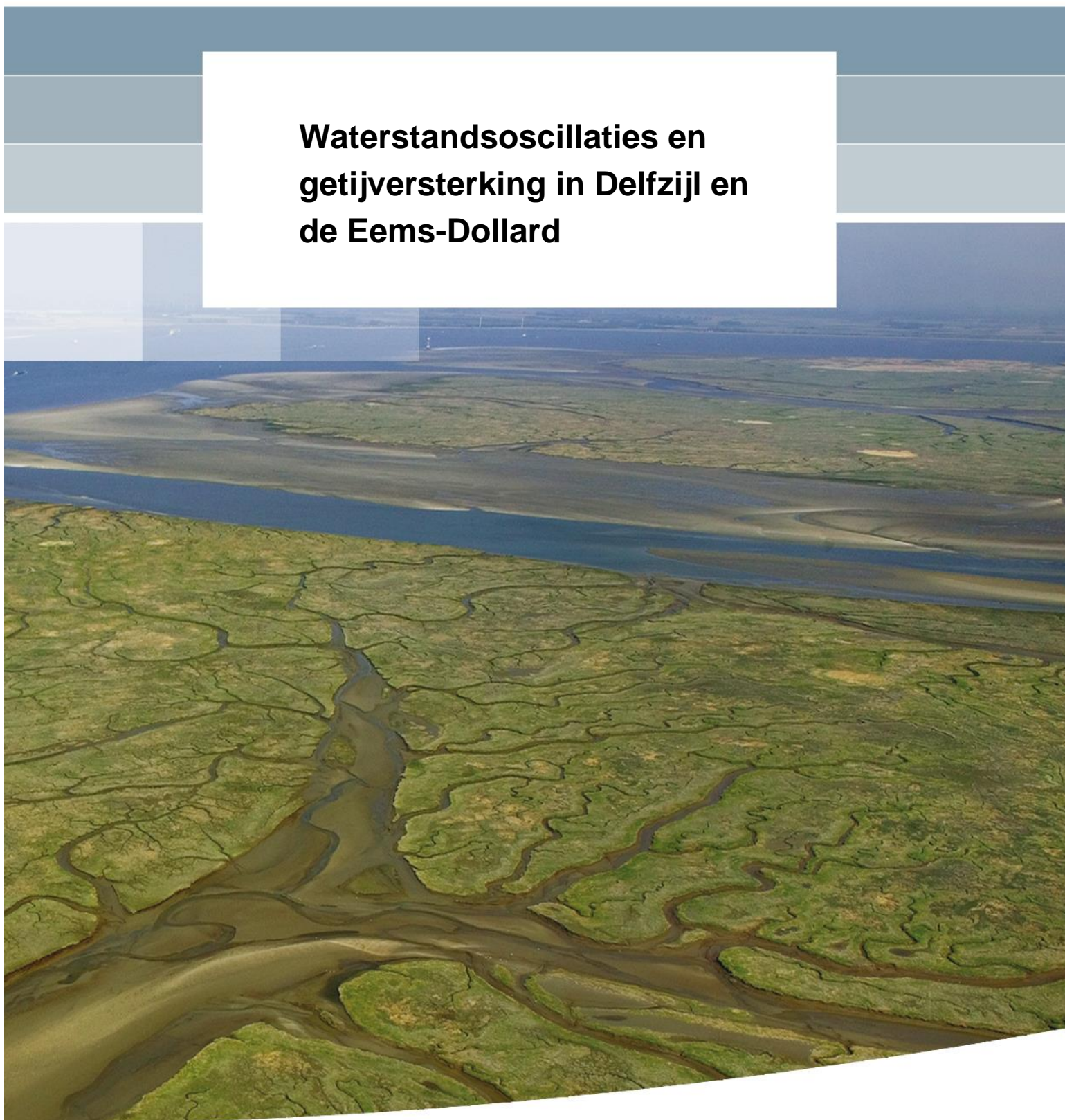


**Waterstandsoscillaties en  
getijversterking in Delfzijl en  
de Eems-Dollard**





# **Waterstandsoscillaties en getijversterking in Delfzijl en de Eems-Dollard**

Firmijn Zijl  
Deepak Vatvani

11200537-013



**Titel**

Waterstandsoscillaties en getijversterking in Delfzijl en de Eems-Dollard

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Marcel Bottema (RWS-WVL)	11200537-013	11200537-013-ZWS-0002	35

**Trefwoorden**

Stormopzet, semi-periodieke oscillaties, Delfzijl, getij-opzet interactie

**Samenvatting**

In het gemeten waterstanden en stormopzet bij Delfzijl werd tijdens de 5-6 december 2013 Sinterklaasstorm een semi-periodiek signaal waargenomen met een viermaal daagse periode. In deze studie wordt dit signaal verder beschreven door het beschouwen van meerdere stormen en meetlocaties in de Eems-Dollard. Hierbij wordt naast harmonische analyse gebruik gemaakt van wavelet analyse.

Om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van het optreden van semi-periodieke oscillaties tijdens stormen zijn een tweetal experimenten uitgevoerd. In het eerste experiment wordt gekeken in hoeverre dit gedrag met een eenvoudig lineair model beschreven kan worden. Hieruit blijkt dat:

- het semi-periodieke gedrag van de opzet dat tijdens stormen optreedt wordt gereproduceerd door het lineaire model,
- het toevoegen van een eenvoudige benadering van niet-lineaire getij-opzet interactie bijdraagt aan de kwaliteit van de opzet representatie,
- ook zonder niet-lineaire component wordt het quasi-periodieke signaal in de opzet al deels beschreven. Dit betekent dat het semi-periodiek gedrag ook in de opzet van Huijbertgat aanwezig is (en versterkt in Delfzijl doorkomt),
- het quasi-periodieke signaal in de opzet in tegenfase is met het viermaal daagse getij signaal. Dit wijst erop dat de aanwezigheid van de opzet een dempend effect heeft op de generatie van hogere harmonische getij componenten.

In het tweede experiment wordt de respons van het Eems-Dollard systeem in kaart gebracht met behulp van een model dat geëxciteerd wordt met een range aan frequenties. Hieruit blijkt dat:

- het 4-maal daags en hoger frequent signaal afkomstig van zee wordt versterkt door aanwezigheid van de opzet.
- de lokale opwekking van  $M_4$  uit  $M_2$  significant zwakker wordt.

Het dempen van het viermaal daagse signaal tijdens hoge opzetten komt overeen met de bevindingen uit het eerste experiment. Deze resultaten tonen echter ook een iets sterkere amplificatie van het  $M_4$  randsignaal. Zwakkere lokale opwekking van  $M_4$  heeft in de praktijk blijkbaar meer impact. De resultaten uit beide experimenten duiden op niet-lineaire interactie als oorzaak van het semi-periodiek gedrag in de opzet tijdens stormen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
final	dec. 2017	Firmijn Zijl		Martin Verlaan		Frank Hoozemans	
		Deepak Vatvani					

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>3</b>
1.1	Doelstelling en aanpak	3
1.2	Activiteiten	3
1.3	Indeling van het rapport	4
<b>2</b>	<b>Uitvoering</b>	<b>5</b>
2.1	Keuze voor de te analyseren stormen	5
2.2	Station locaties	5
2.3	Literatuur review	5
2.4	Harmonische analyse	6
2.5	Wavelet analyse van de opzet	9
2.6	Tijdstip van opzet in relatie tot de fase van het getij	16
2.7	Samenvatting	19
<b>3</b>	<b>Hypotheses</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Experimenten</b>	<b>23</b>
4.1	Inleiding	23
4.2	Experiment 1: niet-lineaire getij-opzet interactie	23
4.3	Experiment 2: respons op een chirp-signaal	27
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>33</b>
5.1	Conclusie	33
5.2	Aanbevelingen	34
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>35</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Storm opzet op alle relevante stations</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Wavelet analyse resultaten op alle stations</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Vergelijking empirisch model met DCSMv6-ZUNOV4</b>	<b>C-1</b>
	<b>Memo 1: Evaluation of the North Sea tide-surge models during the 5-6 December 2013 Sinterklaas storm</b>	
	<b>Memo 2: Improved DCSMv6-ECMWF meteorological forcing</b>	
	<b>Memo 3: On the impact of hydrodynamic model resolution on water levels</b>	

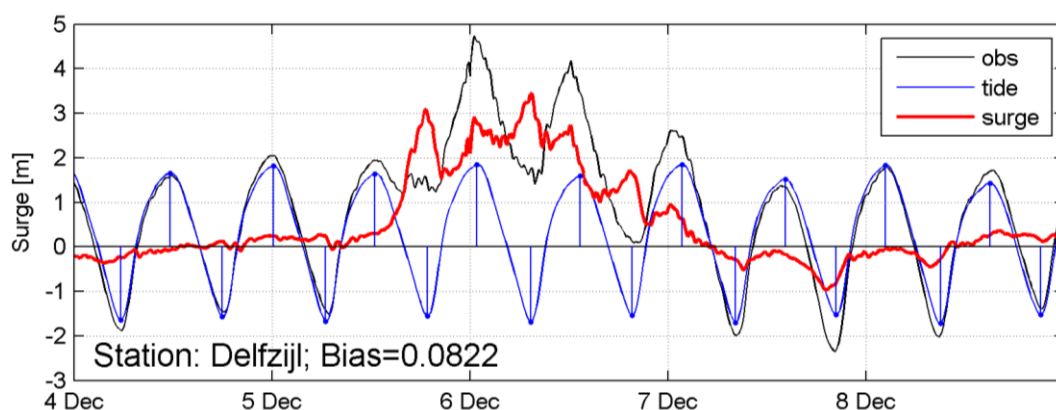




## 1 Introductie

De gemeten waterstanden te Delfzijl tijdens en na de Sinterklaasstorm (5-6 december 2013) (Figuur 1.1) lijken het volgende gedrag te laten zien [1], [2], [3], [4]:

- versterking van het 4-maal daags getij tijdens storm;
- versterking van het 2-maal daags signaal na en eventueel tijdens de storm.



Figuur 1.1 Gemeten waterstand en stormopzet in Delfzijl tijdens de december 2013 Sinterklaasstorm

De hierboven genoemde oscillaties worden goed weergegeven door het operationele getij-opzet model DCSMv6-ZUNOV4. Dit betekent dat de oorzaak gezocht moet worden in effecten die in dit model gerepresenteerd worden. Interactie met korte golven wordt in dit model bijvoorbeeld niet meegenomen en is daarmee dus ook geen oorzaak voor het hier beschouwde semi-periodieke gedrag. De oorzaak en of verklaring voor de oscillaties tijdens de storm is, ondanks dat deze reproduceerbaar is, niettemin nog onduidelijk. Om dit verschijnsel verder onder de loep te nemen is een klein onderzoeksproject in het kader van KPP-VOW gedefinieerd. De resultaten hiervan worden in dit rapport beschreven.

### 1.1 Doelstelling en aanpak

Het doel van dit deelproject is het in kaart brengen en verklaren van veranderingen in het (semi-)periodiek gedrag van de waterstanden in de Eems-Dollard tijdens stormen. Dit deelproject bouwt voort op eerdere analyses [1] en [3] van de Sinterklaasstorm door:

- specifieke focus te leggen op de Eems-Dollard, o.a. door het beschouwen van additionele metingen in de Eems-Dollard (7 Duitse locaties),
- beschouwing van aanvullende stormen (bijvoorbeeld november 2006, november 2007, februari/maart 2008, oktober 2014),
- te kijken naar vooral het gedrag van het (semi-)periodiek opzetsignaal tijdens stormen.

### 1.2 Activiteiten

Om de gestelde doelstelling te bereiken zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

1. Fenomenologische beschrijving: beknopte analyse van verandering in semi-periodiek gedrag tijdens een aantal stormen m.b.v. Wavelet analyse<sup>1</sup>
2. Beknopt literatuuronderzoek

<sup>1</sup> hierbij is het uitwerken en stroomlijnen van bestaande (Matlab) scripts nodig

3. Opstellen van onderzoekshypotheses die voornoemd verschijnsel kunnen verklaren
4. Afstropen van onderzoekshypotheses aan de hand van literatuuronderzoek en/of expert judgement
5. Uitwerking van een of meerdere hypothesen met behulp van tenminste 1 test berekening
6. Beknopte rapportage

### 1.3 Indeling van het rapport

Hoofdstuk 2 geeft een beknopte beschrijving van de uitgevoerde activiteiten en geeft toelichting op sommige keuzes die gemaakt zijn in deze studie. Dit wordt gevolgd door hoofdstuk 3 met enkele hypothesen voor mogelijke verklaringen van de waargenomen semi-periodieke oscillaties in de opzet. Hoofdstuk 4 bevat de beschrijving en resultaten van een tweetal experimenten dat is uitgevoerd om bovengenoemde hypothesen te ontcrachten of staven. Hoofdstuk 5 bevat conclusies en aanbevelingen gevolgd door referentielijst in Hoofdstuk 6.

Naast Appendices met bijkomende resultaten van deze studie zijn aan het einde van dit rapport zijn een drietal memo's toegevoegd ( [1], [2] en [4]) waarnaar in de tekst verwezen wordt.

## 2 Uitvoering

### 2.1 Keuze voor de te analyseren stormen

De analyses zijn uitgevoerd, voor de 5-6 december 2013 Sinterklaasstorm en voor de belangrijkste stormen in de jaren 2006, 2007, 2008, 2014 (zie Tabel 2.1). De gekozen stormperiodes omvatten 5 van de 6 stormen met de grootste scheve opzet te Delfzijl in de periode 1996 tot en met 2015.

Tabel 2.1 Geanalyseerde stormen in deze studie en de bijbehorende periode

no.	Beschouwde periode
1	30/10/2006 – 03/11/2006
2	08/11/2007 – 13/11/2007
3	28/02/2008 – 04/03/2008
4	04/12/2013 – 09/12/2013
5	20/10/2014 – 25/10/2014

### 2.2 Station locaties

In de figuur hieronder worden de locaties van alle stations (4 Nederlandse en 7 Duitse stations) weergegeven. Op deze locaties worden zowel harmonische als wavelet analyses uitgevoerd. De analyse periodes voor de stations in Duitsland zijn beperkt tot de stormen van 2013 en 2014 omdat meetgegevens in de Duitse stations in de andere stormperiode niet beschikbaar zijn.



Figuur 2.1 Locaties van de beschouwde meetstations.

### 2.3 Literatuur review

Bij de aanvang van deze studie is er literatuur geselecteerd voor de beknopte review: Horsburgh (2007) [5] en van Maren (2015) [6]. Later is ook een rapport Alkyon (2008) [7] erbij gekomen. Uit deze drie heeft alleen die van Horsburgh (2007) raakvlakken met het

onderwerp uit deze studie. Hij heeft langjarige data uit 5 kuststations<sup>2</sup> in Engeland geanalyseerd en zijn belangrijkste conclusies is:

- de opzetpiek treedt op 3 tot 5 uren voor dichtstbijzijnd hoogwater,
- in kleinere mate is er ook opzetpiek geconstateerd 1-2 uur voor hoogwater,
- fase verschuiving van het getij door de aanwezigheid van meteorologische opzet verklaart de aanwezigheid van met name de dubbeldaagse component in de opzet,
- er is geen 4 maal daagse component gevonden in de opzet (de amplitudes van het viermaaldaagse getij zijn in alle stations überhaupt heel erg klein)

De studie in Waddenzee door Alkyon [7], heeft ten doel een versimpeling van de windvelden voor het genereren van stormopzet als een alternatief van complexe maar reële windvelden. In het rapport wordt geconcludeerd dat complexe geometrie in interactie met de atmosferische aansturing leidt tot een complexe waterstandrespons.

De publicatie van van Maren [6] focust op de invloed van fijn slib en verlaging van bodemweerstand op het gedrag van getij in de rivier Eems. Hij constateert dat er getijamplificatie optreedt door de verlaging van de bodemwrijving en dientengevolge minder dissipatie in het systeem. De amplificatie speelt echter op veel langere tijdschalen dan de hier beschouwde verandering tijden en na stormen.

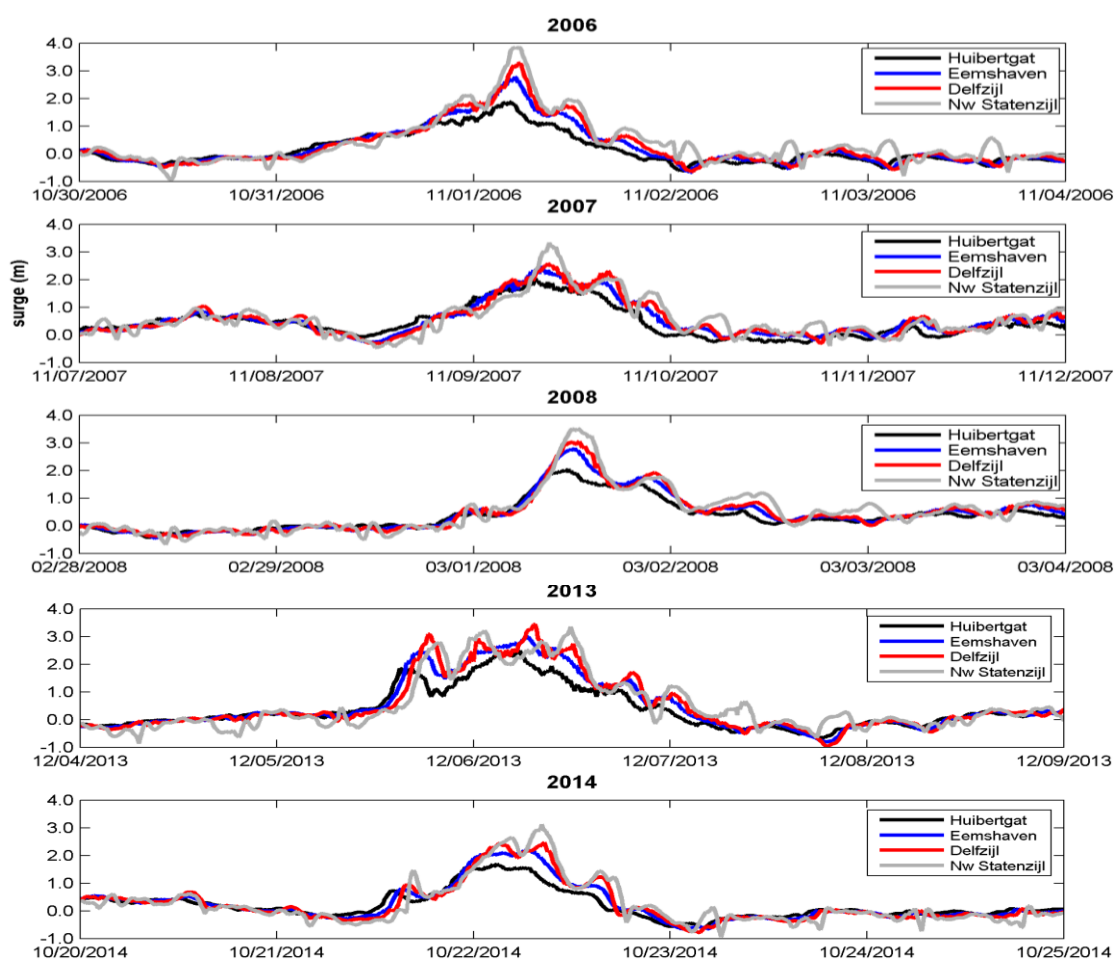
## 2.4 Harmonische analyse

De stormopzet in de hier beschouwde stations is bepaald door het getij van de gemeten waterstanden af te trekken. Het getij is bepaald door harmonische analyse van de meetdata, met een analyseperiode van 1 jaar. De analyse is uitgevoerd voor een set van 118 getij componenten gebruikt [1]. De opzet wordt gepresenteerd voor een periode van 5 dagen (vlak voor en vlak na de storm). Voor de jaren 2006, 2007 en 2008 worden slechts de opzet op de Nederlandse stations gepresenteerd wegens gebrek aan data voor de stations in Duitsland.

Een selectie van resultaten voor de Nederlandse meetlocaties wordt getoond in Figuur 2.2. De gemeten waterstanden, en de waterstandsopzet voor alle individuele stations en voor alle stormen zijn gepresenteerd in Bijlage A.

---

<sup>2</sup> Alle stations liggen direct aan de kust: Sheerness, Cromer, Immingham, North Shields en Aberdeen.



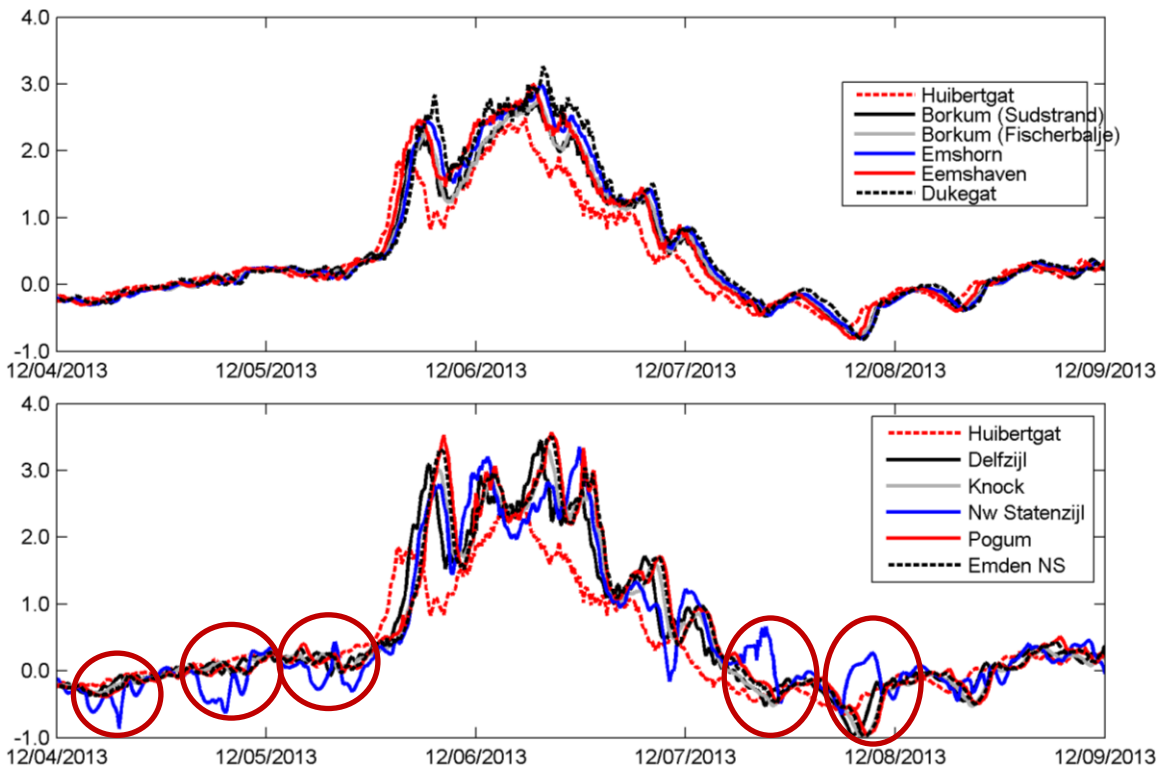
Figuur 2.2 Gemeten stormopzet gedurende verschillende stormen voor de 5 Nederlandse stations (zie overzicht van de locaties in Figuur 2.1)

Voor alle stormen kunnen we zien dat het verloop van de opzet vanaf station Huibertgat (buitengaats) naar stations in de Wadden en EemsDollard vergelijkbaar is. De opzet in de stations in de Waddenzee lijkt het verloop van de opzet in Huibertgat te volgen, waarbij de amplitude toeneemt en de fase groter wordt. De hoogte van de opzet neemt toe maar ook de oscillatie amplitudes voor golven met een periode van enkele uren tot 12 uur. De oscillaties zijn het sterkst in stations in de Eems-Dollard en het lijkt erop dat de oscillaties meer zichtbaar wordt naarmate de opzet hoger is.

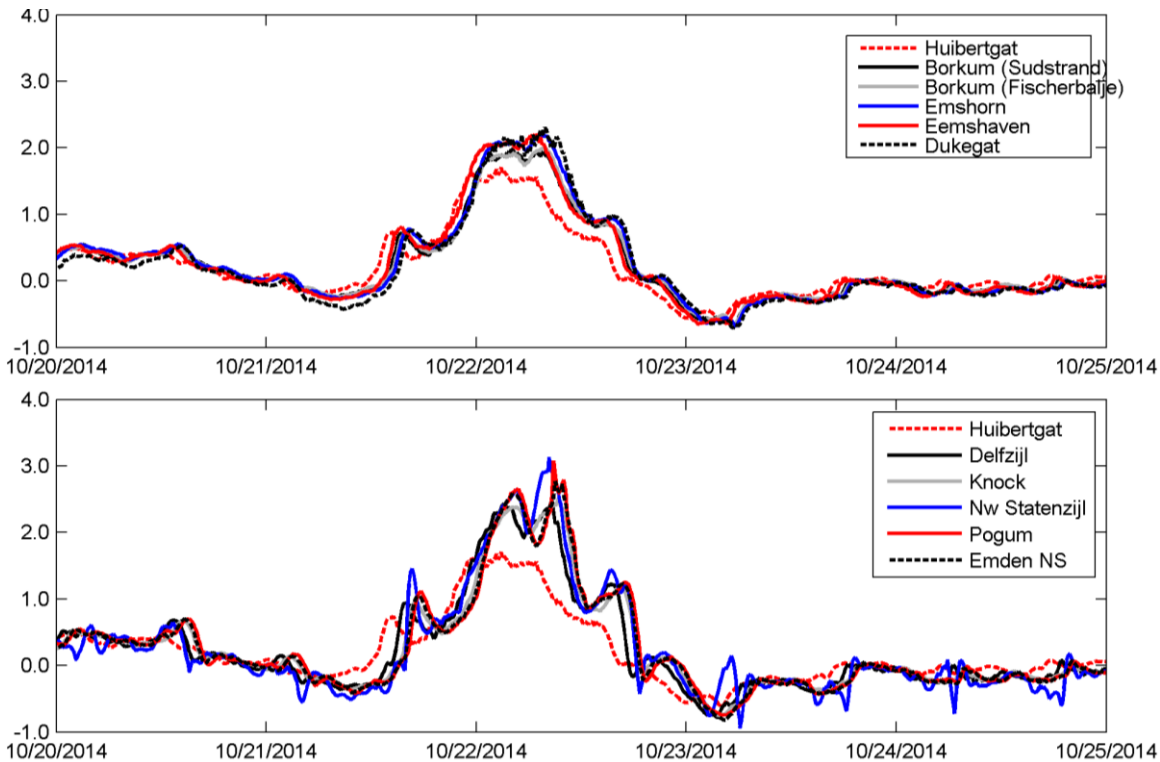
Tijdens de meeste stormen is vooral een versterking van het 4-maal daagse signaal zichtbaar. De storm van maart 2008 vormt een uitzondering, waarbij voornamelijk 2-maal daags signaal zichtbaar is.

In station Nieuwe Stanzijl, als enige in de groep, zien we bij alle stormen ook oscillaties, die niet worden gereproduceerd in andere stations (zie b.v. omcirkelde gebieden in de figuur hieronder). Uit nadere analyse blijkt dat deze zijn veroorzaakt door droogvallende platen<sup>3</sup> tijdens laagwater in (de buurt van) het station.

<sup>3</sup> Al dan niet beïnvloedt door het debiet door de spuisluis.



Figuur 2.3 Stormopzet gedurende 2013 storm voor 11 stations in de regio (voor overzicht van de locaties zie Figuur 2.2).



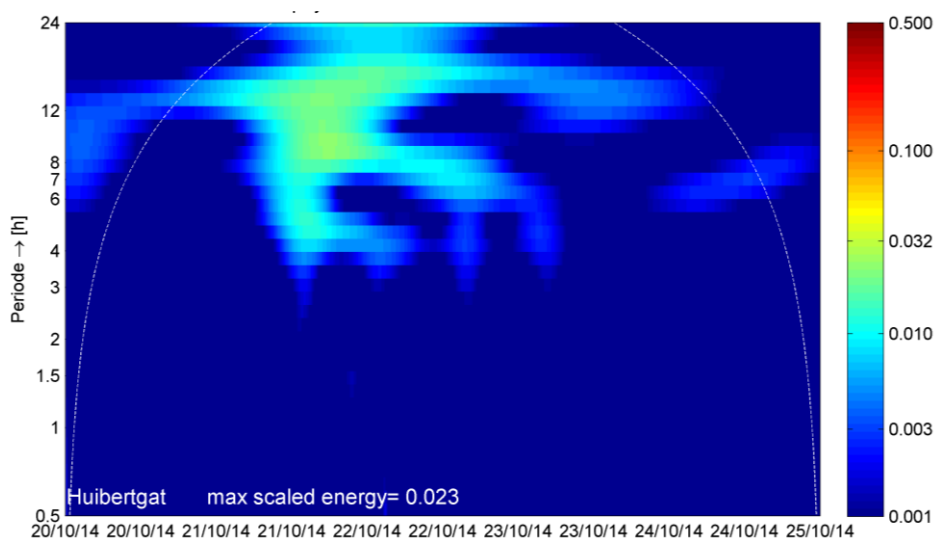
Figuur 2.4 Stormopzet gedurende 2014 storm voor 11 stations in de regio (voor overzicht van de locaties zie Figuur 2.2).

## 2.5 Wavelet analyse van de opzet

Ten behoeve van het analyseren van de semi-periodieke oscillatie verschijnselen zijn wavelet-analyses uitgevoerd op de gemeten opzet. Wavelet analyse is afgeleid van de Fouriertransformatie, waarbij tijdsignalen omgezet kunnen worden naar (energie-) frequentie spectra voor verschillende golfperiodes. Fourier spectra geven echter geen informatie over de variatie van de energie over het beschouwde tijdsinterval; een wavelet-analyse doet dit wel en is te beschouwen als een bijzondere vorm van een Fourieranalyse [8].

Door de analyse alleen te richten op de opzetsignalen, waarbij het getij van de totale waterstand is afgetrokken, kunnen we getij energie buiten beschouwing laten. De gekozen periodeduur voor de wavelet analyse is 120 uur (5 dagen) en deze is zodanig dat het moment van de hoogste opzet ongeveer in het midden van de analyse periode zit.

De gepresenteerde resultaten van de wavelet analyse bestaan uit contouren van golfenergie in de bijbehorende golfperiode, als functie van de tijd. Het contourinterval (log2 van de energie waarde tussen 0.001 en 0.5) is zodanig gekozen dat de respons in buitengaats station Huibertgat en stations in de Wadden nog net zichtbaar is (zie voorbeeld figuur hier onder). De getoonde periode is aan de bovengrens beperkt tot 24 uur<sup>4</sup> en aan de ondergrens tot 0.5 uur. De witte stippellijn in de figuur geeft de betrouwbaarheidsgrens van de wavelet analyse. Voor meer details van de wavelet analyse methode die hier is toegepast verwijzen we naar [9].

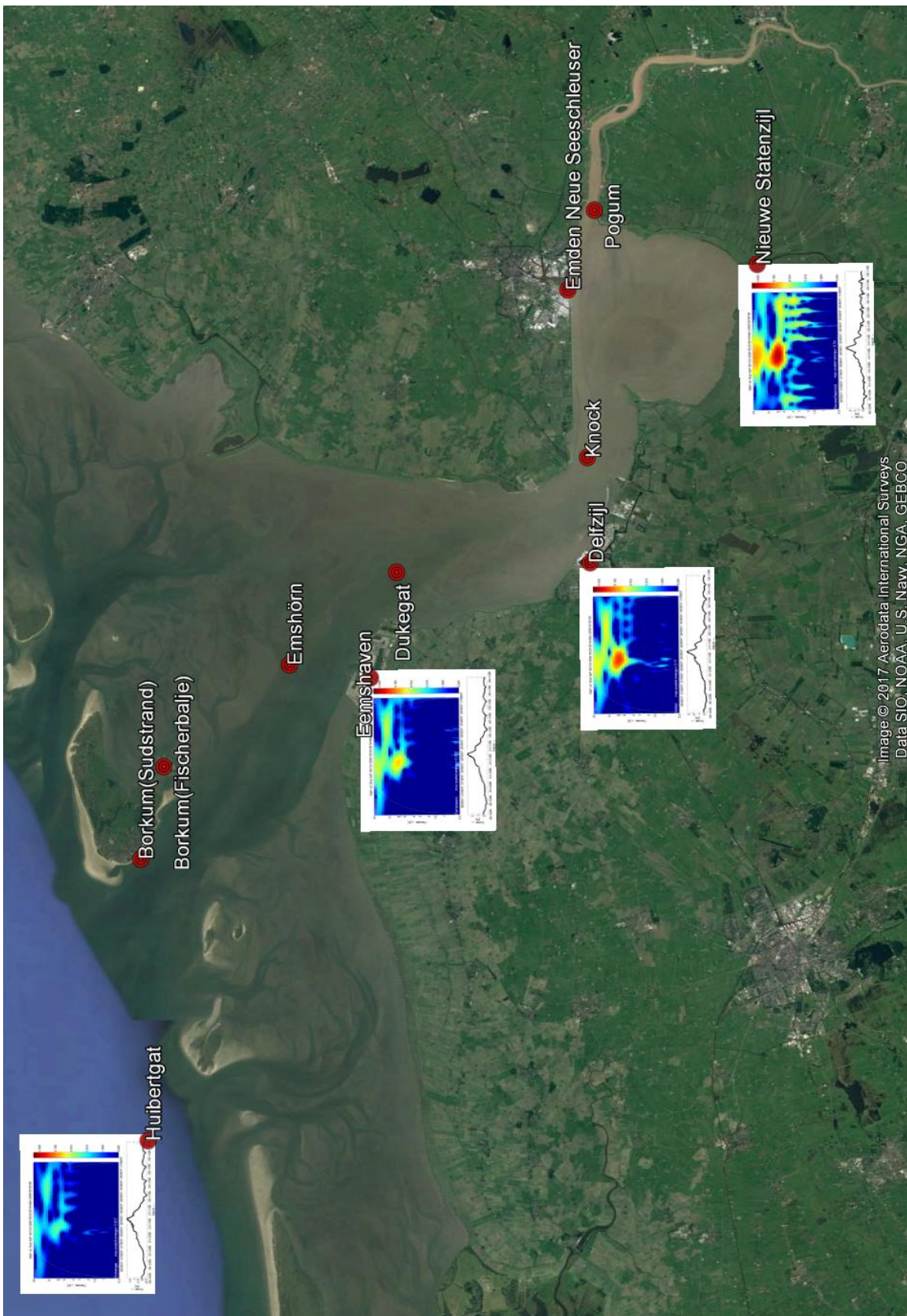


Figuur 2.5 Voorbeeld Wavelet analyseresultaat van de oktober2014 storm (geschaalde energie) in Huibertgat.

Figuren van de wavelet analyses voor alle beschouwde stormperiodes en voor alle beschouwde stations zijn gegeven in Bijlage B. Hieronder geven we een ruimtelijk overzicht van de resultaten, waarmee (ruimtelijke) trends gemakkelijk te detecteren vallen.

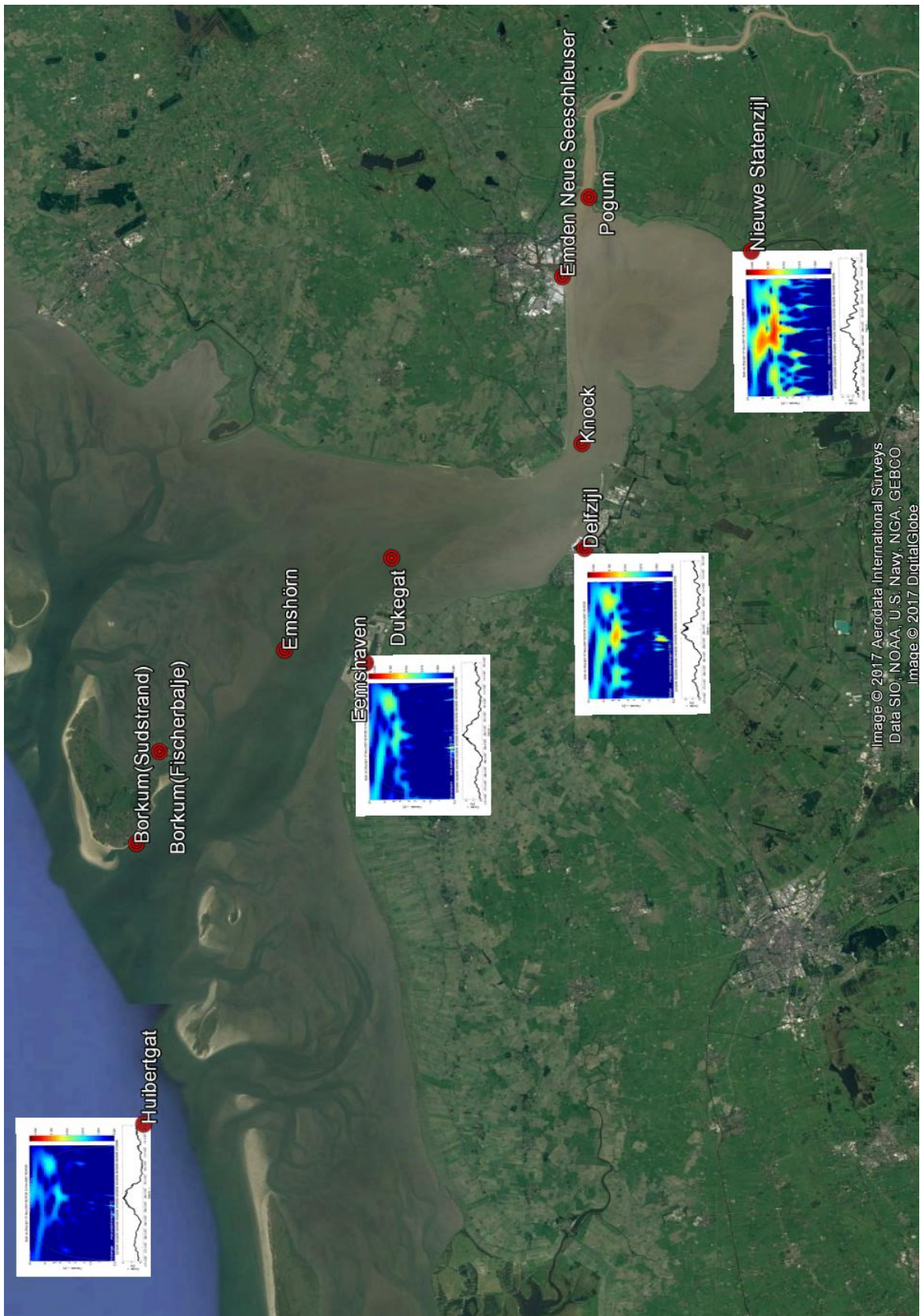
<sup>4</sup> Dit betekent dat (met name) boven de 24 uur periode er nog golfsignalen aanwezig zijn met hogere energie waarde.





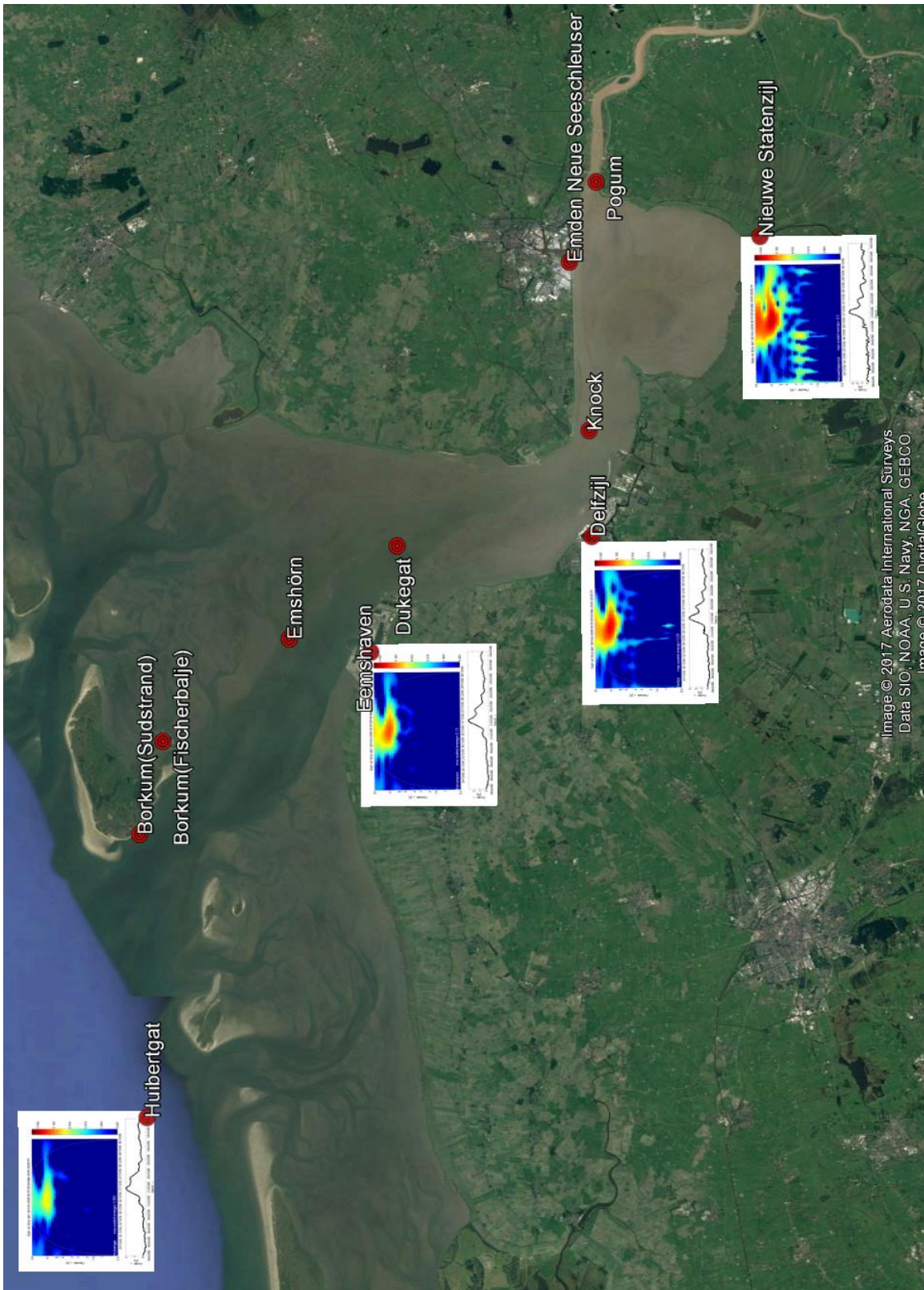
Figuur 2.6 Overzicht resultaat wavelet analyse voor de 2006 storm als functie van de tijd in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.





Figuur 2.7 Overzicht resultaat wavelet analyse voor de 2007 storm als functie van de tijd in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.





Figuur 2.8 Overzicht resultaat wavelet analyse voor de 2008 storm als functie van de tijd in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.



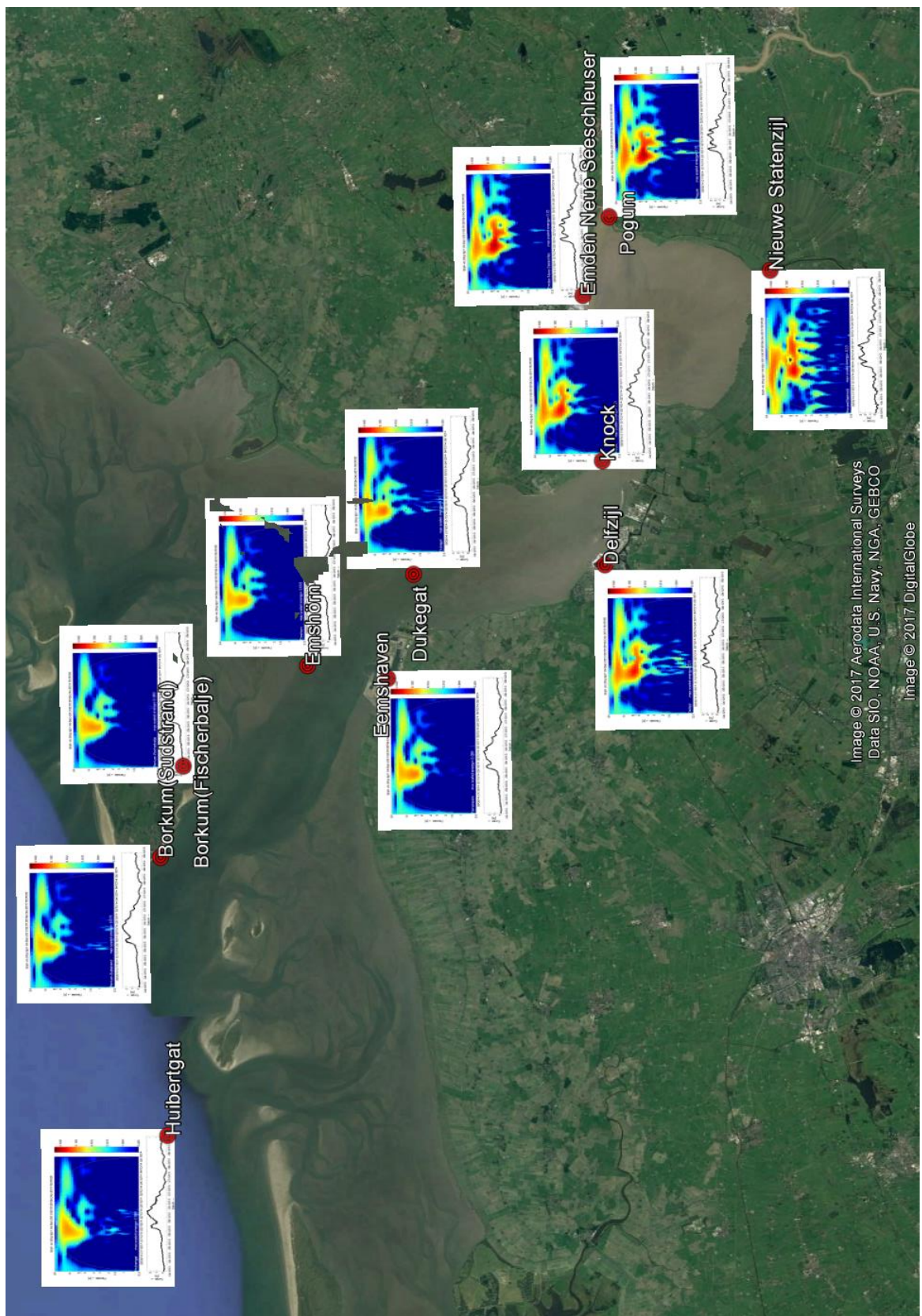
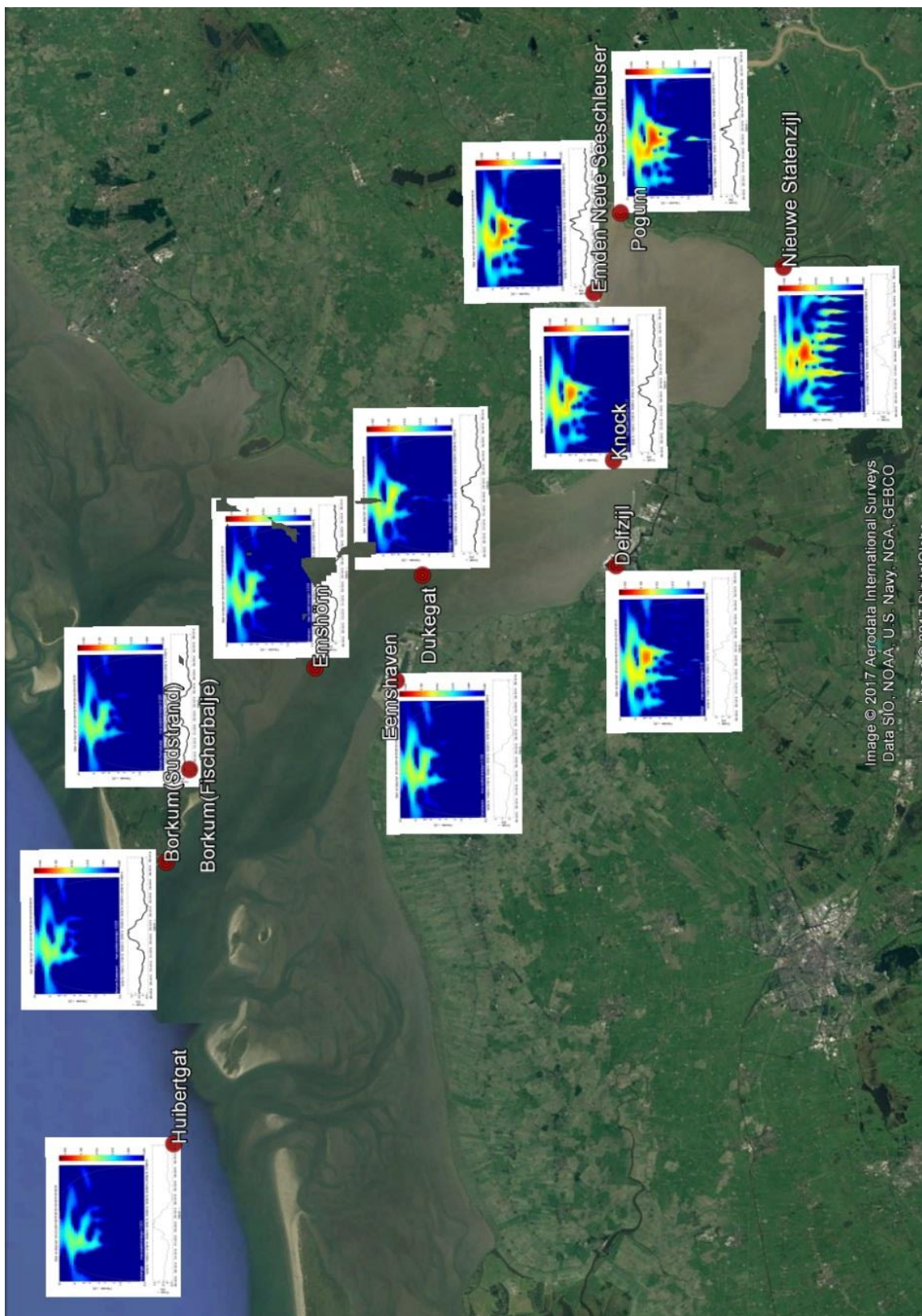


Image © 2017 Aerodata International Surveys  
Data: SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
Image © 2017 DigitalGlobe

Figuur 2.9 Overzicht resultaat wavelet analyse voor de 2013 als functie van de tijd in alle 11 stations

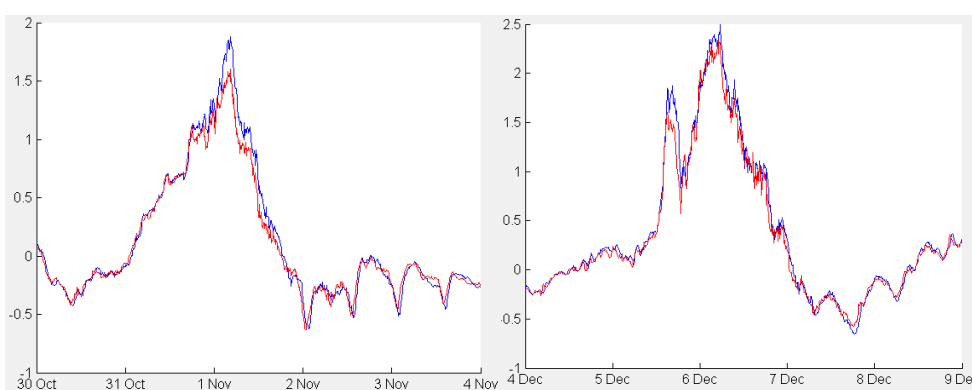




Figuur 2.10 Overzicht Wavelet analyse 2013 en 2014 storm resultaat (geschaalde energie) als functie van de tijd in de 11 stations

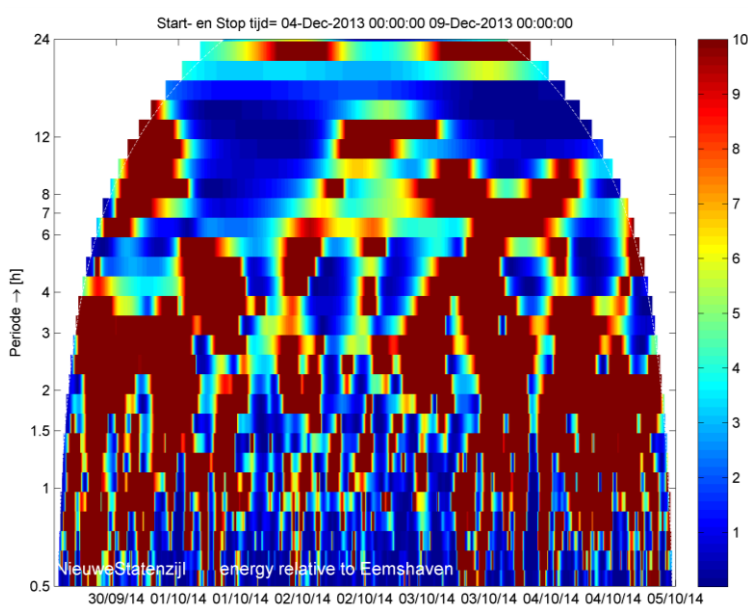
Er is ook overwogen om een relatieve wavelet plot te maken, waarbij de respons op elk station wordt gedeeld door de respons in een station dat niet door lokale fenomenen in de Eems-Dollard beïnvloed wordt. Op deze manier kan de versterking of verzwakking van de respons op elk station ten opzichte van dit referentiestation bepaald worden.

Om te bepalen of Huibertgat als referentie station gebruikt is de opzet ter plaatse vergeleken met de opzet in Wierumergonden, een station dat > 100km verder westwaarts ligt. Uit deze vergelijking (Figuur 2.11) blijkt dat de opzet in beide stations een vergelijkbaar verloop en magnitude heeft. De getoonde figuren gelden voor de stormperiodes in 2006 en 2013, maar dit gedrag zien we ook voor de opzet tijdens andere stormen (hier niet getoond). Hieruit wordt geconcludeerd dat de stormopzet in Huibertgat gezien kan worden als een signaal dat niet is beïnvloed door de respons van Eems Dollard gedurende de storm.



Figuur 2.11 Stormopzet (m) in Wierumergonden (rood) en Huibertgat (blauw) in 2006 (links) en 2013 (rechts)

De resulterende relatieve plots (zie voorbeeld in Figuur 2.12) zijn echter te chaotisch om er een zinnige analyse mee te doen. Voor veel golf periodes is de respons in Eemshaven zeer klein. Als we de respons van andere stations hiermee delen dan krijgen we een heel groot getal.



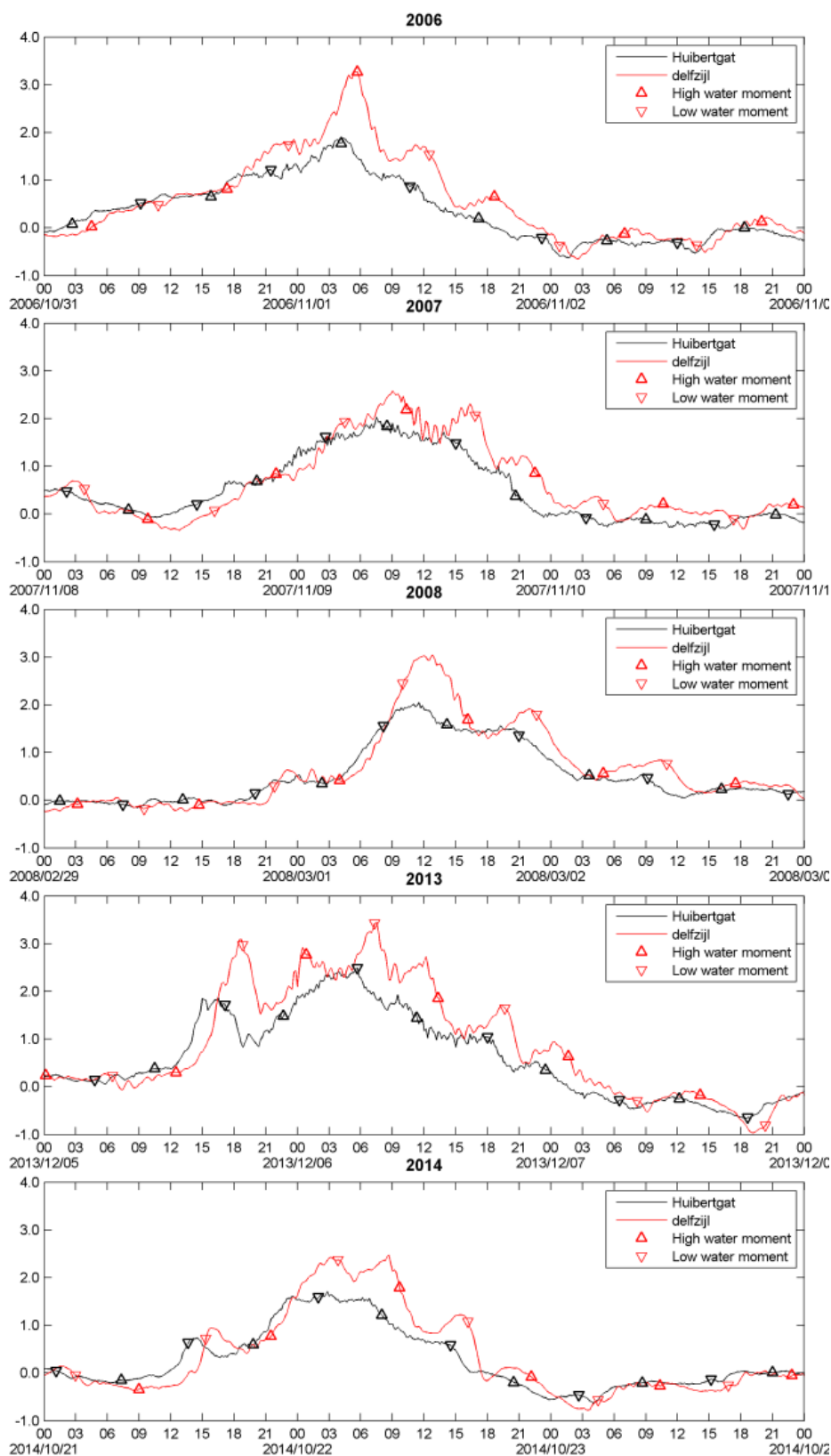
Figuur 2.12 Voorbeeld van een relatieve wavelet energie plot in Nieuwe Statenzijl t.o.v. Eemshaven.

Uit bovenstaande figuren en alle figuren in Annex B, kunnen we concluderen dat tijdens de meeste van de beschouwde stormen is er een toename van de golfenergie met een 4-maal daagse karakter (6-8 uur periode). Tijdens de maart 2008 storm ontbreekt de viermaal daagse golfcomponent; hier wordt vooral de energie met een dubbel-daagse periode (12-14 uur) versterkt. In 2006 en 2008 zien we ook dat enkel daagse golf worden versterkt maar die versterking is echter een orde kleiner (de kleuren in de figuren zijn weergegeven op een logaritmisch schaal).

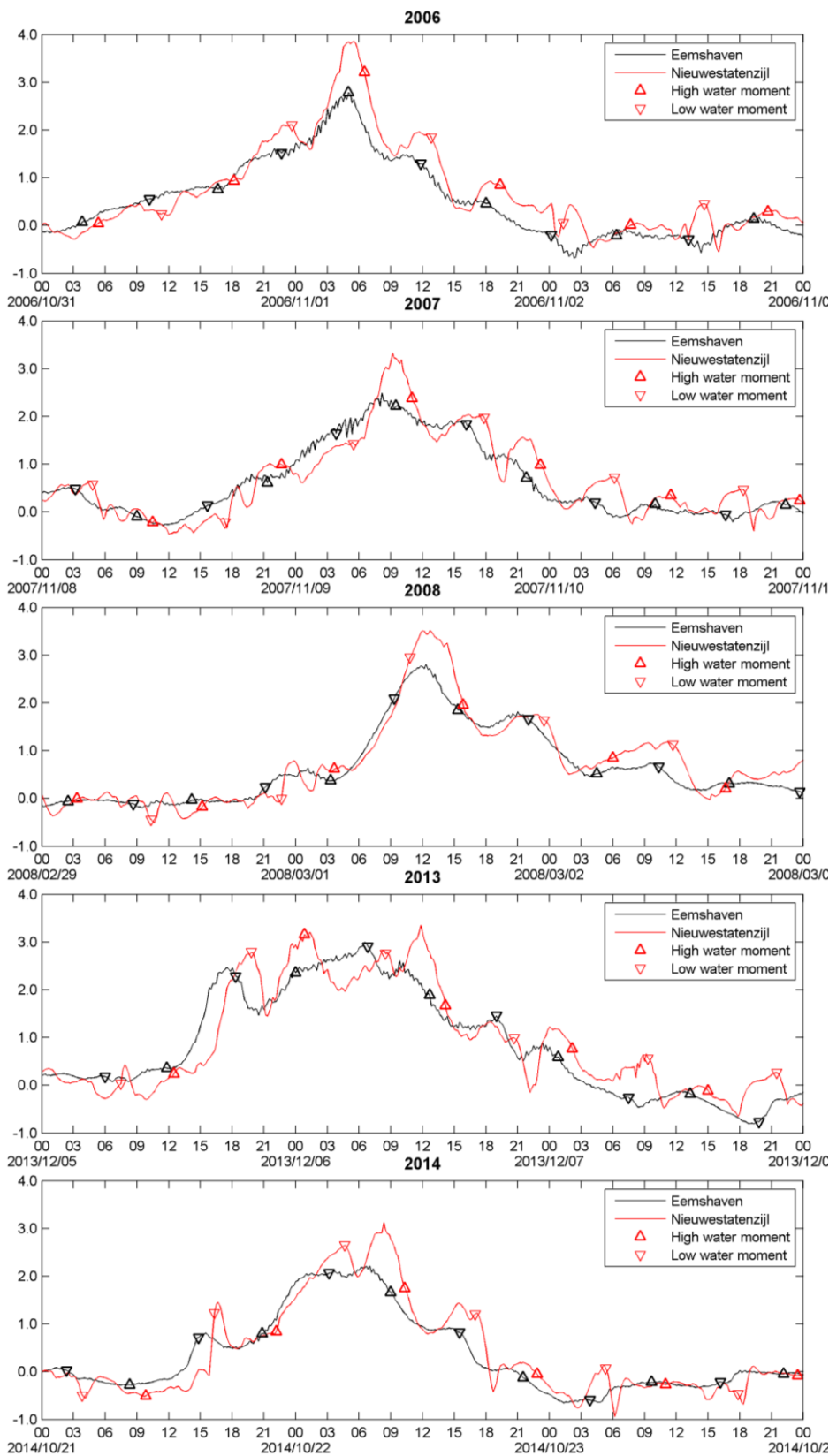
In station Nieuwe Statenzijl zien we ook twee keer per dag pieken in energie met periodes tussen 0.5 en 3 uur. Dit periodieke signaal, die optreedt tijdens laagwater, wordt veroorzaakt door het droogvallen van gebieden in de buurt van Nieuwe Statenzijl (zie eerder opmerking hierover).

## **2.6 Tijdstip van opzet in relatie tot de fase van het getij**

In Figuur 2.14 wordt de opzet in een aantal stations getoond in combinatie met de momenten van getij laagwaters en getij hoogwaters. Doorgaans, met uitzondering van 2006 storm, is de opzet hoger tijdens laagwater of enkele uren daarna, hetgeen consistent is met bevindingen uit de literatuur [5]. Uit deze figuur blijkt dat het lastig is een eenduidige relatie te leggen tussen het begin van het semi-periodieke signaal in de opzet en de momenten van hoog- en laagwater.



Figuur 2.13 Opzet in Huibertgat en Delfzijl voor verschillende stormen. Driehoeken geven de momenten van getij laagwater ( $\nabla$ ) en getij hoogwater ( $\Delta$ ) aan.



Figuur 2.14 Opzet in Eemshaven en Nieuwe Statenzijl voor verschillende stormen. Driehoeken geven de momenten van getij laagwater ( $\nabla$ ) en getij hoogwater ( $\Delta$ ) aan.



## 2.7 Samenvatting

Uit zowel visuele inspectie en wavelet analyse van de opzet kan het volgende worden geconcludeerd:

- 1 De stormopzet in Huibertgat lijkt erg op die in Wierumergronden. Hieruit wordt geconcludeerd dat de opzet te Huibertgat niet of nauwelijks beïnvloed wordt door fenomenen die in de Eems-Dollard plaatsvinden.
- 2 Tijdens vier van de vijf beschouwde stormen is er een toename van de golfenergie met een 4-maal daagse (6-8 uur) periode in het opzetsignaal. Alleen tijdens de maart 2008 storm wordt vooral de energie met een dubbel-daagse periode (12-14 uur) versterkt.
- 3 Na de opzetpiek van de stormen in 2006 en 2013 is er ook een tijdelijke versterking van het dubbel daags signaal in de opzet. Tijdens de opzet piek is de bijdrage hiervan beperkt (t.o.v. het viermaal daags signaal).
- 4 Tijdens de stormen in 2006 en 2008 zien we ook dat het enkeldaags signaal versterkt wordt. Deze versterking is echter een orde kleiner dan de versterking met dubbel- of enkeldaagse periode.
- 5 Tijdens eenzelfde storm is er een grote gelijkenis in de vorm van de opzet en opzet spectra op de verschillende locaties. In bovenstroomse richting treedt er versterking op van het opzet signaal. Dit geldt zowel voor het gehele signaal als het quasi-periodieke signaal hierin. Tussen Huibertgat en Delfzijl wordt de energie in dit quasi-periodiek signaal versterkt met een factor 3-10.

De hierboven gegeven samenvatting van de resultaten geven nog geen verklaring over de waargenomen verschijnselen. In het volgende hoofdstuk worden hierover hypothesen opgesteld.



### 3 Hypotheses

Uit voorgaande analyse blijkt dat er een grote gelijkheid is in de vorm van de opzet en opzet spectra op de verschillende locaties in de Eems-Dollard. Vanaf Huibertgat is er in bovenstroomse richting sprake van versterking van zowel het getij als het opzet signaal. Net zoals met getijsignaal deze versterking wordt veroorzaakt onder meer door ondieper wordende bodem waardoor signaal amplificatie optreedt. Toename van amplitude kan ook worden veroorzaakt door lager wordende bodem wrijving veroorzaakt door fijn slib uit de rivier. Dit verschijnsel treedt zeker op in de rivier [6] maar kan niet worden uitgesloten dat het ook in Eems Dollard plaats vindt. Door lager wordende bodemwrijving (minder dissipatie) kan getij (en opzet) makkelijker doordringen (snellere propagatie) in het estuarium. Bovenstaande heeft echter een permanent karakter (of verandert over lange tijdschalen) en verklaart daarmee niet het semi-periodieke gedrag van de opzet gedurende een storm. Potentiele oorzaken zijn:

- A. resonantie door het aanslaan van een eigen frequentie van het bekken eventueel afhankelijk van de gemiddelde waterstand, zoals het geval in het IJsselmeer [3];
- B. niet-lineaire getij-opzet interactie [3], waarbij de aanwezigheid van de opzet invloed heeft op het getij, en vice-versa.



## 4 Experimenten

### 4.1 Inleiding

Om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van het optreden van semi-periodieke oscillaties tijdens stormen zijn een tweetal experimenten uitgevoerd. Het eerste experiment wordt gekeken in hoeverre dit gedrag met een eenvoudig lineair model beschreven kan worden (sectie 4.2). In het tweede experiment wordt de respons van het Eems-Dollard systeem in kaart gebracht met behulp van een model dat geëxciteerd wordt met een range aan frequenties (sectie 4.3).

### 4.2 Experiment 1: niet-lineaire getij-opzet interactie

Bij niet-lineaire getij-opzet interactie kan verwacht worden dat de viermaal daagse component in de opzet van Delfzijl te relateren is aan de ongestoorde opzet maal het 4-maal daagse getij in Delfzijl. Deze gereconstrueerde opzet  $S_D$  wordt daartoe berekend met vergelijking (1), bestaande uit een sommatie van de volgende componenten:

- 1 Een constante  $C_1$  die het gemiddelde verschil in opzet tussen Huibertgat en Delfzijl weergeeft.
- 2 De opzet te Huibertgat  $S_H$ , verschoven in de tijd met  $\Delta t$  (vanwege de tijd die nodig is voor de propagatie van de opzet van Huibertgat naar Delfzijl) en versterkt door vermenigvuldiging met een tweede constante  $C_2$ .
- 3 De opzet te Huibertgat inclusief tijdverschuiving en amplificatie  $C_2 \cdot S_H(t - \Delta t)$ , vermenigvuldigd met het viermaal daags getij (bestaande uit 15 componenten) te Delfzijl  $T_{D,4}$  vermenigvuldigd met een derde constante  $C_3$

$$S_D(t) = C_1 + C_2 \cdot S_H(t - \Delta t) + C_3 \cdot C_2 \cdot S_H(t - \Delta t) \cdot T_{D,4} \quad (1)$$

De derde stap geeft een eerste orde (lineaire) benadering van niet-lineaire interactie tussen de opzet en het getij. Belangrijk is ook te vermelden dat er in dit eenvoudige model geen resonantie wordt meegenomen.

#### *Bepaling getij, surge en viermaal daags getij*

De opzet te Huibertgat is bepaald door het getij van de volledige waterstand af te trekken. Bepaling van het getij is gedaan met door middel van een harmonische analyse met 118 getij componenten. Om tot de berekende totale waterstand te Delfzijl te komen is op eenzelfde wijze het getij ter plaatse bepaald (dit wordt vervolgens opgeteld bij de met bovenstaande methode berekende opzet). Het viermaal daagse getij te Delfzijl is bepaald door harmonische analyse met 15 viermaal daagse componenten (waarvan M4 en MS4 de grootste zijn).

#### *Instellingen coëfficiënten*

Voor de instellingen van de coëfficiënten van het hierboven beschreven model zijn de volgende aannamen gedaan:

- De constante in stap 1 ( $C_1$ ; het gemiddelde opzetverschil Huibertgat en Delfzijl) is op 8,0 cm gezet.

- De tijdsverschuiving van het opzetsignaal van Huibertgat  $\Delta t$  is gebaseerd op de fasedraaiing van het M2 getij tussen Huibertgat (249,0°) en Delfzijl (304,3°). Dit resulteert in een tijdsverschuiving van 110 minuten (afgerond op gehele meetintervallen van 10 minuten).
- De amplificatie van het opzetsignaal van Huibertgat  $C_2$  was initieel gebaseerd op de amplitude versterking van het M2 getij tussen Huibertgat (1,013 m) en Delfzijl (1,334 m). Dit resulteerde in een versterking met 30 %. Omdat gebleken is dat dit tot een relatieve bias in de opzet leidde is dit later gereduceerd naar 24 %.
- Voor de constante in stap 3 ( $C_3$ ) waarmee de opzet en het viermaal daagse getij vermenigvuldigd wordt zijn verschillende instellingen geprobeerd. De impact hiervan wordt hieronder beschreven.

## Resultaten

Op basis van bovenstaande methode is de opzet te Delfzijl berekend voor de periode 1996 tot en met 2015 en vergeleken met de gemeten opzet. De kwaliteit is bepaald voor de gehele 20-jaar periode, alsmede zes perioden van 2,5 dag om de hoogste scheve opzetten van de in deze studie beschouwde stormen (zie Tabel 2.1). Dit is gedaan met verschillende waarden van  $C_3$ , waarbij een waarde van nul impliceert dat de derde term (niet-lineaire getij-opzet interactie) niet meegenomen wordt. De resultaten worden gepresenteerd in Tabel 4.1. Hieruit blijkt dat het toevoegen van een benadering van niet-lineaire interactie de representatie kwaliteit van de opzet tijdens de meeste stormen doet toenemen (de uitzondering is de maart 2008 storm). Verschillende waarden voor  $C_3$  zijn geprobeerd. Een waarde van -0,40 tot -0,35 gaf de beste resultaten, afhankelijk van de storm die beschouwd wordt.

Tabel 4.1 Kwaliteit van de opzet representatie in Delfzijl voor verschillende instellingen van  $C_3$ , voor de periode 1996 tot en met 2015 en rond zes van de meest extreme scheve opzetten in deze periode.

$C_3$	1996 - 2015			20061101	20131206 <sup>1</sup>	20131206 <sup>2</sup>	20071109	20080301	20141022
	bias (cm)	std (cm)	rmse (cm)	std (cm)	std (cm)	std (cm)	std (cm)	std (cm)	std (cm)
0.00	-0.2	9.4	9.4	26.5	33.4	30.4	21.3	26.0	18.3
-0.35	-0.2	9.3	9.3	25.6	29.9	27.0	20.3	26.3	17.9
-0.40	-0.2	9.4	9.4	25.5	29.7	26.8	20.5	26.5	18.0

De kwaliteit van het model is ook beschreven in termen van de fout in de scheve opzet. Hiertoe zijn alle hoogwaters in de 20-jaar periode verdeeld in drie scheve opzet klassen. De eerste groep bevat de 99% laagste gemeten scheve opzetten, de tweede groep bevat de scheve opzetten met een hoogte tussen de 99,0% en 99,8% en de derde groep de 0,2% hoogste scheve opzetten (29 events). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4.2. Hieruit blijkt dat de niet-lineaire interactie component in het eenvoudige model een verhoging van de meest extreme hoogwaters van 8-9 cm geeft.

Tabel 4.2 Summary of the skill to represent skew surge heights at Delfzijl, for three different event classes, in terms of mean bias and RMSE.

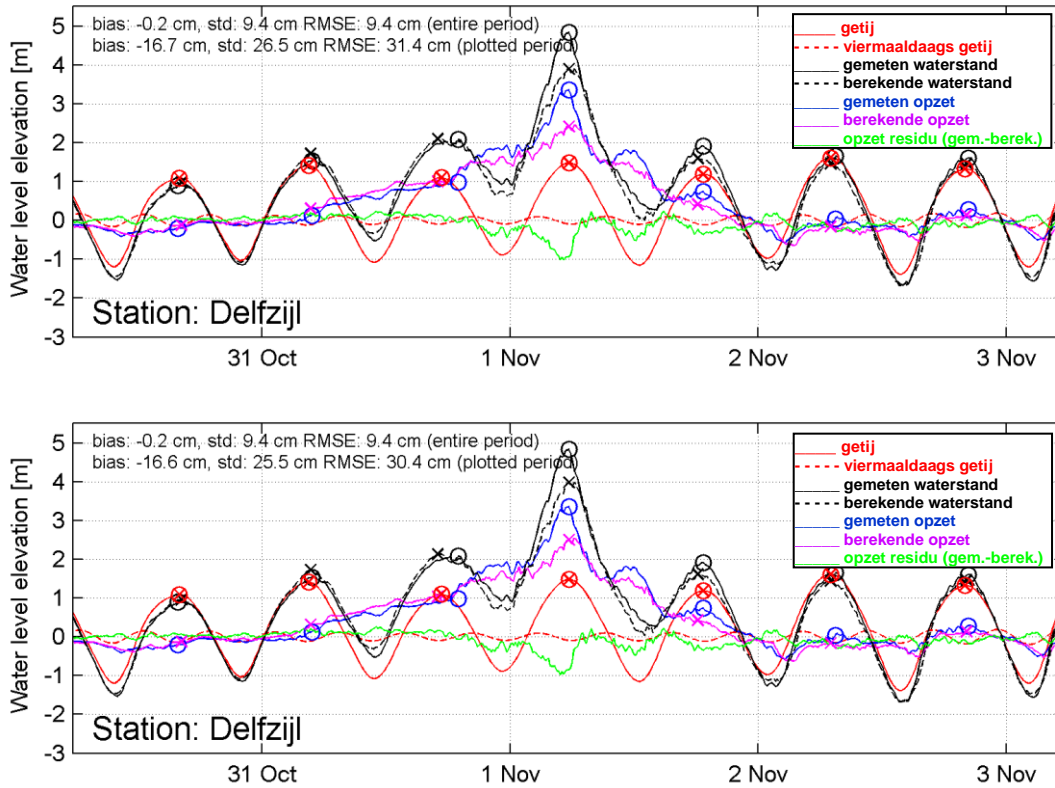
$C_3$	<99.0% skew surges		99.0% - 99.8% skew surges		>99.8 % skew surges	
	bias (cm)	RMSE (cm)	bias (cm)	RMSE (cm)	bias (cm)	RMSE (cm)
0.00	-0.2	7.2	-12.6	19.7	-24.5	33.6
-0.35	0.0	7.9	-5.6	17.0	-16.5	28.7
-0.40	0.0	8.1	-4.5	16.8	-15.2	28.0

Deze resultaten zijn ook visueel weergegeven voor de twee meest extreme stormen in de afgelopen 20 jaar (in termen van veroorzaakte scheve opzet bij Delfzijl): de november 2006 Allerheiligenstorm (Figuur 4.1) en de december 2013 Sinterklaasstorm (Figuur 4.2). Hieruit blijkt het volgende:

- Het model is in staat om de opzet (en waterstand) in Delfzijl te beschrijven.
- Ook het semi-periodieke gedrag van de opzet dat tijdens stormen optreedt wordt goed gereproduceerd.
- Het toevoegen van een eenvoudige benadering van niet-lineaire getij-opzet interactie draagt bij aan de opzet representatie. Dit is ook af te lezen uit de statistische kentallen die in de figuren gepresenteerd worden: meenemen van niet-lineaire interactie doet de standaarddeviatie tijdens de storm afnemen van 26.4 cm naar 25.5 cm (Allerheiligenstorm) en van 33.4 cm naar 29.7 cm (Sinterklaasstorm).
- Ook zonder niet-lineaire component wordt het quasi-periodieke signaal in de opzet al deels beschreven. Dit betekent dat het semi-periodiek gedrag ook in de opzet van Huibertgat aanwezig is (en versterkt in Delfzijl doorkomt).
- Het quasi-periodieke signaal in de opzet is in tegenfase met het viermaal daagse getij signaal. Dit blijkt ook uit het minteken van de gekozen waarde voor  $C_3$ . Blijkbaar heeft de aanwezigheid van de opzet een dempend effect op de generatie van hogere harmonische getij componenten.

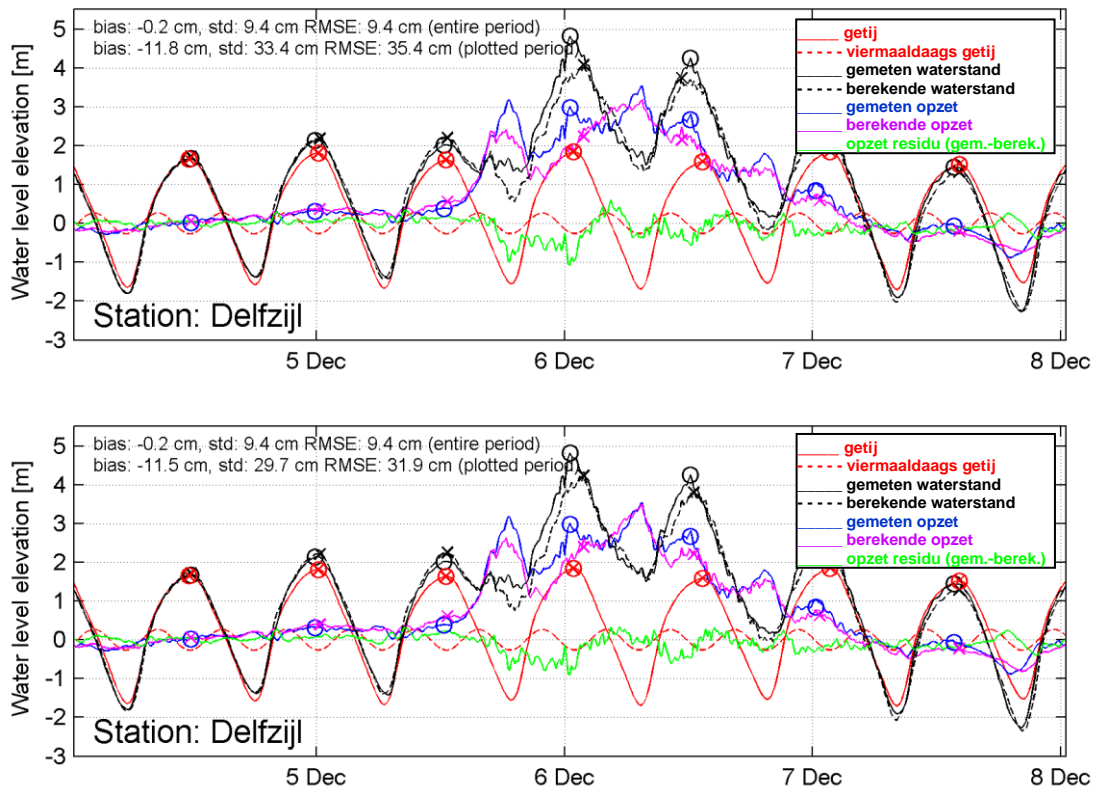
De resultaten zijn zodanig goed dat overwogen kan worden om een soortgelijke aanpak als aanvulling in een operationele context te gebruiken. Indien het model met metingen van Huibertgat gevoed wordt, kan de waterstand in Delfzijl 110 minuten vooruit voorspeld worden.

In Appendix C worden de resultaten van het empirische model vergeleken met het operationele getij-opzet model DCsMv6-ZUNOv4. Deze resultaten geven aan dat er in beide modellen vanaf een scheve opzet van 180-190 cm boven NAP een systematische onderschatting optreedt. Dit wijst op onvolkomenheden in de modelparameterizaties onder extreme condities, of het niet meenemen van fysische processen die alleen relevant worden onder extreme stormcondities. Met het empirische model is het relatief eenvoudig om de periodes te identificeren waar dit optreedt om deze vervolgens nader te onderzoeken.



Figuur 4.1 Gemeten en berekende waterstanden op meetlocatie Delfzijl tijdens de november 2006 Allerheiligenstorm, zonder (boven) en met (onder) niet-lineaire interactie bijdrage. De hoogwaters, getijhoogwaters en scheve opzetten worden weergegeven door cirkels (gemeten) en kruisjes (berekend).



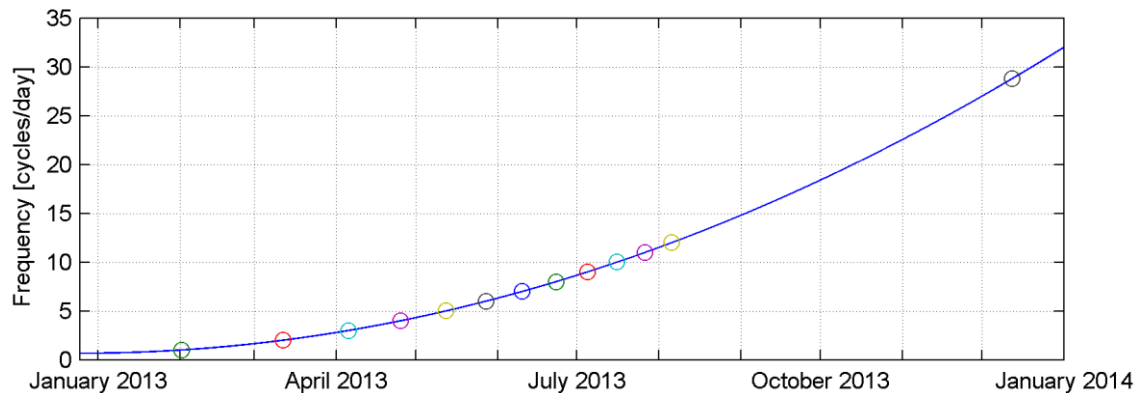


Figuur 4.2 Gemeten en berekende waterstanden op meetlocatie Delfzijl tijdens de december 2013 Sinterklaasstorm. De hoogwaters, getijhoogwaters en scheve opzetten worden weergegeven door cirkels (gemeten) en kruisjes (berekend).

#### 4.3 Experiment 2: respons op een chirp-signaal

Resonantie houdt in dat er een staande golf ontstaat met een frequentie gelijk aan de eigenfrequentie en opgewerkt door het aanstoten van deze frequentie. Buiten de resonantiefrequenties zal er dan weinig respons optreden. Een ander kenmerk van resonantie is dat het signaal nog enige tijd blijft nadat het aanslaan is opgehouden.

Om te testen of er sprake is van resonantie en te achterhalen voor welke frequentie de Eems-Dollard gevoelig is, is er een berekening gemaakt met een lokaal testmodel van de Eems-Dollard. Dit model heeft als enige forcering een chirp-randsignaal. Dit houdt in dat het model aangestuurd wordt met een periodiek signaal met een toenemende frequentie en constante amplitude (in dit geval 1 m). Er is gekozen voor een over een jaar kwadratische toenemende frequentie, beginnend bij 2/3 cycli per dag (periode 36 hr) en eindigend bij 36 cycli per dag (periode 45 minuten). Dit wordt weergegeven in Figuur 4.3.



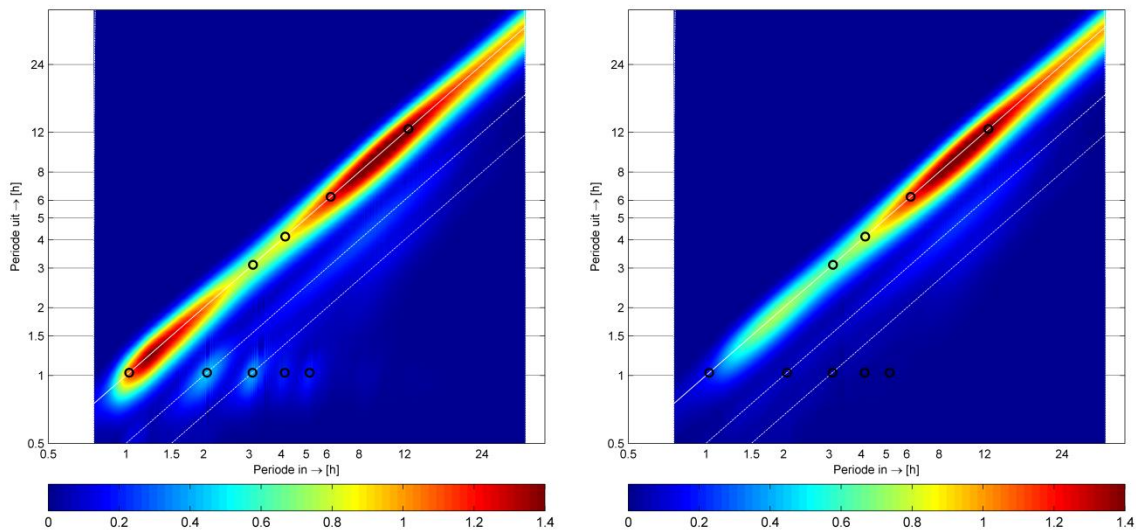
Figuur 4.3 Frequentie van het chirp signaal waarmee de open rand van het Eems-Dollard testmodel wordt aangestuurd. De cirkels geven een frequentie van 1 t/m 12 cycli per dag en een periode van 50 minuten (cirkel rechtsboven) weer.

### Resultaten

De resultaten van het hierboven beschreven experiment zijn geanalyseerd met behulp van een wavelet analyse. De resultaten hiervan worden in Figuur 4.4 weergegeven voor locaties Delfzijl en Knock. Hierin staat de periode van het randsignaal langs de x-as en de periode van het berekende signaal langs de y-as. De kleur geeft de amplitude weer. Langs de diagonaal staan met zwarte cirkels de periodes van M2, M4, M6 en M8 weergegeven. Uit de resultaten voor Delfzijl kan het volgende worden geconcludeerd:

- Vooral signaal met een periode van ~10 uur (~3-maal daags) en 70-80 min komt versterkt door. De versterking kan groter zijn dan 50%.
- Signaal met een periode van 3-4 uur (6-8-maal daags) wordt juist verzwakt.
- Naast een respons met eenzelfde periode zijn er ook hogere harmonischen zichtbaar. Deze zijn aangegeven met de gestippelde diagonalen. Vooral hogere harmonischen met een twee- en drie-keer kleinere periode worden opgewekt. Dit is het gevolg van niet-lineariteiten in het model.
- Er treedt een versterkte respons op met een periode van ongeveer 1 uur. Deze wordt opgewekt als de ingaande periode 1, 2, 3, 4 of 5 keer zo groot is (aangegeven met zwarte cirkels). De periode van 1 uur komt ongeveer overeen met de periode van de seiche (50 minuten) die in het signaal van Delfzijl waargenomen kan worden.

De laagfrequente respons in Knock is vergelijkbaar met Delfzijl. Signaal met een periode kleiner dan 2 uur wordt in Knock echter gedempt in plaats van versterkt in Delfzijl.

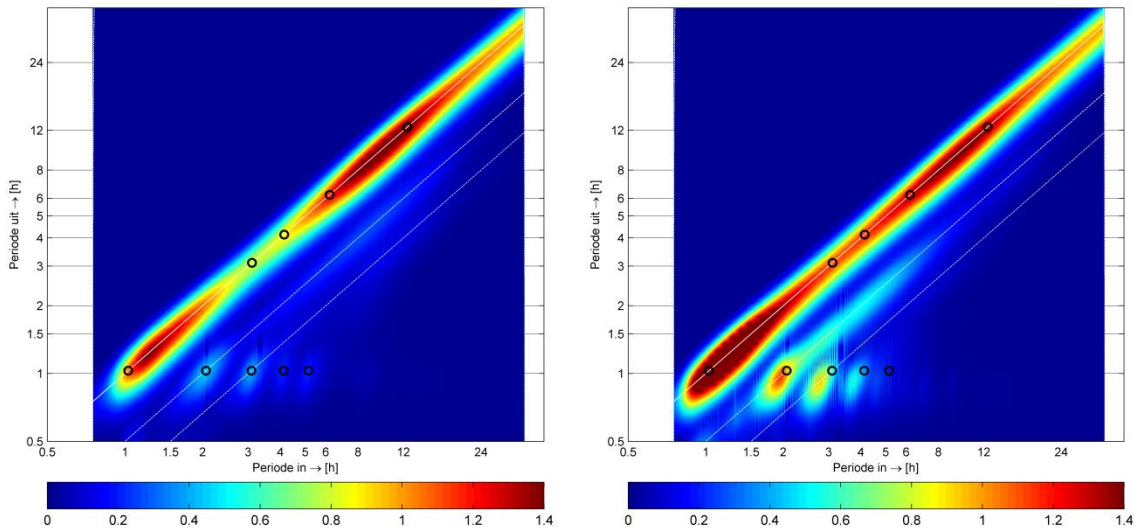


Figuur 4.4 Amplitude van de berekende respons in Delfzijl (links) en Knock (rechts) als functie van de periode van het invoer chirp-sigitaal.

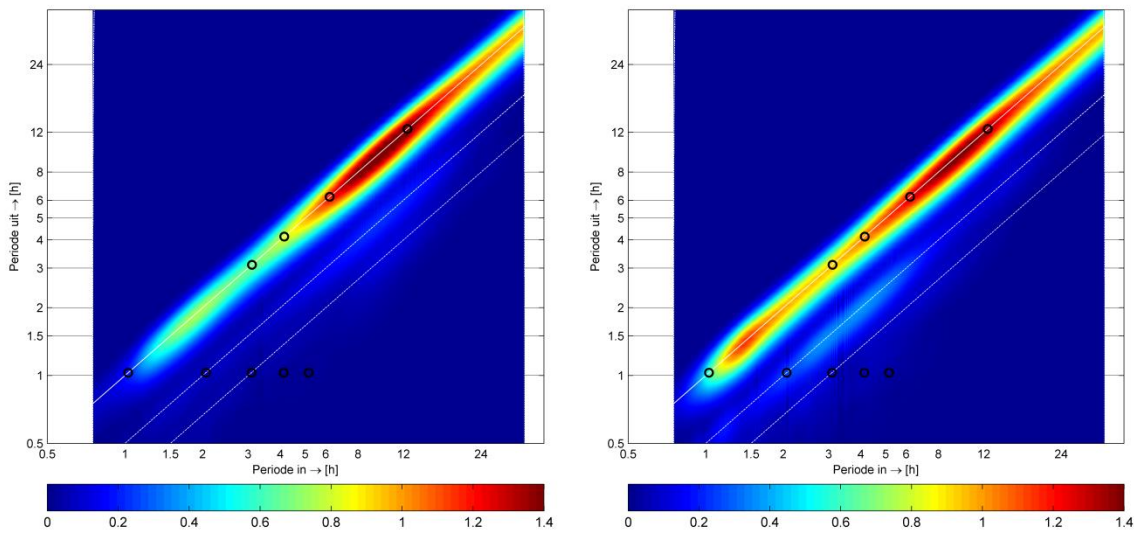
#### Invloed van opzet

Om de invloed van de opzet te achterhalen is een test gedaan met aanvullend aan de eerder beschreven aansturing een constante opzet van 2m op de rand. In Figuur 4.5 (Delfzijl) en Figuur 4.6 (Knock) worden de resultaten hiervan getoond. Om de invloed van de opzet beter inzichtelijk te maken zijn in Figuur 4.7 (Delfzijl) en Figuur 4.8 (Knock) uitsneden van deze resultaten getoond langs de hoofddiagonaal (bovenste panelen) en langs de diagonaal met een twee keer kleinere uitgaande periode (onderste panelen). In deze laatste figuren zijn ook resultaten met een opzet van 1 m toegevoegd. Vergelijking met de resultaten zonder opzet toont het volgende:

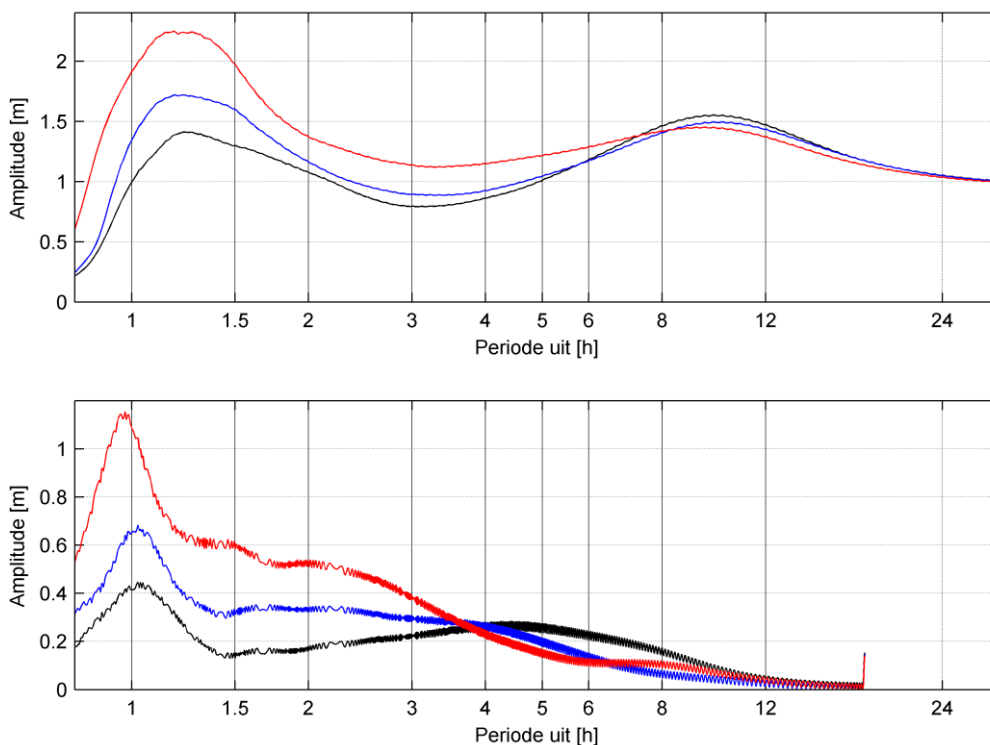
- Het tweemaal daagse signaal wordt enigszins gedempt door de aanwezigheid van de opzet. Dit blijkt uit de bovenste panelen van Figuur 4.7 en Figuur 4.8, waarin bij een periode van circa 12 uur de amplitude verminderd bij toenemende opzet.
- Het viermaal daags en hoger frequent signaal afkomstig van de open rand (zeezijde) wordt versterkt door aanwezigheid van de opzet. Dit blijkt uit de bovenste panelen van Figuur 4.7 en Figuur 4.8, waarin bij een periode van circa 7 uur en kleiner de amplitude toeneemt bij toenemende opzet.
- De lokale opwekking van M4 uit M2 wordt significant zwakker, mogelijk door minder invloed van lokale bodemwrijving vanwege de toegenomen waterdiepte. Dit blijkt uit de onderste panelen van Figuur 4.7 en Figuur 4.8, waarin bij een ingaande periode van 6 uur (en dus een ingaande periode van 12 uur) de amplitude bijna halveert bij zowel 1 m als 2 m opzet, ten opzichte van de amplitude zonder opzet. Het dempen van het viermaal daagse signaal tijdens hoge opzetten komt overeen met de bevindingen uit het eerste experiment. Deze resultaten tonen echter ook een iets sterkere amplificatie van het M4 randsigitaal. Zwakkere lokale opwekking van M4 heeft in de praktijk blijkbaar meer impact.
- De opwekking van hogere harmonischen met een gehalveerde periode, komend uit signaal met een periode tot iets meer dan 6 uur (4-maal daags en hoger frequent) wordt sterker (zie onderste panelen van Figuur 4.7 en Figuur 4.8).
- In Delfzijl worden oscillaties met een periode van ~1 uur sterker. Ook neemt de periode van de sterkste respons iets af. Zowel verminderde demping door toegenomen waterdiepte als sterker aanslaan door toegenomen generatie van hogere harmonische kunnen hierbij een rol spelen.



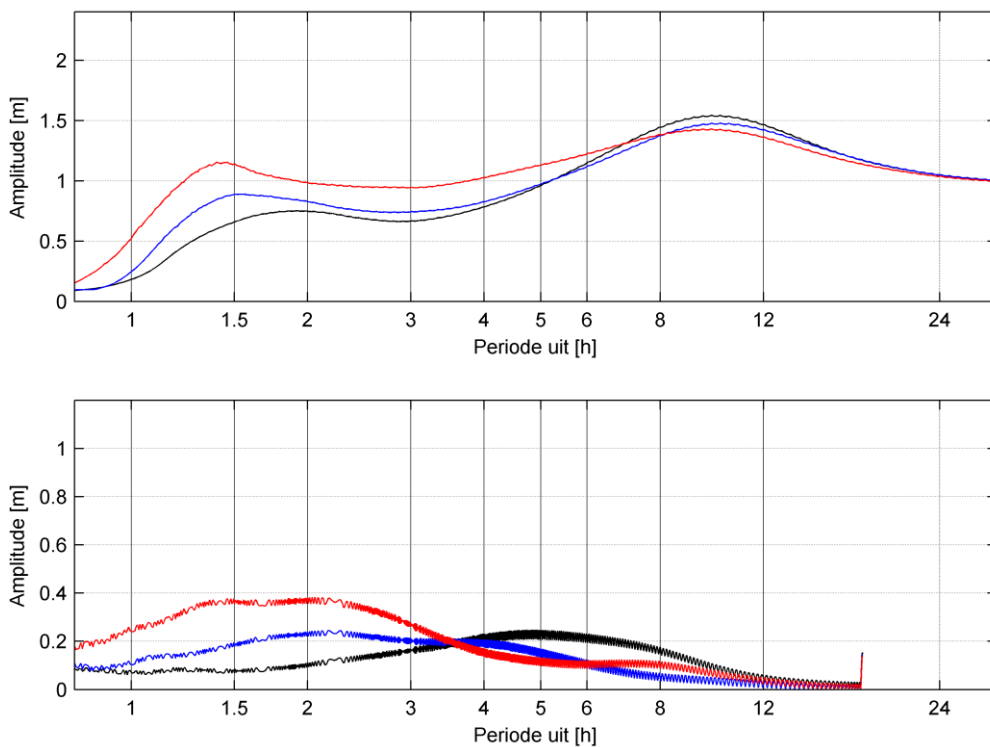
Figuur 4.5 Amplitude van de berekende respons in Delfzijl zonder opzet (links) en met 2 m opzet (rechts) als functie van de periode van het invoer chirp-signaal.



Figuur 4.6 Amplitude van de berekende respons in Knock zonder opzet (links) en met 2 m opzet (rechts) als functie van de periode van het invoer chirp-signaal.



Figuur 4.7 Amplitude respons in Delfzijl, zonder opzet (zwart), met 1 m opzet (blauw) en met 2 m opzet op de rand (rood), voor zowel de respons de periode gelijk aan de ingaande periode (boven) en de helft van de ingaande periode.



Figuur 4.8 Amplitude respons in Knock, zonder opzet (zwart), met 1 m opzet (blauw) en met 2 m opzet op de rand (rood), voor zowel de respons de periode gelijk aan de ingaande periode (boven) en de helft van de ingaande periode.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusie

Uit de in dit rapport gepresenteerde resultaten komt het volgende beeld naar voren met betrekking tot semi-periodiek gedrag in de opzet tijdens en direct na stormen:

- Tijdens vier van de vijf beschouwde stormen is er een toename van de golfenergie met een 4-maal daagse (6-8 uur) periode. Alleen tijdens de maart 2008 storm wordt vooral de energie met een dubbel-daagse periode (12-14 uur) versterkt.
- Na de opzetpiek van de stormen in 2006 en 2013 is er ook een tijdelijke versterking van het dubbel daags signaal in de opzet. Tijdens de opzet piek is de bijdrage hiervan beperkt (t.o.v. het viermaal daags signaal).
- Tijdens eenzelfde storm is er een grote gelijkenis in de vorm van de opzet en opzet spectra op de verschillende locaties. In bovenstroomse richting treedt er versterking op van het opzet signaal. Dit geldt zowel voor het gehele signaal als de quasi-periodieke component hierin. Tussen Huibertgat en Delfzijl wordt de energie in dit quasi-periodiek signaal versterkt met een factor 3-10.

Om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van het optreden van semi-periodieke oscillaties tijdens stormen zijn een tweetal experimenten uitgevoerd. Het eerste experiment wordt gekeken in hoeverre dit gedrag met een eenvoudig lineair model beschreven kan worden. Hieruit blijkt het volgende:

- Ook het semi-periodieke gedrag van de opzet dat tijdens stormen optreedt wordt goed gereproduceerd door het lineaire model.
- Het toevoegen van een eenvoudige benadering van niet-lineaire getij-opzet interactie draagt bij aan de kwaliteit van de opzet representatie.
- Ook zonder niet-lineaire component wordt het quasi-periodieke signaal in de opzet al deels beschreven. Dit betekent dat het semi-periodiek gedrag ook in de opzet van Huibertgat aanwezig is (en versterkt in Delfzijl doorkomt).
- Het quasi-periodieke signaal in de opzet is in tegenfase met het viermaal daagse getij signaal. Blijkbaar heeft de aanwezigheid van de opzet een dempend effect op de generatie van hogere harmonische getij componenten.

In het tweede experiment wordt de respons van het Eems-Dollard systeem in kaart gebracht met behulp van een model dat geëxciteerd wordt met een range aan frequenties. Hieruit blijkt het volgende:

- Het tweemaal daagse signaal wordt enigszins gedempt door de aanwezigheid van de opzet.
- Het 4-maal daags en hoger frequent signaal afkomstig van de open rand (zeezijde) wordt versterkt door aanwezigheid van de opzet.
- De lokale opwekking van M4 uit M2 wordt significant zwakker, mogelijk door minder invloed van lokale bodemwrijving vanwege de toegenomen waterdiepte.

Het dempen van het viermaal daagse signaal tijdens hoge opzetten komt overeen met de bevindingen uit het eerste experiment. Deze resultaten tonen echter ook een iets sterkere amplificatie van het M4 randsignaal. Zwakkere lokale opwekking van M4 heeft in de praktijk blijkbaar meer impact.

Bovenstaande resultaten duiden op niet-lineaire interactie van als oorzaak van het semi-periodiek gedrag in de opzet tijdens stormen. Resonantie lijkt bij het veroorzaken van het quasi-periodieke viermaal daagse gedrag geen grote rol te spelen.

Er zijn in het tweede experiment ook oscillaties gevonden met een periode van ongeveer 1 uur. Deze zijn alleen zichtbaar in Delfzijl (en niet in Knock) en hebben vermoedelijk te maken met een seiche in het havenbasin van Delfzijl, die de buik heeft nabij het meetstation Delfzijl en de knoop bij de ingang van de haven. Bij het ontstaan van deze oscillaties speelt resonantie vermoedelijk wel een rol. Uit het experiment blijkt ook dat deze oscillaties in Delfzijl sterker worden door aanwezigheid van opzet (m.a.w. de gevoeligheid voor resonantie neemt toe). Ook neemt de periode van de sterkste respons iets af. Zowel verminderde demping door toegenomen waterdiepte als sterker aanslaan door toegenomen generatie van hogere harmonische kunnen hierbij een rol spelen.

## 5.2 Aanbevelingen

- De resultaten van het hier gepresenteerde empirische model zijn zodanig goed dat overwogen kan worden om een soortgelijke aanpak in een operationele context als aanvulling op de numerieke procesmodellen te gebruiken. Indien het model met metingen van Huibertgat gevoed wordt, kan de waterstand in Delfzijl 110 minuten vooruit voorspeld worden.
- De resultaten van het empirische model vergeleken met het operationele getij-opzet model DCMSv6-ZUNOV4. Deze resultaten geven aan dat er in beide modellen vanaf een scheve opzet van 180-190 cm boven NAP een systematische onderschatting optreedt. Dit wijst op onvolkomenheden in de modelparameterizaties onder extreme condities, of het niet meenemen van fysische processen die alleen relevant worden onder extreme stormcondities. Met het empirische model is het relatief eenvoudig om de periodes te identificeren waar dit optreedt. Er wordt aanbevolen de metingen en modelresultaten gedurende deze periodes vervolgens nader te onderzoeken, eventueel met behulp van wavelet analyse van de modelresultaten. Hierbij kan ook gekeken worden naar de impact van bijvoorbeeld modelresolutie, het sluiten van het Ems Sperrwerk en de invloed van de dieptegemiddelde modellering (2D vs. 3D).
- Met betrekking tot de hoogfrequente oscillaties (periode ~1 uur) zien we dat de gevoeligheid voor resonantie toeneemt. Aanbevolen wordt om te onderzoeken of het meerwaarde heeft om hier rekening mee te houden bij het vaststellen van seichetoeslagen voor Delfzijl en de Dollard.
- Er is niet bekend wat de trigger voor de in het havenbekken van Delfzijl optredende seiches is. Aanbevolen wordt om dit verder te onderzoeken.
- Uit dit onderzoek komt geen verklaring naar voren voor de vergrote getijamplitude na sommige stormen. Aanbevolen wordt dit aspect verder te onderzoeken.



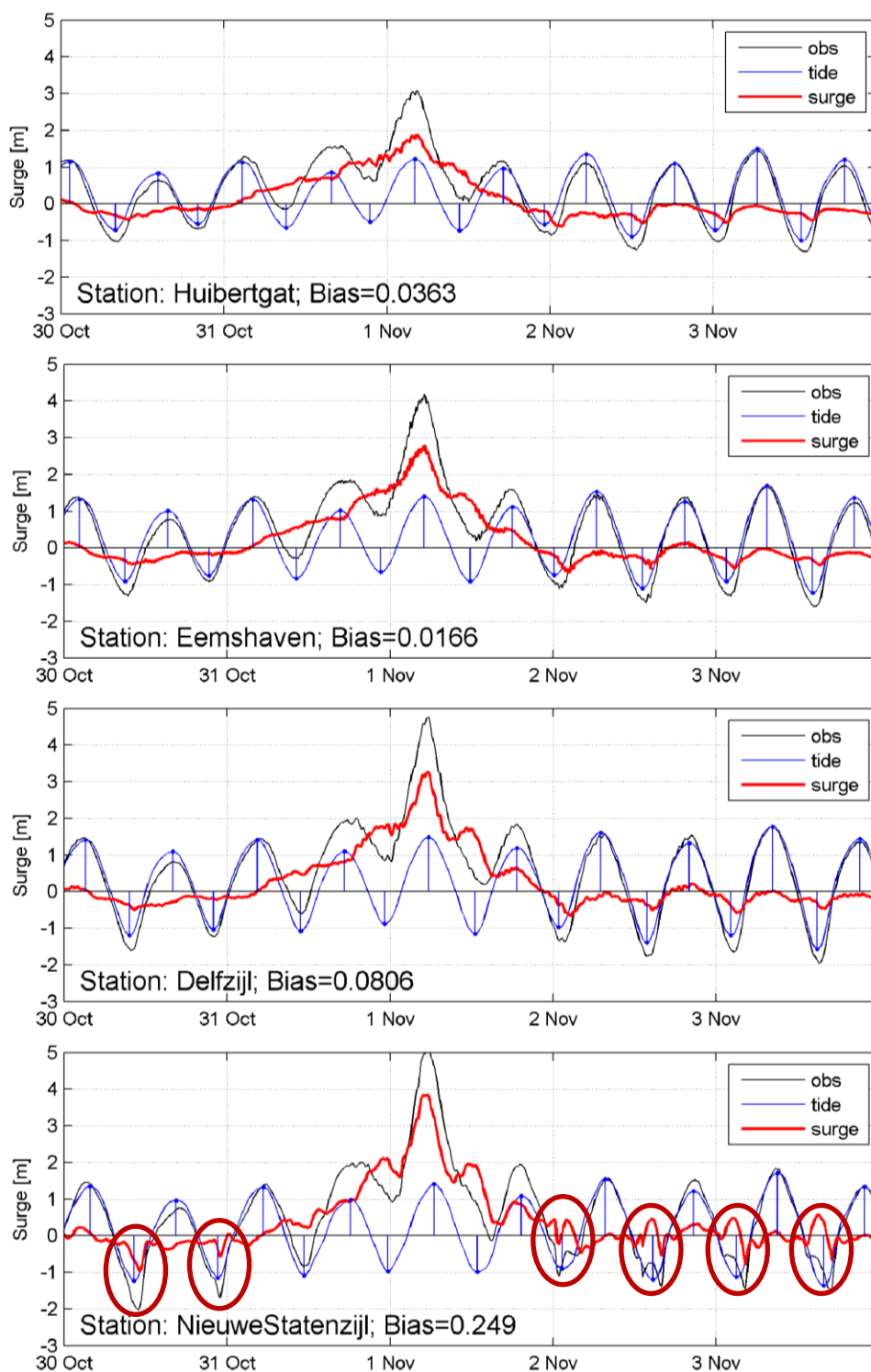
## 6 Referenties

- [1] F. Zijl, "Evaluation of the North Sea tide-surge models during the 5-6 December 2013 Sinterklaas storm," Deltares, 2015, 6 maart.
- [2] F. Zijl, "Improved DCSMv6-ECMWF meteorological forcing," Deltares, december 2015.
- [3] F. Zijl, M. Verlaan, J. Kroos, P. Heinen and H. Peters, "QRF protocol - Thema voorspelbaarheid hoogwater Delfzijl (1220039-010 )," Deltares, 2016.
- [4] F. Zijl, "On the impact of hydrodynamic model resolution on water levels," Deltares, 2015.
- [5] K. J. Horsburgh and C. Wilson, "Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea," *J. of Geophysical Research*, vol. 112, p. 13, 2007.
- [6] D. van Maren, J. Winterwerp and J. Vroom, "Fine sediment transport into the hyper-turbid lower Ems River: the role of channel deepening and sediment-induced drag reduction," *Ocean Dynamics*, vol. 65, no. 4, pp. 589-605, 2015.
- [7] Alkyon, "Simulation studies for storm winds, flow fields and wave climate in the Wadden Sea," Alkyon, 2008.
- [8] C. Torrence and G. Compo, "A practical guide to wavelet Analysis," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 79, pp. 61-78, 1998.
- [9] M. de Jong, S. Reijmering and J. Beckers, "Seiches - Invloed op waterkeringen, beperkingen in opwekking en analyse waterstandsmetingen," Deltares (project 1230042-007 ), 1998.



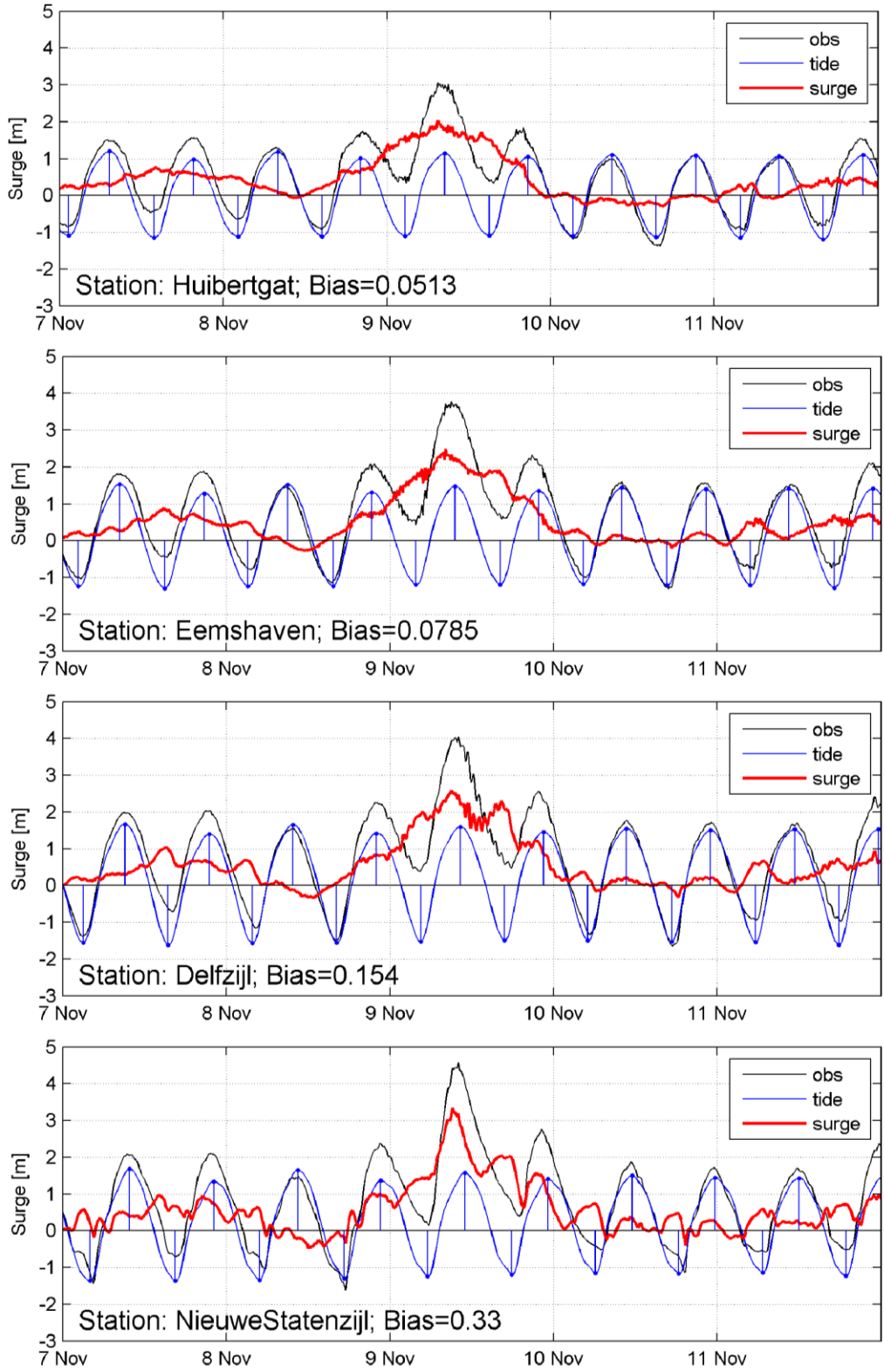
## A Storm opzet op alle relevante stations

### A.1. 30 oktober- 3 november 2006



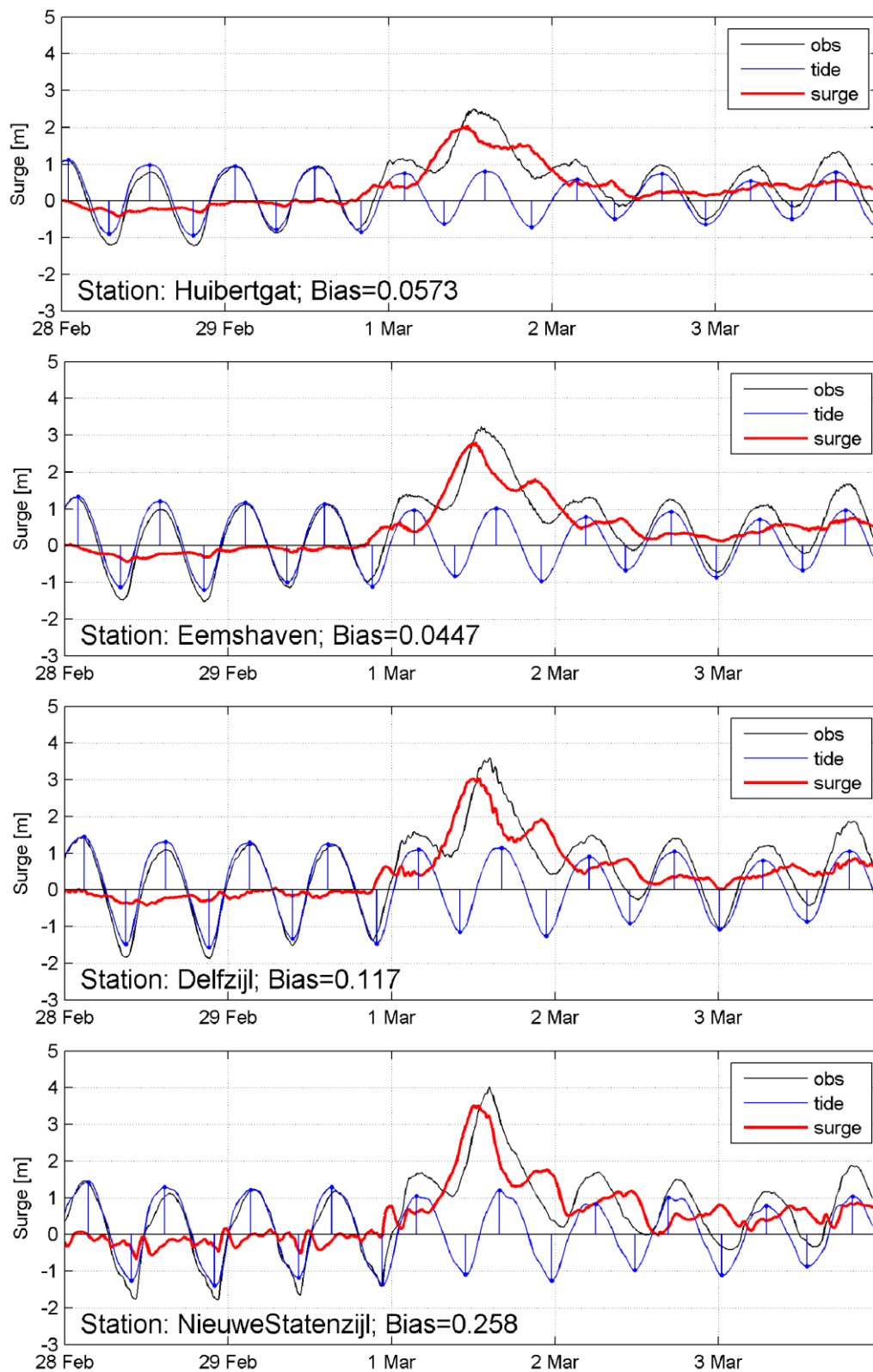
Figuur A.1 Waterstanden en stormopzet oktober-november 2006 in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl. Omcirkelde gebieden zijn laagwater momenten in Nieuwe Statenzijl.

## A.2. 8-12 november 2007



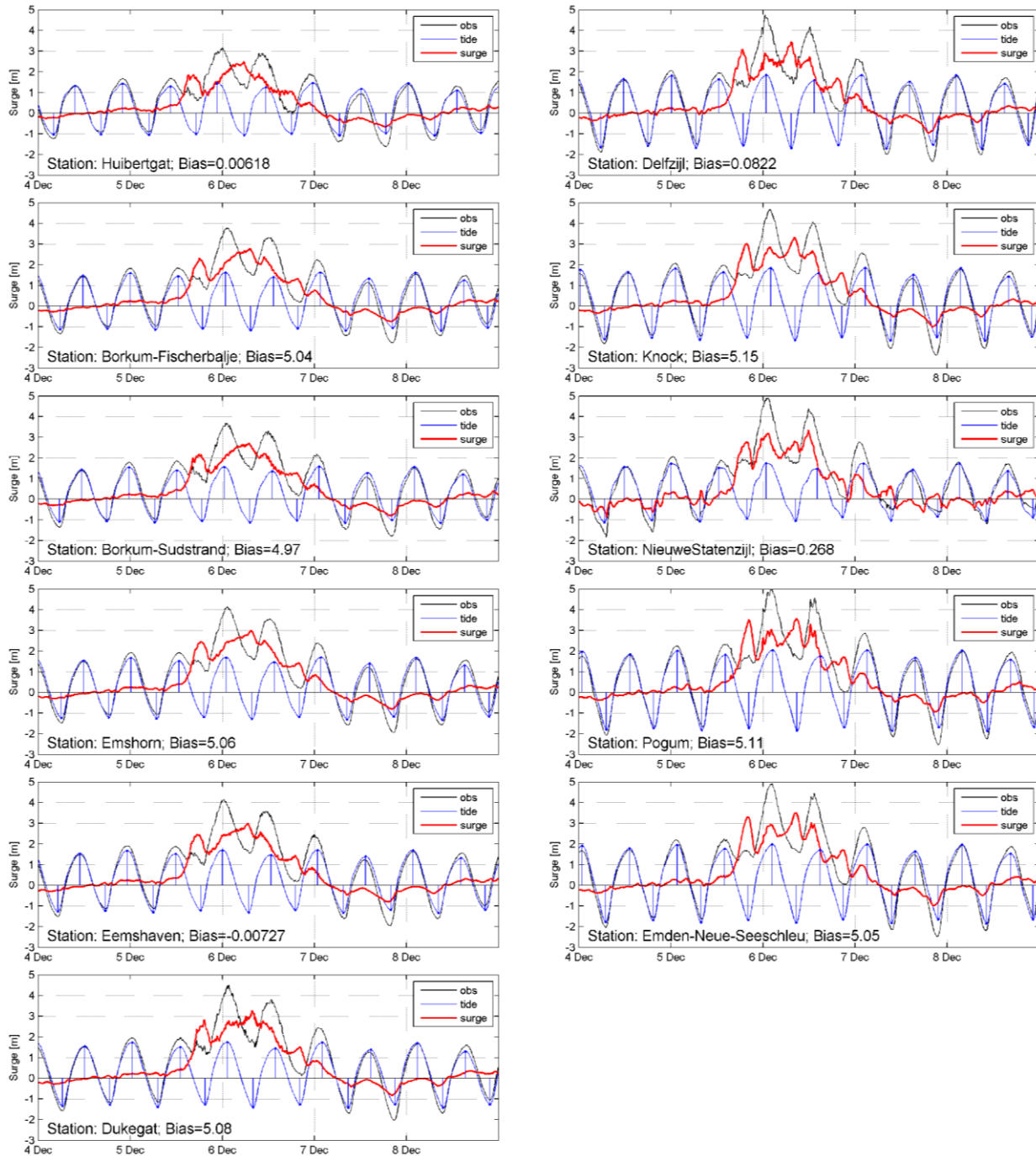
Figuur A.2 Waterstanden en stormopzet november 2007 in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.

## A.3. 28 februari – 3 maart 2008



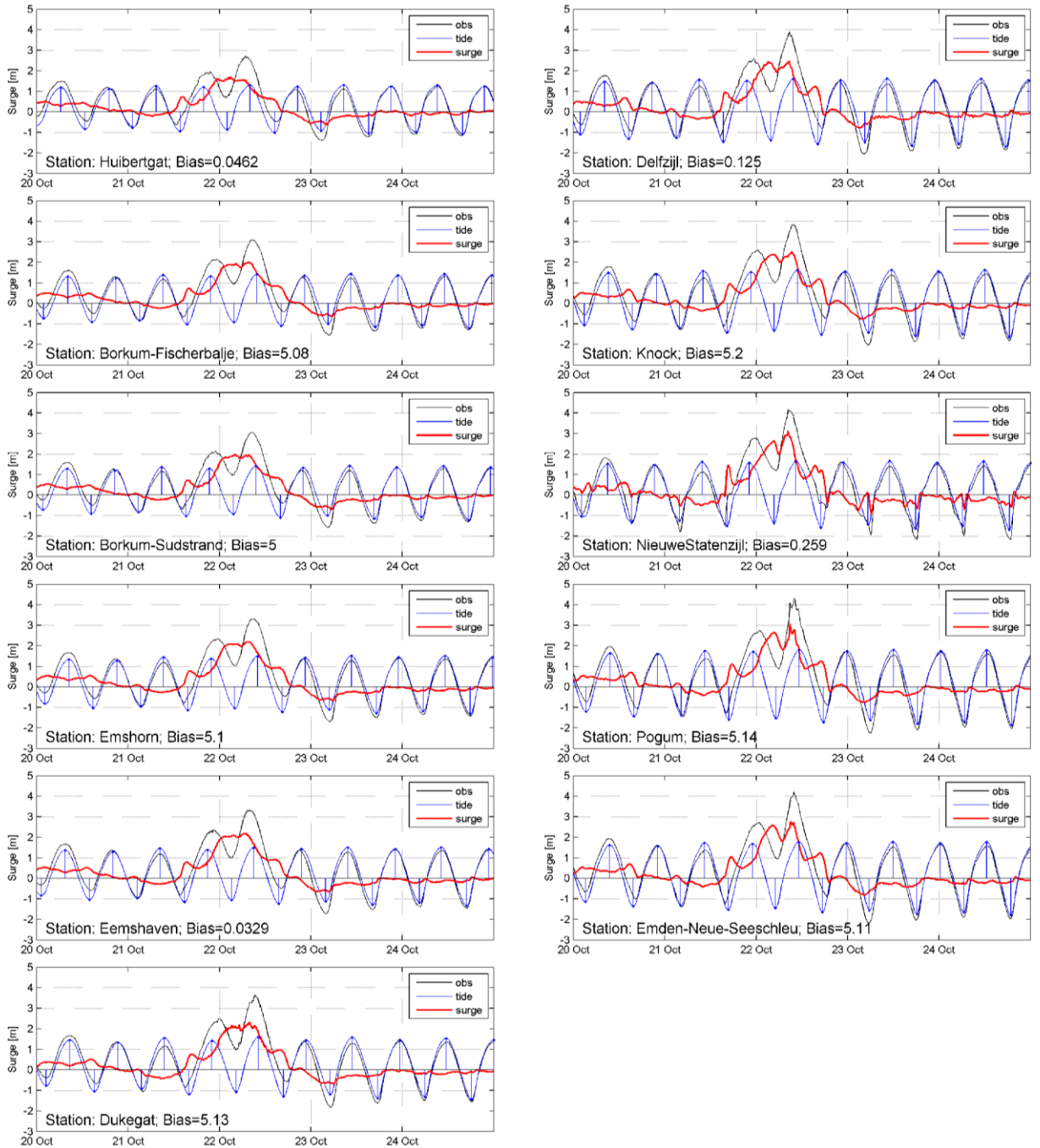
Figuur A.3 Waterstanden en stormopzet februari-maart 2008 in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.

## A.4. 4-8 december 2013



Figuur A.4 Waterstanden en stormopzet december 2013 in alle geanalyseerde stations

**A.5. 20-24 oktober 2014**



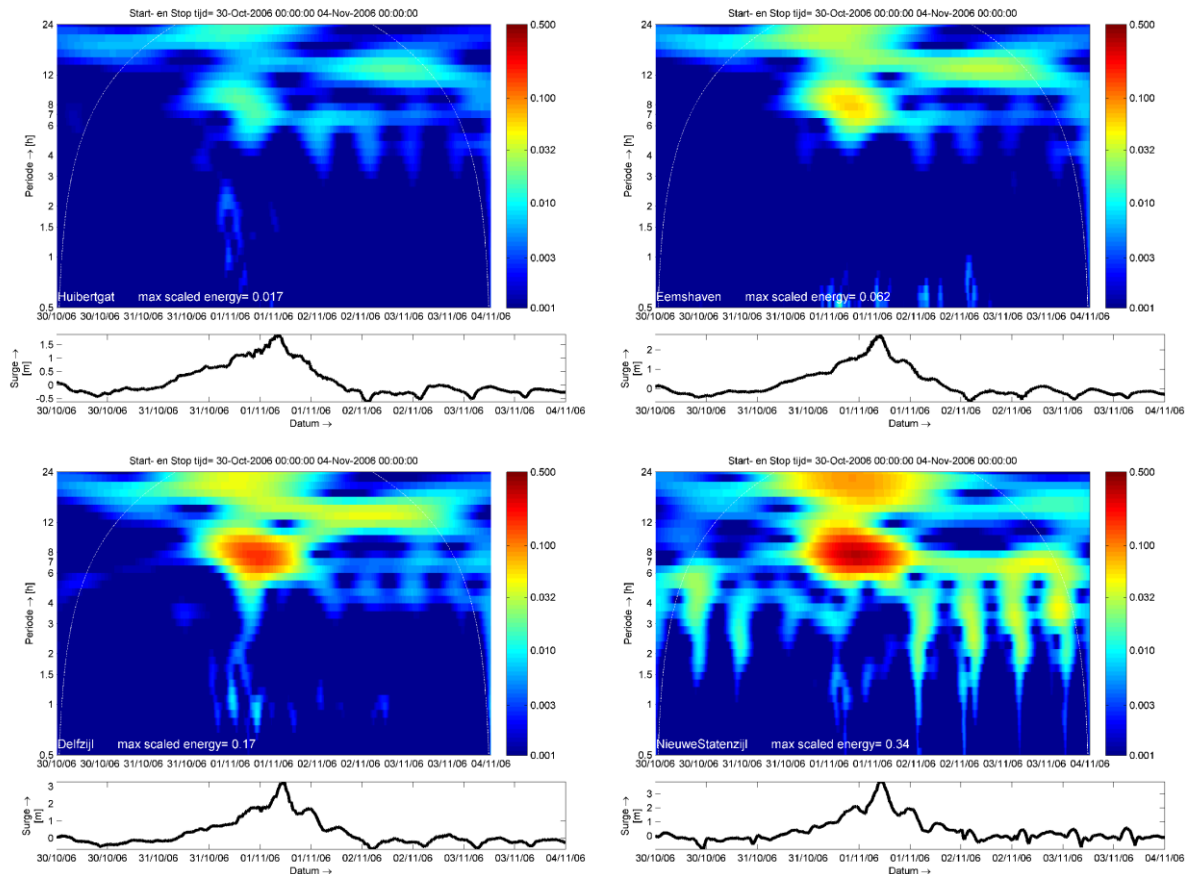
Figuur A.5 Waterstanden en stormopzet oktober 2014 in alle geanalyseerde stations





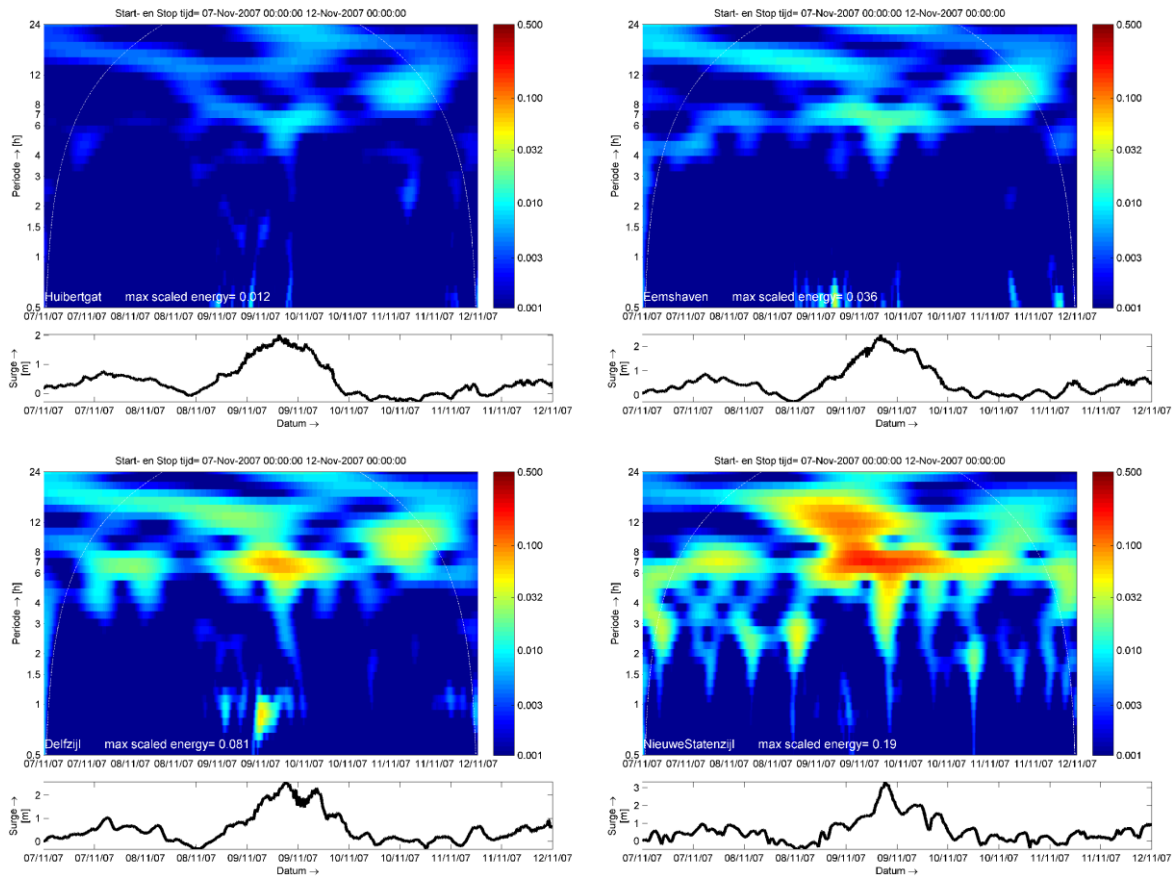
## B Wavelet analyse resultaten op alle stations

### B.1. 30 oktober- 3 november 2006



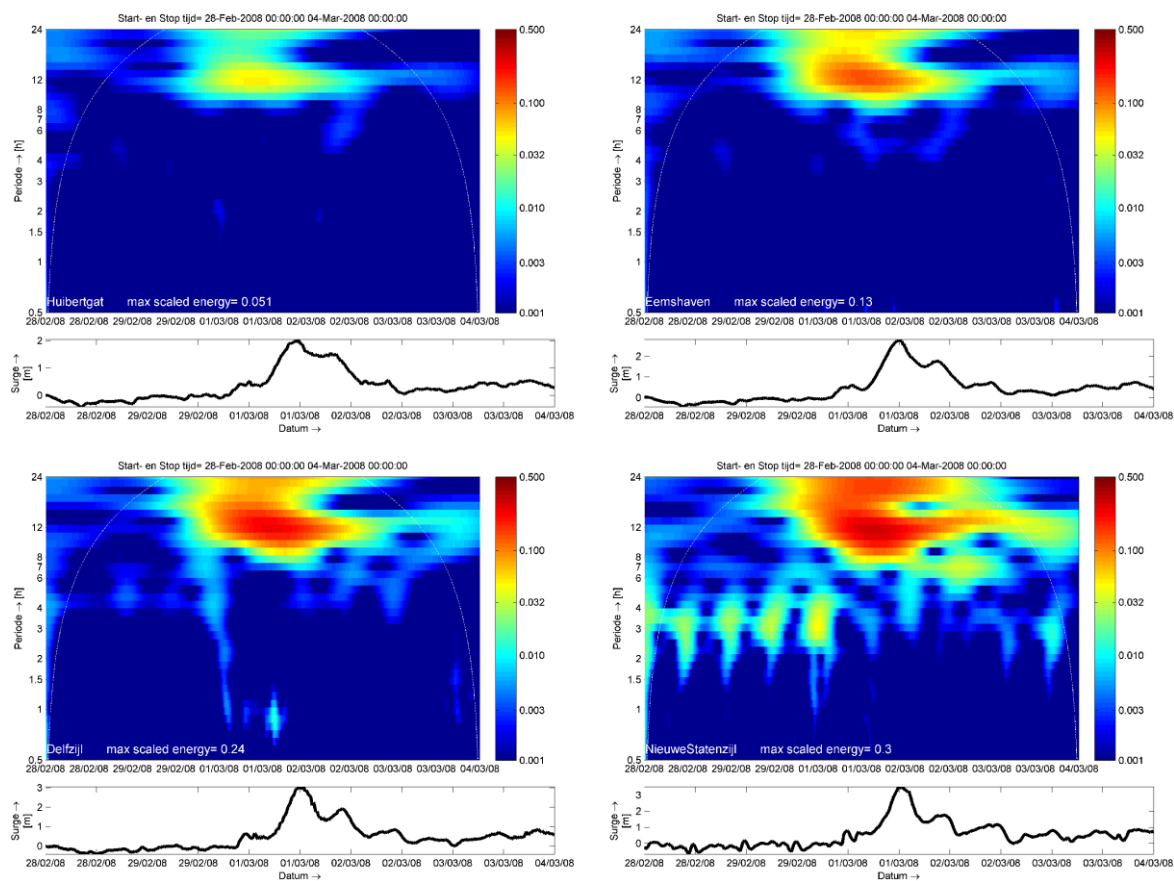
*Figuur B.1 Wavelet analyse 2006 storm resultaat (geschaalde energie) als functie van de tijd in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.*

## B.2. 7-12 november 2007



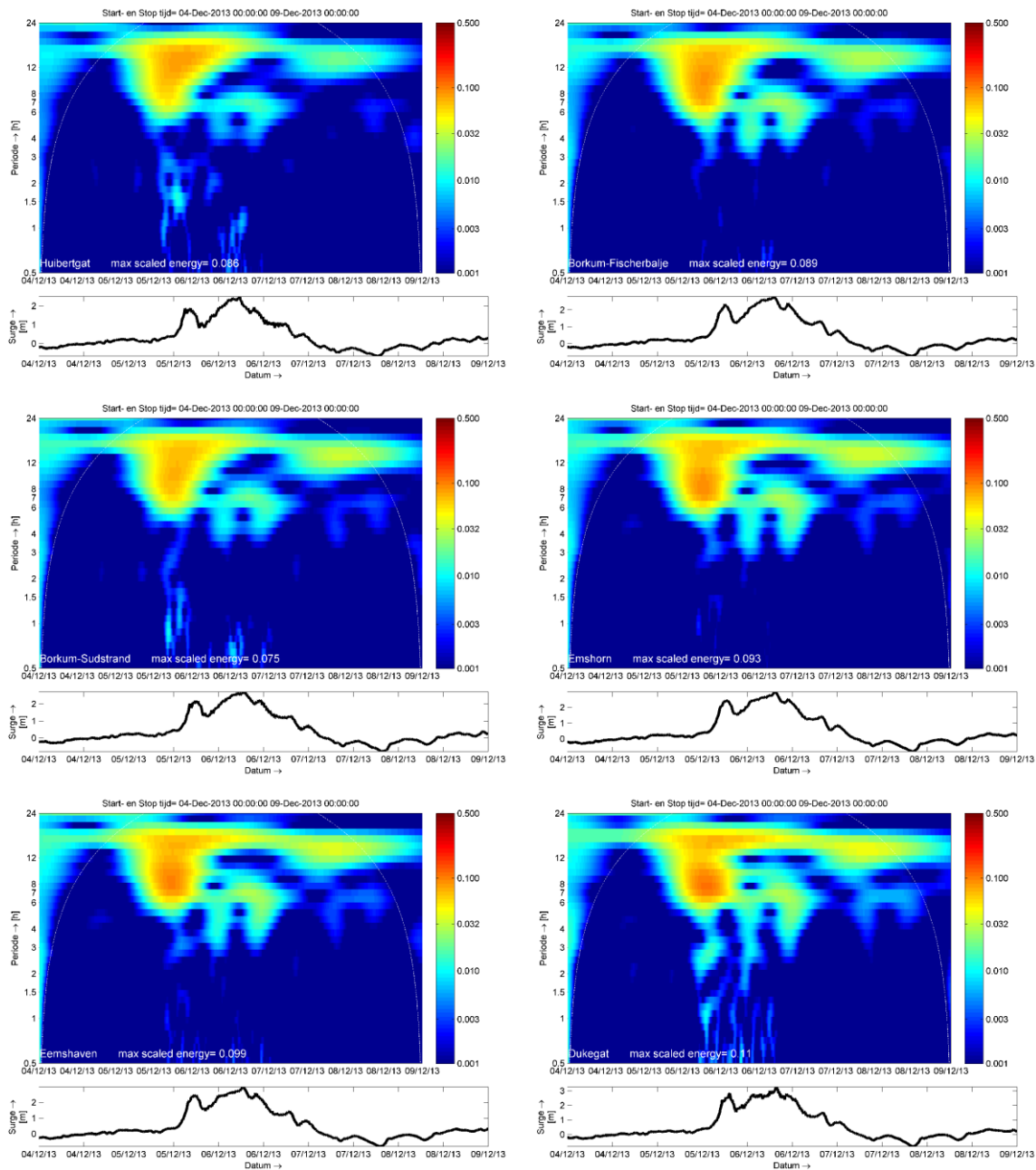
Figuur B.2 Wavelet analyse 2007 storm resultaat (geschaalde energie) als functie van de tijd in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.

**B.3. 28 februari – 3 maart 2008**

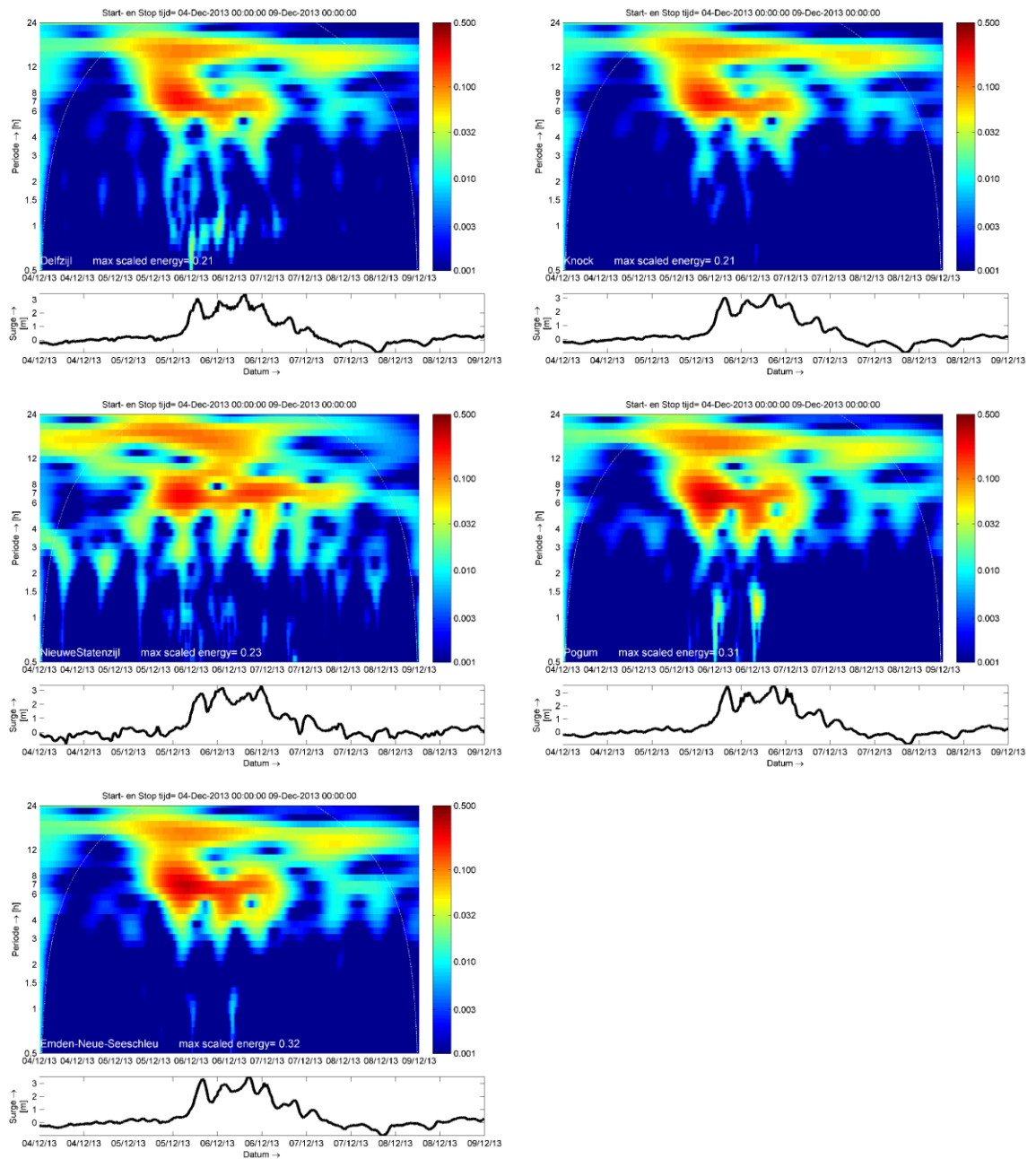


Figuur B.3 Wavelet analyse 2008 storm resultaat (geschaalde energie) als functie van de tijd in Huibertgat, Eemshaven, Delfzijl en Nieuwe Statenzijl.

## B.4. 4-9 december 2013

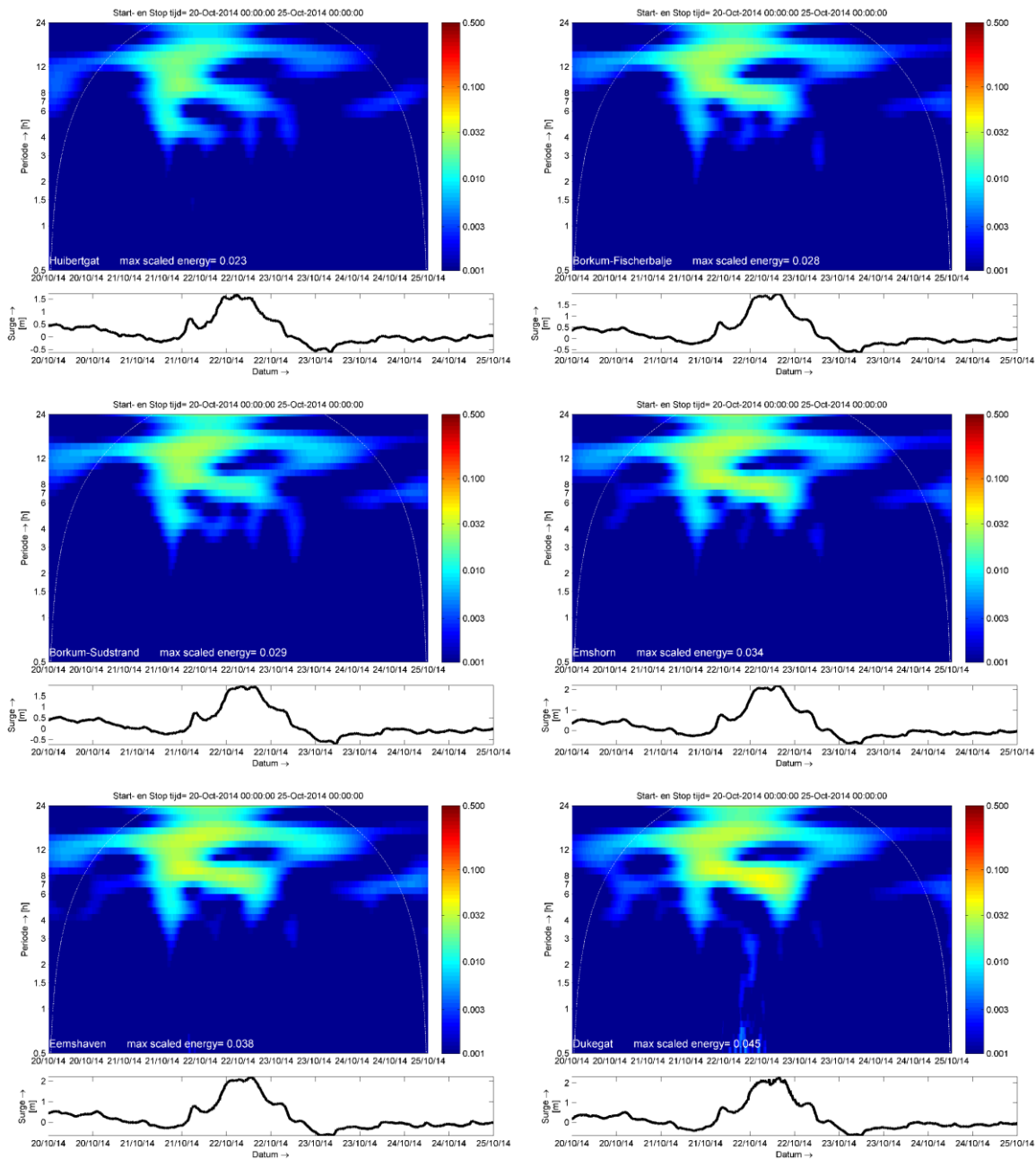


Figuur B.4a Wavelet analyse 2013 storm (geschaalde energie) als functie van de tijd in Huibertgat, Borkum Sudstrand, Borkum Fischerbalje, Emshorn, Eemshaven en Dukegat



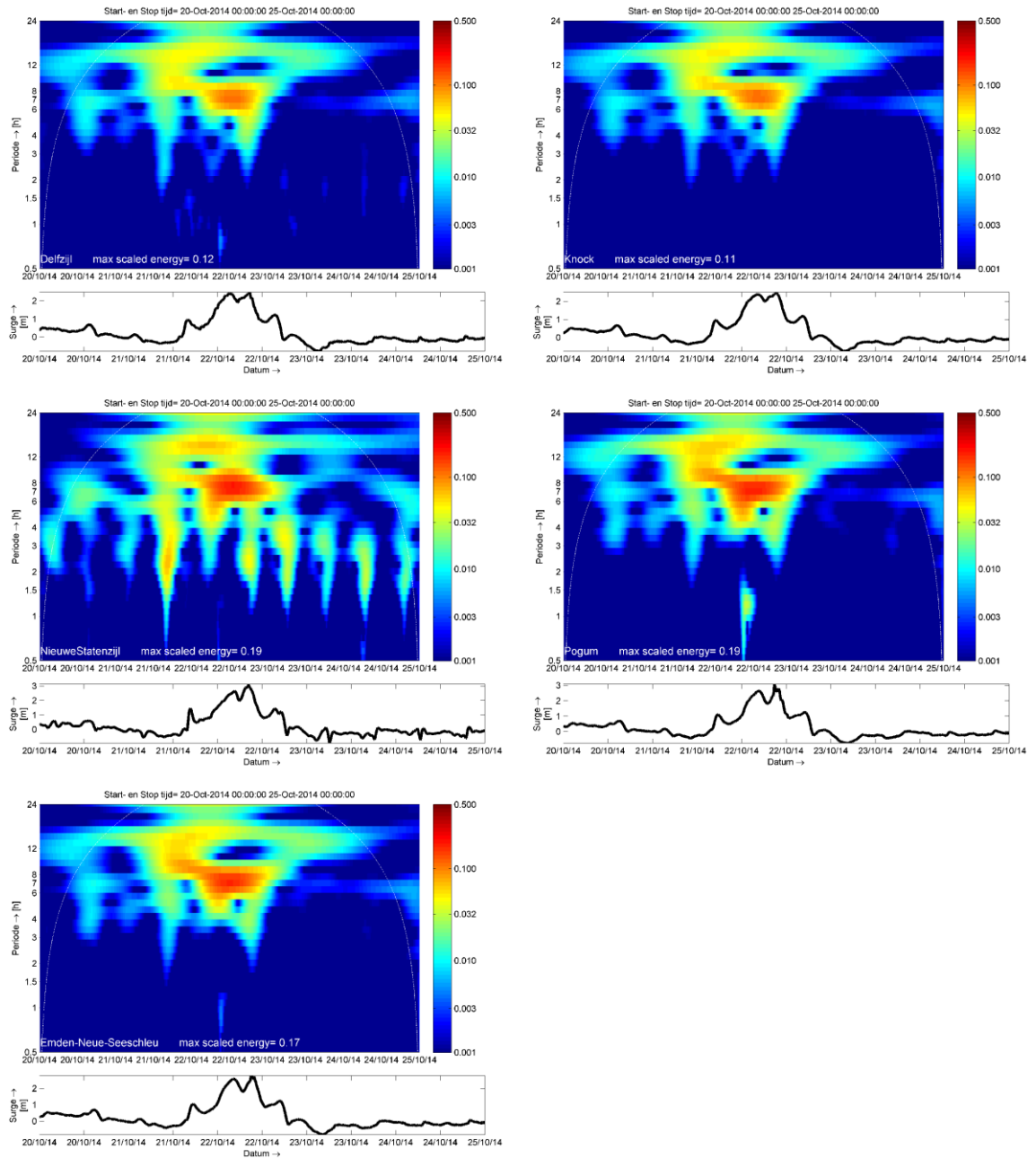
Figuur B.4b Wavelet analyse 2013 storm (geschaalde energie) als functie van de tijd in Delfzijl, Knock, Nieuwe Statenzijl, Pogum en Emden Neue Seeschleu

## B.5. 20-25 oktober 2014



Figuur B.5a Wavelet analyse 2014 storm (geschaalde energie) als functie van de tijd in Huibertgat, Borkum Sudstrand, Borkum Fischerbalje, Emshorn, Eemshaven en Dukegat





Figuur B.5b Wavelet analyse 2014 storm (geschaalde energie) als functie van de tijd in Delfzijl, Knock, Nieuwe Statenzijl, Pogum en Emden Neue Seeschleu

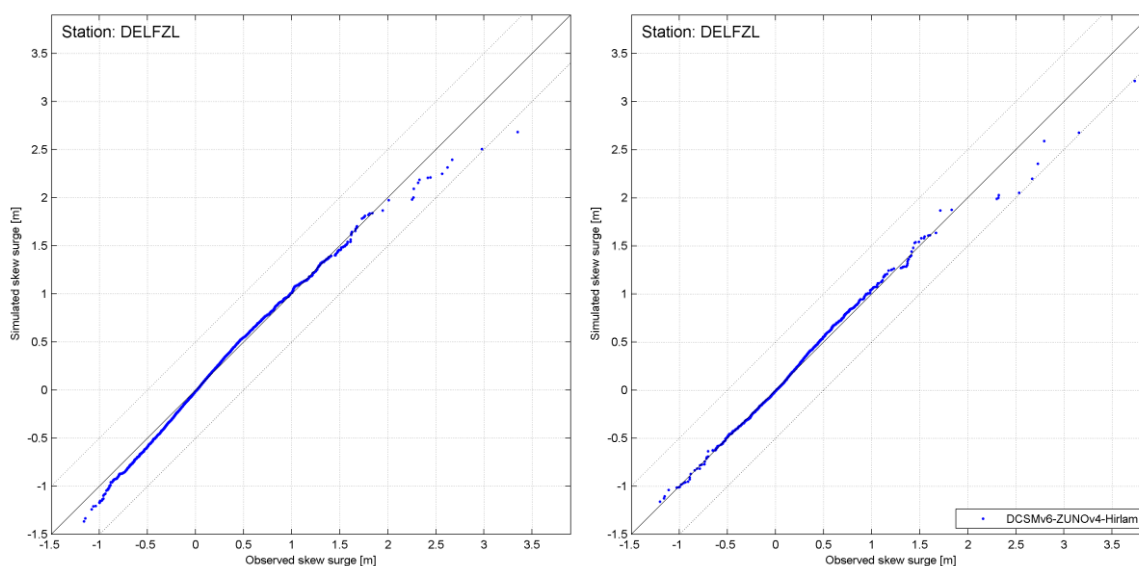


## C Vergelijking empirisch model met DCSMv6-ZUNOV4

De vergelijking van empirisch berekende en gemeten scheve opzetten kan op een meer grafische manier getoond worden in de vorm van een Q-Q plot. In deze plot worden de gemeten en gemodelleerde scheve opzetten eerst afzonderlijk gesorteerd en daarna tegen elkaar uitgezet. Dit betekent dat de stippen in de figuur niet bij elkaar horende gemeten en gemodelleerde scheve opzetten voorstellen. Het voordeel van een Q-Q plot is dat deze minder spreiding laat zien en de nadruk meer legt op systematische verschillen. Ook is het mogelijk om systematisch gedrag te vergelijken als resultaten in verschillende periodes beschikbaar zijn. Dit wordt in Figuur C.1 gedaan voor het in dit rapport gepresenteerde empirisch model en het operationele getij-opzet model DCSMv6-ZUNOV4.

Er wordt opgemerkt dat de methode waarmee de scheve opzet bepaald enigszins verschilt voor beide modellen. In dit experiment wordt de harmonische analyse per jaar uitgevoerd (twintig keer); bij de analyse van DCSMv6-ZUNOV4 is de harmonische analyse over twee keer een periode van ongeveer 2 jaar uitgevoerd. Dit verklaart het verschil in hoogste gemeten scheve opzet in beide figuren.

Deze resultaten geven aan dat er in beide modellen vanaf een scheve opzet van 180-190 cm boven NAP een systematische onderschatting optreedt. Dit wijst op onvolkomenheden in de model parameterisaties onder extreme condities, of het niet meenemen van fysische processen die alleen relevant worden onder extreme stormcondities. De tekortkoming kunnen zowel in het hydrodynamisch model als het meteorologisch model zitten. De overeenkomst tussen beide modellen suggereert dat de tekortkomingen gezocht moeten worden in het gebied tussen Huibertgat en Delfzijl.



Figuur C.1 Q-Q plot van berekende en gemeten scheve opzetten in Delfzijl, voor het hier gepresenteerde empirisch model (links) en DCSMv6-ZUNOV4 (rechts).