma, R.J., W. Hazeleger, C. Severijns, H. de Vries, A. Sterl, R. Bintanja, G.J. van Oldenborgh and H.W. van den Brink (2013). More hurricanes to hit Western Europe due to global warming. *Geophys. Lett.*, 2013, doi:10.1002/grl50360.
- Hoeksema, H.J., H.P.J. Mulder, M.C. Rommel, J.G. de Ronde, J. de Vlas (2004). Bodemdalingstudie Waddenzee (2004). Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd. RIKZ Rapport.
- Hollebrandse, F.A.P. (2005). Temporal development of the tidal range in the southern North Sea. Ma Dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology,.
- Holthuijsen, L.H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-86028-4
- Holzhauser, H., B. van der Valk, J. van Dalfsen, M. Baptist en G. Janssen (2009). Ecologisch suppleren, nu en in de toekomst. Deltares rapport 1200689-000-ZKS-0009, 67 pp.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. et al., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.,.
- Jelgersma, S. (1979). Sea-level changes in the North Sea Basin. In: Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E. & Wiggers, A.J. (Eds.), *The Quaternary History of the North Sea*, *Acta Universitatis Upsaliensis, Symposia Universitas Upsaliensis Annum Quingentesimum Celebrantis 2*, 22-33.
- Jeuken, C., D. Hordijk, S. Ides, C. Kuijper, P. Peeters, B. de Sonnevile, J. Vanlede (2007). Koploperproject LTV-O&M – Thema Veiligheid – deelproject 1 Inventarisatie historische ontwikkeling van de hoogwaterstanden in het Schelde estuarium. WLDelft Hydraulics, Rapport Z4384.
- Katsman, K., Drijfhout S. & Hazeleger, W. (2011). Tijdsafhankelijke klimaatscenario's voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust. De Bilt, 2011 | Technical report; TR-318

- Klein Breteler, M. (2012). Handleiding Steentoets2008, Excel-programma voor het toetsen en ontwerpen van steenzettingen. Deltares rapport 1204727. <http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/waterveiligheid/@3672/steentoets-2008/>
- KNMI (2010). Monitoring induced seismicity in the North of the Netherlands: status report 2010 (WR 2012-03 version 1.0).
- KNMI (2012). Factsheet KNMI waarschuwingen windstoten, KNMI, mei 2012.
- KNMI (2014). KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp. www.climatescenarios.nl.
- Korff, M., Visschedijk, M., Landwehr, H., Verweij, A. en Meijers, P. (2014). Effecten aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen. Samenvatting resultaten onderzoek Deltares. Rapport nr. 1208624-002-GEO-0004
- Kwadijk, C.J.; M. Haasnoot; J.P.M. Mulder; M.M.C. Hoogvliet; A.B.M. Jeuken; R.A.A. van der Krogt; N.G.C. van Oostrom; H.A. Schelfhout; E.H. van Velzen; H. van Waveren; M.J.M. de Wit. (2010). Adapting to sea level rise in the Netherlands. WIREs Climate Change, 2010 1 729-740
- Löffler, M.A.M., de Leeuw, C.C., ten Haaf, M.E., Verbeek, S.K., Oost, A.P., Grootjans, A.P., Lammerts, E.J. & Haring, R.M.K. (2011). Back to Basics. Edition of: Het Tij Geleerd (Waddenvereniging, SBB, Natuurmonumenten, Rijkswaterstaat, It Fryske Gea, ru-Groningen, Radboud Universiteit Nijmegen, RU-Utrecht. 44 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2012). Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte; Nederland concurrerend, bereikbaar, leefbaar en veilig.
- Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu (2007). Derde Nota Waddenzee: Planologische kernbeslissing. Derde Nota Waddenzee. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, 's-Gravenhage.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007a). Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen, voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR2006). Bijlage I, bedoeld in artikel 1 van de Regeling veiligheid primaire waterkeringen. Augustus 2007.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007b). Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV). Primaire waterkeringen. Uitgave, september 2007. ISBN 978-90-369-5762-5
- Mudersbach, C., T. Wahl, I. D. Haigh, and J. Jensen (2013). Trends in high sea levels of German North Sea gauges compared to regional mean sea level changes. Continental Shelf Research 65, 111-120.
- Nederbragt (2006), Zandvoorraden van het kuststelsel, onderbouwing van een conceptueel model met behulp van trends van de winst- en verliesposten over de periode 1973 - 1997. Rijkswaterstaat rapport, RIKZ/2006.033
- NWKLN (2010). Generalplan Küstenschutz Niedersachsen -Ostfriesischen Inseln-.
- Oost, A.P., Ens, B.J., Brinkman, A.G., Dijkema, K.S., Eysink, W.D., Beukema, J.J., Gussinklo, H.J., Verboom B.M.J. & Verburgh, J.J. (1998). Integrale bodemdalingstudie Waddenzee, Nederlandse Aardolie Maatschappij, report.
- Oost, A.P., P. Hoekstra, A. Wiersma, B. Flemming, E.J. Lammerts, M. Pejrup, J. Hofstede, B. van der Valk, P. Kiden, J. Bartholdy, M.W. van der Berg, P.C. Vos, S. de Vries & Z.B. Wang (2012). Barrier island management: Lessons from the past and directions for the future. OCEAN AND COASTAL MANAGEMENT; 68; 18-38. Special Issue on the Wadden Sea Region.
- Oost, A.P.; Z.B. Wang; A.V. de Groot; L. van der Valk (2014). Preparing for climate change: an adaptive strategy for safety. Research plan 2014 - 2027 in close cooperation with Denmark and Germany. Deltares report 1208855-000, In concept.
- Pickering, M. D., N. C. Wells, K. J. Horsburgh, and J. A. M. Green (2012). The impact of future sea-level rise on the European shelf tides. Continental Shelf Research 35, 1-15.
- Postma, R. (2009) Tekstbureau Met Andere, Woorden. Beleidsnota Waterveiligheid 2009-2015. Ministerie van Verkeer en Waterstaat [etc.], Den Haag.
- Deltaprogramma Waddengebied (2014). Voorkeursstrategie Waddengebied, veilig leven en werken in een natuurlijk waddengebied.
- Raad voor de Wadden (2010). Eems estuarium, van een gezamenlijk probleem naar een gezamenlijke oplossing. Raad voor de Wadden Advies 2010/03.
- Ridderinkhof, W., de Swart H.E., van der Vegt, M. & Hoekstra, P. (2013). Influence of the back-barrier basin length on the geometry of ebb-tidal delta's. Submitted to Ocean Dynamics.

- Ridderinkhof, W., de Swart H.E., van der Vegt, M., Alebregtse, N.C. & Hoekstra, P., (submitted 2014): Geometry of Tidal Basin Systems: A Key Factor for the Net Sediment Transport in Tidal Inlets. Submitted to Journal of Geophysical Research.
- RIKZ (2005). Brochure gebaseerd op RIKZ rapport 'Het klimaat het primaat' (2000).
http://www.waddenzee.nl/fileadmin/content/Dossiers/Klimaatverandering/pdf/Klimaat_folder.pdf
 Rapport RIKZ/2005.033
- Rubin, D.M., Chezar, H., Harney, J.N., Topping, D.J., Melis, T.S., Sherwood, C.R., 2006. Underwater microscope for measuring spatial and temporal changes in bed-sediment grain size. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2006-1360.
- Ruessink B.G., Boers M, van Geer PFC, de Bakker ATM, Pieterse A, Grasso F, de Winter RC (2012) Towards a process-based model to predict dune erosion along the Dutch Wadden coast. Netherlands Journal of Geosciences-Geologie En Mijnbouw 91: 357-372.
- Sha, L.P. (1989). Variation in Ebb-delta Morphologies Along The West And East Frisian Islands, The Netherlands And Germany. Marine Geology, 89: 11 - 28.
- Slangen, A.B.A, Katsman, C.A., van de Wal, R.S.W., Vermeersen, L.L.A. en Riva, R.E.M (2012). Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios. Clim. Dyn. 38 (5-6) 1191-1209, doi 10.1007/s00382-011-1057-6.
- Stepek, A., Wichers Schreur, B. & Wijnant I. (2013). De Tafel van Alders Variatie van het windklimaat van de luchthaven Schiphol in relatie tot het baangebruik KNMI.
- Stive, M.J.F., Kollen, J., Wind, H.G., Stolk, A., Wiersma, J., Zitman, T.J., Reinalda, R. (1987). Kustgenese, grootschalige vorming en ontwikkeling van de Nederlandse kust, vorming en toetsing van hypothesen (hoofdrapport en 4 deelrapporten) Civil Engineering and Geosciences.
- Swinkels, C., Peters, H., van Heesen, J. (2012). Analysis of current patterns in coastal areas using x-band radar images, ICCE 10.9753/icce.v33.currents.39.
<https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/6970>.
- Technische adviescommissie voor de waterkeringen (TAW) (2002). Leidraad Zandige Kust. Document nr.: DWW-2003-046, ISBN: 90-369-5541-6
- Van Aken, H.M. (2008). Variability of the salinity in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *Journal of Sea Research*, April 2008, p.121-132.
- Van de Rest, P. (2004). Morfodynamica en hydrodynamica van de Hollandse Kust. Tu Delft, MSc Thesis.
- Van den Hurk, B., and co-authors (2006): KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI, De Bilt, <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubWR/WR2006-01.pdf>.
- van der Molen, J., and de Swart, H.E. (2001). Holocene tidal conditions and tide-induced sand transport in the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C5), 9339-9362.
- Van Goor, M.A. (2001). Influence of Relative Sea-level Rise on Coastal Inlets and Tidal Basins. WL | Delft Hydraulics/Delft Cluster, Report Z2822/DC03.01.03a.
- Van Loon-Steensma, J.M., Schelfhout, H.A. (2013). Gevoeligheidsanalyse innovatieve dijken Waddengebied: een verkenning naar de meest kansrijke dijkconcepten voor de Waddenkust. Alterra-rapport;2483. Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- Van Nieuwenhuijzen, L.W. (2005). Gebruikershandleiding GRASTOETS versie 3 Spreadsheetprogramma voor toetsing van grasbekledingen volgens VTV. Referentie: 9P2404.B0/R0001/LVN/SEP/Nijm
- Van Wijngaarden, M., Venema, L.B., De Meijer, R.J., (2002). Radiometric sand mud characterisation in the Rhine-Meuse estuary part B. In situ mapping. *Geomorphology*, 43(1-2): 103-116.
- Veiligheidsregio Groningen (2014). Incidentbestrijdingsplan aardbevingen. Versie 1.0, februari 2014.
- Venema, L.B., De Meijer, R.J. (2001). Natural radionuclides as tracers of the dispersal of dredge spoil dumped at sea. *Journal of Environmental Radioactivity*, 55(3): 221-239.
- Verhagen, F. Th., Krikken, A., Broers, H.P. (2010). Draaiboek monitoring grondwater voor de Kaderrichtlijn Water. Aanpassing draaiboek monitoring grondwater. Deltares rapport 9T7892.
- Waddenacademie (2009). H. Speelman, A. Oost, H. Verweijk en Zheng Bing Wang, De ontwikkeling van het Waddengebied in tijd en ruimte, position paper Geowetenschap, Waddenacademie 2009.
- Wang, Z.B., Hoekstra, P., Burchard, H., De Swart, H.E. & Stive, M.J.F. (2012). Morphodynamics of the Wadden Sea and its barrier island system. *Ocean & Coastal Management*; 68; 39-57. Special Issue on the Wadden Sea Region.

- Wehrmann, A & Tilch, E. (2008). Sedimentary dynamic of an ephemeral sand bank island (Kachelotplate, German Wadden Sea): An atlas of sedimentary structures. – *Senckenbergiana maritima*, 38(2): 185-198.
- Weisse, R., von Storch, H., Niemeier, H., Knaack, H. (2012). Changing North Sea storm surge climate: An increasing hazard? *Ocean and Coastal Management* 68, 58–68, doi:10.1016/j.ocecoaman.2011.09.005.
- Wenneker, I. (2014). WTI-HB Veldmetingen – Waddenzee en IJsselmeer, Informatiebehoefte 204-2015 en opname in het LMW, Deltares rapport 1209433-009-HYE-0001, Deltares, maart 2014.
- WMO (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8, 2008 WMO
- WMO (2014). User requirements for observation (OSCAR/Requirements), <http://www.wmo-sat.info/oscar/observingrequirements>

Dankwoord

Bij het ontwikkelen van dit monitoringplan is dankbaar gebruik gemaakt van de bijdrage van de volgende personen, in de vorm van samenwerking, suggesties, advies, netwerk, medewerking en door hen ontwikkelde tools:

- IMARES: Nara Davaasuren, Johan Stapel, Norbert Dankers, Martin Baptist.
- Deltares: Ivo Wennekers, Claire Jeuken, Harry Schelfhout, Bert van der Valk, Alfons Smale.
- Rijkswaterstaat: Floris van Bentum, Jacco Doze, Willem Faber, Evelien van Eijsbergen, Peter Heinen, Willem van der Lee, Quirijn Lodder, Ernst Lofvers, Herman Mulder, Remco Schrijver, Deon Slagter, Ingeborg van Splunder.
- KNMI: Caroline Katsman, Dirk Kraaijpoel, Reinout Boers, Rob Sluijter.
- WaLTER: het gehele team, maar met name Pim Vugteveen, Katja Philippart.
- Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier: Petra Goessen.
- Waterschap Noorderzijlvest: Kees de Jong.
- STOWA: Rob Ruijtenberg, Deltafacts.
- Alterra/Wageningen University: Judith Klostermann, Jantsje van Loon, Pieter Slim, Dorothee van Tol.
- Alle respondenten van de WaLTER/DPW enquête Klimaat en veiligheid.

Verantwoording

Rapport: C121/14
Projectnummer: 4308201153

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het betreffende afdelingshoofd van IMARES.

Akkoord: A.J. Pajmans MSc
Onderzoeker

Handtekening:

Datum: 12 september 2014

Akkoord: Z.B. Wang
Senior specialist/adviseur

Handtekening:

Datum: 12 september 2014

Akkoord: Drs. J. Asjes
Hoofd afdeling Ecosystemen

Handtekening:

Datum: 12 september 2014

Akkoord: Ankie Bruens
Senior specialist/adviseur

Handtekening:

Datum: 12 september 2014

Bijlage A. Specificaties meteorologische databehoefte

In deze bijlage wordt in een aantal tabellen de meteorologische databehoefte samengevat:

- M.1 Gebruikerseisen aan nauwkeurigheid voor variabelen van automatische stations,
- M.2 Gebruikerseisen aan tijdigheid voor variabelen van automatische stations,
- M.3 Gebruikerseisen aan ruimtelijke dekking voor variabelen van automatische stations,
- M.4 Gebruikerseisen aan weerradarsystemen,
- M.5 Overzicht projectmatige metingen meteorologische kennisleemtes
- M.6 Overzicht bronnen hoge-resolutie meteorologische informatie die relevant zijn voor de monitoring Deltaprogramma Wadden
- M.7 Overzicht niet-meteorologische waarnemingen die nodig zijn voor invoer van meteorologische modellen

(a) Gebruikerseisen aan reguliere monitoring

De eerste 3 tabellen (M.1-3) geven gebruikerseisen voor reguliere monitoring door oppervlaktstations. Deze zijn gebaseerd op richtlijnen die door de World Meteorological Organization (WMO) zijn uitgegeven in:

- *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8, (WMO 2008)*
- *OSCAR requirements (WMO, 2014)*, <http://www.wmo-sat.info/oscar/observingrequirements>

De WMO maakt onderscheid tussen verschillende toepassingen en niveaus van informatievoorziening. De in dit plan gehanteerde eisen voor nauwkeurigheid en tijdigheid voldoen aan de criteria voor de toepassing 'Nowcasting'. Deze toepassing komt goed overeen met het gebruik van waarnemingen voor Waterveiligheid toepassingen. Er wordt uitgegaan het niveau 'breakthrough' (het middelste niveau). Voor de variabelen luchtdruk, dagsom neerslag en dagsom verdamping hebben we de eisen voor Numerical Weather Prediction' en voor 'Agricultural Weather Prediction' geraadpleegd.

Tabel M.4 geeft de gebruikerseisen aan weerradarsystemen. De eis van twee radarstations in of nabij het Waddengebied is overgenomen van het initiatief nationaleregenradar.nl, een samenwerkingsverband van nationale waterbeheerders en providers, de overige eisen volgen uit aanbevelingen van OPERA, een samenwerkingsverband van Europese weerdiensten op het gebied van weerradars.

M.1 Gebruikerseisen aan nauwkeurigheid voor variabelen van automatische stations

Variabele	Onzekerheid	Precisie rapportage
windsnelheid	0.5 m/s als wind \leq 5 m/s 10% als wind $>$ 5 m/s	0.5 m/s
windrichting	5 ^o	5 ^o
druk	0.1 hPa	0.1 hPa
temperatuur	0.2 K	0.1 K
zicht	20%	
neerslag	0.1 mm/10 min als neerslag \leq 2 mm/10 min 5% als neerslag $>$ 2 mm/10 min	1 mm 1 mm boven 20mm/10 min
dagsom neerslag	0.1 mm voor dagsommen \leq 5 mm 2% voor dagsommen $>$ 5 mm	0.1 mm 1 mm boven 50mm
straling	15%	10W / m ²
dagsom verdamping	0.8 mm random fout per dag	0.2 mm

Opmerkingen:

- bij vaste neerslag: indien redelijkerwijs mogelijk
- een fout van 5^o in windrichting correspondeert ruwweg met 10% in windsnelheid
- deze meetfouten zijn klein vergeleken met natuurlijke variabiliteit op ruimtelijke schalen van tientallen kilometers en minuten; vermindering van de meetonzekerheid geeft daarom in de meeste gevallen slechts schijnzekerheid
- straling staat voor inkomende kortgolvlige straling
- dagsom verdamping staat voor de Makkink referentie verdamping die wordt bepaald uit inkomende kortgolvlige straling en temperatuur. Criterium komt voort uit eis uit waterbeheer.

M.2 Gebruikerseisen aan tijdigheid voor variabelen van automatische stations

Variabele	Tijdigheid	Uitgiftefrequentie
Windsnelheid	15 min	10 min ^{a)}
Windrichting	15 min	10 min
druk	15 min	10 min
Temperatuur	15 min	10 min
Zicht	15 min	10 min
Neerslag	10 min	10 min
dagsom neerslag	6 h	dagelijks
Straling	1 h	10 min
Verdamping	6 h	dagelijks

^{a)} 10 minuten is de standaard uitgiftefrequentie van LMW en van het KNMI meetnet waarop veel van de huidige toepassingen zijn gebaseerd.

M.3 Gebruikerseisen aan ruimtelijke dekking voor variabelen van automatische stations

Variabele	Resolutie land	Resolutie zee	Resolutie langs kust
Windsnelheid	50 km	200 km	50 km (incl. windpalen)
Windrichting	50 km	200 km	50 km (incl. windpalen)
druk	50 km	200 km	
temperatuur	50 km	200 km	
zicht	Zie opmerking	200 km	
neerslag	50 km boven land (+ radar)	(radar)	
dagsom neerslag	10 km		
straling	50 km		
dagsom verdamping	50 km		

Opmerkingen

- Resolutie langs de kust is een RWS criterium. Dit criterium is niet op WMO of KNMI aanbevelingen is gebaseerd, maar op de RWS behoefte om de windsterkte langs de kust te kunnen monitoren. De windpalen zijn nodig om zowel langs de Noordzeekust als langs het vasteland een resolutie van ongeveer 50 km te bereiken.
- De resoluties in de tabel weerspiegelen de dichtheid van het huidige LMW en KNMI meetnet. De WMO criteria voor resolutie voor high-resolution numerical weather prediction doeleinden zijn een stuk strenger⁹. Op schalen van 50 km geeft het meetnet boven land een bruikbaar beeld voor wind, temperatuur en straling. Om meer details te kunnen vatten wordt aanvullende informatie gebruikt uit onder meer satellietbeelden, radarbeelden en weermodellen.
- Zicht is in veel situaties niet goed te interpoleren tussen landstations, daarom is hier geen resolutie opgegeven. Voor het bepalen van de klimatologie van mist volstaan de metingen van enkele stations in het Waddengebied.
- Om een ruimtelijk beeld van neerslag te verkrijgen op basis van stationsdata is een resolutie van minimaal 10 km nodig. Combineren van een netwerk van 50km stationsdata met radargegevens levert een bruikbaar ruimtelijk beeld, al is nauwkeurigheid beperkt.

⁹Dwz dat deze componenten van het huidige meetnet volgens de WMO criteria geen toegevoegde waarde hebben voor de kwaliteit van hoge resolutie modelverwachtingen. Ze kunnen wel gebruikt worden om de kwaliteit van de verwachtingen te toetsen.

- Dagsom verdamping staat voor de Makkink referentie verdamping die wordt bepaald uit de inkomende kortgolvlige straling en temperatuur. Aangenomen is dat een resolutie van 50km van oppervlaktestations volstaat om een product te maken dat op schalen van 2.5km x 2.5km aan de nauwkeurigheidseis voldoet. Anders is de eis aan resolutie hoger.

M.4 Gebruikerseisen weerradarsystemen

Soort criterium	Gebruikerseisen	Opmerkingen
aantal en afstand	minimaal 2 binnen 150 km	Met Den Helder en Emden is hieraan voldaan.
type	C-band, dual Doppler	Bij voorkeur <i>dual polarisation</i>
ruimtelijke resolutie	1 km	
resolutie in tijd	5 min	
Beschikbaar binnen	5 min	
variabelen	reflectie, radiële snelheid, polarisatie	
eisen aan kwaliteit	conform OPERA	Zie www.eumetnet.eu/opera
eisen aan disseminatie	conform OPERA	OPERA is een Europees samenwerkingsverband op het gebied van weerradar

(b) Overzicht projectmatige metingen meteorologische kennisleemtes

Extra of projectmatige meteorologische waarnemingen worden verricht voor:

- Processtudies die meteorologische kennisleemtes adresseren die een beperkende factor zijn voor de kwaliteit van klimaatstudies, weersverwachtingen en forcering van golven, waterbeweging, morfologie en ecosysteem.
- Ondersteunende metingen voor studies van processen op het gebied van golven, waterbeweging, morfologie, ecosysteem waarvoor meteorologie een belangrijke stuurparameter is.

Binnen het programma WTI2017 worden meteorologische veldmetingen ingewonnen en verwerkt voor de invulling van kennisleemtes op het gebied van Hydraulische Belastingen (Wenneker, Deltares 2014). In 2014 hebben KNMI en Deltares in opdracht van I&M een Definitiestudie Kennisprogramma Wind verricht (Boers et al., 2014) waarin onder meer voorstellen zijn gedaan voor het verrichten projectmatige metingen.

Het gaat zowel om het verwerven van nieuwe kennis als om de kwaliteit van modelinformatie vast te stellen. Want nog steeds is de kwaliteit van de meteorologische forcering een van de belangrijkste beperkende factoren bij het berekenen van hydraulische randvoorwaardes.

M.5 Overzicht projectmatige metingen meteorologische kennisleemtes

Type meting en variabelen	Variabelen	Aantal locaties	Programma	Relevantie Deltaprogramma Waddengebied	Opmerkingen
wind forcering golven, waterbeweging en waterstand op het wad	oppervlaktewind windstress luchttemperatuur watertemperatuur	4	WTI 2017	Waterveiligheid Morfologie	Bestaand programma, krijgt vervolg na 2017.
dragrelatie wind boven ondiep water en inhomogeen terrein	oppervlaktewind windstress profielen wind temperatuur profiel watertemperatuur	1	KNMI/Deltares voorstel <i>Kennisprogramma Wind (2014)</i>	Waterveiligheid Morfologie	Programma in definitiefase. Opdrachtgever is I&M/DGRW.

(c) Extra eisen als informatiebehoefte aan hoge-resolutie meteorologische gegevens toeneemt

De behoefte aan meteorologische modellen en waarnemingen met een hogere resolutie neemt steeds toe omdat dit meer gedetailleerde en meer precieze informatie geeft. Echter, het plaatsen van extra klassieke waarnemingsstations heeft een slechte kosten/baten-verhouding. Daarom is de aanbeveling om bestaande hoge resolutie informatie uit andere bronnen beter te benutten, zie de tabel hieronder.

M.6 Overzicht bronnen hoge-resolutie meteorologische informatie die relevant zijn voor de monitoring Deltaprogramma Wadden

Type	Variabelen/Sensoren	resolutie	Opmerkingen
Weerradar	radiële snelheid, reflectie	1 km	
satelliet scatterometer	oppervlaktewind	12 km	- beperkte dekking in ruimte en tijd - nu nog niet dicht bij de kust
meteosat satelliet	straling, bewolking, sneeuw	3 km / 1 km	1 km beperkte productset
Internet of things	sensoren van waterschappen, veerdiensten, windmolens etc.		
Crowdsourcing	metingen door publiek		Zie bv. www.metoffice.gov.uk KNMI heeft pilot gestart.

(d) Behoeft aan niet-meteorologische data van meteorologische modellen

Het vermogen van meteorologische modellen om verschijnselen aan de grond goed te kunnen simuleren hangt sterk af van de kwaliteit van de gegevens van oppervlakte eigenschappen zoals ruwheid die het model nodig heeft. Daarom zijn ook goede waarnemingen nodig van deze oppervlakte eigenschappen.

M.7 Overzicht niet-meteorologische waarnemingen die nodig zijn voor invoer van meteorologische modellen

Type	Bron	resolutie	Opmerkingen
Zeewatertemperatuur	satelliet	1 km	
Zeewatertemperatuur	in-situ sensor	2 tot 4 locaties	Om satellietmetingen te ijken.
Land-zee masker en hoogte	o.a. satelliet	1 km, 1h	Hangt in Waddenzee van tij af.
Bodemvocht	o.a. satelliet	5 km	
Sneeuw, ijkbedekking	in-situ, satelliet	5 km	
Ruwheid land	Divers, waaronder grondgebruik, vegetatietype, nationaal hoogtebestand.	product: 100m - 1km databronnen: 0,5m tot 100m	Verandert niet of langzaam (m.u.v. onderlopende wadplaten)

Bijlage B. Inventarisatie monitoringbehoefte

De bijlage geeft in tabelvorm de totale monitoringbehoefte weer voor Deltaprogramma Waddengebied, zoals in de afzonderlijke Hoofdstukken is beargumenteerd. Bij elke monitoringgrootheid/meetvariabele (op alfabetische volgorde gerangschikt) worden het doel of de doelen waaruit de databehoefte voortkomt weergegeven, gevolgd door, waar relevant, de eisen die aan het aantal meetpunten/resolutie, meetfrequentie, meetmethode etc. worden gesteld. In de laatste kolom wordt aangegeven of de huidige monitoring aanvulling behoeft.

Groen: huidige monitoring voldoet.

Geel: of huidige monitoring voldoet is afhankelijk van de situatie. Aanvullingen zijn wenselijk.

Rood: huidige monitoring voldoet niet. Aanvullingen zijn nodig.

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Begaanbaarheid dijk	Waterkering toetsing keringen	dijkvakken	bij aanleg en onderhoud			
Bodemligging (kustraaien)	Morfologische ontwikkeling Toetsing van de kustlijn, en meegroeivermogen vooroever, strand, duin	Jarkus raaien op de kust	jaarlijks	combinatie van singlebeam lodingen en Lidar		
Bodemligging (Noordzee kustzone)	Morfologische ontwikkeling meegroeivermogen kustfundament, en buitendelta's	gebiedsdekkend	vaklodingen, elke 3 jaar op de kust en de buitendelta's	combinatie van singlebeam lodingen en Lidar		
Bodemligging (Waddenzee)	Morfologische ontwikkeling meegroeivermogen kombergingsgebied	gebiedsdekkend	vaklodingen, elke 6 jaar in de kombergingsgebieden	combinatie van singlebeam lodingen en Lidar		Multibeam opnamen nodig voor nauwkeurigere dieptebeoordeling

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Bodemligging (wadplaten en kwelders)	Morfologische ontwikkeling meegroeivermogen wadplaten, kwelders	gebiedsdekkend	varierend: eens per 3 jaar en eens per 6 jaar	combinatie van singlebeam lodingen en Lidar		meenemen van de randen van het wad en betere aansluiting op lodingen is nodig. Uitbreiding 3-jaarlijkse nauwkeurige metingen kwelders naar Dollard en eilandkwelders (vaste raaien). Uitbreiden in-situ wadmetingen
Bodemligging (achterland, eilandstaarten en – koppen)	Morfologische ontwikkeling meegroeivermogen eilanden en achterland	gebiedsdekkend	eilandstaarten en koppen: ieder jaar. achterland: elke 5 tot 8 jaar	laseraltimetrie en peilmerkdeling		Nauwkeurigheid AHN metingen blijven vergroten, Uitbreiding jaarlijkse LiDAR met volledige buitendijkse gebieden van eilanden (kop en staart)
Bodemligging (buitendelta en bekken)	Onderzoek, pilots en modellering procesmetingen, evaluatie van pilot	gebiedsdekkend	continue metingen, aangevuld met meetcampagnes	radar (continu) en jetski's multibeam	t.b.v. pilots, onderzoek en modellering	gedetailleerde invulling meetcampagnes hangt ook af van pilot en doelstellingen
Bodemligging (eilandkust)	Onderzoek, pilots en modellering evaluatie van pilot	verdichte Jarkus raaien, op omringende eilandkust	twee keer per jaar, gedurende 5 tot 10 jaar na pilot		pilots	intensiteit en frequentie meetcampagne hangt ook af van omvang pilot.

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Bodemligging (Noordzee en Waddenzee)	Belastingen randvoorwaarde voor golf en waterstand modellen	gehele WZ, Noordzeekust incl buitendeltas	Noordzee: elke 3 jaar, Waddenzee: elke 6 jaar, vaargeuelen: minstens 1x per jaar.	combinatie van lodingen en LiDAR		frequentie verhogen voor gebieden die dynamisch zijn, of bepalend zijn voor de hydraulische randvoorwaarden (met name voorlanden)
Bodemligging (Noordzee en Waddenzee)	Sturende factoren randvoorwaarde voor golf en waterstand modellen	Noordzee, 5 km resolutie??	10 jaar			
Bodemligging (Waddenzee)	Sturende factoren grootte van antropogene invloeden zoals bodemdaling	locaties afhankelijk van activiteit	afhankelijk van snelheid effecten, jaarlijks tot elke 6 jaar		tijdelijk (gedurende looptijd impact)	Verticale resolutie Lidar en lodingen is onvoldoende voor impactstudies, behoefte aan nieuwe meettechnieken ontwikkelen voor betere nauwkeurigheid
Bodemligging (duinvolume)	Waterkering toetsing keringen (duinprofiel)	JarKus-raaien	jaarlijks			

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Bodemligging (nabij kunstwerken)	Waterkering ontgrondingskuilen	lokaal bij kunstwerken	Afhankelijk van ontwikkeling bodemligging en spuivolume			bij toename van spuivolumes moet er regelmatig controle aan de ontwikkeling van ontgrondingskuilen plaatsvinden
Bodemligging (nabij kust)	Waterkering status voorland: BKL, geulen, kwelders	alle voorlanden voor dijken en duinen en kunstwerken	jaarlijks (?)	multi-beam of single-beam aangevuld met LiDAR. Deel valt onder JARKUS.	langdurig, soms incidenteel extra metingen	Beter aansluiten op AHN. Aandachtsgebieden met multi-beam doen en soms hogere frequentie (bijvoorbeeld bij migrerende geulen).
Bodemligging (dijk)	Waterkering dijkprofiel, dijkhoogte (voor toetsing)	langs volledige dijk	minimaal 1x per 6 jaar			
Bodemligging (land)	Sturende factoren klimaatverandering					

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Bodemvocht	Sturende factoren klimaatverandering, waterbeheer	5 km resolutie	wekelijks	satelliet		meer ruimtelijk detail wenselijk
Dijkbekleding	Waterkering toetsing keringen	bestaande locaties	minimaal 1x per 6 jaar en na/tijdens stormen			
Dijkstabiliteit	Waterkering toetsing keringen	alle dijken dicht bij een geul	continue	probes, satelliet, multibeam	ook Pilot Vierhuizenegat	Ook verticale, horizontale bewegingen en hoekverdraaiingen meten.
Golven (Noordzee)	Sturende factoren invloed waterbeweging (golven) van de Noordzee	Enkele locaties in de Noordzee + satellietmetingen	In- situ 10 minuten Satelliet dagelijks	satelliet		Meer ruimtelijk detail en hogere frequentie satelliet informatie
Golven (Waddengebied)	Belastingen randvoorwaarde en/of kalibratie model voor berekening HR	Noordzee bij Eierlandse Gat, Schiermonnikoog Noord, Borkum Noord, Amelander Zeegat + enige locaties bij kust vasteland	20 minuten	golfboeien	-	Voor voldoende spreiding in de metingen: opnemen van enkele projectmatige WTI metingen in het vaste LMW. Voor pilot / onderzoek aanvullende metingen vereist, afhankelijk van project.

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Golven (zeegat en komberging)	Onderzoek, pilots en modellering invoer en verbetering modellen, vergroten proceskennis	inspanning gericht op 1 zeegat. 1 boei per geul, minstens twee boeien in de keel van het zeegat		golfboeien	Ook pilot / onderzoek	Extra locaties gewenst, afhankelijk van project en doelstelling.
Golven (Eemsmonding)	Onderzoek, pilots en modellering vergroten proceskennis golfpropagatie van diep naar ondiep water	viertal golfboeien in de Eemsmonding		golfboeien	onderzoek, verbetering modellen	handhaven WTI golfboeien in Eemsmonding, voor ten minste nog 10jaar.
Luchttemperatuur	Sturende factoren projectmatige metingen		10 minuten	in-situ sensor	pilot/ onderzoek	Afhankelijk van project
Luchttemperatuur	Sturende factoren weer, klimaat, hydr. modellen		10 minuten			
Luchttemperatuur	Belastingen randvoorwaarde model voor berekening hydraulische randvoorwaarden		continu			
Neerslag	Sturende factoren weer, klimaat, hydr. modellen		10 minuten	in situ radar		meer ruimtelijk detail wenselijk
Oppervlakte temperatuur (land)	Sturende factoren weer en klimaat			satelliet		

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Saliniteit	Sturende factoren modellen Noordzee, waterkwaliteit	Noordzee, 300 km resolutie		in-situ sensor		
Sedimentsamenstelling	Onderzoek, pilots en modellering vergroten proceskennis en modelverbetering	buitendelta en in het bekken	voldoende variatie in de tijd voor registreren seizoenseffecten, effect van stormen en herstel daarna	(bijvoorbeeld: Flying Eyeball Camera)	pilot/onderzoek	inspanning en dekking hangt ook af van pilot, of doelstelling onderzoek.
Sedimentsamenstelling	Morfologische veranderingen meegroeivermogen en dynamiek Waddenzee	op de platen	elke 6 tot 10 jaar			huidige inspanning op intergetijdegebied uitbreiden naar subgetijdegebied. Huidige inspanning is alleen op projectbasis, er vinden nog geen reguliere metingen plaats.
Sedimenttransport	Onderzoek, pilots, en modellering sedimentbalansen Waddenzee, vergroten proceskennis	door de geulen, gecombineerd met stromingsmetingen	13-uurs metingen in enkele geulen. Minstens 1x per jaar.	OBS		urgente behoefte vanuit onderzoek
Seismische trillingen	sturende factoren aardbevingen	bestaande locaties	continue			ja, wanneer door KNMI geplande uitbreiding is uitgevoerd
sneeuw (bedekking)	Sturende factoren klimaatverandering			satelliet, in-situ		meer ruimtelijk detail wenselijk in bewolkte situaties

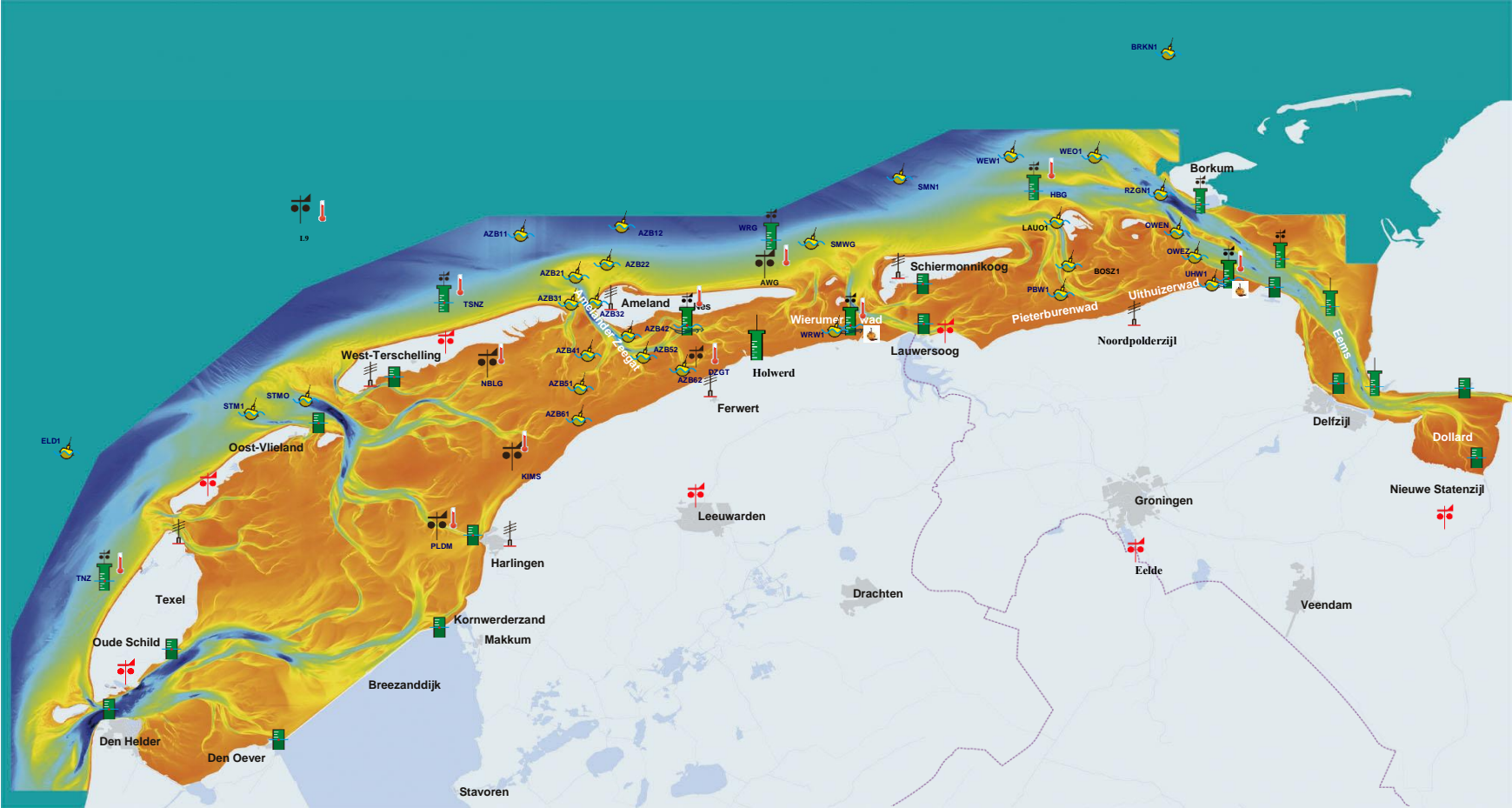
Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Straling	Sturende factoren weer en klimaat, waterbeheer		1 uur	in-situ + satelliet		
Stroming	Onderzoek, pilots en modellering debieten door geulen, bepaling van sedimenttransporten	Continue metingen op enkele permanente stations. Aangevuld met 13-uurs metingen in enkele geulen. Minstens 1x per jaar.	Continue metingen op enkele permanente stations. Aangevuld met 13-uurs metingen in enkele geulen. Minstens 1x per jaar.		onderzoek.	urgente behoefte vanuit onderzoek.
Vegetatie (bedekking)	Waterkering status voorland	alle voorlanden voor dijken en duinen en kunstwerken	minimaal 1x per 6 jaar			Huidige inspanning voldoet redelijk
Verdamping	Sturende factoren weer, klimaat, waterbeheer	land	dagelijks	in-situ sensor + satelliet		
Waterstanden	Belastingen maatgevende condities, stijging GHW, getij	bestaande waterstandsmmeetpunten (ongeveer 20 in het Wadden gebied)	10 minuten			









Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Waterstanden	Morfologische ontwikkeling GHW, GLW	Bestaande meetpunten in de Noordzee. In de Waddenzee 1 getijstation bij de keel en 1 getijstation achterin het bekken.	elke 10 minuten			Extra meetpunten wenselijk in het bekken, voor een betere gebiedsdekking. (Voorgesteld: De Cocksdoorp, Holwerd en een extra punt tussen Harlingen en Holwerd.)
Waterstanden	Sturende factoren zeespiegelstijging Waddengebied	Enkele meetpunten	gemiddeld per 10 minuten	absoluut referentie niveau zeer goed bekend		

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Waterstanden	Sturende factoren zeespiegelstijging wereldwijd			hoge precisie satellieten in-situ		satellietmonitoring wereldwijd patroon zeespiegelstijging nodig voor interpretatie metingen Waddengebied, evenals in-situ metingen buiten Waddengebied
Waterstanden	Sturende factoren getij karakteristieken	bestaande meetpunten	gemiddeld per 10 minuten	Gebruik satellietmonitoring patroon Noordzee en omgeving maakt betere bepaling getijkarakteristieken mogelijk		
Water temperatuur	Belastingen randvoorwaarde model voor berekening hydraulische randvoorwaarden	in elk geval: DZGT (Dantziggat), NBLG (Noorderbalgen), L9, TSNZ (Terschelling Noordzee), AWG (Ameland Wierumergronden), Terschelling-Hoorn, Nes	continue			
Water temperatuur	Sturende factoren weer, klimaat, modellen	1 km resolutie		satelliet		
Water temperatuur	Sturende factoren projectmatige metingen			in-situ sensor	pilot/ onderzoek	Afhankelijk van project

Meetvariabele/ Databehoefte	Deltathema en Doel	Locaties	Frequentie	Methode	Pilot / Onderzoek Incidenteel	Behoefte aan intensivering, aanvullingen en verbetering huidige monitoring
Water temperatuur	Sturende factoren ijkings satellietmeting	2 tot 4 in Waddenzee		in-situ sensor		Aanvulling gewenst
Windsnelheid en -richting	Sturende factoren projectmatige metingen	Aanvulling op standaard locaties	10 minuten	in-situ sensor	pilot/ onderzoek	Meer ruimtelijk detail wenselijk afhankelijk van opzet pilot/onderzoeksproject
Windsnelheid en - richting	Sturende factoren projectmatige metingen	Noordzee, 5 – 25 km resolutie	1 tot enkele malen per dag gedeelte Noordzee	satelliet	Pilot / onderzoek	Behoefte afhankelijk van opzet pilot / onderzoeksproject
Windsnelheid en -richting	Belastingen / Sturende factoren randvoorwaarde model voor berekening hydraulische randvoorwaarden, weer en klimaat, meteo modellen	Langs kust eilanden en kust vasteland 50km resolutie	10 minuten			Borgen resolutie als WTI inspanning niet wordt voortgezet (opnemen van enkele WTI meetstations in LMW)
Zicht	Sturende factoren klimaatverandering.	Enige locaties	10 minuten			waarnemingen met een hogere resolutie uit alternatieve bronnen mits kosten laag zijn

Bijlage C. Overzicht bestaande meetstations



- | | | | |
|---|---|---|---------------------------------------|
|  | Tide measurement |  | Meteo measurement
Rijkswaterstaat |
|  | Tide- and meteo measurements |  | Air temperature |
|  | Tide-, Wave-, water temperature- and meteo measurements |  | S4-wave direction and waveheight |
|  | Meteo measurement
KNMI |  | Buoy (directional or non-directional) |