

# Hoogwaterbeschermingsprogramma

## Plan van aanpak

### Meerjarige veldmetingen Eems-Dollard

Versie 2.0

Mei 2017

*Waterschap* NOORDERZIJLVEST



# Inhoud

\_Toc482890106

<b>1</b>	<b>Aanleiding en doel.....</b>	<b>3</b>
1.1	Aanleiding.....	3
1.2	Gesignaleerde onzekerheden en veiligheden .....	3
1.3	Doel plan van aanpak (PvA).....	6
<b>2</b>	<b>Hydraulische condities .....</b>	<b>7</b>
2.1	Gebiedsbeschrijving en huidige veldmetingen.....	7
2.2	Huidige en mogelijk toekomstige modellering waterstand en golven .....	9
2.3	Validatie voorgekomen extreme stormen – waterstand (samenvatting) .....	13
2.4	Stand van zaken validatie golven bij de dijk .....	14
2.5	Meetvoorstel in oostelijke Waddenzee en Eems-Dollard .....	17
2.5.1	Globale systeem .....	17
2.5.2	Lokale systeem .....	19
<b>3</b>	<b>Golfoverslag .....</b>	<b>20</b>
3.1	Inleiding .....	20
3.2	Locaties voor overslagmetingen.....	20
3.3	Golfoverslag en golfoploopmetingen .....	23
3.4	Laboratoriumonderzoek van golfoverslag.....	29
<b>4</b>	<b>Zeespiegelstijging en bodemdaling.....</b>	<b>31</b>
4.1	Samenvattende conclusies .....	31
4.2	Bodemdaling en zeespiegelstijging Eems-Dollard .....	31
<b>5</b>	<b>Meetprogramma .....</b>	<b>34</b>
5.1	Inleiding .....	34
5.2	Fasering .....	34
5.3	Meteo, golf- en waterstandsmodellen .....	35
5.4	Golfoverslag.....	35
5.5	Data + validatie .....	36
<b>6</b>	<b>Projectorganisatie .....</b>	<b>37</b>
6.1	Organisatieschema .....	37
6.2	Inzet Aio-er of promovendus.....	38
<b>7</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>39</b>

# 1 Aanleiding en doel

## 1.1 Aanleiding

De Waterwet schrijft voor dat de primaire waterkeringen elke 12 jaar beoordeeld moeten worden aan de in de wet opgenomen veiligheidsnormen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI). Met het rekenmodel Hydra-NL worden de Hydraulische Randvoorwaarden (HR) bepaald. Onzekerheidstoelagen dekken onzekerheden en onnauwkeurigheden in de methodes om de HR te bepalen. Dit kan leiden tot een te hoge ontwerpwaterstand voor de waterkering en daarmee overdimensionering.

Uit overzichten van Rijkswaterstaat blijkt dat er te weinig metingen in het Eems - Dollard gebied plaatsvinden, die leiden tot genoemde onzekerheden m.b.t. waterstanden en golven. Deze onzekerheden hebben het waterschap Noorderzijvest doen besluiten voor de dijkversterking Eemshaven – Delfzijl een planperiode te kiezen voor 25 jaar (in plaats van de reguliere 50 jaar), gecombineerd met het onderdeel 'Meerjarige veldmetingen Eems – Dollard'.

Het onderdeel 'Meerjarige Veldmeting Eems – Dollard' heeft tot doel de onzekerheden te verkleinen van:

- de waterstand en golven bij de dijk (de HYDRA-uitvoerpunten).
- de golfoverslag (bepaling kruinhoogte boven ontwerpwaterstand).

Het onderdeel 'Meerjarige veldmetingen Eems – Dollard' heeft een bredere impact dan alleen de dijkversterking Eemshaven – Delfzijl:

- Impact modellering gehele Eems-Dollard door metingen ook buiten dijktraject Eemshaven – Delfzijl.
- Veldmetingen verkleinen onzekerheden m.b.t. waterstanden en golven.
- Veldmetingen leveren betere rekenmodellen op.
- Integraliteit leidt tot nieuwe inzichten en reduceert onzekerheden.
- Adaptieve aanpak draagt bij aan sober en doelmatig voor gehele Eems-Dollardgebied én het oostelijk (NL) Waddengebied.
- Vergelijking traditionele én nieuwe meetmethodes: unieke combinatie aan informatie.

Om dit te bereiken wordt gedacht aan een 12 - 15 jaar durend programma met de volgende onderdelen:

- meerjarige veldmetingen op basis van bestaande + nieuwe meteo- en HYDRA-uitvoerpunten, bestaande + nieuwe golfmeetboeien, golfoverslag + golfoploop-instrumenten.
- data opslag + processing, vergunningaanvraag, projectmanagement.
- validatiestudies, stormrapportages, schaalmodelonderzoek.

## 1.2 Gesignaleerde onzekerheden en veiligheden

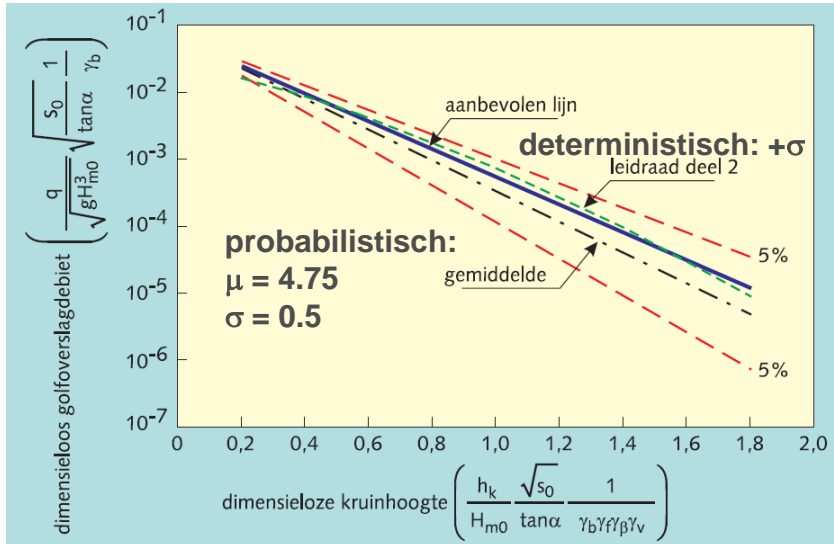
Bij het tot stand komen van het voorkeursalternatief worden in een ontwerpproces verschillende onzekerheden, veiligheden en robuustheden in rekening gebracht. Soms zijn deze impliciet, zoals een veiligheid in de pc-overslagmodule, maar meestal expliciet. Onzekerheden kunnen ook van de lokale omstandigheden afhangen, zoals bijvoorbeeld de scheve golfval bij het traject Eemshaven-Delfzijl. De bij dit project gevonden onzekerheden, veiligheden en robuustheden worden in deze paragraaf besproken. Het voornaamste doel van de meerjarige veldmetingen Eems-Dollard is om de gevonden onzekerheden te verkleinen.

Van belang hierbij is te realiseren dat vanaf januari 2017 het nieuwe WBI-instrumentarium van kracht is. Dan is het mogelijk om op basis van probabilistische berekeningen per dijkvak en per mechanisme kwantitatief aan te geven hoe groot de kans op falen is, en hoe groot de onzekerheid daarin is. Per mechanisme, dus bijvoorbeeld ook erosie van het binnentalud als gevolg van golfoverslag.

### *Golfoverslag*

In pc-overslag zit in de deterministische mode een veiligheid ten aanzien van modelonzekerheid. Deze is eind negentiger jaren ontstaan omdat er geen onzekerheid voor golfvoorwaarden en waterstand werd

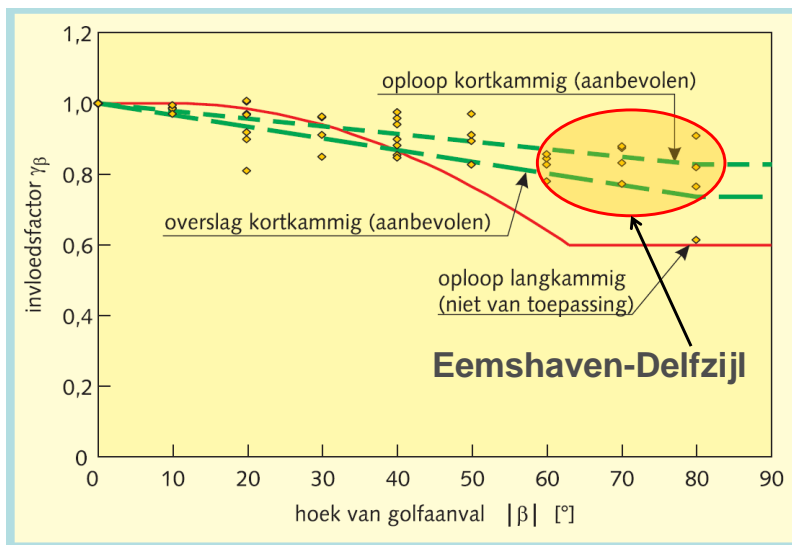
meegenomen bij het ontwerp en de formule te onzeker is om van het gemiddelde uit te gaan. Figuur 1.1 geeft de golfoverslagformule, zoals deze in pc-overslag en alle andere gerelateerde programma's zoals de HYDRA's is geprogrammeerd. Als een probabilistische berekening wordt gemaakt, dan mag van de gemiddelde lijn worden uitgegaan en kan de betrouwbaarheid van de formule door de gegeven standaardafwijking worden meegenomen. Bij een deterministische berekening wordt van de "aanbevolen lijn" uitgegaan en deze ligt een standaardafwijking hoger dan de gemiddelde lijn.



Figuur 1.1. De golfoverslagrelatie zoals deze in pc-overslag en de HYDRA's is ingebouwd.

Bij het ontwerp van de dijk is deze onzekerheidstoeslag van één standaardafwijking meegenomen. In principe moet deze onzekerheid op een juiste manier samen worden beschouwd met andere onzekerheden. Hierbij geldt dat onzekerheden niet zomaar bij elkaar kunnen worden opgeteld. Meten van de golfoverslag heeft twee effecten: het verkleint de onzekerheid (de band zal veel kleiner worden dan het gebied tussen de twee rode streeplijnen in figuur 1.1) en het geeft ook de juiste overslagrelatie voor de lokale omstandigheden, welke van het gemiddelde kan afwijken (zowel naar boven als naar beneden).

Op het traject Eemshaven - Delfzijl is op veel locaties sprake van (zeer) scheve golfaanval. Het effect van deze scheve golfaanval zit wel in een formule, maar is onzeker omdat het moeilijk is om modelonderzoek uit te voeren met zeer scheve golfaanval. Figuur 1.2 geeft de relatie die wordt gebruikt om de hoek van golfaanval bij overslag in rekening te brengen.



Figuur 1.2. Invloed van scheve golfaanval op golfoverslag



De hoek van golfaanval bij het dijktraject Eemshaven-Delfzijl is vaak groter dan 60° en de relatie is hier veel onzekerder dan bij loodrechte golfaanval. Het meten van golfoverslag in het veld is daarmee erg nuttig:

- het verkleint de onzekerheid in de golfoverslagrelatie.
- het geeft de juiste overslagrelatie voor de lokale omstandigheden.
- het valideert de onzekerheid bij de invloed van scheve golfaanval op overslag.

De golfoverslagrelatie is een bepalende factor voor de kruinhoogte (naast de waterstand). Daarom wordt aandacht besteed aan het meten van golfoverslag, naast het meten van de golfcondities, waterstand en andere meteo-condities.

#### *Onzekerheid in golven en waterstanden*

Bij de Leidraad Rivierdijken werd voor het eerst een robuustheidstoets toegepast en wel van 0,3 m op de waterstand. Op basis van de dijkversterkingsplannen op Ameland is besloten om voor golf-gedomineerde dijken een robuustheid op de golfhoogte en golfperiode te zetten van 10%, welke later ook is toegepast voor andere dijkversterkingsprojecten. Deze 10% verdisconteerde impliciet een eventuele onzekerheid in de waterstand. Later is in bestuurlijk kader eerst alsnog een robuustheidstoets op de waterstand gezet in het merengebied en momenteel wordt, naast de onzekerheidstoets op golfhoogte en -periode, voornamelijk 0,4 m bij de waterstand opgeteld.

Toekomstige studies, eventueel met probabilistische berekeningen, moeten aantonen wat correctere onzekerheidstoetsen zouden moeten zijn voor golfhoogte, -periode en waterstand. Aangezien deze onderlinge relaties geen metingen vergen is dit onderdeel in het plan van aanpak niet verder uitgewerkt.

Wat wel speelt is dat de hydraulische randvoorwaarden voor ontwerp door numerieke golf- en waterstandsmoedellen wordt voorspeld. Met name in de oostelijke Waddenzee en nog meer in de Eems-Dollard, is deze voorspelling onzeker. Het indringen van de golven vanaf de Noordzee speelt een rol, maar ook de geulen en het feit dat het dijktraject vooral noord-zuid ligt en dus deels beschermd is tegen wind- en golfrichtingen die westelijker dan het noorden komen. Wind is een belangrijke parameter voor o.a. de golfparameters (hoogte en richting). Om de windverwachtingen te bepalen maakt het KNMI gebruik van het rekenmodel Hirlam. Afhankelijk van tijdshorizon wordt gebruik gemaakt van een gridresolutie van minimaal 2,5 km tot maximaal 8 km. Dit is relatief grofschalig voor het Eems-Dollardgebied. In het Eems-Dollardgebied worden geen meteogegevens ingewonnen op open water. Dit maakt de in de hydromoedellen gebruikte meteocondities een relatief onzekere factor.

Het lijkt ons daarom zinvol meteocondities, golfcondities en waterstanden langs het dijktraject te meten en deze te valideren met bestaande, en mogelijk later verbeterde, moedellen. Belangrijk bij dit soort validaties is dat er voldoende nauwkeurige invoer is voor het model om een validatie mogelijk te maken. Zonder juiste invoer is er geen goede validatie mogelijk. Dit is anders bij ontwerpomstandigheden, want daar worden stormcondities opgelegd, waarbij dan de golfcondities en waterstanden worden uitgerekend. Alleen meten langs het dijktraject is niet voldoende en zal waarschijnlijk niet tot een redelijke validatie leiden. Bij een met juiste gegevens gevoed model, is wel validatie mogelijk. Wat betreft het duiden van eventuele metingen bij de dijk, is een optie om metingen in een groter gebied uit te voeren.

#### *Zeespiegelstijging en bodemdaling*

Langjarig meten kan aantonen of de verwachte zeespiegelstijging inderdaad in de aangenomen mate optreedt. Vaak wordt ook aangenomen dat bodemdaling leidt tot een toename in de waterdiepte. Echter, verscheidene studies geven aan dat de Waddenzee en Eems-Dollard in principe mee kunnen groeien met de (huidige schattingen van de toekomstige) bodemdaling en zeespiegelstijging. Er is dan dus wel een hogere waterstand, maar een gelijkblijvende of minder grote waterdiepte en dus een minder grote toename in golfhoogte. Langjarig meten van de bodemdaling kan dit aantonen, zowel aan de landzijde als aan de Waddenzeezijde.

#### *Overgang naar de nieuwe norm*

Binnen het OI2014 wordt nog geen gebruik gemaakt van probabilistische kansverdelingen en daaraan gerelateerde rekenwaarden bij kritische overslagdebieten. Dit is echter wel het uiteindelijke streven. Bij een volledig probabilistische berekening speelt een specifiek overslagdebiet waarbij doorbraak optreedt, geen rol

meer, maar is onderdeel van de berekening. Dat kan betekenen dat hiermee “ruimte” wordt gecreëerd voor een langere planperiode dan 25 jaar. De in dit plan van aanpak voorgestelde activiteiten zijn niet gericht op het inwinnen van informatie ten behoeve van de verdere ontwikkelingen van het OI en WBI. Het richt zich sec op veldmetingen op het gebied van hydraulische condities, golfoverslag en mogelijk zeespiegelstijging en/of bodemdaling om onzekerheden in het Oostelijk Waddengebied en het Eems-Dollardgebied beter in kaart te brengen.

### 1.3 Doel plan van aanpak (PvA)

Dit PvA heeft als doel inzicht te geven in de samenhang tussen verschillende aspecten en projectonderdelen en beschrijft:

1. Aanleiding.
2. Hydraulische condities.
3. Golfoverslag.
4. Zeespiegelstijging en bodemdaling.
5. Meetvoorstel.
6. Projectorganisatie.

Dit PvA vindt zijn oorsprong in het Plan van Aanpak Veldmetingen Eemshaven – Delfzijl van februari 2016 (Van der Meer et al, 2016). Het PvA van februari 2016 is in opdracht van het Waterschap Noorderzijlvest en het Hoogwaterbeschermingsprogramma in samenwerking met Rijkswaterstaat opgesteld door het volgende consortium van partijen: Arcadis, Deltares, Etrometa, Infram, TU Delft, Unesco-IHE, Van der Meer Consulting.

Op basis van het PvA van 2016 heeft de programmadirectie Hoogwaterbescherming een financiële bijdrage toegezegd voor de procesinnovatie ‘Meerjarige veldmetingen Eems-Dollard’.

#### **Plan Veldmetingen ter validatie van de WTI-modellentrein**

Door vier hoogleraren van UNESCO-IHE en TU Delft is een plan geschreven “Veldmetingen - validatie van de WTI-modellentrein”. Hierin wordt bepleit om veldmetingen, zoals uitgevoerd bij Petten, door te zetten, met vooral het doel lange golven goed te kunnen modelleren en uiteindelijk modellen op te leveren, die ook de lange golven meenemen in de Hydraulische Randvoorwaarden bij het ontwerpen van waterkeringen. De keuze en locatie van meetinstrumenten zou opgezet moeten worden vanuit de modellen zelf, zodat de modellen op de juiste wijze gevalideerd kunnen worden. In onderhavig plan is hier richting aan gegeven. De samenvatting van dit plan is als bijlage 1 opgenomen.

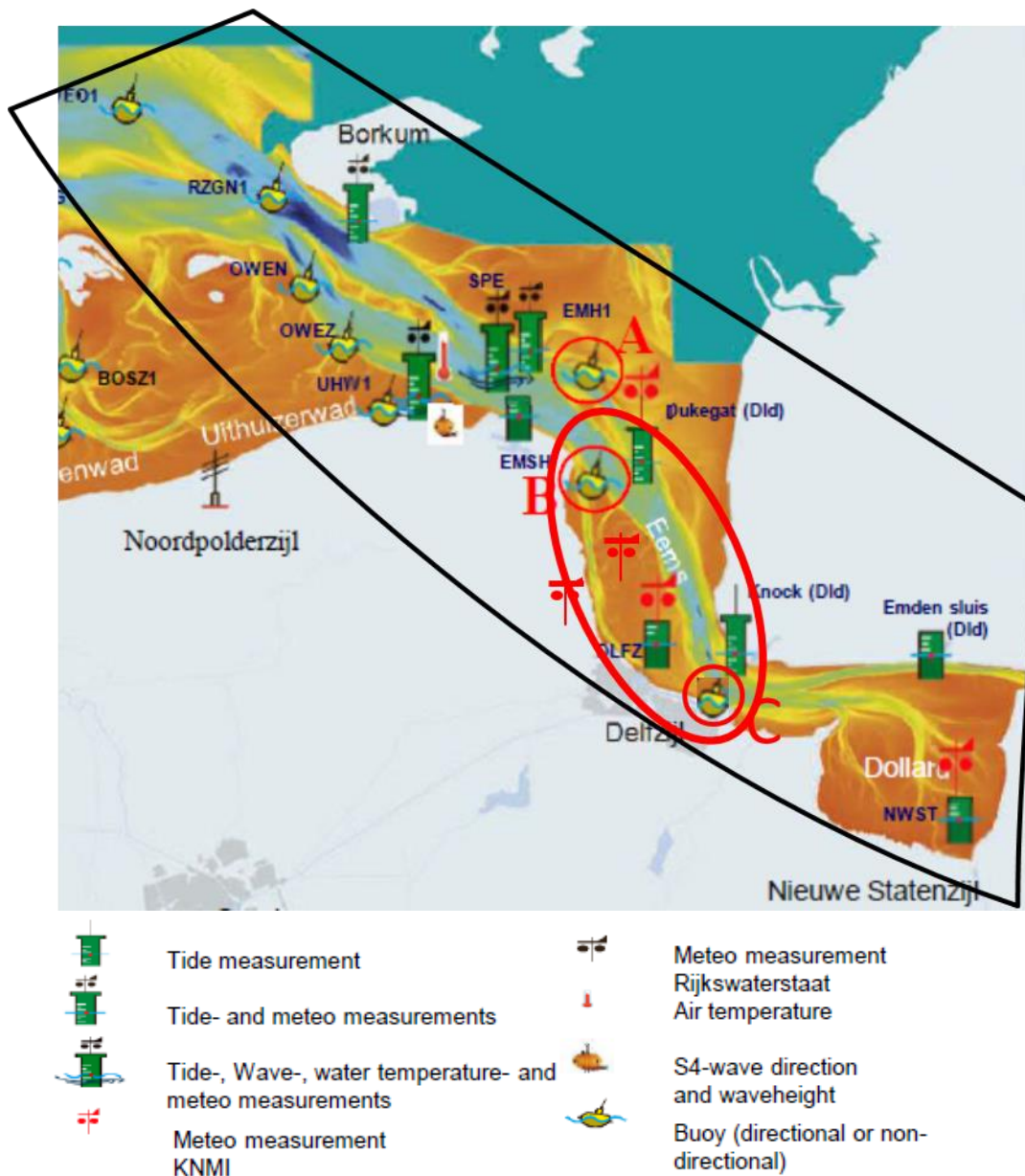


## 2 Hydraulische condities

### 2.1 Gebiedsbeschrijving en huidige veldmetingen

Ons interessegebied bestaat uit de Oostelijke Waddenzee en de Eems-Dollard, zie figuur 2.1. Deze figuur toont tevens de locaties waarop momenteel veldmetingen van de volgende grootheden verricht worden:

- Waterstanden.
- Golven (golfhoogte, golfperiode en – op sommige locaties – golfrichting).
- Stroming.
- Wind (snelheid en richting).
- Lucht- en watertemperatuur.



Figuur 2.1. Oostelijke Waddenzee en het Eems-Dollard gebied, inclusief de huidige veldmetingen. Met de rode en zwarte lijnen worden de verderop beschreven watersystemen aangegeven.

Uit figuur 2.1 blijkt dat de meetlocaties zich zowel aan de kust als op open water bevinden. Ook wordt op verreweg de meeste locaties slechts een subset van de genoemde grootheden gemeten. Bij de start van de werkzaamheden van dit plan van aanpak dient precies te worden vastgesteld wat waar wordt gemeten.

Het meten van temperatuurverschillen tussen lucht en water geeft inzicht in de warmteoverdracht tussen lucht en zee. Dit is van invloed op de ruwheid van het water, wat weer van belang is voor golfopwekking door wind. Binnen dit document zijn temperatuurmetingen verder buiten beschouwing gelaten, omdat het meten ervan – indien nodig – relatief eenvoudig gerealiseerd kan worden. Luchttemperatuur kan op een meetpaal gemeten worden, watertemperatuur zowel op een meetpaal als met een golfboei.

Er zijn vaste en mobiele meetlocaties te onderscheiden. Waterstanden, stroming, luchttemperatuur en wind worden altijd op vaste meetlocaties gemeten, meestal meetpalen. Golven en watertemperatuur kunnen zowel op vaste als mobiele locaties, zoals golfboeien, gemeten worden. Het voordeel van vaste meetlocaties is dat er meerdere grootheden op gemeten kunnen worden. Het nadeel is dat de bouw hoge kosten met zich meebrengt en bouw- en proceduretijd (vergunningen) in beslag neemt. Het voordeel van een mobiele meetlocatie (golfboeien) zijn de relatief lage kosten en het feit dat ze op basis van nieuwe inzichten eenvoudig verplaatst kunnen worden.

Een groot deel van de in figuur 2.1 getoonde meetlocaties vallen onder het LMW (Landelijk Meetnet Water). Op Nederlands grondgebied worden deze beheerd door RWS, op Duits grondgebied door de verantwoordelijke Duitse autoriteiten. De stations in de Duitse territoriale wateren betreffen station Borkum, station Emshörn, station Dukegat, station Knock en station Emden sluis. Deze stations beslaan de gehele as van de Eems-Dollard. Onderdeel van de studie is om de beschikbaarheid van bestaande data alsmede toekomstige data van deze stations na te gaan. Een van de consortiumpartners heeft voor eerdere projecten in de Eems-Dollard Duitse data gebruikt.

Een aantal van de in figuur 2.1 getoonde meetlocaties wordt door RWS gefinancierd vanuit het WBI2017 project: golfboeien WEO1, RZGN1 en WEW1, en meetpaal UHW1. Hoewel deze financiering eind 2020 afloopt, bestaat de mogelijkheid dat een aantal van deze locaties dan nog blijft bestaan, bijvoorbeeld de golfboeien vanwege hun relevantie voor de scheepvaart, zie Deltares (2015a). Uit oogpunt van continuïteit is het wenselijk dat de meetpaal UHW1 actief blijft gedurende dit project. Meetgegevens kort voor de teen van de dijk zijn van essentieel belang voor het slagen van dit project. Daarbij is de borging van data van deze bestaande stations als randvoorwaarde-golven voor onze scope voor eenvoudige toekomstige raadpleging een belangrijk aandachtspunt.

Bodemligging is een belangrijke grootheid. Bodemliggingsmetingen worden met verschillende frequenties en verschillende ruimtelijke dekkingen en verschillende financieringsbronnen uitgevoerd. In het kort komt het op het volgende neer:

- reguliere vak lodingen in het buitengebied (zeewaarts van de Waddeneilanden) → eens per drie jaar.
- reguliere vaklodingen in het binnen gebied (tussen de Waddeneilanden en het vasteland) → eens per zes jaar.
- kustlodingen, oftewel lodingen van de Jarkus raaien → jaarlijks.
- scheepvaartlodingen in de vaargeulen → minimaal eens per jaar.
- lodingen op projectbasis.

In ons interessegebied, zie figuur 2.2, vinden reguliere vak lodingen en scheepvaartlodingen plaats. Tabel 2.1 geeft het programma weer.

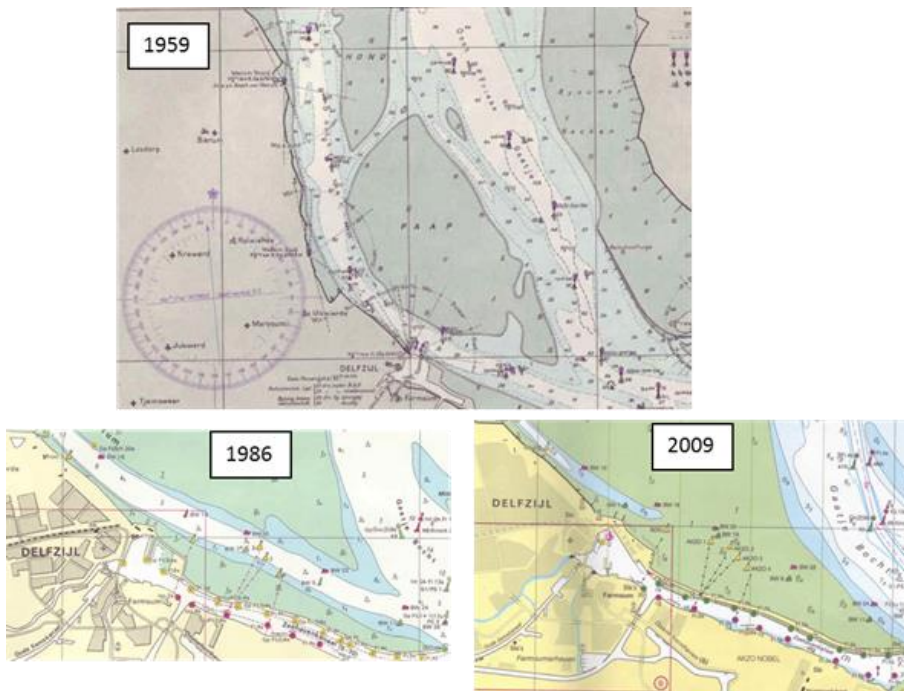


Figuur 2.2. Programma reguliere vaklodingen.

Jaartal (zomer)	Buitengebied	Binnengebied
2016	Oost. W'zee (bruin)	---
2019	Oost. W'zee (bruin)	Oost. W'zee (bruin)
2020	---	Eemsmonding (paars)

Tabel 2.1. Reguliere vak lodingen in ons interessegebied (repetierend iedere 6 jaar, dus 2022 = 2016, etc.).

Het is van belang om de ontwikkeling van de Eemsbodem op basis van huidige en toekomstige metingen verder in kaart te brengen. Historische data tonen een verzanding van de Bocht van Watum, zie figuur 2.3 (Alkyon, 2007). Deze ontwikkeling is zeer relevant gezien de beschouwde tijdspanne van 25/50 jaar. De morfologische ontwikkeling van de Eems heeft een effect op de vervorming en voortplanting van het getij, waardoor waterstanden en stroomsnelheden veranderen. Tevens beïnvloedt het de golfdoordringing en dissipatie van golfenergie vanuit de Eems naar Delfzijl via de Paap-Hond plaat. De grootte van deze effecten kunnen gekwantificeerd worden aan de hand van hydromorfologische berekeningen met een specifieke set rekenmodellen, zie (Arcadis 2015b).



Figuur 2.3. Historische ontwikkeling Bocht van Watum.

## 2.2 Huidige en mogelijk toekomstige modellering waterstand en golven

### *Nut en noodzaak van een verbeterd model instrumentarium*

Het gebruik van numerieke modellen om opgetreden situaties na te bootsen is sinds circa 1970 gangbaar. Het aan deze simulaties ten grondslag liggende model instrumentarium is sindsdien vele malen verbeterd. Een veel gehoorde redenering die gebruikt wordt om een verdere verbetering van het model instrumentarium niet uit te voeren is de volgende: *De hydraulische randvoorwaarden zijn voor wat betreft de waterstanden gebaseerd op een extrapolatie van langjarige metingen van waterstanden (voor het Eems estuarium de metingen bij*

*Delfzijl vanaf 1 maart 1881). De hydrodynamische modellen worden alleen gebruikt om deze randvoorwaarden naar andere locaties te vertalen, daarvoor zijn ze nu al voldoende nauwkeurig.*

Deze redenatie houdt stand, zolang de situatie in de Eems sinds 1881 niet zou zijn veranderd. Dit is echter wel het geval. Om deze effecten mee te nemen zijn de reeksen over deze periode gehomogeniseerd. Dat is voor het eerst gebeurd door de eerste Deltacommissie (Rapport 1960). De rapporten over de basispeilen langs de Nederlandse kust van DGW uit 1993 plaatsen hier kanttekeningen bij. Deze rapporten vormen nog steeds de basis voor de huidige HR.

Door het modelinstrumentarium verder te verbeteren, kunnen de wijzigingen in het estuarium in het verleden en het recente heden beter worden nagerekend. Daarmee kan dan de tijdreeks vanaf 1881 voor wat betreft het optreden van extremen beter worden gehomogeniseerd, waardoor tevens de betrouwbaarheid van de basispeilen en de extrapolatie naar 1 in 10.000 jaar extremen wordt verbeterd. Dat homogeniseren is nodig, vanwege alle veranderingen die er sinds 1881 in het estuarium en in de haven van Delfzijl hebben plaatsgevonden. Zie bijvoorbeeld de situatie in 1959 in figuur 2.3 waarbij er geen lange havendam is en een diepe en brede “bocht van Watum” geul. Ook de verschillende verdiepingen van de vaargeul naar Eemshaven en de bouw/gebruik van de Eemskering hebben hun invloed. In hoofdstuk 3 laat tabel 3.3 zien dat de extremen mede bepaald worden door extremen uit 1901 (plaats 3) en 1906 (plaats 4).

Er zijn nauwkeurigere voorspellingen nodig, zowel voor het heden als voor het verleden. Als voorbeeld: met een gevalideerd model instrumentarium, kan met de bathymetrie en de lay-out van 1901, de 1901 storm worden nagebootst en gevalideerd met de gemeten waterstand in 1901. Vervolgens kan dezelfde storm met de huidige bathymetrie en lay-out worden nagebootst en kan een gehomogeniseerde 1901 storm in de extreme waarden statistiek worden meegenomen. Ook de gelijktijdigheid van het optreden van hoogwater met extreme golven is van belang voor het onderzoek. Dit kan worden onderzocht met een gedetailleerd en geïntegreerd modellen instrumentarium. Een onderdeel van verder onderzoek betreft het verder uitbreiden van de tijdreeksen voor Delfzijl tot 2016. In de vigerende HR worden nog steeds de reeksen tot 1985 gebruikt.

#### *Het huidige model instrumentarium*

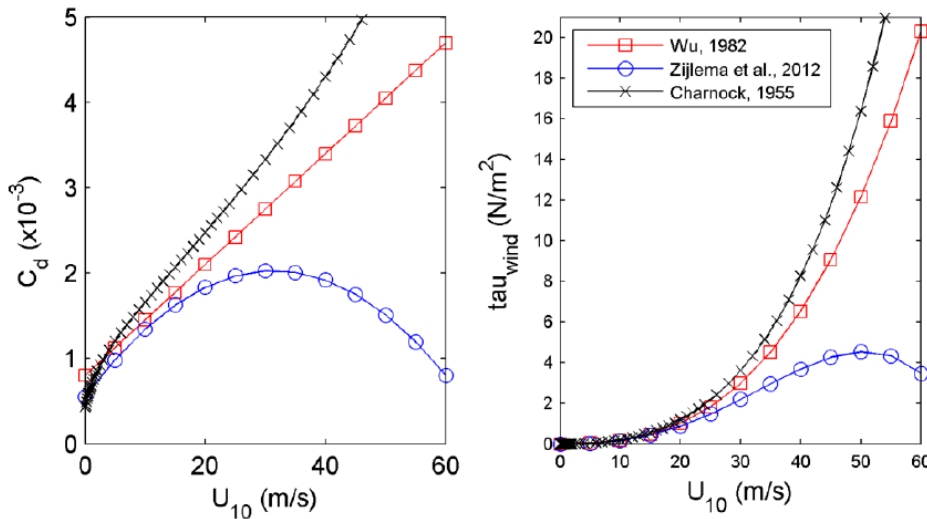
Het huidige modelinstrumentarium gebruikt strikt gescheiden modellen voor meteo (KNMI Hirlam of Harmony), waterbeweging (Waqua in Simona) en golfvoortplanting (SWAN). Er is weliswaar eenzijdige uitwisseling tussen meteo en golfvoortplanting en tussen meteo en waterbeweging. Maar tweezijdige wisselwerking ontbreekt. Er wordt gebruik gemaakt van Kalman filtertechnieken. Deze technieken zorgen voor een optimaal uitgangspunt voor de voorspellingen, maar maken het tegelijk moeilijk om een objectief oordeel over de resultaten te vellen (Arcadis 2014, 2015a, 2015b). Er zijn momenteel meerdere soorten van model(treinen) waarmee waterstanden en golven berekend kunnen worden binnen onze scope:

- Operationeel waterstandsmodel.
- WBI onderzoeksmodellen.
- HR (Hydraulische Randvoorwaarden) modeltrein.

De meeste van deze modeltreinen, in ieder geval het modelsysteem van de SVSD maakt geen gebruik van de nieuwste modelleringstechnieken, maar van het enigszins verouderde WAQUA in Simona systeem. Dat heeft een aantal nadelen. Voor de waterbeweging (Waqua in Simona) kan niet geïnteracteed worden met SWAN (er is slechts een éézijdige koppeling met SWAN). Door gebruik van een DCSM model zijn met behulp van automatische afregeling niet realistische ruweheidsvelden terecht gekomen. Het systeem maakt nog gebruik van offline nesting en de meteo velden hebben een lage resolutie in tijd en ruimte.

Een belangrijk aspect voor de stormopzet is de energieoverdracht van lucht op water. Hiervoor bestaan meerdere formules waarbij de windschuifspanningscoëfficiënt afhankelijk is van de windsnelheid.

Uit de in figuur 2.4 weergegeven curves blijkt dat voor de meerderheid van de opgetreden stormen het verschil in berekende stormopzet dus niet heel sterk zal afhangen van de gekozen parameterisatie. Als er echter wordt gekeken naar extreme stormen, zoals voor de hydraulische randvoorwaarden, dan begint deze keuze wel belangrijk te worden.



Figuur 2.4. Relatie windsnelheid op 10 m hoogte en windschuifspanning(scoëfficiënt)

Het huidige modelinstrumentarium geeft overigens uitstekende resultaten (afwijkingen van orde cm's). Echter zodra de windsnelheden toe nemen, neemt de kwaliteit van de voorspellingen af. De laatste 10 jaar is veel onderzoek hiernaar verricht en zijn in samenspraak met experts van diverse instellingen de hydro-meteo-modellen verbeterd. Het waterschap overweegt een windexpert (grenslaagmeteroloog) aan het kernteam toe te voegen.

De toepassing voor aandrijving van waterbeweging en golfvoortplantingsmodellen is een bijzaak. De behoefte voor de waterbeweging en de golfvoortplanting ligt op tijdschalen van 5 à 10 minuten en ruimte schalen van orde 100 - 1000 m in plaats van de nu gebruikelijke schalen van 1 uur en 30 km.

Op basis van actuele wind- en waterstandsmetingen en windvoorspellingen wordt sinds een aantal jaar een operationeel waterstandsmodel (WAQUA) gedraaid, dat waterstands-voorspellingen voor de komende uren/dagen geeft. Dit model is afgeregeld (gekalibreerd) op basis van langdurige tijdreeksen. Omdat het overgrote deel van deze tijdreeksen uit relatief milde (alledaagse) condities bestaat, is dit model tijdens stormen veelal minder nauwkeurig. Er bestaat ook een operationeel golvenmodel (SWAN) voor de Noordzee, maar dat omvat niet ons interessegebied. Voor de hindcast van verscheidene extreme stormen in de Waddenzee en Eems-Dollard heeft Arcadis recentelijk uitvoerig gerekend m.b.v. een hiervoor opgezette Delft3D-SWAN modellentrein met detail-meteo invoer uit WRF-NMM modellen (Arcadis 2014, 2015a, 2015b).

Binnen het WBI2017 wordt, middels veldmetingen ingewonnen, data gebruikt voor de invulling van de belangrijkste kennisleemtes op het gebied van Hydraulische Belastingen, ten behoeve van nauwkeuriger Hydraulische Randvoorwaarden (HR). Tijdens het WBI2017 onderzoek zijn er diverse hindcast studies van opgetreden stormen uitgevoerd, waarbij de geconstateerde verschillen tussen gemeten en met SWAN berekende golven en waterstanden WAQUA/Delft3D geanalyseerd worden. Deze analyses geven beter inzicht in de fysica tijdens stormomstandigheden, en dit inzicht wordt vervolgens gebruikt om rekenmodellen te verbeteren, of de onzekerheden daarin te kwantificeren en mogelijk te verkleinen. Tijdens dergelijke hindcast studies worden variaties in diverse lastig in te schatten grootheden, zoals bodemwrijving, en gecompliceerde fysische processen, zoals golfopwekking door wind en golfbreking, aangebracht om het effect

van deze variaties te onderzoeken. Dit onderzoek resulteert in andere en tijdens stormen veelal betere, resultaten dan huidige operationele modellen. Vanwege variaties is er niet sprake van één vastgesteld onderzoeksmodel. Binnen het WBI2017 is tevens een aantal hindcast studies naar golven en waterstanden in de Oostelijke Waddenzee uitgevoerd.

In 2011 zijn met WAQUA en SWAN nieuwe Hydraulische Randvoorwaarden (HR) bepaald, zie Deltares (2011). Dit zijn de waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting die, voor de meest waarschijnlijke combinatie van windsnelheid, windrichting en waterstand (het illustratiepunt, te berekenen met Hydra-K), tot de minimale vereiste kruinhoogte leiden voor de beschouwde oeverlocatie. Met de per 1 januari 2017 ingevoerde nieuwe normering zijn per uitvoerlocatie nieuwe hydraulische randvoorwaarden van kracht.

#### *Toekomstige modellering systemen*

Toekomstige modellering systemen maken gebruik van een flexible mesh modelleringsysteem voor golven, meteo, waterbeweging en sedimenttransport. De gehele modellering van alle onderdelen zal plaatsvinden op één locatie (dus geen aparte meteo). Er zal frequente (bijvoorbeeld elke 10 minuten) interactie zijn tussen alle onderdelen van het systeem (meteo, golven en waterstanden) en de gehele trein zal elk uur opnieuw worden opgestart met de meest recente weersvoorspellingen (verschillende systemen draaien tegelijkertijd). Alle modellen zijn genest in wereldmodellen en ontvangen hun randvoorwaarden van omhullende wereld omvattende modellen. Op deze wijze worden ook grootschalige langperiodieke verschijnselen (bijvoorbeeld de warme golfstroom) automatisch in het systeem meegenomen. Om de uitwisseling efficiënt te doen verlopen, zal ook het meteo model in het systeem meedraaien.

De Flexible Mesh modellen maken gebruik van een resolutie die toeneemt naar de kust toe en bijvoorbeeld in de Eems Dollard ook de kleinste geultjes nog kan meenemen, terwijl tegelijk rondom Engeland en op dieper water met zeer grove resoluties wordt gewerkt. Dus maaswijdten variërend van enkele kilometers tot enkele meters.

Belangrijk hierbij is dat het golfvoortplantingsmodel op hetzelfde rooster rekent als het waterbeweging model en het meteo model. Ook het spectrale golfvoortplantingsmodel rekent instationair. Essentiële punten van aandacht zijn het gedrag van de wind tijdens een zware storm in een gebied als de Oostelijke Waddenzee en het Eems/ Dollard estuarium. De overdracht van energie op de grenslaag van lucht en water vraagt nader onderzoek. Welk gedeelte van deze energie komt ten goede aan golfgroei en welk deel aan de waterbeweging. Is er een maximum aan de overdracht? Er zijn theorieën die zeggen dat bij hoge windsnelheden veel potentiële energie gaat zitten in het boven het wateroppervlak houden van waterdruppels. Als gevolg daarvan zal er minder energie overblijven om de golven dan wel het water aan te drijven.

De interactie tussen waterbeweging en golfvoortplanting is niet alleen van belang voor de golven, maar ook voor de waterstanden (Arcadis 2014, 2015a). Brekende golven en Stokes drift zorgt voor extra opzet, juist in gebieden als het Eems estuarium. Mogelijk hebben de extreme waterstanden ook weer hun invloed op de meteo (ruwheidsveld en land water grens) en daarnaast heeft opgewerveld sediment (zand en fijn slib) een turbulentie dempende werking op de waterbeweging. Er vindt immers steeds meer energievernietiging plaats naarmate er meer sediment wordt opgewoeld. Dit is echter lastig meetbaar in het veld. Verschijnselen als El Nino, maar ook de verschillen van jaar tot jaar zitten niet in onze modellen, terwijl het effect van El Nino en de jaarverschillen wel degelijk merkbaar is in de kracht van de golfstroom over de Noord-Atlantische oceaan. Deze effecten zijn bij nesting in een wereld model goed mee te nemen.

Als eerste stap op weg naar een dergelijk modellering systeem is het van belang gebruik te maken van: Delft3D Flexible Mesh, voorlopig in 2D, met SWAN in-stationair op een vergelijkbaar rooster en idem WRF NMM meteo modellen op soortgelijke resolutie. Dat betekent al een flinke stap voorwaarts in het model instrumentarium.

Ensemble modellering zal eveneens een steeds belangrijkere rol gaan spelen. Dat doet het nu al in de grootschalige weersvoorspelling, maar zal op termijn ook steeds meer een rol gaan spelen in de modellentrein. De rekenkracht vormt naarmate de tijd voortschrijdt steeds minder een probleem.

Deze modelontwikkeling is geen onderdeel van het huidige plan van aanpak voor veldmetingen. Dat zal in een ander en veel breder kader opgepakt moeten worden. Het streven is wel om voor validatie van gemeten stormen steeds de laatste stand van de techniek te betrekken, echter deze worden binnen binnen het meetplan niet zelf ontwikkeld. Een optie is om de eerste stappen op weg naar een dergelijk toekomstbeeld binnen dit project te realiseren. Het betreft bijvoorbeeld het opzetten en valideren van een 2D Flexible Mesh modelinstrumentarium, gekoppeld met SWAN en WRF NMM modellen op gelijksoortige roosters. Mogelijk kunnen promovendi hier een rol in spelen.

## 2.3 Validatie voorgekomen extreme stormen – waterstand (samenvatting)

### *Het rekenexperiment eerste deel*

Binnen het eerste deel van het rekenexperiment (Arcadis 2014) zijn testen gedaan voor de Sinterklaas storm van 2013. Daaruit zijn de volgende aspecten met betrekking tot het modelinstrumentarium naar voren gekomen:

1. Drie dimensionaal rekenen heeft momenteel nog geen meerwaarde voor het Eems-estuarium. Er is nauwelijks stratificatie in de Eems en het is voldoende om zout en temperatuur mee te nemen in een Equation of State achtige benadering en in de randvoorwaarden. Bij Kornwerderzand en Den Oever zou stratificatie wel een rol kunnen spelen, maar tijdens stormen wordt er niet gespuid.
2. Meer resolutie in tijd en ruimte heeft meerwaarde. Interactie tijden van orde 10 minuten tussen waterbeweging golfvoortplanting en meteorologie lijken op dit moment de juiste resolutie in de tijd te geven.
3. Tweezijdige interactie tussen golven en waterbeweging hebben nadrukkelijk effect.
4. Kalman filtering dient niet te worden toegepast voor validatie.
5. De wind is de zwakste schakel in de modellentrein.
6. Er is nog geen eenduidige conclusie over de meerwaarde van een afbuigende relatie tussen windsnelheid en oppervlakteschuifspanning.

### *Het rekenexperiment tweede deel (concept)*

In het tweede deel van het rekenexperiment (Arcadis, 2015a) zijn testen uitgevoerd voor een viertal stormen in het Eems Dollard estuarium. Daaruit komen de volgende aspecten voor het modelinstrumentarium naar voren:

1. De wind- en drukvelden zijn opnieuw de zwakste schakel in het modellen instrumentarium.
2. Er is een gedegen integrale meetcampagne nodig voor een verdere validatie van het modelinstrumentarium. Vooral de windmetingen boven zee zijn gebrekkig en onvoldoende ruimtelijk beschikbaar.
3. Het verdient aanbeveling zowel de golven als de waterbeweging als de meteo modellen te nesten in grootschalige omhullende modellen (NOAA / wereld modellen voor waterbeweging).
4. Gebruik de nieuwe Flexible Mesh techniek om één model te maken van Oceaan tot Eems.

### *Het valideren van het toekomstige modelleringssysteem*

Om het toekomstige modellenstelsel degelijk te kunnen valideren, zijn metingen nodig. Zowel bij rustig weer als bij extremen. Een eerste aanzet daartoe is gegeven in de rapporten over het rekenexperiment (Arcadis 2014, 2015a). Echter het betreft slechts een eerste aanzet, gebaseerd op vier stormen met een duidelijk tekort aan meetgegevens. Wel is gebleken dat juist het Eems-estuarium zich bij uitstek leent voor de validatie van de meest complexe situaties.

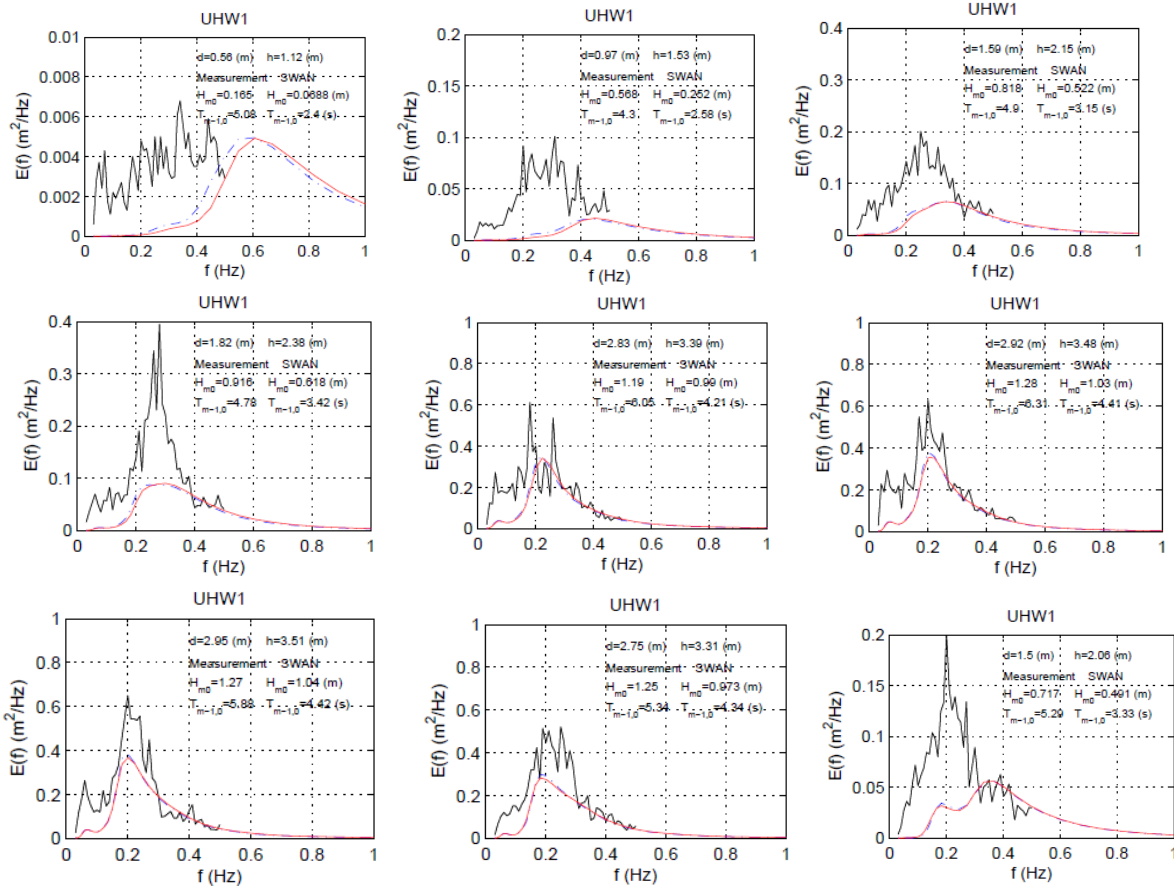
Voor de validatie is het van belang alle onderdelen van het systeem te valideren. Juist daarvoor is een integrale en simultane benadering vereist. Het is niet voldoende om alleen de waterstanden of de golven te meten: het gaat om de gelijktijdigheid van metingen van wind, druk, waterstanden, golven, stromingen en sediment in combinatie met temperatuur (lucht en water) en saliniteit die de complexe fysica van het systeem bepalen. En niet alleen zijn deze metingen gelijktijdig nodig, maar ook bij voorkeur in de tijd met een tijdstap van orde 5 á 10 minuten. Dat begint met de wind- en de drukvelden, de zwakste schakel in de huidige modellering. De wind en drukvelden moeten in meer detail worden getuned op de heersende condities, met name in het zo complexe Eems-Dollard estuarium. Het is aan te bevelen meer aandacht te schenken aan de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de meteo modellen in een integrale benadering.

De waterstand vormt een van de belangrijkste bijdragen in de Hydraulische Randvoorwaarden, waarmee onze dijken worden ontworpen. De onzekerheid (onbetrouwbaarheid van de voorspellingen) speelt daarin een rol, die leidt tot mogelijk te conservatieve inschatting van de benodigde kruinhoogte. Dit werkt door in de onzekerheid ten aanzien van golfhoogten, al zijn de golven aan de teen van de dijk in het Eems estuarium, zelfs tijdens een superstorm vaak sterk waterdiepte gelimiteerd.

#### 2.4 Stand van zaken validatie golven bij de dijk

Voor de relatief eenvoudige situatie van min of meer loodrechte golfaanval met een zandbank parallel aan een rechte kustlijn is er in de periode 1995 – 2013 op de aan de Hollandse kust gelegen Petten meetsite een schat aan golfdata vlak voor de dijk (en golfoploop- en overslagdata op de dijk) ingewonnen, zie Wenneker et al. (2016).

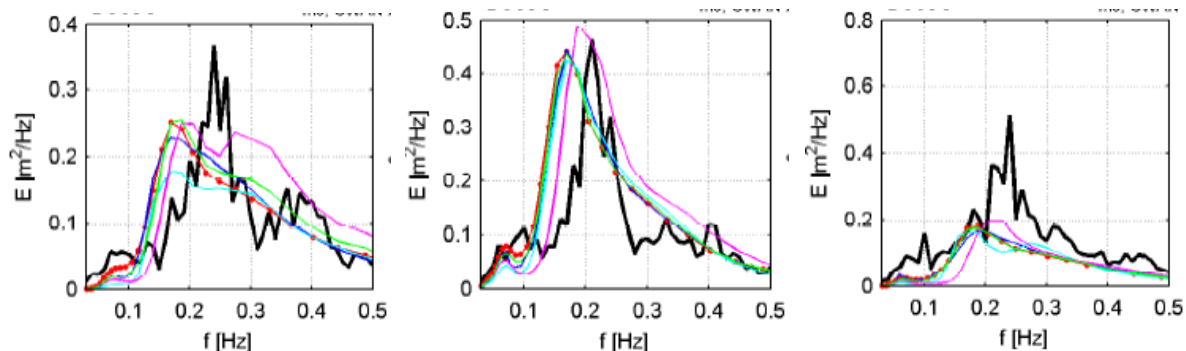
De Waddenzee is qua modellering van golven en waterstanden een veel complexer gebied dan de Hollandse kust. Dit is een gevolg van de aanwezigheid van eilanden, diepe getijgeulen daartussen en ondiepe platen daarachter. In WBI kader zijn vele hindcast studies voor waterstand en golven uitgevoerd. De meeste waren gericht op het Amelanders Zeegat, maar in enkele studies is ook de Oostelijke Waddenzee beschouwd. De resultaten daarvan, voor zover het golven bij de dijk betreft, beschrijven we hieronder kort.



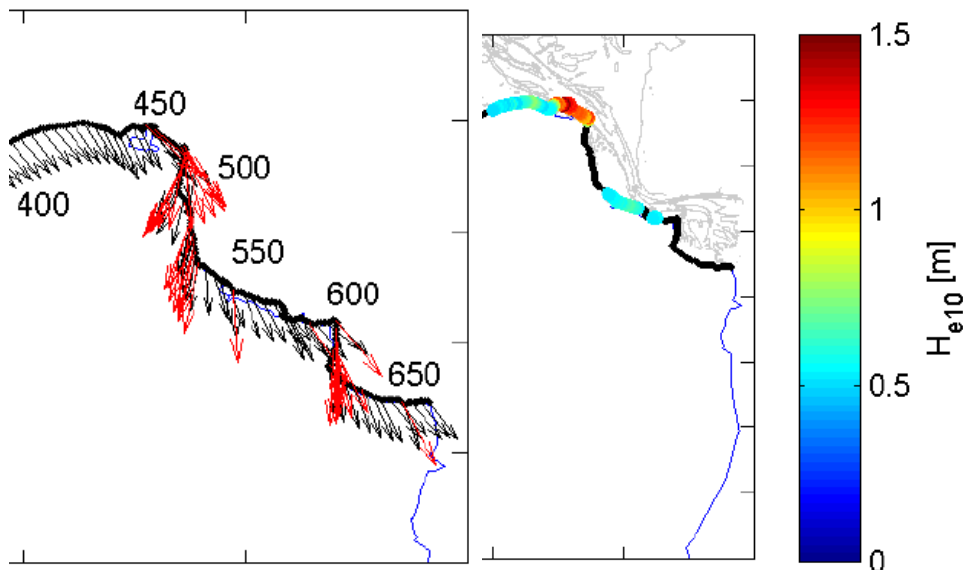
Figuur 2.5. Gemeten (zwart) en berekende golfspectra (rood, blauw) in Uithuizerwad tijdens de november 2007 storm. Figuren afkomstig uit Alkyon (2008).

Alkyon (2008) beschrijft een hindcast studie (SWAN en Delft3D) van de allerheiligenstorm (9 november 2007). Deze studie geeft aan dat, met de toen vigerende SWAN versie en modelinstellingen, de golven in de Oostelijke Waddenzee voornamelijk door de wind lokaal opgewekt zijn. Uit veldmetingen blijkt daarnaast dat laagfrequente golven ( $< 0.1$  Hz) afkomstig van de Noordzee de kust bereiken. Nabij de kust onderschat SWAN zowel de golfhoogte ( $H_{m0}$ ) als de golfperiode ( $T_{m-1,0}$ ) op forse wijze: met tientallen procenten. Ter illustratie hiervan zie figuur 2.5, enkele figuren voor Uithuizerwad (UHW1 in figuur 2.1).

Deltares (2014a) beschrijft een hindcast studie (SWAN en Delft3D) van de Sinterklaasstorm (5-6 december 2013). Tijdens deze storm was de waterstand aan de noordkant van de Groningse kust relatief laag, waardoor er maar relatief weinig laagfrequente energie de kust bereikte. Ter illustratie geeft figuur 2.6 enkele figuren uit Deltares (2015a) voor Uithuizerwad. Hierbij valt op dat de waterstand in de Eems-Dollard tijdens deze storm zeer hoog was, zie ook de groene lijn in figuur 2.8.



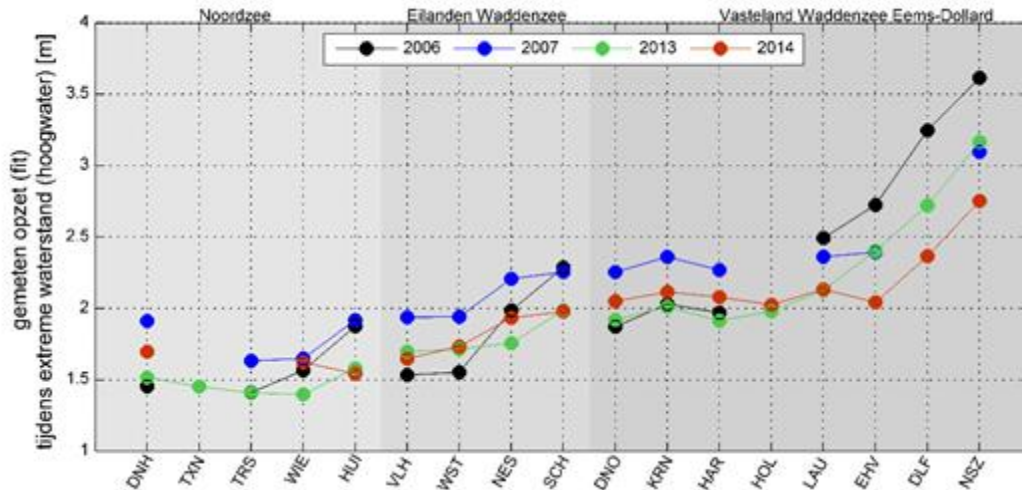
Figuur 2.6. Gemeten (zwart) en berekende golfspectra (overige kleuren) in Uithuizerwad tijdens de Sinterklaasstorm. Figuren afkomstig uit Deltares (2014a).



Figuur 2.7. Links: Golfrichting voor de illustratiepunten (HR). Rode pijlen geven aan dat de hoek tussen golfrichting en dijknormaal groter dan  $75^\circ$  is. Rechts: Laagfrequente ( $< 0.1$  Hz) golfhoogte  $H_{e10}$  voor extreme stormen met een windsnelheid van 35 m/s. Alleen punten met  $H_{e10} > 0.5$  m zijn met een kleur weergegeven. Figuren afkomstig uit Deltares (2015b).

Deltares (2015b) is een andere vermeldenswaardige studie. Op basis van metingen nabij de dijk is de nauwkeurigheid van SWAN voor de berekening van golfrichting en richtingsverspreiding bepaald. Daarnaast is, op basis hiervan en van een aantal berekeningen voor extreme stormen met een herhalingsperiode van orde 4000 jaar, ingeschat wat de resulterende onzekerheid in kruinhoogte van de dijk is. Daaruit blijkt dat deze onzekerheid groter is naarmate: (i) de golven scheef op de dijk invallen en (ii) er meer laagfrequente golfenergie aanwezig is. Een indicatie voor de dan optredende maximale fout (onzekerheid) in de benodigde kruinhoogte is plus of min 35 – 70 centimeter. Figuur 2.7 toont dat de golven op de dijk tussen Eemshaven en Delfzijl dan zeer scheef invallen, terwijl de laagfrequente golfhoogte lager dan 0.5 m is. Op basis van de nieuwe HR kan deze onzekerheid preciezer gekwantificeerd worden.

Door het ontbreken van golfmetingen in de eigenlijke Eems kunnen we eigenlijk nog niet veel zeggen over de golven tussen Eemshaven en Delfzijl. Toekomstige data uit de voorgestelde locaties (zie locaties 'A', 'B' en 'C' in figuur 2.9) zullen hierin voorzien. De data uit de voorgestelde locaties in de Eemsmonding ('A' en 'B') dienen dan vergeleken te worden met data van de huidige stations (RZGN1, UHW1, SPE) zodat vastgesteld kan worden hoe de golfdoordringing vanuit de Oostelijke Waddenzee in de Eemsmond verloopt. Een optie is om een golfboei (of ADCP series) net noordelijk van de havenmond van Delfzijl ('C') te plaatsen zodat een beeld kan worden gevormd hoe de golfhoogte/golfrichting/golfperiode langs de kust tussen Eemshaven en Delfzijl verloopt. Bovendien kunnen deze gegevens duidelijk maken wat de bijdrage is van de golfopzet aan de totale waterstand-opzet te Delfzijl tijdens stormen, zie figuur 2.8. In de huidige modellen bestaan namelijk aanzienlijke afwijkingen tussen gemeten en gemodelleerde extreme waterstanden tijdens stormcondities. Dit is ook relevant voor de golfoverslag-modellering aangezien het hier gaat om een randvoorwaarde.



Figuur 2.8. Gemeten waterstand opzet voor een viertal stormen voor verscheidene stations in de Waddenzee en Eems-Dollard (Arcadis, 2015a).

## 2.5 Meetvoorstel in oostelijke Waddenzee en Eems-Dollard

Voor wat betreft de modellering en validatie van de hydraulische condities (waterstand en stroming, golven, golfoploop en golfoverslag) onderscheiden we binnen dit Plan van Aanpak twee watersystemen:

1. Oostelijke Waddenzee en het Eems-Dollard gebied ('globale systeem').
2. Bocht van Watum en in het bijzonder de dijk tussen Eemshaven en Delfzijl ('lokale systeem').

Figuur 2.1 geeft ruwweg de grenzen van beide watersystemen aan. Het globale systeem is identiek aan ons interessegebied, terwijl het lokale systeem een subsysteem van het eerste is. Voor toekomstige validatie en modelverbeteringen, waar dit Plan van Aanpak een voorzet voor geeft, zijn veldmetingen noodzakelijk. Eerst beschouwen we het globale systeem, vervolgens het lokale systeem.

### 2.5.1 Globale systeem

Toekomstige hindcast studies en modelverbeteringen voor het globale systeem behelzen met name de berekening van waterstanden, golven en wind. Concreet gaat het om:

- Waterbeweging (waterstanden en stromingen) aangedreven door het getij, de wind en dichtheidsverschillen.
- Wind, inclusief de ruimtelijke variaties mede als gevolg van overgangen (land-zee en zee-land).
- Golfvoortplanting van de diepe Noordzee door het Eemsgebied en lokale golfopwekking door wind.

Bij hindcast studies worden in de regel alle veldmetingen meegenomen; hetzij om als input of randvoorwaarden het model mee aan te sturen (wind, en waterstanden en golven op de Noordzee) hetzij om naast de berekende modelresultaten te leggen. Dat betekent dat deze grootheden op diverse locaties gemeten moeten worden om een voldoende goede ruimtelijke dekking te krijgen.

Voor de bepaling van 'zinnige' meetlocaties is een aantal zaken van belang. Allereerst is het van belang om te realiseren dat de meest interessante stormsituaties optreden bij noorder- of noordwesterstormen. Dan zal de wind de waterstand in het Eems-Dollard estuarium opstuwten. Ook zijn bij deze windrichtingen de golven het hoogst. Ten tweede is het vanuit oogpunt van kosten en logistiek aan te raden om zoveel mogelijk gebruik te maken van bestaande meetlocaties. Op basis van bovenstaande overwegingen overwegen wij een uitbreiding van de bestaande situatie, zie ook figuur 2.9:

### 1. Behoud van de huidige meetlocaties

Ten aanzien van de huidige meetlocaties merken wij op dat er, voor zover bekend, geen plannen zijn om de huidige vaste meetlocaties (zowel de Nederlandse als de Duitse) weg te halen. Behoud van Uithuizerwad (UHW1) is nog onzeker. Deze is echter van belang in het voorliggende plan, omdat wordt voorgesteld hier ook golfoverslag op de dijk te meten. Inmiddels is bekend dat WBI in ieder geval doorgaat met meten tot 2020. Er bestaat de mogelijkheid dat een aantal boeien zal verdwijnen. Het effect daarvan op de hier benodigde vervolgstudies zal te zijner tijd bekeken moeten worden. Overigens kunnen boeien die overbodig raken ook in ons lokale gebied worden ingezet, zie punt 4.

### 2. Uitbreiding van twee of drie meetpalen (Dukegat en DLFZ (Delfzijl), NWST (Nieuwe Statenzijl)) met windsensoren

Nauwkeurige windvelden zijn van groot belang, omdat deze zowel de waterstanden als de golven in grote mate bepalen. Omdat windsnelheden met name op overgangen (zee-land en land-zee) grote gradiënten kunnen vertonen, voorzien wij extra windmeetpunten. Op dergelijke punten wordt zowel de windsnelheid als de windrichting gemeten. De eerste voorgestelde uitbreiding (op meetpaal Dukegat) achten wij nodig omdat de windmetingen op de Eemshaven meetpaal (SPE) en Emshörn (EMH1) beïnvloed kunnen worden door de zee-land overgang bij Eemshaven. Dukegat bevindt zich aan de ingang (vanuit zee gezien) van de Eems-Dollard. De aldaar gemeten (noorden)wind is representatief voor de wind die de opstuwing in de Eems-Dollard bepaalt. De tweede voorgestelde uitbreiding, in de buurt van Delfzijl, achten wij nodig om inzicht te krijgen in het verloop van het windveld over dit deel van de Eems. In dit meetpunt zal de invloed van de zee-land overgang duidelijk aanwezig zijn. Hierbij is het tevens nodig om de huidige beschikbaarheid van metingen goed in kaart te brengen (o.a. data van Duitse stations Emshorn, Borkum, Dukegat, Knock) om een compleet beeld van de hydrodynamica van de Eems te verkrijgen. Een optie is om ook op meetpaal NWST (Nieuwe Statenzijl) in de Dollard een windmeting uit te voeren. Het windveld daar zal, in tegenstelling tot dat bij Delfzijl, sterk beïnvloed zijn door het feit dat de wind een groot stuk over (Duits) vasteland is gegaan.

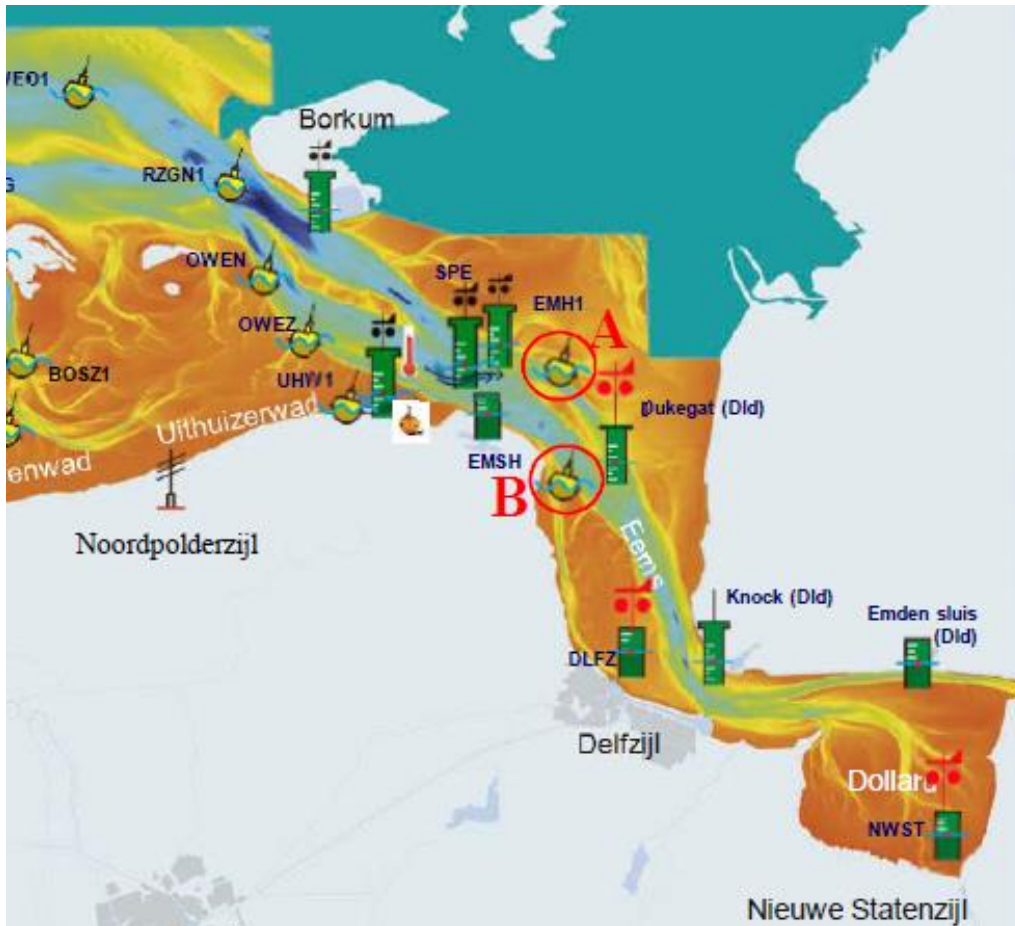
### 3. Twee nieuwe meetpalen met windsensoren

Installatie van twee meetpalen met windsensoren waarbij eentje geplaatst wordt halverwege de lijn Eemshaven-Delfzijl op de plaat 'Paap-Hond' en eentje in de lijn loodrecht hierop, gelegen op het land. Dit biedt de mogelijkheid om vast te stellen hoe de land-zee overgang de windsnelheid en windrichting beïnvloedt. Daarmee wordt ook duidelijk in hoeverre in algemene zin data van landstations (bijvoorbeeld ook station te Nieuw Beerta) bruikbaar zijn als input voor waterstand- en golfmodellering en voor het vergelijken met meteorologische uitvoer van atmosferische modellen.

### 4. Drie extra directionele golfboeien in het Eems gebied

Ten behoeve van SWAN-validatie in de Eems en het leveren van golfrandvoorwaarden voor het lokale systeem (zie de volgende sectie) stellen we voor om twee directionele golfboeien te plaatsen in het Eems gebied. De eerste boei (A) is bedoeld om golfgegevens te krijgen vóóordat ze de geul oversteken. De tweede boei (B) is bedoeld om golfgegevens te krijgen aan het begin van de plaat. Dit geeft inzicht in de golfvoortplanting over de geul. Bovendien levert (B) golfrandvoorwaarden voor het lokale systeem. Een derde boei in de omgeving van Delfzijl is nodig om golfinformatie voor dit deel van de Eems te verkrijgen, ter vergelijking met de meer noordelijk gelegen boeien. Figuur 2.9 geeft deze niet weer, figuur 2.1 wel.

Tot slot vermelden we dat metingen van golven, wind en waterstanden in het lokale systeem ook meegenomen zullen worden in studies naar het globale systeem. Met andere woorden: meetpunten in het lokale systeem zijn ten behoeve van zowel het lokale als het globale systeem.



Figuur 2.9. Huidige meetlocaties en – in rood – de voorgestelde nieuwe locaties.

### 2.5.2 Lokale systeem

Paragraaf 3.2 geeft het voorstel om op drie locaties langs de dijk Eemshaven-Delfzijl op Hydra-uitvoerpunten een meetpaal in te richten ten behoeve van de golfoverslagmetingen (locaties 1, 2 en 3 in figuur 3.3). De op deze locaties ingewonnen data wordt ook gebruikt ten behoeve van de modellering van waterstanden en golven. Deze meetpalen hebben dus een tweeledig doel. Ten behoeve van zowel de validatie van waterstanden/golven als golfoverslag is het van belang om daarop waterstand en golven (hoogte, periode, richting) te meten. Ten behoeve van golfoverslag dienen uit de golfmetingen de inkomende golfcomponenten gehaald te worden. Ten behoeve van waterstand/golfmodellering is het wenselijk om de meetpalen uit te rusten met windmetingen.

De locaties uit figuur 3.3 zijn ook ten behoeve van waterstand/golfmodellering geschikt: ze zijn ruimtelijk goed verdeeld. De meest noordelijke locatie (locatie 3) ligt nog redelijk dichtbij de geul en vlak om de bocht, en daar zal de invloed van de Waddenzee (denk aan lange golven) nog het meest aanwezig zijn. Locatie 1 krijgt minder scheve golfaanval, terwijl ook de golfhoogte aldaar veelal iets groter is dan in de andere locaties (zie tabel 3.1). Gebruik van data van locatie 2 geeft inzicht in het verloop van waterstanden en golven tussen locaties 1 en 3.

## 3 Golfverslag

### 3.1 Inleiding

Paragraaf 1.2 geeft aan dat het zinvol is om de onzekerheid in de golfverslagformule en de onzekerheid bij (zeer) scheve golfaanval door middel van metingen vast te stellen.

Tot nu toe is veel aan veldmetingen gedaan met betrekking tot hydraulische condities, zodat de ontwikkelde numerieke modellen gevalideerd kunnen worden. Overigens worden er ook voor andere doeleinden metingen op de Nederlandse wateren uitgevoerd, zoals bijvoorbeeld de scheepvaart. Voor golfverslag zijn veel minder metingen uitgevoerd, omdat daar fysische modellering in golfgoten en golfbassins de hoofdrol spelen. Alleen in het Europees onderzoek CLASH en later ook bij Petten, zijn golfverslagmetingen uitgevoerd, met als hoofddoel het vaststellen van eventuele schaaffecten. En deze zijn met name voor ruwe en doorlatende afdekkingen (golfbrekers en breuksteentaluds) ook vastgesteld.

Voor de dijkverbetering Eemshaven-Delfzijl gaat het om een specifieke locatie en de golfaanval voor de meeste dijkvakken is ook specifiek, namelijk (zeer) scheef invallend. De eerste vraag is dan: Waar zou het beste gemeten kunnen worden? De tweede vraag is: Hoe en wat zou gemeten moeten worden? Dit hoofdstuk gaat in op beide vragen.

### 3.2 Locaties voor overslagmetingen

Op meerdere plaatsen golfverslag meten, heeft alleen zin als de lokale omstandigheden verschillend zijn. Dit verschil kan betrekking hebben op de golfcondities zelf, hogere of lagere golven, op de doorsnede van de dijk (berm, taludhellingen) en op de hoek van golfaanval.

Het dijktraject ligt redelijk noord-zuid, met alleen het meest zuidelijk dijktraject nabij Delfzijl wat meer van het noordwesten naar het zuidoosten loopt. Het bovenste deel krijgt alleen golfaanval als de golven ten oosten van het Noorden komen. Bij Delfzijl kunnen de golven meer uit de noordwestelijke hoek komen.

Het heeft geen zin om golfverslag te meten voor verschillende locaties als de te verwachten golfhoogte niet veel verschilt en de hoek van golfaanval ook niet. Er wordt dan dubbel gemeten en het is interessanter twee locaties te kiezen die van elkaar verschillen. Dit zelfde geldt ook voor golfmetingen vlak voor de dijk. De golfhoogte die jaarlijks of 10-jaarlijks op kan treden, varieert niet veel van noord naar zuid langs het traject. Alleen het meest zuidelijk dijktraject nabij Delfzijl krijgt hogere golven. Figuur 3.1 geeft de dijkstrekking met daarop enkele raaien. Onderstaand in tabel 3.1 een overzicht van golfhoogten en indien beschikbaar, golfrichtingen. Tussen de jaarlijkse conditie en de 1x/10 jaar condities zit ongeveer 1 m in waterstand. De golfhoogten zijn relatief klein, variëren niet veel langs de dijk en de hoek van golfaanval is vanuit het noorden.

Locatie	Orientatie (°N)	Frequentie (1/... p/j)			Frequentie (1/... p/j)			Frequentie (1/... p/j)	
		1	10	4000	1	10	4000	10	4000
			Golfhoogte Hs (m)			Waterstand (m NAP)		Hoek van golfaanval (° N)	
Raai 6	90	~0.4	0.58	1.53	3.05	4.00	5.24	14	28
Raai 41	76	~0.4	0.69	1.46	3.10	4.12	5.84	354	358
Raai 61	75	~0.5	0.67	1.54	3.15	4.20	5.74	5	13
Raai 86	92	~0.5	0.74	1.67	3.20	4.35	5.85	2	9
Raai 106	52	~0.6	1.20	2.35	3.25	4.37	6.27	340	338

Tabel 3.1. Overzicht van golfhoogten, waterstanden en golfrichtingen voor 6 raaien.



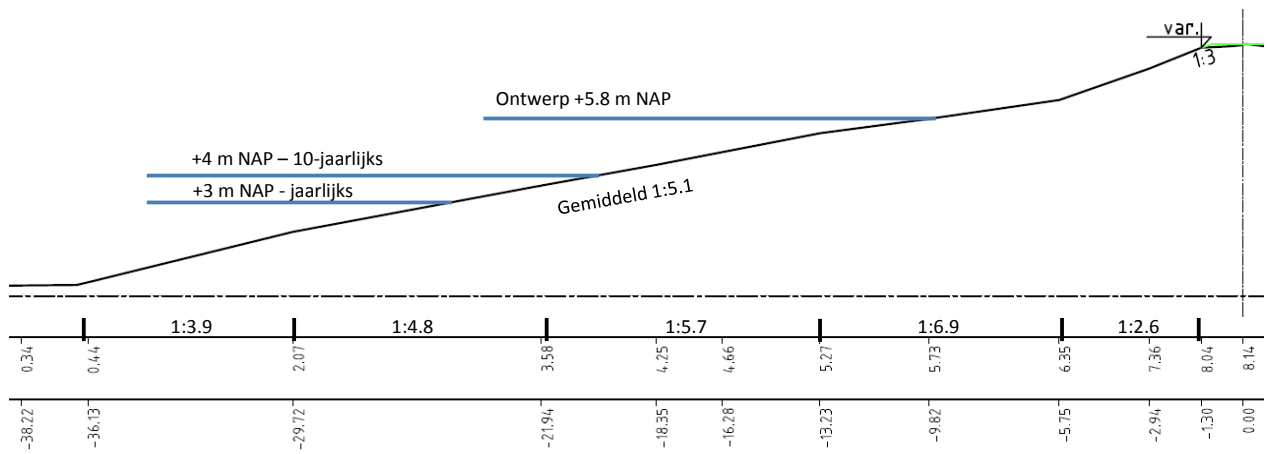
Figuur 3.1. Dijkstrekking Eemshaven-Delfzijl met 6 raaien.

Over het grootste deel van de dijkstrekking is scheve tot zeer scheve golfaanval te verwachten. Bij Delfzijl is dit net iets minder scheef. Tussen raaien 86 en 106, bij de overgang naar km 29, zit een stukje dijk wat vrijwel loodrechte golfaanval heeft. Bij deze hoek zou dus overslag bij loodrechte golfaanval kunnen worden gemeten en net om de hoek onder ongeveer  $45^\circ$ . Als deze twee locaties dicht bij elkaar geplaatst kunnen worden, dan is waarschijnlijk één locatie voldoende om de hydraulische en andere meteocondities te meten. Bij de definitieve vaststelling moet worden gekeken of de golfcondities op dit punt vergelijkbaar zijn met die aan het zuidende (nabij het Eemshotel). Als daar een redelijk groot verschil in zit, dan is het aantrekkelijker om loodrecht bij de hoek van km 29 te meten en onder een hoek bij het Eemshotel.

Op de noordelijker strekking komen eigenlijk alleen scheve golven aan. Gekozen zou kunnen worden voor het uiterste noorden (raai 6) met zeer scheve golfaanval en meer in het midden (rondom raaien 41 en 61) met een iets minder scheve hoek. Bij elk van deze locaties zouden ook hydraulische en andere meteo condities gemeten moeten worden. Bij raai 41 (locatie Dubbele Dijk) speelt de vraag of de harde dijkbekleding daar moet worden opgetrokken. Optie is om daarom op deze locatie te meten.

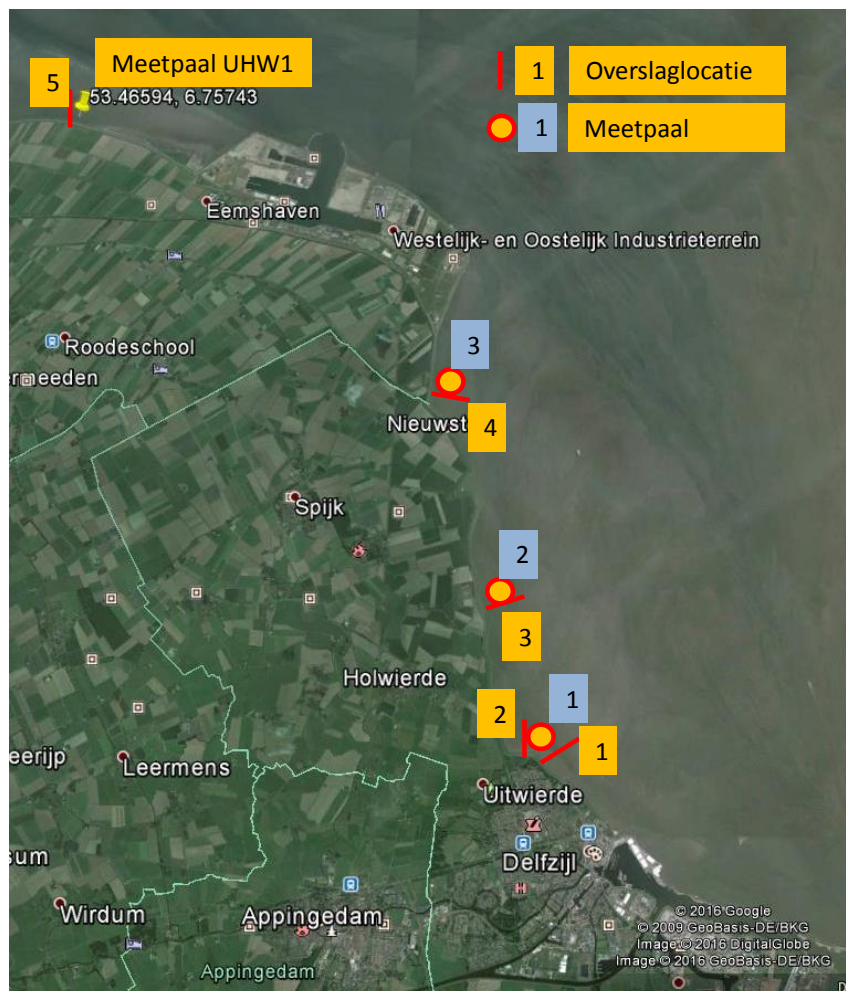
Samengevat komen we dan op 3 of 4 locaties om golfoverslag te meten, waarbij de hoek van golfaanval globaal loopt van loodrecht tot bijna langsgolven. Hierbij zijn 3 meetpunten nodig op de HYDRA-uitvoerpunten voor de hydraulische en andere meteo condities. Deze 3 meetpunten zijn ook voldoende om aan te geven of langs het traject de condities inderdaad vrijwel gelijk zijn met een lichte toename bij Delfzijl.

Een andere reden om de meetlocaties te kiezen, is op grond van verschil in dijkdoorsnede. De geometrie van de dijk heeft invloed op de golfoverslag. Figuur 3.2 geeft de doorsnede die min of meer voor het hele traject geldt.



Figuur 3.2. Doorsnede voor raai 41 met gemiddelde taluds en mogelijke waterstanden.

Het talud van de 6 dijkdoorsneden zit gemiddeld tussen 1:5.0 en 1:5.8. Het loopt een beetje gebogen met bij de teen een talud van ongeveer 1:4 en bovenin een talud van 1:7. Het laatste stuk naar de kruin is steiler, ongeveer 1:3. Figuur 3.1 geeft ook de jaarlijkse, 10-jaarlijkse en ontwerpwaterstand. Dit zijn de punten waar golfploop begint en overslag moet dus hoger op het talud worden gemeten. Wat betreft doorsnede van talud is er geen reden om een bepaalde locatie te kiezen, want de dijkdoorsnede is vrij uniform.



Figuur 3.3. Mogelijke locaties om golfoverslag te meten met meetpalen voor hydraulische en meteo condities.

Er is wel een andere reden om een extra locatie te kiezen om golfoverslag te meten. Dat is het feit dat er net ten westen van de Eemshaven en 100 m vanaf de dijk een meetpaal UHW1 staat. Deze locatie krijgt direct

noordwestelijke golven vanuit de Waddenzee, welke dus veel hoger zijn dan wat langs de dijk van de Eemshaven-Delfzijl mag worden verwacht. De golfrichting op de dijk zal loodrecht of iets afwijkend zijn. Juist omdat de golfhoogte hier hoger is, is het interessant om ook hier golfoverslag te meten. De golfoverslagrelatie wordt dan met duidelijk andere condities gevalideerd. En het geeft de bestaande meetpaal een extra functie.

Het voorstel is om op 4 tot 5 locaties golfoverslag te meten. Er zijn 3 meetpalen nodig voor de hydraulische en meteo condities. Figuur 3.3 geeft de mogelijke locaties.

Naast het verrichten van metingen met meetinstrumentarium kunnen hindcasts van veekrandwaarnemingen aanwijzingen geven of de huidige modelketen de golfoploop onderschat of juist overschat. Vooralsnog maakt dit echter geen deel uit van dit onderzoek.

### 3.3 Golfoverslag en golfoplopmetingen

In het laboratorium wordt golfoverslag gemeten door het water op te vangen in een bak. Er zijn dan voornamelijk twee methoden om overslag te meten. De eerste is met een golfhoogtemeter in de bak, die begin en eindstand bepaalt, waardoor het totale volume overslag en daarmee ook het overslagdebiet kan worden berekend. Bij Petten en ook andere in situ metingen, werd de waterstand bepaald door twee drukopnemers in de bak te plaatsen. De tweede methode is om de bak met het gewicht van het water erin te meten. De bak moet dan wel helemaal vrij staan. Hiermee kunnen heel nauwkeurig overslaande golfvolumes worden bepaald. Deze methode is (nog) niet bij in situ metingen uitgevoerd.

Het ligt voor de hand in eerste instantie uit te gaan van een golfoverslagbak. Verderop wordt ook een ander idee besproken. De rand van de bak moet zodanig hoog boven de waterstand liggen dat er wel golven inlopen, maar niet zoveel dat de bak voortdurend vol zit.

In (Van der Meer et al, 2016) zijn ook verkennende berekeningen gemaakt bij golfhoogten van 0.5 - 0.7 m, die mogelijk bij de locatie Dubbele Dijk zijn te verwachten. Bij het Uithuizerwad doen zich hogere golven voor bij gelijke weersomstandigheden. Op basis van een analyse van de golfhoogte- en waterstandsmetingen bij het Uithuizerwad<sup>1</sup> is inzicht gekregen in de te verwachten hoge waterstanden, bijbehorende golfcondities en golf-richtingen. Hiermee kunnen verkennende overslagberekeningen worden uitgevoerd om ten slotte de hoogte van de overslagrand van de golfoverslagbakken te kunnen berekenen en het benodigde volume voor de meetlocatie ter plaatse van Uithuizerwad. Dat is in deze fase nog niet gedaan.

Tabel 3.2 geeft resultaten van verkennende berekeningen uit (Van der Meer et al, 2016). Uit voorlopige berekeningen komt een hoogteverschil van ongeveer 0.60 m. Bij dijkvakken die scheef worden aangevallen, gelet op de scheve hoek van inval van de golven, moet de lijn waarover de golven de bak inlopen voldoende lang zijn. In eerste instantie wordt gedacht aan een bak van 4 m lang. Om de hoeveelheid opgevangen water op basis van natuurlijk verval te laten uitstromen is eveneens een afvoergoot nodig. Naar de eerste inschatting is de benodigde breedte hiervan 1 m. In totaal resulteert dit in een meetopstelling met een lengte van 5 m (zie figuur 3.7).

Het is van belang dat de metingen representatief zijn voor de werkelijke situatie. Dit is het best haalbaar door de golfoverslagbakken in te graven in het buitentalud, waarbij de bovenkant nagenoeg gelijk ligt met de bovenkant van het talud. De constructie en de wijze van aanbrengen in het buitentalud wordt zodanig uitgevoerd dat de integriteit van de waterkering geen geweld wordt aangedaan. Het streven is om in beginsel overslag te meten dan tenminste jaarlijks voorkomt. Het is dan ook van belang dat de hoogte van de instroomopening (overslagrand) hierop wordt afgestemd.

Het meten van de golfoverslag in de bakken kan in eerste instantie op dezelfde manier worden gedaan als bij Petten (twee druksensoren die de waterstand meten). Daarnaast is het zinvol om rechtstreeks te bepalen hoeveel golven de rand van de golfoverslagbak halen en overslag geven. Dit is niet altijd even gemakkelijk uit de overslagmetingen zelf te halen. De meetbak wordt uitgerust met meerdere waterdruksensoren zodat waterstandswisselingen in de bak kunnen worden gemeten. Door de signalen van de drukdozen op te slaan kan

<sup>1</sup> Zie Van der Meer Consulting B.V. "Veldmeting Eemshaven-Delfzijl, Specificaties golfoverslagbakken in de dijk"

achteraf het aantal overgeslagen golven worden bepaald. Of er sprake is van een inkomende golf kan eveneens door drukdozen worden geregistreerd. In eerste instantie wordt gedacht aan een totaal van vier drukdozen per bak om de voornoemde gegevens te kunnen registreren.

Door de mate van waterstandswisselingen te analyseren (en zo mogelijk te combineren met de afvoercharacteristiek van een meetstuw) kan ook het volume per golf per strekkend meter ( $m^3$  per m) en daarmee het overslagdebiet ( $l/m$  per s) worden bepaald. Het in de bak opgevangen overgeslagen water zal via een min of meer gecontroleerde uitstroming (een) meetstuw en een afvoergoot worden teruggevoerd naar zee.

Werkelijke waterstanden zullen niet gelijk zijn aan de "ontwerpwaterstand" voor de bak, ze kunnen lager of hoger zijn. Een lagere waterstand zal minder golfoverslag geven, een hogere veel meer. Een te lage waterstand zal geen overslag opleveren, bij een te hoge waterstand zal de bak te vaak helemaal vol zitten. Door middel van eerste berekeningen kan inzicht worden verkregen in de effectiviteit van een golfoverslagbak. Daartoe is van een initiële ontwerpwaterstand van +3,0 m NAP uitgegaan (de juiste waarde doet er hier even niet toe). De overslaghoogte, dit is de rand van de bak, ligt op +3,6 m NAP. Voor de golfhoogten is uitgegaan van  $H_s = 0,5$  m; 0,6 m en 0,7 m. Voor de hoek van golfaanval is uitgegaan van  $\beta = 0^\circ, 60^\circ$  en  $80^\circ$ . Naast een waterstand van +3,0 m NAP is ook gekeken naar een lagere waterstand van +2,8 m NAP en een hogere waterstand van +3,2 m NAP.

Daarnaast is voor de berekeningen uitgegaan van een 1:5 talud, een golfperiode  $T_{m-1,0} = 3$  s, een gemiddelde golfperiode van  $T_m = 2,5$  s, een piek van de storm van 2 uur en een ruwheidsfactor voor het talud van  $\gamma_f = 1$ . Tabel 3.2 geeft alle berekeningen, welke zijn uitgevoerd met pc-overslag.

<b>Vaste waarden:</b>
Hoogte overslagbak: +3.6 m NAP
Golfperiode $T_{m-1,0} = 3$ s
Golfperiode $T_m = 2.5$ s
Stormduur: 2 uur
Talud: 1:5
Ruwheid: $\gamma_f = 1$

Waterstand (m NAP)	Vrijboord (m)	Golfhoogte (m)	Hoek van golf-aanval (°)	2%-oploop (m)	Overslagdebiet (l/s per m)	Percentage overslag (%)	Volume max golf (l/m)
2.8	0.8	0.5	0	0.88	0.13	4	59
2.8	0.8	0.6	0	0.96	0.30	7	88
2.8	0.8	0.7	0	1.03	0.57	10	125
2.8	0.8	0.5	60	0.76	0.02	1	21
2.8	0.8	0.6	60	0.83	0.06	3	33
2.8	0.8	0.7	60	0.90	0.13	4	49
2.8	0.8	0.5	80	0.72	0.01	1	12
2.8	0.8	0.6	80	0.79	0.03	2	21
2.8	0.8	0.7	80	0.85	0.07	3	32
3	0.6	0.5	0	0.88	0.8	16	120
3	0.6	0.6	0	0.96	1.6	22	181
3	0.6	0.7	0	1.03	2.6	27	255
3	0.6	0.5	60	0.76	0.2	8	51
3	0.6	0.6	60	0.83	0.5	13	80
3	0.6	0.7	60	0.90	0.9	17	117
3	0.6	0.5	80	0.72	0.1	7	34
3	0.6	0.6	80	0.79	0.3	10	55
3	0.6	0.7	80	0.85	0.5	14	82
3.2	0.4	0.5	0	0.88	4.9	44	320
3.2	0.4	0.6	0	0.96	8.0	51	469
3.2	0.4	0.7	0	1.03	11.9	56	644
3.2	0.4	0.5	60	0.76	2.0	34	164
3.2	0.4	0.6	60	0.83	3.6	40	250
3.2	0.4	0.7	60	0.90	5.6	46	365
3.2	0.4	0.5	80	0.72	1.3	30	120
3.2	0.4	0.6	80	0.79	2.5	36	188
3.2	0.4	0.7	80	0.85	4.0	42	272

Tabel 3.2. Berekeningen met pc-overslag om de effectiviteit van een overslagbak te bepalen.

De laatste vier kolommen van tabel 3.2 geven achtereenvolgens weer: de 2%-golfoploophoogte, het gemiddeld overslagdebiet, het percentage overslaande golven en het maximum overslaand volume in de grootste golf (gebaseerd op twee uur overslag).

De 2%-golfoploophoogte zit voor scheve golfaanval globaal tussen 0,7 m en 0,9 m. Bij de laagste waterstand van +2,8 m NAP zit de bak ongeveer op deze hoogte. Het overslagpercentage zit tussen 1% - 4%, dus rondom de 2%. Hierbij wordt globaal een overslagdebiet van 0,01 - 0,1 l/s per m voorspeld. Dat is vrij weinig en zit niet ver van wat nog meetbaar is. De maximale overslaande golven hebben volumes van 10 - 50 l/m, wat veel kleiner is dan het toelaatbare maximum in de bak. Gesteld kan worden dat met deze vrij boord van 0,8 m er nog gemeten kan worden, maar de vrij boord moet niet veel groter worden. Het maximum zal ongeveer bij 0,9 m liggen, 0,3 m beneden die "ontwerpwaarde".

Op de initiële waterstand met een vrij boord van 0,6 m wordt bij scheve golfaanval 7%-17% van de golven in de overslagbak opgevangen. Het gemiddeld debiet ligt daarbij tussen 0.1 en 1 l/s per m. De maximaal overslaande golfvolumes zitten tussen 30 - 120 l per m, dus nog steeds ruim beneden het toegestane maximum. Bij deze waterstand kan er prima golfoverslag worden gemeten.

Bij een 0,2 m hogere waterstand en een vrij boord van maar 0,4 m, gaan 30% tot 46% van de golven in de overslagbak. Dus bij een van de twee of drie golven wordt overslag gemeten. Het gemiddeld overslagdebiet komt op 1 - 6 l/s per m. De maximale overslagvolumes komen tussen 150 - 350 l/m te liggen, dus nog steeds beneden het maximum. Ook deze waterstand zou goed gemeten moeten kunnen worden. Maar de waterstand moet niet veel hoger komen te liggen, want dan loopt de bak te vaak helemaal vol. Dit maximum zit ongeveer 0,3 m boven de "ontwerpwaarde".

Bovenstaande houdt in dat bij de aangenomen situaties een golfoverslagbak een bereik in verticale waterstand heeft van ongeveer 0,6 m, zijnde  $\pm 0,30$  m rondom de initiële waterstand, met de rand van de bak die hier 0,6 m boven ligt. Hiermee kan een plan worden gemaakt voor zowel de juiste plaats van de overslagbak als hoeveel overslagbakken er nodig zijn.

Tabel 3.1 geeft aan dat de jaarlijks te verwachten waterstand net boven +3 m NAP ligt en ongeveer 0,2 m toeneemt richting Delfzijl. De 10-jaarlijkse waterstand ligt vrijwel 1 m hoger. Voor Delfzijl zijn beide waarden +3,25 m NAP en +4,37 m NAP. Tabel 3.3 geeft de 50 hoogste hoogwaterstanden bij Delfzijl die in 115 jaar zijn gemeten. Wat hierin opvalt is dat in de laatste 15 jaar, dus na 2000, er 10 bij de hoogste 31 zitten. In 15 jaar zijn 10 waterstanden gemeten tussen +3,70 m NAP en +4,83 m NAP.

nr	datum	stand in NAP +cm	nr	datum	stand in NAP +cm	nr	datum	stand in NAP +cm
1	1-11-2006	483	21	24-11-1981	391	36	18-9-1914	366
2	6-12-2013	482	22	2-2-1983	388	37	3-12-1917	365
3	28-1-1901	453	23	28-2-1990	387	38	5-2-1999	359
4	13-3-1906	451	24	24-11-1981	385	39	13-11-1973	357
5	4-2-1944	448	25	30-1-2000	383	40	16-11-1973	356
6	16-2-1962	446	26	2-12-1917	382	41	13-3-1994	354
7	4-1-1976	435	27	18-3-2007	378	42	2-11-1921	354
8	13-1-1916	432	28	12-1-2007	378	43	8-4-1943	353
9	6-12-2013	426	29	11-1-2015	377	44	7-1-1905	353
10	28-1-1994	425	30	6-12-1973	373	45	12-12-1990	351
11	9-11-2007	421	31	1-3-2008	370	46	10-10-1926	351
12	19-11-1973	419	32	12-12-1929	368	47	20-12-1993	350
13	21-1-1976	408	33	3-12-1999	366	48	23-1-1993	350
14	3-1-1976	406	34	2-1-1995	366	49	1-12-1936	350
15	10-1-1995	404	35	28-1-1994	366	50	5-2-1999	349
16	22-10-2014	402						
17	14-12-1973	399						
18	31-12-1977	396						
19	22-12-1954	393						
20	27-2-1990	392						

	Waterstand boven landelijk alarmeringspeil (code rood)
	Waterstand boven (regionaal) alarmeringspeil (code oranje)
	Waterstand boven voorwaarschuingspeil (code geel)

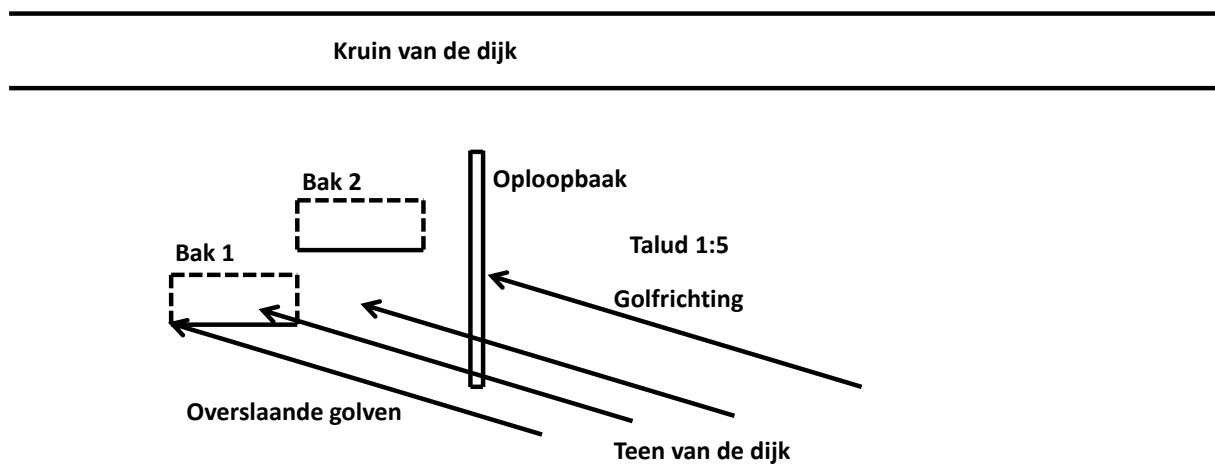
Tabel 3.3. Hoogste hoogwaterstanden bij Delfzijl na 1900.

Gebaseerd op de metingen is de 10-jaarlijkse waterstand +4,20 m NAP en deze is in de laatste 15 jaar driemaal overschreden. In de laatste 15 jaar zijn ook de twee hoogste waterstanden gemeten. Toch moet niet teveel naar

deze hoogste waterstanden worden gekeken, want het is best mogelijk dat ze de komende 15 jaar niet weer voorkomen.

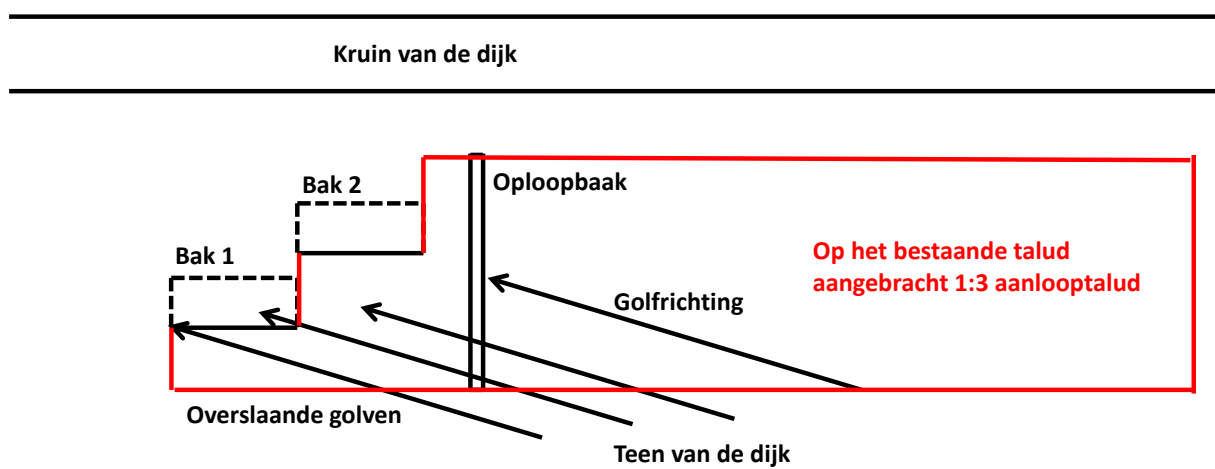
Gezien het bereik van de golfoverslagbakken ( $\pm 0,3$  m rondom een initiële waterstand), zouden twee bakken 0,6 m (verticaal gemeten) uit elkaar moeten liggen. Als we bij Delfzijl van +3,3 m NAP voor de laagste bak uitgaan, dan komt de tweede bak op +3,9 m NAP. Het bereik waarbij overslag kan worden gemeten, is dan van +3,0 m NAP tot +4,2 m NAP. Dit betekent dat de onderste bak vrijwel elk jaar een of meerdere stormen kan meten en dat als de waterstand echt hoog wordt, er tot een waterstand van +3,9 m NAP gemeten kan worden. Dit is een waterstand die 10 maal in de laatste 115 jaar is overschreden. Dit is overigens driemaal in de laatste 15 jaar gebeurd. In eerste instantie lijken daarmee twee overslagbakken met een verschil in aanleghoogte van 0,6 m goed te voldoen.

Als de golven meer loodrecht inkomen, of (veel) hoger zijn, dan moet met vergelijkbare berekeningen als in tabel 3.2 worden nagegaan wat dan de meest ideale aanleghoogte en grootte van de golfoverslagbak is. Voorlopig is het voldoende om te weten dat twee overslagbakken orde van grootte 0,6 m in hoogte uit elkaar, voldoende is om golfoverslag goed te meten. Ook is het zinvol om golfploop naast de golfoverslagbakken te meten. In eerste instantie wordt aan een oploopbaak in het talud gedacht, welke aan de golfzijde van de twee overslagbakken moet komen, zie figuur 3.4. Een alternatief wordt verderop besproken.

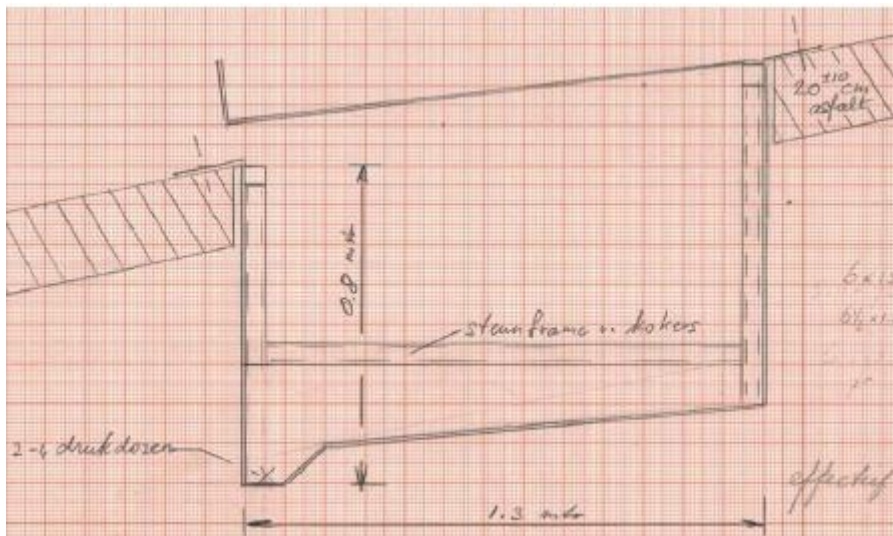


*Figuur 3.4. Mogelijke opstelling met twee golfoverslagbakken en een oploopbaak*

Figuur 3.6 geeft een idee van de doorsnede van zo'n golfoverslagbak. Doordat het geheel in het talud zit, is er op de dijk niet veel van te zien (het is geen obstakel).



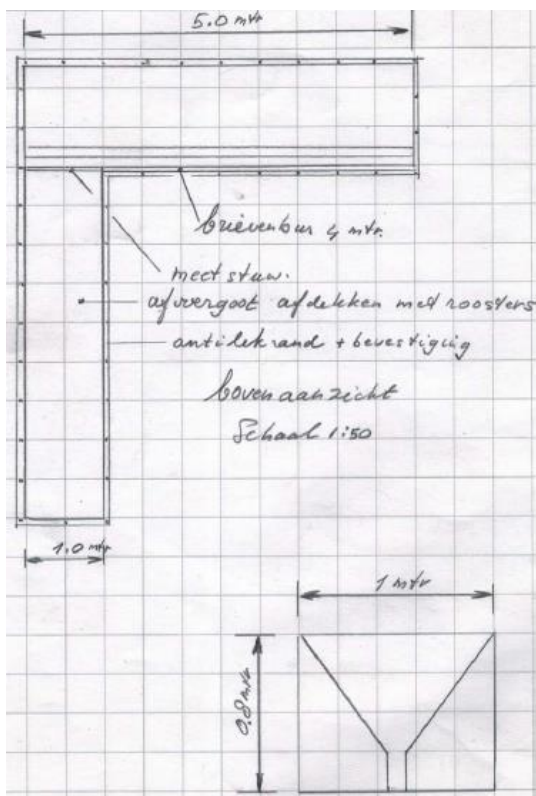
*Figuur 3.5. Schematisch overzicht van aan te brengen aanlooptalud bij overslagbakken bovenop het bestaande talud*



Figuur 3.6. Schematische doorsnede van de golfverslagbak met een "brievenbus constructie" voor de overslagopening.

Zoals al aangegeven is de vrijboordhoogte van meetopstelling bij relevante stormcondities klein. Dat betekent dat bij hogere waterstanden niet alleen de overslag-hoeveelheden groter worden, maar ook dat door het steeds kleinere verval de afvoercapaciteit van het water uit de meetbak kleiner kan worden. Om de afvoer te maximaliseren is de afvoergoot breed bemeten. Gedacht wordt aan een breedte 1 m. De golfbelasting, en daarmee het op te vangen overslagdebiet, ten Westen van de Eemshaven is groter dan die ter plaatse van de Dubbele Dijk. Die bakken benodigen dan ook een grotere opvangcapaciteit. In eerste instantie wordt gedacht aan bakken met een breedte van 1,3 m en een diepte 0,8 m ter plaatse van de Dubbele Dijk en bakken met een breedte van 1,5 m en een diepte van 0,9 m ter plaatse van de locatie Uithuizerwad ten Westen van het Eemshavencomplex.

Figuur 3.7 geeft een eerste indicatie van de afmetingen van de combinatie golfverslagbak + afvoergoot.



Figuur 3.7. Schematische doorsnede van de golfverslagbakconstructie met de afvoergoot.



Een alternatief idee is om met drie innovatieve oploophaken naast elkaar een 3D-beeld van de oploop te meten en hieruit de golfoverslag te berekenen. Uit de oploopverdeling en bijbehorende laagdikte over het talud kan in 2D een overslagdebiet worden bepaald. De innovatieve oploophaken kan ter verificatie naast een klassieke oploophaken worden gezet.

Over de haalbaarheid hiervan bestaat verschil van mening tussen de meerdere instanties die werkzaam zijn in dit expertiseterrein. Een van de redenen hiervoor is dat het bepalen van de golfoverslag met behulp van dit instrumentarium een berekening blijft en dus niet direct wordt gemeten. Validatie van deze innovatieve methode naast een rechtstreeks gemeten overslag en een klassieke oploophaken wordt als noodzakelijk beschouwd.

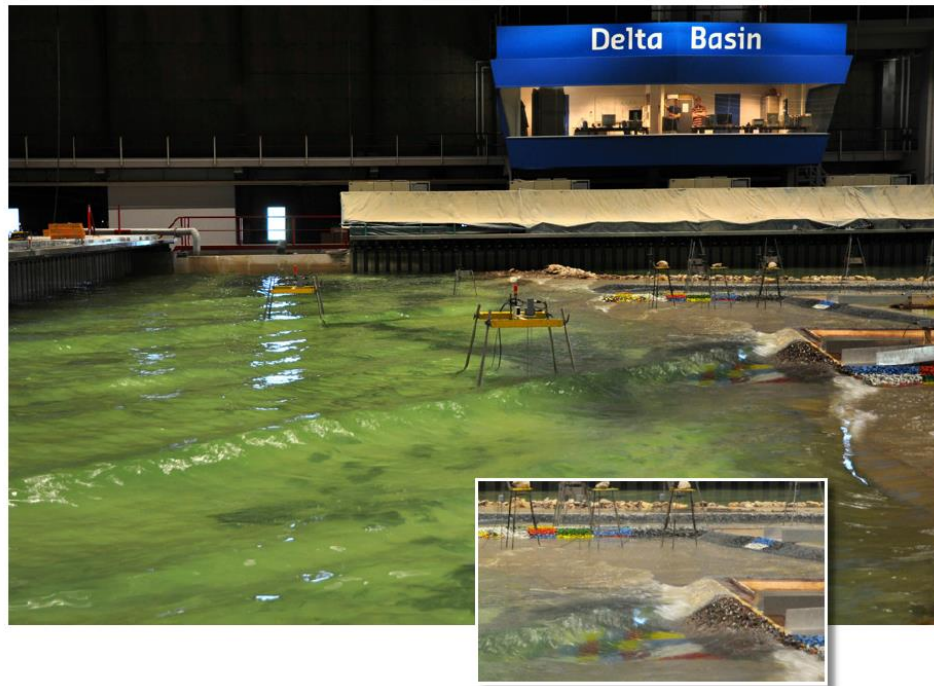
### 3.4 Laboratoriumonderzoek van golfoverslag

Over de invloed van scheve golfaanval is er ten opzichte van loodrechte golfinval relatief weinig bekend. Meer inzicht hierin leidt tot een beter inzicht in golfoverslagdebieten voor de hier beschouwde dijk. Bij veldmetingen zullen de extreme hydraulische (ontwerp)condities vrijwel zeker niet worden bereikt. Lage condities (lagere waterstanden en golfhoogten) zijn soms lastig vertaalbaar naar zwaardere condities in termen van golfoverslag. Voor de studie is het wel nodig om uiteindelijk een goede vertaling te maken van gemeten extreme stormen naar ontwerpsituaties.

Een eventuele optie is om aanvullend onderzoek uit te voeren in een golfbassin. In dit bassin kan de dijk en een deel van het voorland op schaal worden nagebouwd, zie figuur 3.9. Iedere gewenste hydraulische conditie, dus ook de extreme ontwerpcondities, kan worden opgelegd middels het geavanceerde golfschot. Er kan een proevenprogramma worden uitgevoerd waarbij verschillende parameters (golfcondities, waterstanden, kruinhoogte, etcetera) systematisch kan worden gevarieerd. Hierbij kan de exacte geometrie van de dijk worden nagebouwd. Er kan ook worden gekozen voor een meer generiek onderzoek (generieker profiel). Ook kunnen gemeten stormen worden nagebootst om te kijken of er mogelijk schaal- of modeffecten zijn (die overigens niet worden verwacht). Voornaamste voordelen van een experiment in een golfbassin ten opzichte van een veldmeting zijn als volgt:

- Relatief lage kosten ten opzichte van veldmetingen.
- Resultaten zijn snel beschikbaar (binnen enkele maanden).
- Parameters (waterstand, golfhoogte, golfperiode en golfrichting) kunnen stelselmatig worden gevarieerd.
- Parameters kunnen in het gewenste bereik (ontwerpstormcondities, zeer zware golfaanval) gekozen worden.
- Condities zijn goed controleerbaar en meetbaar.

Het nadeel is dat hydraulische condities worden opgelegd en niet zoals bij veldmetingen, worden gemeten. Dit onderzoek kan daarom veldmetingen ook niet vervangen, het is complementair. Wel kan het een belangrijke rol spelen in de vertaling van in het veld geregistreerde extreme stormen, maar nog lang geen ontwerpsituaties, naar condities behorend bij de ontwerpsituatie. Vandaar dat wordt voorgesteld dit onderzoek uit te voeren nadat al veel is gemeten en inzicht in vertaling naar omwerpomstandigheden wenselijk is. Dit is ergens tussen het tiende en vijftiende jaar van meten.



*Figuur 3.9. Illustratie van schaalmodelonderzoek in het Delta golfbassin van Deltares.*



## 4 Zeespiegelstijging en bodemdaling

### 4.1 Samenvattende conclusies

Omtrent zeespiegelstijging en bodemdaling wordt in Nederland veel gemeten en is ook veel bekend. Dit hoofdstuk geeft de conclusies van een uitgebreide samenvatting, in 2015 opgesteld door P. van Oosterloo van IHE.

De conclusies omtrent zeespiegelstijging en bodemdaling kunnen als volgt worden samengevat:

1. Waddenzee en Eems-Dollard kunnen in principe meegroeien met zeespiegelstijging, mits voldoende wordt gesuppleerd. Bodemdaling door gaswinning is van een orde lagere invloed in deze gebieden. Alleen bij zeer extreme zeespiegelstijging zou een andere situatie op kunnen treden in de Waddenzee.
2. De bocht van Watum sedimenteert sinds het einde van de 19e eeuw, dit is sinds het begin van de 20e eeuw verder versterkt. De belangrijkste oorzaak is waarschijnlijk de aanleg van en onderhoud aan de vaargeul. Wanneer er geen significante veranderingen in het morfologisch beheer van het estuarium aanstaande zijn, is het niet de verwachting dat de bocht van Watum zich de komende jaren morfologisch anders zal gaan gedragen. Uit studies blijkt dat de natuurlijke sedimentatie en erosie, de natuurlijke dynamiek in het gebied, groot is ten opzichte van de bodemdaling door gaswinning, ongeveer een factor 3 tot 12 groter. Tevens werden positieve correlaties tussen de natuurlijke sedimentatie en de bodemdaling gevonden, welke aangeven dat er waarschijnlijk volledige compensatie plaatsvindt voor de bodemdaling.
3. Het NAM-statusrapport van 2015 geeft prognoses van de bodemdaling voor 2025, 2050 en 2080. De eindhaling (2080) als gevolg van gaswinning ter plaatse van de dijk tussen Eemshaven en Delfzijl bedraagt ongeveer 22 cm nabij Eemshaven tot 38 cm nabij Delfzijl. Hiervan is in 2013 reeds 16 tot 25 cm opgetreden. De verwachte bodemdaling op deze locatie als gevolg van gaswinning in 2050 bedraagt tussen 22 en 32 cm. Ten opzichte van 2013 is dit dus een extra daling van 6 à 7 cm in 37 jaar. Dit betekent dat voor dijkversterking mogelijk uitgegaan mag worden van orde 10 cm extra ten opzichte van 2013. Hierbij moet dan nog de natuurlijke daling (isostatische rebound en natuurlijke klink) bij op worden geteld voor de bepaling van de mee te nemen bodemdaling.
4. Er is en wordt al veel gemeten en gerapporteerd over de bodemdaling en zeespiegelstijging. Met andere woorden, er is reeds veel informatie en data beschikbaar. Het is daarom waarschijnlijk voldoende om aan te sluiten bij wat er tot nu toe beschikbaar is, bijvoorbeeld de vijfjaarlijkse rapportages van de NAM.
5. Voor het monitoren van bodemdaling na bijvoorbeeld een dijkverzwaring, kan de hoogtedaling in kaart worden gebracht 0, 1, 16 en 360 maanden na de bouw. Aanbevolen wordt de plaatsing van minimaal 3 peilmerken op trajecten langs de gradiënt van de verwachte daling tussen het punt met de grootste en kleinste verwachte daling. (Barends et al., 2008). Een andere mogelijkheid voor het monitoren van bodemdaling bij grootschalige waterstaatkundige werken is het gebruiken van InSAR-beelden voor een klein(er) gebied, zoals bijvoorbeeld wordt gedaan door SkyGeo/Hansje Brinker.

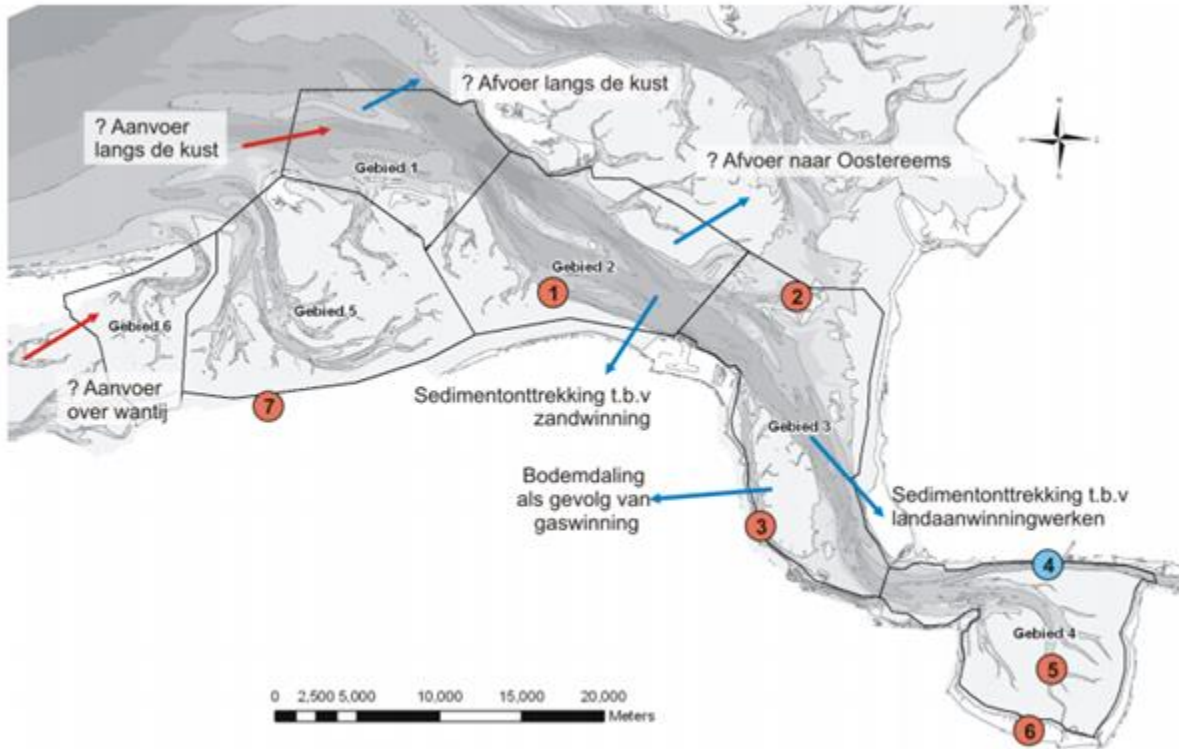
### 4.2 Bodemdaling en zeespiegelstijging Eems-Dollard

Volgens Alkyon (2008) is de grootste verandering in het Eems-Dollard gebied in de afgelopen 100 jaar het verdwijnen van de geulverbinding tussen de kombergingsgebieden van de Westereems en de Oostereems geweest, ten zuidoosten van het Waddeneiland Borkum. Tegenwoordig ligt hier een wantij. Verdere morfologische veranderingen zijn de verplaatsing en toe- en afname van geulen. Deze veranderingen zijn onder andere veroorzaakt door het baggeren van de vaarweg sinds de jaren twintig. Een overzicht van de belangrijkste veranderingen in het gebied is gegeven in Alkyon (2008), zie figuur 4.1. Alkyon (2008) geeft tevens de gemiddelde langjarige sedimentatie in de Eems-Dollard, zie tabel 4.1.

De getallen in figuur 4.1 beschrijven de volgende ontwikkelingen:

1. Netto sedimentatie in de getijgeul Oude Westereems.
2. Netto sedimentatie op en rond de Eemshoornplaat, waardoor op een termijn van eeuwen de uitwisseling van water tussen Eems en Oostereems steeds verder afneemt.
3. Sedimentatie in de Bocht van Watum, waardoor deze geul op een termijn van een eeuw steeds kleiner is geworden.

4. Verdieping van de Unterems door baggerwerkzaamheden.
5. Netto sedimentatie in de Dollard.
6. Sedimentatie op de kwelders in de Dollard (gecombineerd met een afname van het areaal kwelders, door erosie van de kwelderrand).
7. Sedimentatie op de Groninger kwelders.

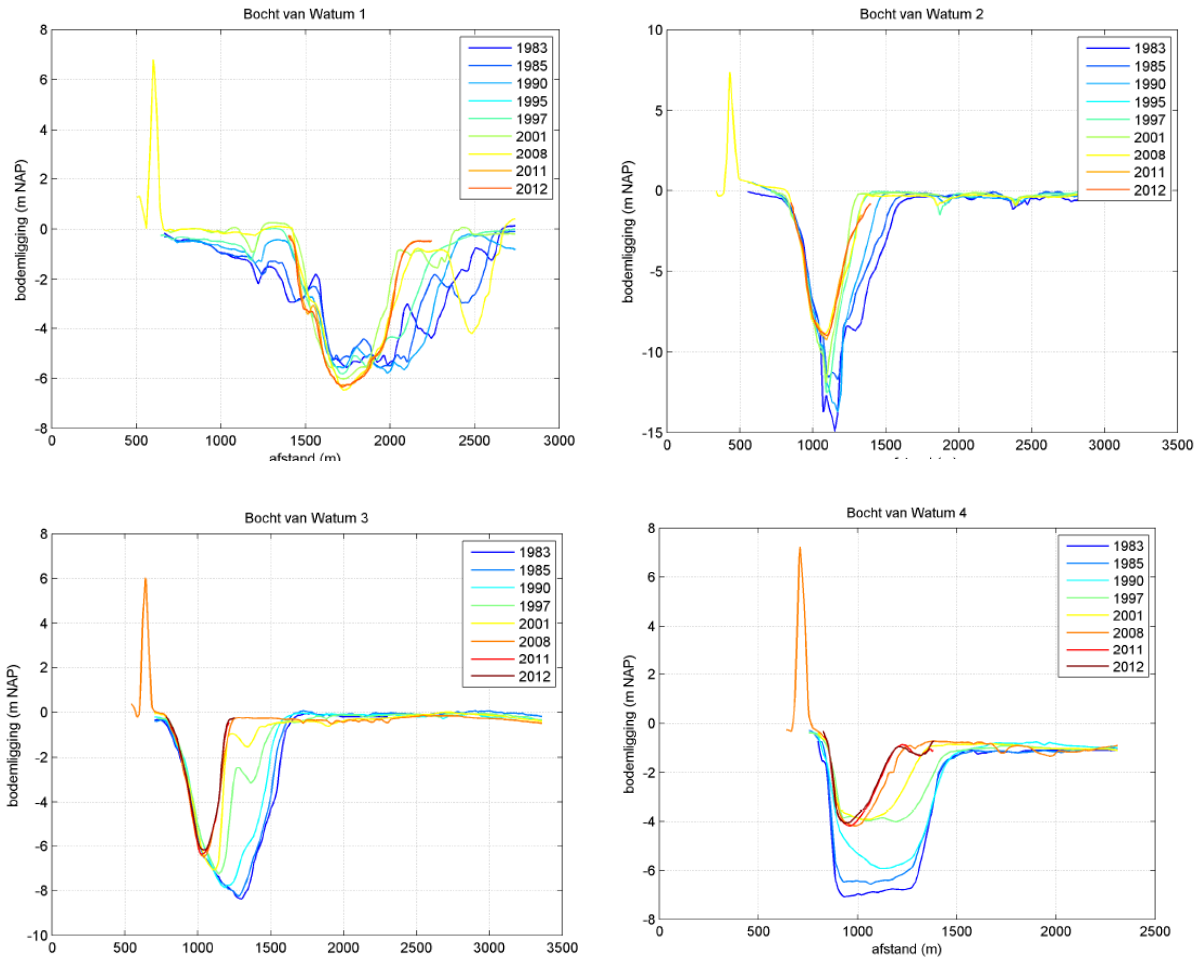


Figuur 4.1. Overzicht van belangrijkste veranderingen in het Eems-Dollard gebied (Alkyon, 2008).

De bocht van Watum sedimenteert sinds het einde van de 19e eeuw, dit is sinds het begin van de 20e eeuw verder versterkt. De belangrijkste oorzaak is ook hier waarschijnlijk de aanleg van en onderhoud aan de vaargeul. De sedimentatie uit zich de laatste 30 jaar voornamelijk als een opvulling en westwaartse verschuiving van de oostelijke geulwand. De landwaartse wand van de Bocht van Watum ligt de laatste 30 jaar vrij stabiel. Tevens sedimenteert het intergetijdengebied direct naast de dijk (Deltares, 2014b).

	Ondergrens	Gemiddeld	Bovengrens
	$\times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$		
<b>Geobserveerde veranderingen sedimentvolume Eems</b>	1,2	2,0	2,9
<b>Gebieden niet in bodemligginggegevens</b>	0,04		
<b>Veronderstelde veranderingen sedimentvolume Dollard</b>	0,2		
<b>Kwelders Dollard (niet in bodemligginggegevens)</b>	0,02	0,06	0,09
<b>Onttrekking sediment (gemiddeld 1985-2006)</b>	2,0		
<b>Bodemdaling als gevolg van gaswinning (Slochteren)</b>	0,43		
<b>Totaal</b>	3,9	4,7	5,7
<b><i>Bijdrage slibsedimentatie</i></b>	<b><i>0,4-0,7</i></b>		

Tabel 4.1. Gemiddelde langjarige sedimentatie in de Eems-Dollard (Alkyon, 2008).



Figuur 4.2. Overzicht van het verloop van de sedimentatie van de Bocht van Watum (Van der Werf, Deltares, 2014).

Deltares (2014b) geeft ook aan dat het estuarium ondieper aan het worden is. Door actief morfologisch beheer, onder andere het storten van sediment afkomstig uit de haven van Delfzijl in de bocht van Watum (tot 2004), zijn de morfologische trends (de sedimentatie, het ondieper worden van het estuarium) versterkt. De studie geeft tevens aan, dat wanneer er geen significante veranderingen in het morfologisch beheer van het estuarium aanstaande zijn, het niet de verwachting is dat de bocht van Watum zich de komende jaren morfologisch anders zal gaan gedragen. Tevens staat het morfologisch gedrag van de Bocht van Watum een zeevaartse versterking van het dijktraject Eemshaven-Delfzijl niet in de weg.

Uit studies van Mulder (1996) en RIKZ (2004a) blijkt dat de natuurlijke sedimentatie en erosie, de natuurlijke dynamiek in het gebied, groot is ten opzichte van de bodemdaling door gaswinning, ongeveer een factor 3 tot 12 groter. Tevens werden positieve correlaties tussen de natuurlijke sedimentatie en de bodemdaling gevonden, welke aangeven dat er waarschijnlijk volledige compensatie plaatsvindt voor de bodemdaling.

## 5 Meetprogramma

### 5.1 Inleiding

Uit de hoofdstukken 2 – 4 blijkt een richting voor het meetprogramma om de onzekerheden te verkleinen van waterstanden, golven, stromingen en golfoverslag. De inleiding geeft al aan dat het samengevat gaat om een 12 - 15 jaar durend programma met de volgende onderdelen:

- meerjarige veldmetingen op basis van bestaande + nieuwe meteo- en HYDRA-uitvoerpunten, bestaande + nieuwe golfmeetboeien, golfoverslag + golfoploop-instrumenten.
- data opslag + processing, vergunningaanvraag, projectmanagement.
- validatiestudies, stormrapportages, schaalmodelonderzoek.

Figuur 5.1 geeft dit schematisch weer.



Figuur 5.1. Overzicht werkzaamheden

Onderdeel 0 is in gang gezet door het waterschap Noorderzijlvest in samenspraak met deskundigen van Rijkswaterstaat WV en CIV. Dit plan van aanpak geeft richting aan de overige onderdelen, deels dient dit nog te worden uitgewerkt in een projectplan.

### 5.2 Fasering

De voorgaande hoofdstukken geven een eerste indicatie van aantallen en locaties, echter deze staan nog niet definitief vast. Het eerste jaar van het onderzoek gaat het waterschap samen met deskundigen een verdiepingsslag uitvoeren (projectplan) om er voor te zorgen dat in de winter van 2018 – 2019 de eerste metingen uit dit programma kunnen plaatsvinden. De voorbereiding in het eerste jaar behelst ook het ontwerp en bouw (B+C in figuur 5.1), de aanschaf en plaatsing van de meetinstrumenten. Een extra data-inwinstation is

zeer waarschijnlijk nodig. Er dient voldoende aandacht te worden geschonken aan het verkrijgen van de benodigde vergunningen en de dataopslag + processing van de overslagbak en oploopbaak.

Tijdens de gehele meetcampagne worden stormrapportages opgesteld en de metingen gevalideerd en indein nodig bijgestuurd. Het betreft dus nadrukkelijk een cyclisch proces. Met name de eerste jaren vinden de meeste werkzaamheden plaats.

### 5.3 Meteo, golf- en waterstandsmodellen

De ruwe en deels verwerkte data wordt centraal opgeslagen binnen het DONAR<sup>2</sup> systeem van Rijkswaterstaat. Voor de validatie van stormen met betrekking tot de golf- en waterstandsmodellen, als wel de golfoverslag, is het belangrijk dat de juiste gegevens beschikbaar zijn. Onderdeel van het project is om de stormen te beschrijven die in een winterseizoen zijn opgetreden. Hiertoe dient na elk gemeten seizoen een gedegen stormrapport opgesteld te worden, die volledig gericht is op het daarna goed uit kunnen voeren van de validaties. De metingen zelf moeten worden beoordeeld op geschiktheid en gemeten waarde. Voor het opstellen van de stormrapportages is een gedegen kennis van zaken (meteo, golven, waterstanden en golfoverslag) nodig.

Hoofdstuk 2 beveelt aan hoe met huidige modellen betere validaties mogelijk te maken. Op zich horen kosten voor verbetering van het modelinstrumentarium niet in het plan van aanpak thuis. Tenzij de verbeteringen specifiek bedoeld zijn om de validatie van de voorgestelde metingen in het plan van aanpak beter mogelijk te maken. Hiertoe wordt voorgesteld om een nieuw gekoppeld roosteronafhankelijk DFlow FM model te ontwerpen, gefocust op de Oostelijke Waddenzee en de Eems.

Het is ook belangrijk om actuele bemeten situaties na te bootsen om de werkelijke kwaliteit van de modellen en hun toename in nauwkeurigheid in maat en getal uit te drukken. Hiertoe worden om de paar jaar gemeten stormen, en als er een wezenlijk verbeterd model is ook de eerdere gemeten stormen, nagerekend. Een optie is om als eerste de vier stormen uit het rekenexperiment (Arcadis 2015a) opnieuw worden nagebootst om te kijken of de kwaliteit van de hindcasts, door de integrale benadering beter is geworden.

Het is niet de bedoeling om elk jaar de nieuw gemeten stormen door te rekenen. Een reden kan zijn dat er voldoende nieuwe stormen zijn gemeten of dat het modelinstrumentarium zodanig is verbeterd, dat een hernieuwde validatie met (alle) gemeten stormen zinvol is. Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat een nieuwe reken/validatie exercitie zinvol is om de drie jaar. Op dit moment ontbreken voorstellen die er op gericht zijn de golfcondities zelf te valideren (SWAN of andere modellen), anders dan in combinatie met boven voorgestelde validatie van waterstanden (en golven).

### 5.4 Golfoverslag

De validatie van de golfoploop- en golfoverslagmetingen vindt plaats door de gemeten waterstand- en golfcondities als invoer te gebruiken voor de oploop- of overslagmodule. Voor de validatie van de golf- en waterstandsmodellen zijn voor een groot deel de hydraulische condities vlak bij de dijk (de nieuwe meetpalen) al bepaald. Het is echter mogelijk dat de standaarduitwerking niet voldoende is (bijvoorbeeld een vaste periode van 20 minuten), maar dat voor de piek van de storm, waarbij overslag is gemeten, opnieuw de ruwe data moet worden omgezet in golfhoogten, perioden, etc., die beter geschikt zijn voor de validatie.

De metingen bij Petten hebben laten zien dat het niet zo eenvoudig is om van het gemeten signaal in een golfoverslagbak een goede schatting te krijgen van de gemeten overslaande volumes per golf en daaruit een gemiddeld overslagdebiet. Kennis van zaken omtrent wat golfoverslag precies is, moet op een juiste manier worden verwerkt in heel specifieke software. Deze combinatie van kennis en ICT is bij Petten pas in een laat stadium op gang gekomen. Met name in de eerste paar jaar wordt verwacht dat hier de nodige inspanning in gaat zitten. Als de routine uitontwikkeld is, dan zal de verwerking van de golfoploop- en overslagmeting een veel meer routinematige klus worden.

---

<sup>2</sup> DONAR staat voor Data Opslag Natte Rijkswaterstaat, en is het centrale opslag-, verwerkings- en presentatiesysteem voor de meetgegevens van de "natte" Rijkswaterstaat (RWS). In deze centrale database worden in principe alle fysische, chemische en biologische meetgegevens van RWS opgeslagen.

De data die worden ingewonnen met de golfoverslagbakken en de golfoploopbaak zullen (in eerste instantie) niet worden opgeslagen in DONAR. Hiervoor moet een aparte opslag worden ontwikkeld, het liefst aansluitend op het DDSC, zoals het waterschap Noorderzijlvest al gebruikt voor de Livedijk XL.

In de eerste paar jaar zal de validatie zelf de nodige aandacht vergen. Daarna is het vooral de metingen van het afgelopen jaar verwerken, waarbij (zeer) extreme stormen meer aandacht zullen krijgen. Aan het eind van de meerjarige veldmetingen wordt de balans opgemaakt. Dan is het tijd om vast te stellen of de dijk(hoogte) inderdaad langer mee kan, of dat toch aan een nieuwe dijkverhoging moet worden gedacht. Van belang is om de onzekerheden omtrent de golfoverslagmodule goed in kaart te brengen. De volgende werkzaamheden worden voorzien:

- Procedure bepalen om de golfcondities bij de dijk voor een zelf vastgestelde tijdsperiode te bepalen.
- Software ontwikkelen (op basis metingen Petten) om de overslaande golfvolumes te bepalen, het gemiddeld overslagdebiet en de oploop.
- Uitwerken hydraulische gegevens, uitwerken overslag/oploop en validatie van de metingen per jaar, inclusief rapportage.
- Eindrapportage omtrent toe te passen onzekerheden bij de golfoverslagmodule in toetsing en ontwerp.

#### *Kosten laboratoriumonderzoek golfoverslag*

Als optie beschouwen we het bouwen van een schaalmodel van de dijk en het uitvoeren van een proevenprogramma.

## 5.5 Data + validatie

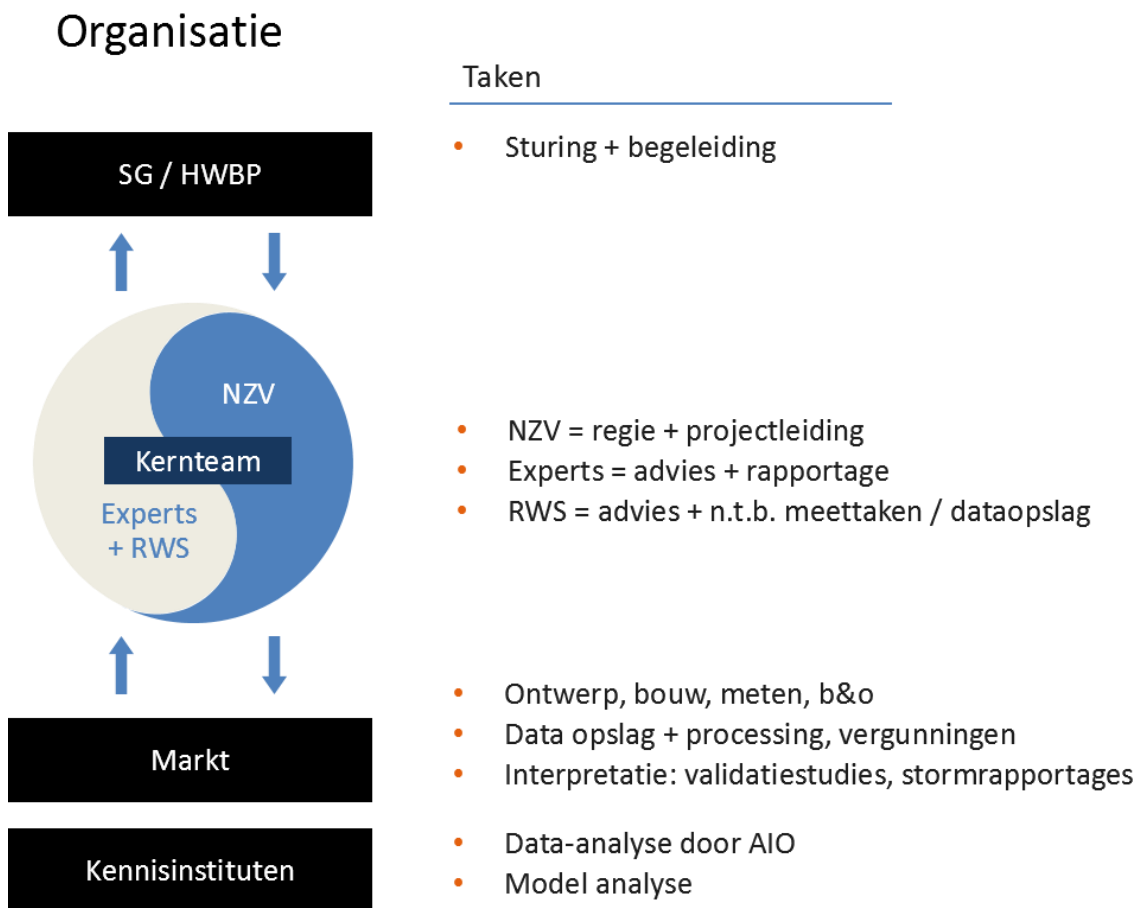
De metingen zoals beschreven in hoofdstukken 2 tot en met 4 resulteren door de jaren heen in grote hoeveelheden data die centraal zijn opgeslagen. Wat gemeten zal worden zijn deels ruwe data. Voor een deel zal er ook al data processing plaatsvinden, met name op de manier zoals dat nu ook gebeurt: golfhoogte, golfperiode, etc. per 20 minuten. Ten behoeve van validatie is het waarschijnlijk dat gegevens opnieuw moeten worden bewerkt. Bijvoorbeeld de golfhoogte en periode gedurende een min of meer constante waterstand van bijvoorbeeld 1 uur of langer. Dit hangt ook af van hoe de validatie plaats vindt. Bij golf- en waterstandsmodellen moet voor validatie de juiste invoer worden bepaald om de validatie mogelijk te maken. En de te valideren parameters moeten goed zijn uitgewerkt. Bij golfoploop en golfoverslag moeten de metingen zelf worden verwerkt tot oploopverdelingen, overslagverdelingen per golf en gemiddeld overslagdebiet. Daarna kan de validatie met de overslagmodule plaatsvinden.

Het ligt in de lijn der verwachtingen dat in de komende 15 jaar golf- en waterstandsmodellen worden verbeterd en mogelijk wel helemaal vernieuwd. Dat werk vormt geen wezenlijk onderdeel van het onderhavige plan. De validatie gaat uit van de modellen die bestaan, tenzij verbetering direct leidt tot een betere validatie. De validatie zelf kan ook resulteren in aanbevelingen om modellen te verbeteren of opnieuw op te zetten. Dit valt buiten de scope van dit onderzoek.

## 6 Projectorganisatie

### 6.1 Organisationschema

Vanaf Q4 - 2016 is het project door het waterschap Noorderzijlvest opgepakt. Voor het project is een projectleider benoemd en een kernteam samengesteld. Tevens is een samenwerking aangegaan met Rijkswaterstaat CIV én WVL als logische partner. Een AIO (via IHE) heeft een eerste verkenning gedaan (samenvatting zie hoofdstuk 4) en het ontwerp van een overslagbak is door een marktpartij voorbereid. In Q1-2017 is een contracteringsstrategie opgezet. Figuur 6.1 geeft het organisationschema weer.



Figuur 6.1. Organisationschema Meerjarige veldmetingen Eems – Dollard

Het waterschap Noorderzijlvest heeft zelf beperkte ervaring op dit vakgebied en zoekt expertise om haar te helpen met de uitvoering van het programma. Het waterschap zorgt zelf voor de regie van het project en inhoudelijke begeleiding vanuit dijktechniek. Een aantal experts van het KNMI, Deltares en Rijkswaterstaat WVL + CIV staan het waterschap terzijde. Naast advisering is RWS ook de beoogde samenwerkingspartner voor een aantal nog nader te bepalen werkzaamheden uit onderdeel A en D, zie figuur 5.1. Voor de onderdelen B, C, D (deels) en E zoekt het waterschap een samenwerkingspartner uit de markt.

Het project betreft een langdurig onderzoeksproject waarbij specifieke kennis nodig is uit de markt. Dit betreft:

- Aantoonbare kennis en ervaring omtrent het opzetten van metingen, het meten en interpreteren van metingen t.b.v. het reduceren van de in dit plan van aanpak genoemde onzekerheden.
- Aantoonbare kennis van hydraulische belastingen.

- Aantoonbare ervaring met ontwikkelen, opzetten en uitvoeren van hydraulische metingen op een dijk.
- Aantoonbare ervaring met integratie en validatie van gecombineerde meteo-, waterbeweging- en golfvoortplantingsmodellen in een actuele (werkelijk gemeten) situatie.

Het waterschap Noorderzijlvest heeft hierbij de voorkeur voor 1 partij of een consortium van partijen met 1 penvoerder.

## 6.2 Inzet Aio-er of promovendus

De opzet, uitvoering en validatie van de metingen zal behoorlijk veel mankracht vergen, waarbij het berekenen zelf en mogelijke verbeteringen van modellen aan de orde zullen komen. Het plan van aanpak voorziet in het opstellen van diverse stormrapportages met inbreng van de juiste kennis (zijn geen standaardrapporten) en het ontwikkelen van software om overslag- en oploopmetingen goed te uit te werken. Hiervoor is langdurig innovatieve denkkraft voor nodig. Deels kan dit door marktpartijen worden gedaan, die de kennis in huis hebben om bestaande modellen op een goede manier bij de validatie toe te passen en die ook voldoende kennis hebben van de gewenste en gemeten invoer en validatie parameters.

Aangezien er diepgaande kennis nodig is voor verdere (model)ontwikkeling, maar ook voor uitwerken en verbeteringen van innovaties (overslag en oploopmeting) is de optie om één of twee promovendi te contracteren.

## 7 Referenties

- Alkyon (2007). Hydromorphological study for EIA of Eemshaven and EIA of fairway to Eemshaven (No A1836R1r5). Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, Marknesse, The Netherlands.
- Alkyon (2008). SWAN hindcast in the Eastern Wadden Sea and Eems-Dollard estuary. Storm of 9 November 2007. Alkyon rapport A2191R1r4.
- Arcadis (2014). Een rekenexperiment voor de Waddenzee, de storm van 5 & 6 december 2013. Rapport C03041.001941.0100, ARCADIS, 2014
- Arcadis (2015a). Een rekenexperiment voor de Waddenzee, 4 stormen van 2006, 2007, 2013 en 2014. Rapport C03041.001941.0200, ARCADIS, 2015
- Arcadis (2015b). Effecten Rijke Dijk Eemshaven Delfzijl, Rapport C03041.002103.0100, ARCADIS, 2015.
- Barends, F. B. J., Dillingh, D., Hanssen, R., & Van Onselen, K. (2008). *Bodemdaling langs de Nederlandse kust*. IOS Press.
- Deltares (2011). Achtergrondrapportage HR2011 voor zee en estuaria. WTI – HR2011. Deltares rapport 1204143-002-HYE-0037.
- Deltares (2014a). SWAN hindcasts Wadden Sea, December 2013. Tidal inlet of Ameland and eastern Wadden Sea. Deltares rapport 1209433-007-HYE-0005.
- Deltares. (2014b). Morfologische analyse t.b.v. versnelde verbetering dijktraject Eemshaven-Delfzijl.
- Deltares (2015a). Inventarisatie golfinformatie zeehavens. Deltares rapport 1220034-001-ZKS-0001.
- Deltares (2015b). Validation of SWAN wave directions. Deltares rapport 1220082-007-HYE-0003.
- Mulder, H. P. J. (1996). *Sedimentbalans Eems-Dollard: een tweedimensionale rekenmethode. Een zand- en slibbalans voor de periode 1985-1990 met het Invers Sediment Transport Model*.
- RIKZ. (2004a). *Bodemdalingstudie Waddenzee 2004: Vragen en onzekerheden opnieuw beschouwd*. Rijkswaterstaat, RIKZ.
- I. Wenneker, B. Spelt, H. Peters en J. de Ronde (2016). Overview of 20 years of field measurements in the coastal zone and at the Petten sea dike in the Netherlands. Coastal Engineering 109 (2016), 96 – 113.
- Van der Meer Consulting, Arcadis, Deltares, Etrometa, Infram, TU Delft, Unesco-IHE (2016). Plan van aanpak veldmetingen Eemshaven – Delfzijl in opdracht van Waterschap Noorderzijlvest.

## Bijlage Veldmetingen – validatie WTI-modellentrein

Prof. dr. ir. J.W. van der Meer – UNESCO-IHE en Van der Meer Consulting bv

Prof. dr. ir. S.N. Jonkman – TUDelft

Prof. dr. ir. J.A. Roelvink – UNESCO-IHE

Prof. dr. ir. A.J.H.M. Reniers - TUDelft

28 mei 2015

### **Executive summary**

Nederland staat de komende jaren voor een forse versterkingsopgave van onze dijken en andere waterkeringen. Golfcondities en golfoverslag spelen bij storm gedreven keringen een belangrijke rol bij de bepaling van de kruinhoogte van de dijk en dus bij de kosten van versterking. Nieuwe inzichten geven aan dat lange golven op relatief ondiepe vooroevers mogelijk een belangrijke rol spelen bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden, die nodig zijn om de dijkhoogte te bepalen. Deze inzichten moeten gevalideerd worden, wat uitstekend kan door veldmetingen uit te voeren. In principe zijn laboratoriummetingen hiervoor minder geschikt. Op middellange termijn zou dit moeten leiden tot het bijdragen aan kennis over benodigde dijkversterkingen en mogelijk bijdragen aan besparingen en beter inzicht in de veiligheid van de dijken.

Bijna twintig jaar lang zijn bij Petten metingen naar hydraulische fenomenen uitgevoerd en deze hebben een schat aan informatie en ervaring opgeleverd. De natuur laat vaak kanten zien, die in een geschematiseerde laboratoriumopstelling niet naar voren komen. Petten heeft ook goede validatiepunten opgeleverd. De ervaring van Petten kan worden gebruikt bij nieuw op te zetten metingen.

Recentelijk is komen vast te staan dat lange golfenergie op relatief ondiepe voorlanden belangrijk kan zijn bij de bepaling van de golfcondities bij de dijk en de daaruit voortvloeiende golfoverslag (en dus de dijkhoogte). Het effect van lange golfenergie zit niet in de huidige Hydraulische Randvoorwaarden. Nieuwe modellen als SWASH of XBeach zouden aan SWAN gekoppeld kunnen worden om betere golfcondities bij de dijk te kunnen leveren. Validatie is uiterst zinvol en kan worden gedaan door een veldmeetcampagne op te zetten.

De keuze en locatie van meetinstrumenten zou opgezet moeten worden vanuit de modellen zelf, zodat de modellen op de juiste wijze gevalideerd kunnen worden. Ook past hierin een eerste opstelling om nieuwe meettechnieken als radar en PUV te vergelijken met bestaande technieken en daarna te kiezen voor de gewenste meetmethode. In eerste instantie zou bij bestaande meetcampagnes, zoals de POV Wadden aangesloten kunnen worden. Daarna is het van belang dat er meer meetlocaties in Nederland komen die elk een specifiek watersysteem dekken, zoals de Noord-Hollandse kust, de waddenkust, het IJsselmeer en de estuaria in Zeeland.

Dit plan is langzamerhand ontstaan door verschillende contacten tussen bedrijfsleven, Rijkswaterstaat en universiteiten. Het plan heeft vorm gekregen door de maatschappelijke verantwoordelijkheid van universiteiten om nieuwe inzichten, mogelijk ontbrekende kennis en het effect daarvan voor de maatschappij te duiden en een weg voor te stellen tot een oplossing. Het plan wordt daarom gedragen door vier hoogleraren aan UNESCO-IHE en TU Delft. Het doel is uiteindelijk om verantwoord en met het juiste inzicht, kosteneffectief en robuust, de toekomstige versterkingsopgave te kunnen uitvoeren.