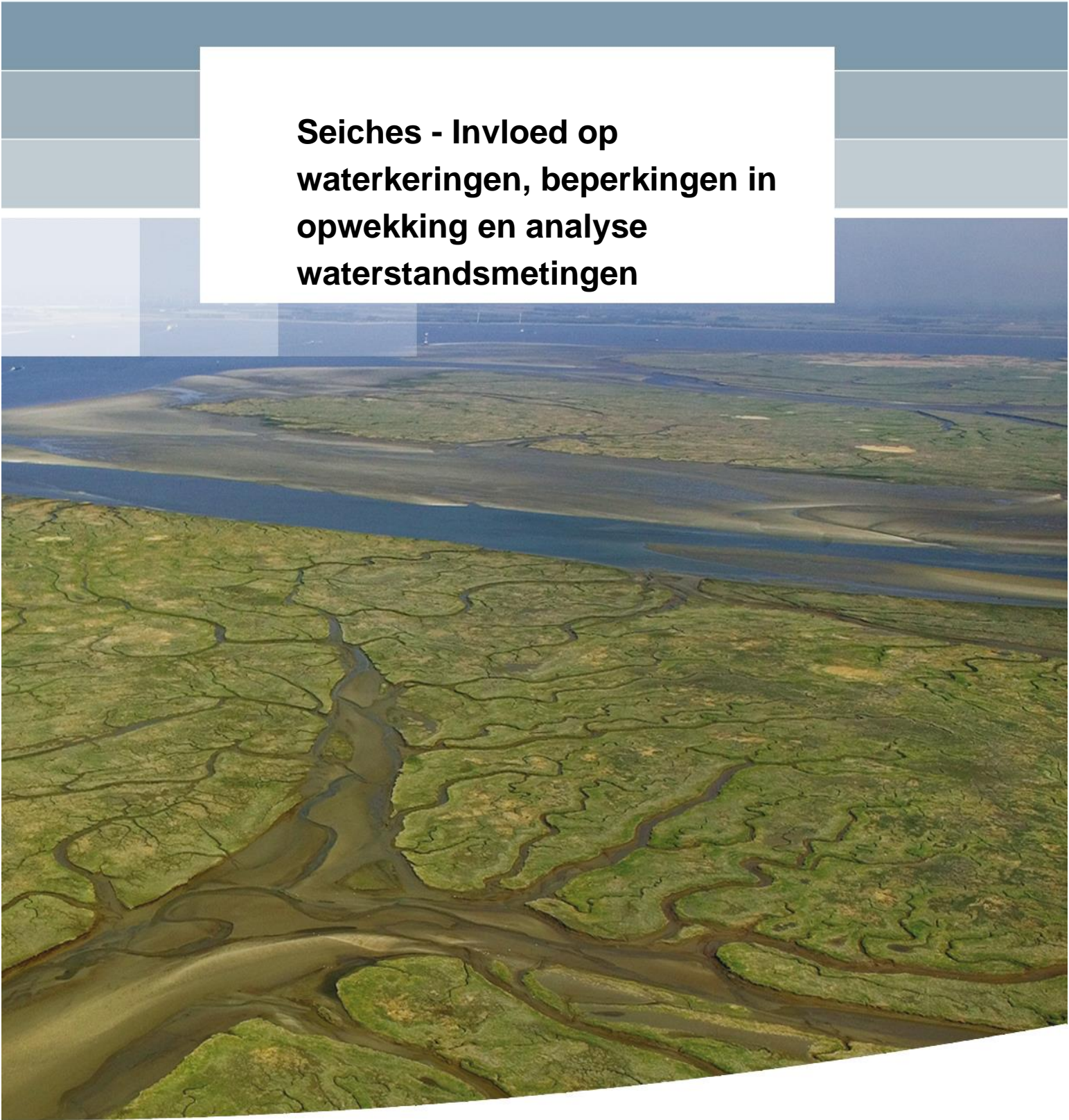


**Seiches - Invloed op
waterkeringen, beperkingen in
opwekking en analyse
waterstandsmetingen**



**Seiches - Invloed op waterkeringen,
beperkingen in opwekking en
analyse waterstandsmetingen**

KPP-VOW 2016

M.P.C. de Jong
S.P. Reijmerink
J.V.L. Beckers

1230042-007

Titel

Seiches - Invloed op waterkeringen, beperkingen in opwekking en analyse waterstandsmetingen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1230042-007	1230042-007-ZWS-0001	44

Trefwoorden

Seiches, halingen, waterkeringen, meteorologie, stormen, faalmechanismen, koufronten, troggen

Samenvatting

In 2015 is in het kader van het project 'Kennis Primaire Processen – Versterking Onderzoek Waterveiligheid' (KPP-VOW) een verkenning naar potentiële seiche-locaties in Nederland gemaakt en is een Plan van Aanpak met vervolgtaken uitgewerkt. Dit rapport beschrijft hoe in 2016 de eerste twee onderdelen uit dat Plan van Aanpak en een aanvullende data-analysetaak zijn uitgevoerd in datzelfde kader. Het gaat hierbij om de volgende taken:

- 1 Inventarisatie invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen
- 2 Inventarisatie van de fysische maxima van opwekkingsmechanismen
- 3 Analyse van waterstandsmetingen op het Marker- en IJsselmeer en randmeren

De eerste twee taken zijn op basis van expert-sessies uitgewerkt. Hierbij ging het om experts op het gebied van geotechniek en hydrodynamica (Taak 1), en hydrodynamica en meteorologie (Taak 2). Data-filtering, energiespectra en andere data-analysetechnieken zijn ingezet voor Taak 3.

De hoofduitkomst van Taak 1 is een overzicht van verschillende faalmechanismen met voor elk een inschatting in hoeverre seiches daarop van invloed kunnen zijn (Tabel 2.1, Pagina 7). Voor Taak 2 is een kwalitatieve analyse gemaakt van de mogelijke beperking in de opwekkingskracht van seiches tijdens extreme stormen. Deze resultaten zijn vervolgens uitgewerkt in een stappenplan voor het kwantificeren van deze potentiële beperking met behulp van numerieke simulaties in een eventueel vervolg op de huidige studie. De resultaten van Taak 3 bestaan uit typische waarden voor seiche-parameters voor verschillende locaties langs de beschouwde meren (hoogte, periode, zie Tabel 4.2, Pagina 24). Daarnaast is voor het IJsselmeer en het Markermeer de verdeling van de gemiddelde seiche-amplitude over de kalendermaanden bepaald en is de correlatie tussen seiche-amplitude en gelijktijdig opgetreden wind-geïnduceerde opzet voor die gebieden geanalyseerd.

De uitkomsten van de drie hoofdtaken zijn een opstap naar de verdere taken uit het Plan van Aanpak uit 2015, uit te voeren in eventuele vervolgfasen van deze studie.

Referenties

Plan van Aanpak KPP 2016 project, 22 december 2015

Compact werkplan uitvoering taken 'Seiches VOW 2016', Versie 3, 26 januari 2016

Status

definitief

Titel

Seiches - Invloed op waterkeringen, beperkingen in opwekking en analyse waterstandsmetingen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	1230042-007	1230042-007-ZWS-0001	44

Key words

Seiches, water barriers, meteorology, storms, failure mechanisms, cold fronts, troughs

Summary

In 2015 Deltares made an inventory of all potential seiche locations within the Netherlands and prepared a Work Plan for possible further tasks in following years. Those activities were part of the project 'Kennis Primaire Processen – Versterking Onderzoek Waterveiligheid' (KPP-VOW). The present report describes how in 2016 the first two tasks from the Work Plan on seiches, and an additional data analysis task, have been performed within the same project framework. The work included the following tasks:

- 1 Inventory of the influence of seiches on the failure mechanisms of water barriers
- 2 Inventory of possible limitations in the strengths of seiche generating mechanisms
- 3 Analysis of water levels on Lake Marker, Lake IJssel and adjacent smaller lakes

The first two tasks have been based on expert sessions. This included experts on geotechnics and hydrodynamics (Task1) and hydrodynamics and meteorology (Task 2). Data filtering, energy spectra and other analysis techniques have been applied for Task 3.

The main result of Task 1 consists of an overview of the different failure mechanisms together with an assessment to what extent seiches could influence those mechanisms (Page 7). For Task 2 Deltares, together with KMNI, made a qualitative analysis of the possible limitations in the strength of seiche generation mechanisms during extreme storms. The results of that assessment have been used to draft a stepwise approach for quantifying such potential limitations using numerical modelling in a possible follow-up phase of this project. The results of Task 3 consist of typical values for seiche parameters at several locations along the considered lakes (height, period, see Page 24). In addition, for Lake Marker and Lake IJssel Deltares determined the distribution of the monthly-averaged seiche-amplitude and analysed the correlation between seiche-amplitude and coinciding wind-induced surge.

The outcomes of the three main tasks form a stepping stone towards further tasks mentioned in the Work Plan of 2015, to be performed in possible following phases of this study.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Projectachtergrond	1
1.2	Voortzetting van verkenning uit 2015	1
1.3	Studiedoel	3
1.4	Aanpak seiches onder KPP-VOW 2016	3
1.4.1	Taak 1, faalmechanismen	3
1.4.2	Taak 2, (beperkingen in) seiche-opwekking en -response	4
1.4.3	Taak 3, analyse waterstandsmetingen IJsselmeer en aangrenzende meren	4
1.5	Indeling rapport	5
2	Invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen	6
2.1	Achtergrond en motivatie	6
2.2	Uitkomst expert-consultatie	6
3	Beperking opwekking en response seiches	11
3.1	Opwekking van seiches	11
3.1.1	Achtergrond mogelijke beperkingen in opwekking	11
3.1.2	Uitkomst discussiesessies	11
3.1.3	Stappenplan voor numerieke analyses in een vervolgstudie	14
3.2	Seiche-response	15
3.2.1	Algemeen	15
3.2.2	Havenbekkens	16
3.2.3	Grote meren	17
3.2.4	Estuaria	17
4	Analyse waterstandsmetingen	19
4.1	Context	19
4.2	Overzicht meetpunten	19
4.3	Fourier-, wavelet- en extreme-waarde analyse	21
4.4	Karakteristieke waarden	23
4.5	Correlatie seiche-amplitude en wind-geïnduceerde opzet	25
4.6	Verdeling typische seiche-amplituden per maand	26
4.7	Discussie uitkomsten analyse waterstandsmetingen	27
5	Detailanalyse geselecteerde seiche-episoden	29
5.1	Beschouwde episoden	29
5.1.1	Algemene beschrijving	29
5.1.2	Storm Kyrill – 18 januari 2007 (koufront in zuidzuidoostelijke richting)	30
5.1.3	Polar outbreak – 21 november 2008 (koufront in zuidelijke richting)	30
5.1.4	Herfststorm – 28 oktober 2013 (koufront in oostnoordoostelijke richting)	31
5.1.5	Lentestorm – 31 maart 2015 (koufront in oostzuidoostelijke richting)	31
5.2	Belangrijkste observaties en discussie	31
6	Relevantie decimeringshoogte in bijdrage seiches aan MHW	33
6.1	Context	33
6.2	Analyse invloed decimeringshoogte	33
6.2.1	Model 1: Kans op seiche met een constante waarde	33

6.2.2	Model 2: Gammaverdeling van seiches	35
6.3	Getallenvoorbeeld Rotterdam	36
6.4	Conclusie en discussie	37
7	Conclusies, discussie en vooruitblik	39
7.1	Hoofdconclusies	39
7.2	Discussie en vooruitblik	40
7.3	Korte-termijn taken voorzien voor 2017	42
	Referenties	43
	Bijlage(n)	
A	Notulen van expertsessies	A-1
B	Resultaten wavelet-analyse per meetlocatie	B-1
B.1	IJsselmeer	B-1
B.1.1	Den Oever Binnen	B-1
B.1.2	Kornwerderzand Binnen	B-2
B.1.3	Lemmer	B-4
B.1.4	Krabbersgat Noord	B-5
B.1.5	Houtrib Noord	B-7
B.2	Markermeer	B-8
B.2.1	Krabbersgat Zuid	B-8
B.2.2	Houtrib Zuid	B-10
B.2.3	Schellingwouderbrug	B-11
B.3	Eem en Gooimeer	B-13
B.3.1	Hollandse Brug	B-13
B.3.2	Nijkerk West	B-14
B.4	Wolderwijd, Veluwemeer en Drontermeer	B-16
B.4.1	Nijkerk Oost	B-16
B.4.2	Elburgerbrug	B-17
B.4.3	Roggebotsluis Zuid	B-19
B.5	Ketelmeer	B-20
B.5.1	Kamperhoek	B-20
B.5.2	Ketelhaven	B-22
B.5.3	Roggebotsluis Noord	B-23
B.6	Zwarte Water	B-25
B.6.1	Ramspolbrug	B-25
B.6.2	Kadoelen	B-26
B.6.3	Genemuiden	B-28
C	Extreme-waarde fits per meetlocatie	C-1
D	Weerkaarten, satellietbeelden en meetsignalen	D-1
D.1	Storm Kyrill – 18 januari 2007	D-1
D.2	Polar outbreak – 21 november 2008	D-5
D.3	Herfststorm – 28 oktober 2013	D-9
D.4	Lentestorm – 31 maart 2015	D-13

1 Inleiding

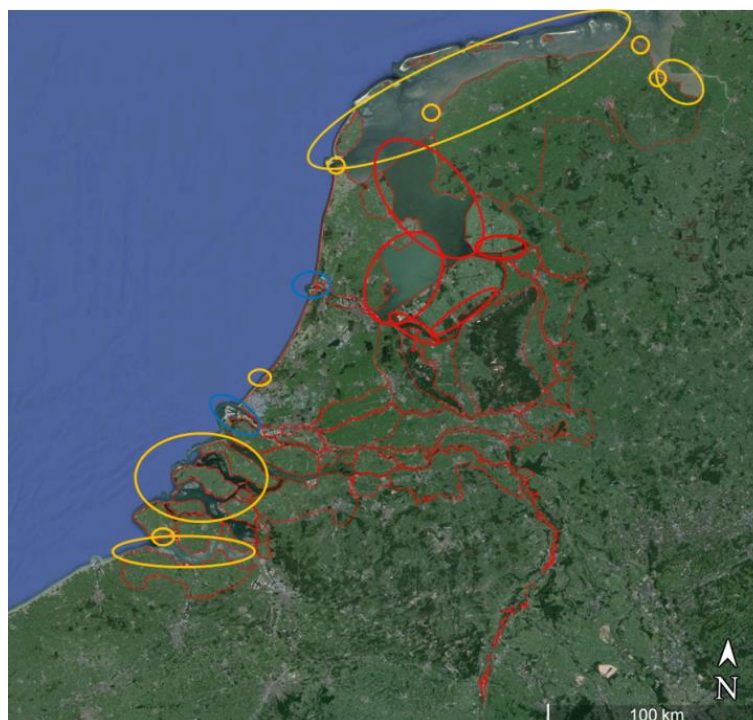
1.1 Projectachtergrond

Deze studie is onderdeel van het project 'Kennis Primaire Processen – Versterking Onderzoek' Waterveiligheid (KPP-VOW). Rijkswaterstaat wil met dit project bijdragen aan verbeteringen in het primaire proces rondom waterveiligheid. Dat kan worden bereikt door kostenbesparingen bij aanleg, beheer en onderhoud, door betere risicobeheersing en door versterking van het imago van Rijkswaterstaat. Binnen dit project wordt aan meerdere onderwerpen gewerkt, onder andere gelinkt aan kennisbehoeften uit programma's zoals WBI (Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium).

Eén van de lopende onderwerpen binnen KPP-VOW is de invloed van seiches op waterkeringen. Seiches zijn staande lange golven die in havenbekkens, op meren en in estuaria versterkt op kunnen treden als gevolg van resonantie. Deze lange golven treden op bij typische tijdschalen tussen enkele minuten en enkele uren, dus tussen de tijdschalen van windgolven (<20 s) en het getij (ca. 12 uur) in. De tijdschaal van een seiche is gekoppeld aan de diepte en horizontale afmetingen van het gebied waarin het seiche optreedt. Dit soort lange golven kan de maatgevende waterstand en mogelijk de faalmechanismen van waterkeringen beïnvloeden.

1.2 Voortzetting van verkenning uit 2015

In 2015 is onder KPP-VOW een verkenning uitgevoerd naar seiches (Deltares, 2015a). Daarin is nagegaan waar in Nederland seiches op zouden kunnen treden (Figuur 1.1) en is voor die gebieden een eerste schatting gemaakt van lokale seiche-kenmerken (amplitude en periode, Tabel 1.1). Daarnaast is per gebied een samenvatting gegeven van eerdere studies.



Figuur 1.1 Potentiële seiche-locaties in Nederland (aangepaste versie van afbeelding overgenomen uit Deltares, 2015a). Rood: relevant en als eerste oppakken; geel: relevant; blauw: reeds bekeken in andere studies.

Uit die verkenning bleek dat seiches in verscheidene gebieden in Nederland op kunnen treden, met verschillende sterktes. Figuur 1.1, oorspronkelijk afkomstig uit Deltares (2015a), toont een overzicht van deze gebieden, inclusief de mate van urgentie van verder onderzoek. Tabel 1.1 geeft een samenvatting van de kwantitatieve resultaten van de verkenning uit 2015. De resultaten geven aan dat seiches in Nederland kunnen optreden met typische verwachte amplituden tot ca. 1 m tijdens gemiddelde stormcondities. De langste tijdschalen treden op in het IJsselmeer en in de estuaria, met seiche-perioden van meerdere uren.

Tabel 1.1 Samenvatting van uitkomsten van de verkenning (uit Deltares, 2015a).

Naam gebied	Indicatieve orde van grootte lokale seiche-amplitude (m)		Typische tijdschaal	Gevoelig voor seiches?	Voorgaande studies uitgevoerd?	Aanvullende studies nodig?
	Normaal/ operationeel	Extreem				
Westerschelde*	0.1	0.2	>3 uur	lokaal	beperkt	alleen tbv HR + locatie-specifiek
Vlissingen-haven*	0.2	0.3	tot 30 min.	mogelijk	beperkt	alleen tbv HR
Noord Zeeland*	0.1	0.2	1-3 uur	beperkt	nee	alleen tbv HR
Rotterdam	0.5-1.0	1.0	30 min – 2.5 uur	ja	ja	alleen aanscherping
Benedenstr. Rivieren + binnenhavens*	<0.1	<0.1	enkele minuten	beperkt	nee	nee
Scheveningen	0.2	0.5	8-20 minuten	mogelijk	beperkt	alleen tbv HR
IJmuiden	0.5-1.0	1.0	30 minuten	ja	ja	alleen aanscherping
Den Helder	0.2	0.5	10-30 minuten	mogelijk	beperkt	alleen tbv HR
Harlingen*	<0.1	0.1 - 0.3	10-20 minuten	mogelijk	nee	alleen tbv HR
Westelijke Waddenzee	0.1	0.3	8-15 minuten, >3 uur	lokaal	beperkt	alleen tbv HR + locatie-specifiek
Eemshaven*	0.1	0.35	15-30 minuten	mogelijk	nee	alleen tbv HR
Delfszijl*	<0.1	<0.2	10 minuten	mogelijk	nee	alleen tbv HR
Eems-Dollard*	<0.1	<0.2	>3 uur	beperkt	nee	alleen tbv HR
IJsselmeer	0.5	1.0	1-3 uur	ja	beperkt	ja
Markermeer	0.2	0.5-1.0	1-3 uur	beperkt	nee	ja
Kleine meren*	<0.1	<0.1	enkele minuten	mogelijk	nee	nee

* Voor deze locaties zijn geen (uitgebreide) eerdere studies beschikbaar en de vermelde indicatieve waarden zijn slechts een ruwe expert-schatting die in detailstudies nader onderbouwd dienen te worden.

Aan de hand van de genoemde verkenning is in Deltares (2015a) ook een Plan van Aanpak aangemaakt voor taken die in de daaropvolgende jaren uitgevoerd zouden kunnen worden voor het onderwerp seiches. Voor details van het Plan van Aanpak verwijzen wij naar Deltares (2015a). In 2016 zijn de eerste twee onderdelen uit het plan opgepakt (hieronder

omschreven). Verdere taken uit het werkplan zullen mogelijk in latere jaren worden uitgewerkt.

1.3 Studiedoel

In 2016 zijn binnen het onderdeel 'Seiches' van KPP-VOW 3 deeltaken uitgevoerd:

- 1 *Inventarisatie invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen*
Doel: Inventariseren van de invloed van seiches op waterkeringen en nagaan welke aspecten van seiches relevant zijn voor welke faalmechanismen van waterkeringen.
- 2 *(beperkingen in) Seiche-opwekking en -response*
Doel: Nagaan welke fysische grenzen te stellen zijn aan de meteorologische krachten die seiches opwekken. Ook beperkingen aan de responsekant (demping) zullen in deze beschouwing worden meegenomen.
- 3 *Analyse van waterstandsmetingen op locaties langs het Markermeer, IJsselmeer en aangrenzende meren op seiche-achtige verschijnselen*
Doel: Identificeren en kwantificeren van seiches en andere waterstandsschommelingen op locaties aan het IJsselmeer en het Markermeer, en langs de oevers van daarmee in verbinding staande kleinere meren en de Randmeren rondom Flevoland.

De eerste twee (generieke) taken komen overeen met de eerste twee onderdelen van het Plan van Aanpak voor verdere seiche-studies (Deltares, 2015a). De derde taak, een beknopte data-analyse, is in overleg met RWS na afronding van de verkenning uit 2015 toegevoegd, gezien de relevantie van het analyseren van seiches in juist die gebieden (Figuur 1.1). Indien gewenst kan Taak 3 in latere studiefasen worden uitgebreid met gedetailleerdere analyses.

Parallel aan het uitvoeren van de huidige studie heeft een stage plaatsgevonden waarin onder andere met numerieke modellen de opwekking van seiches op het IJsselmeer is geanalyseerd (student L. Muntjewerf, RWS, 2016). In die stage zijn de uitkomsten van Taak 3 uit deze projectfase gebruikt als startpunt. Uitkomsten van die stage zullen weer bijdragen aan het startpunt van numerieke taken in een mogelijk vervolg van dit project.

1.4 Aanpak seiches onder KPP-VOW 2016

1.4.1 Taak 1, faalmechanismen

In deze taak (Werkpakket F1 uit Deltares, 2015a) is het van belang de kennis op het vlak van seiches (waterbeweging) te koppelen aan de kennis van de sterkte en faalmechanismen van waterkeringen. Hiervoor is expertise binnen Deltares op het vlak van hydrodynamica en geotechniek gecombineerd tijdens een discussie-sessie met experts op beide gebieden. Daarnaast heeft een statisticus deelgenomen om uit te werken of de kans op samenloop met een hoog hydraulisch belastingsniveau (HBN, vereiste kruinhoogte) voldoende groot is om seiches van invloed te laten zijn op de Hydraulische Randvoorwaarden (HR).

De volgende experts hebben deelgenomen aan de discussie:

- | | |
|------------------------|-----------------------------------|
| • Mark Klein Breteler | dijkbekledingen |
| • Alexander van Duinen | macro-stabiliteit |
| • Ulrich Förster | piping |
| • Andre van Hoven | grasbekledingen, binnentaluds |
| • Joost Beckers | expert statistiek |
| • Jacco Groeneweg | golven, numerieke golfmodellering |
| • Martijn de Jong | golven, seiches |

Deze inventarisatie is een belangrijke eerste stap. De uitkomst van deze taak, vastgelegd in de huidige rapportage, geeft aan welke aspecten van de seiches, en/of welke locaties in Nederland, het meest urgent zijn in relatie tot de veiligheid van waterkeringen in Nederland. Dit kan aanleiding zijn voor het verleggen van de focus in latere onderdelen (in 2017 en/of daarna).

1.4.2 Taak 2, (beperkingen in) seiche-opwekking en -response

In deze taak (Werkpakket O1 uit Deltares, 2015a) is een kwalitatieve inventarisatie van mogelijke beperkingen in de opwekking en in de response van seiches uitgewerkt op basis van overleggen met deskundigen, onder andere experts op het gebied van meteorologie (KNMI). Dit is aangevuld met een analyse van gegevens, inclusief de bijbehorende meteorologische omstandigheden, van een beperkt aantal seiche-gevallen.

De volgende activiteiten vallen onder deze taak:

- Analyse van een aantal historische, karakteristieke gevallen (inclusief waterstandsmetingen op zee).
- Vaststellen/schatten wat de kenmerken/sterkte van de bekende aandrijvende mechanismen moeten zijn om tot zeer hoge seiches te komen (die volgens statistiek relevant zijn).
- Expertsessies met meteorologen en hydrodynamici (KNMI en Deltares), onder andere om na te gaan of de benodigde sterkte van de opwekkende krachten in de praktijk daadwerkelijk op kunnen treden.
- Kwalitatief aangeven waar de begrenzing door gevormd kan worden en hoe deze nader gekwantificeerd zouden kunnen worden.

Vanuit KNMI hebben M. van Schaik en S. Tijn bijgedragen aan deze taak.

1.4.3 Taak 3, analyse waterstandsmetingen IJsselmeer en aangrenzende meren

Er is vanuit RWS behoefte aan informatie over seiches voor zowel IJsselmeer, Markermeer, de meren die met IJsselmeer/Markermeer in open verbinding staan, het Zwarte Meer en het Veluwemeer. Het gaat hierbij vooral om locaties die relevant zijn voor het tijdig sluiten van coupures/balgstuwen maar ook voor sluizen (vervalbelasting). Daarom zijn in deze taak meetreeksen van waterstanden langs deze meren geanalyseerd om zo de typische amplituden en tijdschalen van seiches en seiche-achtige fenomenen (waterstandsslingeringen) in deze gebieden vast te kunnen stellen. De uitkomsten dienen gezien te worden in het licht van de huidige hoogte-toeslag voor dit soort waterstandsslingeringen voor de waterkeringen in dit gebied. Ook al worden de extreme condities gelinkt aan de herhalingstijden van de HR niet gemeten, toch geeft analyse van de metingen een eerste basis om de bestaande hoogtetoeslagen mee te vergelijken en kunnen gebieden met sterke of juist zwakkere waterstandsslingeringen worden geïdentificeerd.

Na afstemming met RWS zijn de volgende meetlocaties beschouwd binnen Taak 3:

- Den Oever binnen
- Kornwerderzand binnen
- Krabbersgat noord
- Krabbersgat zuid
- Lemmer
- Schellingwouderbrug
- Kadoelen
- Roggebotsluis Noord (eerder beschouwd in Deltares, 2014a)

- Roggebotsluis Zuid
- Elburgerbrug
- Nijkerk Oost
- Nijkerk West
- Hollandse brug
- Houtrib-Noord
- Houtrib-Zuid
- Kamperhoek
- Ramspolbrug
- Genemuiden
- Ketelhaven

Meetgegevens van waterstanden zijn geanalyseerd van januari 2006 tot en met december 2015, dus 10 jaar in totaal. Amplituden en tijdschalen van seiches en andere schommelingen zijn uit deze data afgeleid met behulp van (Fourier-) frequentie-filtering en wavelet-analyses (deze techniek wordt in het betreffende hoofdstuk nader toegelicht). Daarnaast is voor het IJsselmeer en het Markermeer de verdeling van de gemiddelde seiche-amplitude over de kalendermaanden bepaald en is de correlatie tussen seiche-amplitude en gelijktijdig opgetreden wind-geïnduceerde opzet voor die gebieden geanalyseerd.

Een beperking in de analyse is het opslaginterval van de waterstandsmetingen. De meetwaarden zijn om de 10 minuten opgeslagen, waardoor de kortste slinging die weergegeven kan worden 20 minuten bedraagt. Waar mogelijk en relevant is een conclusie gegeven over de geschiktheid van de huidige meetlocaties voor het registreren van deze specifieke fenomenen en of er in de toekomst mogelijk andere meetlocaties benodigd zijn.

De uitkomsten van deze deeltaak kunnen als uitgangspunt dienen voor het definiëren van mogelijke vervolgtaken voor het IJsselmeergebied in de volgende jaren onder KPP-VOW. Hieronder vallen bijvoorbeeld ook gedetailleerde interpretatie van specifieke situaties, inclusief correlaties met windcondities en andere (meteorologische) fenomenen en een koppeling naar Werkpakket O2¹ uit het Plan van Aanpak (Deltares, 2015a).

1.5 Indeling rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de resultaten van Taak 1, inclusief een overzichtstabel van de (potentiële) invloed van seiches op verschillende faalmechanismen van waterkeringen. De uitkomsten van Taak 2, beperkingen in seiche-opwekking en -response, staan beschreven in Hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft de analyse van waterstandsmetingen van locaties langs het IJsselmeer en nabijgelegen meren en de kwantificering van de seiche-amplituden op die locaties. Als onderdeel van Taak 2, worden in Hoofdstuk 5 enkele opvallende seiche-episoden uit Hoofdstuk 4 nader uitgewerkt door het beschouwen van weerkaarten, waterstandsmetingen en meteorologische meetgegevens. De algemene relevantie van de invloed van seiches op de maatgevende hoogwaterstanden wordt in Hoofdstuk 6 uitgewerkt aan de hand van een beschouwing van waterstandsstatistiek en de invloed van de decimeringshoogte daarin. Hoofdstuk 7 beschrijft de hoofdconclusies van de huidige studie, aangevuld met een vooruitblik.

¹ Werkpakket O2 betreft het omzetten van de kwalitatieve beschrijving van de opwekking naar een kwantitatieve (incl. mogelijke fysische begrenzing).

2 Invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen

2.1 Achtergrond en motivatie

Omdat de tijdschalen van seiches tussen het getij en windgolven in liggen kunnen seiches een bijzondere/andere invloed hebben op (faalmechanismen van) waterkeringen en die tot nu toe mogelijk nog niet is beschouwd. Om dit na te gaan is een expert-consultatie uitgevoerd in de vorm van een brainstormsessie met experts op het gebied van hydrodynamica, geotechniek en statistiek (met deelnemers zoals beschreven in Sectie 1.4.1).

De onderstaande beschouwingen zijn gebaseerd op expert-interpretaties. Op basis hiervan zijn binnen de huidige taak generieke verwachtingen en bestaande inzichten verkend. Echter, gezien de onzekerheid in die uitkomsten zal begrijpelijkerwijs vooralsnog de neiging bestaan om conservatieve keuzes te maken. Voor scherpere inschattingen en conclusies zullen aanvullende (numerieke) gevoeligheidsanalyses benodigd zijn – met en zonder de invloed van seiches – als onderdeel van een mogelijke vervolgfase van deze studie.

2.2 Uitkomst expert-consultatie

Tijdens de expert-consultatie zijn de verschillende faalmechanismen besproken en is op basis van expert-interpretaties nagegaan of seiches een invloed kunnen hebben op die mechanismen en zo ja, hoe die invloed verwerkt zou kunnen worden in de HR (via de maatgevende waterstand, afgekort als MHW, of anders). De notulen van die expert-sessie (onderdeel van Taak 1) zijn opgenomen in Bijlage A.

Er zijn drie manieren geïdentificeerd om seiches mee te nemen bij de beoordeling van faalmechanismen van waterkeringen:

- A. Meenemen in de statistiek van hoogwaters en als een stationaire opslag toepassen bovenop de waterstandverhoging door stormopzet, getij en/of afvoergolven. De beperkte duur van het seiche wordt hierbij genegeerd en ook de periodiciteit in het seiche-sigitaal. Dit is de huidige praktijk wanneer een toeslag voor seiches binnen de HR in detail wordt berekend (vooralsnog alleen voor de havens van Rotterdam en IJmuiden, zie Deltares, 2015a).
- B. Bij de beoordeling van een faalmechanisme het seiche niet meenemen. Alleen de waterstandvariatie met een duur gelijk aan getij (of langer) wordt beschouwd. De waterstand waarbij het faalmechanisme wordt beoordeeld is daarmee doorgaans lager dan de werkelijk (kortstondig) optredende maximale waterstand tijdens een seiche.
- C. Het werkelijke waterstandverloop in de tijd, inclusief de periodiciteit en duur het seiche, wordt in detail meegenomen.

Van elk van de besproken mechanismen is nagegaan welk van de drie mogelijke aanpakken het meest geschikt zou zijn. In sommige gevallen is een conservatieve aanpak voorgesteld en bij andere faalmechanismen is geconcludeerd dat aanvullend onderzoek nodig is (bijvoorbeeld naar de invloed van het tijdsverloop van een seiche op een faalmechanisme). Voor enkele aspecten is op basis van expertinschatting geconcludeerd dat seiches geen significante rol spelen en dat er bij beoordeling van die faalmechanismen geen rekening met seiches gehouden hoeft worden. Tabel 2.1, op de volgende pagina, toont een samenvatting van de besproken mechanismen en uitkomsten van het overleg. In het resterende deel van deze sectie worden de voornaamste onderdelen uit deze tabel toegelicht en onderbouwd.

Tabel 2.1 Overzicht van faalmechanismen van waterkeringen, de verwachte invloed van seiches daarop en een voorstel van hoe dit verwerkt zou kunnen worden in de HR (via opname in MHW of anders).

Faalmechanisme	Seiches van invloed?	Hoe invloed seiches mee te nemen in MHW?
Erosie grasbekleding kruin en binnentalud bij overslag	Ja, top werkt zwaarder door dan dal	A is conservatief, C kan overwogen worden
Afschuiven grasbekleding binnentalud bij overslag	Geen significante invloed verwacht	Seiches niet meenemen (B), C kan overwogen worden igv situaties die kritisch zijn voor overslag
Macro-stabiliteit binnentalud bij toepassing zonering irt overslag	Ja, maar op dit moment zit dit faalmechanisme icm overslag niet standaard in WBI2017.	A is conservatief. Erosie na afschuiving wordt echter niet expliciet berekend, C is daarom niet zinvol.
Macro-stabiliteit binnentalud irt grondwaterstand in waterkering	Geen significante invloed verwacht omdat waterlens ('opbolling' waterstand) in kering voornamelijk bepaald wordt door neerslag	seiches niet meenemen (B)
Macro-stabiliteit buitentalud irt grondwaterstand in waterkering	Geen significante invloed verwacht vanwege beperkte amplitude van seiches	seiches niet meenemen (B)
Erosie grasbekleding door golfklappen (buitentalud)	Indien toeslag seiches al in MHW dan geen (aanvullende) kritische invloed	A
Erosie grasbekleding door golfoploop (buitentalud)	Ja, maar is conservatief afgedekt indien een toeslag voor seiches is opgenomen in MHW	A is conservatief, C zou overwogen kunnen worden
Afschuiven gras/steenbekleding + top laagstabiliteit	Ja, seiches zorgen voor verschuiving van aanvalsgebied langs het talud. Bijkomende invloed op lokale golven als die diepte-gelimiteerd zijn agv tijdelijke waterstandsverhoging.	Meestal seiches niet meenemen (B), en alleen mogelijk A igv diepte-gelimiteerde golven.
Uitspoeling van top laag (buitentalud)	Beperkte invloed verwacht. Mogelijk bijkomende invloed op lokale diepte-gelimiteerde golven.	Mogelijk seiches niet meenemen (B). C nader bestuderen voor definitieve conclusie.
Uitspoeling van ondergrond (buitentalud)	Beperkte invloed verwacht. Mogelijk bijkomende invloed op lokale diepte-gelimiteerde golven.	Mogelijk seiches niet meenemen (B). C nader bestuderen voor definitieve conclusie.
Falen van asfaltbekledingen (buitentalud)	Geen invloed verwacht bij verschil in waterdrukken en irt vermoeiing, wel bij golfinvloeden igv diepte-gelimiteerde golfcondities	Meestal seiches niet meenemen (B), en alleen mogelijk A igv diepte-gelimiteerde golven.
Piping	Geen significante invloed verwacht omdat piping is gelinkt aan fenomenen met veel langere tijdschaal	seiches niet meenemen (B)
Plaatvloeiingen (stabiliteit voorland)	Seiches kunnen theoretisch een trigger zijn (naast andere effecten zoals scheepsgolven). Maar in de praktijk geen grote invloed verwacht.	seiches niet meenemen (B)
Microstabiliteit	Geen significante invloed van seiches verwacht	seiches niet meenemen (B)
Erosie rondom en stabiliteit Niet-Waterkerende Objecten	Invloed van seiches verwacht op stabiliteit NWO. Erosie soortgelijk als bovenstaand.	Mogelijk seiches niet meenemen (B). C nader bestuderen voor definitieve conclusie.

Voorafgaand aan het uitwerken van de bevindingen in de tabel is het van belang om op te merken dat de tijdschalen en golflengten van seiches in grote watersystemen (zoals IJsselmeer en Markermeer) dermate lang zijn dat er eerder sprake is van een stromingsverschijnsel en quasi-stationaire waterstandsveranderingen dan van eigenschappen behorende bij reguliere (wind-)golven.

Voor overslaggerosie van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud zullen seiches relevant zijn, zeker bij grotere golfhoogten ($H_s > 1.5-2$ m). Op dit moment wordt de overslagbelasting (debiet) op de piek van de storm aangehouden gedurende 6 uur als representatieve weergave van de belasting tijdens de totale storm. Van belang hierbij is dat het effect van een waterstandsverhoging door een seiche niet zal worden gecompenseerd door het daarop volgende dal van een seiche vanwege de niet-lineaire relatie in de invloed van de overslag. Het kan dus nuttig zijn om het effect van het totale verloop van de waterstand inclusief seiches te berekenen. Optie A is zeker veilig, Optie B is zeker onveilig en met enkele berekeningen (Optie C) kan nagegaan worden of het nuttig is om het tijdsverloop van een seiche in detail mee te nemen of dat het verschil met Optie A verwaarloosbaar is.

Voor macrostabiliteit van het binnentalud geldt dat half afschuiven van het binnentalud met behoud van kruinhoogte op dit moment nog niet als falen wordt gezien zolang de kerende functie tijdens de storm maar behouden blijft (toepassen zogenaamde 'zonerings'). Voor de overslag in deze situatie wordt ook de piekwaarde toegepast (met een duur van 6 uur) en ook hier kunnen seiches een verhogende invloed hebben op de mate van overslag. Vooralsnog wordt ook hier Optie A voorzien.

De grondwaterstand binnen in een dijk, binnenwaarts van de kruin, kan relevant zijn voor macrostabiliteit, maar wordt bij kleidijken vaak nauwelijks beïnvloed door MHW. Die grondwaterstand aan de binnenzijde van de dijk is belangrijk voor macrostabiliteit, maar zal door seiches dus nauwelijks worden beïnvloed. Ook de waterdruk in het eerste watervoerende pakket wordt waarschijnlijk nauwelijks beïnvloed door seiches. De macrostabiliteit binnenwaarts wordt hierdoor niet kritisch beïnvloed. Optie A is waarschijnlijk te conservatief, optie B is veilig genoeg.

De invloed van seiches kan in principe van belang zijn voor macro-stabiliteit aan het buitentalud vanwege de relatief plotselinge waterstandsverlaging door de seiches ten opzichte van de waterstand in de kering. Echter, dit zal alleen significant zijn als de verlaging erg groot is, dus bijvoorbeeld vanaf MHW naar een gemiddelde waterstand. Voor seiches zal dit doorgaans niet het geval zijn dus is de verwachting dat in de praktijk de invloed beperkt zal zijn (Optie B is mogelijk toepasbaar).

In geval van golfklappen zullen seiches de impact van die aanval verspreiden over een breder bereik van het talud, maar de bekleding is alleen in een specifiek deel versterkt en daarboven ligt gras. Als seiches al in MHW zitten (vaste toeslag, Optie A) dan is daarmee naar verwachting dit effect al voldoende afgedekt en kan verdere invloed beperkt blijven. Optie A is veilig, Optie B is onveilig, van Optie C wordt niet een heel ander resultaat verwacht ten opzichte van Optie A. Bij verdedigde taluds zijn de golven vaak zo hoog dat het gras heel snel bezwijkt zodra de waterstand boven de harde bekleding komt.

De invloed van seiches op het faalmechanisme 'oplooperosie gras op buitentalud' zal naar verwachting beperkt zijn als de toeslag van seiches al in MHW zit (Optie A). Anders is er mogelijk meer impact juist op de overgang tussen harde en zachte bekleding, waardoor er meer schade zou kunnen ontstaan, vooral in situaties/locaties met relatief hoge golven. Een

vaste toeslag in MHW (Optie A) zal conservatief zijn. Men zou de invloed van het tijdsverloop van de waterstand inclusief seiches kunnen analyseren. Optie A is zeker veilig, Optie B zeker onveilig. Met enkele berekeningen kan worden gekeken of Optie C een optimalisatie kan geven ten opzichte van Optie A.

In geval van afschuiven van gras/steenbekleding hebben seiches naar verwachting nauwelijks invloed. Alleen als de golfhoogte tijdelijk toeneemt omdat de golven voor de waterkering diepte-gelimiteerd zijn, kan er een hogere belasting optreden. Alleen in dat geval moet de seiche-amplitude er mogelijk bij opgeteld worden (Optie A). Anders is Optie B voldoende.

Seiches zijn alleen van invloed op de toplaagstabiliteit van steenzettingen in geval van hoge seiche-amplituden ten opzichte van de (verticale) zone met grote golfbelasting. In dat geval zou de belastingduur per verticale locatie iets korter kunnen zijn en wordt de aanval op het talud verspreid over een groter verticaal bereik dan in een situatie zonder seiches. De invloed is echter gering, en daarom is wellicht Optie B voldoende. Als de golfhoogte tijdens een top van een seiche tijdelijk toeneemt omdat de golven diepte-gelimiteerd zijn – door de hogere waterstand treedt er tijdelijk minder diepte-geïnduceerd golfbreken op – kan er in principe een hogere belasting optreden. Alleen in dat geval moet mogelijk de seiche-amplitude bij het MHW worden opgeteld (Optie A), anders is de tijdelijke verhoging in de waterstand als gevolg van een seiche van te korte duur om een significant effect op de golfgroei te hebben en is Optie B voldoende.

Bij materiaaltransport vanuit de ondergrond en materiaaltransport vanuit de granulaire laag bij steenzettingen kan de invloed van seiches verwaarloosd worden (optie B). De reststerkte van een kering, na schade aan de bovenlaag, zal naar verwachting niet kleiner worden onder de invloed van seiches. Dit is echter niet eenvoudig te kwantificeren en daarom wordt voorgesteld om in een latere studiefase numerieke berekeningen uit te voeren inclusief seiches (optie C), indien nadere uitwerking van dit aspect door RWS gewenst is.

De invloed van seiches op het falen van asfaltbekledingen is naar verwachting beperkt. De golfbelasting wordt ook in dit geval alleen verdeeld over een groter (verticaal) bereik langs het talud. Seiches kunnen echter ook hierbij wel relevant zijn in geval van diepte-gelimiteerde golfhoogtes waarbij een tijdelijke waterstandsverhoging als gevolg van het seiche tijdelijk hogere golven op kan leveren. In principe kan asfalt van het talud af worden gedrukt bij lagere buitenwaterstand in geval van een seiche, maar dat effect is mogelijk beperkt omdat grondwatereffecten relatief langzame processen zijn. Asfalt wordt aangebracht tot ver boven de waterlijn, maar water kan mogelijk binnendringen via de onderkant. Vanwege deze overwegingen zal Optie B waarschijnlijk voldoende zijn. Merk op dat vermoeiing van asfaltbekledingen naar verwachting geen grote rol zal spelen omdat dit effect pas speelt bij 100-en of 1000-en krachtenwisselingen als gevolg van golfklappen. Binnen de duur van een seiche-episode is het aantal slingeringen veel kleiner.

De invloed van seiches op piping is naar verwachting zeer gering. Het gaat bij piping over relatief langdurige fenomenen met een maximale groeisnelheid van de pipe van 2 mm/s. Die groeisnelheid wordt onder andere beïnvloed door de mate van overschrijding van het kritieke verval (verval over de kering waar geen evenwicht meer ontstaat en de pipegroei niet meer tot stilstand komt). Op dit moment staat de relevantie van het mechanisme bij tijdschalen van getijden en storm-gedreven watersystemen (met relatief lange tijdschalen ten opzichte van typische seiche-perioden) ter discussie binnen WBI, dus laat staan de invloed per seiche-periode. Op basis van bovengenoemde groeisnelheid wordt, in geval van een dijkbreedte

groter dan 50 m, ervan uitgegaan dat de kans op doorbraak bij een extreme hoogwaterstand van 6 uur verwaarloosbaar is. Op basis van deze beschouwingen is Optie A mogelijk te conservatief en is Optie B waarschijnlijk veilig genoeg.

Plaatvloeiingen kunnen in principe getriggerd worden door seiches door hun invloed op de waterstand. Het effect van seiches zou vergelijkbaar kunnen zijn met de invloed van scheepsgolven op plaatvloeiingen. Dergelijke vloeiingen treden op als een bepaald taluddeel 'op scherp staat'. De kans dat dit optreedt door een seiche, en niet al eerder door een meer frequent voorkomend fenomeen zoals een scheepspassage, wordt echter als zeer klein geschat. Daarom is Optie B naar verwachting de juiste aanpak voor dit fenomeen.

Niet-Waterkerende Objecten (NWO's) zijn geïdentificeerd als een potentiële complicerende factor in bovenstaande beschouwingen. Lokale ontgrondingskuilen rondom dergelijke constructies zouden beïnvloed kunnen worden door seiches. De hierboven beschreven inzichten, verwachtingen en conclusies over de (mogelijke) invloed van seiches op de generieke faalmechanismen gerelateerd aan erosieverschijnselen zullen naar verwachting ook opgaan voor erosie-effecten rondom een NWO. Daarnaast kan een NWO ook falen door verlies aan stabiliteit van het object. Daarbij zal het effect van een seiche op de waterstand invloed hebben omdat dit ervoor zorgt dat de golfaanval tijdelijk op een ander punt op het object aangrijpt, waardoor er mogelijk eerder instabiliteit van de NWO op kan treden. Voor erosie rondom NWO's is naar verwachting Optie B doorgaans voldoende (seiches niet meenemen), conform de aanbevelingen bij andere erosie-gerelateerde faalmechanismen. Voor de beschouwing van de stabiliteit van specifieke NWO's wordt Optie C aangeraden.

3 Beperking opwekking en response seiches

3.1 Opwekking van seiches

3.1.1 Achtergrond mogelijke beperkingen in opwekking

Beperkingen in de opwekking van seiches in havens en meren in Nederland zijn gekoppeld aan beperkingen in: 1) de sterkte van meteorologische fenomenen en 2) aan de effectiviteit waarmee zij energie over kunnen brengen op het wateroppervlak. De Jong (2004) heeft vanuit zijn promotiewerk voor het eerst de hypothese aangedragen dat tijdens extreme situaties de opwekking van seiches mogelijk veel minder effectief zal zijn dan tijdens gemiddelde stormen. Deze hypothese is voornamelijk gebaseerd op de verhouding tussen de treksnelheid van weersystemen en de loopsnelheid van lange golven op de Noordzee. Omdat die twee snelheden tijdens gemiddelde stormen ongeveer overeenkomen kan het weersysteem juist onder die condities effectief lange golven op zee opwekken. Bij extreme stormen zal de treksnelheid naar verwachting veel hoger liggen, buiten het optimale bereik van 15-20 m/s, en zal de opwekking in dat geval veel minder effectief zijn.

Om een verdere kwantificering en verificatie van deze globale hypothese te maken heeft Deltares in het verleden een beknopte studie uitgevoerd voor Maasvlakte 2 (beschreven in een conferentiepublicatie, De Jong *et al.*, 2006), in opdracht van het Havenbedrijf Rotterdam (HbR). In die studie is naar de meest zware stormen in de destijds beschikbare dataset gekeken. Uiteraard worden de ontwerpcondities niet gemeten, maar desondanks zijn er in dat werk een aantal aanwijzingen gevonden dat er juist tijdens de gemeten stormsituaties veelal een optimale opwekkingssituatie voor seiches optreedt en dat inderdaad zwaardere condities minder snel tot hoge seiches zouden kunnen leiden. Deze gedeeltelijke (indirecte) onderbouwing van de hypothese is door HbR gebruikt om uit twee mogelijke statistiek-scenario's – berekend door derden met numerieke statistische methoden – de laagste seiche-toeslag te selecteren voor de aanleg van MV2.

Ook voor waterkeringen elders in Nederland (HR) zouden inzichten in de beperking in de opwekking van seiches, en in de seiche-response, relevant kunnen zijn als er op die manier een bovengrens aan seiche-amplitudes gegeven kan worden. Omdat een potentiële bovengrens in de opwekking direct bepalend zal zijn voor de maatgevende seiche-waarden is het van belang om die bovengrens met grote zekerheid vast te stellen alvorens deze toegepast zal kunnen worden. In de huidige studie is op basis van twee expert-overleggen tussen KNMI en Deltares eerst een kwalitatieve verkenning gemaakt, conform Werkpakket O1 uit het Plan van Aanpak beschreven in Deltares (2015a), als opstap naar een kwantificering van de hypothese in een latere projectfase. Voor die nadere kwantificering (Werkpakket O2 uit het Plan van Aanpak uit 2015) is in de huidige taak een stappenplan opgesteld, mogelijk uit te voeren in een latere fase onder KPP-VOW.

3.1.2 Uitkomst discussiesessies

Beschouwing gerelateerde fenomenen

In twee discussiesessies hebben experts op het gebied van hydrodynamica (Deltares) en meteorologie (KNMI) de mogelijke beperkingen in opwekking van seiches nader verkend en kwalitatief uitgewerkt. De notulen van die overleggen (onderdeel van Taak 2) zijn opgenomen in Bijlage A. Het eerste overleg was vooral gericht op de betrokken meteorologische en

hydrodynamische fenomenen, het tweede overleg vooral op de numerieke modellering van (de beperkingen in) de opwekking van seiches.

Uitgangspunt van deze besprekingen was de huidige opdeling van weersystemen die kunnen leiden tot seiches, zoals gedefinieerd door het KNMI (KNMI, 2008²):

- A. pre-frontale buienlijn: lijn met zware buien en windstoten uit richtingen tussen zuid en zuidwest voorafgaand aan koufront
- B. actief koufront uit westelijke richtingen met zware buien en windstoten en met markante windruiming na koufrontpassage
- C. convectiecellen achter een front, tijdens een polar outbreak (sterke zuidwestelijke aanvoer van zeer koude lucht vanaf de poolstreek)
- D. post-frontale buienlijn: lijn met zware buien en windstoten in stroming tussen zuidwest en noord achter koufront

Type A is gekoppeld aan (zomerse) onweersystemen die niet zullen samenvallen met de grootste windopzet op de Noordzee en dus ook niet met de hoogste waterstanden. Dit weerstype is dus naar verwachting niet maatgevend voor de HR, in ieder geval in relatie tot de Nederlandse kust en de zeehavens en mogelijk ook voor de grote meren³. De andere weerstypen kunnen wel samenvallen met een hoge opzet als gevolg van wind vanuit noordwest en in het overleg is daar de nadruk op gelegd.

De verwachting is dat Type C een vorm is die mogelijk niet op zal treden tijdens extreme condities omdat in die situatie die cellen niet (zo geordend) kunnen ontstaan. Dus nog los van de invloed van treksnelheid zou dat betekenen dat de opwekking van seiches door die meteorologische condities tijdens extreme situaties inderdaad niet effectief zal zijn.

Bij Type B/D is er mogelijk een bovengrens te geven aan de puls-verstoring (sterkte van de verstoring) door het bijbehorende front of trog (troggen verderop nader beschouwd). In het seiche-werkplan uit 2007 (WL | Delft Hydraulics, 2007) is een puls van 45 m/s genoemd als opwekkende kracht benodigd voor een 1.3 m amplitude verstoring op zee, leidend tot een seiche-amplitude van 2 m bij de Maeslantkering. Een situatie met 90 knopen windstoot (45 m/s) kan in werkelijkheid optreden. Mogelijk dat statistiek van windstoten (of andere verstoringen?) inzicht kan geven in de kans van voorkomen van dergelijke extreme fluctuaties. Van belang om daarbij op te merken is dat een enkele lokale windstoot weliswaar die vereiste sterkte zou kunnen behalen, maar dat voor de opwekking van seiches alleen grootschalige weersfenomenen relevant zullen zijn, overeenkomend met tijdschalen van ca. 30 minuten tot 2-3 uur.

In relatie tot de HR is het goed om voorafgaand aan verdere interpretatie eerst vast te stellen of er (alleen) naar extreme situaties gekeken moet worden. Deze vraag is relevant omdat in de HR de gecombineerde statistiek van seiches en waterstanden wordt beschouwd, bestaande uit combinaties van opzet en seiche-amplitude. Een hoge waterstand kan het opgetelde effect zijn van een hoge opzet en een (laag) seiche, maar ook van een lagere

² Mogelijk dat deze opdeling nog een keer herzien zal worden omdat bijvoorbeeld type B en D erg op elkaar lijken en mogelijk samengevoegd kunnen worden.

³ De invloed van dergelijke situaties op (de bediening van) kunstwerken is tijdens de expert-overleggen niet in detail beschouwd, mede omdat dit mogelijk af zal hangen van locatie-specifieke geometrie-details en mogelijk ook van de wijze van operationele inzet van dergelijke kunstwerken. Dit maakt dat dergelijke toepassingen lastig te beschouwen zijn in een generieke evaluatie zoals hier beschreven.

hoogwaterstand in combinatie met een hoger seiche. Echter, typische amplituden van seiches tijdens gemiddelde stormen zijn in de orde van 1 m. Nog afgezien van potentiële beperkingen in de opwekking, zullen de seiche-amplituden ook in extreme situaties naar verwachting van dezelfde orde zijn als gevolg van demping (Sectie 3.2.1). Dit betekent dat voor maatgevende waterstanden voor de HR minimaal een waterstand als gevolg van getij en wind-gedreven opzet van ca. 4 m benodigd zal zijn. Dat zijn nog steeds extreme condities.

De stroming in weersystemen in extreme situaties is naar verwachting altijd relatief snel (>20 m/s). De stroming op 700 hPa niveau wordt daarbij als representatief gezien voor de treksnelheid van weersystemen. Mede afhankelijk van de hoek die meteorologische verstoringen (convectiecellen, fronten en troggen) maken met de hoofdstroming, zou dat inderdaad kunnen betekenen dat treksnelheden van die weersystemen boven het 'ideale' bereik voor seiche-opwekking op de Noordzee vallen (15-20 m/s, met (theoretisch) optimum rond 17 m/s). Dit zou betekenen dat meteorologische verstoringen in die situaties minder effectief zijn in het opwekken van lange golven die de seiches in de zeehavens veroorzaken⁴.

Voor hoge seiches is ook een langdurig aanbod van energie benodigd (zie ook Sectie 3.2.1). Hieruit is af te leiden dat de maatgevende, dus hoogste, seiches doorgaans het gevolg zullen zijn van een langer aanbod van energie en niet van losse puls-verstoringen zoals tijdens een enkele verstoring door een koufrontpassage. Puls-verstoringen (Type B/D) geven het bassin doorgaans één uitwijking die daarna uitdempt bij een eigenperiode van het bekken. Voor een periodiek signaal bij die weerstypen zouden er bijvoorbeeld veel troggen na elkaar op moeten treden in een storm en dat is zeldzaam. Bij een lagedrukgebied over Denemarken kan er trogvorming richting Nederland optreden. De noordwestelijke stroming in die situaties leidt tot de hoogste windopzet aan de Nederlandse kust (en mogelijk ook op de grote meren) en in die condities treden doorgaans ook instabiele weersituaties op waarbij een serie van troggen kan optreden. Dergelijke troggen ontstaan als buien zich ordenen tot een lijnverstoring. Losse buien zullen doorgaans niet leiden tot de verstoringen die seiches opwekken, maar deze troggen wel. Bij koufronten en troggen kunnen geordende buien optreden die lucht met hogere snelheid meenemen van hogere luchtlagen naar beneden. Bovendien voegen zij extra snelheid toe als gevolg van de buien. De resulterende grootschalige verstoringen in atmosferische druk en windsnelheid en/of –richting kunnen seiches opwekken. Mogelijk dat in extreme condities die geordendheid van buien minder (sterk) voorkomt. Om dit nader te onderzoeken kan nagegaan worden hoe vaak er situaties optreden met meerdere troggen achter elkaar, benodigd voor hoge seiches op de grote meren⁵. Een enkele trog komt regelmatig voor, twee is ook een relatief veelvoorkomende situatie maar drie of meer is mogelijk uitzonderlijk (zie ook de voorbeelden in Hoofdstuk 5). Type C zou wel voor een langdurig aanbod van seiche-energie kunnen zorgen, benodigd voor hoge seiches in de zeehavens, maar zoals hierboven beschreven zou de effectiviteit van dat mechanisme juist bij extreme stormen kleiner kunnen zijn. Dit zou nader gekwantificeerd kunnen worden in vervolgfases met behulp van numerieke modellen. De individuele buiencellen van weerstype C worden echter nog niet opgelost in Harmonie, het nieuwe weermodel van KNMI. Er zijn echter andere mogelijkheden om deze analyses uit te voeren (hieronder nader uitgewerkt).

⁴ Voor de grote meren is deze mogelijke beperking minder relevant, omdat de seiches daar primair worden opgewekt door scherpe overgangen in windrichting en -snelheid (en atmosferische druk). Het is niet uitgesloten dat die ook bij hogere treksnelheden van weersystemen nog steeds op zullen treden.

⁵ Merk op dat in de huidige studie gekeken wordt naar waterstandsfluctuaties op de grote meren met perioden van maximaal enkele uren, terwijl in Deltares (2015c) gekeken is naar afhankelijkheden van verschillende parameters in relatie tot het (dag-)gemiddelde meerpeil van het IJsselmeer.

Numerieke berekeningen (uitgangspunt voor Werkpakket O2 uit Deltares, 2015a)

Voor het kwantificeren van de (grenzen aan de) opwekking van seiches zijn numerieke berekeningen voorzien waarbij een meteorologisch model (Harmonie van het KNMI) zal worden gekoppeld aan een hydrodynamisch model (Delft3D of soortgelijk van Deltares). Hierbij zal het van belang zijn om eerst na te gaan in hoeverre de relevante tijdschalen en fenomenen (zie ook Sectie 5.2, met een interpretatie van meteorologische condities tijdens enkele seiche-episoden) goed beschreven kunnen worden in de meteorologische modellen⁶. Grootschalige fenomenen en weersystemen zitten er goed in, maar buiencellen mogelijk nog niet met voldoende detail en betrouwbaarheid. Mogelijk dat wel specifieke overall weersituaties beschreven kunnen worden die doorgaans geassocieerd worden met de opwekking van seiches, maar hoe die kennis ingezet zou kunnen worden voor verdere kwantificering van de hypothese van beperkte opwekkingskracht van seiches tijdens extreme stormen zal nog nagegaan moeten worden.

Voorheen is wel eens overwogen om te starten met responseberekeningen van theoretische of principe-situaties met een fluctuerende verstoring in wind- en atmosferische drukcondities, bijvoorbeeld door een sinussignaal op te leggen. Echter, in deze studie is tijdens de expertsessies geconcludeerd dat dit enerzijds niet veel toevoegt aan eerdere soortgelijke analyses (bijvoorbeeld beschreven in De Jong, 2004, waarin met een dergelijke harmonische verstoring is gewerkt) en anderzijds dat dergelijke zeer schetsmatige principeverstoringen naar verwachting niet geschikt zullen zijn om vanuit de meteorologie een goede uitspraak te kunnen doen over beperkingen in het optreden daarvan.

Tijdens de expert-sessies is geconcludeerd dat het beter zal zijn om te werken met meer realistische wind- en drukcondities. Die verstoring zou afgeleid kunnen worden uit gemeten tijdreeksen (troggen, buiencellen) en zou opgeschaald kunnen worden om extreme condities weer te geven om zo de effectiviteit van de opwekking van seiches onder die condities te kunnen analyseren. Mogelijk dat eerst enkele situaties met een verstoring op basis van een meetsignaal doorgerekend kunnen worden (tijdreeks van een locatie die 'bevroren' over het domein wordt verplaatst op basis van aangenomen, constante, treksnelheid). Bij de aandrijving van het hydrodynamische model op deze manier is het van belang om na te gaan met welke resolutie het tijdsignaal beschikbaar moet zijn. Mogelijk dat door de langstreckende beweging van de verstoring en de resulterende response een relatief korte tijdstap benodigd zal zijn. De meest complete beschrijving zal pas volgen uit de volledige koppeling van een meteorologisch en een hydrodynamisch model. Die berekeningen worden als laatste en meest gedetailleerde onderdeel van deze analyse gezien.

3.1.3 Stappenplan voor numerieke analyses in een vervolgstudie

De beschouwingen en inzichten uit de vorige sectie hebben geleid tot het volgende stappenplan voorzien voor Werkpakket O2 (Deltares, 2015a):

- Selecteer 3-4 typische stormsituaties met seiches (nog vast te stellen of focus is op Noordzee en kusthavens of op het IJsselmeer)
- Doorrekenen van die situaties in Harmonie (met hoge resolutie in tijd en ruimte) + wegschrijven uitvoer met kort tijdsinterval (1 minuut?)
- Het maken van hydrodynamische berekeningen aangestuurd met de meteorologische forcering (wind + atmosferische druk)

⁶ In Deltares (2016) zijn recentelijk simulaties gemaakt van de Noordzee met een hydrodynamisch model aangestuurd door uitkomst van een meteorologisch model (HARMONIE). In die studie is echter gefocust op de beschrijving van de grootschalige wind-geïnduceerde opzet en niet op de tijdschalen van seiches.

- Eenvoudige berekeningen met forcering door bewegende bevroren wind- en drukvelden op basis van gemeten tijdreeksen, als referentie.
- Berekeningen op basis van berekende wind- en drukvelden uit Harmonie.
- Analyse van de seiche-response en vergelijking met gemeten waarden.
- Daarna variatie in (opschalen) treksnelheid en eventueel andere parameters om mogelijke beperkingen in opwekking tijdens extreme stormen te analyseren.

Een belangrijk aandachtspunt bij die laatste stap is dat op die manier weliswaar de invloed van (opgeschaalde) gemeten condities wordt beschouwd maar dat het nog niet zeker is of er tijdens extreme stormen ook nog andere fenomenen op zullen treden, die niet in de gemeten signalen zitten. Dit vraagt aanvullende aandacht bij opzet en uitwerking van de simulaties. Dit aspect is van belang omdat dit mede bepalend zal zijn voor het kunnen geven van een harde bovengrens in de opwekking van seiches.

Parallel aan de huidige studie heeft een stage plaatsgevonden (onder begeleiding van RWS, KNMI en Deltares), waarin is nagegaan in hoeverre numerieke simulaties de opwekking van seiches op het IJsselmeer weer kunnen geven en in het bijzonder welke (minimale) tijdstap voor de meteorologische forcering van het hydrodynamisch model benodigd is. De resultaten van dat werk staan beschreven in een stageverslag (RWS, 2016) en zullen gebruikt worden bij de verdere uitwerking van mogelijke numerieke simulaties van seiches.

3.2 Seiche-response

3.2.1 Algemeen

De seiche-response op de geïdentificeerde potentiële seiche-locaties in Nederland (Deltares, 2015a) zal veelal beperkt/begrensd worden door specifieke karakteristieken van die locaties. Een belangrijke algemene beperking in de seiche-response is een beperkte duur van het energieaanbod in het seiche-frequentiebereik; de fenomenen die seiches veroorzaken zijn doorgaans episodisch van aard en treden alleen in beperkte tijdsintervallen op. Dat betekent dat een seiche in een havenbekken, of op een meer of estuarium, niet noodzakelijkerwijs tot maximale sterkte kan doorgroeien. Dit zal sowieso het geval zijn bij een enkele puls-verstoring die een watersysteem uit zijn evenwicht brengt waarna dit bij een eigenperiode uitslingert met een langzaam afnemende amplitude. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de passage van een scherp koufront of een enkele trog.

Omdat de duur van het energieaanbod voor seiches niet precies bekend is wordt onder andere voor het WBI uitgegaan van een onbeperkte duur (Deltares, 2014c), oftewel een constant energieaanbod. Dit is een conservatieve aanname, maar zo wordt voorkomen dat een specifieke keuze voor een duur in extreme gevallen toch overschreden zou kunnen worden; een specifieke beperkte duur kiezen zal waarschijnlijk direct doorwerken in een daaruit volgend maximum respons. Tot nu toe is de duur van het aanbod van seiche-energie per situatie nog niet in detail bestudeerd voor het WBI. Mogelijk dat het analyseren hiervan een aanknopingspunt is om de methoden voor het berekenen van maatgevende seiche-amplituden binnen het WBI verder aan te scherpen. Dit zou kunnen leiden tot aanpassingen in het modelinstrumentarium (tijdsdomein stromingsmodel) ten opzichte van voorheen ingezette modellen (mild-slope model PHAROS, per frequentie en met constante inkomende amplitude).

In de volgende secties worden beperkingen in de response van havens (Sectie 3.2.2), van meren (Sectie 3.2.3) en van estuaria (Sectie 3.2.4) beschouwd. Dit overzicht zal uitgangspunt zijn voor de vervolgtaken voor seiches onder KPP-VOW in volgende jaren.

3.2.2 Havenbekkens

Voor havens langs de Noordzeekust zullen beperkingen in de seiche-response bestaan uit:

1 *uitstraling van seiche-energie uit de havenmondning terug naar zee*

Eén van de grootste dempende (reducerende) effecten van seiches in zeehavens is het uitstralen van seiche-energie terug naar open zee. Het seiche ontstaat omdat energie vanaf zee het havenbekken binnendringt, maar door de open verbinding met zee zal een opgeslingerd seiche vanuit de haven ook energie radiaal weer uitstralen, terug de open zee op. Dit beperkt de opslinging van een seiche in een zeehavenbekken; op een bepaald moment zal het seiche een sterkte hebben bereikt waarbij het aanbod van inkomende energie in balans zal zijn met de hoeveelheid uitgestraalde energie.

2 *bodemwrijving*

De eigenschappen van seiches in grote watersystemen in Nederland, waaronder de grote zeehavens, zijn vergelijkbaar met die van stromingsfenomenen omdat deze seiches zeer lange golven zijn. Hierdoor heeft bodemwrijving een relatief grote invloed vergeleken met de invloed van bodemwrijving op korte (wind)golven. De invloed van bodemwrijving is omgekeerd evenredig met de waterdiepte, dus hoe kleiner de diepte van het bekken, hoe groter de dempende invloed van bodemwrijving op de seiches.

3 *entreeverliezen*

Bij het naar binnen lopen(stromen) van een lang seiche in een groot havenbekken zullen door relatief scherpe overgangen in geometrie neren (wervels) ontstaan die energie zullen dissiperen. Deze energie wordt onttrokken aan de seiche-beweging die daardoor geremd wordt. Dit worden entreeverliezen genoemd.

4 *onderlopen van kades*

Bij extreme waterstanden zullen kadeterreinen van havens onderlopen. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren in Rotterdam, IJmuiden en Den Helder (zie Deltares, 2015a, en referenties daarin vermeld). Doordat de seiche-golf tijdens elke slinging het kadeterrein op moet lopen en weer af zal stromen wordt veel energie gedissipeerd. Havenbekkens zijn doorgaans relatief lang en smal, waardoor er per bekken relatief veel kadeterrein (kadelengte) rondom het bekken onder kan lopen. Dit resulteert in een grote remming van de versterking van het seiche. Dit effect is in recente studies voor het WBI meegenomen (Deltares 2014b,c) om op die manier zo realistisch mogelijk de maatgevende seiche-waarden af te leiden en om niet onnodig conservatief te zijn. In het toegepaste golvenmodel (PHAROS) worden randeffecten weergegeven met een enkele reflectiefactor per kadesegment. Om toch het effect van demping weer te kunnen geven zijn reflectiefactoren <1 gebruikt ($<100\%$). De verlaging van de reflectiefactor ten opzichte van 100% geeft het gedissipeerde deel van de seiche-energie weer. Dit is een grove benadering van het complexe proces dat op de kadeterreinen plaatsvindt, maar het huidige golvenmodel biedt geen andere mogelijkheid. Om de juiste waarden voor de reflectiefactoren af te leiden, inclusief het effect van de processen op de kadeterreinen, zijn theoretische formuleringen afgeleid (Deltares, 2014b, later ook toegepast in Deltares, 2014c) die de fractie van het seiche beschrijven die direct tegen de verticale kade reflecteert en de fractie van het seiche die het kadeterrein op loopt (stroomt) en aan het eind van het kadeterrein reflecteert en terug richting het havenbassin loopt (stroomt). Door het op- en afstromen op het kadeterrein wordt een deel van de seiche-energie gedissipeerd. Hierdoor zal de fractie van het seiche die vanaf het kadeterrein terugkeert bij het havenbekken een lagere amplitude hebben gekregen. Samen met het

deel dat direct op de verticale kadewand al is gereflecteerd⁷ resulteert dit in reflectiewaarden <1 .

3.2.3 Grote meren

Beperkingen in de response van seiches op grote meren wordt naar verwachting vooral bepaald door bodemwrijving. Omdat de grote meren in Nederland veel ondieper zijn (ca. 3-5 m waterdiepte) dan de grote zeehavens (15-20 m) zal bodemwrijving voor de meren van grotere invloed zijn dan voor de diepe zeehavens. Deze demping kan op de meren zo sterk zijn dat initiële verstoringen in de waterstand (bijvoorbeeld als gevolg van een puls-verstoring door een koufrontpassage) niet langzaam uitslingeren maar na één tot enkele slingeren al gedissipeerd zijn. Om dit na te gaan zouden principesommen gedraaid kunnen worden voor zowel meren (IJsselmeer) als havenbekkens (Rotterdam) met een initiële scheefstand in de waterstand die 'losgelaten' wordt. Naar verwachting zal de slinging op het ondiepe meer veel eerder uitgedempt zijn dan die in een veel dieper havenbekken. Deze activiteiten zouden mogelijk opgenomen kunnen worden onder Taak O2 uit Deltares (2015a).

Soortgelijk als bij havenbekkens kunnen ook langs een meer oevers onderlopen, maar dit dempende effect kan mogelijk voor meren beperkt zijn – kleiner dan voor havenbekkens – aangezien de ondergelopen delen relatief kleine gebieden zijn langs de rand van het meer. Merk hierbij op dat een talud waarlangs de waterstand op en neer gaat (bijvoorbeeld 1:3) niet een significant dempend effect op het seiche zal hebben; op de zeer lange seiche-golf heeft een dergelijk talud eenzelfde effect als een verticale wand (beperkte tot geen energiedissipatie).

Een specifieke vorm van een meer, een trechtersvorm, kan de seiche-slingering lokaal versterken, bijvoorbeeld bij Lemmer aan het IJsselmeer (Hoofdstuk 4), of juist afzwakken.

3.2.4 Estuaria

Estuaria zijn doorgaans relatief grote watersystemen. Dat betekent dat zij geen sterke (resonante) response zullen vertonen bij zeer korte golfperioden. Windgolven en waterstandsfluctuaties als gevolg van bijvoorbeeld meteorologische verstoringen zullen hier dus doorgaans niet opslingeren en zullen beperkt in amplitude blijven (alleen doordringing, zie Deltares, 2015a, en referenties daarin vermeld). Een voorbeeld hiervan is te vinden in een recente analyse van waterstanden uit de voorhaven van Terneuzen (Deltares, 2015b), uitgevoerd als onderdeel van het afleiden van de hydraulische (ontwerp)randvoorwaarden voor de geplande nieuwe zeesluis op die locatie. In die analyse werden naast lokale seiches in de havenbekkens van de voorhaven van Terneuzen (bij een tijdschaal van enkele minuten) ook waterstandsverstoringen door meteorologische effecten bij een tijdschaal 1.5 uur gevonden, die alleen doorgedrongen waren vanaf zee en dus beperkt in amplitude waren gebleven (doorgaans ca. 0.1 m amplitude). Sommige havenbekkens in Rotterdam hebben juist eigenperiodes rond die tijdschaal (bijvoorbeeld het Calandkanaal). Voor het meest

⁷ Merk op dat door de looptijd van de lange golf op het kadeterrein (heen en weer) er een faseverschil is ontstaan tussen de direct gereflecteerde fractie van het seiche op de verticale kadewand en de fractie die vanaf het overstroomde kadeterrein terugkeert naar het havenbekken. Dit is belangrijk in resonantie-situaties, waarin de timing van de verstoringen en verschillende golfcomponenten van grote invloed is. Alleen als de timing van forcering en response samenvalt zal er sterke resonantie optreden (denk aan aanduwen van schommel). Een faseverschuiving van één of meerdere golfcomponenten werkt daarbij remmend, in aanvulling op de directe demping van de amplitude. De fase-verschuiving als gevolg van de processen op de kadeterreinen, en de dempende werking als gevolg daarvan, is in de formuleringen voor de reflectiefactoren meegenomen.

uitgesproken voorbeeld met beide tijdschalen zichtbaar in de metingen bij Terneuzen is in Deltares (2015b) nagegaan of er een seiche-response in Rotterdam was opgetreden. Op die dag bleek er inderdaad een sterk seiche daar opgetreden te zijn, in response op de inkomende golfenergie bij langere periodes (1.1 m top-dalhoogte, bij een eigenperiode van ca. 1.5 uur), waar die bij Terneuzen alleen doorgedrongen was (geen versterking).

De typische grootte van estuaria maakt dat zij gevoelig zullen zijn voor (veel) langere tijdschalen, inclusief boventonen van het getij. Die getijcomponenten zouden lokaal versterkt kunnen worden. Hierbij kan ook de windopzet tijdens stormen een rol spelen; in de Eems/Dollard treedt tijdens situaties met windopzet een mogelijke versterking van specifieke getijcomponenten op (pers. comm. M. Bottema). Blijkbaar zorgt op die locatie de verhoogde waterstand ervoor, met daaraan gekoppelde verhoging van de eigenfrequenties, dat specifieke getijperioden versterkt/aangeslagen worden in het estuarium. Gezien de langere tijdschalen van deze fenomenen zal voornamelijk bodemwrijving in dat soort situaties zorgen voor demping. Mogelijk dat er via de bodemwrijving een relatie is tussen estuaria met en zonder sterke (rivier)stroming. Het kan zijn dat in estuaria met stroming (zoals de Westerschelde) de getijcomponenten minder versterkt zullen worden dan in estuaria met minder sterke rivierstroming (bijvoorbeeld Eems/Dollard). Of dit inderdaad het geval is zal in een latere studiefase nagegaan moeten worden in meer gedetailleerde analyses op basis van numerieke simulaties.

4 Analyse waterstandsmetingen

4.1 Context

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van waterstandsmetingen voor het identificeren en het kwantificeren van seiche-achtige waterstandsfluctuaties op het IJsselmeer, Markermeer en andere nabijgelegen meren uit de periode van begin 2006 tot eind 2015. Sectie 4.2 geeft een overzicht van alle meetpunten en de databeschikbaarheid per punt. Vervolgens wordt in Sectie 4.3 een korte beschrijving gegeven van de uitgevoerde wavelet-analyses (tijdsafhankelijke golfenergiespectra). Daarna worden karakteristieke parameterwaarden gepresenteerd per meetpunt (Sectie 4.4). De correlatie tussen seiche-amplitude en tegelijk opgetreden wind-geïnduceerde opzet staat in Sectie 4.5 uitgewerkt. Sectie 4.6 beschrijft vervolgens de verdeling van de (gemiddelde) seiche-amplitude over de maanden van het jaar. Tot slot worden de resultaten geïnterpreteerd in Sectie 4.7.

4.2 Overzicht meetpunten

In overleg met Rijkswaterstaat zijn een negentiental punten geselecteerd verspreid over het IJsselmeer, Markermeer en enkele nabijgelegen meren. Hiervan staat een aantal meren in open verbinding met het IJsselmeer of het Markermeer en zijn enkele meren hiervan afgesloten door schutsluizen. Een aantal van de geselecteerde punten is van belang voor het tijdig sluiten van coupures, maar ook voor reguliere schutsluizen (vervalbelasting). Tabel 4.1 toont een overzicht van de meetpunten per beschouwd watersysteem en de databeschikbaarheid op deze locaties. Figuur 4.1 geeft de geografische locaties van de meetpunten weer.

Tabel 4.1 Overzicht meetpunten en databereik per watersysteem.

Watersysteem	Meetpunten	Begindatum	Einddatum
IJsselmeer	Den Oever Binnen	01-01-2006	31-12-2015
	Kornwerderzand Binnen	01-01-2006	
	Lemmer	01-01-2006	
	Krabbersgat Noord	09-03-2010	
	Houtrib Noord	01-01-2006	
Markermeer	Krabbersgat Zuid	01-01-2006	
	Houtrib Zuid	01-01-2006	
	Schellingwouderbrug	01-01-2006	
Eem GooiMeer	Hollandse Brug	01-01-2006	
	Nijkerk West	01-01-2006	
Wolderwijd Veluwemeer Drontermeer	Nijkerk Oost	01-01-2006	
	Elburgerbrug	01-01-2006	
	Roggebotsluis Zuid	01-01-2006	
Ketelmeer	Kamperhoek	01-01-2006	
	Ketelhaven	01-04-2006	
	Roggebotsluis Noord	01-01-2006	
Zwarte Water	Ramspolbrug	01-01-2006	
	Kadoelen	01-01-1990 ^a	
	Genemuiden	01-01-2010	

^a Ten behoeve van het kunnen leggen van verbanden tussen metingen op verschillende meetpunten is er geen gebruik gemaakt van de data op dit punt eerder dan 01-01-2006.

Voor de meeste punten is 10 jaar aan meetdata beschikbaar. Deze meetgegevens, beschikbaar gesteld door RWS, zijn dus een zeer complete bron van informatie in het

beschouwde gebied. Een beperking in de waterstandsmetingen is echter het toegepaste opslaginterval van 10 minuten. Hierdoor is de kortst mogelijke seiche-periode die onderscheiden kan worden beperkt tot 20 minuten⁸, terwijl op sommige locaties mogelijk ook kortere seiche-perioden voorkomen. Een voordeel van dit bemonsteringsinterval is dat de meetsignalen al gefilterd zijn (door het meetsysteem en/of de middelingsmethode) op waterstandsfluctuaties met een veel kortere periode dan seiches, zoals wind- en eventuele scheepsgolven.



Figuur 4.1 Geografische locaties waterstandsmeeptpunten (Bron achtergrond: Google Earth).

⁸ Deze beperking is onafhankelijk van de analysemethode.

4.3 Fourier-, wavelet- en extreme-waarde analyse

Ten behoeve van het analyseren van de waterstandsmetingen op seiche-achtige verschijnselen zijn Fourier- en wavelet-analyses uitgevoerd op de tijdsignalen. Met behulp van een Fouriertransformatie zijn de tijdsignalen omgezet naar energie-frequentiespectra waarmee bepaald kan worden bij welke golfperiode golfenergie opgetreden is. Deze spectra geven echter geen informatie over de variatie van de energie over het beschouwde tijdsinterval; een wavelet-analyse doet dit wel en kan daarom grofweg gezien worden als een bijzondere vorm van een Fourieranalyse (Torrence and Compo, 1998).

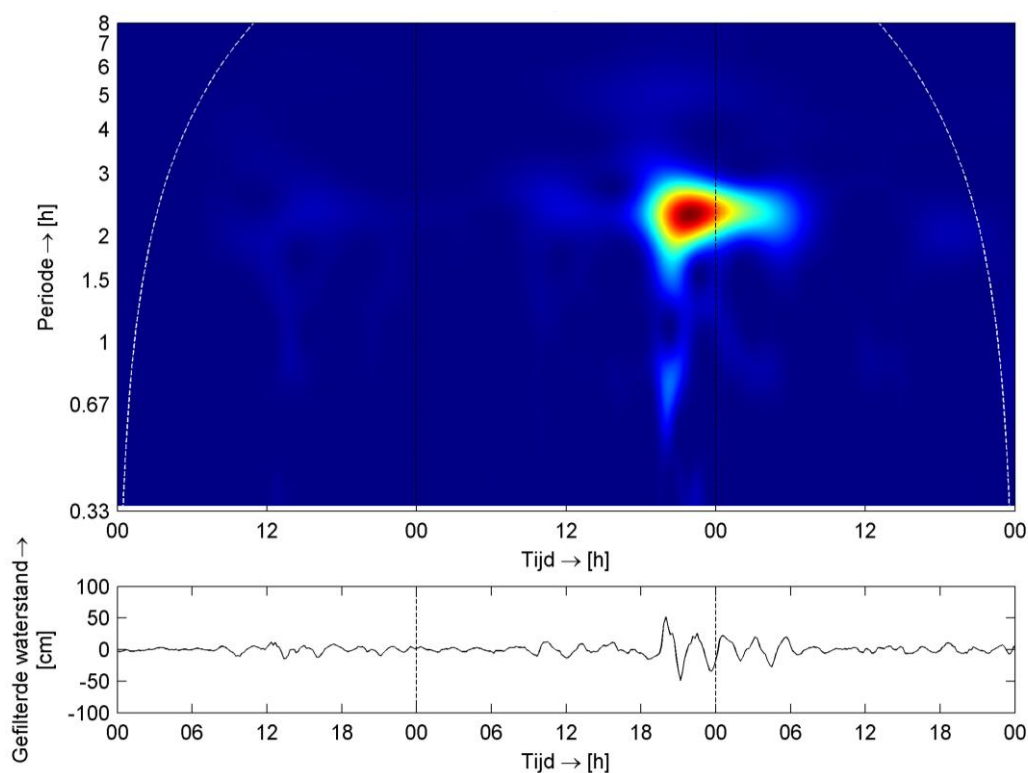
Door een high-pass filtering toe te passen op de spectra (alleen energie behorende bij waterstandsfluctuaties met een golfperiode korter dan de filterperiode blijft behouden) en de gefilterde spectra weer terug om te zetten naar tijdsignalen kunnen seiche-episoden in het tijdsignaal worden beschouwd. Als high-pass filterperiode is binnen dit project 7 uur aangehouden voor alle meetlocaties. Hierdoor worden nog wel de langste seiche-achtige waterstandsfluctuaties op het IJsselmeer beschouwd (De Jong et al., 2006), maar worden waterstandsveranderingen met nog langere tijdschalen – als gevolg van bijvoorbeeld stormopzetten – buiten beschouwing gelaten. Merk op dat het lastig is om de langste tijdschalen van de seiches te scheiden van de kortste tijdschalen van het opzetverloop omdat deze deels overlappend zijn. De gekozen grenswaarde (filterfrequentie) is dus een praktisch compromis.

Een sprekend voorbeeld van de toegepaste analyse is opgenomen in Figuur 4.2 voor het meetsignaal bij Lemmer van 15 tot en met 17 juli 2007. In de avond en nacht van 16 op 17 juli trad hier een seiche op met een maximale amplitude van ca. 0.5 m en een periode van ongeveer 2,5 uur. Het bovenste paneel toont het genormeerde wavelet-spectrum en het onderste paneel het low-pass-gefilterde tijdsignaal. Let op dat de wit-gestreepte lijnen in het wavelet-spectrum het gebied aangeven waarbinnen de gevonden energiewaardes betrouwbaar zijn; buiten dit gebied spelen randeffecten als gevolg van de eindige duur van het signaal een rol en kunnen soms onrealistisch hoge energiewaardes gevonden worden (vooral bij tijdsignalen met lage werkelijke energiewaarden). Dergelijke hoge energiewaarden aan de zijranden van de wavelet-spectra hebben dus geen fysische betekenis en dienen genegeerd te worden.

Om een uitspraak te kunnen doen over karakteristieke amplitude- en periodematen in Sectie 4.4, en daarmee lokale seiche-karakteristieken te duiden, is op gelijke wijze per meetlocatie en per dag bepaald wat de maximale absolute uitwijking (amplitude) was in de gefilterde tijdssignalen. Omdat deze gefilterde tijdreeksen alleen de seiche-achtige verschijnselen bevatten is dit daarmee ook de grootste amplitude van dit soort golven die opgetreden is op die locatie en op die dag. Om een werkbaar aantal situaties te kunnen selecteren, zijn vanuit deze maxima per dag vervolgens de dagen met de hoogste 1% aan uitwijkingen geselecteerd (hierna de '1% dagen')⁹. Wanneer op een locatie tien jaar aan data beschikbaar is komt dit neer op 37 seiche-episoden. Voor die situaties zijn wavelet-spectra geproduceerd. Op basis van deze top-1% episoden zijn de karakteristieke waardes bepaald zoals deze verderop in deze rapportage worden gepresenteerd (Sectie 4.4). In Bijlage B worden per uitvoerlocatie gefilterde tijdreeksen van de top 3 hoogste seiche-episoden getoond waarin de hoogste oppervlakte-uitwijkingen werden waargenomen.

⁹ Merk op dat dit een pragmatische keuze is en dat dit niet zegt dat alle geselecteerde situaties noodzakelijkerwijs zuivere seiches zijn (dat wil zeggen alleen bestaan uit een resonante beweging bij een eigenperiode), noch dat de niet-geselecteerde situaties alle geen seiches zullen bevatten.

Naast de hiervoor beschreven data-analyses zijn er ook extreme-waarde-analyses per locatie uitgevoerd op de gefilterde tijdseries om de orde grootte van de seiche-amplitudes tijdens extreme seiche-episoden in meer detail te duiden. Hiervoor is gebruik gemaakt van het ORCA-software pakket van Deltares (Van Os en Caires, 2011). Met dit pakket kunnen diverse extreme-waarde-analyses op tijdseries van bijvoorbeeld golfhoogtes, stroomsnelheden of windsnelheden worden uitgevoerd. Voor dergelijke tijdseries geldt dat deze altijd een positieve waarde hebben. Omdat in het geval van de hier beschouwde waterstandsfluctuaties de gemeten waarden de ene keer positief zijn en de andere keer negatief is er hier voor gekozen om de amplitude (absolute uitwijking) te analyseren. Hierbij wordt voor deze eerste analyse aangenomen dat voor alle locaties geldt dat de waarden van waterstandsverlagingen ook op zouden kunnen treden als positieve uitwijkingen.



Figuur 4.2 Voorbeeld van waveletanalyse en filtering van een tijdsignaal met behulp van een Fourieranalyse

Allereerst is er per locatie met de “Peak-over-Threshold”-methode een drempelwaarde bepaald waarboven de amplitudes moeten liggen om geselecteerd te worden voor het afleiden van de extreme-waarde kansverdelingsfunctie. Voor het bepalen van de drempel en het selecteren van datapunten is gebruik gemaakt van de richtlijnen die horen bij de toegepaste methode (onder andere beschreven in Van Os en Caires, 2011). Zo moeten bijvoorbeeld twee unieke episoden minstens 24 uur uit elkaar liggen en worden er maximaal 10 episoden per jaar meegenomen. Op basis van de geselecteerde drempels en episoden is er vervolgens een “General Pareto” kansverdelingsfunctie door de data gefit om zo een statistische schatting te kunnen maken van de seiche-amplitudes voor herhalings tijden van 1, 2, 5 en 10 jaar. In principe zou dit ook voor langere herhalings tijden kunnen (met afnemende betrouwbaarheid voor toenemende herhalings tijden), maar gezien de beperkte duur van de beschikbare dataset en het verkennende karakter van de huidige data-analysetaak zijn die hier niet beschouwd.

4.4 Karakteristieke waarden

Tabel 4.2, op de golvende pagina, toont in de eerste twee resultatenkolommen de maximum geregistreerde absolute seiche-amplitude en de gemiddelde absolute seiche-amplitude op basis van de top-1% episoden in de metingen¹⁰, afgerond op 5 cm (onder aan de tabel zijn een tweetal opmerkelijke waarden nader beschreven). In de vier daarop volgende kolommen worden de berekende extreme seiche-amplitudes getoond voor de herhalingstijden van 1, 2, 5, en 10 jaar. Afbeeldingen met de data-fits van de extreme-waarde-functies behorende bij deze uitkomsten zijn opgenomen in Bijlage C. Tot slot worden in de meest rechter kolom de waargenomen typische seiche-periodes vermeld, in volgorde van afnemende typische sterkte (amplitude).

Wanneer de extreme waarden uit Tabel 4.2 worden vergeleken met de eerdere schattingen voor het IJsselmeer en Markermeer uit Deltares (2015), overgenomen in de huidige rapportage als Tabel 1.1, valt op dat de geschatte operationele/jaarlijkse waarden uit Deltares (2015) redelijk overeenkomen met de waarden voor de kortere herhalingstijden (1-2 jaar). Voor het IJsselmeer zijn de nieuw afgeleide waarden iets lager, voor het Markermeer zijn zij iets hoger. Merk op dat de extreme situaties in Tabel 1.1 (overgenomen uit Deltares, 2015) zijn afgeschat met het oog op herhalingstijden relevant voor HR en daarom doorgaans (terecht) hoger zijn dan de waarden uit Tabel 4.2 voor 10 jaar herhalingstijd. De uitkomsten van de huidige studie lijken dus consistent te zijn met de schattingen van typische seiche-amplituden uit Deltares (2015). Echter, naar aanleiding van de huidige analyse is inmiddels duidelijk geworden dat de locale sterkte van de seiches, ook langs de oever van hetzelfde meer, ruimtelijk sterk kan variëren. Dit heeft deels te maken met de algehele slingervorm van het seiche, maar ook met de lokale geometrie (zie de voorbeelden in Figuur 4.3).

De geschatte seiche-periodes voor het IJsselmeer uit Tabel 1.1 (1-3 uur) komen goed overeen met de gevonden waarden van de analyse uit Tabel 4.2 (1-3,5 uur), grotendeels omdat die waarden in de voorgaande studie reeds waren gebaseerd op berekende eigenmodi van het IJsselmeer uit Deltares (2014a) en De Jong et al. (2006), hier ter illustratie opgenomen als Figuur 4.3.

Een belangrijke seiche-component (periode) die mist in de periode-schattingen voor het IJsselmeer in Deltares (2015a) is die van 5,5 uur; deze wordt, op Lemmer na, overal geregistreerd. Een nadere vergelijking van de periodes zoals afgeleid uit de metingen met de berekende eigenmodi van het IJsselmeer (Figuur 4.3) laat zien dat niet alle berekende modi in de metingen teruggevonden zijn (waaronder de periode van 5,5 uur). Dit laatste kan mogelijk verklaard worden door het feit dat de eigenmodi van Figuur 4.3 berekend zijn bij een waterstand van 0 m NAP, terwijl de geregistreerde seiches mogelijk plaatsvonden op momenten met een lagere (hogere) waterstand en dus bij langere (kortere) seiche-periodes.

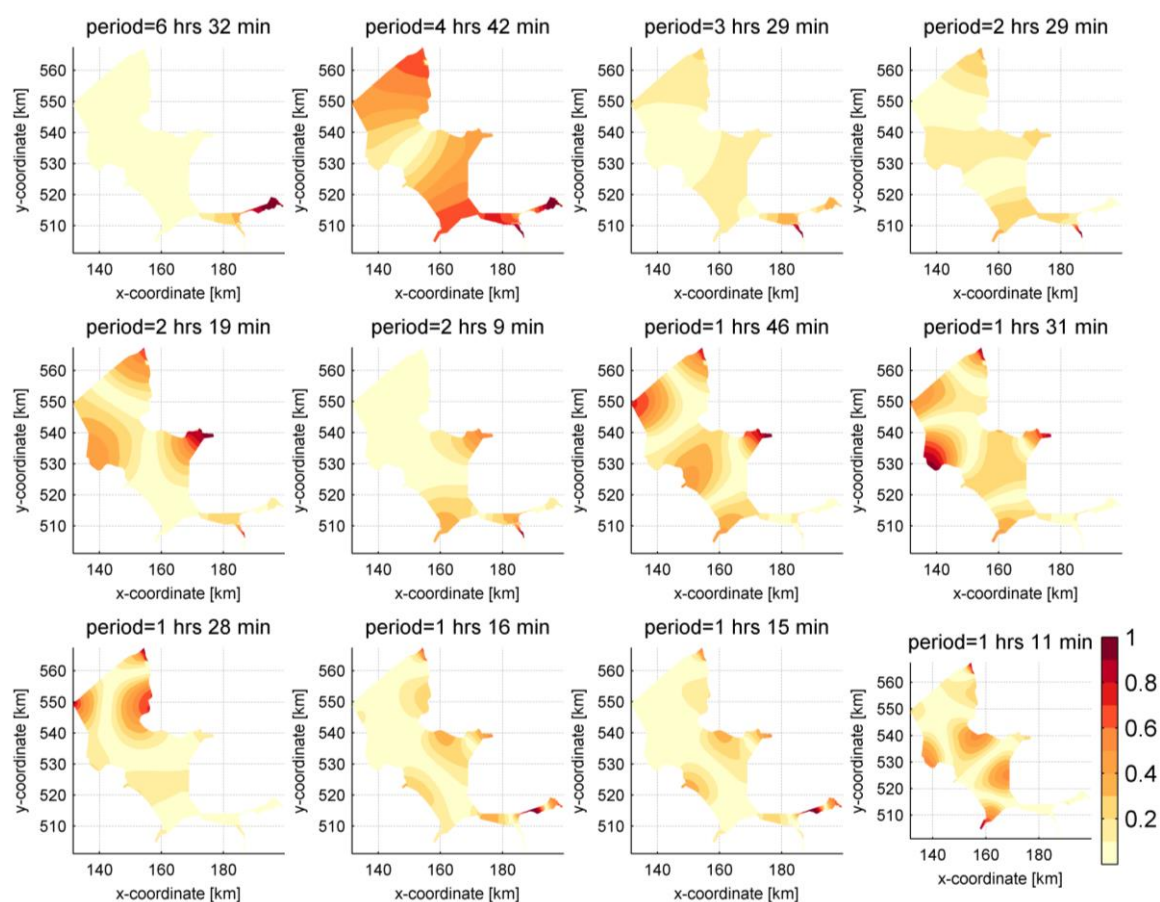
¹⁰ Merk op dat een gemiddelde over alle dagelijkse maxima uit de gefilterde tijdreeksen geen aanvullende informatie zou bieden omdat in die middeling ook veel dagen met alleen meetruis meegenomen zouden worden. Door de selectie van situaties te baseren op de 1% hoogste amplituden worden die dagen automatisch uitgesloten.

Tabel 4.2 Overzicht van karakteristieke waarden seiche-achtige waterstandsfluctuaties per watersysteem en meetpunt (2006-2015).

Water-systeem	Meetpunt	Maximum geregistreeerde absolute seiche-amplitude [m]	Gemiddelde absolute seiche-amplitude o.b.v. top-1% van de metingen [m]	Seiche-amplitude [m] per herhalingsstijd [jaar]				Typische seiche-periodes in volgorde van sterkte
				1	2	5	10	
IJsselmeer	Den Oever Binnen	0,35	0,25	0,26	0,30	0,34	0,38	5,5 u, 1,75 u, 30 min. en 50 min.
	Kornwerderz. Binnen	0,60	0,30	0,35	0,39	0,46	0,51	5,5 u, 2,5 u en 1,5 u
	Lemmer	0,80	0,50	0,51	0,58	0,68	0,75	2,5 u, 50 min. en 1,25 u
	Krabbersgat Noord	0,55	0,30	0,30	0,35	0,41	0,46	45 min., 1,25 u en 5,5 u
	Houtrib Noord	1,35 ^a	0,45	0,41	0,49	0,61	0,71	1,25 u, 5,5 u en 2,5 u
Markermeer	Krabbersgat Zuid	0,40	0,30	0,31	0,36	0,41	0,46	2 u en 1 u
	Houtrib Zuid	0,50	0,30	0,31	0,35	0,41	0,45	2,5 u, 1,5 u en 1 u
	Schellingw.-brug	0,65	0,35	0,37	0,43	0,51	0,58	1 u, 3,5 u en 2 u
Eem GooiMeer	Hollandse Brug	0,35	0,20	0,19	0,22	0,25	0,28	3,5 u en 6 u
	Nijkerk West	0,30	0,20	0,22	0,24	0,27	0,29	3,5 u en 6 u
Wolderwijd Veluwemeer Drontermeer	Nijkerk Oost	0,15	0,10	0,09	0,11	0,13	0,15	2,5 u
	Elburgerbrug	0,15	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	2,5 u
	Roggebotsluis Zuid	0,20 ^b	0,15	0,13	0,14	0,16	0,18	2,5 u en 50 min.
Ketelmeer	Kamperhoek	0,40	0,20	0,19	0,22	0,26	0,29	5,5 u en 1,25 u
	Ketelhaven	0,40	0,25	0,27	0,31	0,35	0,39	5,5 u en 2,5 u
	Roggebotsluis Noord	0,55	0,35	0,31	0,35	0,41	0,45	5,5 u en 2,5 u
Zwarte Water	Ramspolbrug	0,45	0,15	0,14	0,17	0,21	0,24	5,5 u, 2,5 u en 1 u
	Kadoelen	0,20	0,10	0,10	0,11	0,14	0,15	5,5 u
	Genemuiden	0,15	0,10	0,09	0,10	0,12	0,13	5,5 u

^a Deze afwijkende hoge seiche-amplitude (schatting herhalingsstijd ~20 jaar) kan worden gerelateerd aan de storm Kyrill die op 18-01-2007 over Nederland heen trok. Gelijkoortige (maar kleinere) uitwijkingen worden ook op andere meetlocaties gevonden voor deze seiche-episode.

^b De maximum waarde bij Roggebotsluis Zuid (0,50 m, meting van 15-12-2011) is sterk afwijkend van de andere seiche-achtige verschijnselen geregistreerd op die locatie. De oppervlakte-uitwijking behorende bij die meting is niet te relateren aan de waterstand op dat moment bij bijvoorbeeld Nijkerk West of windcondities op die dag. De desbetreffende meting viel samen met onderhoudswerkzaamheden die destijds aan de Roggebotsluis werden uitgevoerd. De afwijkende meting kan mogelijk in verband worden gebracht met deze werkzaamheden. Voor de extreme-waarde-analyse op deze locatie zijn de meetgegevens van die dag daarom niet meegenomen. De eerstvolgende geregistreeerde hoogste absolute seiche-amplitude is 0,20 m, welke in de tabel gepresenteerd wordt.



Figuur 4.3 Relatieve respons (genormaliseerd met de maximale waarde) voor alle eigenperiodes van het IJsselmeergebied vanaf 1 uur en 11 minuten, bepaald bij een meerpeil van 0 m NAP.

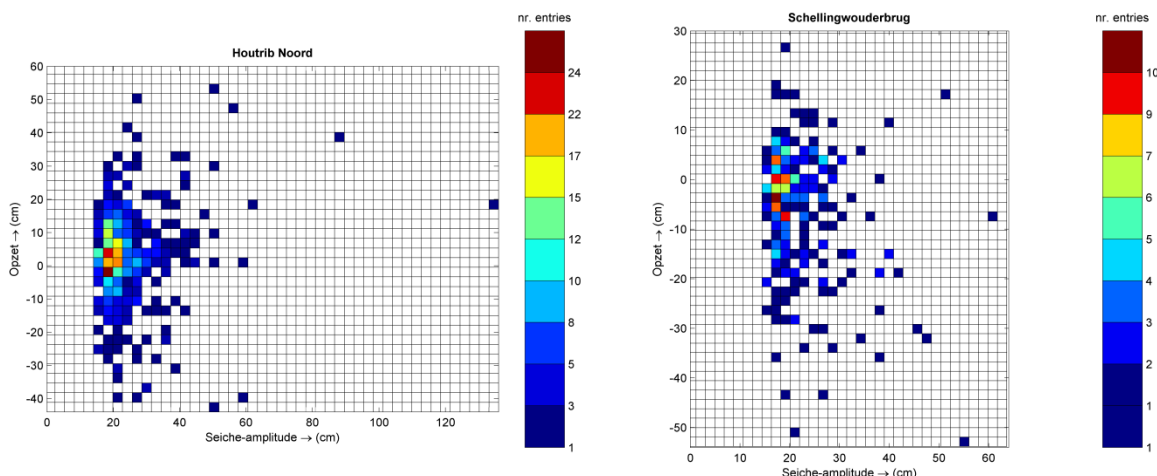
4.5 Correlatie seiche-amplitude en wind-geïnduceerde opzet

Als onderdeel van de analyse van de waterstandmetingen is beknopt onderzocht of er een correlatie bestaat op het IJsselmeer en het Markermeer tussen de hoogte van de seiche-amplitudes en de gelijktijdig opgetreden wind-geïnduceerde opzet. Hierbij is gefocust op de meetlocaties Houtrib Noord op het IJsselmeer en Schellingwouderbrug op het Markermeer (zie Figuur 4.1). Deze locaties zijn geselecteerd als representatief voor deze twee meren, met typische seiche-amplitudes voor dat watersysteem.

Om de wind-geïnduceerde opzet te bepalen is het ongefilterde meetsignaal verminderd met het momentane gemiddelde meerpeil (gemiddelde over alle beschikbare meetpunten per meer)¹¹ en met het geïsoleerde seiche-sigitaal. Vervolgens is bij elke maximale seiche-amplitude per dag (zie Sectie 4.3) de bijbehorende windopzet gezocht (binnen een tijdsinterval van 2 uur voor tot 2 uur na het moment van de maximale seiche-amplitude). De verkregen waarden zijn uiteengezet in een correlatieplot (zie Figuur 4.4). In deze figuren geven de kleuren in de vakken aan hoeveel punten er zich bevinden binnen de grenzen van

¹¹ Merk op dat door het middelen van locaties langs het gehele meer de momentane opwaaiing aan één zijde van het meer en de afwaaiing op datzelfde moment aan de andere zijde van het meer tegen elkaar wegvallen en dit een pragmatische, en voor deze eerste analyse naar verwachting voldoende nauwkeurige, schatting oplevert van het momentane gemiddelde meerpeil.

dat vak. Om te voorkomen dat deze plots te veel lage 'seiches' bevatten (mogelijke 'ruis') is ervoor gekozen een drempelwaarde op de seiche-amplitude toe te passen van 0.15 m.



Figuur 4.4 Correlatie van seiche-amplitude met wind-geïnduceerde opzet voor locaties Houtrib Noord (links) en Schellingwouderbrug (rechts).

De uitkomsten in Figuur 4.4 laten zien dat er erg veel spreiding in de gegevens zit en dat er geen duidelijke correlatie lijkt te bestaan tussen de hoogte van de seiches en de gelijktijdig opgetreden windopzet. Ook wanneer voor andere drempelwaardes gekozen wordt voor de seiche-amplitude (bijvoorbeeld 0.1 m of 0.2 m) of wanneer de windopzet op het exacte moment van de maximale seiche-amplitude per dag wordt gebruikt, is er geen sprake van een uitgesproken correlatie (geen plots getoond hier).

Figuur 4.4 laat bovendien zien dat op meetlocatie Houtrib Noord ((zuid)oostelijke rand van het IJsselmeer) er vaker seiches optreden op momenten met een positieve windopzet en op meetlocatie Schellingwouderbrug ((zuid)westelijke rand van het Markermeer) in het merendeel van de gevallen met negatieve windopzet. Dit valt te verklaren aan de hand van de overheersende westelijke wind in Nederland welke leidt tot een scheefstand op de meren met afwaaiing aan de westzijde en opwaaiing aan de oostzijde van de grote meren.

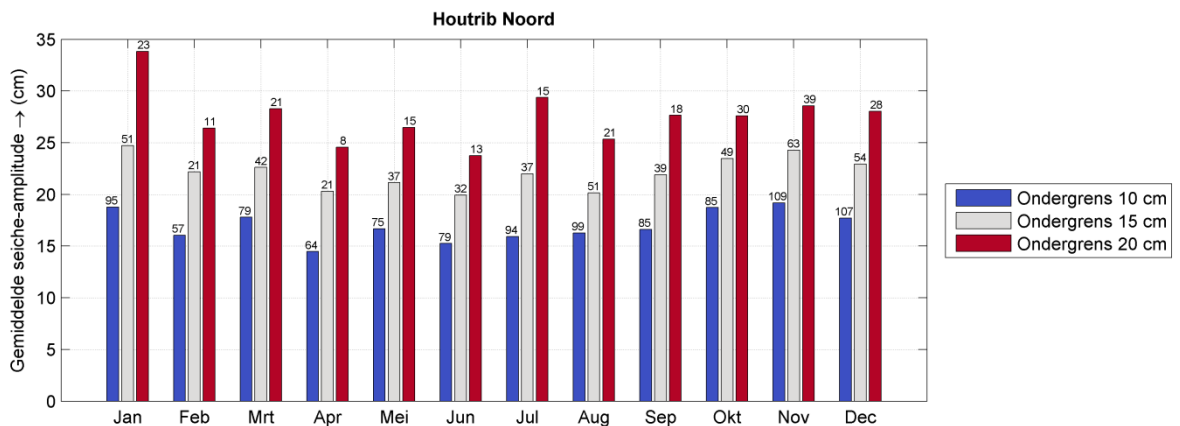
4.6 Verdeling typische seiche-amplituden per maand

Als laatste onderdeel van de analyse van de waterstandsmetingen is de verdeling van gemiddelde seiche-amplitude (amplitude van seiche-achtige waterstandsfluctuaties) over de maanden van het jaar onderzocht. Dit zal een indirecte aanwijzing zijn of seiches op de grote meren doorgaans optreden tijdens maatgevende opzetsituaties gedurende winterstormen, of juist ook tijdens (onweers)frontpassages in de zomermaanden.

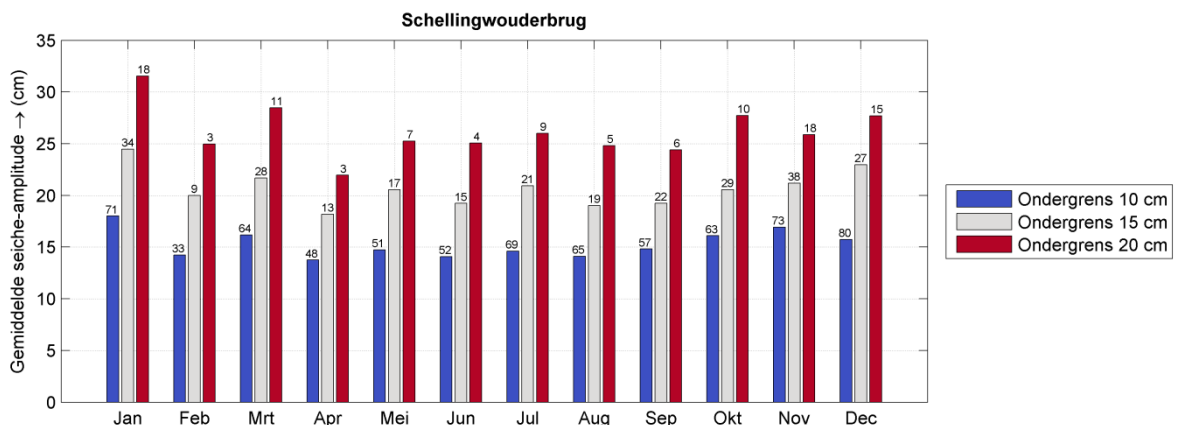
Ook voor dit onderdeel is gefocust op de meetlocaties Houtrib Noord op het IJsselmeer en Schellingwouderbrug op het Markermeer. In deze analyse is een drietal ondergrenzen van de seiche-amplitude aangehouden om zo de gevoeligheid van de uitkomsten voor een specifieke keuze van ondergrens te analyseren. Figuur 4.5 en Figuur 4.6 tonen de uitkomst van deze analyse voor respectievelijk locatie Houtrib Noord en locatie Schellingwouderbrug. Boven iedere staaf is aangegeven hoeveel seiche-situaties er beschikbaar waren voor het bepalen van de weergegeven gemiddelde waarde.

Opvallend is dat de waarden van de gemiddelde seiche-amplitudes per maand vrij constant zijn over het gehele jaar, voor elk van de gekozen ondergrenzen en voor beide meetlocaties

(en dus meren). De gemiddelde amplitudes blijken slechts beperkt hoger te zijn in de wintermaanden. De gegevens geven wel aan dat er op de grote meren in de wintermaanden iets vaker seiche-situaties optreden dan in de zomermaanden.



Figuur 4.5 Verdeling van gemiddelde seiche-amplitude over de maanden van het jaar ter plaatse van locatie Houtrib Noord voor een drietal ondergrenzen.



Figuur 4.6 Verdeling van gemiddelde seiche-amplitude over de maanden van het jaar ter plaatse van locatie Schellingwouderbrug voor een drietal ondergrenzen.

Dit resultaat voor de grote meren wijkt af van eerdere conclusies voor havens langs de Noordzeekust. Voor de grote meren lijkt deze redelijk constant voor het gehele jaar, terwijl De Jong (2004, Figuur 3.1 op pagina 22 in dat document) heeft laten zien dat in Rotterdam in de zomermaanden geen significante seiches optreden. In de haven van Rotterdam – en dat geldt naar verwachting generiek voor zeehavens langs de Nederlandse Noordzeekust – is er dus duidelijk wel sprake van een winterstorm-gerelateerde opwekking van seiches.

4.7 Discussie uitkomsten analyse waterstandsmetingen

De uitkomst van de analyse van waterstandsmetingen van locaties langs de oevers van het IJsselmeer, Markermeer en nabijgelegen meren, samengevat in Tabel 4.2, geeft aan dat op al deze meren seiches optreden. De sterkte (typische amplituden) waarmee zij optreden is echter zeer verschillend, soms ook tussen locaties gelegen zijn aan hetzelfde watersysteem. Dit zou deels ook het gevolg kunnen zijn van de positie van de meetlocaties ten opzichte van de heersende trekrichingen van stormen.

Voor de beschouwde locaties geldt doorgaans dat op de grootste meren de hoogste seiche-amplituden worden geregistreerd. Dit is conform verwachting; in grote watersystemen kan meer windopzet optreden en omdat seiches (groten)deels door (instationaire) windopzet getriggerd worden zijn ook de seiches in grotere systemen in potentie hoger. Lokale karakteristieken, zoals een meetpunt aan de spitse kant van een trechtersvormig deel van een meer (bijvoorbeeld locatie Lemmer), zullen doorgaans een aanvullende versterkende werking hebben.

Op veel locaties is de seiche-amplitude enkele decimeters (Tabel 4.2). Dit is mogelijk hoger dan tot nu toe werd aangenomen voor de Hydraulische Randvoorwaarden. Aanbevolen wordt om een uitgebreidere analyse te maken van de seiches op de beschouwde watersystemen, mogelijk op basis van langere tijdreeksen, indien dit in het kader van de HR gewenst is.

In een beknopte analyse op basis van een representatieve locatie langs het IJsselmeer en een locatie langs het Markermeer is geen uitgesproken correlatie gevonden tussen de lokale seiche-amplitudes en de momentane hoogte van de windopzet op die locaties. Uit de analyse volgt ook dat de hoogte van de seiches op de grote meren weinig afhankelijk lijkt van het seizoen (kalendermaand). Seiches komen wel iets frequenter voor in de wintermaanden dan in de zomermaanden. Deze uitkomsten zullen van belang zijn voor het vaststellen van de relevantie van seiches voor de HR; indien de seiche-amplitude ongecorrleerd is met de tegelijk optredende wind-geïnduceerde opzet kan dit gunstig zijn voor statistische bepaling van maatgevende waterstanden. Daarnaast kunnen deze uitkomsten richting geven aan de analyse van de opwekkingsmechanismen van seiches; blijkbaar is de opwekking van seiches op de grote meren gelinkt aan één of een combinatie van fenomenen die het gehele jaar door met soortgelijke sterkte/effectiviteit seiches kunnen opwekken.

De verspreiding van de meetlocaties over de verschillende watersystemen is op dit moment al erg goed en de dekking is nagenoeg compleet, met in (bijna) elke hoek van de meren een meetlocatie. In die hoeken treden doorgaans de grootste amplituden van de seiches op (Figuur 4.3) en daarom zijn die meetlocaties goed geschikt om deze fenomenen te registreren. Alleen de locaties bij Hoorn en nabij Medemblik zijn niet vertegenwoordigd. Echter, het is de vraag of extra meetpunten op die locaties aanvullende/andere inzichten gaan opleveren ten opzichte van de uitgebreide bestaande verzameling aan meetpunten. Op dit moment is er naar onze verwachting dus geen aanleiding om aanvullende meetlocaties te overwegen. Wel wordt aangeraden om de haalbaarheid na te gaan van het verkorten van het bemonsteringsinterval van de waterstandsmetingen van 10 minuten naar 1 minuut. Op die manier zouden naar verwachting alle relevante seiche-tijdschalen worden geregistreerd, in tegenstelling tot de huidige situatie waarin alleen perioden langer van 20 minuten worden vastgelegd.

5 Detailanalyse geselecteerde seiche-episoden

Als onderdeel van Taak 2 van deze studie (zie ook Hoofdstuk 3) worden in dit hoofdstuk de specifieke weercondities nader beschouwd zoals die zijn opgetreden tijdens een viertal geselecteerde representatieve/typerende seiche-episoden. Voor het selecteren van deze episoden is gebruik gemaakt van de analyseresultaten van Taak 3 (Hoofdstuk 4). Allereerst worden in Sectie 5.1 de geselecteerde episoden algemeen beschreven, waarna ze per stuk nader worden beschouwd in daaropvolgende deelsecties. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een overzicht van de belangrijkste bevindingen van dit onderdeel in Sectie 5.2.

5.1 Beschouwde episoden

5.1.1 Algemene beschrijving

Op basis van de hoogste seiche-episoden van alle in Hoofdstuk 4 beschouwde meetpunten zijn een viertal episoden geselecteerd waarbij op nagenoeg alle meren significante seiche-achtige effecten zijn opgetreden. Daarnaast is deze selectie gemaakt om verschillende soorten weertypen te kunnen beschouwen (zie ook Sectie 3.1.2):

- Storm Kyrill op 18-01-2007, zeer zware storm waarbij een scherp koufront in zuidzuidoostelijke richting over Nederland trok gevolgd door onstabiele lucht. De kern van het bijbehorende lagedrukgebied trok over het noorden van Nederland. Zuidwestelijke/westelijke wind met uurgemiddelde snelheden tot 25 m/s (90 km/u). Voornamelijk opwekkingsmechanisme Type B.
- 'Polar outbreak' op 21-11-2008, convectiecellen en een trog achter een koufront in zuidelijke richting. Variabele westelijke/noordwestelijke wind met uurgemiddelde snelheden van 15 tot 22 m/s (54 tot 79 km/u). Kenmerken van opwekkingsmechanisme Type C en Type D.
- Herfststorm Christian/St Jude op 28-10-2013, zware storm waarbij een scherp koufront over Nederland in oostnoordoostelijke richting trok, gevolgd door enkele troggen. De kern van het bijbehorende lagedrukgebied trok over het noorden van Nederland. Zuidelijke/zuidwestelijke wind met uurgemiddelde snelheden tot ~22 m/s (79 km/u). Kenmerken van Type B en Type D.
- Lentestorm op 31-03-2015, zware storm waarbij een scherp koufront in oostzuidoostelijke richting over Nederland heen trok. De kern van het bijbehorende lagedrukgebied trok over het noorden van Nederland. Later op de dag na de piek van de storm trokken nog enkele troggen over Nederland in noordnoordwestelijke richting. Tijdens de storm heerste een westzuidwestelijke/westelijke wind met uurgemiddelde windsnelheden rond 65 km/u. Kenmerken van Type B en Type D.

In alle hier beschreven gevallen betrof dit stormcondities waarbij een koufront over Nederland trok, al dan niet gevolgd door instabiele lucht, een lage druk-kern, open convectiecellen of troggen. In Bijlage D is voor elk van deze episoden een viertal figuren opgenomen:

- een figuur met metingen van luchtdruk, uurgemiddelde windsnelheid en windrichting op verschillende locaties in Nederland (Hoek van Holland, Schiphol, Lelystad en Stavoren);
- een set van vier weerkaarten van tijdstippen rondom het de piek van de seiche-episode;
- een satellietbeeld van het moment van overtrekken van het koufront; en
- een figuur met waterstandsmetingen op open zee (platform K13a en Europlatform) en in twee zeehavenbekkens (IJmuiden Buitenhaven en Rozenburgse Sluis).

In dit laatste figuur zijn ook de gefilterde seiche-signalen opgenomen, waarbij alle energie met een frequentie lager dan 0,1 mHz ($T > 2,8 \text{ uur}^{12}$) is verwijderd.

5.1.2 Storm Kyrill – 18 januari 2007 (koufront in zuidzuidoostelijke richting)

Op 18-01-2007 trekt tijdens storm Kyrill rond 13 UTC een scherp koufront Nederland binnen in zuidzuidoostelijke richting, gevolgd door het overtrekken van instabiele lucht. Vooral deze instabiele lucht zorgt gedurende een aantal uren na het overtrekken van het koufront voor slingeren op de meren.

Vooral rond 17 UTC treden er overal (sterke) slingeren op (vergelijk bijvoorbeeld Figuur B.13, Figuur B.22, Figuur B.50 en Figuur D.4). Het is hierbij opvallend dat de grootst opgetreden slinging in de haven van Rotterdam een stuk sterker is (amplitude $\sim 0.5 \text{ m}$) dan in de haven van IJmuiden (amplitude $\sim 0.2 \text{ m}$). Een verklaring voor de sterke slingeren kan gevonden worden in het plotseling wegvallen van de wind rond dat tijdstip. In het middelste kader van Figuur D.1 is rond 17 UTC een plotselinge sterke afname van de windsnelheid te zien ter plaatse van Schiphol, Lelystad en Stavoren. Tegelijkertijd is in het bovenste kader een kleine versnelde toename van de luchtdruk waar te nemen op de locaties van Schiphol en Lelystad (in Stavoren wordt de luchtdruk niet gemeten). Op de weerkaarten van Figuur D.2 is hier geen directe verklaring voor terug te zien, maar mogelijk dat deze slingeren zijn veroorzaakt door een trog (koude lucht aanwezig in de bovenlucht) die niet is gemarkeerd op de weerkaarten. Deze hypothese wordt ondersteund door vergelijkbare waarnemingen tijdens de andere seiche-episodes (zie hierna) en waarbij wel troggen in de weerkaarten zijn aangegeven.

5.1.3 Polar outbreak – 21 november 2008 (koufront in zuidelijke richting)

Op 21-11-2008 trad een zogenaamde polar outbreak op, waarbij koude lucht vanaf de Noordpool richting Nederland trekt achter een in zuidelijke richting trekkend koufront aan. Een polar outbreak is op weerkaarten te herkennen aan ongeveer noordelijk georiënteerde parallelle isobaren welke vanaf het noordpoolgebied richting Nederland lopen (zie de weerkaarten voor 12 en 18 UTC in Figuur D.6). Dit fenomeen gaat vaak gepaard met regelmatige open convectiecellen die ontstaan op de Noordzee en die eerder gelinkt zijn aan de opwekking van seiches (De Jong, 2004). Deze cellen zijn zichtbaar op satellietfoto's van deze dag (zie Figuur D.7).

Als gevolg van de wisselingen in de windsnelheid en atmosferische druk in de open convectiecellen ontstaan waterstandsfluctuaties op zee (zie Figuur D.8). Omdat de periode van deze overtrekkende fluctuaties ongeveer overeenkomt met de eigenperiode(s) van bekkens van de havens van IJmuiden en Rotterdam worden deze lange golven daar versterkt.

De open convectiecellen vallen uiteen boven land omdat daar de aandrijvende instabiele situatie (warm zeewater onder koude poollucht) wegvalt. Zij hebben hierdoor weinig invloed op de waterstanden op de grote meren. De waargenomen slingeren op de meren (o.a. Figuur B.7, Figuur B.20 en Figuur B.29) zijn daarom niet het gevolg van de open convectiecellen maar van een trog welke rond 10 UTC over Nederland heen trekt; enkele

¹² Voor deze filtergrens is een waarde gekozen lager dan de frequenties van de langste seiches in die zeehavens en hoger dan de frequenties van de belangrijkste getijcomponenten; op die manier wordt het getij verwijderd uit het signaal en blijven alleen de seiches over.

uren na het passeren van het koudefront. In het middelste kader van Figuur D.5 is te zien dat op dit tijdstip de windsnelheid plots sterk afneemt en in het bovenste kader is te zien dat de atmosferische druk rond dit tijdstip kort versneld toeneemt. Anders dan voor de meren heeft deze trog minder invloed op de waterstanden in de zeehavens van IJmuiden en Rotterdam (Figuur D.8); hier hebben vooral de waterstandsfluctuaties als gevolg van de open convectiecellen een grote invloed. Dit is een opvallende observatie: de verschillende watersystemen (grote meren, zeehavens) reageren alle op dezelfde storm, maar hun (sterkste) reactie is op verschillende onderdelen van het overtrekkende weersysteem.

Een ander opvallende observatie is de trekrichting van de overtrekkende trog. Anders dan bijvoorbeeld de troggen die over Nederland heen trokken bij de Herfststorm en de Lentestorm (zie hierna), is de trog niet met een parallelle oriëntatie richting de Hollandse kust getrokken, maar meer dwars op de kust en in zuidoostelijke richting. Mogelijk verklaart dit deels de beperkte response in de zeehavens op deze trogpassage in dit specifieke geval.

5.1.4 Herfststorm – 28 oktober 2013 (koufront in oostnoordoostelijke richting)

Tijdens de Herfststorm van 28-10-2013 trekt er rond 10 UTC een koufront in oostnoordoostelijke richting over Nederland met direct daarachter een lagedrukgebied met instabiele lucht over het noorden van Nederland (zie Figuur D.10). Evenals bij de hierboven beschouwde seiche-episoden valt het moment van de grootste slingeringen samen met een versnelde toename van de luchtdruk en met een plotselinge afname van de windsnelheid (zie Figuur D.9). Tevens draait de wind van een zuidelijke richting naar een meer west/zuidwestelijke richting. Dit weersysteem zorgt voor relatief sterke slingeringen in alle meren (maximale amplitude ca. 0.50 m), maar zorgt voor weinig significante excitatie in de havens van IJmuiden en Rotterdam (maximale amplitude ca. 0.10 m). Het verschil aan excitatie kan mogelijk verklaard worden door de zuid/zuidwestelijke oriëntatie van de storm en de grotere seiche-gevoeligheid van de Noordzeehavens voor noord/noordwestelijke georiënteerde weersystemen en daaraan gekoppelde koufrontpassages. Een andere, deels gerelateerde, verklaring zou kunnen zijn dat deze storm wel het type verstoringen bevatte waarop de meren reageren, maar niet het type waar de zeehavens het meest gevoelig voor zijn.

5.1.5 Lentestorm – 31 maart 2015 (koufront in oostzuidoostelijke richting)

De Lentestorm van 31-03-2015 heeft gezorgd voor significante slingeringen op de meren en in de zeehavens van IJmuiden en Rotterdam. In de ochtend trekt een lagedrukgebied met instabiele lucht over het noorden van Nederland en een scherp koufront trekt in oostzuidoostelijke richting over geheel Nederland. De grootst waargenomen slingeringen (bijvoorbeeld Figuur B.18, Figuur B.28 en Figuur D.16) gaan, evenals voor de andere waargenomen seiche-episoden, samen met een (versnelde) toename van de luchtdruk en een plotselinge afname van de windsnelheid (zie Figuur D.13).

Vervolgens trekken tussen 16 en 18 UTC nog enkele troggen over Nederland heen (zie Figuur D.14); ook deze zorgen voor excitatie van de meren en havens, zij het met een kleinere amplitude dan bij frontpassages. Ook voor de troggen zijn in de meteo-metingen van Figuur D.13 afnames in de windsnelheid en toenames van de luchtdruk te herkennen, al zijn deze minder duidelijk dan die rond 5 UTC.

5.2 Belangrijkste observaties en discussie

Op basis van de in Sectie 5.1 beschreven seiche-episoden worden hier enkele algemene observaties samengevat. Ook al is slechts een beperkt aantal episoden beschouwd, toch zijn er enkele opvallende karakteristieken geïdentificeerd die mogelijk in een volgende studiefase

leidend kunnen zijn in het selecteren van aanvullende stormsituaties en het opzetten van verdere analyses.

Grote meren

- De (grote) meren reageren op zowel koufrontpassages (Type B) als op overtrekkende troggen (Type D, zie Sectie 3.1.2). De respons is hierbij het sterkst op de koufrontpassages.
- De beschouwde seiche-episoden laten zien dat de grote meren gevoelig zijn voor zuidwestelijk/westelijk georiënteerde stormen.
- Een snelle toename van de luchtdruk (nadat deze een minimum heeft gehad) samen met een plotselinge afname van de windsnelheid zorgen voor slingeringen op de meren. Veelal zijn deze verstoringen gelinkt aan koufronten, maar soortgelijke verstoringen lijken ook op te treden tijdens trogpassages.

Zeehavens

- In de beschouwde situaties worden de havenbekkens van IJmuiden en Rotterdam aangeslagen door dezelfde meteorologische elementen als voor de meren, zij het doorgaans in mindere mate.
- De havenbekkens van IJmuiden en Rotterdam lijken sterker aangeslagen te worden door waterstandsfluctuaties op open zee welke veroorzaakt worden door open convectiecellen boven de Noordzee (Type C). Deze cellen zijn een kenmerk van een polar outbreak (koude luchtstroom vanaf de pool over de Noordzee). Deze cellen vallen uiteen boven land, waar de aandrijvende kracht van het relatief warme zeewater wegvalt, en leiden hierdoor niet of nauwelijks tot een response op de grote meren.

Bovenstaande observaties geven een indicatie van de mechanismen welke seiches veroorzaken op de meren (naar verwachting gekoppeld aan Type B en Type D). In latere studiefases kunnen deze opwekkingsmechanismen nader worden onderzocht, onder andere met het numeriek meteorologisch model HARMONIE van het KNMI. Dit model heeft een operationele resolutie van 2,5 km bij 2,5 km wat voldoende zou moeten zijn voor het beschrijven van de opwekkingsmechanismen voor seiches gerelateerd aan deze opwekkingstypen.

De typische grootte van de open convectiecellen behorende bij het opwekkingsmechanisme Type C is mogelijk te klein om volledig op te lossen met de huidige versie van HARMONIE. Dit betekent dat HARMONIE waarschijnlijk wel in staat zal zijn om de grootschalige opwekking van seiches op de grote meren te reproduceren (Type B en Type D), maar mogelijk (nog) niet de opwekking van de hoogste amplitudes in de zeehavens, die in vele gevallen veroorzaakt worden door kleinschaligere meteorologische fenomenen (convectiecellen, Type C). Dit zal in een latere projectfase nader onderzocht kunnen worden in samenwerking met het KNMI. De resultaten van de stage van L. Muntjewerf (RWS, 2016) die parallel aan de huidige studie is uitgevoerd zullen hierbij meegenomen worden.

6 Relevantie decimeringshoogte in bijdrage seiches aan MHW

6.1 Context

In dit project wordt onderzoek gedaan naar het waterstandsverhogende effect van seiches voor een aantal watersystemen waar tot nu toe nog geen (of beperkte) seiche-toeslagen worden toegepast, zoals het IJsselmeer (Hoofdstuk 4). Een belangrijke aanvullende vraag daarbij is wanneer seiches een statistisch significant effect hebben op de maatgevende waterstand en welke rol de decimeringshoogte¹³ daarin speelt. In dit hoofdstuk wordt deze vraag beantwoord aan de hand van twee modellen voor het vóórkomen van seiches:

- Model1: Tijdens een hoogwater treedt een seiche op met een bepaalde kans
- Model2: Tijdens een hoogwater treedt altijd een seiche op. De grootte van de seiche wordt gegeven door een kansverdeling.

6.2 Analyse invloed decimeringshoogte

6.2.1 Model 1: Kans op seiche met een constante waarde

In model 1 treedt tijdens een hoogwater een seiche op met een bepaalde vaste kans (P_s). De grootte van de seiche (amplitude) is in dit model altijd gelijk. De overschrijdingsfrequentie van de waterstand h wordt beschreven als een exponentiële verdeling:

$$F(h) = \exp\left(\frac{-h}{\eta}\right) \quad (1)$$

Waarin de constante η de nepereringshoogte wordt genoemd. Deze geeft aan hoe snel de overschrijdingskans kleiner wordt bij hogere waarden van h . De nepereringshoogte is gerelateerd aan de decimeringshoogte d :

$$\eta = \frac{d}{\ln(10)} = \frac{d}{2.3} \quad (2)$$

Tijdens een hoogwater kan er een seiche optreden met een kans van P_s . Het seiche heeft een verhogend effect s op de maximale waterstand. De overschrijdingskans van deze verhoogde waterstand h_s (inclusief seiche effect) wordt dan:

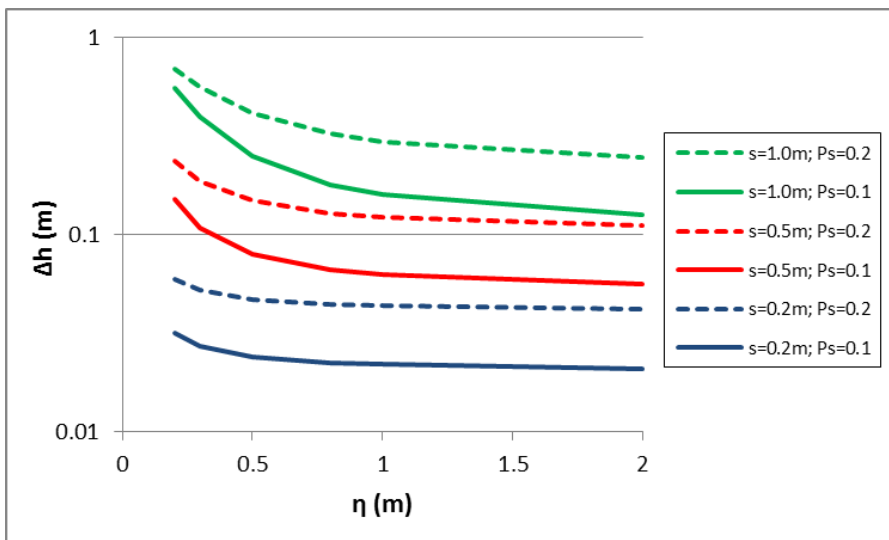
$$F(h_s) = P_s \exp\left(\frac{-h_s + s}{\eta}\right) + (1 - P_s) \exp\left(\frac{-h_s}{\eta}\right) \quad (3)$$

Door de oorspronkelijke overschrijdingsfrequentie (Formule 1) gelijk te stellen aan de kans op deze verhoogde waterstand kan het waterstandsverhogende effect worden berekend:

¹³ De decimeringshoogte is het verschil tussen twee waterstanden waarvan de herhalingstijd een factor 10 verschilt. De decimeringshoogte wordt verderop in de hoofdttekst met een voorbeeld toegelicht.

$$\begin{aligned}
 F(h) &= F(h_s) \\
 \exp\left(\frac{-h}{\eta}\right) &= P_s \exp\left(\frac{-h_s + s}{\eta}\right) + (1 - P_s) \exp\left(\frac{-h_s}{\eta}\right) \\
 \exp\left(\frac{h_s - h}{\eta}\right) &= P_s \exp\left(\frac{s}{\eta}\right) + 1 - P_s \\
 \Delta h = h_s - h &= \eta \ln\left(P_s \exp\left(\frac{s}{\eta}\right) + 1 - P_s\right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Het verloop van de verhoging van de maatgevende waterstand, Δh , volgens Formule 4 is weergegeven in Figuur 6.1. We zien dat voor toenemende nepererings-/decimeringshoogte de waterstandsverhoging Δh afneemt tot een limietwaarde. Praktisch gesproken wordt de limietwaarde ongeveer bereikt zodra het product van seiche-kans (P_s) en seiche-effect (s) kleiner wordt dan de decimeringshoogte.



Figuur 6.1 Het waterstandsverhogende effect Δh als functie van η voor verschillende waarden van s en P_s

De limietwaarde van Δh voor grote η kan als volgt worden berekend. Voor een grote η ten opzichte van het seiche-effect s geldt $\exp(x) \approx 1+x$ en $\ln(1+x) \approx x$. Het waterstandsverhogende effect volgens Formule 4 reduceert dan tot:

$$\begin{aligned}
 \Delta h &= \eta \ln\left(P_s \exp\left(\frac{s}{\eta}\right) + 1 - P_s\right) \\
 &= \eta \ln\left(P_s \left(1 + \frac{s}{\eta}\right) + 1 - P_s\right) = \eta \ln\left(\left(P_s \frac{s}{\eta}\right) + 1\right) = \eta \left(P_s \frac{s}{\eta}\right) = sP_s
 \end{aligned} \tag{5}$$

Uit Model 1 volgt dat Δh afhankelijk is van de sterkte van de seiche, de kans op een seiche en de decimeringshoogte (nepereringshoogte). Voor grote waarden van η is de statistische invloed van seiches onafhankelijk van de decimeringshoogte. De waterstandsverhoging is dan alleen nog afhankelijk van de kans op een seiche (P_s) en van de grootte van het seiche-effect (s).

6.2.2 Model 2: Gammaverdeling van seiches

Model 2 is het model dat gebruikt is voor het bepalen van de seiche-toeslag voor de Rotterdamse haven (Deltares, 2010). Hierin treedt bij elk hoogwater een seiche op. De kansverdeling van het waterstandsverhogende effect van de seiche wordt gemodelleerd als een Gammaverdeling:

$$P(s | a, b) = \frac{s^{a-1}}{b^a \Gamma(a)} \exp\left(\frac{-s}{b}\right) \quad (6)$$

Waarin s het netto seiche-effect is en a en b parameters van de kansverdeling. In dit model treedt dus altijd een seiche op tijdens een hoogwater. De grootte van het effect wordt gegeven door Formule 6. Merk op dat deze kansverdeling onafhankelijk is van de waterstand h . In werkelijkheid bestaat er wel een afhankelijkheid. Dit wordt nog nader beschouwd als onderdeel van het getallenvoorbeeld voor Rotterdam (Sectie 6.3).

De overschrijdingsfrequentie van de waterstand inclusief seiche-effect h_s wordt berekend door te integreren over s :

$$\begin{aligned} F(h_s) &= \int_0^{\infty} F(h_s) P(s | h_s) ds \\ &= \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{-h+s}{\eta}\right) \frac{s^{a-1}}{b^a \Gamma(a)} \exp\left(\frac{-s}{b}\right) ds \\ &= \exp\left(\frac{-h}{\eta}\right) \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^{\infty} s^{a-1} \exp\left(s\left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{b}\right)\right) ds \end{aligned} \quad (7)$$

Voor deze integraal bestaat een standaardoplossing:

$$\int_0^{\infty} x^n \exp(-ax) dx = \frac{\Gamma(n+1)}{a^{n+1}} \quad (8)$$

Combineren van Formule 7 en 8 leidt tot:

$$F(h_s) = \exp\left(-\frac{h}{\eta} - a \ln\left(1 - \frac{b}{\eta}\right)\right) = \exp\left(-\frac{h - a\eta \ln\left(1 - \frac{b}{\eta}\right)}{\eta}\right) \quad (9)$$

Als we Formule 9 vergelijken met de oorspronkelijke kansverdeling van de waterstand (Formule 1) dan zien we dat het waterstandsverhogende effect van de seiches gelijk is aan:

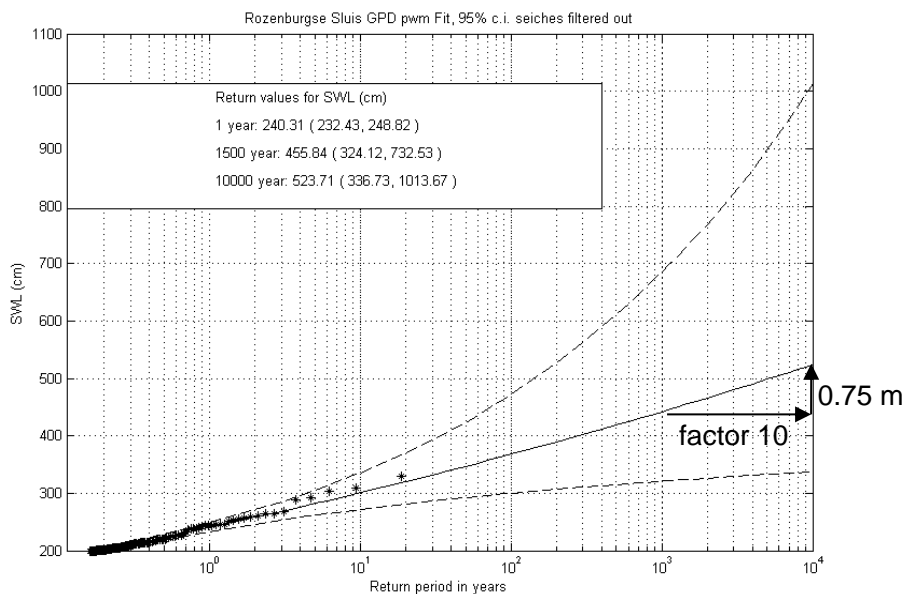
$$\Delta h = -a\eta \ln\left(1 - \frac{b}{\eta}\right) \quad (10)$$

Het waterstandsverhogende effect van seiches op een locatie is dus afhankelijk van de parameters van de kansverdeling van het seiche-effect én van de nepererings- of decimeringshoogte. Merk op dat ook in dit model bij toenemende nepereringshoogte de invloed van die parameter steeds kleiner wordt. In de limiet is het waterstandsverhogende effect gelijk aan de verwachtingswaarde van de seiche-kansverdeling, net als bij Model 1:

$$\lim_{\eta \rightarrow \infty} (\Delta h) = \lim_{\eta \rightarrow \infty} \left(-a\eta \ln \left(1 - \frac{b}{\eta} \right) \right) = ab \quad (11)$$

6.3 Getallenvoorbeeld Rotterdam

Ter illustratie geven we hier een getallenvoorbeeld voor locatie Rozenburgse Sluis (ROZ) in de haven van Rotterdam. De decimeringshoogte is hier ongeveer 0.75 m (zie Figuur 6.2) en de neperingshoogte is 0.33 m (Formule 2).



Figuur 6.2 Kansverdeling van waterstanden bij ROZ zonder seiche-effect (gefilterd signaal). Uit: Deltares (2010).

De kansverdeling van het seiche-effect is in Deltares (2010) gemodelleerd als een Gammaverdeling met parameters $a = 2.79$ en $b = 0.36$. Deze verdeling geldt echter voor een *genormeerd* seiche effect s_{norm} volgens¹⁴:

$$s_{norm} = \frac{s}{0.121h - 0.066} \quad (12)$$

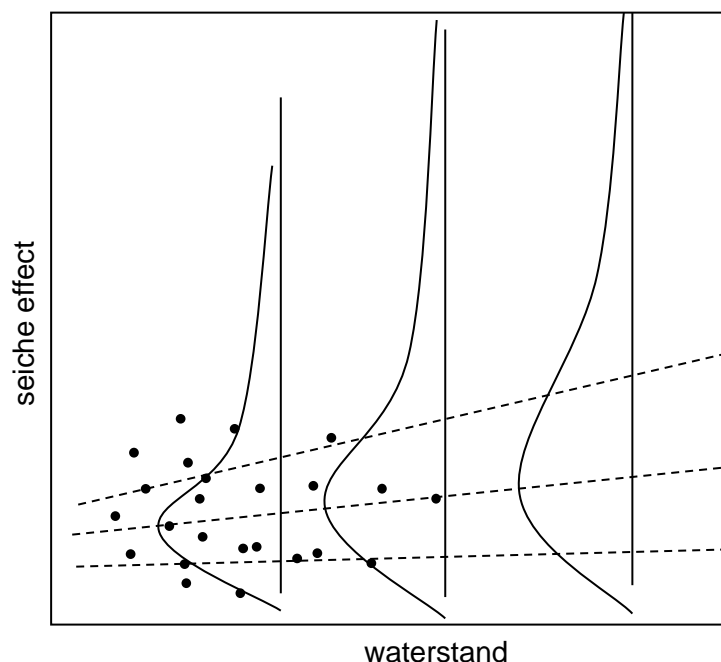
De kansverdeling van dit genormeerde seiche-effect s_{norm} is onafhankelijk van de waterstand, maar het absolute seiche-effect s is *wel* afhankelijk van de waterstand; de spreiding van de kansverdeling van s neemt toe bij hogere waterstanden (zie Figuur 6.3).

Om Formule 10 toch te kunnen gebruiken, nemen we de kansverdeling van het seiche-effect bij de maatgevende waterstand van 5 m+NAP. De parameters van de Gammaverdeling behorende bij die waterstand zijn dan gelijk aan $a = 2.79$ en $b = 0.194$ m en de geschatte waterstandsverhoging als gevolg van het seiche-effect is volgens Formule 10 in dat geval gelijk aan:

¹⁴ In Deltares (2010) wordt een model gebruikt waarin de kans op optreden van seiches afhankelijk is van de waterstand (zie formule 3.1 en Figuur 3.4 in Deltares, 2010). Bij een hogere waterstand geldt een grotere kans op hoge seiches. De genormaliseerde seiche-amplitude is onafhankelijk van de waterstand. Die aanpak is (aangepast) overgenomen uit eerdere studies naar seiche-statistiek in Rotterdam, onder andere ten tijde van het ontwerp van de Maeslantkering (zie Deltares, 2010 en verwijzingen daarin).

$$\Delta h = -a\eta \ln\left(1 - \frac{b}{\eta}\right) = -2.79 * 0.33 * \ln\left(1 - \frac{0.194}{0.33}\right) = 0.82 \text{ m} \quad (13)$$

Deze 0.82 m komt redelijk overeen met de waarde van 0.75 m zoals bepaald in Deltares (2010). Het verschil kan worden verklaard door het feit dat we de afhankelijkheid van de seiche-verdeling van de waterstand hier in dit voorbeeld hebben verwaarloosd. Bij lagere waterstanden dan 5 m+NAP geldt een kleinere spreiding van deze kansverdeling en een kleiner waterstandsverhogend effect. In Deltares (2010) wordt dit meegenomen in de numerieke integratie en komt de totale waterstandsverhoging lager uit.



Figuur 6.3 Gammaverdeling van seiche-effect met spreiding als functie van de waterstand. Uit: Deltares (2010).

In de limiet voor grote decimeringshoogten zou het waterstandsverhogende effect gelijk worden aan de verwachtingswaarde van de Gammaverdeling: $ab = 2.79 \times 0.194 \text{ m} = 0.54 \text{ m}$. De hierboven berekende waarde (0.82 m) is duidelijk groter. Dit geeft aan dat voor Rotterdam de seiche-amplitude, seiche-kans én de nepereringshoogte (decimeringshoogte) alle van invloed zijn. Voor de meest seiche-gevoelige locaties langs het IJsselmeer verwachten we dat er een soortgelijke afhankelijkheid zal zijn, dat wil zeggen dat de statistische invloed van seiches ook daar van alle drie de parameters af zal hangen.

6.4 Conclusie en discussie

De afleidingen in dit hoofdstuk geven inzicht in het waterstandsverhogende effect van seiches en de rol die de decimeringshoogte daarin speelt. De statistische relevantie van seiches op een locatie is afhankelijk van de lokale typische grootte van de seiche-amplitude, de kans op optreden van hoge seiches én van de decimeringshoogte. De invloed van de decimeringshoogte neemt af bij toenemende decimeringshoogte ten opzichte van de seiche-amplituden. Bij zeer grote decimeringshoogte is de statistische invloed van seiches gelijk aan de verwachtingswaarde van het seiche effect en onafhankelijk van de decimeringshoogte.

Met Formules 4, 10 en 11 kan een eerste schatting gemaakt worden van de statistische relevantie van de invloed van seiches op een locatie. De inschatting van lokale typische seiche-amplituden uit de verkenning van potentiële seiche-locaties in Nederland (Deltares, 2015a) zou in een latere studiefase mogelijk gebruikt kunnen worden om dit grofweg voor alle beschouwde locaties uit te werken.

7 Conclusies, discussie en vooruitblik

7.1 Hoofdconclusies

Deze studie heeft geleid tot de volgende belangrijkste conclusies.

Taak 1: inventarisatie invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen

- Op basis van expert-consultatie is een inventarisatie gemaakt van de verschillende faalmechanismen van (primaire) waterkeringen, in hoeverre seiches daarop van invloed zijn en of die invloed meegenomen moet worden bij het vaststellen van de Hydraulische Randvoorwaarden (HR).
- Voor elk faalmechanisme is aangegeven of A) een constante toeslag, B) geen toeslag of C) het compleet meenemen van het seiche-sigitaal op dit moment aanbevolen wordt voor de HR.
- De uitkomsten van deze taak staan samengevat in Tabel 2.1 op Pagina 7 van de hoofdtekst. Die informatie is bedoeld voor het maken van verdere keuzes door RWS, in overleg met Deltares, over of en hoe deze effecten nader onderzocht zullen worden en eventueel in de HR meegenomen zullen moeten gaan worden (zie ook Sectie 7.2).

Taak 2: (beperkingen in) seiche-opwekking en -response

- De verschillende opwekkingsmechanismen van seiches zijn in een overleg met hydrodynamici en meteorologen nader beschouwd.
- De hoogste seiches worden verwacht bij een langer aanhoudende meteorologische verstoring. Deze kan bestaan uit een aaneenschakeling van convectiecellen in de koude lucht achter een koufront of uit een serie van troggen. Deze beide effecten zullen naar verwachting minder effectief zijn in de opwekking van seiches tijdens extreme stormen. In een verdere uitwerking hiervan zal nader onderscheid moeten worden gemaakt tussen de karakteristieken van (de opwekking van) seiches in zeehavens en op de grote meren.
- Deze observaties en verwachtingen zouden met numerieke simulaties met een hydrodynamisch model geforceerd met uitvoer van een meteorologisch model geanalyseerd en gekwantificeerd kunnen worden. Hierbij zouden eerst gemeten situaties nagerekend kunnen worden om na te gaan of de opgetreden seiches gereproduceerd kunnen worden. Vervolgens zou de invoer aangepast (verschaald) kunnen worden om zo extreme stormcondities door te kunnen rekenen.
- Uit gedetailleerde analyse van 4 stormsituaties met verschillende meteorologische condities lijkt de respons op de grote meren primair gekoppeld aan koufronten en trogpasages, terwijl in de zeehavens de grootste respons optrad tijdens het overtrekken van instabiele lucht met convectiecellen. Het eerste type verstoringen zou de huidige versie van HARMONIE, het meteorologisch model van het KNMI, goed weer moeten kunnen geven. Echter, convectiecellen zullen naar verwachting nog niet voldoende opgelost worden. Dit impliceert dat vervolgstudies voornamelijk gericht zouden moeten zijn op het numeriek simuleren van de opwekking van seiches op de grote meren. Voor het simuleren van de opwekking van seiches in de grote zeehavens is HARMONIE op dit moment naar verwachting nog niet geschikt. In samenwerking met KNMI zou dat uitgezocht moeten worden.
- Voor het uitvoeren van een numerieke analyse is in deze studie een stappenplan uitgewerkt (Sectie 3.1.3). Die werkzaamheden zouden in een vervolg van de huidige studie onder KPP-VOW uitgevoerd kunnen worden.

Taak 3: analyse van waterstandsmetingen Marker- en IJsselmeer en randmeren

- Analyse van waterstandsmetingen op 19 locaties in het IJsselmeer, Markermeer en randmeren heeft aangetoond dat seiches optreden in alle beschouwde watersystemen, met verschillende amplituden en tijdschalen.
- Tabel 4.2, op Pagina 24 van de hoofdtekst, bevat een samenvatting van de typische seiche-amplitudes en -periodes zoals afgeleid uit de metingen op de beschouwde locaties.
- De hoogte van de seiches (amplitude) lijkt gecorreleerd te zijn met de grootte van het watersysteem. Dit is conform verwachting; in grote watersystemen kan meer windopzet optreden en omdat seiches (groten)deels door (instationaire) windopzet getriggerd worden zijn ook de seiches in grotere systemen in potentie hoger.
- Er is veel verschil in de grootte van seiche-amplituden op verschillende meren, maar ook tussen sommige locaties in hetzelfde watersysteem. Dit heeft onder andere te maken met de specifieke (lokale) geometrie van het meer en mogelijk ook met de positie van een locatie in een watersysteem ten opzichte van de heersende trekrichting van stormen.
- De seiches op de beschouwde watersystemen hebben typische amplituden van enkele decimeters. Dit is mogelijk hoger dan tot nu toe aangenomen voor de Hydraulische Randvoorwaarden. Indien gewenst in het kader van de HR zouden de seiches op de grote meren en aangrenzende watersystemen nader onderzocht kunnen worden om de sterkte van deze oscillaties nader te onderbouwen voorafgaand aan eventuele opname in de HR.
- De seiche-amplitude en de gelijktijdig optredende wind-geïnduceerde opzet lijken geen sterke correlatie te vertonen voor de twee beschouwde locaties (één op het IJsselmeer en één op het Markermeer). Dit resultaat kan relevant zijn voor het afleiden van maatgevende waterstanden voor de HR.
- De seiches op het IJsselmeer en Markermeer lijken door het gehele jaar een relatief constante gemiddelde amplitude per maand te hebben. De hoogste amplituden komen dus niet noodzakelijkerwijs voor tijdens – voor wind-geïnduceerde opzet – maatgevende winterstormcondities. Dit resultaat kan onder andere relevant zijn voor het analyseren van de opwekking van seiches op de grote meren.

Invloed van decimeringshoogte op het seiche-effect

- De statistische relevantie van seiches op een locatie is afhankelijk van de lokale typische grootte van de seiche-amplitude, de kans op optreden van hoge seiches én van de decimeringshoogte. De invloed van seiches is het grootst als de decimeringshoogte klein is ten opzichte van de seiche-amplituden. Bij hoge waarden van de decimeringshoogte is de statistische invloed van seiches beperkt tot het product van de seiche-kans en de seiche-amplitude en wordt deze onafhankelijk van de decimeringshoogte.

7.2 Discussie en vooruitblik

De verschillende hoofdtaken in de huidige studie zijn bedoeld als eerste stap in een groter Plan van Aanpak voor het nader uitwerken van opwekking en respons van seiches en hun effect op de waterkeringen, zoals beschreven in Deltares (2015a). Hieronder wordt een korte vooruitblik gegeven naar hoe de verschillende taken uit deze rapportage eventueel voortgang zouden kunnen vinden in latere jaren, maar ook welke implicaties bepaalde uitkomsten zouden kunnen hebben. In overleg tussen RWS en Deltares zou de uiteindelijke invulling van die taken vastgesteld kunnen worden.

Taak 1 – invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen

De verkennende inventarisatie van hoe faalmechanismen van waterkeringen kunnen worden beïnvloed door seiches heeft opgeleverd dat waarschijnlijk veel van de beschouwde mechanismen gelukkig niet nadelig beïnvloed worden door deze lange golven. Voor een aantal mechanismen is dit al vastgesteld, op basis van expertinschattingen, voor enkele andere zou dit nog geverifieerd kunnen worden in een vervolgstudie.

Een aantal mechanismen zou in specifieke gevallen wel beïnvloed kunnen worden. Bijvoorbeeld indien er op een locatie sprake is van diepte-gemiddelde windgolven die in geval van de top van een seiche tijdelijk hoger kunnen worden en zo voor een bepaald tijdsinterval een hogere belasting op een waterkering kunnen veroorzaken. In deze verkennende studie konden dit soort aspecten niet in detail en voor elke locatie worden uitgewerkt en daarom zijn vooralsnog generieke en doorgaans conservatieve suggesties gedaan. Of deze mogelijke invloeden op faalmechanismen ook in de praktijk een significante invloed zullen hebben, en of die dus in de HR meegenomen zullen moeten worden, zal in een vervolgstudie in detail beschouwd moeten worden. Mogelijk kunnen eerst enkele representatieve locaties beschouwd worden om zo een eerste indruk van praktische implicaties te verkrijgen alvorens een eventuele grotere analyse uit te voeren.

Taak 2 - seiche-opwekking en -response

De taak over beperkingen in seiche-opwekking zou kunnen leiden tot lagere seiche-toeslagen (en nooit tot hogere). Verdere verkenning en uitwerking van dit verwachte gedrag van seiches zou dus een positieve (verlagende) invloed op de HR kunnen hebben. Echter, het in detail vaststellen van de grenzen in opwekking zal niet eenvoudig zijn en zal ook zeer gedegen uitgevoerd moeten worden omdat die grens daarmee ook direct de bovengrens voor de invloed van seiches binnen de HR zal bepalen. Voor de zeehavens zal dit naar verwachting nog het meest complex zijn, vanwege de interactie met de Noordzee en mogelijk relatief korte tijdschalen van betrokken meteorologische fenomenen. Die kortere tijdschalen worden waarschijnlijk nog niet voldoende opgelost door de huidige meteorologische modellen. Voor de grote meren zal dit ook niet eenvoudig zijn, maar die situaties bieden naar verwachting op korte termijn wel meer mogelijkheden omdat de daarvoor relevante grootschalige meteorologische processen nu al redelijk goed worden weergegeven in een meteorologisch model als Harmonie (KNMI). Het compacte stappenplan dat in de huidige studie is uitgewerkt voor nadere kwantificering van de (beperkingen) in de opwekking van seiches op de grote meren (Sectie 3.1.3) zou mogelijk op een later moment onder KPP-VOW uitgevoerd kunnen worden (als onderdeel van Werkpakket O2 uit het Plan van Aanpak uit 2015).

Taak 3 - analyse van waterstandsmetingen op de grote meren

De analyse van waterstanden op het IJsselmeer, Markermeer en nabijgelegen meren heeft een goed eerste beeld opgeleverd van de sterkte en tijdschalen van seiches op die verschillende (deels gekoppelde) watersystemen. Mogelijk dat locaties met zeer lage lokale seiche-amplituden (<0.1-0.2 m), en naar verwachting beperkte extreme waarden, niet nader beschouwd hoeven te worden en dat een eenvoudige standaardtoeslag voor die gebieden voldoende is. Voor het uitwerken van locaties met hogere seiche-amplituden zouden de uitkomsten in een vervolgfase nader uitgewerkt dienen te worden tot herhalingstijden die relevant zijn voor de HR en voor andere (operationele) toepassingen. Of dat mogelijk is op basis van de beschikbare tijdreeksen (met relatief beperkte duur), dat wil zeggen met voldoende betrouwbaarheid/nauwkeurigheid, zal nagegaan moeten worden. In aanvulling op het oorspronkelijke Plan van Aanpak voor seiches (Deltares, 2015a) kan hiervoor een deeltaak onder een onder KPP-VOW gedefinieerd worden (zie Sectie 7.3).

7.3 Korte-termijn taken voorzien voor 2017

In Deltares (2015) is een werkplan aangemaakt voor een grootschalige analyse van de opwekking van seiches en de mogelijkheid om die numeriek te berekenen en zo te gaan voorspellen. Dat vergt een majeure effort in tijd en kosten. Die aanpak wordt nog steeds als zeer wenselijk en relevant gezien, maar wordt vooralsnog niet voor 2017 voorzien omdat er kleinere deeltaken liggen die eerst uitgewerkt dienen te worden, naast de voorbereidende taken die reeds in 2016 zijn uitgevoerd en in deze rapportage staan beschreven.

Vooralsnog worden de volgende deeltaken onder het onderdeel 'seiches' binnen KPP-VOW 2017 voorzien:

1. Kwantificering seiches:
 - a. De seichegevoeligheid van de nog niet in beeld gebrachte wateren binnen Nederland zoveel mogelijk uitwerken (waaronder gebieden in Zeeland en de meeste nieuwe buitenwateren zoals Grevelingen, Volkerak-Zoommeer en Hollandse IJssel, naar aanleiding van de verkenning in Deltares 2015).
 - b. Het voor deze locaties zo veel mogelijk uitwerken van een deterministische indicatie [gezien de zeer korte meetreeksen vooralsnog] van seiches in extreme condities, met indicatieve onzekerheidsband. Deze waarden zullen vervolgens worden vergeleken met de lokale grootte van de opwaaiing (of overall-waterstandsverhoging ten opzichte van dagelijks gemiddelde) om een indruk te geven van het maximale relatieve belang van seiches.
 - c. Vervolgstep is deze seiche-karakteristieken te combineren met locatie-specifieke informatie over de decimeringshoogte, en conform de compacte aanpak van Hoofdstuk 6 van de huidige rapportage tot een indicatief netto-seiche-effect per locatie/gebied te komen. Hiervoor zijn mogelijk ook aanvullende principeberekeningen van uitdempende seiches en/of aanvullende data-analyse benodigd om de lokale demping van de watersystemen vast te stellen. Of dergelijke simulaties benodigd zijn en binnen de projectrestricties (doorlooptijd, budget) passen zal in de loop het project op basis van tussenresultaten nagegaan moeten worden.
2. Het uitvoeren van proef/principe-sommen van de invloed van opwekkingsmechanismen van seiches op het IJssel- en Markermeergebied tijdens extreme omstandigheden (normcondities). Vooralsnog voorzien wij enkele proefsommen met orde 5hPa drukstoot en/of scherpe windsprong die je met bijv. 18m/s en 36 m/s voortplant (denk bij scherpe windsprong aan 18 m/s resp 36 m/s W/ZW-wind, gevolgd door voor 50-80% wegvallen van de wind binnen 1 uur of binnen ca. 30 km). Op deze manier kan een indicatie worden gegeven of extreme seiches bij extreme wind op de grote binnenmeren sterker of zwakker worden.

De bovenstaande onderdelen geven een indicatieve kwantificering van wat per potentiële seiche-locatie/gebied in Nederland (gebieden geïdentificeerd in Deltares, 2015) de grootte van een netto seiche-effect zal zijn en wat de statistische relevantie zal zijn. Dit zal nadere richting geven aan vervolgtaken (onder andere grootschalige modelleertaken, beschreven in het Plan van Aanpak uit 2015) en zal belangrijke input zijn voor keuzes of en hoe seiches voor specifieke faalmechanismen meegenomen zullen moeten gaan worden.

Referenties

De Jong (2004), Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins, PhD Thesis, TU Delft, ISBN 90-9017925-9.

De Jong, M.P.C., J. Dekker, and G. Kant (2006), Characteristics of seiches in the Port of Rotterdam during design storm conditions, Proc. 30th Int. Conf. Coastal Eng., Vol. 2, pp. 1210-1221, 2006.

De Jong, M.P.C., M. Bottema, R.J. Labeur en C. Stolker (2006) Atmospherically generated scale water-level fluctuations in a closed basin, Proc. 30th Int. Conf. Coastal Eng., Vol. 2, pp. 1184-1196, San Diego, USA.

Deltares (2010), Update of the seiche allowances for the Rotterdam Europoort area, WBI 2009/2010, input for the Hydraulic Boundary Conditions 2011, Rapport 1200103-052-ZWS-0005, auteurs: M.P.C. de Jong en J.A.M. de Bont.

Deltares (2014a), Impactanalyse Roggebot-Noord, 209915-000-HYE-0014, auteurs: C. Gautier, N. Kramer, C. Geerse en J. den Bieman.

Deltares (2014b), Statistiek seiches buitenhaven IJmuiden voor ontwerp nieuwe zeesluis, Rapport 1209945-000-HYE-0002, auteurs: M.P.C. de Jong, S.P. Reijmerink en M.J.A. Borsboom.

Deltares (2014c), Actualisatie seiches Rotterdam WBI2017 -Waterstandsafhankelijke seichewaarden, 1209433-006-HYE-0002, auteurs: S.P. Reijmerink en M.P.C. de Jong.

Deltares (2015a), Inventarisatie van potentiële seiche-locaties in Nederland - Verkenning en Plan van Aanpak, 1220039-010-VEB-0001, auteur: M.P.C. de Jong.

Deltares (2015b), Expert-interpretatie seiches buitenhavens Terneuzen, 1220093-003-GEO-0002, auteur: M.P.C. de Jong.

Deltares (2015c), Verkenning statistische afhankelijkheid IJsselmeer, 1220039-010-VEB-0002, auteurs: N. Kramer en W. J.Klerk.

Deltares (2016), Toetsing meteorologisch model HARMONIE als invoer voor het beschrijven van de waterstand langs de Nederlandse kust gedurende twee stormperiodes, Technisch memo, Referentie 1220073-002-ZKS-0017, auteur: M. Tiessen.

KNMI (2008), Meteorologische omstandigheden tijdens het optreden van type C seiches in de Rotterdamse Haven – Een aanzet tot het verbeteren van de seichesverwachting, maart 2008, auteur: M. van Schaik.

Rijkswaterstaat (2016), Seiches in het IJsselmeergebied, Verkennende studie WAQUA – HARMONIE, Rijkswaterstaat WMCN, september 2016, auteur (stagiaire): L. Muntjewerf.

Torrence, C. en G.P. Compo (1998), A practical guide to wavelet Analysis, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 79, pp. 61-78.

Van Os, J. and S. Caires, 2011, How to carry out metocean studies, Proc. 30th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng. (OMAE2011-49066).

WL | Delft Hydraulics (2007), Analyse en advies seiche-voorspellingen en methodiek seiche-statistiek, auteurs: M.P.C. de Jong, J.V.L. Beckers en J. Groeneweg.

A Notulen van expertsessies

In het kader van dit project hebben drie expert-overleggen plaatsgevonden, één in het kader van Taak 1 (Deltares) en twee in het kader van Taak 2 (Deltares-KNMI). Hieronder zijn de bespreekverslagen van die bijeenkomsten opgenomen ten bate van vastlegging. De hoofdtekst van dit rapport is deels gebaseerd op uitwerkingen van de feedback die de verschillende experts tijdens deze bijeenkomsten hebben ingebracht.

Notulen overleg seiches KPP-VOW 2016, Taak 1, invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen

Datum: 30 maart 2016, 9:00-10:30 uur

Aanwezig: Mark Klein Breteler, Andre van Hoven, Jacco Groeneweg, Joost Beckers, Martijn de Jong (notulen)

Afwezig (kopie notulen): Ulrich Forster, Alexander van Duinen

Doel van de bespreking: Inventariseren van mogelijke invloeden van seiches op specifieke faalmechanismen van waterkeringen.

Beknopte motivatie: Seiches zijn waterstandslingeringen met periodes tussen 10 minuten en ca. 2 uur en met typische amplituden tot 1 m. Zij treden op in (half) afgesloten waterbekkens. Door resonantie kunnen seiches versterkt worden. Seiches treden in Nederland op tijdens stormachtig weer en zijn hier gelinkt aan meteorologische opwekkingsmechanismen. Omdat de tijdschalen van seiches tussen het getij en windgolven in liggen kunnen seiches een bijzondere/andere invloed hebben op (faalmechanismen van) waterkeringen die tot nu toe mogelijk nog niet is beschouwd.

*Punsgewijze samenvatting van de bespreking (**acties in bold**):*

- Er zijn drie manieren om seiches mee te nemen bij de beoordeling van faalmechanismen:
 - A. Meenemen in de statistiek van hoogwaters en als zijnde stationaire opslag op de waterstandverhoging door stormopzet, getij en of afvoergolven. De beperkte duur van het seiche wordt genegeerd. Dit is de huidige praktijk.
 - B. Bij de beoordeling van een faalmechanisme het seiche niet meenemen. De waterstand waarbij het mechanisme wordt beoordeeld wordt daarmee lager. Alleen de waterstandvariatie met een periode gelijk aan getij (of langer) wordt beschouwd.
 - C. Het werkelijke waterstandverloop inclusief seiche wordt meegenomen.
- Voor de verschillende faalmechanismen van een dijk is nagegaan in hoeverre op basis van expert judgement bovenstaande aanpakken veilig genoeg zijn, niet veilig genoeg, of dat dit nader zou moeten worden uitgezocht.
- AvH: voor overslagerosie van de grasbekleding op de kruin en het binnentalud zullen seiches relevant zijn, zeker bij grotere golfhoogten ($H_s > 1,5-2$ m). Op dit moment wordt de overslagbelasting (debiet) op de piek van de storm aangehouden gedurende 6 uur als representatieve weergave van de belasting tijdens de totale storm. Van belang hierbij is dat een waterstandsverhoging door een seiche niet zal worden gecompenseerd door het daarop volgende dal van een seiche vanwege niet-lineaire relatie in de invloed van de overslag. Het kan nuttig zijn om het effect van het totale verloop van de waterstand inclusief seiches te berekenen. A is zeker veilig, B is zeker onveilig met enkele berekeningen (optie C) zou kunnen worden gekeken of het nuttig is om het ook werkelijk te gaan meenemen of dat het verschil met optie A verwaarloosbaar is.
- AvH: voor overslag en infiltratie van water in het binnentalud zal de invloed van het seiche (top/dal) niet heel groot zijn en wordt geen significant effect verwacht. A zeker veilig, B zeker onveilig, waarschijnlijk weinig nut om werkelijk verloop mee te nemen. Optie C zal bijna gelijk zijn aan optie A.
- AvH: macrostabiliteit van binnentalud: half afschuiven van binnentalud met behoud van kruinhoogte wordt op dit moment nog niet als falen gezien zolang de kerende functie tijdens de storm maar behouden blijft (toepassen zogenaamde zonering). Voor de overslag in deze situatie wordt ook de piekwaarde toegepast (6 uur duur) en ook hier kunnen seiches een verhogende invloed hebben op de mate van overlag.

- AvH: grondwaterstand binnen in dijk, binnenwaarts van de kruin, wordt bij kleidijken vaak nauwelijks beïnvloed door MHW. Die grondwaterstand aan de binnenkant van de dijk is belangrijk voor macrostabiliteit, maar zal door seiches nauwelijks worden beïnvloed. Ook de waterdruk in het eerste watervoerende pakket wordt waarschijnlijk nauwelijks beïnvloed door seiches. AvH+MKB: macro-stabiliteit binnenwaarts hierdoor niet kritisch beïnvloed. Optie A waarschijnlijk te veilig, optie B veilig genoeg.
- AvH+MKB: voor macro-stabiliteit aan het buitentalud kan in principe een seiche van belang zijn vanwege de relatief plotselinge waterstandsverlaging agv een seiche ten opzichte van de waterstand in de kering. Echter, dit zal alleen significant zijn als de verlaging erg groot is, dus zeg vanaf MHW naar een gemiddelde waterstand. Voor seiches zal dit doorgaans niet het geval zijn dus is de verwachting dat in de praktijk de invloed beperkt zal zijn. Aanvulling AvD naar aanleiding van notulen: voor macro-stabiliteit heeft optie C waarschijnlijk de voorkeur, maar dat zal eerst nader uitgewerkt moeten worden.
- MKB+AvH: golfklappen erosie gras: seiches verspreiden impact over breder bereik, maar bekleding is alleen in specifiek bereik versterkt en daarboven ligt gras. Als seiches al in MHW zitten dan is naar verwachting daarmee dit effect al afdoende afgedekt en kan verdere invloed beperkt blijven. A veilig, B onveilig, van C wordt niet een heel ander resultaat verwacht ten opzichte van A. Bij verdedigde taluds zijn de golven vaak zo hoog dat zodra de waterstand boven de harde bekleding komt het gras heel snel bezwijkt.
- MKB+AvH: oplooperosie gras: invloed van seiches zal naar verwachting beperkt zijn als de toeslag van seiches al in MHW zit (A =conservatief). Anders mogelijk meer impact juist op overgang tussen harde en zachte bekleding waardoor meer schade zou kunnen ontstaan, vooral in situaties/locaties met relatief hoge golven. Vaste toeslag in MHW is conservatief. Men zou de invloed van het tijdsverloop van de waterstand inclusief seiches kunnen analyseren. Optie A zeker veilig, B zeker onveilig, met enkele berekeningen kan worden gekeken of optie C een werkelijke optimalisatie geeft ten opzichte van optie A.
- MKB: afschuiven van gras/steenbekleding: Seiches hebben nauwelijks invloed. Alleen als de golfhoogte tijdelijk toeneemt omdat de golven diepte-gelimiteerd zijn, kan er een hogere belasting optreden. Alleen in dat geval moet de seiche-amplitude erbij geteld worden (optie A). Anders: B.
- MKB: toplaagstabiliteit steenzettingen: De seiches zijn alleen van invloed indien deze hoog zijn tov hoogte van de zone met grote golfbelasting. In dat geval zou de belastingduur iets korter kunnen zijn dan zonder seiches. De invloed is echter gering, en daarom wellicht kiezen voor optie B. Als de golfhoogte tijdelijk toeneemt omdat de golven diepte-gelimiteerd zijn, kan er een hogere belasting optreden. Alleen in dat geval moet de seiche amplitude erbij geteld worden (optie A), anders hoeft het niet en geldt dus optie B. JG: golven zullen tijdelijk hoger zijn igv diepte-gelimiteerde golfhoogten voor de waterkering. Voor niet diepte-gelimiteerde condities is de tijdelijke verhoging in waterstand agv een seiche te kort om een significant effect op de golfgroei te hebben. MKB/JB: Seiches zorgen ervoor dat de belasting verschuift over het talud. Dit geeft een bandbreedte van belasting die mogelijk agv seiches groter zal zijn.
- MKB: bij materiaaltransport vanuit de ondergrond en materiaaltransport vanuit de granulaire laag bij steenzettingen kan de invloed van seiches verwaarloosd worden (optie B). De reststerkte van een kering, na schade aan de bovenlaag, zal naar verwachting niet kleiner worden onder de invloed van seiches. Dit is echter niet zo gemakkelijk in te schatten en daarom wordt voorgesteld om numerieke berekeningen uit te voeren inclusief seiches (optie C) om de invloed te kwantificeren
- MKB: voor de kruin en binnentalud havendammen/golfbrekers is een vaste toeslag voor seiches relevant: optie A. Deze constructies kunnen een onderdeel zijn van het

waterkeringsysteem en zijn dan belangrijk voor de veiligheid van het achterland. MdJ: golfbrekers liggen nabij de ingang van havens, waar de seiche-amplituden beperkt zullen zijn. Dus mogelijk geen grote toeslag voor seiches.

- MKB: falen van asfaltbekledingen: invloed van seiches naar verwachting beperkt. Belasting wordt ook in dit geval alleen verdeeld over een groter bereik langs het talud. Seiches wel relevant igv diepte-gelimiteerde golfhoogte waarbij een tijdelijke waterstandsverhoging agv een seiche tijdelijk hogere golven op kan leveren. MKB/AvH: mogelijk dat asfalt van het talud afgedrukt wordt bij lagere buitenwaterstand igv seiche. Maar invloed mogelijk beperkt omdat grondwatereffecten relatief langzame processen zijn. Asfalt wordt aangebracht tot ver boven de waterlijn, maar water kan mogelijk binnendringen via de onderkant. Optie B.
- JB: hebben wateroverdrukken onder het asfalt als gevolg van seiches invloed op vermoeiing van asfalt? AvH: hier verwachten we geen significante invloed omdat vermoeiing pas speelt bij 100-en of 1000-en krachtenwisselingen als gevolg van golfklappen. Binnen een seiche-episode is het aantal slingeringen veel kleiner.
- AvH/JG (+ aanvulling UF obv de notulen): de invloed van seiches op piping is naar verwachting zeer gering. Het gaat daarbij over relatief langdurige fenomenen met een maximale groeisnelheid van de pipe van 2 mm/s. De groeisnelheid van de pipe wordt o.a. ook beïnvloed van de mate van overschrijding van het kritieke verval (verval over de kering waar geen evenwicht meer ontstaat en de pipegroei niet meer tot stilstand komt). Op dit moment staat de relevantie van het mechanisme bij tijdschalen van getijden- en stormgedreven watersystemen ter discussie, dus laat staan de invloed per seiche-slingering. Op basis van bovengenoemde groeisnelheid wordt, in geval van een dijkbreedte groter 50 m, ervan uitgegaan dat de kans op doorbraak bij een extreme hoogwaterstand van 6 uur verwaarloosbaar is. A mogelijk te veilig, B veilig genoeg.
- AvH/MKB: stabiliteit voorland: plaatvloeiingen kunnen mogelijk getriggerd worden door seiches door hun invloed op de waterstand (**MdJ checkt bij Geeralt van den Ham**). Ook scheepsgolven kunnen dergelijke triggers zijn. Dit gebeurt als een bepaald taluddeel 'op scherp staat'.
- AvH: voor micro-stabiliteit wordt geen invloed van seiches verwacht. A te veilig, B veilig genoeg
- RWS heeft gevraagd om de discussie over invloed van seiches ook te beschouwen in het licht van statistische relevantie. Dit hangt onder andere samen met de decimeringshoogte (de verhoging in MHW behorende bij een orde van grootte verhoging in de herhalingstijd). **JB zal hiervoor een beknopte beschrijving en beschouwing maken** (ca. 1 mandag) en deze aanleveren aan MdJ om op te nemen in de rapportage aan RWS (als los hoofdstuk of bijlage).

Notulen overleg seiches KPP-VOW 2016, Taak 2, beperking in opwekking en response seiches

Datum: 16 februari 2016, 14-16 uur

Aanwezig: Marcel van Schaik (KNMI), Bas Reijmerink (Deltares), Jacco Groeneweg (Deltares), Joost Beckers (Deltares), Martijn de Jong (Deltares, notulen)

Doel van de bespreking: Onderzoeken of en welke bovengrenzen er bestaan van seiche-opwekkingsmechanismen. De toeslagen voor seiches en buistoten op de hydraulische randvoorwaarden worden in het huidige WBI bepaald aan de hand van een statistische analyse. Daarin wordt aangenomen dat er geen fysische bovengrenzen van de opwekkingsmechanismen zijn (wel aan de response-kant, omdat PHAROS rekening houdt met het onderlopen van kades). Als aangetoond kan worden dat de meteorologische opwekkingsmechanismen wel begrensd zijn dan zou dat kunnen leiden tot bijstelling van de toeslagen.

Puntsgewijze samenvatting van de bespreking (acties in bold):

- **Marcel stuur het document rond met daarin de instructies voor de weerkamer over de seiche-verwachting inclusief indeling in 4 soorten van weersituaties (A t/m D).**
- Deze 4 soorten zijn:
 - A: pre-frontale buienlijn: lijn met zware buien en windstoten uit richtingen tussen zuid en zuidwest voorafgaand aan koufront
 - B: actief koufront uit westelijke richtingen met zware buien en windstoten en met markante windruiming na koufrontpassage
 - C: convectiecellen achter een front, tijdens een polar outbreak
 - D: post-frontale buienlijn: lijn met zware buien en windstoten in stroming tussen zuidwest en noord achter koufront
- Marcel: mogelijk dat deze opdeling nog een keer herzien kan worden omdat bijvoorbeeld type B en D erg op elkaar lijken en mogelijk samengevoegd kunnen worden.
- Marcel: type C is een vorm die mogelijk niet op zal treden tijdens extreme condities omdat in die situatie die cellen niet (zo geordend) kunnen ontstaan
- Marcel: voor Type B/D is er mogelijk een bovengrens aan de puls (sterke van de verstoring). In het werkplan uit 2007 (WL) is een puls van 45 m/s genoemd als opwekkende kracht voor een 1.3 m amplitude verstoring op zee, leidend tot een seiche-amplitude van 2 m bij de Maeslantkering. Een situatie met 90 knopen windstoot kan optreden. Mogelijk dat statistiek van windstoten (of andere verstoringen?) inzicht kunnen geven in de kans van voorkomen van extreme fluctuaties. **Marcel zal beschikbaarheid van deze gegevens binnen KNMI nagaan.**
- Marcel: In de zomer kunnen buien over het algemeen tot grotere hoogte doorgroeien (de tophoogte) dan in de winter; de tophoogte van extreme zomerse buien komt in de winter bijna nooit voor. Bij koufronten en troggen kunnen windstoten voorkomen ten gevolge van de onstabielheid (buiigheid); de windsnelheid op grotere hoogte wordt als het ware naar beneden getransporteerd. Bovendien kunnen bij zware buien 'downbursts' optreden t.g.v. neerslag die de lucht afkoelt.
- Marcel: losse buien geven doorgaans geen sterke verstoringen in windsnelheid, wel bij troggen
- Martijn: irt opwekking van seiches zullen vooral grootschalige fenomenen relevant zijn, fluctuaties met periodes van 30 minuten tot ca 2-3 uur. Daarnaast is de treksnelheid van de systemen van belang ivm de effectiviteit van de overdracht van energie aan de lange golven op zee.
- Marcel: open cellen worden niet goed opgelost in Harmonie. Mogelijk dat een gemeten windconditie tijdens een seiche aangepast zou kunnen worden door typische windfluctuaties toe te voegen.
- Martijn: is de treksnelheid van een koufront tijdens een zeer zware storm ook altijd erg hoog?
Marcel: ja; Stroming op 700 hPa niveau wordt als bepalend gezien en die is onder die

- condities relatief hoog. Martijn: optimale opwekking van lange golven op zee bij een treksnelheid tussen ca. 15-20 m/s met optimale condities rondom 17 m/s. Koufronten zullen in dat soort extreme stormsituaties dus waarschijnlijk bijna altijd sneller lopen dan deze 17 m/s.
- Joost: van belang is ook de duur van het energieaanbod voor seiches en of er sprake is van een buistoot met enkele puls of dat er een langer signaal optreedt. Voor de respons op een buistoot verwacht je dat deze gerelateerd is aan de sterkte van het signaal. Voor een resonantieverschijnsel als seiches gaat met meer om de duur van het periodieke signaal en de 'match' tussen de frequentie van de aandrijvende kracht en resonantiefrequentie van het bekken.
 - Martijn: daaruit is af te leiden dat de maatgevende, dus hoogste, seiches doorgaans het gevolg zullen zijn van een langer aanbod van energie en niet van de puls-opwekkingen. Die laatste geven het bassin 1 puls-uitwijking die daarna uitdempt bij een eigenperiode van het bekken. Marcel: voor een periodiek signaal in geval van troggen zouden er relatief veel na elkaar op moeten treden in een storm en dat is zeldzaam.
 - Marcel: In een NW'lijke stroming achter een koufront komen vaak wel losse buien voor, dit is ook mogelijk tijdens de zwaardere stormen. Jacco: als dit kleine lokale systemen zijn dan zijn die mogelijk voor opwekking van seiches niet relevant.
 - Martijn: een hoger energieaanbod hoeft korter aan te houden om maximale seiche-amplituden door resonantie te veroorzaken. Ook een lager energieaanbod kan een hoog seiche veroorzaken als het dan maar langer aanhoudt.
 - Joost: moeten we wel naar extreme stormen kijken? In de statistiek van seiches en waterstanden kijken we naar de combinatie van beide parameters. Een hoge waterstand kan het gevolg zijn van een hoge opzet met een (klein) seiche, maar ook een lagere hoge waterstand icm een hoger seiche. Jacco: als de seiche-amplituden ca. 1 m zijn, dan is er nog steeds een extreme setup van 4 m nodig om aan echt hoge waterstanden te komen. Dus mogelijk toch extreme condities.
 - Marcel: er bestaat ook "external surge" (ook wel Wickgolf genoemd), dat is een extra opzet als gevolg van een lagedrukgebied dat over Schotland richting Denemarken trekt. Een extra opzet rondom Schotland agv dit lagedrukgebied (eerst gemeten op locatie Wick) loopt dan zuidelijk richting NL (duurt ongeveer 12 uur voordat de golf bij Wick de Nederlandse ZW kust bereikt).
 - Marcel: noordwestelijke stroming leidt tot hoge setup en in die condities doorgaans ook instabiele situaties, een serie van troggen is daarbij niet uit te sluiten
 - Marcel: Als het lagedrukgebied dat de storm veroorzaakt dicht genoeg bij Nederland ligt kan er trogvorming optreden t.g.v. de grotere onstabiele nabij het lagedrukgebied (voor de beeldvorming, zie voorbeeld hieronder). Een trog ontstaat als buien zich ordenen tot een lijnverstoring
 - Marcel: de invloed van troggen kan in een koppeling van een meteo-hydro simulatie worden doorgerekend, bijvoorbeeld obv een signaal van een gemeten drukfluctuatie (of obv statistiek). Jacco: die zouden dan opgeschaald kunnen worden. Martijn: in het plan uit 2007 werd al gesproken over theoretische wind/druk-signalen die met verschillende treksnelheden, sterktes en ruimteschalen als forcering in een hydrodynamisch model toegepast zouden kunnen worden. Dat zouden we ook in werkpakket O2 aan kunnen houden.
 - Martijn: er zit mogelijk veel demping in ondiepe gebieden zoals het IJsselmeer. Joost: in een berekening zou een initiële scheefstand losgelaten kunnen worden en dan kan de uitslingering worden doorgerekend. Als er veel demping is dan zal er niet echt sprake zijn van uitslingeren en dempt de beweging meteen weg. Dan zal er nooit sprake zijn van resonantie/opslinging. Martijn: in een verkenning voor het Markermeer (2015) leek dit het geval te zijn, maar er zijn ook andere situaties waargenomen waarin dat wel het geval was. Bas: in de data-analyse

onder Taak 3 blijkt er op alle beschouwde locaties (IJsselmeer, Markermeer, Zwarte Meer, Randmeren) sprake te zijn van fluctuaties, alleen zijn de tijdschalen en de amplituden sterk verschillend.

- Marcel/Jacco: de storm van 5 december 2013, of die in januari 2014 zijn mogelijk interessant om nader te analyseren als onderdeel van deze taak (**Bas zal dit meenemen bij het selecteren van episoden**).
- Bas: de data die voor het IJsselmeer etc wordt geanalyseerd is januari 2006 – december 2015. Het is het handigste om binnen dat tijdsinterval seiche-episoden te kiezen.
- Joost: Het onderzoek naar bovengrenzen van opwekkingsmechanismen is lastig. Je kunt wel aantonen dat bepaalde weerspatronen (met een seiche opwekking) kunnen voorkomen, maar het is lastiger om aan te tonen dat deze weerspatronen niet kunnen voorkomen. Als je er niet in slaagt om een bepaald weerspatroon te simuleren dan mag je nog niet concluderen dat het niet kan optreden.

Notulen overleg seiches KPP-VOW 2016, Taak 2, beperking in opwekking en response seiches – Sessie 2

Datum: 16 juni 2016, 09:30-11:00 uur

Aanwezig: Marcel van Schaik, Sander Tijm (KNMI), Laura Muntjewerf (stagiaire), Martijn de Jong (Deltares, notulen)

Doel van deze taak: Onderzoeken of en welke bovengrenzen er bestaan van seiche-opwekkingsmechanismen. De toeslagen voor seiches en buistoten op de hydraulische randvoorwaarden worden in het huidige WBI bepaald aan de hand van een statistische analyse. Daarin wordt aangenomen dat er geen fysische bovengrenzen van de opwekkingsmechanismen zijn (wel aan de response-kant, omdat het numerieke havenresponsemodel PHAROS rekening houdt met het onderlopen van kades). Als aangetoond kan worden dat de meteorologische opwekkingsmechanismen inderdaad begrensd zijn dan zou dat kunnen leiden tot bijstelling van de toeslagen.

In een eerste bespreking (16 februari 2016) is vooral gesproken over meteorologische en hydrodynamische processen en eigenschappen daarvan die zouden kunnen leiden tot een maximum aan de opwekkingskracht voor seiches. In dit tweede overleg is vooral ingegaan op de numerieke modellering van de opwekking van seiches en hoe numerieke berekeningen mogelijk bij zouden kunnen dragen aan het onderbouwen van een conclusie over een (mogelijke) bovengrens aan de sterkte van seiches tijdens extreme stormen.

Puntsgewijze samenvatting van de bespreking (acties in bold):

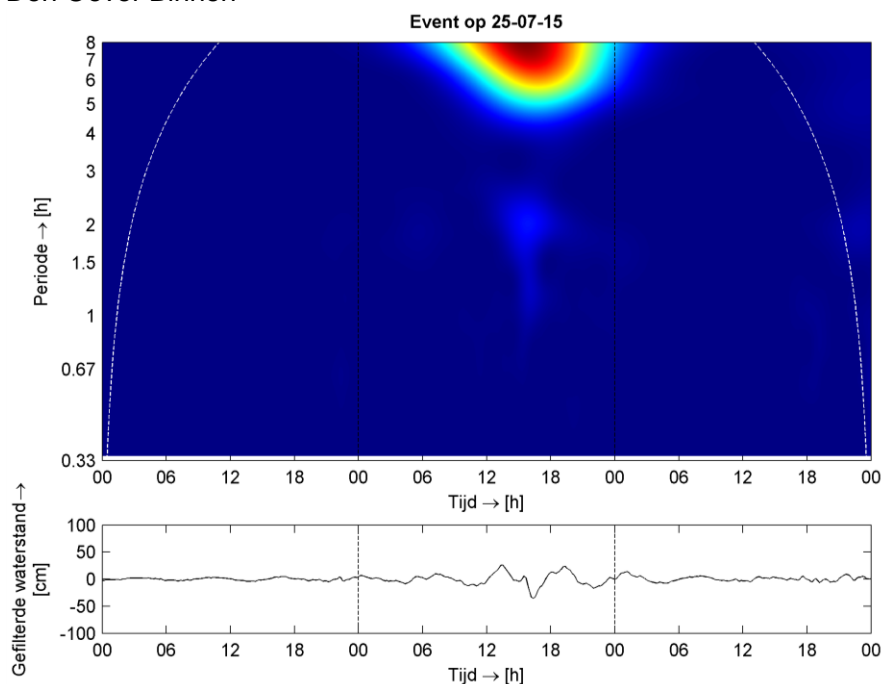
- Korte inleiding door MdJ: in het kader van een groot project voor RWS, vorig jaar een verkenning voor grote watergebieden in heel Nederland, nu 3 deeltaken: 1) invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen, 2) begrenzing in opwekking seiches en 3) beknopte analyse van waterstandsmetingen van het IJsselmeer en omringende meren.
- MdJ: doel van het huidige overleg is te komen tot een stappenplan van de inzet van numerieke simulatie van de opwekking van seiches om de (mogelijke) begrenzing in de opwekking van seiches te analyseren.
- ST: van belang voor het numeriek simuleren van de opwekking is vooral om goed te weten welke fenomenen beschreven moeten worden met een model als Harmonie. Grootschalige effecten zitten er doorgaans beter in dan hele kleinschalige effecten.
- MvS: we zouden kunnen starten met de condities die overeenkomen met maximale response. ST: mogelijk is het beter om met een realistische (opgetreden) situatie met seiches te starten. Er zouden dan nieuwe sommen gedraaid kunnen worden met Harmonie van die situatie (eventueel met verhoogde resolutie in tijd en ruimte). ST/MdJ: eerst reproduceren, en dus zijn de relevante fenomenen inderdaad beschreven, en dan variëren. Bijvoorbeeld grotere treksnelheid. MvS: principe-sommen in een hydrodynamisch model met theoretische verstoringen zijn waarschijnlijk niet nuttig, zeker ook omdat soortgelijke analyses in het verleden al zijn gedaan en omdat die verstoringen niet op die manier in de atmosfeer voorkomen. MdJ: akkoord.
- MvS: op dit moment is Deepak Vatvani (Deltares) bezig met hydrodynamische response-berekeningen van het IJsselmeer nav data die Hans de Vries (KNMI) heeft aangeleverd. **MdJ zal de status van dat werk nagaan.**
- ST: we zouden in de nieuwe sommen in Harmonie uitvoer kunnen aanmaken per minuut, in plaats van de normale (operationele) uitvoer per uur. Binnenkort gaat de operationele uitvoer naar eens per kwartier. Houd er rekening mee dat ook het overtrekken van de verstoringen een invloed heeft en dat de standaard Nyquist-regel die zegt dat de minimale opgeloste periode $2\Delta t$ is hier niet 1-op-1 opgaat.
- MvS: mogelijk dat de 'Sinterklaasstorm' een interessante case kan zijn. MdJ: die situatie is inderdaad in de data-analyse uit Taak 3 als een opvallende situatie geïdentificeerd.

- MdJ: er is een website van RWS met een selectie van opvallende storm-situaties met seiches, inclusief ook meteorologische beschrijving:
http://waterberichtgeving.rws.nl/nl/projecten_seiches.htm
Daar zouden we ook situaties uit kunnen selecteren. In eerdere studies voor de HR hebben we daar ook situaties uit geselecteerd.
- ST: wanneer treedt het seiche op tov de stormpiek? Een koufront zou een seiche kunnen veroorzaken en de stroming in het lagedrukgebied erachter wekt pas de opzet op. MdJ: in het verleden heb ik de timing van de seiches tov de stormopzet wel eens bekeken maar er was erg veel spreiding in de data. Er leek (inderdaad) een lichte voorkeur voor vroeg in de storm te zijn.
- ST: de buiencellen (convectiecellen) zouden we eventueel kunnen schalen. Treksnelheid van de systemen is gelinkt aan het 700 hPa niveau. De cellen zelf worden nog niet opgelost in Harmonie, maar mogelijk kunnen we wel op basis van meta-data afleiden in welke condities ze op zullen treden. MdJ: maar hoe zouden we dat dan kunnen uitbreiden naar een analyse van extreme situaties en de mogelijke beperking in de opwekking van seiches?
- MvS: samenvattend zou een stappenplan kunnen zijn:
 - Selecteer 3-4 typische stormsituaties met seiches (nog vast te stellen of focus is op Noordzee en kusthavens of op het IJsselmeer)
 - Doorrekenen van die situaties in Harmonie (met hoge resolutie) + wegschrijven uitvoer met kort tijdsinterval (1 minuut?)
 - Het maken van hydrodynamische berekeningen aangestuurd met de meteorologische forcering (wind + atmosferische druk)
 - Analyse van de seiche-response en vergelijking met gemeten waarden.
 - Daarna variatie in treksnelheid en mogelijke andere parameters om mogelijke beperkingen in opwekking te analyseren.
- LM: Bovenstaand stappenplan is vergelijkbaar met de aanpak binnen mijn stage: seiche-episode in IJsselmeer (waterstandsmetingen Lemmer) classificeren en reproduceren het Harmonie en waterstandsmodel. Focus hierbij is de gevoeligheid van de te reproduceren waterstanden voor de tijdsresolutie van de windveldeninvoer (experimenten opzet: 1min – 10 min – 30 min - zoals nu operationeel, 60 min). Uitkomst kan wellicht in de lopende fase van het onderzoek van Deltares (+ KNMI) al relevant zijn. **LM neemt contact op met Marcel Bottema wat voor type seiche-episode interessant is voor dit project, wellicht valt dat samen met wat WMCM meren wil binnen stage.**
- MdJ: maar hoe de variaties vast te stellen die representatief zijn voor extreme condities zoals die relevant zijn voor de Hydraulische Randvoorwaarden voor primaire waterkeringen? MvS: bovendien weet je niet of de fenomenen tijdens de waargenomen stormen een complete beschrijving geven van de situatie tijdens extreme stormen. Mogelijk dat er in die situaties andere processen/fenomenen een rol gaan spelen. Op dit moment wordt er voor de HR (WBI) uitgegaan van een representatief verloop in de windsnelheid. **MdJ vraagt dat op bij collega's.** Die waarden zouden mogelijk leidend kunnen zijn bij het maken van variaties in de door te rekenen weersystemen.
- LM: is het nog van belang om re-analyses te gebruiken of voorspellingen. MdJ: het gaat in deze taak om extreme condities en niet over voorspellen, maar dat is wel onderdeel van andere taken uit het seiche-werkplan van vorig jaar. LM: is het een idee om het per type te simuleren. MdJ: dat zou in de selectie van de storm-situaties meegenomen kunnen worden.
- **MdJ maakt notulen en stuurt die rond.** MdJ zal de uitkomst van het overleg opnemen in de rapportage aan RWS. Mogelijk dat er volgend jaar in het kader van dit project ruimte zal zijn om deze berekeningen en analyses uit te gaan voeren.

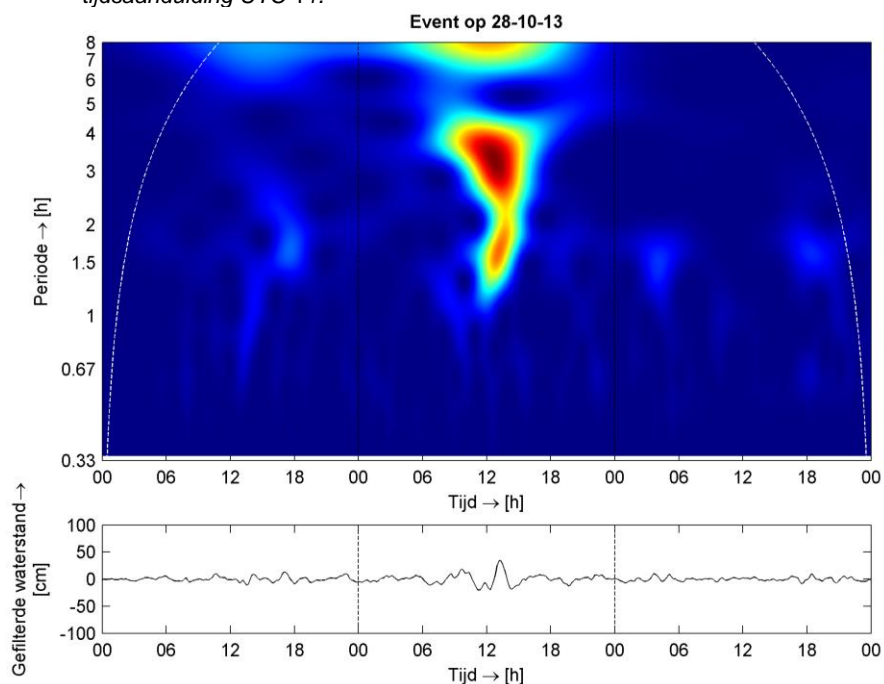
B Resultaten wavelet-analyse per meetlocatie

B.1 IJsselmeer

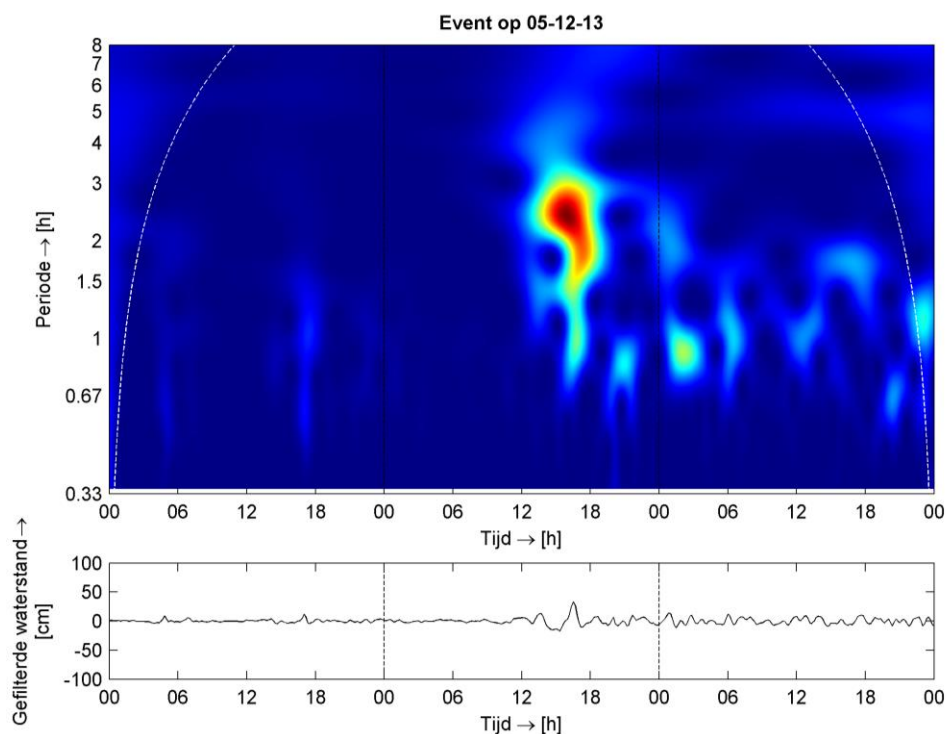
B.1.1 Den Oever Binnen



Figuur B.1 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Den Oever Binnen, amplitude = 0.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.

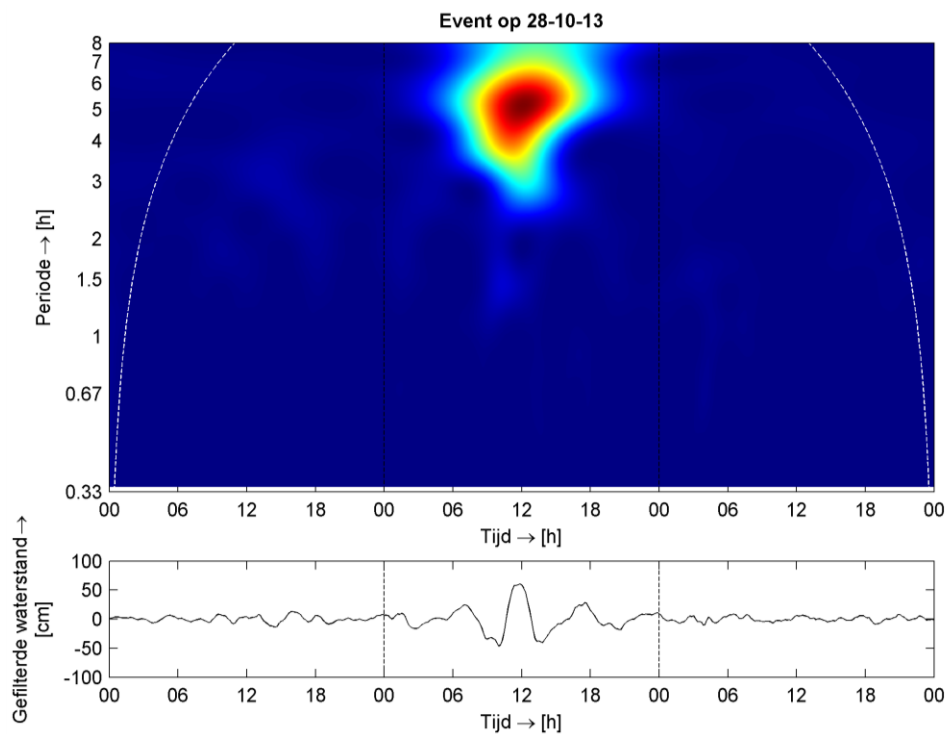


Figuur B.2 Tweede hoogste geregistreeerde seiche-episode Den Oever Binnen, amplitude = 0.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.

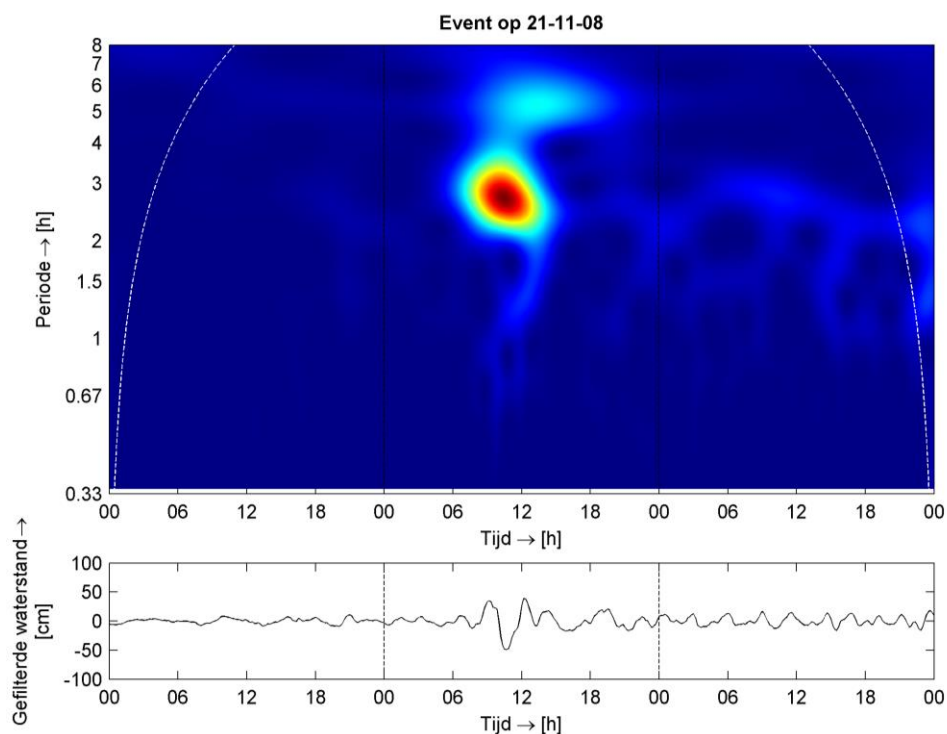


Figuur B.3 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Den Oever Binnen, amplitude = 0.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.

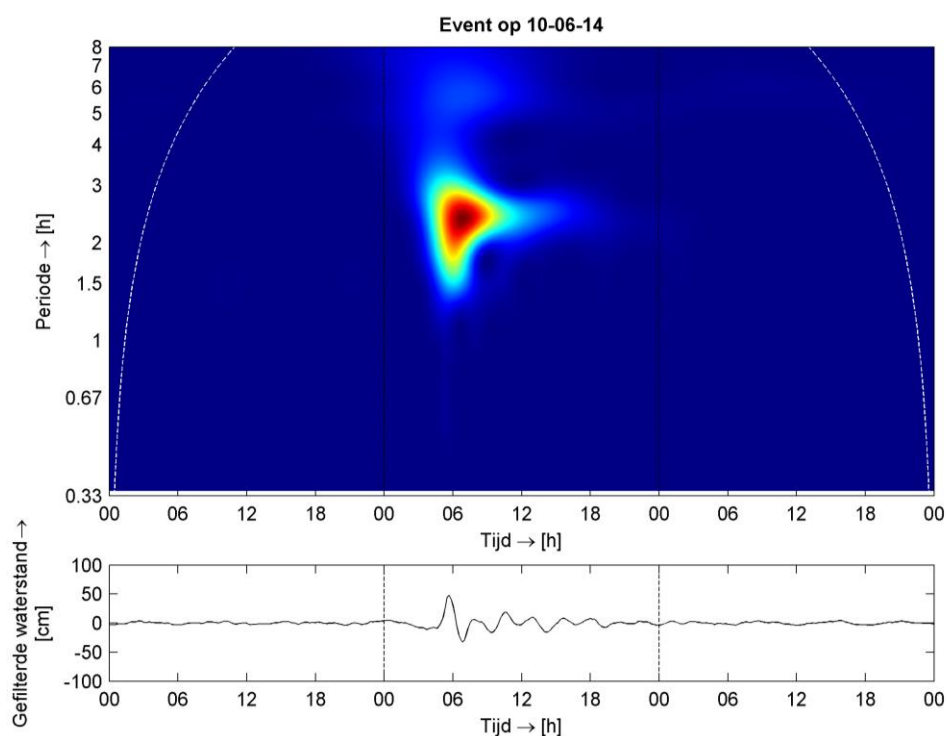
B.1.2 Kornwerderzand Binnen



Figuur B.4 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Kornwerderzand Binnen, amplitude = 0.6 m, tijdsaanduiding UTC +1.

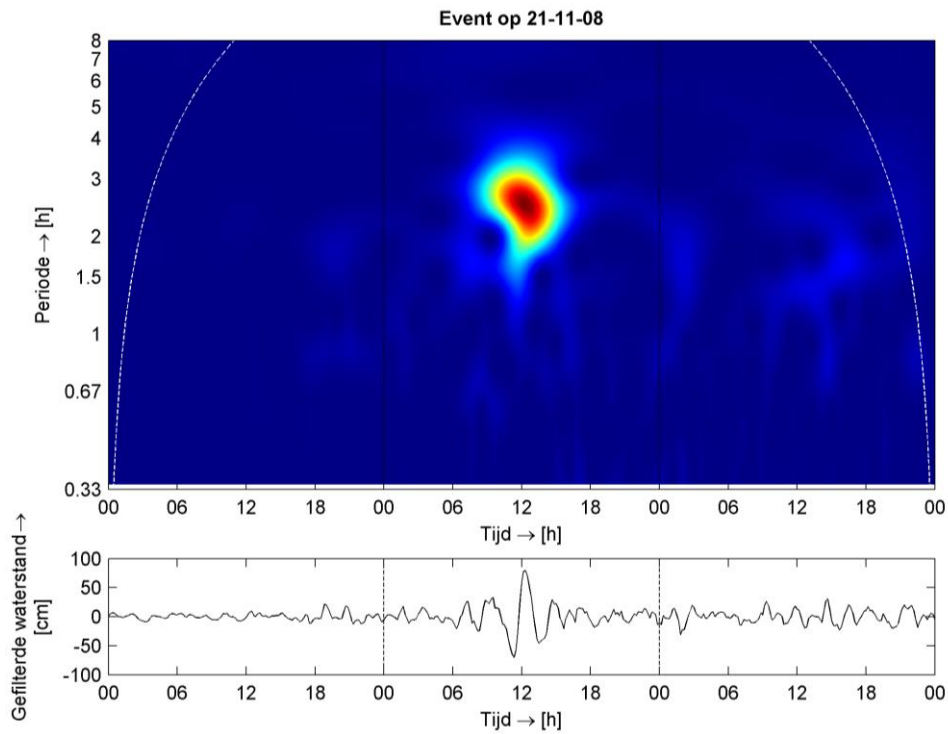


Figuur B.5 Tweede hoogste geregisteerde seiche-episode Kornwerderzand Binnen, amplitude = 0.5 m, tijdsaanduiding UTC +1.

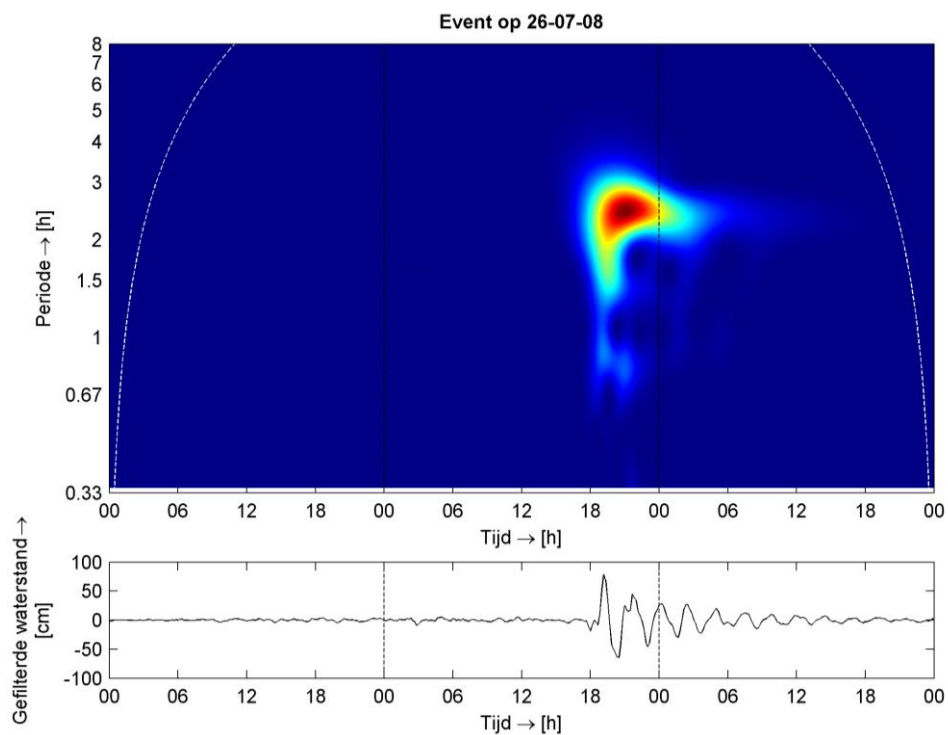


Figuur B.6 Derde hoogste geregisteerde seiche-episode Kornwerderzand Binnen, amplitude = 0.5 m, tijdsaanduiding UTC +1.

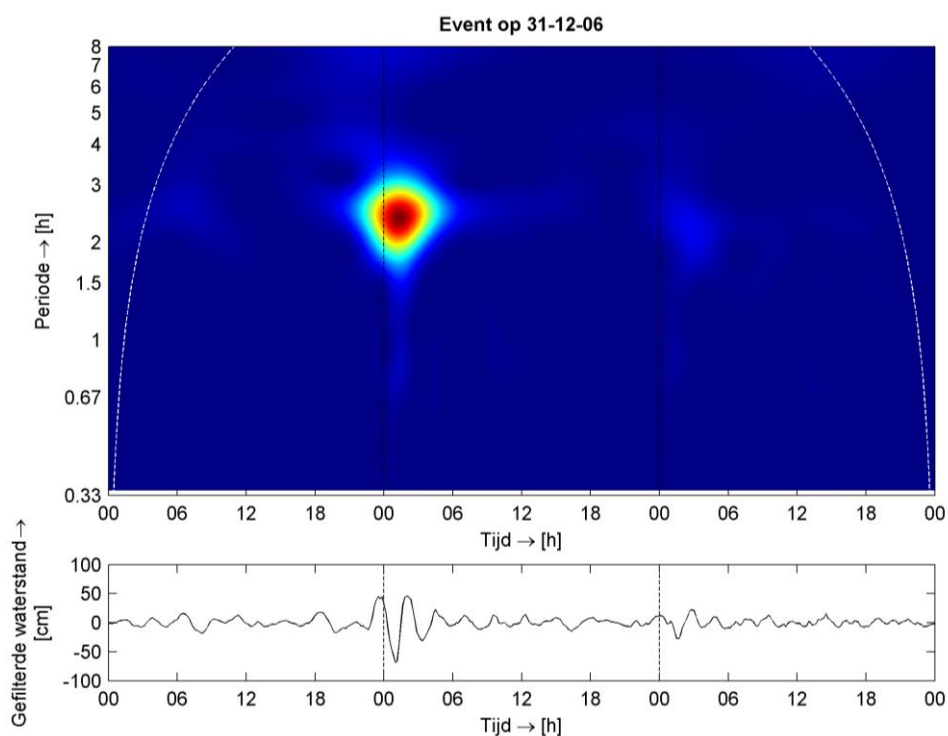
B.1.3 Lemmer



Figuur B.7 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Lemmer, amplitude = 0.8 m, tijdsaanduiding UTC +1.

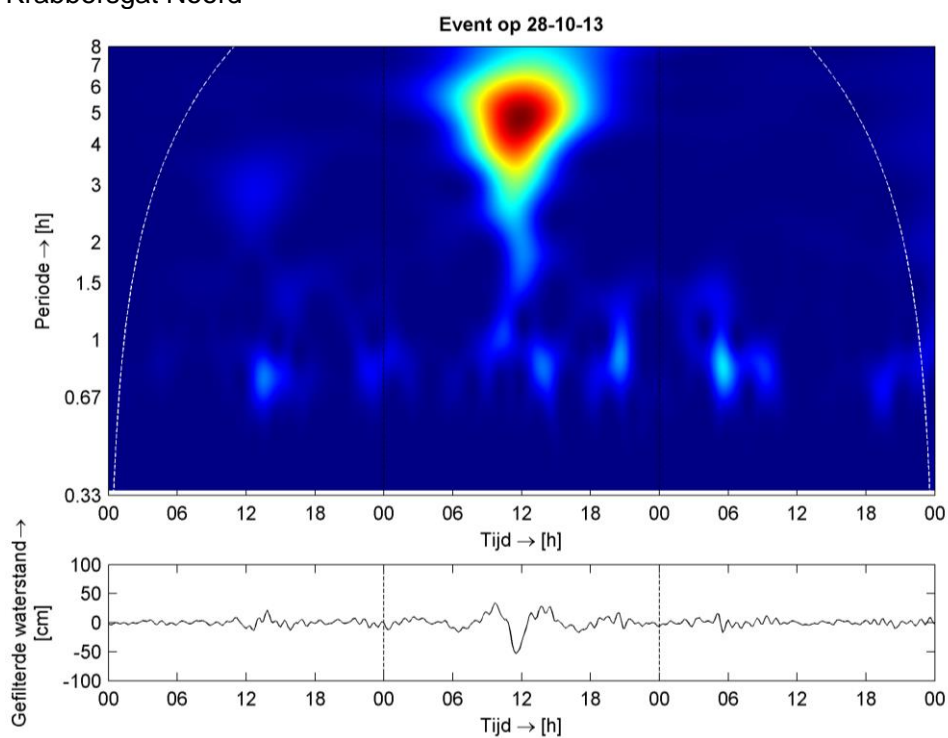


Figuur B.8 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Lemmer, amplitude = 0.8 m, tijdsaanduiding UTC +1.

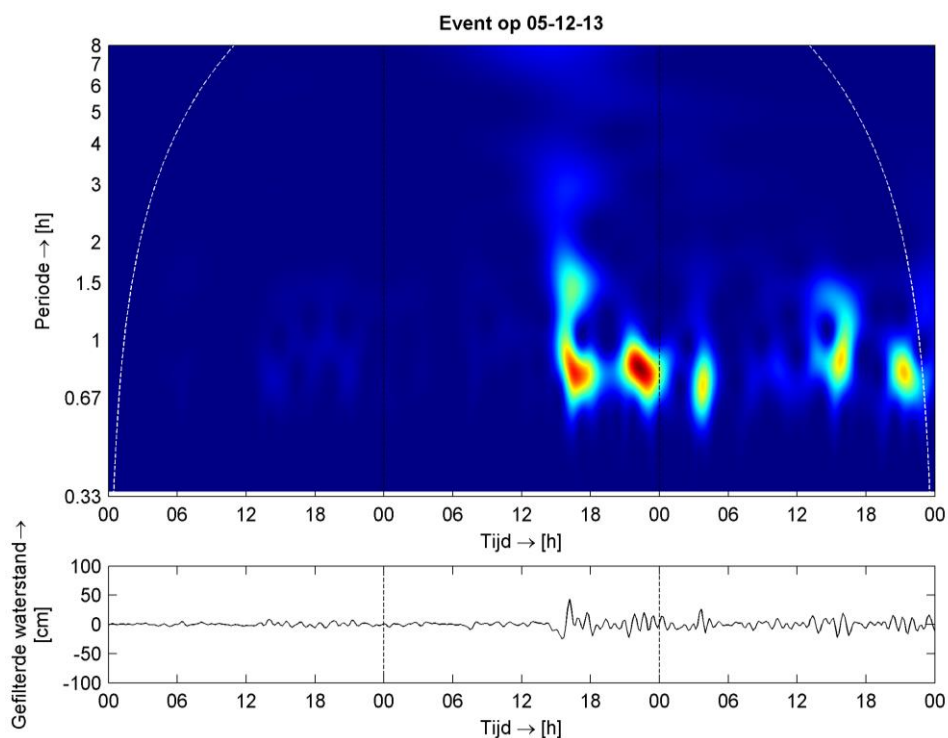


Figuur B.9 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Lemmer, amplitude = 0.7 m, tijdsaanduiding UTC +1.

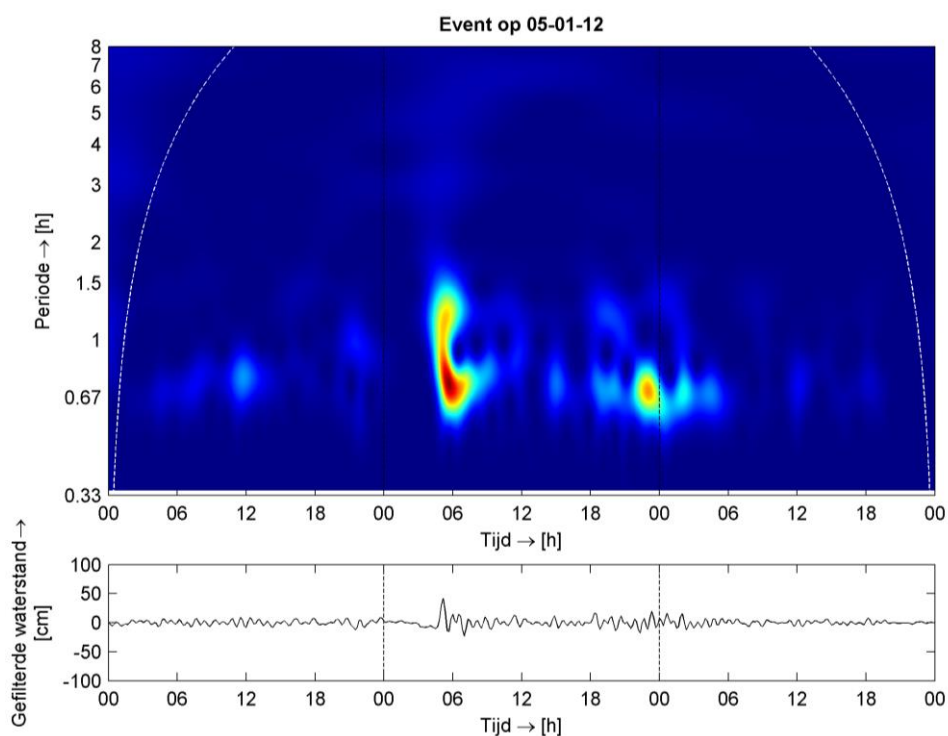
B.1.4 Krabbersgat Noord



Figuur B.10 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Krabbersgat Noord, amplitude = 0.55 m, tijdsaanduiding UTC +1.

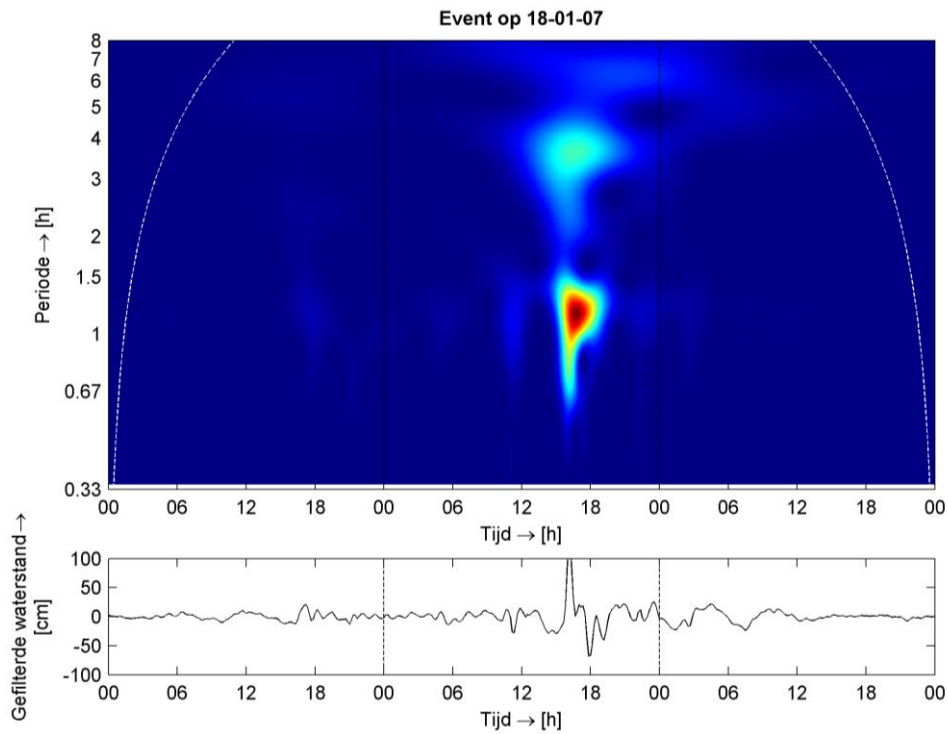


Figuur B.11 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Krabbersgat Noord, amplitude = 0.45 m, tijdsaanduiding UTC +1.

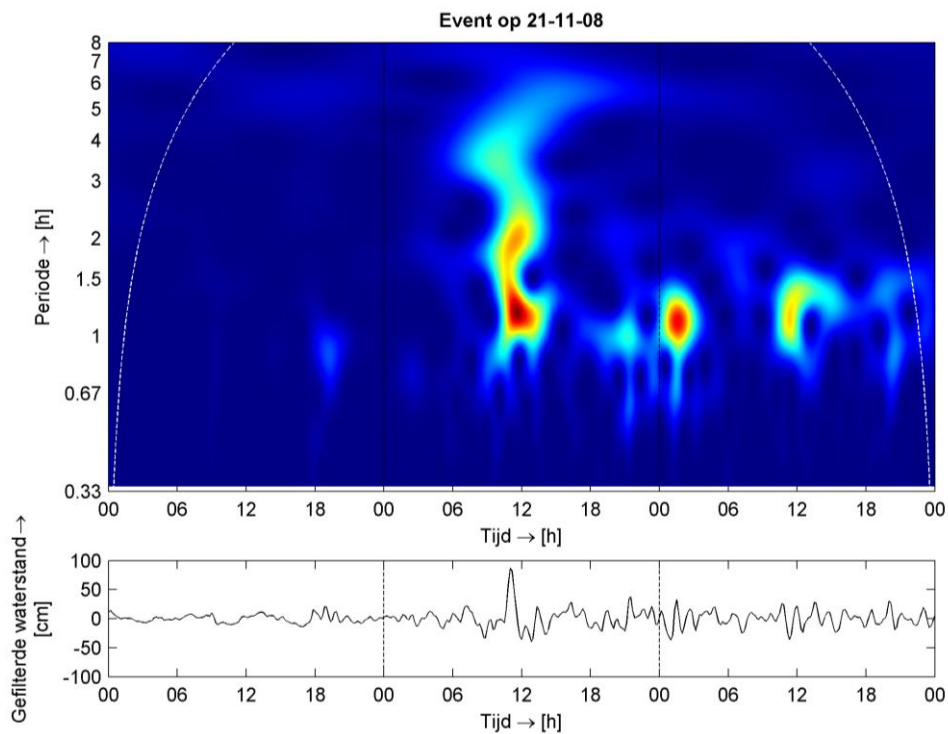


Figuur B.12 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Krabbersgat Noord, amplitude = 0.4 m, tijdsaanduiding UTC +1.

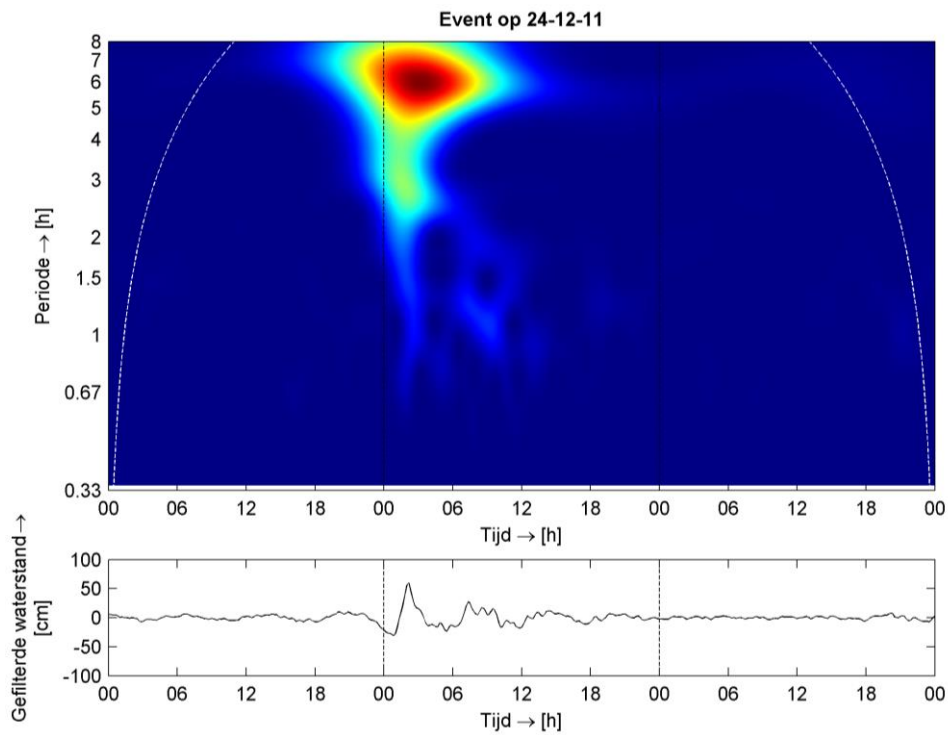
B.1.5 Houtrib Noord



Figuur B.13 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Houtrib Noord, amplitude = 1.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.



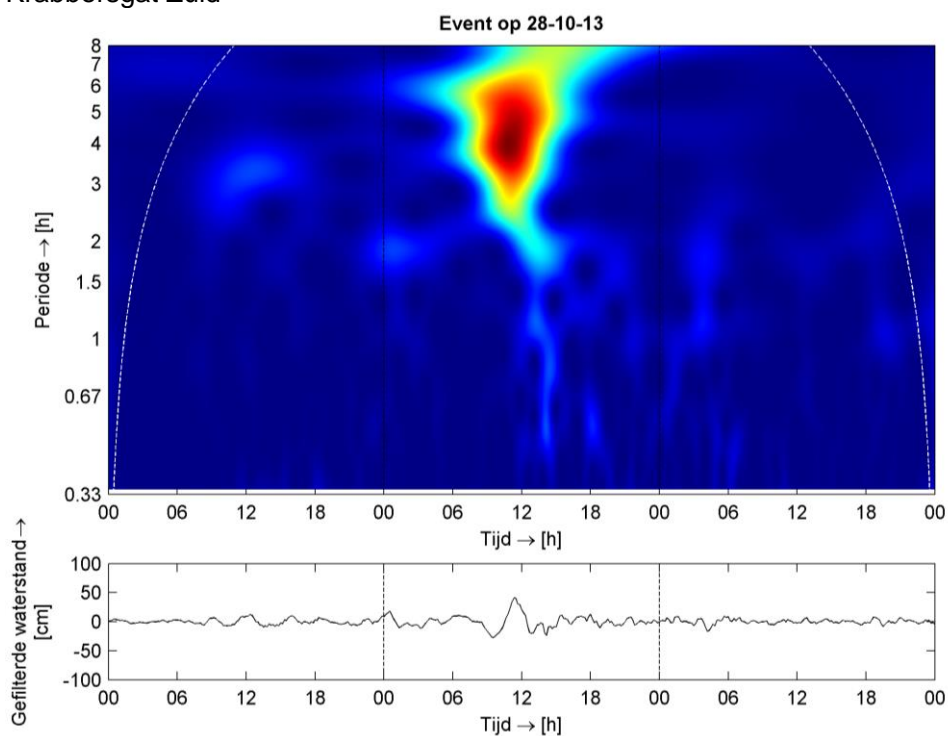
Figuur B.14 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Houtrib Noord, amplitude = 0.85 m, tijdsaanduiding UTC +1.



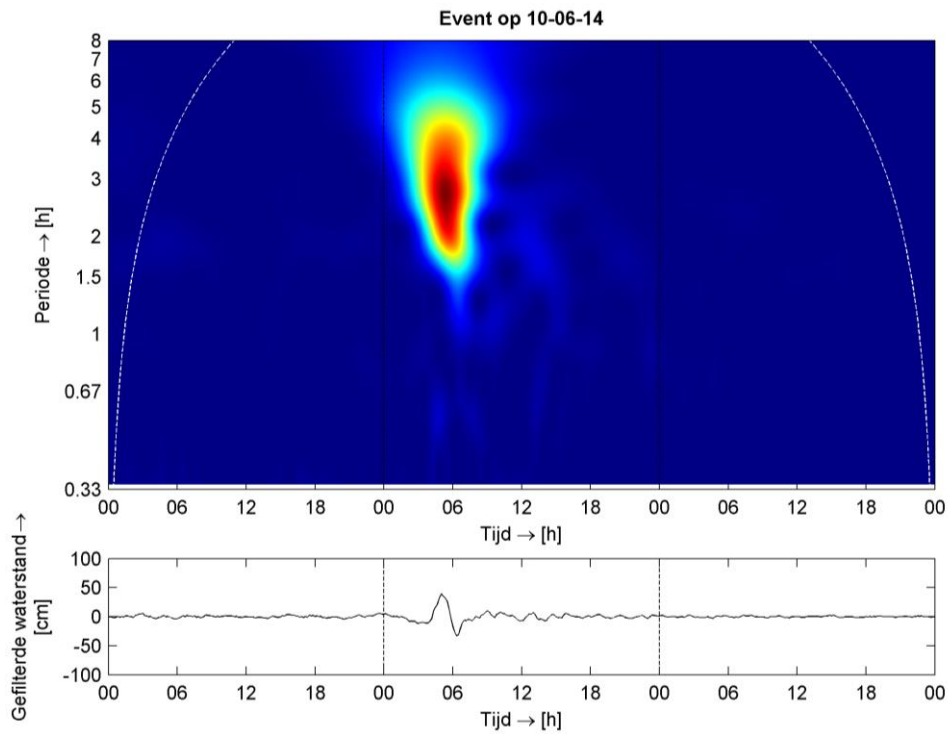
Figuur B.15 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Houtrib Noord, amplitude = 0.6 m, tijdsaanduiding UTC +1.

B.2 Markermeer

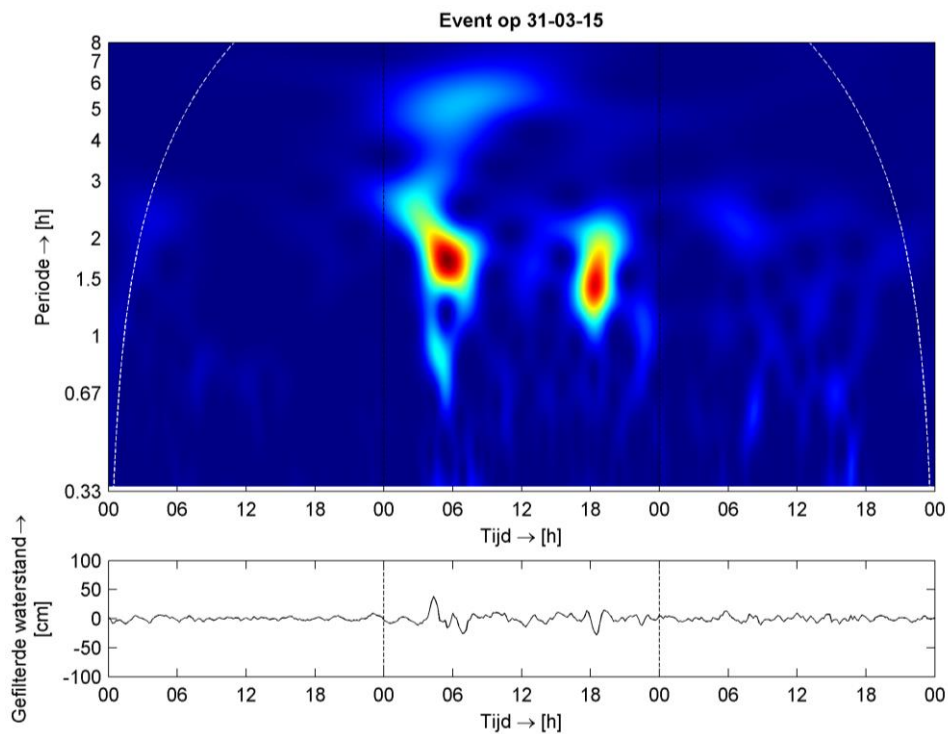
B.2.1 Krabbersgat Zuid



Figuur B.16 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Krabbersgat Zuid, amplitude = 0.4 m, tijdsaanduiding UTC +1.

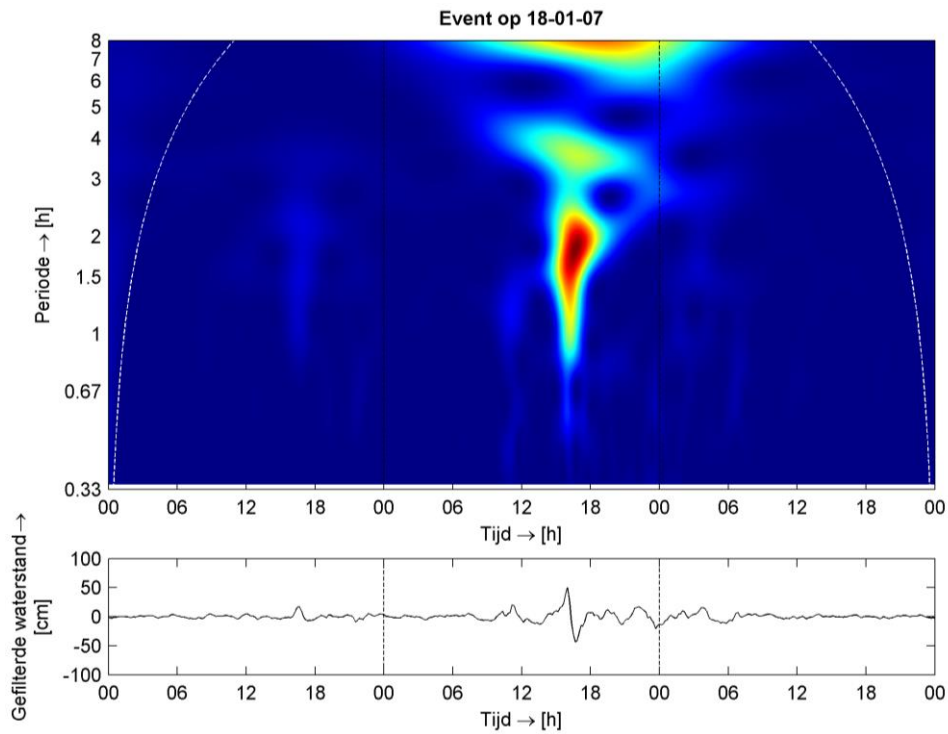


Figuur B.17 Tweede hoogste geregisteerde seiche-episode Krabbersgat Zuid, amplitude = 0.4 m, tijdsaanduiding UTC +1.

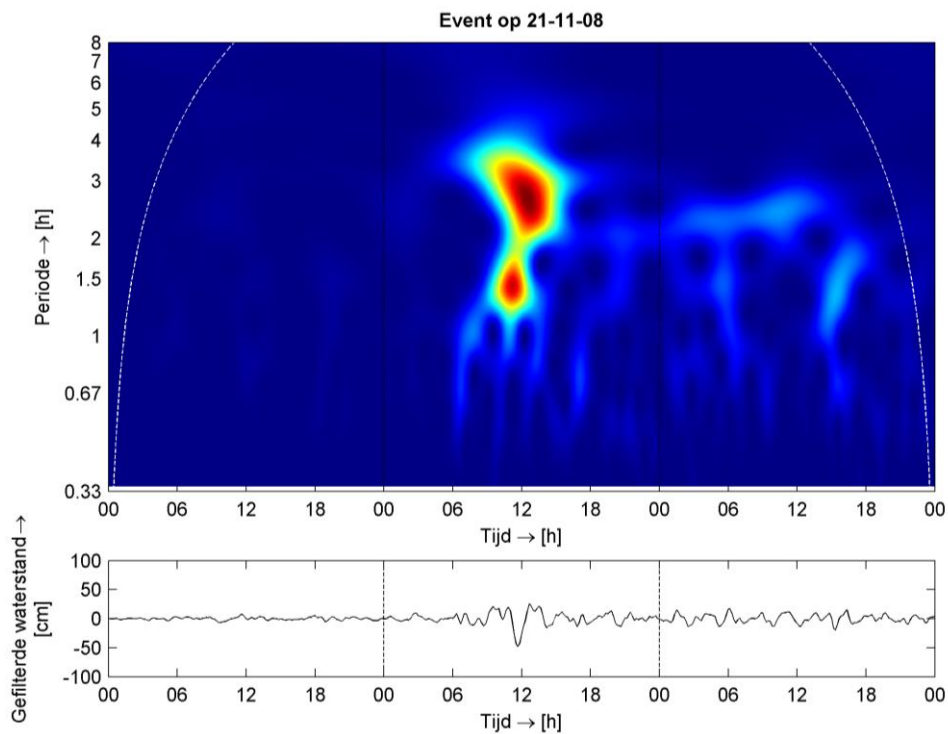


Figuur B.18 Derde hoogste geregisteerde seiche-episode Krabbersgat Zuid, amplitude = 0.4 m, tijdsaanduiding UTC +1.

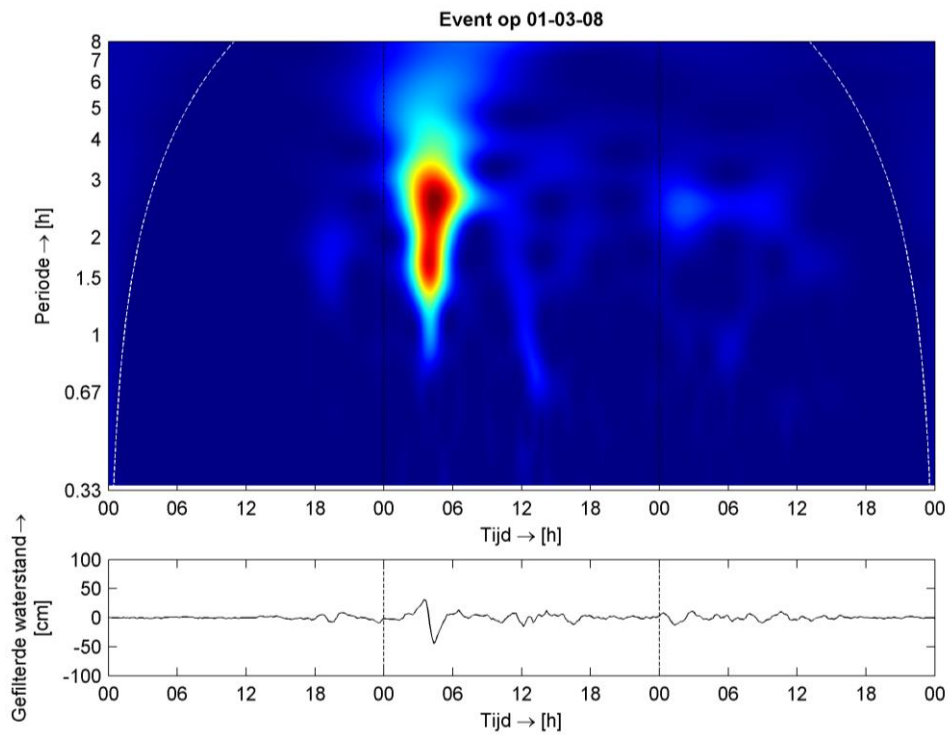
B.2.2 Houtrib Zuid



Figuur B.19 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Houtrib Zuid, amplitude = 0.5 m, tijdsaanduiding UTC +1.

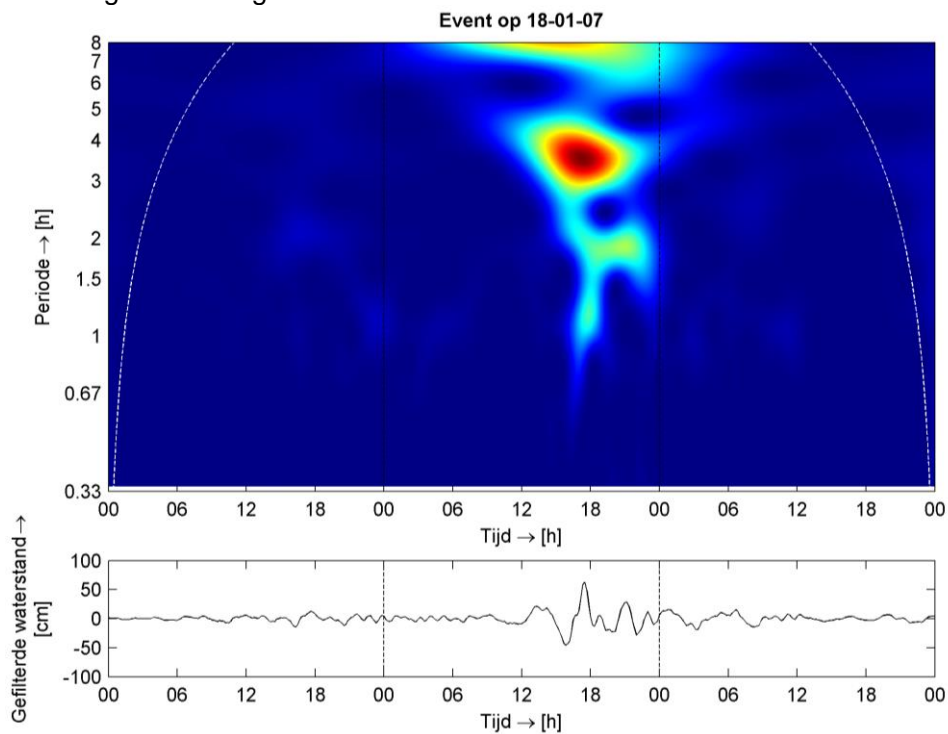


Figuur B.20 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Houtrib Zuid, amplitude = 0.5 m, tijdsaanduiding UTC +1.

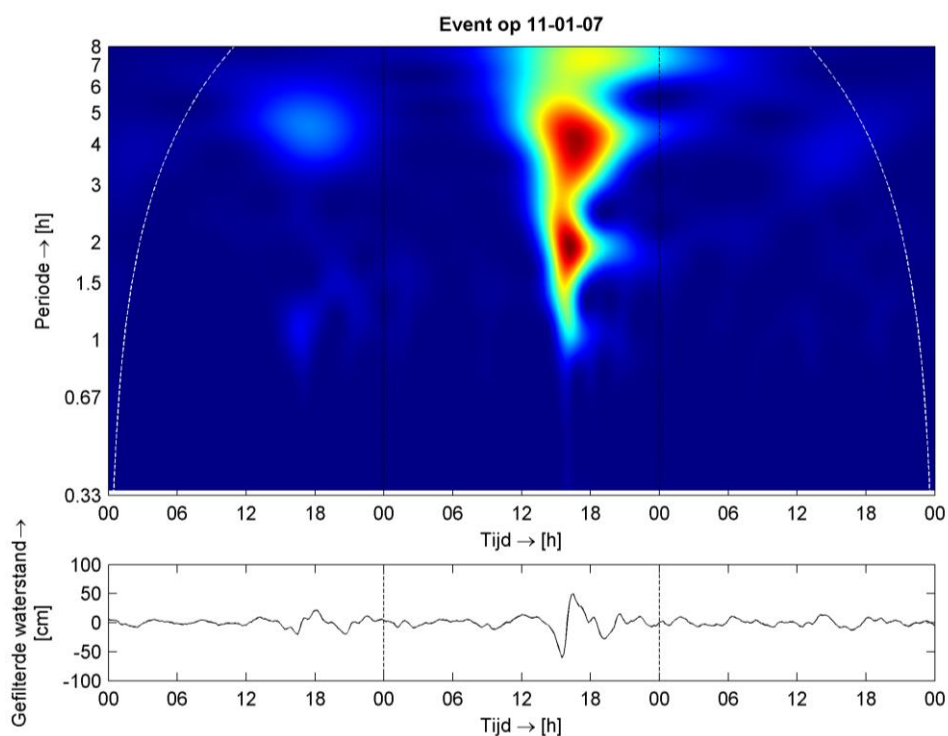


Figuur B.21 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Houtrib Zuid, amplitude = 0.45 m, tijdsaanduiding UTC +1.

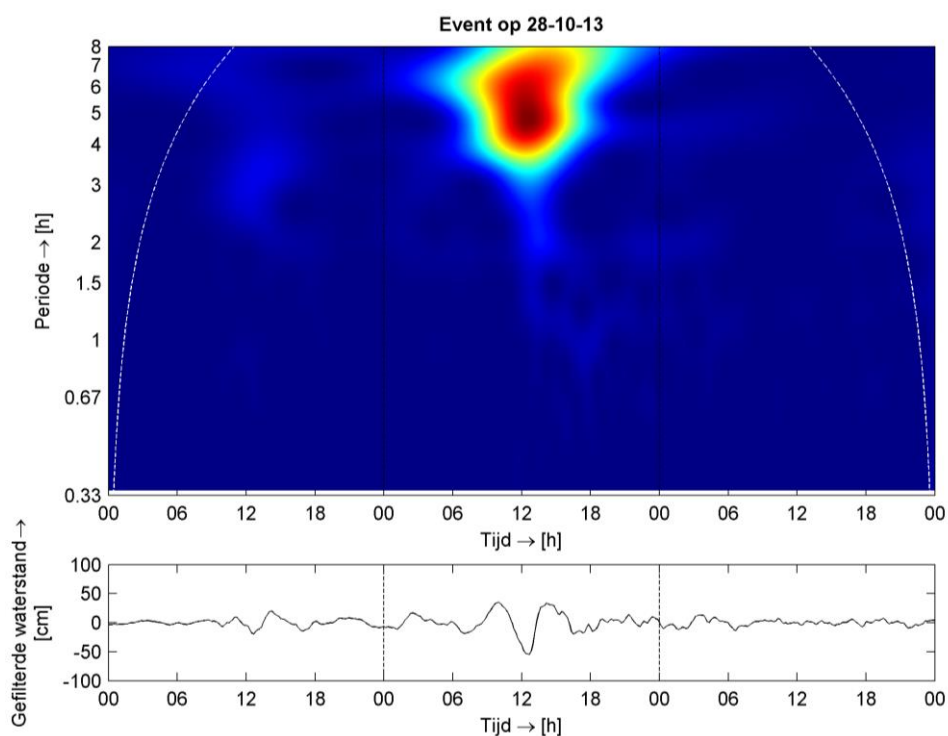
B.2.3 Schellingwouderbrug



Figuur B.22 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Schellingwouderbrug, amplitude = 0.65 m, tijdsaanduiding UTC +1.



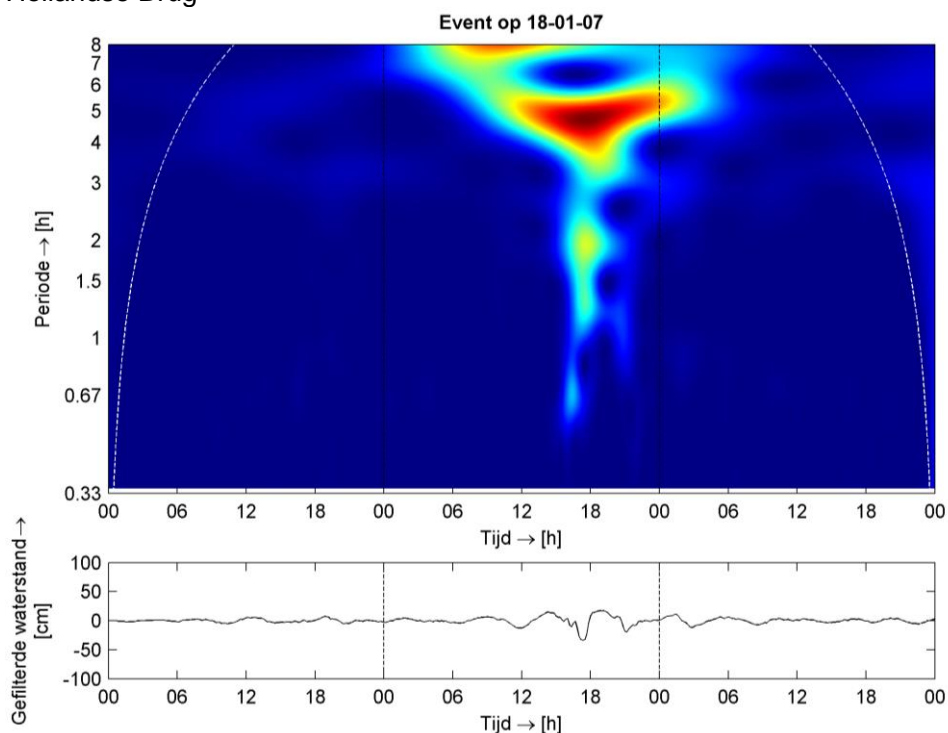
Figuur B.23 Tweede hoogste geregistreeerde seiche-episode Schellingwouderbrug, amplitude = 0.60 m, tijdsaanduiding UTC +1.



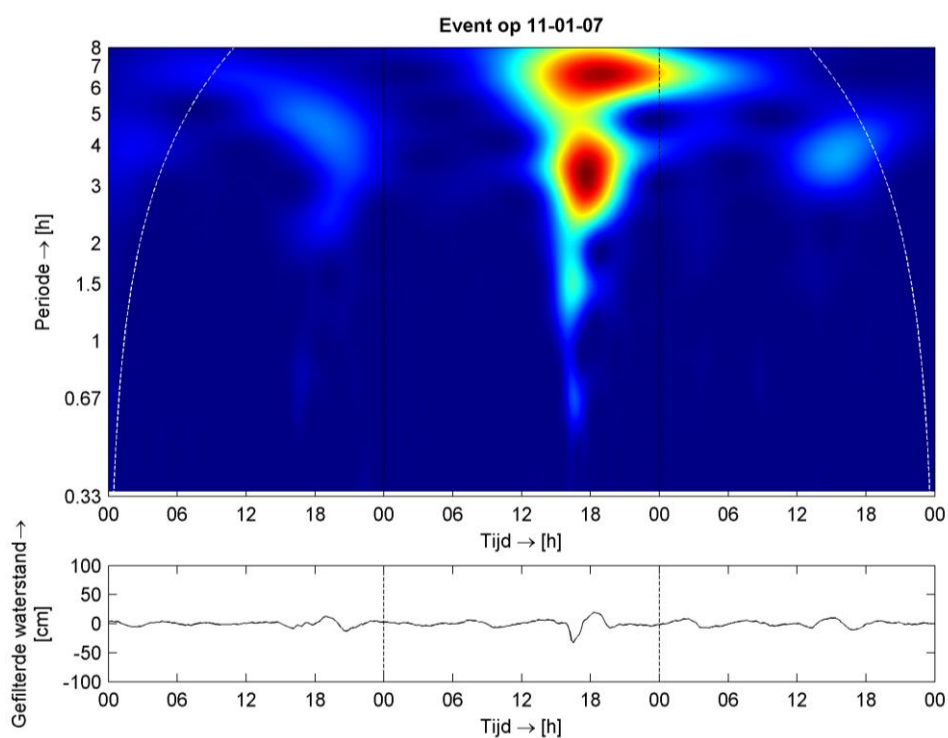
Figuur B.24 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Schellingwouderbrug, amplitude = 0.55 m, tijdsaanduiding UTC +1.

B.3 Eem en Gooimeer

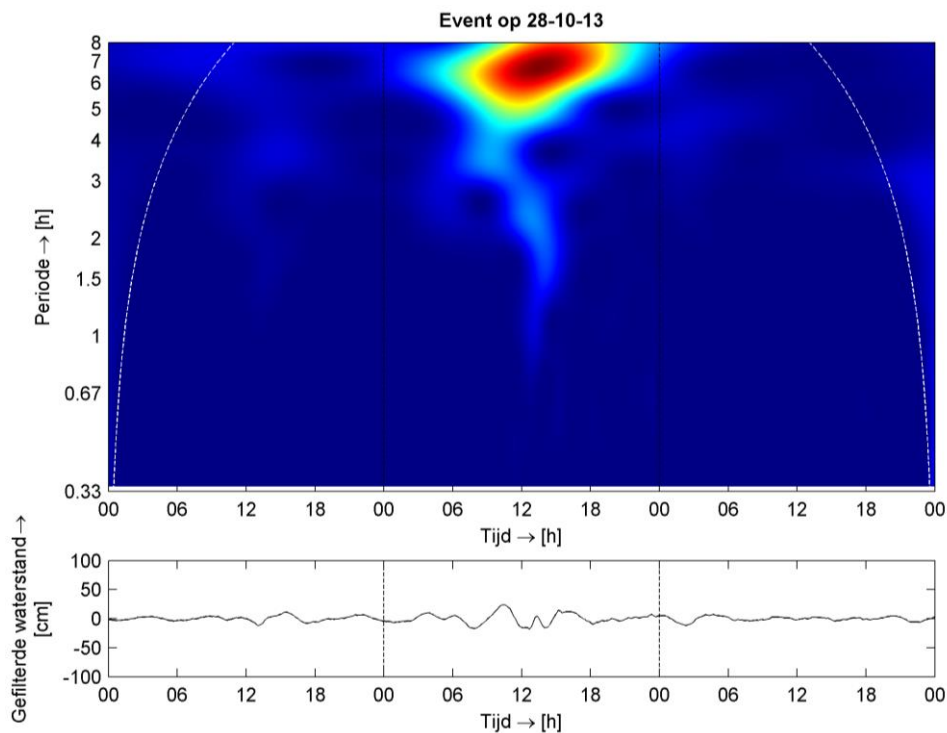
B.3.1 Hollandse Brug



Figuur B.25 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Hollandse Brug, amplitude = 0.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.

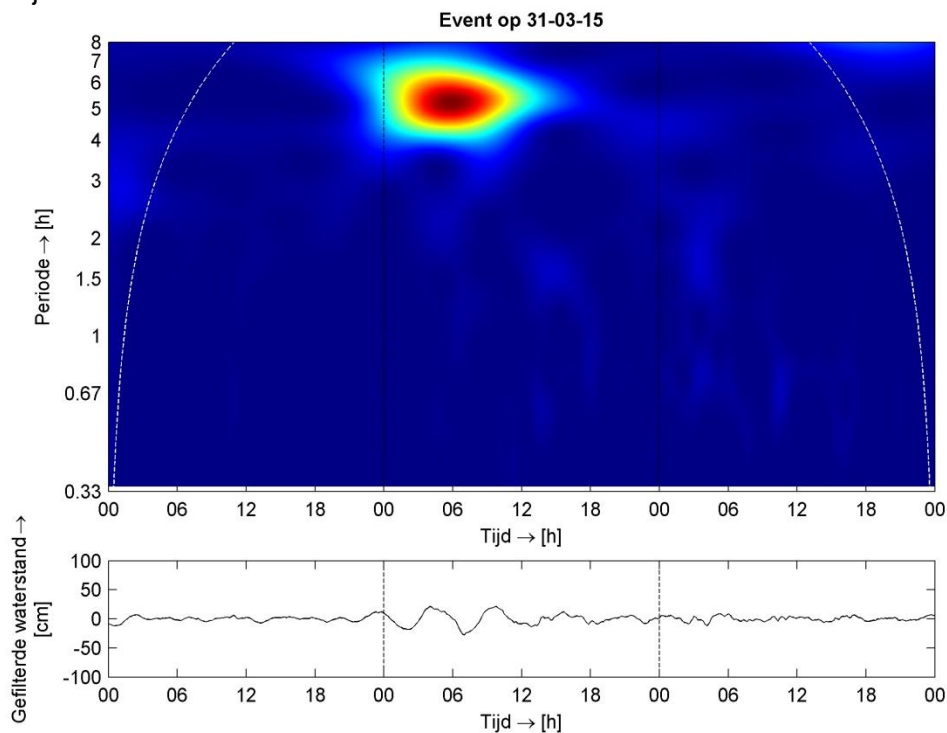


Figuur B.26 Tweede hoogste geregistreeerde seiche-episode Hollandse Brug, amplitude = 0.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.

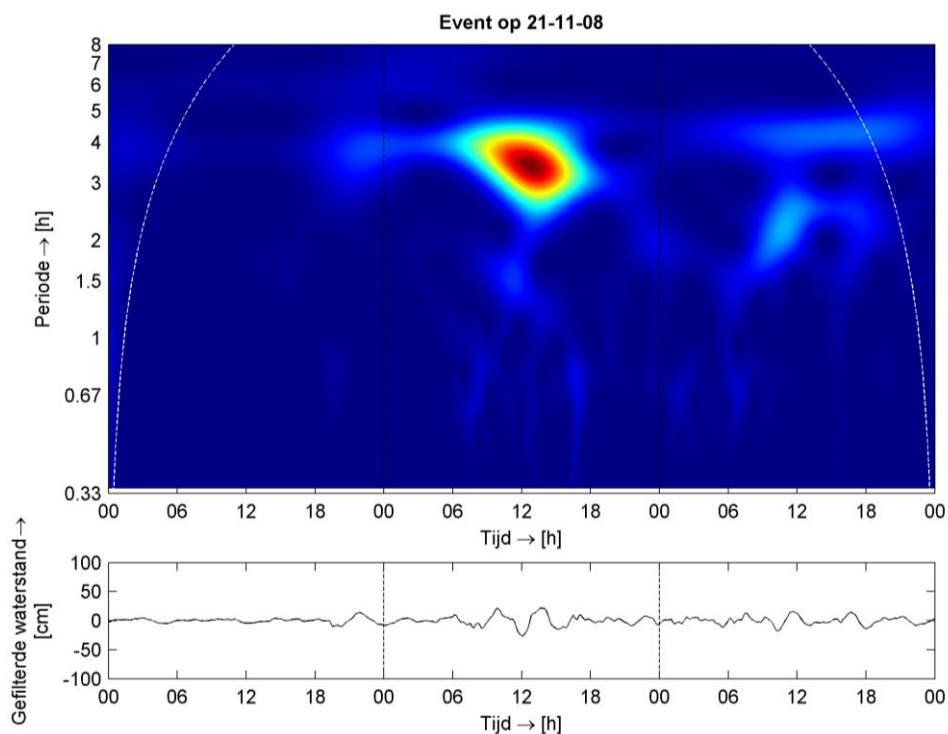


Figuur B.27 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Hollandse Brug, amplitude = 0.25 m, tijdsaanduiding UTC +1.

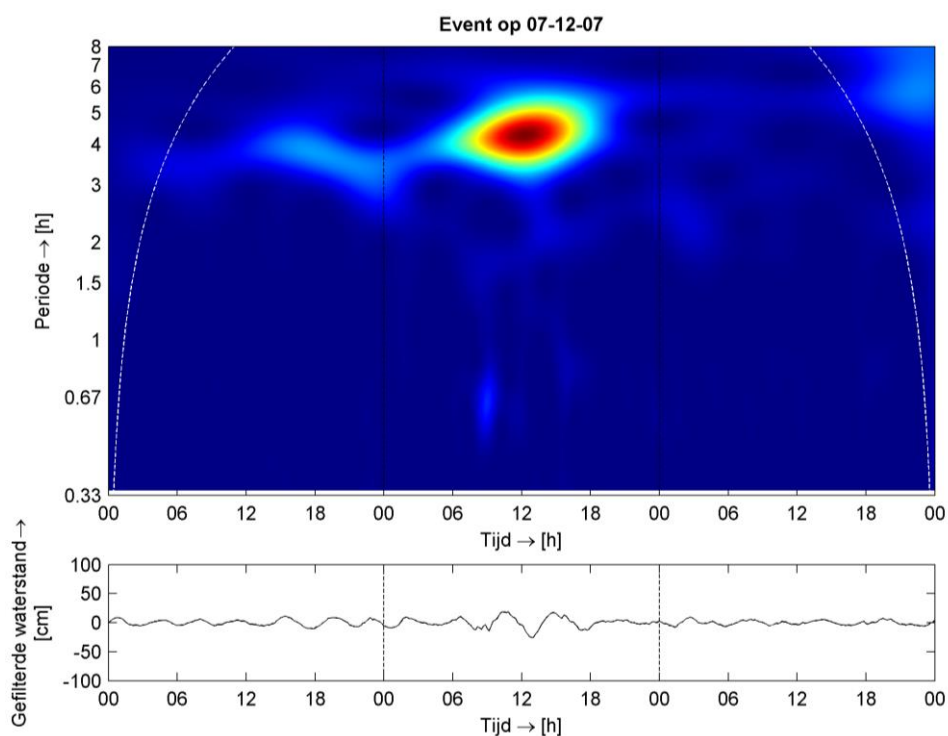
B.3.2 Nijkerk West



Figuur B.28 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Nijkerk West, amplitude = 0.30 m, tijdsaanduiding UTC +1.



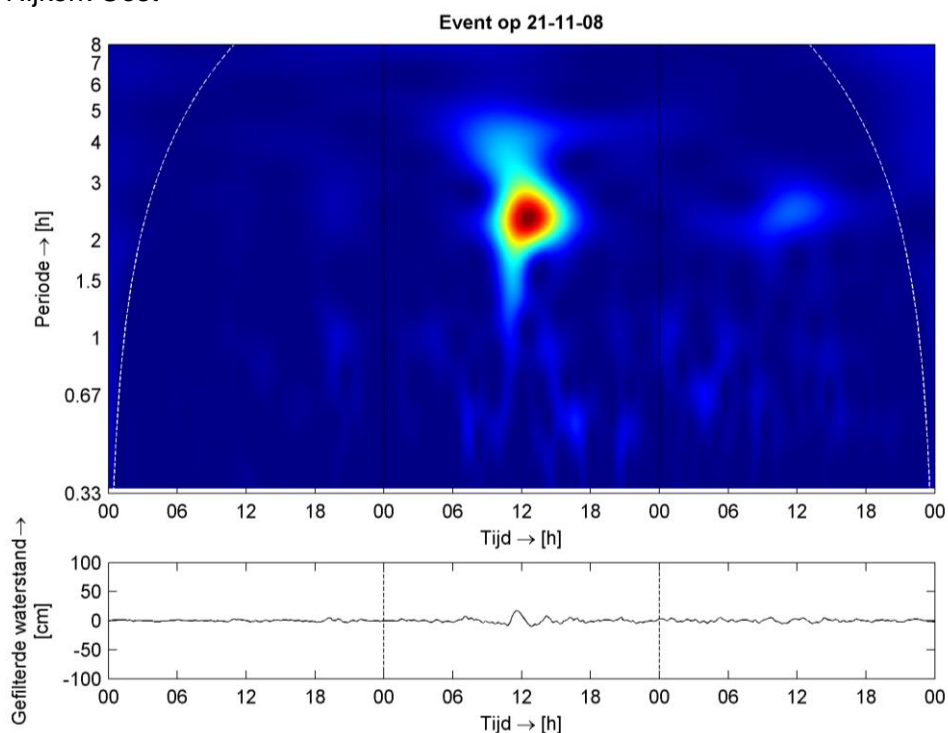
Figuur B.29 Tweede hoogste geregistreeerde seiche-episode Nijkerk West, amplitude = 0.25 m, tijdsaanduiding UTC +1.



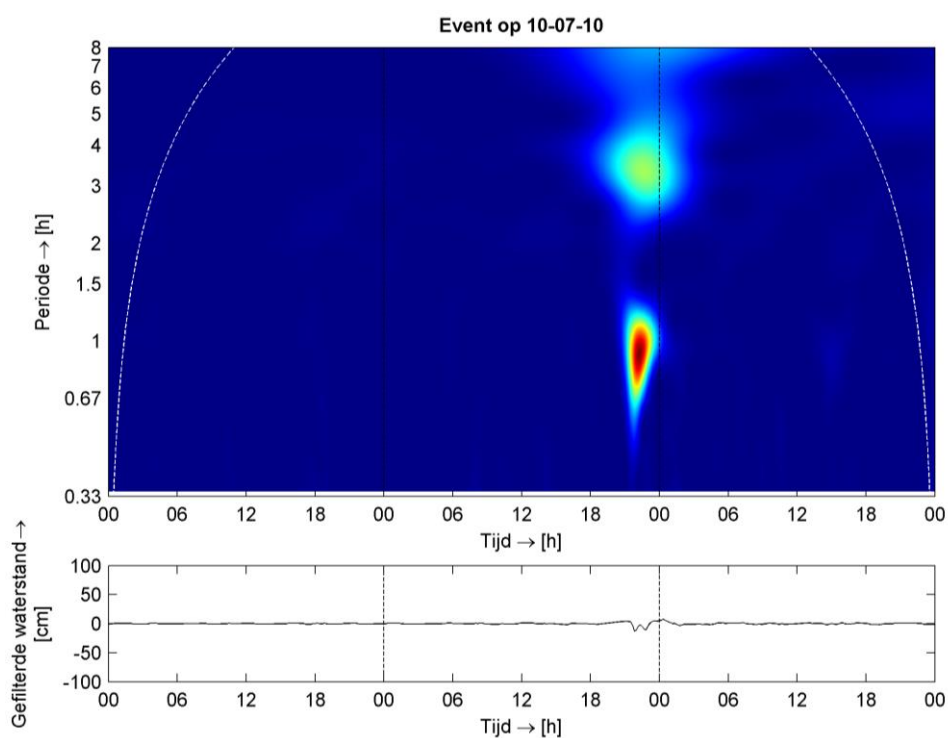
Figuur B.30 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Nijkerk West, amplitude = 0.25 m, tijdsaanduiding UTC +1.

B.4 Wolderwijd, Veluwemeer en Drontermeer

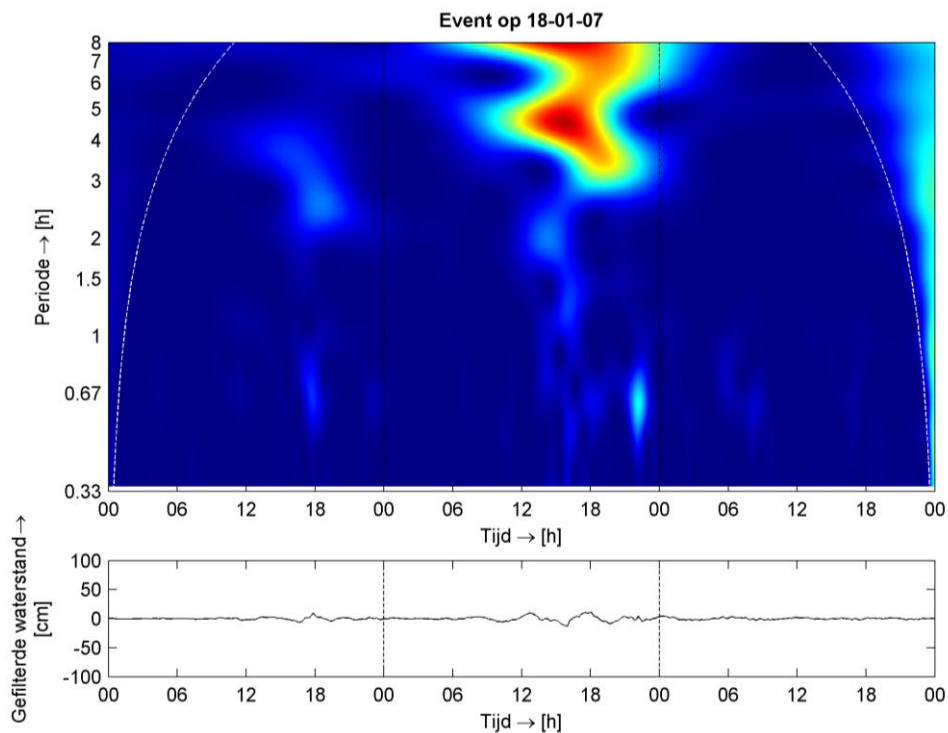
B.4.1 Nijkerk Oost



Figuur B.31 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Nijkerk Oost, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.

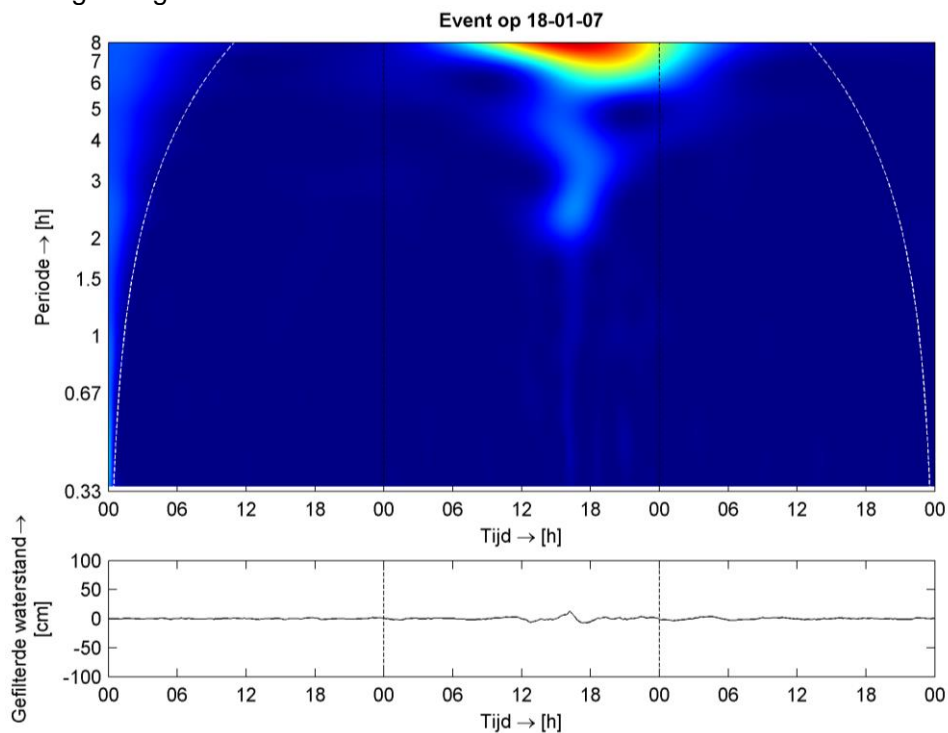


Figuur B.32 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Nijkerk Oost, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.

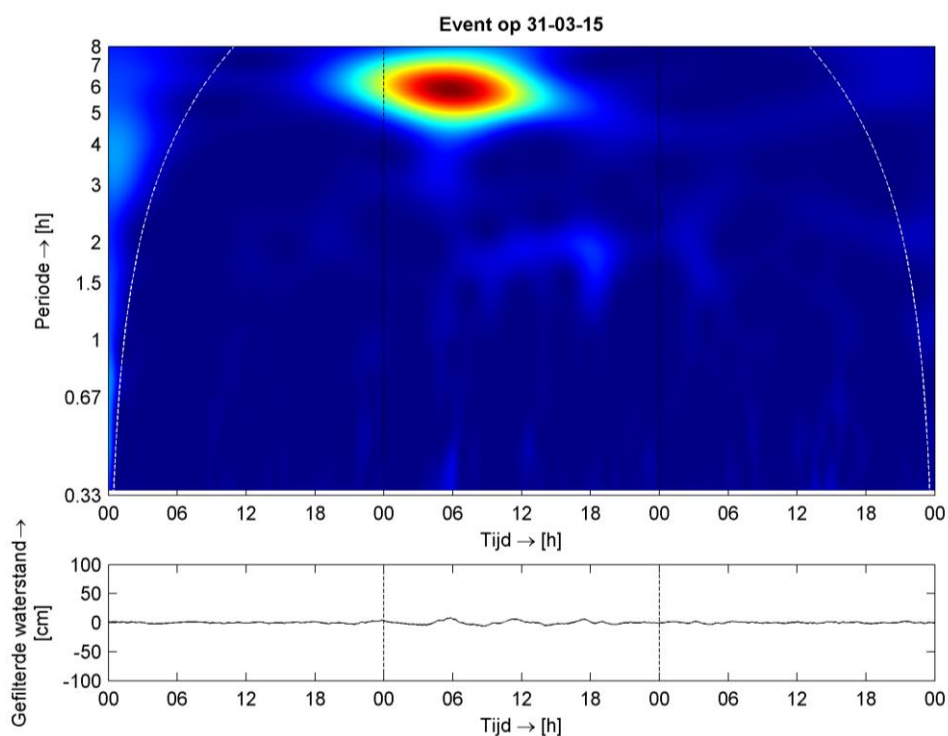


Figuur B.33 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Nijkerk Oost, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.

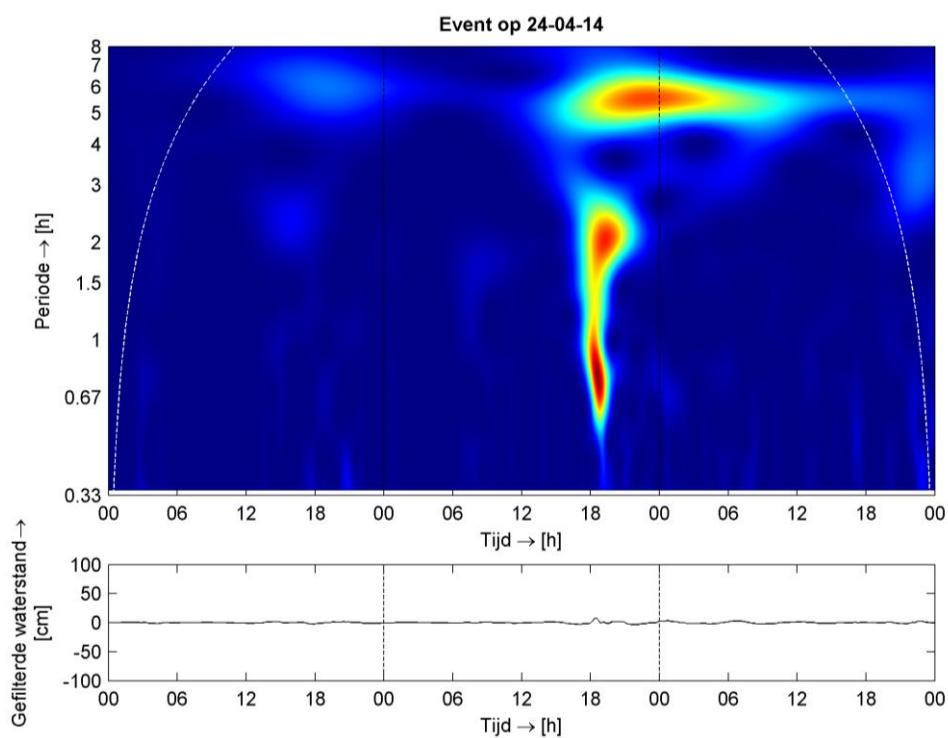
B.4.2 Elburgerbrug



Figuur B.34 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Elburgerbrug, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.

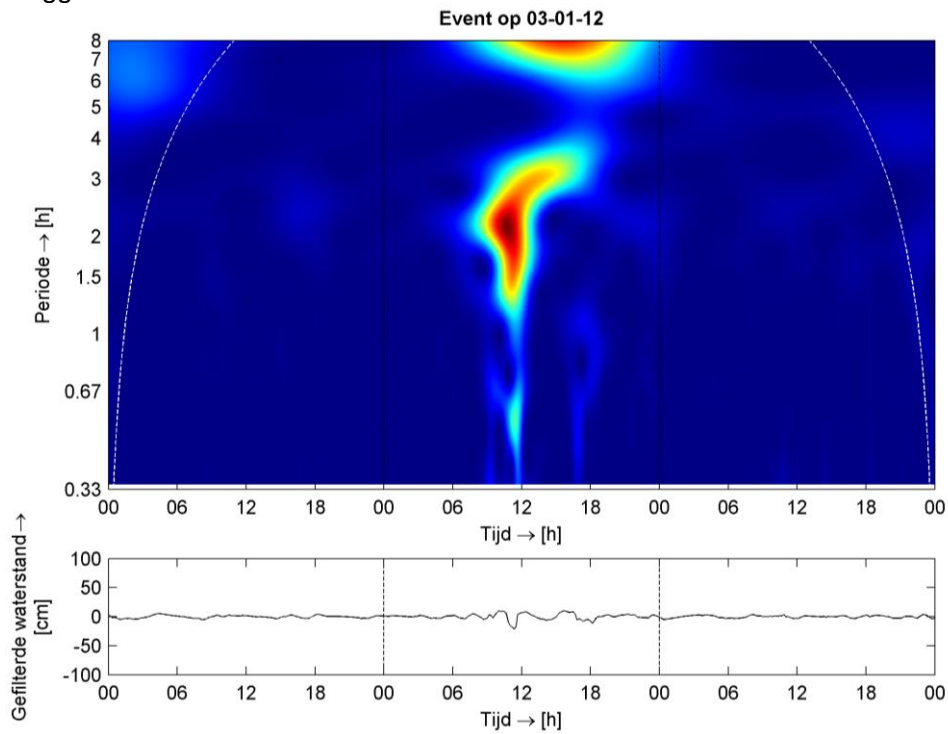


Figuur B.35 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Elburgerbrug, amplitude = 0.10 m, tijdsaanduiding UTC +1.

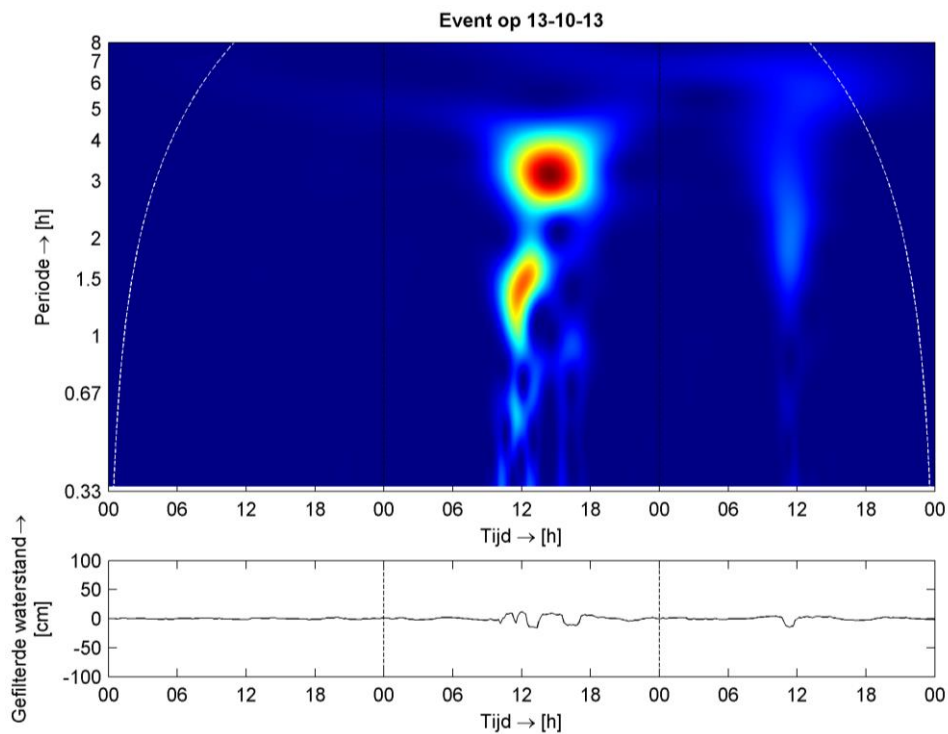


Figuur B.36 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Elburgerbrug, amplitude = 0.10 m, tijdsaanduiding UTC +1.

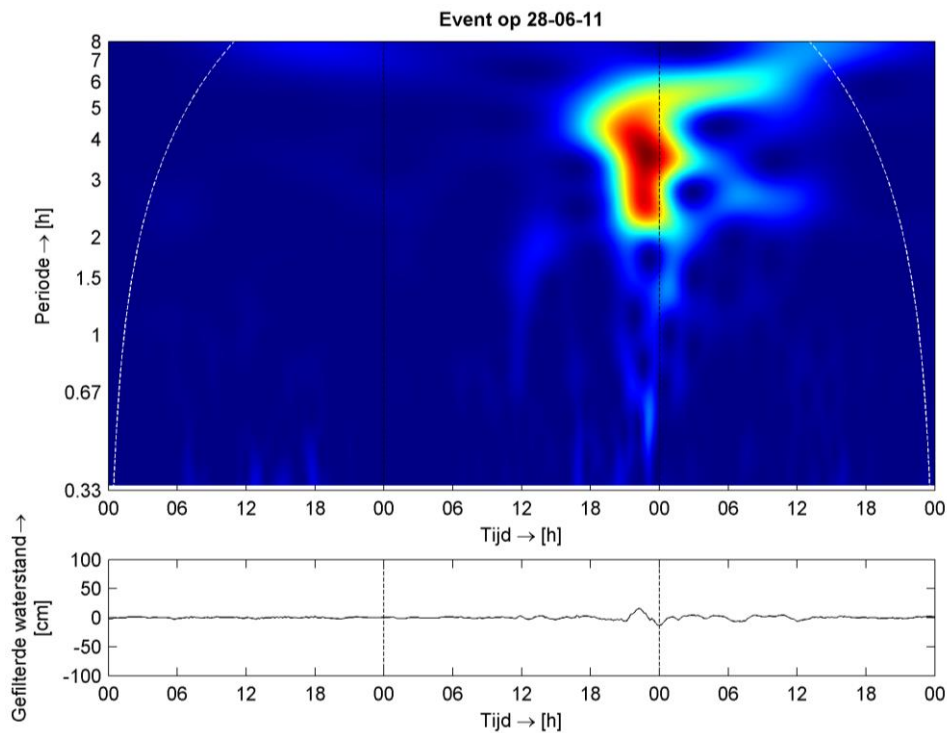
B.4.3 Roggebotsluis Zuid



Figuur B.37 Eerste hoogste geregisteerde seiche-episode Roggebotsluis Zuid, amplitude = 0.2 m, tijdsaanduiding UTC +1.



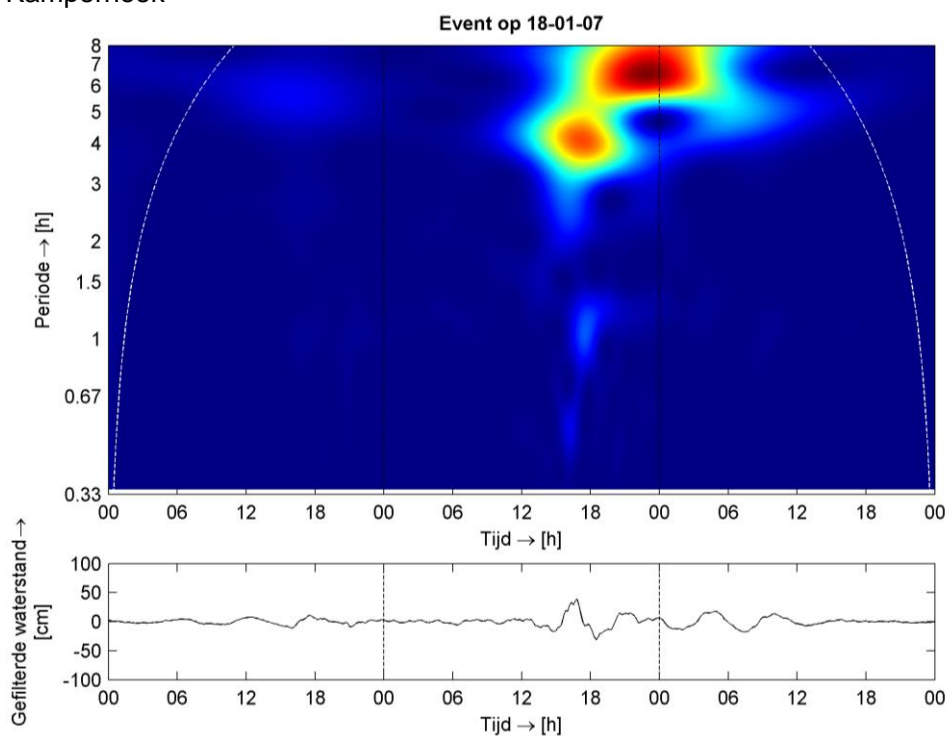
Figuur B.38 Tweede hoogste geregisteerde seiche-episode Roggebotsluis Zuid, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.



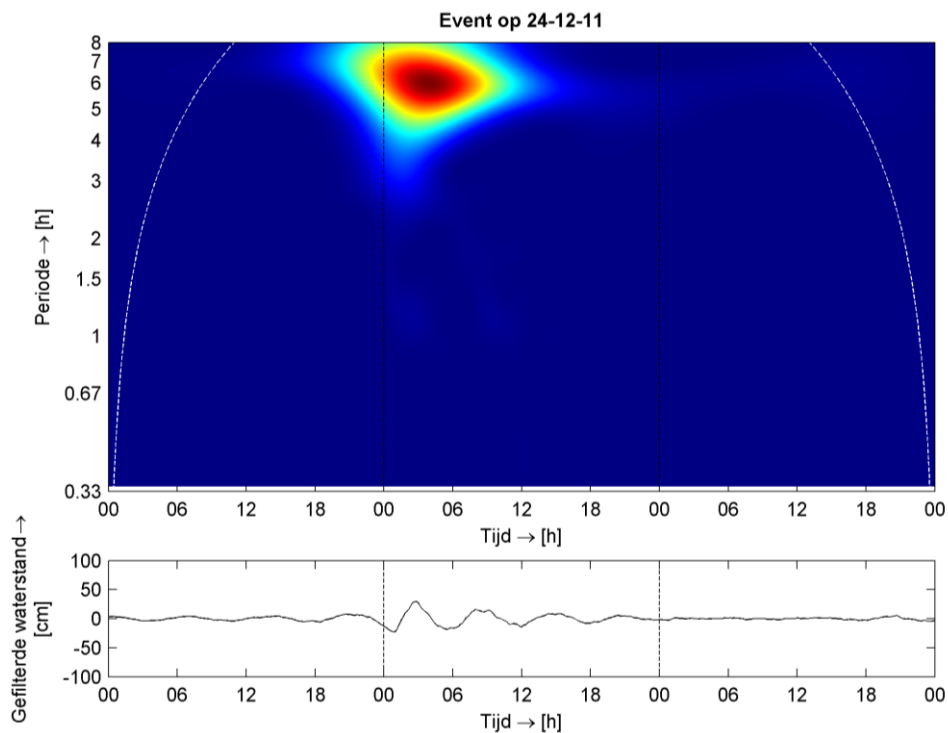
Figuur B.39 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Roggebotsluis Zuid, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.

B.5 Ketelmeer

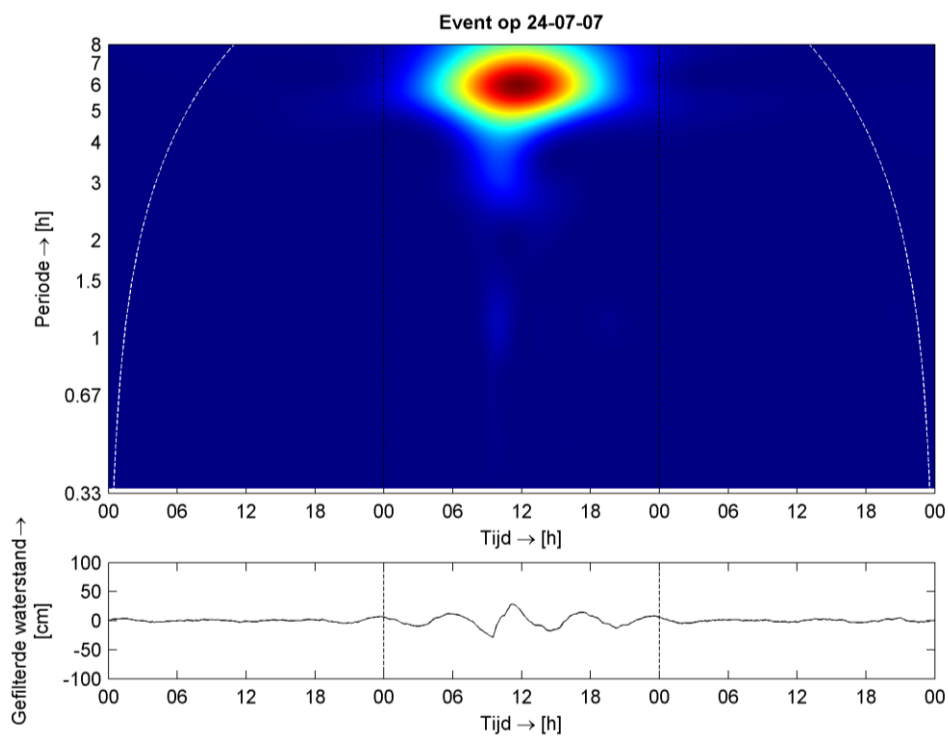
B.5.1 Kamperhoek



Figuur B.40 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Kamperhoek, amplitude = 0.40 m, tijdsaanduiding UTC +1.

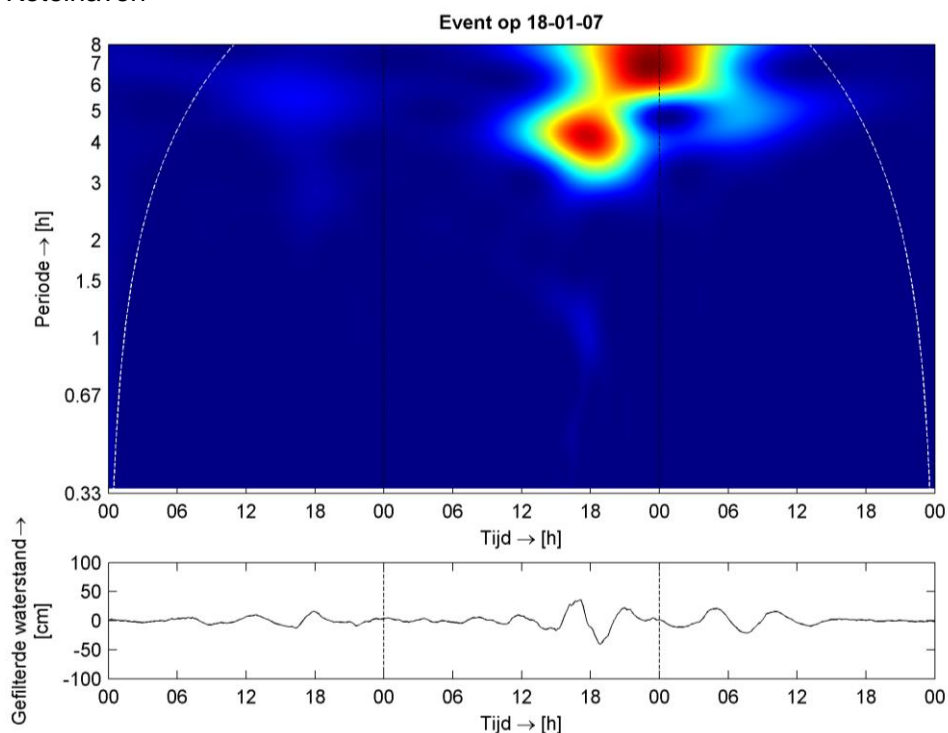


Figuur B.41 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Kamperhoek, amplitude = 0.30 m, tijdsaanduiding UTC +1.

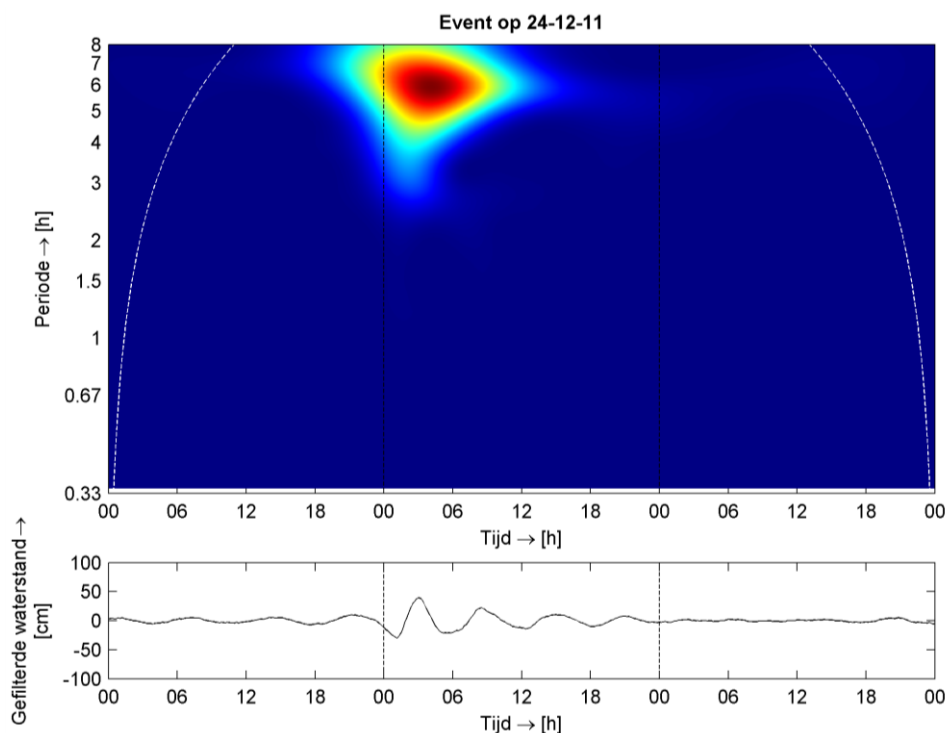


Figuur B.42 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Kamperhoek, amplitude = 0.30 m, tijdsaanduiding UTC +1.

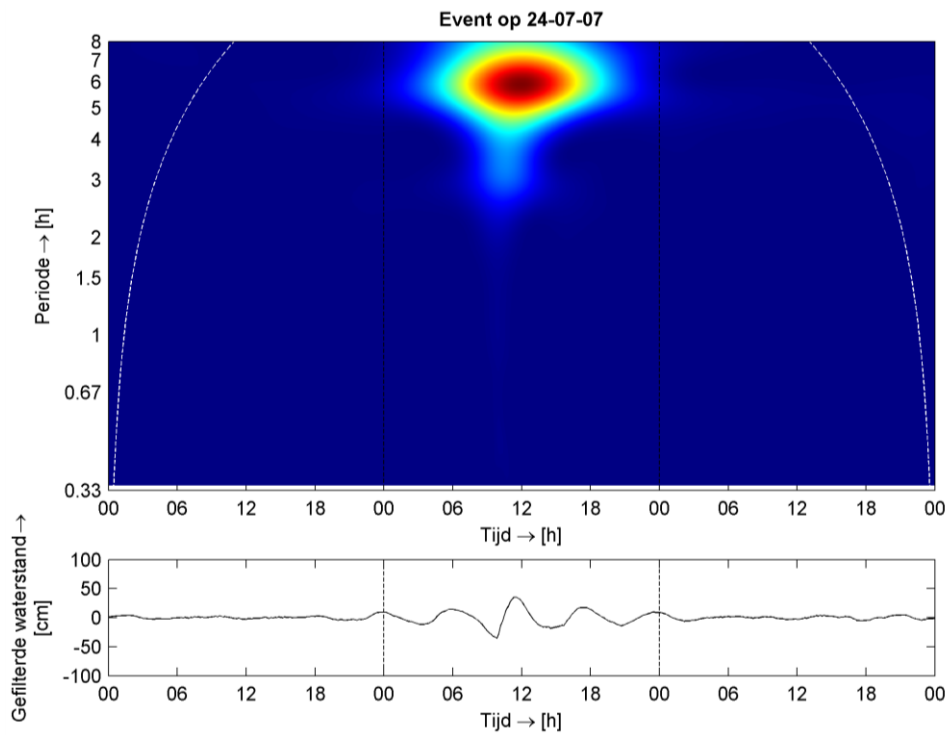
B.5.2 Ketelhaven



Figuur B.43 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Ketelhaven, amplitude = 0.40 m, tijdsaanduiding UTC +1.

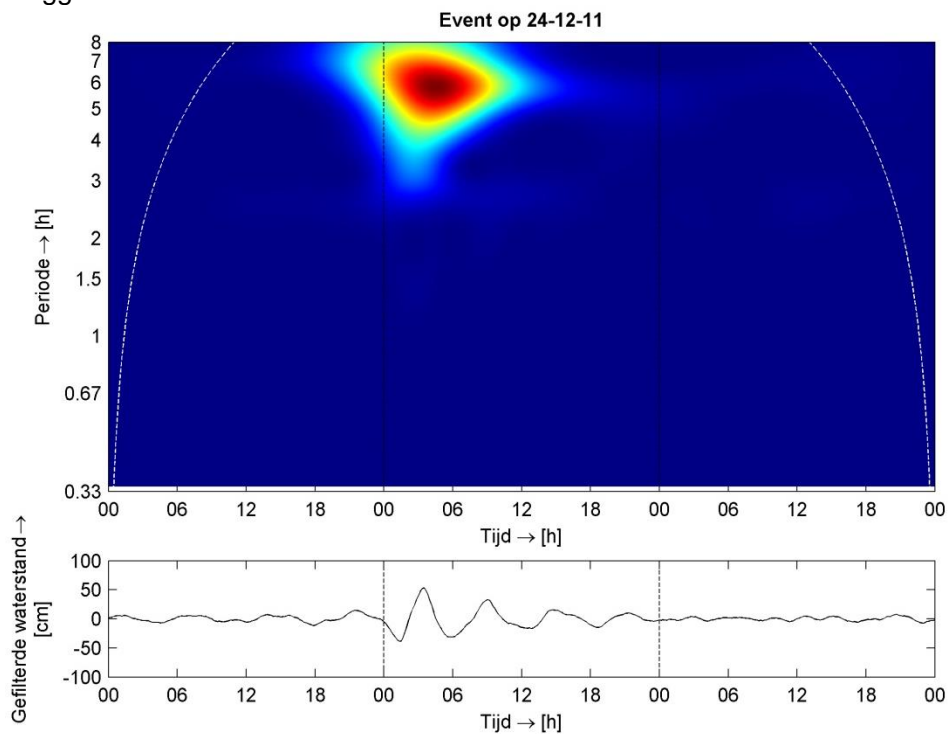


Figuur B.44 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Ketelhaven, amplitude = 0.40 m, tijdsaanduiding UTC +1.

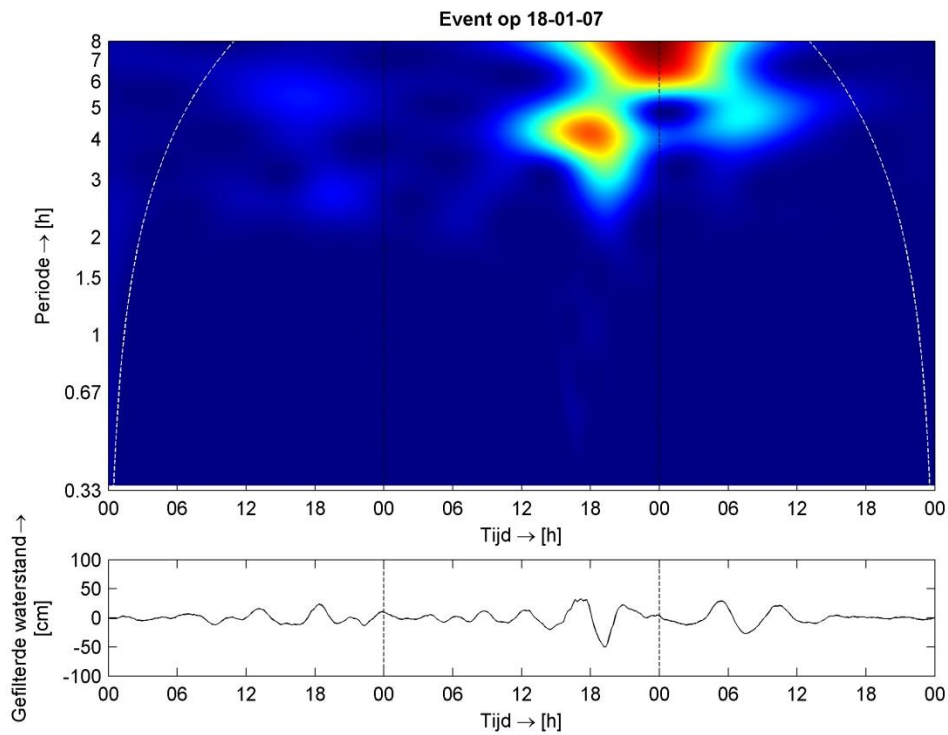


Figuur B.45 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Ketelhaven, amplitude = 0.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.

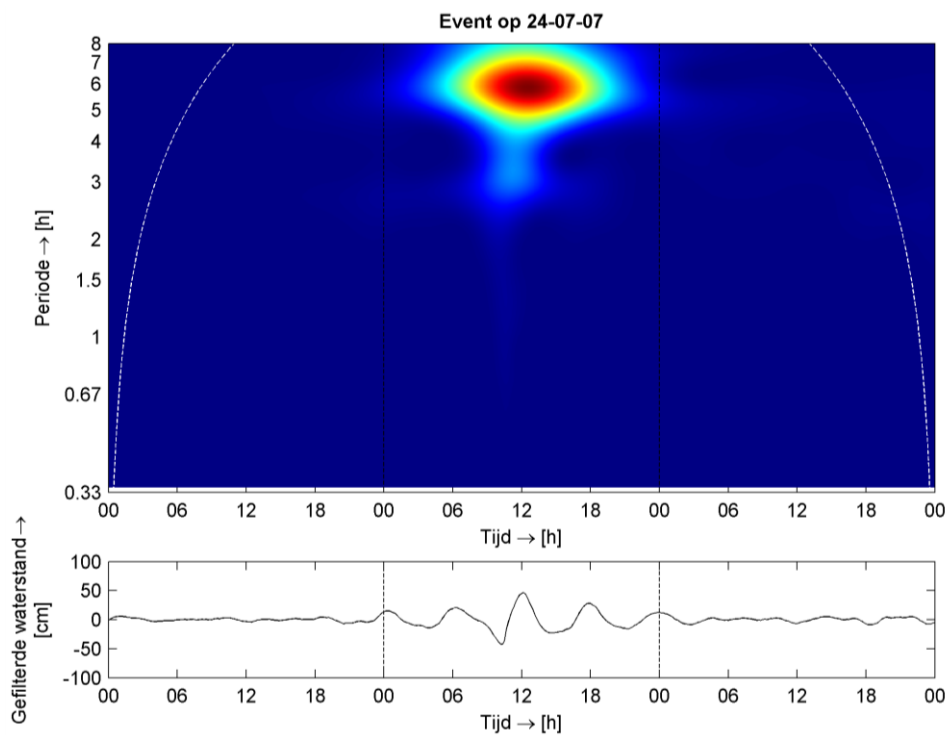
B.5.3 Roggebotsluis Noord



Figuur B.46 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Roggebotsluis Noord, amplitude = 0.55 m, tijdsaanduiding UTC +1.



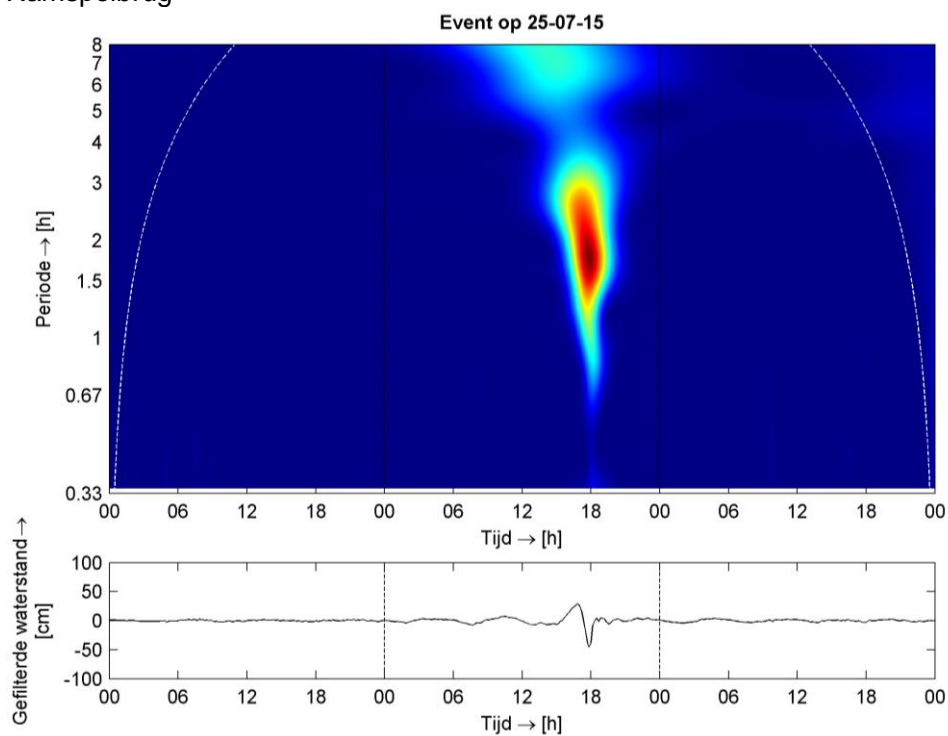
Figuur B.47 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Roggebotsluis Noord, amplitude = 0.50 m, tijdsaanduiding UTC +1.



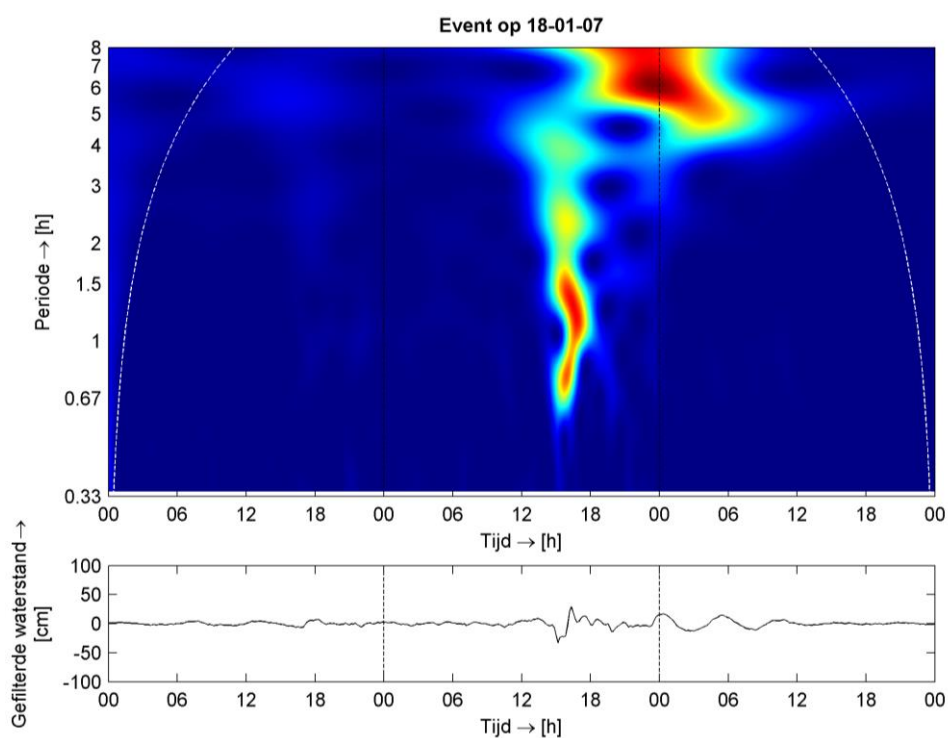
Figuur B.48 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Roggebotsluis Noord, amplitude = 0.45 m, tijdsaanduiding UTC +1.

B.6 Zwarte Water

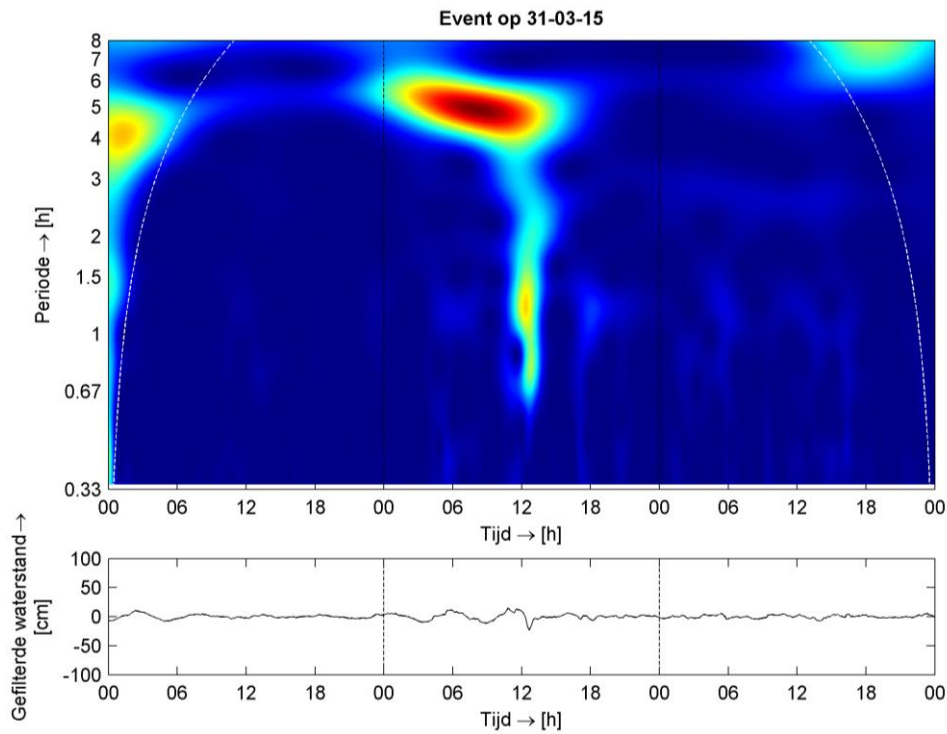
B.6.1 Ramspolbrug



Figuur B.49 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Ramspolbrug, amplitude = 0.45 m, tijdsaanduiding UTC +1.

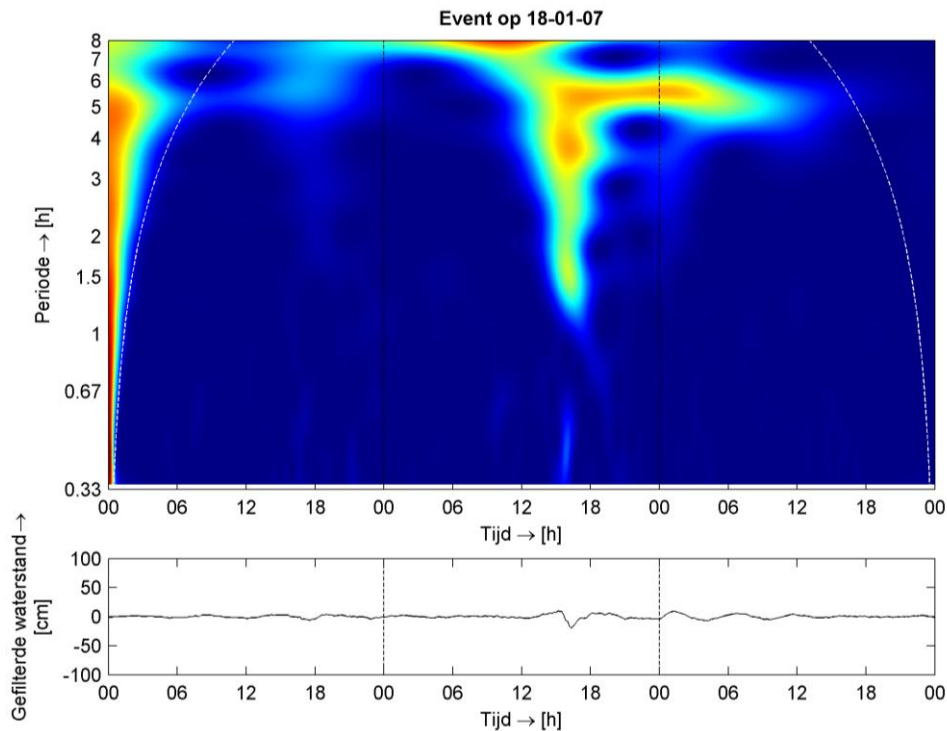


Figuur B.50 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Ramspolbrug, amplitude = 0.35 m, tijdsaanduiding UTC +1.

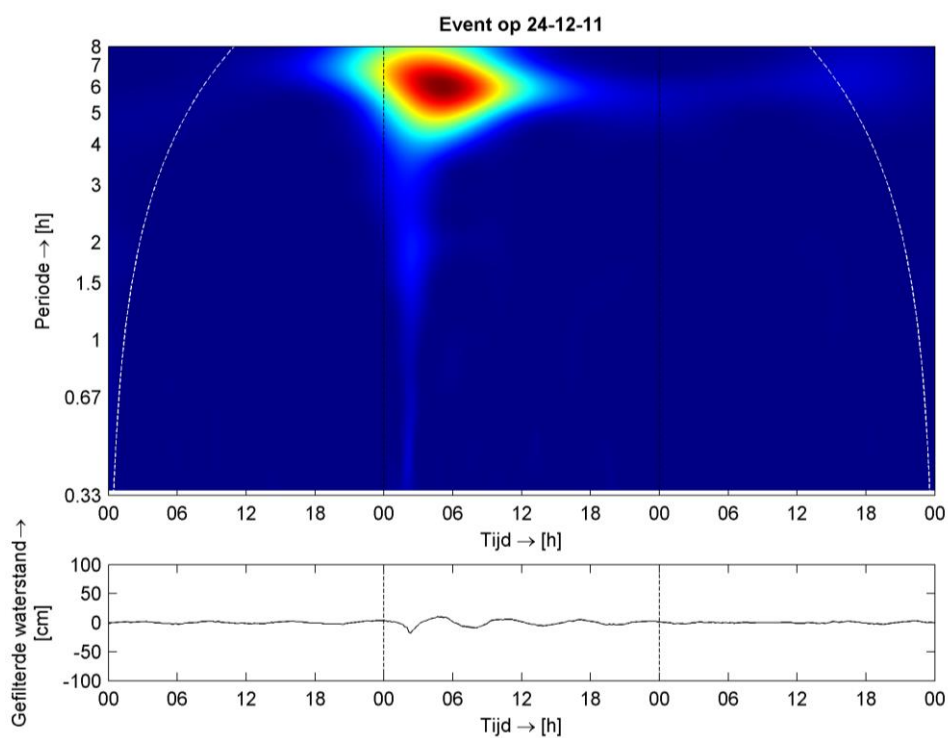


Figuur B.51 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Ramspolbrug, amplitude = 0.25 m, tijdsaanduiding UTC +1.

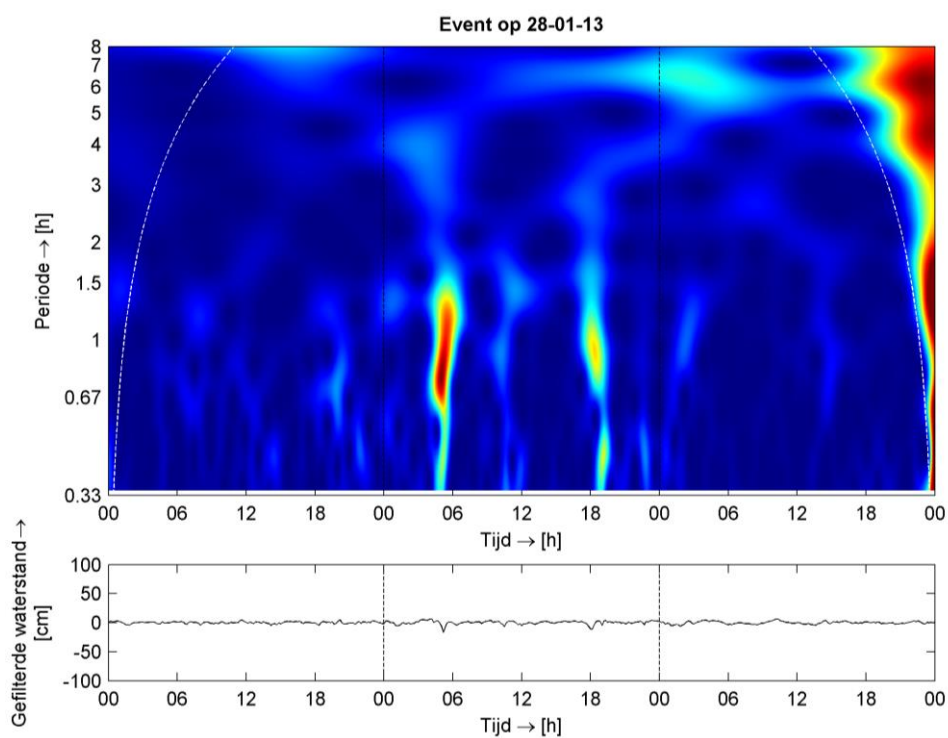
B.6.2 Kadoelen



Figuur B.52 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Kadoelen, amplitude = 0.20 m, tijdsaanduiding UTC +1.

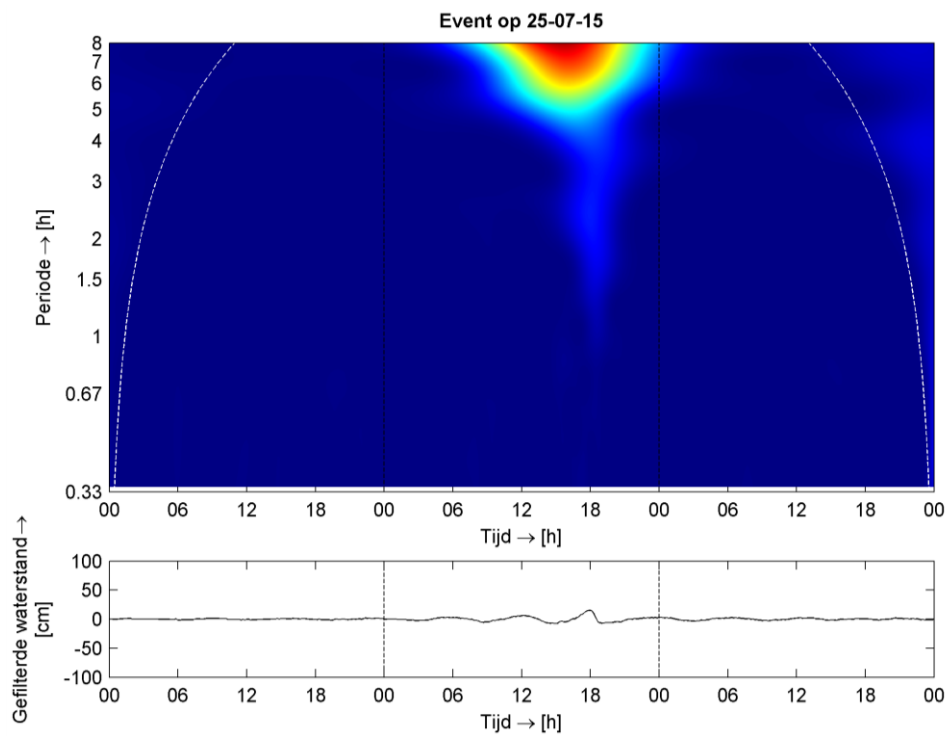


Figuur B.53 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Kadoelen, amplitude = 0.20 m, tijdsaanduiding UTC +1.

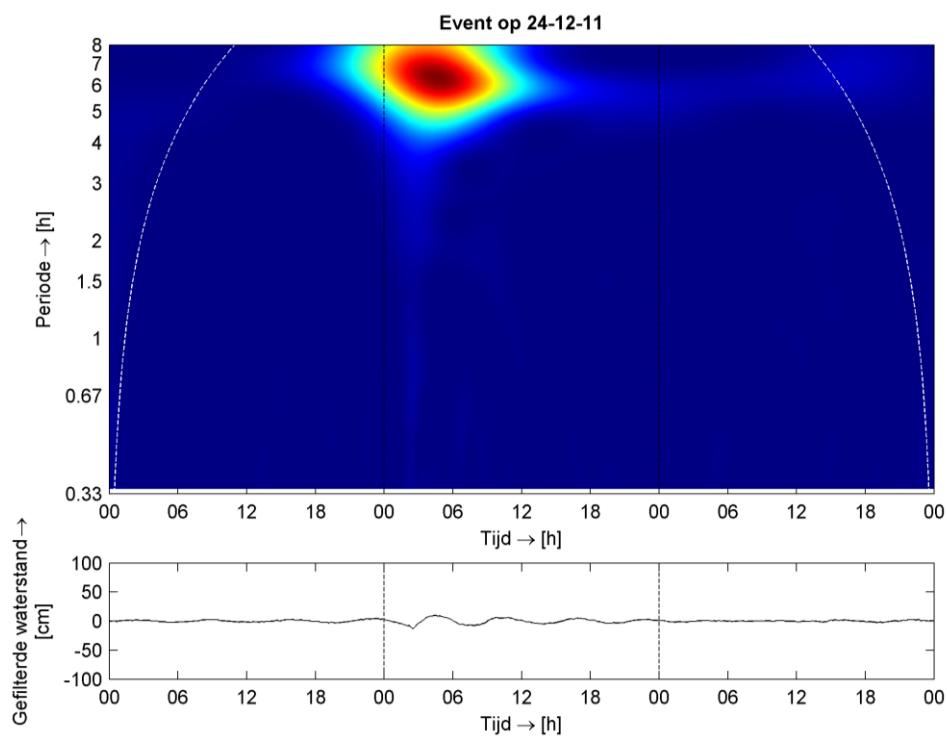


Figuur B.54 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Kadoelen, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.

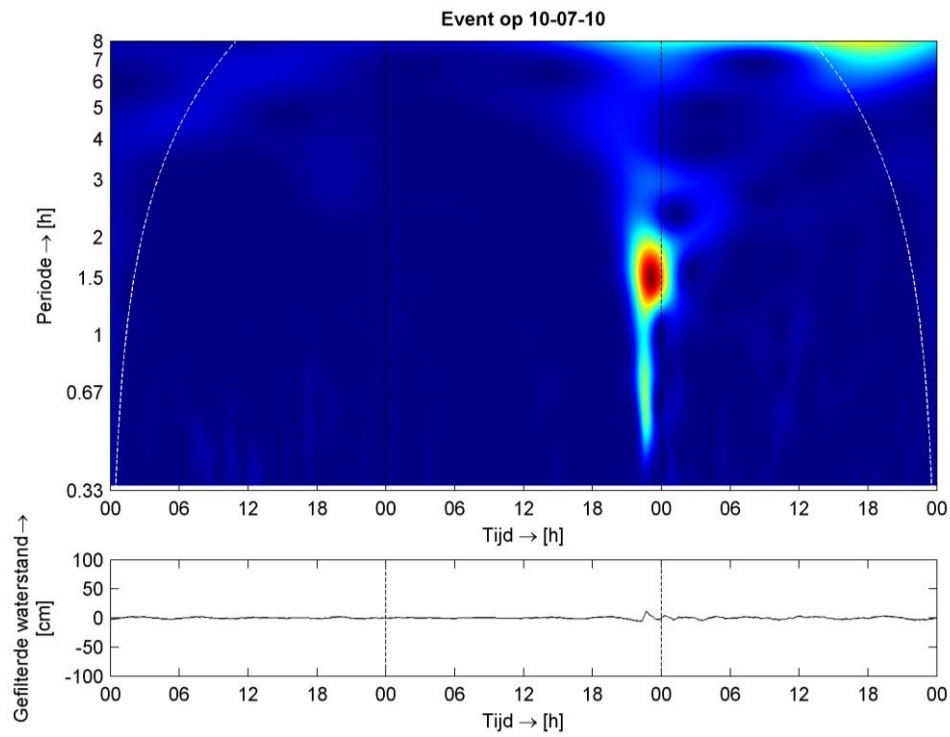
B.6.3 Genemuïden



Figuur B.55 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Genemuïden, amplitude = 0.15 m, tijdsaanduiding UTC +1.

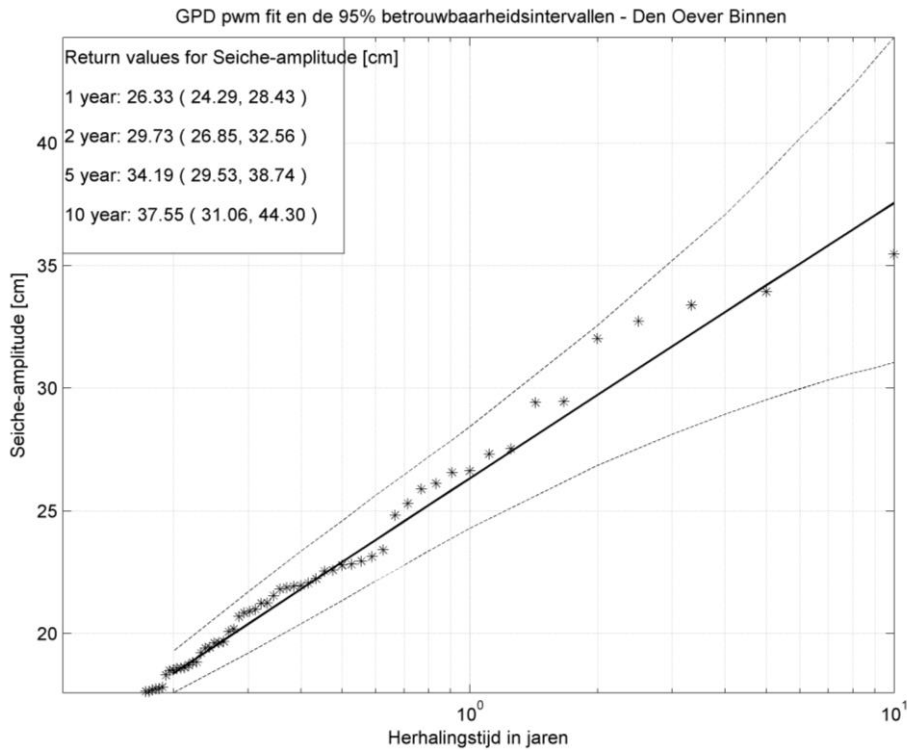


Figuur B.56 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Genemuïden, amplitude = 0.13 m, tijdsaanduiding UTC +1.

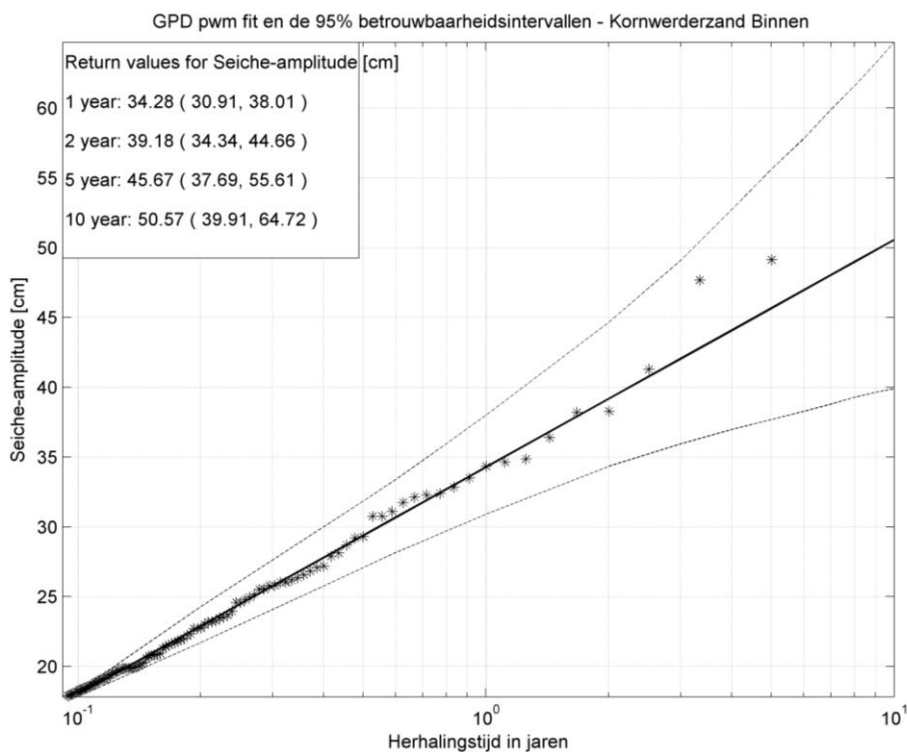


Figuur B.57 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Genemuiden, amplitude = 0.12 m, tijdsaanduiding UTC +1.

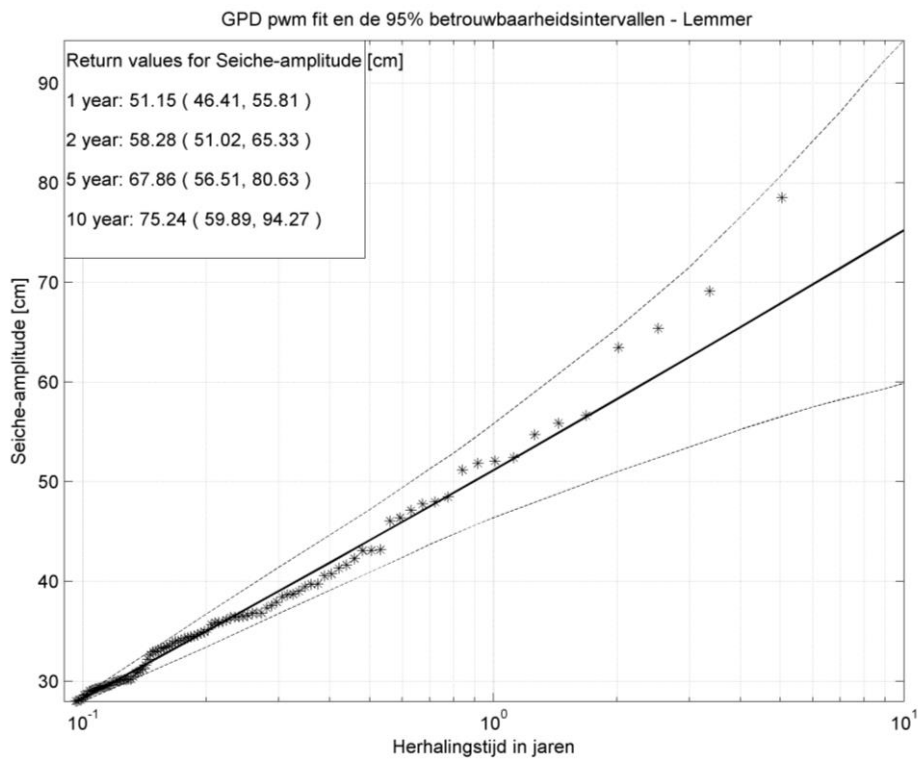
C Extreme-waarde fits per meetlocatie



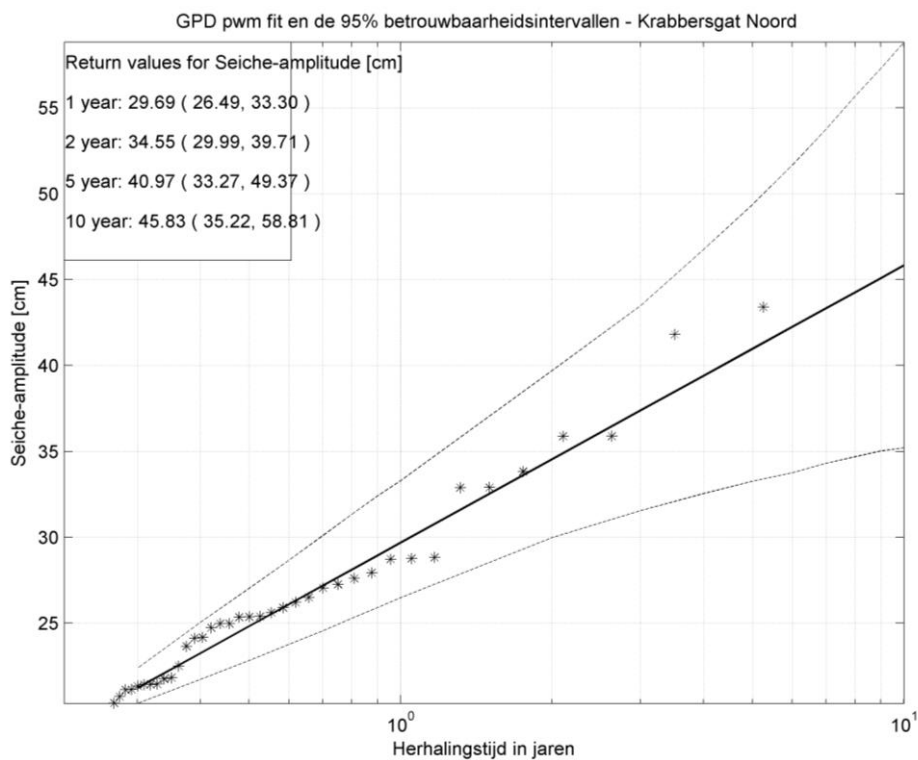
Figuur C.1 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Den Oever Binnen.



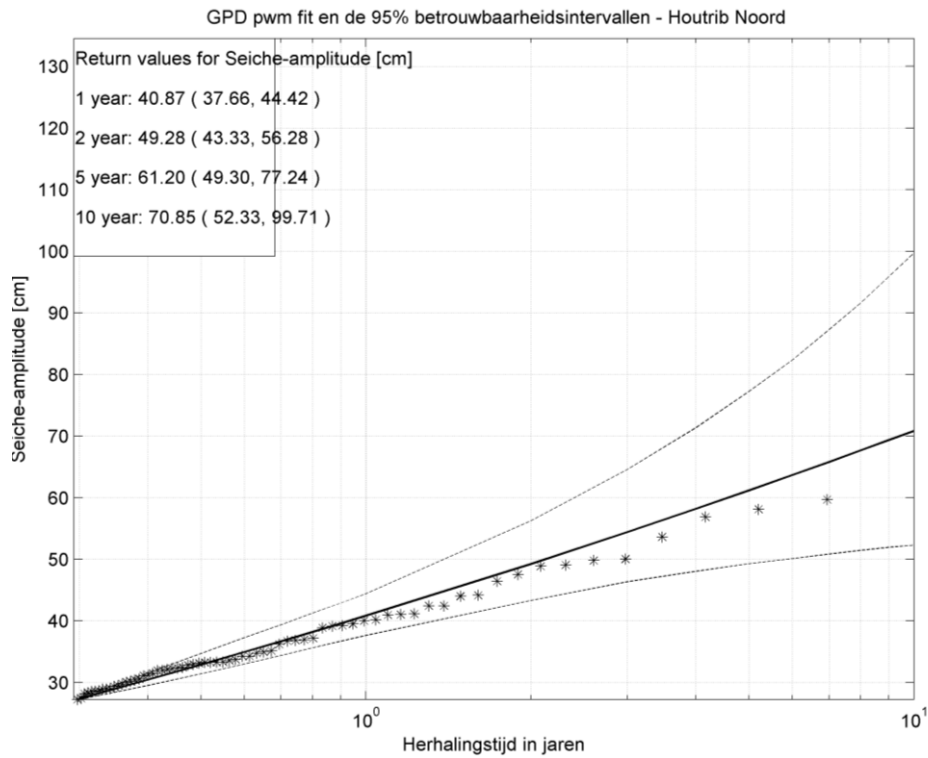
Figuur C.2 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kornwerderzand Binnen.



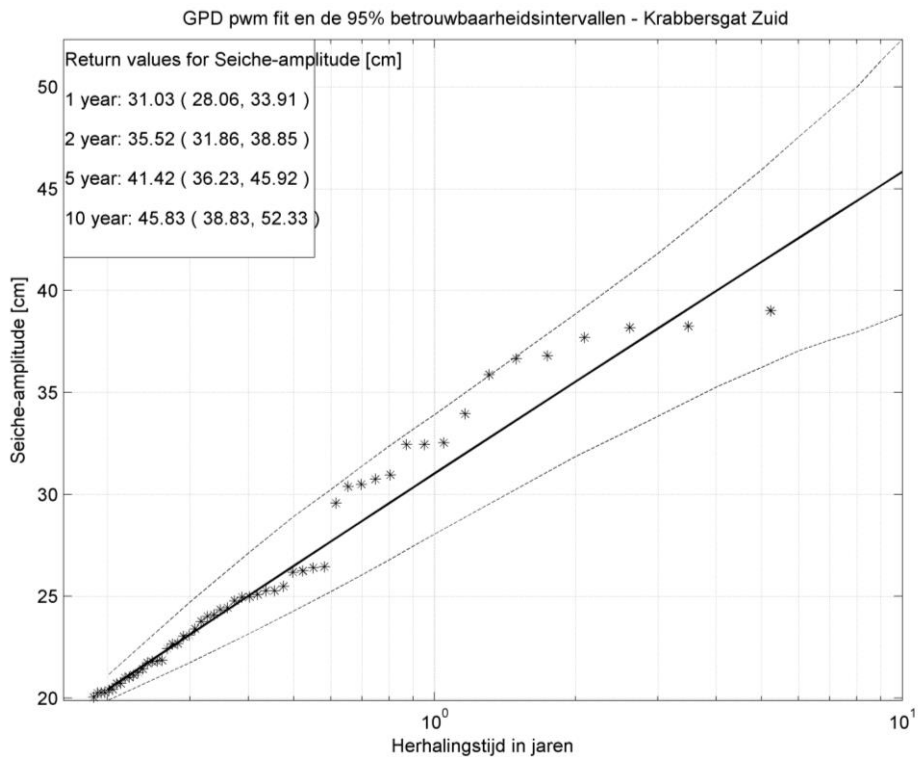
Figuur C.3 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Lemmer.



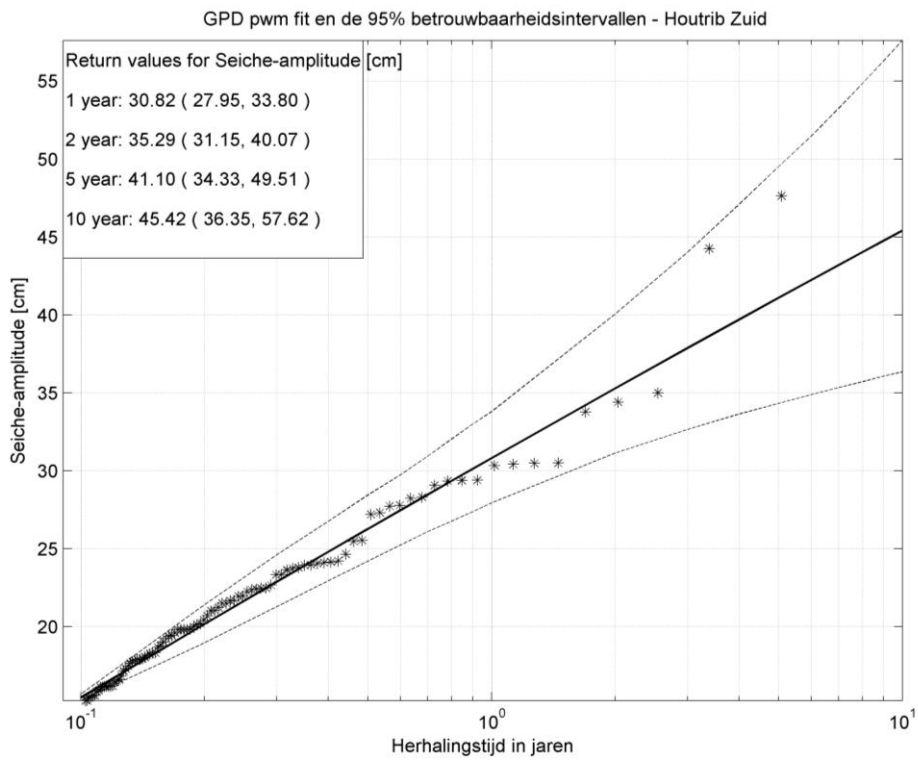
Figuur C.4 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Krabbersgat Noord.



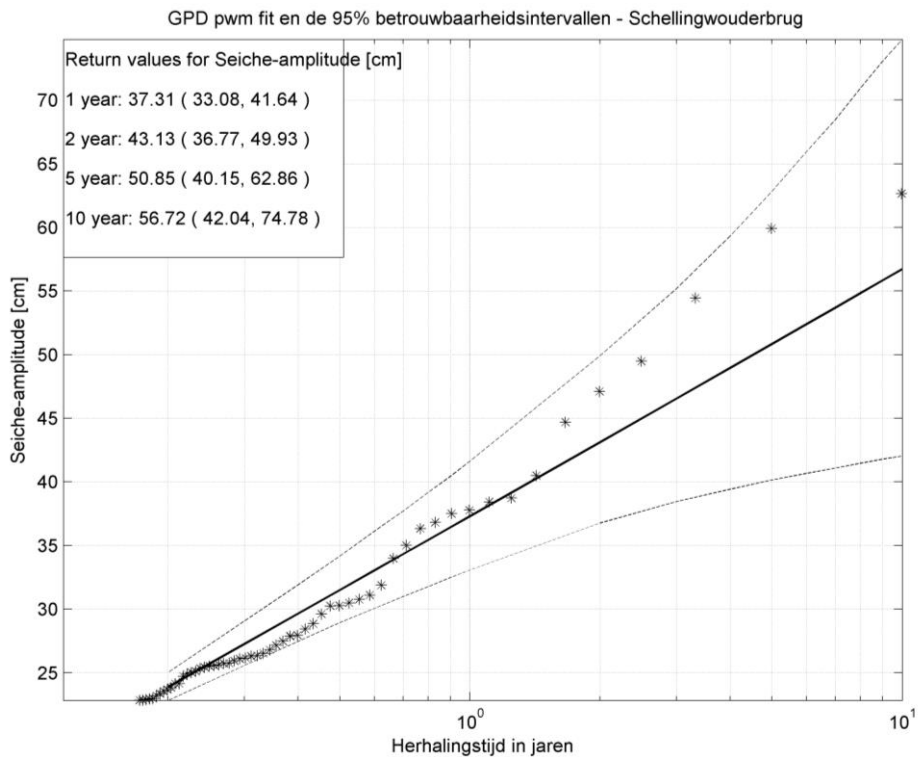
Figuur C.5 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Houtrib Noord.



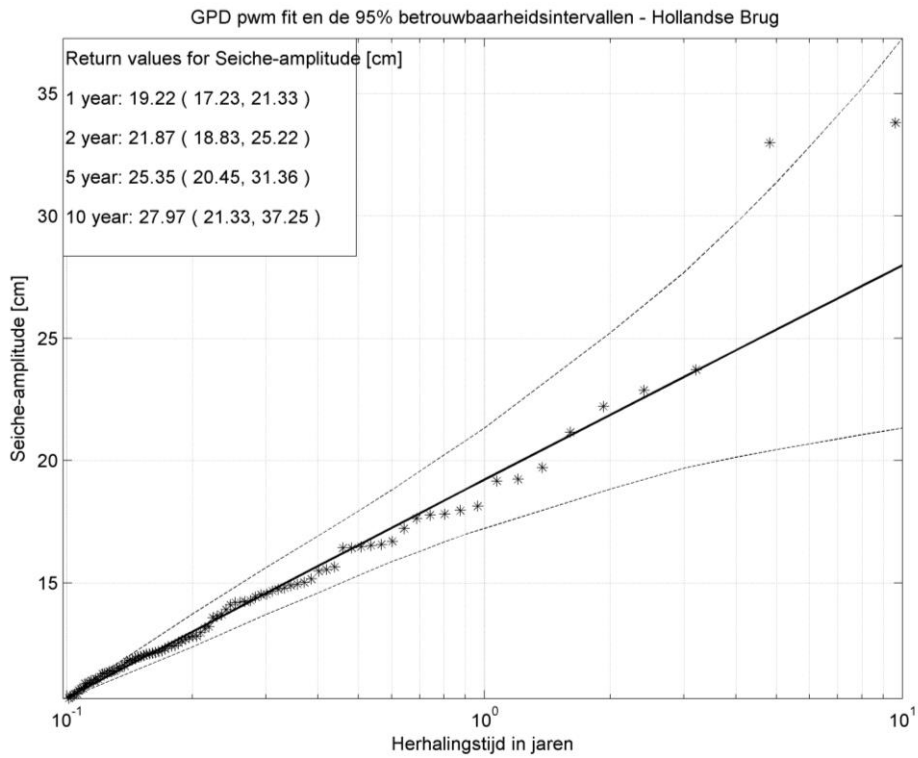
Figuur C.6 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Krabbersgat Zuid.



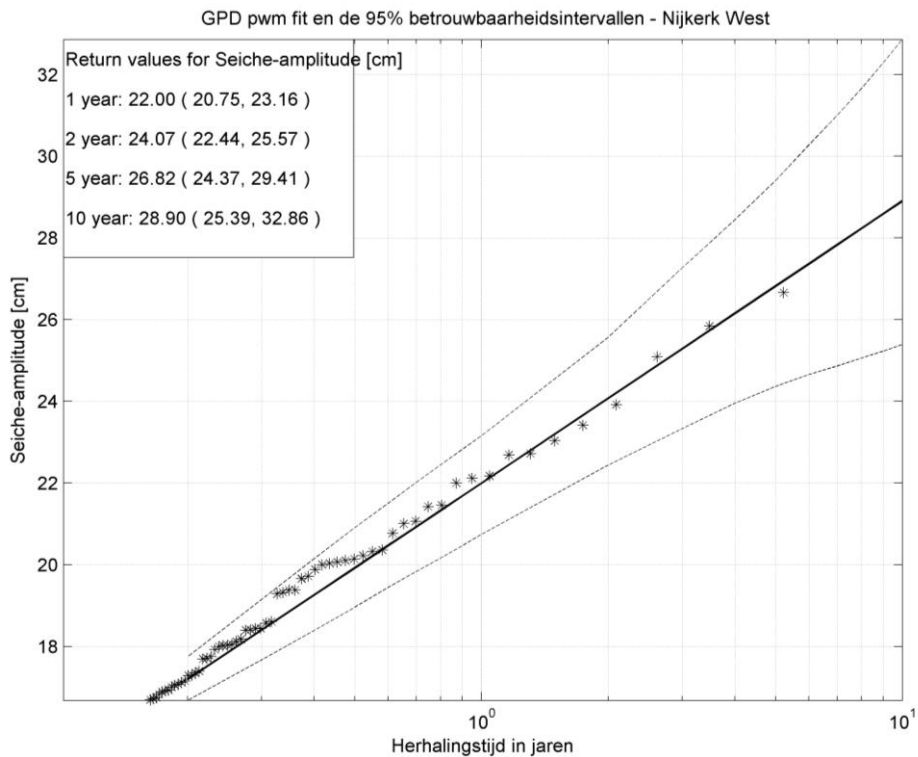
Figuur C.7 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Houtrib Zuid.



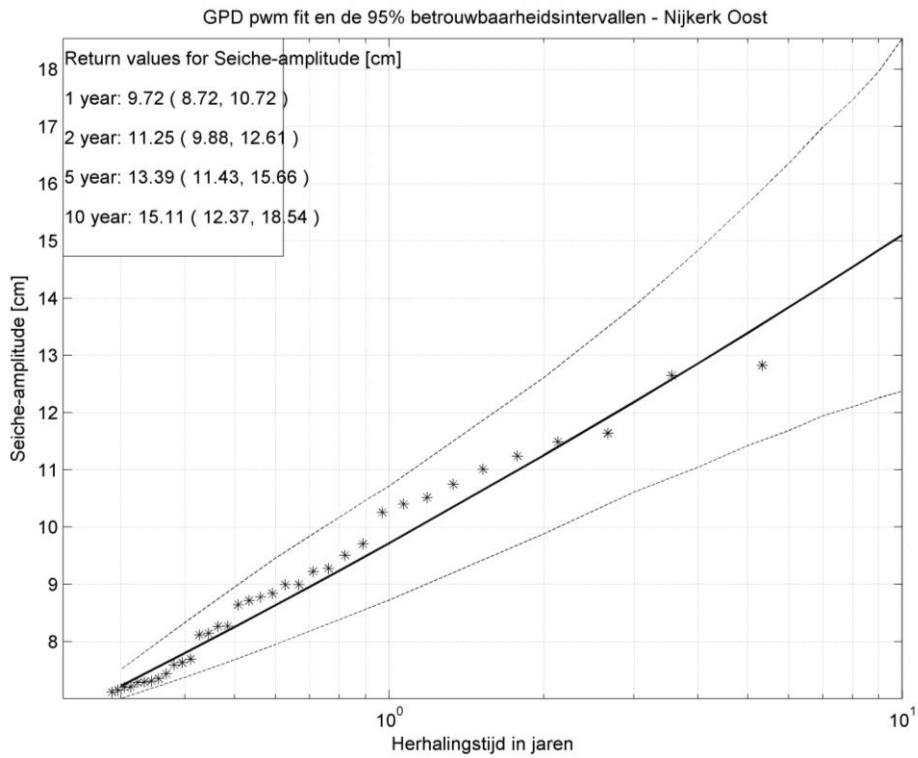
Figuur C.8 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Schellingwouderbrug.



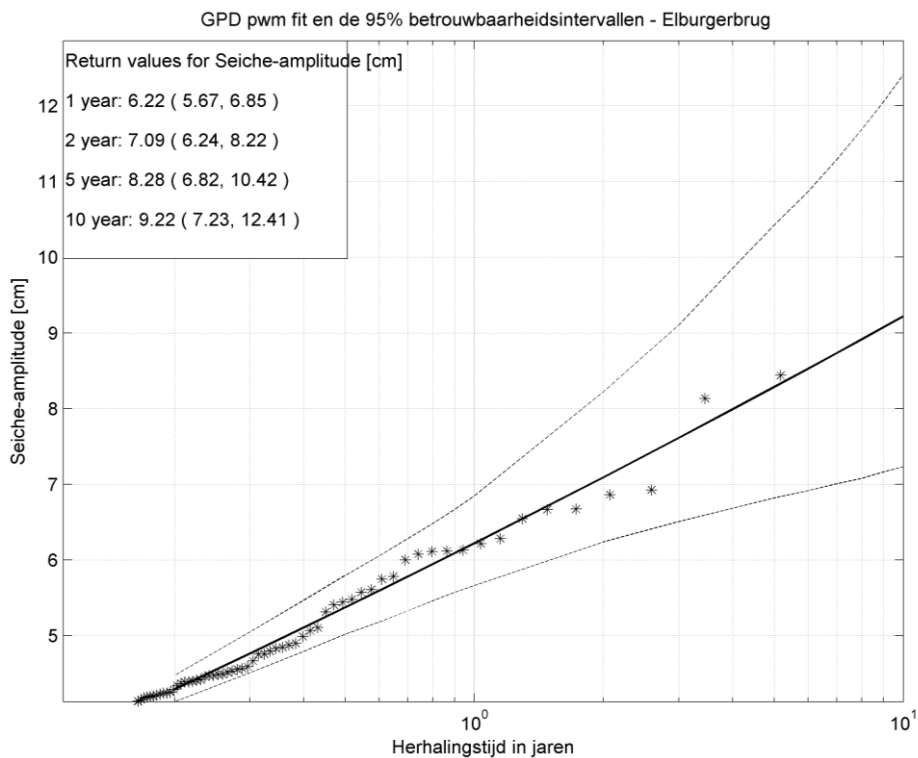
Figuur C.9 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Hollandse Brug.



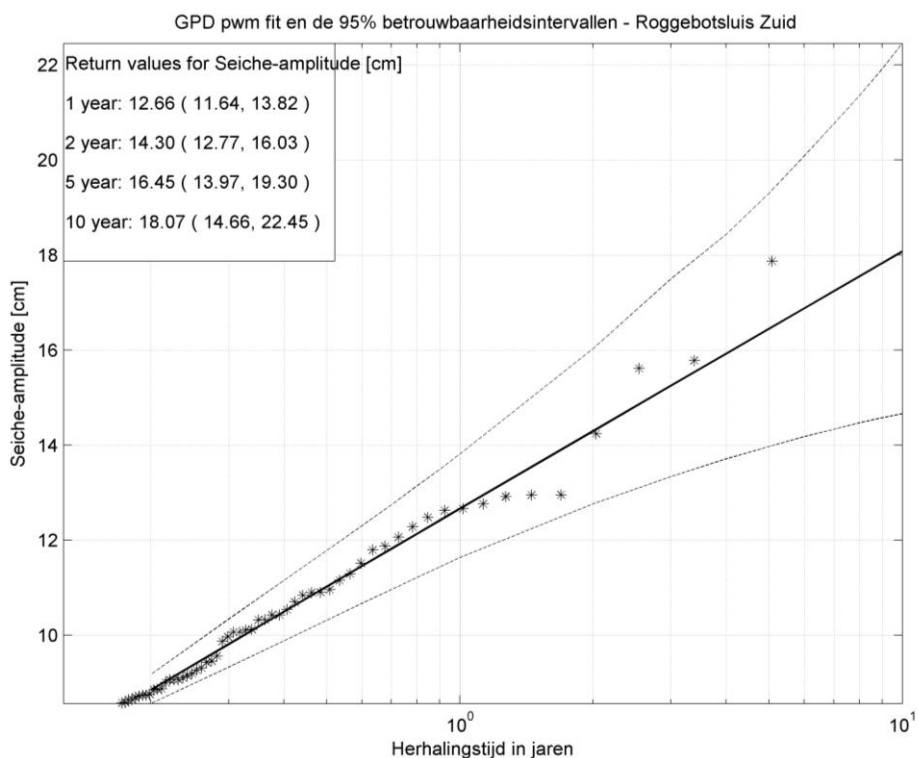
Figuur C.10 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Nijkerk West.



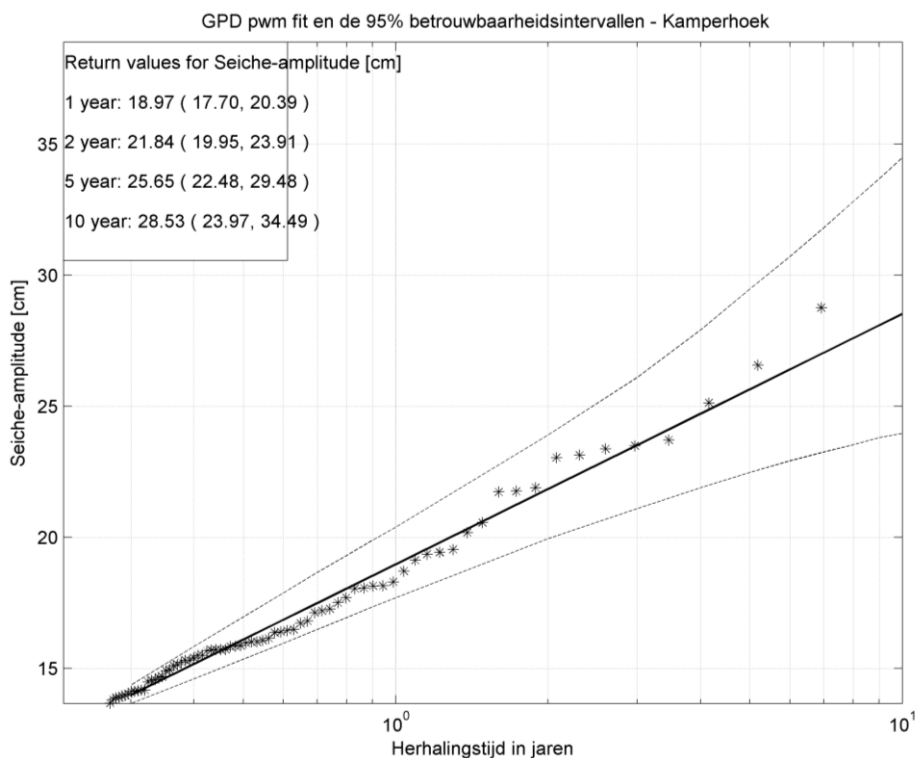
Figuur C.11 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Nijkerk Oost.



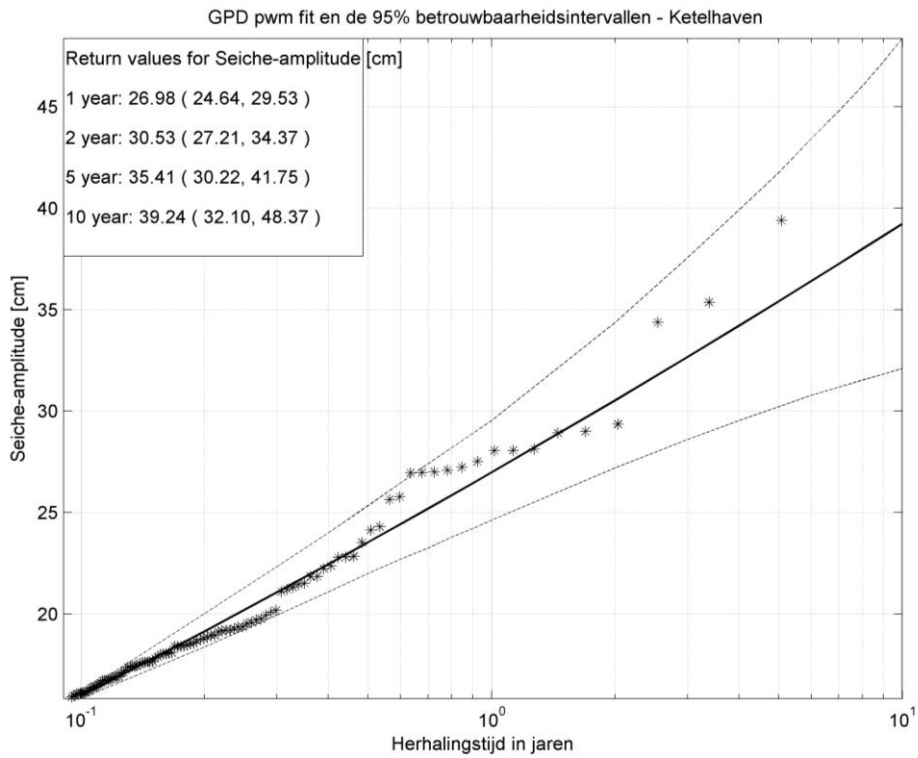
Figuur C.12 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Elburgerbrug.



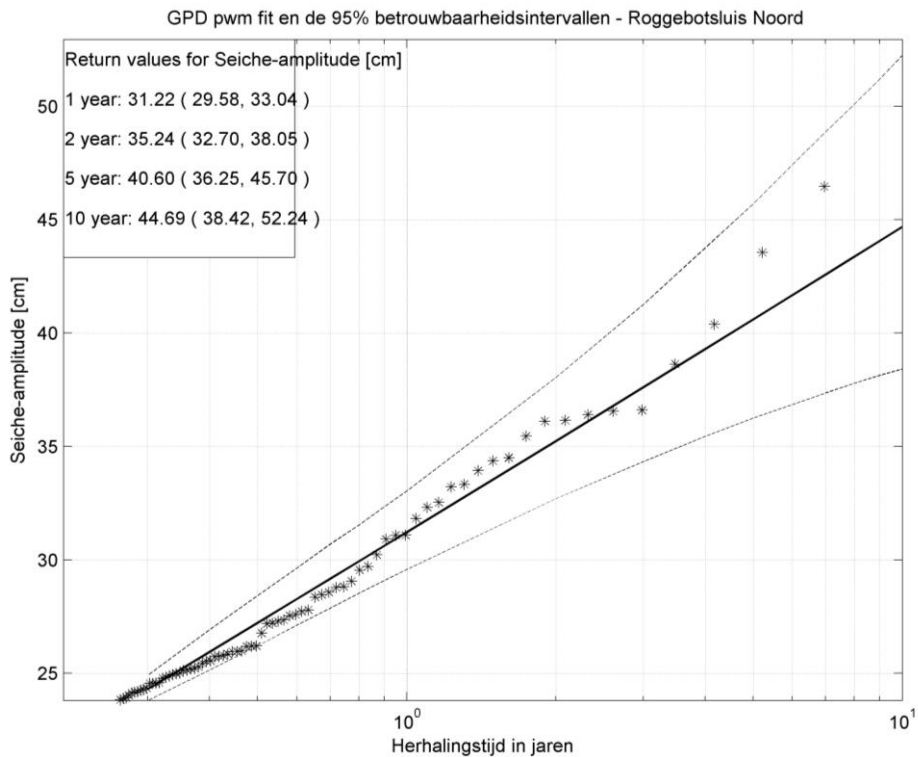
Figuur C.13 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Roggebotsluis Zuid.



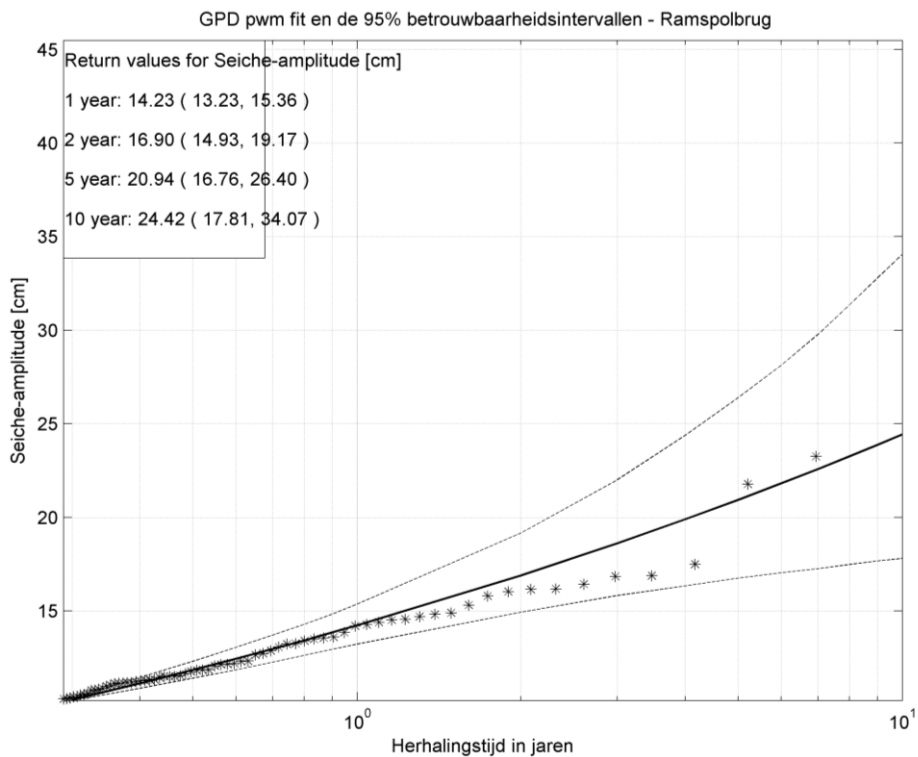
Figuur C.14 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kamperhoek.



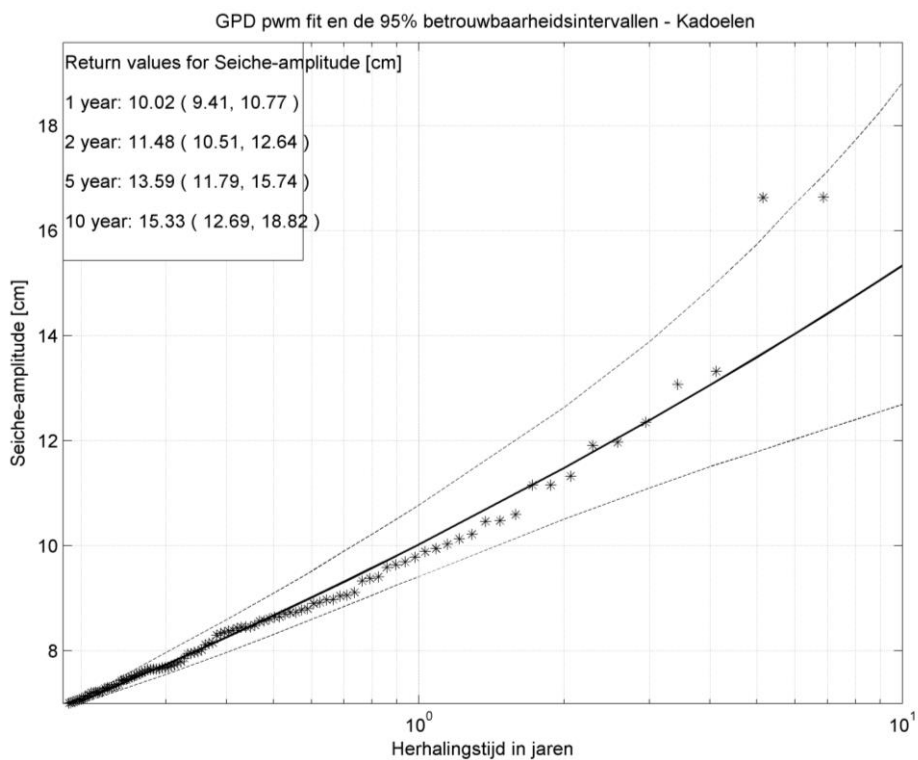
Figuur C.15 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Ketelhaven.



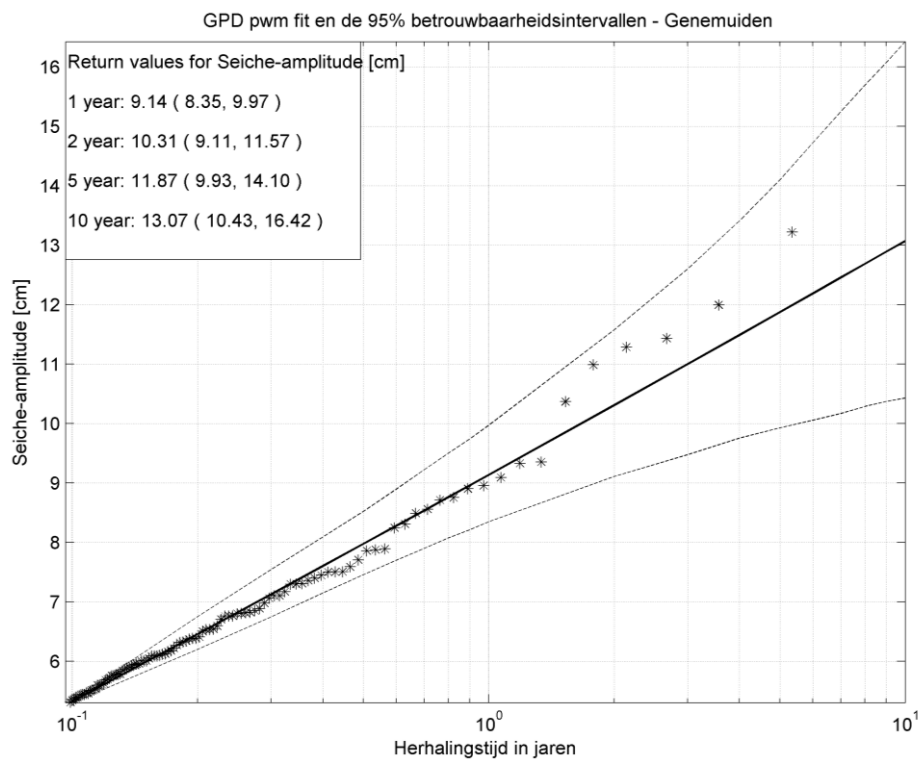
Figuur C.16 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Roggebotsluis Noord.



Figuur C.17 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Ramspolbrug.



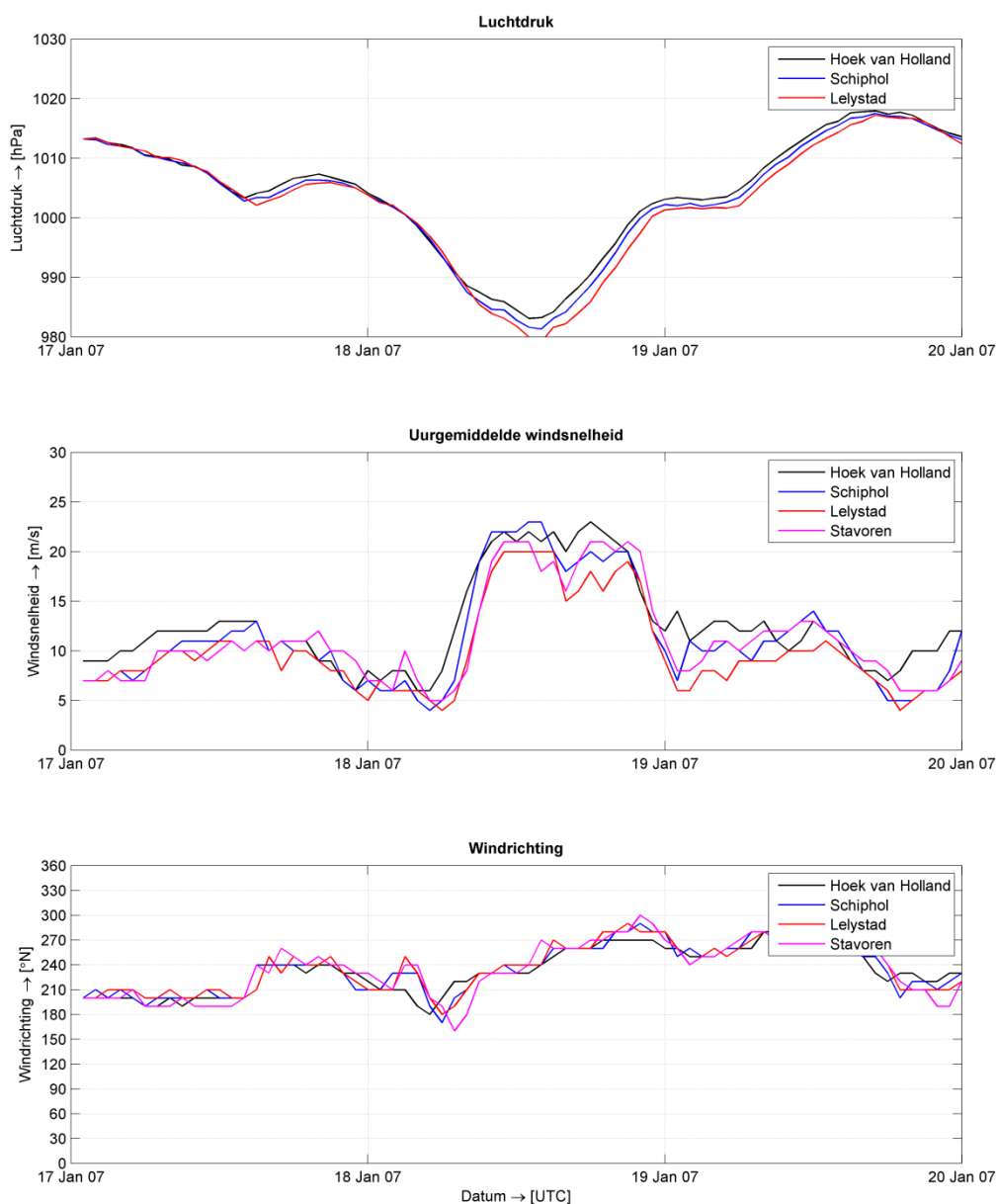
Figuur C.18 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kadoelen.



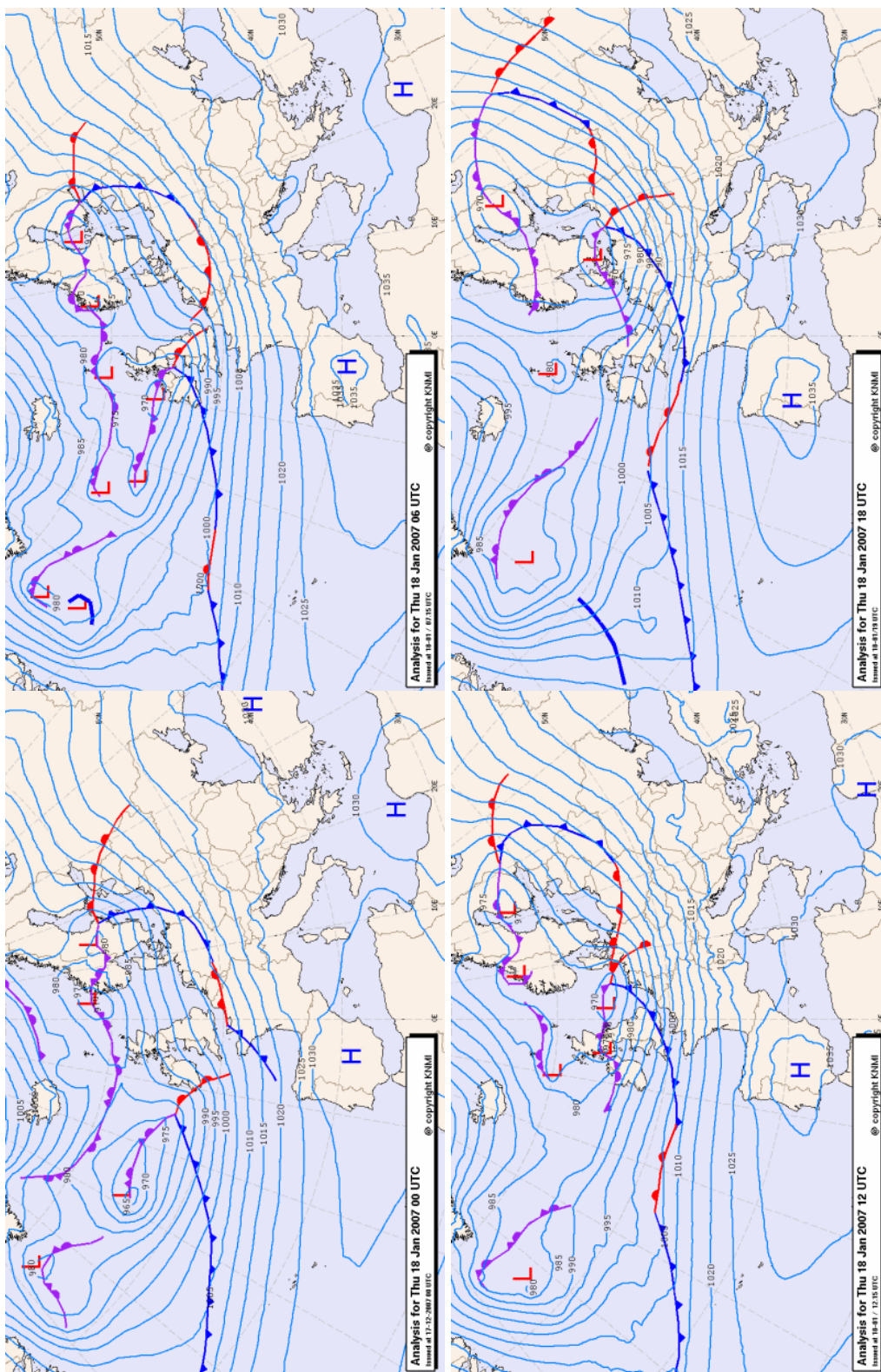
Figuur C.19 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Genemuiden.

D Weerkaarten, satellietbeelden en meetsignalen

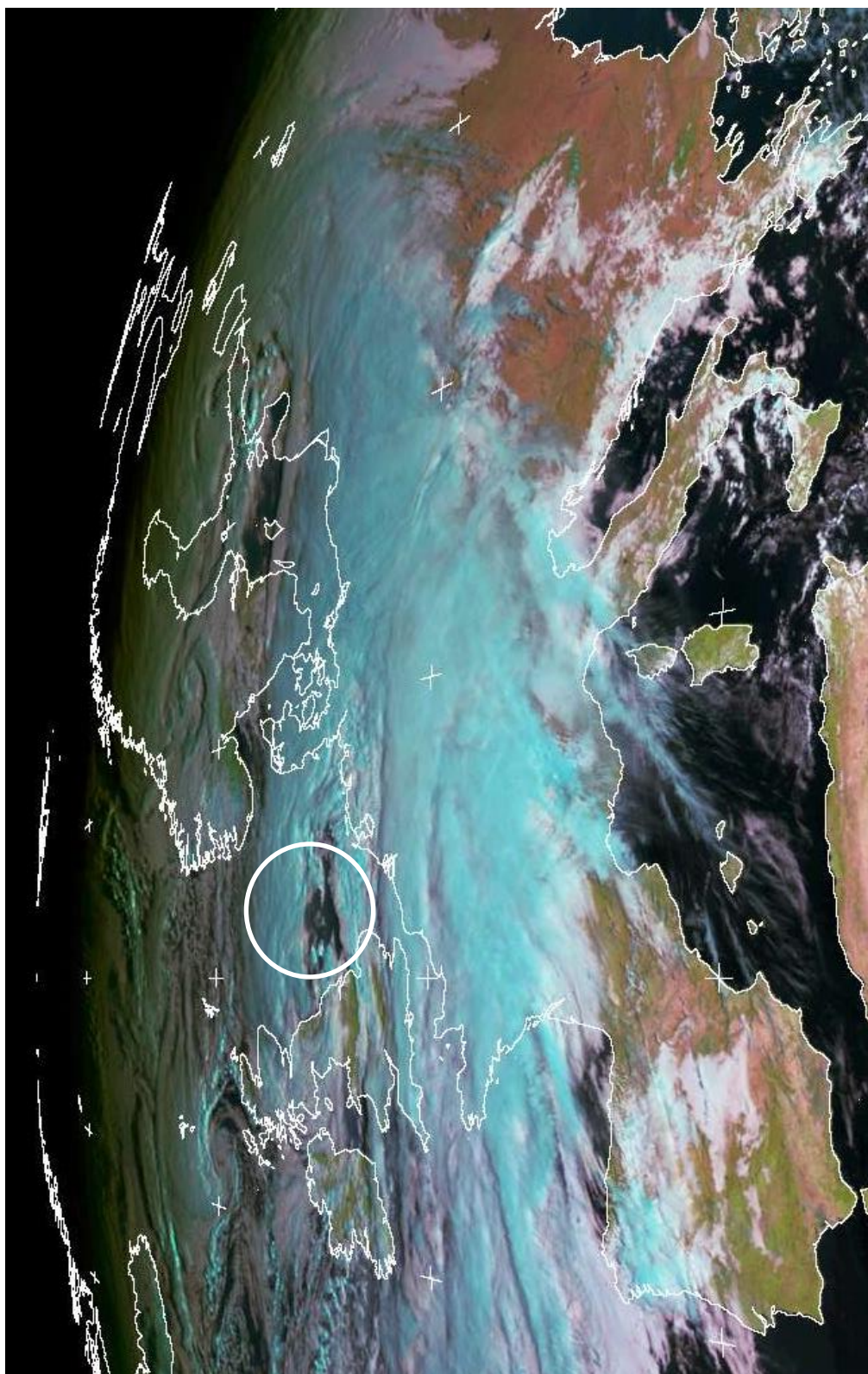
D.1 Storm Kyrill – 18 januari 2007



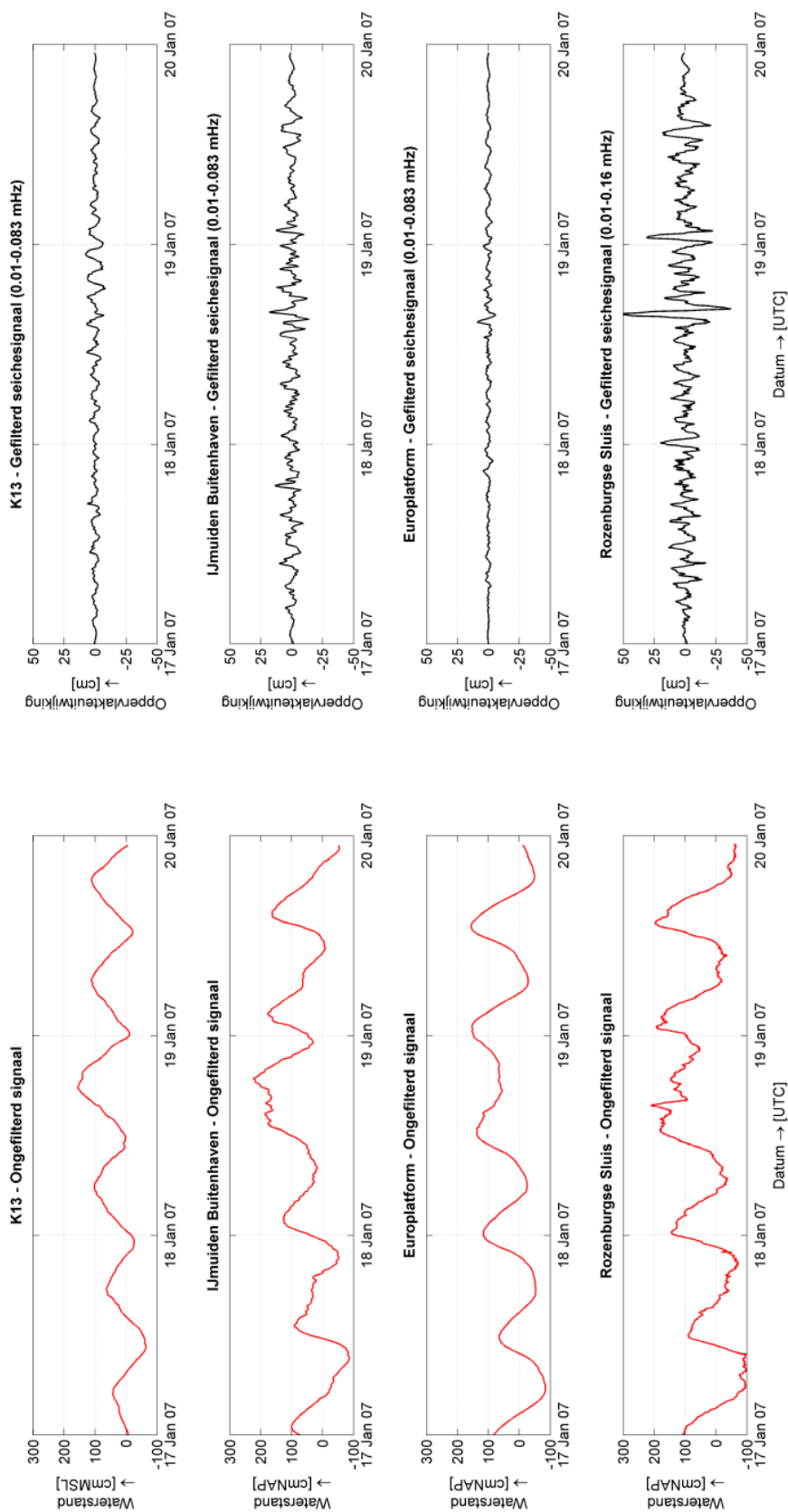
Figuur D.1 Meteo-metingen periode 17-01-2007 tot en met 19-01-2007 (bron: KNMI).



Figuur D.2 Weerkaarten behorende bij storm Kyrill op 18-01-2007 (bron: KNMI).

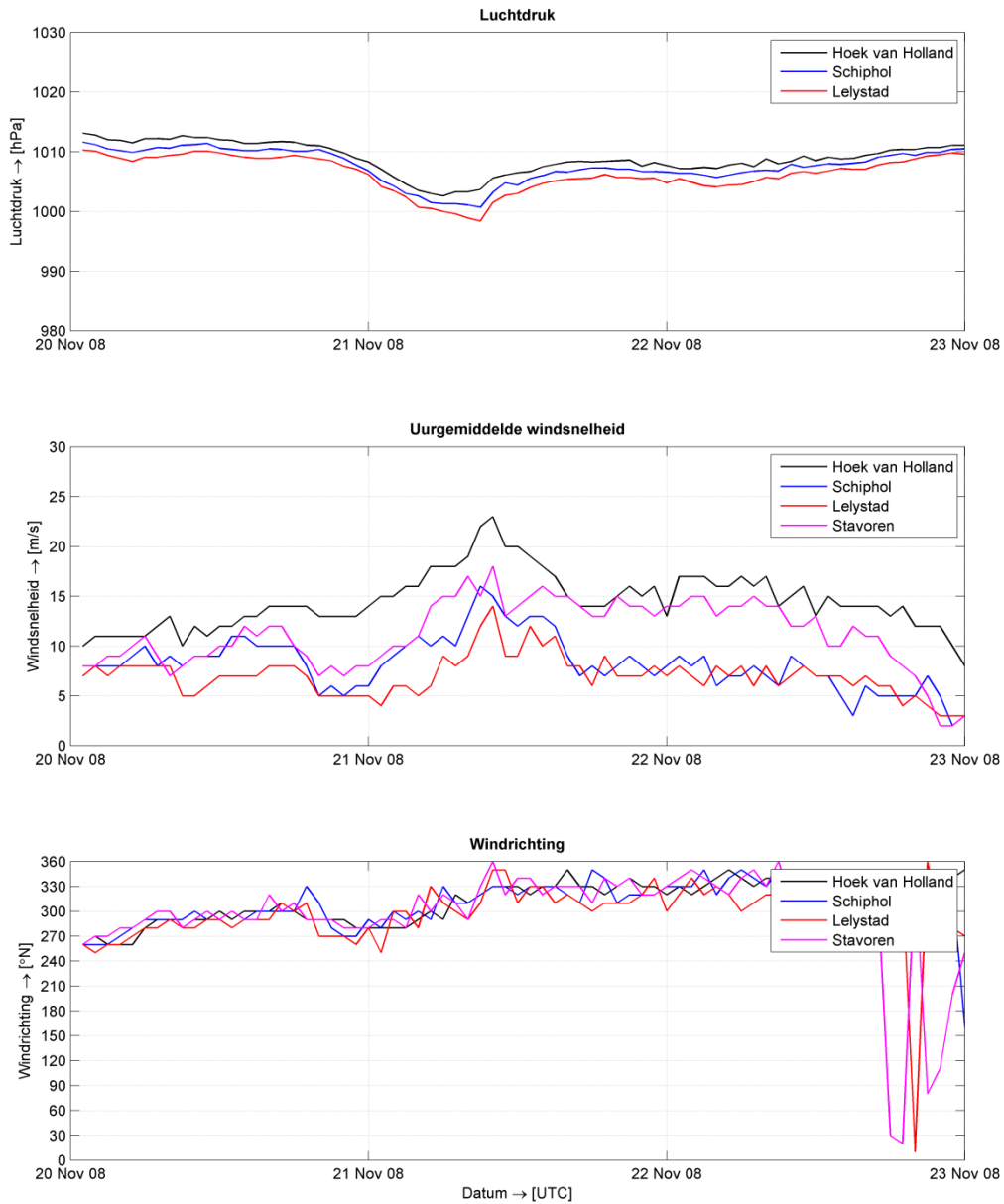


Figuur D.3 Satellietfoto Europa 18-01-2007 12 UTC. De kern van het lagedrukgebied is zichtbaar op de Noordzee tussen Nederland en Groot-Brittannië (bron: EUMETSAT, NERC Satellite Receiving Station, University of Dundee).

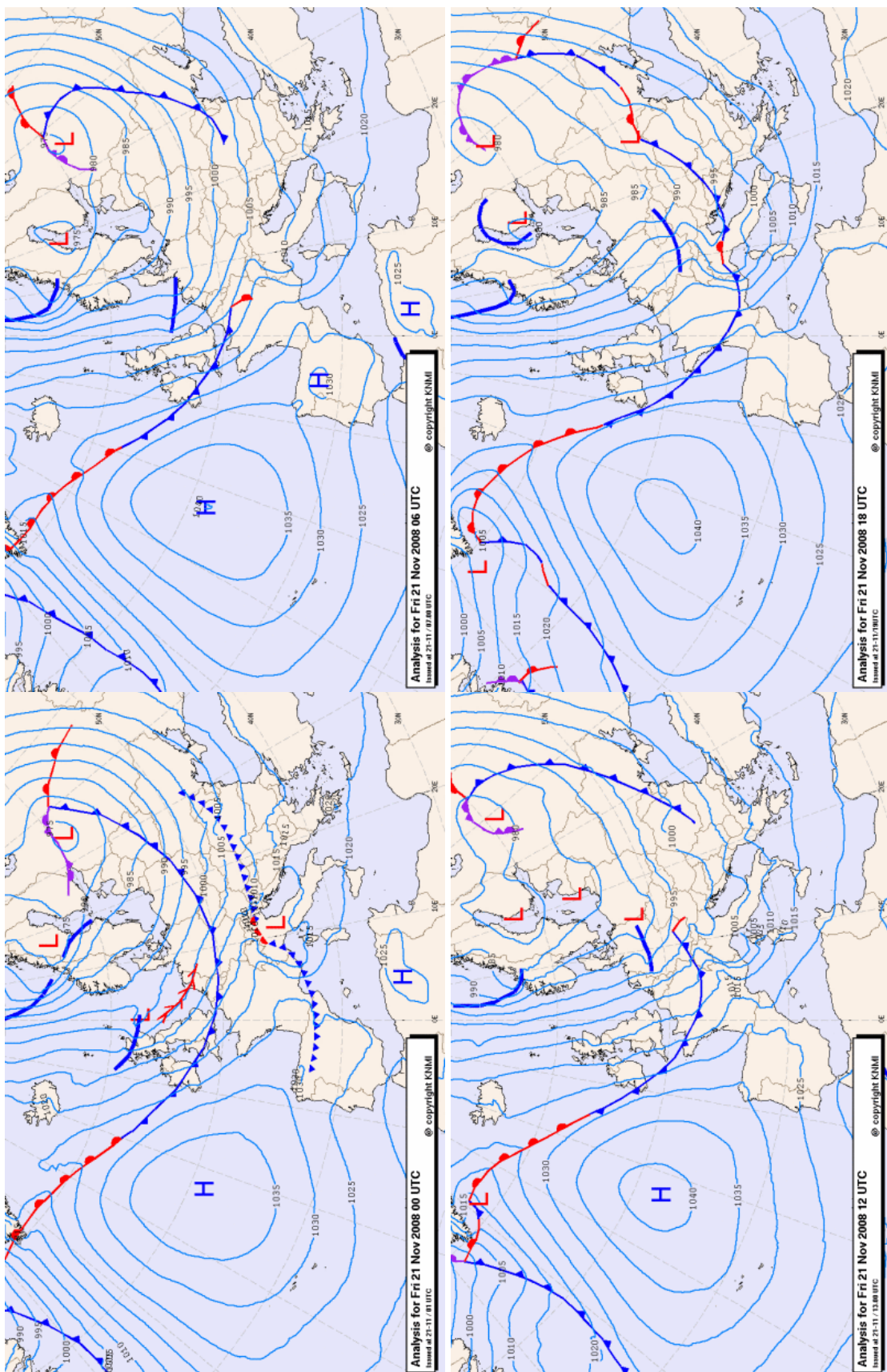


Figuur D.4 (Gefilterde) meetsignalen waterstand meetlocaties Platform K13a, IJmuiden Buitenhaven, Europlatform en Rozenburgse Sluis 17-20 januari 2007 (bron: RWS: Waterbase en HbR: Meetnet Rotterdam).

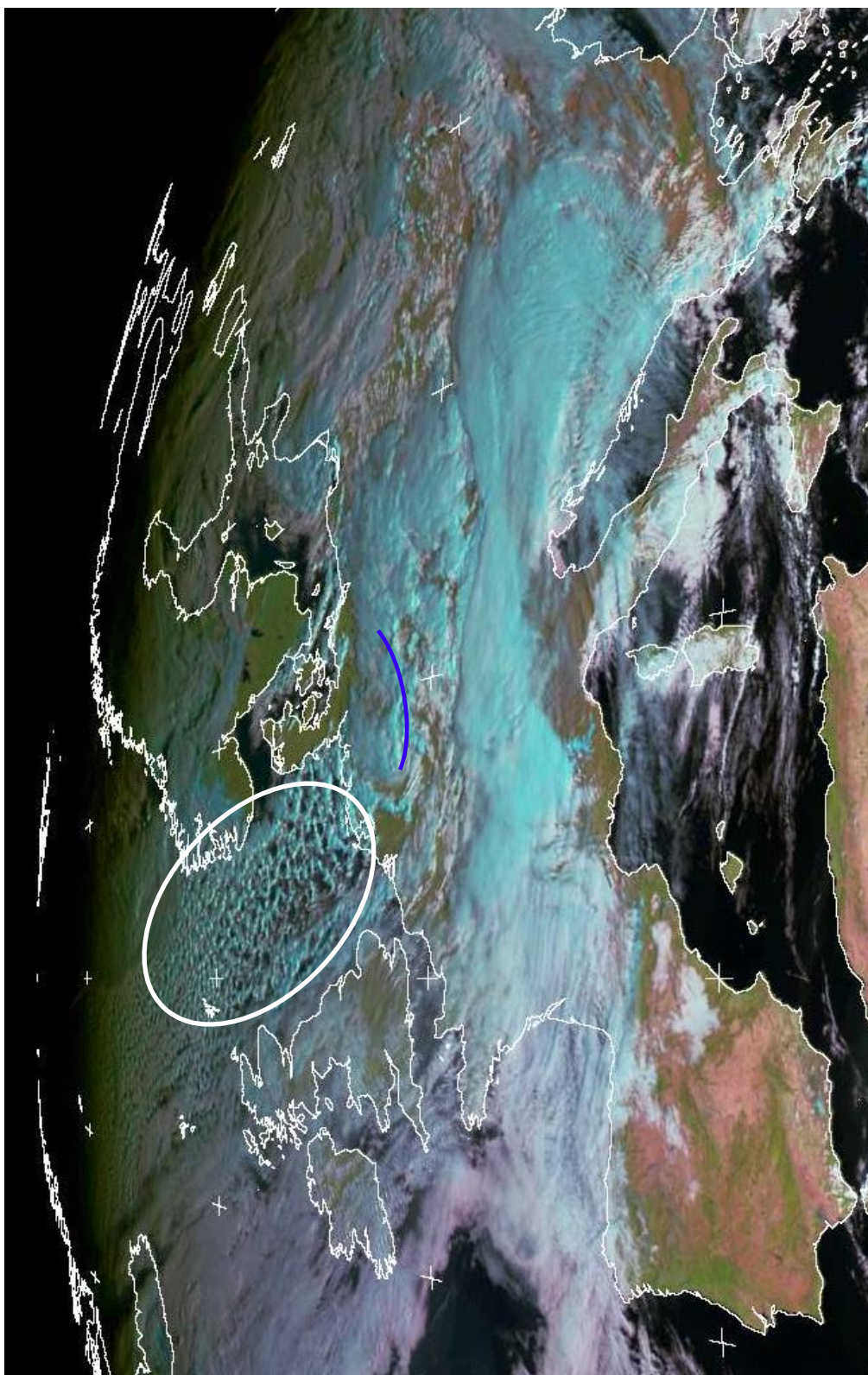
D.2 Polar outbreak – 21 november 2008



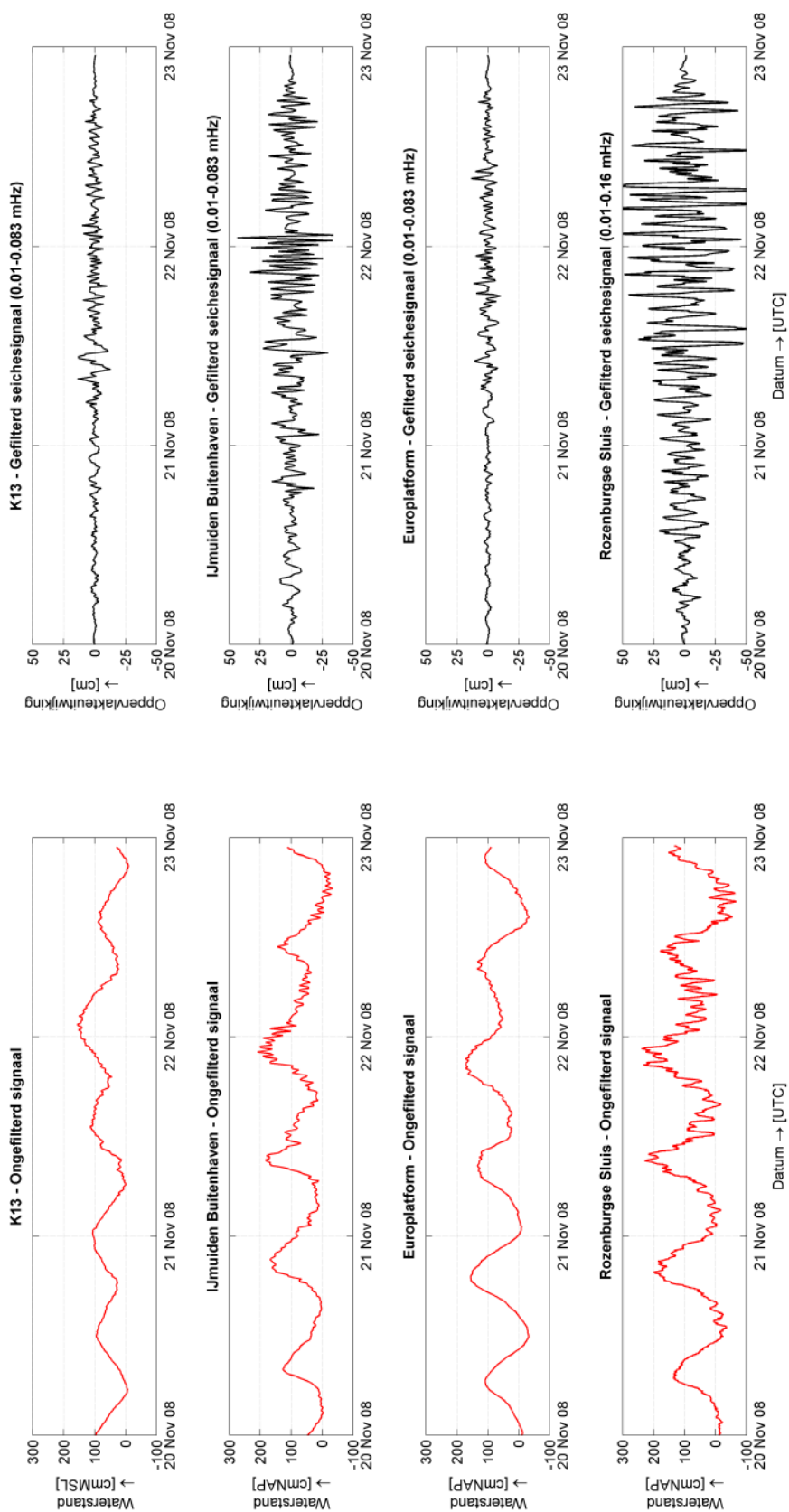
Figuur D.5 Meteo-metingen periode 20-11-2008 tot en met 22-11-2008 (bron: KNMI).



Figuur D.6 Weerkaarten behorende bij de polar outbreak op 21-11-2008 (bron: KNMI).

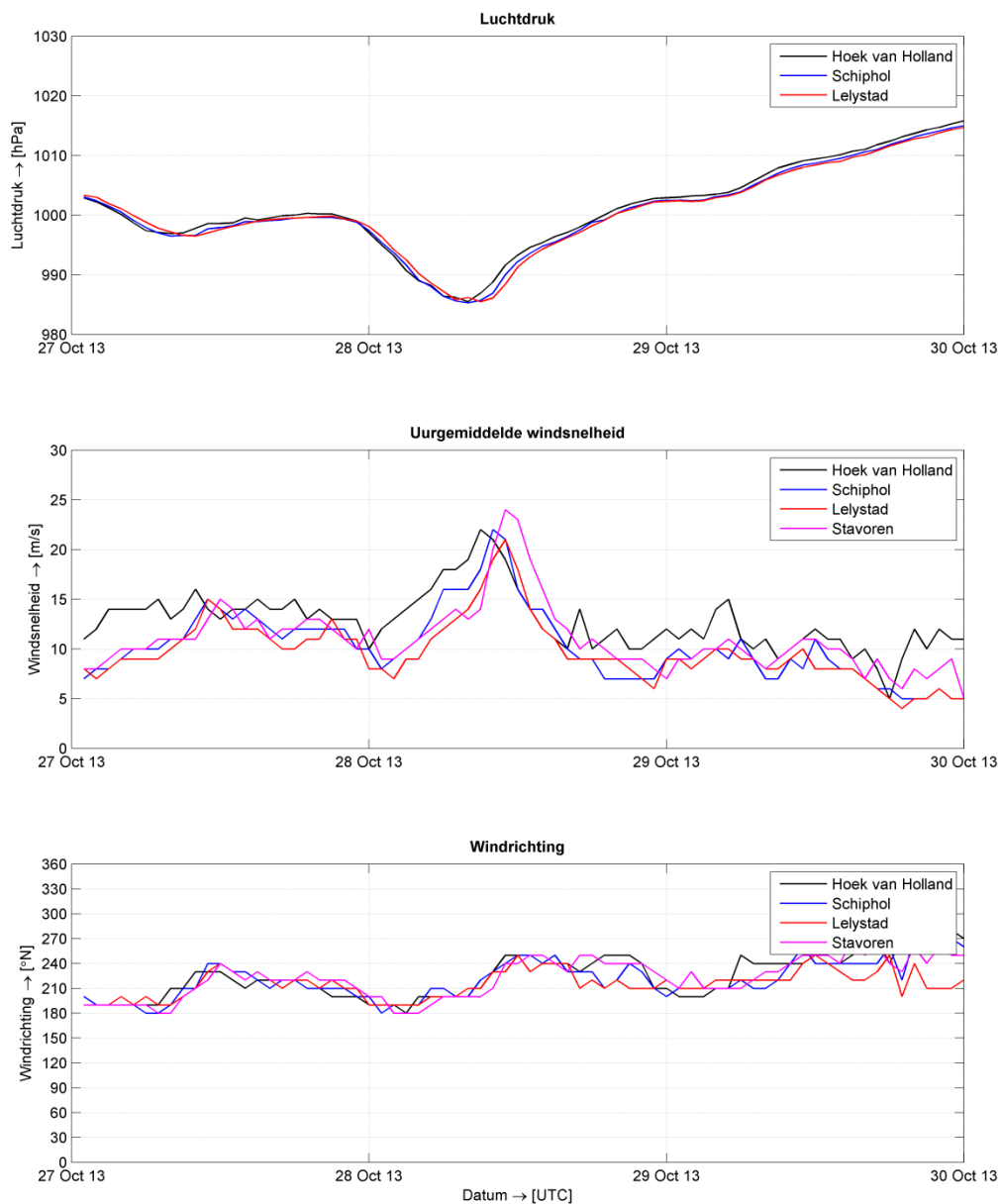


Figuur D.7 Satellietfoto Europa 21-11-2008 12 UTC. De open convectiecellen in het gebied met koude lucht (polar outbreak) boven de Noordzee zijn zichtbaar op de foto. Een trog heeft op het moment van de afbeelding net Nederland gepasseerd. (bron: EUMETSAT, NERC Satellite Receiving Station, University of Dundee).

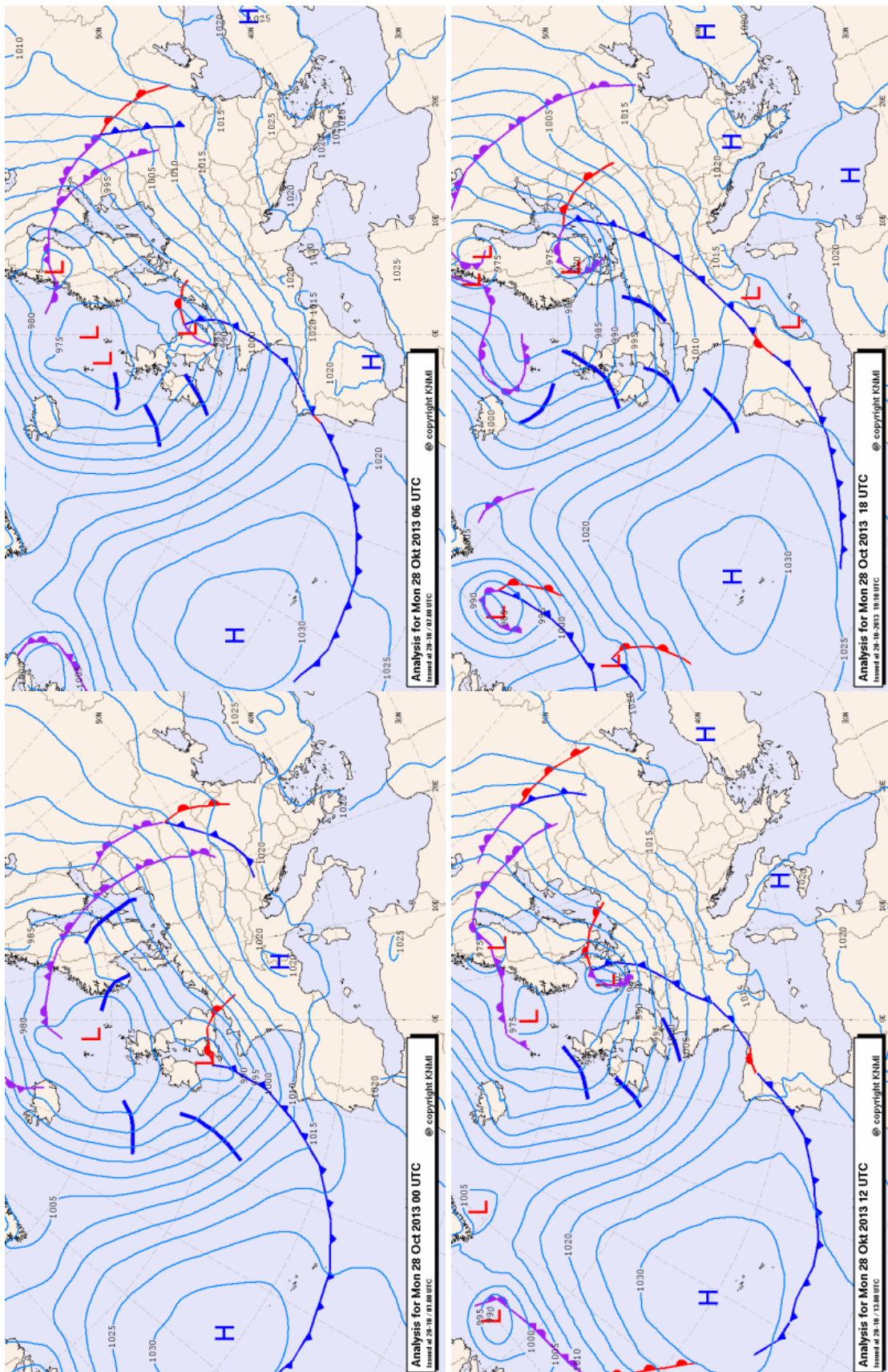


Figuur D.8 (Gefilterde) meetsignalen waterstand meetlocaties Platform K13a, IJmuiden Buitenhaven, Europlatform en Rozenburgse Sluis 20-23 november 2008 (bron: RWS: Waterbase en HbR: Meetnet Rotterdam).

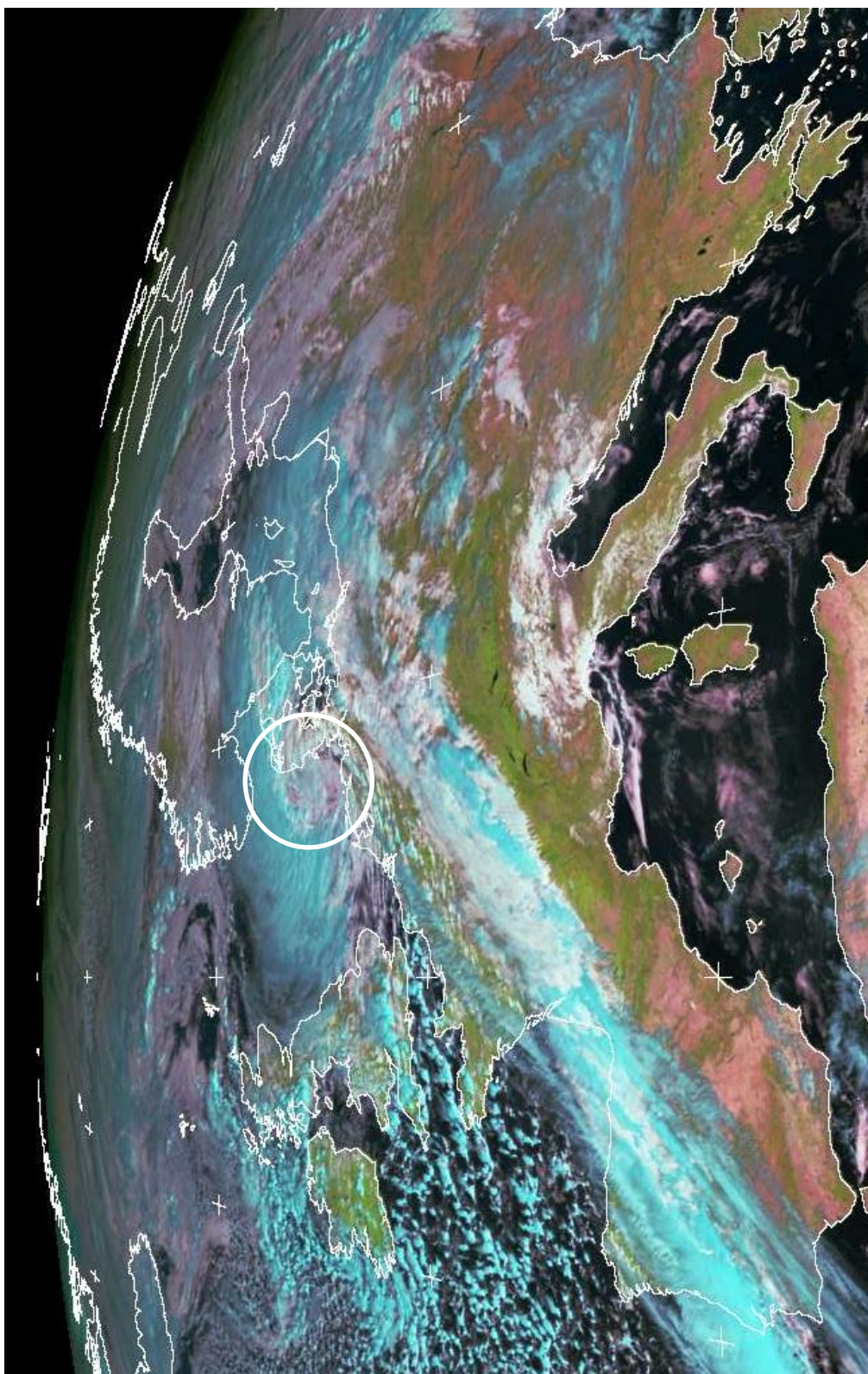
D.3 Herfststorm – 28 oktober 2013



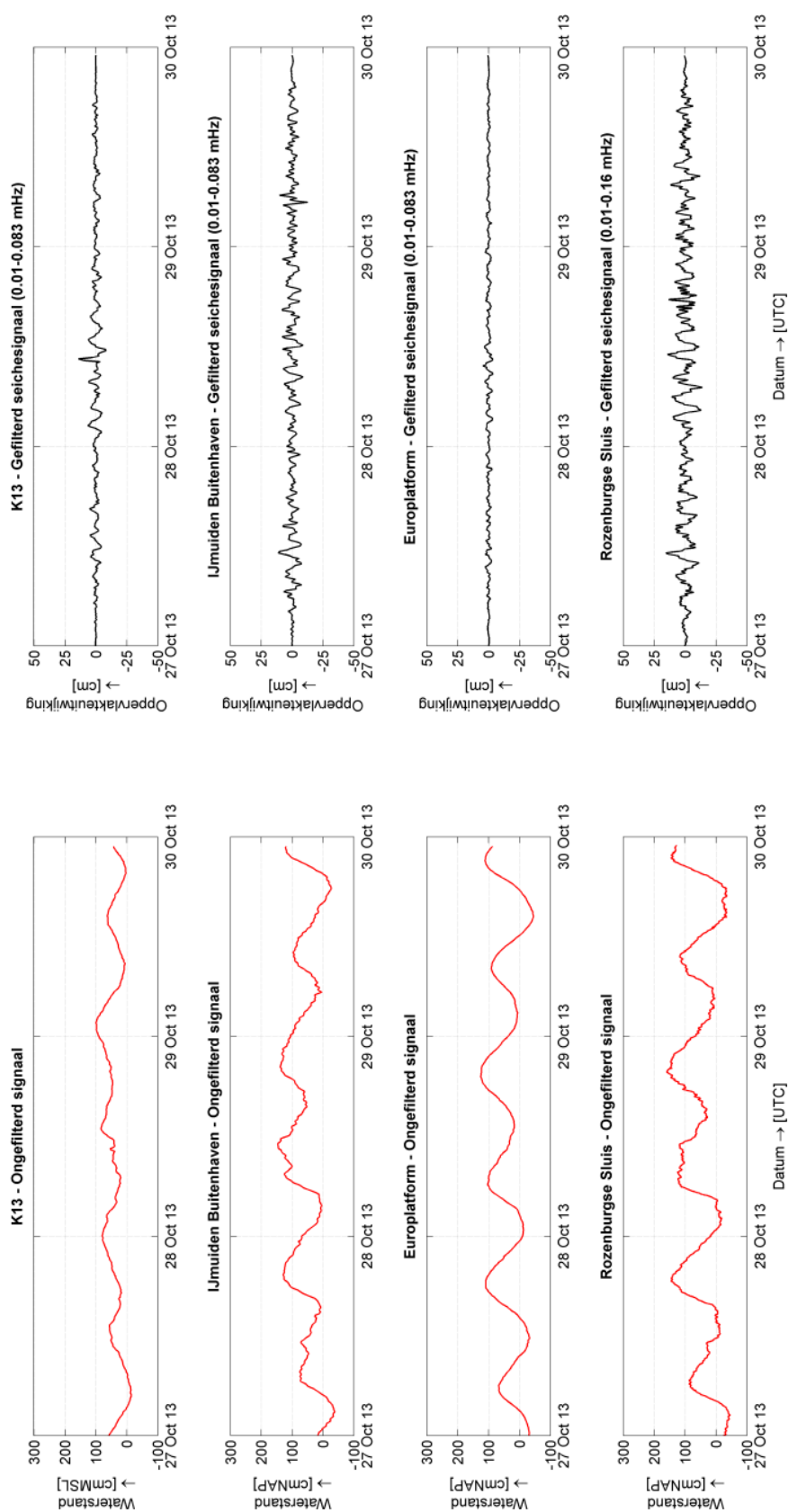
Figuur D.9 Meteo-metingen periode 27-10-2013 tot en met 29-10-2013 (bron: KNMI).



Figuur D.10 Weerkaarten behorende bij de Herfststorm Christian/St Jude op 28-10-2013 (bron: KNMI).

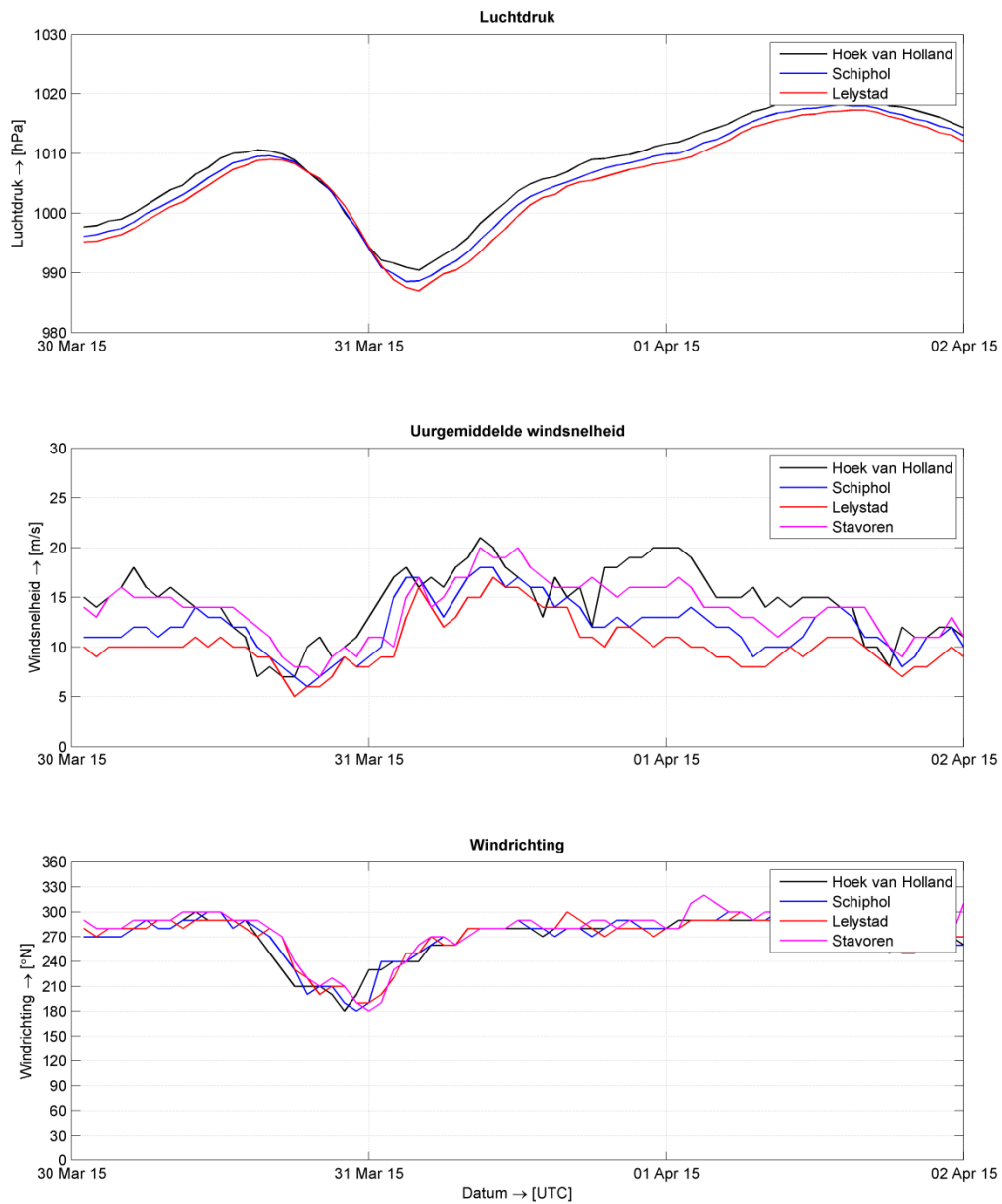


Figuur D.11 Satellietfoto Europa 28-10-2013 12 UTC. De kern van het lagedrukgebied is zichtbaar in de Duitse Bocht tussen Nederland en Denemarken (bron: EUMETSAT, NERC Satellite Receiving Station, University of Dundee).

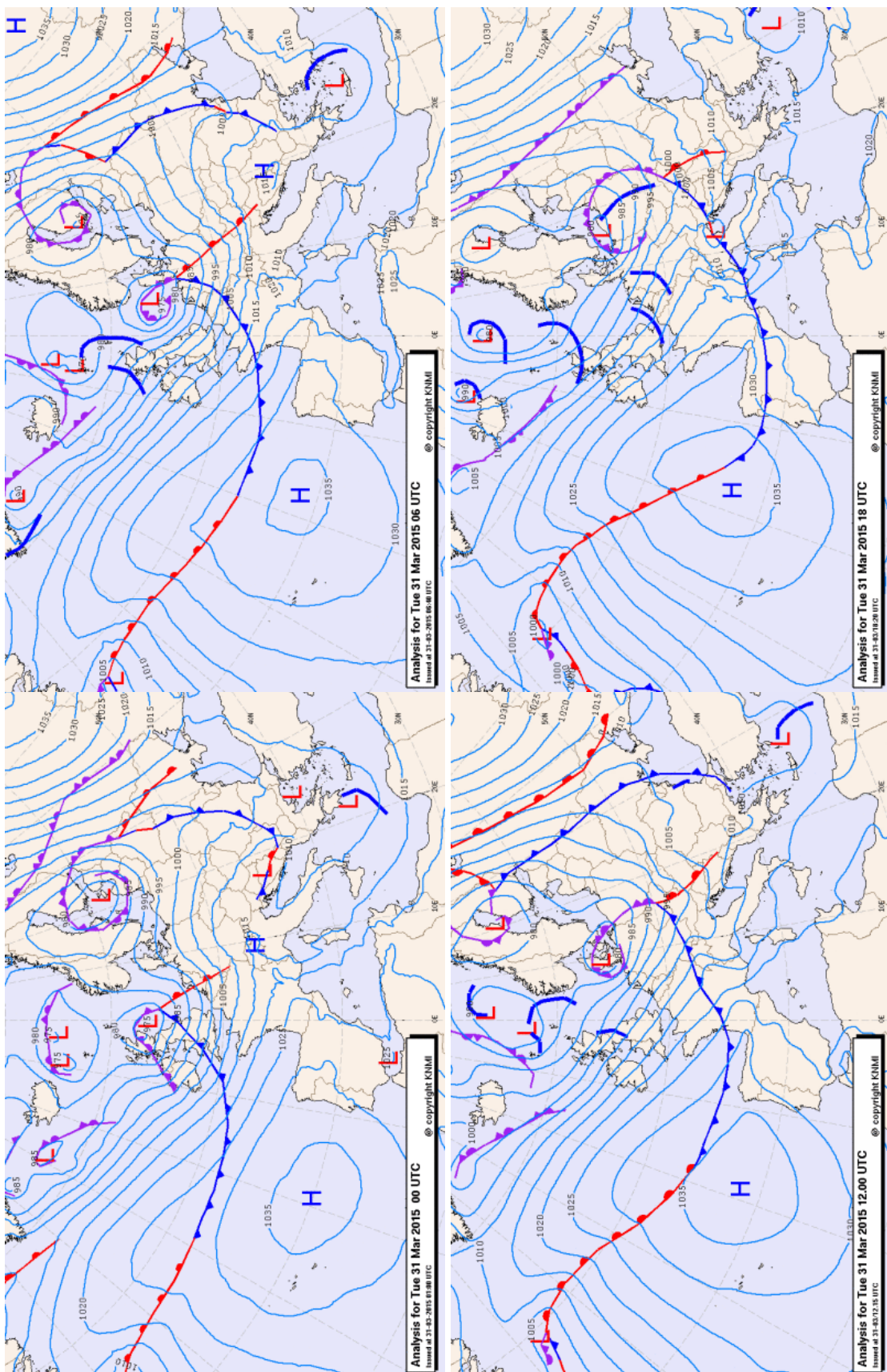


Figuur D.12 (Gefilterde) meetsignalen waterstand meetlocaties Platform K13a, IJmuiden Buitenhaven, Europlatform en Rozenburgse Sluis 27-30 oktober 2013 (bron: RWS: Waterbase en HbR: Meetnet Rotterdam).

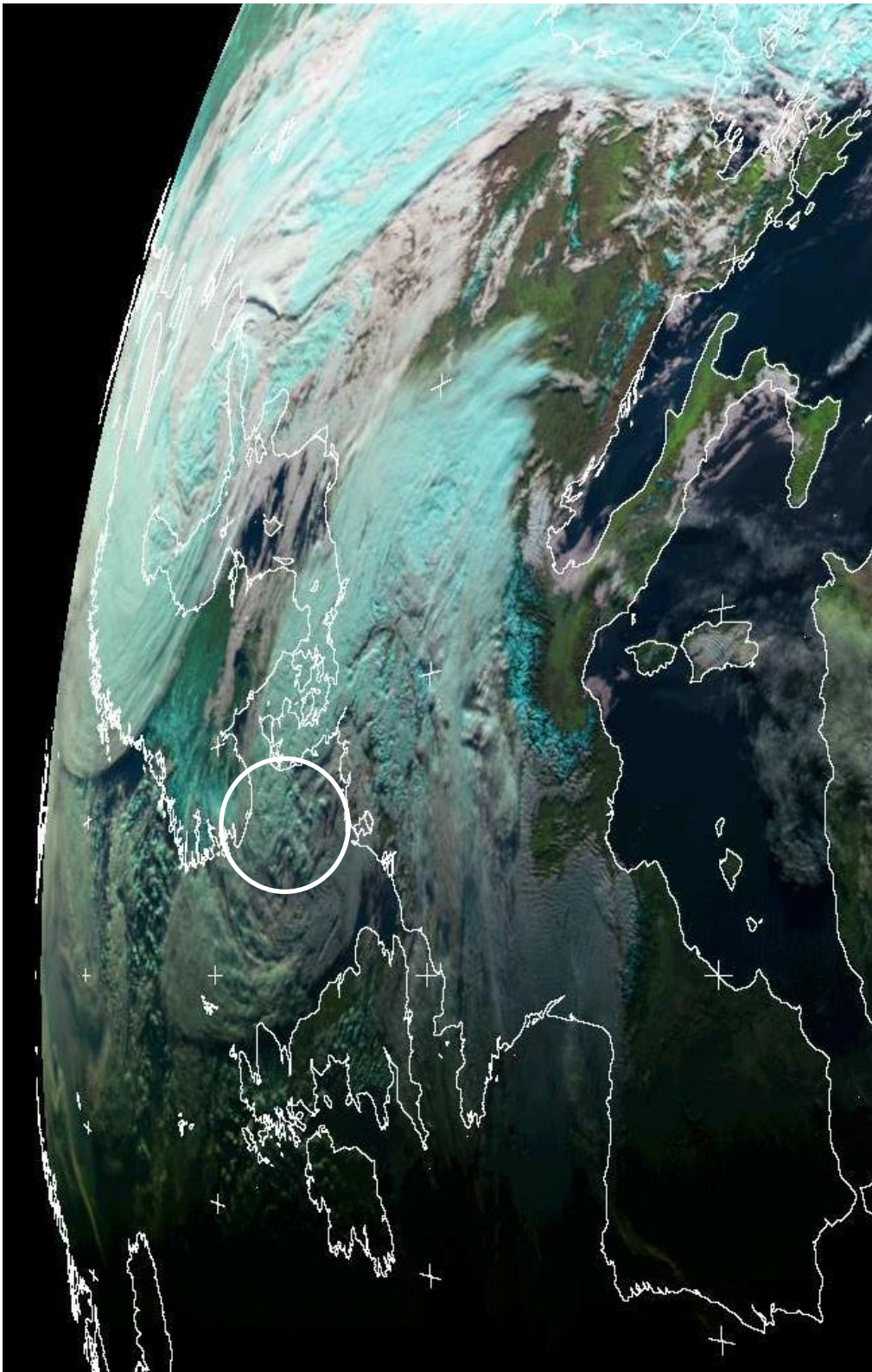
D.4 Lentestorm – 31 maart 2015



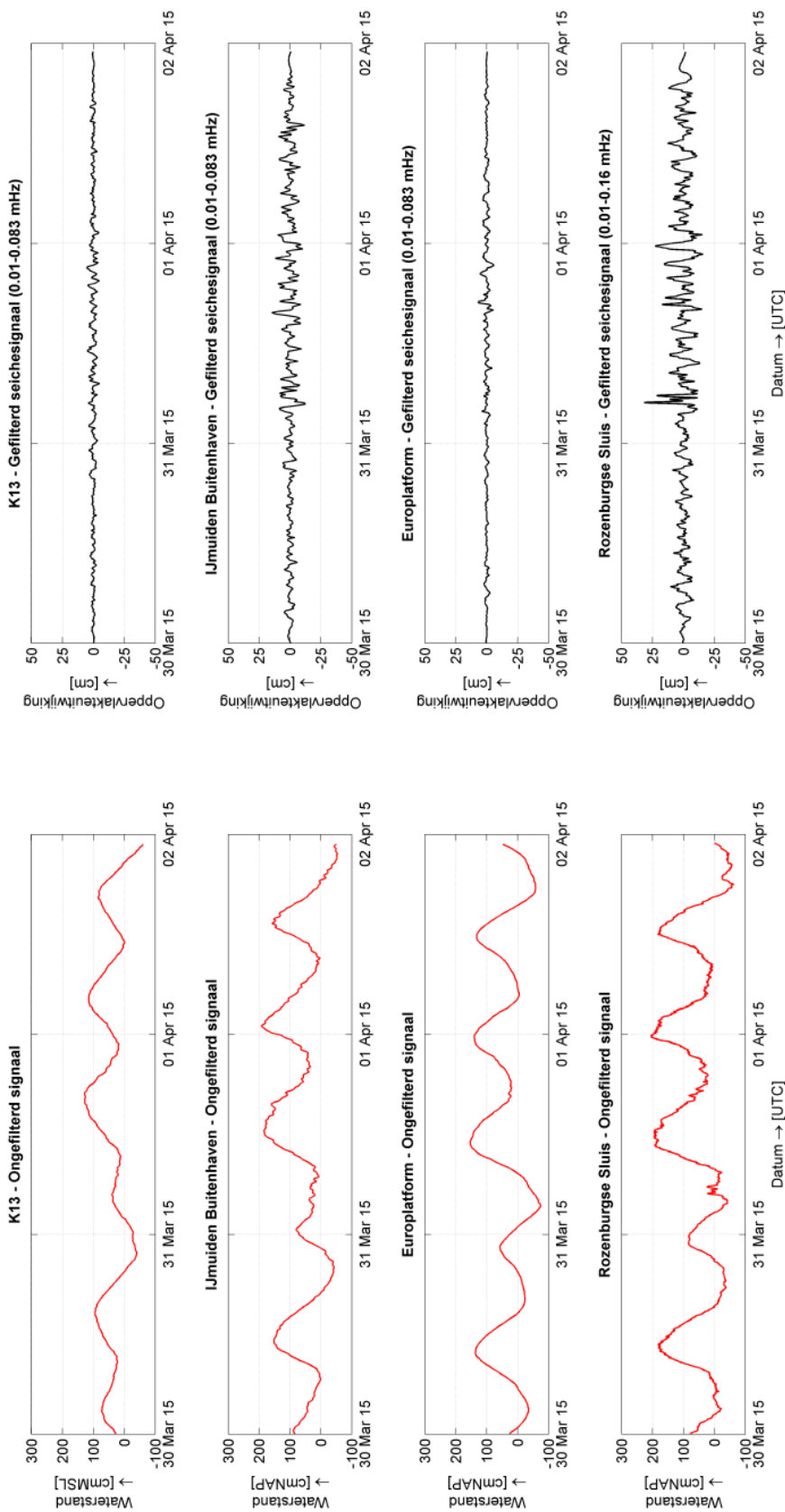
Figuur D.13 Meteo-metingen periode 30-03-2015 tot en met 01-04-2015 (bron: KNMI).



Figuur D.14 Weerkaarten behorende bij de Lentestorm op 31-03-2015 (bron: KNMI).



Figuur D.15 Satellietfoto Europa 31-03-2015 06 UTC. De kern van het lagedrukgebied is zichtbaar op de Noordzee tussen Nederland en Noorwegen (bron: EUMETSAT, NERC Satellite Receiving Station, University of Dundee).



Figuur D.16(Gefilterde) meetsignalen waterstand meetlocaties Platform K13a, IJmuiden Buitenhaven, Europlatform en Rozenburgse Sluis 30 maart – 2 april 2013 (bron: RWS: Waterbase en HbR: Meetnet Rotterdam).