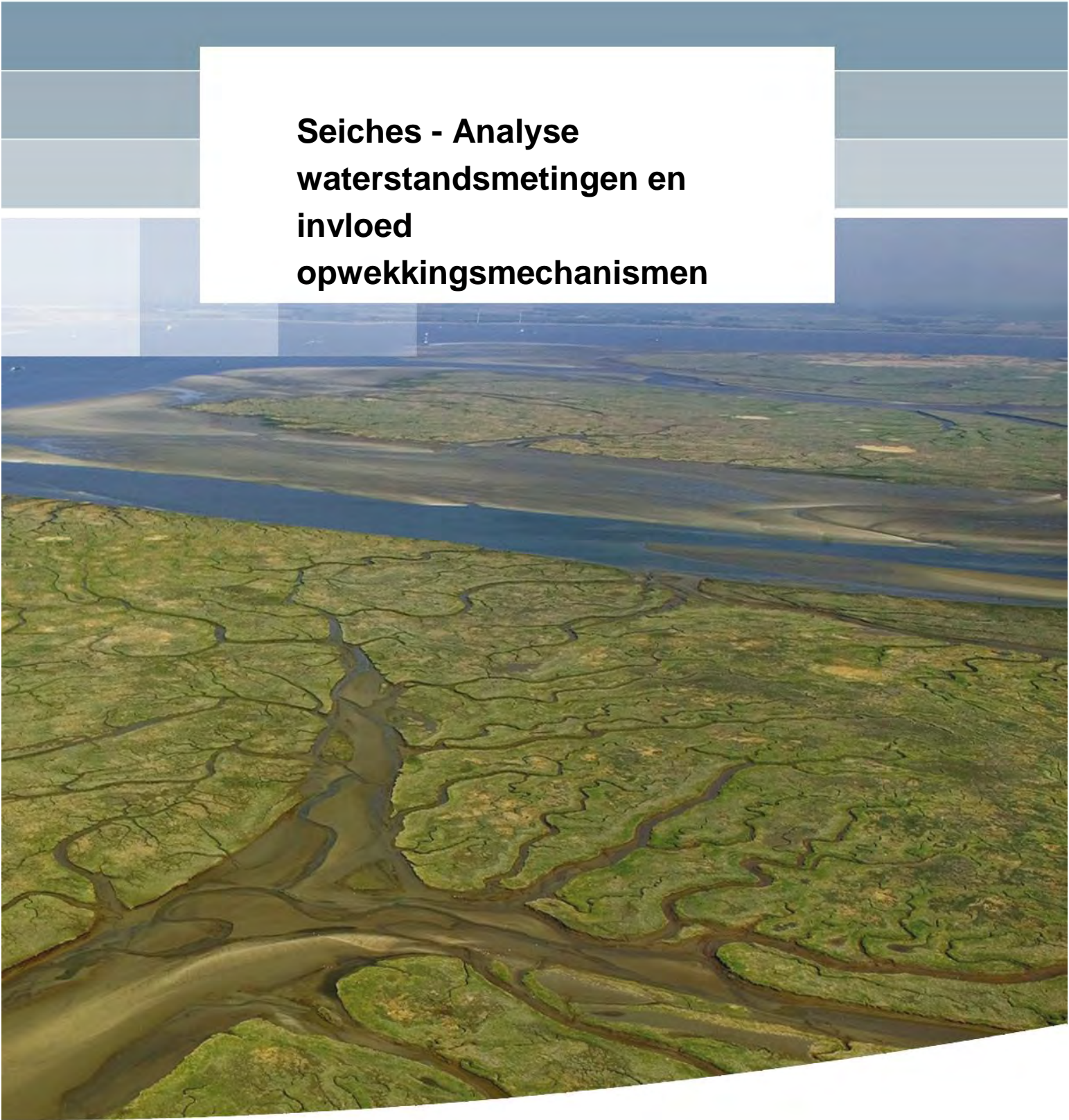


**Seiches - Analyse
waterstandsmetingen en
invloed
opwekkingsmechanismen**



**Seiches - Analyse
waterstandsmetingen en invloed
opwekkingsmechanismen tijdens
extremen**

Bas Reijmerink

11200537-009

Titel

Seiches - Analyse waterstandsmetingen en invloed opwekkingsmechanismen tijdens extremen

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	11200537-009	11200537-009-ZWS-0001	47

Trefwoorden

Seiches, halingen, koufronten, troggen, drukstoten, windsprongen

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. In 2016 zijn drie onderdelen uit dat Plan van Aanpak uitgevoerd en de resultaten daarvan zijn beschreven in Deltares (2016). Dit rapport beschrijft de uitvoering van de in 2017 uitgevoerde taken binnen het voorgenoemde project. Het gaat hierbij om de volgende taken:

- 1 Analyse van waterstandsmetingen op de voor seiches nog niet eerder beschouwde wateren binnen Nederland, in aanvulling op eerdere analyses. Bovendien is de statistische analyse uit voorgaande projectfasen uitgebreid voor nieuwe en in voorgaande studies beschouwde locaties.
- 2 Uitvoeren en analyseren van principesommen van de invloed van opwekkingsmechanismen van seiche-achtige verschijnselen op het IJsselmeergebied tijdens extreme omstandigheden.

De eerste taak is een direct vervolg op de werkzaamheden uit 2016 en hiervoor zijn data-filtering, energiespectra en andere data-analysetechnieken ingezet. Voor de uitwerking van de tweede taak is gebruikt gemaakt van een numeriek stromingsmodel (WAQUA) van het IJsselmeergebied en de IJssel- en Vechtdelta.

De resultaten van Taak 1 bestaan uit typische waarden voor seiche-parameters voor verschillende locaties op de beschouwde waterlichamen (hoogte, periode, zie Tabel 2.2, 2.3 en 2.4). Ook is een eerste indicatie gegeven van de mogelijke relevantie van seiches voor de HR (Hydraulische Randvoorwaarden van primaire waterkeringen) op de beschouwde locaties, ten opzichte van andere fenomenen die bijdragen aan de lokale maatgevende waterstand, aan de hand van het waterstandsverhogende effect van seiches op hoogwaters, het zogenaamde netto seiche-effect (Tabel 3.1). Deze uitkomsten geven een indicatie van de lokale maatgevende seiche-waarden, maar nadere analyse van deze uitkomsten is benodigd voordat deze ten bate voor de HR ingezet kunnen (onder andere om mogelijke dubbeltelling van waterstandsverhogende effecten te voorkomen).

De resultaten van Taak 2 geven inzicht in welke meteorologische fenomenen de belangrijkste invloed hebben op het initiëren van seiches (of seiche-achtige fenomenen) tijdens extreme condities (HR). Het gaat daarbij om extreme condities met onder andere zeer hoge treksnelheden (passeersnelheden) van weersystemen en meteorologische verstoringen als koufronten. Zij geven aan dat onder die condities vooral plotselinge veranderingen in de windsnelheid en –richting zorgen voor schommelingen in de waterstand, terwijl drukpulsen bij hoge treksnelheden slechts een beperkte invloed hebben. De sterkte van de wind na het initiëren van een seiche heeft een belangrijke invloed op de tijdsduur van de seiche. Hoe sterker de wind na het passeren van een verstoring, des te sneller dat een seiche wordt "gedempt" omdat het systeem onder die condities sneller richting een nieuwe evenwichtssituatie wordt gedwongen.

Titel

Seiches - Analyse waterstandsmetingen en invloed opwekkingsmechanismen tijdens extremen

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Project

11200537-009

Kenmerk

11200537-009-ZWS-0001

Pagina's

47

De volgende stap in de analyses zou kunnen bestaan uit het simuleren van meer realistische en complete wind- en drukvelden, bijvoorbeeld op basis van lokale meetreeksen. Daaruit zou dan afgeleid kunnen worden in hoeverre de meest relevante meteorologische aspecten op dit moment in de meteorologische modellen opgelost worden en of een directe koppeling van een hydrodynamisch model met een dergelijk weersmodel op dit moment al voldoende toegevoegde waarde biedt of dat een dergelijke aanpak op termijn pas uitgewerkt zou kunnen worden.

Referenties

2017 HV02 - PvA Versterking onderzoek waterveiligheid v2.01

Compact werkplan uitvoering taken "Seiches VOW 2017", Versie 2, 23 februari 2017

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
Concept	aug 2017	Bas Reijmerink		Martijn de Jong Joost Beckers		KlaasJan Bos	
Definitief	okt 2017	Bas Reijmerink		Martijn de Jong Joost Beckers		KlaasJan Bos	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Projectachtergrond	1
1.2	Recente projecthistorie	1
1.2.1	Werkzaamheden 2015	1
1.2.2	Werkzaamheden 2016	3
1.2.3	Werkzaamheden 2017	3
1.3	Studiedoel	3
1.4	Aanpak seiches onder KPP-VOW 2017	4
1.4.1	Taak 1, analyse seiches in waterstandsmetingen op aanvullende locaties	4
1.4.2	Taak 2, principesommen opwekkingsmechanismen tijdens extremen	6
1.5	Indeling rapport	6
2	Analyse waterstandsmetingen watersystemen	7
2.1	Context	7
2.2	Overzicht meetpunten	7
2.3	Fourier-, wavelet- en extreme-waarde-analyse	9
2.4	Overzicht karakteristieke waardes	12
2.5	Discussie uitkomsten analyse waterstandsmetingen	19
3	Indicatief netto-seiche-effect per locatie	21
3.1	Toelichting NSE-methodes	21
3.1.1	Methode 1: Volledig statistische benadering	21
3.1.2	Methode 2: Analytische statistische benadering	23
3.1.3	Getallenvoorbeelden bij methodes	24
3.2	Resultaten en toelichting	25
3.3	Opmerkingen in relatie tot het toepassen van resultaten	26
3.4	Afronding Werkpakket B1 uit Deltares	26
4	Principesommen van invloed opwekkingsmechanismen op seiches tijdens extreme condities	28
4.1	Context	28
4.2	Korte beschrijving WAQUA-model en rundefinities	28
4.2.1	WAQUA-model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht	28
4.2.2	Rundefinities principesommen	29
4.3	Forceringen en resultaten	30
4.3.1	Runs 1 en 2: Kortdurende drukstoot	30
4.3.2	Runs 3, 4 en 5: Scherpe windsprong	34
4.3.3	Run 6: Windruiming	39
4.3.4	Run 7: Windstoot	41
4.4	Vergelijking uitkomsten met eerdere studies	43
5	Conclusies en vooruitblik	44
5.1	Hoofdconclusies	44
5.2	Vooruitblik van mogelijk vervolg (onder KPP-VOW 2018)	46
	Referenties	47

Bijlage(n)

A Resultaten wavelet-analyses per meetlocatie	A-1
A.1 Westerschelde	A-1
A.1.1 Vlissingen	A-1
A.1.2 Terneuzen	A-4
A.1.3 Hansweert	A-7
A.1.4 Bath	A-10
A.2 Oosterschelde	A-13
A.2.1 Roompot Binnen	A-13
A.2.2 Kats Buiten	A-16
A.2.3 Krammersluizen West	A-19
A.2.4 Yerseke	A-22
A.2.5 Marollegat	A-25
A.3 Veerse Meer	A-28
A.3.1 Sluis Kats Binnen (VM3)	A-28
A.3.2 Oranjeplaat (VM4)	A-31
A.3.3 Schotsman (VM5)	A-34
A.4 Grevelingenmeer	A-37
A.4.1 Bommenede	A-37
A.4.2 Hevel Grevelingen West	A-40
A.5 Volkerak-Zoommeer	A-43
A.5.1 Rak Zuid	A-43
A.5.2 Volkerak Galathea	A-46
A.5.3 Nieuw-Vossemeer	A-49
A.5.4 Bathse Spuikanaal Inloop	A-52
A.6 Haringvliet en Hollands Diep	A-55
A.6.1 Hellevoetsluis	A-55
A.6.2 Rak Noord	A-58
A.6.3 Moerdijk	A-61
A.6.4 Deeneplaat	A-64
A.6.5 Werkendam Buiten	A-67
A.7 Hollandsche IJssel	A-70
A.7.1 Krimpen aan den IJssel	A-70
A.8 Waddenzee	A-73
A.8.1 Den Helder	A-73
A.8.2 Den Oever Buiten	A-76
A.8.3 Kornwerderzand Buiten	A-79
A.8.4 Harlingen	A-82
A.8.5 Lauwersoog	A-85
A.8.6 Schiermonnikoog	A-88
A.8.7 Nes	A-91
A.8.8 West-Terschelling	A-94
A.8.9 Vlieland Haven	A-97
A.8.10 Oudeschild	A-100
A.9 Eems-Dollard	A-103
A.9.1 Eemshaven	A-103
A.9.2 Delfzijl	A-106
A.9.3 Nieuw Statenzijl	A-109
B Extreme-waarde fits per meetlocatie	B-1

B.1	Westerschelde	B-1
B.2	Oosterschelde	B-3
B.3	Veerse Meer	B-5
B.4	Grevelingenmeer	B-7
B.5	Volkerak-Zoommeer	B-8
B.6	Haringvliets en Hollands Diep	B-10
B.7	Hollandsche IJssel	B-13
B.8	Waddenzee	B-14
B.9	Eems-Dollard	B-24
B.10	IJsselmeer	B-25
B.11	Markermeer	B-29
B.12	Randmeren	B-31
B.13	Ketelmeer	B-33
B.14	Zwarte Water	B-34
C	Waveletplots principesommen	C-1
C.1	Run 1	C-1
C.2	Run 2	C-5
C.3	Run 3	C-9
C.4	Run 4	C-13
C.5	Run 5	C-17
C.6	Run 6	C-21
C.7	Run 7	C-25

1 Inleiding

1.1 Projectachtergrond

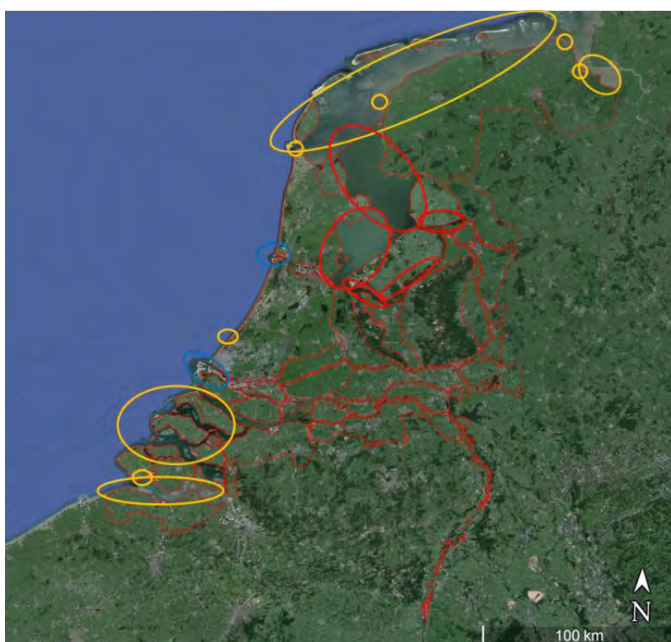
Deze studie is onderdeel van het project 'Kenniss Primaire Processen – Versterking Onderzoek' Waterveiligheid (KPP-VOW). Rijkswaterstaat wil met dit project bijdragen aan verbeteringen in het primaire proces rondom waterveiligheid. Dat kan worden bereikt door kostenbesparingen bij aanleg, beheer en onderhoud, 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 watersysteem waarin het seiche optreedt. Dit soort lange golven kan de maatgevende waterstand en mogelijk de faalmechanismen van waterkeringen beïnvloeden.

1.2 Recente projecthistorie

1.2.1 Werkzaamheden 2015

In 2015 is onder KPP-VOW een verkenning uitgevoerd naar seiches (Deltares, 2015). 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 (2015), 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, deels gebaseerd op eerdere modelstudies, op meetgegevens en op basis van expertschattingen. 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, 2015).

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 (2015) 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 (2015).

1.2.2 Werkzaamheden 2016

In 2016 waren de eerste twee onderdelen uit het plan opgepakt (Deltares, 2016), te weten: inventarisatie invloed seiches op faalmechanismen waterkeringen (werkpakket F1) en (beperkingen in) seiche-opwekking en response (werkpakket O1). Daarnaast was in overleg met RWS als derde taak een beknopte data-analyse uitgevoerd waarbij seiches en andere waterstandsschommelingen zijn geïdentificeerd en gekwantificeerd op locaties aan het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren rondom Flevoland (werkpakket B1 uit Deltares, 2016).

De hoofduitkomst van de eerstgenoemde taak was een overzicht van verschillende faalmechanismen met voor elk een inschatting in hoeverre seiches daarop van invloed kunnen zijn. Voor de tweede taak was in 2016 een kwalitatieve analyse gemaakt van de mogelijke beperking in de opwekkingskracht van seiches tijdens extreme stormen. Deze resultaten waren 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 de derde taak bestonden uit typische waarden voor seiche-parameters voor verschillende locaties langs de beschouwde meren (hoogte, periode). Daarnaast was voor het IJsselmeer en het Markermeer de verdeling van de gemiddelde seiche-amplitude over de kalendermaanden bepaald en was de correlatie tussen seiche-amplitude en gelijktijdig opgetreden wind-geïnduceerde opzet voor die gebieden geanalyseerd (Deltares, 2016).

1.2.3 Werkzaamheden 2017

In 2017 is in het kader van KPP-VOW verder gewerkt aan het onderwerp seiches. In de volgende secties staan de uitgevoerde werkzaamheden nader beschreven. Verdere taken uit het werkplan zullen mogelijk in latere jaren worden uitgewerkt, afhankelijk van keuzes door RWS in overleg met Deltares.

1.3 Studiedoel

In 2017 zijn binnen het onderdeel “Seiches” van KPP-VOW twee deeltaken uitgevoerd:

- 1 *Kwantificering van seiche-achtige verschijnselen op de voor seiches nog niet eerder beschouwde wateren binnen Nederland.*
Doel: Identificeren en kwantificeren van seiches en andere waterstandsschommelingen op diverse locaties in de voor seiches in het kader van KPP-VOW nog niet eerder beschouwde wateren in Nederland
- 2 *Uitvoeren van principesommen van de invloed van opwekkingsmechanismen van seiche-achtige verschijnselen op het IJsselmeergebied tijdens extreme omstandigheden met een numeriek stromingsmodel.*
Doel: Analyseren van de effectiviteit (resulterende sterkte) van opwekking van seiches tijdens extreme situaties op het IJsselmeergebied om na te gaan of die situaties afwijken van “reguliere” opwekkingssituaties.

De eerste taak is het vervolg van werkpakket B1 uit het Plan van Aanpak voor verdere seiche-studies (Deltares, 2015). De resultaten van de eerdere werkzaamheden uitgevoerd binnen dit werkpakket zijn terug te vinden in Deltares (2016). De tweede taak is te zien als een voorbereiding op werkpakket O2 uit Deltares (2015).

1.4 Aanpak seiches onder KPP-VOW 2017

- 1.4.1 Taak 1, analyse seiches in waterstandsmetingen op aanvullende locaties
- Binnen deze taak (Werkpakket B1 uit Deltares, 2015) heeft een tweetal hoofdactiviteiten plaatsgevonden. Allereerst is de seiche-gevoeligheid van de voor seiches nog niet eerder beschouwde wateren uitgewerkt (Zeeuwse wateren, Haringvliet, Hollands Diep, Hollandsche IJssel, Waddenzee en Eems-Dollard). Hierbij is grotendeels dezelfde aanpak gevolgd als in Deltares (2016). Als tweede stap is er voor alle locaties, dus ook voor die in 2016 voor relatief korte herhalingstijden al waren beschouwd, een indicatie gegeven van de sterkte van seiches voor langere herhalingstijden, samen met een inschatting van een onzekerheidsband. Als vervolgstap zijn deze seiche-karakteristieken, conform de compacte aanpak beschreven in Hoofdstuk 6 uit Deltares (2016), met locatie-specifieke informatie over de decimeringshoogte gecombineerd om tot een netto-seiche-effect per locatie/gebied te komen.

Het gaat in deze taak vooral om locaties/gebieden die relevant zijn voor de Hydraulische Randvoorwaarden van Nederland, maar ook om locaties die relevant zijn voor het tijdig sluiten van coupures en voor reguliere inzet van sluizen (vervalbelasting). Per waterlichaam/-systeem is gepoogd meerdere, ruimtelijk goed verdeelde meetpunten te beschouwen zodat de mogelijke ruimtelijke spreiding in de kenmerken van seiche-achtige verschijnselen (amplitude, periode) geduid kan worden. Er is hierbij uitgegaan van een zo recent mogelijke periode van 10 jaar aan meetgegevens (wanneer mogelijk is de periode januari 2006 tot en met december 2015 gebruikt) om zo aan te sluiten op het werk in 2016. Die aanpak maakt het mogelijk om kruisverbanden te leggen tussen seiche-episoden en om de seiche-waarden op de verschillende locaties consistent te kunnen vergelijken. Op basis van de geanalyseerde 10 jaar aan meetgegevens zijn indicaties gegeven van de sterkte van seiches voor langere herhalingstijden (tot 10.000 jaar), samen met een inschatting van de bijbehorende onzekerheidsband. Dit is een zeer grove extrapolatie¹. RWS heeft, in overleg met Deltares, er desondanks voor gekozen om deze extrapolatie te (laten) maken om zo een eerste koppeling te kunnen maken tussen resultaten uit deze en andere recente seiche-studies (2015-2016) en de herhalingstijden relevant voor de HR. Daarnaast is voor enkele punten een uitbreiding gemaakt naar een tijdreeks met meetdata van meer dan 10 jaar om zo te kunnen duiden wat het effect is van het meenemen van meer jaren aan meetdata op de afleiding/bepaling van seiche-sterktes voor langere herhalingstijden en op de grootte van de bijbehorende onzekerheidsbanden.

Na afstemming met RWS zijn de volgende meetlocaties per waterlichaam/-systeem beschouwd binnen Taak 1 van de huidige studie (in aanvulling op de lijst met locaties beschouwd in Deltares, 2016):

- Westerschelde
 - Vlissingen
 - Terneuzen
 - Hansweert
 - Bath
- Oosterschelde
 - Roompot Binnen
 - Kats Buiten
 - Krammersluizen West
 - Yerseke
 - Marollegat

¹ In de praktijk wordt vaak aangehouden dat bij T jaar aan meetdata realistische schattingen kunnen worden gegeven voor herhalingstijden tot circa T^2 jaar.

- Veerse Meer
 - Sluis Kats Binnen (VM3)
 - Oranjeplaat (VM4)
 - Schotsman (VM5)
- Grevelingenmeer
 - Bommeneede
 - Hevel Grevelingen West
- Volkerak-Zoommeer
 - Rak Zuid
 - Volkerak Galathea
 - Nieuw-Vossemeer
 - Bathse Spuikanaal Inloop
- Haringvliet en Hollands Diep
 - Hellevoetsluis
 - Rak Noord
 - Moerdijk
 - Deeneplaat
 - Werkendam Buiten
- Hollandsche IJssel
 - Krimpen aan den IJssel
- Waddenzee
 - Den Helder
 - Den Oever Buiten
 - Kornwerderzand Buiten
 - Harlingen
 - Lauwersoog
 - Schiermonnikoog
 - Nes
 - West-Terschelling
 - Vlieland Haven
 - Oudeschild
- Eems-Dollard
 - Eemshaven
 - Delfzijl
 - Nieuw-Statenzijl

In de gevallen waar er geen data beschikbaar was binnen voorgenoemde periode is per locatie een andere aaneengesloten periode van 10 jaar beschouwd. In de gevallen waar geen 10 jaar aan data beschikbaar was, zijn zo lang mogelijke aaneengesloten meetreeksen beschouwd. Indien er op een locatie sprake was van een dergelijke afwijkende databeschikbaarheid zal dit verderop in deze rapportage bij de beschrijving van de uitkomsten en analyses worden vermeld.

Uit de beschouwde tijdreeksen zijn amplituden en tijdschalen van seiches en andere waterstandschommelingen met tijdschalen tussen korte golven en windopzet afgeleid met behulp van (Fourier-) frequentie-filtering en wavelet-analyses. Voor een beknopte toelichting van deze technieken wordt verwezen naar Sectie 2.3.

De uitkomsten van deze deeltaak kunnen als uitgangspunt dienen voor het definiëren van mogelijke vervolgtaken voor deze gebieden in de volgende jaren, waaronder mogelijk binnen KPP-VOW. Hieronder vallen bijvoorbeeld ook gedetailleerde interpretatie van specifieke

situaties, inclusief correlaties met windcondities en andere (meteorologische) fenomenen en een koppeling naar Werkpakket O2² uit het Plan van Aanpak (Deltares, 2015).

1.4.2 Taak 2, principesommen opwekkingsmechanismen tijdens extremen

In deze taak (voorbereiding op werkpakket O2 uit Deltares, 2015) zijn principesommen uitgevoerd met het numeriek model WAQUA van opwekkingsmechanismen van seiches op het IJsselmeer (incl. randmeren) tijdens extreme omstandigheden. Hierbij zijn als mechanismen drukstoten en scherpe windsprongen beschouwd met verschillende treksnelheden (gerelateerd aan de passeersnelheden van weersystemen). Deze mechanismen worden gezien als de belangrijkste mogelijke seiche-bronnen op het IJsselmeer. Voor het uitvoeren van de sommen is gebruik gemaakt van de vigerende WAQUA-modelschematisatie van het IJsselmeer en de IJssel- en Vechtdelta (Deltares, 2011). Deze schematisatie is in beheer bij Deltares.

Deze deeltaak moet gezien worden als een voorbereiding op Werkpakket O2 uit Deltares (2015). De resultaten kunnen als uitgangspunt gebruikt worden bij de verdere invulling van Werkpakket O2 in latere fases van het project.

1.5 Indeling rapport

Hoofdstuk 2 beschrijft de analyse van waterstandsmetingen van locaties in de voor seiches nog niet eerder beschouwde wateren in Nederland en de kwantificering van de seiche-amplituden op die locaties. Op basis van de resultaten uit Hoofdstuk 2 en de methode beschreven in Hoofdstuk 6 van Deltares (2016) wordt in Hoofdstuk 3 per locatie een eerste indicatie gegeven van het netto-seiche-effect per beschouwde locatie voor een herhalingsstijd van 1000 jaar. De uitwerkingen van de principesommen van Taak 2 voor het bepalen van de invloed van opwekkingsmechanismen op seiches tijdens extreme condities staan beschreven in Hoofdstuk 4. Tot slot beschrijft Hoofdstuk 5 de hoofdconclusies van de huidige studie, aangevuld met een vooruitblik naar mogelijk vervolgwerk.

² *Werkpakket O2 betreft het omzetten van de kwalitatieve beschrijving van de opwekking van seiches naar een kwantitatieve (incl. mogelijk fysische begrenzing).*

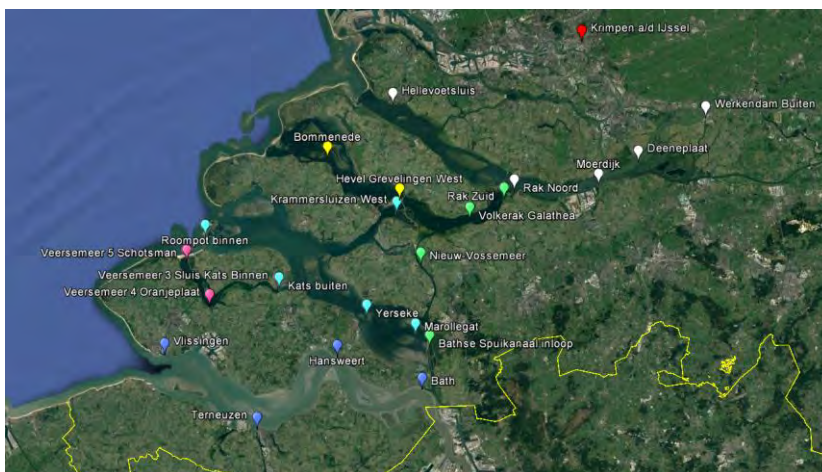
2 Analyse waterstandsmetingen watersystemen

2.1 Context

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van waterstandsmetingen voor het identificeren en het kwantificeren van seiche-achtige waterstandsfluctuaties op verschillende meetlocaties in Nederland gedurende de periode van begin 2006 tot eind 2016. Deze meetlocaties zijn beschouwd in aanvulling op de soortgelijke analyses voor andere locaties in Deltares (2016). Sectie 2.2 geeft een overzicht van alle meetpunten en de databeschikbaarheid per punt. Vervolgens wordt in Sectie 2.3 een korte beschrijving gegeven van de Fourier-, wavelet- (tijdsafhankelijke golfenergiespectra) en extreme-waarde-analyses (overgenomen van Sectie 4.3 uit Deltares, 2006) zoals die zijn toegepast om de gezochte waarden van seicheparameters te bepalen. Daarna worden deze karakteristieke parameterwaarden gepresenteerd per meetpunt (Sectie 2.4). Tot slot worden de resultaten geïnterpreteerd in Sectie 2.5.

2.2 Overzicht meetpunten

In overleg met Rijkswaterstaat zijn 37 punten geselecteerd verspreid over de Zeeuwse wateren, het Haringvliet en Hollands Diep³, de Hollandse IJssel, de Waddenzee en de Eems-Dollard. Op de Zeeuwse wateren staan een aantal waterlichamen in open verbinding met elkaar en zijn andere van elkaar afgesloten door schutsluizen of waterkeringen. Een aantal van de geselecteerde punten is van belang voor het tijdig sluiten van waterkeringen; andere punten zijn relevant voor het kunnen bedienen van schutsluizen (vervalbelasting). Tabel 2.1 toont een overzicht van de meetpunten per beschouwd watersysteem en de databeschikbaarheid op deze locaties. Figuur 2.1 en Figuur 2.2 geven de geografische locaties van de meetpunten weer van de meetpunten gelegen in respectievelijk de zuidelijk en noordelijke regio's van Nederland. De locaties hebben per waterlichaam een kleur meegekregen.



Figuur 2.1 Geografische locaties waterstandsmetpunten in het zuiden van Nederland. De locaties hebben per waterlichaam een kleur meegekregen (Bron achtergrondafbeelding: Google Earth).

³ Na invoering van het Kierbesluit vanaf begin 2018, waarbij de Haringvlietssluis op een kier worden gezet ter bevordering van de fauna op het Haringvliet, zal de situatie op het Haringvliet en Hollands Diep, voor wat betreft seiches, mogelijk veranderen. Verwacht wordt dat het inbrengen van meer getij op deze wateren en het bewerkstelligen van een permanente (semi-)open verbinding zal leiden tot demping van seiches. Dit is hier echter niet nader onderzocht.



Figuur 2.2 Geografische locaties waterstandsmetpunten in het noorden van Nederland. De locaties hebben per waterlichaam een kleur meegekregen (Bron achtergrondafbeelding: Google Earth).

Voor de meeste punten is 10 jaar of meer aan meetdata beschikbaar. Deze meetgegevens zijn voor het grootste deel gedownload van <http://watergegevens.rijkswaterstaat.nl>. Daarnaast is voor een aantal van de meetpunten op de Zeeuwse wateren de meetdata aangeleverd door het Hydro Meteo Centrum Zeeland (HMCZ). Een beperking in de waterstandsmetingen is echter het toegepaste opslaginterval van 10 minuten. Dit geldt voor alle beschouwde locaties. Hierdoor is de kortst mogelijke seiche-periode die onderscheiden kan worden beperkt tot 20 minuten⁴, 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.

⁴ Deze beperking is onafhankelijk van de analysemethode.

Tabel 2.1 Overzicht meetpunten en databereik per watersysteem

Watersysteem	Meetpunten	Begindatum ^b	Einddatum
Westerschelde	Vlissingen Terneuzen Hansweert Bath	01-01-1987	15-12-2016
Oosterschelde	Roompot Binnen Kats Buiten Krammersluizen West Yerseke Marollegat	23-02-1987 09-06-1998 01-01-1989 01-01-1995 04-11-1997	30-10-2016
Veerse Meer ^a	Sluis Kats binnen (VM3) Oranjeplaat (VM4) Schotsman (VM5)	01-01-2010	21-11-2016
Volkerak-Zoommeer	Bathse spuikanaal inloop Nieuw-Vossemeer Volkerak Galathea ^a Rak Zuid	13-11-1997 21-10-1997 21-10-1997 26-11-2013	30-10-2016
Grevelingenmeer ^a	Bommenede Hevel Grevelingen West	01-01-2000 01-01-2010	21-11-2016
Haringvliet & Hollands Diep	Hellevoetsluis Rak Noord Moerdijk Deeneplaat Werkendam buiten	02-06-1988 05-10-1987 01-06-1988 14-06-1988 10-09-1987	30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016 04-10-2005 30-10-2016
Hollandse IJssel	Krimpen a/d IJssel	01-02-1989	15-12-2016
Waddenzee	Den Helder Den Oever Buiten Kornwerderzand Buiten Harlingen Lauwersoog Schiermonnikoog Nes West-Terschelling Vlieland Haven Oudeschild	01-01-1987 14-01-1988 25-03-1988 01-01-1987 02-09-1987 26-01-1989 01-07-1987 25-03-1988 25-03-1988 14-01-1988	03-04-2016 30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016 30-10-2016
Eems-Dollard	Eemshaven Delfzijl Nieuw-Statenzijl	08-01-1988 01-01-1987 08-01-1988	30-10-2016 31-12-2010 12-12-2016

^a Meetdata aangeleverd door Hydro Meteo Centrum Zeeland (HMCZ)

^b Om aan te sluiten bij het KPP-werk uit 2016 zal alleen gebruik gemaakt worden van de meetdata vanaf 01-01-2006 (indien van toepassing).

2.3 Fourier-, wavelet- en extreme-waarde-analyse

Ten behoeve van het analyseren van de waterstandsmetingen op seiche-achtige verschijnselen zijn Fourier-, wavelet- en extreme-waarde-analyses uitgevoerd op de tijdsignalen. Hierbij is dezelfde aanpak gevolgd als in Deltares (2016). Voor een nadere beschrijving van de aanpak is hierom Sectie 4.3 uit Deltares (2016) overgenomen in dit rapport en waar nodig aangepast zodat het aansluit op het huidige onderzoek.

Alvorens deze analyses uit te voeren zijn de geselecteerde tijdseries eerst gecheckt en gecorrigeerd voor meetfouten. Dit was noodzakelijk omdat niet van alle meetpunten gecontroleerde/verwerkte tijdreeksen beschikbaar waren. Waterstandsfluctuaties als gevolg van menselijk handelen (onderhoud meetpunt, spuien, bedienen schutkolk, sluiten kering et cetera) zijn niet verwijderd uit de tijdseries (voor zover als zodanig identificeerbaar). Daar waar de tijdseries en potentiële “seiche”-episoden sterk beïnvloed zijn door menselijk handelen zal dit nader worden beschouwd in Sectie 2.4.

Begin toegepaste aanpak (overgenomen uit Deltares, 2016)

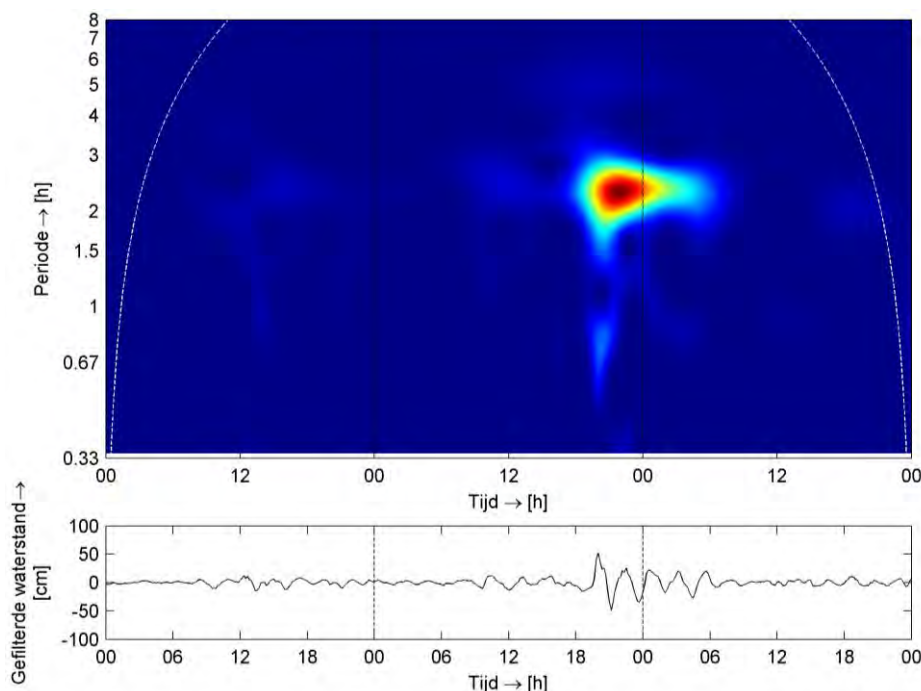
 Ten behoeve van het analyseren van de waterstandsmetingen op seiche-achtige verschijnselen zijn Fourier- en wavelet-analyses uitgevoerd op de tijdsignalen. Met behulp van een Fouriertransformatie zijn de tijdsignalen omgezet naar energie-frequentiespectra waarmee bepaald kan worden bij welke golfperiode 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 zijn binnen dit project verschillende waardes aangehouden afhankelijk van de meetlocaties. De keuze van de periode is onder andere afhankelijk van het aanwezige getij. Merk op dat het dus lastig is om de tijdschalen van de seiches goed te scheiden van de kortste tijdschalen van bijvoorbeeld het getij of opzetverloop omdat deze deels overlappend kunnen zijn. De gekozen grenswaardes (filterfrequentie zie Sectie 2.4) zijn daarom praktische compromissen. Merk op dat voor de filtering een cosinusfunctie (in 40 frequentiestappen) is toegepast om de scherpte van de filtering te verzachten en zo mogelijke randeffecten te voorkomen. De grootte van de frequentiestappen, en hiermee de scherpte van het filter, is hierbij afhankelijk van de lengte van het tijdsignaal en de grootte van de tijdstap volgens $\Delta f = 1/(N \cdot \Delta t)$, waarbij N het aantal tijdstappen is en Δt de tijdstapgrootte.

Een sprekend voorbeeld van de toegepaste analyse is opgenomen in Figuur 2.3 van een meetsignaal bij Lemmer op het IJsselmeer 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 2.4, 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')⁵. 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 waarden bepaald zoals deze verderop in deze rapportage worden gepresenteerd (Sectie 2.4). In Bijlage A worden per uitvoerlocatie gefilterde tijdreeksen van de top 3 hoogste seiche-episoden getoond waarin de hoogste oppervlakte-uitwijkingen werden waargenomen.



Figuur 2.3 Voorbeeld van waveletanalyse en filtering van een tijdsignaal met behulp van een Fourieranalyse

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.

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

⁵ 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.

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 langere herhalingstijden.

Einde toegepaste aanpak (overgenomen uit Deltares, 2016)

Anders dan de aanpak uit Deltares (2016) zijn bij de extreme-waarde-analyse voor de seiche-amplituden op basis van de beschouwde periodes van 10 jaar meetdata meer en ook langere herhalingstijden beschouwd. Naast de herhalingstijden van 1, 2, 5 en 10 jaar (beschouwd in Deltares, 2016) zijn ook de herhalingstijden van 1.000, 4.000 en 10.000 jaar beschouwd in combinatie met een inschatting van een onzekerheidsband. Zoals aangegeven in Deltares (2016) neemt de betrouwbaarheid van de schattingen af naar mate de herhalingstijden toenemen. Dit komt tot uitdrukking in grotere onzekerheidsbanden voor langere herhalingstijden.

Om te kunnen duiden wat de invloed is van het meenemen van langere periodes aan meetdata op het afleiden van de seichesterktes voor langere herhalingstijden en op de onzekerheidsbanden is voor enkele opvallende punten een uitbreiding gemaakt op basis van de totaal beschikbare periode aan meetdata, die op die locaties langer was dan het 10-jaar tijdsinterval dat standaard is gebruikt. De punten waar dit voor gedaan is, hebben een opvallend hoge of lage waarde voor de extreme schattingen van de seiche amplitude en zijn mogelijk het meest illustratief voor de invloed van het gebruik van een langere meetreeks.

2.4 Overzicht karakteristieke waarden

Tabel 2.2 en Tabel 2.3, op de volgende pagina's, tonen in de derde kolom de highpass-frequenties waarop gefilterd is in de Fourier-analyse⁶. Op locaties waar invloed is van het getij zijn deze afbreekfrequenties zo gekozen dat zoveel als mogelijk van de energie uit het getij niet mee wordt genomen in het signaal dat beschouwd wordt in de extreme-waarde-analyse ($f = 0,1-0,1389$ mHz of $T = 2,00-2,78$ uur) omdat het getij al in andere HR-bijdragen zit. Op bepaalde locaties (onder andere in de ondiepe gebieden in de Westerschelde) is dit onderscheid niet gemakkelijk te maken omdat een deel van de energie uit hogere-orde getijdecomponenten daar samenvalt met de energie in het frequentiebereik dat beschouwd wordt als het seiche-bereik in getijdegebieden ($f > 0.1$ mHz of $T < 2,78$ uur). In gebieden waar geen invloed optreedt van het getij is als highpass-frequentie $f = 0.03968$ mHz ($T = 7$ uur) gebruikt. Dit is gelijk aan de frequentie die gebruikt is in Deltares (2016) voor het filteren van de signalen op mogelijke invloeden van windopzet voor locaties op grote meren (dus zonder getij-invloed vanaf zee).

De twee daaropvolgende resultatenkolommen tonen de gemiddelde absolute seiche-amplitude (dit kan ook de diepte van een dal in het waterstandsverloop zijn) en de maximum geregistreerde absolute seiche-amplitude op basis van de top-1% episoden in de metingen⁷, afgerond op 5 cm. In de zeven daarop volgende kolommen worden de berekende extreme

⁶ Alle energie in het oorspronkelijke meetsignaal onder deze frequentie is niet meegenomen in het signaal zoals toegepast in de extreme-waarde-analyse.

⁷ 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 dagen met zeer lage waarden automatisch uitgesloten.

seiche-amplitudes getoond voor de herhalingstijden van 1, 2, 5, 10, 1.000, 4.000 en 10.000 jaar. Hierbij is de onzekerheid van de schattingen voor de korte herhalingstijden tot 10 jaar kleiner (smalle nauwkeurigheidsbanden) dan voor de schattingen voor de langere herhalingstijden; de betrouwbaarheid neemt af naar mate de herhalingstijden toe nemen. De resultaten van de analyse op basis van tijdreeksen langer dan 10 jaar zijn in cursieve cijfers weergegeven in de tabellen. Merk op dat de schattingen van de seiche-amplituden naar boven afgerond op 0,05 m om zo aan te sluiten op de andere resultaten binnen deze rapportage. Afbeeldingen met de data-fits (inclusief onzekerheidsbanden) van de extreme-waarde-functies behorende bij deze uitkomsten zijn ter vastlegging opgenomen in Bijlage B. Tot slot worden in de meest rechter kolom de waargenomen typische seiche-periodes vermeld, in volgorde van afnemende typische sterkte (amplitude). Deze waarden zijn handmatig afgelezen uit de waveletplots.

De kleurmarkeringen van de rijen in de tabel geven een duiding van de betrouwbaarheid/zuiverheid van het geanalyseerde signaal en daarmee van de resulterende waardes⁸. Deze betrouwbaarheid/zuiverheid wordt beïnvloed door de lengte en kwaliteit van de tijdreeksen, maar ook door de invloed van menselijk handelen op het meetsignaal en de relatieve invloed van hoogfrequente getij-componenten die deels samenvallen met het beschouwde frequentiebereik voor seiches. Merk op dat de kleurmarkering dus geen duiding geeft van de kwaliteit/juistheid van de uiteindelijke extreme waarde fit.

Een groene markering geeft aan dat de invoergegevens het afleiden van de gezochte seiche-waarden met voldoende nauwkeurigheid mogelijk maakten. Een oranje markering is gebruikt voor de meetpunten waar de betrouwbaarheid van de geanalyseerde inputgegevens onzeker is, maar waarbij deze niet a priori onbruikbaar zijn. In de analyse van deze punten worden bijvoorbeeld naast werkelijke seiche-events mogelijk ook enkele 'events' meegenomen die veroorzaakt worden door menselijke invloeden of 'events' welke het gevolg zijn van getij-energie uit hogere-orde componenten. Meetpunten zijn rood gemarkeerd wanneer de uitkomsten naar verwachting sterk of nagenoeg volledig beïnvloed worden door aspecten van de meetreeks die het gevolg zijn van menselijk handelen of vermoedelijk voornamelijk afkomstig zijn van hogere-orde getijcomponenten. Opgemerkt wordt dat beide voorgenoemde effecten al (mogelijk) zijn opgenomen in andere hoogtetoeslagen voor de aangrenzende waterkeringen. Om dubbeltellingen en daaruit volgende onnodig conservatieve waarden te voorkomen, wordt sterk aangeraden dit te verifiëren alvorens de gevonden waardes toe te passen (nader beschouwd in Sectie 3.2).

Een vergelijking van de extreme waardes uit Tabel 2.2 en Tabel 2.3 met de eerder gedane ruwe expert-schattingen voor de beschouwde wateren uit Deltares (2015), overgenomen in de huidige rapportage als Tabel 1.1, valt het op dat de geschatte **operationele/jaarlijkse** waarden uit Deltares (2015) redelijk overeenkomen met de waarden voor de kortere herhalingstijden (1-2 jaar). Voor de Westerschelde⁹, Oosterschelde en de Eems-Dollard zijn de nieuw afgeleide waarden iets hoger. Voor de overige gebieden zijn de nieuw afgeleide waarden nagenoeg gelijk met de eerdere schattingen van orde van groottes. Duidelijke uitzonderingen hierop zijn de meetpunten Krimpen aan den IJssel en Nieuw-Statenzijl. De

⁸ Merk op dat hier dus niet a priori de betrouwbaarheid van de uitkomsten wordt bedoeld, maar de verwachte betrouwbaarheid van de meetgegevens, ook al is er uiteraard wel een relatie tussen de kwaliteit van de input en die van de output.

⁹ Opgemerkt moet worden dat het beschouwde meetpunt bij Vlissingen niet gelegen is nabij de Sloehaven, maar nabij de oude haven. Hierdoor kunnen de gevonden waardes niet goed vergeleken worden met de geschatte waardes uit Tabel 1.1.

gevonden seiche-waarden op deze locatie zijn naar verwachting sterk beïnvloed door menselijk handelen (respectievelijk gekoppeld aan sluitingen van de kering en bedienen van de spuisluis) en deze zijn daardoor in de nieuwe uitkomsten een stuk hoger dan de schattingen uit Deltares (2015). Mogelijk dat de werkelijke lokale seiche-waarden dichterbij de oorspronkelijke schatting liggen dan in de huidige analyse kon worden afgeleid, maar dat kon binnen de huidige taak niet nader worden uitgewerkt, grotendeels als gevolg van beperkingen in de meetdata.

De waarden die in de huidige studie op basis van de extreme-waarde-analyse voor **herhalingstijden relevant voor de HR** zijn afgeleid blijken in veel gevallen hoger te liggen dan die uit Tabel 1.1. Voor die langere herhalingstijden blijken de uitkomsten op basis van data-analyses dus minder consistent te zijn met de oorspronkelijk expert-schattingen van typische seiche-amplitudes uit Deltares (2015). Dit verschil kan voor een deel mogelijk verklaard worden aan de hand van de ruimtelijke variatie in de seichesterktes. Een andere verklaring kan gevonden worden in het feit dat seiches mogelijk beperkt worden in hun sterkte door beperkingen in de forcering; omdat de statistieke analyses een extrapolatie zijn naar langere herhalingstijden op basis van de gemeten condities – daarvoor gelden mogelijke beperkende condities nog niet – zitten die beperkingen niet in de statistisch afgeleide waarden. Deze hypothese wordt mogelijk in een latere fase van dit KPP-VOW project (Taak O2 uit Deltares, 2015) nader onderzocht. In de extreme-waarde-analyse, zuiver op basis van de meetdata, is hier geen rekening mee gehouden om zo de data-analyse zuiver te houden, vooralsnog zonder verdere expert-interpretatie.

Een vergelijking van de gevonden tijdschalen met de eerder geschatte waarden van dat type parameter (Deltares, 2015) is lastig te maken. Dit komt voornamelijk doordat de gekozen frequentiebanden waarop de meetsignalen gefilterd zijn vaak krasser zijn dan de range aan geschatte tijdschalen. Dit is deels het gevolg van de eigenschappen van dataopslag en deels het gevolg van keuzes die gemaakt moesten worden in de analyse-aanpak (afsplitsen seiche-sigitaal van het getijsigitaal). Om een voorbeeld te geven: voor de Westelijke Waddenzee zijn tijdschalen geschat van 8 tot 15 minuten en meer dan 3 uur, terwijl het meetsigitaal alleen frequenties bevat tussen 20 minuten en 2,78 uur (0,1 mHz). De schatting voor Noord-Zeeland daarentegen (1-3 uur) komt redelijk overeen met de waarden op de Zeeuwse meren (Grevelingenmeer, Volkerak-Zoommeer en Veerse Meer).

Ter aanvulling op de hierboven beschreven resultaten zijn in Tabel 2.4 de resultaten opgenomen van de in 2016 beschouwde meetpunten op het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren (Tabel 4.2 overgenomen uit Deltares, 2016), hier aangevuld met schattingen van de seiche-amplituden voor langere herhalingstijden (1.000, 4.000 en 10.000 jaar). Evenals in de andere tabellen zijn in Tabel 2.4 kleurmarkeringen gebruikt voor het duiden van de betrouwbaarheid/zuiverheid van de geanalyseerde meetgegevens die gebruikt zijn als input. Omdat de gebruikte data gevalideerd zijn en over het algemeen op deze locaties weinig beïnvloed worden door menselijk handelen, hebben alle meetlocaties in Tabel 2.4, op locatie Ramspolbrug na, een groene markering gekregen. Ramspolbrug is rood gemarkeerd vanwege de mogelijke invloed van het openen en sluiten van de balgstuw bij Ramspol op het seichesigitaal. Het openen en sluiten hiervan heeft mogelijk geleid tot de zeer grote onzekerheidsbanden rondom de extreme waarde schattingen (Figuur B.54).

Ook meetlocatie Houtrib Noord laat zeer grote onzekerheidsbanden zien rondom de extreme waarde schattingen op basis van 10 jaar data (Figuur B.42). Dit is naar verwachting het gevolg van de relatief zeer grote seiche-amplitude tijdens de storm van 18 januari 2007 in combinatie met de relatief korte tijdreeks die is gebruikt. Om die reden is voor die locatie

onderzocht of het meenemen van een langere tijdreeks een positieve invloed heeft op de onzekerheidsbanden¹⁰. De resultaten hiervan zijn weergegeven met cursieve cijfers in Tabel 2.4 en het bijbehorende figuur is opgenomen in Bijlage B (Figuur B.42). Deze geven aan dat het meenemen van meer gegevens/het inzetten van een langere tijdreeks op die locatie leiden tot een kleinere range in de onzekerheidsbanden. Hieruit is op te maken dat een relatief zwaar event als de storm van 18 januari 2007 een belangrijke invloed heeft op de onzekerheid in de analyse. Wanneer meer stormen mee worden genomen, wordt de relatieve positie van de storm in de statistiek duidelijker en wordt de onzekerheid in de schattingen kleiner.

¹⁰ Hiervoor is een langere (gecheckte) tijdreeks aangevraagd bij de Helpdesk Water van RWS.

Tabel 2.2 Overzicht van karakteristieke waarden seiche-achtige waterstandsfluctuaties per watersysteem in Zeeland en Zuid-Holland en meetpunt. Resultaten op basis van langere tijdreeksen dan 10 jaar zijn cursief weergegeven.

Water-systeem	Meetpunt	Highpass-filterfrequentie [mHz]	Gemiddelde absolute seiche-amplitude o.b.v.top-1% van de metingen [m]	Maximum geregistreeerde absolute seiche-amplitude [m]	Seiche-amplitude [m] per herhalingsstijd [jaar]							Typische seiche-periodes in volgorde van sterkte
					1	2	5	10	1000	4000	10000	
Wester-schelde ¹¹	Vlissingen	0,1389	0,15	0,20	0,15	0,15	0,20	0,20	0,30	0,35	0,35	1-1,5 uur
	Terneuzen	0,1389	0,20	0,25	0,20	0,20	0,25	0,25	0,35	0,40	0,45	1-1,5 uur
	Hansweert	0,1389	0,20	0,25	0,20	0,20	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	1,5-2 uur
	Bath	0,1389	0,20	0,35	0,25	0,25	0,30	0,30	0,50	0,55	0,60	1,5-2 uur
Ooster-schelde ¹²	Roompot Binnen	0,1389	0,20	0,40	0,15	0,20	0,20	0,25	0,35	0,40	0,40	40 min, 75 min
	Kats Buiten	0,1389	0,25	0,35	0,20	0,25	0,25	0,30	0,40	0,45	0,50	30 min, 75 min
	Krammersluizen West	0,1389	0,35	0,45	0,20	0,20	0,25	0,25	0,40	0,45	0,50	1,5-2 uur
	Yerseke	0,1389	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	60-75 min
Veerse Meer	Marollegat	0,1389	0,15	0,20	0,15	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	0,30	1,5 uur
	Sluis Kats Binnen (VM3)	0,0397	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	2,25 uur
	Oranjeplaat (VM4)	0,0397	0,05	0,10	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	1 uur
Grevelingen-meer	Schotsman (VM5)	0,0397	0,05	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	2,25 uur
	Bommenede	0,0397	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,15	0,15	0,20	1 uur
	Hevel Grevelingen West	0,0397	0,15	0,20	0,10	0,15	0,15	0,20	0,30	0,35	0,40	2,5 uur
Volkerak-Zoommeer	Rak Zuid	0,0397	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	1,5-2 uur
	Volkerak Galathea	0,0397	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,25	0,25	0,30	1,5 uu
	Nieuw-Vossemeer	0,0397	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	75 min
	Bathse Spuisluis Inloop	0,0397	0,05	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	50 min, 75 min
Haringvliet en Hollands Diep ¹³	Hellevoetsluis	0,1000	0,10	0,15	0,10	0,10	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	1 uur
	Rak Noord	0,1000	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	2 uur
	Moerdijk	0,1000	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,20	0,20	1 uur
	Deeneplaat	0,1000	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,25	0,30	30-60 min
	Werkendam Buiten	0,1000	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,25	0,30	1,5 uur
Hollandsche IJssel ¹⁴	Krimpen a/d IJssel	0,1000	0,15	0,35	0,20	0,25	0,30	0,35	0,65	0,75	0,85	1,5-2 uur

¹¹ De meetpunten op de Westerschelde worden beïnvloed door hogere-orde getijcomponenten bij de hogere hoogwaters (springtij). De invloed hiervan is sterker verder achter in de Westerschelde (Hansweert en Bath), gekoppeld aan de kleinere waterdiepten in dat gebied die de hogere-orde componenten versterken; op die locaties worden de gedetecteerde waterstandsvariaties volledig bepaald door deze hogere-orde componenten. Nabij Terneuzen en Vlissingen worden naast deze getijcomponenten bij springtij ook werkelijke slingeringen op het signaal waargenomen welke geen onderdeel zijn van het getij.

¹² De waarden op de Oosterschelde worden voor een deel beïnvloed door translatiegolven als gevolg van het sluiten van de Oosterscheldedekering. Daarnaast worden bij de meeste punten (m.u.v. Roompot Binnen) voornamelijk "seiche"-events gevonden bij laagwater situaties, wat wijst op mogelijke invloeden van translatiegolven als gevolg van het opstarten en stoppen van spui-installaties.

¹³ De meetpunten ondervinden invloed van hogere-orde getijcomponenten en in de wintermaanden van het bedienen van de Haringvlietssluisen.

Tabel 2.3 Overzicht van karakteristieke waarden seiche-achtige waterstandsfluctuaties per watersysteem in Noord-Nederland en meetpunt. Resultaten op basis van langere tijdreeksen dan 10 jaar zijn cursief weergegeven.

Water-systeem	Meetpunt	Highpass-filterfrequentie [mHz]	Gemiddelde absolute seiche-amplitude o.b.v.top-1% van de metingen [m]	Maximum geregistreeerde absolute seiche-amplitude [m]	Seiche-amplitude [m] per herhalingsijd [jaar]							Typische seiche-periodes in volgorde van sterkte
					1	2	5	10	1000	4000	10000	
Waddenzee	Den Helder	0,1389	0,15	0,25	0,15	0,20	0,20	0,25	0,40	0,45	0,45	1-1,5 uur
	Den Oever Buiten ¹⁵	0,1389	0,20	0,30	0,20	0,25	0,25	0,30	0,60	0,80	0,90	20 min, 1 uur
	Kornwerderzand Buiten	0,1389	0,15	0,20	0,15	0,15	0,20	0,20	0,35	0,40	0,45	75 min
	Harlingen	0,1389	0,10	0,20	0,10	0,15	0,20	0,20	0,50	0,65	0,75	40-60 min
	Lauwersoog	0,1389	0,15	0,20	0,15	0,15	0,20	0,20	0,30	0,35	0,35	60 min
	Schiermonnikoog ¹⁶	0,1389	0,15	0,35	0,15	0,20	0,25	0,25	0,45	0,55	0,60	60 min
	Nes ¹⁷	0,1389	0,15	0,20	0,15	0,15	0,20	0,20	0,30	0,35	0,35	40-60 min
	West-Terschelling	0,1389	0,15	0,25	0,15	0,15	0,20	0,25	0,50	0,60	0,70	40 min
	Vlieland Haven	0,1389	0,15	0,20	0,15	0,15	0,20	0,20	0,30	0,30	0,35	30-40 min
	Oudeschild	0,1389	0,10	0,25	0,10	0,15	0,20	0,20	0,50	0,65	0,75	40-60 min
Eems-Dollard	Eemshaven	0,1389	0,15	0,30	0,15	0,20	0,20	0,25	0,40	0,45	0,50	20-30 min
	Delfzijl	0,1389	0,25	0,40	0,25	0,25	0,30	0,30	0,55	0,60	0,65	50-60 min
	Nieuw-Statenzijl ¹⁸	0,1389	0,60	0,75	0,60	0,65	0,70	0,75	0,95	1,05	1,10	n.v.t.

¹⁴ De gevonden "seiches" zijn nagenoeg allemaal metingen van translatiegolven als gevolg van het (proef-)sluiten van de Hollandse IJsselkering.

¹⁵ De gefilterde signalen van de seiche-events laten regelmatig kortdurende (~20 min) schokken zien bij opkomend water. Deze schokken worden toegeschreven aan het sluiten van de nabijgelegen Stevinssluisen.

¹⁶ De gefilterde signalen bij meetpunt Schiermonnikoog laten veelal seiche-achtige signalen zien bij laagwater. Een mogelijke verklaring voor deze schommelingen zou de invloed van de spuisluis bij Lauwersoog kunnen zijn. Dit is niet nader onderzocht.

¹⁷ Een nadere beschouwing van de "seiches" bij meetpunt Nes laat zien dat deze regelmatig veroorzaakt worden door kleine kortstondige afwijkingen in de meetsignalen (zogenaamde spikes). De kwaliteit op dit meetpunt is dus beperkt, maar dit geeft ook aan dat seiches hier slechts een zeer beperkte rol spelen.

¹⁸ Het meetpunt bij Nieuw-Statenzijl wordt sterk beïnvloed door een combinatie van het droogvallen van platen en het spuien door de nabijgelegen spuisluis. Tevens wordt het punt ook beïnvloed door (versterkte) hogere-orde getijcomponenten (zie ook Deltares, 2017).

Tabel 2.4 Overzicht van karakteristieke waarden seiche-achtige waterstandsfluctuaties per watersysteem in Midden-Nederland en meetpunt (Tabel 4.2 overgenomen uit Deltares, 2016). De tabel is aangevuld met amplitudes voor langere herhalings tijden en de seiche-amplituden zijn naar boven afgerond op 0,05 m. Resultaten op basis van langere tijdreeksen dan 10 jaar zijn cursief weergegeven.

Water-systeem	Meetpunt	Highpass-filterfrequentie [mHz]	Gemiddelde absolute seiche-amplitude o.b.v. top-1% van de metingen [m]	Maximum geregistreerde absolute seiche-amplitude [m]	Seiche-amplitude [m] per herhalings tijd [jaar]							Typische seiche-periodes in volgorde van sterkte
					1	2	5	10	1000	4000	10000	
IJsselmeer	Den Oever Binnen	0,0397	0,25	0,35	0,30	0,30	0,35	0,40	0,60	0,70	0,75	5,5 u, 1,75 u, 30 min. en 50 min.
	Kornwerderzand Binnen	0,0397	0,30	0,60	0,35	0,40	0,50	0,55	0,85	0,95	1,00	5,5 u, 2,5 u en 1,5 u
	Lemmer	0,0397	0,50	0,80	0,55	0,60	0,70	0,75	1,30	1,45	1,55	2,5 u, 50 min. en 1,25 u
	Krabbersgat Noord	0,0397	0,30	0,55	0,30	0,35	0,45	0,50	0,80	0,90	0,95	45 min., 1,25 u en 5,5 u
	Houtrib Noord	0,0397	0,45	1,35 ¹⁹	0,45	0,50	0,65	0,75	1,55	1,85	2,10	1,25, 5,5 en 2,5 u
Markermeer	Krabbersgat Zuid	0,0397	0,30	0,40	0,35	0,40	0,45	0,50	0,75	0,85	0,90	2 en 1 u
	Houtrib Zuid	0,0397	0,30	0,50	0,35	0,35	0,45	0,45	0,75	0,80	0,85	2,5, 1,5 en 1 u
	Schellingwouderbrug	0,0397	0,35	0,65	0,40	0,45	0,55	0,60	1,00	1,10	1,15	1 u, 3,5 u en 2 u
Eem GooiMeer	Hollandse Brug	0,0397	0,20	0,35	0,20	0,25	0,25	0,30	0,45	0,50	0,55	3,5 u en 6 u
	Nijkerk West	0,0397	0,20	0,30	0,25	0,25	0,30	0,30	0,45	0,50	0,50	3,5 u en 6 u
Wolderwijd	Nijkerk Oost	0,0397	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15	0,30	0,35	0,40	2,5 u
Veluwemeer Drontermeer	Elburgerbrug	0,0397	0,05	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,20	0,20	2,5 u
	Roggebotsluis Zuid	0,0397	0,15	0,20 ²⁰	0,15	0,15	0,20	0,20	0,30	0,35	0,35	2,5 u en 50 min.
Ketelmeer	Kamperhoek	0,0397	0,20	0,40	0,20	0,25	0,30	0,30	0,50	0,55	0,60	5,5 u en 1,25 u
	Ketelhaven	0,0397	0,25	0,40	0,30	0,35	0,35	0,40	0,70	0,80	0,85	5,5 u en 2,5 u
	Roggebotsluis Noord	0,0397	0,35	0,55	0,35	0,35	0,45	0,45	0,75	0,85	0,90	5,5 u en 2,5 u
Zwarte Water	Ramspolbrug	0,0397	0,15	0,45	0,15	0,20	0,25	0,25	0,65	0,80	0,95	5,5, 2,5 en 1 u
	Kadoelen	0,0397	0,10	0,20	0,10	0,15	0,15	0,15	0,35	0,40	0,45	5,5 u
	Genemuiden	0,0397	0,10	0,15	0,10	0,10	0,15	0,15	0,25	0,25	0,30	5,5 u

¹⁹ Deze afwijkende hoge seiche-amplitude (schatting herhalings tijd ~20 jaar) kan worden gerelateerd aan de storm Kyrill die op 18-01-2007 over Nederland heen trok. Gelijksortige (maar kleinere) uitwijkingen worden ook op andere meetlocaties gevonden voor deze seiche-episode.

²⁰ 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 geregistreerde hoogste absolute seiche-amplitude is 0,20 m, welke in de tabel gepresenteerd wordt.

2.5 Discussie uitkomsten analyse waterstandsmetingen

De resultaten van de uitgevoerde analyses op de waterstandsmetingen, samengevat in Tabel 2.2 en Tabel 2.3, laten zien dat op elk van de nog niet eerder beschouwde locaties seiche-achtige verschijnselen optreden binnen het op die locaties beschouwde frequentiebereik. De sterkte (typische amplitude) waarmee deze verschijnselen optreden is verschillend over de beschouwde watersystemen en lijkt op deze aanvullend beschouwde watersystemen minder gecorreleerd met de grootte van de systemen. In verhouding tot de gevonden karakteristieke waarden voor de grote meren en randmeren (eerder beschouwd in Deltares, 2016, en uitgebreid in Tabel 2.4), zijn de sterktes (amplitudes) op die locaties echter relatief laag. Volgens deze analyse worden de hoogste seiches, buiten de zeehavens en het IJsselmeergebied, gevonden op de Oosterschelde, Westerschelde en Eems-Dollard en hebben zij een amplitude in de orde van 0,3 m bij een herhalingsdij van 10 jaar.

Hieronder worden enkele mogelijke (deel)verklaringen voor het laag uitvallen van de seiche-amplitudes puntsgewijs benoemd:

- Een mogelijke verklaring is het verschil in soorten watersystemen dat is beschouwd (studie 2016 vs. de huidige studie) en het verschil in processen die optreden op deze watersystemen. Door de open verbindingen van de Westerschelde, Oosterschelde, de Waddenzee en de Eems-Dollard met de (Noord)zee kan op die systemen demping door uitstraling van energie naar de Noordzee/Waddenzee plaatsvinden. Een andere mogelijke verklaring is dat hoge stroomsnelheden als gevolg van het getij ook een bijdrage kunnen hebben in de demping van seiches.
- Een andere mogelijke verklaring voor het relatief laag uitvallen van de seiche-amplitudes is het feit dat op alle wateren waarop een getij heerst een beperkter bereik aan frequenties binnen het meetsignaal kon worden beschouwd dan binnen de analyse voor locaties op binnenwateren in Deltares (2016). Deze aanpak is binnen de huidige projectfase gevolgd om de mogelijke invloed van het getij zoveel mogelijk weg te nemen en sluit hiermee aan op de aanpak van Deltares (2016) waarbij het getijdedeel van het frequentiebereik buiten het interessegebied is weg gefilterd. Een groot nadeel van deze aanpak is echter dat voor de grotere watersystemen mogelijke belangrijke frequenties waarop seiche-achtige verschijnselen zouden kunnen optreden niet konden worden beschouwd. In Deltares (2016) is bijvoorbeeld te zien dat op de grote meren relatief vaak seiches optreden met een periodes van boven de 2,5-3 uur; dergelijke grootschalige waterbewegingen konden niet of slechts beperkt worden beschouwd voor de waterlichamen die beïnvloed worden door het getij.
- Ook de beperkte betrouwbaarheid van de meetsignalen op enkele locaties kan tot een overschatting van de seiches leiden. Veelal leiden menselijke invloeden als spuien en het sluiten van keringen of meetfouten (zogenaamde spikes) tot een vertekend beeld waarbij de typische waarden voor de uit de data afgeleide seiche-parameters mogelijk te hoog uitvallen. Ook hogere-orde getijdecomponenten die moeilijk weggefilterd kunnen worden (ondanks de beperkte bereiken aan frequenties) kunnen tot te hoge schattingen van de seiche-amplitudes leiden.
- Op de relatief kleine watersystemen waarop geen getij heerst of het effect van het getij slechts beperkt merkbaar is (Veerse Meer en Grevelingenmeer) zijn de sterktes van de seiches beperkt: orde 0,1-0,2 m voor een herhalingsdij van 10 jaar (vergelijkbaar met de randmeren in het IJsselmeergebied). Dit is het gevolg van de relatief kleine schaal van deze meren, waardoor de opwekkende mechanismen minder invloed hebben, en de aanwezigheid van zandplaten die mogelijk een dempende werking kunnen hebben.

Op basis van de in dit onderzoek gevolgde aanpak²¹ wordt gesteld dat het getij een belangrijke invloed speelt in de analyse van de waterstandsignalen en de onzekerheid in de resulterende seiche-parameters. Een mogelijke latere uitbreiding van de aanpak voor het analyseren van seiches in getijdegebieden, waarbij de onzekerheid als gevolg van het getij mogelijk beperkter is, is het voorbereiden van de meetsignalen op basis van harmonische analyses (astronomisch getij). Door een harmonische analyse kan op elk meetpunt de sterkte van verschillende getijdecomponenten bepaald worden. Door deze getijdecomponenten van de meetsignalen af te trekken, blijven in theorie alleen meteo-gedreven waterstandsfluctuaties (en eventuele andersoortige verstoringen die in het signaal zitten) over en kan een groter bereik aan frequenties beschouwd worden zonder vervuiling door getijcomponenten. Voor de meetpunten waarop getijvoorspellingen worden gegeven zijn deze componenten vaak al bekend.

Tot slot moet de timing van de seiche-achtige verschijnselen ten opzichte van het getij benoemd worden. In enkele gevallen (aangegeven met een voetnoot bij Tabel 2.2 en Tabel 2.3) worden voornamelijk seiche-achtige verstoringen gevonden bij laagwater. Deze situatie is over het algemeen niet maatgevend voor de waterveiligheid (zie ook Tabel 2.1 in Deltares, 2016). Voor die gevallen moet nader onderzocht worden of het in rekening brengen van een extra toeslag voor seiches daadwerkelijk benodigd is of dat een dergelijke aanpak mogelijk tot onnodig conservatisme leidt omdat deze effecten niet op zullen treden in combinatie met hoogwater. Een mogelijke aanpak hiervoor is het beschouwen van het netto seiche-effect. Dit wordt nader toegelicht in het volgende hoofdstuk.

²¹ Deze aanpak is ingegeven door de aanpak welke gevolgd is in voorgaande jaren en welke gebaseerd is op locaties waar geen invloed heerst van het getij.

3 Indicatief netto-seiche-effect per locatie

In dit hoofdstuk is voor alle locaties een indicatieve duiding gegeven van de statistische relevantie van de invloed van seiches op hoogwaters (en hiermee voor de HR), bij een herhalingsstijd van 1000 jaar. Die invloed is uitgedrukt met behulp van het waterstandsverhogende effect van seiches of het zogenaamde 'netto seiche-effect' (hierna: NSE). Hiervoor zijn twee methodes toegepast, waarbij de eerste methode een statistische benadering betreft welke gebruik maakt van de decimeringshoogte²² en de tweede methode een meer analytische statistische benadering welke uitgaat van extreme waarde analyses van bewerkte tijdreeksen. Beide methodes bevatten subjectieve elementen die van invloed zijn op de resultaten. De methodes zijn toegepast op basis van de eerder beschouwde 10 jaar aan meetdata (zie Hoofdstuk 2). De resulterende NSE-waardes worden gepresenteerd zonder een schatting van onzekerheden omdat de inzet van 10 jaar meetdata feitelijk sowieso niet geschikt is om verder te kijken dan 100 jaar herhalingsstijd (al helemaal voor de onzekerheidsbanden, zie Voetnoot 1). Desondanks geven de uitkomsten van de verschillende methoden wel een eerste indicatie van wat de (statistische) lokale seiche-invloeden zijn in verhouding tot de bijdragen van andere fenomenen aan de lokale maatgevende waterstanden. Allereerst wordt in Sectie 3.1 beide toegepaste aanpakken nader toegelicht, waarna in Sectie 3.2 de resultaten van beide methodes worden gepresenteerd en besproken. In Sectie 3.3 wordt een belangrijke kanttekening geplaatst bij de toepassing van de resultaten uit dit hoofdstuk in het kader van het WBI (Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium) en OI (OntwerpInstrumentarium). Tot slot wordt in Sectie 3.4 Taak 1 en daarmee Werkpakket B1 uit Deltares (2015) afgerond.

3.1 Toelichting NSE-methodes

3.1.1 Methode 1: Volledig statistische benadering

De eerste methode die in dit hoofdstuk is gebruikt is het toepassen van Model 1 welke eerder is toegelicht in Hoofdstuk 6 van Deltares (2016). Voor het toelichten van de methode is hierom Sectie 6.2.1 uit Deltares (2016) overgenomen in dit rapport.

Begin beschrijving statische methode (overgenomen uit Deltares, 2016)

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

²² De decimeringshoogte is het verschil tussen twee waterstanden waarvan de herhalingsstijd een factor 10 verschilt. De decimeringshoogte wordt verderop in de hoofdttekst met een voorbeeld toegelicht.

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

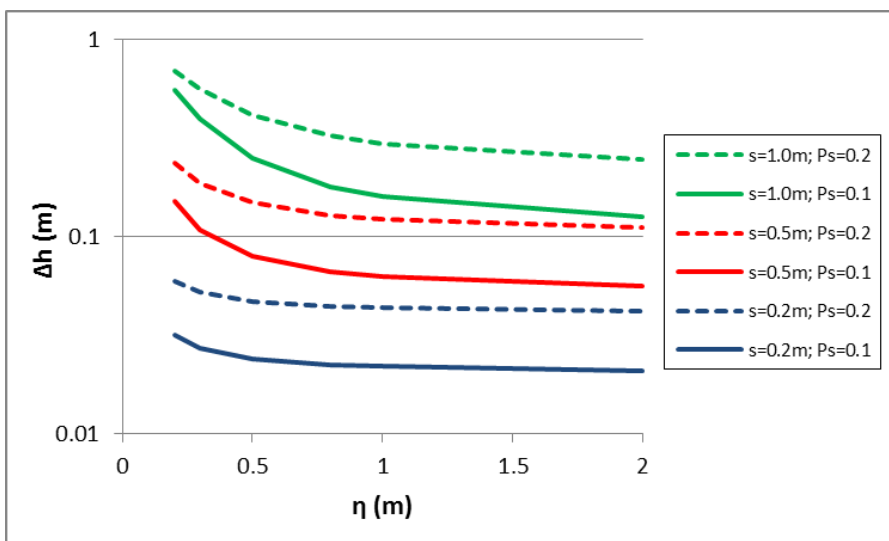
Tijdens een hoogwater kan er een seiche optreden met een kans van P_s . Het seiche heeft een verhogend effect s op de maximale waterstand. De overschrijdingskans van deze verhoogde waterstand h_s (inclusief seiche effect) wordt dan:

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

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

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

Het verloop van de verhoging van de maatgevende waterstand, Δh , volgens Formule 4 is weergegeven in Figuur 3.1. 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 3.1 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:

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

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).

Einde beschrijving statistische methode (overgenomen uit Deltares, 2016)

Uit bovenstaande beschrijving volgt dat voor het toepassen van het model waardes nodig zijn voor de nepereringshoogte, η , de seiche-amplitude, s , en de kans op een dergelijke seiche, P_s .

Voor de nepereringshoogte is allereerst de decimeringshoogte nodig. De decimeringshoogte kan afgeleid worden van de kansverdelingsfit die volgt uit een extreme waarde analyse voor de waterstand *exclusief* seiche-sigitaal. Voor de kans van voorkomen van een seiche per hoogwater, P_s , moet een keuze worden gemaakt. Merk op dat bij een kans van 1 de totale seiche-amplitude opgeteld moet worden bij het hoogwater en bij een kans van 0 heeft de seiche geen verhogende invloed op het hoogwater. Omdat er geen expliciete informatie beschikbaar is over de kans van voorkomen van een seiche per hoogwater is er voor gekozen om hiervoor vooralsnog twee waarden (0,25 en 0,05) aan te nemen voor elk van de locaties binnen de huidige studiefase. Hiermee is het mogelijk een eerste indicatie te geven van het NSE zonder al te conservatief te zijn. Wanneer meer informatie beschikbaar is over de kansverdeling van seiches tijdens hoogwaters voor de verschillende locaties, dan kan het NSE eenvoudig worden geüpdatet op basis van die informatie. Vooralsnog is de uitkomst van Methode 2 beschikbaar als vergelijkingsmateriaal om te zien of de vooralsnog gekozen waarden van de kans van het seiche per hoogwater realistisch is.

3.1.2 Methode 2: Analytische statistische benadering

De tweede methode die is toegepast om een indicatie te geven van het NSE gaat uit van een meer analytische statistische beschouwing op basis van extreme waarde analyses van de waterstandmeetsignalen. Voor elk van de locaties is zowel het totale ongefilterde (totale) meetsigitaal beschouwd als het gefilterde meetsigitaal waaruit de seiches zijn weggefilterd. Op beide signalen is een extreme waarde analyse uitgevoerd waaruit voor beide signalen een werklijn volgde. Door de extreme-waarde-schattingen (werklijn) voor het totale sigitaal, inclusief seiches, te verminderen met de schattingen op basis van het gefilterde sigitaal, exclusief seiches, wordt een eerste kwantificering gemaakt van het NSE op die locatie.

Wanneer de seiches vooral samenvallen met hoogwater, dan is dit terug te zien in een hoge waarde van het NSE en wanneer deze vooral samenvallen met laagwater, dan zal dit leiden

tot een lage waarde van het NSE (voor gegeven lokale seiche-amplitude). Doordat deze methode, anders dan Methode 1, onafhankelijk is van de (deels subjectieve) keuze voor een bepaalde kans op een seiche bij een hoogwater, wordt deze methode als meer objectief gezien voor het bepalen van het NSE. Anderzijds is Methode 1 een compacte methode die met betrekkelijk weinig analyse-stappen snel een eerste schatting geeft van het NSE op een locatie.

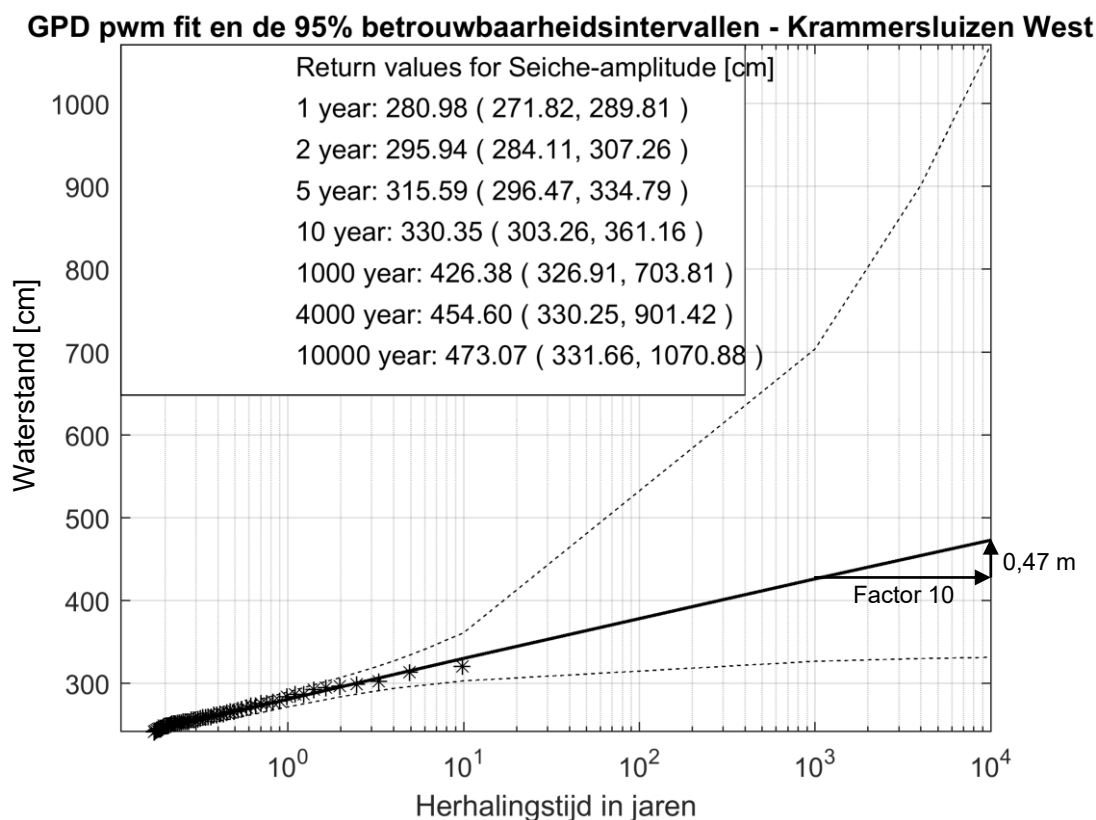
3.1.3 Getallenvoorbeelden bij methodes

Ter illustratie van de methodes is hieronder een getallenvoorbeeld gegeven voor de toepassing van de twee methodes voor locatie Krammersluizen West in de Oosterschelde voor een herhalingsjijd van 1000 jaar.

Methode 1

De decimeringshoogte, d , is hier 0,47 m (zie Figuur 3.2) en de nepereringshoogte, η , is 0,20 m (Formule 2). Uit Tabel 2.2 volgt dat de seiche-amplitude, s , op deze voorbeeldlocatie een waarde van 0,40 m heeft voor een herhalingsjijd van 1000 jaar.

Op basis van bovenstaande waardes is het NSE voor locatie Krammersluizen West op basis van de eerste methode dan 0,19 m en 0,06 m voor respectievelijk een kans van voorkomen van een seiche bij een dergelijk hoogwater van 0,25 en 0,05.



Figuur 3.2 Kansverdeling van waterstanden bij Krammersluizen West zonder seiche-effect (gefilterd signaal).

Methode 2

Voor de tweede methode is in het geval van locatie Krammersluizen West de waarde van de 1000 jaar schatting voor het totale signaal gelijk aan 4,27 m en voor het gefilterde signaal 4,25 m. Het afgeronde NSE is hiermee gelijk aan 0,02 m.

Uit deze getallenvoorbeelden volgt dat het NSE op deze locatie naar verwachting beperkt is. Uit het feit dat de tweede methode een lager NSE oplevert, geeft aan dat de seiches over het algemeen niet zullen optreden met hoogwater. Dit laatste ondersteunt de hypothese dat veel van de gemeten seiche-achtige verstoringen op deze locatie het gevolg zijn van menselijk handelen/spui-acties rondom laagwater (zie Voetnoot 12).

3.2 Resultaten en toelichting

In Tabel 3.1 op Pagina 27 worden de resultaten voor beide methodes getoond voor alle locaties (inclusief de locaties uit Deltares, 2016). Voor Methode 2 missen enkele resultaten omdat het voor die punten niet mogelijk was een drempelwaarde te kiezen waaruit een geschikte exponentiële fit zou kunnen volgen. Dit is voornamelijk het gevolg van de resolutie van de meetdata (opgeslagen als geheel aantal cm)²³.

Uit de resultaten van Tabel 3.1 komt naar voren dat het NSE dat bepaald is met Methode 2 altijd lager is dan of gelijk aan de waarde van het NSE dat bepaald is met de meer statistische Methode 1 voor $P_s = 0,25$. Dit geeft aan dat seiches over het algemeen op de beschouwde locaties relatief beperkt samenvallen met een hoogwater.

Opvallend is dat de voor de watersystemen waarop een getij heerst, de waardes van het NSE op basis van de meer objectieve Methode 2 relatief goed matchen met de waardes die bepaald zijn op basis van Methode 1. Dit geeft aan dat de gekozen range van de kans dat een seiche optreedt ten tijde van een hoogwater (0,05-0,25) een redelijke range is voor getijgedreven watersystemen. Daarentegen liggen de NSE-waarden van Methode 2 voor de meetlocaties op het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren over het algemeen een stuk lager dan de waardes op basis van Methode 1. Dit lijkt te wijzen op een kleine samenloopkans van seiches met een stormopzet (in het bijzonder de pieken daarvan), mogelijk zelfs nog lager dan de kleinste waarde hier toegepast (0.05).

De relatief hoge waardes voor het NSE voor Methode 2 bij Bath, Terneuzen, Lemmer, Schellingwouderbrug en de meetlocaties in de Eems-Dollard geven aan dat deze locaties een zekere gevoeligheid kennen voor seiches. Voor Lemmer en Schellingwouderbrug is deze gevoeligheid te relateren aan hun locaties in de trechtervormige uiteindes van respectievelijk het IJsselmeer en Markermeer, welke naar verwachting zorgen voor een versterking van grootschalige waterstandsvariaties op die meren. De gevoeligheid voor seiches op de Eems-Dollard is vermoedelijk voor een deel toe te wijzen aan amplificatie van hogere orde getijcomponenten (Deltares, 2017). Hetzelfde geldt mogelijk voor de locaties Bath en Terneuzen op de Westerschelde.

Bij de resultaten in Tabel 3.1 moet opgemerkt worden dat deze waardes slechts een eerste indicatie geven van het mogelijke effect van seiches op de waterstand bij hoogwatersituaties. Een aantal aspecten beïnvloeden de betrouwbaarheid van deze getallen. Eén van deze aspecten is de lengte van de tijdserie die is beschouwd. Beide methodes maken gebruik van resultaten van een extreme waarde schatting. De betrouwbaarheid van deze schatting wordt groter naarmate de tijdserie die beschouwd wordt langer is. Wanneer meer data ingezet zou

²³ Deze beperking zou mogelijk vermeden kunnen worden door het toepassen van een licht lopend gemiddelde. Dit is hier echter niet beschouwd omdat dit enerzijds extra subjectiviteit introduceert vanwege het te kiezen bereik van het lopend gemiddelde. Deze keuze van hoe zwaar de voor- en achterliggende punten meetellen, zal een zeker invloed hebben op de resulterende bepaling van het NSE. Anderzijds kan het beschouwen van een lopend gemiddelde tot een onderschatting van het NSE leiden. Zeker bij scherpe pieken in het signaal kan dit een behoorlijke invloed hebben (piekwaardes blijven gelijk of worden verlaagd).

kunnen worden (langere tijdreeksen), zullen de schattingen ook voor lange herhalings tijden betrouwbaarder worden en zullen de uitkomsten minder variëren bij een kleine verandering in de gekozen drempelwaarde (als onderdeel van het uitvoeren van een extreme waarde analyse). Een ander aspect is dat beide methodes beïnvloed worden door enige subjectiviteit bij het kiezen van de drempelwaardes voor de extreme waarde analyses. De invloed van de te kiezen drempelwaarde zal groter zijn bij kortere tijdseries dan bij langere tijdseries (zie eerste aspect). Bij Methode 1 werkt dit door in de decimeringshoogte en de schatting van de seiche-amplitude bij de beschouwde herhalings tijd en bij Methode 2 in de schattingen van de (on)gefilterde maatgevende waterstanden bij de beschouwde herhalings tijd. Deze eigenschappen van de toegepaste methoden zijn onvermijdelijk. Zij zullen de uitkomsten niet direct onbruikbaar maken, maar zijn wel van belang bij interpretatie en eventuele verdere inzet van de uitkomsten.

3.3 Opmerkingen in relatie tot het toepassen van resultaten

Let op dat bij toepassing van de resultaten van Taak 1 (tabellen uit Sectie 2.4 en Tabel 3.1) gewaakt moet worden voor mogelijke dubbeltelling bij het combineren van seichetoeslagen met piekwaterstanden en waterstandsverlopen uit het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) / OntwerpInstrumentarium (OI). Dit geldt in het bijzonder voor niet-getijwateren, waarbij in deze studie het seichesignaal is gebaseerd op een 7-uurs high-pass-signaal en waarbij de WBI/OI-waterstanden niet zijn gebaseerd op het complementaire low-pass-signaal, maar op het (vrijwel) volledige waterstandssignaal inclusief (delen van) het signaal dat in onderliggende studie als seiche-signaal wordt beschouwd. Deze mogelijke dubbeltelling werkt door via de modelkalibratie van de WBI/OI-modellen en via de waterstandsverlopen uit het WBI/OI. Om de resultaten uit de huidige studie toe te kunnen passen (zijnde niet als bovengrenswaarde) zullen dus eerst de WBI/OI-modellen opnieuw gekalibreerd moeten worden op het gefilterde signaal en zullen de waterstandsverlopen gecorrigeerd moeten worden. Een andere mogelijkheid is om de seiche-analyses uit te voeren op een gefilterd signaal waarbij de filterfrequentie is afgestemd op de WBI/OI-modellen. Dit zou in een vervolgproject nader uitgewerkt en uitgevoerd kunnen worden (niet noodzakelijkerwijs onder KPP-VOW).

Uit de resultaten van Taak 1 wordt geconcludeerd dat het nauw luistert op basis van welke methode de invloed van seiches (amplitudes en netto seiche-effect) wordt bepaald, in samenhang met hoe de waterstandsignalen worden ingezet (keuze filterfrequentie). Om dubbeltellingen te voorkomen wordt het dus aangeraden om een consistente aanpak op te zetten en tevens goed te documenteren.

3.4 Afronding Werkpakket B1 uit Deltares

Met het uitvoeren van de analyse van waterstanden op de in dit onderzoek beschouwde watersystemen tezamen met de analyse in 2016 van waterstanden in het IJsselmeer, Markermeer en nabijgelegen meren (Deltares, 2016) is een goed eerste beeld verkregen van de sterkte en tijdschalen van seiches op die verschillende (deels gekoppelde) watersystemen. De uitwerking van de resultaten naar langere herhalings tijden die relevant zijn voor de HR en naar waardes voor netto-seiche-effecten hebben relevante inzichten opgeleverd welke, na verdere uitwerking, ingezet kunnen worden voor bijvoorbeeld het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI). Met het presenteren van de resultaten in dit rapport is Werkpakket B1 uit Deltares (2015) in hoofdlijnen afgerond. Wel kunnen de in dit onderzoek gepresenteerde resultaten aanleiding geven tot meer locatie-specifieke onderzoeken, waarbij bijvoorbeeld de betrouwbaarheid/nauwkeurigheid van de resultaten nader wordt onderzocht voor een specifieke locatie.

Tabel 3.1 Duiding van NSE per meetlocatie voor een herhalingsijd van 1000 jaar op basis van twee methodes²⁴.

Meetpunt	NSE methode 1 ($P_s=0.05$)	NSE methode 1 ($P_s=0.25$)	NSE methode 2	Locatie	NSE methode 1 ($P_s=0.05$)	NSE methode 1 ($P_s=0.25$)	NSE methode 2
Vlissingen	0,02	0,10	0,05	Lauwersoog	0,02	0,09	0,06
Terneuzen	0,03	0,14	0,13	Schiermonnikoog	0,03	0,13	0,09
Hansweert	0,02	0,09	0,05	Nes	0,02	0,09	0,04
Bath	0,04	0,18	0,15	West-Terschelling	0,02	0,10	0,07
Roompot Binnen	0,07	0,19	0,09	Vlieland Haven	0,02	0,08	0,06
Kats Buiten	0,08	0,22	0,03	Oudeschild	0,02	0,09	0,02
Krammersluizen West	0,06	0,19	0,02	Eemshaven	0,03	0,14	0,14
Yerseke	0,03	0,11	0,01	Delfzijl	0,04	0,19	0,20
Marollegat	0,02	0,09	0,06	Nieuw-Statenzijl	0,14	0,46	0,11
Sluis Kats Binnen (VM3)	0,15	0,17	--	Den Oever Binnen	0,35	0,48	0,04
Oranjeplaat (VM4)	0,10	0,11	--	Kornwerderzand Binnen	0,37	0,63	--
Schotsman (VM5)	0,07	0,08	--	Lemmer	0,66	0,98	0,19
Bommenede	0,07	0,10	--	Krabbersgat Noord	0,46	0,59	--
Hevel Grevelingen West	0,20	0,25	--	Houtrib Noord	1,21	1,39	--
Rak Zuid	0,10	0,18	--	Krabbersgat Zuid	0,19	0,49	0,06
Volkerak Galathea	0,02	0,09	--	Houtrib Zuid	0,54	0,65	--
Nieuw- Vossemeer	0,03	0,07	--	Schellingwouderbrug	0,87	0,96	0,10
Bathse Spuisluis Inloop	0,11	0,16	--	Hollandse Brug	0,31	0,40	0,05
Hellevoetsluis	0,01	0,07	0,02	Nijkerk West	0,22	0,33	--
Rak Noord	0,01	0,05	0,03	Nijkerk Oost	0,21	0,25	0,02
Moerdijk	0,01	0,05	0,01	Elburgerbrug	0,03	0,08	--
Deeneplaat	0,03	0,09	<0,01	Roggebotsluis Zuid	0,32	0,44	--
Werkendam Buiten	0,04	0,12	0,02	Kamperhoek	0,19	0,38	--
Krimpen a/d IJssel	0,28	0,48	<0,01	Ketelhaven	0,21	0,47	--
Den Helder	0,03	0,14	0,03	Roggebotsluis Noord	0,21	0,49	--
Den Oever Buiten	0,03	0,11	0,01	Ramspolbrug	0,41	0,63	0,09
Kornwerderzand Buiten	0,02	0,10	0,09	Kadoelen	0,02	0,10	0,02
Harlingen	0,02	0,10	0,03	Genemuiden	0,02	0,09	0,07

²⁴ Zie intro van hoofdstuk voor een toelichting van de status van de resultaten.

4 Principesommen van invloed opwekkingsmechanismen op seiches tijdens extreme condities

4.1 Context

Dit hoofdstuk beschrijft de opzet en de resultaten van principesommen die zijn uitgevoerd met het numerieke stromingsmodel WAQUA van potentiële opwekkingsmechanismen van seiches tijdens extreme omstandigheden op het IJsselmeer inclusief Vecht- en IJsseldelta. Deze sommen zijn uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in de relatieve invloed van verschillende aspecten van potentiële opwekkingsmechanismen op de sterktes van seiches op het IJsselmeer; het doel is niet geweest om de exacte waarden van de seiche-amplitudes of periodes te voorspellen. Met behulp van de resultaten kan voor werkelijke (extreme) stormen uiteindelijk beter geduid worden welke mechanismen ter grondslag liggen aan de (mogelijk) optredende seiches. Bovendien zullen de uitkomsten gebruikt kunnen worden om na te gaan op welke aspecten mogelijk verder onderzoek gericht zou moeten worden.

In eerdere verkennende onderzoeken (WL | Delft Hydraulics, 2004 en Muntjewerf, 2016) is reeds aangetoond dat het mogelijk is om met WAQUA seiches te reproduceren onder reguliere tot zware stormcondities op basis van uniform opgelegde meetsignalen. Zowel de amplitudes als de perioden van de waterstandsfluctuaties kunnen redelijk tot goed worden benaderd met WAQUA. Ook is in WL | Delft Hydraulics (2004) een eerste verkenning uitgevoerd naar 'overshoots' van de waterstand bij zeer zware stormen (windkracht 12 Beaufort). Met overshoots wordt het tijdelijk 'doorschieten' van de waterstand bedoeld na een plotselinge verandering in de richting of sterkte van de wind.

Deze deeltaak moet gezien worden als een voorbereiding op Werkpakket O2 uit Deltares (2015), waarbij het uiteindelijke doel zal zijn een kwantitatieve beschrijving te geven van de opwekking van seiches (incl. mogelijke fysische begrenzing van de aandrijvende krachten en resulterende seiche-amplitudes). Die beschrijving kan vervolgens input zijn voor nadere analyses van deze fenomenen en zou ingezet kunnen worden om de huidige operationele seiche-verwachting van het KNMI uit te breiden.

Sectie 4.2 beschrijft de achtergrond van het toegepaste WAQUA-model van het IJsselmeer en geeft een overzicht van de rundefinities van de uitgevoerde berekeningen. Vervolgens worden in Sectie 4.3 de resultaten van de runs besproken en geanalyseerd. Tot slot worden in Sectie 4.4 de resultaten vergeleken met de resultaten van eerdere studies.

4.2 Korte beschrijving WAQUA-model en rundefinities

4.2.1 WAQUA-model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht

Binnen dit project is gebruik gemaakt van de WAQUA-modelschematisatie van het IJsselmeer, Overijsselsche Vecht en de IJssel vanaf Olst zoals die in 2011 door Deltares is opgezet voor de Waterdienst van Rijkswaterstaat in het kader van WTI 2011. Deze modelschematisatie is de vigerende schematisatie voor dit gebied. Het model is in beheer van Rijkswaterstaat, maar wordt onderhouden door Deltares. De opzet, kalibratie en verificatie van het model is beschreven in Deltares (2011).

In relatie tot de toepassing voor het bepalen van de HR 2011 is er bij de opzet en validatie van het model specifiek gekeken naar een correcte hydrodynamische beschrijving en schematisatie van de verschillende deelgebieden, de berekening van waterstanden op het

IJsselmeer, de IJssel en de Vecht, van de afvoeren op de Vecht en de IJssel, van de waterbalans van het IJsselmeer, de invloed van de windformulering op het IJsselmeer, en de werking van de Ramspolkering. Het model is niet gevalideerd voor seiches (waterstanden en stroomsnelheden) in het modelgebied. De resultaten binnen de huidige toepassing moeten daarom worden geïnterpreteerd als een eerste indicatie van de daadwerkelijke waarden die zullen optreden onder dergelijke omstandigheden.

Het model is zonder aanpassingen aan de schematisatie of numerieke instellingen toegepast binnen dit project²⁵. Voor de Ramspolkering betekent dit dat deze in het rekenmodel zal sluiten bij een waterstand van NAP +0,50 m aan de zijde van het Zwarte Water. Verder is voor de runs uitgegaan van een situatie met een minimale afvoer op de rivieren, enkel bedoeld om de waterstand in de riviermonding te handhaven. Op die manier wordt een mogelijke invloed van de rivierafvoer op de seiches zoveel als mogelijk beperkt. Tot slot zijn de Stevin- en Lorentz(keer)sluizen in de Afsluitdijk continue gesloten gedurende de runs.

4.2.2 Rundefinities principesommen

Uit KNMI (2008) komt naar voren dat een viertal weersystemen kunnen leiden tot seiches:

- 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.

Vanuit deze weersystemen kunnen enkele discrete, onweerslijn of front-gerelateerde forceringsonderdelen worden onderscheiden die elk een bepaalde invloed kunnen hebben op de sterkte, periode en duur van de resulterende seiches op het IJsselmeer (Type A, B en D):

- Drukstoten
- Windstoten/scherpe windsprongen
- Windruiming

Op basis van deze forceringen is een zevental runs in overleg met RWS gedefinieerd, waarbij verschillende combinaties van – voor het systeem typische – extreme parameterwaarden zijn aangehouden voor de druk en wind. Deze rundefinities zijn samengevat in Tabel 4.1. Hierbij zijn Runs 1 en 2 en Runs 3, 4 en 5 sets van soortgelijk type runs. Runs 6 en 7 zijn twee op zichzelf staande runs. Anders dan in eerder uitgevoerde studies (WL | Delft Hydraulics, 2004 en Muntjewerf, 2016) worden de forceringen in deze berekeningen als ruimtelijk variërende velden opgelegd. De forceringen worden nader toegelicht in de volgende sectie.

²⁵ Hiervoor is gekozen om consistent te blijven met de eerdere studie(s), vanwege naar verwachting onvoldoende beschikbaarheid van validatiegegevens (zeker voor extreme condities) en omdat een volledige modelkalibratie en -validatie een project op zich zou zijn. De inzet van het model binnen het huidige project is bovendien niet gericht op exacte nauwkeurigheid maar op relatieve interpretaties.

Tabel 4.1 Rundefinities principesommen met WAQUA

Run	Type forcering	Trekriching front incl. snelheid
1	Kortdurende drukstoot (symmetrische driehoekspuls, 30 min.) van 5 hPa bij een verder constante druk (1020 hPa) zonder wind	WZW (18 m/s)
2	Kortdurende drukstoot (symmetrische driehoekspuls, 15 min.) van 5 hPa bij een verder constante druk (1020 hPa) zonder wind	WZW (36 m/s)
3	Scherpe windsprong waarbij de wind (richting WZW) met 50% afneemt van 18 m/s naar 9 m/s in 30 minuten bij een constante druk (1020 hPa)	WZW (18 m/s)
4	Scherpe windsprong waarbij de wind (richting WZW) met 80% afneemt van 36 m/s naar 7,2 m/s in 30 minuten bij een constante druk (1020 hPa)	WZW (36 m/s)
5	Scherpe windsprong waarbij de wind (richting WZW) met 50% afneemt van 18 m/s naar 9 m/s in 30 minuten, incl. kortdurende drukstoot (symmetrische driehoekspuls, 30 min.) van 5 hPa bij een verder constante druk (1020 hPa)	WZW (18 m/s)
6	Windruiming bij constante windsnelheid (18 m/s) waarbij de windrichting in 30 minuten draait van Z naar WZW, incl. kortdurende drukstoot (symmetrische driehoekspuls, 30 min.) van 5 hPa bij een verder constante druk (1020 hPa)	WZW (18 m/s)
7	Windstoot waarbij de wind (richting WZW) toeneemt van 18 m/s naar 36 m/s in 30 minuten bij een constante druk (1020 hPa)	WZW (36 m/s)

4.3 Forceringen en resultaten

Hieronder worden de forceringen en resultaten van elk van de runs besproken. Hierbij zijn vergelijkbare runs gegroepeerd zoals beschreven in Sectie 4.2.2. In Bijlage C zijn ter vastlegging voor alle runs en elk van de beschouwde locaties wavelet-plots opgenomen van de resulterende waterstandsignalen. Waar dit relevant is, zal hiernaar verwezen worden als onderdeel van de interpretatie van de uitkomsten.

4.3.1 Runs 1 en 2: Kortdurende drukstoot

Forcering

De forceringen van Runs 1 en 2 bestaan uit een driehoekdrukspuls van 5 hPa bovenop de basisdruk van 1020 hPa. Voor Run 1 duurt deze puls 30 minuten en trekt de puls over met 18 m/s (komend uit WZW, zie bovenste kaders Figuur 4.1). De ruimtelijke reikwijdte van de puls is hiermee 32,4 km, wat iets groter is dan de maximale natte breedte van het IJsselmeer, gemeten langs de trekrichting. Voor Run 2 is het ruimtelijke veld van de puls gelijk gehouden en is alleen de treksnelheid verhoogd naar 36 m/s (zie bovenste kaders Figuur 4.2). Merk op dat dit geresulteerd heeft in het halveren van de gemodelleerde tijd van Run 2 ten opzichte van Run 1. De verwachting is dat een hogere treksnelheid leidt tot een minder sterke seiches als gevolg van het (nog meer) uit de pas lopen van de treksnelheid met de voortplantingssnelheid van lange golven in het beschouwde domein.

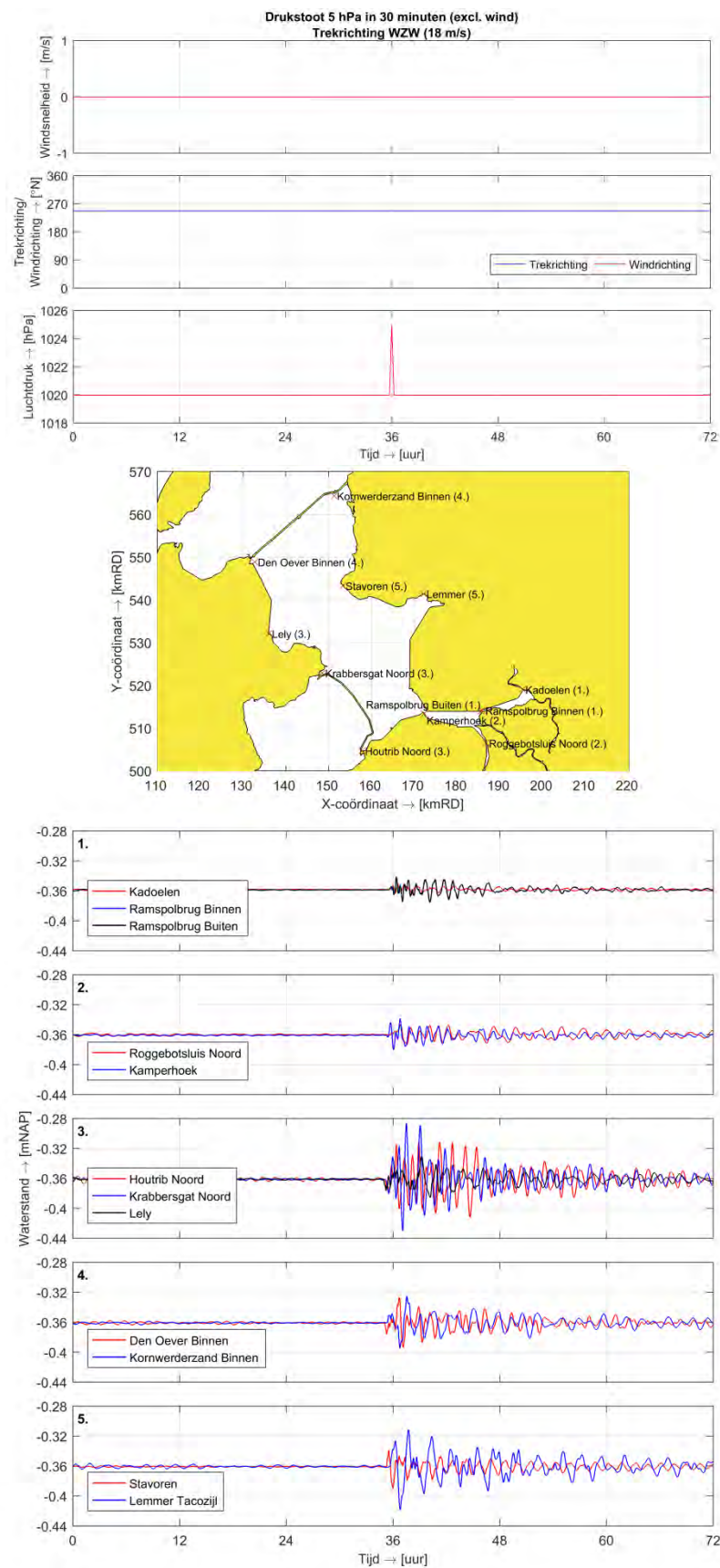
Resultaten

Uit de resultaten van Runs 1 en 2 (het onderste deel van respectievelijk Figuur 4.1 en Figuur 4.2) komt naar voren dat de gesimuleerde treksnelheden van de fronten naar alle waarschijnlijkheid te hoog zijn om met alleen een druksprong (met richting WZW) een hoge seiche/schommeling te veroorzaken op het IJsselmeer (amplituden < 1 dm). Ook volgt uit de resultaten dat een hogere treksnelheid niet noodzakelijkerwijs tot hogere amplitudes leidt.

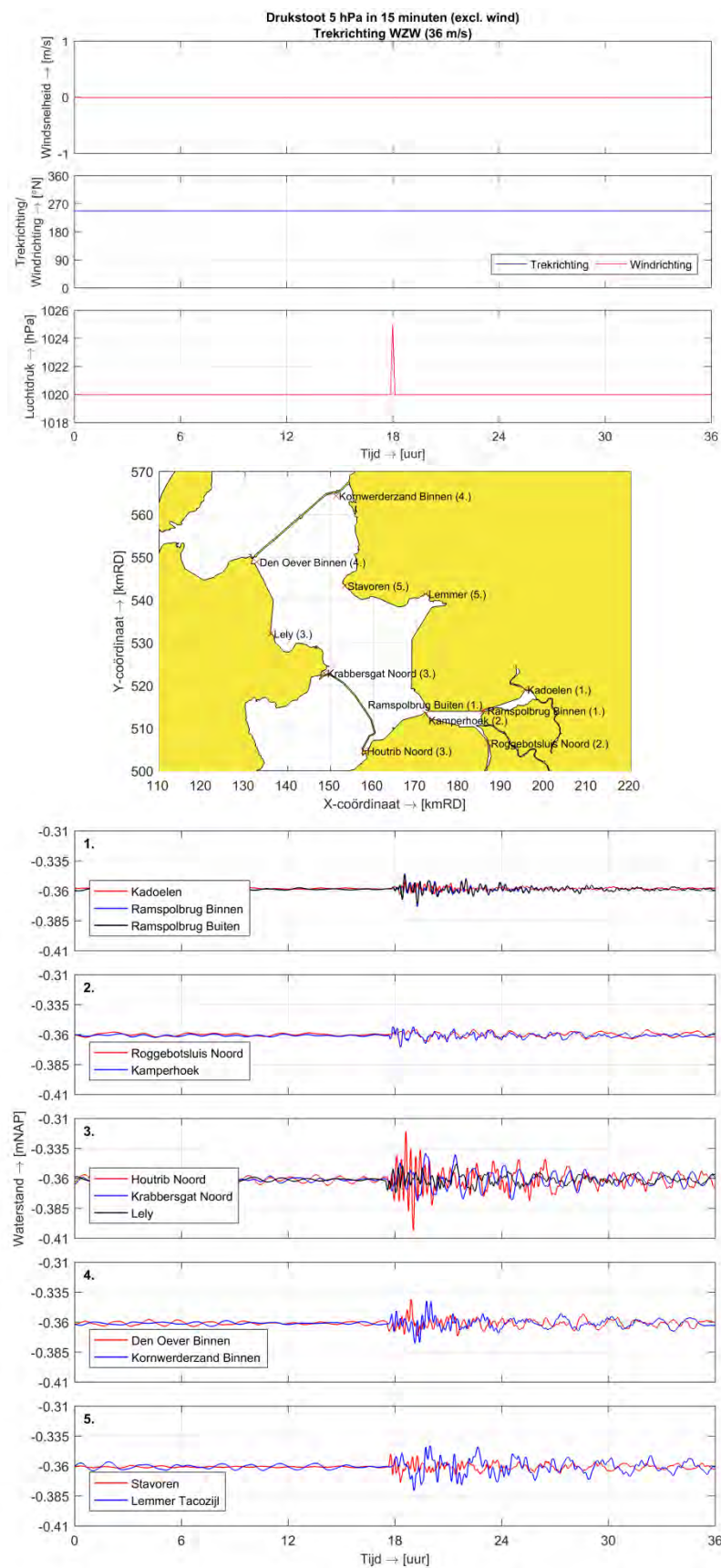
De maximale amplitude die wordt gevonden is orde 7 cm bij Krabbersgat Noord bij een treksnelheid van 18 m/s. Op die locatie is het drukstooteffect net wat groter dan het statische drukeffect ($\pm 1 \text{ hPa} > 1 \text{ cm}$ waterstandsverschil). Op alle andere locaties is het drukstooteffect kleiner dan of gelijk aan het statische drukeffect ($\pm 1 \text{ hPa} \leq 1 \text{ cm}$ waterstandsverschil). Bij de hogere treksnelheid van 36 m/s zijn de amplitudes ongeveer de helft kleiner. De verschillende slingerperiodes die worden gevonden verspreid over het domein (vergelijk bijvoorbeeld de punten bij de Houtribdijk met het punt bij Lemmer in Figuur 4.1) wijzen er op dat naast globale opwekking, waarbij het gehele IJsselmeer is aangeslagen, ook lokale opwekking is opgetreden, af te lezen uit de kortere tijdschalen die optreden. In Bijlages C.1 en C.2 is dit goed terug te zien in de wavelet-plots van de verschillende uitvoerlocaties. Voor Run 1 worden hierin periodes teruggevonden van 0,7 tot 2,5 uur, terwijl voor Run 2, met een hogere treksnelheid, veelal kortere slingerperiodes gevonden worden.

Opvallend is dat de schommelingen/seiches op de verschillende punten zeer lang door blijven gaan en veelal nog niet compleet uitgedempt zijn aan het einde van het simulatieinterval. Dit wijst er op dat de demping in het systeem vrij beperkt is voor dergelijke schommelingen. Ook lijkt de mate van uitdoving enigszins locatieafhankelijk. Omdat de forcering in dit geval niet zelf voor demping²⁶ zorgt, zal alleen de bodemwrijving voor demping kunnen zorgen. De stroomsnelheden in het systeem zijn echter dermate laag dat de bodemwrijving een beperkte invloed heeft. Omdat het model niet gevalideerd is voor seiches is het onbekend hoe goed deze demping de werkelijkheid benadert. Echter de uitkomsten kunnen wel vergeleken worden met de andere set aan runs.

²⁶ Met demping als gevolg van de forcering wordt hier bedoeld: het toewerken naar een (nieuwe) stabiele evenwichtstoestand bij die forcering.



Figuur 4.1 Forcering en resultaten Run 1



Figuur 4.2 Forcing en resultaten Run 2

4.3.2 Runs 3, 4 en 5: Scherpe windsprong

Forcering

De forceringen van Runs 3, 4 en 5 bestaan uit een constante druk van 1020 hPa met een scherpe windsprong halverwege de run. Run 5 bevat daarnaast een drukstoot gelijk aan die van Run 1 op het moment van de windsprong. De windsprongen van Runs 3 en 5 zijn gelijk aan elkaar en bestaan uit een afname (50%) van de wind (richting WZW) in 30 minuten van 18 m/s naar 9 m/s. De windsprong van Run 4 bestaat uit een afname (80%) van de wind (richting WZW) in 60 minuten van 36 m/s naar 7,2 m/s. Alle drie de runs worden opgestart vanuit rust (geen wind) om vervolgens naar een evenwichtstoestand toe te werken, waarna de windsprong optreedt en het systeem naar een nieuwe evenwichtstoestand toe moet werken. Het verloop van de forceringen in de tijd van Runs 3, 4 en 5 is weergegeven in de bovenste drie kaders van respectievelijk Figuur 4.3, Figuur 4.4 en Figuur 4.5.

Resultaten

Het plotseling wegvallen van de wind in Runs 3, 4 en 5 leidt in de simulaties tot schommelingen in de waterstand op het IJsselmeer. Op de aansluitende meren (Ketelmeer, Vossemeer en Zwarte Water) zijn deze schommelingen minder duidelijk tot niet zichtbaar en wordt veelal kritisch gedempt gedrag vertoond. Dit houdt in dat na de scherpe verandering in de windconditie de waterstand op een zeker uitvoerpunt geleidelijk een andere evenwichtswaarde aanneemt zonder dat hierbij oscillaties optreden.

Ondanks de verschillen in windsnelheid tussen Runs 3 en 5 en Run 4, zijn de amplitudes van de resulterende schommelingen op het IJsselmeer vergelijkbaar (orde 0,2-0,3 m). Anders dan Runs 3 en 5 laat Run 4 duidelijk “over- en undershoots” in de waterstandssignalen direct na het wegvallen van de wind (~0,4-0,6 m amplitude). Deze zijn vooral zichtbaar op het IJsselmeer en met name op locaties Houtrib Noord (overshoot, bovenwinds) en Kornwerderzand Binnen (undershoot, benedenwinds). Dit is het gevolg van de grotere sprong in de windsnelheid. Vooral “overshoots” kunnen van belang zijn voor de waterveiligheid (overtopping), maar ook “undershoots” kunnen voor veiligheidsproblemen zorgen (afschuiven taluds). “Overshoots” bij seiches zijn in een eerder onderzoek al nader beschouwd (WL | Delft Hydraulics, 2004).

De verstoring in de waterstand op locatie Kadoelen rond tijdstip $t = 12$ uur bij Run 4 (Figuur 4.4) is geen “overshoot” zoals degene die optreden op $t = 36$ uur als gevolg van de meteorologische forcering van het model. De verstoring rond 12 uur wordt veroorzaakt door het sluiten van de Ramspolkering (vergelijkbaar met het effect van een translatiegolf). Nadat de kering volledig is gesloten, stelt zich er geleidelijk een nieuw evenwicht in op het Zwarte Water, waarbij de waterstand bij Kadoelen afneemt tot de nieuwe evenwichtswaarde.

De periodes van de schommelingen op de verschillende locaties op het IJsselmeer voor Runs 3, 4 en 5 zijn zeer vergelijkbaar (~2,5 uur, zie Bijlages C.3 tot en met C.5). Dit geeft aan dat, anders dan bij Runs 1 en 2, hier wel globale opwekking is opgetreden.

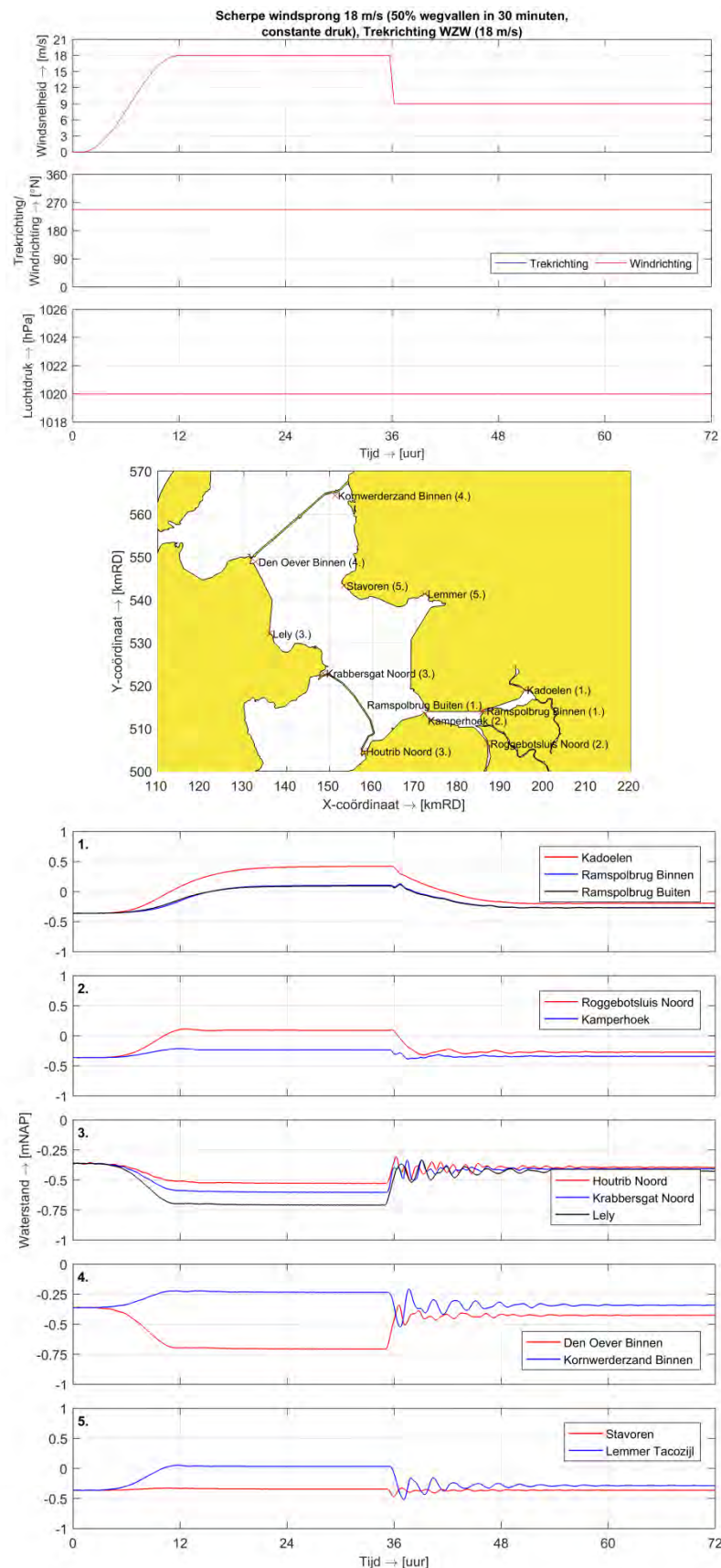
Het kritisch gedempt gedrag op de aangrenzende meren wordt naar verwachting veroorzaakt door de nauwe verbindingen tussen de waterlichamen. Deze vernauwingen bij de Ketelbrug en de Ramspolkering zorgen naar verwachting voor een vertragend effect op de communicatie van de waterstanden op de waterlichamen. Het is daardoor mogelijk dat de kleinere meren het relatief snelle waterstandsverloop op het IJsselmeer niet kunnen volgen.

Een vergelijking van de resultaten van Runs 3 en 5, waarbij het enige verschil het toevoegen van een drukstoot is bij Run 5, laat zien dat de verschillen in de waterstandsverlopen zeer klein zijn. De invloed van de drukstoot is verwaarloosbaar ten opzichte van de invloed van de forcering door de wind.

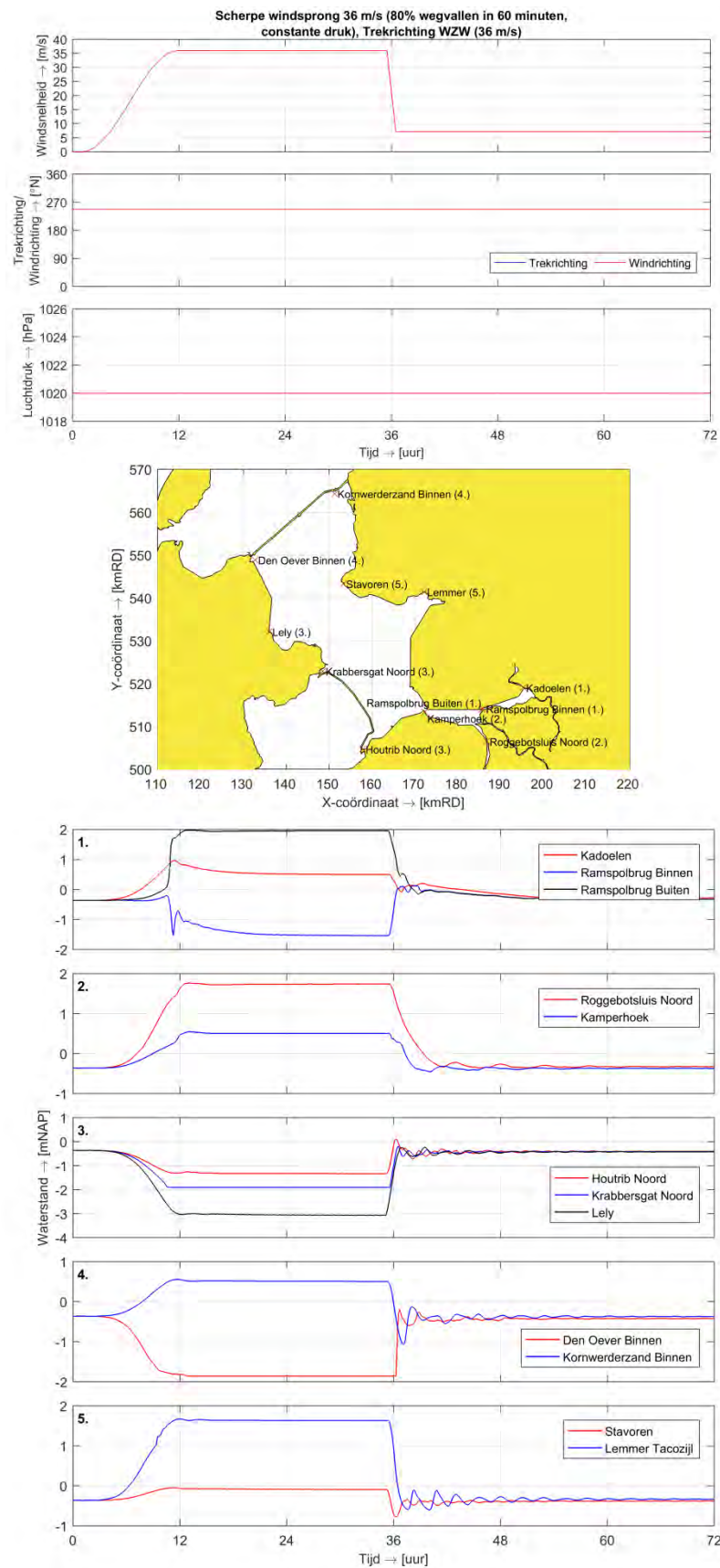
Daarnaast wordt opgemerkt dat de tijdsduur voor het bereiken van een nieuwe evenwichtstoestand beïnvloed wordt door de sterkte van de wind na de windsprong. Uit een vergelijking van Runs 3 en 5 met Run 4 valt op dat de schommelingen in de waterstand bij Runs 3 en 5 (met een windsnelheid van 9 m/s na de windsprong) binnen 12 uur nagenoeg uitgedempt zijn, terwijl bij Run 4 (met een windsnelheid van 7,2 m/s na de windsprong) dit langer duurt dan 12 uur. Dit wijst er op dat de opgelegde nieuwe evenwichtssituatie 'stabiliserend' werkt omdat het systeem naar die nieuwe evenwichtssituatie gedwongen lijkt te worden.

Tot slot kunnen bij Run 4 nog twee opvallende observaties gemaakt worden:

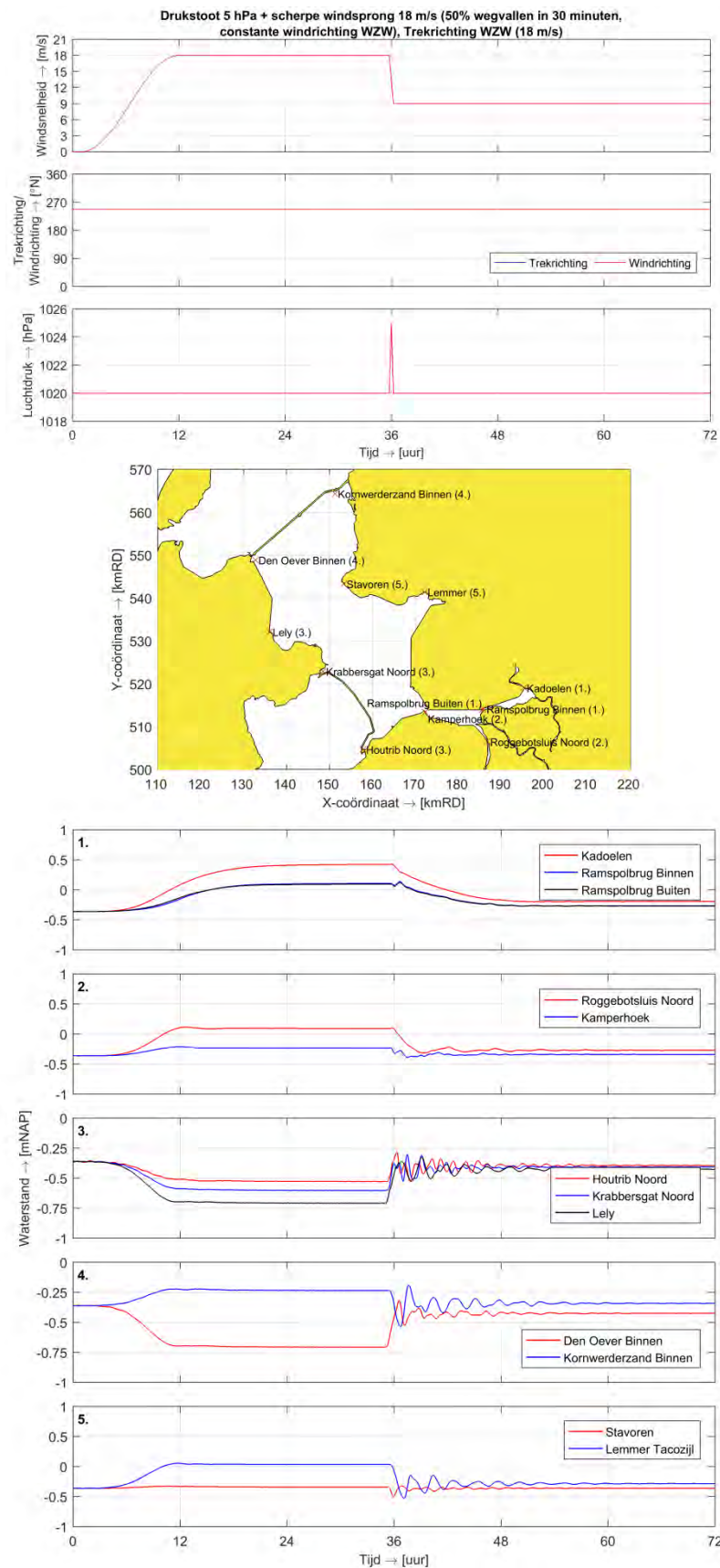
- Als eerste valt op dat de locaties Krabbersgat Noord en Den Oever Binnen droogvallen bij de zeer extreme wind van 36 m/s uit WZW. De scheefstand op het IJsselmeer wordt in dat geval zo groot dat aan de benedenwindse zijde delen droog beginnen te vallen. Het is onbekend hoe realistisch dit is. Binnen de huidige opdracht is dit niet verder onderzocht.
- Een andere opvallende observatie is de sluiting van de Ramspolkering. Als gevolg van het bereiken van een waterpeil van 0,5 meter aan de oostzijde van de kering (Zwarte Water) aan het begin van de run heeft de kering zich gesloten. Vervolgens heeft zich er een groot verval opgebouwd over de kering van orde 3,5 m. De kering wordt weer geopend op het moment dat het verval over de kering weer snel afneemt na de windsprong. Er heerst dan nog een zeker restverval (orde 0,5 m). Dit verval loopt binnen 2-3 uur terug totdat een situatie met praktisch gelijke waterstand ontstaat. Het is onbekend hoe goed dit detailproces van openen overeenstemt met de werkelijkheid. Een nadere analyse en validatie van de gedetailleerde beschrijving van het keringsproces was geen onderdeel van het huidige project.



Figuur 4.3 Forcering en resultaten Run 3



Figuur 4.4 Forcing en resultaten Run 4.



Figuur 4.5 Forcering en resultaten Run 5

4.3.3 Run 6: Windruiming

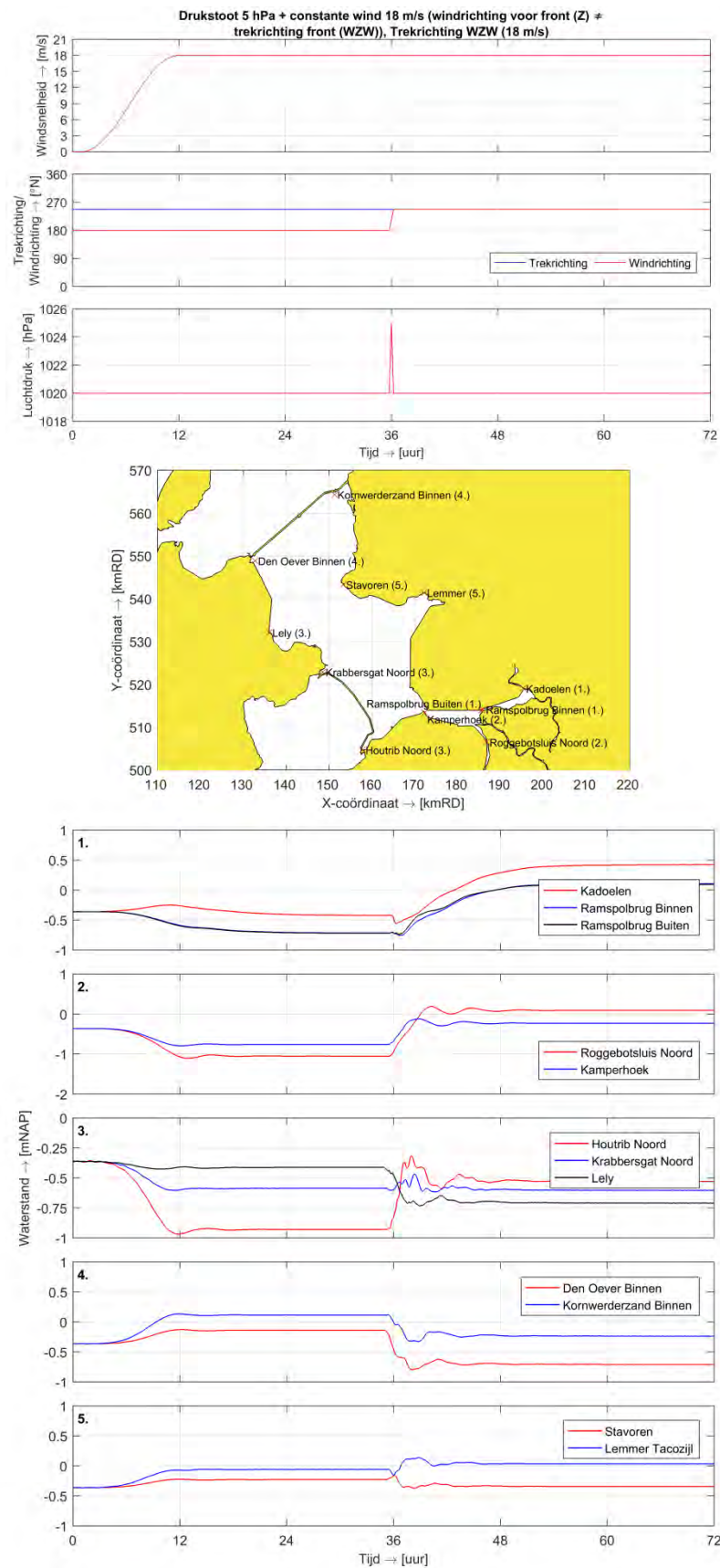
Forcering

In Run 6 vindt windruiming plaats waarbij de windrichting in 30 minuten draait van Z naar WZW. De windsnelheid behoudt hierbij een constante waarde van 18 m/s. Tevens bevat Run 6 een drukstoot gelijk aan die van Run 1 op het moment van de windruiming. De run wordt opgestart vanuit rust (geen wind) om vervolgens naar een evenwichtstoestand toe te werken, waarna de windruiming optreedt en het systeem naar een nieuwe evenwichtstoestand toewerkt. Het verloop van de forceringen in de tijd van Run 6 is weergegeven in de bovenste drie kaders van Figuur 4.6.

Resultaten

De resultaten van Run 6 laten zien dat windruiming leidt tot waterstandsfluctuaties met vergelijkbare amplitudes op het IJsselmeer en de randmeren als Runs 3, 4 en 5. De amplitudes van de fluctuaties variëren hierbij tussen 0,1 en 0,3 m. De fluctuaties hebben anders dan voor Runs 3, 4 en 5 een langere periode van orde 5-6 uur (zie Bijlage C.6). Dit geeft aan dat een andere eigenmodus van het meer kan worden aangeslagen in geval van de gesimuleerde windruiming dan bij een windsprong uit richting WZW (Runs 3, 4 en 5). Naar verwachting is de invloed van de drukstoot op de grootte van de fluctuaties zeer klein (vergelijkbaar met de resultaten van Run 5); dit is echter niet afzonderlijk onderzocht.

De relatief sterke en constant blijvende forcering door de wind zorgt voor het relatief snel bereiken van een nieuw evenwicht op het IJsselmeergebied. Anders dan voor Runs 3, 4 en 5 zijn bij Run 6 wel fluctuaties in de waterstand te zien op het Ketelmeer en het Vossemeer. Naar verwachting is dit het gevolg van een verschil in de invloed van de wind op de randmeren ten opzichte van het IJsselmeer, juist bij die windrichtingen. Op het Zwarte water worden nauwelijks schommelingen waargenomen. Door de constant blijvende windsnelheid na de verstoringrelatief wordt snel een nieuw evenwicht bereikt op het IJsselmeer (orde 6-8 uur). Op de aangrenzende wateren duurt dit langer (orde 12 uur) als gevolg van vernauwingen ter plaatse van meetpunt Kamperhoek en Ramspolbrug en mogelijk de beperktere invloed van de wind op de meren (oriëntatie meren t.o.v. windrichting).



Figuur 4.6 Forcering en resultaten Run 6

4.3.4 Run 7: Windstoot

Forcering

De forcering van Run 7 bestaat uit een sterke toename van de wind (windstoot) in 30 minuten²⁷ van 18 m/s naar 36 m/s. Hierbij blijven de windrichting (WZW) en de luchtdruk (1020 hPa) constant. De run wordt opgestart vanuit rust (geen wind) om vervolgens naar een evenwichtstoestand inclusief wind toe te werken, waarna de windstoot optreedt en het systeem naar een nieuwe evenwichtstoestand toewerkt. Het verloop van de forceringen in de tijd van Run 7 is weergegeven in de bovenste drie kaders van Figuur 4.7.

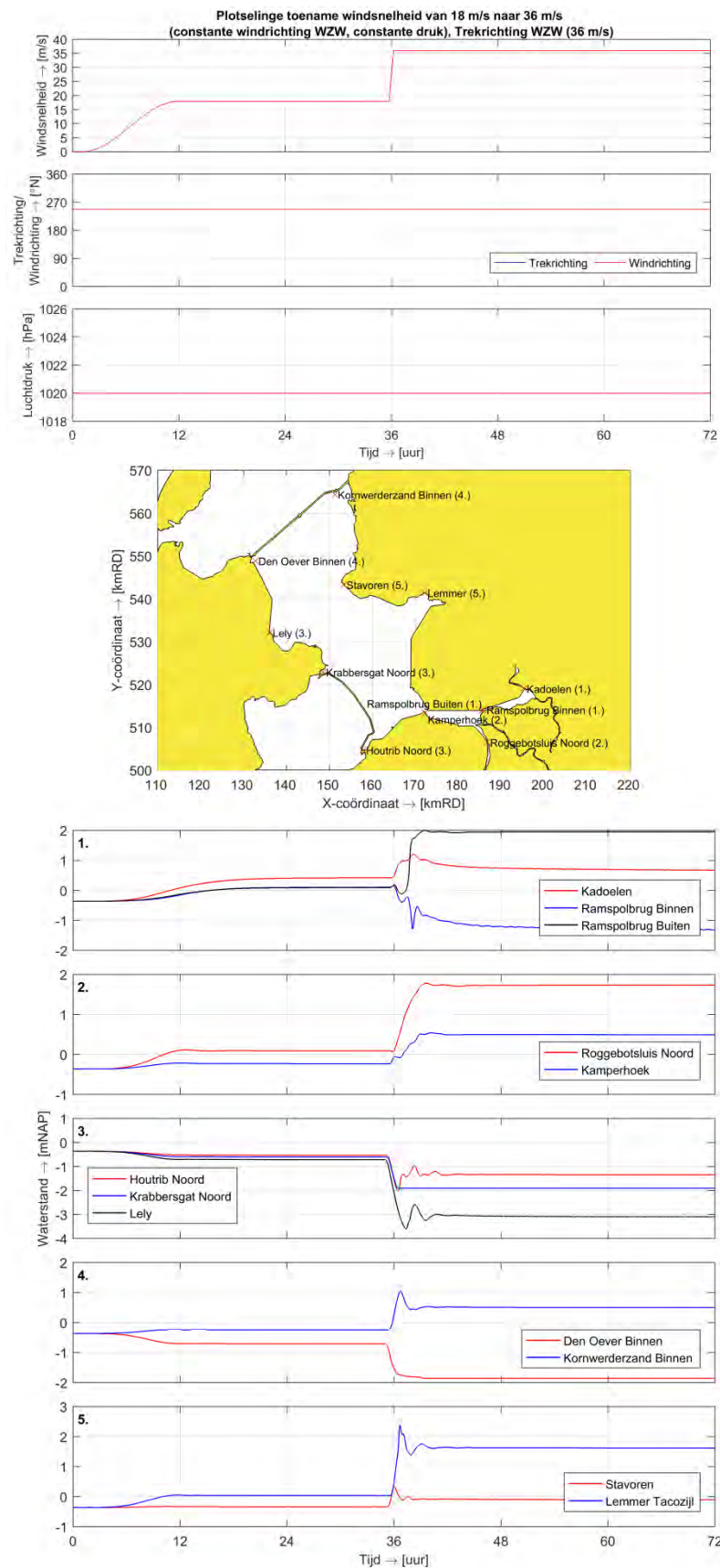
Resultaten

Uit de resultaten van Run 7 komt naar voren dat een windstoot tot sterke fluctuaties in de waterstand kan leiden. Echter worden deze schommelingen onderdrukt door de sterke, constant aanhoudende wind (36 m/s) in het interval na de plotselinge toename. Op veel punten zijn hierdoor alleen de initiële “under- en overshoots” waar te nemen (~0,4-0,6 m) met één enkele daaropvolgende oscillatie (T ~2-4 uur, zie Bijlage C.7). De grootste “overshoot” wordt gevonden op locatie Lemmer Tacoziyl (benedenwinds) en de grootste undershoot op locatie Lely (bovenwinds). Op enkele andere punten treedt kritisch gedempt gedrag op. De nieuwe evenwichtssituatie van het systeem wordt bij Run 7 dus ook veel sneller bereikt (binnen ca. 4 uur) ten opzichte van de andere runs.

Evenals bij Run 4 sluit in Run 7 de Ramspolkering als gevolg van de door de sterke wind gegenereerde scheefstand en de daaruit volgende hoge waterstand op het Ketelmeer. Op het Zwarte Water ontstaat hierdoor een apart systeem dat gedurende het interval met gesloten kering niet beïnvloed wordt door het IJsselmeer en de andere meren. Na de sluiting van de kering valt dan ook een korte schommeling op het Zwarte Water waar te nemen, met een periode van orde 1 uur, die niet elders teruggezien wordt. Dit is naar verwachting een direct gevolg van het sluiten van de kering (vergelijkbaar met een translatiegolf). Vervolgens ontstaat er onafhankelijke scheefstand op het Zwarte Water.

Volledigheidshalve wordt opgemerkt dat evenals bij Run 4 (bij een constant aanhoudende wind uit WZW met een snelheid van 36 m/s) uiteindelijk droogvalling optreedt op enkele punten aan de westzijde van het IJsselmeer. Aangezien dit naar verwachting geen doorslaggevende invloed heeft op de berekende slingeringen op de meren is dit niet verder beschouwd binnen de huidige studie.

²⁷ Oorspronkelijk nam de wind in dit scenario toe van 18 m/s naar 36 m/s in 10 minuten. Vanwege numerieke stabiliteitsproblemen is deze tijdsduur verlengd naar 30 minuten, wat vergelijkbaar is met de tijdsschalen van de verschillende forceringen in andere runs.



Figuur 4.7 Forcering en resultaten Run 7

4.4 Vergelijking uitkomsten met eerdere studies

Zoals genoemd in Sectie 4.1 is in eerder verkennend onderzoek al vastgesteld dat het mogelijk is om met uniforme wind- en drukvelden seiches op het IJsselmeer te reproduceren in het numerieke model WAQUA. In WL | Delft Hydraulics (2004) wordt geconcludeerd dat in de gesimuleerde stormen twee van de drie belangrijkste *eigenperiodes* ($T = 0,7$ uur, **1,5 uur** en **2,4 uur**) goed worden gereproduceerd. Van de derde eigenperiode ($T = 0,7$ uur) wordt verwacht dat deze gerelateerd is aan drukveranderingen welke destijds niet beschouwd zijn. De eigenperiodes $T = 1,5$ en $2,4$ uur worden duidelijk teruggevonden in de resultaten van de huidige studie. Ook de genoemde van eigenperiode $T = 0,7$ uur kunnen in Runs 1 en 2 teruggevonden worden. Dit laatste geeft een indicatie dat de hypothese uit 2004 klopt dat deze eigenperiode inderdaad wordt aangeslagen door drukvariaties. Dit zou nog nader geverifieerd kunnen worden als onderdeel van een eventuele vervolgstudie.

In WL | Delft Hydraulics (2004) wordt ook geconcludeerd dat de *amplitudes* niet voor elke eigenperiode goed overeenkomen met de gemeten uitwijkingen. Dit wordt toegeschreven aan het feit dat het model niet gekalibreerd is voor seiches. Ondanks dat in het huidige onderzoek een nieuwere versie van het WAQUA-model is toegepast (Deltares, 2011), is deze nog niet gekalibreerd voor seiches. Ook heeft in het huidige project nog geen validatie plaatsgevonden voor ruimtelijk variërende velden omdat hier alleen principesommen met kunstmatige forceringen zijn uitgevoerd. Voor het huidige doel van de gemaakte berekeningen, met relatieve interpretaties, was dit ook niet bezwaarlijk. Deze kalibratie dient plaats te vinden alvorens Werkpakket O2 uitgevoerd kan worden waarin HARMONIE gekoppeld gaat worden aan het WAQUA-model.

In het stageonderzoek van Laura Muntjewerf (Muntjewerf, 2016) is onderzocht of het mogelijk is om met WAQUA het seichesignaal in Lemmer te reproduceren voor de Sinterklaasstorm van december 2013 op basis van wind- en drukuitvoer van het KNMI-weermodel HARMONIE (resolutie $2,5 \times 2,5$ km). Ook heeft zij WAQUA toegepast met uniform opgelegde windvelden op basis van het gemeten signaal van meetpaal FL02 (Rotterdamse Hoek). In het werk van Muntjewerf is vooral gefocust op hoezeer WAQUA de amplitudes goed voorspelt en minder op de nauwkeurigheid van de berekende slingerperiodes. In het onderzoek wordt geconcludeerd dat op basis van uniform opgelegde gemeten windvelden tot 90% van de gemeten extreme waterstand (inclusief seiches) gevat wordt met WAQUA. Verder wordt geconcludeerd dat de resolutie van HARMONIE op dit moment nog te beperkt is om de scherpte in de veranderingen van de gemeten wind- en druksignalen goed te vatten. Door het ontbreken van deze scherpte in de forcering worden de seiches in veel mindere mate getriggerd binnen het beschouwde rekendomein in WAQUA.

5 Conclusies en vooruitblik

5.1 Hoofdconclusies

Deze studie heeft geleid tot de volgende hoofdconclusies:

Taak 1: Kwantificering van seiche-achtige verschijnselen op de voor seiches (en binnen KPP-VOW) nog niet eerder beschouwde wateren binnen Nederland.

- Analyse van waterstandsmetingen op 37 locaties op de voor seiches nog niet eerder beschouwde wateren heeft aangetoond dat seiches optreden in alle beschouwde watersystemen, met verschillende amplituden en tijdschalen.
- Tabel 2.2 en Tabel 2.3, op pagina's 16 en 17 van de hoofdtekst, bevatten een samenvatting van de typische seiche-amplitudes en -periodes zoals afgeleid uit de metingen op de in dit rapport beschouwde locaties. Tabel 2.4 toont een samenvatting van de resultaten voor het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren uit Deltares (2016) aangevuld met amplitudes voor langere herhalingstijden (1.000, 4.000 en 10.000 jaar). De seichekarakteristieken bij de gepresenteerde herhalingstijden zijn veelal gebaseerd op een meetreeks van (slechts) 10 jaar. De betrouwbaarheid (verwachtingswaarde en onzekerheidsband) verbetert significant bij gebruik van langere tijdreeksen (bijvoorbeeld 30 jaar).
- De hoogte van de seiches (amplituden) op de in deze studiefase beschouwde locaties lijken, anders dan voor het IJsselmeer, Markermeer en de randmeren (Deltares, 2016), minder gecorreleerd te zijn met de grootte van het watersysteem. Eén van de mogelijke verklaringen hiervoor is dat veel van de in dit onderzoek aanvullend beschouwde wateren in open verbinding staan met zee. Hierdoor kan het systeem anders reageren op bepaalde forceringen en kan energie van seiches worden gedempt door uitstraling naar zee. Een andere mogelijke verklaring is dat hoge stroomsnelheden als gevolg van het getij ook een bijdrage kunnen hebben in de demping van seiches.
- Op de in dit onderzoek beschouwde watersystemen met een open karakter (Westerschelde, Oosterschelde, Waddenzee en Eems-Dollard) bestaan over het algemeen geen grote verschillen in de groottes van seiche-amplituden op de verschillende watersystemen. Gemiddeld is de seiche-amplitude gelijk aan 0,2-0,3 m bij een herhalingstijd van 10 jaar. Ook tussen de locaties in hetzelfde watersysteem bestaan over het algemeen geen grote verschillen.
- De toepasbaarheid van de gebruikte meetdata was beperkt voor een deel van de beschouwde meetlocaties. Dit is deels het gevolg van data-opslagkarakteristieken en deels van overlappende tijdschalen van fysische fenomenen/processen. Dat laatste veelal op locaties waar er ook sprake is van een getijinvloed. In de aanpak en bij de analyse van deze data is rekening gehouden met die beperkingen.
- Om een eerste indicatie te verkrijgen van de relevantie van seiches voor de HR voor alle meetlocaties het waterstandsverhogende effect bepaald dat een seiche kan hebben ten tijde van een hoogwater, het zogenaamde netto-seiche-effect (NSE). Dit is gedaan is op basis van twee methodes voor een voor de HR relevante herhalingstijd van 1000 jaar. Tabel 3.1 op pagina 27 toont deze indicatieve waarden van het NSE per locatie op basis van twee verschillende methodes voor die herhalingstijd.
- De resulterende netto seiche-effecten op de beschouwde watersystemen zijn in veel gevallen significant kleiner dan de corresponderende seiche-amplitudes. Dit wijst op een kleine samenloopkans van seiches met de piek van een stormopzet/hoogwater. Vooral bij niet-getijwateren wordt een relatief kleine correlatie gevonden voor het gelijktijdig optreden van maatgevende waterstanden en seiches.

- Bij toepassing van de resultaten van Taak 1 (seiche-amplitudes en netto seiche-effecten) moet gewaakt worden voor mogelijke dubbeltelling bij het combineren van deze toeslagen met piekwaterstanden en waterstandsverlopen uit het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI) / Ontwerpinstrumentarium (OI). Deze mogelijke dubbeltelling werkt door via de modelkalibratie van de WBI/OI-modellen en via de waterstandsverlopen uit het WBI/OI. Beide zijn gebaseerd op het totale waterstandssignaal, inclusief het hoogfrequente “seichebereik”. De resultaten van Taak 1 kunnen eventueel wel gebruikt worden als bovengrenswaarden.
- Het luistert nauw op basis van welke methode de invloed van seiches (amplitudes en netto seiche-effect) wordt bepaald, in samenhang hoe met de waterstandsignalen wordt omgegaan (keuze filterfrequentie). Deze gevoeligheid vraagt om consistent opgezette aanpak en goed gedocumenteerde keuzes.

Taak 2: Uitvoeren van principesommen van de invloed van opwekkingsmechanismen van seiche-achtige verschijnselen op het IJsselmeergebied tijdens extreme omstandigheden met een numeriek stromingsmodel.

- De in de huidige studie uitgevoerde berekeningen in WAQUA geven aanwijzingen dat seiches, en seiche-achtige slingeren, op het IJsselmeer en verbonden randmeren primair worden opgewekt door windveranderingen (zowel in richting als sterkte). De seicheamplitudes worden hierbij bepaald door de grootte en scherpte van de fenomenen (vooral sprongen in de windsnelheid). De treksnelheden van de weersystemen en met name de variaties in de luchtdruk (drukstoten) hebben hierbij hoogstens een secundair effect.
- Een relatief hoge windsnelheid in het tijdsinterval na het overtrekken van een verstoring (koufront, buienlijn) stuurt het watersysteem naar een nieuwe evenwichtssituatie en zorgt daarmee voor een snellere ‘damping’ van seiche-achtige slingeren op het IJsselmeer. Op de randmeren is dit, mede afhankelijk van de windrichting, minder het geval omdat de wind door de geringere afmetingen van die meren minder grip heeft op dat watersysteem.
- Het forceren van het IJsselmeergebied met extreme condities leidt in alle beschouwde gevallen tot het initiëren van één of meer van de eigenperiodes in dit gebied. In het geval van de in dit onderzoek beschouwde drukstoten worden hierbij zowel (kortere) lokale eigenperiodes aangeslagen als globale (langere) eigenperiodes die voor het gehele IJsselmeer gelden, terwijl bij de beschouwde windveranderingen hoofdzakelijk de globale eigenperiodes worden aangeslagen.
- Het drukstooteffect op de waterstand is over het algemeen kleiner of gelijk aan het statische drukeffect ($\pm 1 \text{ hPa} \leq 1 \text{ cm}$ waterstandsverschil) bij de in dit project beschouwde treksnelheden (18 en 36 m/s). Bij een treksnelheid van de drukstoot van 18 m/s is de seiche-amplitude op slechts één van de beschouwde locaties net groter dan het statische drukeffect.
- Een hogere treksnelheid van een drukstoot leidt zoals verwacht niet noodzakelijkerwijs tot hogere amplitudes van seiches in het IJsselmeergebied bij een verder gelijk blijvende vorm en trekrichting van de meteorologische verstoring. Een hogere treksnelheid leidt er wel toe dat hoger frequente eigenperiodes worden aangeslagen.
- Bij een zeer sterke plotselinge af- of toename in de windsnelheid (van 36 m/s naar 7,2 m/s of van 18 m/s naar 36 m/s) treden op verschillende locaties op het IJsselmeer naast seiches ook “over- en undershoots” op in de waterstand. Bij een plotselinge afname van de windsnelheid treden op bovenwinds gelegen locaties “overshoots” op en benedenwinds “undershoots”. Bij een plotselinge toename is dit andersom.
- De specifieke grootte van een plotselinge af- of toename in windsnelheid heeft vooral een significante invloed op de grootte van “under- of overshoots” van de waterstand en

- in mindere mate op de uiteindelijke amplitudes (of periodes) van de resulterende seiches ná een eventuele “under- of overshoot”.
- Windruiming, waarbij de wind plotseling van Z naar WZW draait, initieert een seiche met de langste, in dit onderzoek, waargenomen periodes (orde 5-6 uur). Bij plotselinge veranderingen in de windsnelheid worden voornamelijk seiches met kortere periodes opgewekt (orde 1,5-3 uur).
 - Een constante hoge windsnelheid na een plotselinge verandering in de wind (bijvoorbeeld een windruiming of windstoot) zorgt dat het watersysteem relatief snel een nieuwe evenwichtsstand bereikt. Slingeringen in de waterstand die zijn ontstaan na de windstoot worden hierdoor relatief sneller “gedempt” dan in situaties waarbij de forcering (grotendeels) wegvalt.
 - Op basis van eerder uitgevoerde studies waarbij de resultaten van WAQUA-runs met uniform opgelegde windvelden (geen drukvelden) vergeleken zijn met metingen wordt geconcludeerd dat WAQUA geschikt is voor het modelleren van seiches (zowel amplitudes als periodes). De amplitudes worden met de huidige modelinstellingen (modelkalibratie) naar verwachting nog wel onderschat met WAQUA. Verdere kalibratie van WAQUA voor seiches (in combinatie met ruimtelijke variërende wind- en drukvelden) is dus benodigd.

5.2 Vooruitblik van mogelijk vervolg (onder KPP-VOW 2018)

In Deltares (2015) is een werkplan beschreven voor een grootschalige analyse van de opwekking van seiches en de mogelijkheid om die numeriek te berekenen en zo te gaan voorspellen (Werkpakket O2). Voor dit laatste is een koppeling benodigd tussen enerzijds een meteorologisch model en anderzijds een hydrodynamisch model. In het huidige onderzoek wordt hierbij gefocust op het IJsselmeer met als meteorologisch model, HARMONIE van het KNMI en als hydrodynamisch model, WAQUA van Rijkswaterstaat.

Zoals beschreven in Sectie 4.4 komt uit Muntjewerf (2016) naar voren dat met het huidige HARMONIE-model nog niet goed mogelijk is om de benodigde scherpste van bepaalde meteorologische fenomenen te vatten, welke benodigd is voor het reproduceren van seiches met WAQUA. Alvorens verder wordt gegaan met de koppeling van HARMONIE met WAQUA, is het dus van belang het HARMONIE-model eerst verder te ontwikkelen. Om het KNMI specifieke handvatten te kunnen bieden voor deze verdere ontwikkeling, is het van belang het huidige onderzoek naar de relatieve invloed van meteorologische fenomenen op de opwekking van seiches in WAQUA voort te zetten onder het onderdeel ‘seiches’ binnen KPP-VOW 2018 of een ander onderzoeksprogramma.

Voorgenoemde handvatten kunnen opgesteld worden door verdergaand inzicht te verkrijgen in de bovengenoemde invloed van meteorologische fenomenen op de opwekking van seiches. Dit inzicht zal verkregen worden door het reproduceren van een zeker bereik aan historische events met WAQUA op het IJsselmeer waarbij verschillende types van weersystemen zijn opgetreden (Type A, B en D, zie Sectie 4.2.2) bij verschillende niveaus van sterktes. De forceringen voor deze simulaties kunnen gegeneerd worden door gemeten tijdreeksen om te zetten naar (in één richting) ruimtelijk variërende wind- en drukvelden (zie Hoofdstuk 4). Door vervolgens de resulterende seiche-tijdseries te correleren aan de meetsignalen van zowel de waterstand als de luchtdruk en de wind (snelheid en richting), zal het duidelijk worden welke fenomenen de grootste invloed hebben. Een bijkomend voordeel van deze aanpak is dat de simulaties tevens mogelijk gebruikt kunnen worden voor de verdere kalibratie en validatie van WAQUA voor het modelleren van seiches zoals genoemd in het laatste punt van Sectie 5.1.

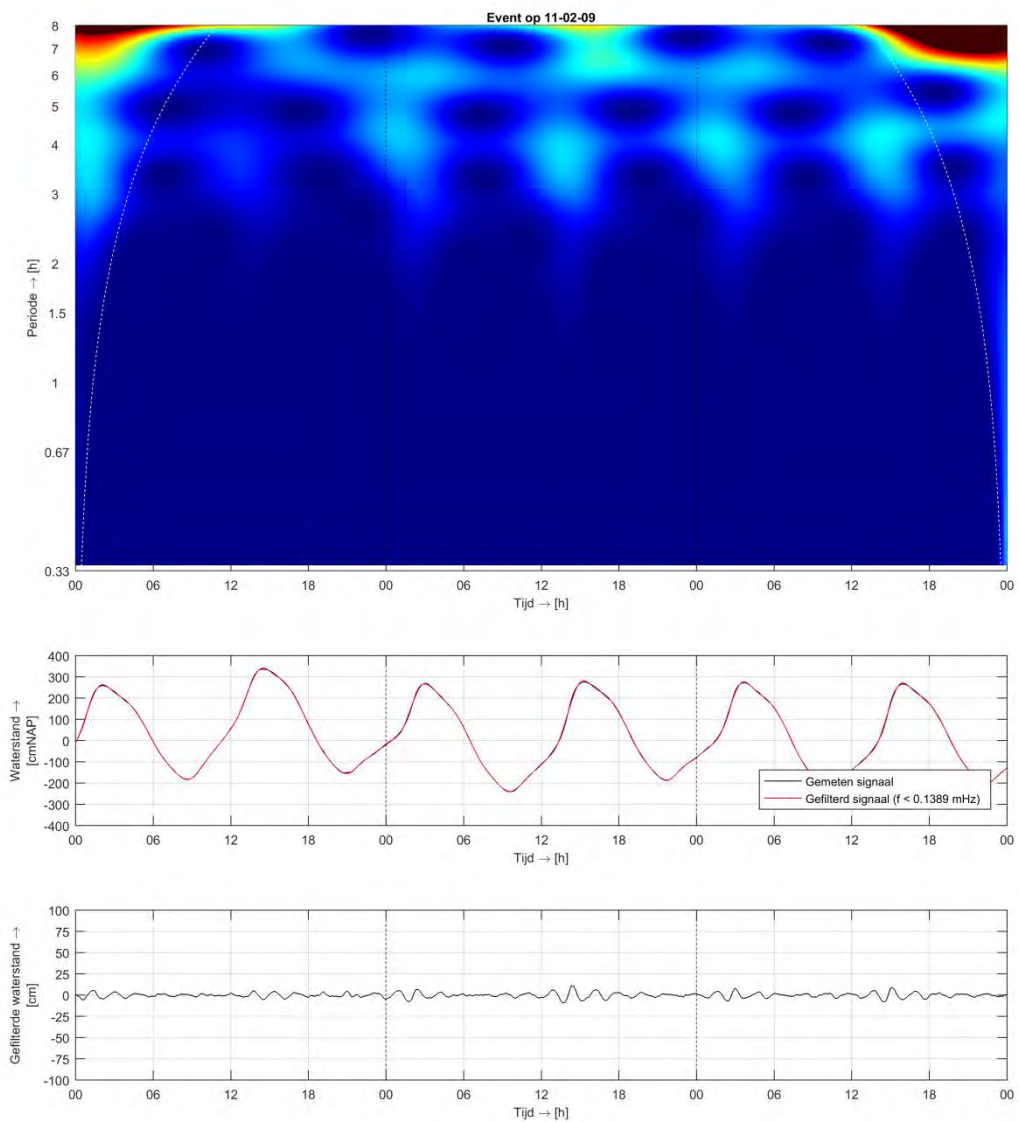
Referenties

- 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.
- Deltares, 2011, WAQUA-model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht, referentie: 1202108-000-ZWS-0015-vj, auteurs: Maarten van der Wal, Johan Crebas, Aukje Spruyt-de Boer, Ton Visser, Migena Zagonjoli, Chris Sprengers, David Kerkhoven en Anke Becker.
- Deltares, 2015, Inventarisatie van potentiële seiche-locaties in Nederland - Verkenning en Plan van Aanpak, referentie 1220039-010-VEB-0001, auteur: M.P.C. de Jong.
- Deltares, 2016, Seiches – Invloed op waterkeringen, beperkingen in opwekking en analyse waterstandsmetingen, referentie: 1230042-007-ZWS-0001, auteurs: M.P.C. de Jong, S.P. Reijmerink en J.V.L. Beckers.
- Deltares, 2017, Waterstandsoscillaties en getijversterking Delfzijl / Eems-Dollard – KPP-VOW onderzoek, referentie: 11200537-013-ZWS-0002, auteurs: Deepak Vatvani en Firmijn Zijl.
- Muntjewerf, L., 2016, Seiches in het IJsselmeergebied – Verkennende studie WAQUA-HARMONIE, Stageverslag MSc Climate Studies WUR.
- 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, 2004, Verkenning seiches in WAQUA – Studie naar waterstandslingeren in het IJsselmeergebied, referentie: H4531, auteurs: M.P.C. de Jong en C. Stolker.

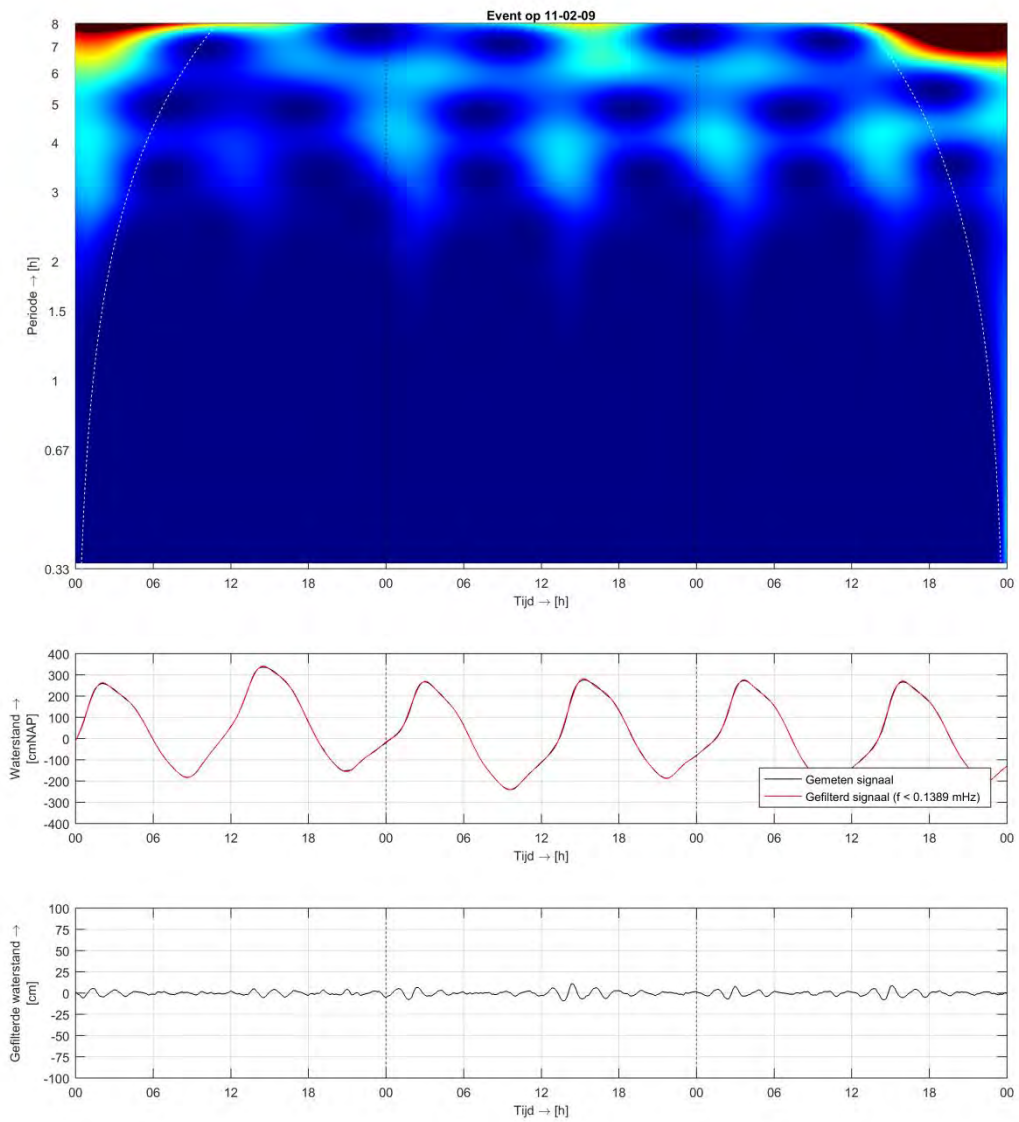
A Resultaten wavelet-analyses per meetlocatie

A.1 Westerschelde

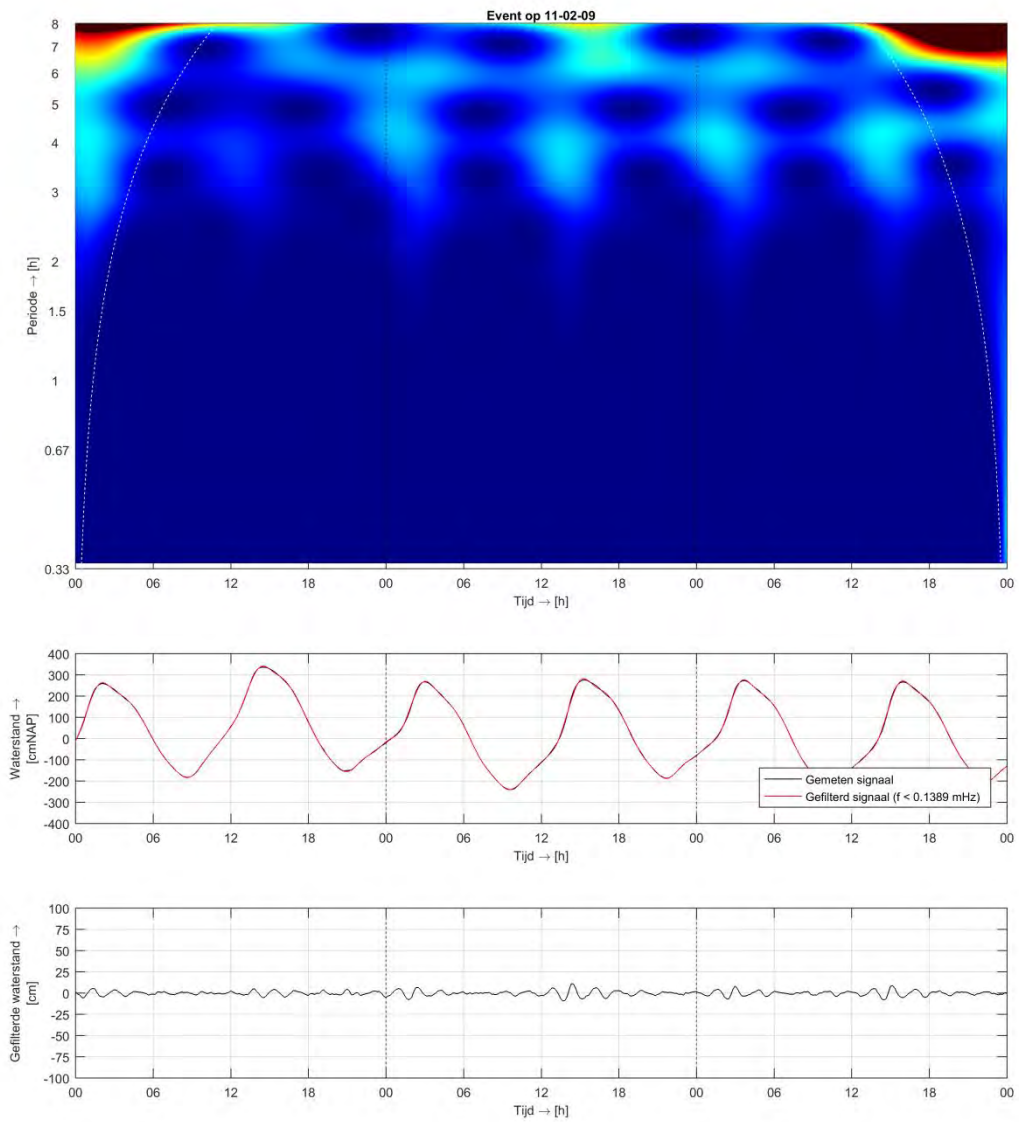
A.1.1 Vlissingen



Figuur A.1 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Vlissingen, amplitude = 0,20 m

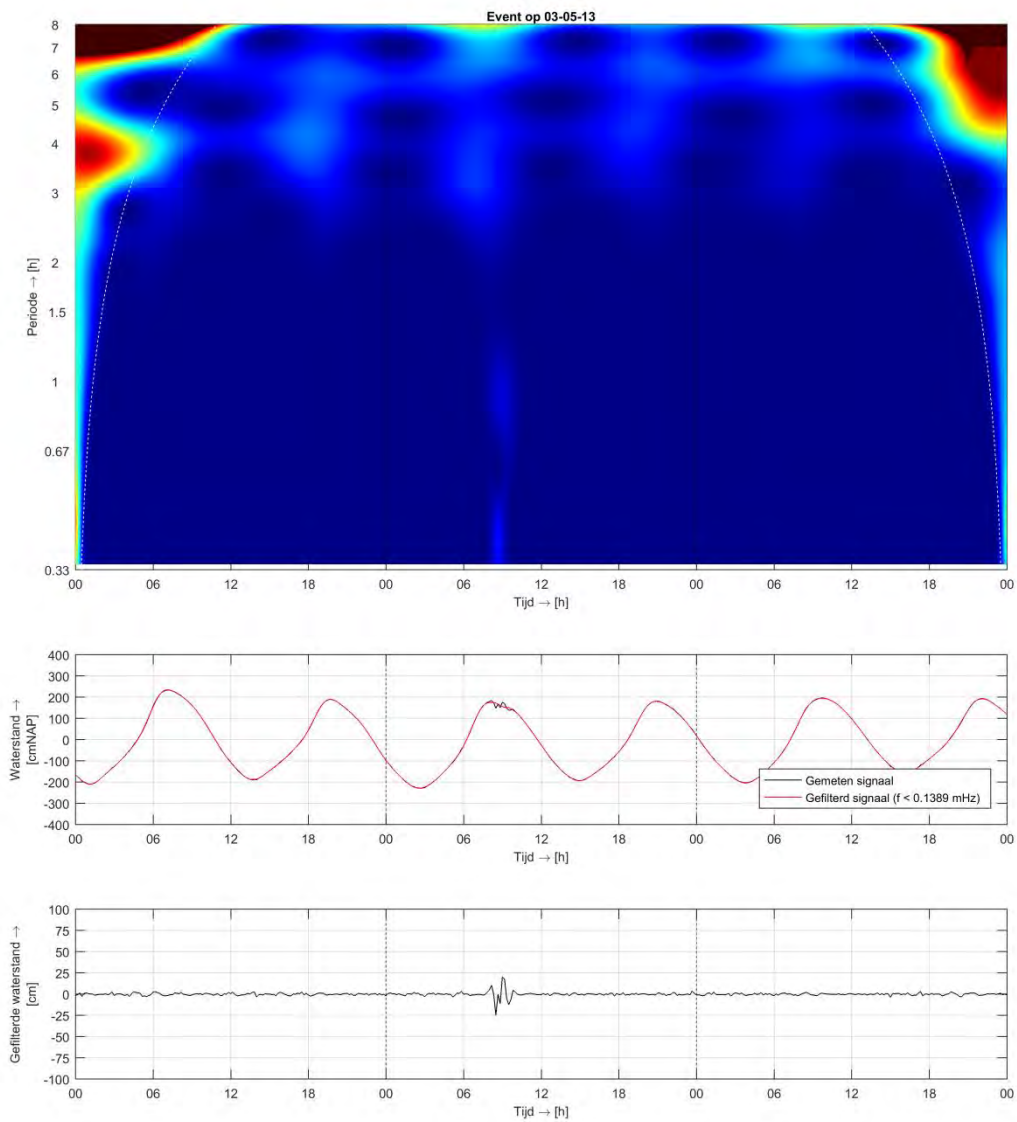


Figuur A.2 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Vlissingen, amplitude = 0,20 m

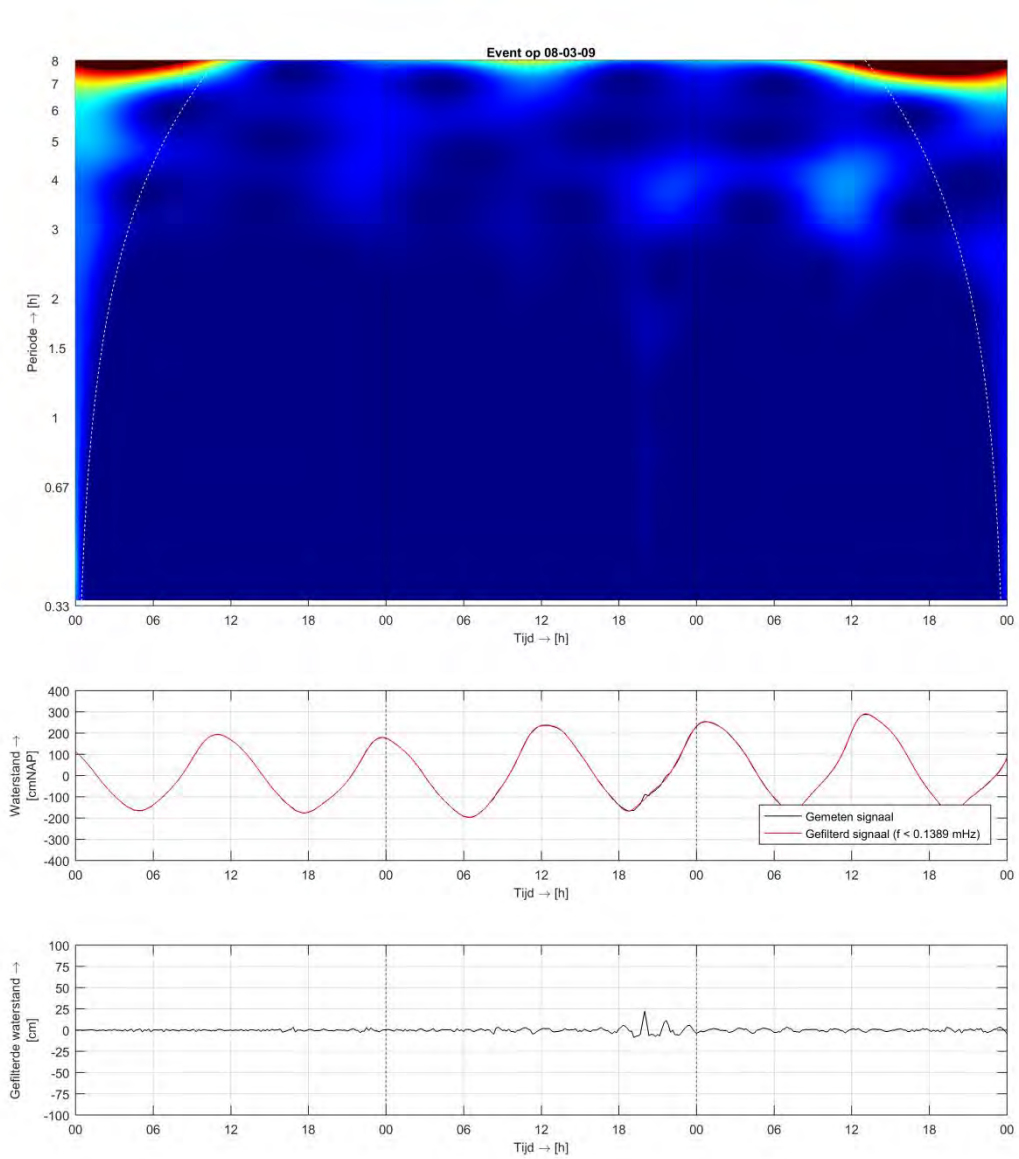


Figuur A.3 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Vlissingen, amplitude = 0,20 m

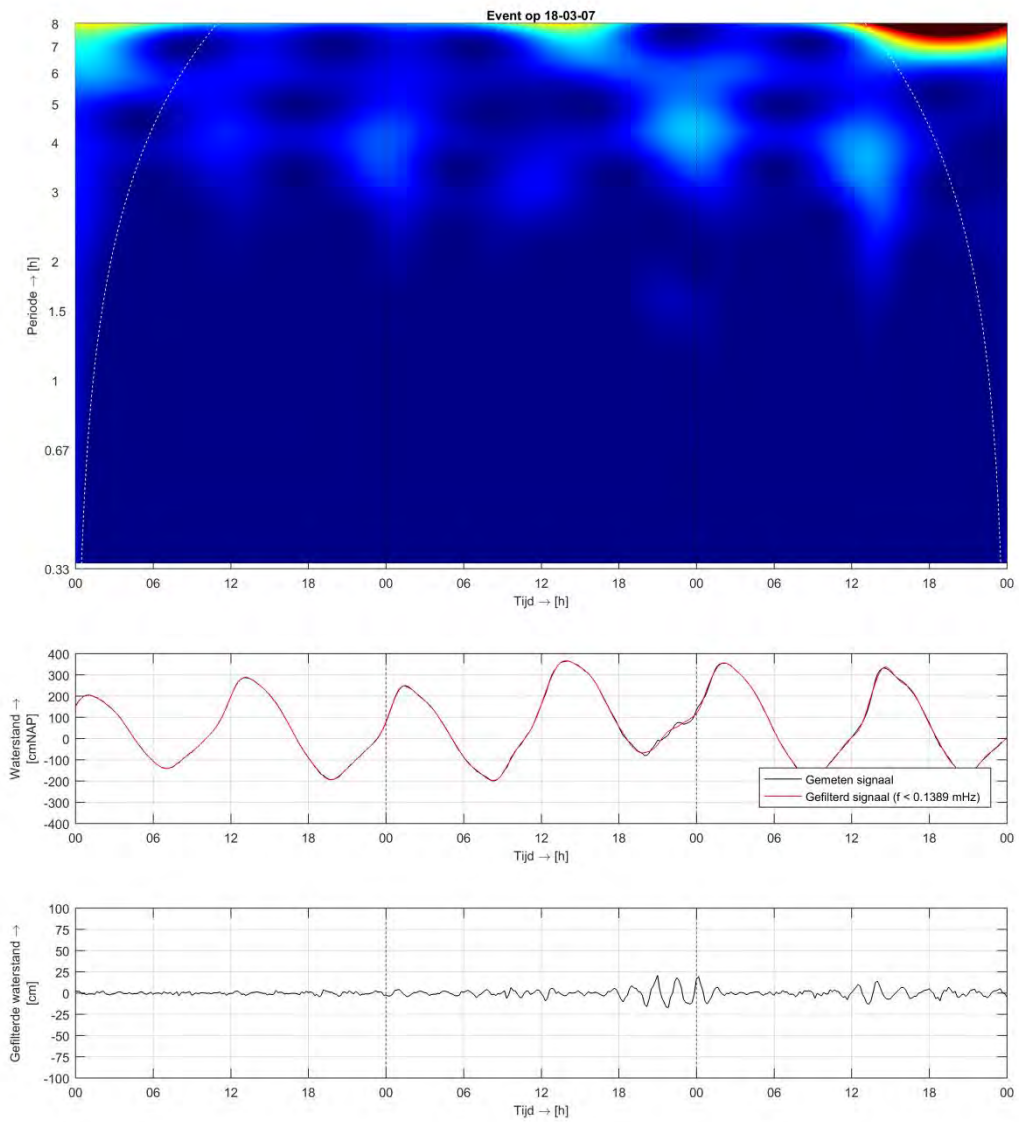
A.1.2 Terneuzen



Figuur A.4 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Terneuzen, amplitude = 0,25 m

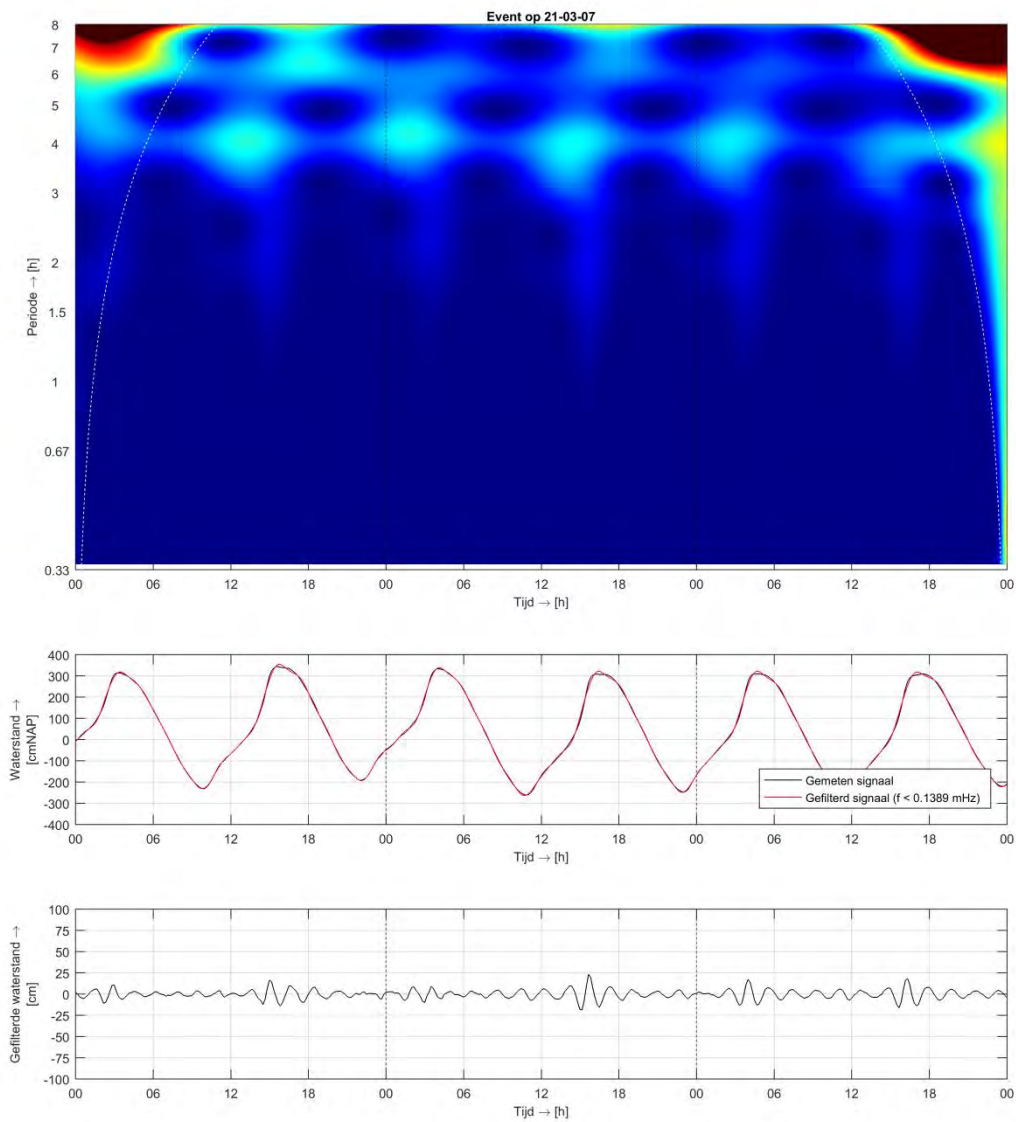


Figuur A.5 Tweede hoogste geregistreeerde seiche-episode Terneuzen, amplitude = 0,25 m

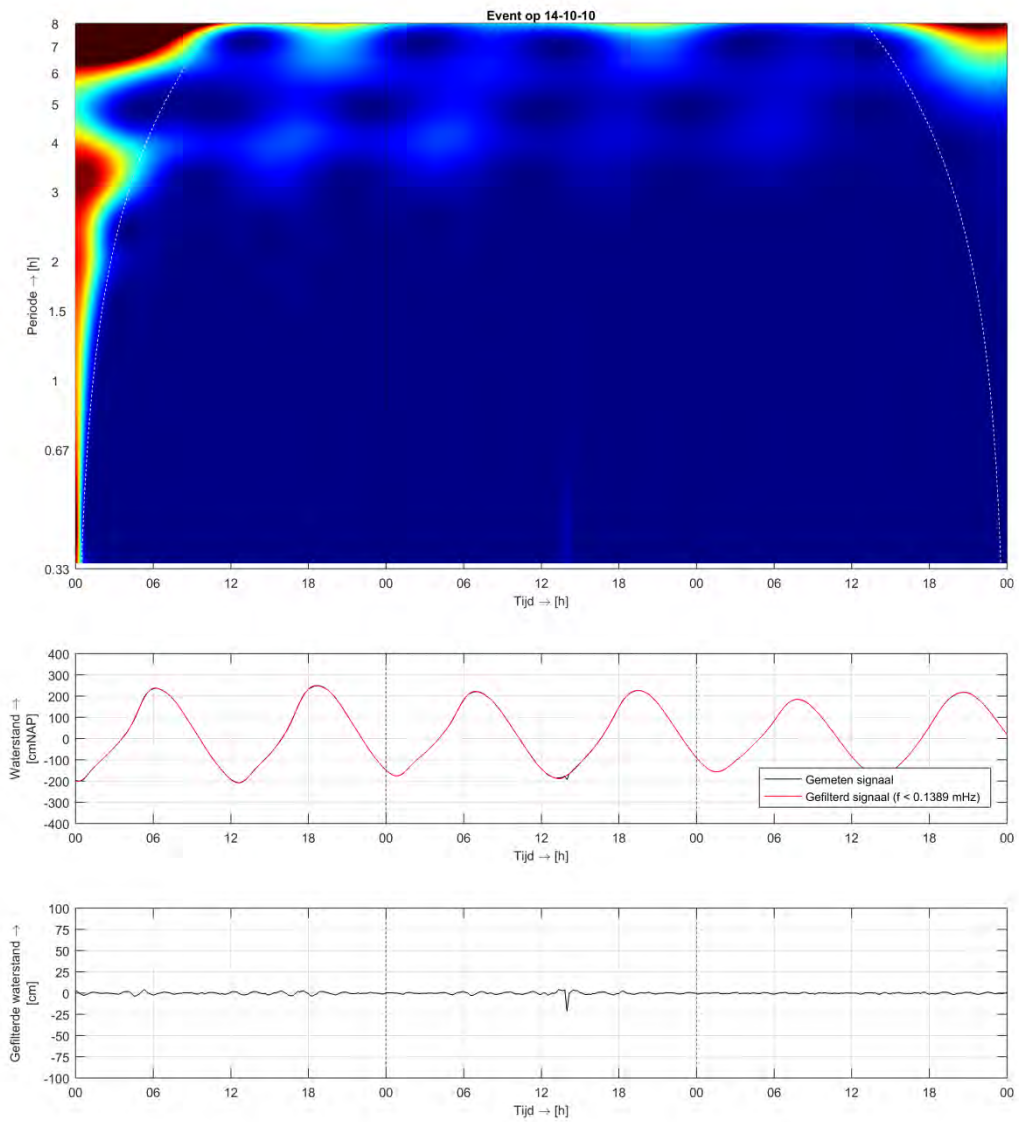


Figuur A.6 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Terneuzen, amplitude = 0,25 m

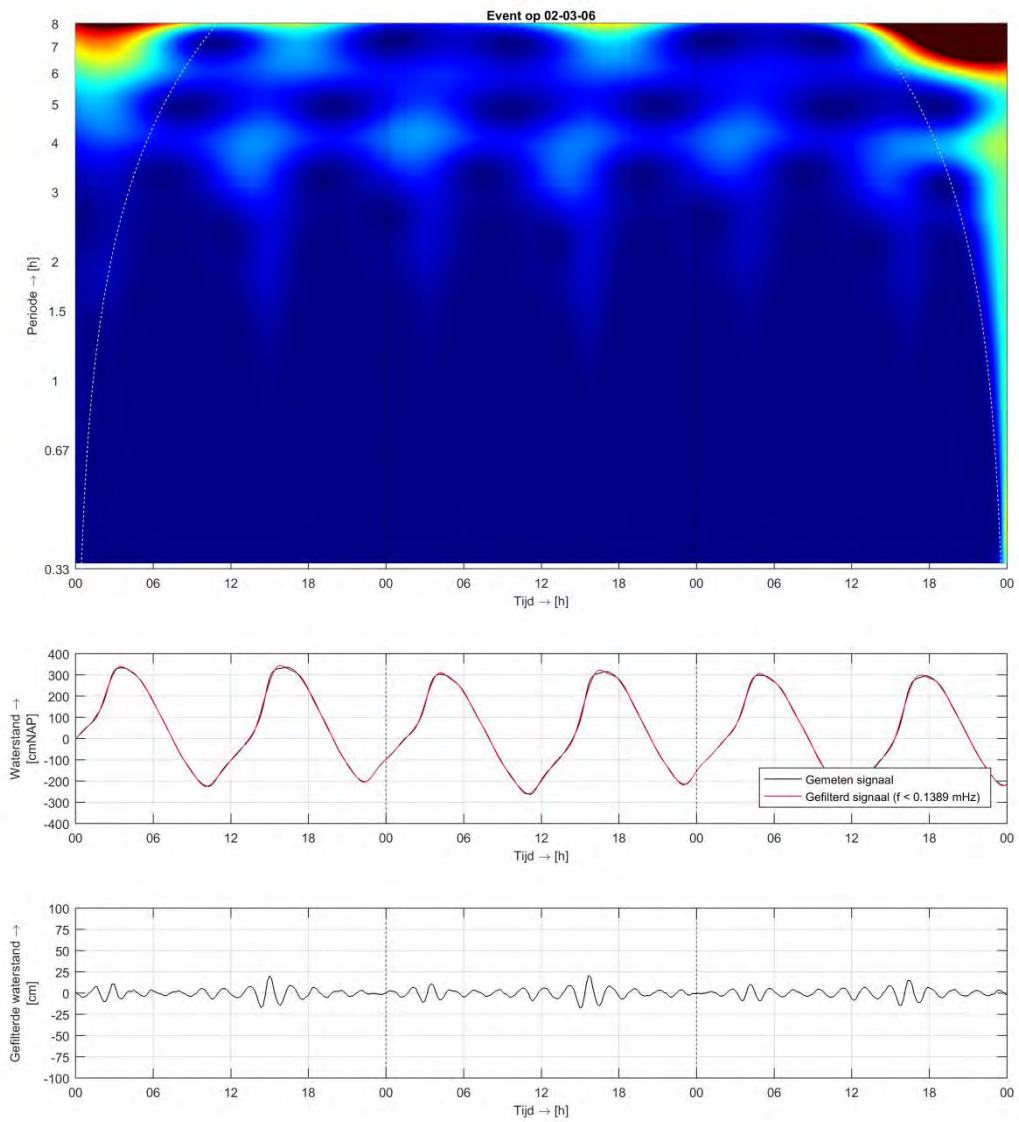
A.1.3 Hansweert



Figuur A.7 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Hansweert, amplitude = 0,25 m

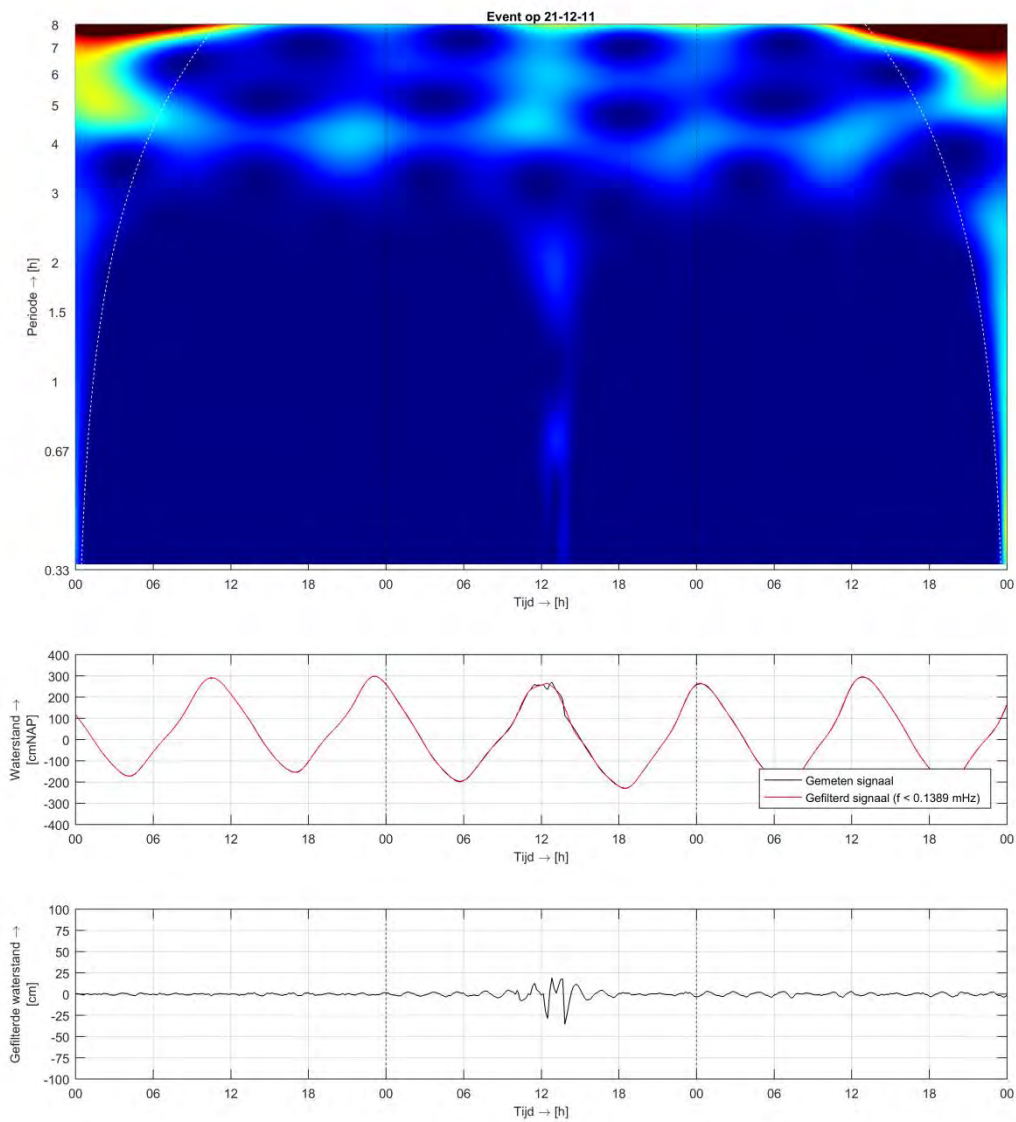


Figuur A.8 Tweede hoogste geregistreeerde seiche-episode Hansweert, amplitude = 0,25 m

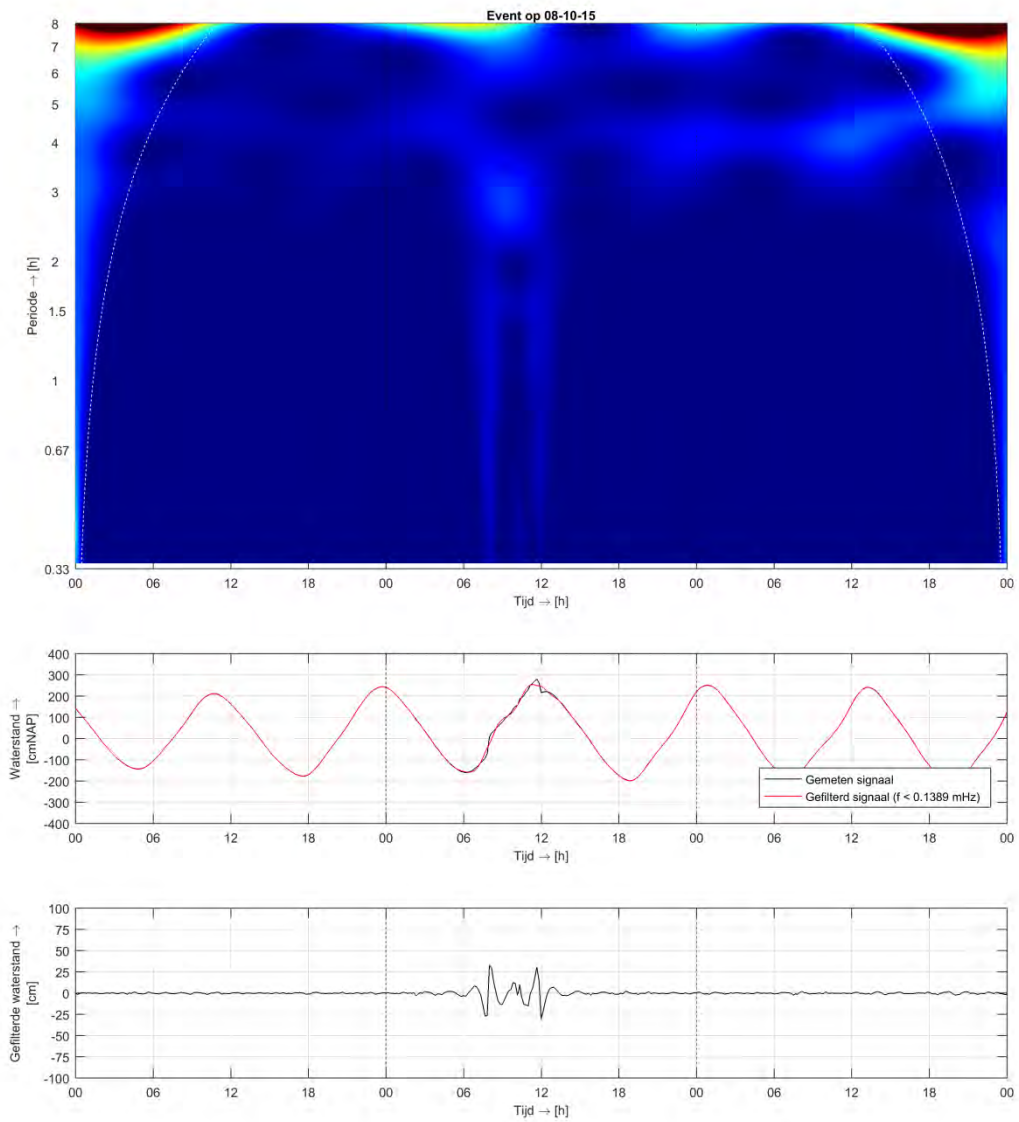


Figuur A.9 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Hansweert, amplitude = 0,25 m

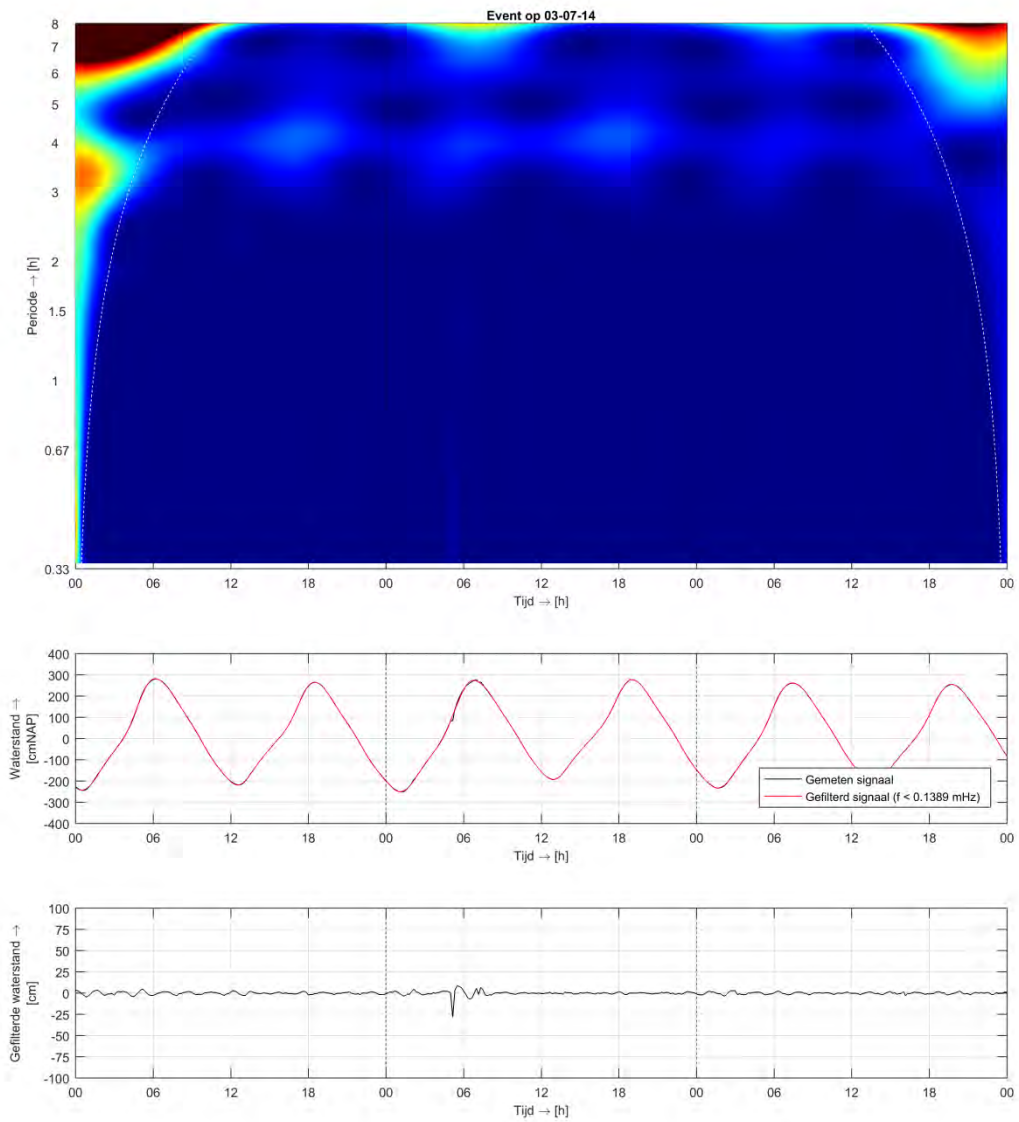
A.1.4 Bath



Figuur A.10 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Bath, amplitude = 0,40 m



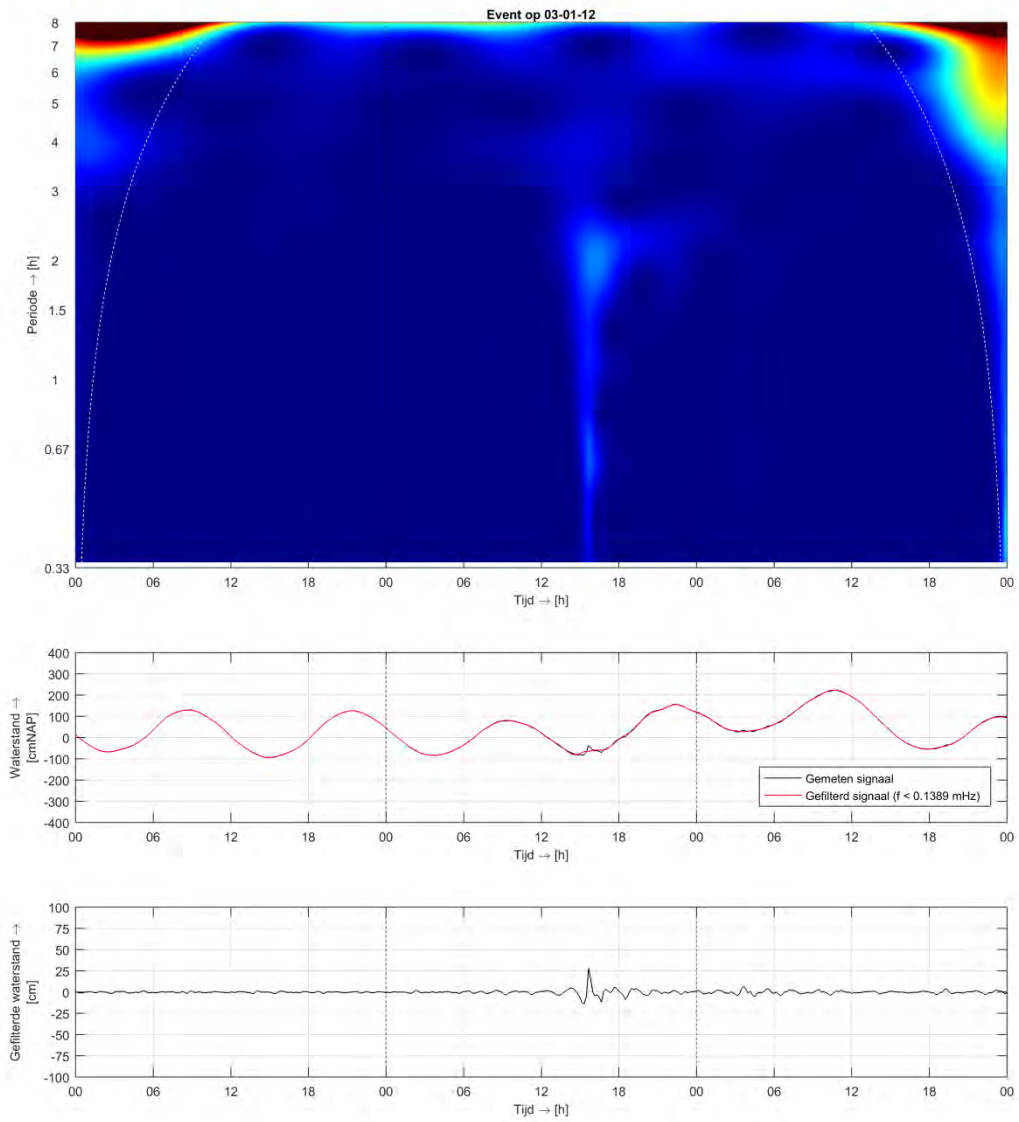
Figuur A.11 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Bath, amplitude = 0,35 m



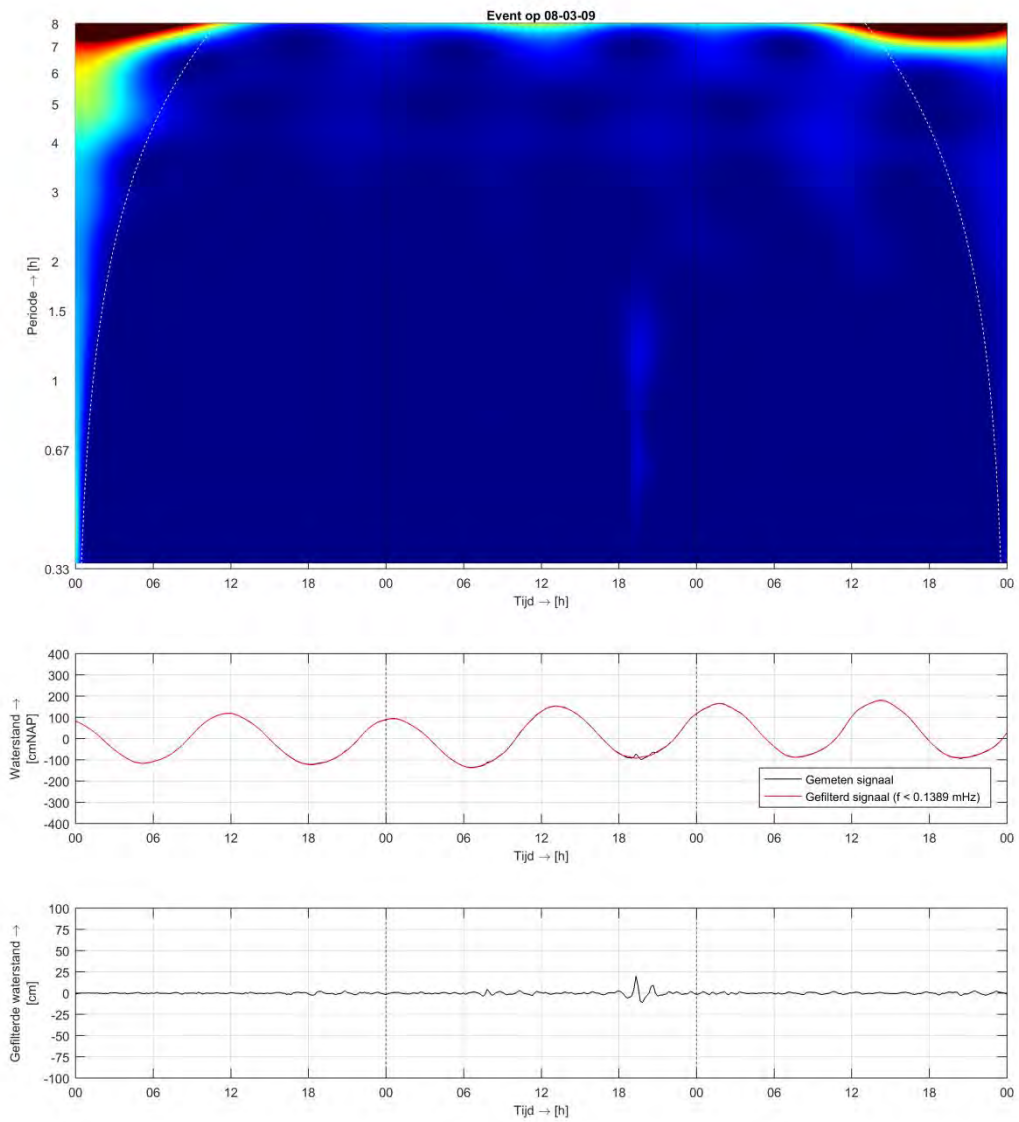
Figuur A.12 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Bath, amplitude = 0,30 m

A.2 Oosterschelde

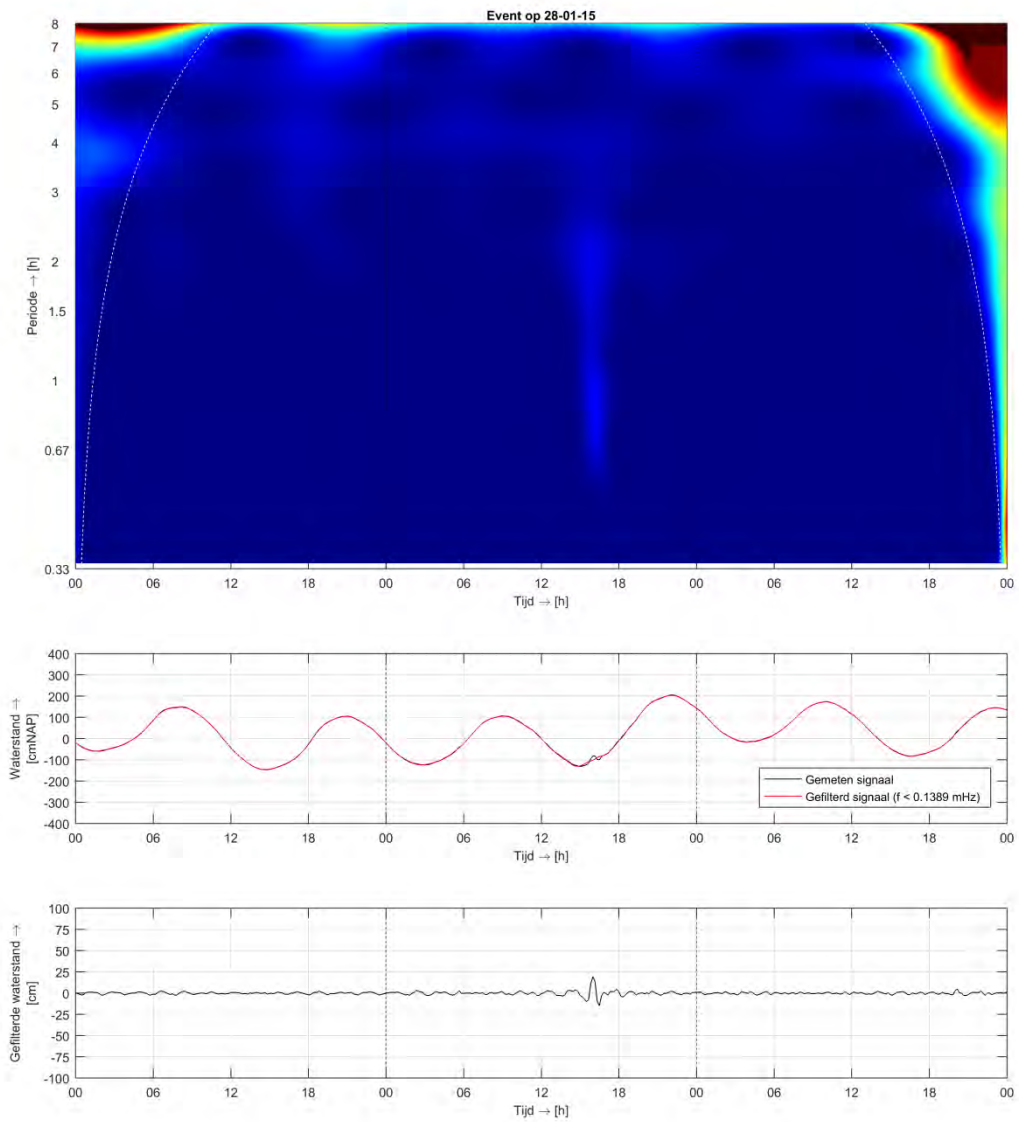
A.2.1 Roompot Binnen



Figuur A.13 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Roompot Binnen, amplitude = 0,30 m

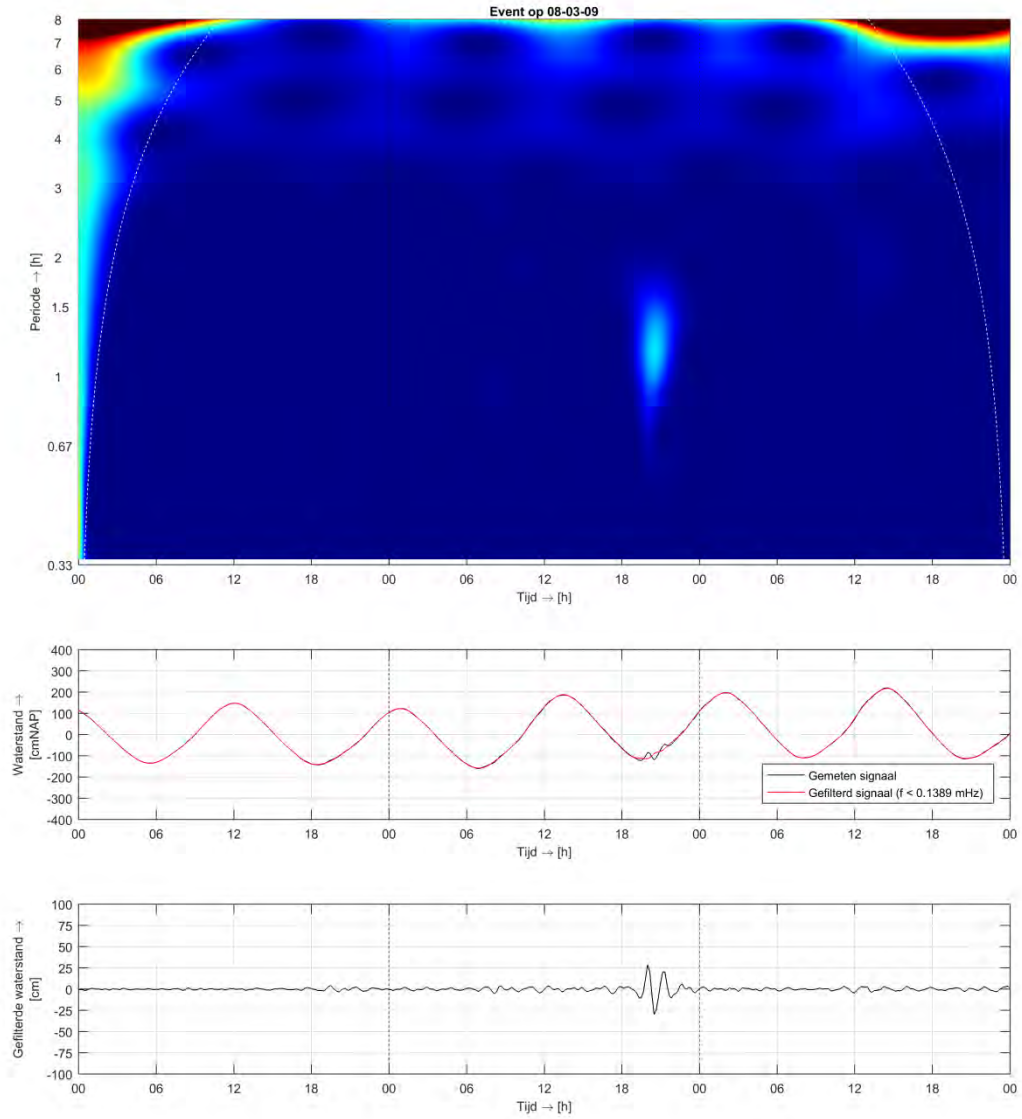


Figuur A.14 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Roompot Binnen, amplitude = 0,25 m

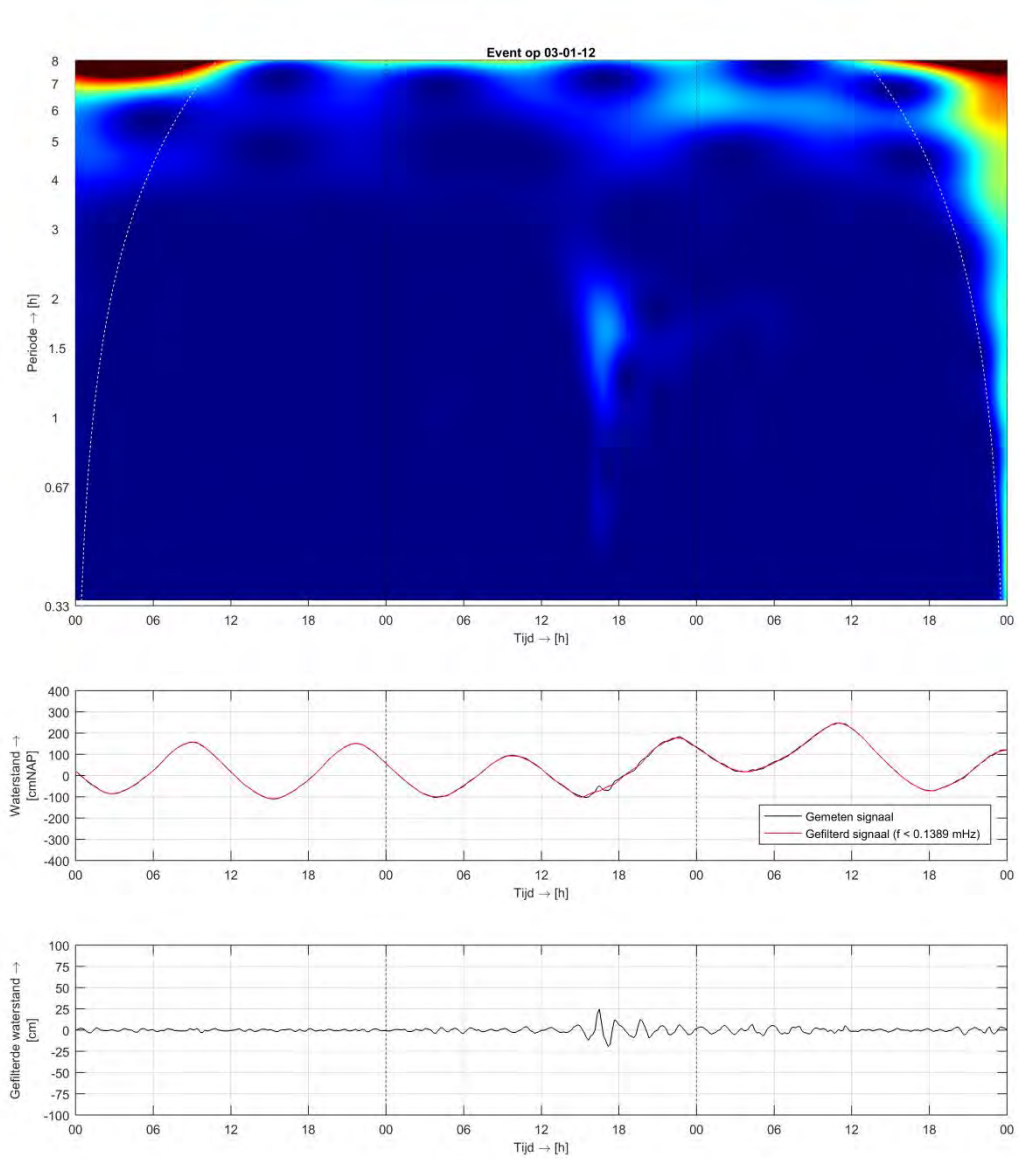


Figuur A.15 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Roompot Binnen, amplitude = 0,20 m

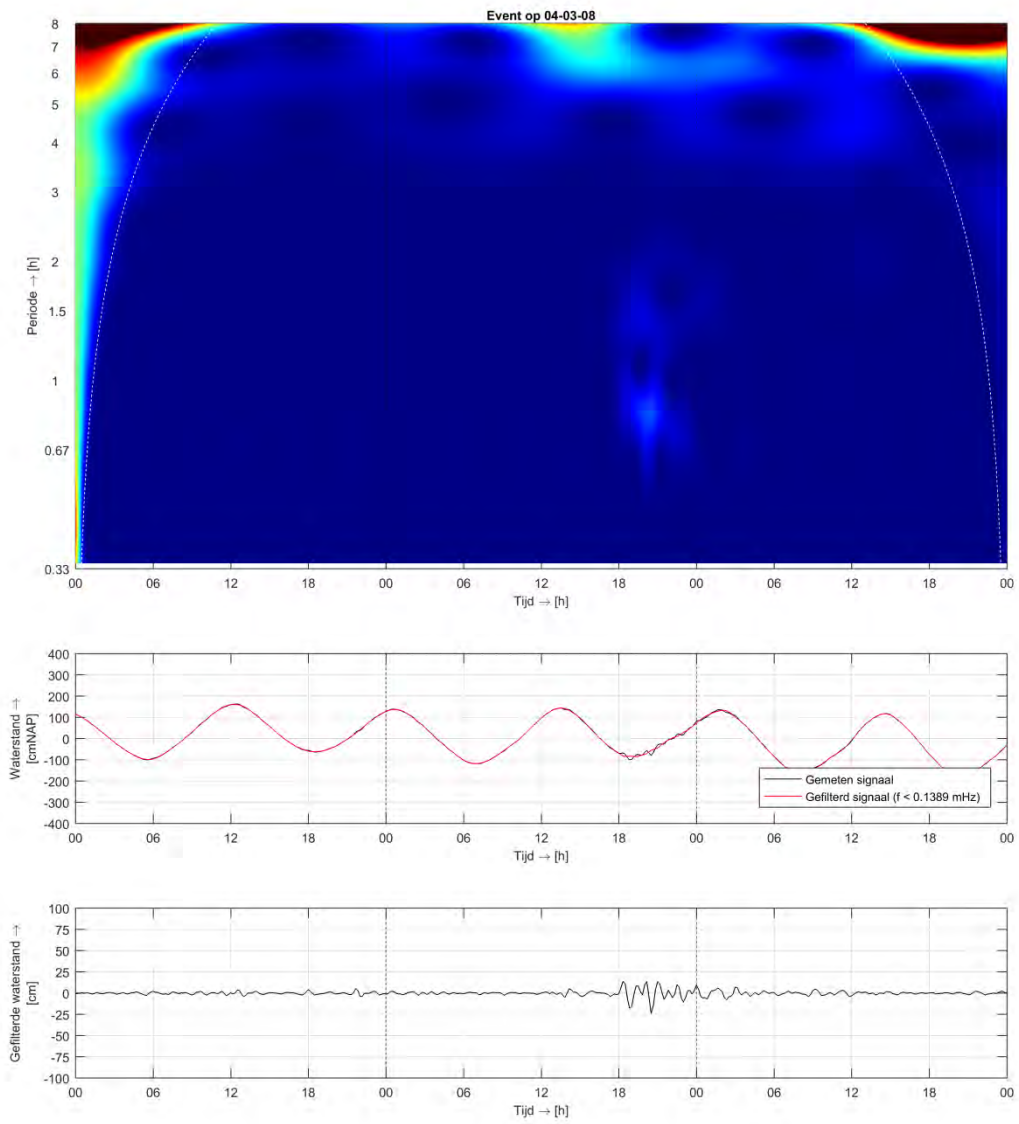
A.2.2 Kats Buiten



Figuur A.16 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Kats Buiten, amplitude = 0,30 m

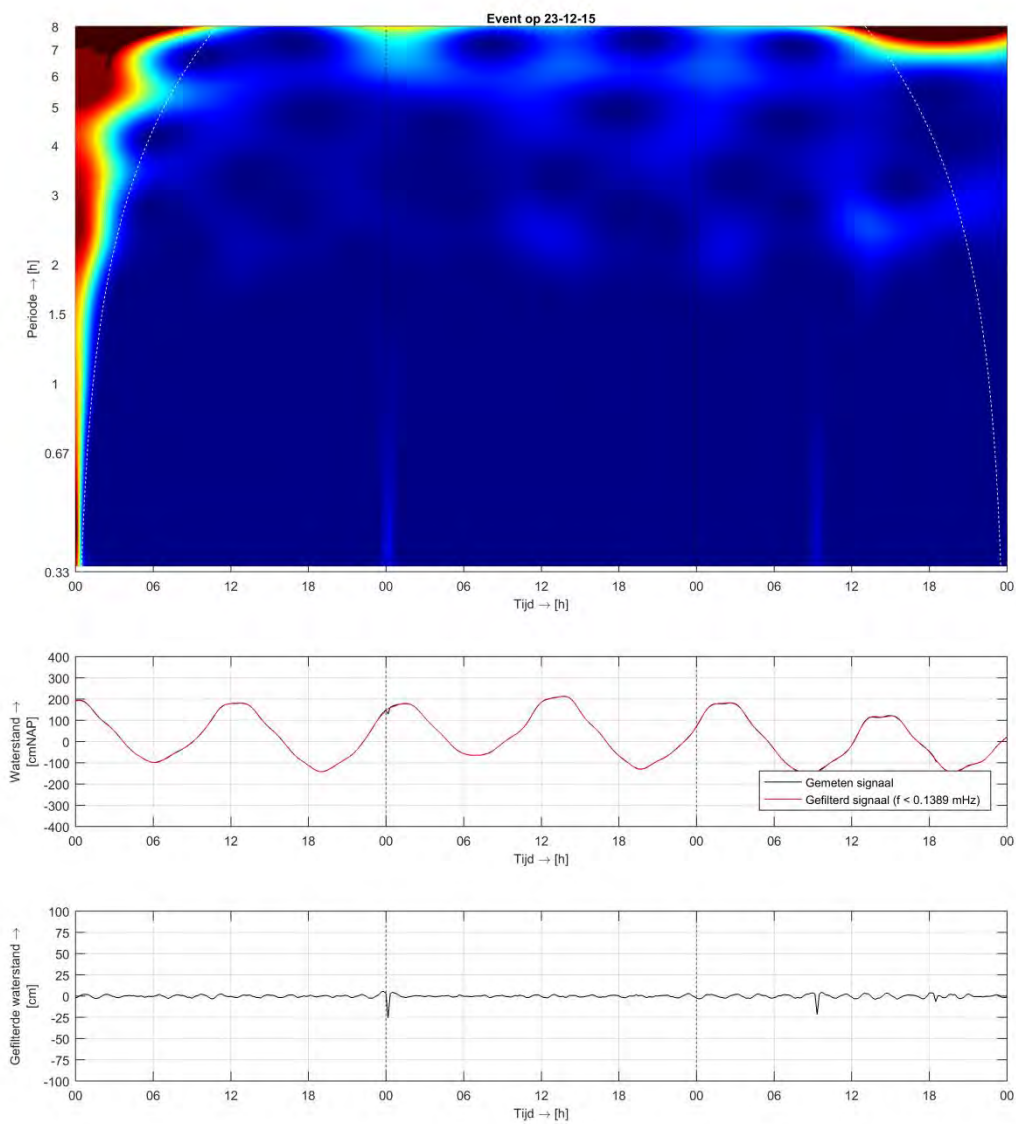


Figuur A.17 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Kats Buiten, amplitude = 0,25 m

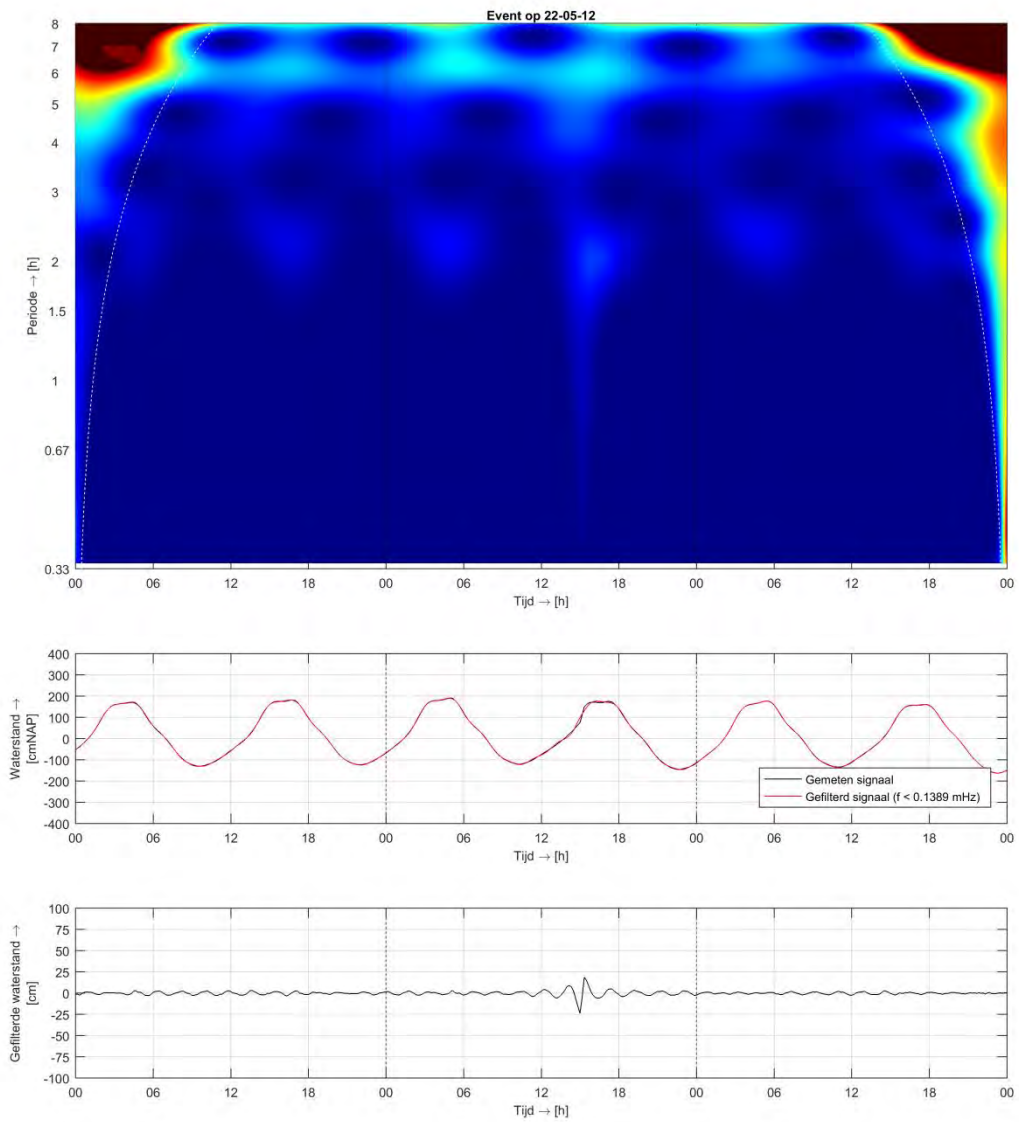


Figuur A.18 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Kats Buiten, amplitude = 0,25 m

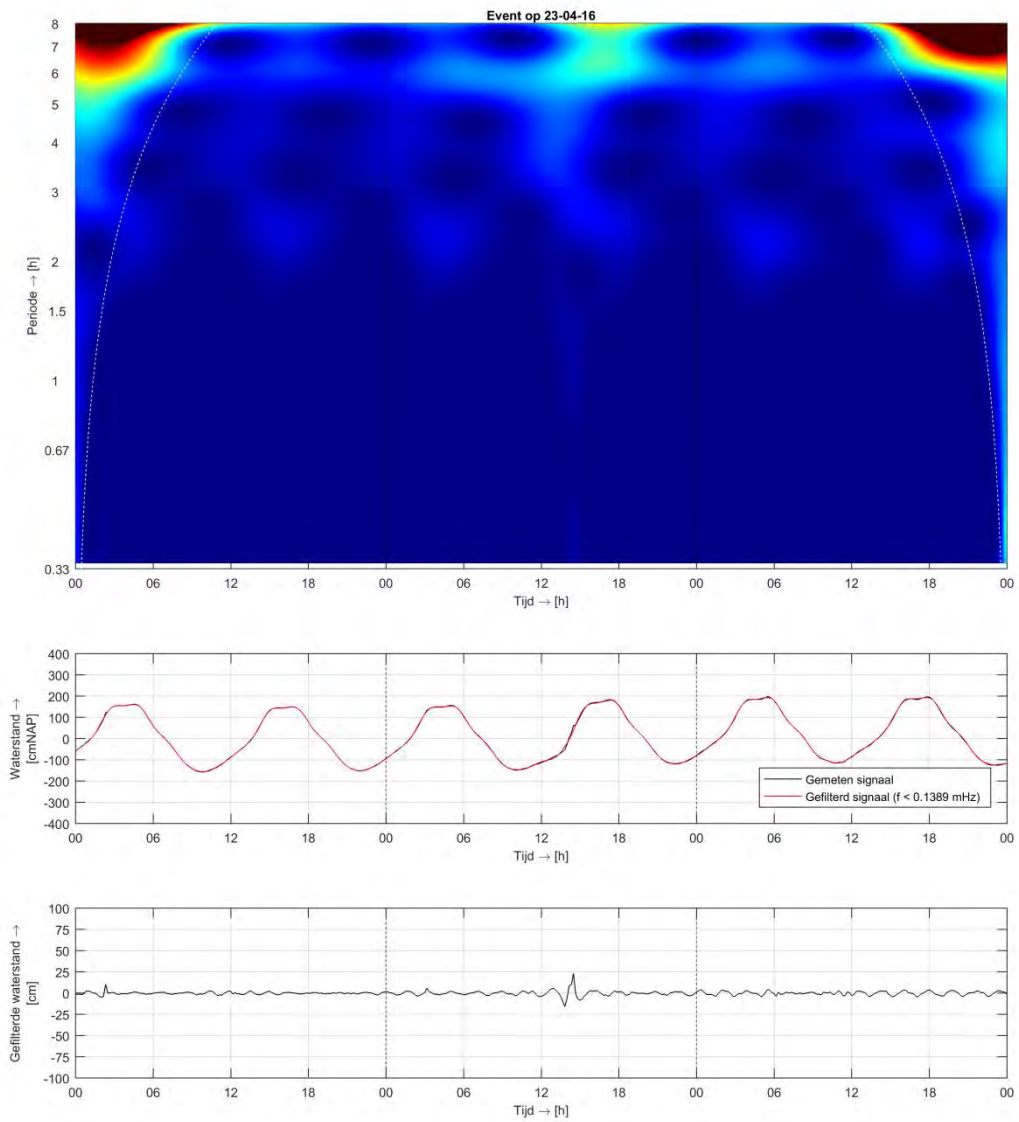
A.2.3 Krammersluizen West



Figuur A.19 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Krammersluizen West, amplitude = 0,30 m

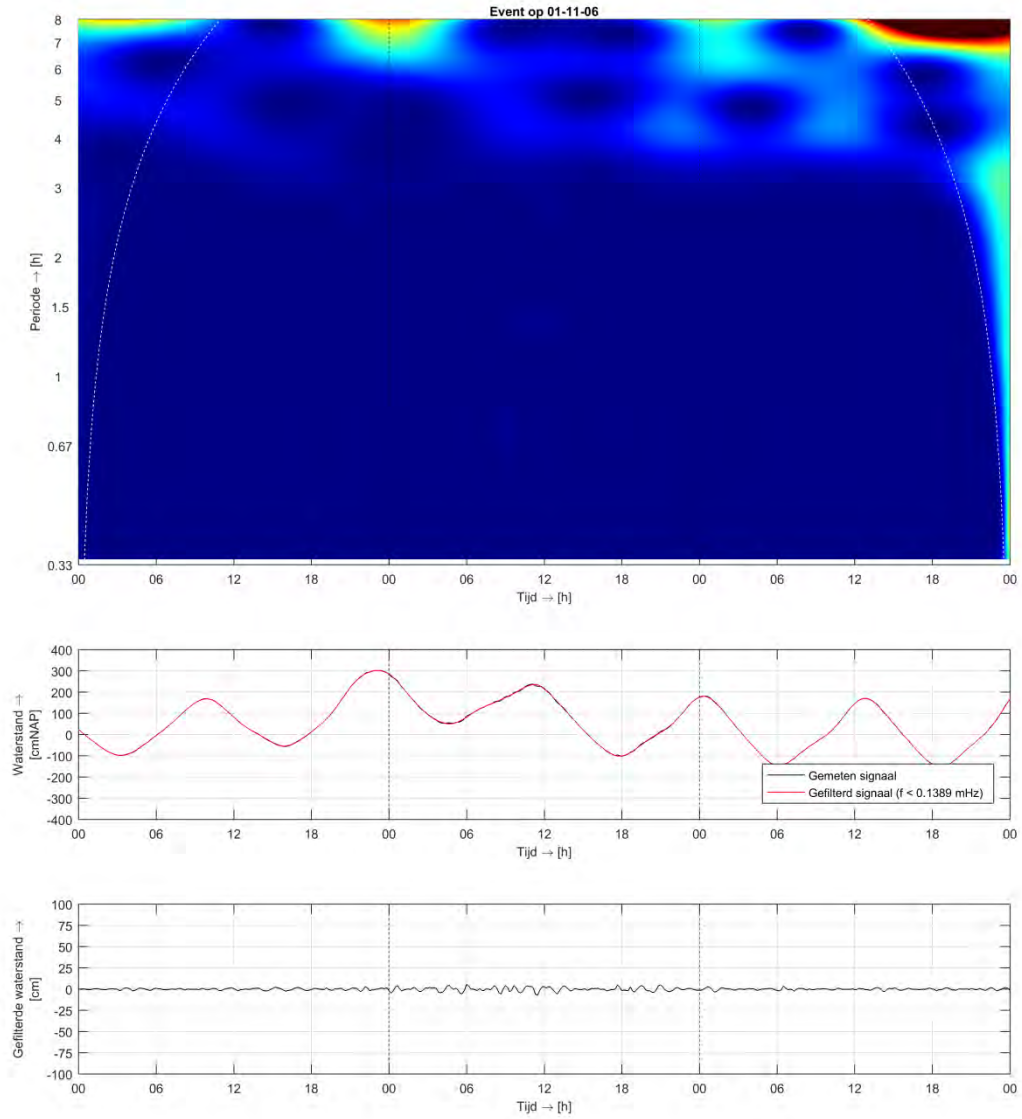


Figuur A.20 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Krammersluizen West, amplitude = 0,25 m

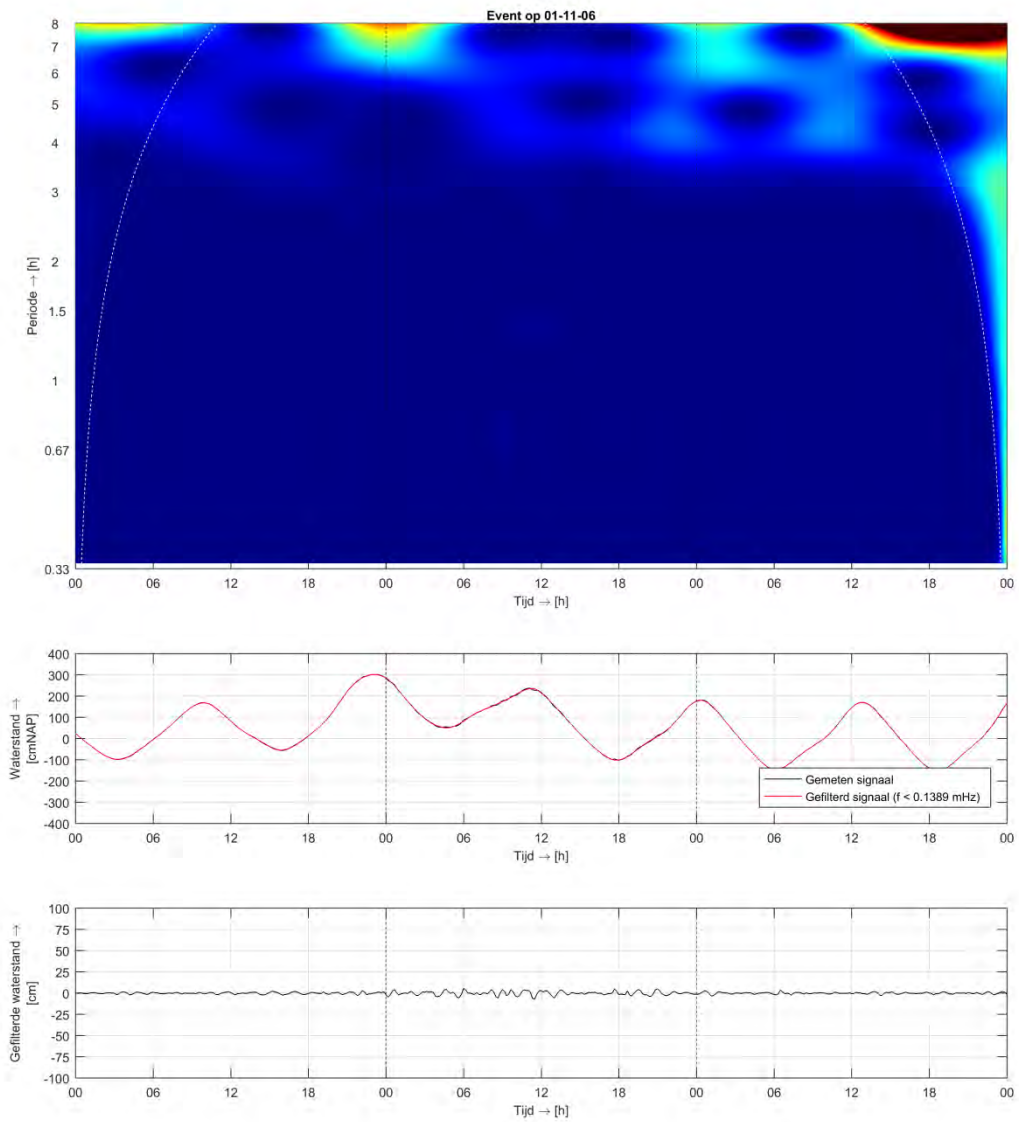


Figuur A.21 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Krammersluizen West, amplitude = 0,25 m

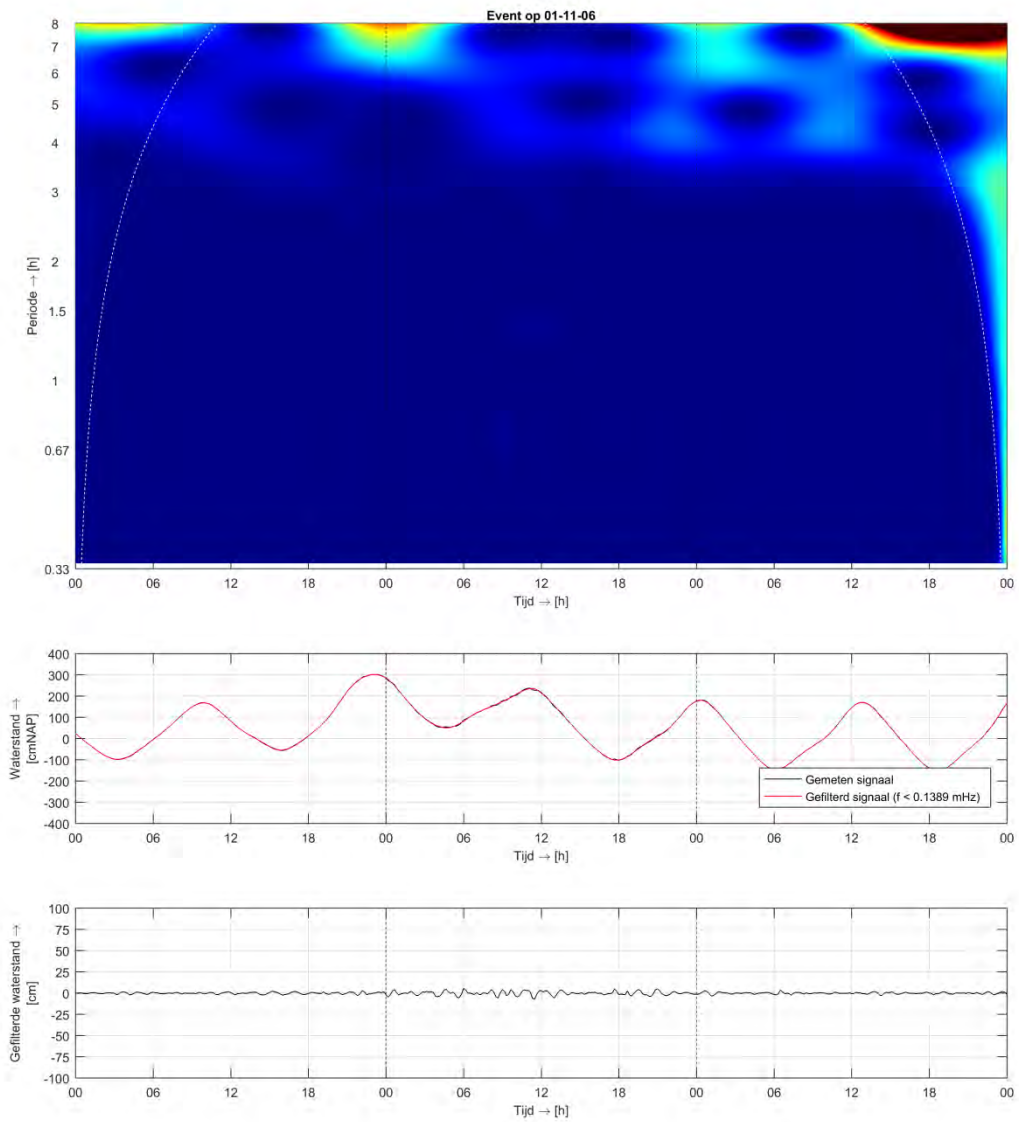
A.2.4 Yerseke



Figuur A.22 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Yerseke, amplitude = 0,15 m

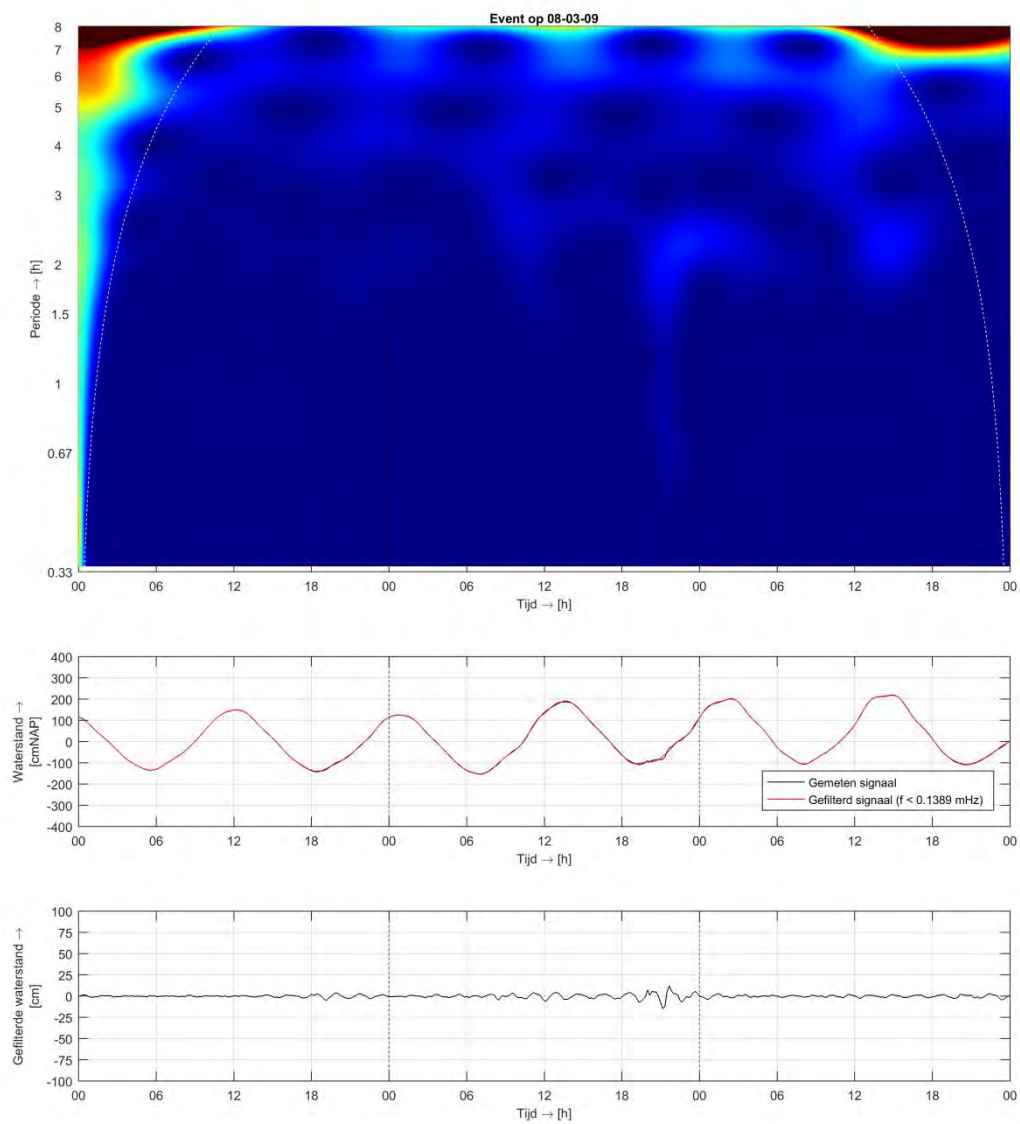


Figuur A.23 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Yerseke, amplitude = 0,15 m

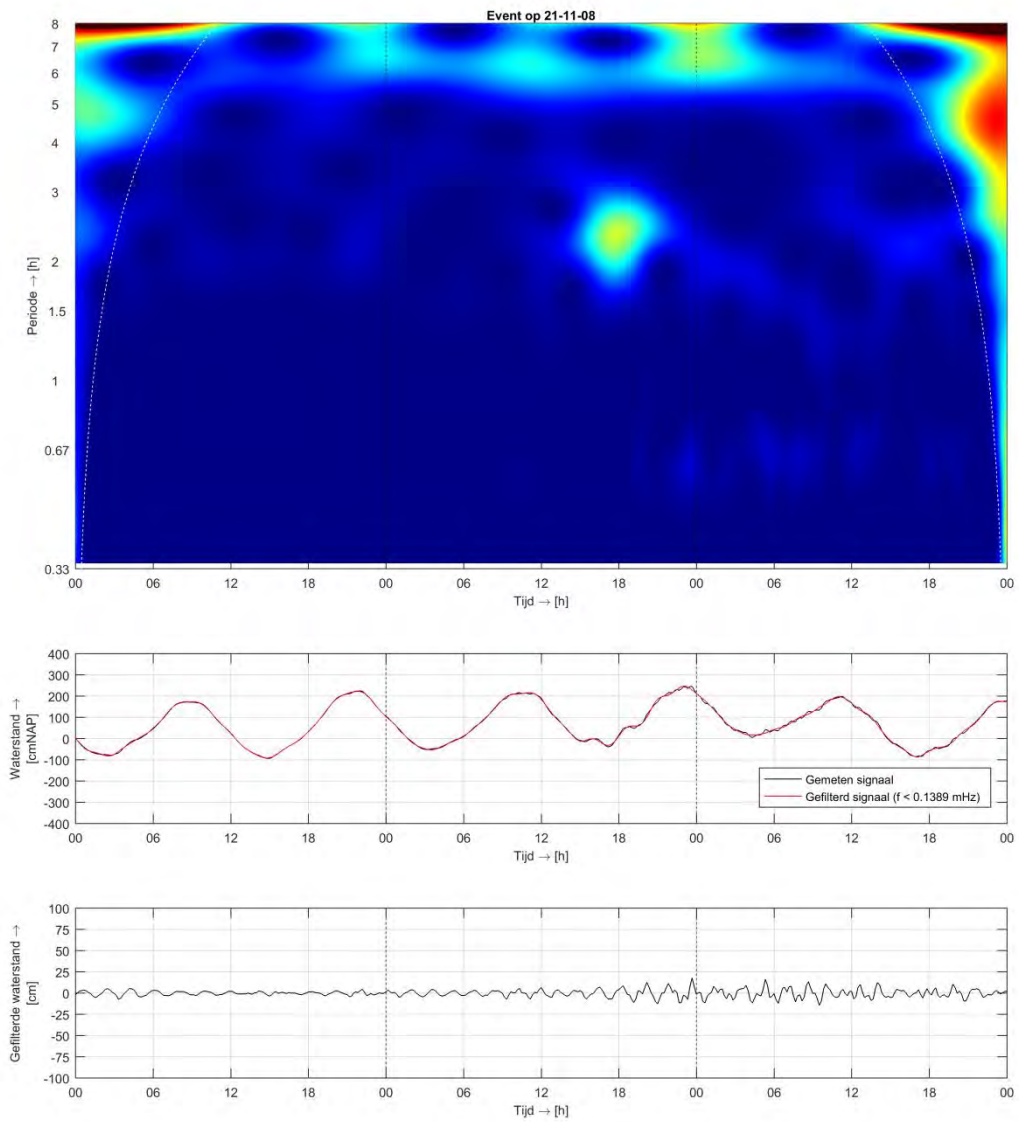


Figuur A.24 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Yerseke, amplitude = 0,15 m

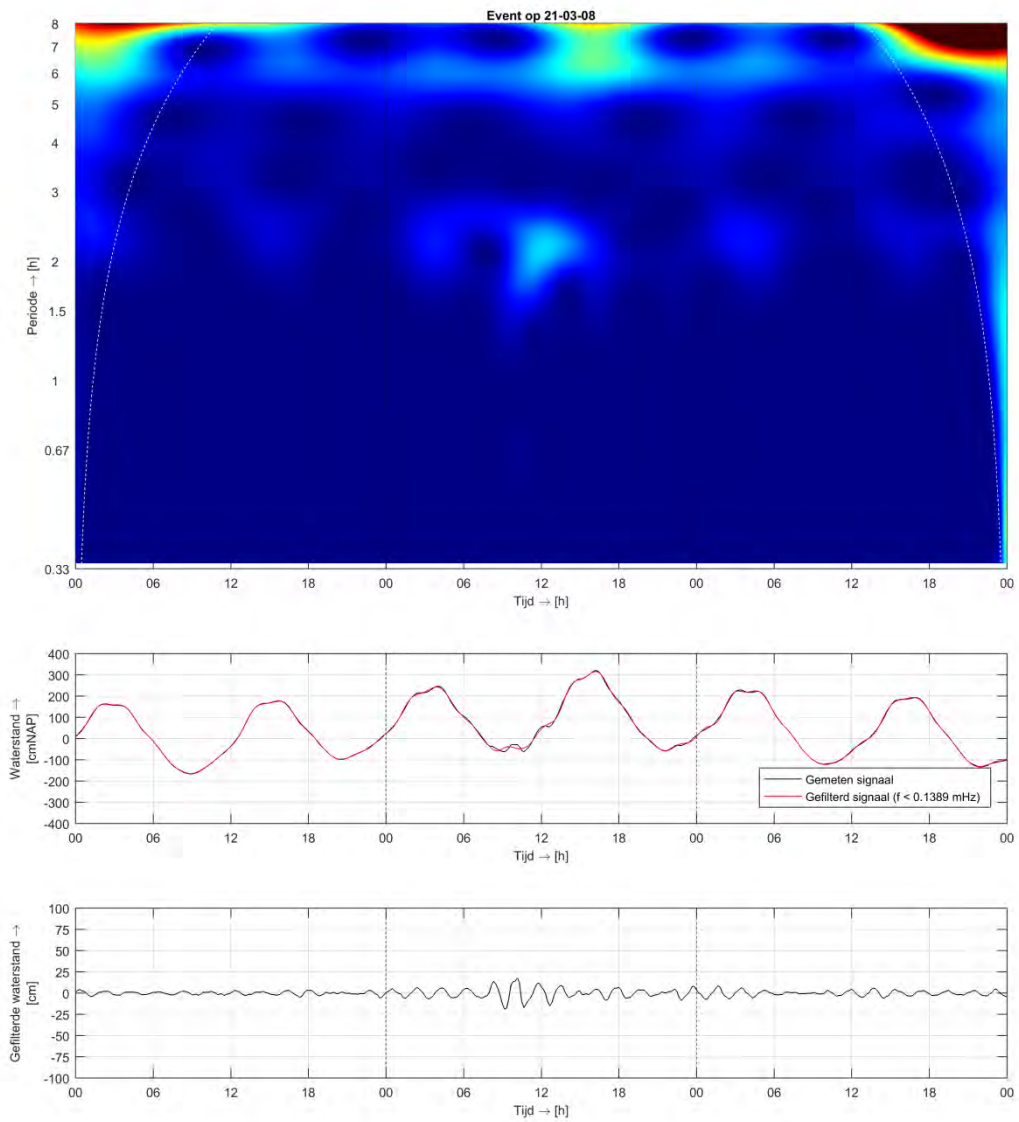
A.2.5 Marollegat



Figuur A.25 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Marollegat, amplitude = 0,15 m



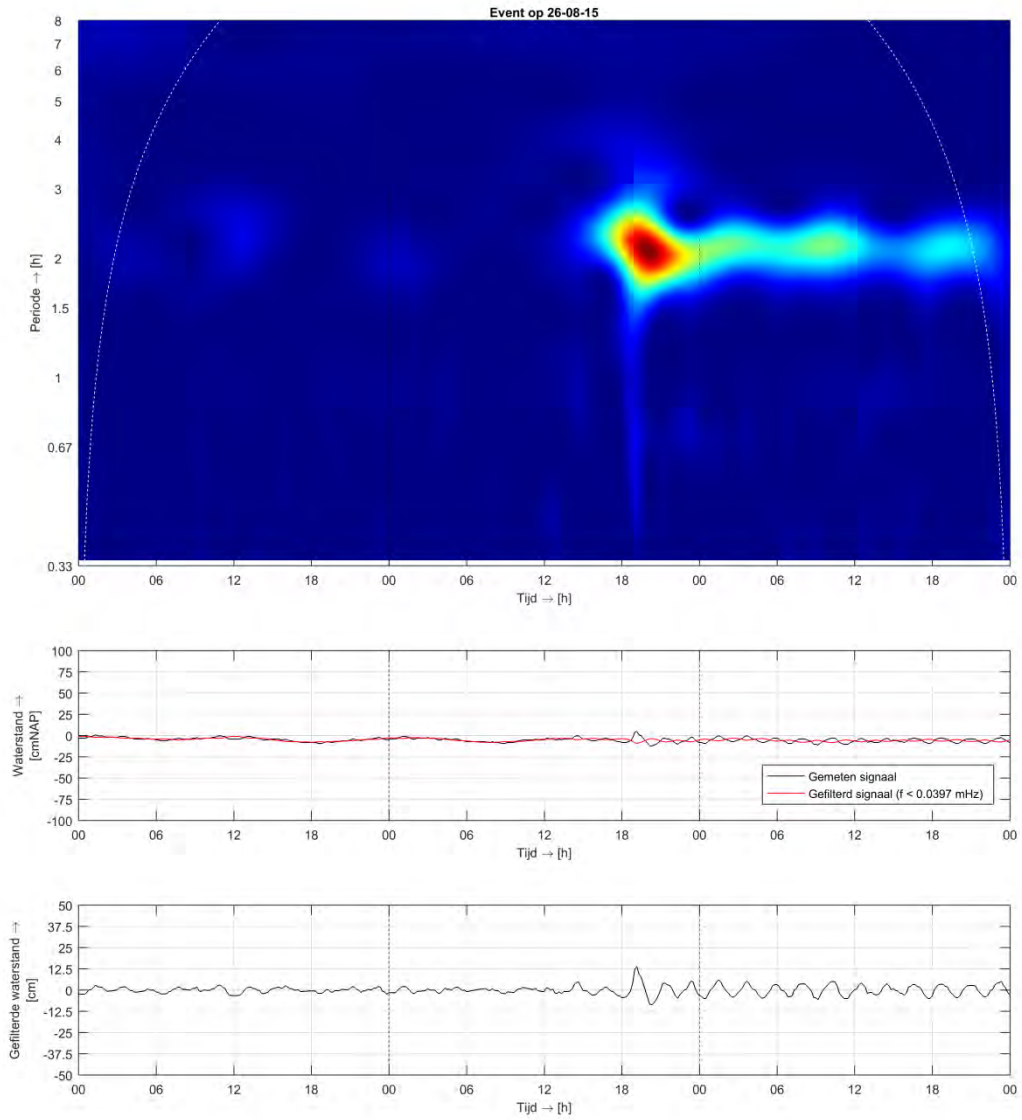
Figuur A.26 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Marollegat, amplitude = 0,15 m



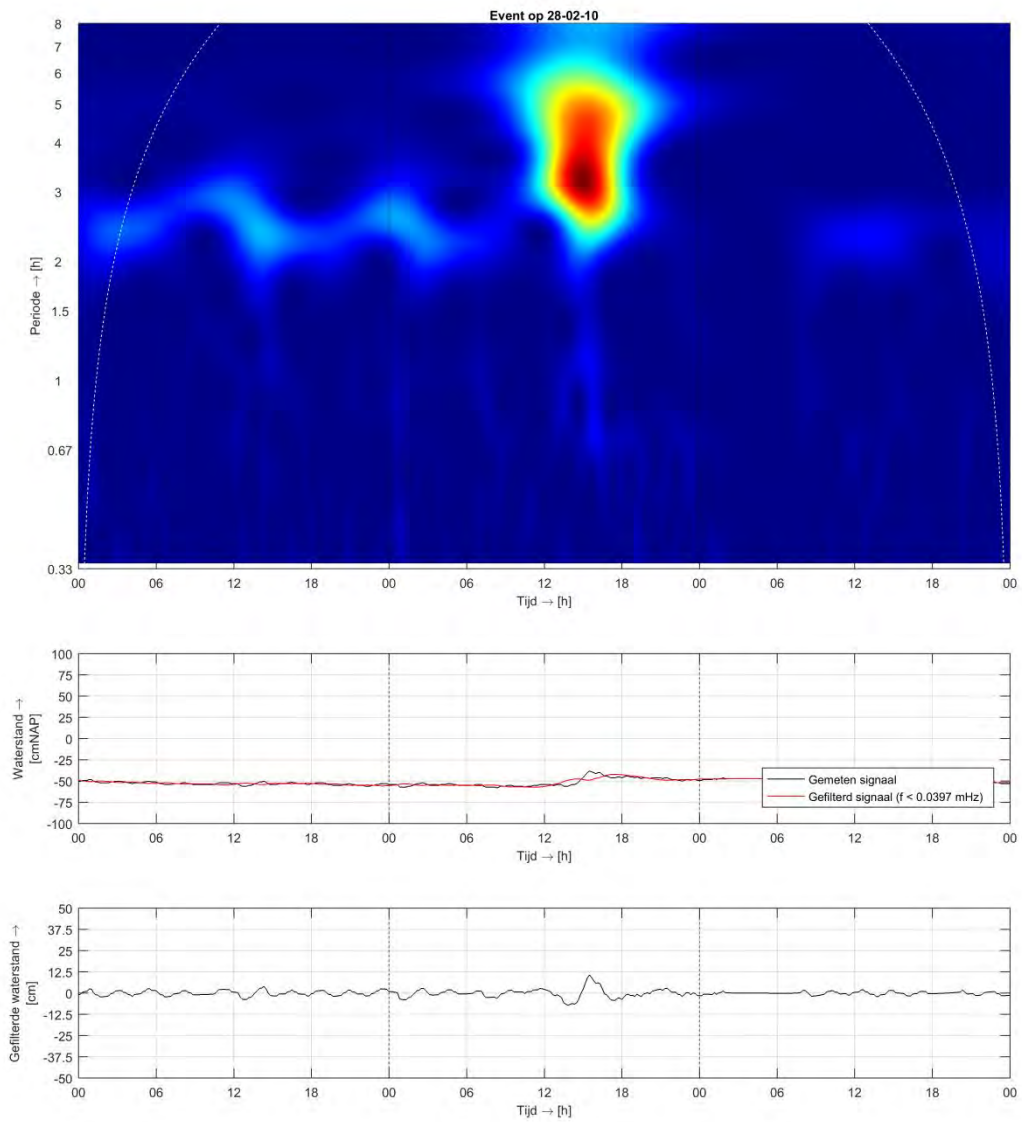
Figuur A.27 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Marollegat, amplitude = 0,15 m

A.3 Veerse Meer

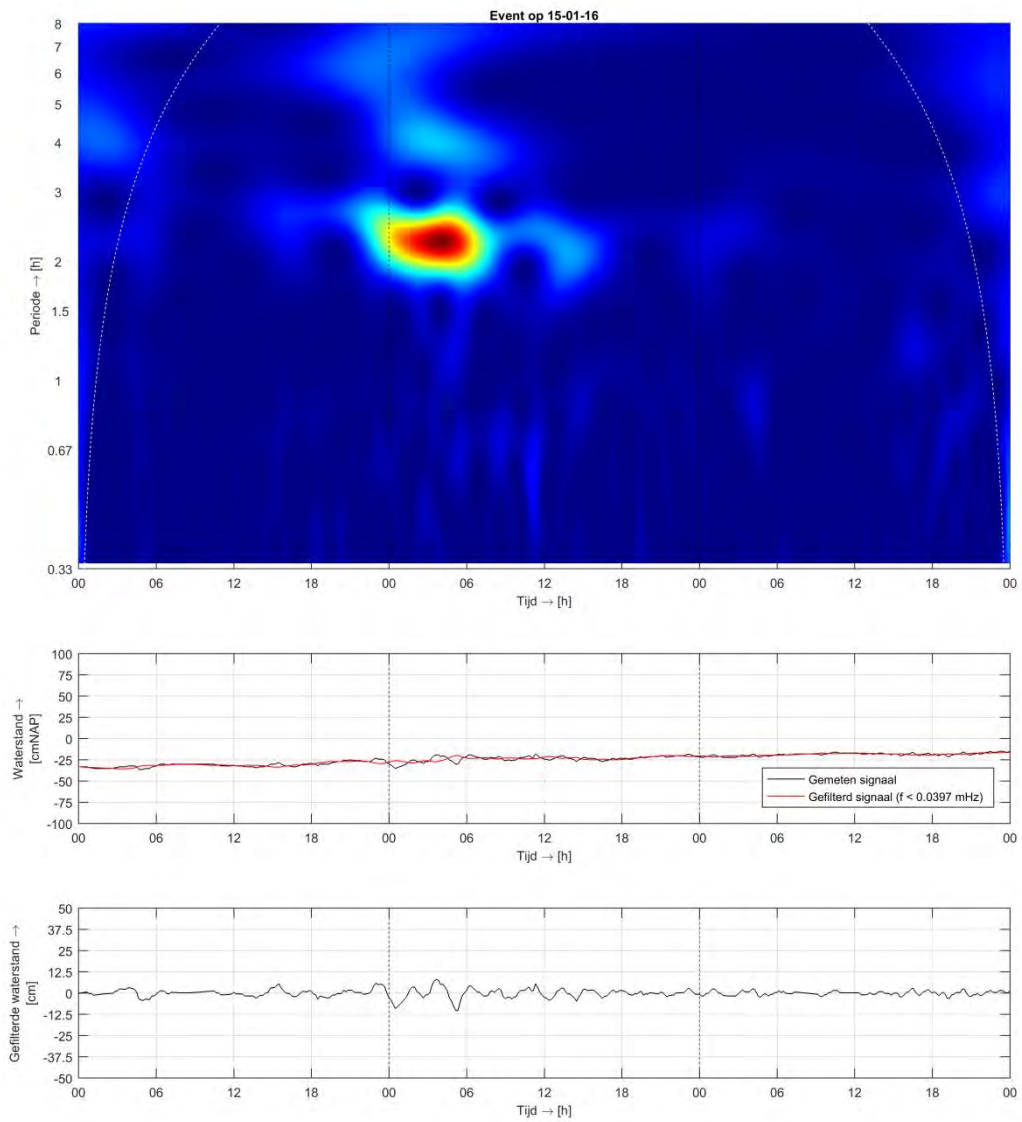
A.3.1 Sluis Kats Binnen (VM3)



Figuur A.28 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Sluis Kats Binnen (VM3), amplitude = 0,15 m

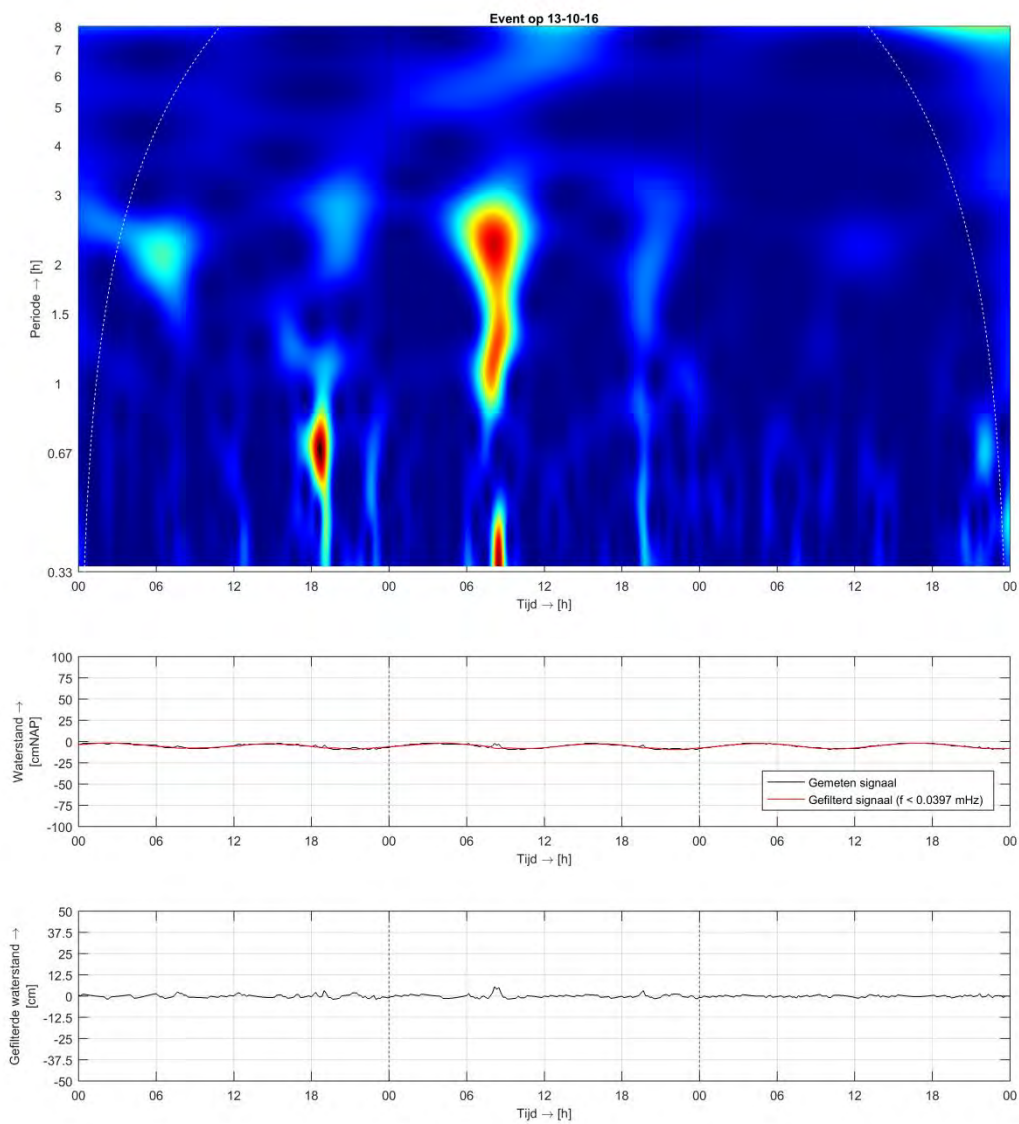


Figuur A.29 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Sluis Kats Binnen (VM3), amplitude = 0,15 m

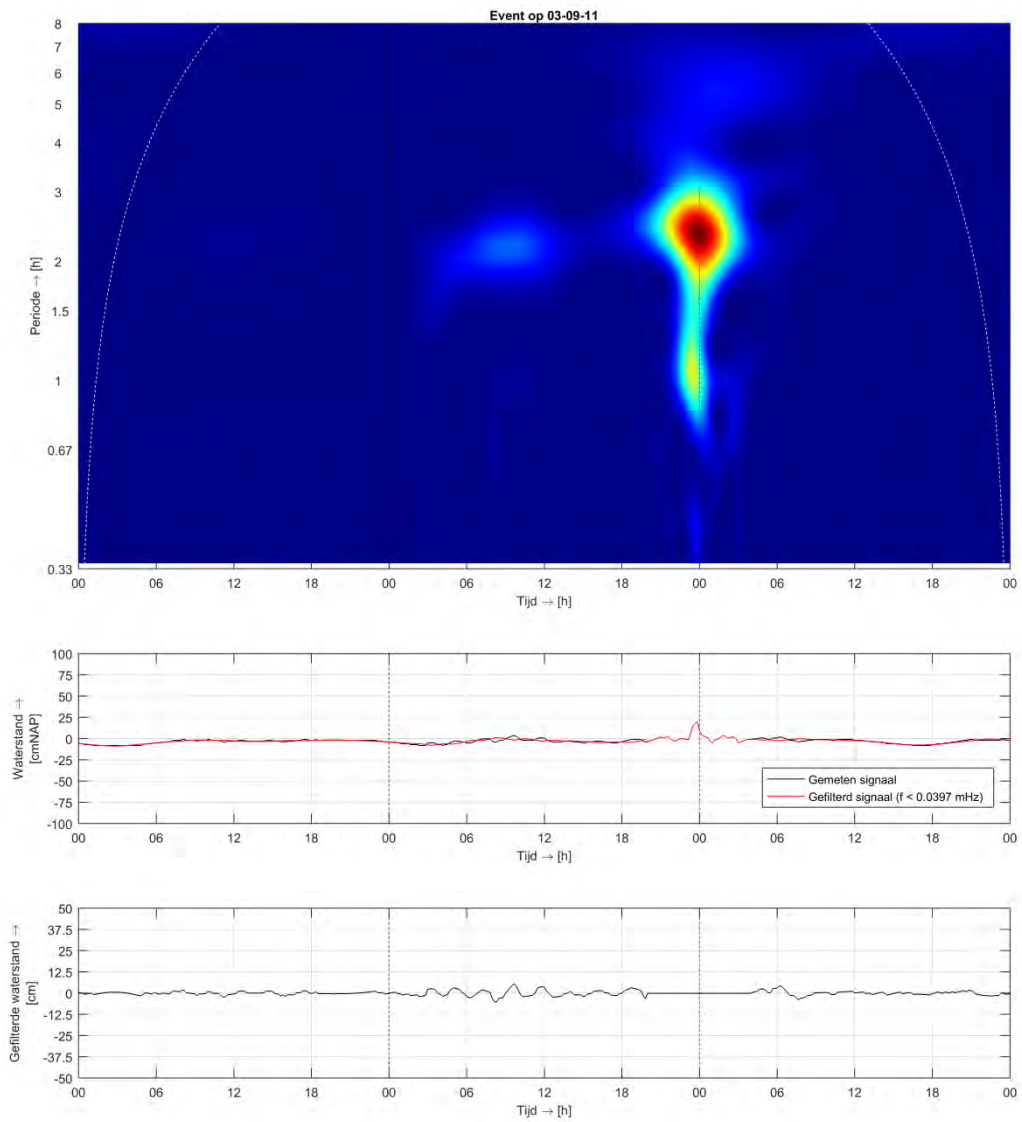


Figuur A.30 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Sluis Kats Binnen (VM3), amplitude = 0,15 m

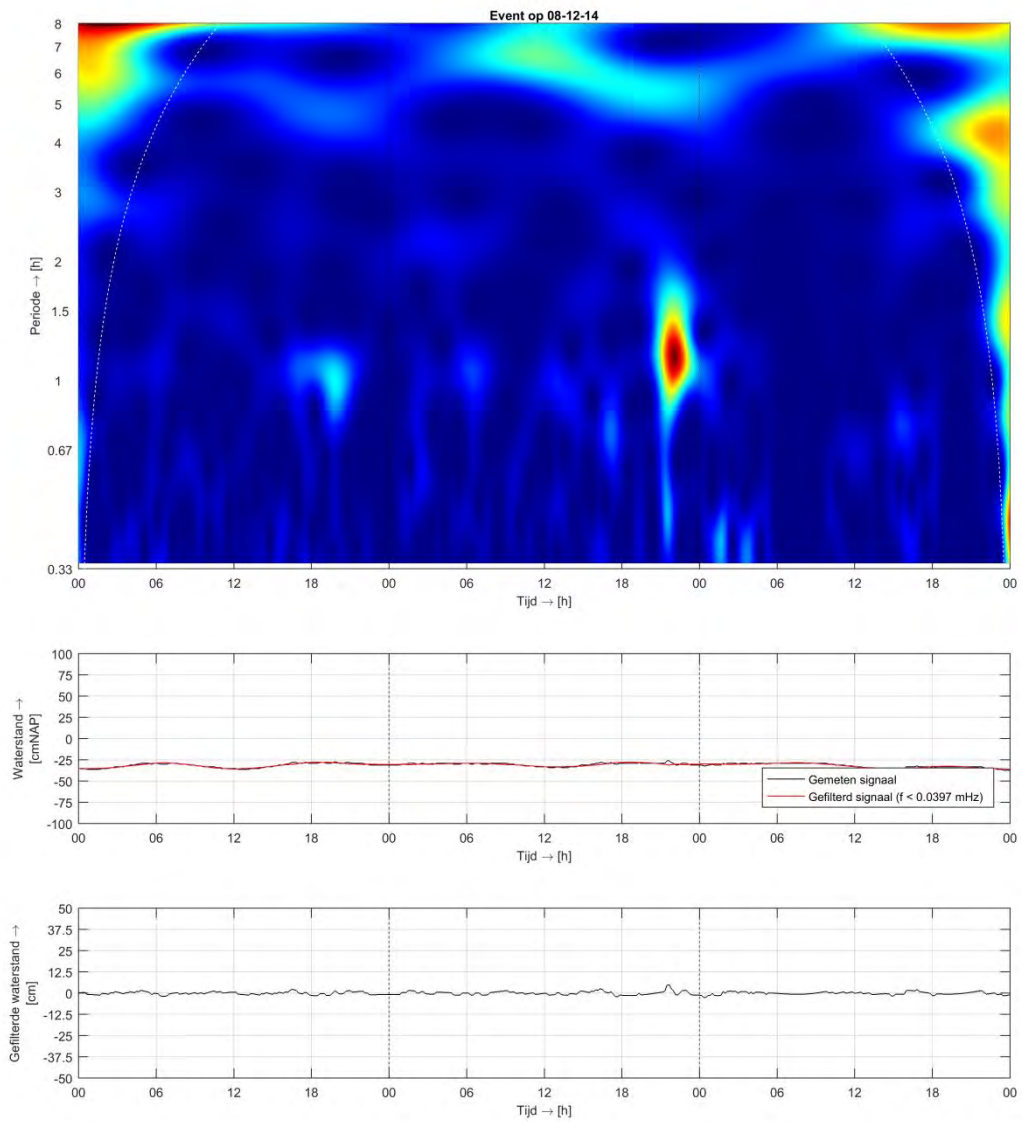
A.3.2 Oranjeplaat (VM4)



Figuur A.31 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Oranjeplaat (VM4), amplitude = 0,10 m

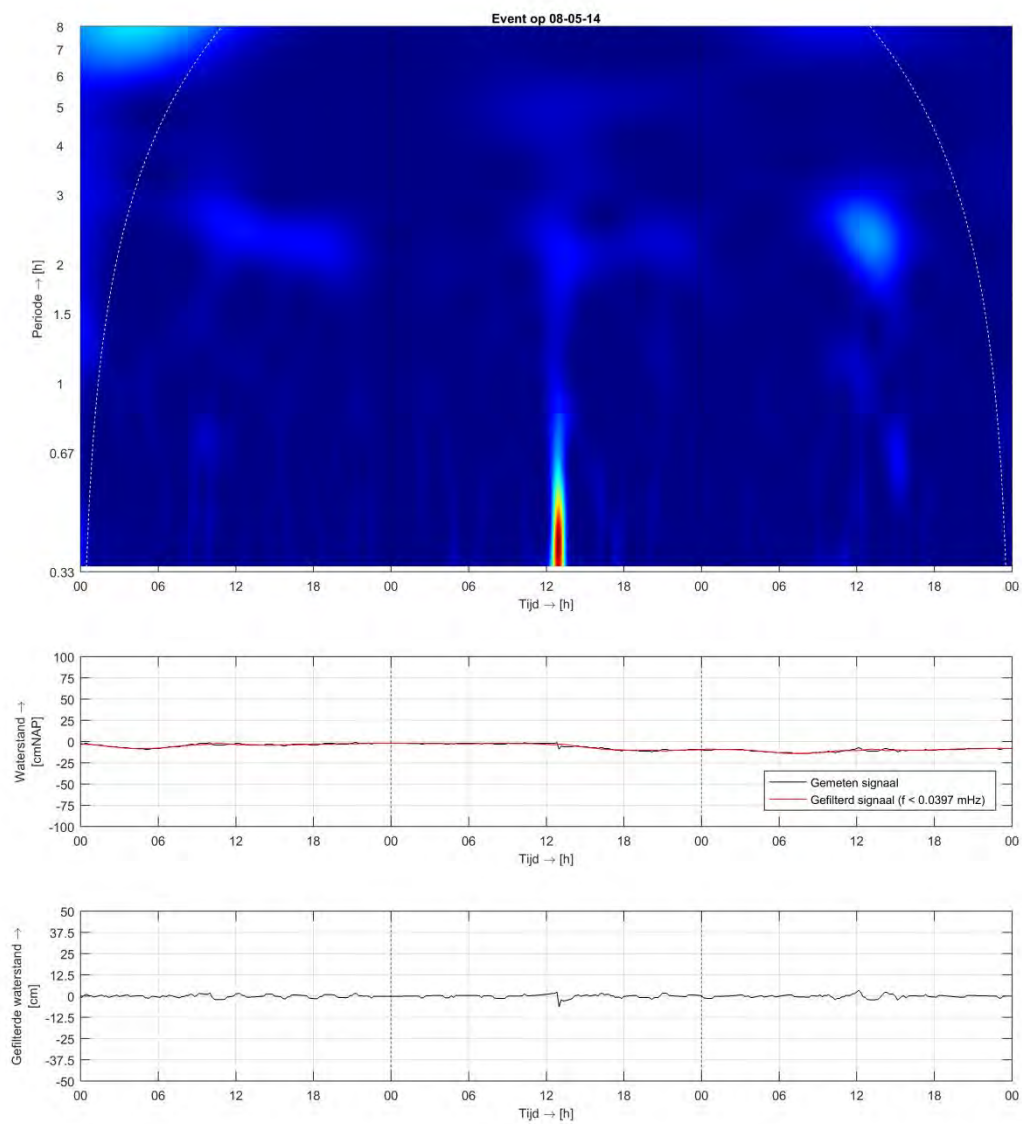


Figuur A.32 Tweede hoogste geregistreeerde seiche-episode Oranjeplaat (VM4), amplitude = 0,10 m

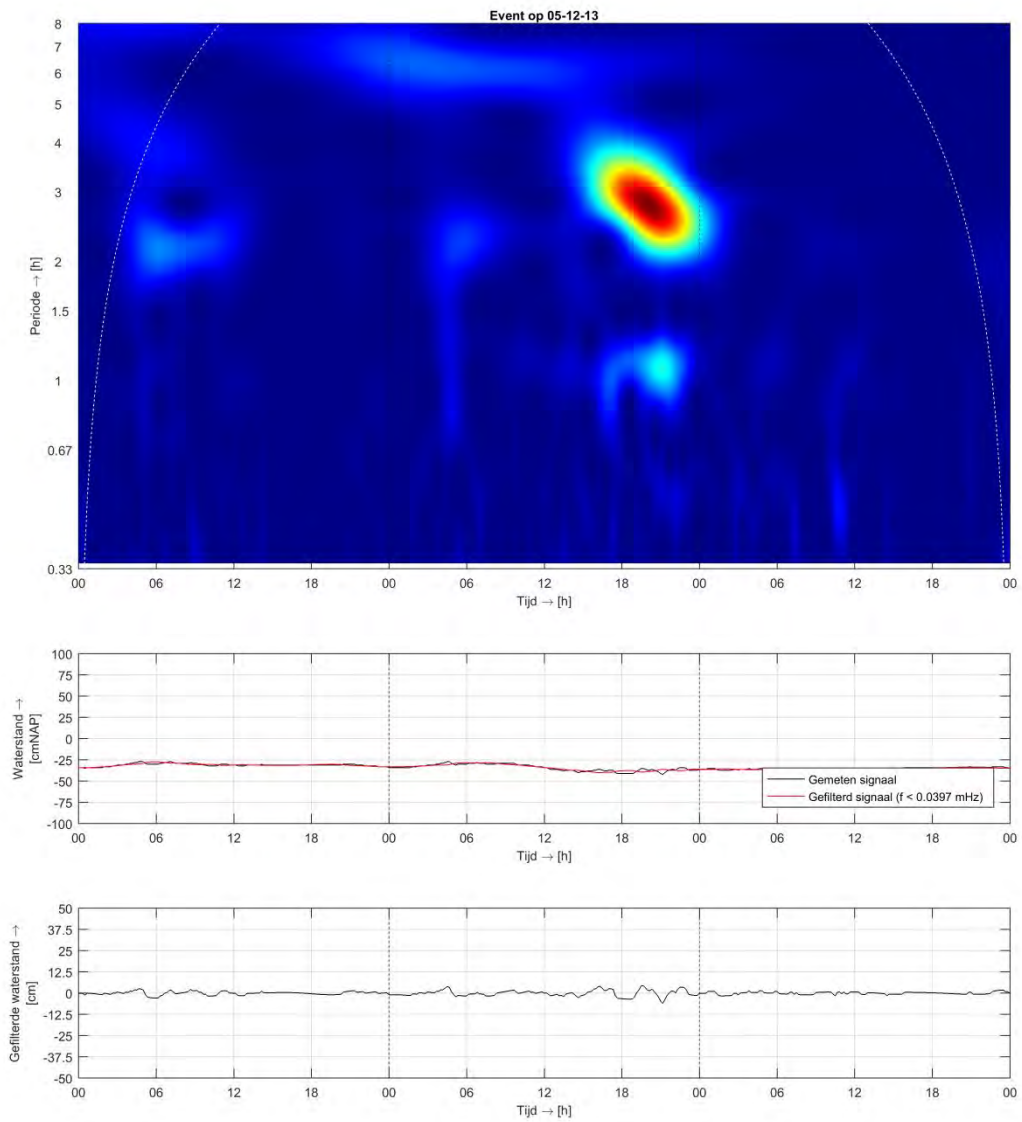


Figuur A.33 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Oranjeplaat (VM4), amplitude = 0,05 m

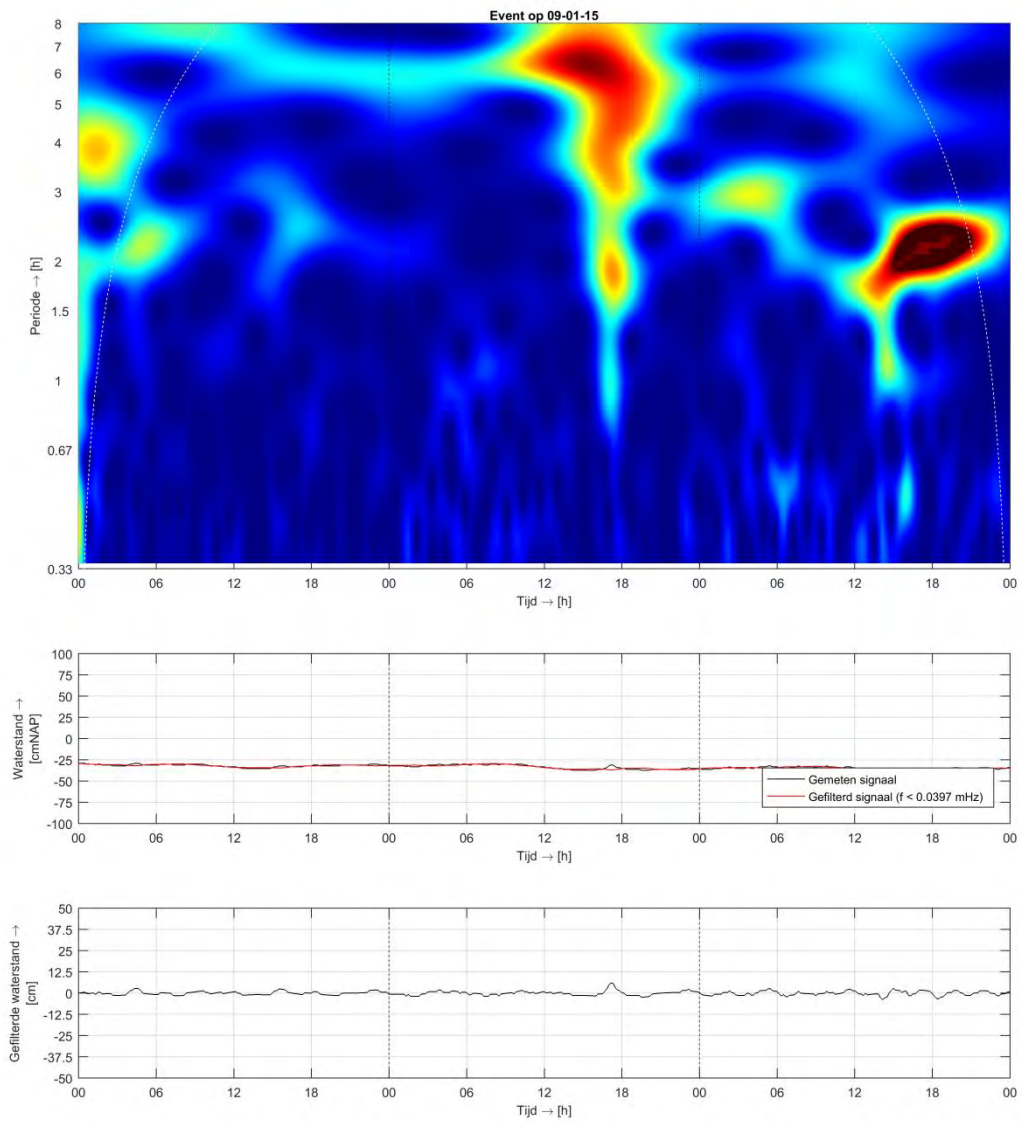
A.3.3 Schotsman (VM5)



Figuur A.34 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Schotsman (VM5), amplitude = 0,10 m



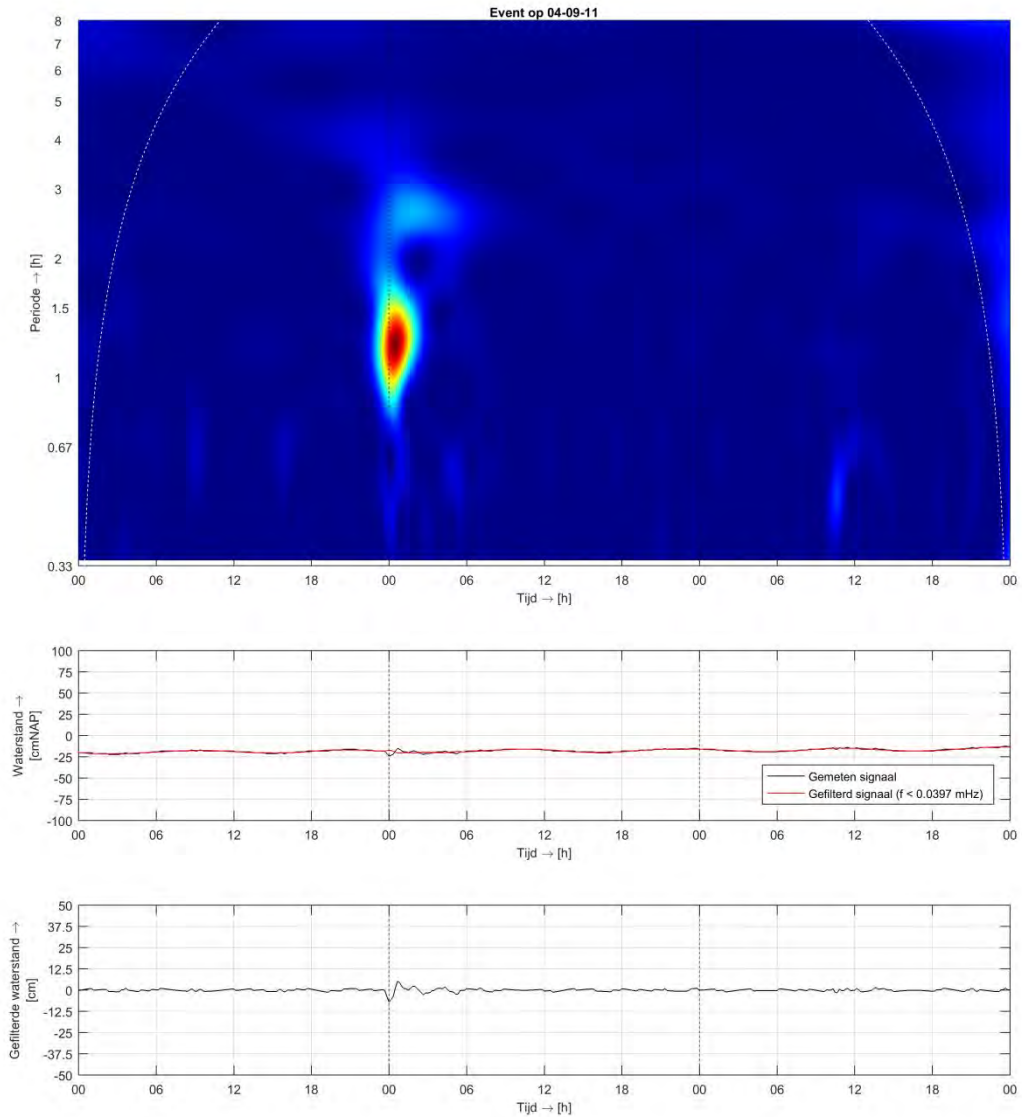
Figuur A.35 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Schotsman (VM5), amplitude = 0,10 m



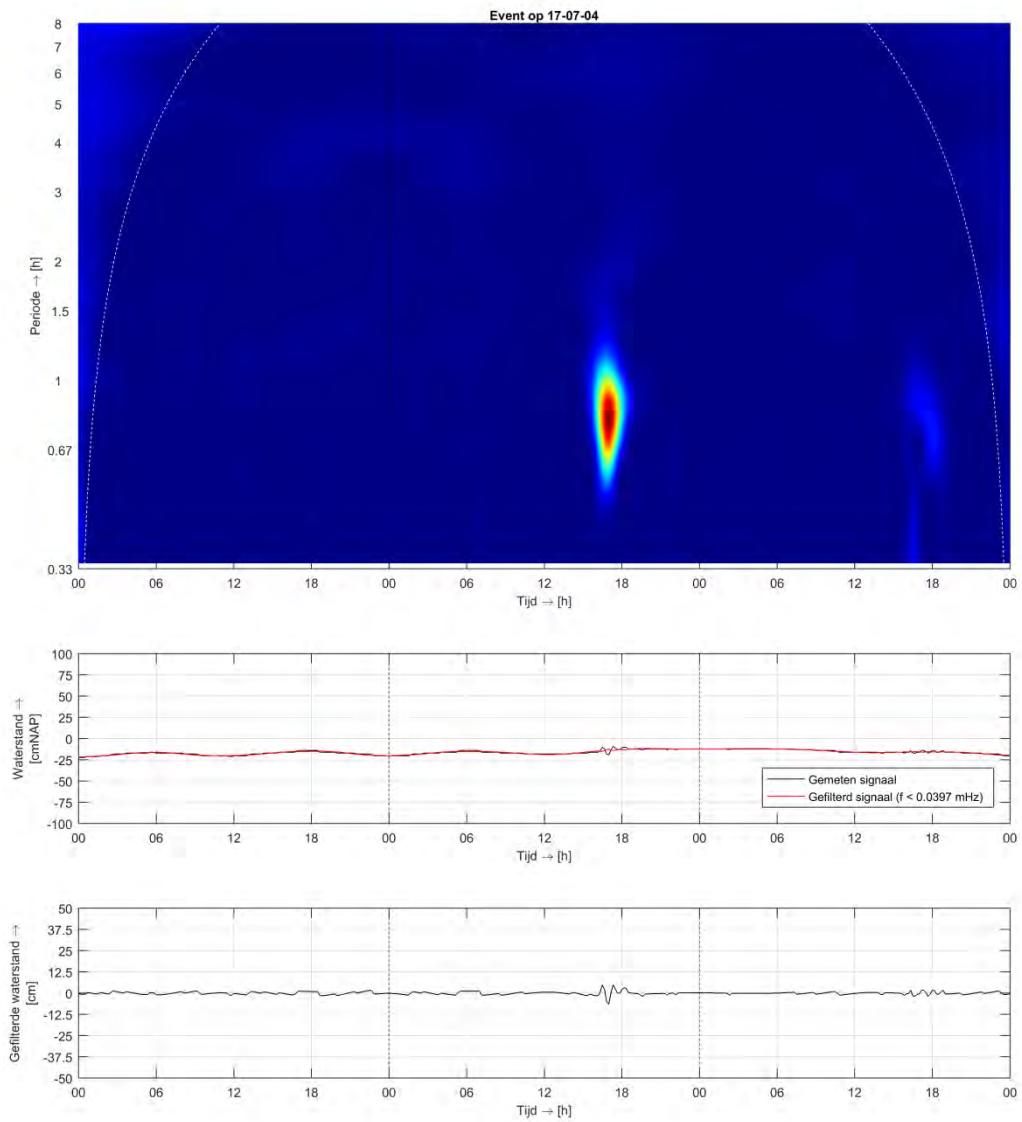
Figuur A.36 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Schotsman (VM5), amplitude = 0,10 m

A.4 Grevelingenmeer

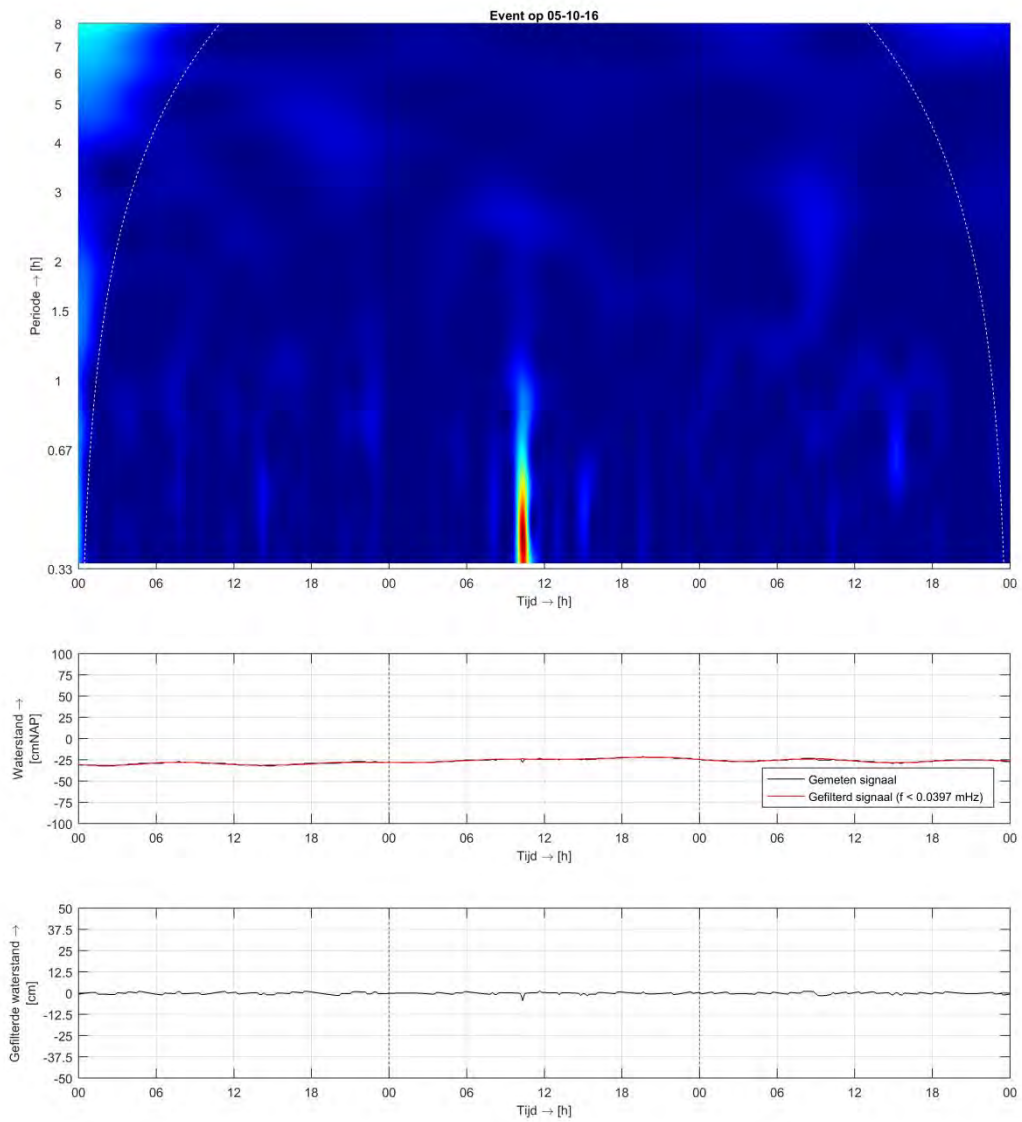
A.4.1 Bommenede



Figuur A.37 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Bommenede, amplitude = 0,10 m

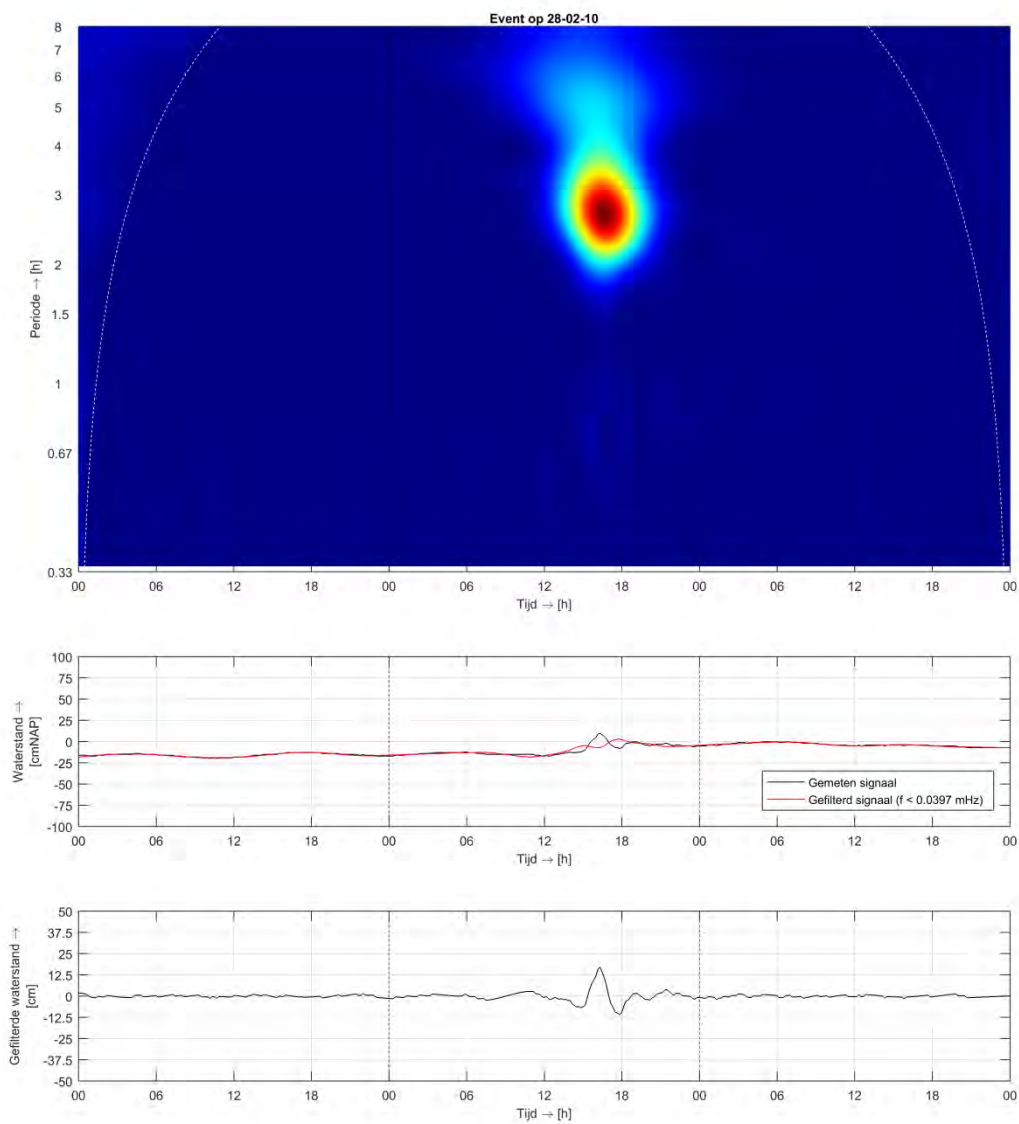


Figuur A.38 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Bommenede, amplitude = 0,10 m

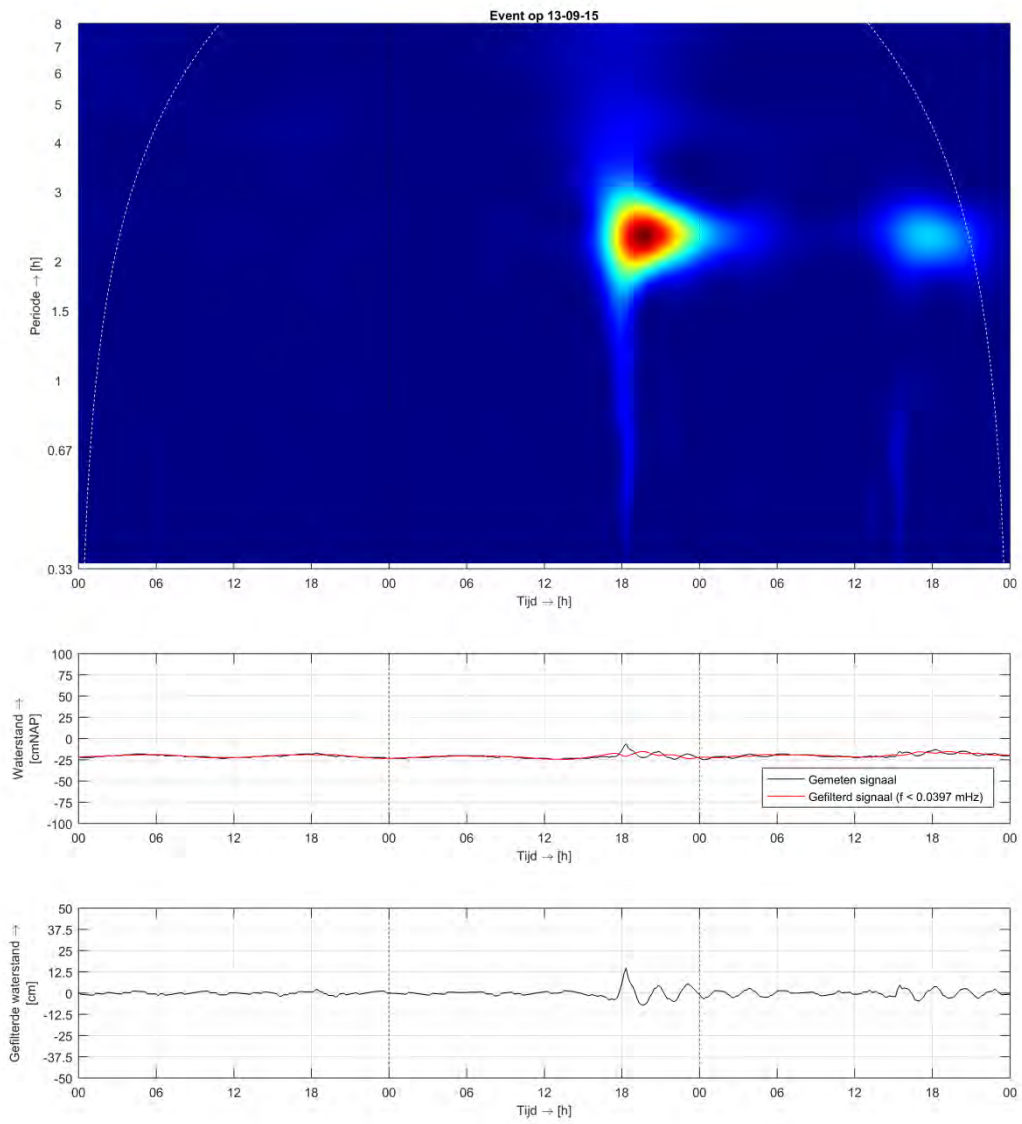


Figuur A.39 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Bommenede, amplitude = 0,05 m

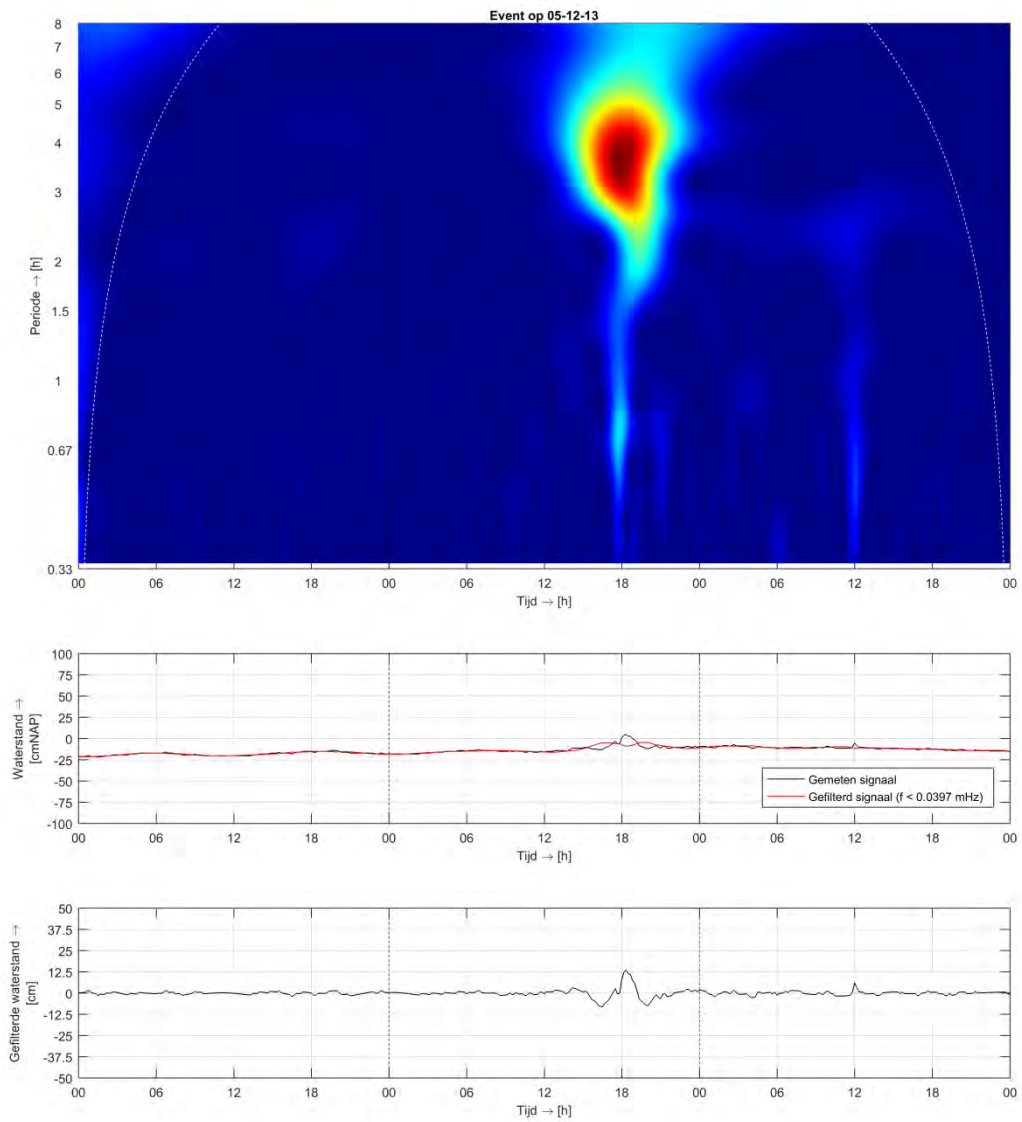
A.4.2 Hevel Grevelingen West



Figuur A.40 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Hevel Grevelingen West, amplitude = 0,20 m



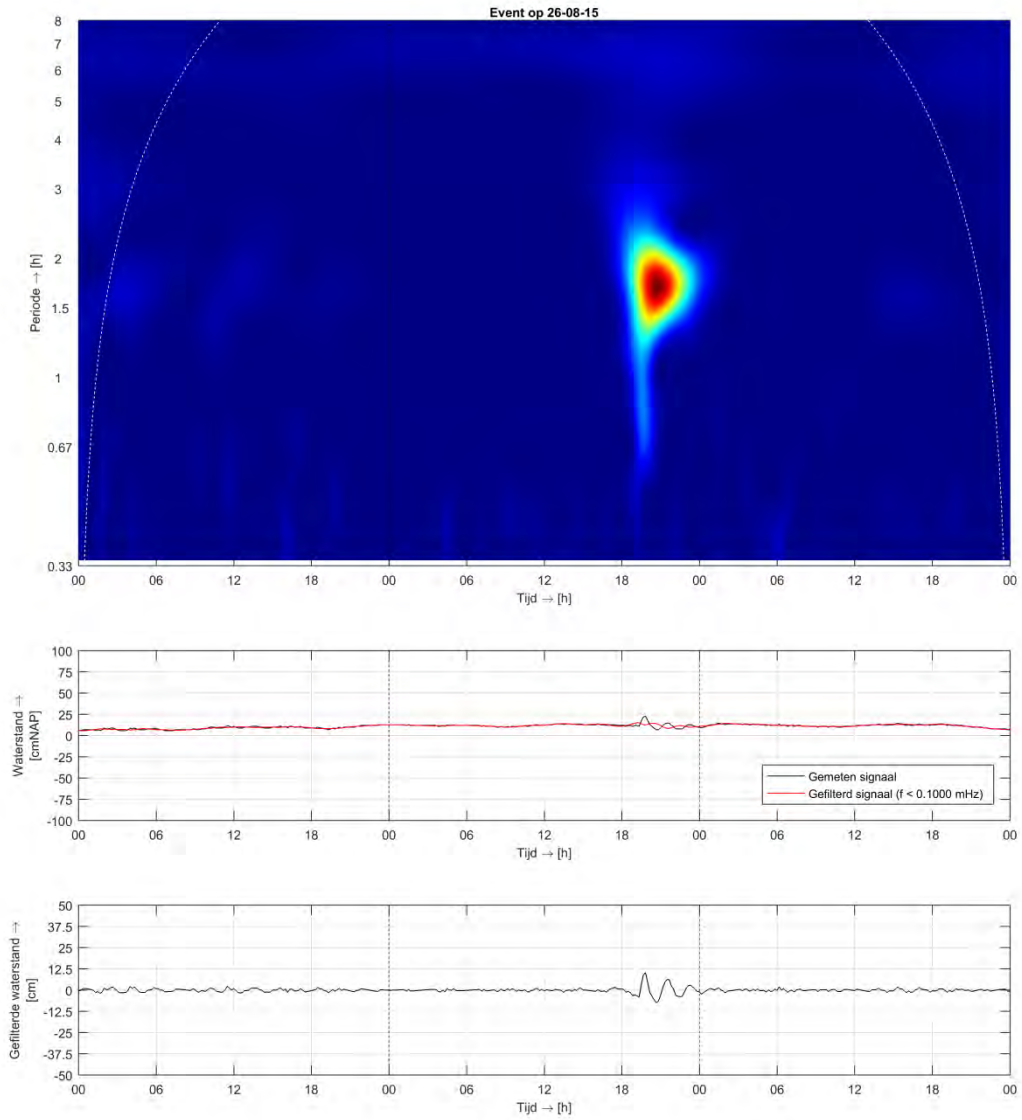
Figuur A.41 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Hevel Grevelingen West, amplitude = 0,15 m



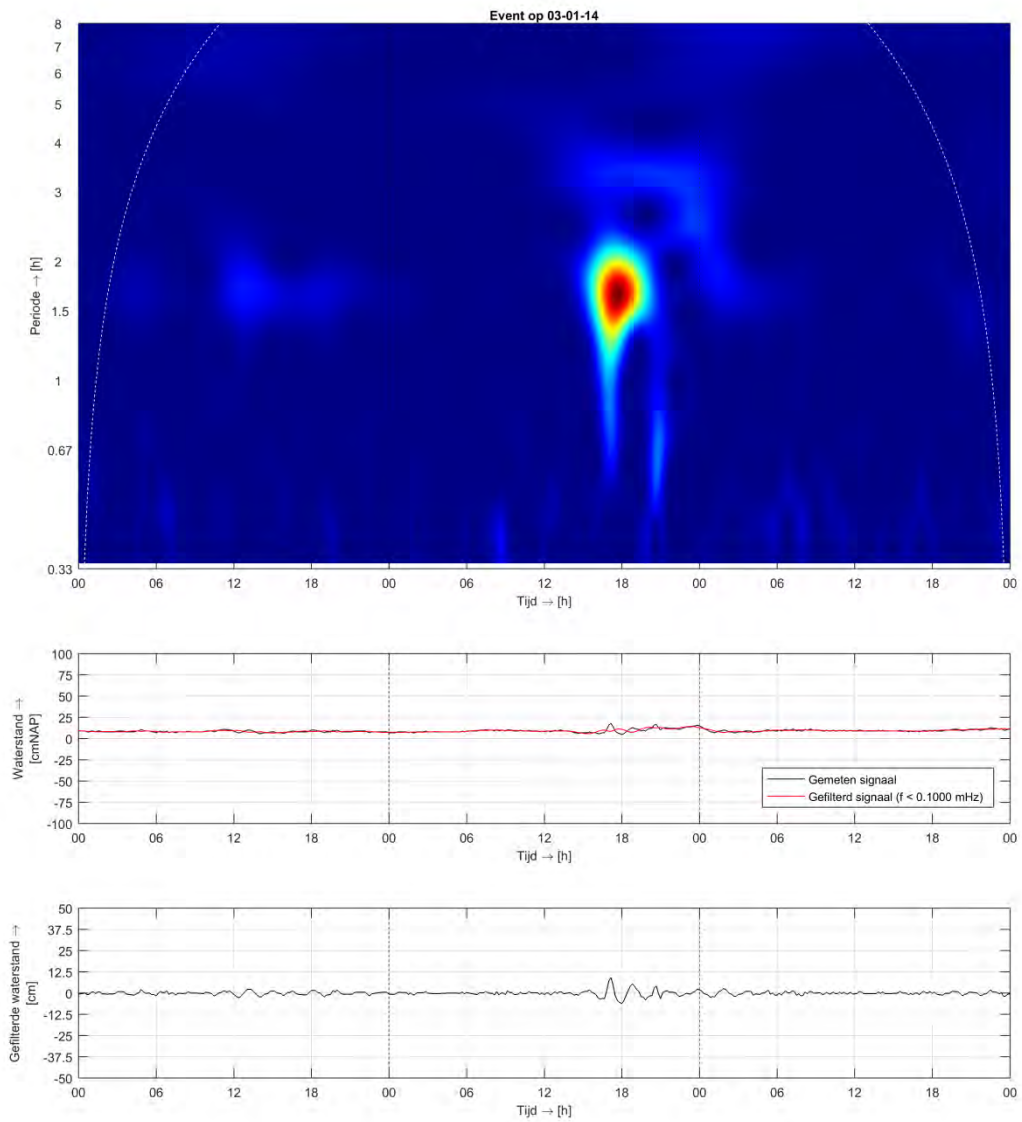
Figuur A.42 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Hevel Grevelingen West, amplitude = 0,15 m

A.5 Volkerak-Zoommeer

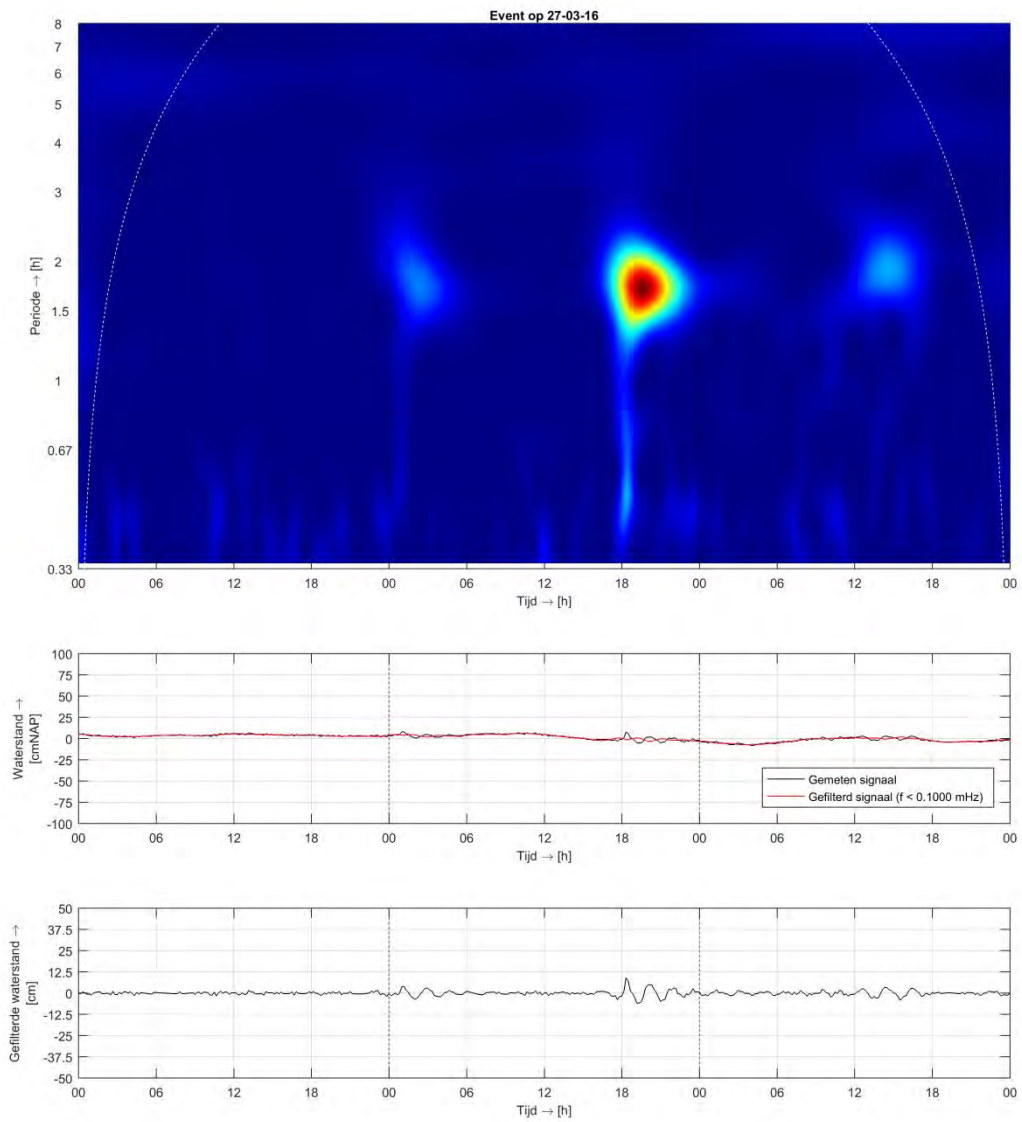
A.5.1 Rak Zuid



Figuur A.43 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Rak Zuid, amplitude = 0,15 m

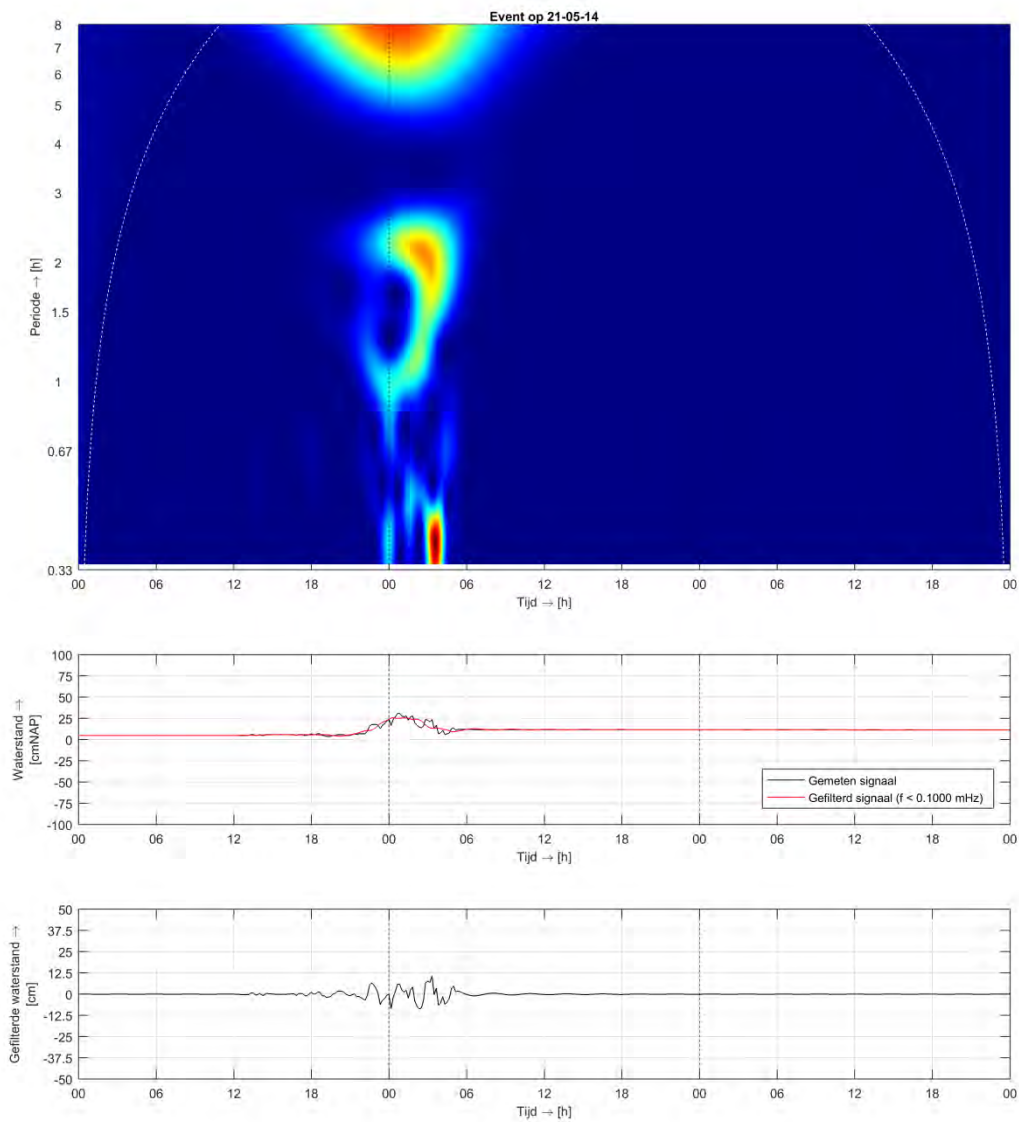


Figuur A.44 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Rak Zuid, amplitude = 0,10 m

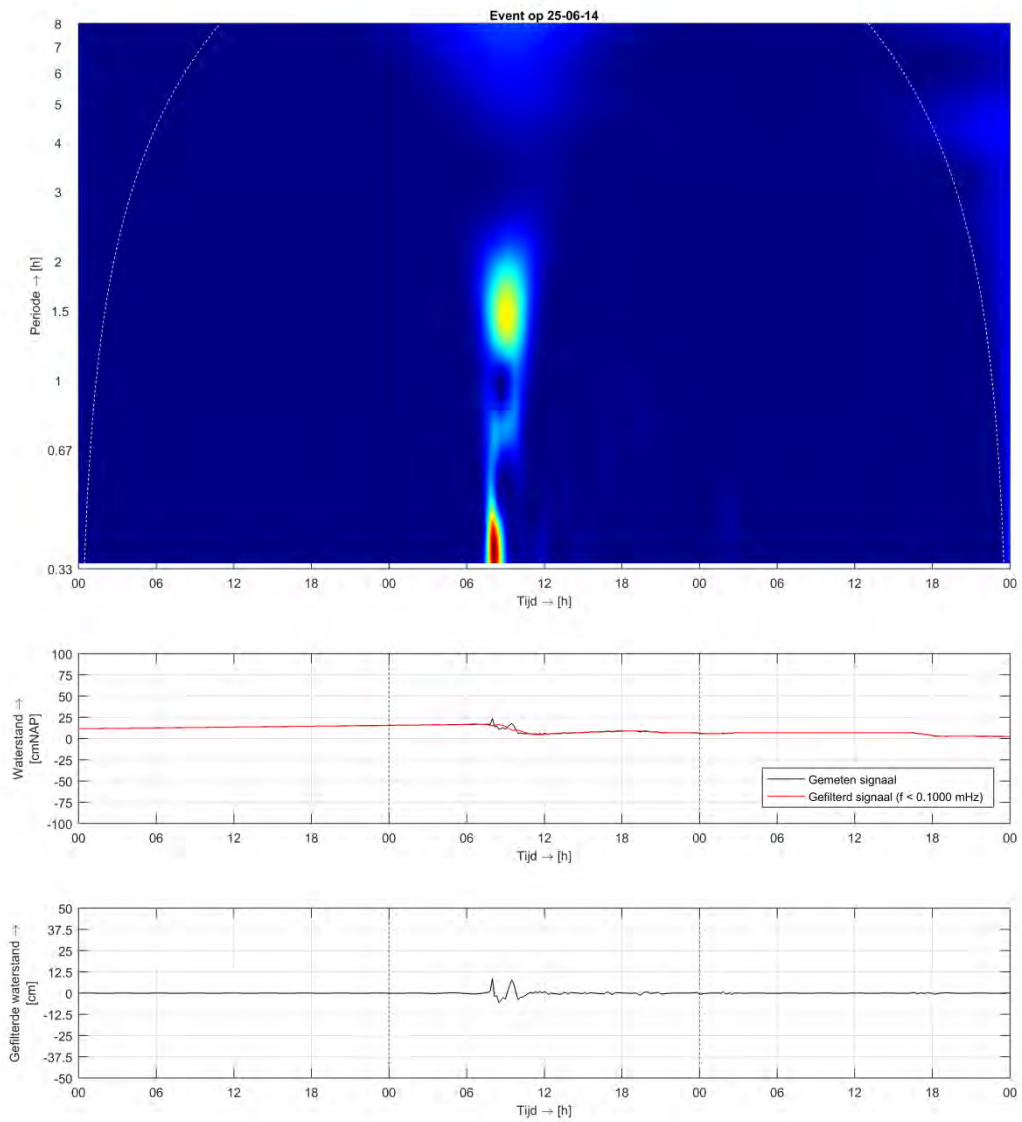


Figuur A.45 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Rak Zuid, amplitude = 0,10 m

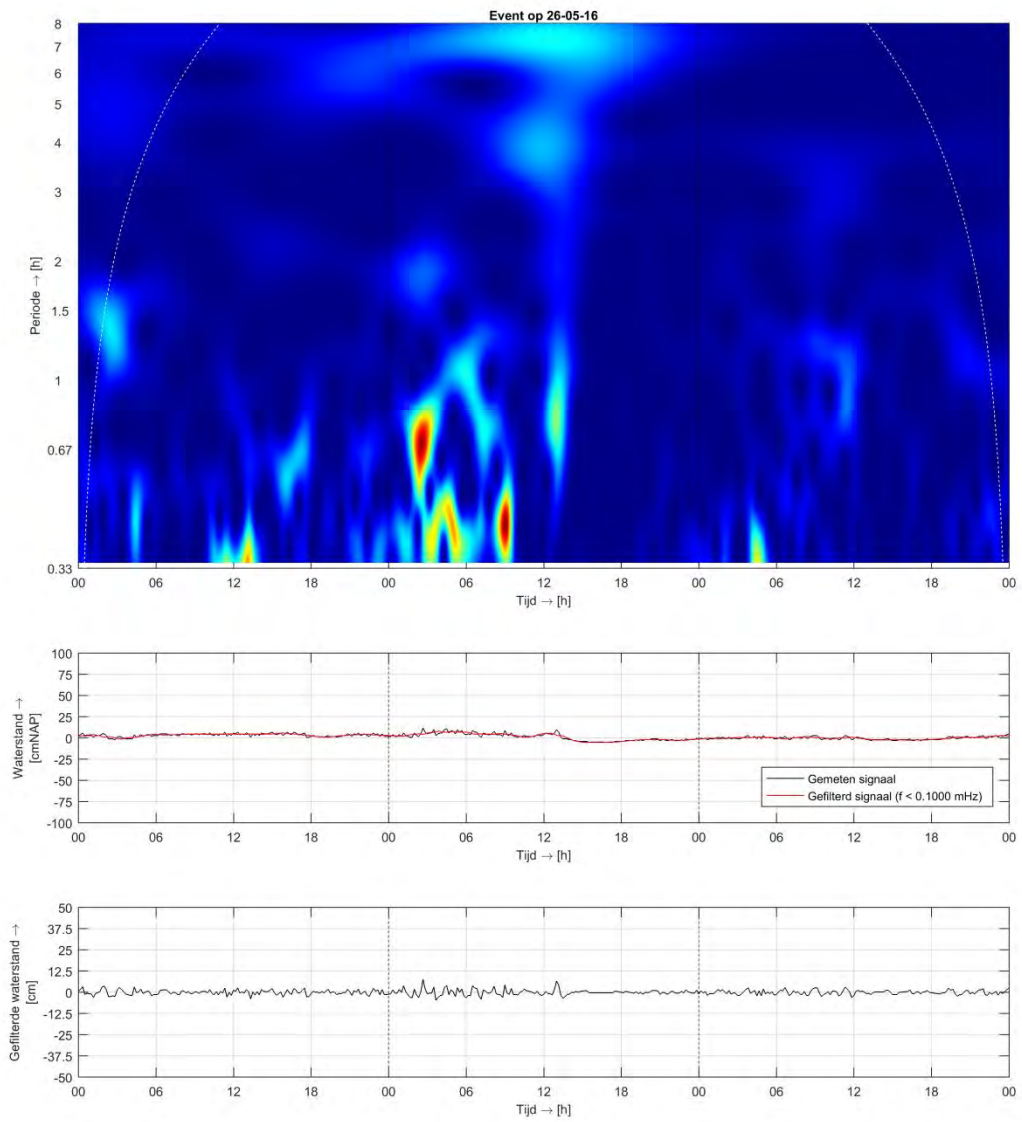
A.5.2 Volkerak Galathea



Figuur A.46 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Volkerak Galathea, amplitude = 0,15 m

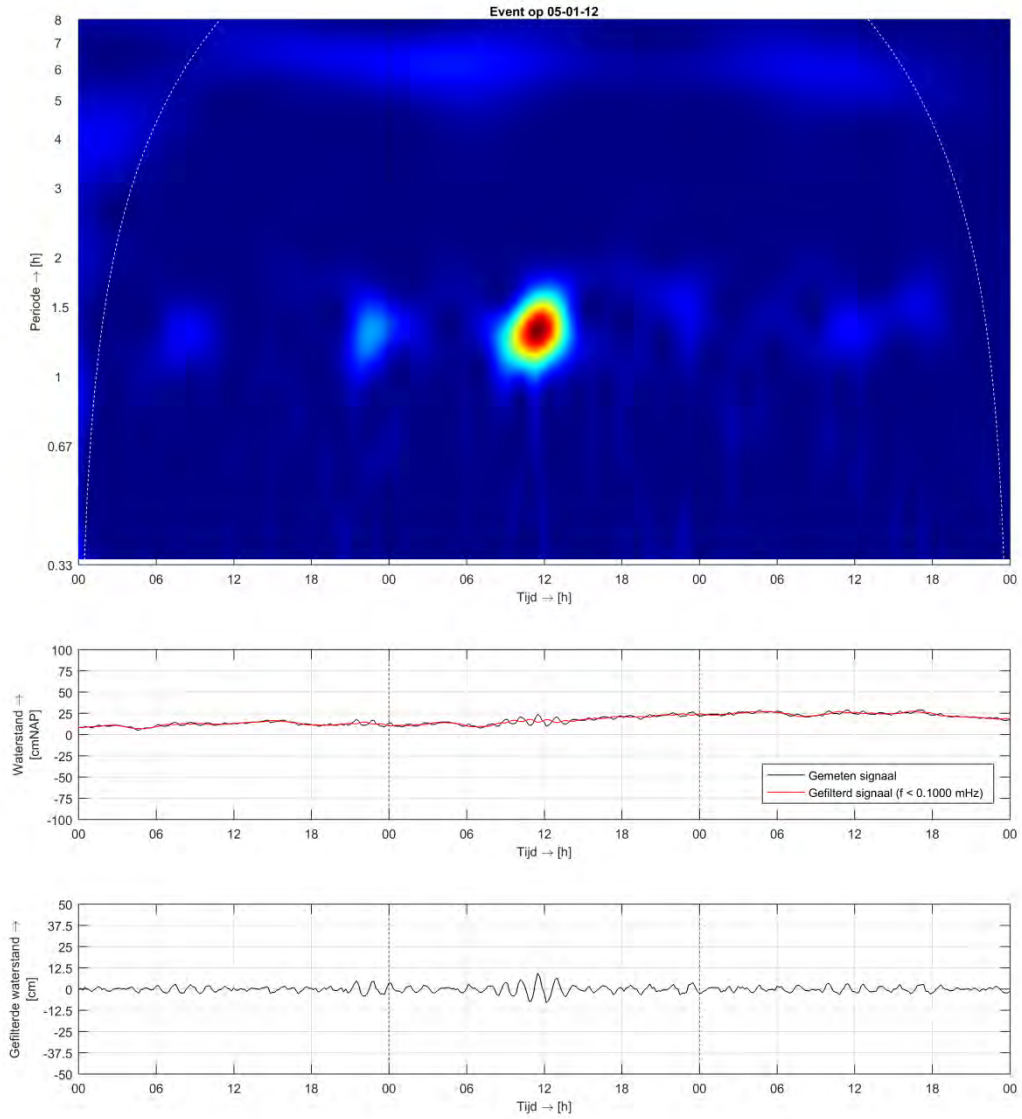


Figuur A.47 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Volkerak Galathea, amplitude = 0,10 m

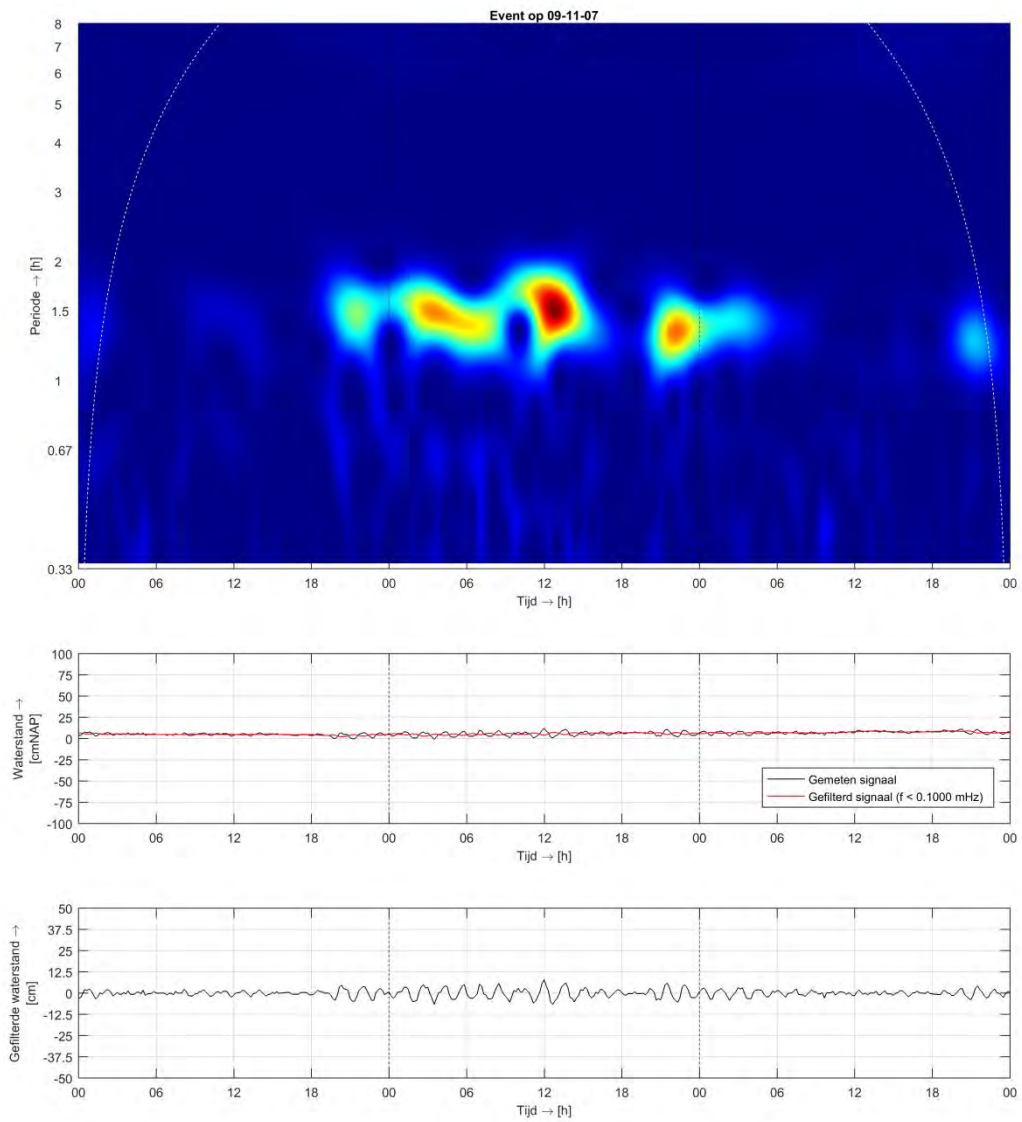


Figuur A.48 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Volkerak Galathea, amplitude = 0,10 m

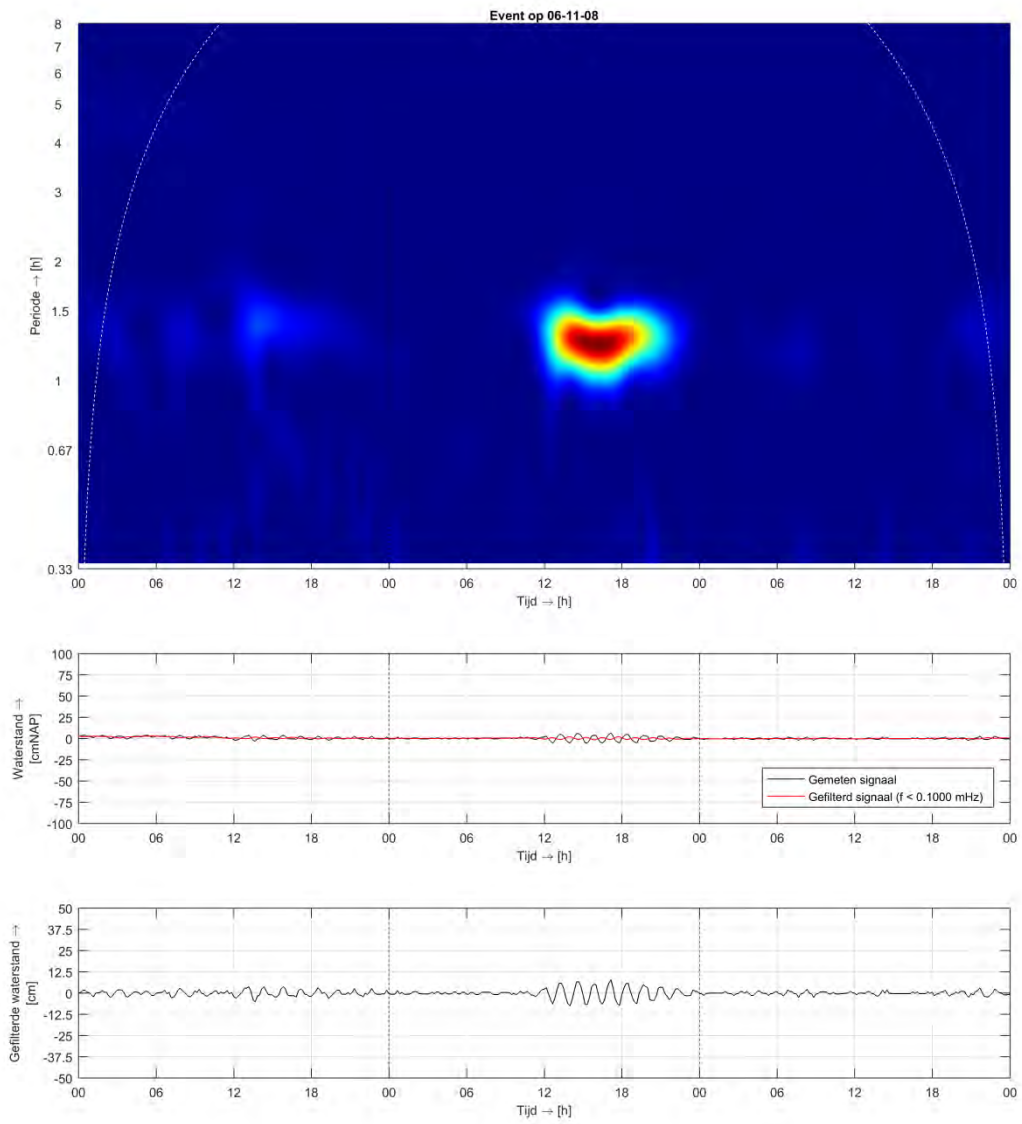
A.5.3 Nieuw-Vossemeer



Figuur A.49 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Nieuw-Vossemeer, amplitude = 0,10 m

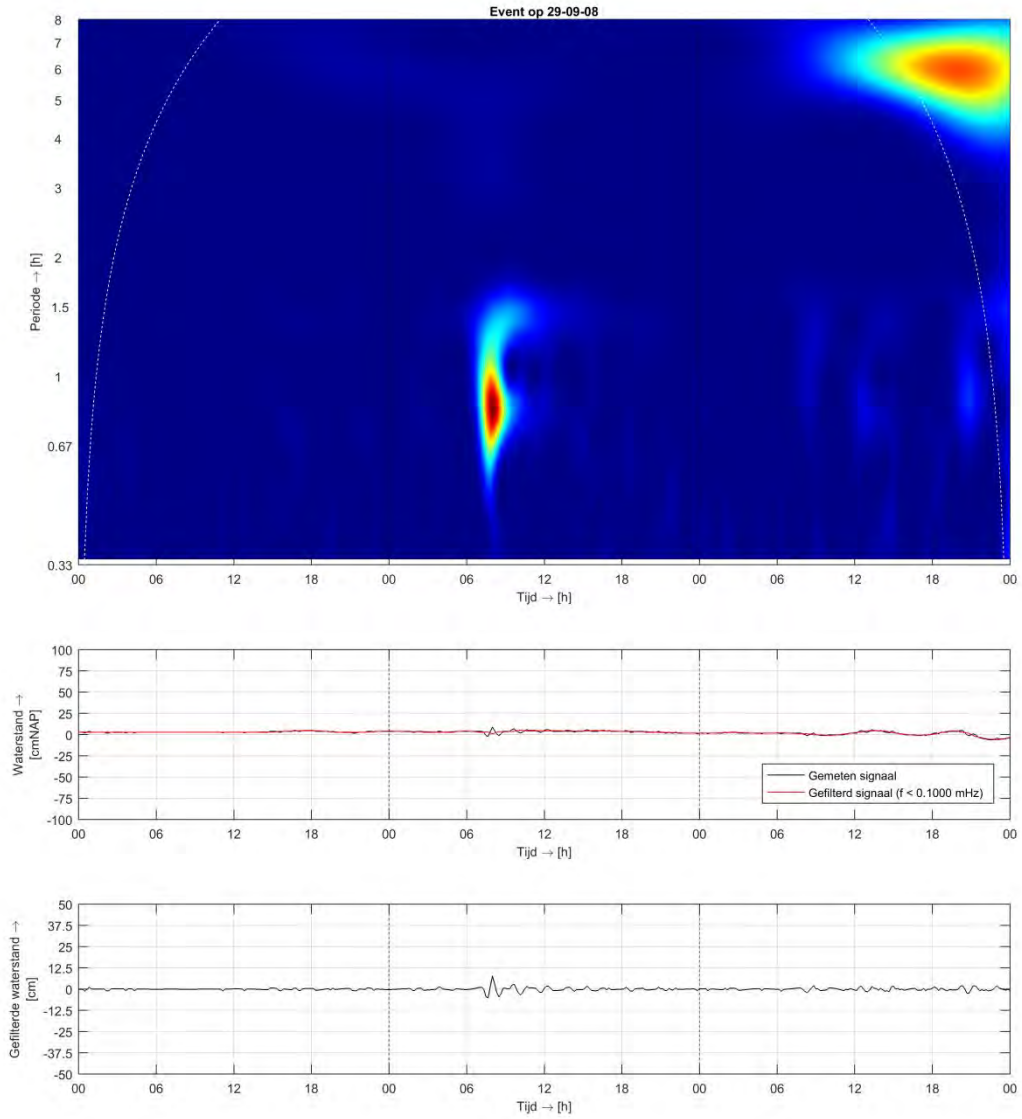


Figuur A.50 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Nieuw-Vossemeer, amplitude = 0,10 m

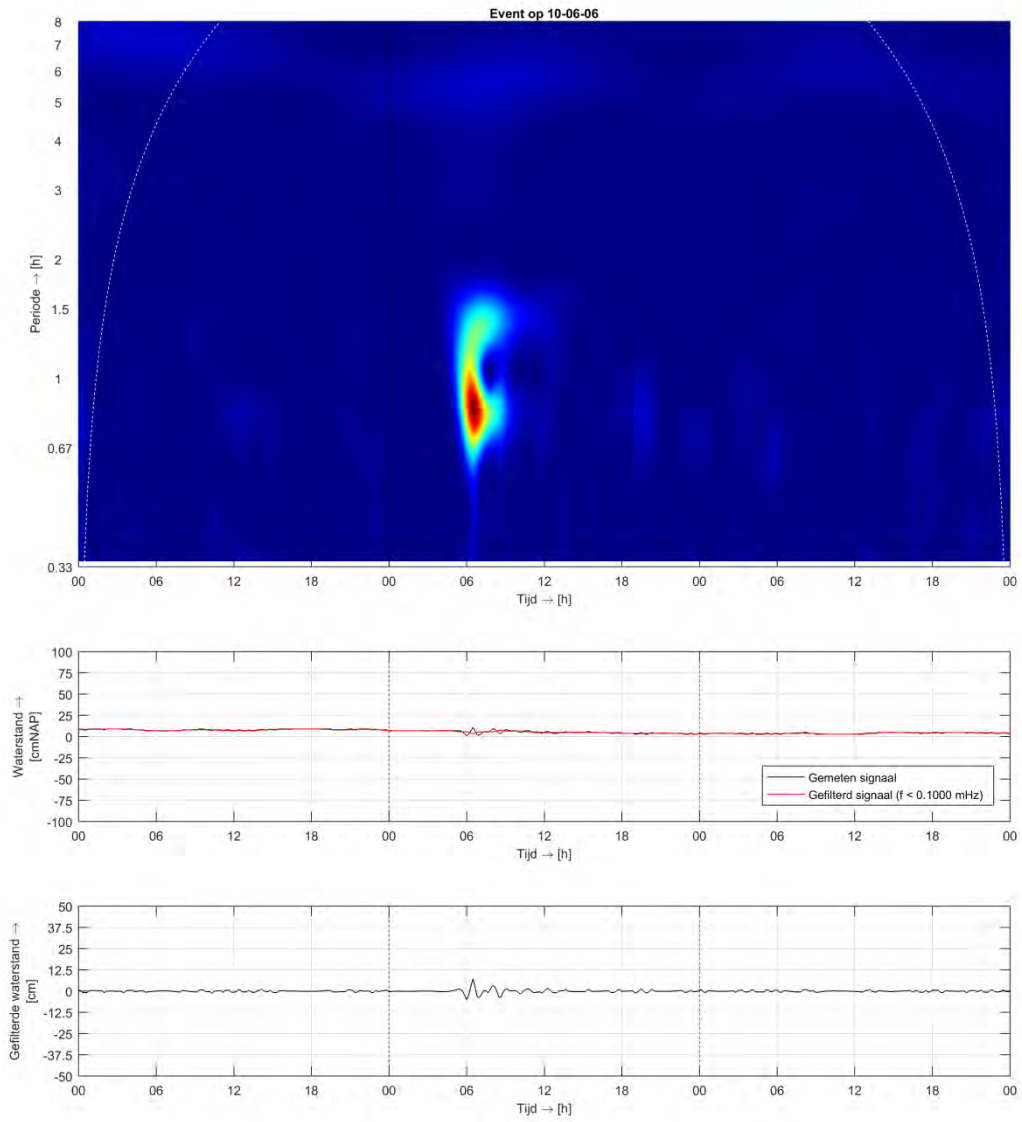


Figuur A.51 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Nieuw-Vossemeer, amplitude = 0,10 m

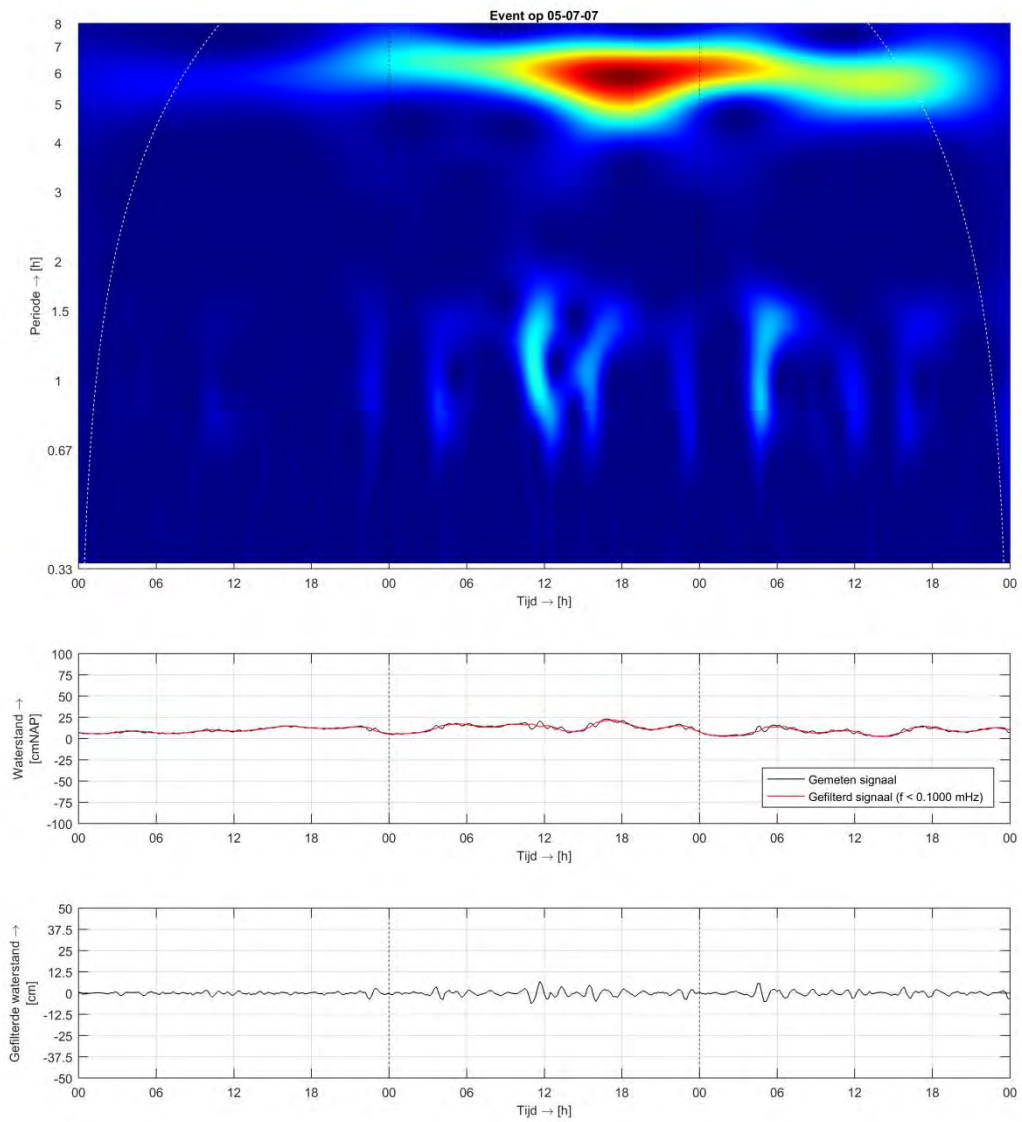
A.5.4 Bathse Spuikanaal Inloop



Figuur A.52 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Bathse Spuikanaal Inloop, amplitude = 0,10 m



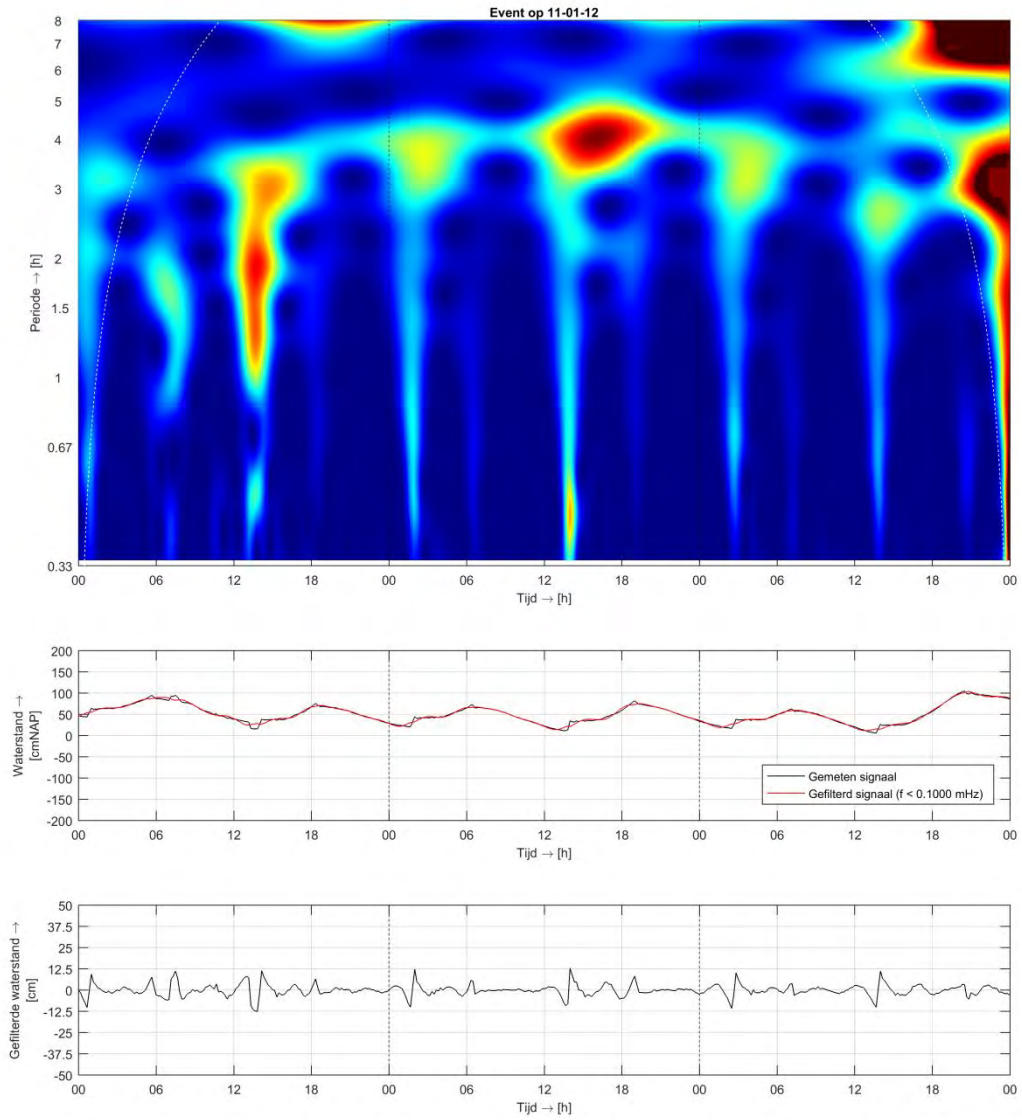
Figuur A.53 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Bathse Spuikanaal Inloop, amplitude = 0,10 m



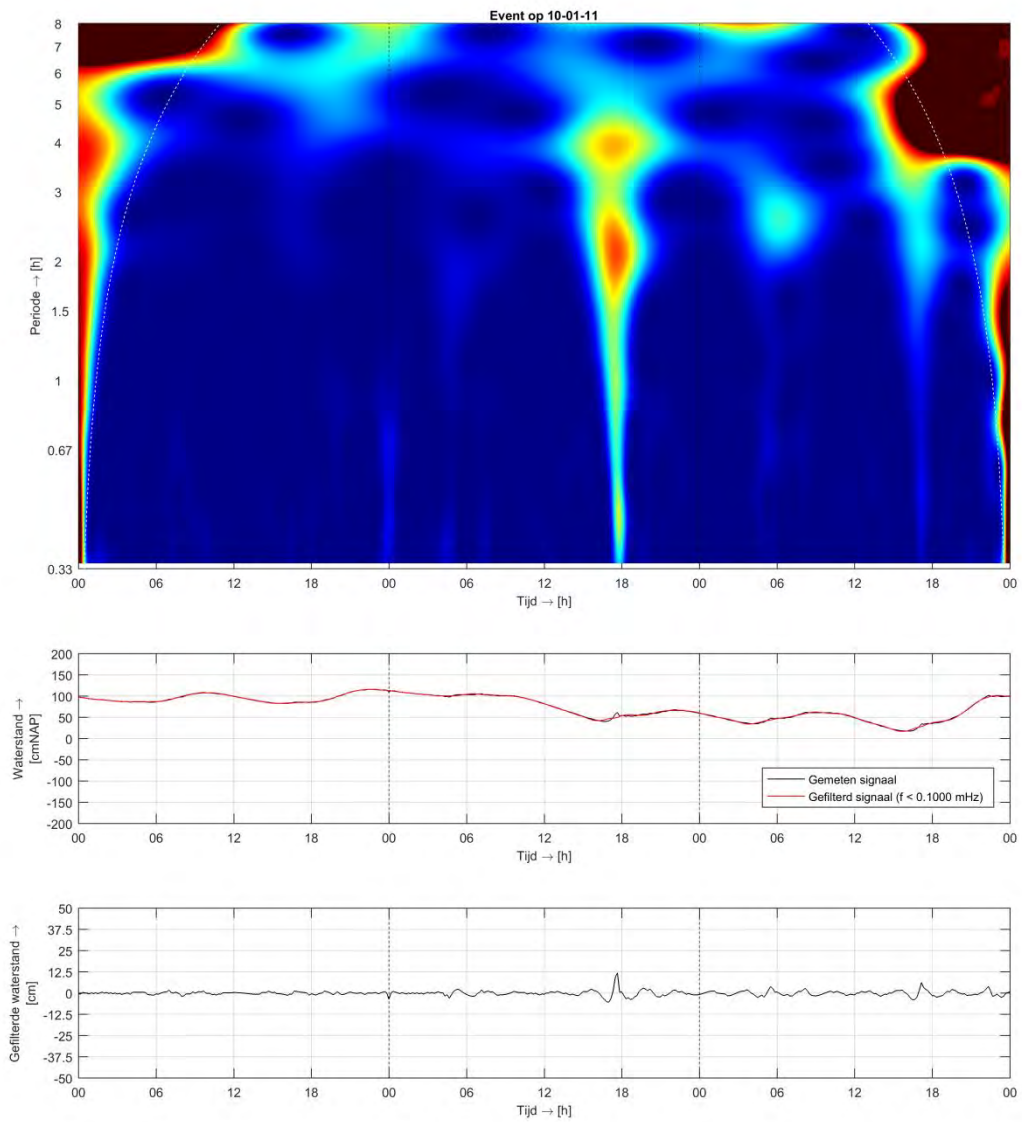
Figuur A.54 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Bathse Spiikanaal Inloop, amplitude = 0,10 m

A.6 Haringvliet en Hollands Diep

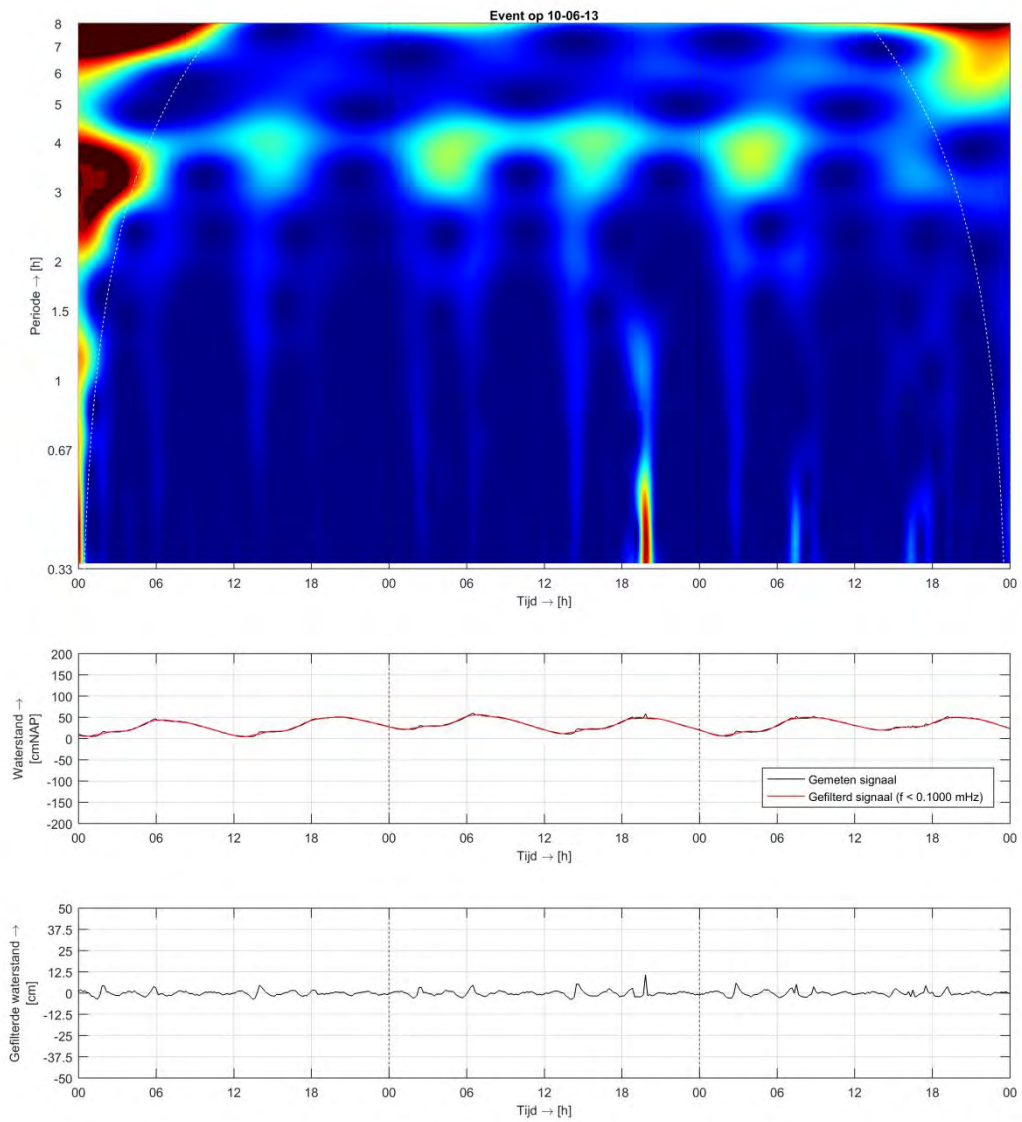
A.6.1 Hellevoetsluis



Figuur A.55 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Hellevoetsluis, amplitude = 0,15 m

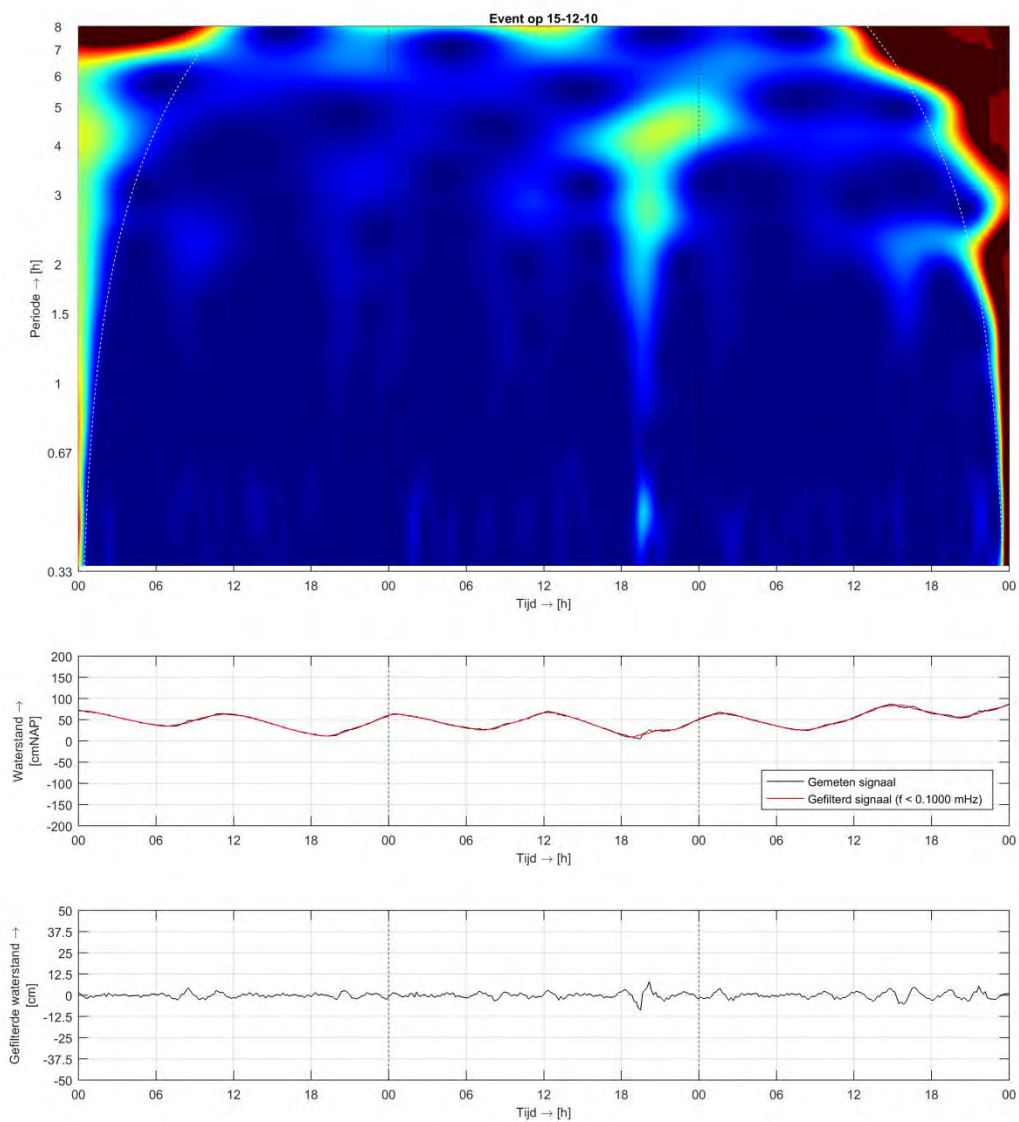


Figuur A.56 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Hellevoetsluis, amplitude = 0,15 m

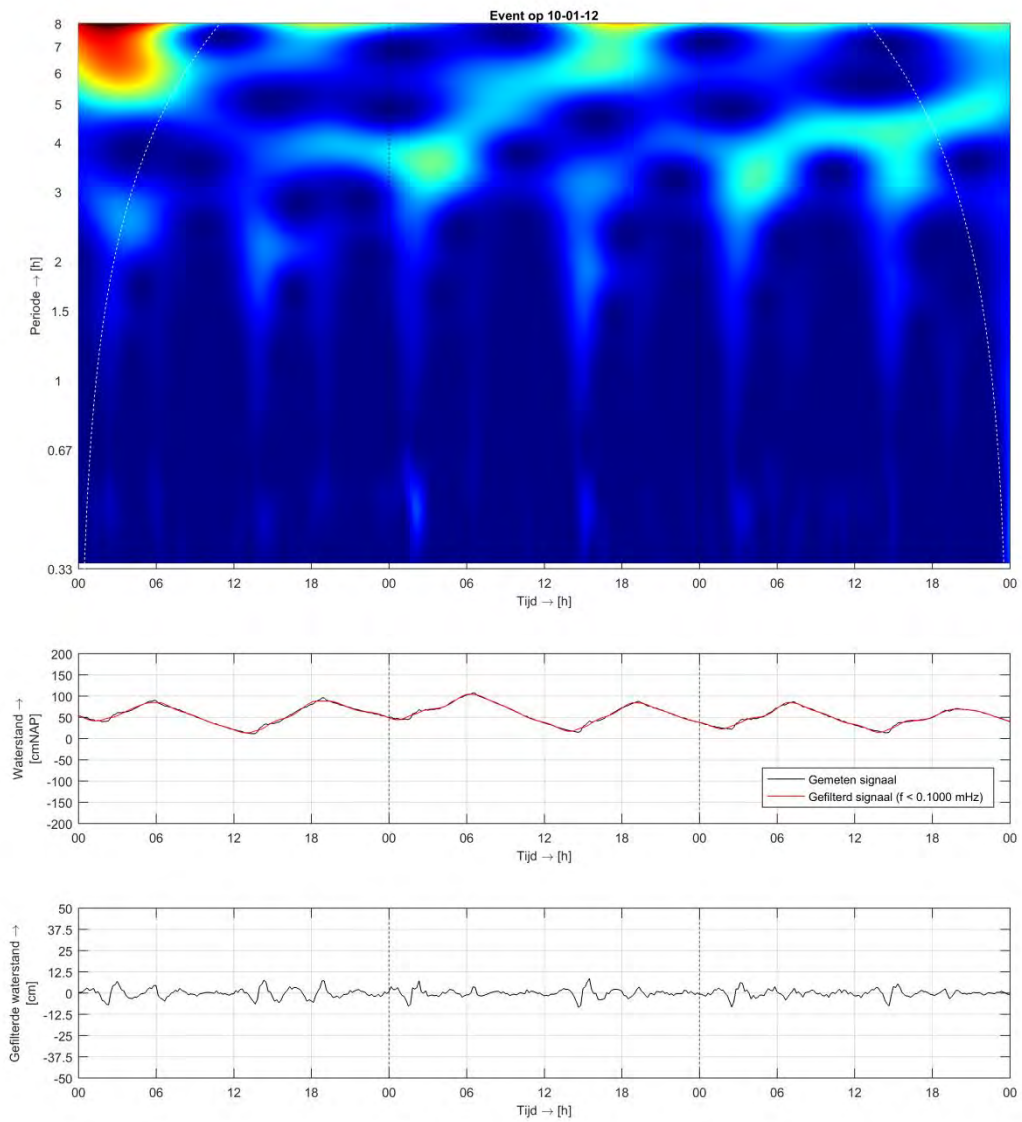


Figuur A.57 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Hellevoetsluis, amplitude = 0,15 m

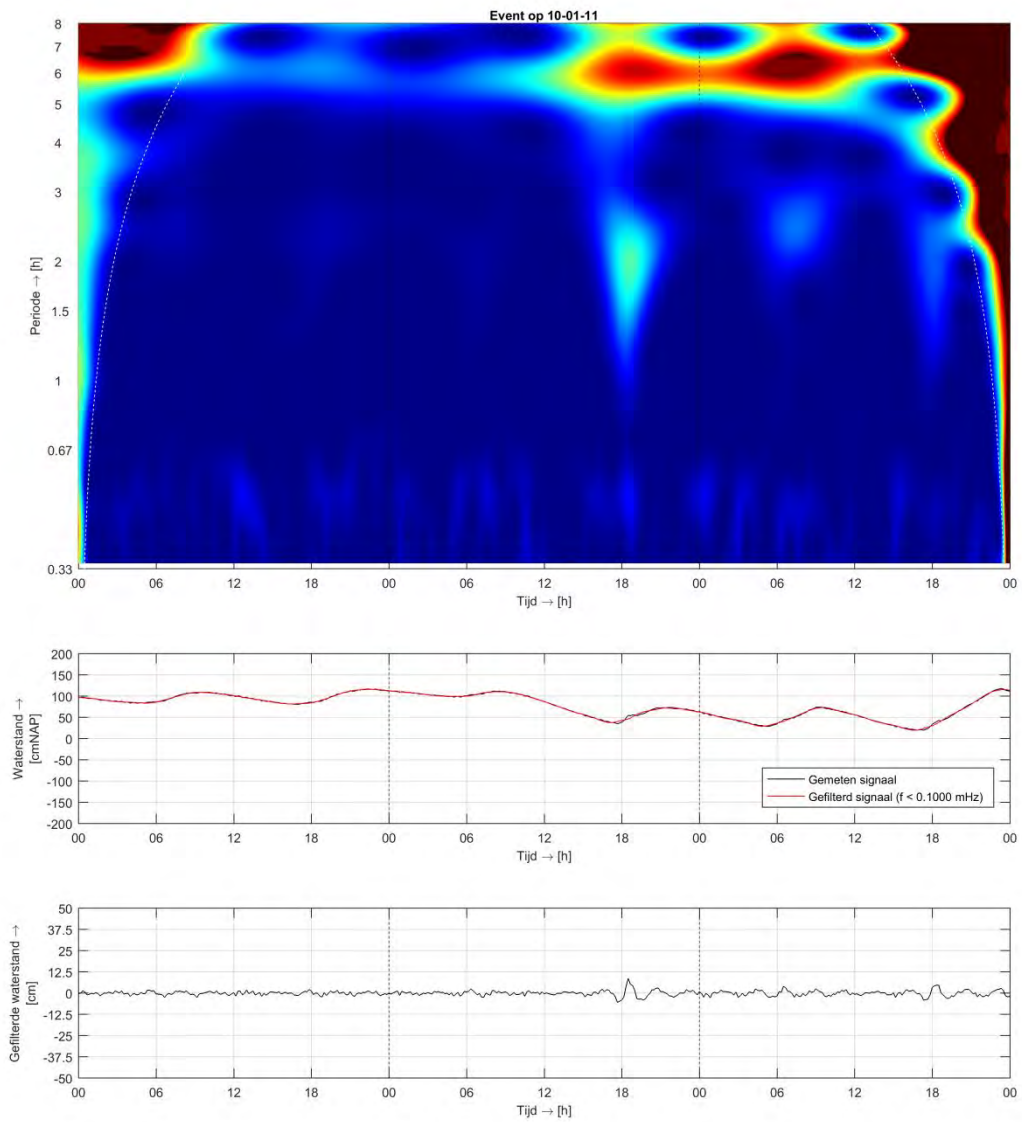
A.6.2 Rak Noord



Figuur A.58 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Rak Noord, amplitude = 0,10 m

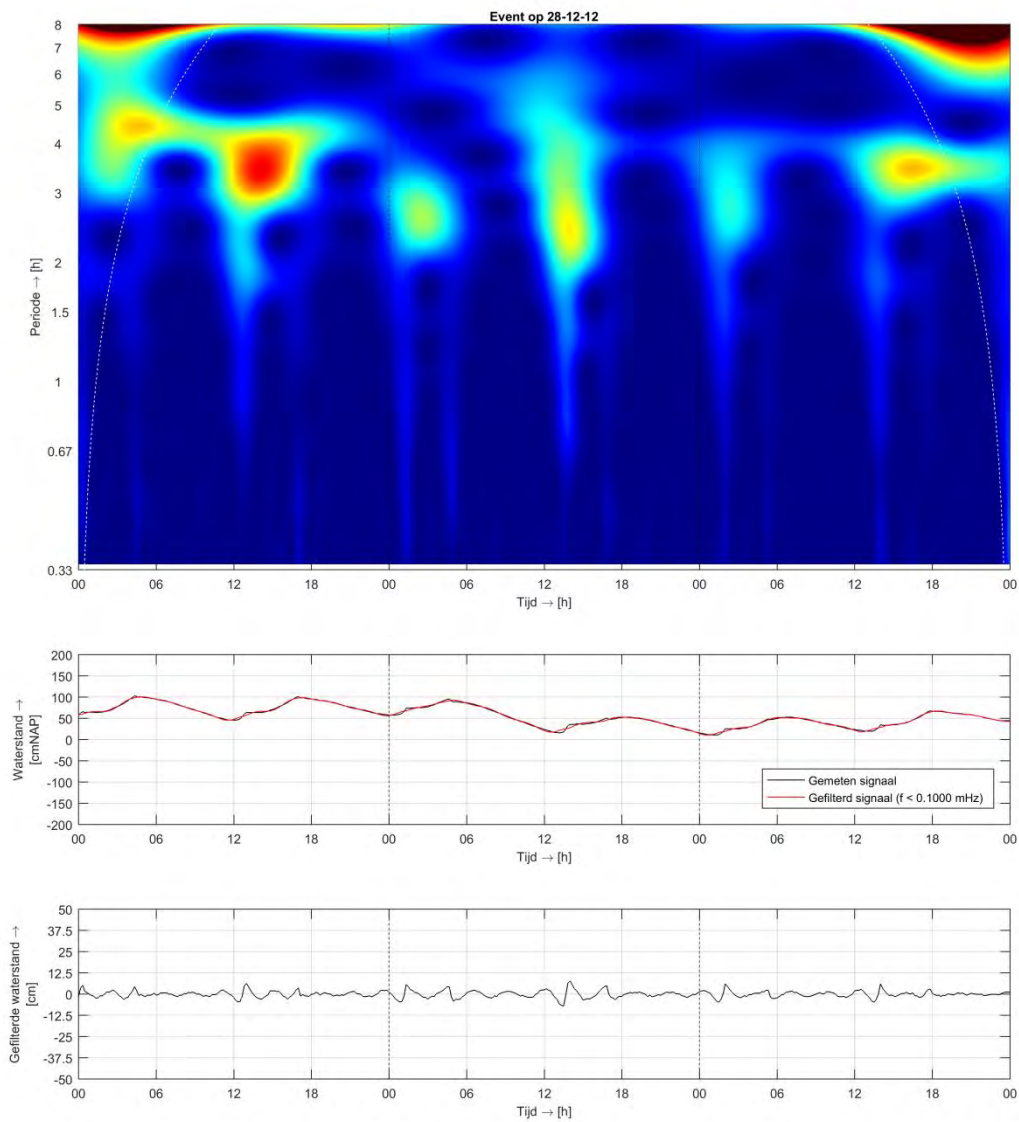


Figuur A.59 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Rak Noord, amplitude = 0,10 m

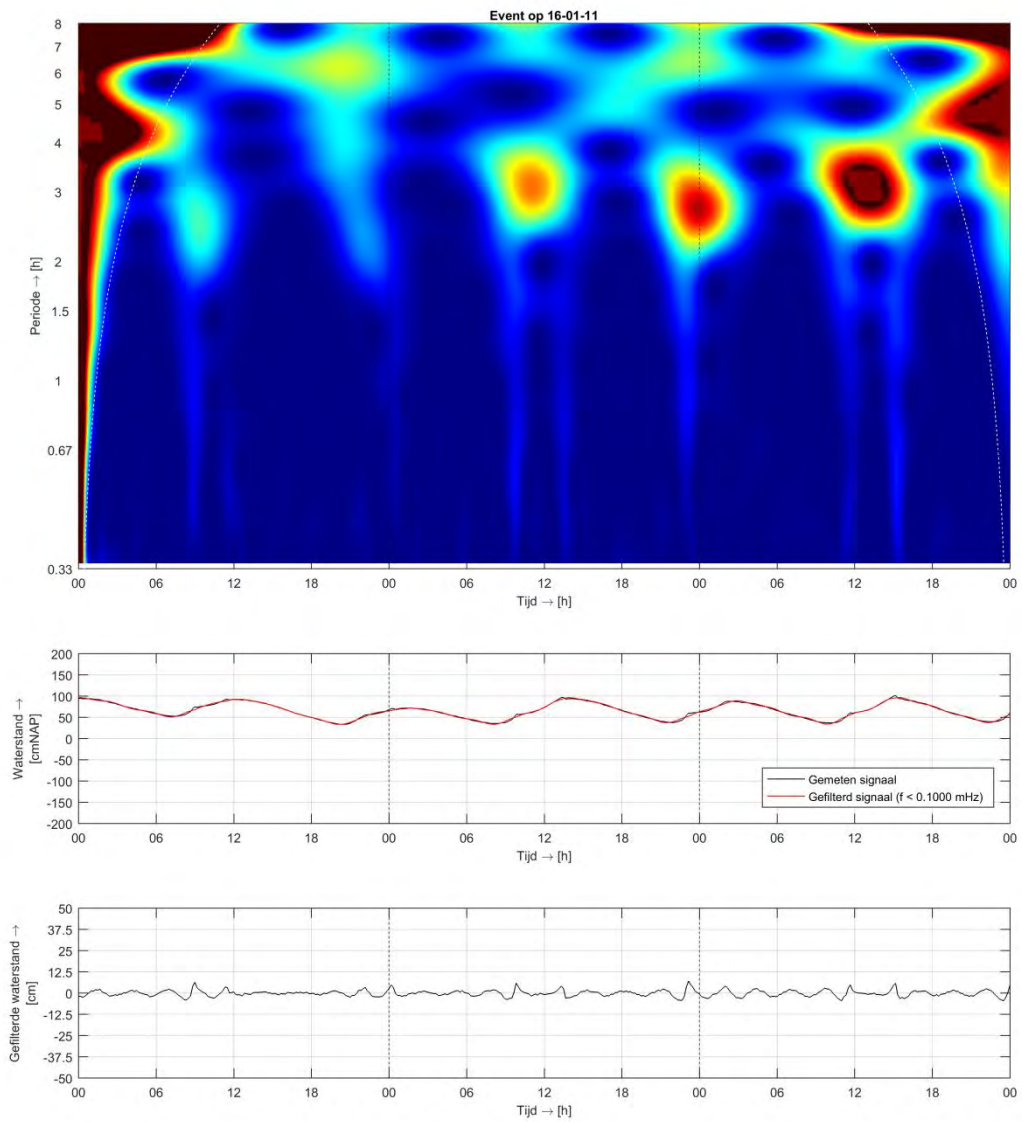


Figuur A.60 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Rak Noord, amplitude = 0,10 m

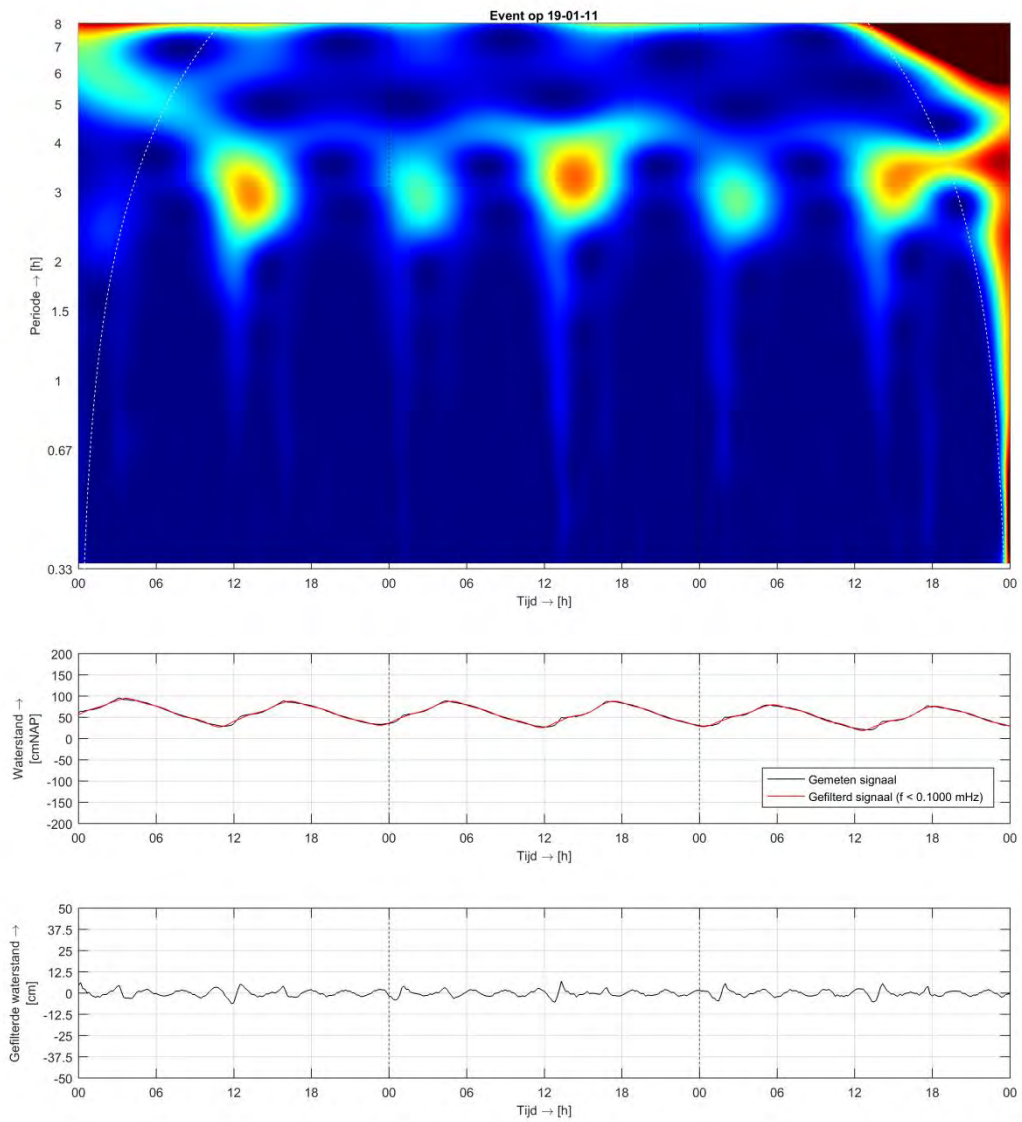
A.6.3 Moerdijk



Figuur A.61 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Moerdijk, amplitude = 0,15 m

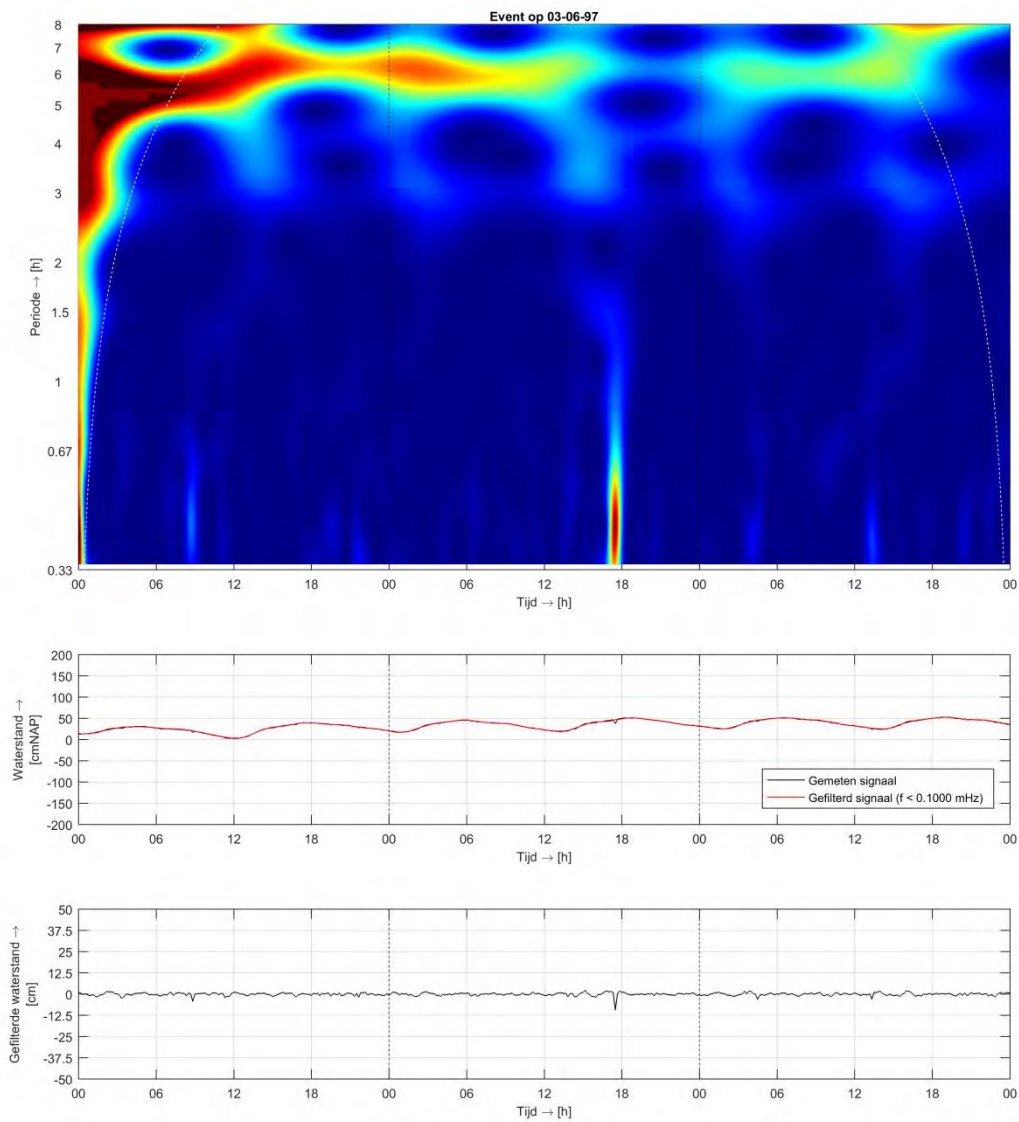


Figuur A.62 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Moerdijk, amplitude = 0,10 m

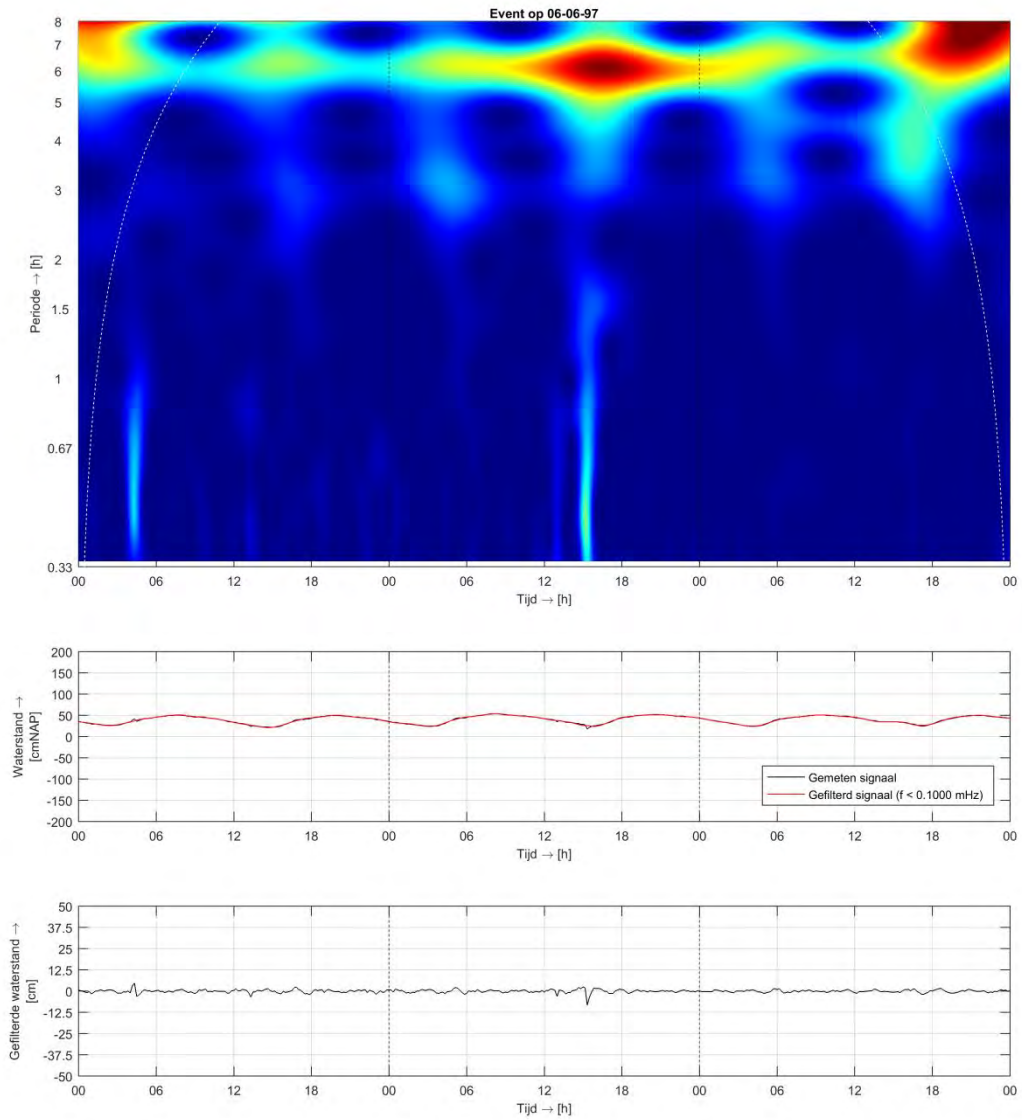


Figuur A.63 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Moerdijk, amplitude = 0,10 m

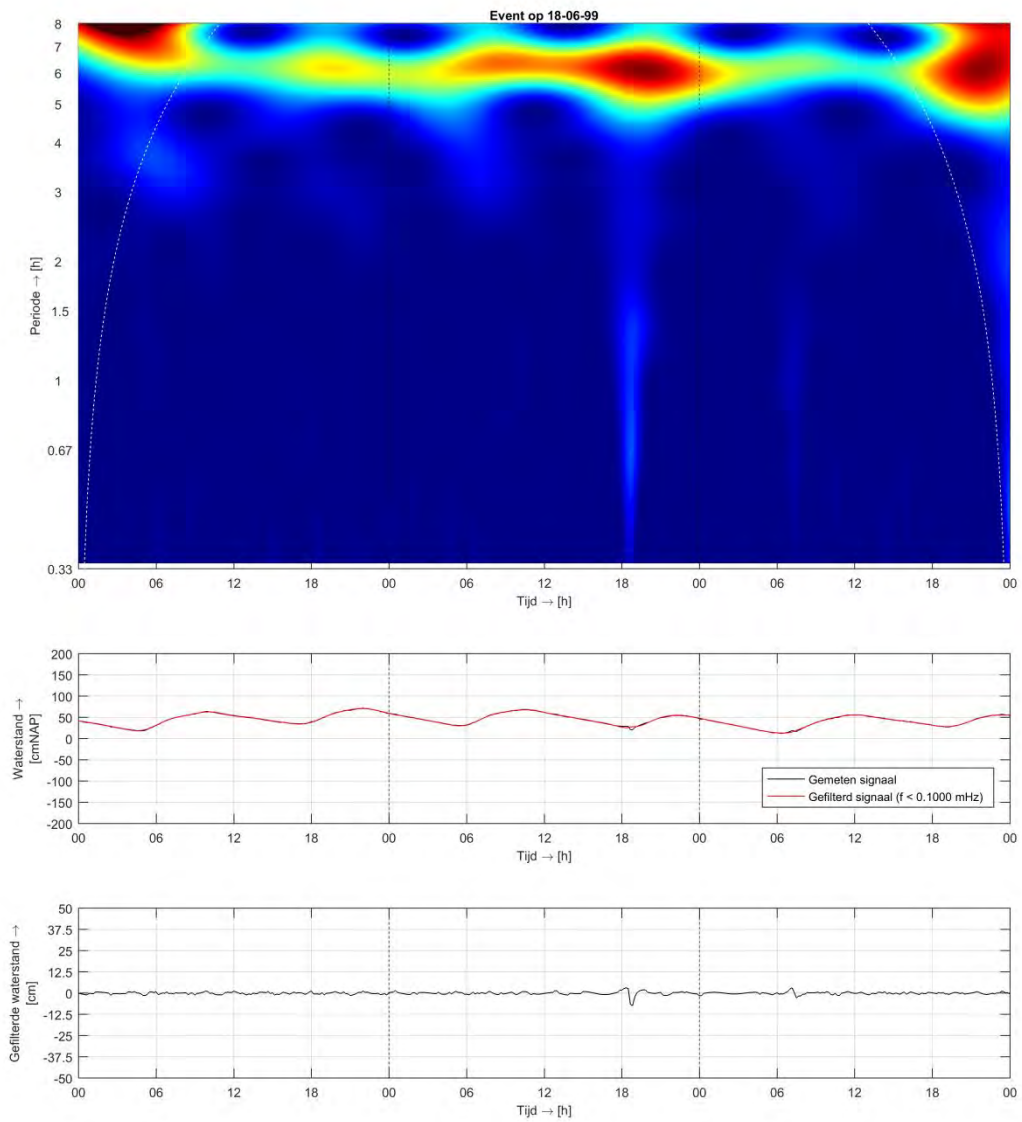
A.6.4 Deeneplaat



Figuur A.64 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Deeneplaat, amplitude = 0,10 m

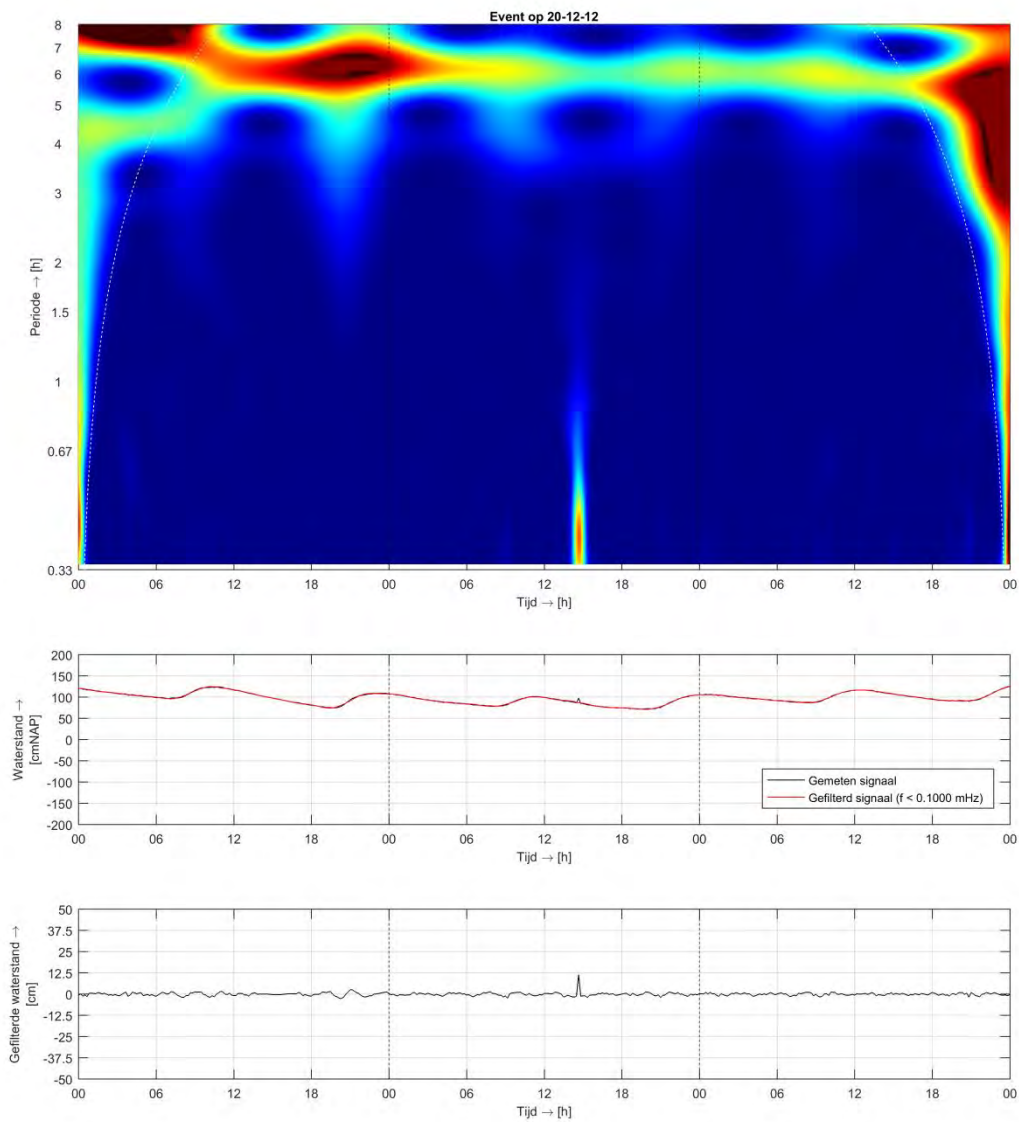


Figuur A.65 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Deeneplaat, amplitude = 0,10 m

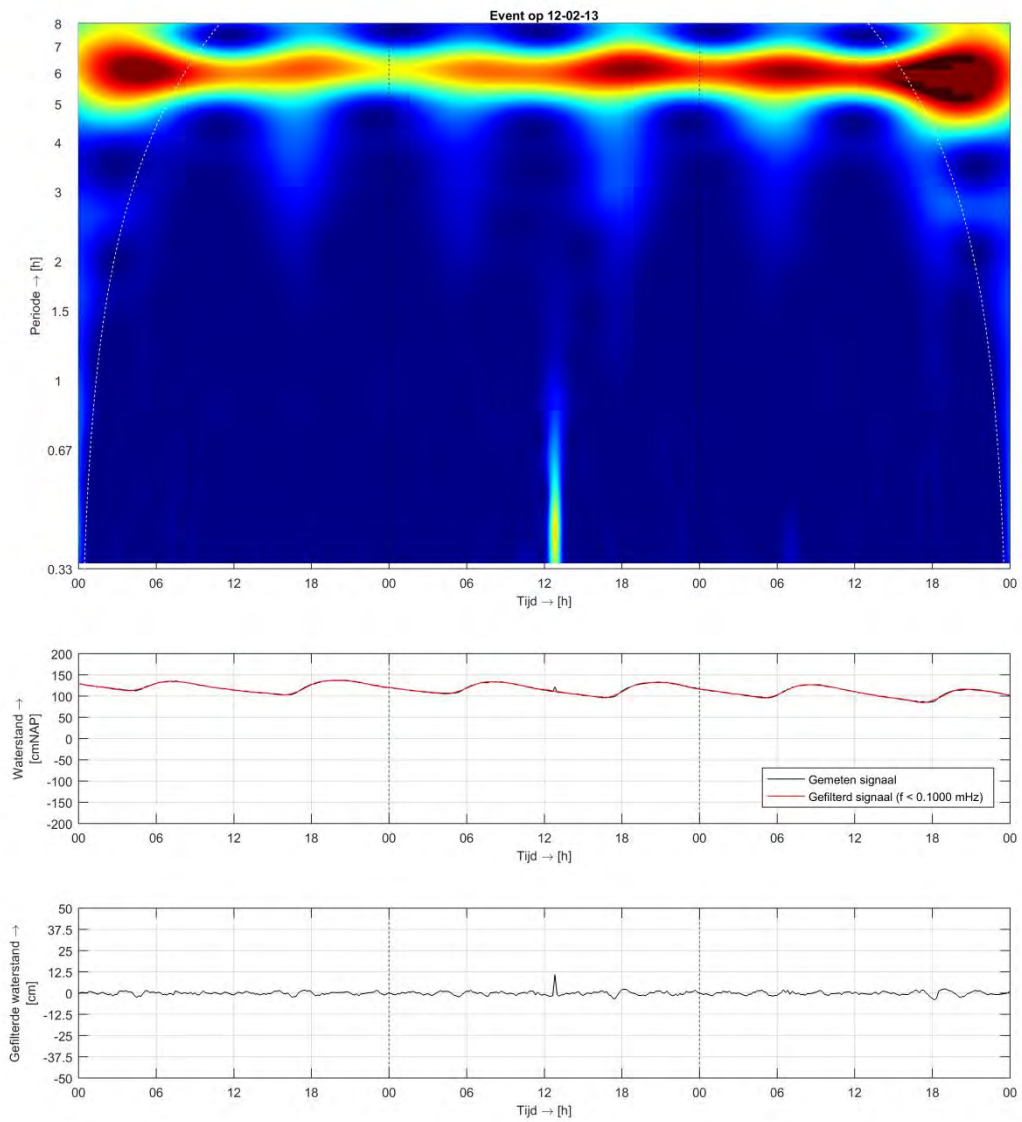


Figuur A.66 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Deeneplaat, amplitude = 0,10 m

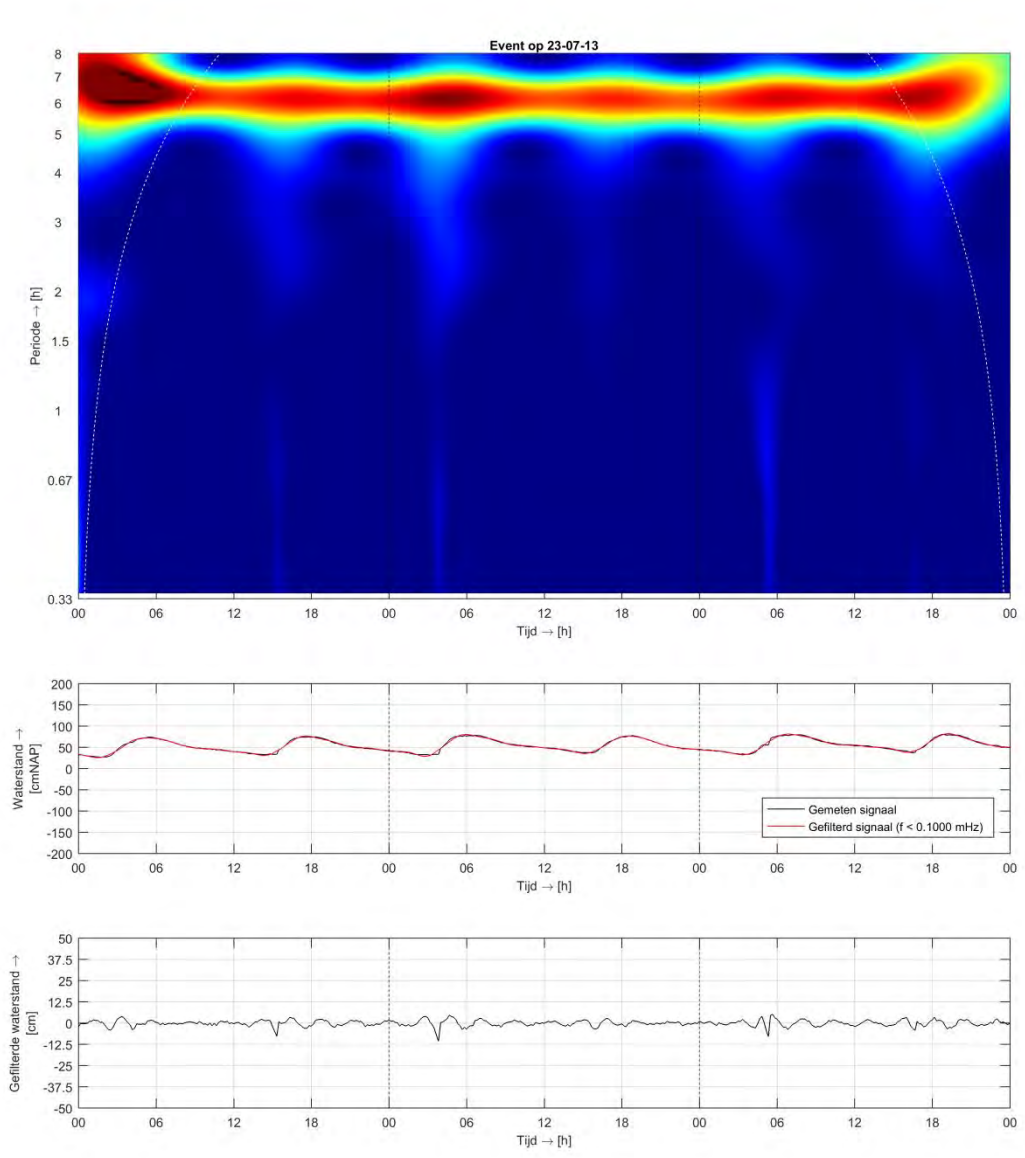
A.6.5 Werkendam Buiten



Figuur A.67 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Werkendam Buiten, amplitude = 0,15 m



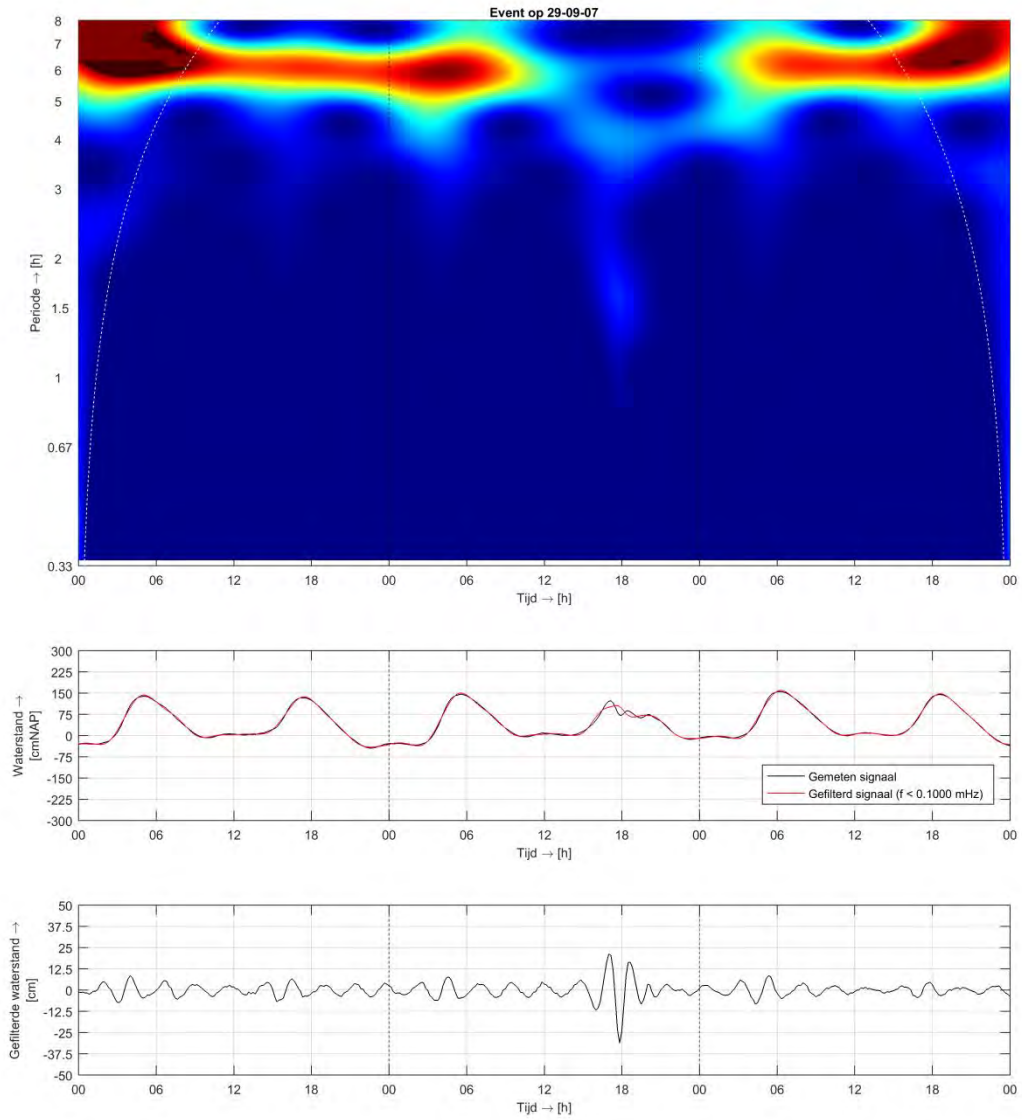
Figuur A.68 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Werkendam Buiten, amplitude = 0,15 m



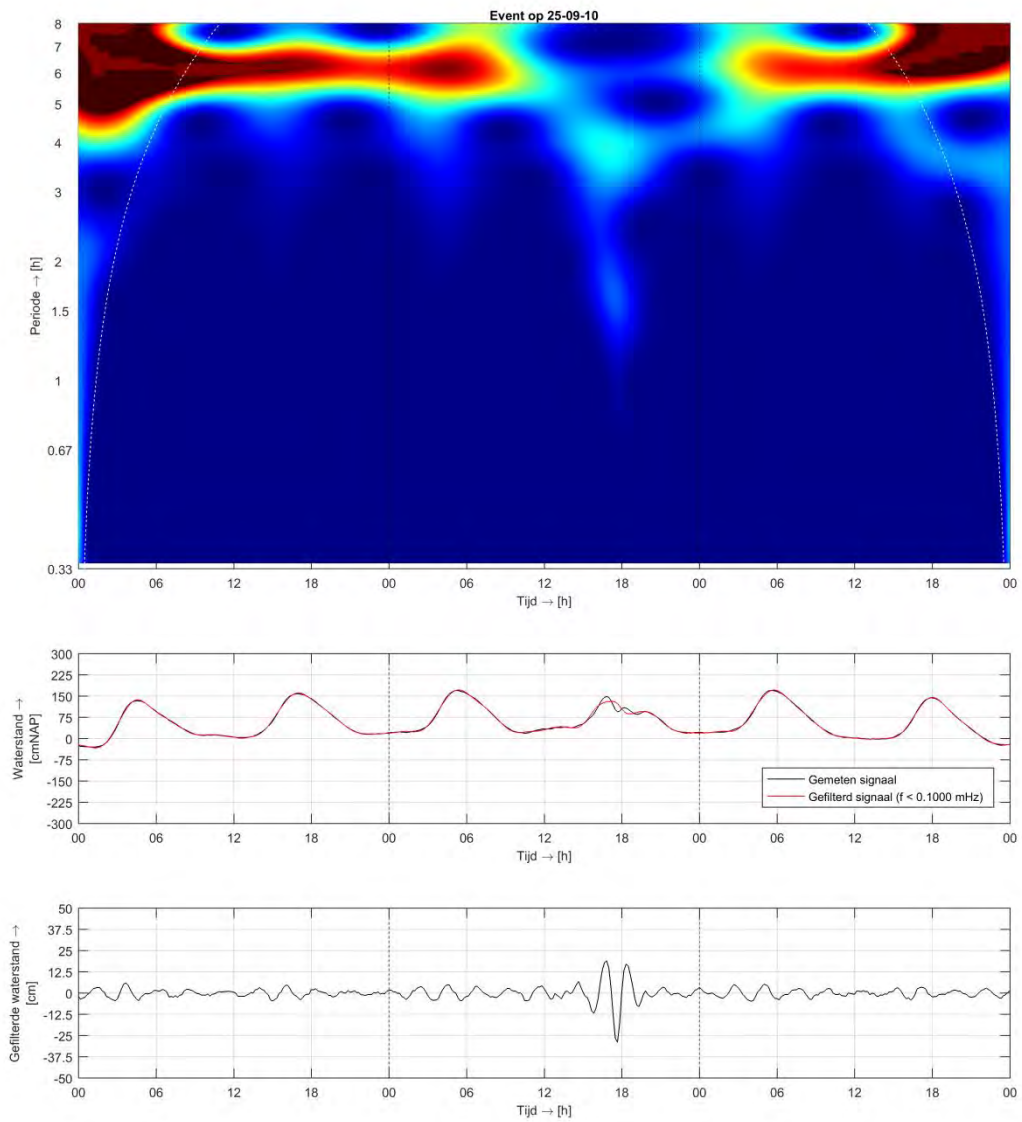
Figuur A.69 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Werkendam Buiten, amplitude = 0,15 m

A.7 Hollandsche IJssel

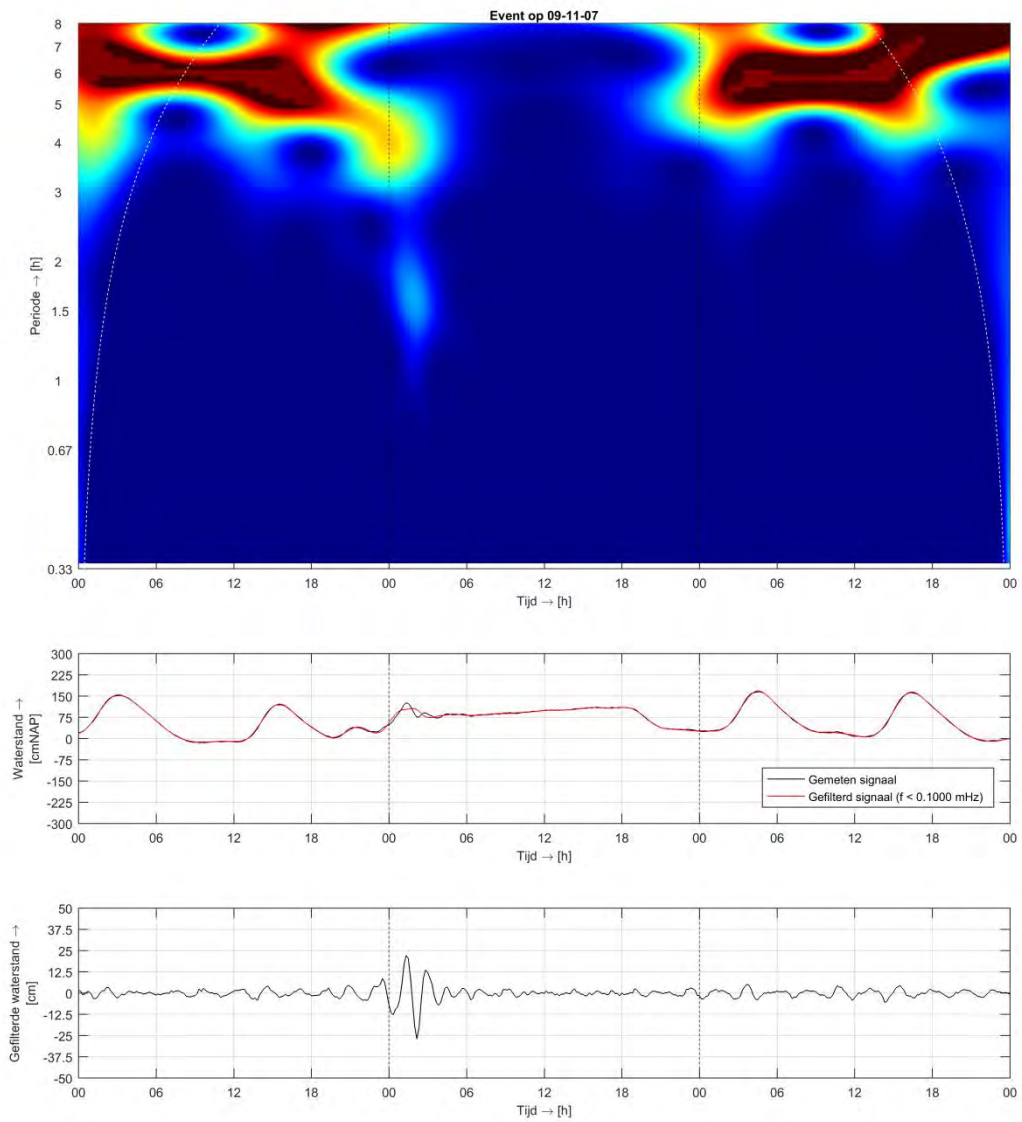
A.7.1 Krimpen aan den IJssel



Figuur A.70 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Krimpen aan den IJssel, amplitude = 0,35 m



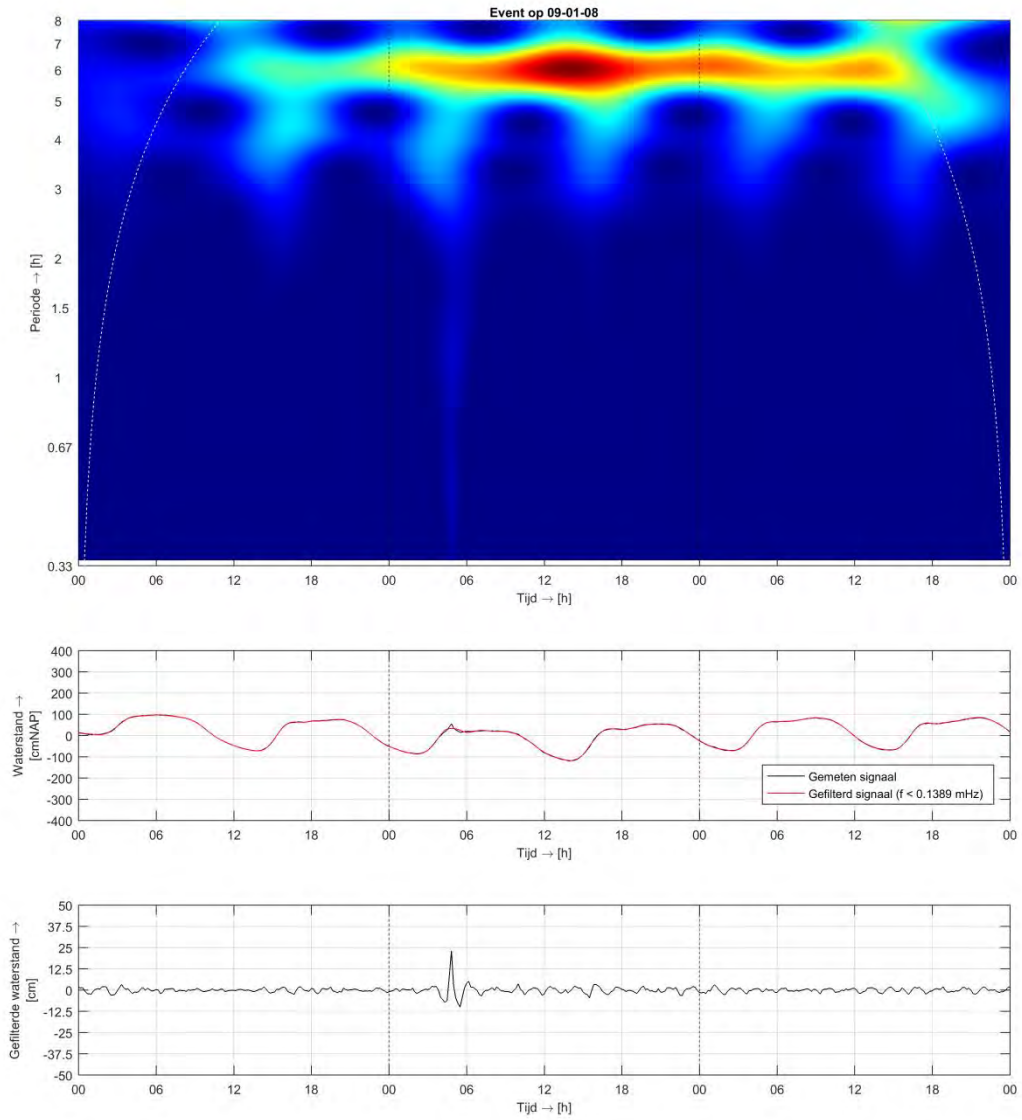
Figuur A.71 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Krimpen aan den IJssel, amplitude = 0,30 m



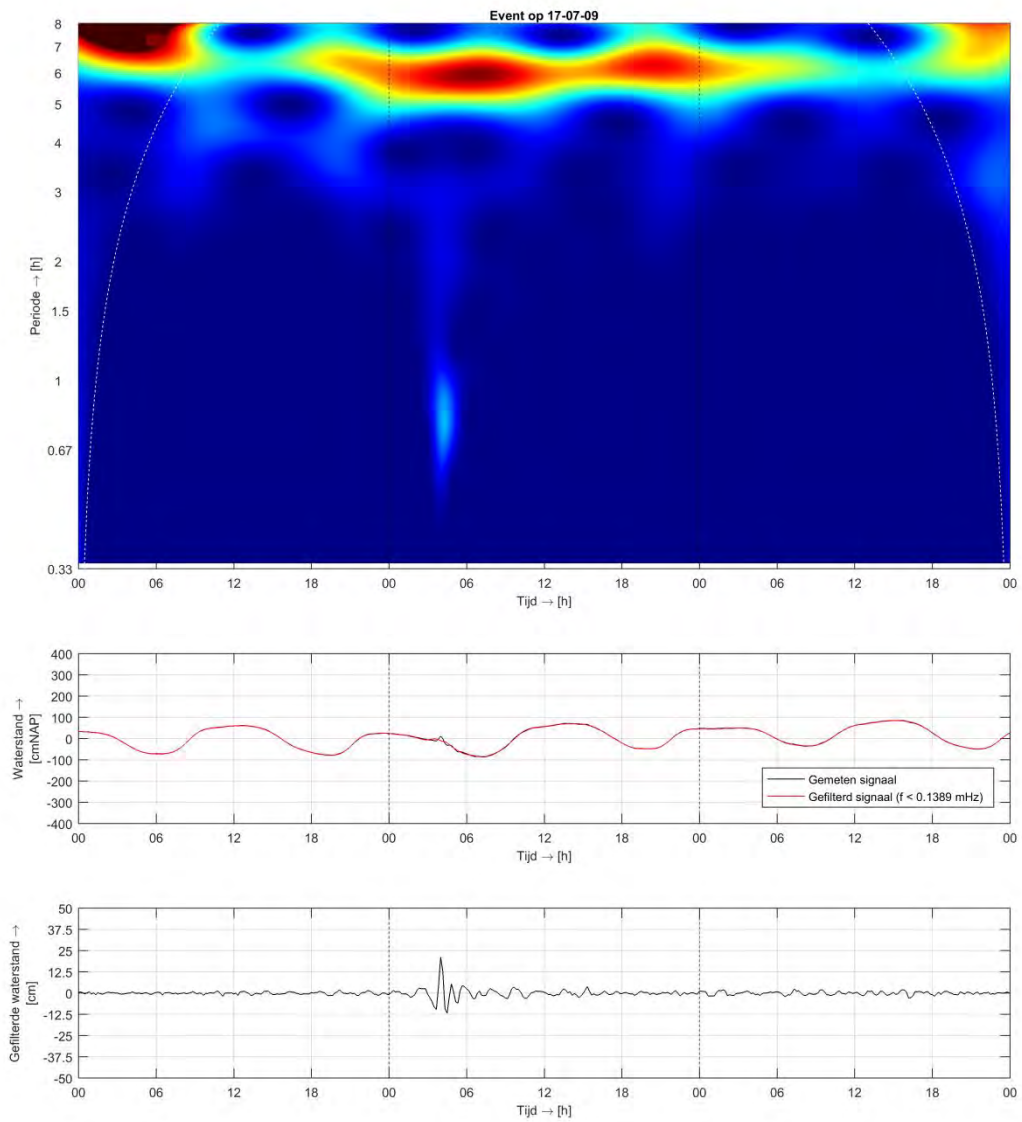
Figuur A.72 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Krimpen aan den IJssel, amplitude = 0,30 m

A.8 Waddenzee

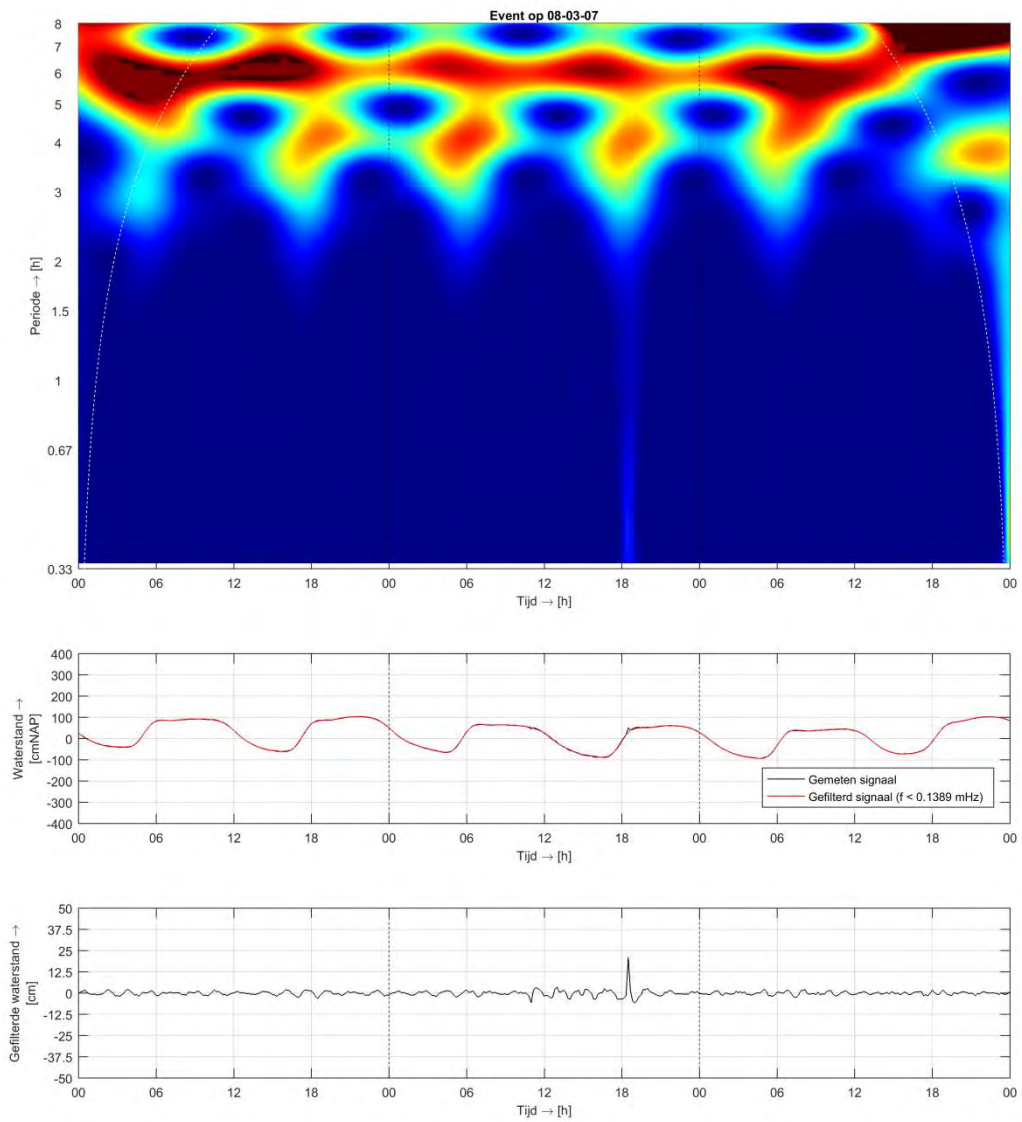
A.8.1 Den Helder



Figuur A.73 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Den Helder, amplitude = ...0,25 m

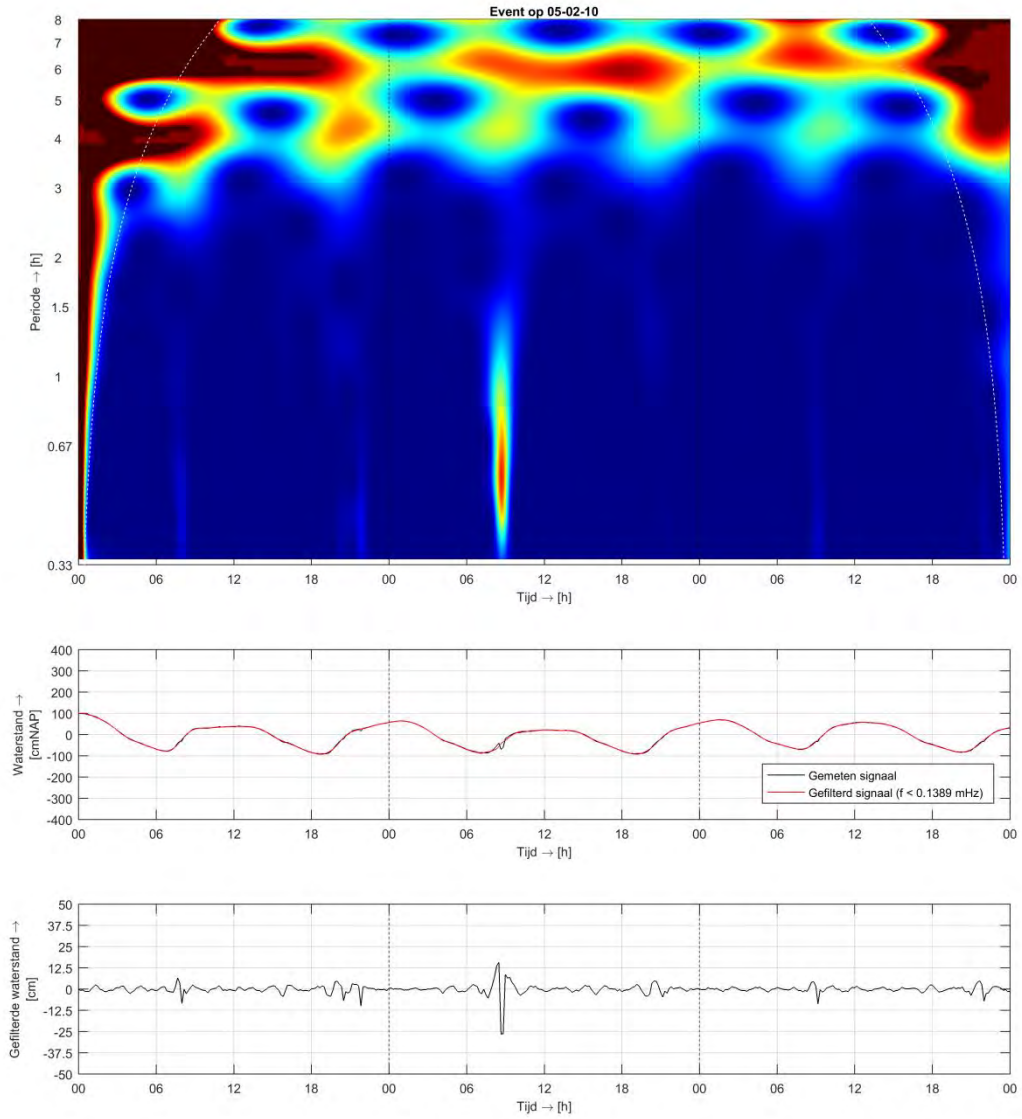


Figuur A.74 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Den Helder, amplitude = 0,25 m

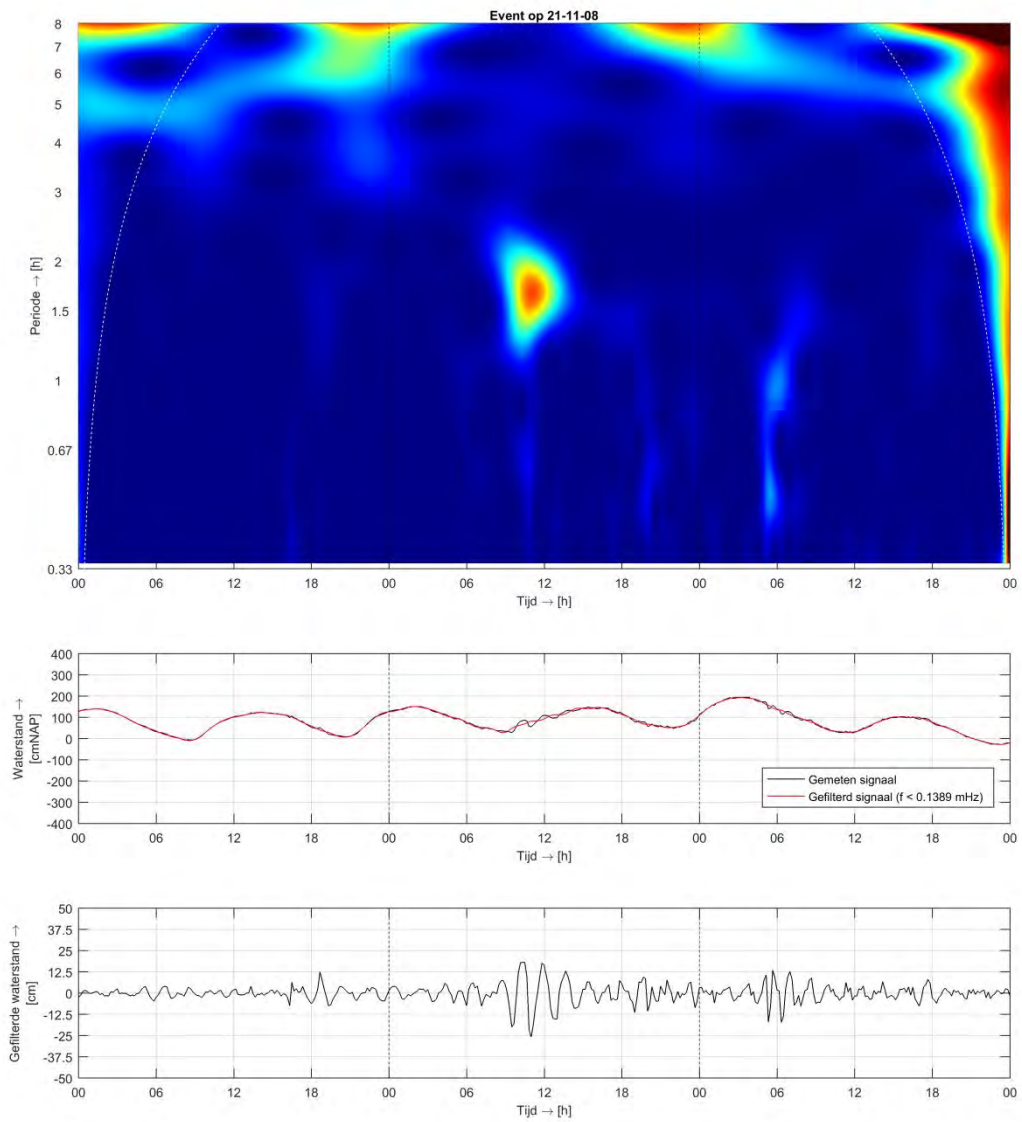


Figuur A.75 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Den Helder, amplitude = 0,25 m

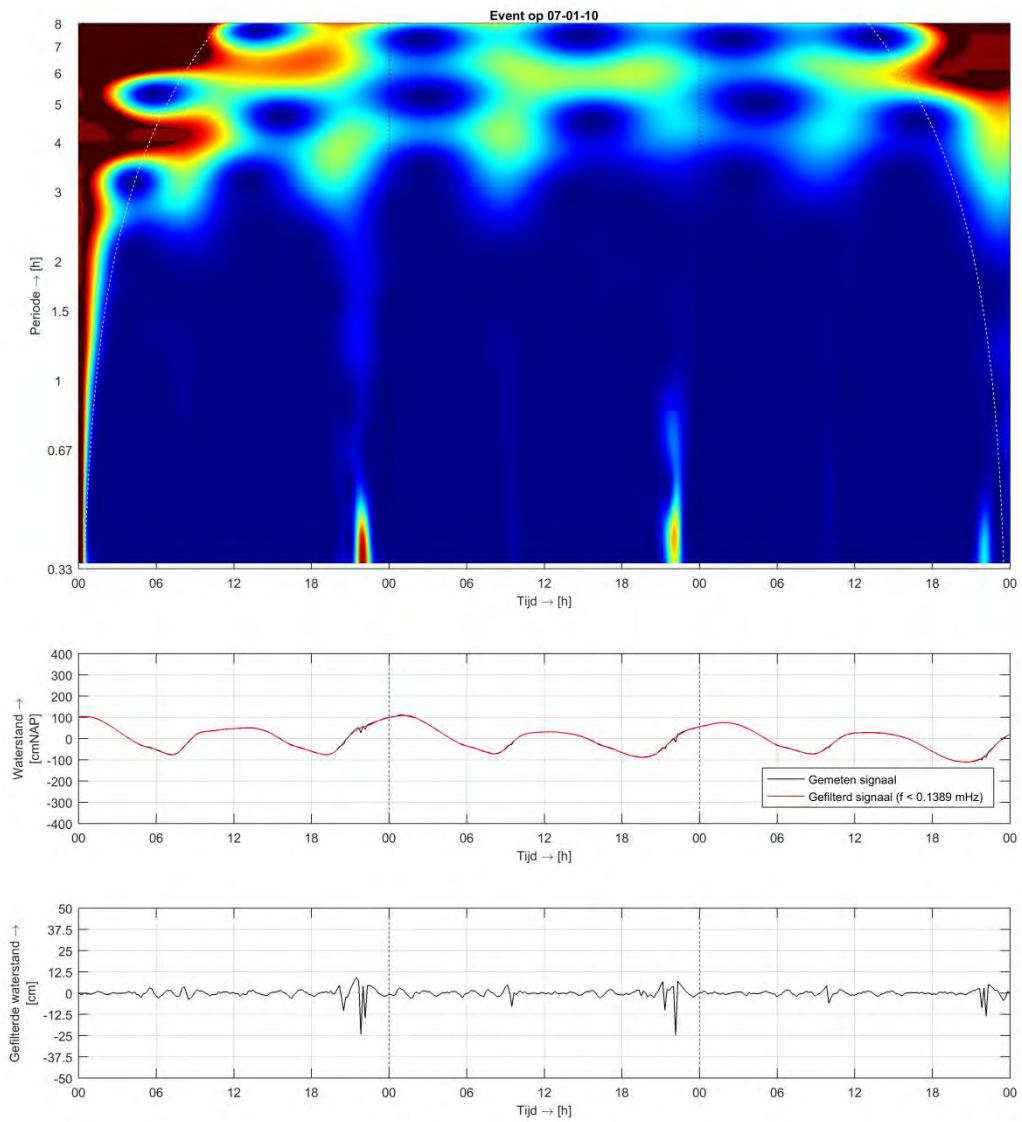
A.8.2 Den Oever Buiten



Figuur A.76 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Den Oever Buiten, amplitude = 0,30 m

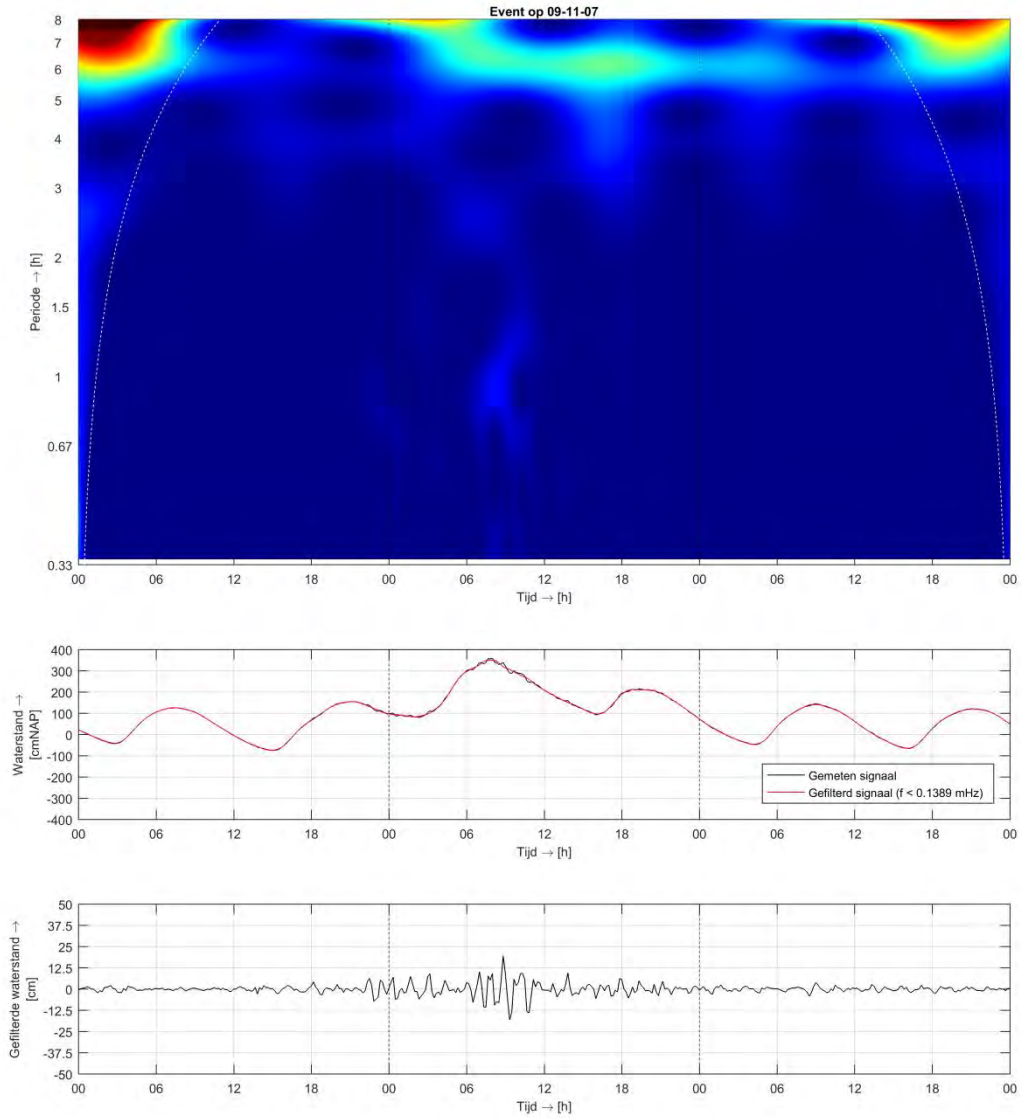


Figuur A.77 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Den Oever Buiten, amplitude = 0,30 m

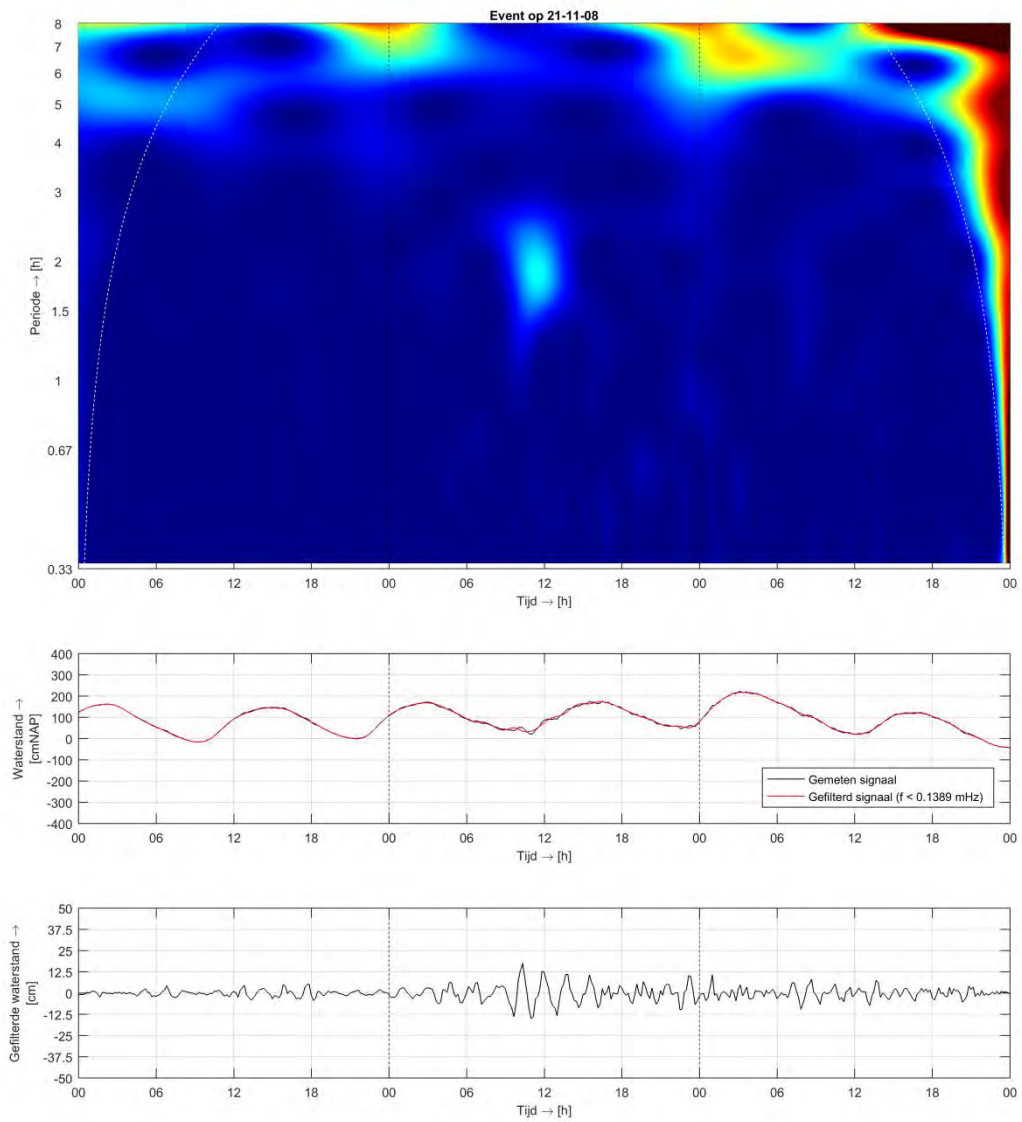


Figuur A.78 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Den Oever Buiten, amplitude = 0,25 m

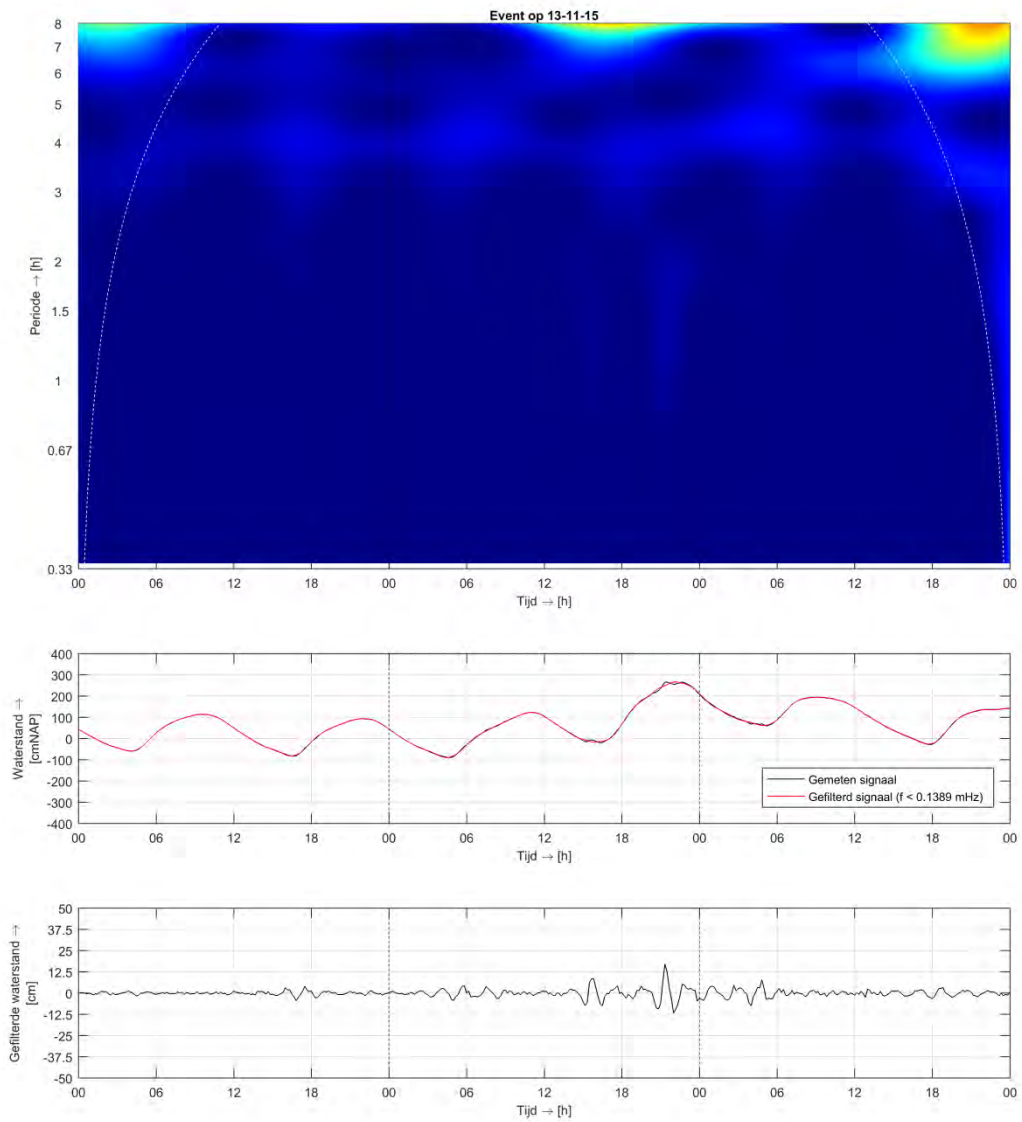
A.8.3 Kornwerderzand Buiten



Figuur A.79 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Kornwerderzand Buiten, amplitude = 0,20 m

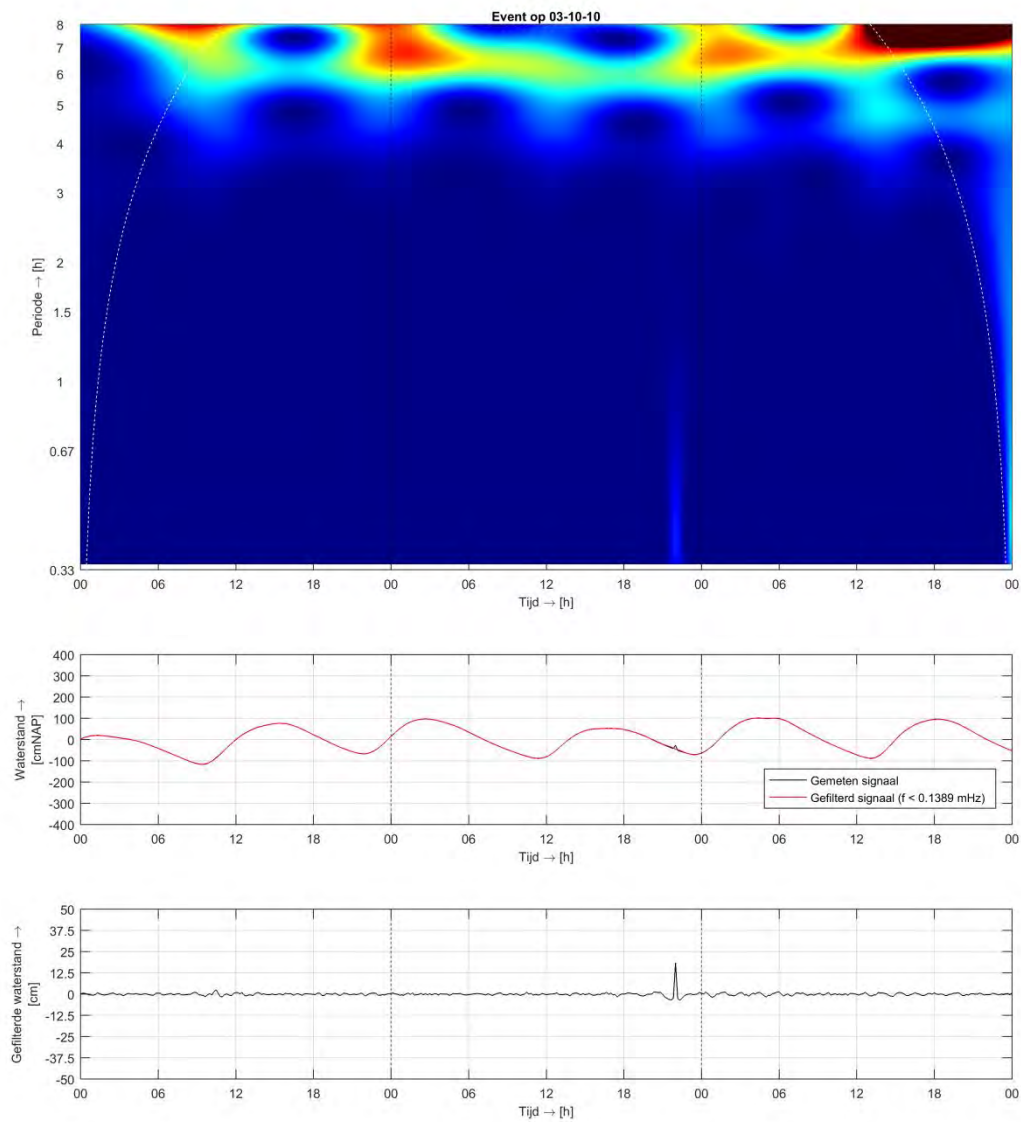


Figuur A.80 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Kornwerderzand Buiten, amplitude = 0,20 m

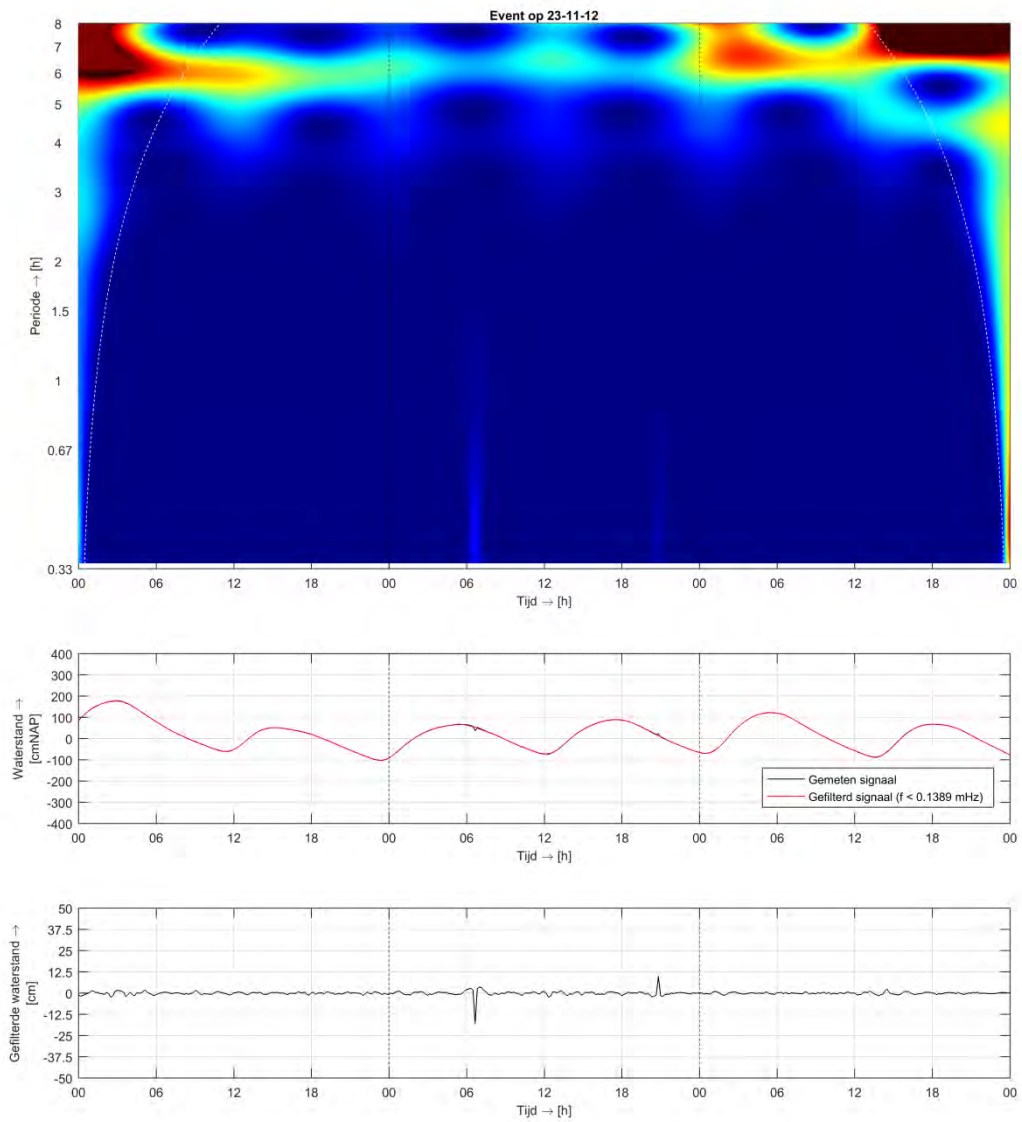


Figuur A.81 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Kornwerderzand Buiten, amplitude = 0,20 m

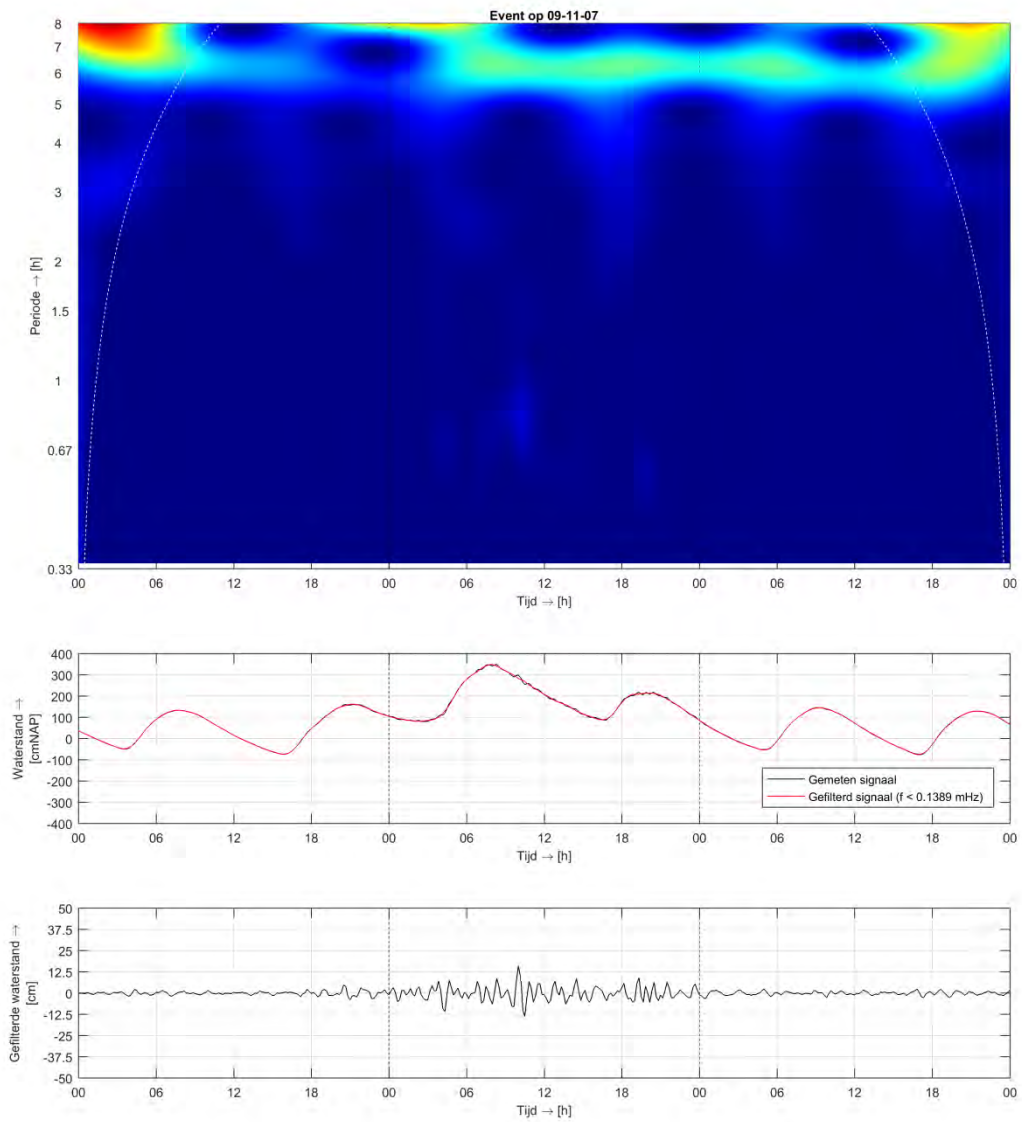
A.8.4 Harlingen



Figuur A.82 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Harlingen, amplitude = 0,20 m

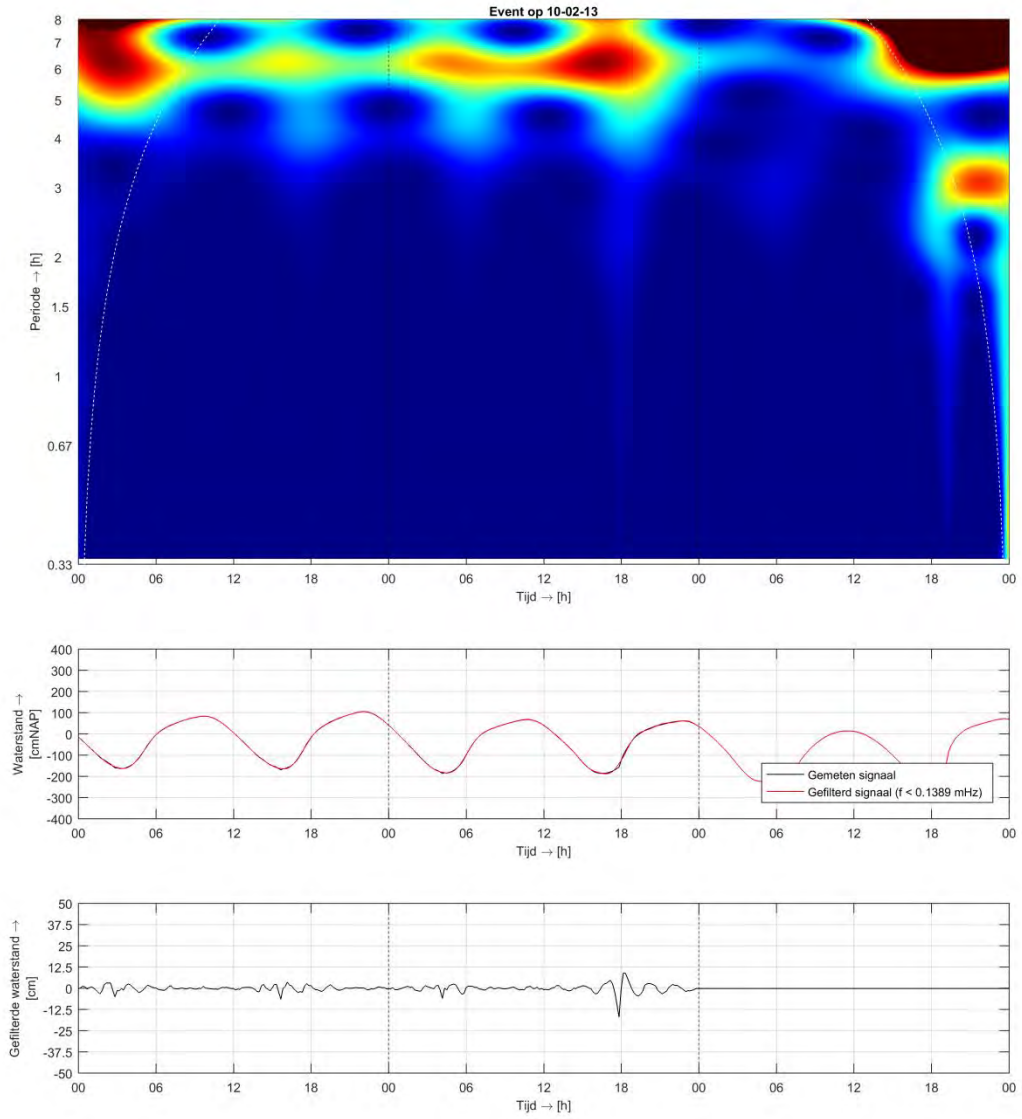


Figuur A.83 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Harlingen, amplitude = 0,20 m

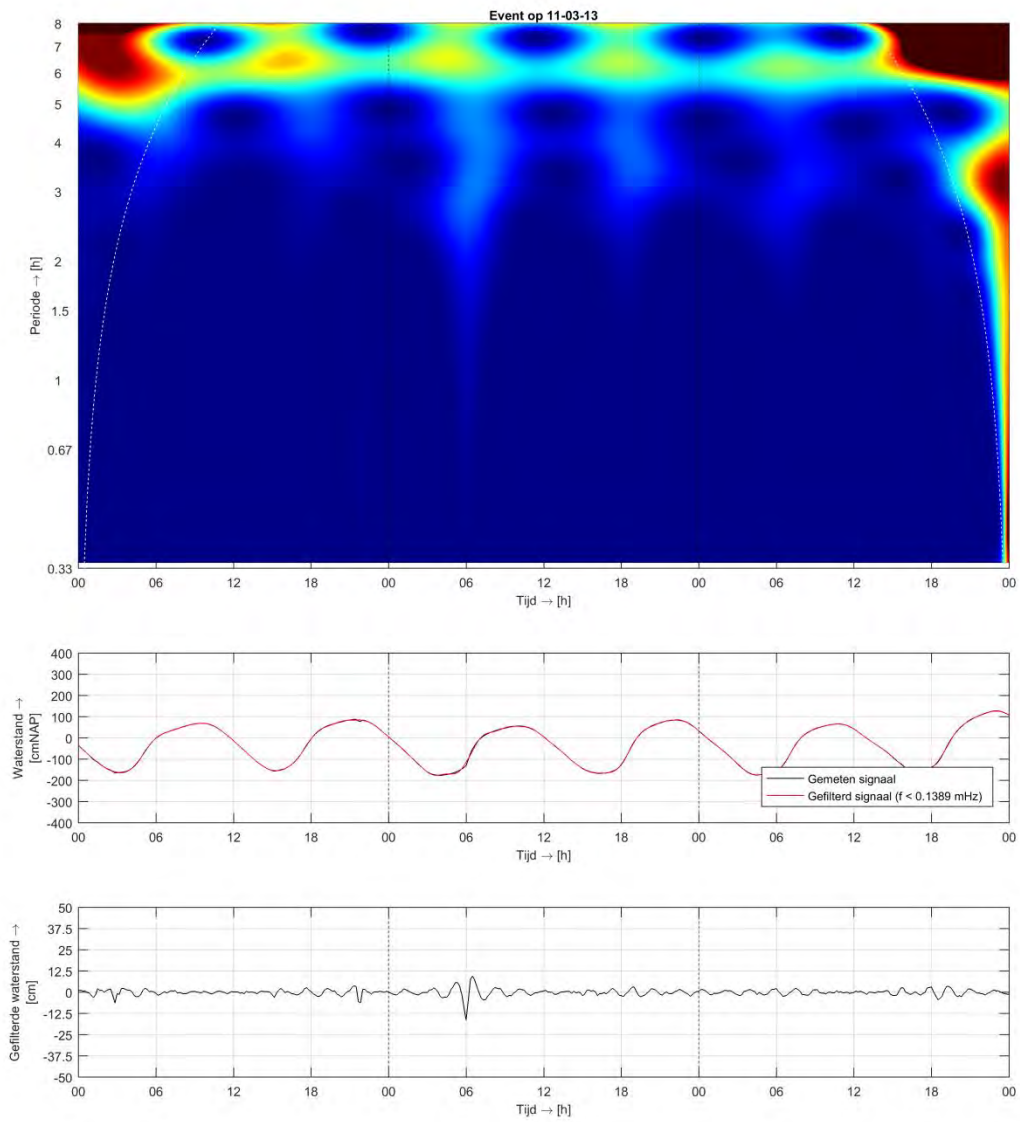


Figuur A.84 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Harlingen, amplitude = 0,20 m

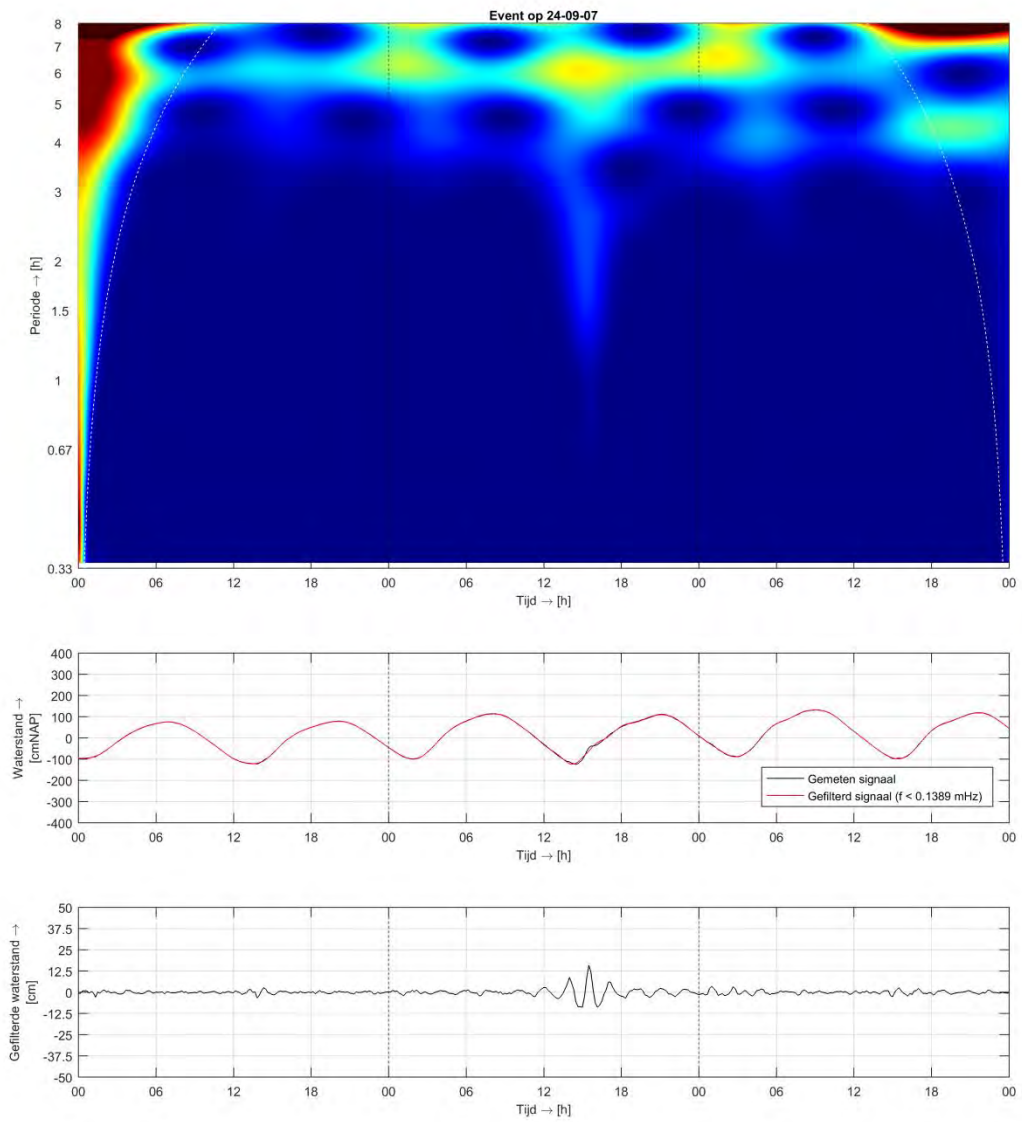
A.8.5 Lauwersoog



Figuur A.85 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Lauwersoog, amplitude = 0,20 m

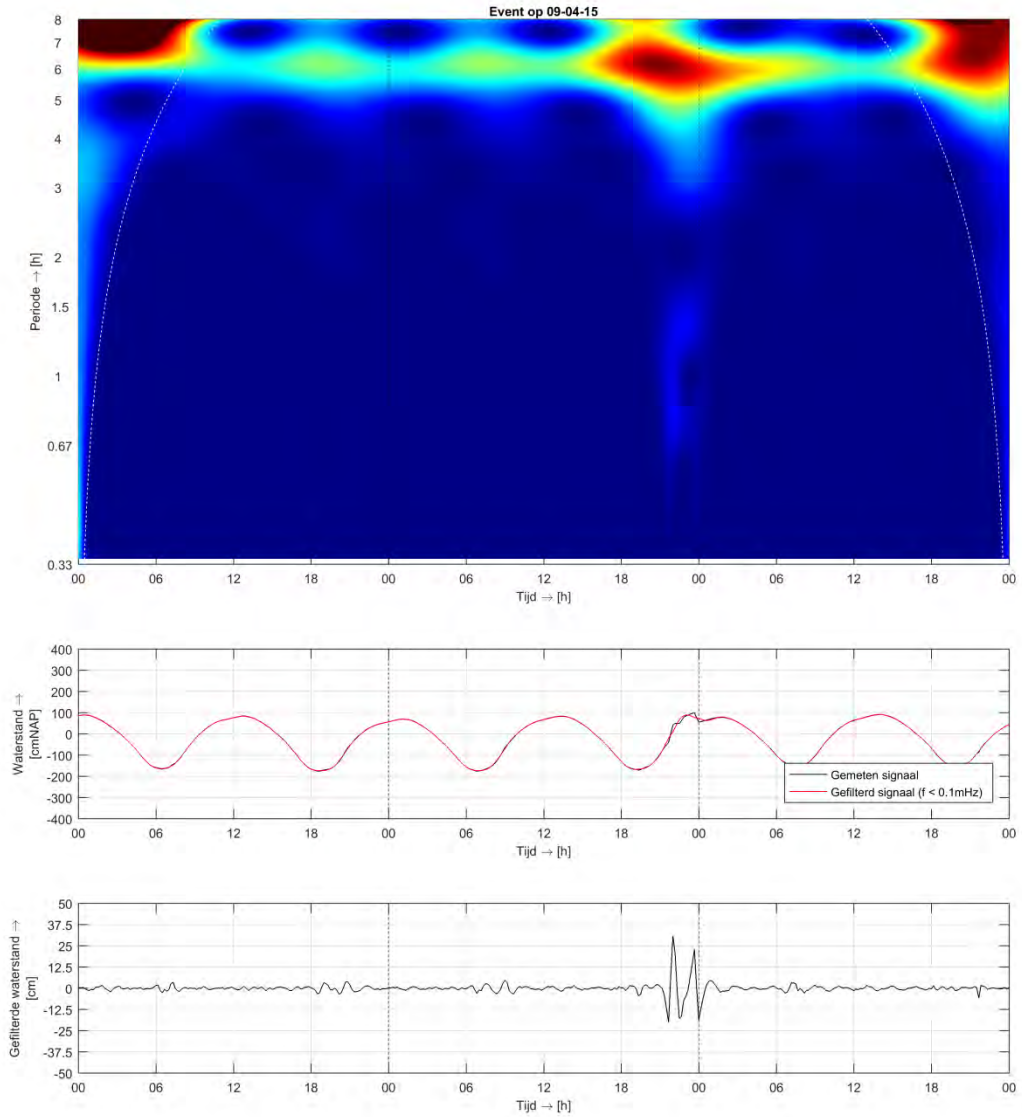


Figuur A.86 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Lauwersoog, amplitude = 0,20 m

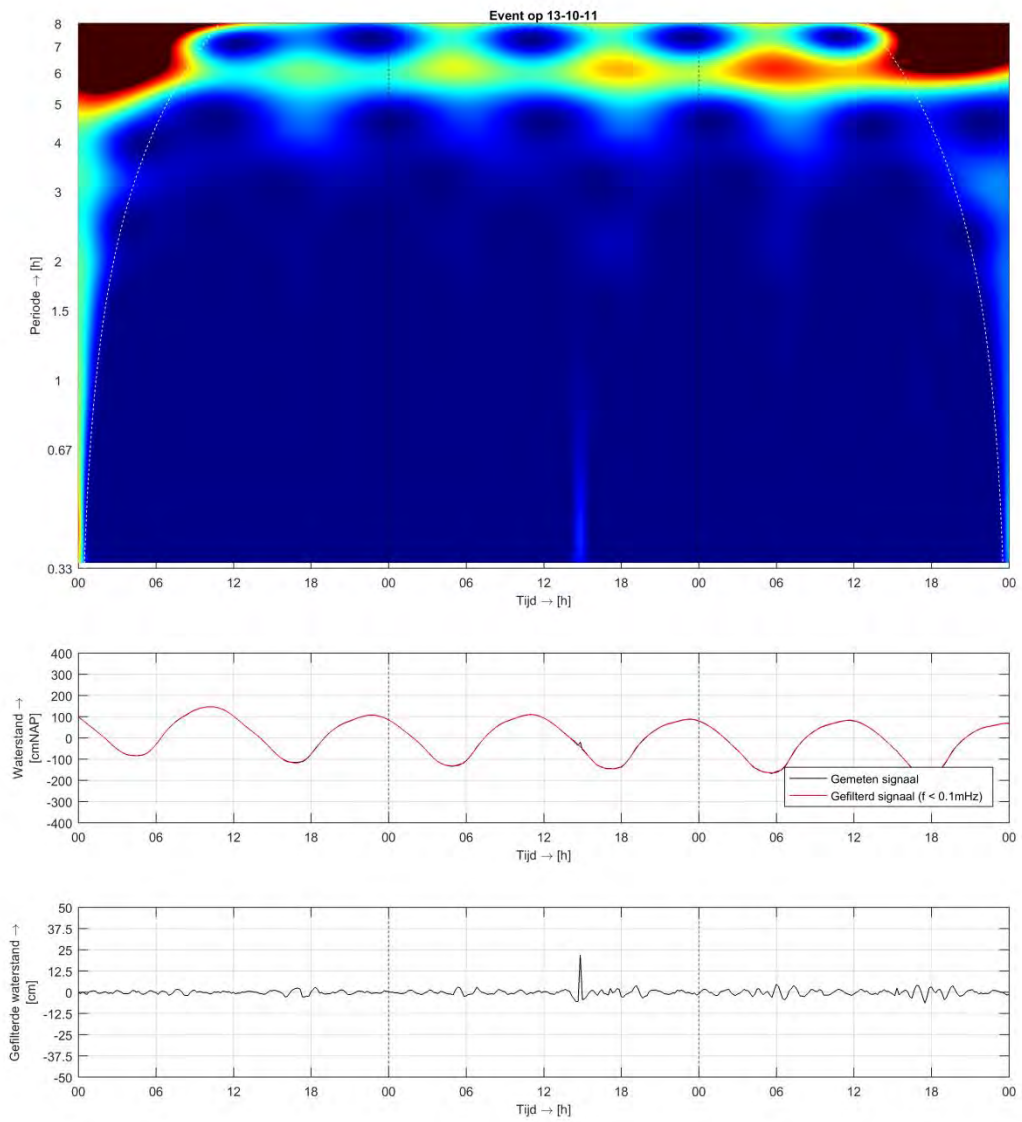


Figuur A.87 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Lauwersoog, amplitude = 0,20 m

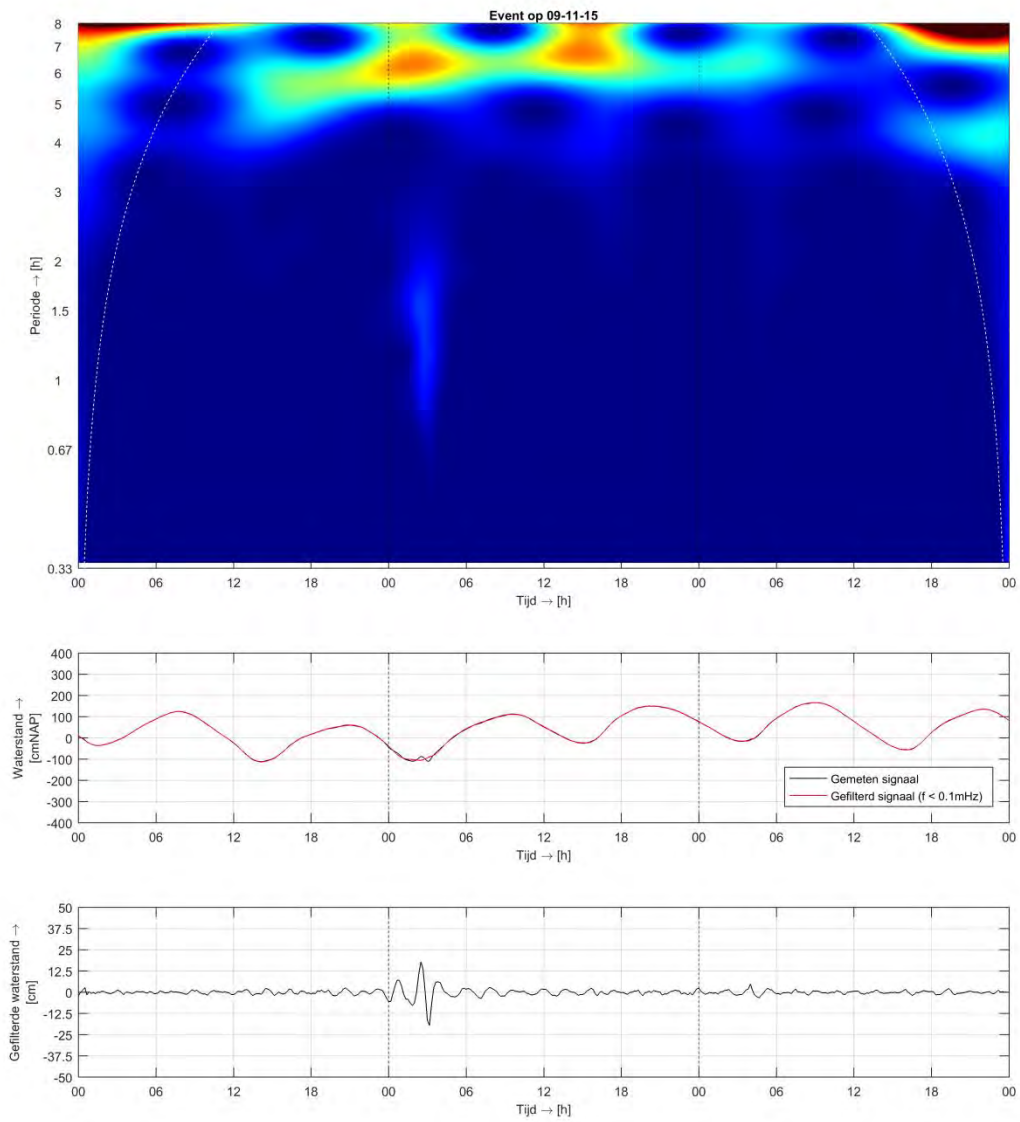
A.8.6 Schiermonnikoog



Figuur A.88 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Schiermonnikoog, amplitude = 0,35 m

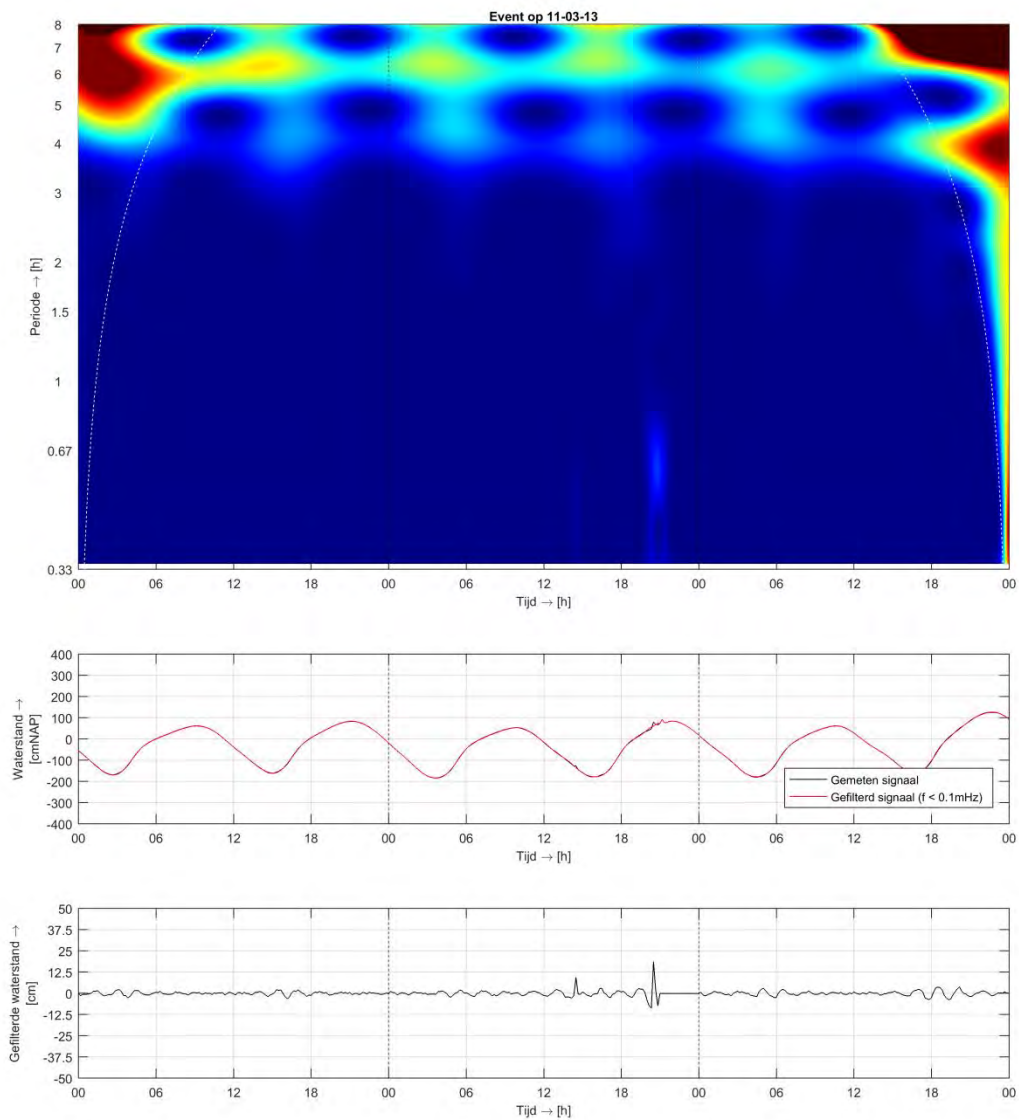


Figuur A.89 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Schiermonnikoog, amplitude = 0,25 m

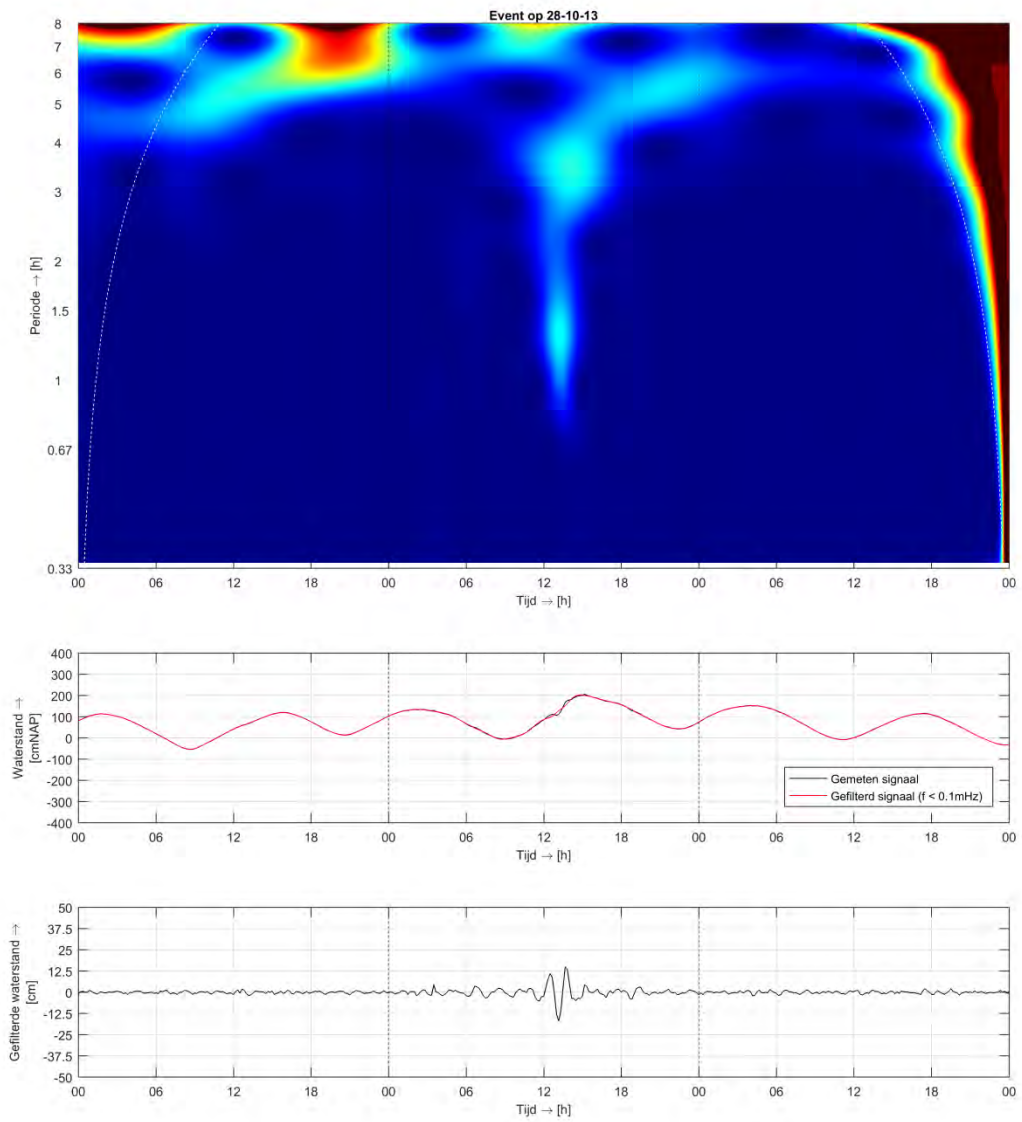


Figuur A.90 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Schiermonnikoog, amplitude = 0,20 m

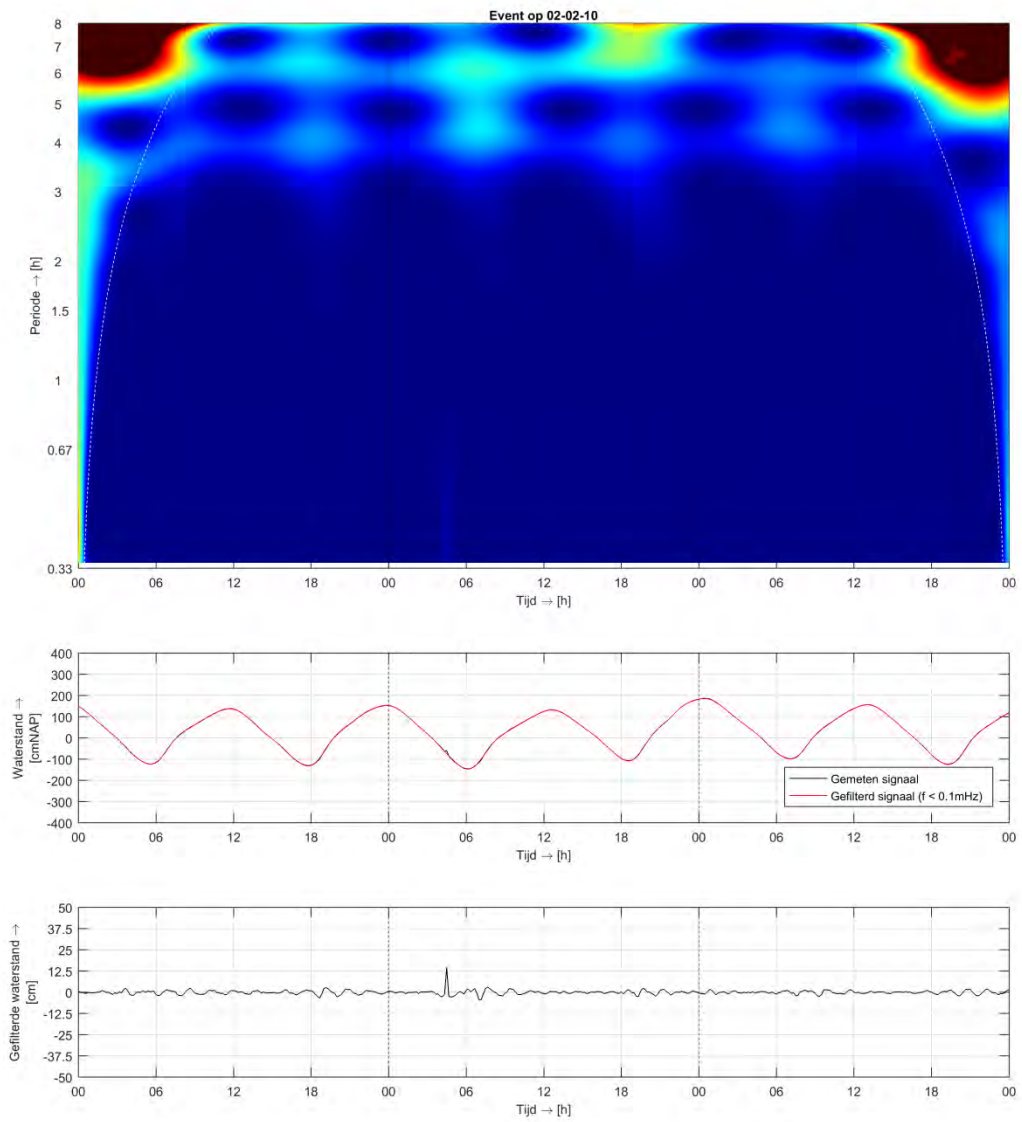
A.8.7 Nes



Figuur A.91 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Nes, amplitude = 0,20 m

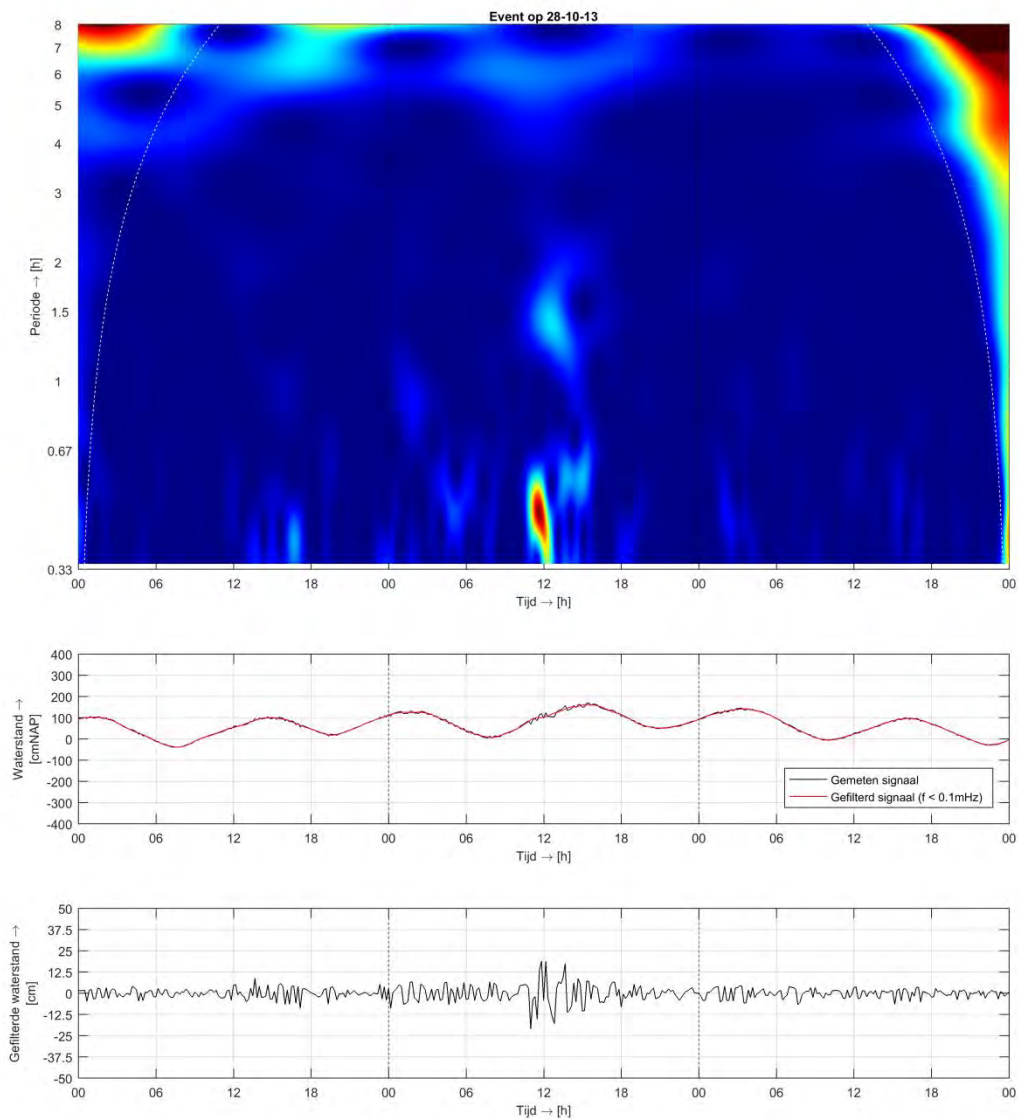


Figuur A.92 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Nes, amplitude = 0,20 m

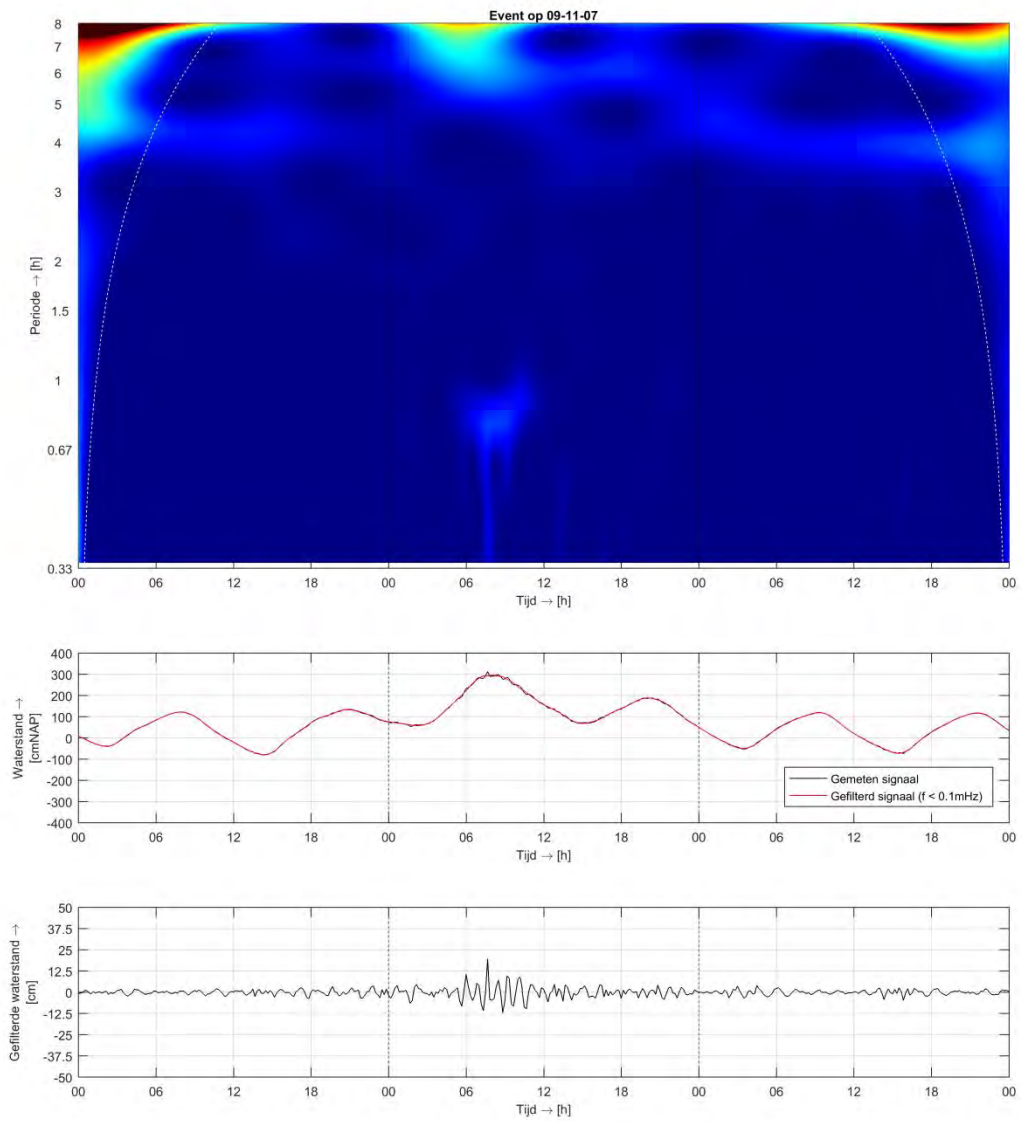


Figuur A.93 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Nes, amplitude = 0,15 m

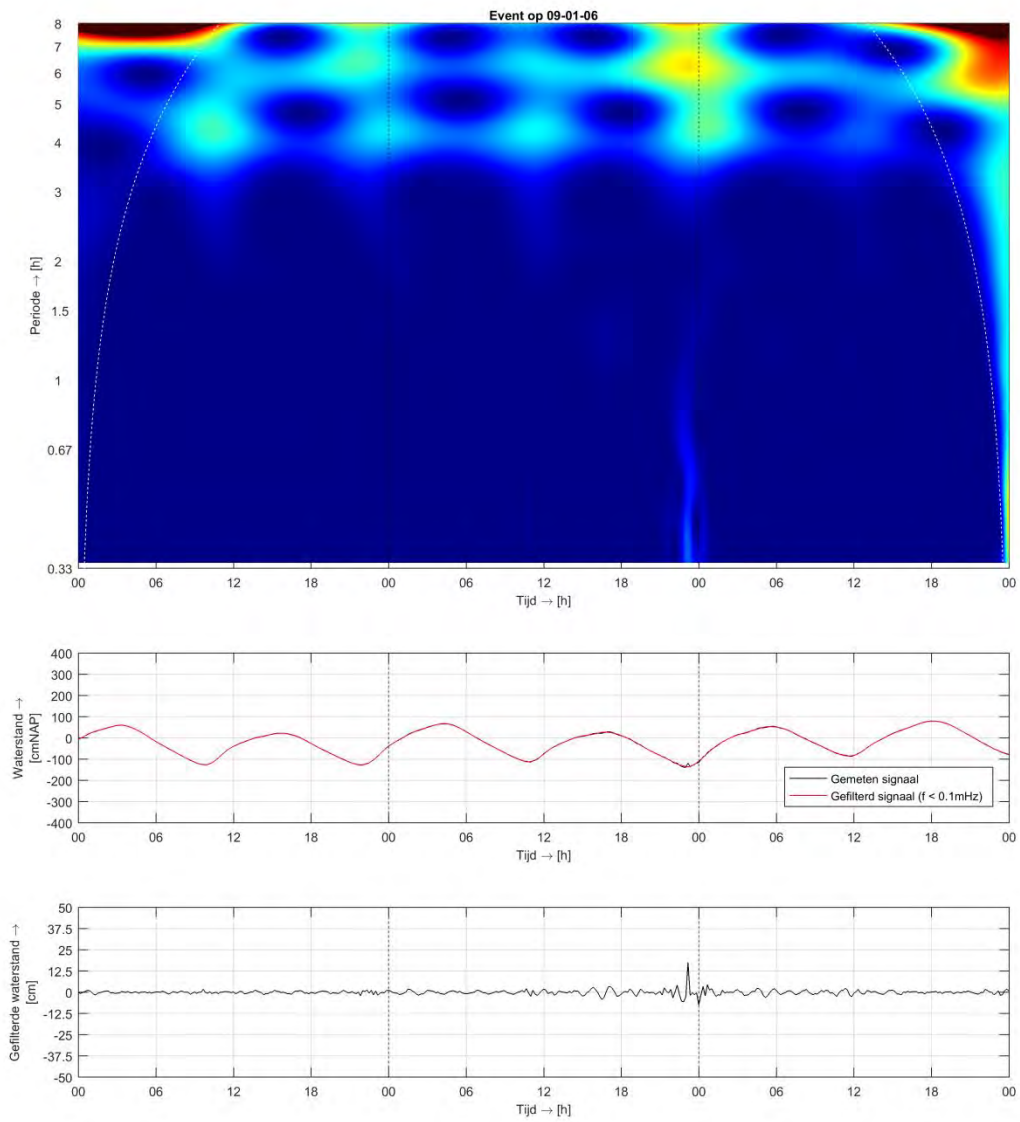
A.8.8 West-Terschelling



Figuur A.94 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode West-Terschelling, amplitude = 0,25 m

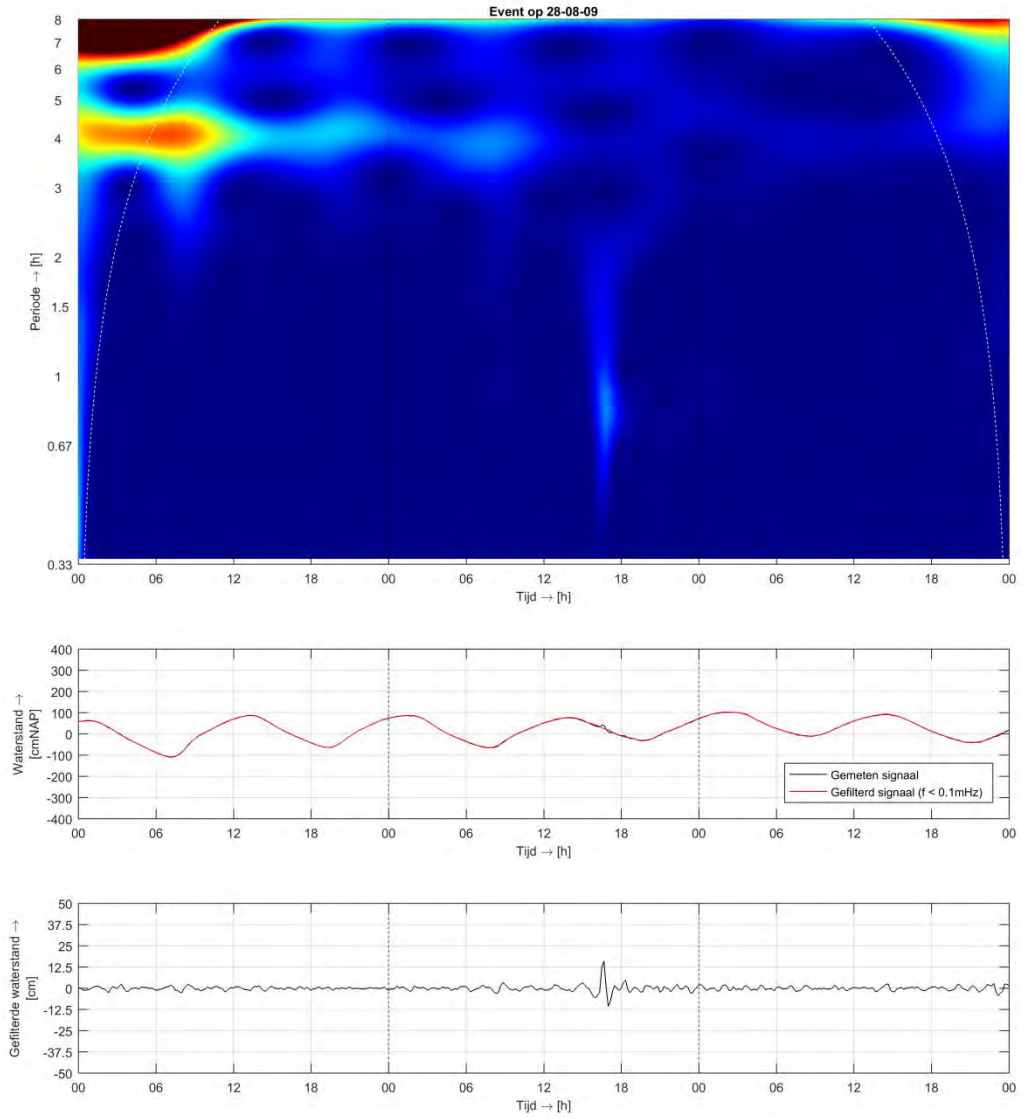


Figuur A.95 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode West-Terschelling, amplitude = 0,20 m

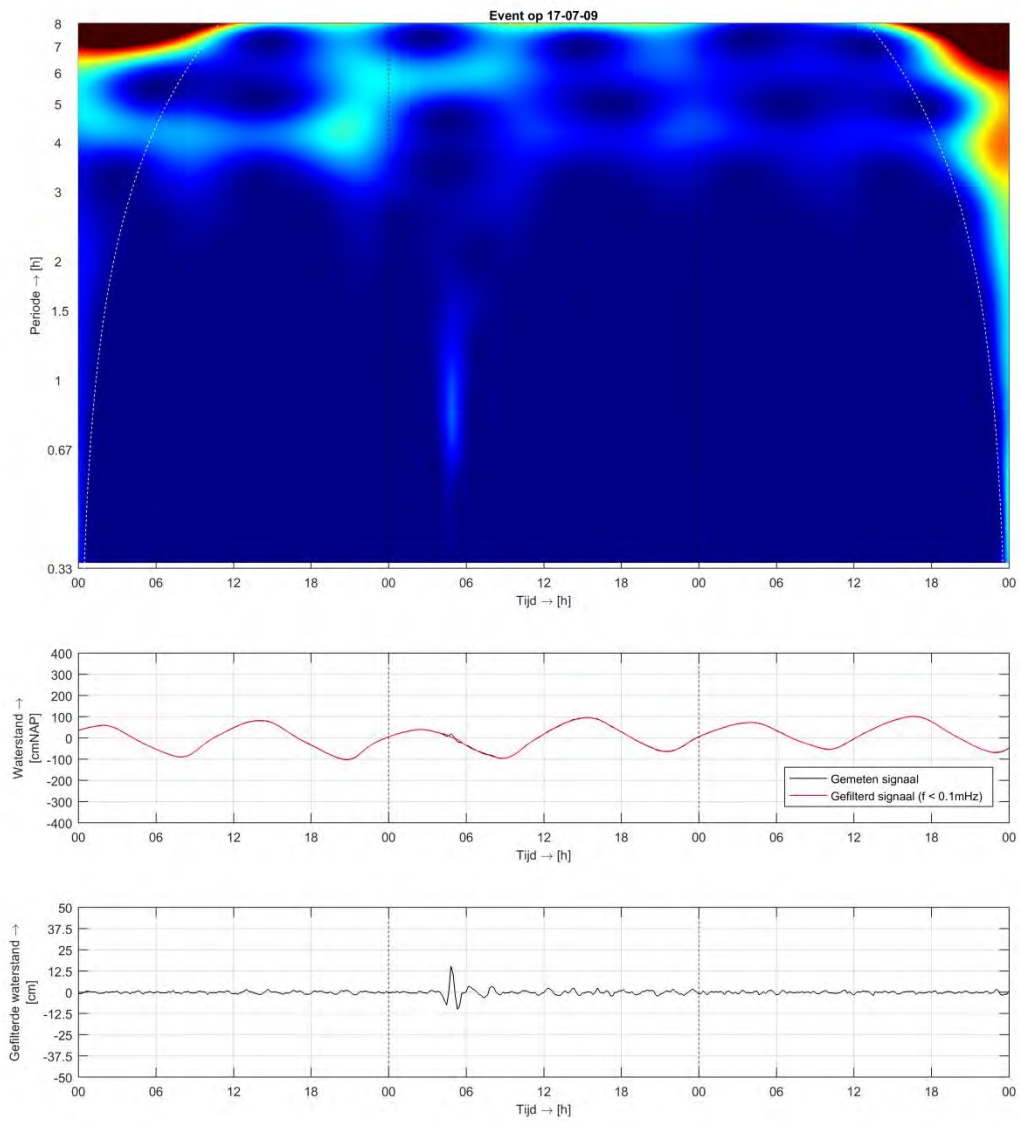


Figuur A.96 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode West-Terschelling, amplitude = 0,20 m

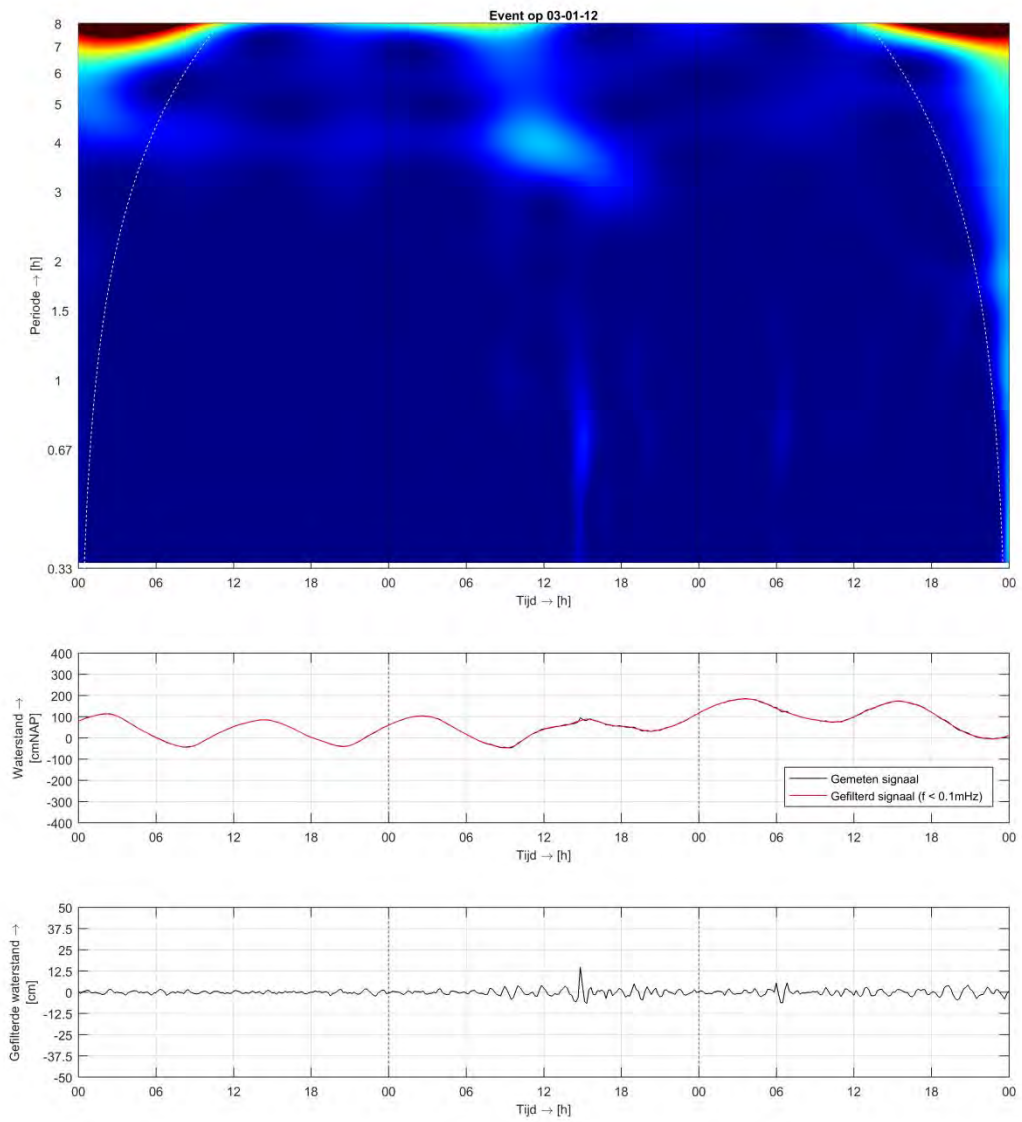
A.8.9 Vlieland Haven



Figuur A.97 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Vlieland Haven, amplitude = 0,20 m

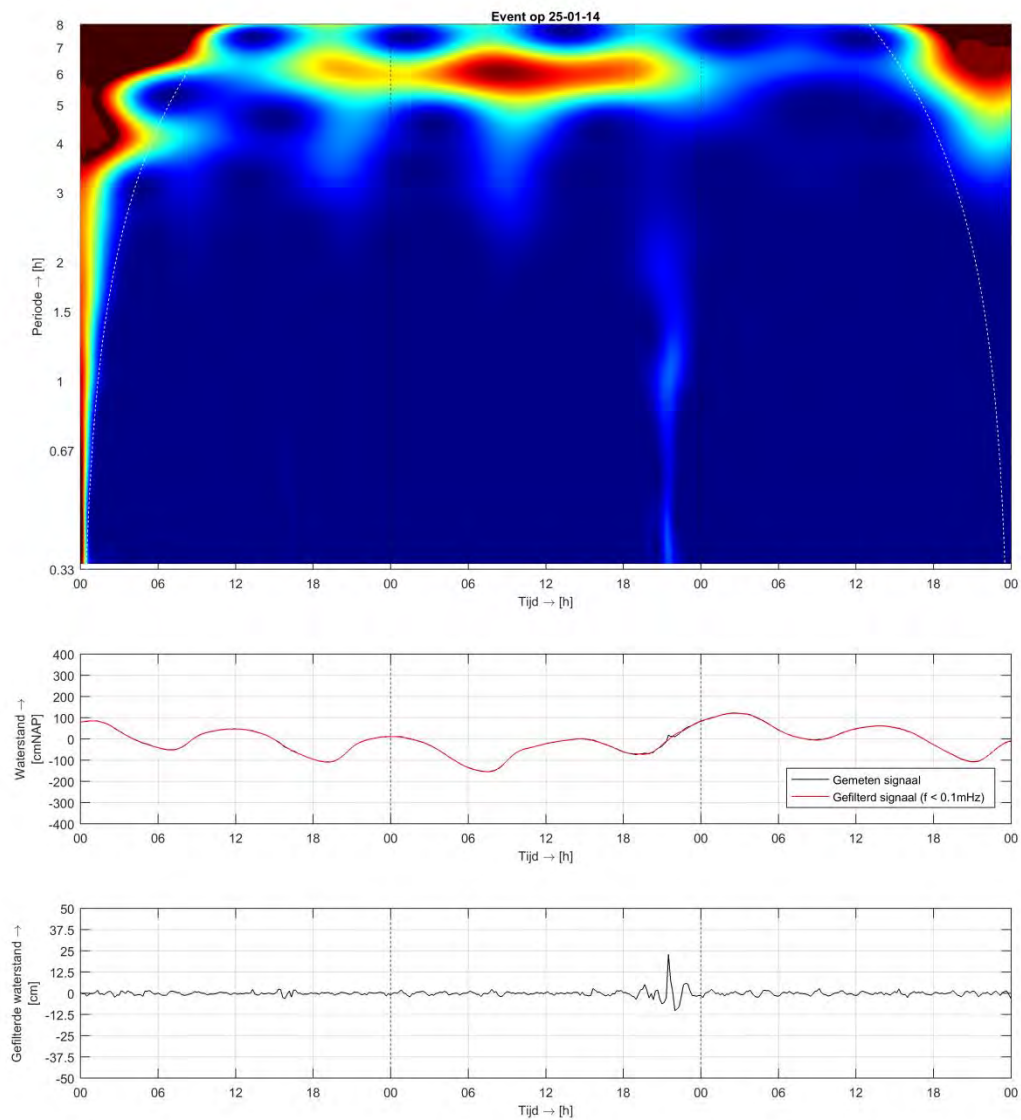


Figuur A.98 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Vlieland Haven, amplitude = 0,20 m

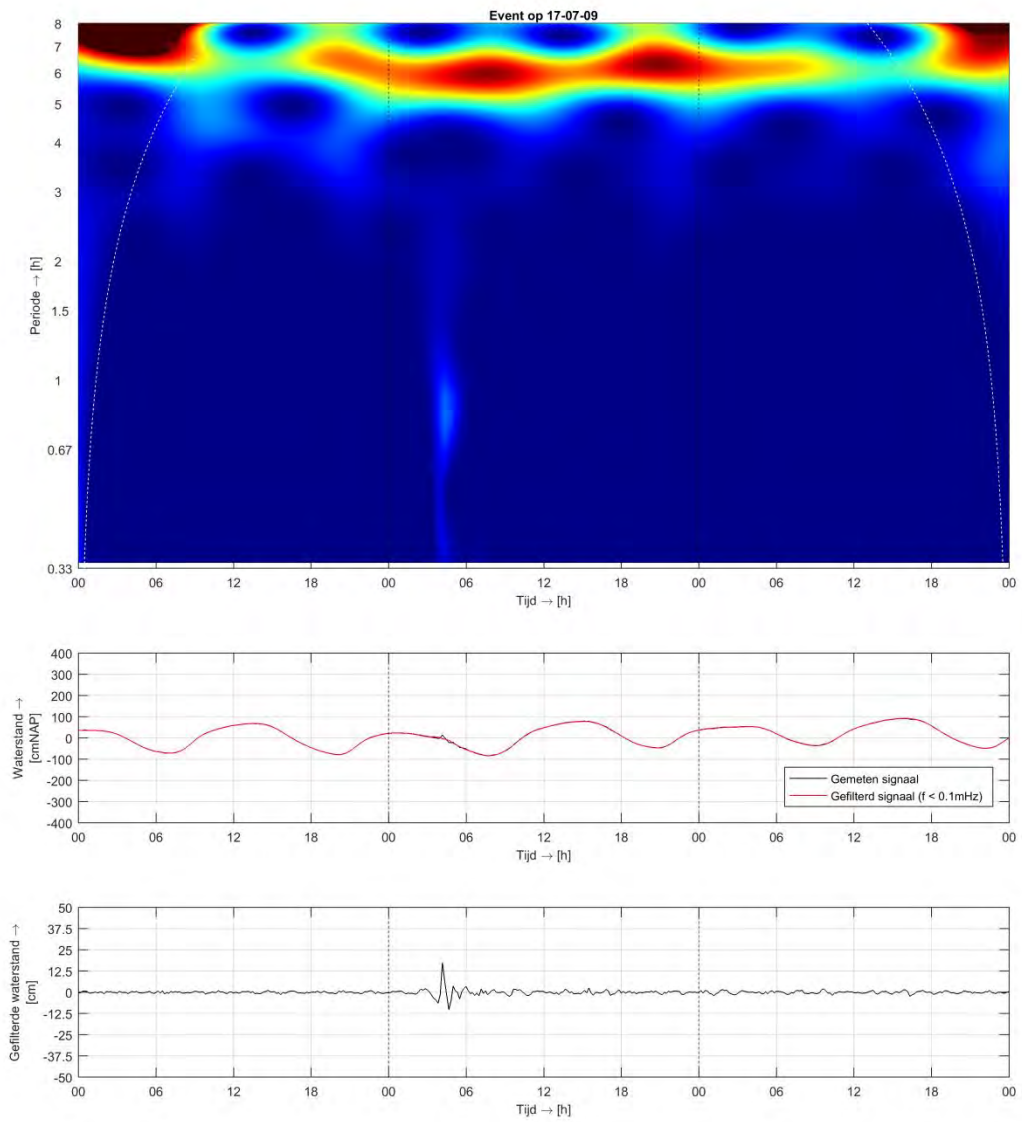


Figuur A.99 Derde hoogste geregistreeerde seiche-episode Vlieland Haven, amplitude = 0,15 m

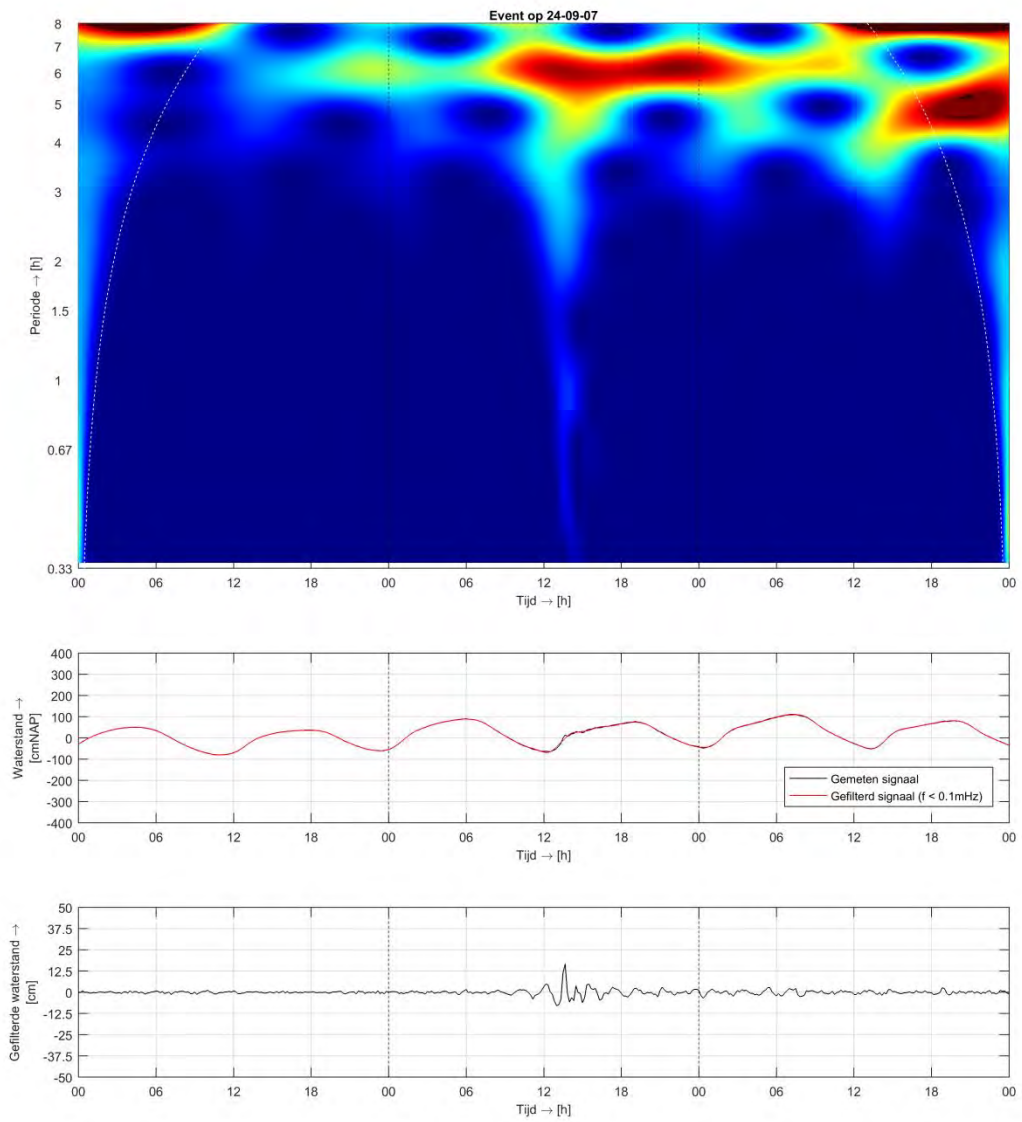
A.8.10 Oudeschild



Figuur A.100 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Oudeschild, amplitude = 0,25 m



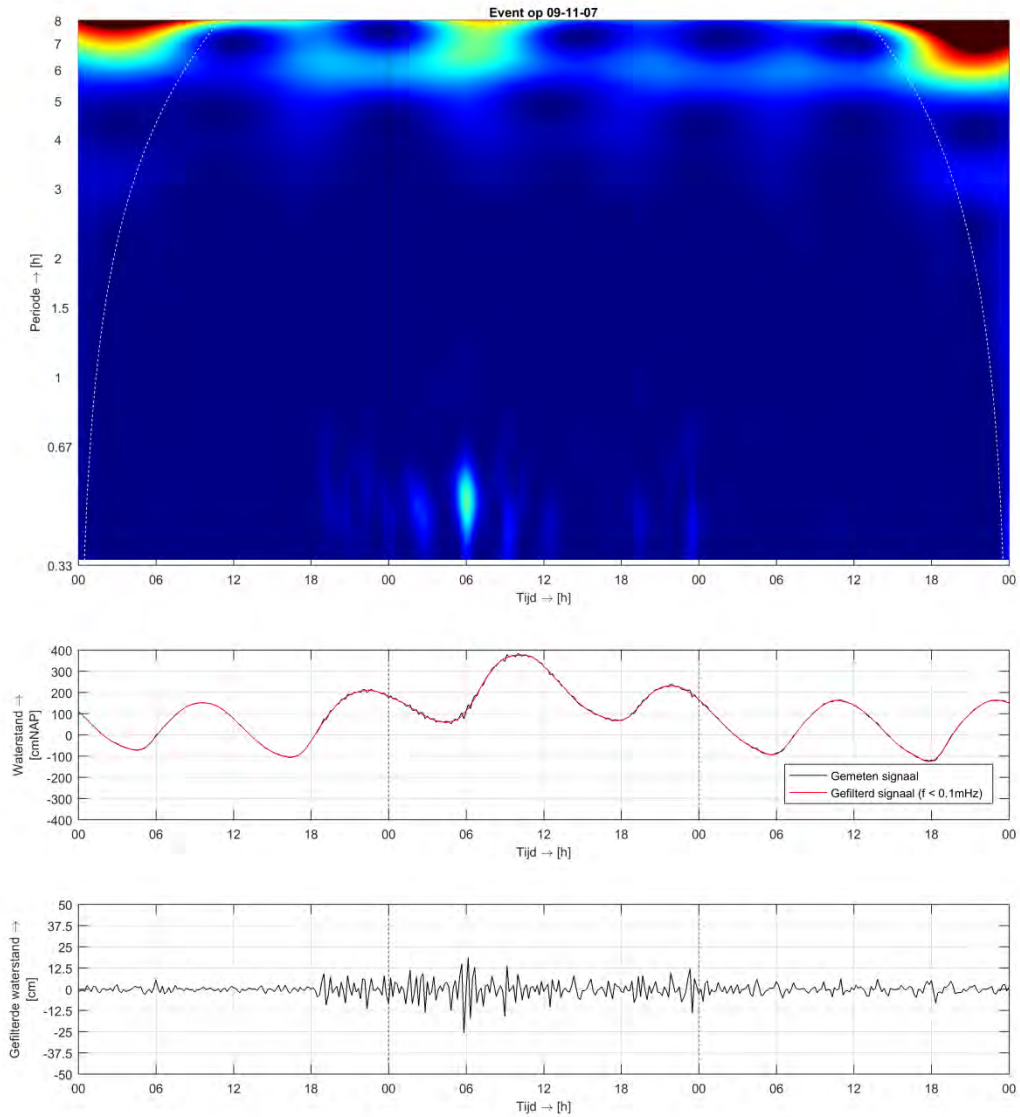
Figuur A.101 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Oudeschild, amplitude = 0,20 m



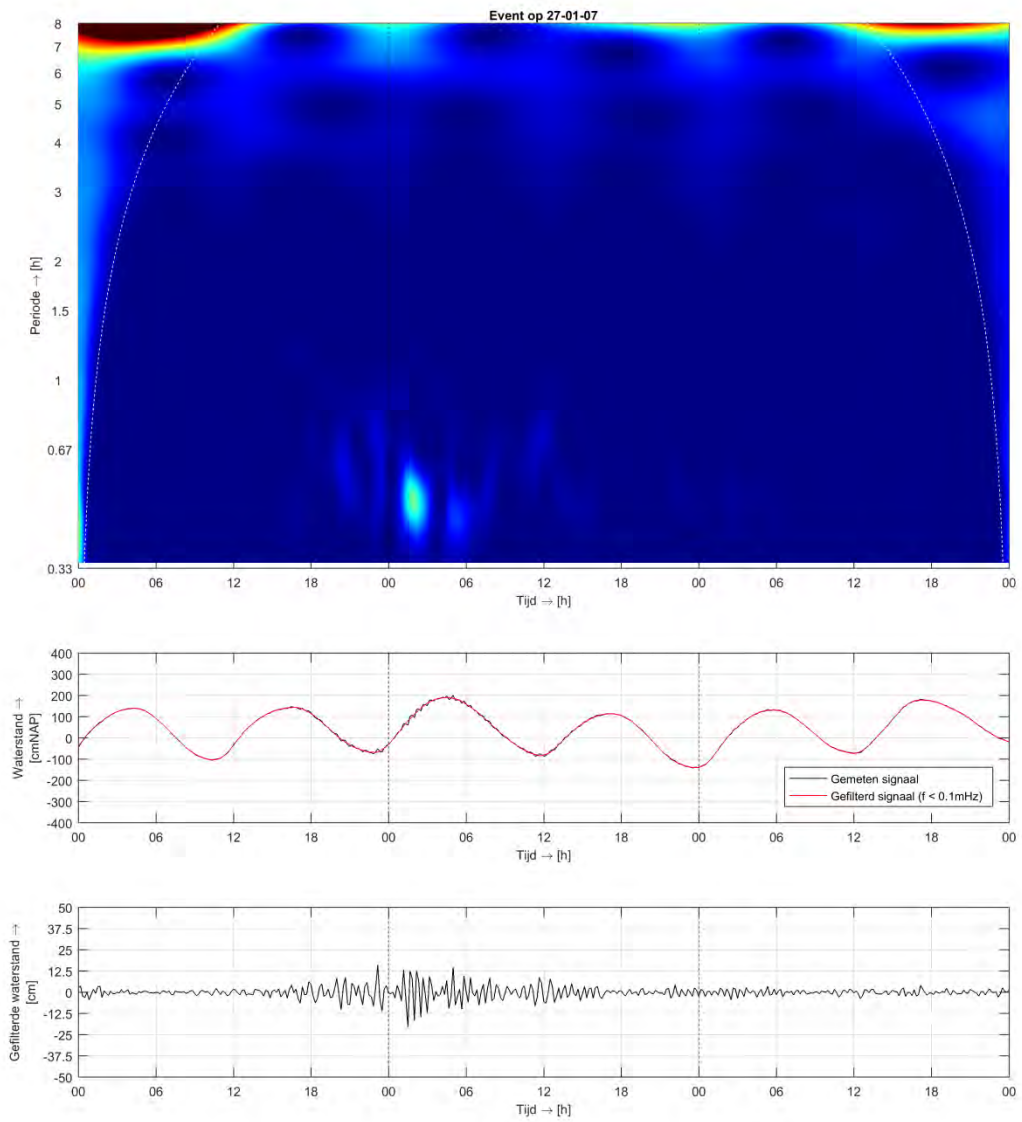
Figuur A.102 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Oudeschild, amplitude = 0,20 m

A.9 Eems-Dollard

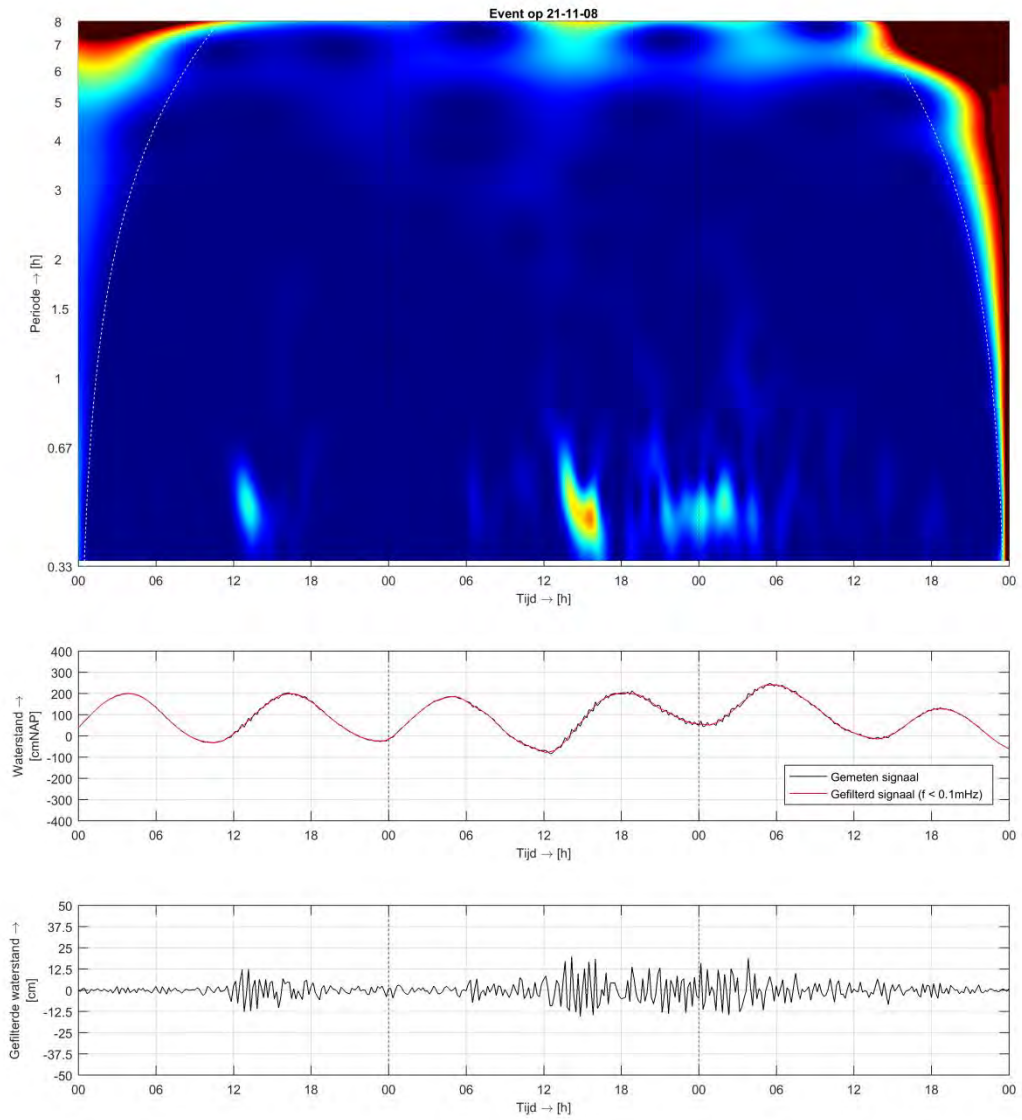
A.9.1 Eemshaven



Figuur A.103 Eerste hoogste geregistreeerde seiche-episode Eemshaven, amplitude = 0,30 m

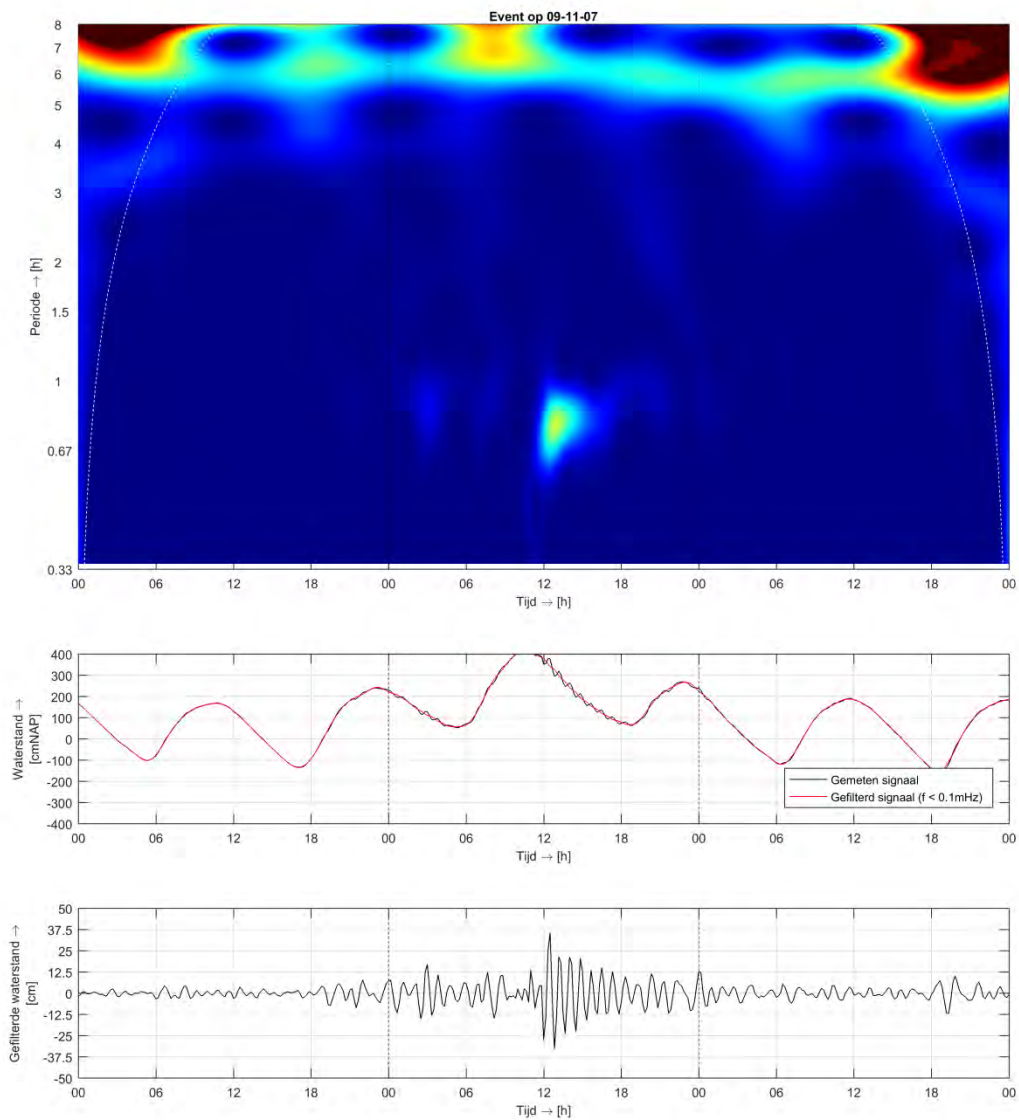


Figuur A.104 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Eemshaven, amplitude = 0,25 m

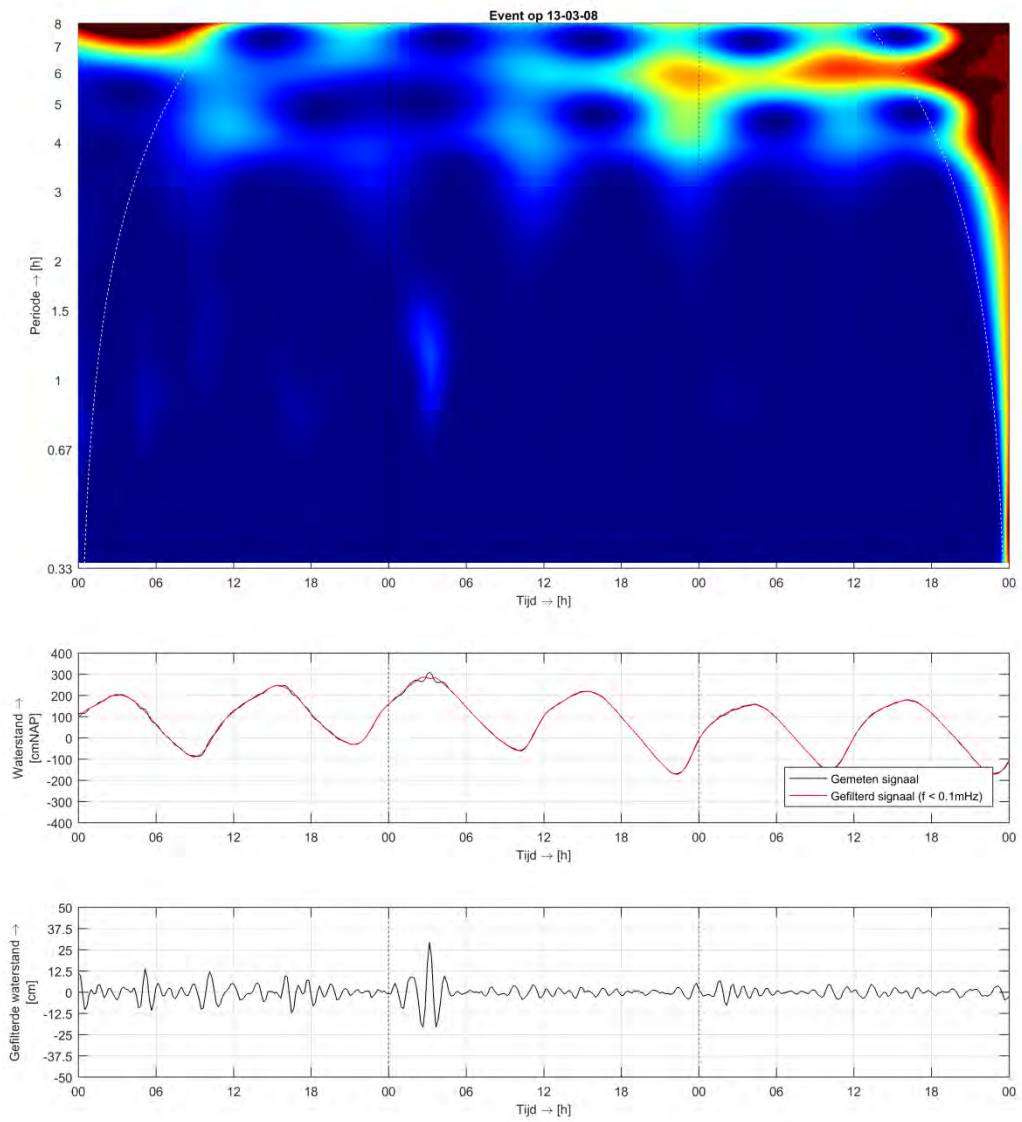


Figuur A.105 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Eemshaven, amplitude = 0,20 m

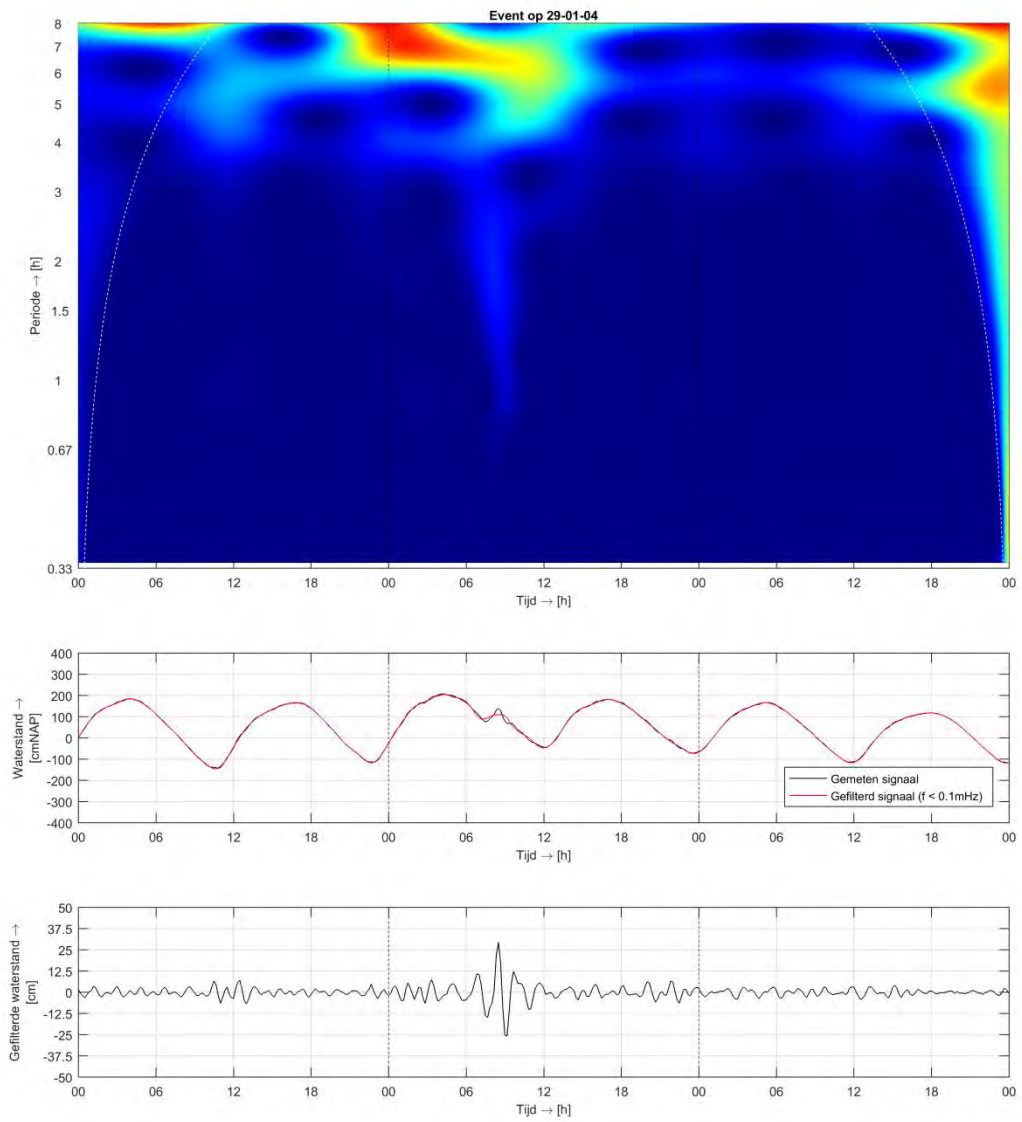
A.9.2 Delfzijl



Figuur A.106 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Delfzijl, amplitude = 0,40 m

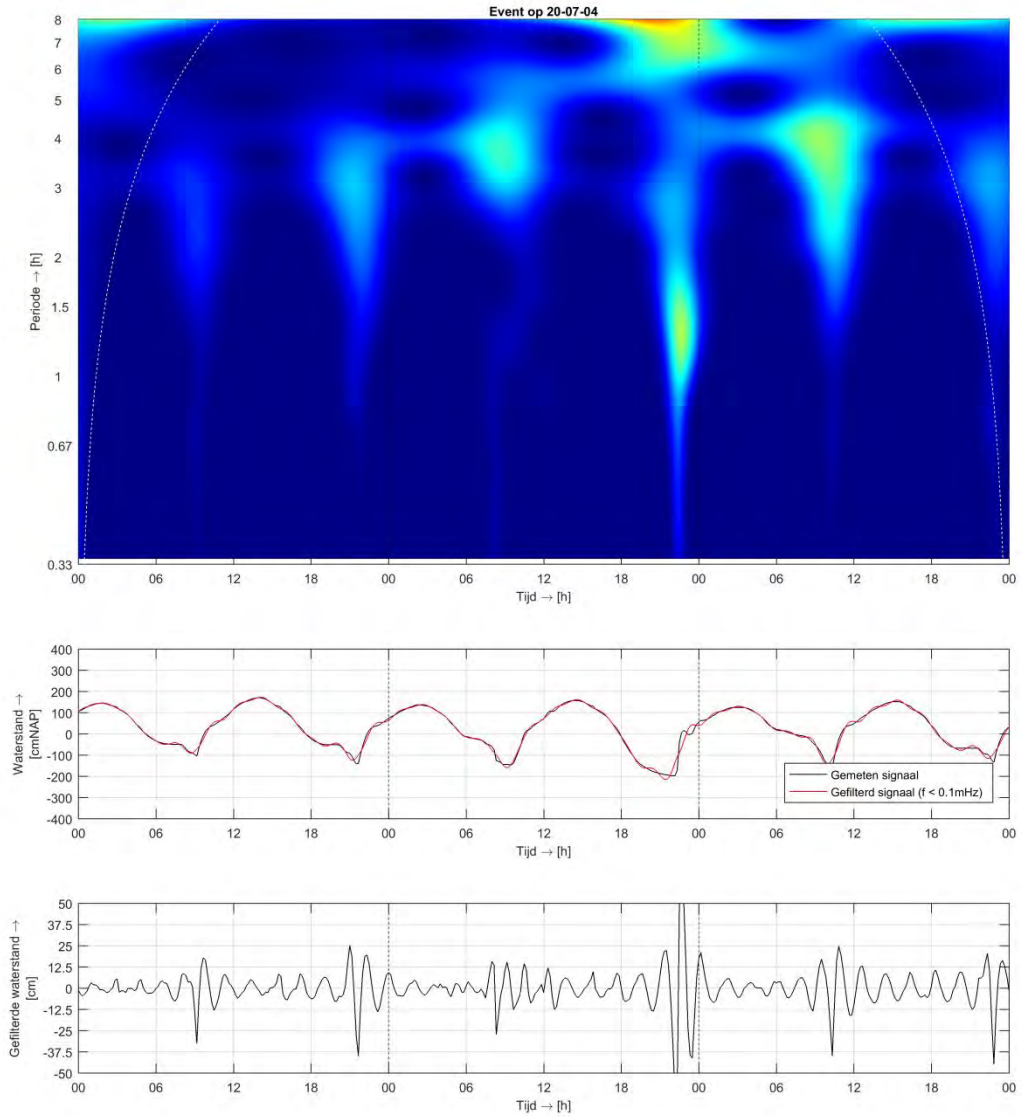


Figuur A.107 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Delfzijl, amplitude = 0,30 m

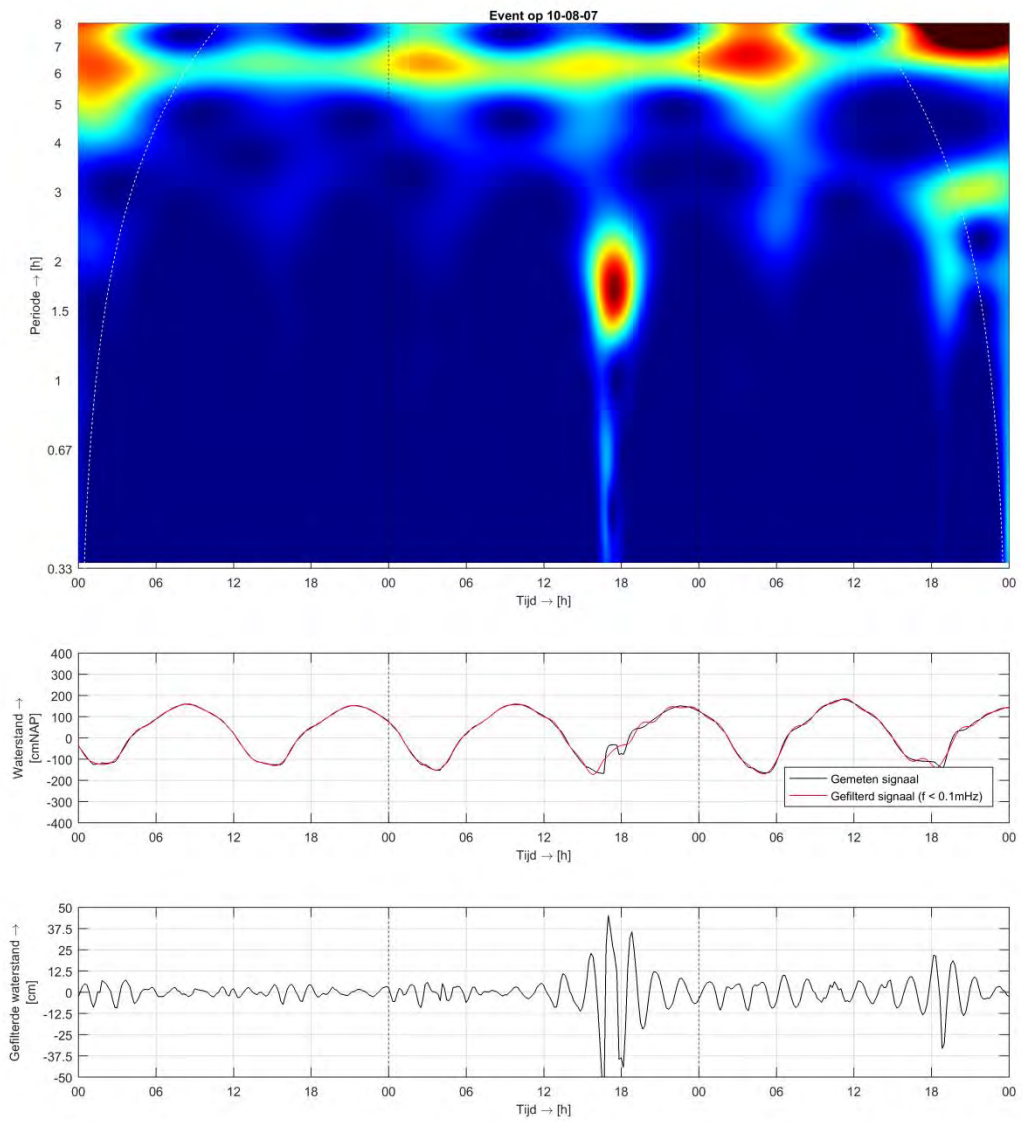


Figuur A.108 Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Delfzijl, amplitude = 0,30 m

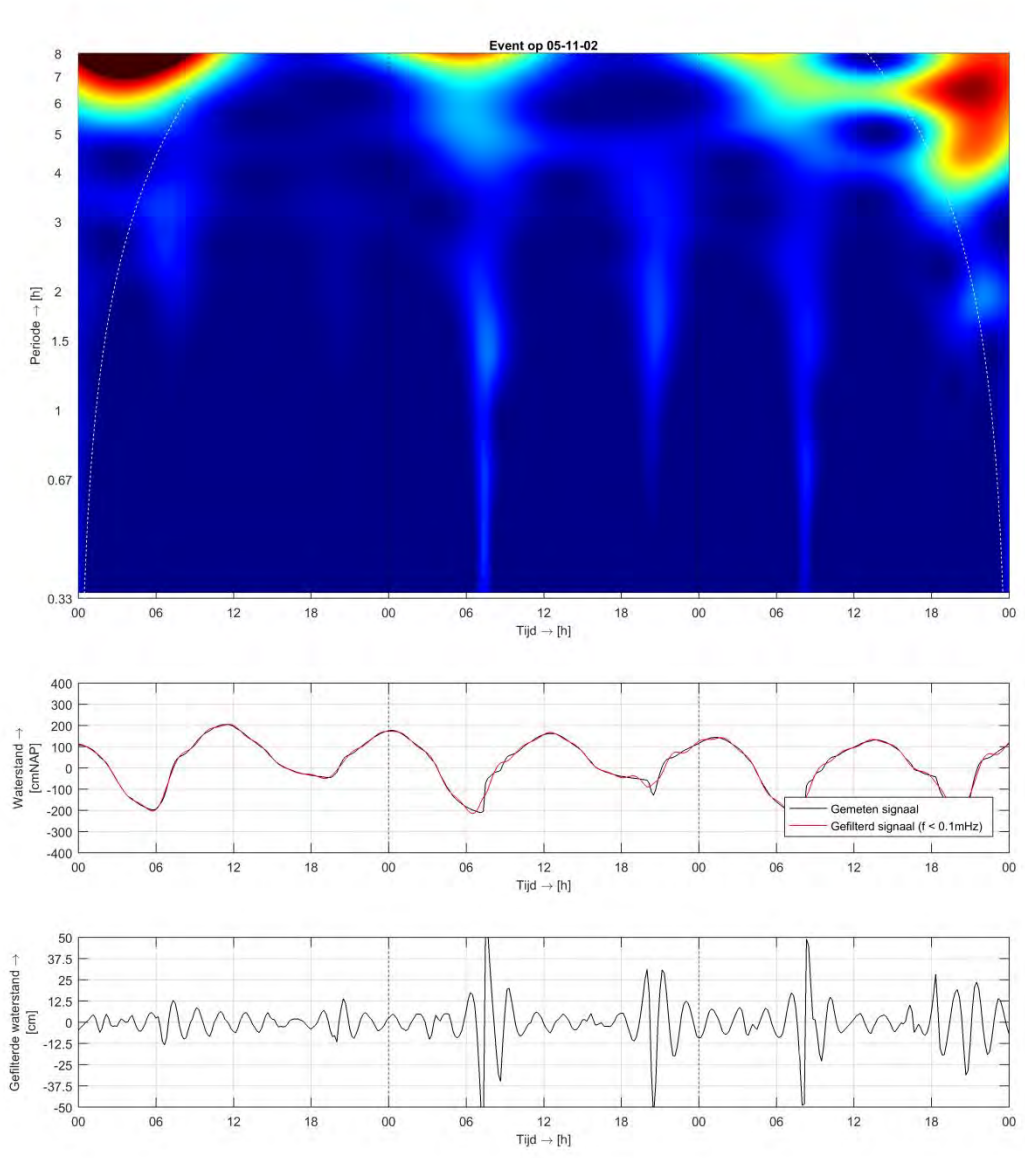
A.9.3 Nieuw Statenzijl



Figuur A.109 Eerste hoogste geregistreerde seiche-episode Nieuw Statenzijl, amplitude = 0,75 m



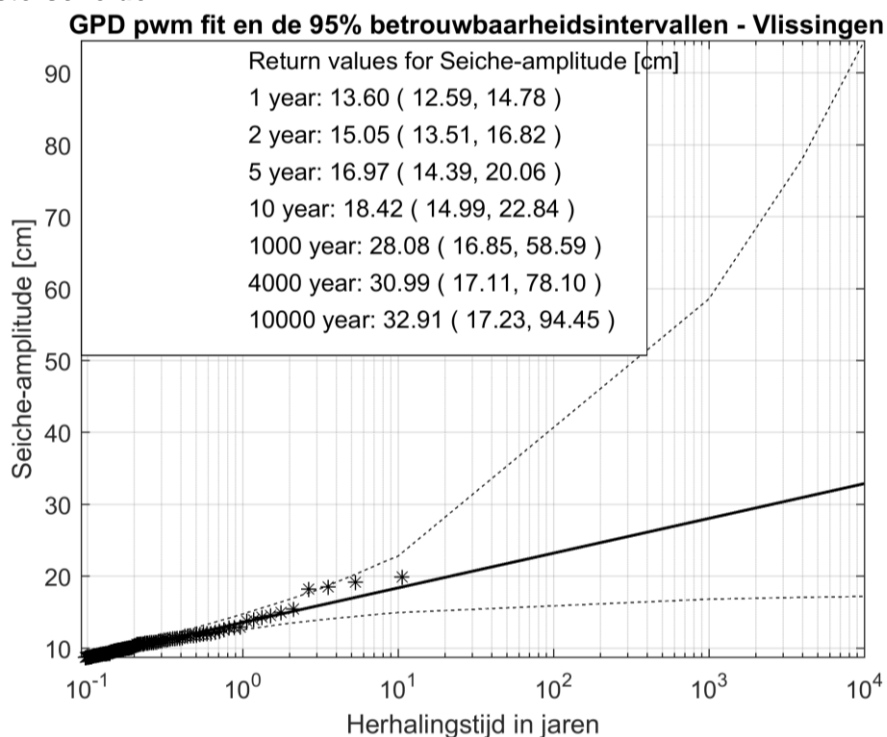
Figuur A.110 Tweede hoogste geregistreerde seiche-episode Nieuw Statenzijl, amplitude = 0,70 m



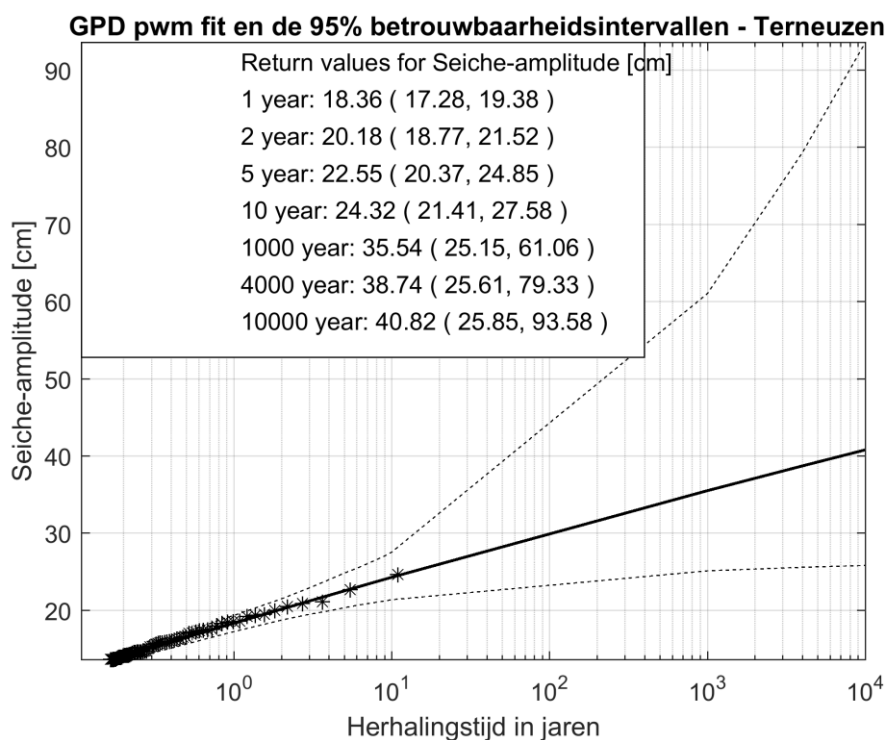
Figuur A.111 *Derde hoogste geregistreerde seiche-episode Nieuw Statenzijl, amplitude = 0,70 m*

B Extreme-waarde fits per meetlocatie

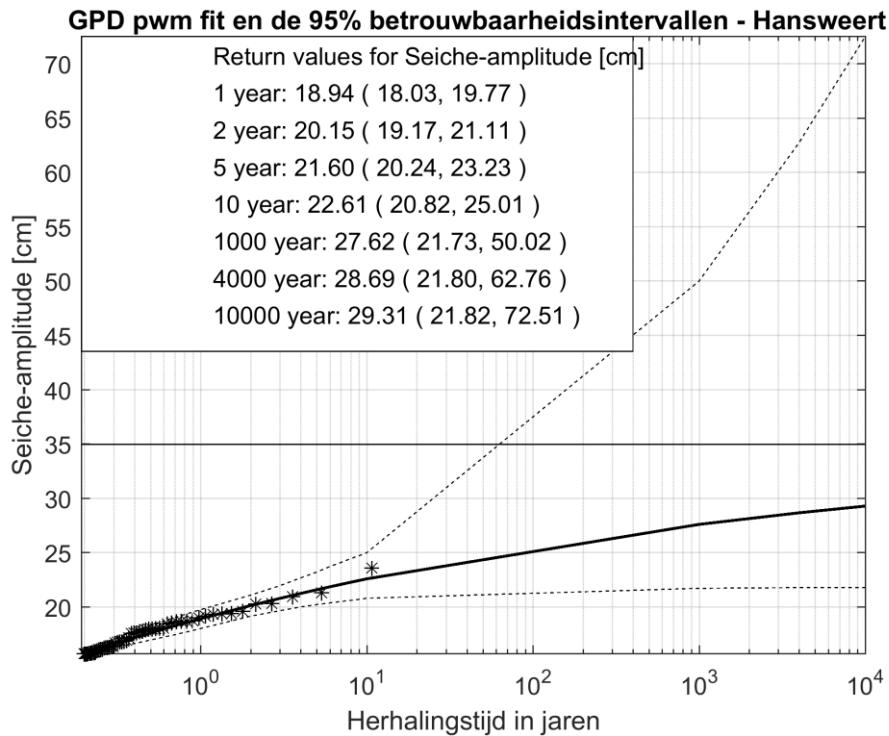
B.1 Westerschelde



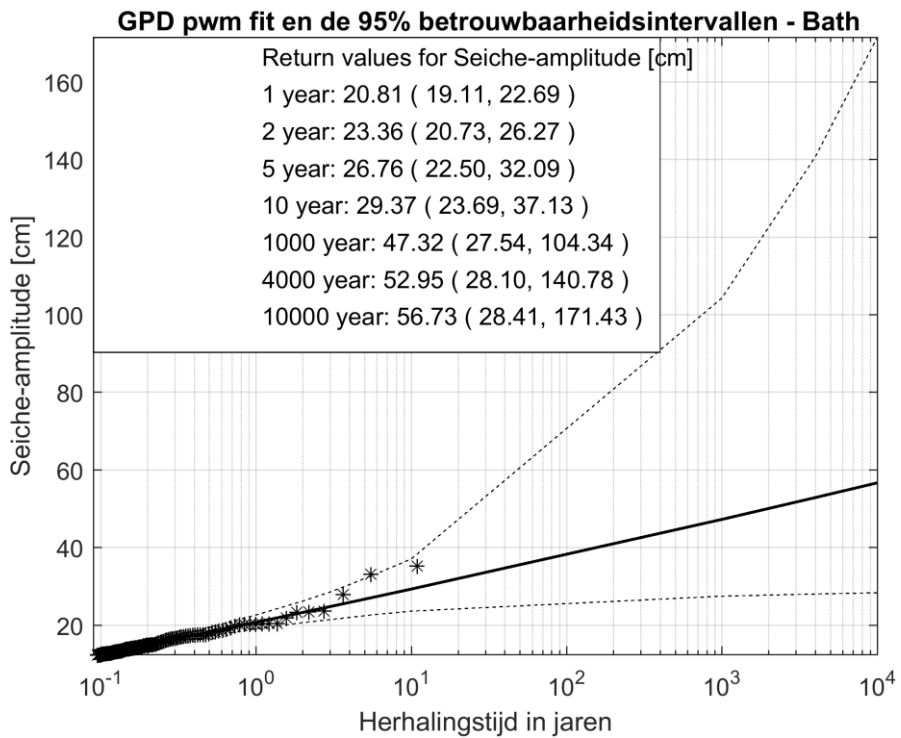
Figuur B.1 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Vlissingen.



Figuur B.2 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Terneuzen.

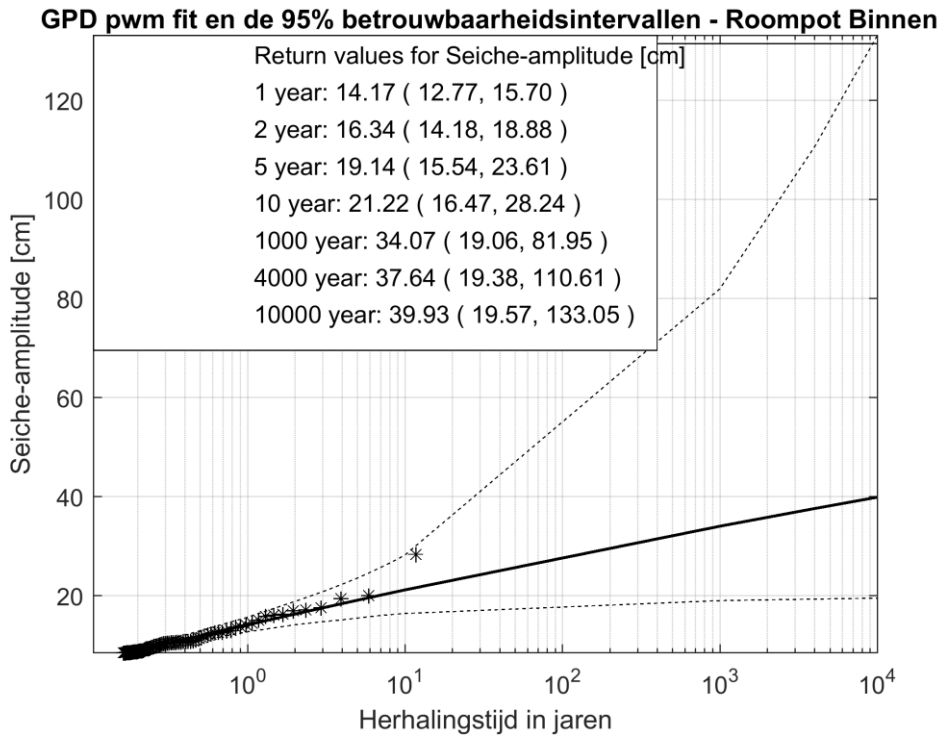


Figuur B.3 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Hansweert.

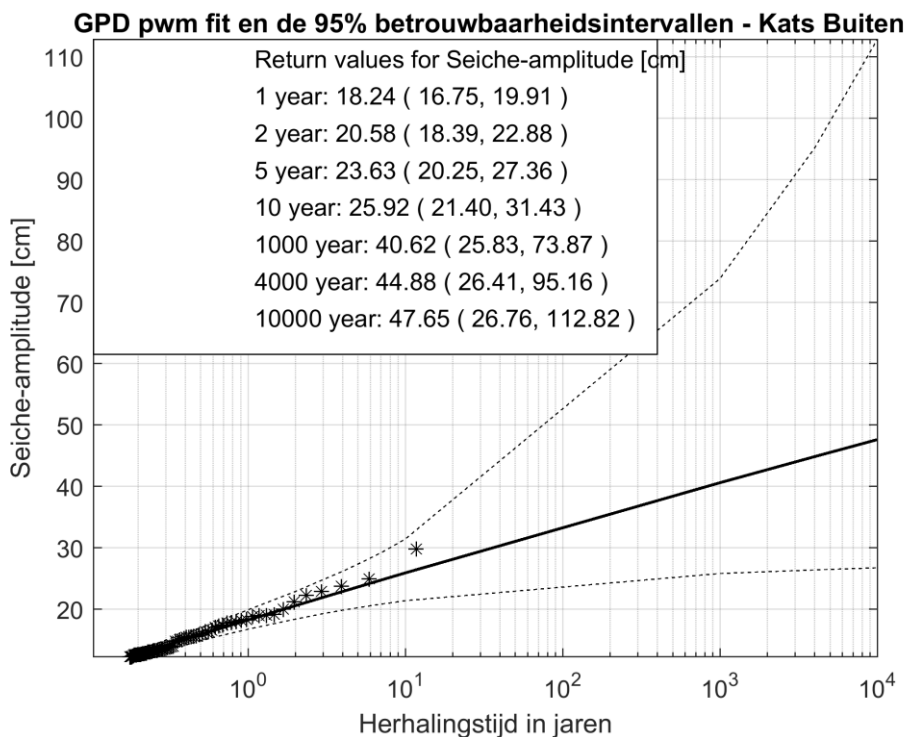


Figuur B.4 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Bath.

B.2 Oosterschelde

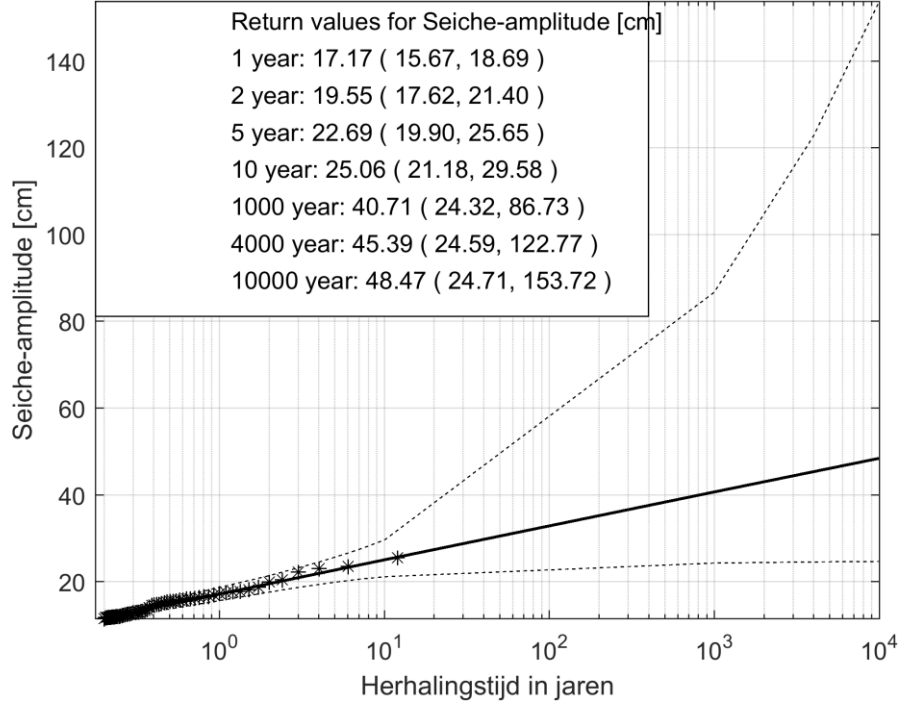


Figuur B.5 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Roompot Binnen.



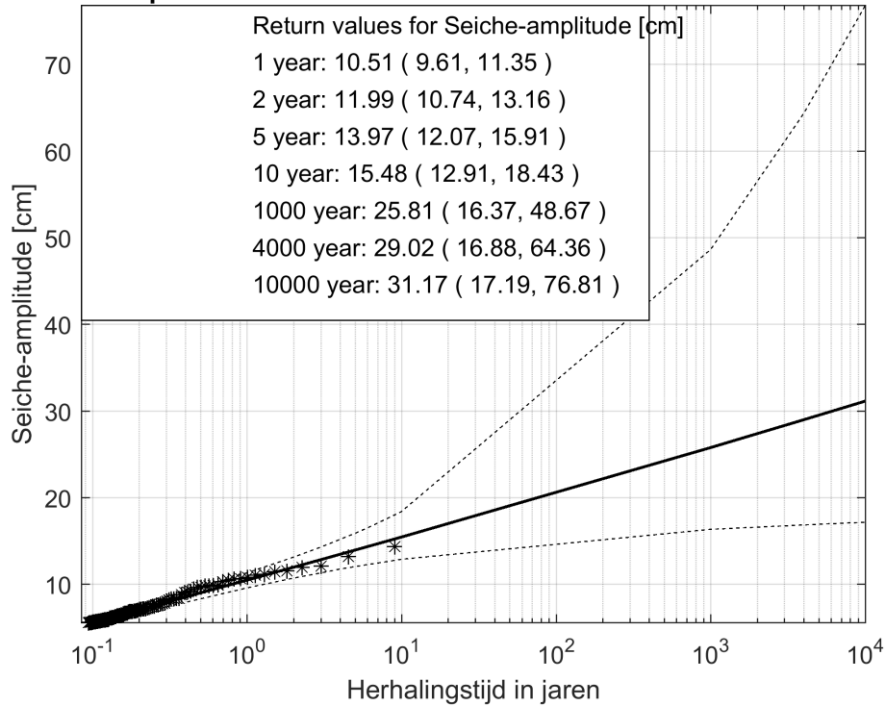
Figuur B.6 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kats Buiten.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Krammersluizen West

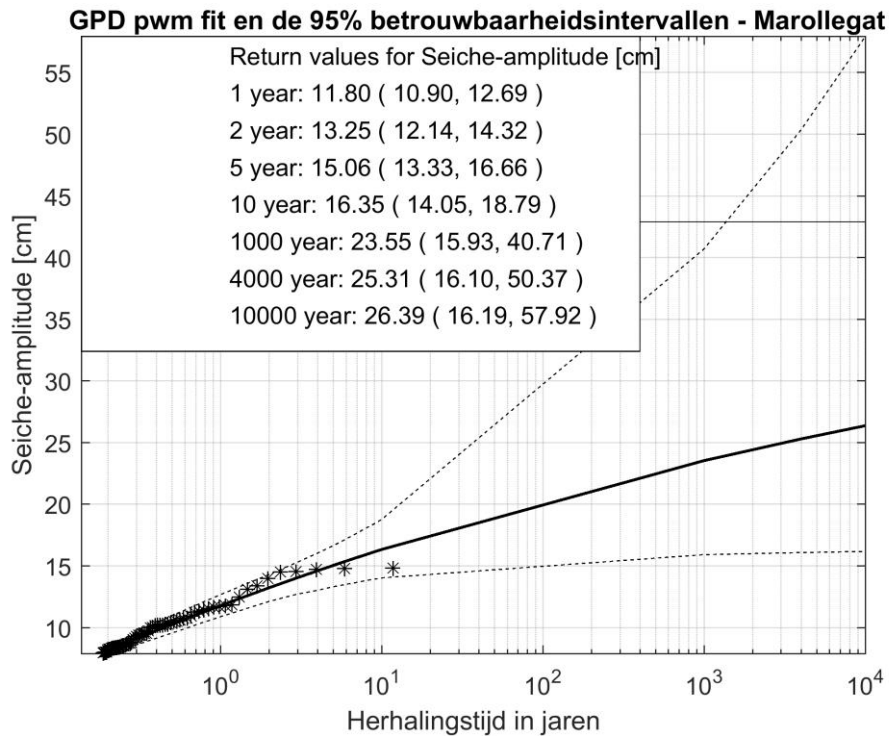


Figuur B.7 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Krammersluizen West.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Yerseke

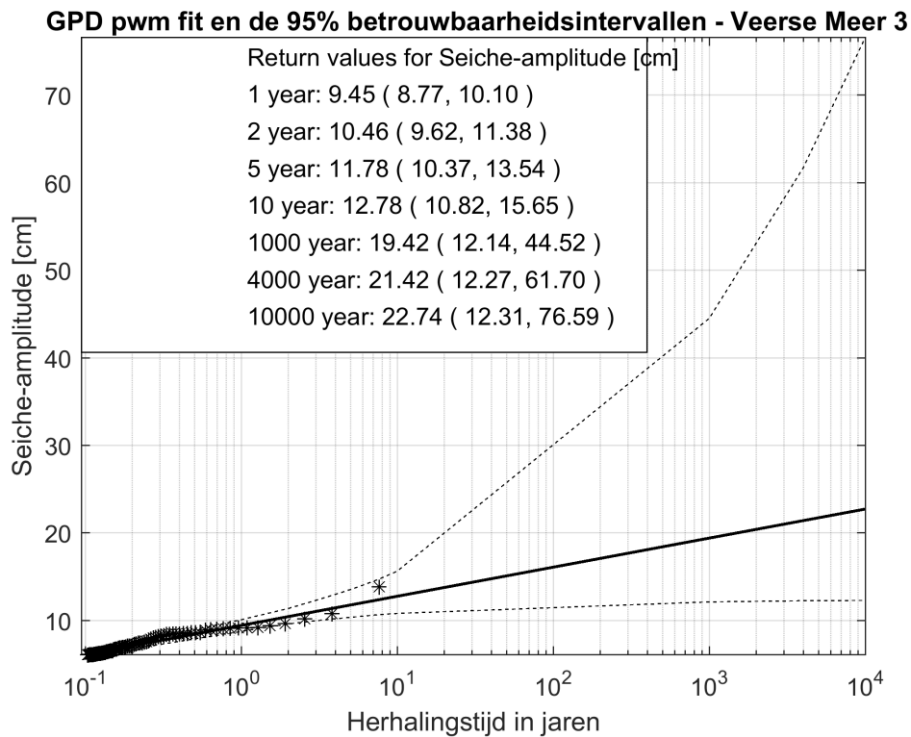


Figuur B.8 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Yerseke.

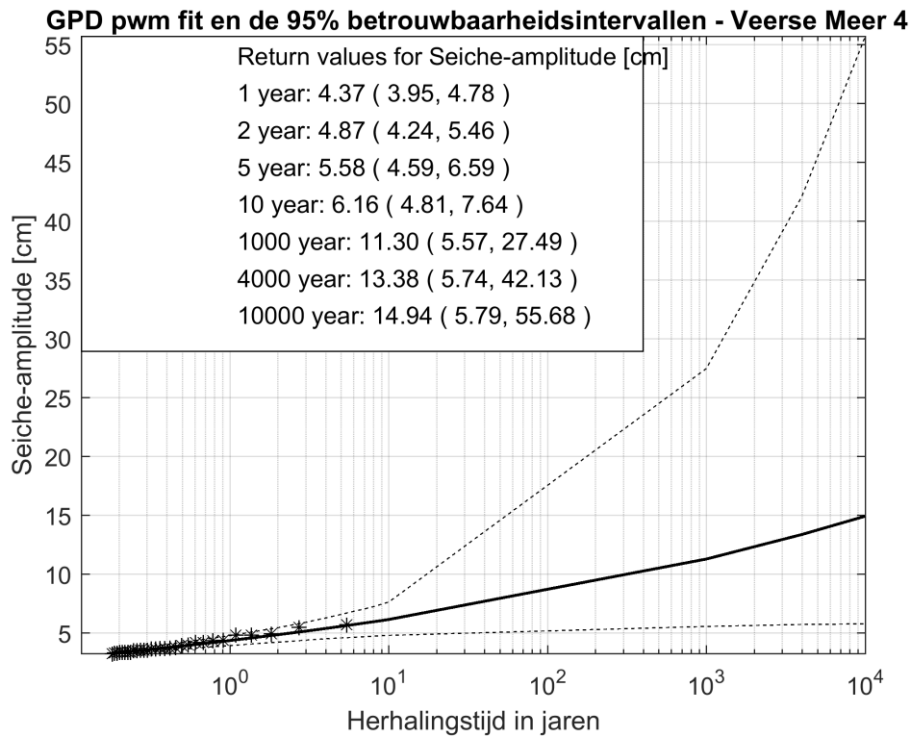


Figuur B.9 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Marollegat.

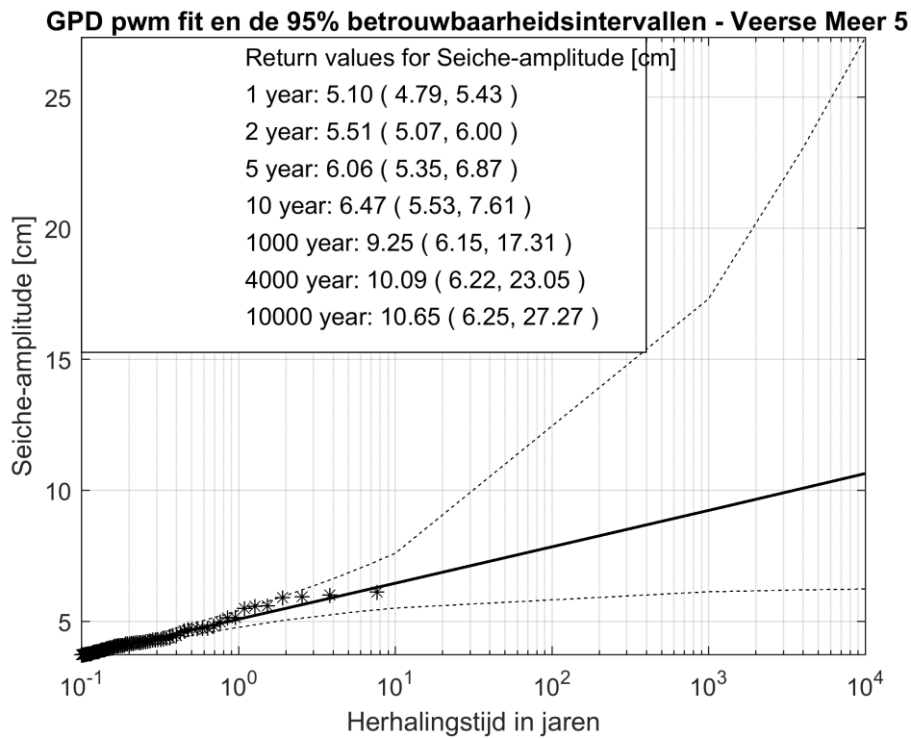
B.3 Veerse Meer



Figuur B.10 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Sluis Kats Binnen (VM3).

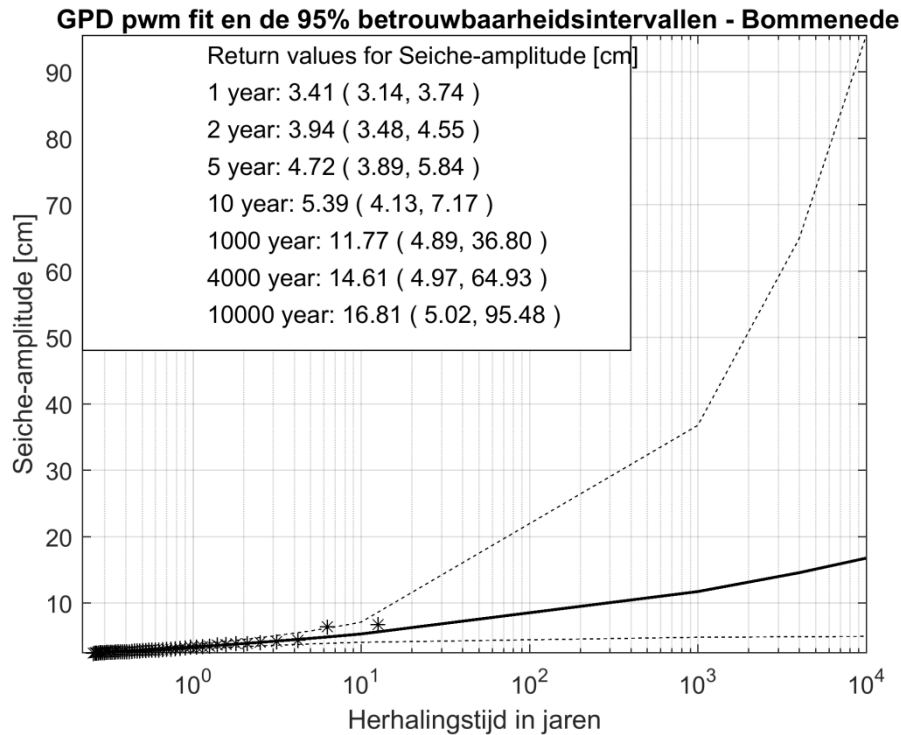


Figuur B.11 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Oranjeplaat (VM4).

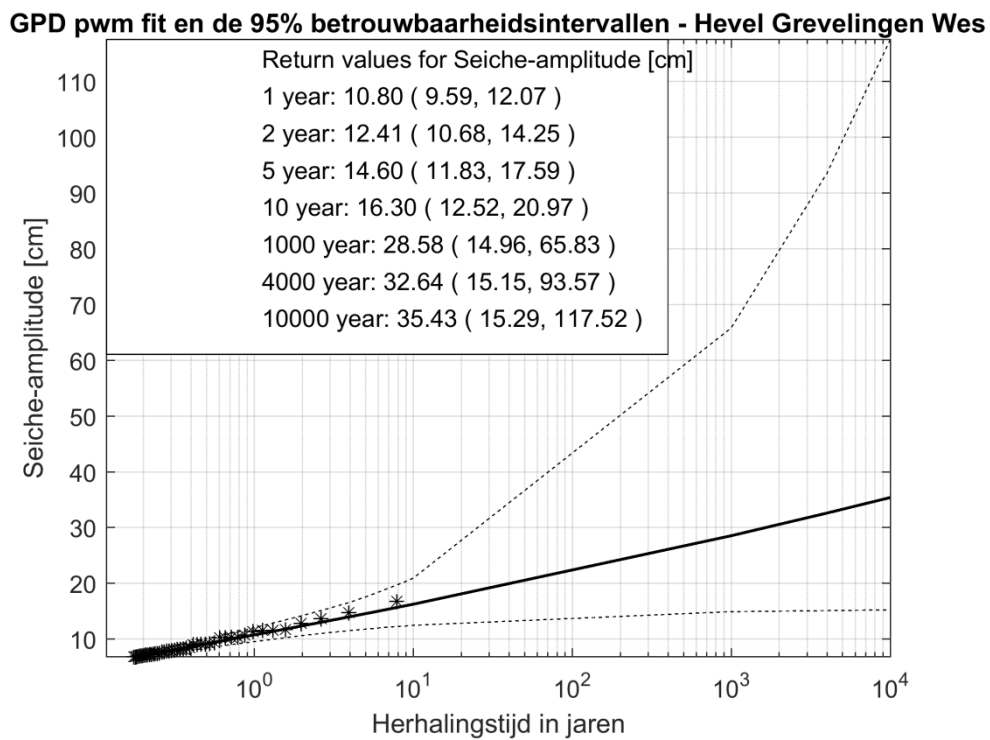


Figuur B.12 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Schotsman (VM5).

B.4 Grevelingenmeer

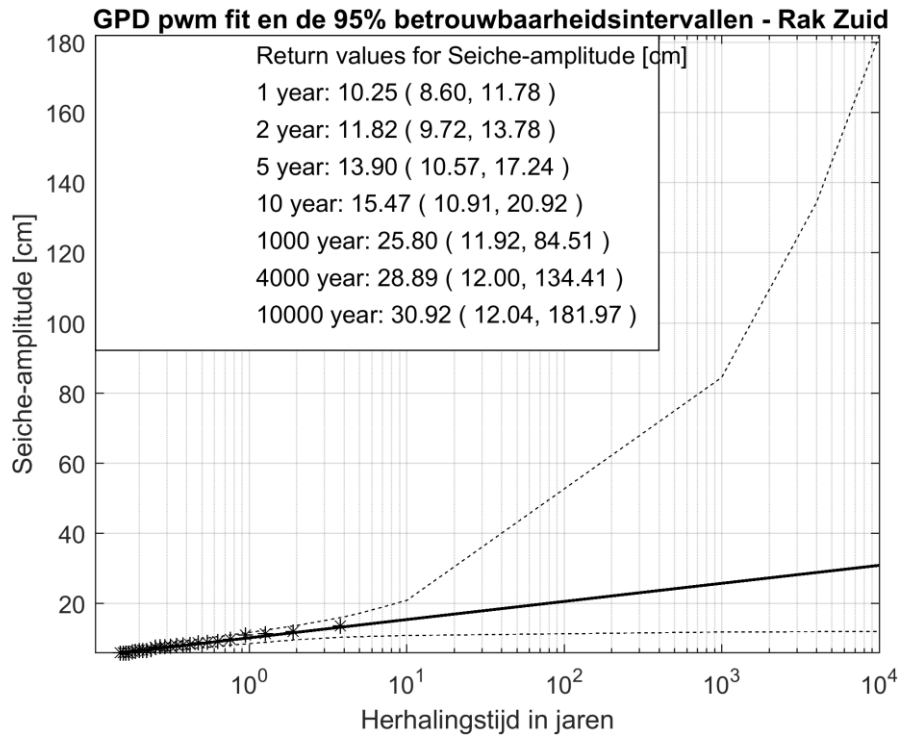


Figuur B.13 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Bommenede.

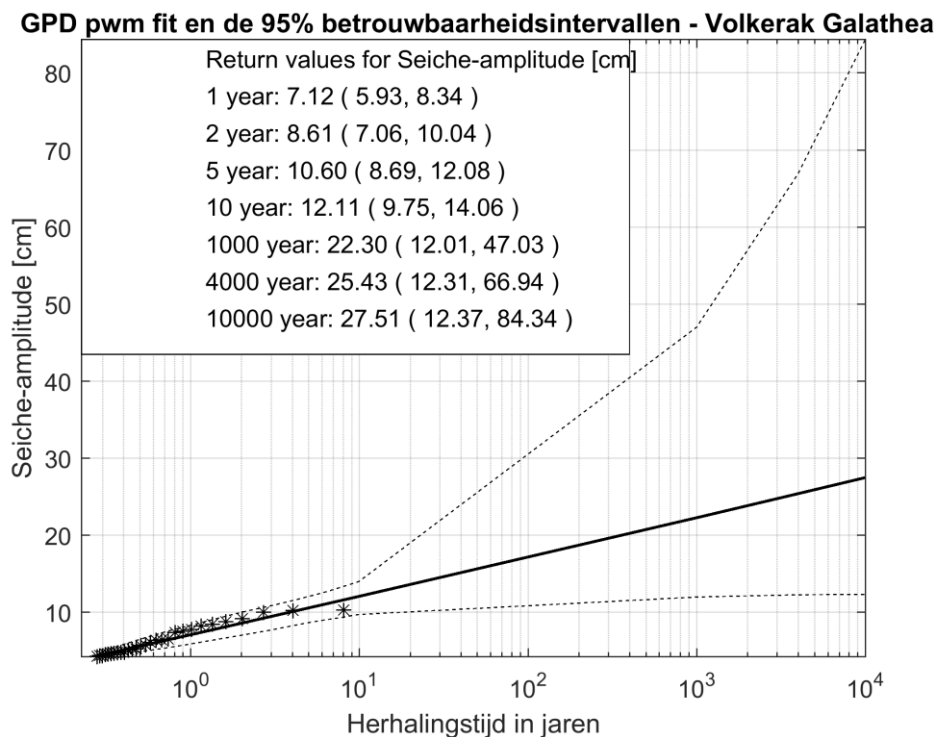


Figuur B.14 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Hevel Grevelingen West.

B.5 Volkerak-Zoommeer

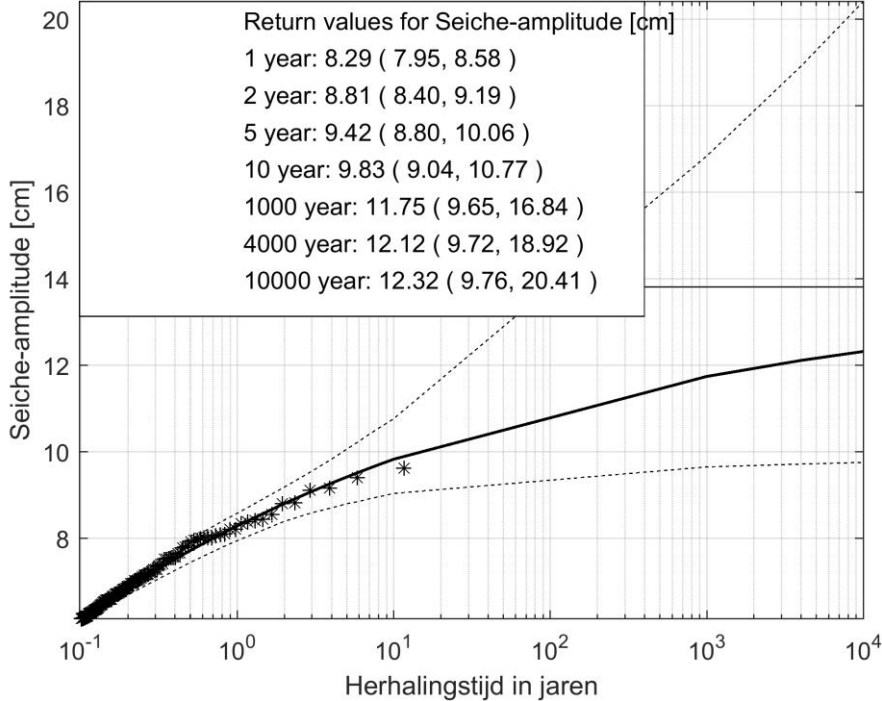


Figuur B.15 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Rak Zuid.



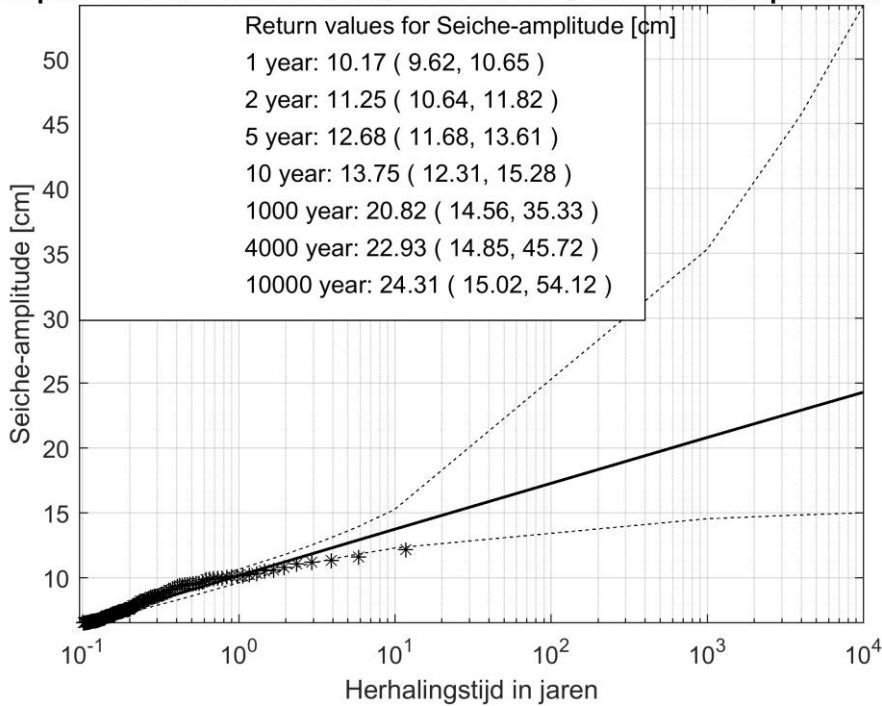
Figuur B.16 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Volkerak Galathea.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Nieuw-Vossemeer



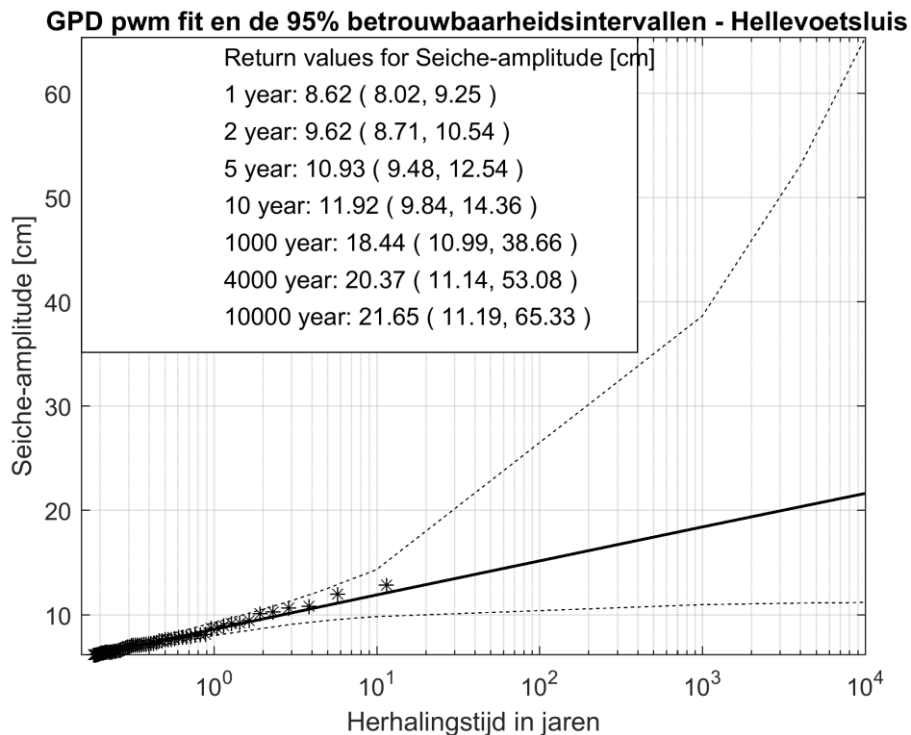
Figuur B.17 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Nieuw-Vossemeer.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Bathse Spuikanaal Inloop

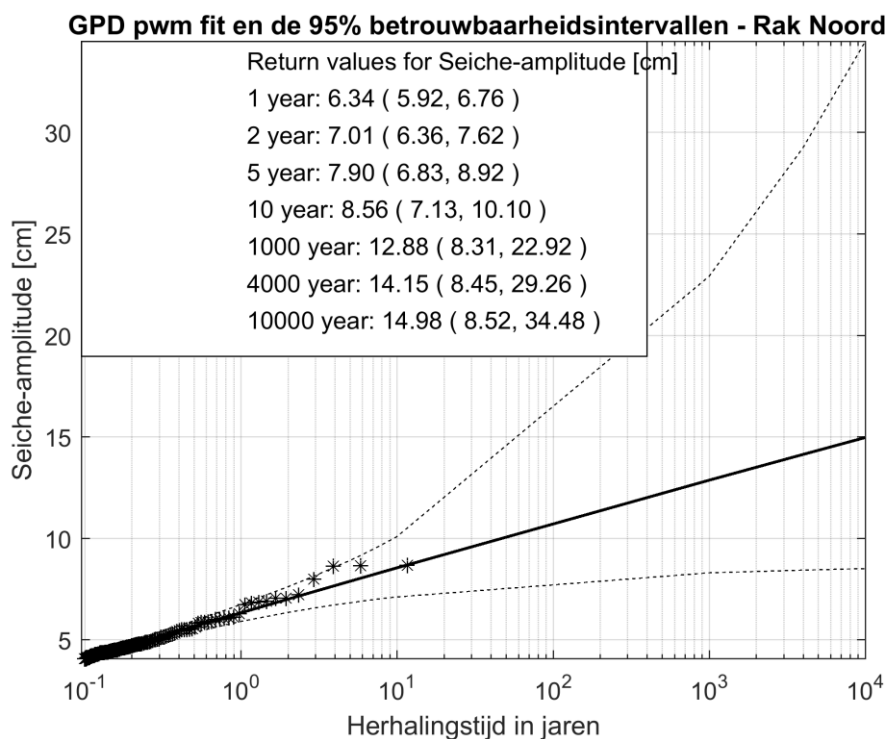


Figuur B.18 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Bathse Spuikanaal Inloop.

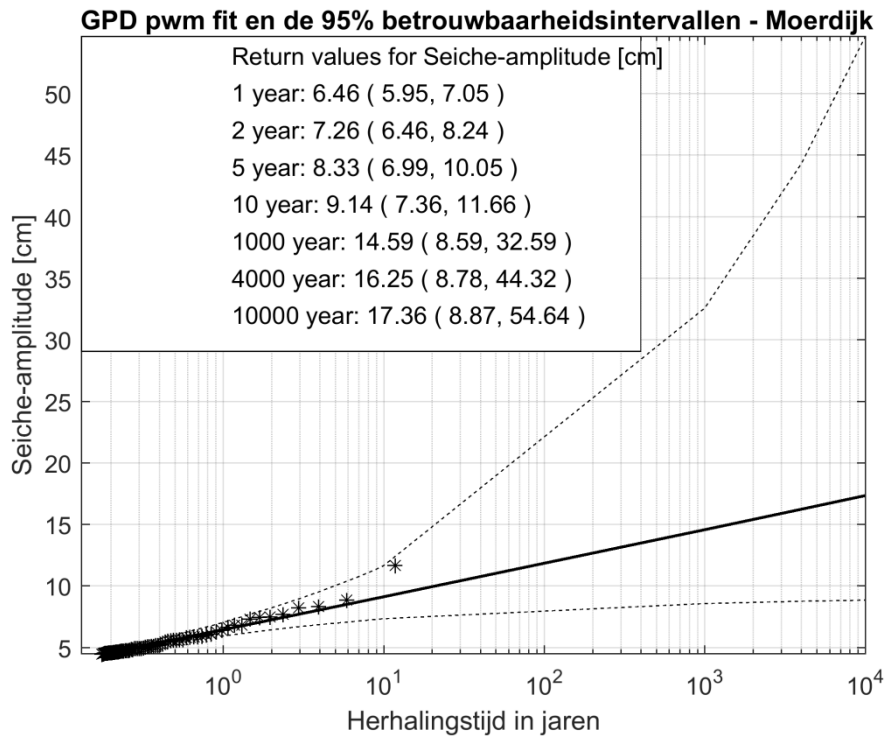
B.6 Haringvliets en Hollands Diep



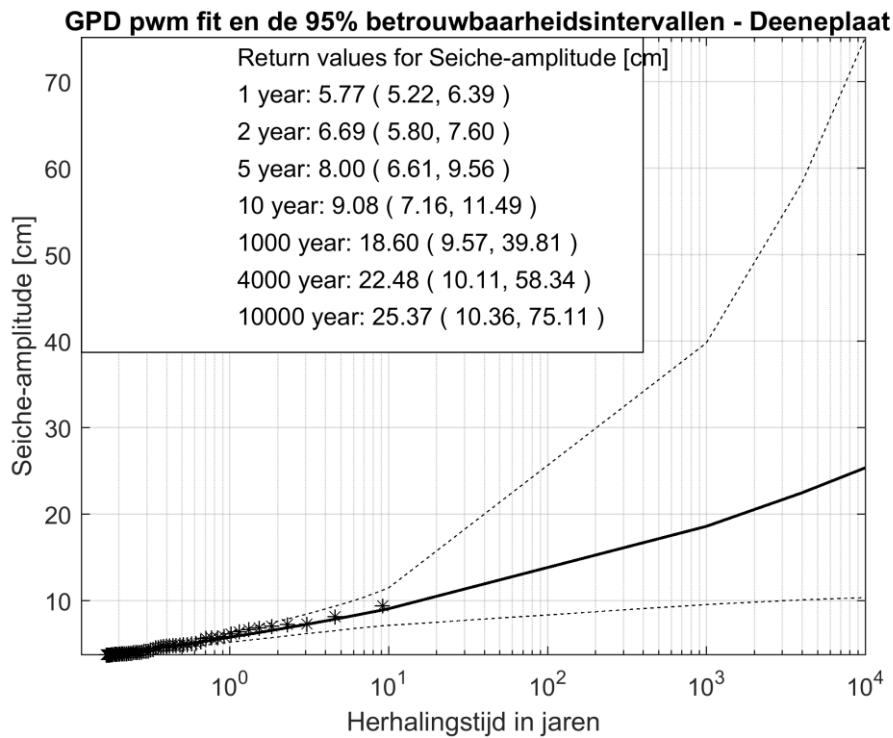
Figuur B.19 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Hellevoetsluis.



Figuur B.20 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Rak Noord.

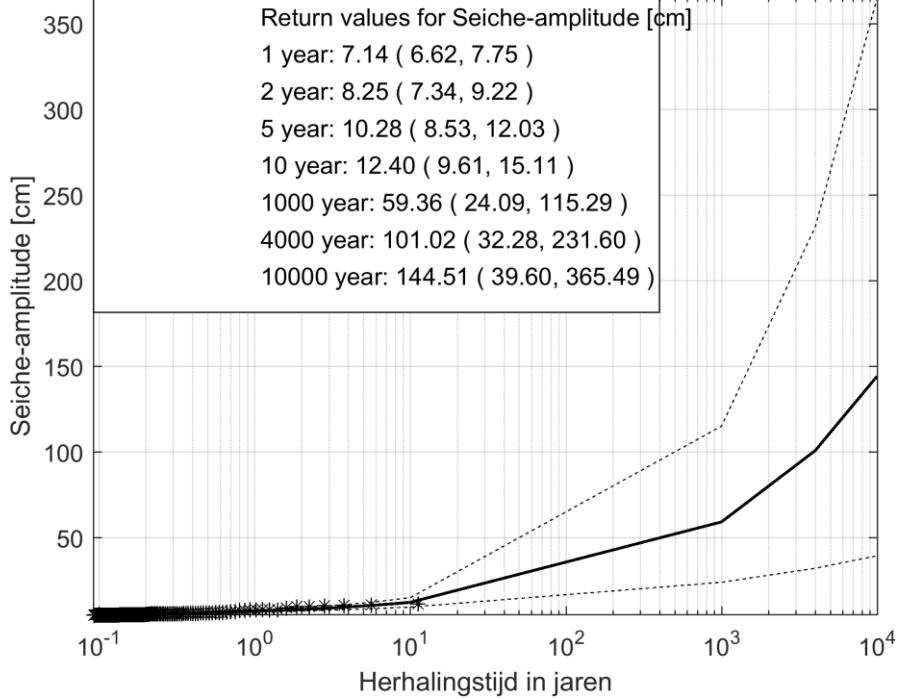


Figuur B.21 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Moerdijk.

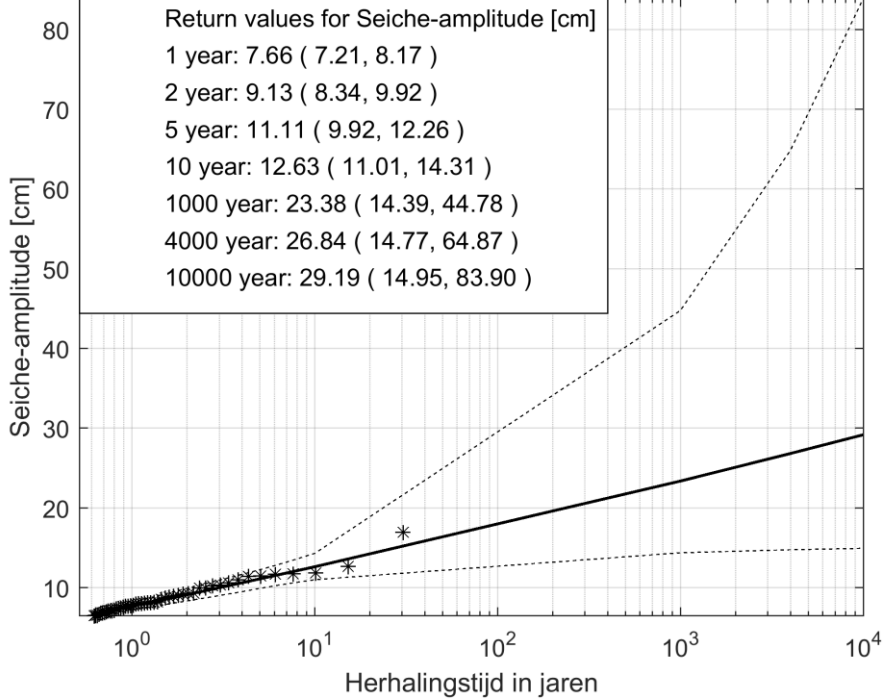


Figuur B.22 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Deeneplaat.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Werkendam Buiten



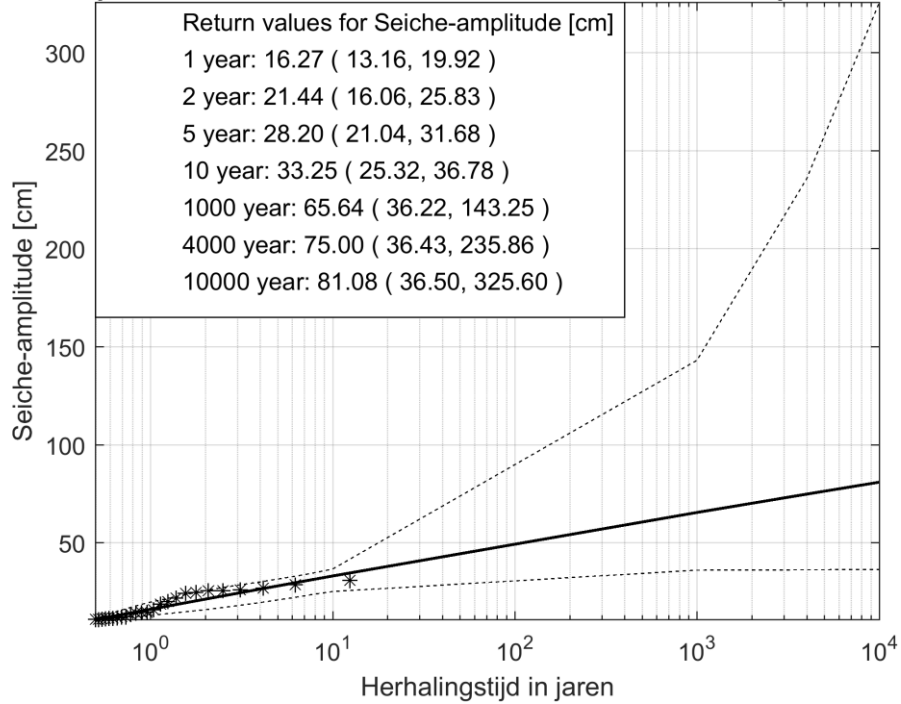
GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Werkendam Buiten



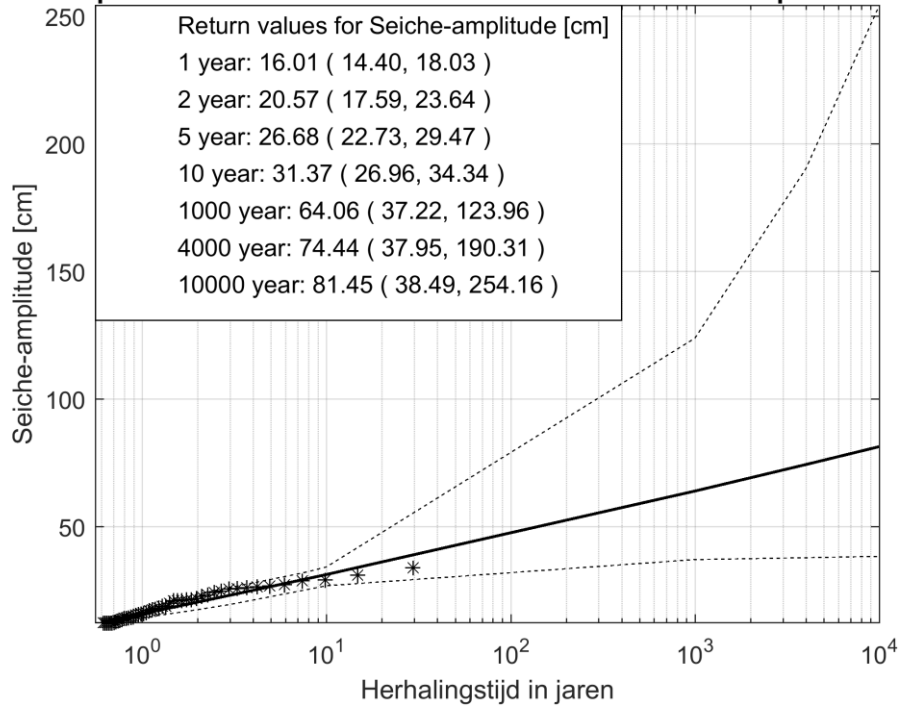
Figuur B.23 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Werkendam Buiten. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

B.7 Hollandsche IJssel

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Krimpen a/d IJssel

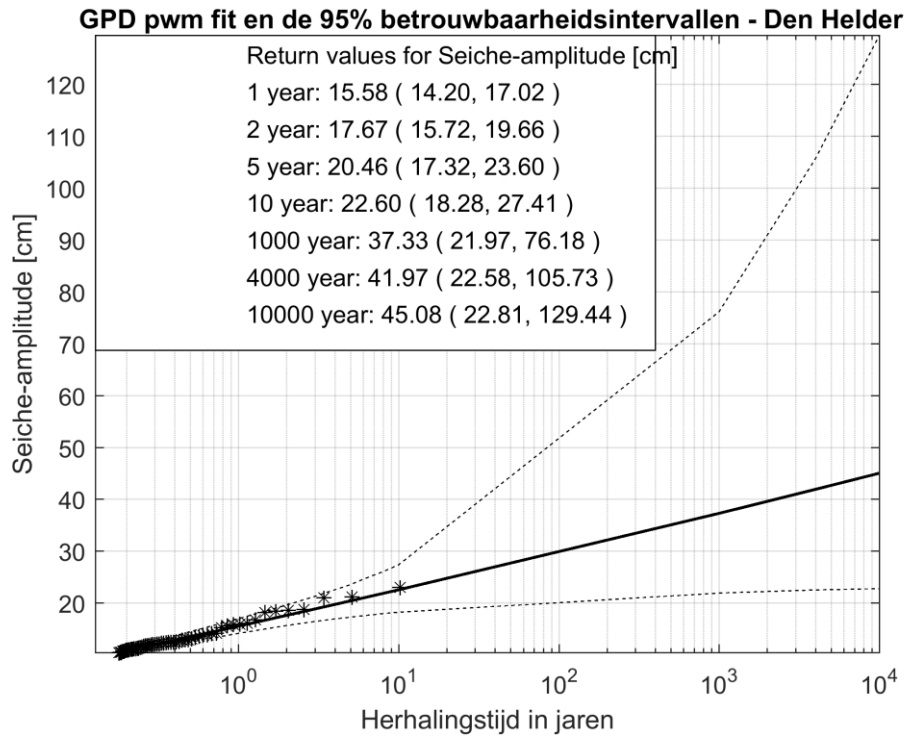


GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Krimpen a/d IJssel



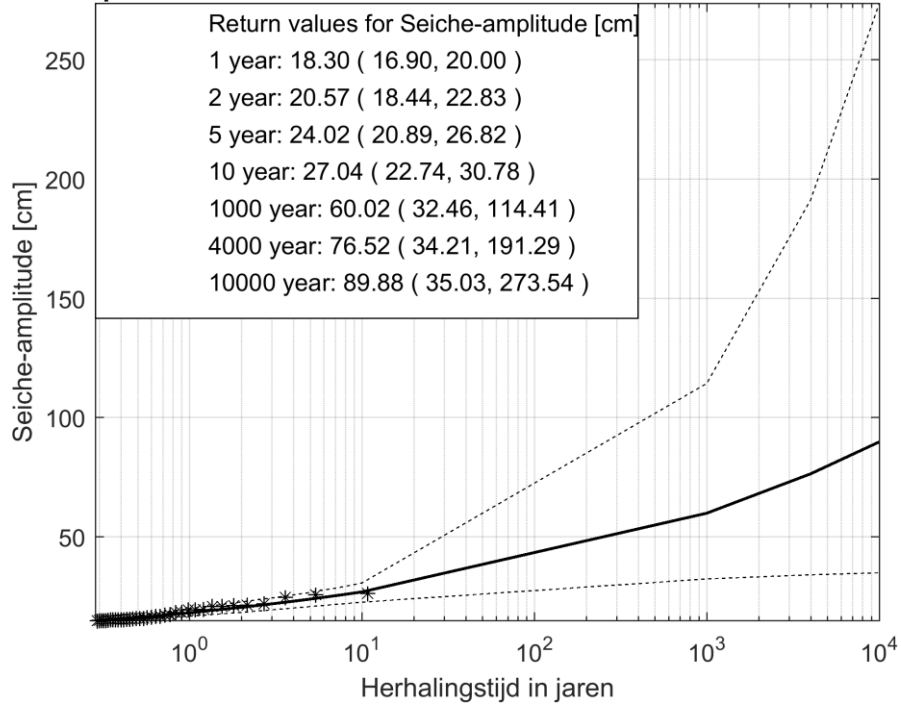
Figuur B.24 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Krimpen aan den IJssel. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

B.8 Waddenzee

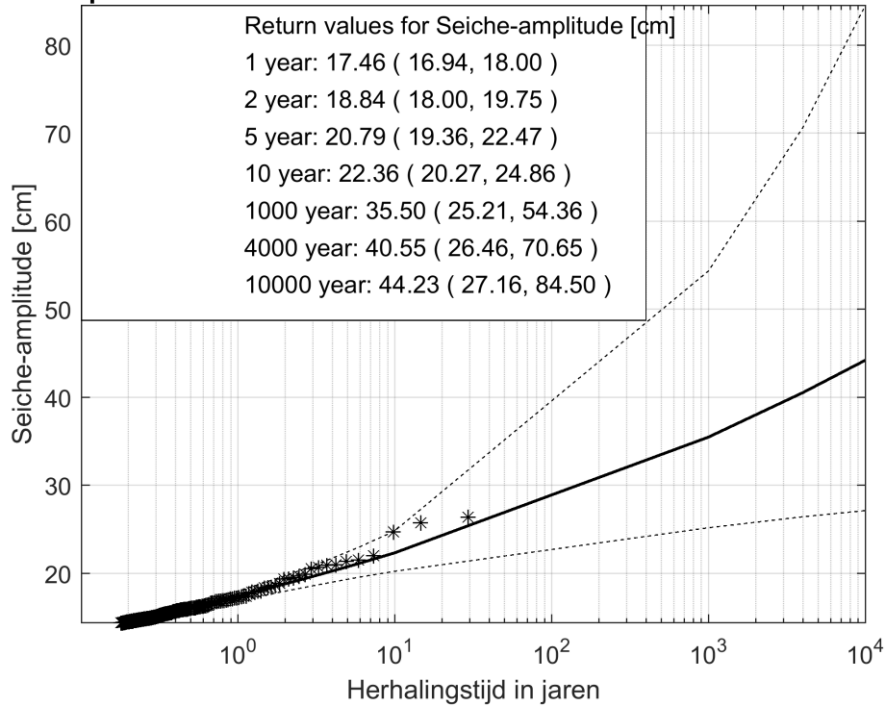


Figuur B.25 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Den Helder.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Den Oever Buiten

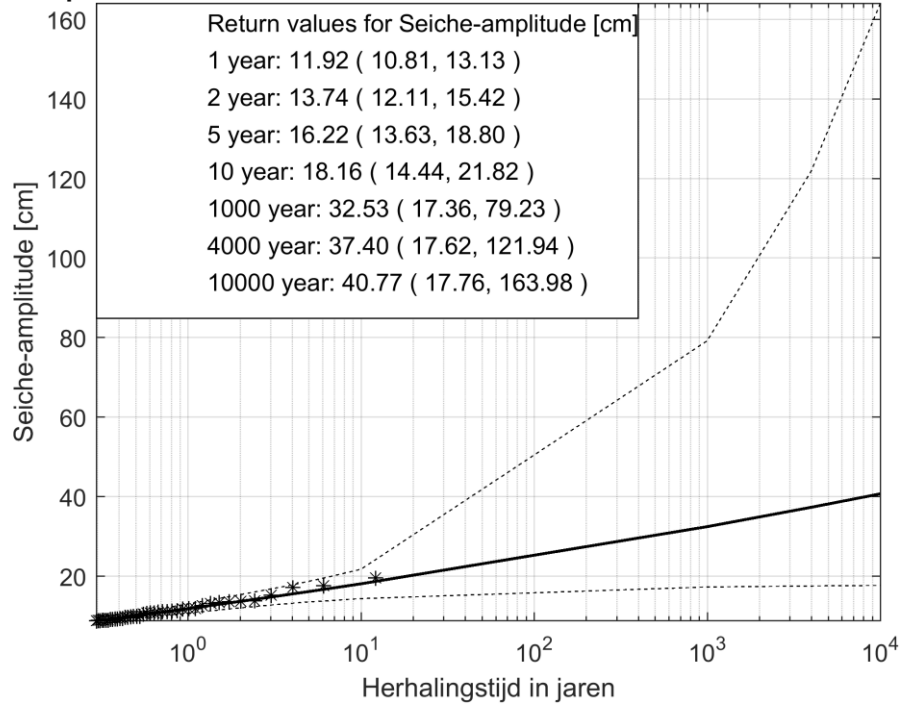


GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Den Oever Buiten

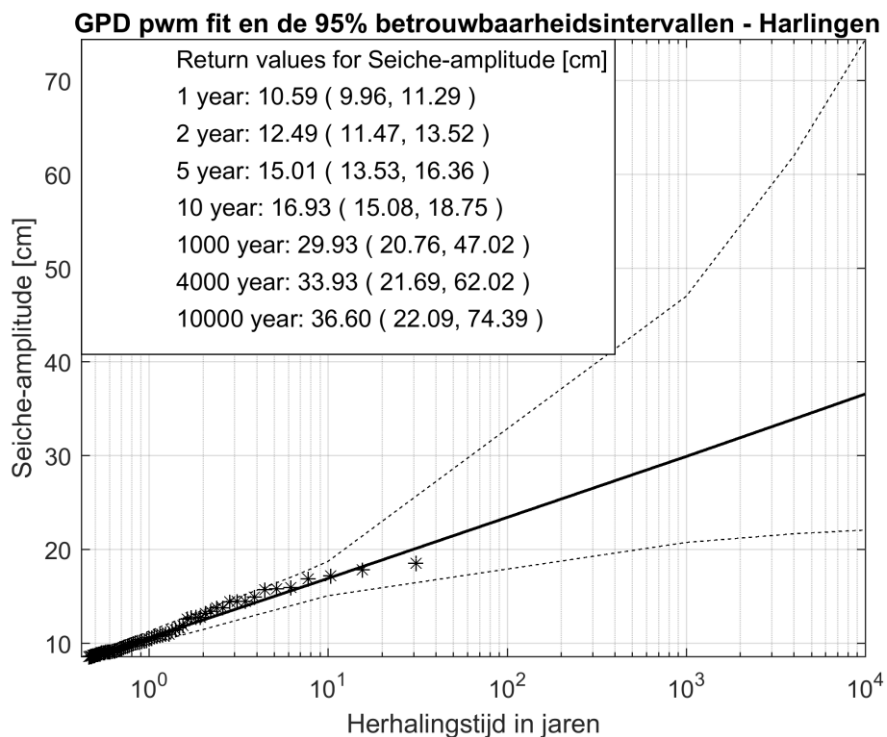
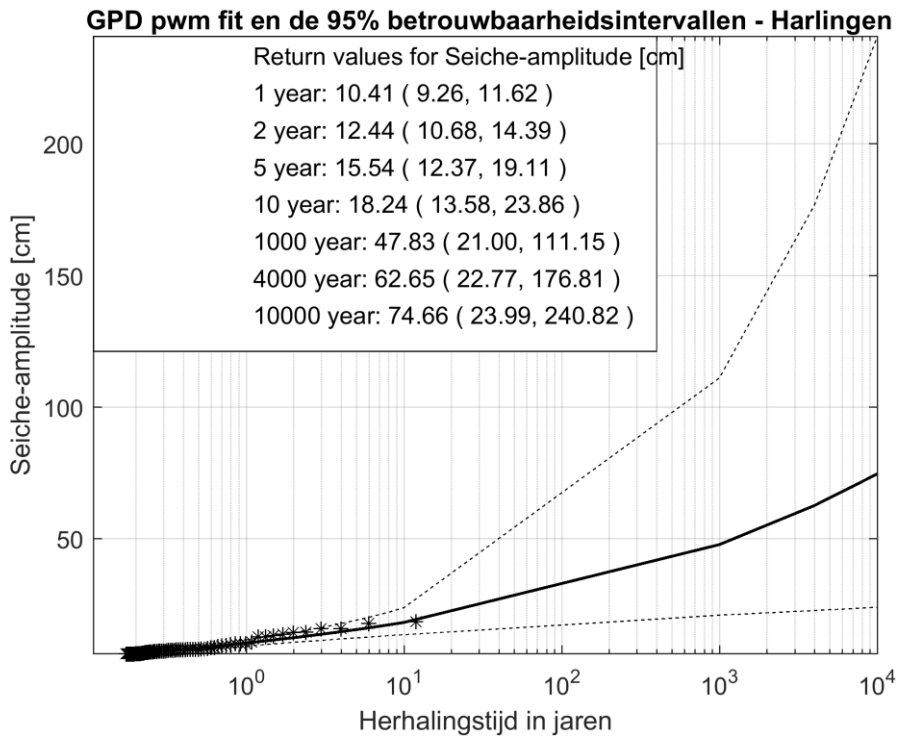


Figuur B.26 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Den Oever Buiten. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

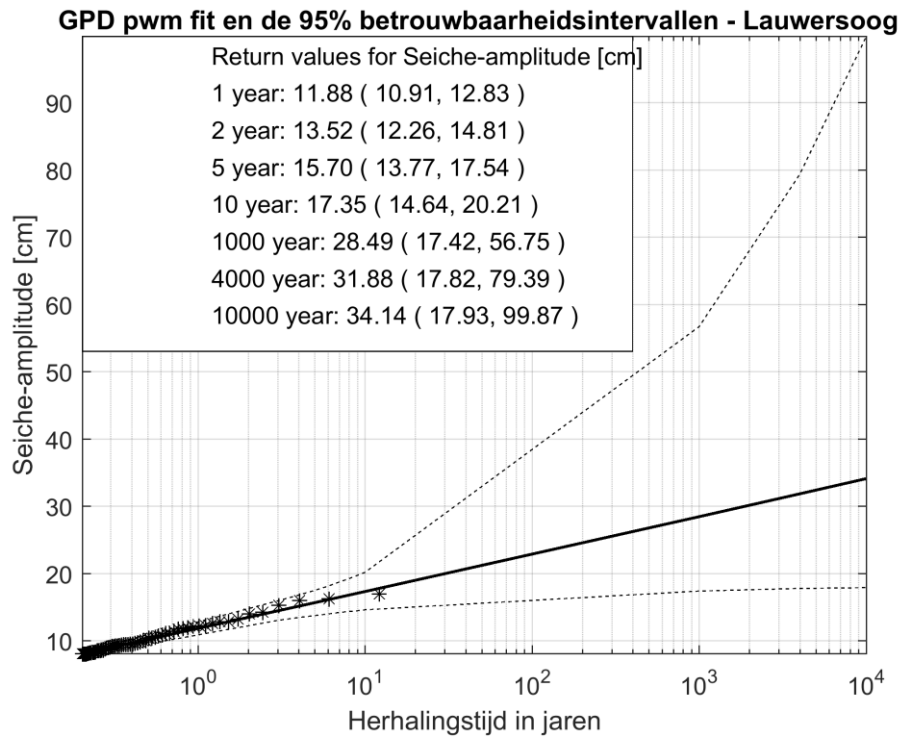
GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Kornwerderzand Buiten



Figuur B.27 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kornwerderzand Buiten.

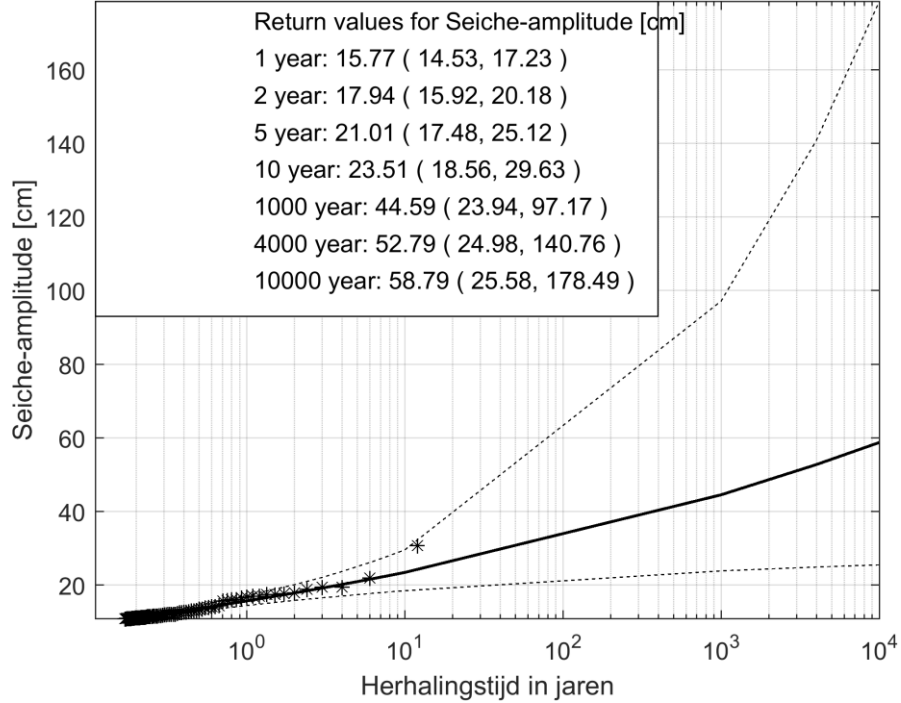


Figuur B.28 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Harlingen. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

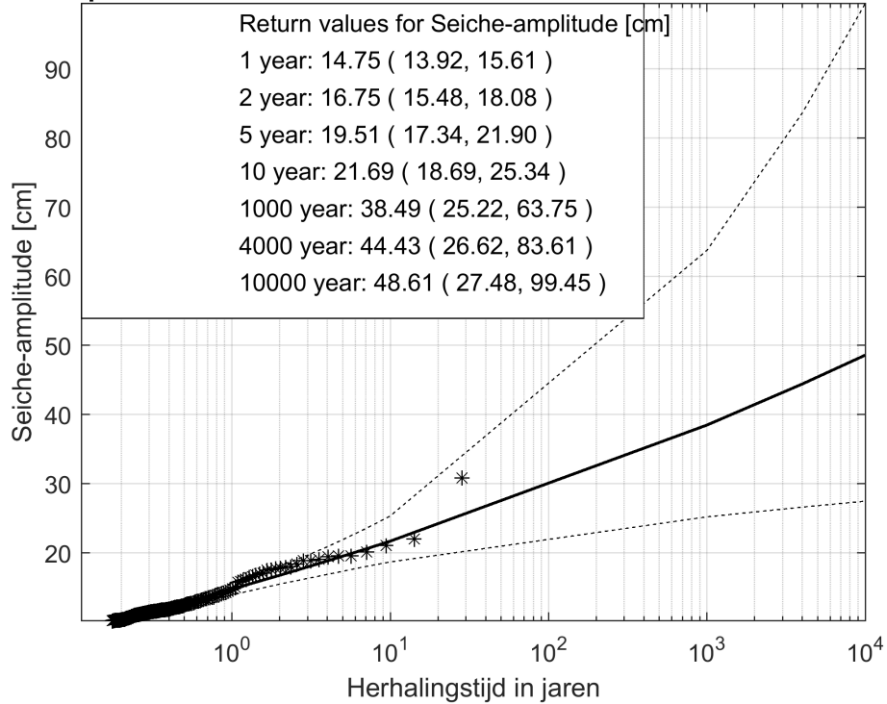


Figuur B.29 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Lauwersoog.

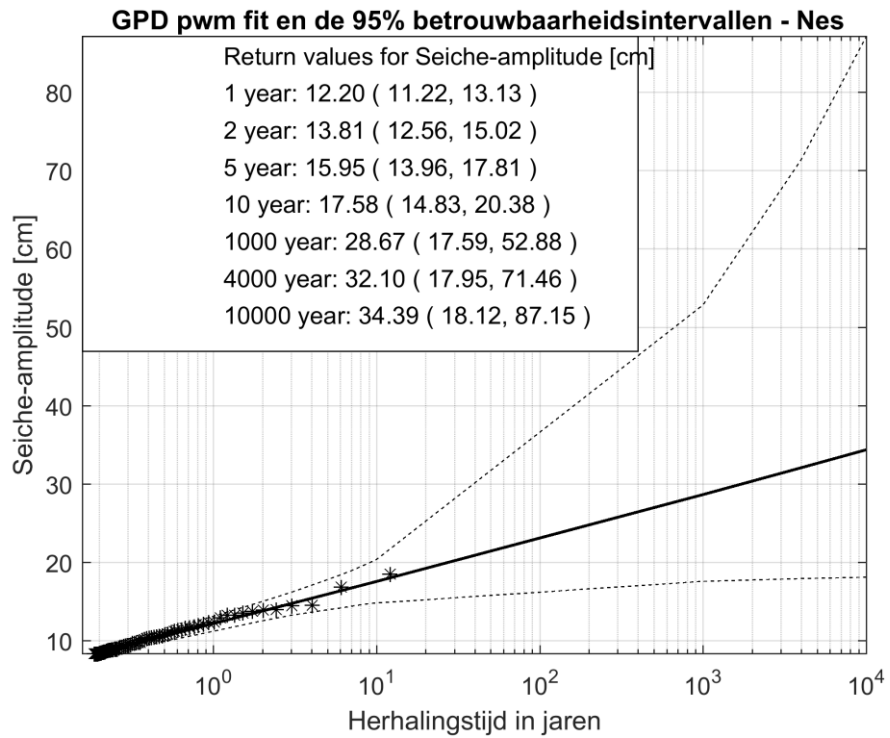
GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Schiermonnikoog



GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Schiermonnikoog

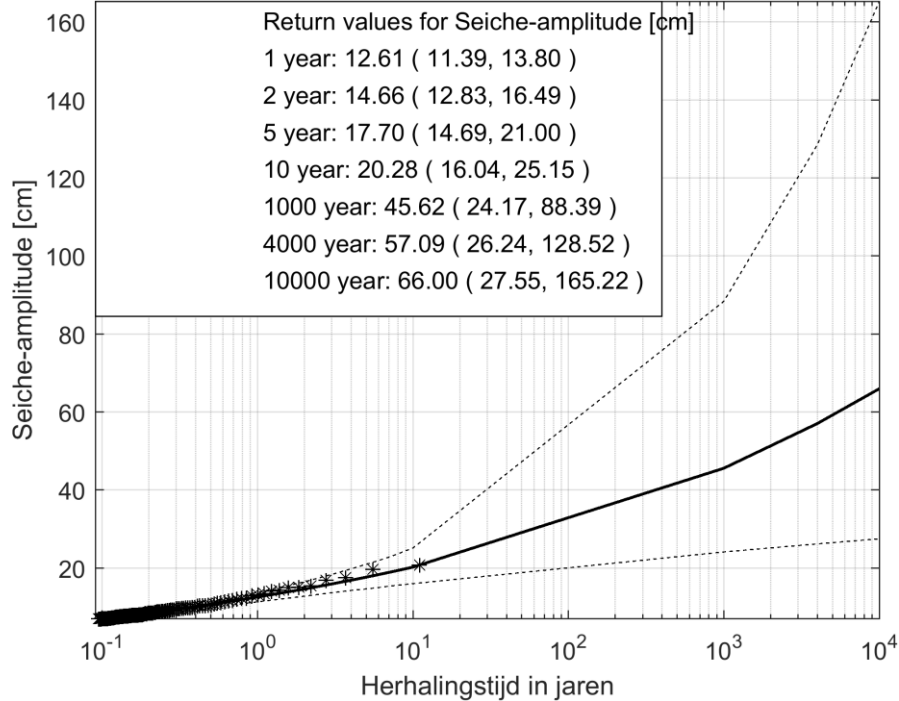


Figuur B.30 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Schiermonnikoog. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

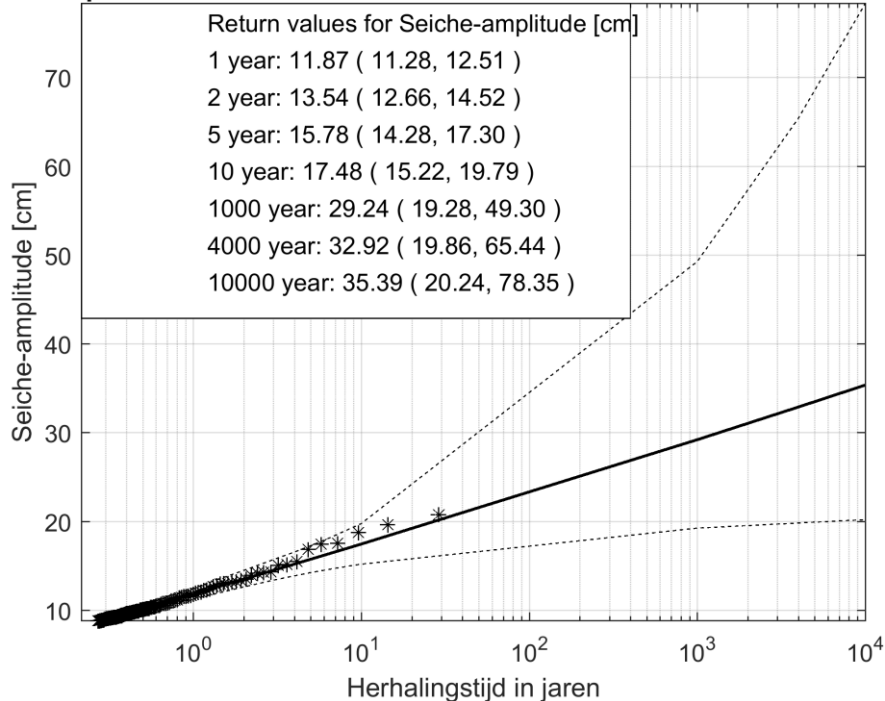


Figuur B.31 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Nes.

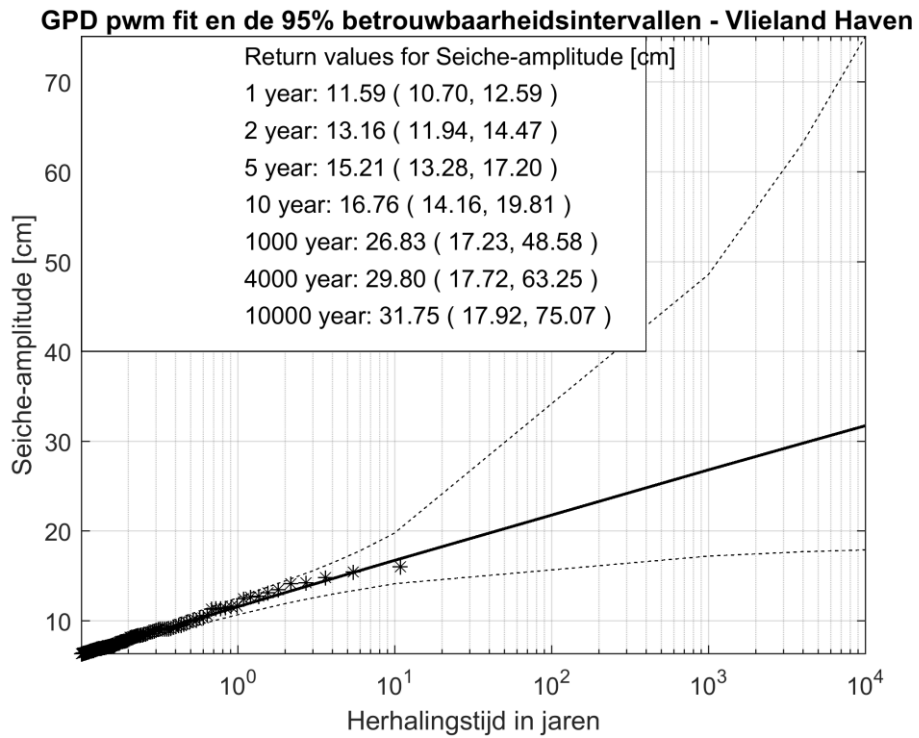
GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - West-Terschelling



GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - West-Terschelling

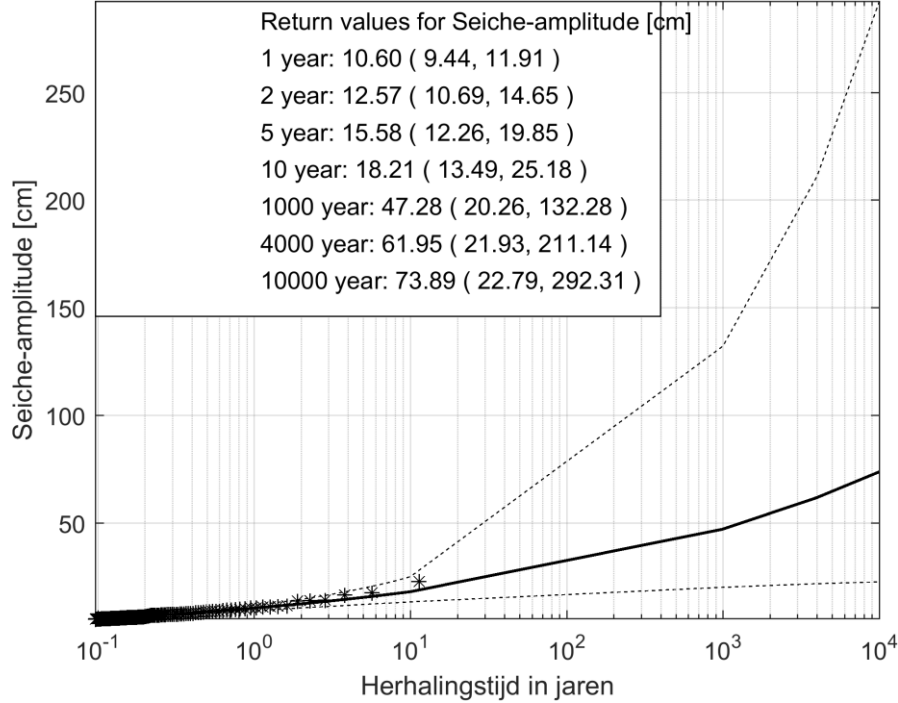


Figuur B.32 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie West-Terschelling. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

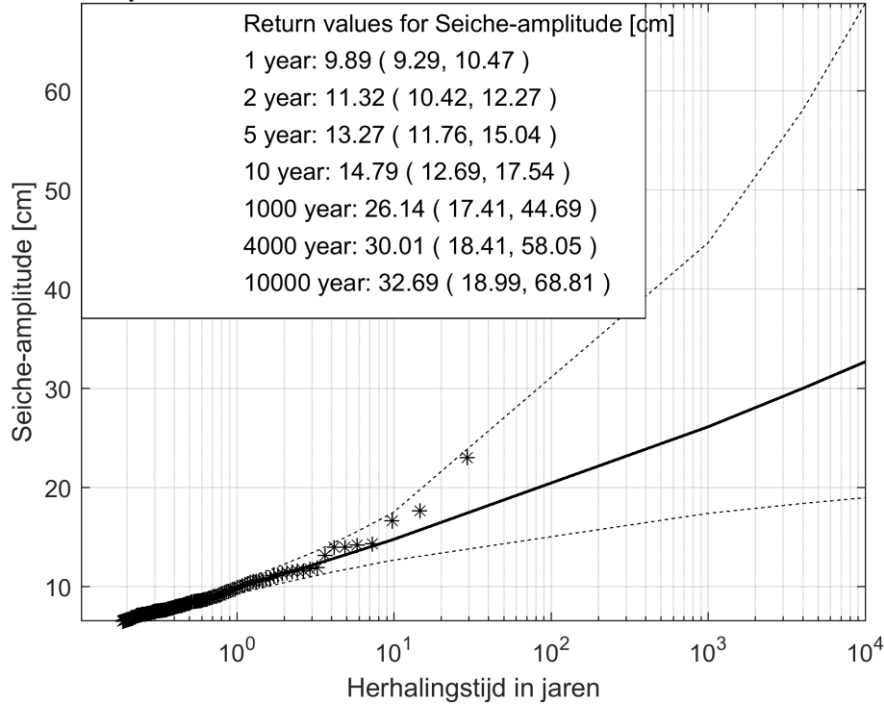


Figuur B.33 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Vlieland Haven.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Oudeschild

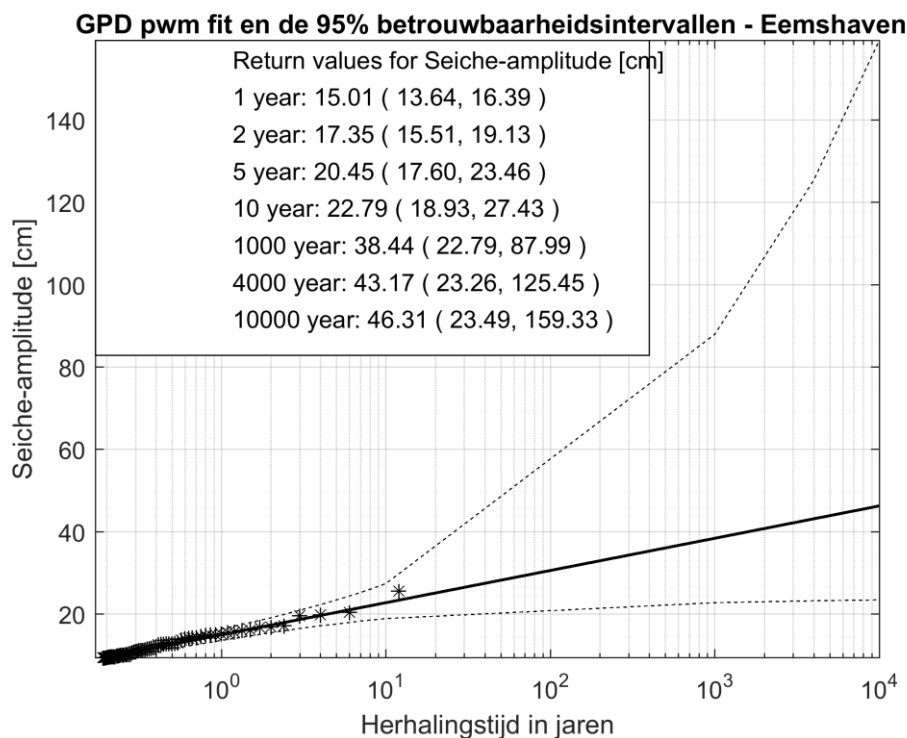


GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Oudeschild

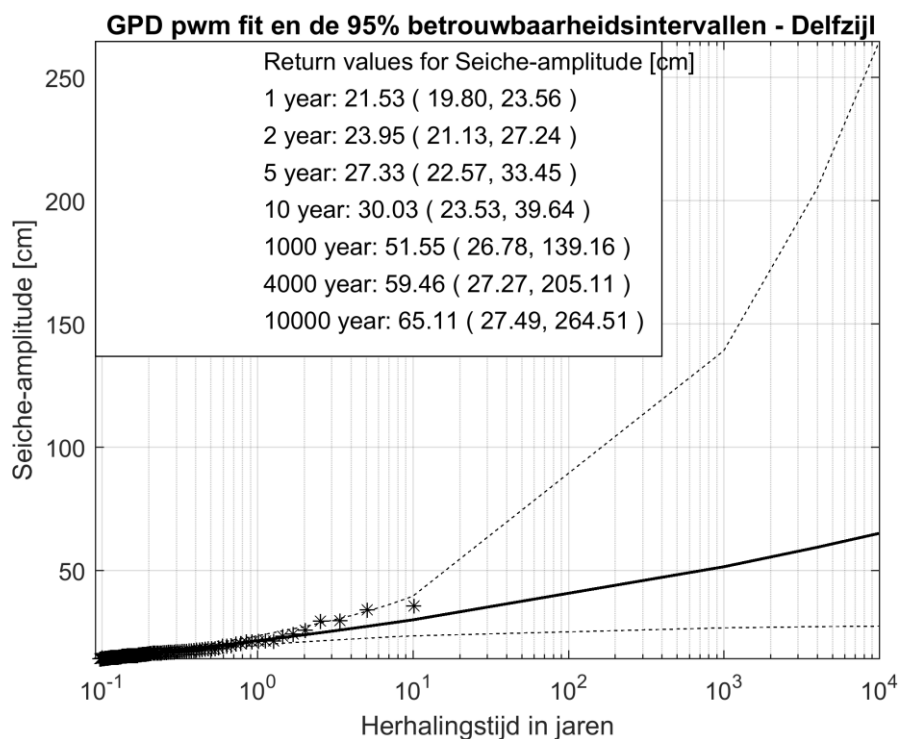


Figuur B.34 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Oudeschild. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

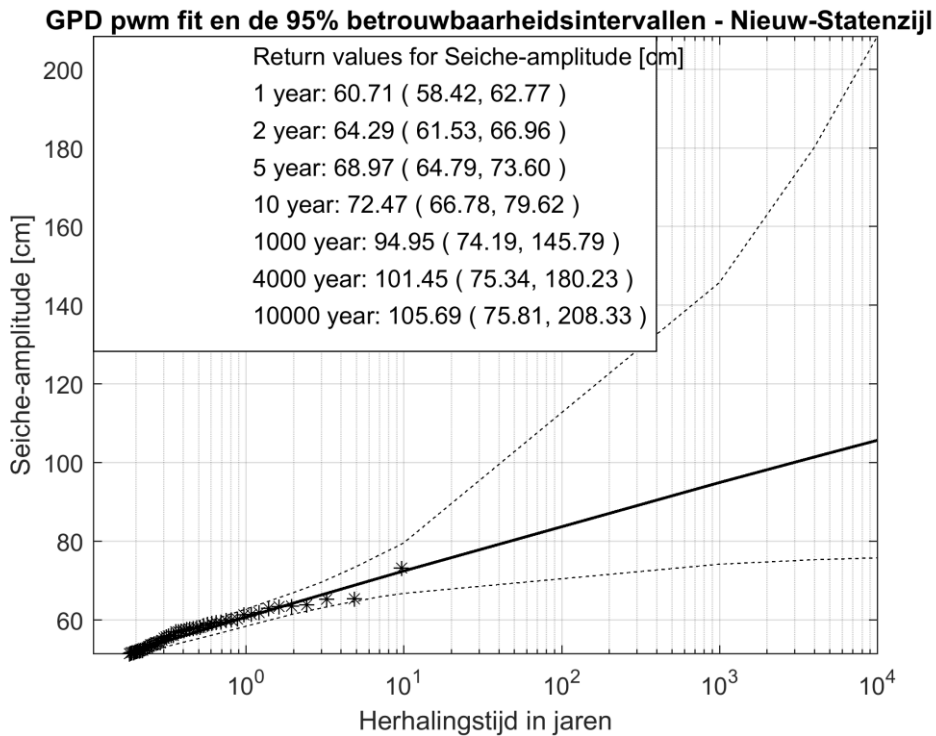
B.9 Eems-Dollard



Figuur B.35 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Eemshaven.

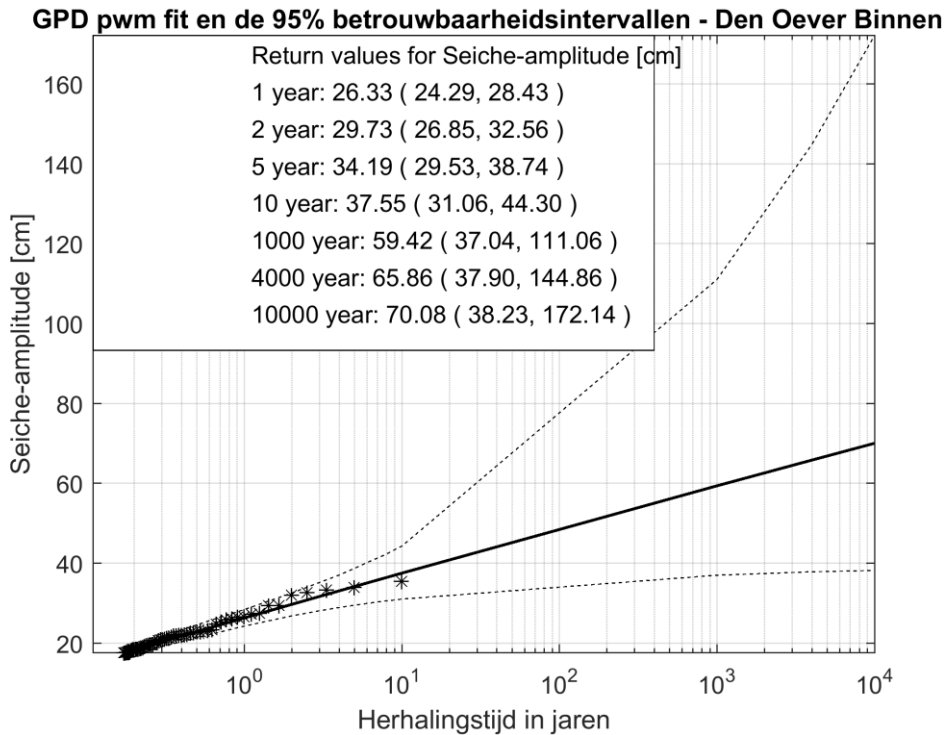


Figuur B.36 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Delfzijl.



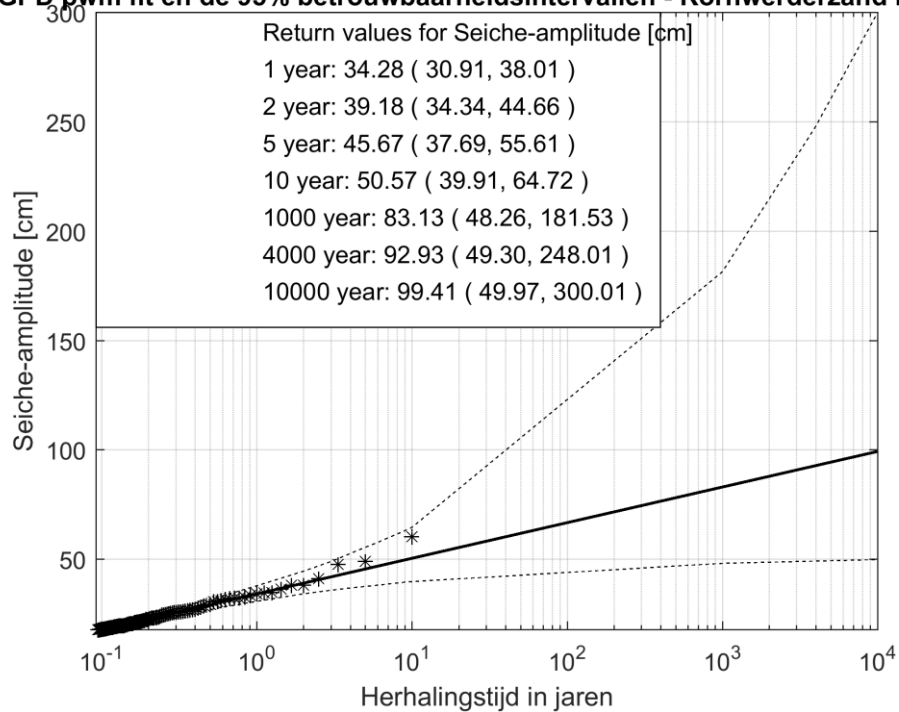
Figuur B.37 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Nieuw Statenzijl.

B.10 IJsselmeer



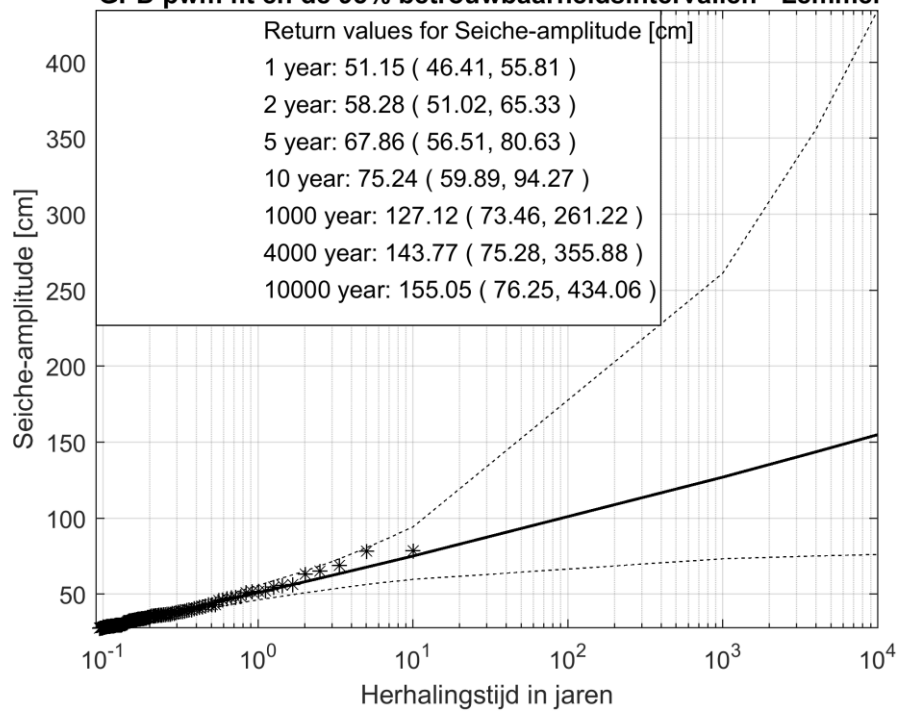
Figuur B.38 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Den Oever Binnen.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Kornwerderzand Binnen



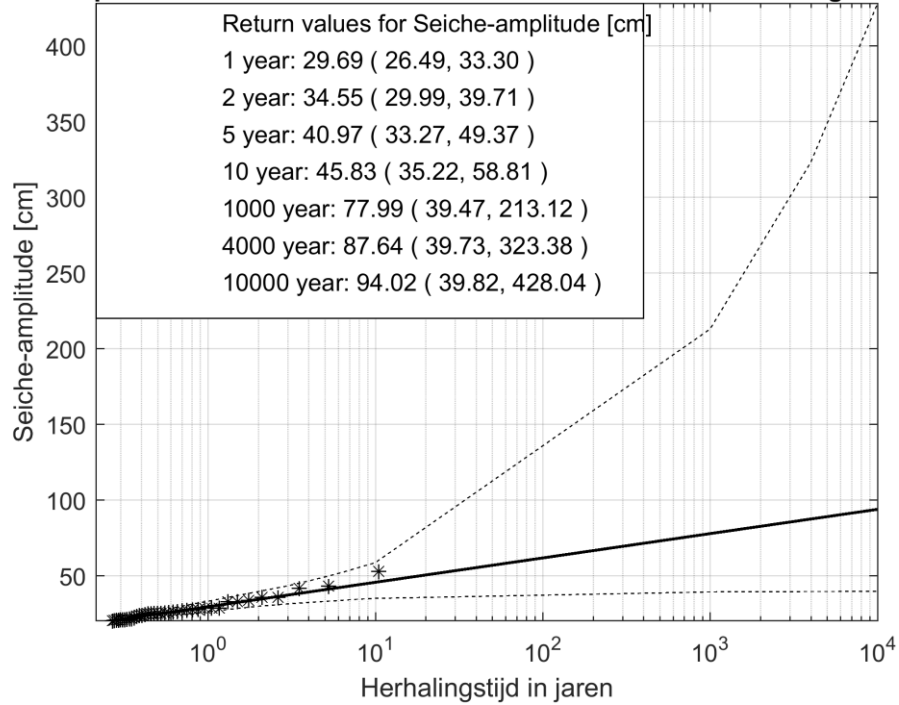
Figuur B.39 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kornwerderzand Binnen.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Lemmer

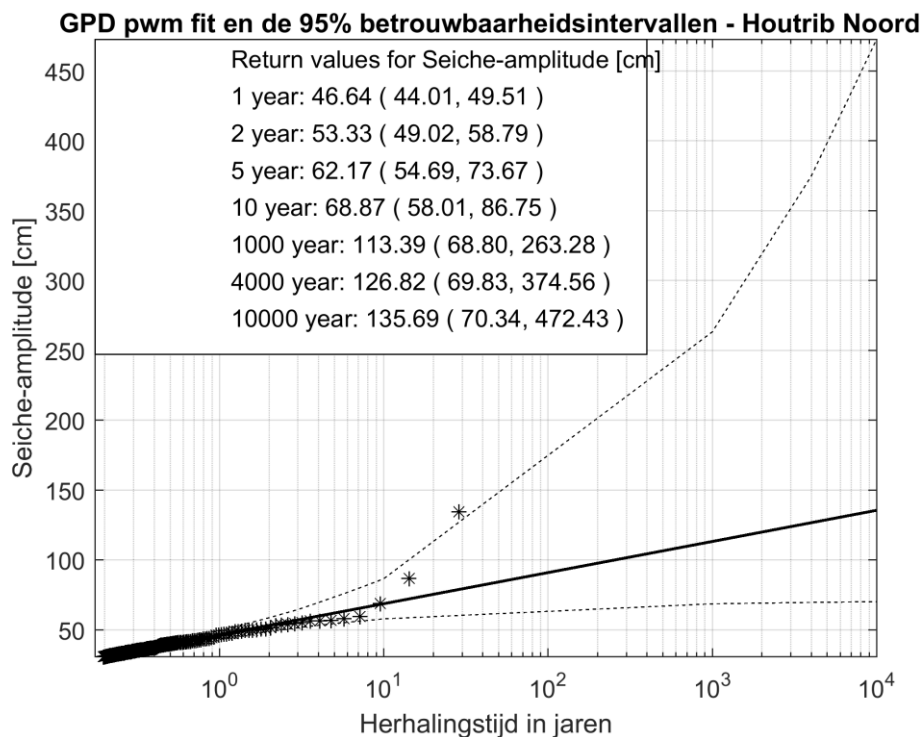
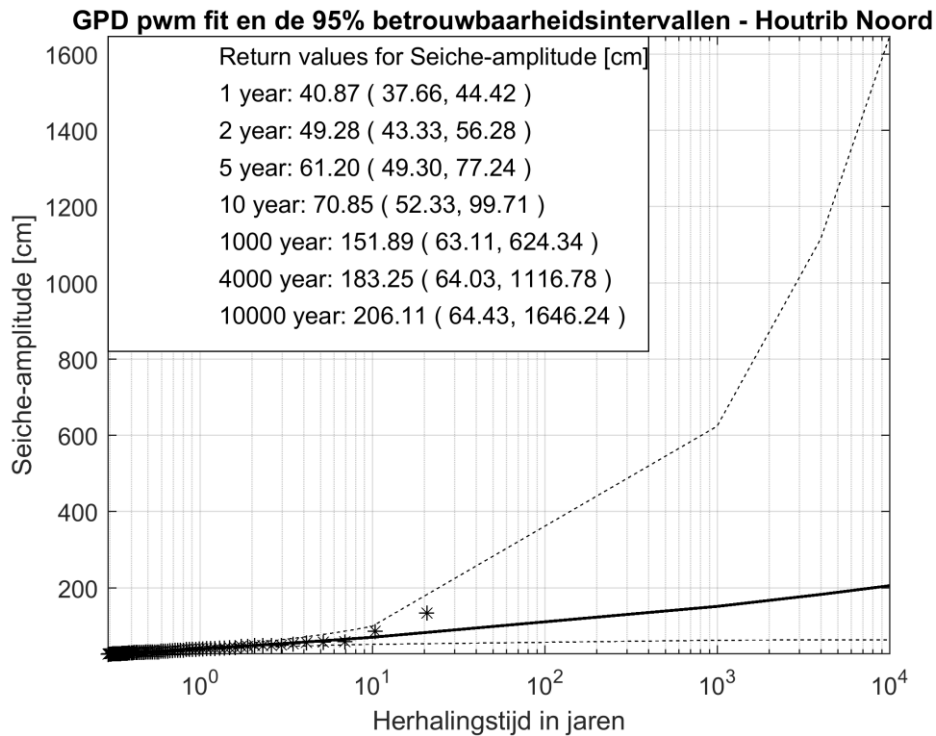


Figuur B.40 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Lemmer.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Krabbersgat Noord

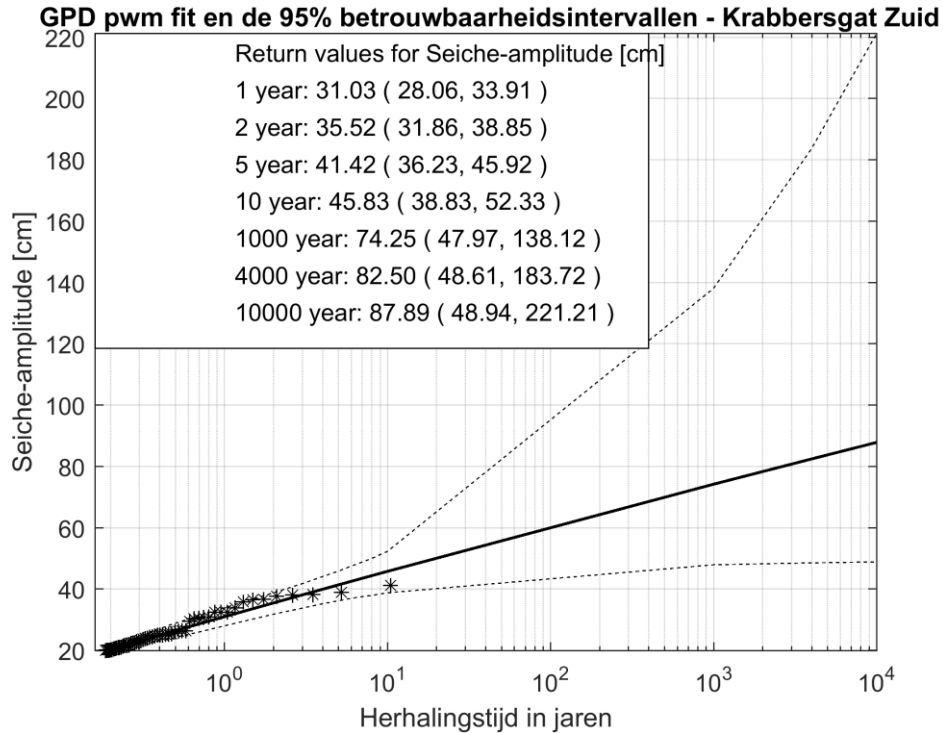


Figuur B.41 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Krabbersgat Noord.

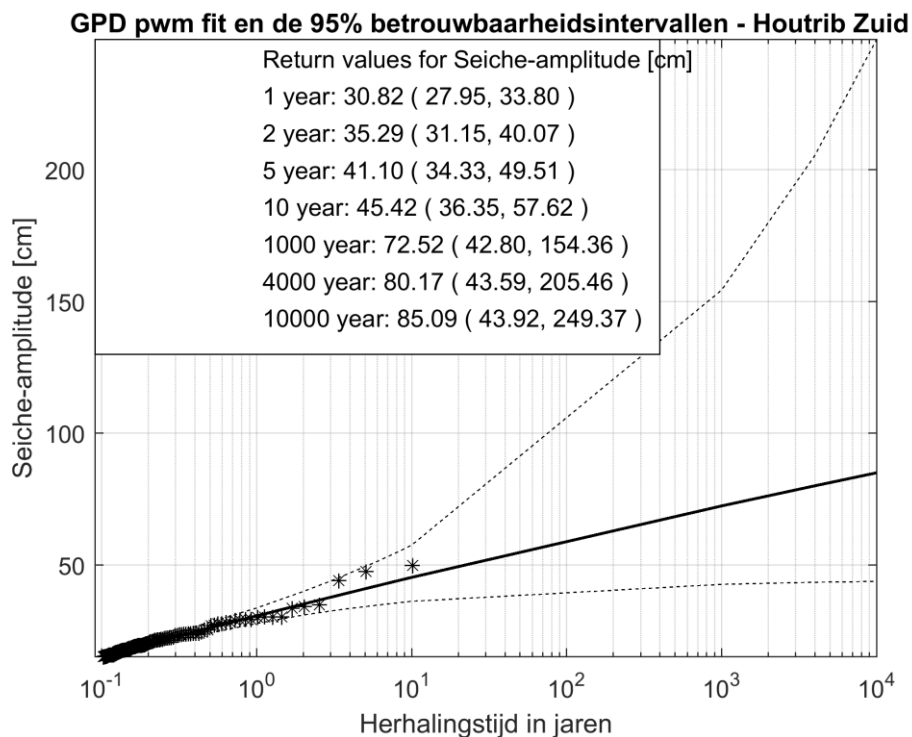


Figuur B.42 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Houtrib Noord. Bovenste kader: fit op basis van 10 jaar data. Onderste kader: fit op basis van alle beschikbare data.

B.11 Markermeer

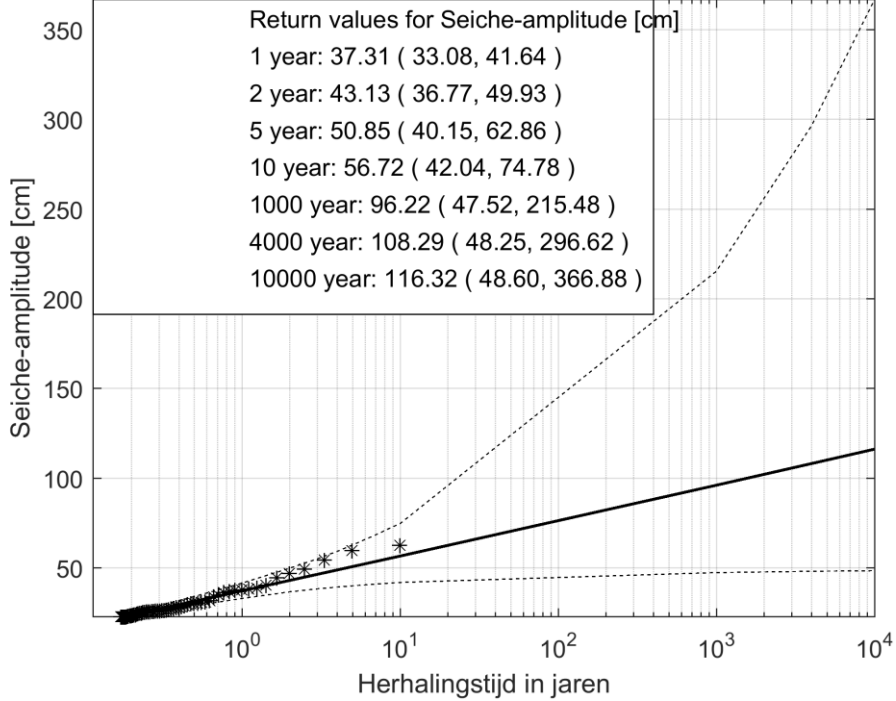


Figuur B.43 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Krabbersgat Zuid.



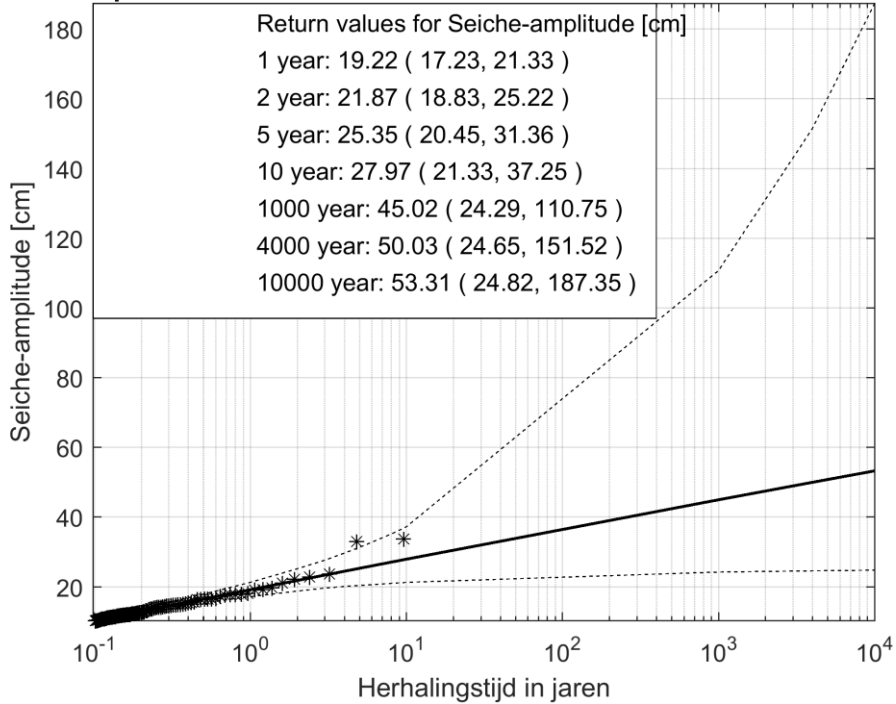
Figuur B.44 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Houtrib Zuid.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Schellingwouderbrug



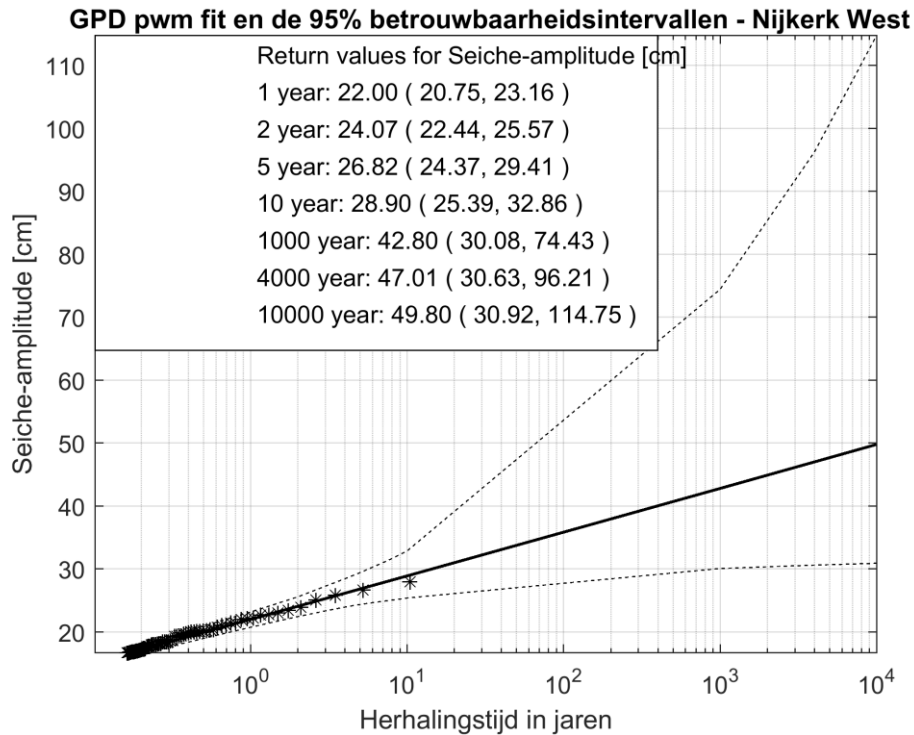
Figuur B.45 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Schellingwouderbrug.

GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Hollandse Brug

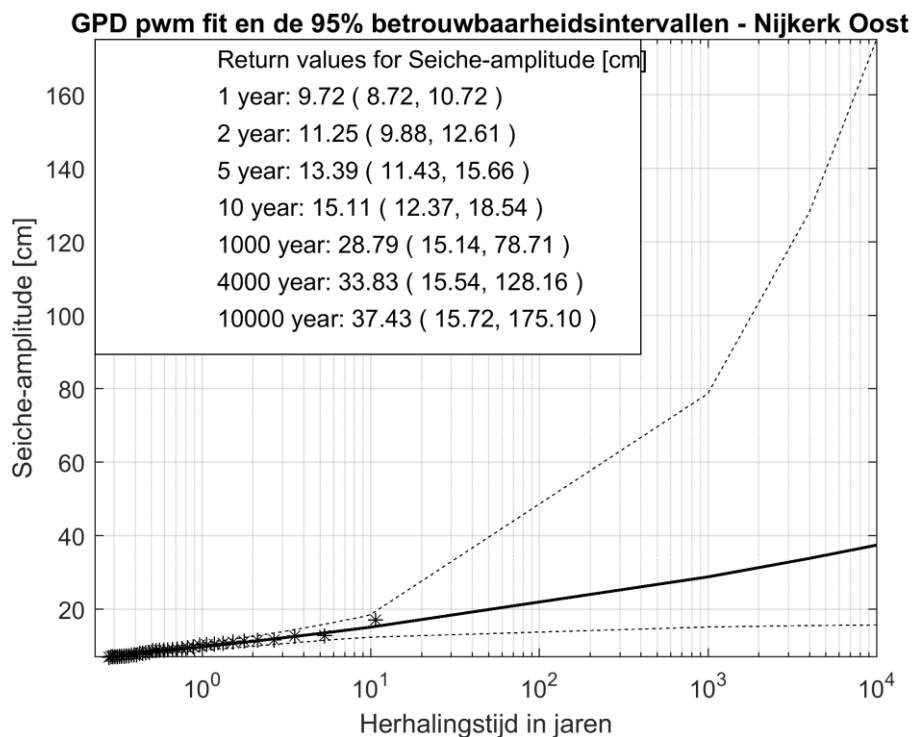


Figuur B.46 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Hollandse Brug.

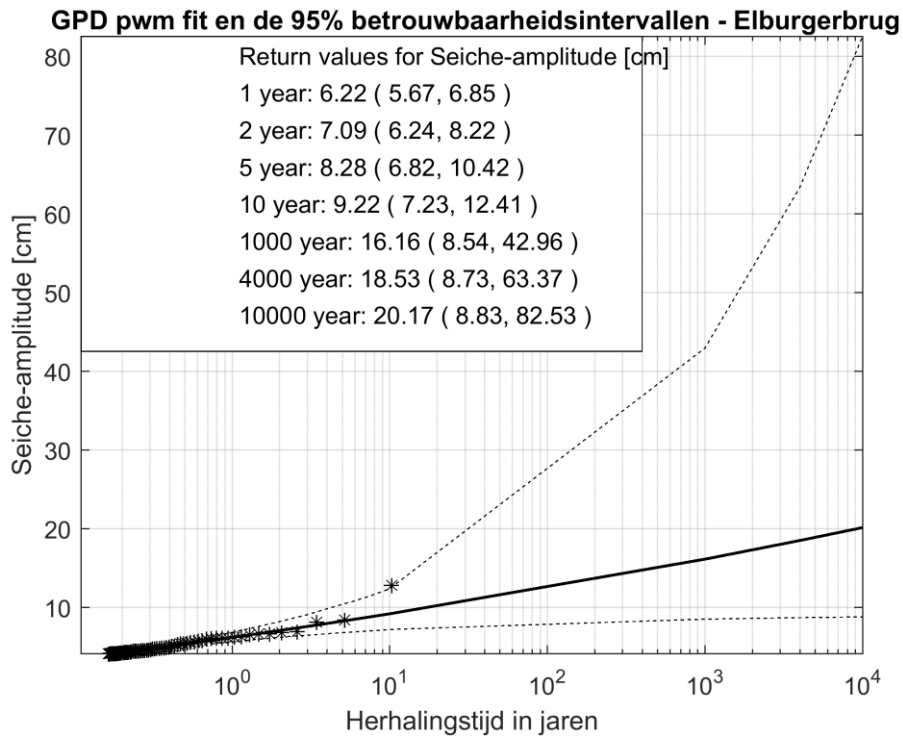
B.12 Randmeren



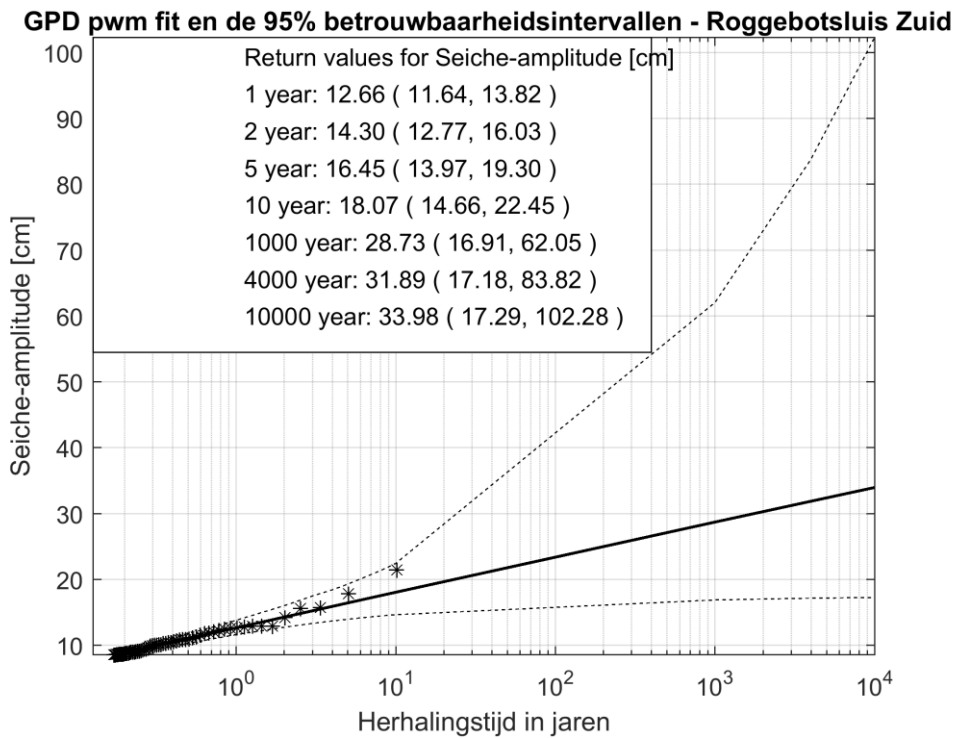
Figuur B.47 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Nijkerk West.



Figuur B.48 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Nijkerk Oost.

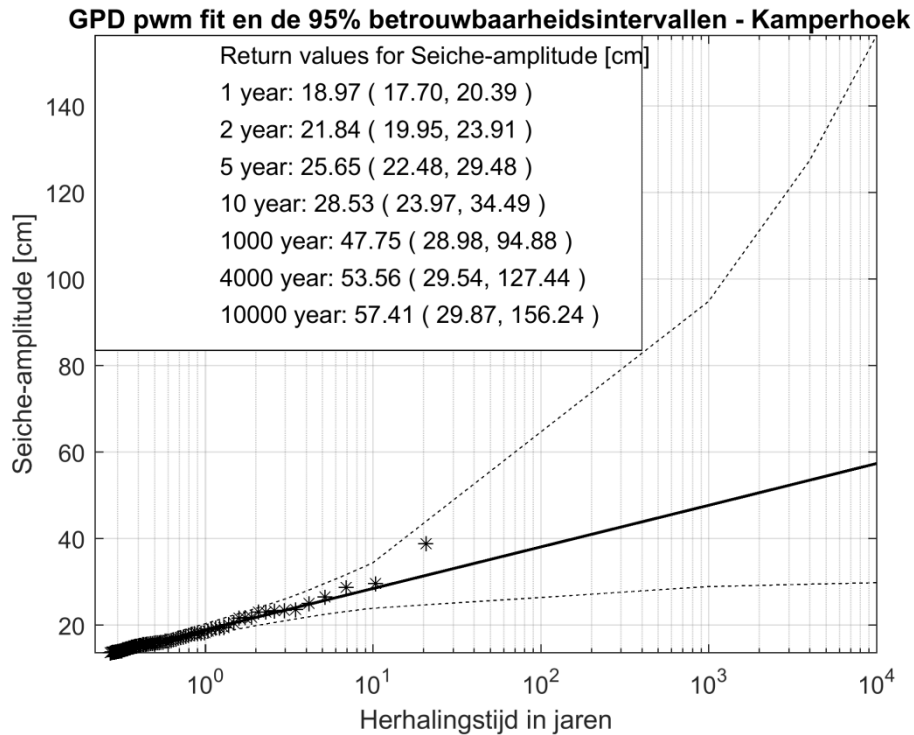


Figuur B.49 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Elburgerbrug.

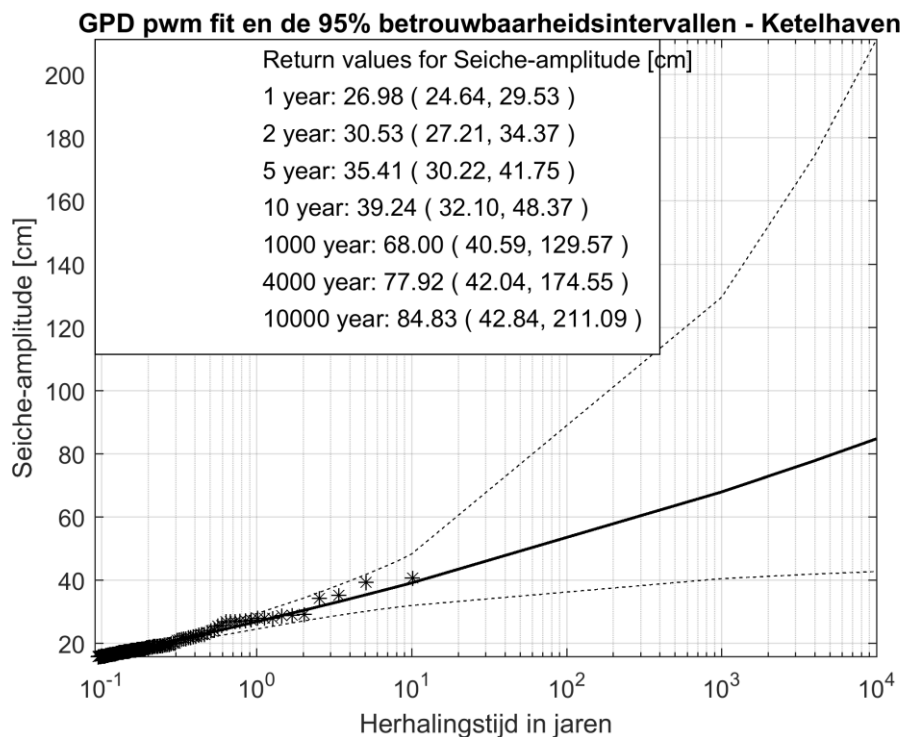


Figuur B.50 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Roggebotsluis Zuid.

B.13 Ketelmeer

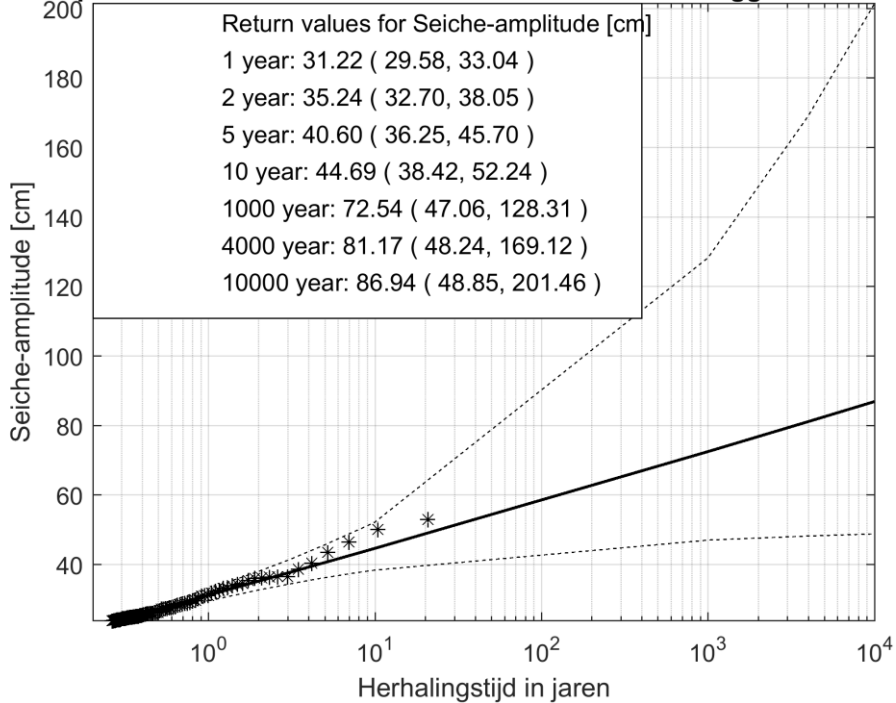


Figuur B.51 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kamperhoek.



Figuur B.52 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Ketelhaven.

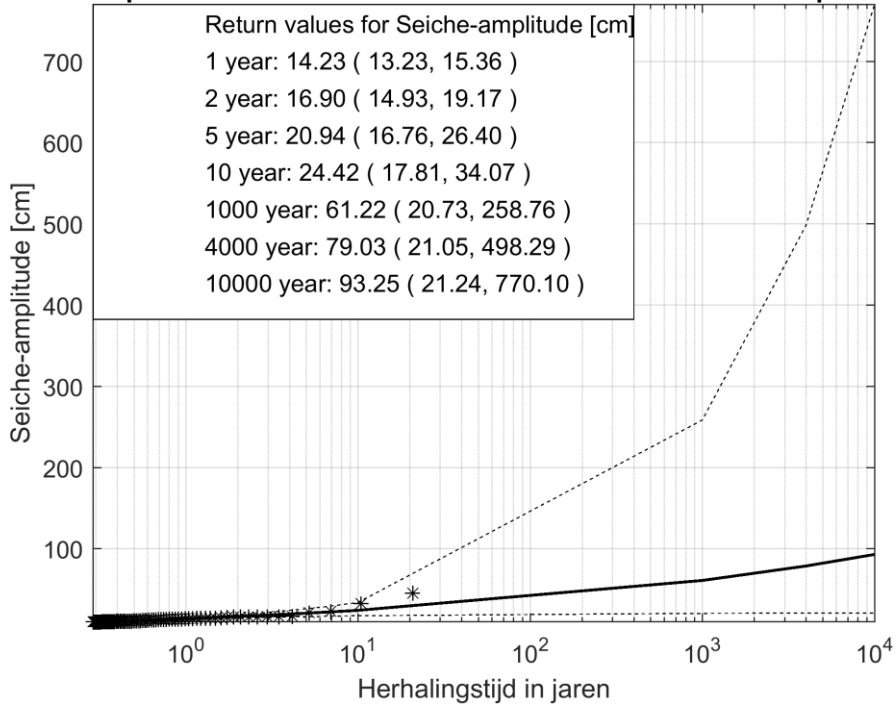
GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Roggebotsluis Noord



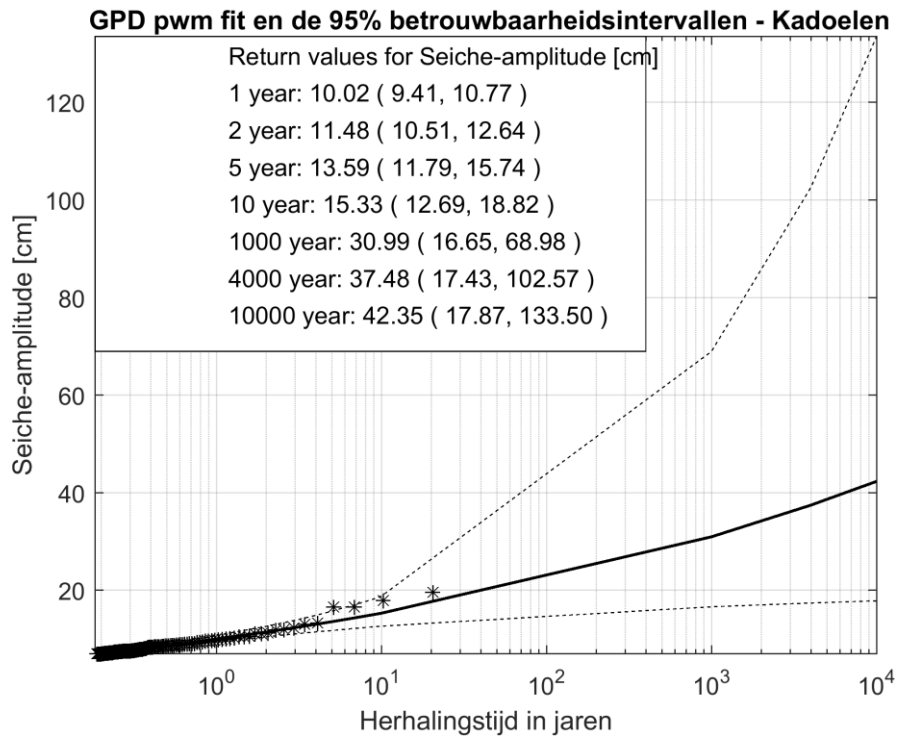
Figuur B.53 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Roggebotsluis Noord.

B.14 Zwarte Water

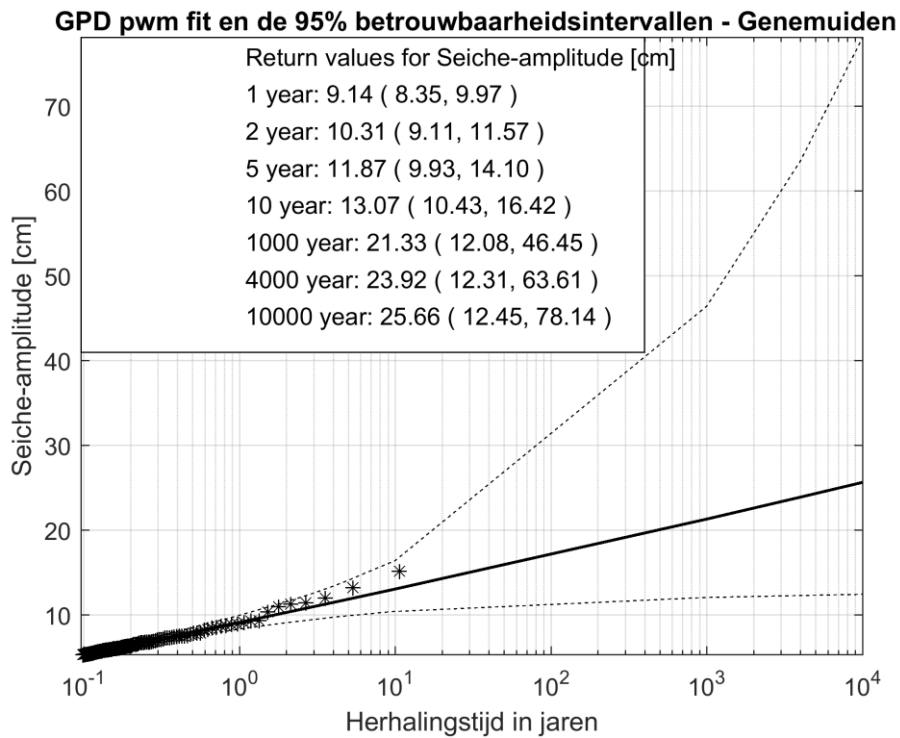
GPD pwm fit en de 95% betrouwbaarheidsintervallen - Ramspolbrug



Figuur B.54 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Ramspolbrug.



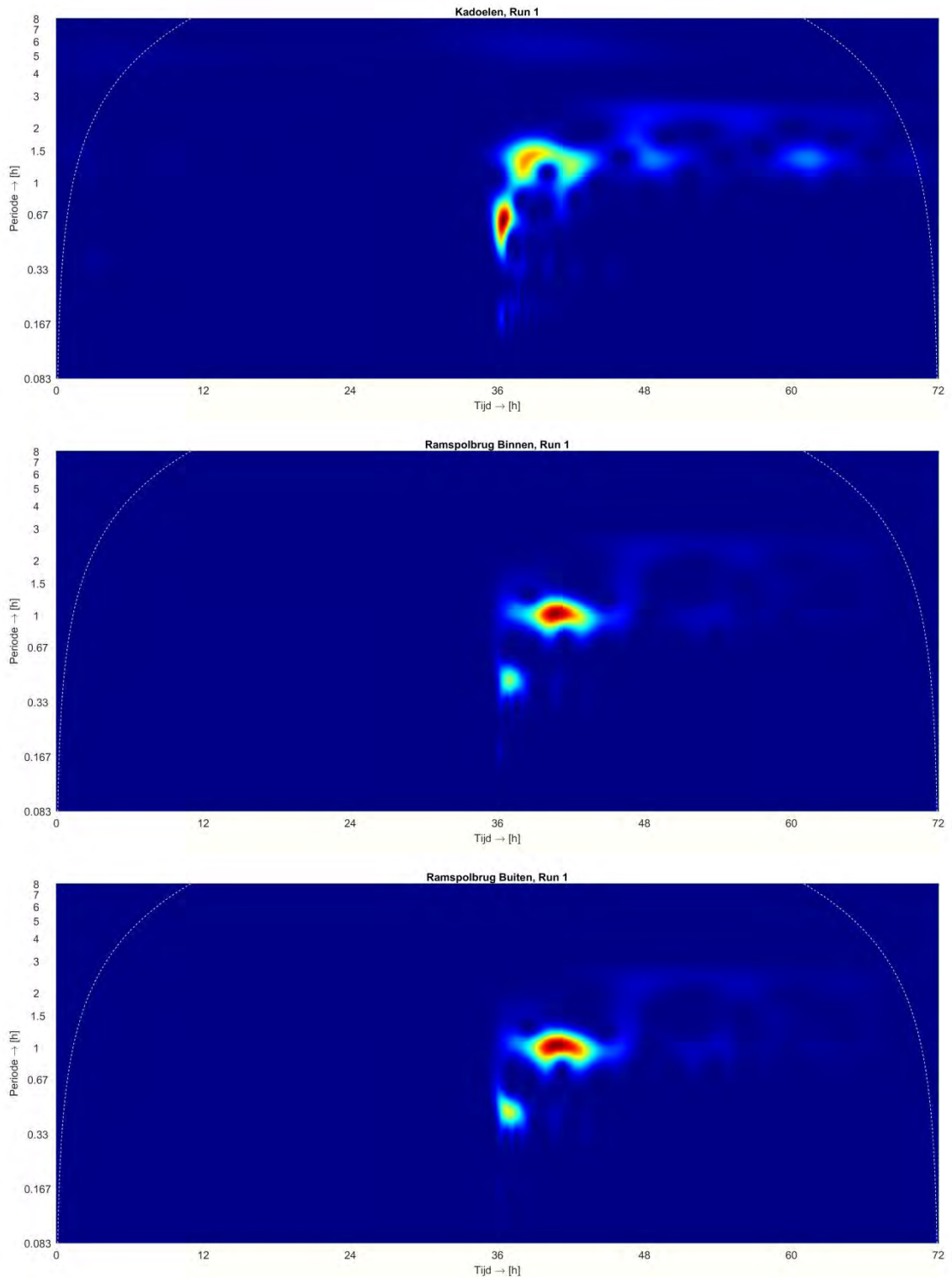
Figuur B.55 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Kadoelen.



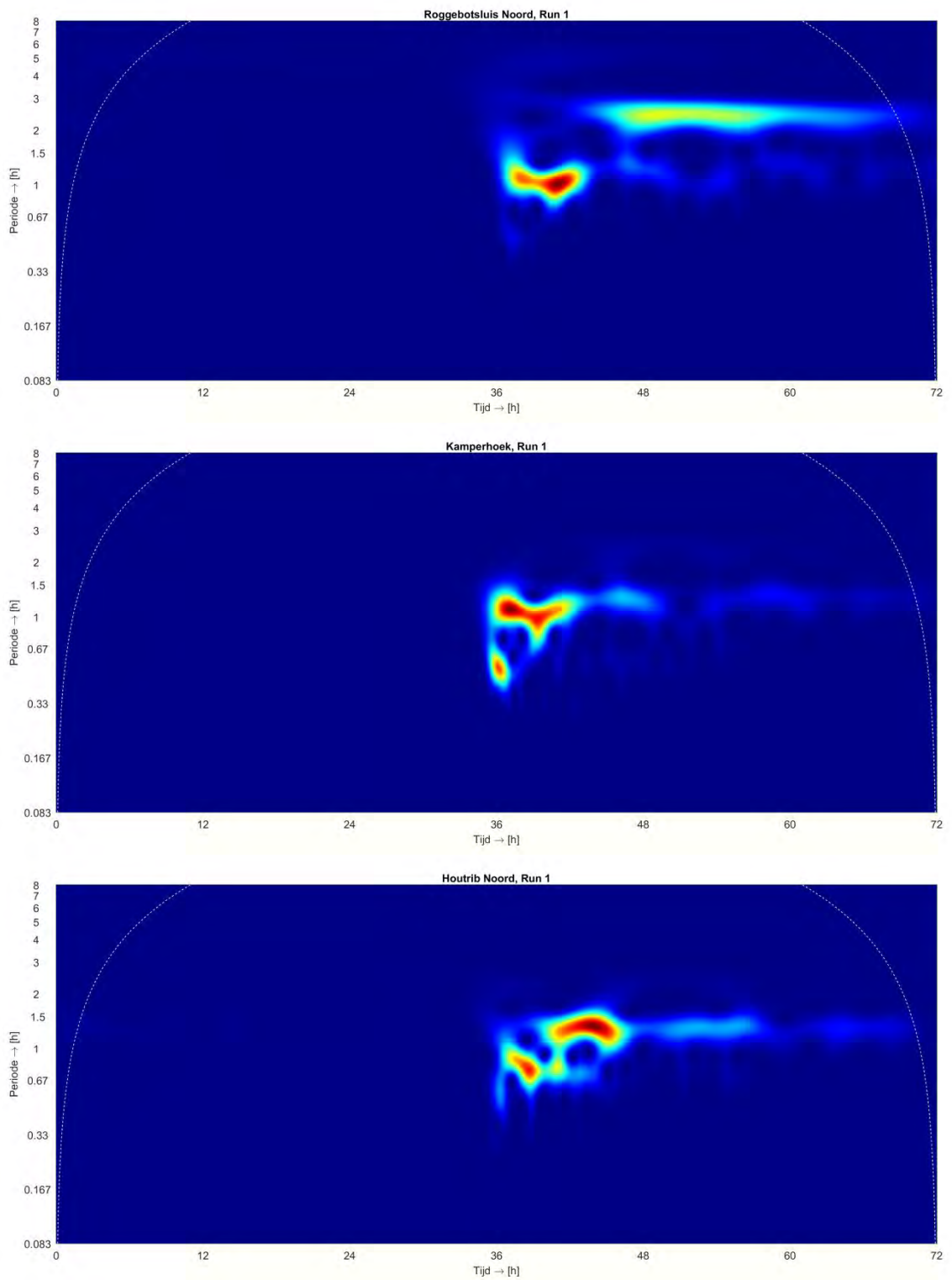
Figuur B.56 Fit van General Pareto kansverdelingsfunctie voor meetlocatie Genemuiden.

C Waveletplots principesommen

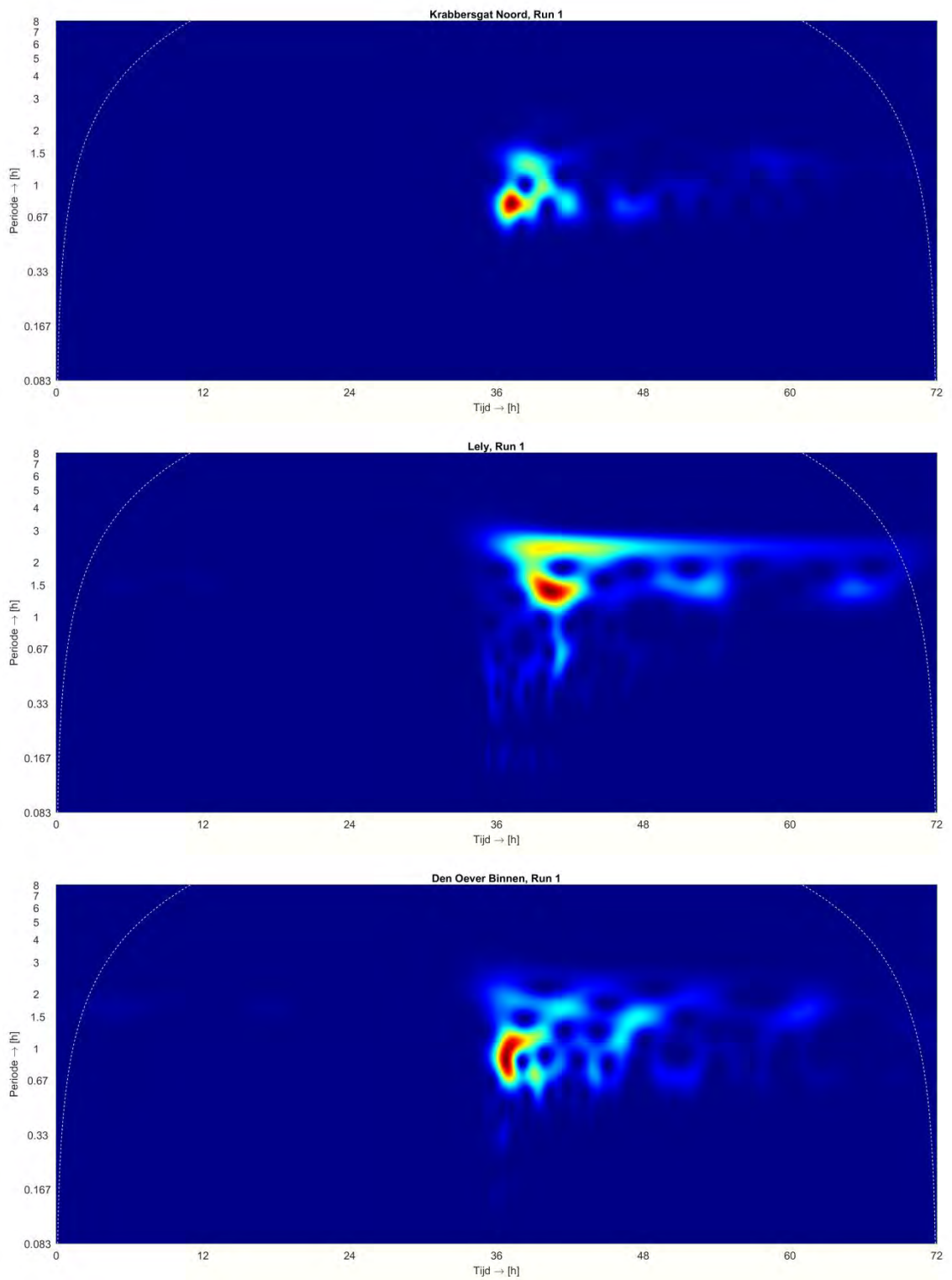
C.1 Run 1



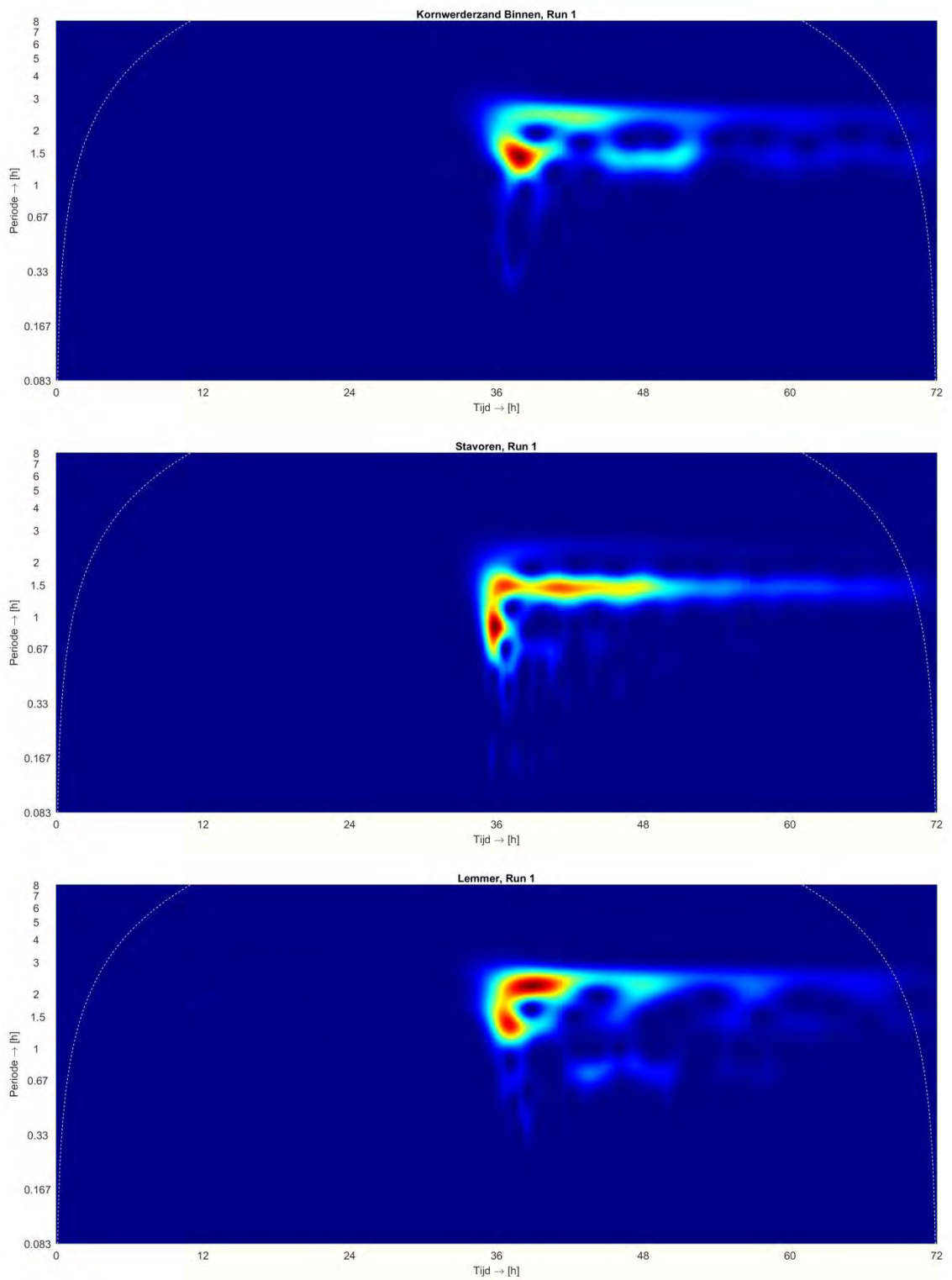
Figuur C.1 Waveletplots Run 1 voor locaties Kadoelen, Ramspolbrug Binnen en Ramspolbrug Buiten.



Figuur C.2 Waveletplots Run 1 voor locaties Roggebotsluis Noord, Kamperhoek en Houtrib Noord.

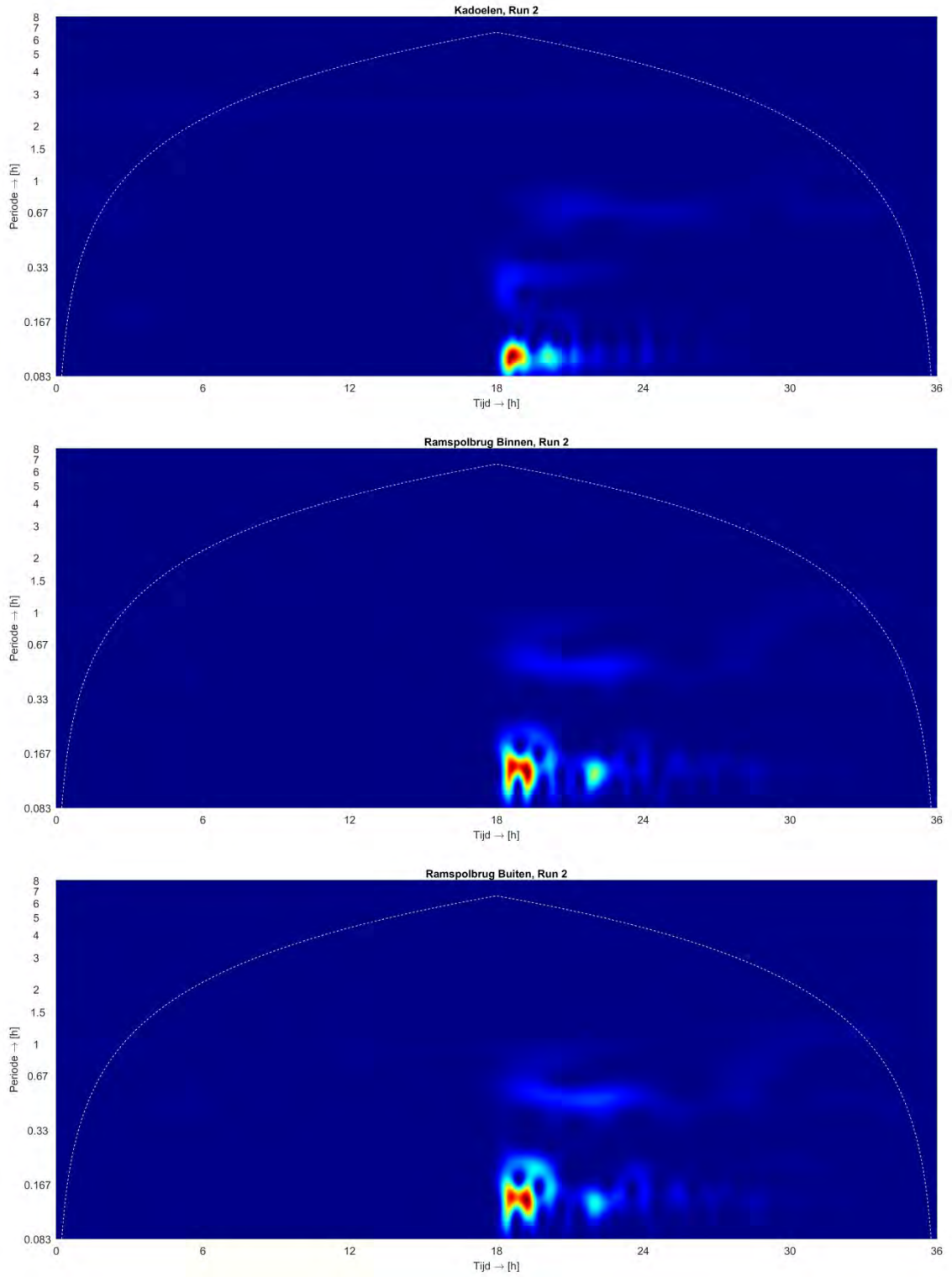


Figuur C.3 Waveletplots Run 1 voor locaties Krabbersgat Noord, Lely en Den Oever Binnen.

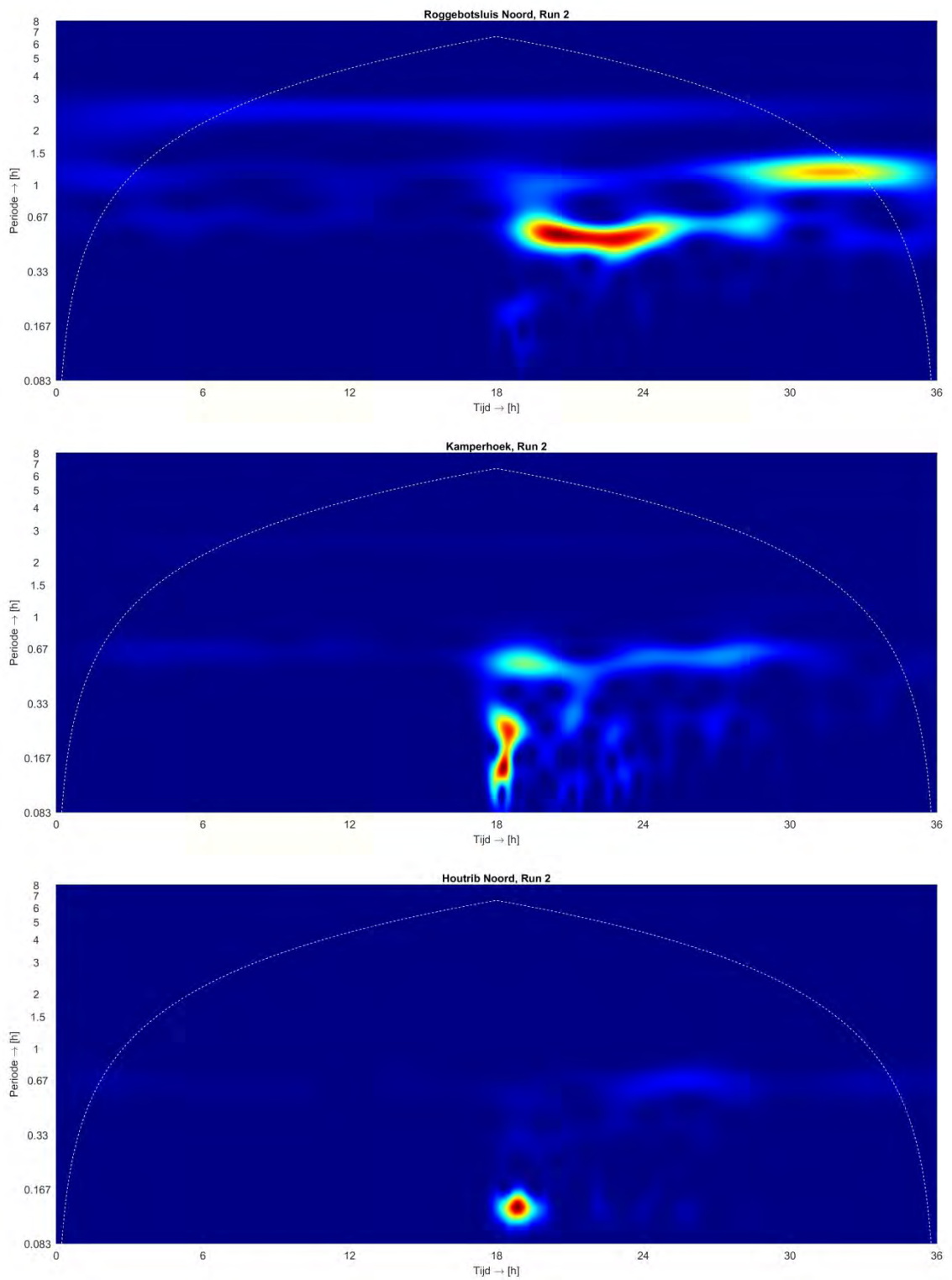


Figuur C.4 Waveletplots Run 1 voor locaties Kornwerderzand Binnen, Stavoren en Lemmer.

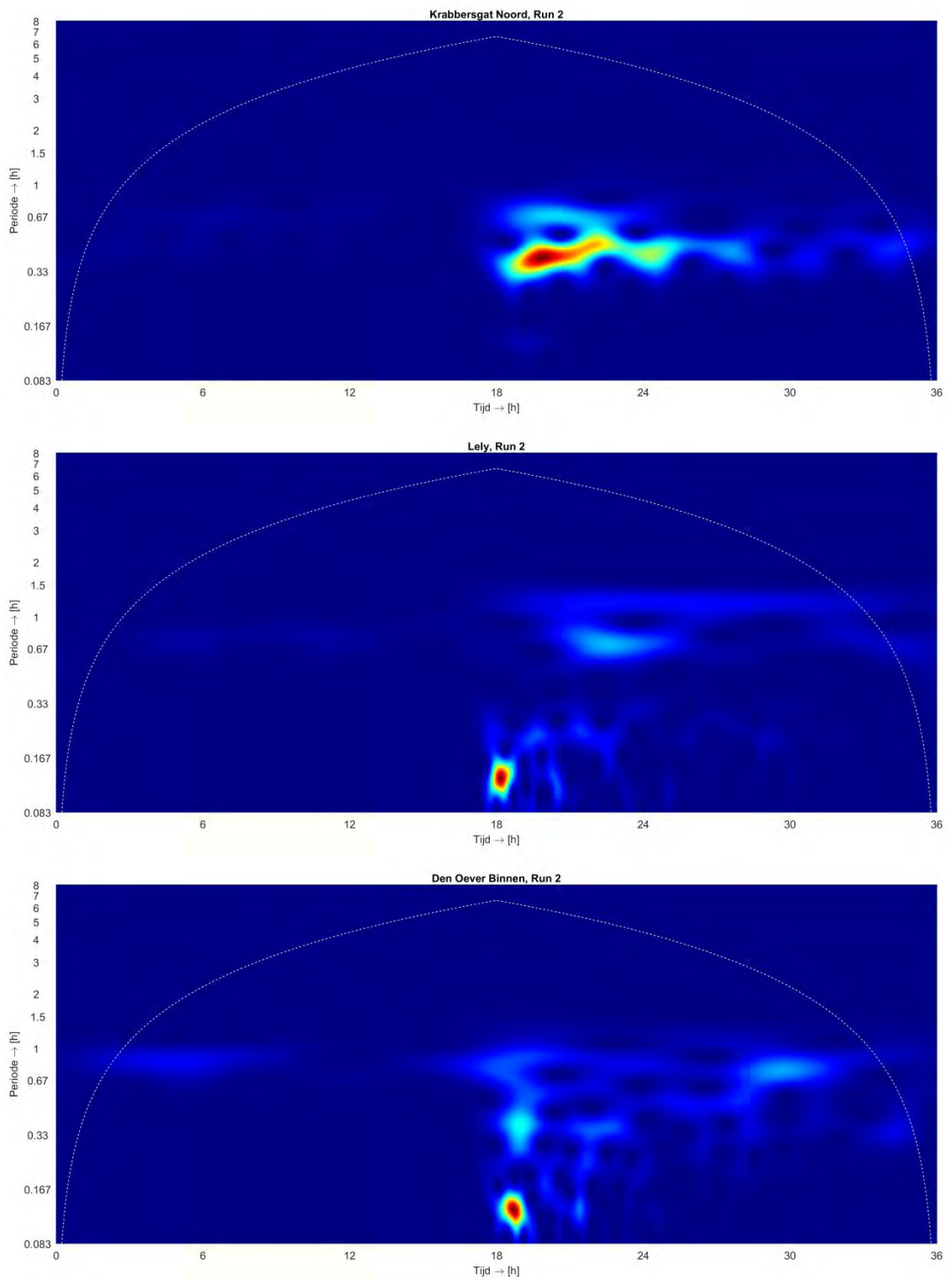
C.2 Run 2



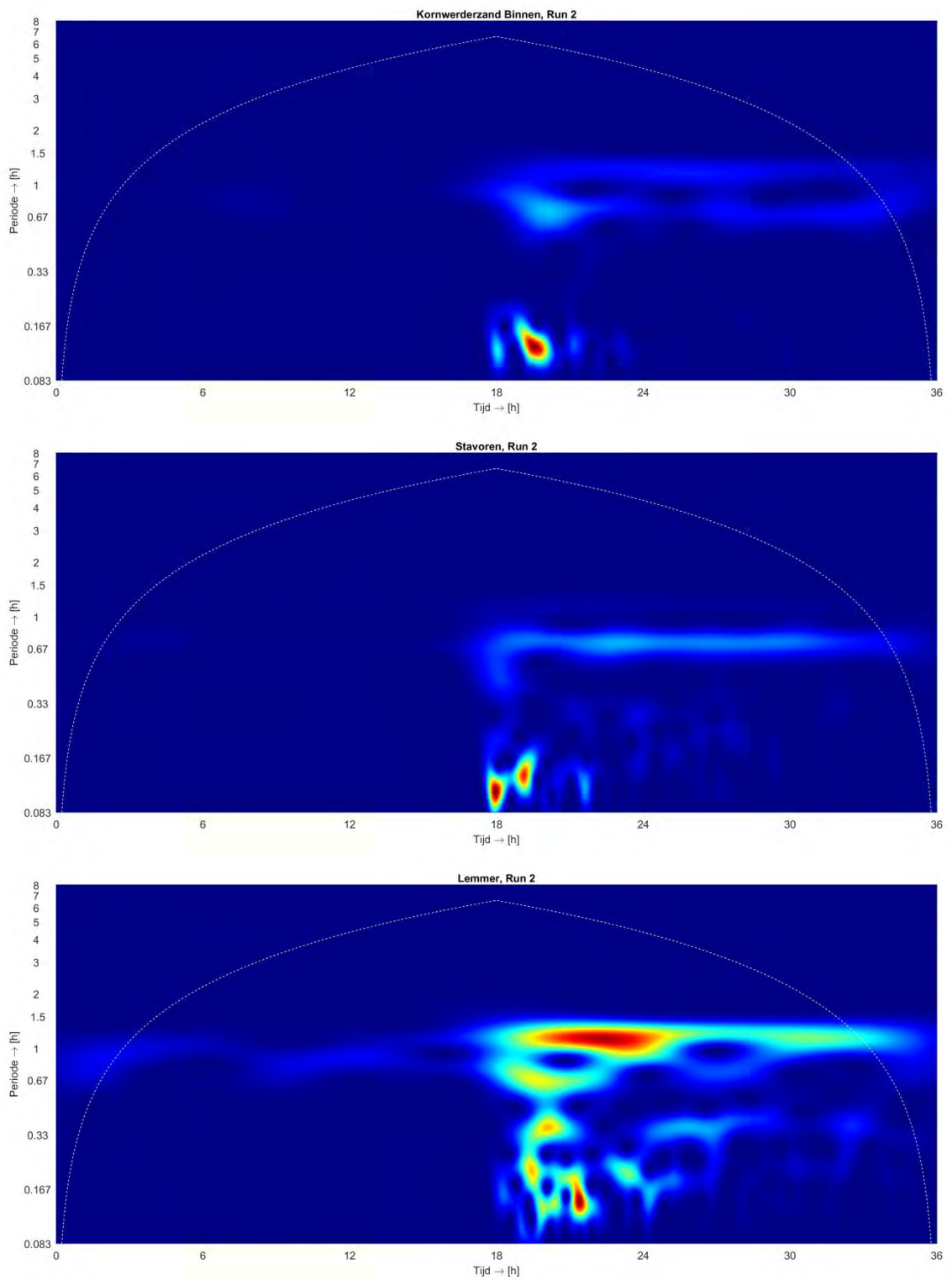
Figuur C.5 Waveletplots Run 2 voor locaties Kadoelen, Ramspolbrug Binnen en Ramspolbrug Buiten.



Figuur C.6 Waveletplots Run 2 voor locaties Roggebotsluis Noord, Kamperhoek en Houtrib Noord.

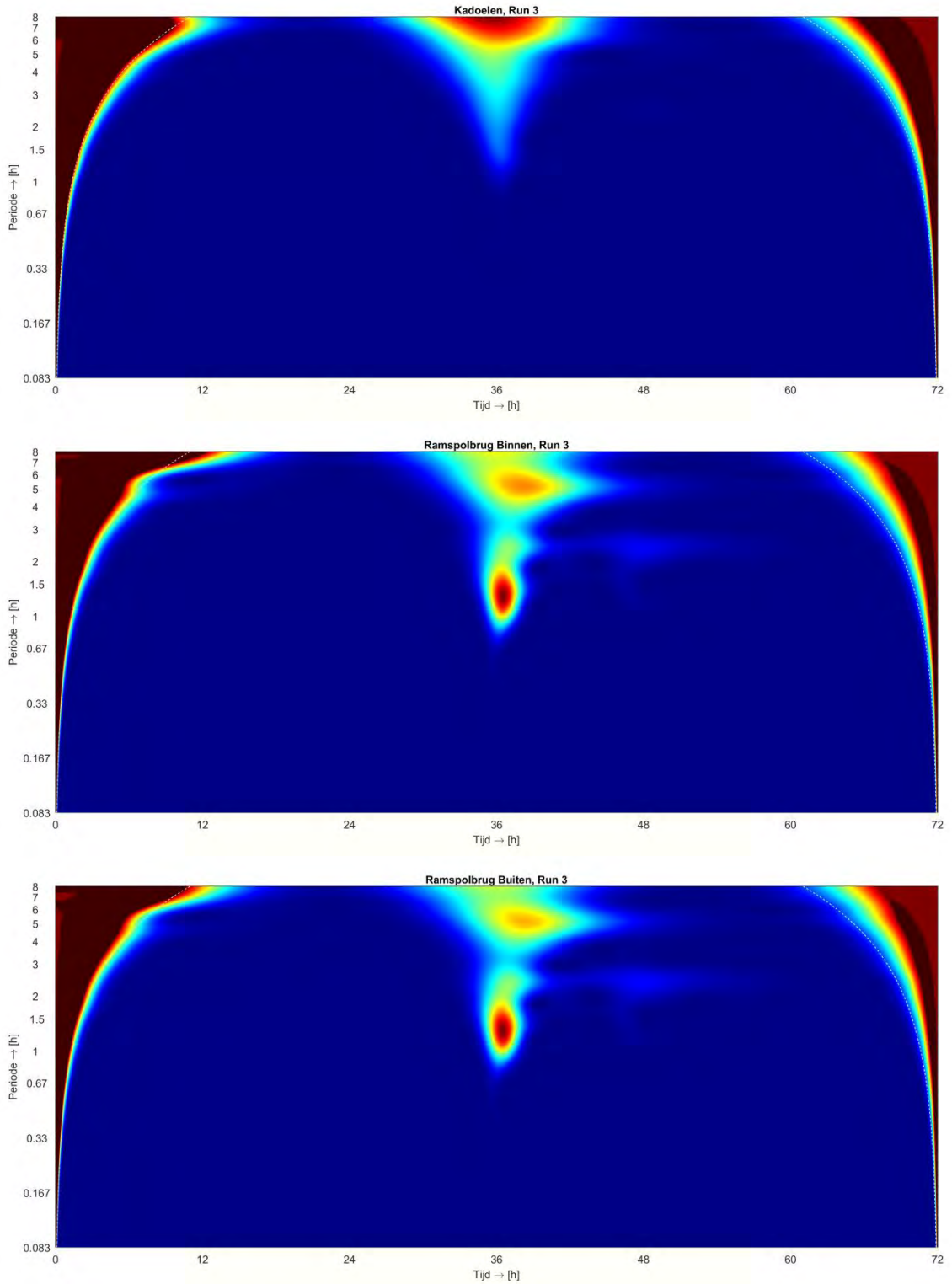


Figuur C.7 Waveletplots Run 2 voor locaties Krabbersgat Noord, Lely en Den Oever Binnen.

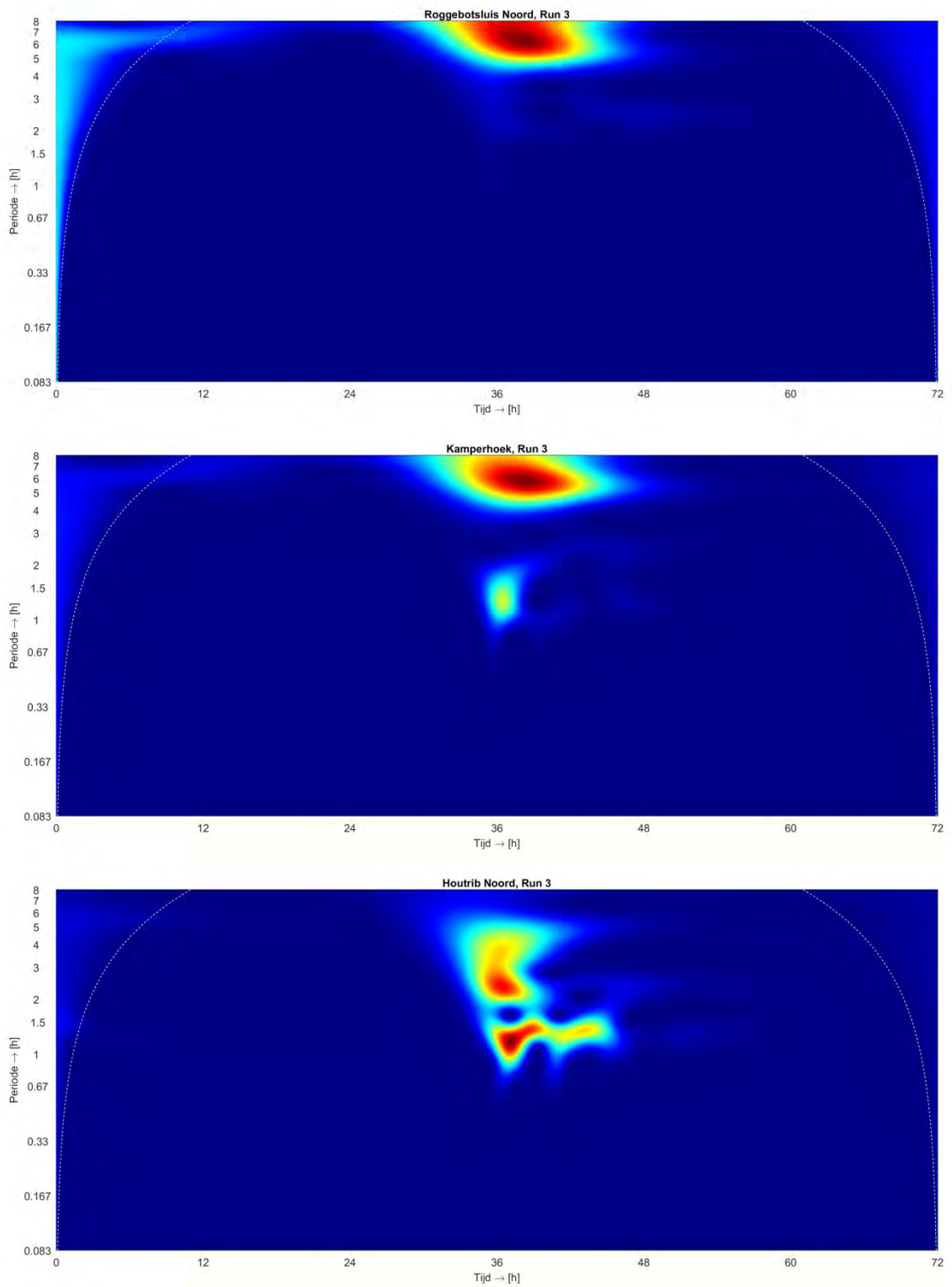


Figuur C.8 Waveletplots Run 2 voor locaties Kornwerderzand Binnen, Stavoren en Lemmer.

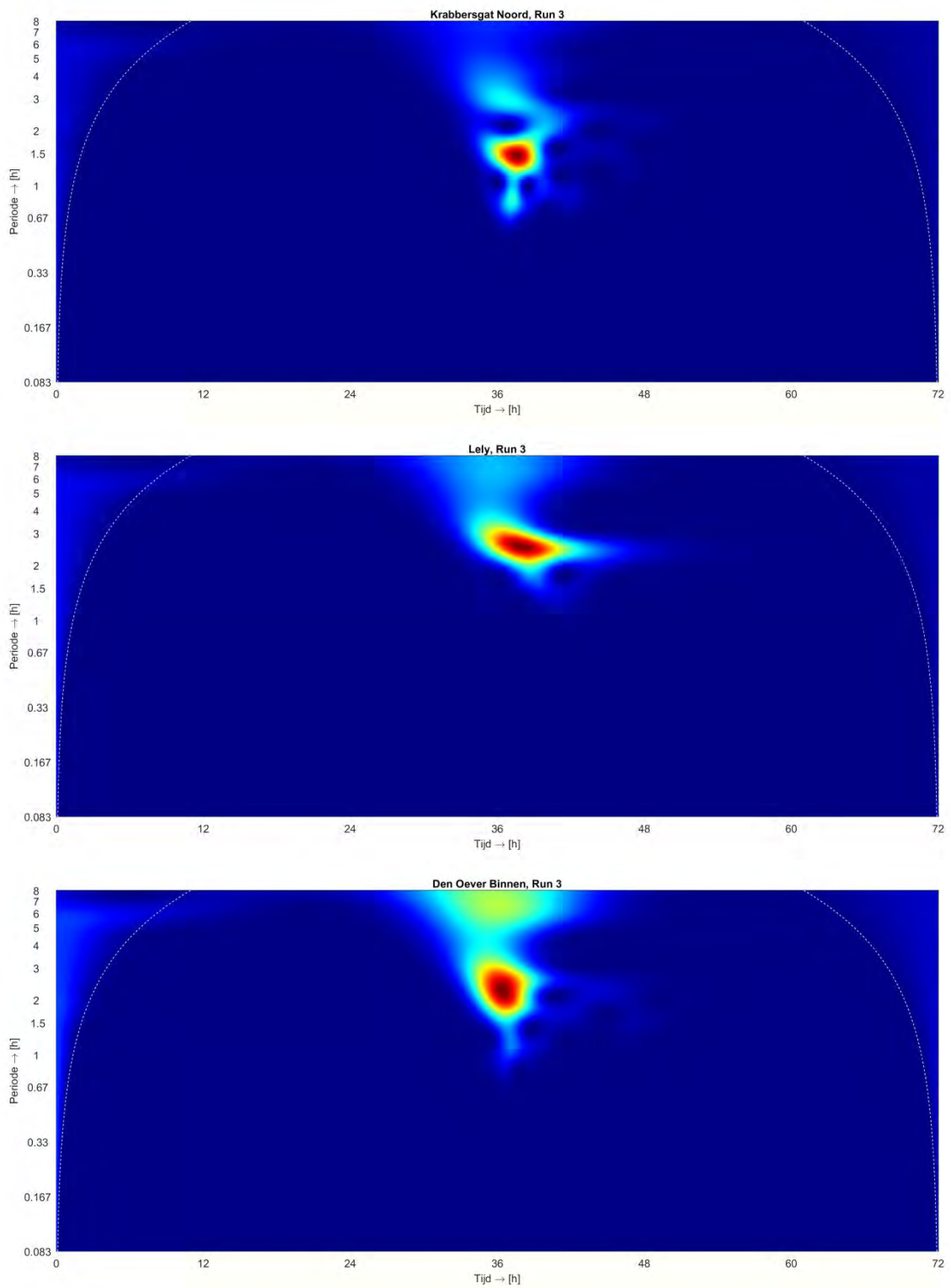
C.3 Run 3



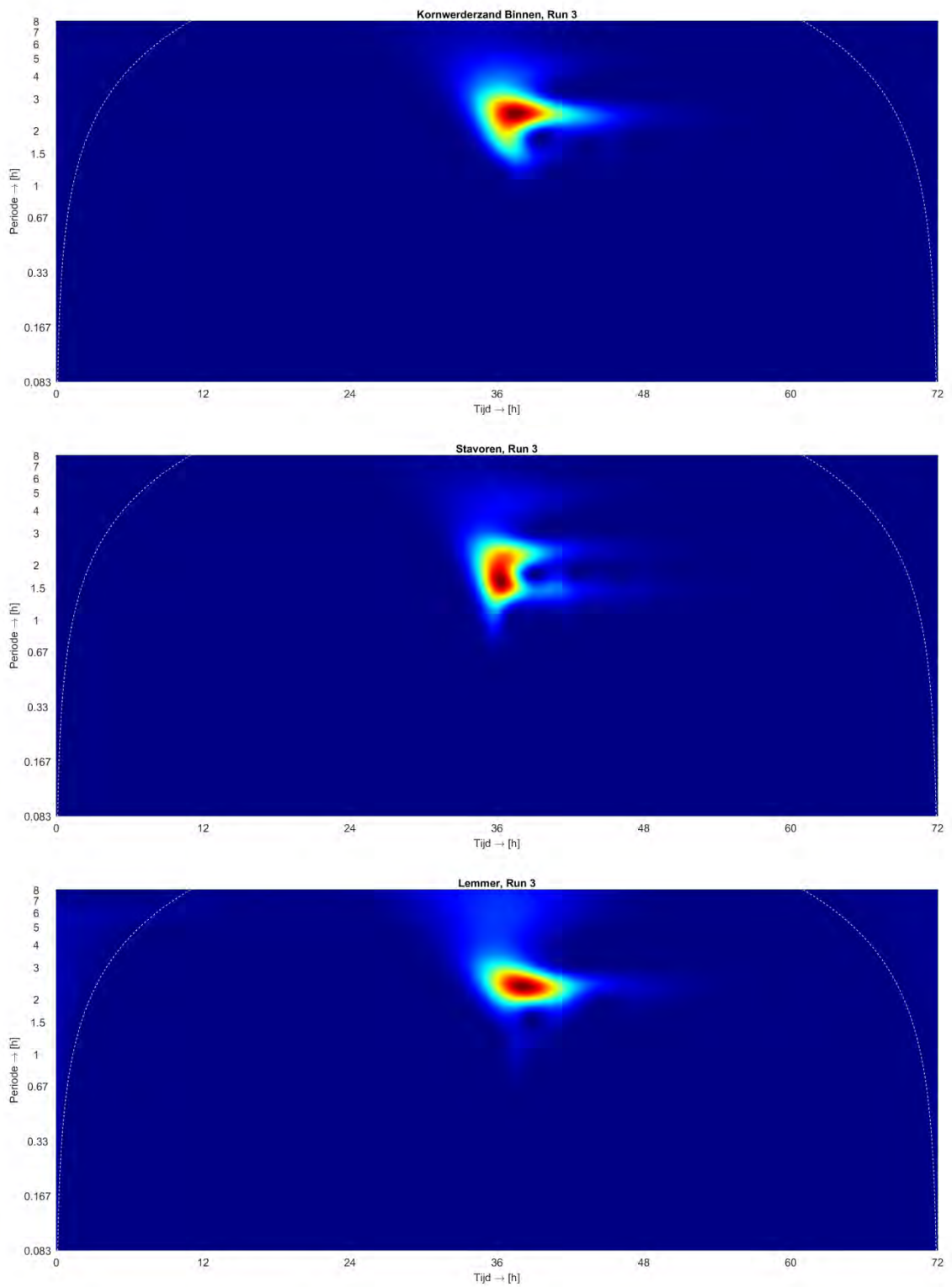
Figuur C.9 Waveletplots Run 3 voor locaties Kadoelen, Ramspolbrug Binnen en Ramspolbrug Buiten.



Figuur C.10 Waveletplots Run 3 voor locaties Roggebotsluis Noord, Kamperhoek en Houtrib Noord.

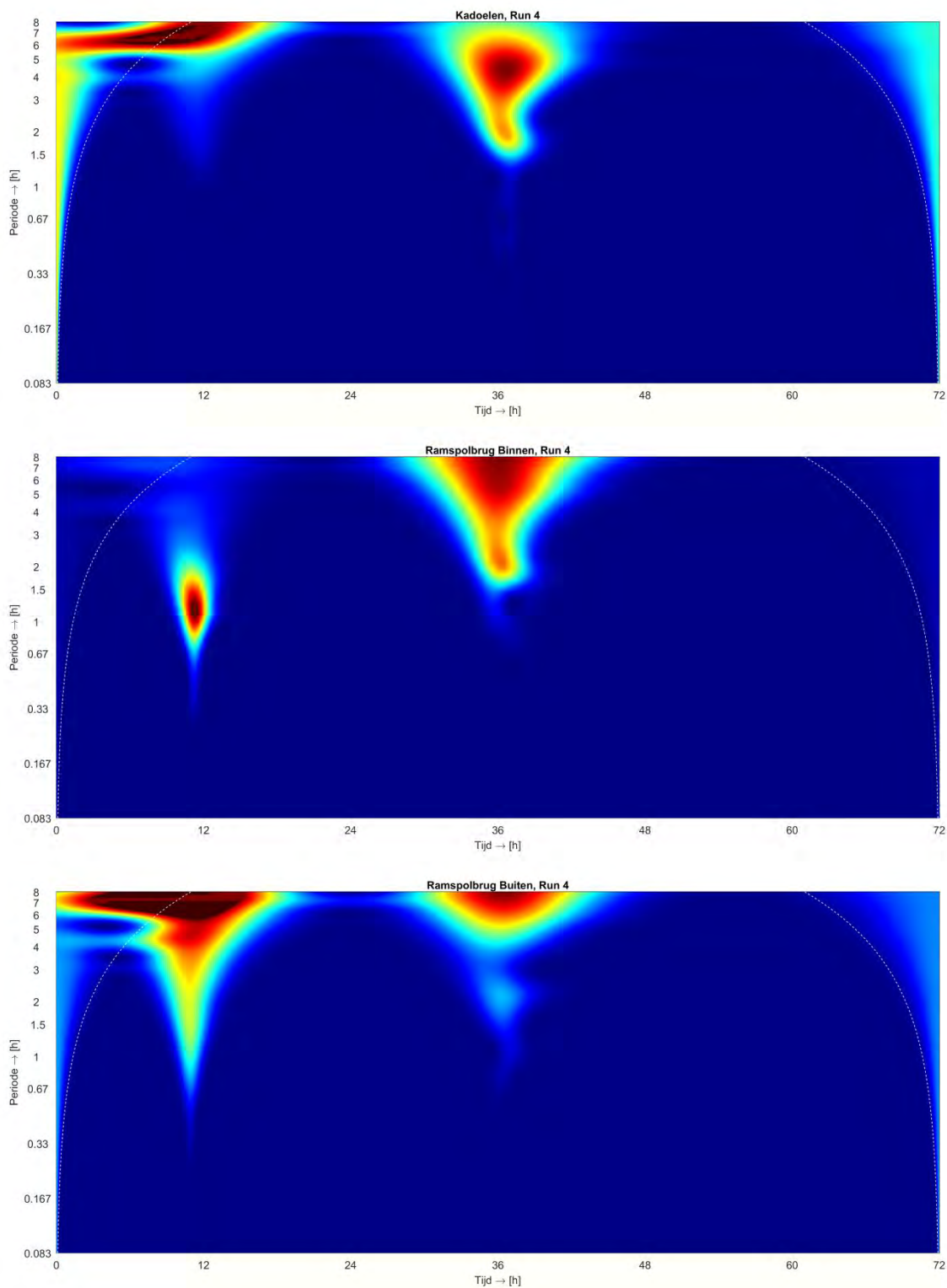


Figuur C.11 Waveletplots Run 3 voor locaties Krabbersgat Noord, Lely en Den Oever Binnen.

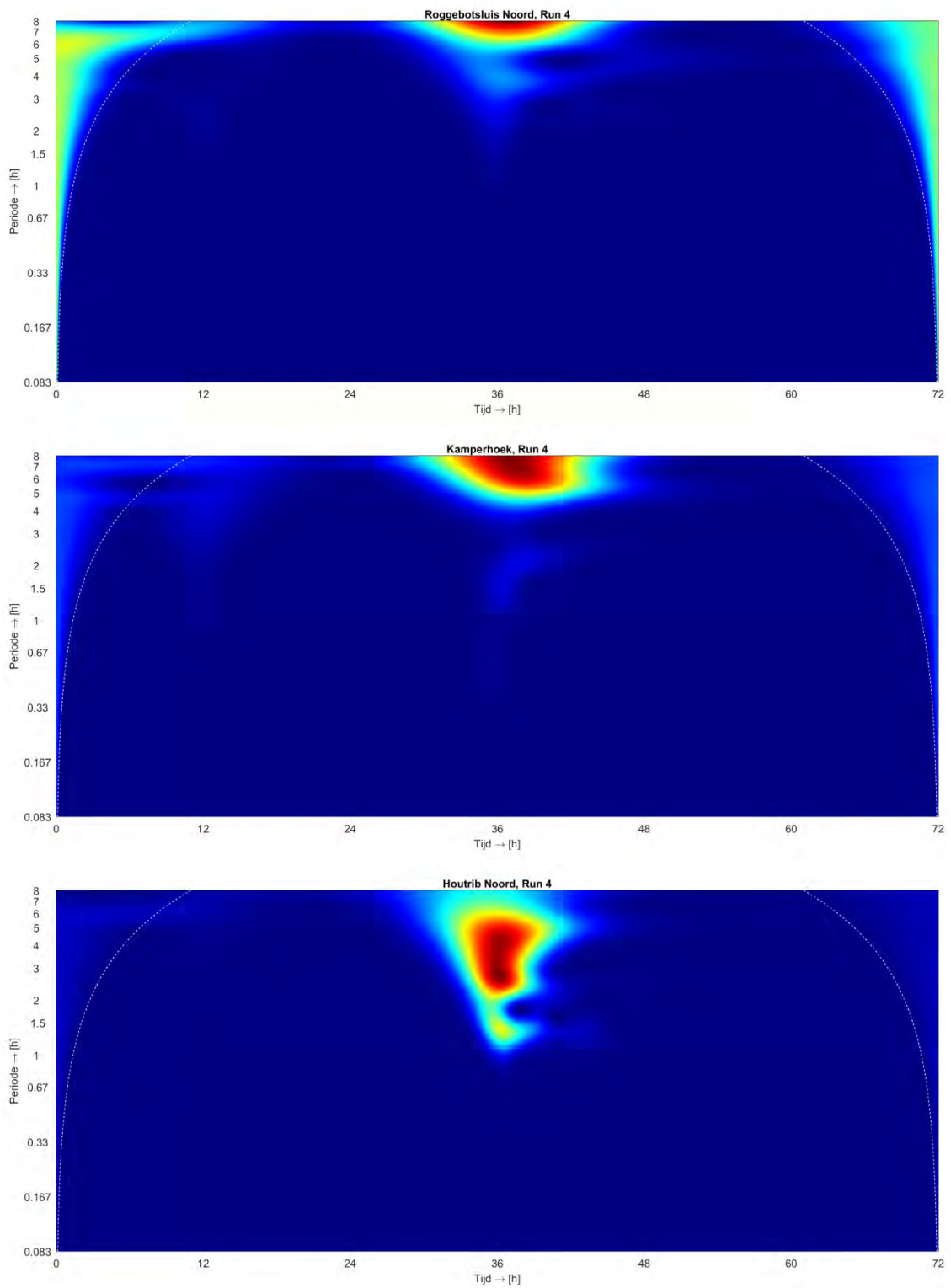


Figuur C.12 Waveletplots Run 3 voor locaties Kornwerderzand Binnen, Stavoren en Lemmer.

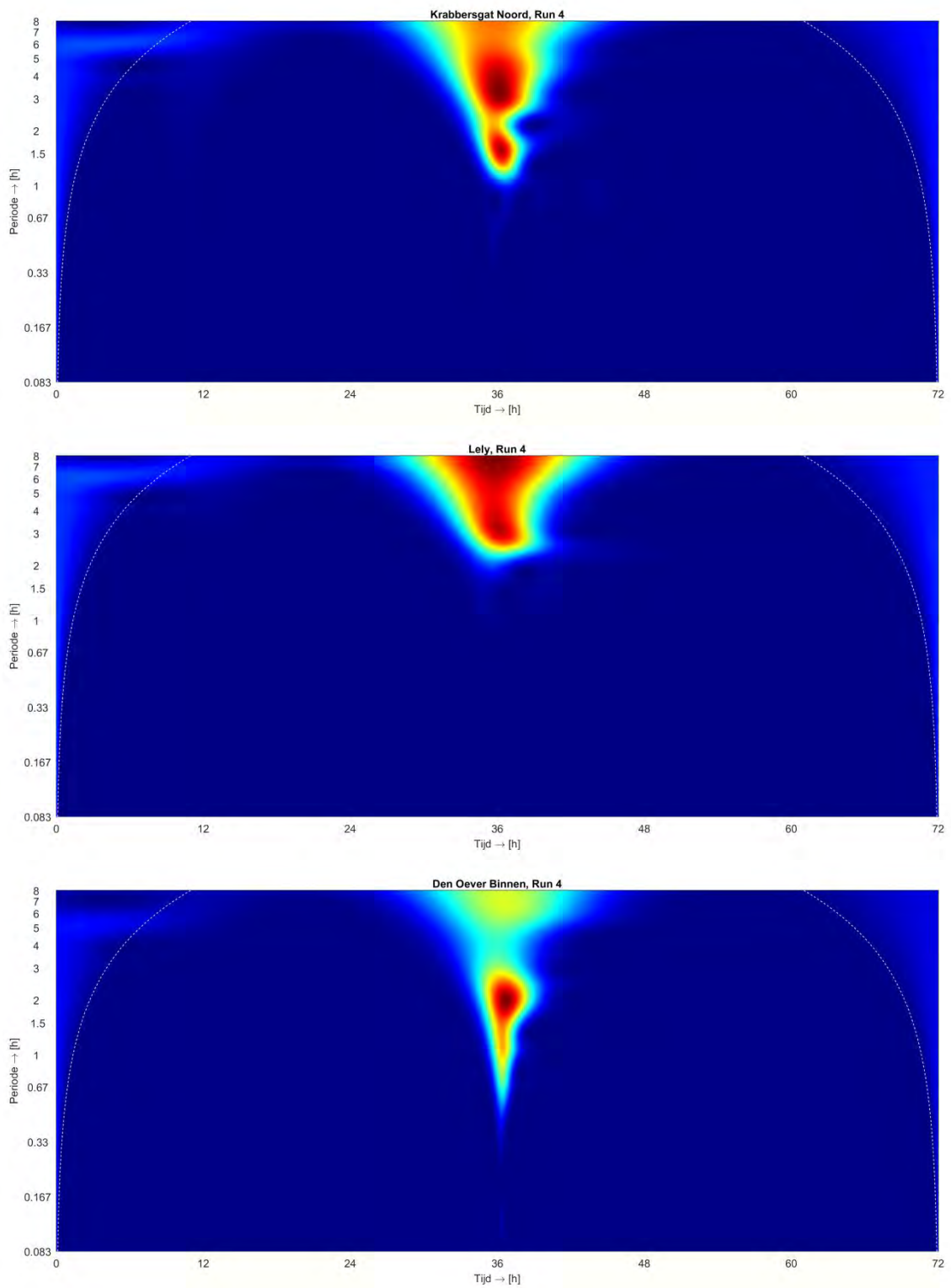
C.4 Run 4



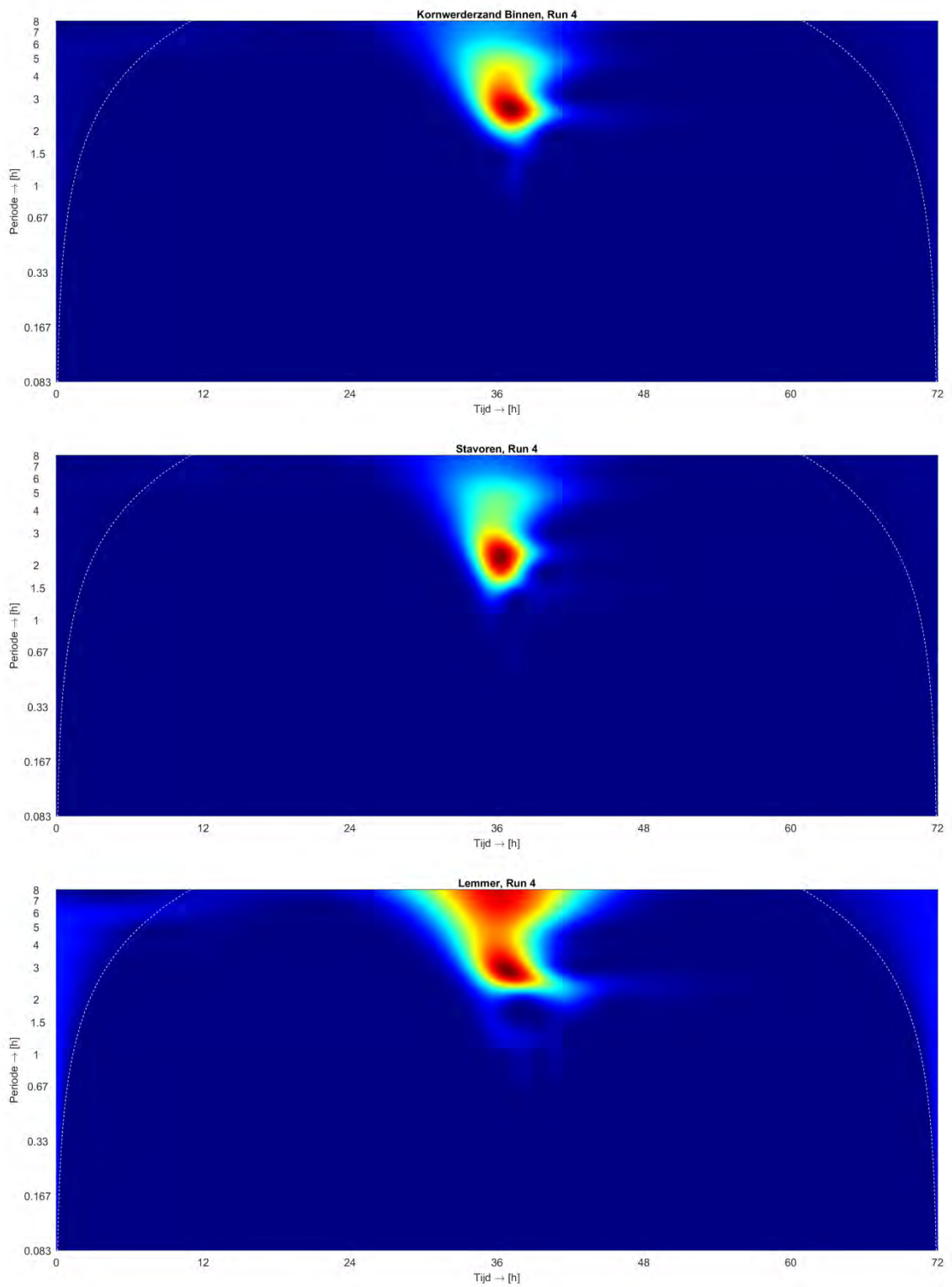
Figuur C.13 Waveletplots Run 4 voor locaties Kadoelen, Ramspolbrug Binnen en Ramspolbrug Buiten.



Figuur C.14 Waveletplots Run 4 voor locaties Roggebotsluis Noord, Kamperhoek en Houtrib Noord.

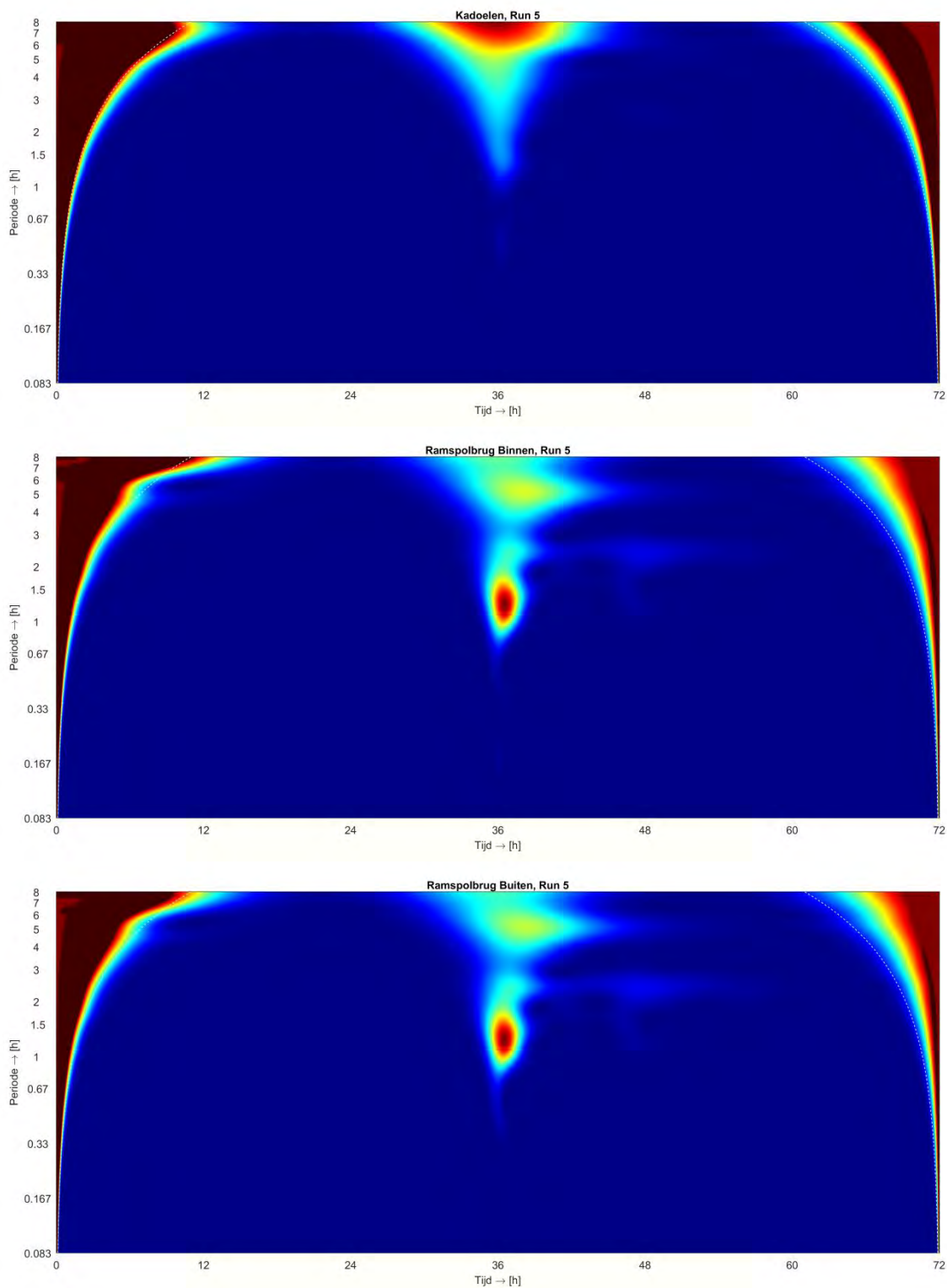


Figuur C.15 Waveletplots Run 4 voor locaties Krabbersgat Noord, Lely en Den Oever Binnen.

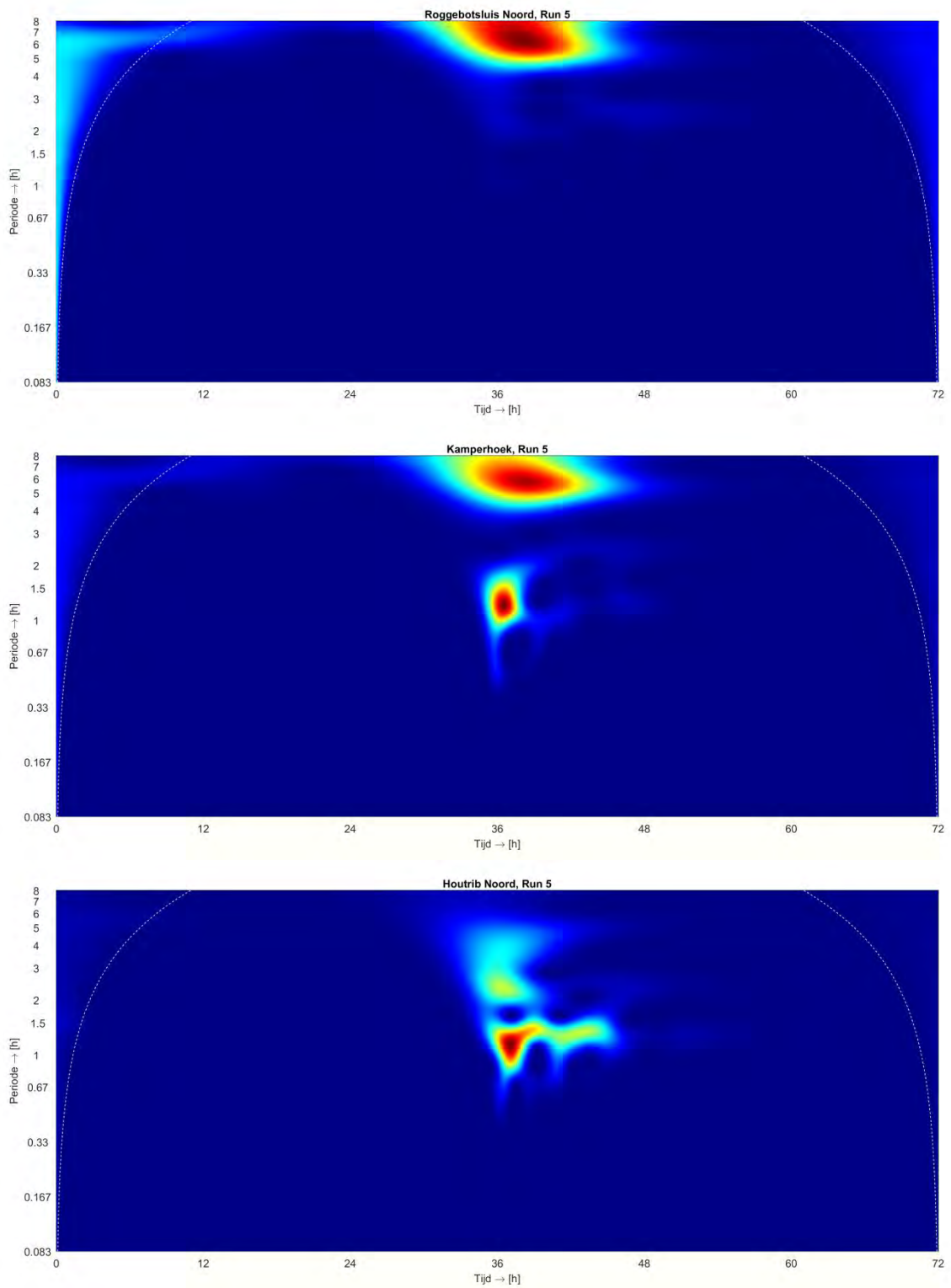


Figuur C.16 Waveletplots Run 4 voor locaties Kornwerderzand Binnen, Stavoren en Lemmer.

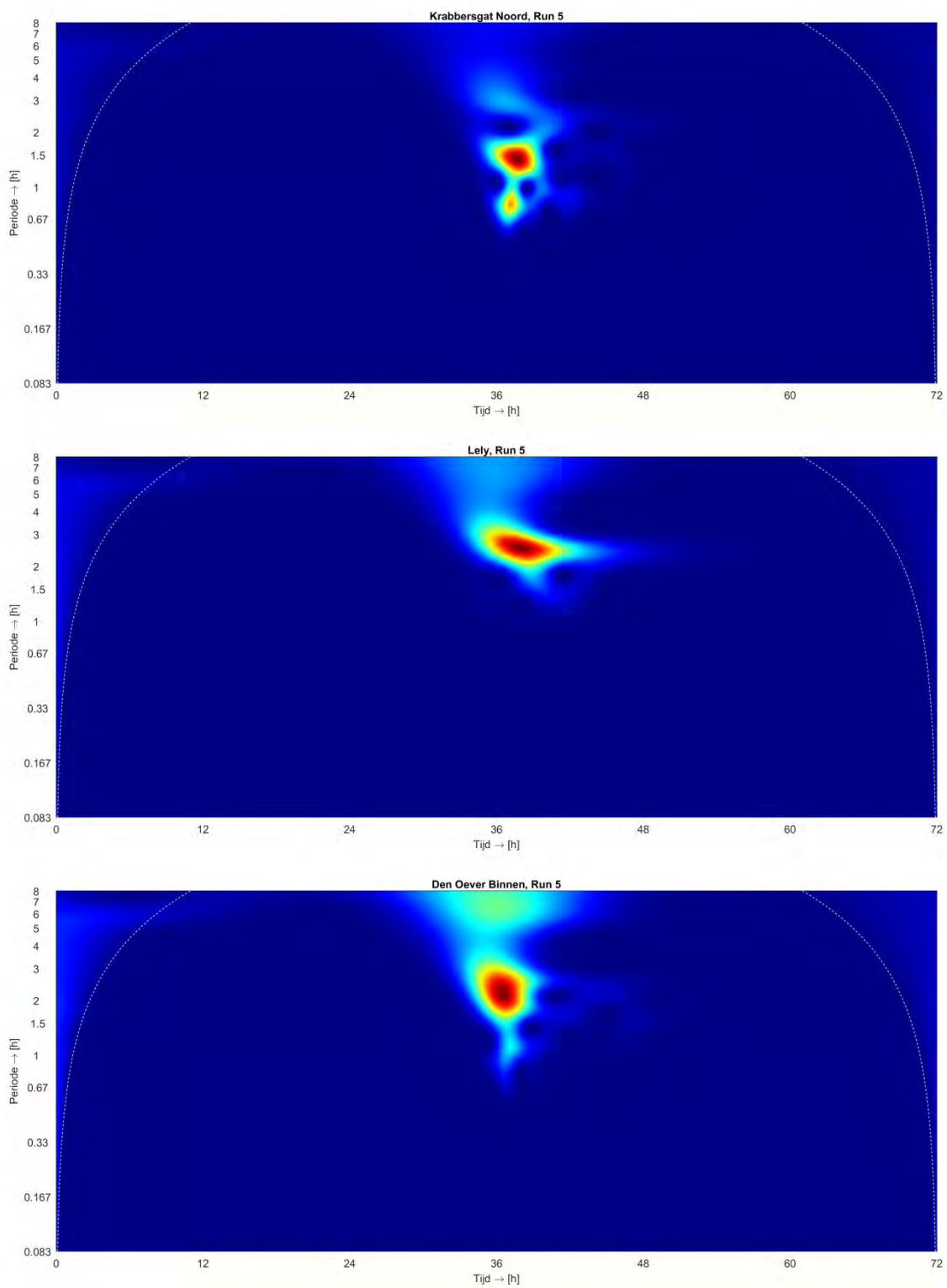
C.5 Run 5



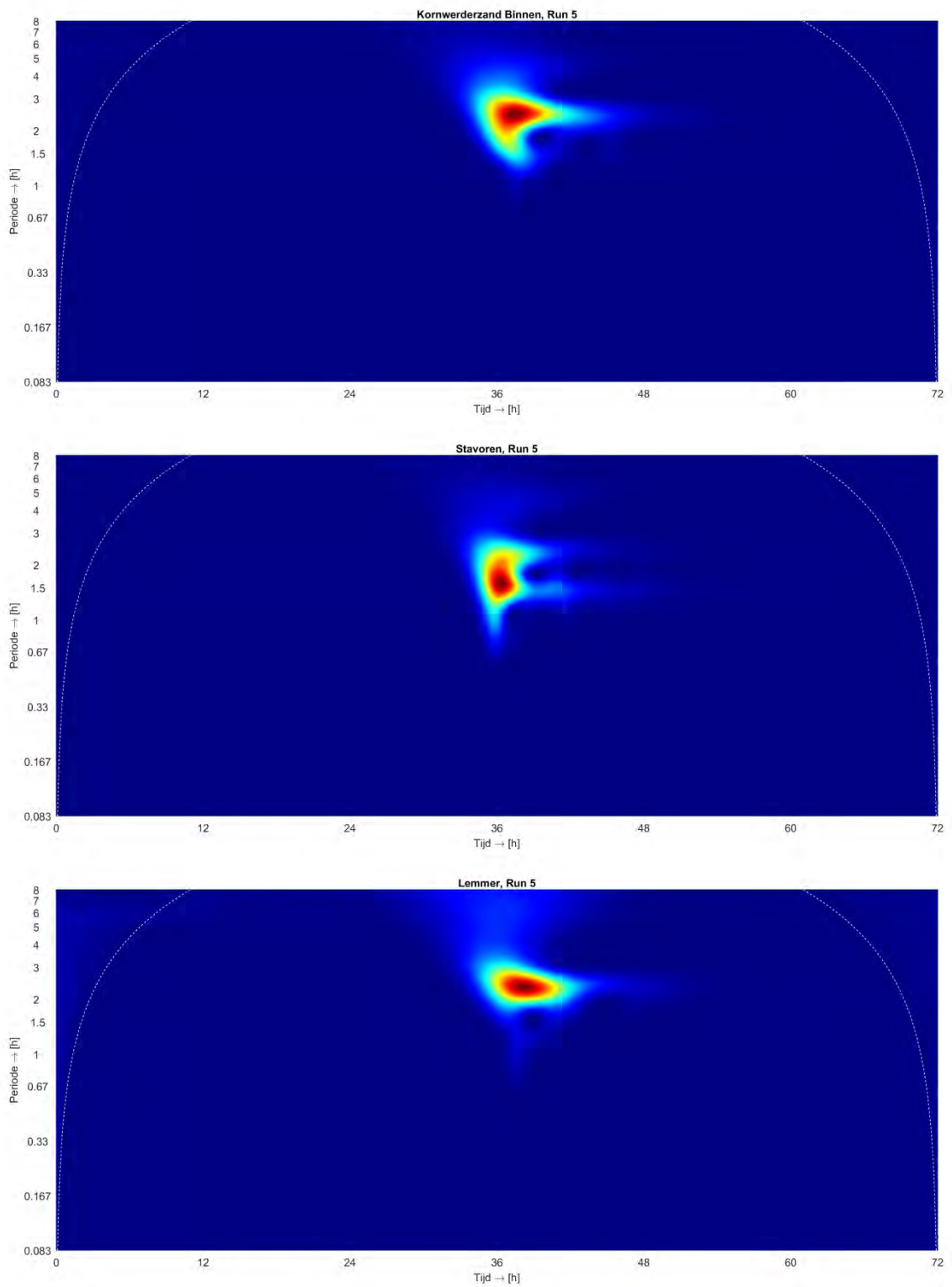
Figuur C.17 Waveletplots Run 5 voor locaties Kadoelen, Ramspolbrug Binnen en Ramspolbrug Buiten.



Figuur C.18 Waveletplots Run 5 voor locaties Roggebotsluis Noord, Kamperhoek en Houtrib Noord.

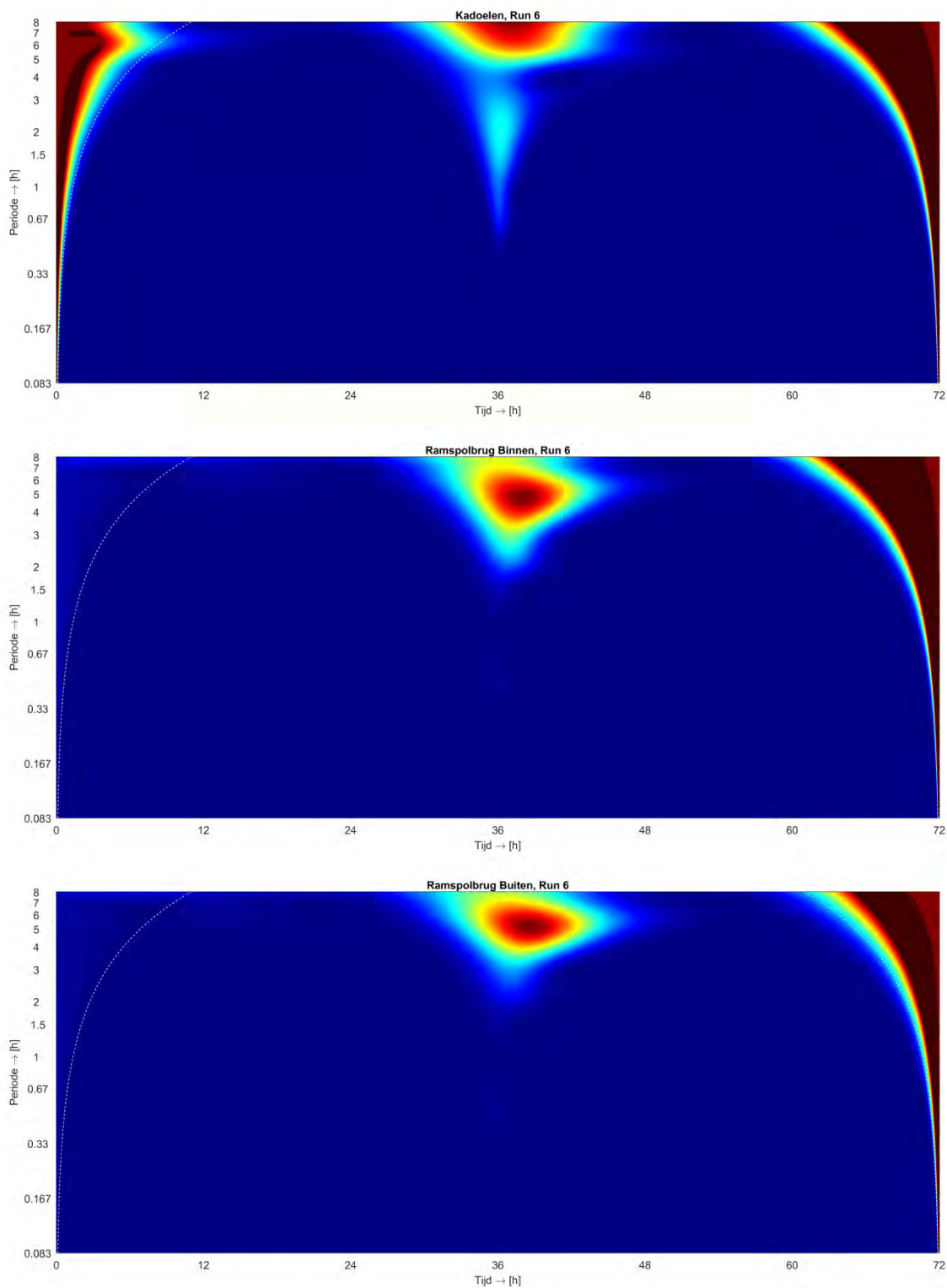


Figuur C.19 Waveletplots Run 5 voor locaties Krabbersgat Noord, Lely en Den Oever Binnen.

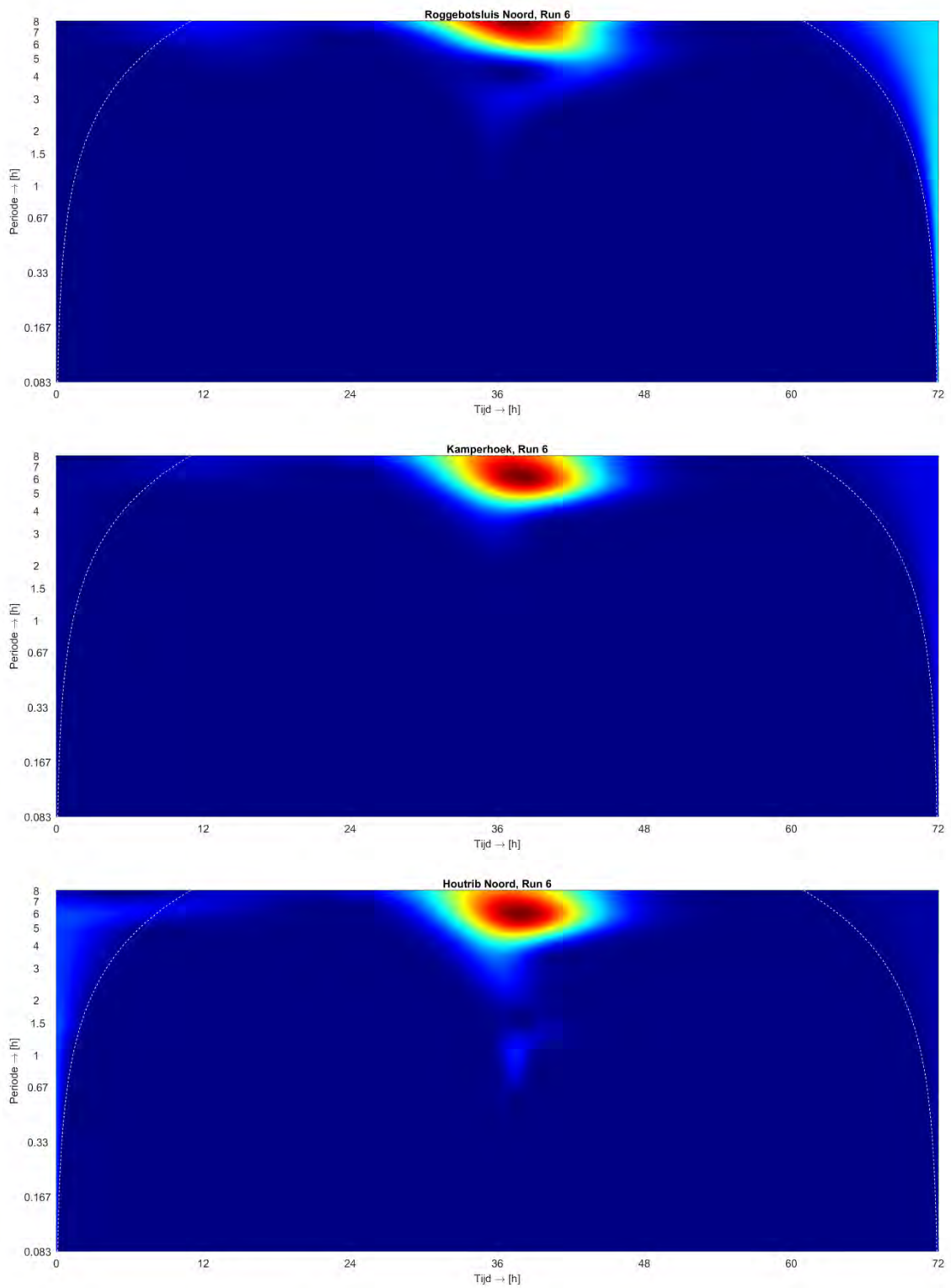


Figuur C.20 Waveletplots Run 5 voor locaties Kornwerderzand Binnen, Stavoren en Lemmer.

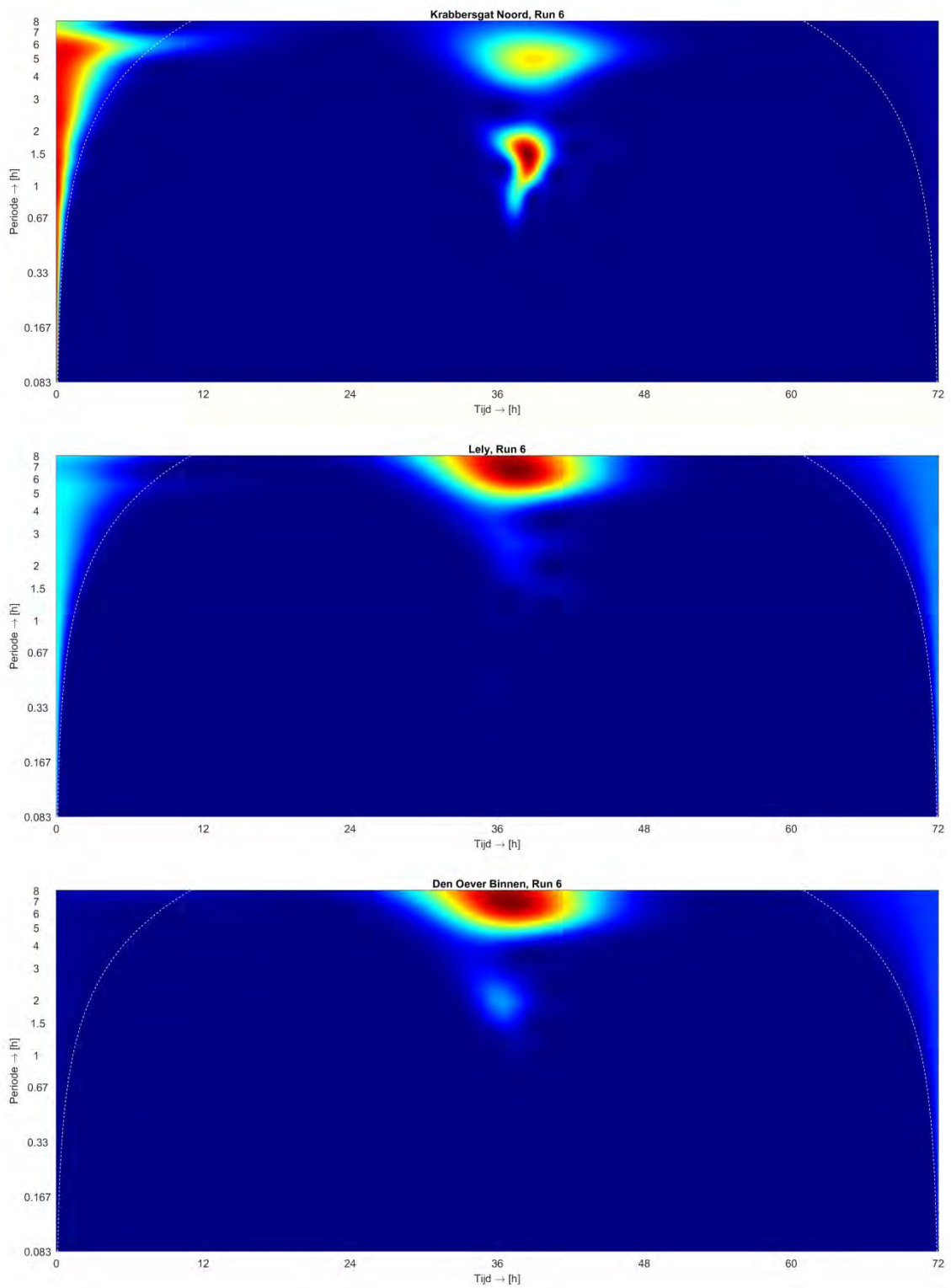
C.6 Run 6



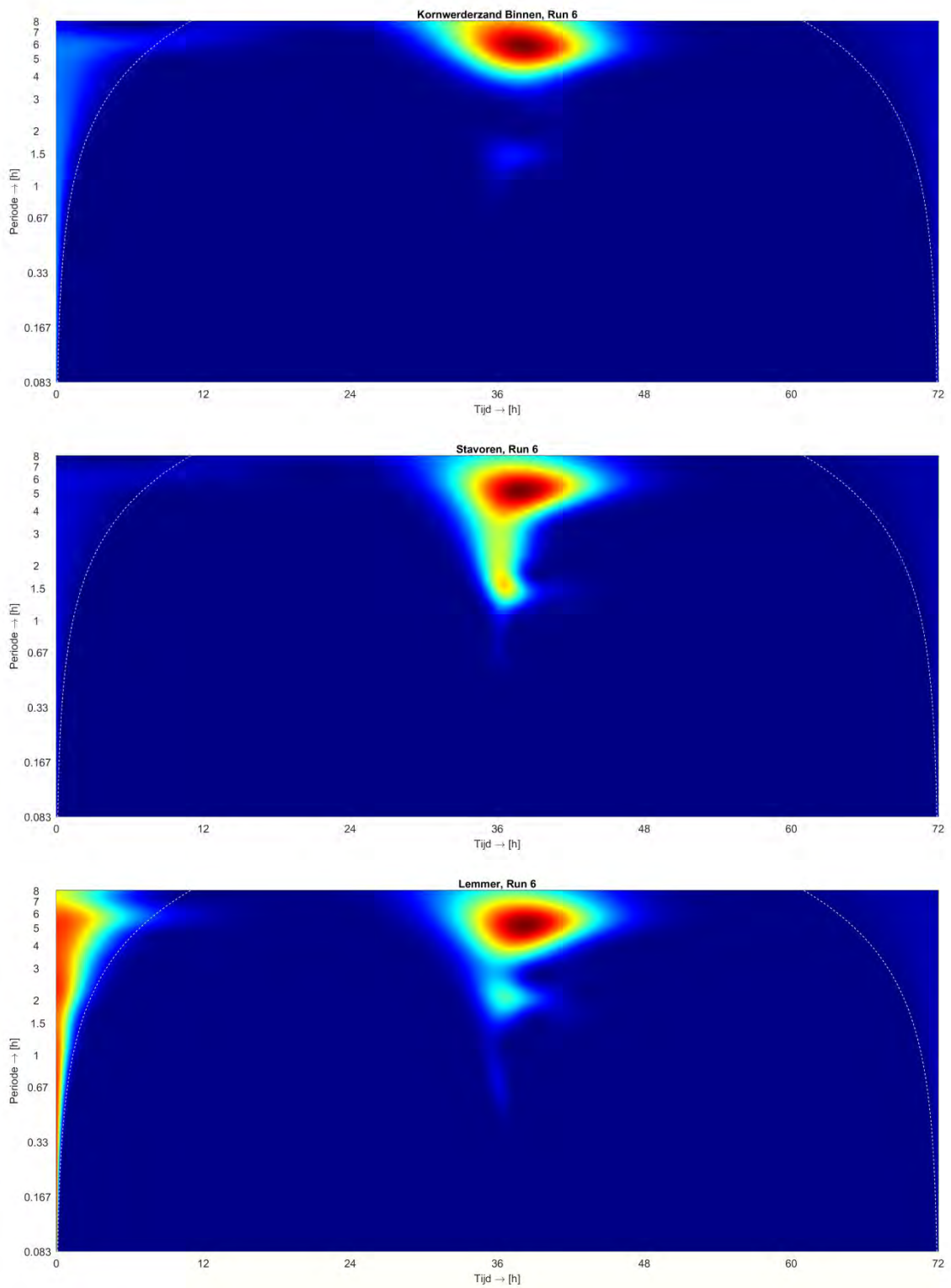
Figuur C.21 Waveletplots Run 6 voor locaties Kadoelen, Ramspolbrug Binnen en Ramspolbrug Buiten.



Figuur C.22 Waveletplots Run 6 voor locaties Roggebotsluis Noord, Kamperhoek en Houtrib Noord.

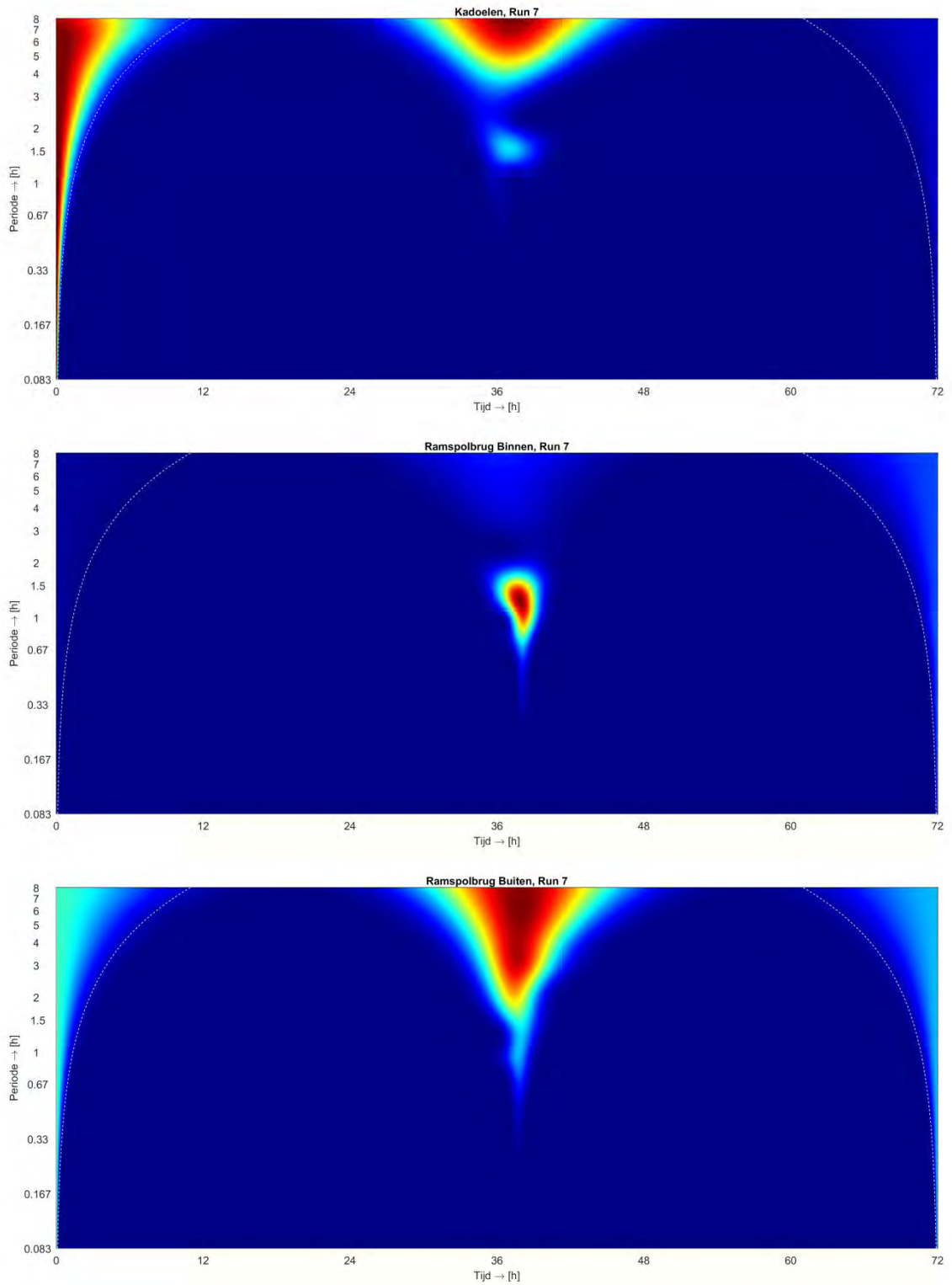


Figuur C.23 Waveletplots Run 6 voor locaties Krabbersgat Noord, Lely en Den Oever Binnen.

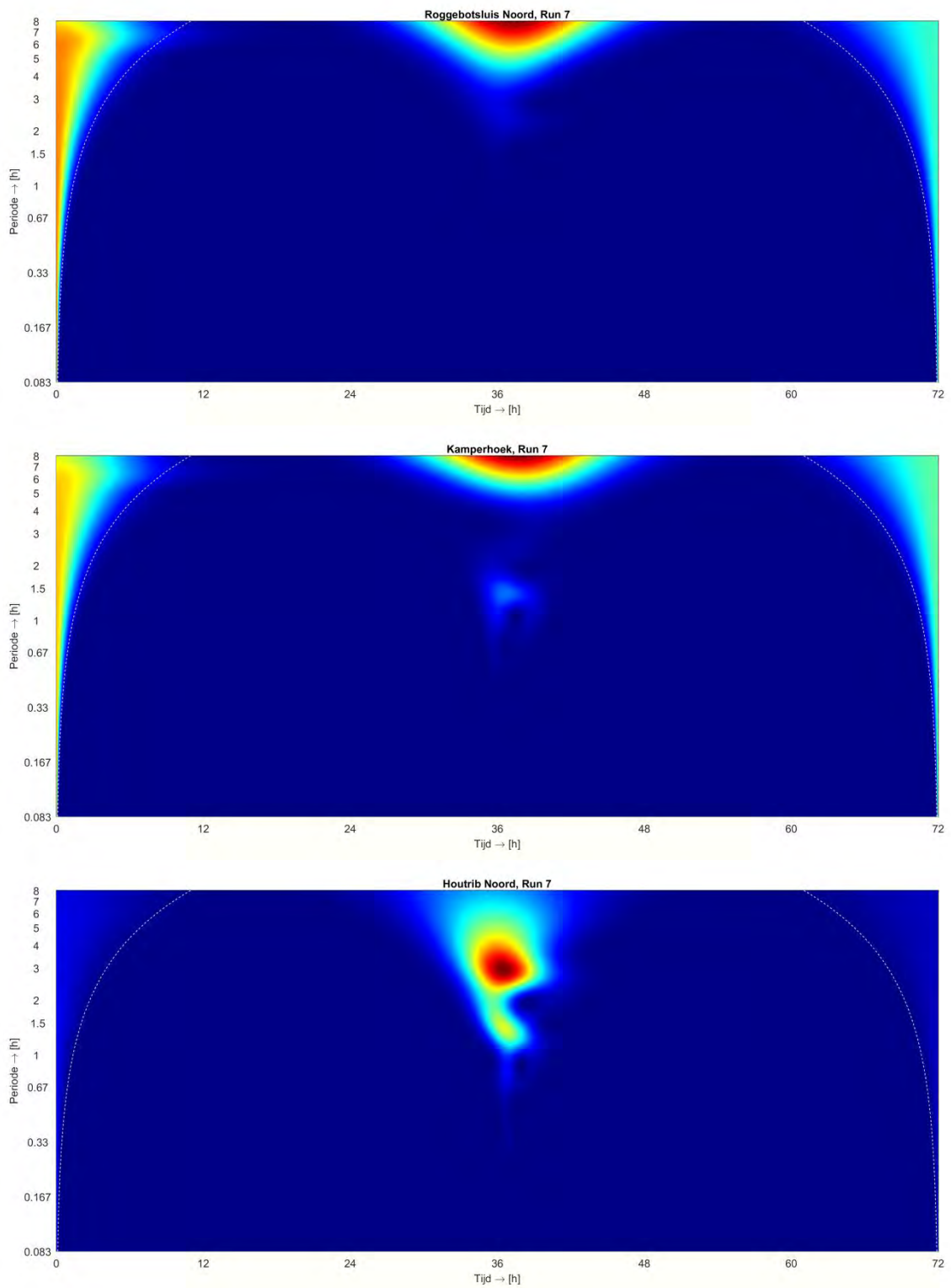


Figuur C.24 Waveletplots Run 6 voor locaties Kornwerderzand Binnen, Stavoren en Lemmer.

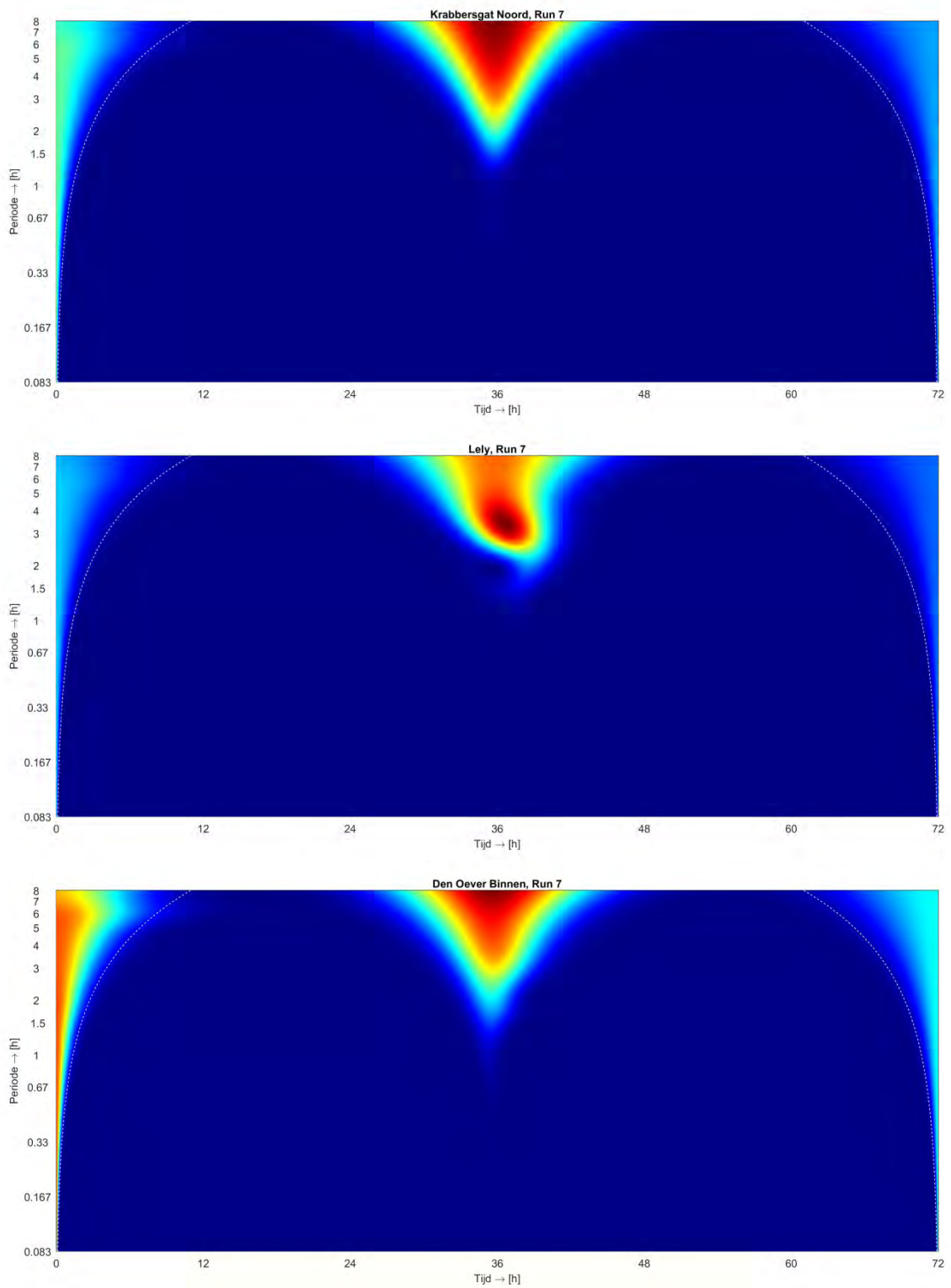
C.7 Run 7



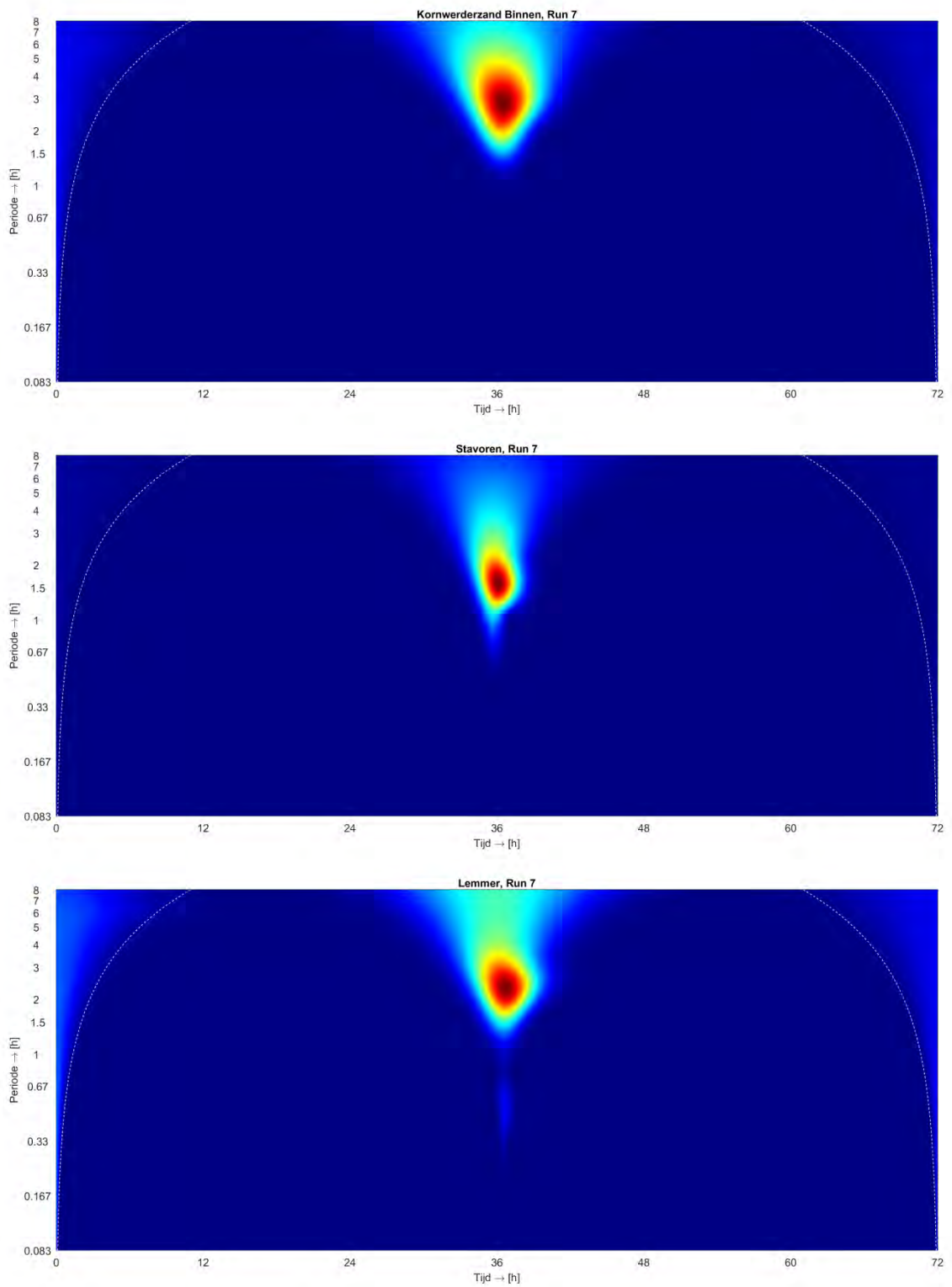
Figuur C.25 Waveletplots Run 7 voor locaties Kadoelen, Ramspolbrug Binnen en Ramspolbrug Buiten.



Figuur C.26 Waveletplots Run 7 voor locaties Roggebotsluis Noord, Kamperhoek en Houtrib Noord.



Figuur C.27 Waveletplots Run 7 voor locaties Krabbersgat Noord, Lely en Den Oever Binnen.



Figuur C.28 Waveletplots Run 7 voor locaties Kornwerderzand Binnen, Stavoren en Lemmer.