



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Seiches in het IJsselmeergebied

Verkennde studie WAQUA - HARMONIE

L. Muntjewerf

KNMI Intern Rapport IR-2016-06



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

RWS BEDRIJFSINFORMATIE

Seiches in het IJsselmeergebied

Verkennde studie WAQUA - HARMONIE

Datum	16 september 2016
Status	Definitief

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat WMCN
Informatie	Stageverslag MSc Climate Studies WUR
Uitgevoerd door	L. Muntjewerf
Datum	16 september 2016
Status	Definitief
Versienummer	1

INHOUD

VOORWOORD	I
SUMMARY	II
SAMENVATTING	IV
LIJST VAN FIGUREN	VI
LIJST VAN TABELLEN	VIII
1 INLEIDING	1
1.1 ACHTERGROND WATERSTANDSMONITORING IJSELMEERGEBIED	1
1.2 SEICHES: FENOMEENBESCHRIJVING	1
1.3 PROBLEEMSTELLING EN HYPOTHESEN	2
1.4 DOELSTELLINGEN	3
1.5 ONDERZOEKSVRAGEN EN AFBAKENING	4
1.6 LEESWIJZER	4
2 METHODOLOGIE	5
2.1 ALGEMENE ONDERZOEKSOPZET	5
2.2 BESCHRIJVING OBSERVATIEDATA	6
2.3 HISTORISCHE SEICHE-EVENTS 2009-2015	7
2.3.1 <i>Identificatie seiches in de tijdseries</i>	7
2.3.2 <i>Analyse seiche-events</i>	7
2.4 CASE STUDY	9
2.4.1 <i>Selectie seiche-event</i>	9
2.4.2 <i>HIRLAM operationele waterstandverwachtingen</i>	9
2.5 MODELCONFIGURATIE	10
2.5.1 <i>Waterstandsmodel WAQUA-IJVD</i>	10
2.5.2 <i>Weermodel HARMONIE</i>	11
2.6 MODELSIMULATIES	13
2.6.1 <i>Experimenten set-up</i>	13
2.6.2 <i>Testen WAQUA configuratie</i>	14
2.6.3 <i>Sensitiviteit tijdsresolutie: uniforme wind</i>	15
2.6.4 <i>Sensitiviteit tijdsresolutie: ruimtelijk variërende wind- en drukvelden</i>	16
2.6.5 <i>Vergelijking modelinvoer: uniforme wind vs. ruimtelijk variërende wind- en drukvelden</i>	16
2.7 ANALYSE MODELOUTPUT	17
3 RESULTATEN: TIJD SERIES ANALYSE	18
3.1 HISTORISCHE SEICHE-EVENTS	18
3.2 WEERWAARSCHUWINGEN	19
3.3 SEICHEVERWACHTINGEN KUST	20
4 RESULTATEN: CASE STUDY OPERATIONEEL	21
4.1 OBSERVATIES EN SEICHE-CLASSIFICATIE	21
4.2 HIRLAM OPERATIONELE MODELPRESTATIE	27
5 RESULTATEN: CASE STUDY MODELVERKENNING	28
5.1 TESTEN WAQUA CONFIGURATIE	28

5.2	UNIFORME WINDVELDEN	32
5.3	RUIMTELIJK VARIËRENDE WINDVELDEN	34
5.4	VERGELIJKING INVOERVELDEN	36
6	DISCUSSIE	38
7	CONCLUSIES.....	40
8	REFERENTIELIJST.....	42
BIJLAGE A	WAQUA CONFIGURATIE	44
BIJLAGE B	HARMONIE DETAILS	46
B.1	CONFIGURATIE SETTINGS	46
B.2	PARAMETERDETAILS.....	47
BIJLAGE C	STATISTIEK ANALYSE	48
BIJLAGE D	BESCHRIJVINGEN SEICHES LEMMER 2009 – 2015.....	50
D.1	TOELICHTING.....	50
D.2	EVENT OP 8 MEI 2009	51
D.3	EVENT OP 26 MEI 2009	53
D.4	EVENT OP 4 SEPTEMBER 2009.....	55
D.5	EVENT OP 26 NOVEMBER 2009.....	57
D.6	EVENT OP 23 AUGUSTUS 2010.....	59
D.7	EVENT OP 28 JUNI 2011	61
D.8	EVENT OP 9 DECEMBER 2011.....	63
D.9	EVENT OP 24 DECEMBER 2011.....	65
D.10	EVENT OP 3 JANUARI 2012	67
D.11	EVENT OP 29 APRIL 2012	69
D.12	EVENT OP 29 JULI 2012	71
D.13	EVENT OP 19 AUGUSTUS 2013	73
D.14	EVENT OP 16 SEPTEMBER 2013	75
D.15	EVENT OP 28 OKTOBER 2013	77
D.16	EVENT OP 3 NOVEMBER 2013	79
D.17	EVENT OP 5 DECEMBER 2013	81
D.18	EVENT OP 10 JUNI 2014.....	83
D.19	EVENT OP 28 JANUARI 2015	85
D.20	EVENT OP 31 MAART 2015.....	87
D.21	EVENT OP 6 MEI 2015	89
D.22	EVENT OP 5 JULI 2015	91
D.23	EVENT OP 26 AUGUSTUS 2015	93

Voorwoord

Dit rapport is geschreven als stageverslag van een viermaandse stage binnen de Masteropleiding Climate Studies aan de Wageningen Universiteit. De stageopdracht is gegeven door het Watermanagementcentrum Nederland (WMCN) van Rijkswaterstaat. In de stagebegeleiding is voorzien door Rijkswaterstaat, Deltares en het KNMI.

Graag wil ik iedereen van harte bedanken die me heeft geholpen tijdens deze stage. Ten eerste dank aan mijn begeleiders bij het WMCN; Aad Dollee voor zijn waardevolle adviezen in de wekelijkse voortgangsgesprekken en voor het conceptueel meedenken over het stageonderzoek in operationele context, Hans Hartholt voor de enthousiaste gesprekken over IJsselmeerfenomenen en voor zijn hulp in het verzamelen van data uit verschillende RWS applicaties. Ellen Claessens bedank ik graag voor haar constante betrokkenheid gedurende de stage, dat heb ik als heel prettig ervaren, en voor het regelen van praktische zaken.

Daarnaast bedank ik Hans de Vries voor de begeleiding vanuit het KNMI, alle hulp met HARMONIE en voor de prettige gedachtewisselingen over de validiteit en logica van mijn onderzoek. Ik bedank Menno Genseberger voor de begeleiding vanuit Deltares en voor het enthousiasme waarmee hij me heeft geïntroduceerd bij zijn collega's. Carlijn Bak- Eijsberg bedank ik voor haar hulp met WAQUA en voor alle tijd die ze steeds heeft genomen mijn vragen te beantwoorden. Dank aan Martijn de Jong voor de openheid waarmee hij me inzicht heeft gegeven in de manier van werken binnen zijn seiche-onderzoek en voor het zoeken naar synergie tussen de twee projecten. Bas Reijmerink ben ik zeer erkentelijk voor delen van de gefilterde waterstandsdata van Lemmer en voor zijn hulp met de waveletanalyses.

Verder bedank ik Marcel Bottema voor zijn bevlogen introductie in seichefenomenen aan het begin van mijn stage, dat was bijzonder nuttig en leerzaam. Bas Stengs bedank ik voor de inzichten die hij me gegeven heeft in RWsOS-meren. Dank aan Sander Tijm voor informatie over de operationele HIRLAM en HARMONIE modellen. Marcel van Schaik bedank ik graag voor zijn tekst en uitleg over meteorologische opwekkingsmechanismen van seiches en het beantwoorden van mijn meteovragen.

Ten slotte bedank ik Reinder Ronda, mijn begeleider vanuit Wageningen. Ik ben heel blij dat je me dit stageonderwerp onder de aandacht hebt gebracht. Daarnaast dank voor de goede begeleiding die je me gegeven hebt in de laatste fase van mijn studie.

Laura Muntjewerf
Utrecht, september 2016

Summary

Rapid water level fluctuations are regularly observed in Lake IJssel, The Netherlands. This type of phenomenon is referred to as seiches; surface waves in the frequency domain between wind waves with a typical period of seconds, and tidal waves with a typical period of 12 hours. Passing fronts or squall lines are assumed to be the primary triggering mechanism in this location. Information on seiches is possibly of relevance for the Water Management Centrum Nederland (Rijkswaterstaat) for giving out water level warnings. The forecasting of seiches is suboptimal within the current operational set of models. The assumed reason is that fluctuations of water levels, wind and pressure are occurring on a smaller time scale than is modelled.

This report is focussed on seiches in the Lemmer harbour. The first part is dedicated to better describe seiche characteristics in terms of occurrence, duration, amplitude and periodicity. The relation of water level fluctuations with the synoptic situation and with variability in wind and atmospheric surface pressure is explored. The analysed time period is 2009 – 2015. The second part aims at reproducing a seiche event with the operational models. The hydrodynamic model WAQUA-IJVD is forced in various temporal resolutions both with uniform wind fields measured at measuring pole FL02, and with spatially varying wind and pressure fields from the numerical weather model HARMONIE. Minimal requirements on the temporal resolution in order to reproduce a seiche are determined with the sensitivity of the hydrodynamic model for the temporal resolution of wind forcing.

Seiches in Lemmer in de period 2009-2015 have occurred 22 times with a mean amplitude of 0.47 meter. The dominant period of the fluctuation in 85% of the cases lies between 1.5 and 2.5 hour. The occurrence of seiches in Lemmer can often be related to a passing squall line from southwesterly to northwesterly directions. The squall line is a result of a passing active cold front or the passing of one or more troughs. Seiches in Lemmer occur more frequent in case a weather warning for severe wind gusts or thunderstorms is issued by the KNMI. This also applies in case the type of seiches that are triggered by a rapid turn or increase in wind is expected to occur in the coastal regions of The Netherlands.

The mean dominant period of fluctuations in wind speed is 3 hour. Atmospheric surface pressure does not fluctuate like the water level and the wind. Instead a steady decline is shown prior to the passing of a cold front, with a sudden increase after. With the passing of a line of thunder a pressure jump rapidly followed by a pressure drop is often observed. The variability in wind and in water levels near Lemmer are in the same order of magnitude. A margin exists within the various periodicities in the wind fluctuation upon which the water may react. Periodicity of wind fluctuations is relatable to the seiche period within an estimated margin of one hour. The overlap between wind and water motion appears sufficient in Lemmer in order for seiches to be related to wind fluctuations.

Seiche phenomena can be well simulated with WAQUA when uniformly forced with measured winds. Simulations with wind forcing in time steps of 30 minutes capture 90% of the extreme values in the observations. This 30 minutes is stated to be the minimal requirement to the temporal resolution of the wind forcing in order to reproduce a seiche signal in Lemmer. A linear improvement in water level forecasts

is visible with increasing the temporal resolution of the uniformly measured wind forcing for the domain of intervals that is tested for. This trend is not visible in the simulations forced with the spatially varying fields from HARMONIE; the sensitivity of model performance for temporal resolution is small. WAQUA model performance is mainly dependent on the quality of meteorological input rather than on its temporal resolution.

Samenvatting

In het IJsselmeergebied zijn regelmatig snelle waterstandsfluctuaties te zien. Dit worden wel seiches genoemd, en zijn oppervlaktegolven die vallen in het frequentiedomein tussen windgolven met een typische periode van seconden, en getijdegolven met een typische periode van 12 uur. De veronderstelling is dat het voornaamste opwekkingsmechanisme van seiches in het IJsselmeergebied het overtrekken van een front of een buienlijn is. Voor het Water Management Centrum Nederland van Rijkswaterstaat is seiche-informatie mogelijk relevant voor waarschuwing of alarmering. Seiches worden met de huidige operationele modellentrein voor waterstandsverwachtingen niet goed verwacht. De veronderstelling is dat de fluctuaties van waterstanden, wind en luchtdruk plaatsvinden op een tijdschaal kleiner dan waar de modellentrein mee rekent.

Dit verslag richt zich op seiches in de haven van Lemmer. Het eerste deel richt zich op het beter in kaart brengen van de karakteristieken van seiches in termen van frequentie van optreden, duur, amplitude, periodiciteit. Ook wordt nagegaan hoe de relatie van de waterstandsfluctuatie is met de synoptische situatie en met variabiliteit in wind- en luchtdruk. De periode die is geanalyseerd is 2009-2015. Het tweede deel is gericht op het reproduceren van een seiche-event met de onderdelen van de operationele modellentrein. Aan het waterstandsmodel WAQUA-IJVD zijn zowel windvelden gemeten bij meetpaal FL02 uniform als windvelden afkomstig van het weermodel HARMONIE opgelgd in verschillende tijdsresoluties. Met de gevoeligheid van het waterstandsmodel voor de tijdsresolutie van de windinvoer kan bepaald worden met welke tijdsresolutie van windinvoer het waterstandsmodel ten minste geforceerd dient te worden om het seiche-sigitaal te produceren.

Seiches in Lemmer zijn in de periode 2009-2015 22 keer voorgekomen met een gemiddelde amplitude van 0,47 meter. 85% van de gevonden seiches heeft een dominante periode van de waterstandsfluctuatie tussen de 1,5 en 2,5 uur. Veelal komen seiches bij Lemmer voor bij het overtrekken van een buienlijn vanuit zuidwestelijk tot noordwestelijke richting. Deze kan veroorzaakt worden door het overtrekken van een koufront of een of meerdere troggen. Wanneer er een weeralarm wordt uitgegeven voor het KNMI voor zware windstoten of zware onweersbuien is er een grotere kans op seiches in Lemmer. Dit geldt ook wanneer er een seicheverwachting wordt uitgegeven voor de kustregio voor seichetypes die worden opgewekt door een snelle windtoename of -draaiing.

De dominantie periodiciteit van de schommelingen in de windsnelheid ligt op 3 uur gemiddeld. De luchtdruk fluctueert niet zoals de waterstand en de wind. Wel is er vaak een gestage daling bij de passage van een koufront, of een snelle schommeling bij het overtrekken van een buienlijn met onweer voorafgaand of ten tijde van de waterstandsfluctuatie. De variabiliteit in wind en variabiliteit in de waterstand bij Lemmer is in vergelijkbare orde van grootte. Er bestaat een marge binnen de verschillende periodiciteiten die aanwezig zijn in de windfluctuaties waar het water op kan reageren. Een schatting van deze marge waarmee de periodiciteit in windfluctuaties samenhangt met periodiciteit van de seiche is een uur. De overlap tussen wind- en waterbewegingen lijkt in Lemmer voldoende om het bestaan van seiches te kunnen relateren aan windfluctuaties.

Seiche-achtige waterstandsfluctuaties kunnen goed gesimuleerd worden met WAQUA met uniform opgelegde gemeten. In tijdstappen van 30 minuten vatten deze simulaties 90% van de extreme waarden van de observaties. Gesteld wordt dat dit de minimale voorwaarde aan de tijdsresolutie is om een seichesignaal te simuleren in Lemmer. Met het verhogen van de tijdsresolutie is een lineaire verbetering te zien in de waterstandsverwachtingen voor het domein van tijdsintervallen waarvoor getest is. Bij de simulaties waarin ruimtelijk variërende wind- en drukvelden uit HARMONIE opgelegd worden is deze relatie niet te zien; de modelprestatie is weinig gevoelig voor het vergroten van de tijdsresolutie van windinvoer. De modelperformance van WAQUA binnen de orde van grootte van het bereik van waterstandsfluctuaties die geëvalueerd zijn, hangt hoofdzakelijk af van de kwaliteit van de meteorologische invoer, meer dan van de tijdsresolutie waarin deze wordt opgelegd.

Lijst van figuren

FIGUUR 1: OPERATIONELE MODELLENTREIN WMCN RWSOS-MEREN. FIGUUR SAMENGESTELD MET DANK AAN BAS STENGES, DELTARES.	1
FIGUUR 2: HERKOMST MEETDATA LEMMER (52°50'19.78"N, 5°42'51.02"E), FL02 ROTTERDAMSE HOEK (52°44'54.10"N, 5°33'32.40"E), STAVOREN (52°53'48.00"N, 5°22'60.00"E) EN LELYSTAD LUCHTHAVEN (52°27'26.20"N, 5°31'10.68"E).	6
FIGUUR 3: OVERZICHT VAN HET IJVD GEBIED, FIGUUR OVERGENOMEN VAN DELTARES (2011A). DE IJSEL LOOPT TOT AAN OLT. DE IJVD-VERSIE DIE HIER GEBRUIKT IS, LOOPT DE VECHT NIET DOOR TOT EMLICHHEIM MAAR IS AFGEKNIPT BIJ OMMEN.	10
FIGUUR 4: WATERSTANDEN LEMMER TEST-SIMULATIE ZONDER WINDFORCERING VOOR 5 DECEMBER 2013.	11
FIGUUR 5: DOMEIN GEBRUIKT VOOR DE HARMONIE SIMULATIE, ZOALS OOK OPERATIONEEL GEBRUIKT. LEGENDA: HOOGTEMETERS (KNMI, 2012).	12
FIGUUR 6: UITSNEDE VAN HARMONIE VAN MODELPARAMETERS OM AAN WAQUA OP TE LEGGEN, GECONVERTEERD VAN LAMBERTPROJECTIE NAAR EEN RECHTHOEKIG ROOSTER. GEMAAKT MET KNMI-SCRIPT <i>HARM2DCSMv6</i> VOOR \$DOMAIN=IJM. LEGENDA: WINDSNELHEID, CONTOURLIJNEN: LUCHTDRIK.	12
FIGUUR 7: LINEAIRE RELATIE TUSSEN WINDSNELHEID (m s^{-1}) EN DE WINDSTRESSCOEFFICIENT MET CONSTANTEN ZOALS GEKALIBREERD DOOR RIZA (1999). FIGUUR OVERGENOMEN VAN DELTARES (2011A).	14
FIGUUR 8: WEERKAARTEN BIJ DE SINTERKLAASSTORM. BOVENSTE PANEEL: 12 UTC (13 CET) 5 DECEMBER 2013. ONDERSTE PANEEL: 18UTC (19 CET) 5 DECEMBER 2013. BRON: KNMI.	22
FIGUUR 9: NEERSLAGRADARKAART 15:15 CET 5 DECEMBER 2013. BRON: BUIENRADAR.	23
FIGUUR 10: BLIKSEMANALYSEKAART 5 DECEMBER 2013. BRON: KNMI.	23
FIGUUR 11: WAVELETSPECTRUM [-] EN GEFILTERDE WATERSTANDSMETINGEN [CM] SEICHE-EVENT LEMMER OP 5 DECEMBER 2013. TIJD IN CET (UTC+1) VAN 04.12.2013 TOT 07.12.2013, ETMAAL VAN 5 DECEMBER TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	24
FIGUUR 12: WAVELETSPECTRUM [-] EN METINGEN WINDSNELHEID [M/S] SEICHE-EVENT LEMMER OP 5 DECEMBER 2013. TIJD IN CET (UTC+1) VAN 04.12.2013 TOT 07.12.2013, ETMAAL VAN 5 DECEMBER TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	24
FIGUUR 13: WAVELETSPECTRUM [-] EN METINGEN V-WINDCOMPONENT (VECTOR ZUID-NOORD)[M/S] SEICHE-EVENT LEMMER OP 5 DECEMBER 2013. TIJD IN CET (UTC+1) VAN 04.12.2013 TOT 07.12.2013, ETMAAL VAN 5 DECEMBER TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	25
FIGUUR 14: WAVELETSPECTRUM [-] EN METINGEN U-WINDCOMPONENT (VECTOR OOST-WEST)[M/S] SEICHE-EVENT LEMMER OP 5 DECEMBER 2013. TIJD IN CET (UTC+1) VAN 04.12.2013 TOT 07.12.2013, ETMAAL VAN 5 DECEMBER TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	25
FIGUUR 15: SAMENVATTING METINGEN SEICHE-EVENT LEMMER OP 5 DECEMBER 2013. ONGEFILTERDE WATERSTAND TE LEMMER [CM T.O.V. NAP], LUCHTDRIK [HPA] TE LELYSTAD, WINDSNELHEID [M/S] EN WINDRICHTING [GRADEN] TE MEETPAAL FL02 TIJD IN CET (UTC+1) VAN 04.12.2013 TOT 07.12.2013, ETMAAL VAN 5 DECEMBER TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	26
FIGUUR 16: OPERATIONELE WATERSTANDSVERWACHTINGEN O.B.V. GEDOWNSCALEDE HIRLAM-VERWACHTINGEN (ZWART) VERSUS OBSERVATIES (ROOD). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	27
FIGUUR 17: EERSTE BENADERING EX1 (BLAUW) VERSUS OBSERVATIES (ROOD). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	28
FIGUUR 18: PADAFHANKELIJKHEID INITIALISATIE EN SIMULATIETIJD: EX1 (BLAUW) VERSUS EX6 (PAARS GEBROKEN). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	29
FIGUUR 19: NUMERIEKE STABILITEIT INTERNE DISCRETISATIE: EX4 (BLAUW GEBROKEN) VERSUS EX7 (ROZE STIPPELLIJD). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	29

FIGUUR 20: TEST WINDSTRESSCONVERSIE: EX1 (BLAUW), EX2 (GROEN GEBROKEN) EN EX5 (PAARS). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	30
FIGUUR 21: GEVOELIGHEID FIJNE TIJDSRESOLUTIE: EX3 (BLAUW) EN EX4 (GROEN). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.....	31
FIGUUR 22: GEVOELIGHEID MODELPRESTATIE VOOR DE TIJDSRESOLUTIE VAN UNIFORM OPGELEGDE WINDVELDEN DR IS DE REFINED INDEX OF AGREEMENT, E DE COEFFICIENT OF EFFICIENCY EN R DE PEARSON CORRELATIECOËFFICIËNT.....	33
FIGUUR 23: GEVOELIGHEID VAN DE ERROR EN DE BEREIKRATIO VOOR DE TIJDSRESOLUTIE VAN DE UNIFORM OPGELEGDE WINDVELDEN.	33
FIGUUR 24: TENDENTIE EXPERIMENTEN UNIFORME WINDVELDEN: OBSERVATIES (ROOD), 10 MINUUT FORCERING EX2 (GROEN) EN 180 MINUUT FORCERING EX12 (BLAUW). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	33
FIGUUR 25: GEVOELIGHEID MODELPRESTATIE VOOR DE TIJDSRESOLUTIE VAN DE RUIMTELIJK VARIËRENDE WIND- EN DRUKVELDEN. DR IS DE REFINED INDEX OF AGREEMENT, E DE COEFFICIENT OF EFFICIENCY EN R DE PEARSON CORRELATIECOËFFICIËNT.....	35
FIGUUR 26: GEVOELIGHEID VAN DE ERROR EN DE BEREIKRATIO VOOR DE TIJDSRESOLUTIE VAN DE RUIMTELIJK VARIËRENDE WIND -EN DRUKVELDEN.....	35
FIGUUR 27: TENDENTIE EXPERIMENTEN HARMONIE VELDEN: OBSERVATIES (ROOD), 1 MINUUT FORCERING EN7 (GROEN) EN 180 MINUUT FORCERING EN1 (BLAUW). WATERSTAND IN CM NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	35
FIGUUR 28: WINDSNELHEID [M/S] VAN OBSERVATIES FL02 (ROOD) EN VAN HARMONIE IN DE GRIDBOX WAARIN DE COÖRDINATEN VAN MEETPAAL FL02 LIGGEN (ZWART). 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN.	36
FIGUUR 29: WINDRICHTING [DEG] VAN OBSERVATIES FL02 (ROOD) EN VAN HARMONIE IN DE GRIDBOX WAARIN DE COÖRDINATEN VAN MEETPAAL FL02 LIGGEN (ZWART). 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN	36
FIGUUR 30: LUCHTDruk [hPa] VAN OBSERVATIES LELYSTAD LUCHTHAVEN (ROOD) EN VAN HARMONIE IN DE GRIDBOX WAARIN DE COÖRDINATEN VAN LELYSTAD LUCHTHAVEN LIGGEN (ZWART). 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 TUSSEN ZWARTE VERTICALE STIPPELLIJNEN	37

Lijst van tabellen

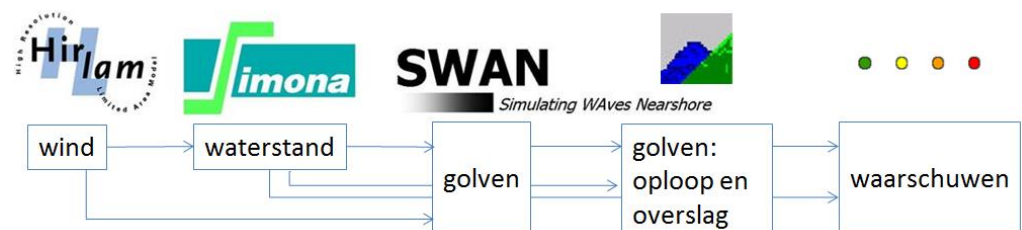
TABEL 1: SEICHE TYPES VOLGENS CLASSIFICATIE KNMI WERKDOCUMENT (KNMI, 2004).	8
TABEL 2: OPERATIONELE WATERSTANDSVERWACHTINGEN UIT WATERCOACH-MEREN. BRON: RIJKSWATERSTAAT.	9
TABEL 3: EXPERIMENTEN SET-UP WAQUA SIMULATIES. EN EN EO REFEREREN NAAR SIMULATIES MET RUIMTELIJKE WINDVELDEN UIT HARMONIE, EX NAAR UNIFORM OPGELEGDE WIND VAN MEETPAAL FL02 OF MEETSTATION STAVOREN. VERDER DE RESOLUTIE VAN DE WINDINVOER IN MINUTEN, DE FORMULERING OM 10 METER WIND TE CONVERTEREN NAAR WINDSTRESS, DE DUUR EN DE INTERNE TIJDSTAP VAN DE WAQUA- SIMULATIE IN MINUTEN.	13
TABEL 4: SAMENVATTENDE KARAKTERISTIEKEN VAN SEICHES IN LEMMER OVER DE PERIODE 2009 – 2015: DATUM, AMPLITUDE WATERSTANDSFLUCTUATIE (M), DOMINANTE PERIODES (UUR) VAN SCHOMMELINGEN IN DE WATERSTAND, DE WINDSNELHEID, DE WINDSNELHEID VAN DE U-COMPONENT, DE WINDSNELHEID VAN DE V-COMPONENT, EN HET TYPE VAN DE SEICHE.	18
TABEL 5: AANTAL DOOR HET KNMI UITGEGEVEN WEERALARMEN EN CODE ORANJE WAARSCHUWINGEN VOOR EXTREEM WEER M.B.T. ZWARE WINDSTOTEN EN ZWARE ONWEERSBUIEN IN DE PERIODE TUSSEN 2009 EN 2015, DE DATA VAN SEICHES DIE TEGELIJK MET EEN KNMI WEERWAARSCHUWING PLAATSVONDEN EN DE KANS OP EEN SEICHE IN LEMMER TIJDENS EEN KNMI WEERWAARSCHUWING GEBASEERD OP DE PERIODE 2009-2015.	20
TABEL 6: AANTAL DOOR HET KNMI UITGEGEVEN SEICHEVERWACHTINGEN PER CLASSIFICATIE TYPE IN DE PERIODE TUSSEN 2009 EN 2013, DE DATA VAN SEICHES DIE TEGELIJK MET EEN KNMI SEICHEVERWACHTING PLAATSVONDEN EN DE KANS OP EEN SEICHE IN LEMMER TIJDENS EEN KNMI SEICHEVERWACHTINGEN GEBASEERD OP DE PERIODE 2009-2013.	20
TABEL 7: STATISTIEK OPERATIONELE WATERSTANDSVERWACHTINGEN O.B.V. GEDOWNSCALEDE HIRLAM- VERWACHTINGEN IN VERGELIJKING MET OBSERVATIES.	27
TABEL 8: STATISTIEK VERSCHIL PADAFHANKELIJKHEID	28
TABEL 9: STATISTIEK INTERNE DISCRETISATIE	29
TABEL 10: STATISTIEK EXPERIMENTEN WINDSTRESSCONVERSIE IN VERGELIJKING MET OBSERVATIES.	30
TABEL 11: STATISTIEK GEVOELIGHEID FIJNE TIJDSRESOLUTIE	30
TABEL 12: STATISTIEK GEVOELIGHEID TIJDSRESOLUTIE UNIFORME WIND	32
TABEL 13: STATISTIEK GEVOELIGHEID TIJDSRESOLUTIE RUIMTELIJK VARIËRENDE WIND- EN DRUKVELDEN	34

1 Inleiding

1.1 Achtergrond waterstandsmonitoring IJsselmeergebied

Rijkswaterstaat is een uitvoeringsorganisatie van het ministerie van Infrastructuur & Milieu. Als zodoende is ze verantwoordelijk voor het beheer van Rijkswegen, -vaarwegen en -wateren, en waterveiligheid in Nederland. Het WaterManagementCentrum Nederland (WMCN) van Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor informatievoorziening voor scheepvaart en waterschappen met betrekking tot de Rijkswateren. Hieronder vallen waarschuwingen voor hoogwater en stormsituaties. Voor het IJsselmeergebied voorziet de WMCN-meren in de berichtgeving richting de dijkbeheerders. De berichtgeving bestaat uit waterstanden en golfinformatie.

De waterstandsmonitoring bij het WMCN gebeurt met waterstandsverwachtingen die voortkomen uit een aantal opeenvolgende modelberekeningen, zie Figuur 1. Elke 6 uur in uurlijkse tijdstappen worden windverwachtingen van het numerieke weermodel HIRLAM in 11 km ruimtelijke resolutie aangeleverd door het KNMI. Met een downscale module wordt de ruimtelijke resolutie van de windvelden verfijnd tot 500m x 500m. De gedownscalede windvelden worden opgelegd aan het tweedimensionale hydrodynamisch model WAQUA-IJVD dat de verandering in tijd en ruimte van waterstanden in het IJsselmeer simuleert. Waterstandsvelden worden elk uur geproduceerd in een horizontale resolutie tussen 100m en 50m. Golfmodellering gebeurt met SWAN vanuit de gedownscalede windvelden en waterstanden van WAQUA. De golfoploop en -overslag per dijkvak wordt berekend door de modules Voorlandmodule en PC-Overslag die gebruik maken van dijkprofielen en het golfbeeld uit SWAN. De gesimuleerde waarden worden vergeleken met vastgestelde alarm- en waarschuwingsspeilen: waarschuwing of alarmering gebeurt bij overschrijding door golfoverslag in dijkvakken, en door waterstanden voor buitendijkse locaties en kunstwerken. Distributie naar dijkbeheerders en publiek gebeurt onder andere via internet en e-mail.



Figuur 1: Operationele modellentrein WMCN RWSOS-meren. Figuur samengesteld met dank aan Bas Stengs, Deltares.

1.2 Seiches: fenomeenbeschrijving

In het IJsselmeergebied zijn regelmatig snelle waterstandsfluctuaties te zien. Hiervoor bestaat de term 'seiche', een fenomeen dat door Groen en Dorrestein (1976) als volgt wordt omschreven:

"Een 'seiche' is een zg. staande golf of schommeling, waaraan een meer of zeebodem als geheel onderworpen kan zijn en die te vergelijken is met het schommelen van het water in een langwerpige bak, waarvan men één uiteinde even heeft opgetild en weer neergezet. De perioden van seiches hangen af van de afmetingen van het waterbassin en kunnen van enige minuten tot vele uren bedragen."

Voor het identificeren van seiches in waterstandsmetingen definieert De Jong (2004a) een seiche als een oppervlaktegolf die valt in het frequentiedomein tussen windgolven met een typische periode van seconden, en getijdegolven met een typische periode van 12 uur. In dit rapport wordt voor de benaming van zulke waterstandsfluctuaties verder de term seiche gehanteerd.

Een vaak aangehaald voorval als het gaat over seiches in het IJsselmeergebied, is de Lemster rissaga (De Jong, 2006). Op 11 juli 1984 werd Lemmer onverwachts getroffen door een extreem snelle waterstandsverandering. Voorafgaand aan de golf daalt het waterpeil met ongeveer een meter, om naar verluidt binnen enkele minute met anderhalve meter te stijgen. Straten in Lemmer lopen onder water, er is materiele schade aan de havenkade, jachten en vissersnetten.

In de dagen voorafgaand aan de Lemster rissaga trekt vanuit een lagedruksysteem over Ierland een koufront uit zuidwestelijke richting over het land. Op 11e juli is het front juist gepasseerd. Tegen het middaguur volgen twee buienlijnen vanuit het zuiden elkaar snel op, met hevige neerslag, windstoten en onweer. Tussen de buienlijnen door krimpt de wind van zuidwest naar noordoost en wordt een snelle luchtdrukfluctuatie waargenomen: een stijging van 5 hPa, gevolgd door een daling van 11 hPa naar verluidt binnen een tijdsbestek van een half uur.

De Jong (2004a) heeft voor de haven van Rotterdam gevonden dat seiches samenvallen met variabiliteit in de windsnelheid en luchtdruk. Voor het IJsselmeergebied is een verkennend onderzoek gedaan door De Jong en Stolker (2004), waarin gesteld wordt dat opwekkingsmechanismen van seiches in havenbekkens en meren overeen komen met de opwekkingsmechanismen zoals beschreven in het KNMI werkdocument voor de seicheverwachting in het kustgebied (KNMI, 2004).

1.3 Probleemstelling en hypothesen

De meeste seiches in het IJsselmeergebied eindigen niet met nadelige gevolgen, in tegenstelling tot de Lemster rissaga. Het is echter goed denkbaar dat een seiche zou samenvallen met opwaaiing van een storm. Seiches geven dan een verhoging in de waterstand bovenop de waterstandsverhoging door storm. Voor WMCN-meren zijn dat situaties waarin seiche-informatie relevant is in waarschuwing of alarmering. De veronderstelling is dat het voornaamste opwekkingsmechanisme van seiches in het IJsselmeergebied het overtrekken van een front of een buienlijn is. Wind oefent kracht uit op het water. Afhankelijk van snelheid, richting, en duur veroorzaakt dit scheefstand van het wateroppervlak. Variabiliteit in snelheid en richting zet de schommeling in gang. De grootste variaties in wind komen voor bij buien in een onstabiele atmosfeer waar verticale uitwisseling van energie groot is.

Met de huidige operationele modellentrein RWSOS-meren worden seiches niet goed verwacht. De veronderstelling is dat de fluctuaties van waterstanden, wind en luchtdruk plaatsvinden op een tijdschaal kleiner dan waar de modellentrein mee rekent. Seiches die opgewekt worden door windfluctuaties met een periode kleiner dan twee uur, kunnen niet goed voorspeld worden met de huidige modellentrein waarin HIRLAM-windvelden uurlijks worden opgelegd. Daarnaast is de ruimtelijke

resolutie van HIRLAM een beperkende factor in de modellentrein. Atmosferische processen die plaatsvinden op een ruimtelijke schaal kleiner dan de 11 km ruimtelijke resolutie waar HIRLAM mee rekent, worden geparameteriseerd. Deze parameterisaties bevatten constanten die empirisch en niet fysisch bepaald zijn. Met name de voorspelkwaliteit van kortdurende convectieve verschijnselen zoals buienlijnen door HIRLAM is beperkt. Seiches die opgewekt worden door zulke verschijnselen komen niet goed in de waterstandsverwachtingen.

HARMONIE (HIRLAM ALADIN Research on Mesoscale Operational NWP In Euromed) is het tweede operationele numerieke weermodel dat het KNMI gebruikt. HARMONIE is de opvolger van het HIRLAM model, maar beslaat een beperkter gebied. Er zijn twee grote verschillen tussen de weermodellen. Ten eerste heeft HARMONIE een fijnere horizontale resolutie; 2,5 km in default settings. Ten tweede is het in tegenstelling tot HIRLAM een niet-hydrostatisch model. Dat betekent dat de bewegingsvergelijkingen ook in de verticaal expliciet worden opgelost, in plaats van hydrostatisch evenwicht aan te nemen. Deze twee aspecten zorgen dat HARMONIE beter is dan HIRLAM in het simuleren van processen op kleine schaal, zoals verticale bewegingen, die belangrijk zijn voor convectieve neerslagsystemen en scherpe fronten. Verondersteld wordt dat het een verbetering met zich meebrengt in de voorspelkwaliteit van seiches, wanneer HARMONIE-windvelden opgenomen worden in de operationele modellentrein voor waterstandsverwachtingen.

1.4 Doelstellingen

Voor het uitvoeren van de taak van WMCN-meren is het gewenst meer inzicht te krijgen in het optreden van seiches. De eerste doelstelling is de karakteristieken van seiches in het IJsselmeergebied beter in kaart brengen: in termen van hoe vaak het voorkomt, hoe de samenhang is met de meteorologische situatie, hoe de relatie is met extreme weersomstandigheden en met seiches aan de kust.

Om in de toekomst kwantitatieve uitspraken te kunnen doen over seiches is het ten tweede nodig om te onderzoeken in hoeverre seiches zijn te reproduceren met de onderdelen van de operationele modellentrein. Hierin gaat het voornamelijk om de gevoeligheid van het waterstandsmodel voor de tijdsresolutie van de windinvoer. Doel van de gevoeligheidsanalyse is te bepalen met welke tijdsresolutie van windinvoer het waterstandsmodel ten minste geforceerd dient te worden om het seiche-sigitaal te produceren. Deze kennis kan in de overweging worden meegenomen van het besluit seicheverwachtingen al dan niet te includeren in het operationele systeem van het IJsselmeergebied. Binnen WMCN wordt onderzocht om HARMONIE op te nemen in RWsOS-meren. Ten einde hieraan bij te dragen worden weersverwachtingen van HARMONIE gebruikt.

Dit verslag richt zich op seiches in de haven van Lemmer omdat wanneer er seiches in het IJsselmeergebied zijn, die op deze locatie vaak duidelijk te zien zijn. De geografische ligging van Lemmer, dat is een trechtervormige vernauwing oostwaarts, zorgt mogelijk voor extremere waterstandsfluctuaties wanneer de schommeling wordt aangezet vanuit het westen (Deltares, 2015).

1.5 Onderzoeksvragen en afbakening

De doelstelling van dit rapport zijn tweeledig. De onderzoeksvragen zijn op te delen in twee categorieën. Ten eerste de typering van seiches in Lemmer. Ten tweede het modelleren en reproduceren van een seiche-fenomeen in Lemmer:

Typering van het seiche-fenomeen

- Hoe is een seiche te karakteriseren in termen van frequentie van optreden, duur, amplitude, periodiciteit?
- Hoe is de synoptische situatie te karakteriseren wanneer seiches voorkomen?
- In welke mate is er een empirische relatie tussen wind- en druk variabiliteit, en variabiliteit in de waterstand?
- In welke mate is een seiche in Lemmer te koppelen aan een KNMI weerwaarschuwing?
- In welke mate is een seiche in Lemmer te koppelen aan een seicheverwachting aan de kust?

Modelleren van het seiche-fenomeen

- In hoeverre kunnen seiches worden gesimuleerd met het waterstandsmodel WAQUA?
 - o Geforceerd met uniform opgelegde gemeten wind
 - o Geforceerd met HARMONIE-windvelden
- Wat zijn de minimale voorwaarden om een seichesignaal te simuleren met betrekking tot de tijdsresolutie van de windforcering?

1.6 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden details van de methode gegeven waarmee de onderzoeksvragen beantwoord zijn. Sectie 2.1 beschrijft de algemene onderzoeksopzet. Hoofdstuk 3 beslaat de resultaten van de tijdserieanalyse van observaties. In hoofdstuk 4 worden observaties en operationele waterstandsverwachtingen besproken van de case study. Hoofdstuk 5 behandelt vervolgens de modelsimulaties van de case study. Punten van discussie worden in hoofdstuk 6 besproken. Hoofdstuk 7 bevat de conclusies met het beantwoorden van de onderzoeksvragen.

2 Methodologie

2.1 Algemene onderzoekopzet

In de tijdserie van waterstandsobservaties van Lemmer over de periode 2009 – 2015 is gezocht naar fluctuaties met een periodiciteit groter die van windgolven en kleiner dan die van getijdgolven. In sectie 2.2 wordt de herkomst van de observatiedata beschreven. Uit de metingen zijn waterstandsfluctuaties gevonden die zijn aangemerkt als seiche. Sectie 2.3.1 beschrijft de analysemethode waarmee amplitude en periodiciteit van fluctuaties in de waterstand en wind zijn vastgesteld, dat zijn filtering door een discrete Fouriertransformatie en waveletanalyses.

Met behulp van weerkaarten zijn de gevonden seiches geclassificeerd binnen de bestaande seiche-types die het KNMI en HydroMeteoCentrum (HMC) hanteren. Er is een koppeling gemaakt is tussen wind- en waterstandsfluctuaties. Daarnaast zijn de gevonden seiches gerelateerd aan meldingen binnen bestaande procedures voor extreem weer en seiches in de kustregio. Dit zijn weerwaarschuwingen van het KNMI voor onweer en zware wind, en seicheverwachtingen voor de kustregio's uitgegeven door HMC. In sectie 2.3.2 wordt de methode van het bovenstaande beschreven.

Uit de reeks seiches is een event gekozen om nader te bestuderen en te reproduceren met onderdelen van de modellentrein. Overwegingen van de seiche keuze zijn opgenomen in sectie 2.4.1. De waterstandsverwachtingen van destijds is samengesteld uit delen van de reeks operationele waterstandsverwachtingen zoals beschreven in sectie 2.4.2.

De modellen om de seiche in Lemmer te reproduceren zijn WAQUA-IJVD en HARMONIE (sectie 2.5 voor modelbeschrijving en configuratie). Een aantal simulaties zijn gedaan met zowel uniform opgelegde gemeten wind van meetpaal FL02 als met ruimtelijk variërende wind- en drukvelden van HARMONIE om de gevoeligheid van de modelprestatie voor de tijdsresolutie van de windinvoer te bepalen. Daar voorafgaand zijn een aantal simulaties gedaan om de WAQUA-configuratie te testen. De experimentele set-up wordt besproken in sectie 2.6. Sectie 2.7 geeft de statistische methode om de resultaten van de simulaties onderling en met observaties te vergelijken.

2.2 Beschrijving observatiedata

De tijdseries van waterstand-, wind-, en luchtdrukobservaties zijn afkomstig van het Landelijk Meetnet Water (LMW), Rijkswaterstaat en het KNMI. De locatie van de meetpunten zijn weergegeven in Figuur 2.

Het LMW is een voorziening van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu die onder andere waterstanden op het IJsselmeer meet. Voor waterstandsmetingen wordt in Lemmer gebruikt gemaakt van een vlotter, ook wel digitale niveaumeter (DNM) genoemd. De gebruikte tijdserie bevat de variabelen waterstand (cmNAP) over een periode van 6 jaar; 00:00 CET 01.01.2009 – 23:50 CET 31.12.2015. Interval van observaties is 10 minuten. Missende waarden zijn opgevuld d.m.v. lineaire interpolatie. Bron data: LMW.

Rijkswaterstaat heeft een aantal meetpalen in het IJsselmeergebied waar golf- en windmetingen opgenomen worden. Windmetingen van de meetopstelling FL02 (Rotterdamse Hoek) in het IJsselmeer zijn gebruikt. De tijdserie bevat de variabelen windsnelheid (ms^{-1}) en windrichting (graden) over een periode van 6 jaar; 00:05 CET 01.01.2009 – 23:55 CET 31.12.2015. Interval van observaties is 10 minuten, missende waarden 16,19% van het totaal zijn lineair geïnterpoleerd. Bron data: Rijkswaterstaat.

Het KNMI heeft een viertal automatische meetstations rond het IJsselmeer waar verschillende meteorologische waarnemingen gedaan worden. Windmetingen van Stavoren zijn afkomstig van het KNMI meetnet automatische weerstations en bevat ook de variabelen windsnelheid (ms^{-1}) en windrichting (graden). Interval van de observaties is 1 minuut. Gebruikte tijdserie dekt de periode 00:00 UTC 01.01.2009 – 23:59 UTC 31.12.2015. Bron data: KNMI.

Op luchthaven Lelystad worden luchtvaartmeteorologische waarnemingen gedaan, hiervan zijn luchtdrukmetingen gebruikt. De tijdserie bevat de variabele luchtdruk op zeeniveau (hPa) over een periode van 6 jaar; 00:00 UTC 01.01.2009 – 23:59 UTC 31.12.2015. Interval van observaties: 1 minuut gemiddelden. Bron data: KNMI.



Figuur 2: Herkomst meetdata Lemmer (52°50'19.78"N, 5°42'51.02"E), FL02 Rotterdamse Hoek (52°44'54.10"N, 5°33'32.40"E), Stavoren (52°53'48.00"N, 5°22'60.00"E) en Lelystad luchthaven (52°27'26.20"N, 5°31'10.68"E).

2.3 Historische seiche-events 2009-2015

2.3.1 Identificatie seiches in de tijdseries

Filter discrete Fouriertransformatie

De Jong et al. (2006) stellen dat seiches in het IJsselmeer over het algemeen een periodiciteit kennen tussen 1 en 6 uur. Oppervlaktegolven met een frequentie buiten deze frequentieband zijn uit de tijdserie van waterstandsobservaties gefilterd. Het verwijderen van signalen van hoogfrequente windgolven en van eventuele stormopzet maakt het beter mogelijk individuele seiche-events aan te wijzen en onderling te vergelijken. De filtering is gedaan door een discrete Fouriertransformatie (DFT) toe te passen op de tijdserie met behulp van Matlab's FFT-algoritme (Fast Fourier Transform). DFT is het herschrijven van een signaal in het tijddomein tot een signaal in het frequentiedomein als combinatie van sinus- en cosinusbasisfuncties. Fluctuaties met een golfperiode korter dan 7 uur zijn verwijderd alvorens het signaal terug te transformeren naar het tijddomein.

Waveletanalyse

De gefilterde waterstandobservaties en de windobservaties zijn geanalyseerd door middel van een waveletanalyse, vergelijkbaar met de methode van De Jong & Stolker (2004). Een waveletanalyse geeft frequentiekaracteristieken van een signaal als functie van tijd. Het signaal wordt opgebroken in tijdvakken waarop de Fouriertransformatie wordt toegepast. De wavelettransformatie verzekert dat passende tijdvakken worden toegewezen voor de verschillende frequentiecomponenten. Er bestaan verschillende waveletfamilies om het signaal te ontbinden, in termen van symmetrie, aantal coëfficiënten of zogenaamde 'vanishing moments' en overlap van tijdvakken (Graps, 1995). Voor de identificatie van seiches in het waterstandssignaal is de Morlet wavelet gebruikt. Het is met name een voordeel in de Morlet familie dat de waveletperiodiciteit symmetrisch geformuleerd is zodat de waveletscale de Fourier-periodiciteit van het signaal benadert, en dus geïnterpreteerd kan worden als periodiciteit van de waterstandsfluctuatie (Torrence & Compo, 1998).

Voor het uitvoeren van waveletanalyse is gebruikt gemaakt van de methode beschreven in Torrence & Compo (1998); de bijbehorende Matlab scripts zijn beschikbaar op <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>. Het energiespectrum in de geproduceerde waveletfiguren is genormaliseerd, dat wil zeggen geschaald tot een totaal van 1 (dimensieloos). Het resulterende waveletspectrumfiguur is interpreteerbaar als een kansdichtheidsfunctie voor een gegeven punt in de tijdserie; een kleurschaal geeft aan hoe de som van gevonden frequentiecomponenten is verdeeld over het bereik van de afhankelijke variabele (in dit geval *periodiciteit*).

Selectie

De filtering en waveletanalyse van de waterstandstijdseries over de periode 01-01-2006 tot 31-12-2015 is uitgevoerd door Deltares (2016). De waterstandsfluctuaties die aan te merken zijn als seiche-achtige fenomenen zijn geïdentificeerd als de hoogste 1% amplitudes over de 10-jarige tijdserie.

2.3.2 Analyse seiche-events

Seicheclassificatie

In een KNMI-werkdocument is een kwalitatieve seicheverwachtingsmethode opgesteld (KNMI, 2004). Gebaseerd op bevindingen van De Jong (2004) en op verkenning van meteorologische achtergronden bij waterstandsfluctuaties door de

auteur van het werkdocument zelf heeft dit geresulteerd in vier typen seiches, beschreven in Tabel 1. Dit zijn ook de seichetypes die het HMC gebruikt bij het uitgeven van seicheverwachtingen voor de kust regio's.

Seiche type C ontstaat vanuit een overtrekkend cellenpatroon door ondiepe convectie (KNMI, 2008). De verwachting is niet een seiche van type C te vinden in de analyse van de tijdseries op het IJsselmeer. Het oppervlakte van het waterlichaam is klein, en daarmee is de tijd afhankelijk van de advectiesnelheid kort. De kans dat de benodigde energieuitwisseling tussen de atmosfeer en het water wordt behaald die kan resulteren in waterstandsfluctuaties is daarmee klein. Seiche types A, B en D ontstaat vanuit een plotselinge windtoename of -draaiing.

De bronnen die gebruikt zijn om de seiches te classificeren zijn weerkaarten, neerslagradarkaarten, en bliksemanalysekaarten. Er zijn 4 weerkaarten beschikbaar per dag (00, 06, 12, 18UTC) in het archief van het KNMI dat teruggaat tot 2001. De bliksemanalysekaarten zijn ook uit het archief van het KNMI, en geeft per dag het aantal gedetecteerde ontladingen vanaf januari 2004. De neerslagradarkaarten zijn beschikbaar elke 5 minuten en komen uit het archief van Buienradar, dat teruggaat tot begin 2009.

Tabel 1: Seiche types volgens classificatie KNMI werkdocument (KNMI, 2004).

Seiche Type	Omschrijving
<u>Seiche type A</u>	Prefrontale buienlijn Een lijn met zware buien en windstoten uit richtingen tussen zuid en zuidwest voorafgaand aan een koufront.
<u>Seiche type B</u>	Koufrontpassage Actief koufront uit westelijke richtingen met zware buien en windstoten en met een markante windruiming na frontpassage.
<u>Seiche type C</u>	Postfrontale convectiecellen Regelmatig patroon van convectiecellen met lichte buien (ondiepe convectie) in noordwestelijke stroming achter koufront
<u>Seiche type D</u>	Postfrontale buienlijn Een lijn met zware buien en windstoten in stroming tussen zuidwest en noord achter het koufront.

KNMI weerwaarschuwingen

De data waarop seiches opgetreden zijn vergeleken met data waarop het KNMI een waarschuwing heeft uitgegeven om inzichtelijke te maken in hoeverre er bij weerwaarschuwingen seiches in het IJsselmeer zijn. Gegeven de hypothesen van de opwekkingsmechanismen van seiches, zijn alleen waarschuwingen met betrekking tot onweer en windstoten in ogenschouw genomen. Voor meer informatie over KNMI weerwaarschuwingen, zie KNMI (2016).

KNMI seicheverwachtingen IJmuiden Haven en Rozenburgsesluis

De data waarop seiches in Lemmer opgetreden zijn, zijn vergeleken met data waarop er een seicheverwachting voor de kust is uitgegeven. Doel is inzichtelijke te maken in hoeverre er bij seicheverwachtingen voor de kustregio ook seiches in het IJsselmeer zijn. Gegeven de hypothesen van de opwekkingsmechanismen van seiches, wordt er verondersteld dat er geen parallellen zullen zijn tussen seiches in Lemmer en langs de kust voor type C (open cel convectie). Een seicheverwachting voor het kustgebied wordt gemaakt door het KNMI volgens de bovenbeschreven seicheverwachtingsmethode (KNMI, 2004). De verwachting wordt door het Hydro Meteo Centrum verspreid als onderdeel van de waterberichtgeving langs de kust (RWS Waterberichtgeving, 2016).

2.4 Case study

2.4.1 *Selectie seiche-event*

Uit de in Bijlage D opgenomen lijst geïdentificeerde seiche-events is gekozen de seiche in Lemmer tijdens de Sinterklaasstorm van 5 december 2013 nader te bestuderen met behulp van modelsimulaties. Wanneer een seiche samenvalt met een storm, kan de seiche een extra verhoging in de waterstand geven. Voor WMCN-meren zijn dat situaties waarin seiche-informatie potentieel relevant is in waarschuwing of alarmering. Verder is deze storm een bijzondere stormvloed geweest voor de kustregio's. Bij Roompot-buiten werd de hoogste waterstand gemeten die is opgetreden na ingebruikname van de Oosterscheldekering in 1986. Bij alle kustlocaties zijn de grenspeilen overschreden. Het WMCN heeft de storm in de periode 5 tot 7 december 2013 geclassificeerd als middelbare stormvloed en gerapporteerd over het verloop (WMCN-KUST 2014).

2.4.2 *HIRLAM operationele waterstandsverwachtingen*

In de operationele modellentrein wordt elke 6 uur een HIRLAM-verwachting voor de komende 48 uur opgegeven. WAQUA-IJVD maakt op basis hiervan elke 6 uur een nieuwe waterstandsverwachting voor de volgende 48 uur. Om de meest actuele operationele waterstandsverwachting voor de gehele tijdspanne van de seiche te analyseren, is een tijdserie samengesteld die uit steeds de eerste 6 uur van de opeenvolgende waterstandsverwachtingen bestaat. De samengestelde tijdserie loopt van 04.12.2013 01CET tot 07.12.2013 00CET.

De operationele waterstandsverwachtingen zijn afkomstig uit WaterCoach-meren versie 2016. Water Coach is een digitale omgeving die voor leerdoeleinden de operationele RWSOS-meren applicaties nabootst. Hierin is data opgenomen van een aantal stormvloedgebeurtenissen, waaronder de Sinterklaasstorm uit 2013. Uit Water Coach zijn 12 reeksen met 48-uurs waterstandsverwachtingen voor Lemmer onttrokken, zie Tabel 2. Starttijdstip refereert aan het begintijdstip van de HIRLAM-verwachting die wordt ingevoerd.

Tabel 2: Operationele waterstandsverwachtingen uit WaterCoach-meren. Bron: Rijkswaterstaat.

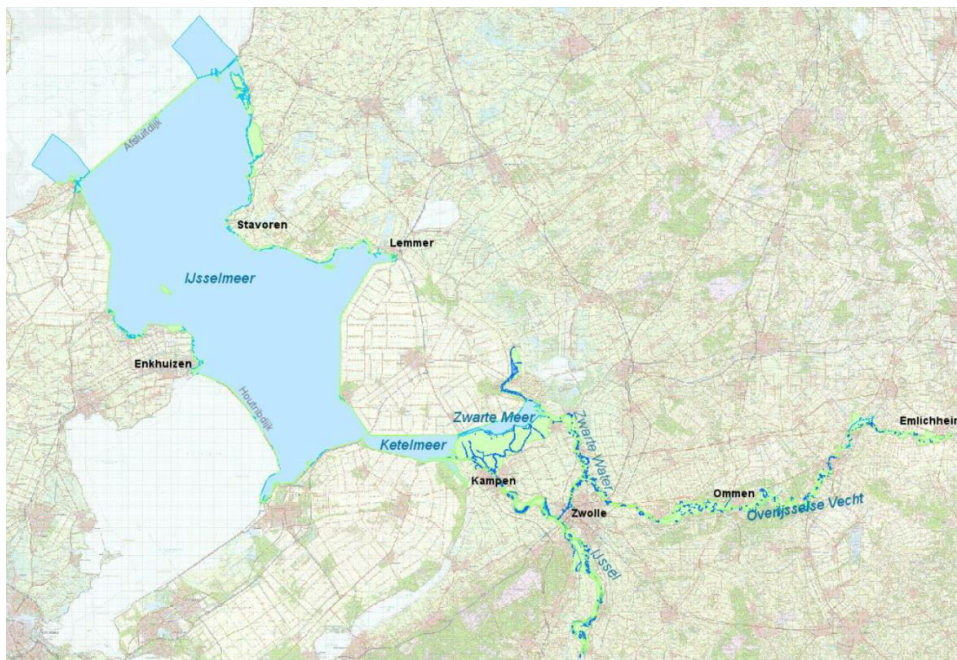
#	Start verwachting
[1]	04-12-2013 01:00:00 CET
[2]	04-12-2013 07:00:00 CET
[3]	04-12-2013 13:00:00 CET
[4]	04-12-2013 19:00:00 CET
[5]	05-12-2013 01:00:00 CET
[6]	05-12-2013 07:00:00 CET
[7]	05-12-2013 13:00:00 CET
[8]	05-12-2013 19:00:00 CET
[9]	06-12-2013 01:00:00 CET
[10]	06-12-2013 07:00:00 CET
[11]	06-12-2013 13:00:00 CET
[12]	06-12-2013 19:00:00 CET

2.5 Modelconfiguratie

2.5.1 Waterstandsmodel WAQUA-IJVD

WAQUA wordt binnen Rijkswaterstaat gebruikt in de modellentrein voor dagelijkse waterstandverwachtingen. Het is deel van het kennissysteem SIMONA waarbinnen modellen voor het simuleren van waterloopkundige fenomenen zijn ondergebracht. WAQUA is een tweedimensionaal hydrodynamisch model dat op hoge resolutie ondiep-water vergelijkingen oplost in 2 horizontale dimensies; diepte-gemiddeld.

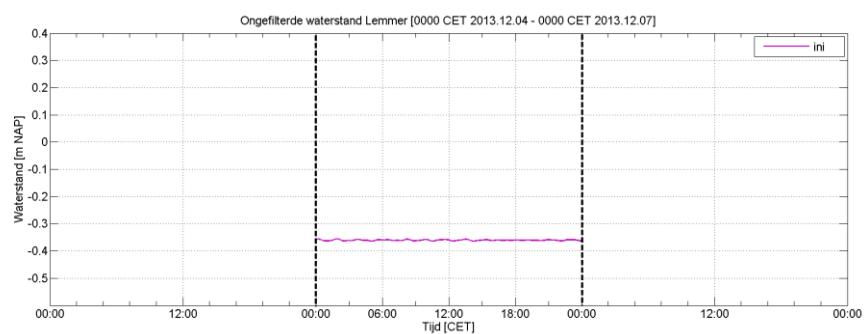
Om het IJsselmeergebied te modelleren is gebruik gemaakt van de schematisatie *ym_ijvd-j07_5-v2*, zoals afgebeeld in Figuur 3. Het waterlichaam wordt begrensd door de noordwestelijke dijk van oostelijk Flevoland, de Houtribsluizen, de dijk Lelystad-Enkhuizen en de Noord-Hollandse kust van Enkhuizen tot aan Den Oever, de Afsluitdijk, de Friese kust van Makkum tot Lemmer, de dijk rond de Noordoostpolder van Lemmer tot Vollenhoven, van het Zwarte meer via het Zwarte water over in de Vecht tot Ommen en van het Ketelmeer de IJssel tot Olst. Zuidelijkere randmeren en het Markermeer worden niet meegenomen. Noordelijk van de Afsluitdijk zijn twee vierhoeken ter representatie van de Waddenzee zodat het spuien bij Den Oever en Kornwerderzand kan worden gesimuleerd. De schematisatie van geometrie en gebiedsinrichting is gebaseerd op geografische informatie in de Baseline database versie 5. Het rooster dat gebruikt is, is *ijvd40m_5-v2* en beslaat de IJssel-Vecht Delta. Dit is een curvilineair rooster van 532 bij 3732 cellen. Gemiddelde resolutie is 40x40m, fijner langs de randen (20m lengte en 5m breedte in de Vecht), op het IJsselmeer zelf een stuk grover. Meer details over het WAQUA model voor de IJssel-Vecht Delta zijn te vinden in de rapporten Deltares 2011a en Deltares 2011b.



Figuur 3: Overzicht van het IJVD gebied, figuur overgenomen van Deltares (2011a). De IJssel loopt tot aan Olst. De IJVD-versie die hier gebruikt is, loopt de Vecht niet door tot Emlichheim maar is afgeknipt bij Ommen.

De opzet van de massabalans is conceptueel van aard, gezien het doel niet is de exacte waterstand maar de tendentie in de vorm van de seiche-beweging te reproduceren. User input als spuien van IJsselmeer naar Markermeer en lozingen

door gemalen kunnen daarmee achterwege gelaten worden. De validiteit van deze aanpak vraagt een stabiele waterstandsbalans wanneer geen wind wordt opgelegd. Initiële situatie: waterstand -0.35 m NAP. De spuisluizen bij de Afsluitdijk staan dicht, de buitenranden Waddenzee worden niet gebruikt, geen invoer van gemalen. Het stromingsprobleem dat opgelegd is simpel: de afvoer van Ommen ($15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) en Olst ($180 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) wordt in de 3 neerslaglocaties op IJsselmeer onttrokken. Om de balanssom te testen is een simulatie gedaan waarin geen wind is opgelegd, zie Figuur 4. Initialisatie van -0.35 m NAP komt overeen met metingen van Lemmer 4.12.2013 00CET. De waterstanden zijn stabiel. Hoewel er looptijd is, geeft deze som een nagenoeg kloppende massabalans gedurende de simulatieperiode.



Figuur 4: Waterstanden Lemmer test-simulatie zonder windforcering voor 5 december 2013.

De WAQUA berekeningen zijn gedaan met Simona 2015 Major Release, uitgevoerd op het h6 Linux-cluster bij Deltares. Het maken van een WAQUA-simulatie vraagt een preprocess-actie en een process-actie. In het pre-processing onderdeel *waqpre* wordt de user input gelezen, de geometrie gedefinieerd, parameters, forceringsvariabelen en de beginwaarden opgegeven. In het processing onderdeel *waqpro* wordt vervolgens de berekening voor het experiment uitgevoerd. Zie Bijlage A voor de exacte configuratie van het domein, de horizontale begrenzing, en de bathymetrie. Zie hoofdstuk 2.6 voor de experimenten set-up.

De WAQUA-output in SDS-file format kan met behulp van de Deltares applicatie Quickplot grafisch worden bekeken als eerste kwaliteitscheck. Met Quickplot zijn de SDS-files omgezet naar Matlab-files. In Matlab zijn de gesimuleerde waterstandtijdreeksen vergeleken met de geobserveerde waterstanden in Lemmer, zie hoofdstuk 2.7 voor de methode van statistische analyse methode.

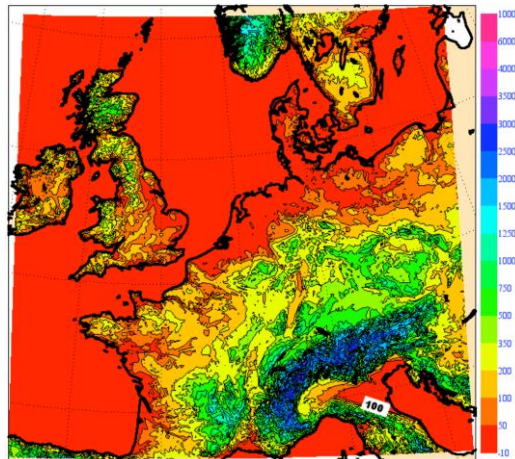
2.5.2

Weermodel HARMONIE

HARMONIE (HIRLAM ALADIN Regional Mesoscale Operational NWP In Europe) is het operationele numerieke weermodel dat het KNMI gebruikt. HARMONIE is een niet-hydrostatisch weermodel dat op fijne ruimtelijke resolutie verwachtingen maakt. Seity et al. (2011) geeft meer informatie over hoe de hydrostatische balans gerelaxeerd is, en beschrijft de fysische parameterisaties zoals microfysica en turbulentie. Verdere details over HARMONIE in de documentatie die is te vinden op www.hirlam.org.

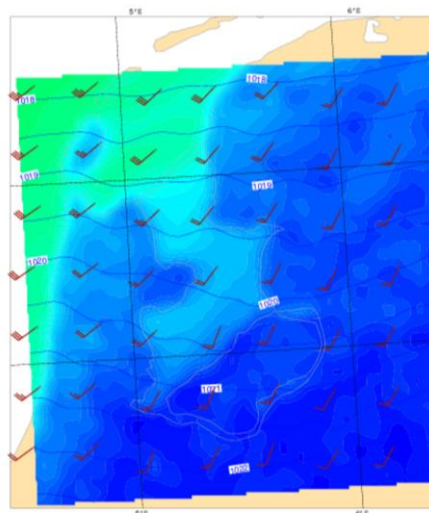
Voor de simulatie is gebruik gemaakt van HARMONIE cy38h1, uitgevoerd op het HPC-cluster van het ECMWF. De Sinterklaasstorm is gesimuleerd van 00UTC 03.12.2013 tot 00UTC 07.12.2013. Daar voorafgaand een spin-up periode van 00UTC 31.11.2013 tot 00UTC 02.12.2013. Het domein beslaat het grootste deel van noordwest Europa met 800 bij 800 gridpunten in Lambertprojectie met resolutie van 2500 meter, zie Figuur 5. De simulatie, die gebruikt is in dit onderzoek, is een reanalyse (retrospective analysis) met een assimilatiecyclus van 3 uur. Een

reanalyse is een exercitie in data-assimilatie: observaties worden met een bepaald tijdsinterval uit verscheidene bronnen op een consistente manier samengevoegd met het numeriek atmosfeermodel. Gedetailleerde settings van de HARMONIE-simulatie zijn te vinden in Bijlage B.



Figuur 5: Domein gebruikt voor de HARMONIE simulatie, zoals ook operationeel gebruikt. Legenda: hoogtemeters (KNMI, 2012).

De modelparameters die WAQUA uit HARMONIE vraagt zijn: luchtdruk en de windcomponenten op 10 meter, die aangeleverd moeten worden als zogenaamde *Spatially Varying Wind and Pressure* (SVWP) velden. Met een KNMI-script *harm2DCSMv6* voor $\$DOMAIN=IJM$ is uit de reanalyse een kleiner domein gesneden, zie Figuur 6. Bovendien converteert dit script HARMONIE's Lamberprojectie naar een rechthoekig rooster dat binnen de SIMONA-omgeving gelezen kan worden. Zowel HARMONIE als geconverteerde files zijn in GRIB-format. De SVWP-velden moeten in de standaard SIMONA format SDS-files worden aangeleverd aan WAQUA. De invoerprocessor *waqwnd* zet de KNMI GRIB-files om naar SDS-files, converteert het rechthoekige rooster naar het curvilineaire rekenrooster dat WAQUA gebruikt, en categoriseert de tijd-as van de tijdserie (in dit geval levert KNMI in UTC, en loopt WAQUA in lokale tijd).



Figuur 6: Uitsnede van HARMONIE van modelparameters om aan WAQUA op te leggen, geconverteerd van Lambertprojectie naar een rechthoekig rooster. Gemaakt met KNMI-script *harm2DCSMv6* voor $\$DOMAIN=IJM$. Legenda: windsnelheid, contourlijnen: luchtdruk.

2.6 Modelsimulaties

2.6.1 Experimenten set-up

Er zijn verschillende simulaties met WAQUA gedaan om de seiche van 5 december 2013 in Lemmer te reproduceren. Tenzij anders vermeld wordt een periode van 3 dagen gesimuleerd; van 00CET 04.12.2013 tot 00CET 07.12.2013.

De experimenten zijn op te delen in 3 categorieën: ten eerste een aantal experimenten om de configuratie van de WAQUA set-up te testen (sectie 2.6.2) om de experimenten die betrekking hebben op de deelvragen goed te kunnen uitvoeren. Ten tweede een aantal experimenten om de gevoeligheid van de modelprestatie voor de tijdsresolutie van windinvoer te bepalen wanneer puntgemeten wind uniform van toepassing wordt verklaard op het hele modelgebied (sectie 2.6.3). Ten slotte een aantal experimenten om dezelfde gevoeligheid te testen maar dan wanneer ruimtelijk variërende wind uit het HARMONIE model wordt opgelegd (sectie 2.6.4). Een overzicht is te vinden in Tabel 3.

Om de verschillen in gevoeligheden van WAQUA met uniforme wind en WAQUA met HARMONIE-wind te duiden is de invoer vergeleken. Duidelijk aanwijsbare bronnen van mogelijke onzekerheid in de modellentrein voor waterstandsverwachtingen zijn 1) de meteorologische verwachting vanuit het weermodel, 2) de parameterisatie van atmosfeer-wateroppervlakte interacties in WAQUA en 3) de resolutie van de forcering, grens- en beginwaarden, zowel in tijd als in ruimte. De hypothese, zoals eerder gesteld, is dat seiches beter reproduceerbaar worden wanneer de tijdsresolutie van de windforcering vergroot wordt. Door invoervelden te vergelijken tussen de simulaties met observaties en de simulaties met HARMONIE-verwachtingen, kan worden beoordeeld verbetering van de modelperformance in het maken van waterstandsverwachtingen van WAQUA geforceerd met HARMONIE te vinden in binnen WAQUA (in geval van punten 2 en 3) of binnen HARMONIE (in geval van punt 1). Aanpak is besproken in sectie 2.6.5.

Tabel 3: Experimenten set-up WAQUA-simulaties. eN en eO refereren naar simulaties met ruimtelijke windvelden uit HARMONIE, ex naar uniform opgelegde wind van meetpaal FL02 of meetstation Stavoren. Verder de resolutie van de windinvoer in minuten, de formulering om 10 meter wind te converteren naar windstress, de duur en de interne tijdstap van de WAQUA-simulatie in minuten.

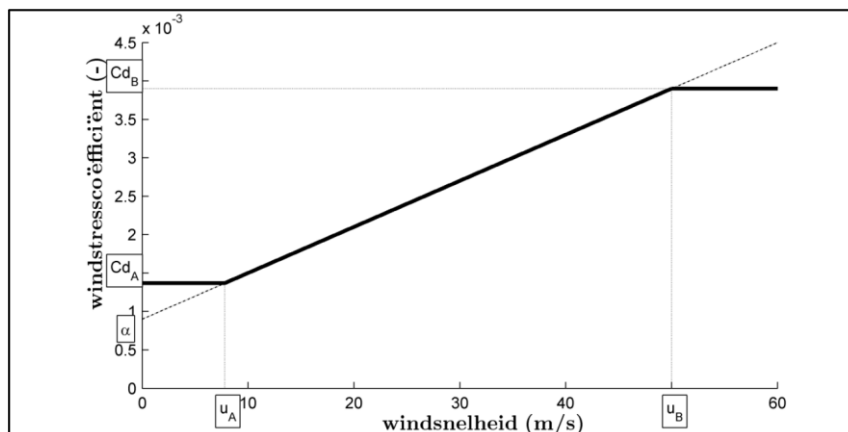
Naam exp	Wind	Resolutie wind (min)	Wind stress	Duur (min)	Tijdstap (min)
eN1	HA38	180	Charnock $\beta = 0.017$	4320	0,25
eN2	HA38	120	Charnock $\beta = 0.017$	4320	0,25
eN3	HA38	60	Charnock $\beta = 0.017$	4320	0,25
eN4	HA38	30	Charnock $\beta = 0.017$	4320	0,25
eN5	HA38	20	Charnock $\beta = 0.017$	4320	0,25
eN6	HA38	10	Charnock $\beta = 0.017$	4320	0,25
eN7	HA38	1	Charnock $\beta = 0.017$	4320	0,25
ex1	FL02	10	Lineair variabel	4320	0,25
ex2	FL02	10	Charnock $\beta = 0.032$	4320	0,25
ex3	Stavoren	10	Lineair variabel	4320	0,25
ex4	Stavoren	1	Lineair variabel	4320	0,25
ex5	FL02	10	Charnock $\beta = 0.025$	4320	0,25
ex6	FL02	10	Lineair variabel	7200	0,25

ex7	Stavoren	1	Lineair variabel	4320	0,0625
ex8	FL02	30	Charnock $\beta = 0.032$	4320	0,25
ex9	FL02	60	Charnock $\beta = 0.032$	4320	0,25
ex10	FL02	20	Charnock $\beta = 0.032$	4320	0,25
ex11	FL02	120	Charnock $\beta = 0.032$	4320	0,25
ex12	FL02	180	Charnock $\beta = 0.032$	4320	0,25

2.6.2

Testen WAQUA-configuratie

Een eerste simulatie (*ex1*) is gedaan met default parameter settings zoals Deltares gebruikt voor het IJsselmeergebied. Wind is uniform opgelegd als equidistante tijdserie in stappen van 10 minuten zoals gemeten bij meetpaal FL02. De interne tijdstap waar WAQUA mee rekent is een kwart minuut. In de vertaling van de 10-meter wind naar windstress aan het oppervlakte is de windstresscoëfficiënt trapsgewijs lineair met de windsnelheid zoals te zien in Figuur 7.



Figuur 7: Lineaire relatie tussen windsnelheid (ms^{-1}) en de windstresscoëfficiënt met constanten zoals gekalibreerd door RIZA (1999). Figuur overgenomen van Deltares (2011a).

Opgegeven constanten van deze relatie zijn voor het IJsselmeer als volgt gekalibreerd (RIZA, 1999):

```
WIND
Wspeed=20 Wangle=240
WCONVERSIONFACTOR = 1.0
WUNIT = 'm/s'
VARIABLE_CD
CDA = 1.36673E-03
CDB = 3.90E-3
WIND_CDA = 7.77886
WIND_CDB = 50.0
include '../wind/wind_FL02_10min.csv'
```

Padafhankelijkheid initialisatie en simulatietijd: ex1-ex6

Om ervan verzekerd te zijn dat de run tijdig genoeg begint om het volledige proces van het seiche-event te kunnen vatten, is een tweede simulatie gestart die twee dagen eerder begint. Ex6 loopt voor 5 dagen, van 00CET 02.12.2013 tot 00CET

07.12.2013. Dit biedt ook de gelegenheid te beoordelen of de simulatie van de waterstand een padafhankelijkheid kent wat betreft de initiële staat.

Numerieke stabiliteit interne discretisatie: ex4 – ex7

In default rekt WAQUA met een interne tijdstap van 0.25 minuten. Dit is voldoende als wind per 10 minuten wordt opgelegd; de factor tussen externe forcering en interne rekenstap is 40. Vraag is of WAQUA voldoende ruimte heeft om de bewegingsberekeningen te maken wanneer wind met een tijdsresolutie van 1 minuut wordt geforceerd, de rekenfactor tussen de interne rekenstap en de forcering is dan nog maar 4. Ex4 legt 1-minuut wind op met interne tijdstap van 0,25 en ex7 legt dezelfde 1-minuut wind op met een interne tijdstap van 0,0625 (rekenfactor 25).

Test windstressconversie: ex1-ex2-ex5.

Er zijn verschillende manieren om de 10m-wind om te rekenen naar oppervlaktetestress. Wind die over een wateroppervlakte waait, zorgt voor stress waarbij momentum, en dus energie, wordt overgedragen van de atmosfeer op het waterlichaam. Windstress is een van de stresstermen in de tweedimensionale bewegingsvergelijkingen waarmee WAQUA stroming numeriek oplost. De energieoverdracht vindt plaats in de grenslaag. Dit is waar de snelheid van de wind afneemt door de trekkracht op het snijvlak tussen het wateroppervlakte en de atmosfeer. De wind die in WAQUA gaat, is de wind op 10 meter boven het wateroppervlak. De lineair variërende relatie voor de windstresscoëfficiënt gaat uit van een windprofiel onafhankelijk van hoogte. Een andere conversiemethode is de Charnock relatie, die uitgaat van een logaritmisch windprofiel. De windstresscoëfficiënt neemt in deze relatie toe met windsnelheid.

Getest is voor de gevoeligheid van de windstressconversiemethode in het simuleren van een seiche. Ex1 hanteert de lineair variabele relatie zoals hierboven beschreven. In WAQUA is 0.032 de default Charnock constante, dit is ex2. Empirisch gezien lijkt deze waarde aan de hoge kant. Makin et al. (1995) vinden waarden tussen 0.018 – 0.030, en dat is voor open zee. Ex3 hanteert een Charnock constante van 0.025, dat is ook de waarde die door HIRLAM wordt gebruikt.

Gevoeligheid fijne tijdsresolutie: ex3 – ex4

Vooruitlopend op de WAQUA-experimenten die worden geforceerd met hoge resolutie HARMONIE-windvelden is een vergelijking gemaakt tussen het opleggen van 1-minuut en 10-minuten uniforme windvelden. Deze windvelden zijn afkomstig van Stavoren. Ex3 legt 10-minuten uniforme windvelden op, ex4 1-minuut windvelden.

2.6.3

Sensitiviteit tijdsresolutie: uniforme wind

Om te testen in hoeverre WAQUA waterstanden beter reproduceert wanneer windvelden in een hogere tijdsresolutie worden opgelegd, zijn een aantal runs gedaan met windforcering van verschillende tijdsintervallen. De wind is afkomstig van meetpaal FL02 en uniform opgelegd in tijdsintervallen van 10 – 20 – 30 – 60 – 120 – 180 minuten. Dit zijn respectievelijk experimenten: ex2 – ex10 – ex8 – ex9 – ex11 – ex12. Meetpaal FL02 heeft geen 1-minuut observaties beschikbaar. De overige parameters, te weten interne tijdstap en de windstressconversie, zijn gekozen op basis van de uitkomsten van de configuratietesten. De interne tijdstap is 0,25 minuten en de windstressconversie is een Charnock relatie met $\beta = 0,032$.

2.6.4 *Sensitiviteit tijdsresolutie: ruimtelijk variërende wind- en drukvelden*

De gevoeligheid van de modelprestatie in het reproduceren van een seiche is ook getest voor de tijdsresolutie van ruimtelijk variërende wind- en drukvelden. De wind is afkomstig van de HARMONIE-simulatie en opgelegd aan WAQUA-IJVD in tijdsintervallen van 10 – 20 – 30 – 60 – 120 – 180 minuten. Dit zijn respectievelijk experimenten eN7 – eN6 – eN5 – eN4 – eN3 – eN2 – eN1. Het weermodel wordt elke drie uur geassimileerd. In experiment eN1 met een tijdstap van 3 uur zijn HARMONIE-windvelden op t0 ingevoerd, dat is waar observatiedata geassimileerd is. Windvelden in de overige experimenten zijn velden uit HARMONIE op verschillende punten in de simulatietijd, afhankelijk van de gevraagde resolutie.

De interne WAQUA-rekentijdstap is gehouden op 0,25 minuten. In HARMONIE zelf wordt voor meren een Charnock relatie gebruikt met $\beta = 0,015$ om de windstress om te zetten naar de outputvariabele 10-meter wind, waarbij gecorrigeerd wordt voor stabiliteit over land. Om de vertaling van HARMONIE-windstress naar HARMONIE 10-meter wind naar WAQUA-windstress goed te doen, de stabiliteitscorrectie in overweging nemende, is een Charnock constante van 0,017 gebruikt.

2.6.5 *Vergelijking modelinvoer: uniforme wind vs. ruimtelijk variërende wind- en drukvelden*

In WAQUA-IJVD veroorzaakt wind scheefstand van het wateroppervlak. Op- en afwaaiing van het water is afhankelijk van windsnelheid, windrichting en duur. Fouten in de windverwachtingen leiden tot fouten in de waterstandsverwachting. Simulaties van de staat van het IJsselmeer met uniform opgelegde gemeten wind geven andere waterstanden dan de simulaties met HARMONIE ruimtelijk variërende wind- en drukvelden. Om de verschillen te duiden worden ingevoerde variabelen vergeleken over de tijdspanne van de simulatie.

Voor de wind is dat de tijdreeks van windsnelheid en windrichting gemeten bij meetpaal FL02 versus de windsnelheid en de windrichting van de gridbox waar de coördinaten van meetpaal FL02 liggen in het HARMONIE-veld. De simulatie met HARMONIE-velden geeft ook luchtdruk op, dat wordt niet meegenomen in de met uniforme wind geforceerde simulaties. Voor luchtdruk is de tijdreeks zoals gemeten bij luchthaven Lelystad vergeleken met de luchtdruk van de gridbox waar de coördinaten van de luchthaven liggen in het HARMONIE-veld.

2.7 Analyse modeloutput

In verband met de conceptuele massabalans die is opgelegd kunnen waarden tussen de experimenten alleen relatief worden vergeleken. De absolute waarden van de statistieken hebben geen betekenis an sich. De referentieset is de beperkende factor in het bepalen van de goodness of fit, daar de waterstandsobservaties niet beschikbaar zijn in een kleiner tijdsinterval dan 10 minuten.

Het tijdsvak waarover de statistische analyse is gedaan, is het etmaal van 5 december (00CET 05.12.2013 tot 00CET 06.12.2013). In de statistieken wordt dan zoveel mogelijk het gewicht beperkt dat gegeven wordt aan van modeldeviaties die plaatsvinden voor en na de seiche, en tegelijkertijd wordt wel de opzet en uitdamping van de seiche zoveel mogelijk meegenomen. De volgende maten worden gebruikt, in Bijlage C een gedetailleerd overzicht:

Verschilmaten

Statistieken om observatiewaarden met simulatiewaarden, of simulatiewaarden onderling, te vergelijken zijn de *Mean Absolute Error (MAE)* en de *Root Mean Square Error (RMSE, of Root Mean Square Difference RMSD in de vergelijkingen van simulaties onderling)*. De MAE is een wat conservatievere maat rondom de gemiddelde afwijking terwijl de RMSE relatief veel waarde hangt aan extreme afwijkingen. In het vergelijken met observaties is de genormaliseerde RMSE toegevoegd. Dit is de ratio tussen de RMSE en de standaard deviatie binnen de observaties; nRMSE geeft aan in hoeverre de simulatieafwijking binnen de variabiliteit van de observaties valt. Verder wordt de *bereikratio* gegeven; de ratio tussen de maximale uitwijking van de modelwaterstanden en de gemeten waterstanden. Dit geeft de fractie aan dat de simulatie het bereik van de seiche vat. Eenheden: MAE en RMSE in meter boven NAP, de bereikratio is dimensieloos.

Maten voor modelprestatie

Voor de gevoeligheid van het waterstandsmodel voor de tijdsresolutie van windinvoer moet eerst beoordeeld worden hoe goed het model de tendentie in de observaties volgt. Er zijn verschillende statistische maten om de modelprestatie of zogenaamde 'goodness of fit' te bepalen, met elk hun beperkingen. Om met de beperking rekening te houden zijn drie verschillende maten berekend om de modelprestatie te beoordelen. Dit zijn de *Pearson product-moment coefficient of linear correlation r* , de *refined Index of Agreement d_r* (Willmott et al., 2012) en de *coefficient of efficiency E* (Nash & Sutcliffe, 1970, Wilcox et al., 1990). Waardes van r liggen in het interval $[-1,1]$, met 1 als perfecte score. Waardes van d_r liggen in het interval $[0, 1]$, ook met 1 als perfecte score. Waardes van E liggen in het interval $[-\infty, 1]$, ook met 1 als perfecte score. De gevoeligheid van het waterstandsmodel voor de tijdsresolutie van de windinvoer is bepaald door de modelprestatiescores af te zetten tegen de tijdsresolutie van de respectievelijke simulaties.

3 Resultaten: tijdseries analyse

3.1 Historische seiche-events

In totaal zijn de 22 waterstandsfluctuaties gevonden met de grootste amplitude die voorkwamen in de periode 2009-2015. Per seiche is een uitgebreide beschrijving van de geanalyseerde waarnemingen opgenomen in Bijlage D. Tabel 4 geeft een samenvattend overzicht van de seiche-amplitude, de periodiciteit van de waargenomen wind- en waterstandsfluctuaties en het seiche-type.

Tabel 4: Samenvattende karakteristieken van seiches in Lemmer over de periode 2009 – 2015: datum, amplitude waterstandsfluctuatie (m), dominante periodes (uur) van schommelingen in de waterstand, de windsnelheid, de windsnelheid van de u-component, de windsnelheid van de v-component, en het type van de seiche.

Datum	Seiche Amplitu de (m)	Water-stand	Wind Snelheid		Type ¹	
			u-wind (oost-west)	v-wind (zuid-noord)		
		Dominante periode (uur)	Dominante periode (uur)	Dominante periode (uur)	Dominante periode (uur)	
8 mei 2009	0,52	2	0,5	1	3	D
26 mei 2009	0,52	2	2	0,5	3,5	A
4 sep 2009	0,43	2,5	1,5	2,5	8,5	D
26 nov 2009	0,47	2	1,5	4,5	8,5	D
23 aug 2010	0,48	1,5	2	1,5	3,5	A
28 jun 2011	0,39	1,5	8,5	0,5	1,5	A
9 dec 2011	0,46	2	2,5	2	6,5	B
24 dec 2011	0,43	2,5	8,5	8,5	0,5	B
3 jan 2012	0,41	2,5	1,5	2	1,5	B
29 apr 2012	0,48	2,5	1,5	3	2,5	A
29 jul 2012	0,41	1	1,5	1,5	5,5	D
19 aug 2013	0,40	2	1	2	4	D
16 sep 2013	0,40	0,5	7	6,5	8,5	B
28 okt 2013	0,56	2,5	1	1	0,5	B
3 nov 2013	0,48	2,5	1	0,5	1,5	D
5 dec 2013	0,57	2,5	2,5	4,5	8,5	B
10 jun 2014	0,65	2,5	0,5	0,5	2	A
28 jan 2015	0,39	2,5	1,5	5	0,5	B
31 mrt 2015	0,55	2	2,5	1	1	B
6 mei 2015	0,43	2,5	4,5	5	5,5	D
5 jul 2015	0,42	0,5	8,5	3,5	0,5	B
26 aug 2015	0,39	2	0,5	1	3	B

De gemiddelde waterstandsfluctuatie is 0,47 meter in amplitude. Voor 85% van de gevonden seiches ligt de dominante periode van de waterstandsfluctuatie tussen de

¹ Zie hoofdstuk 2.3.2 voor de beschrijving van seichetypes.

1,5 en 2,5 uur. De dominantie periodiciteit van de schommelingen in de windsnelheid ligt op 3 uur gemiddeld. De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid in de oost-west richting (u-wind) is met 2,5 uur kleiner dan de dominante periodiciteit in de v-wind (3,5 uur). Dit is interessant omdat het IJsselmeer bij benadering gezien kan worden als een rechthoek met een langere zijde in de zuid-noord-as dan oost-west-as.

De relatie tussen variabiliteit in wind en variabiliteit in de waterstand bij Lemmer is in dezelfde orde van grootte. Een schatting van de marge waarmee de periodiciteit in windfluctuaties samenhangt met periodiciteit van de seiche is een uur. Deze overlap lijkt in Lemmer dusdanig voldoende dat beweging in wind en water samenvallen zodat een seiche ontstaat door windfluctuaties.

Zoals verwacht zijn er in Lemmer alleen de typen seiches opgewekt door een plotselinge windtoename (typen A,B,D) en niet door energieoverdracht vanuit open convectiecellen (type C). Van de 22 seiches zijn er 5 van type A; bij een prefrontale buienlijn. Er zijn 10 seiches gevonden van type B; bij een koufrontpassage, en 7 seiches van type D tijdens buien achter een koufront. Over de seizoenen zijn ze verdeeld: 3 seiches in de winter, 6 in de lente, 8 in de zomer en 5 in de herfst. Hieraan valt op te merken dat seichetype A alleen voorkomt in de zomer en lente.

Lemmer is vooral gevoelig voor passages van koufronten. Er valt op te merken dat systemen vanuit het zuidwesten typisch resulteren vooral in seichetype A, de opwekking van de seiche vindt plaats voorafgaand aan de passage van het koudfront. Systemen uit het west- tot noordwesten resulteren in seiche type B, dat opgewekt wordt door de druk- en windverandering tijdens de koufrontpassage. Seiche type D, dat opgewekt wordt (lang) na passage van een koufront zijn te relateren aan de aanwezigheid van troggen. De passage van een trog wordt gekenmerkt door een val van de druk aan de voorzijde van de trog, gevolgd door een toename van de druk aan de achterzijde van de trog. Een trog is een uitloper van een lagedrukgebied waarvan de as op weerkaarten weergegeven wordt door een blauwe lijn. Passage van een trog wordt gekenmerkt door tijdelijke toename in windsnelheid en eventuele buien, omdat de luchtdruk lager is voor dan achter de trog-as.

3.2 Weerwaarschuwingen

Tabel 5 geeft een overzicht van in hoeverre weerwaarschuwingen uitgegeven door het KNMI te koppelen zijn aan seiches in Lemmer. Er zijn over de periode 2009 – 2015 31 weerwaarschuwingen uitgegeven, dat is code rood (weeralarm) en code oranje tezamen. Dat waren er 20 voor zware onweersbuien en 13 voor zware windstoten, oftewel tweemaal is een waarschuwing afgegeven die betrekking had op zowel zware onweersbuien als zware windstoten. In totaal vinden 6 van de 22 bestudeerde seiche-events in Lemmer plaats tijdens een weerwaarschuwing. Daarvan 4 tijdens een waarschuwing met betrekking tot zware windstoten en 2 tijdens een waarschuwingen met betrekking tot zware onweersbuien. Waarschuwingen voor zware onweersbuien worden vaker uitgegeven terwijl dit minder vaak te koppelen valt het een seiche-event. Evengoed kan gesteld worden dat wanneer er een weeralarm wordt uitgegeven voor het KNMI voor zware windstoten of zware onweersbuien is er een grotere kans op seiches in Lemmer.

3.3 Seicheverwachtingen kust

Tabel 6 is vergelijkbaar met tabel 2; hier met betrekking tot de seicheverwachtingen die het KNMI uitgeeft voor de kustregio's. Voor alle typen seiches, dat is A,B,C en D, zijn in totaal 66 verwachtingen uitgegeven over de periode 2009-2013. Voor 2014 en 2015 is geen direct data-archief beschikbaar. De meeste van deze verwachtingen betrof seiche-type C, dat is een waterstandsfluctuatie gedreven door open cel convectie. Dit type komt niet voor in de tijdserie van Lemmer, zoals hierboven beschreven. Exclusief type C zijn er 15 seicheverwachtingen uitgegeven. In totaal 5 van de 22 bestudeerde seiche-events in Lemmer plaats tijdens een seicheverwachting, en daarnaast nog 2 tijdens een seiche langs de kust waarvoor geen verwachting was uitgegeven. 3 seiches in Lemmer vonden plaats tijdens een seicheverwachting voor type B, 1 voor type A en ook 1 voor type D. Seicheverwachtingen voor type A worden het minst vaak gegeven, daarna type D en dan type B. Er zijn duidelijk parallellen aanwezig tussen het bestaan van seiches aan de kust van type A, B en D, en seiches in Lemmer. Wanneer er een seicheverwachting wordt uitgegeven voor de kustregio voor type A, B of D, is er een grotere kans op seiches in Lemmer.

Tabel 5: Aantal door het KNMI uitgegeven weeralarmen en code oranje waarschuwingen voor extreem weer m.b.t. zware windstoten en zware onweersbuien in de periode tussen 2009 en 2015, de data van seiches die tegelijk met een KNMI weerwaarschuwing plaatsvonden en de kans op een seiche in Lemmer tijdens een KNMI weerwaarschuwing gebaseerd op de periode 2009-2015.

	Aantal KNMI weerwaarschuwingen tussen 2009-2015	Seiches Lemmer (DD-MM-YY)	Kans seiches tijdens KNMI waarschuwing
Weeralarm	5	28-10-13	40%
zware windstoten		05-12-13	
Code oranje	8	03-01-12	25%
zware windstoten		31-03-15	
Weeralarm	4	10-06-14	25%
zware onweersbuien			
Code oranje	16	28-06-11	6%
zware onweersbuien			
Totaal	31	6	19%

Tabel 6: Aantal door het KNMI uitgegeven seicheverwachtingen per classificatietype in de periode tussen 2009 en 2013, de data van seiches die tegelijk met een KNMI seicheverwachting plaatsvonden en de kans op een seiche in Lemmer tijdens een KNMI seicheverwachting gebaseerd op de periode 2009-2013

	Aantal KNMI seicheverwachtingen tussen 2009-2013	Seiches Lemmer (DD-MM-YY) (type)	Kans seiches tijdens KNMI seicheverwachting
Verwachting type A	1	28-10-13 (B)	100%
Verwachting type B	9	09-12-11 (B) 24-12-11 (B) 05-12-13 (B)	33%
Verwachting type C	51	-	0%
Verwachting type D	5	23-08-10 (A)	20%
Seiche langs de kust zonder forecast	geen data	26-05-09 (A) 03-01-12 (B)	
Totaal	66	7	11%
excl. type C	15		47%

4 Resultaten: case study operationeel

4.1 Observaties en seiche-classificatie

Weersituatie tijdens de storm

Het lagedrukgebied vormt zich 's avonds op 4 december ten noorden van Schotland. De depressie beweegt zich snel uitdiepend richting het oostzuidoosten via het noorden van de Noordzee, langs het zuiden van Noorwegen naar de Oostzee. Het bijbehorende koufront bereikt de Nederlandse kust rond 16.00 op 5 december. Een paar uur later volgt het oclusiefront (zie Figuur 8). Bij de depressie ontstaat een windveld, waarbij de wind uit het zuidwesten komt. Na de frontpassage vindt een snelle windruiming plaats naar noordwestelijk tot noordelijke richting.

Met het naderen van de depressie neemt de wind toe langs de Nederlandse kustregio's en over het IJsselmeer. De passage van het koufront gaat gepaard met een scherpe buienlijn met onweer. Na de passage van de oclusie neemt de wind in de loop van de avond van 5 december af (WMCN-KUST,2014).

Figuur 9 toont een beeld van de neerslagradar. Het koufront ligt hierbij boven het noordwesten van Nederland. Achter het oclusiefront bevinden zich talrijke buien. Tijdens het passeren van de buien worden sterke uitschieters in de wind gemeten. In zuidoostelijke richting bewegend zijn na de frontpassage bliksemontladingen gedetecteerd, zoals te zien in Figuur 10.

Waterstanden tijdens de storm

Op 5 december 2013 is een waterstandsfluctuatie waargenomen in Lemmer. Het waveletspectrum en de gefilterde waterstanden van de 3 dagen rondom het seiche-event zijn afgebeeld in Figuur 11. De seiche had een piekamplitude van ongeveer - 50 cm rond 17.00 CET. Opzet en uitdemping van de seiche vindt plaats binnen een tijdsbestek van 9 uur, periodiciteit van de fluctuatie ligt rond de 3 uur.

De dominante periodiciteit van fluctuaties in de wind zijn afgebeeld in Figuur 12, Figuur 13 en Figuur 14 voor de windsnelheid, de v-component (vector zuid-noord georiënteerd) en de u-component (vector oost-west georiënteerd) van de wind respectievelijk. Wat betreft de windsnelheid komt de dominante periodiciteit in de variabiliteit niet goed overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuatie. Rond de tijd van de seiche is wel veel variatie te zien in de windsnelheid, maar een duidelijke relatie met waterstanden ontbreekt. In de windsnelheid van de v-component is de relatie met de waterstandsfluctuatie wel aanwezig. Dit komt voort uit de plotselinge maar haperende winddraaiing van west naar noordwest.

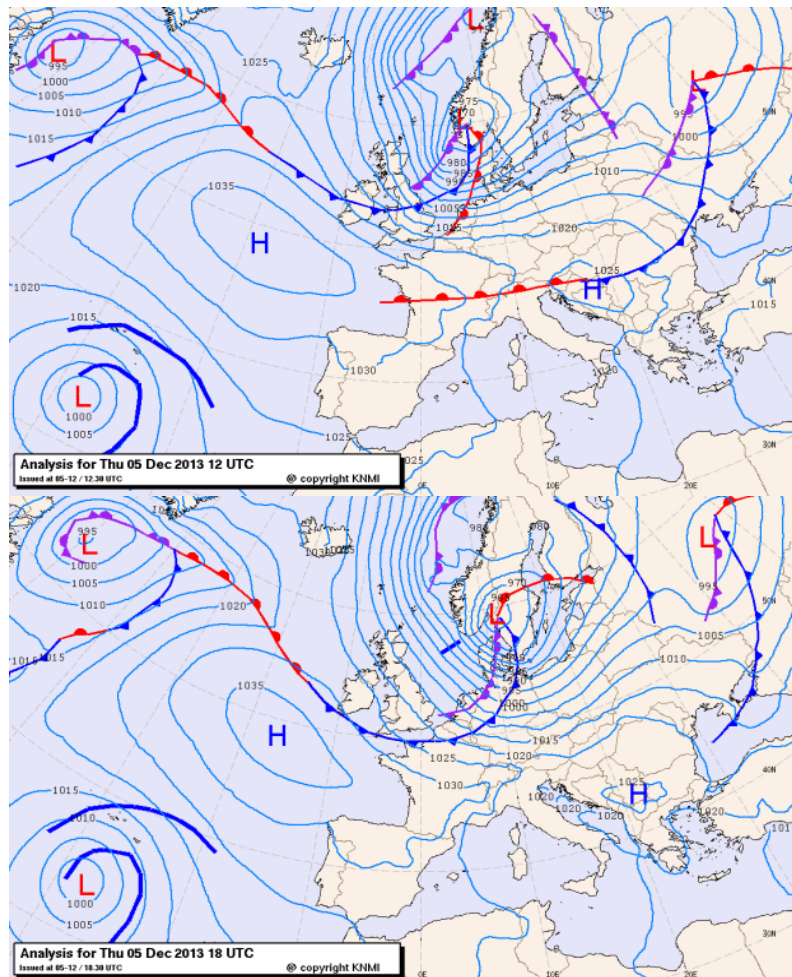
Seicheclassificatie

In de luchtdrukmetingen is een grote daling te zien voorafgaand aan de seiche: bijna 25 hPa over 15 uur tijd. Vervolgens is er een snelle, heftige schommeling: tussen 15:50 en 16:00 CET stijgt de druk 3 hPa, waarna het met 2 hPa daalt in de volgende drie kwartier (zie Figuur 15).

Op de weerkaart van 00UTC (01CET) is de kern van de depressie in het zuiden van Noorwegen te zien. Een warmfront ligt over Nederland, met een koufront daar ten westen van. Het koufront beweegt zich snel, en trekt gedurende de volgende 6 uur over in zuidoostelijke richting.

Op de neerslagradarkaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 5 december en 08 UTC 6 december. Een lijn met onweer trekt voorafgaand aan de seiche vanuit het noordoosten over. De wind is zuidwestelijk, en ruimt na de frontpassage.

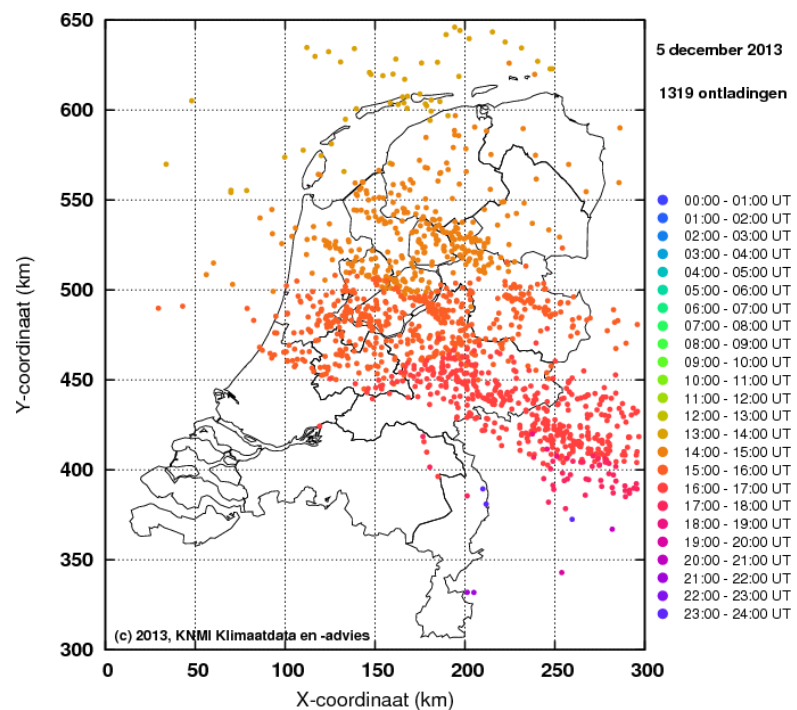
Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B: seiche bij een actief koufrontpassage.



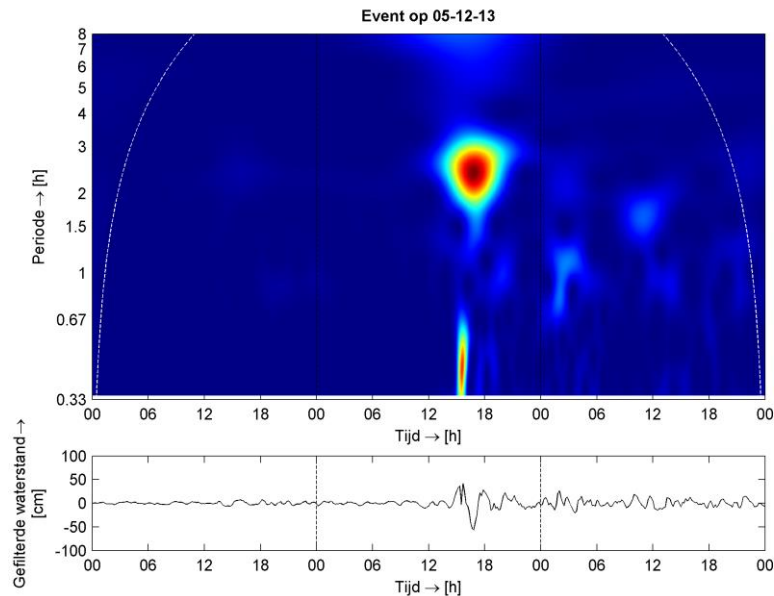
Figuur 8: Weerkaarten bij de Sinterklaasstorm. Bovenste paneel: 12 UTC (13 CET) 5 december 2013. Onderste paneel: 18UTC (19 CET) 5 december 2013. Bron: KNMI



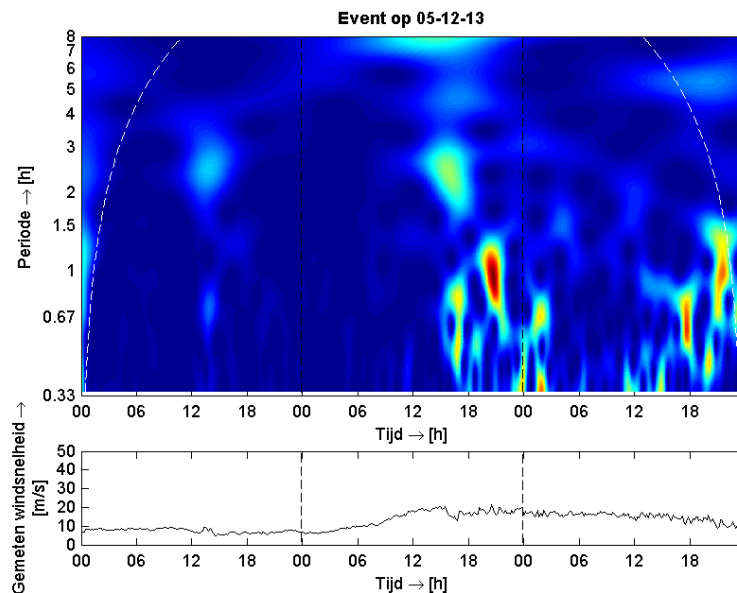
Figuur 9: Neerslagradark kaart 15:15 CET 5 december 2013. Bron: Buienradar.



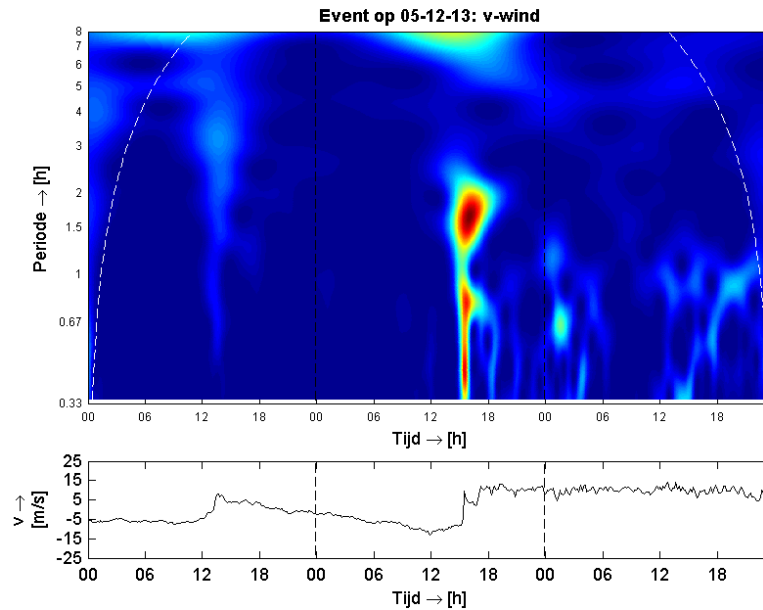
Figuur 10: Bliksemanalysekaart 5 december 2013. Bron: KNMI.



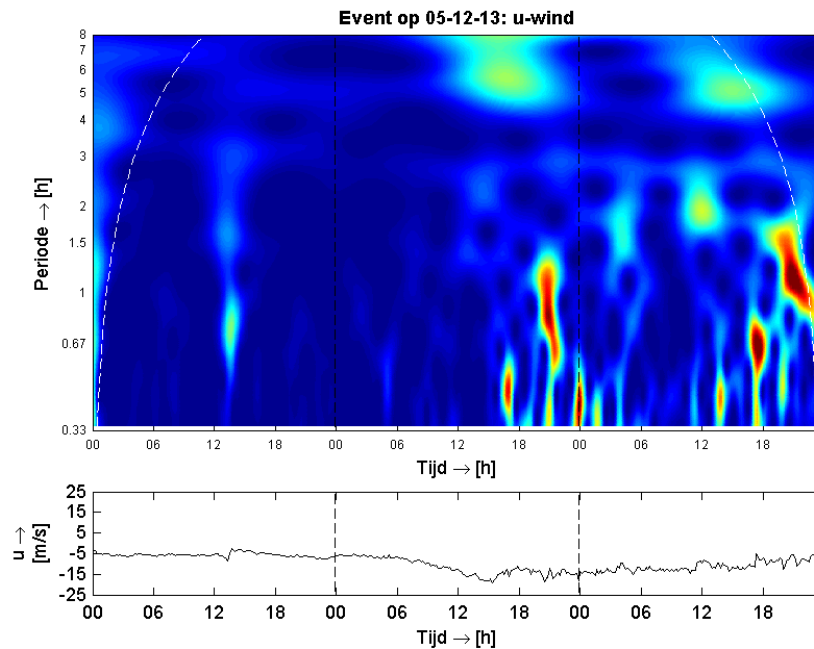
Figuur 11: Waveletspectrum [-] en gefilterde waterstandsmetingen [cm] seiche-event Lemmer op 5 december 2013. Tijd in CET (UTC+1) van 04.12.2013 tot 07.12.2013, etmaal van 5 december tussen zwarte verticale stippellijnen.



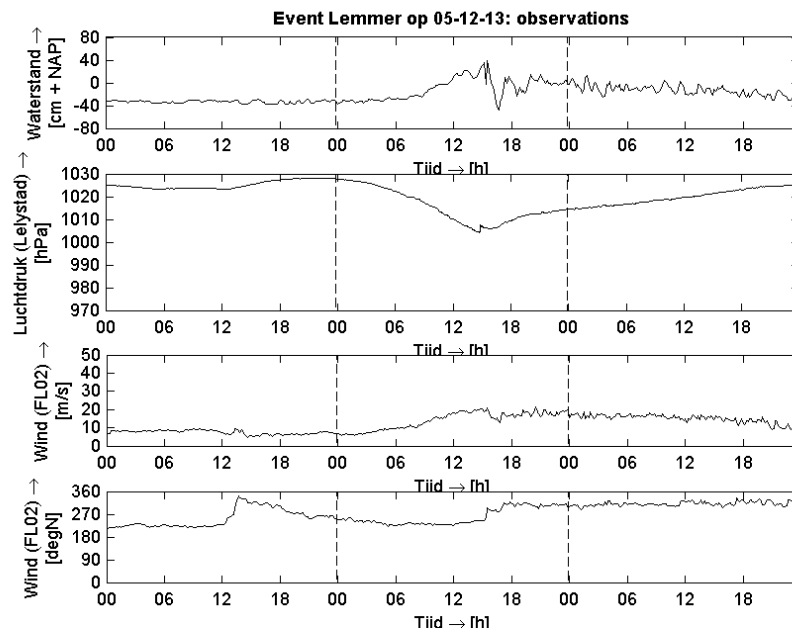
Figuur 12: Waveletspectrum [-] en metingen windsnelheid [m/s] seiche-event Lemmer op 5 december 2013. Tijd in CET (UTC+1) van 04.12.2013 tot 07.12.2013, etmaal van 5 december tussen zwarte verticale stippellijnen



Figuur 13: Waveletspectrum [-] en metingen v-windcomponent (vector zuid-noord)[m/s] seiche-event Lemmer op 5 december 2013. Tijd in CET (UTC+1) van 04.12.2013 tot 07.12.2013, etmaal van 5 december tussen zwarte verticale stippellijnen



Figuur 14: Waveletspectrum [-] en metingen u-windcomponent (vector oost-west)[m/s] seiche-event Lemmer op 5 december 2013. Tijd in CET (UTC+1) van 04.12.2013 tot 07.12.2013, etmaal van 5 december tussen zwarte verticale stippellijnen

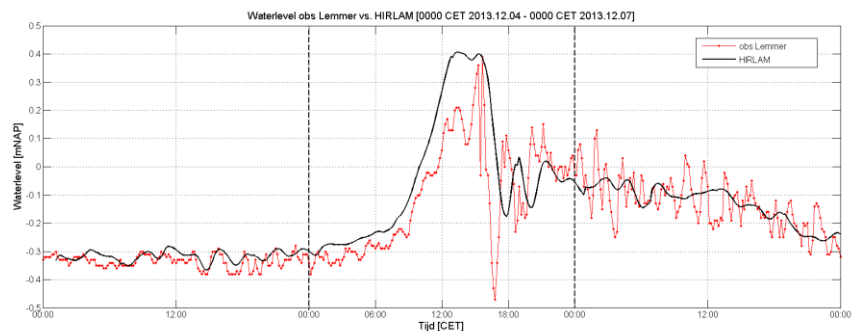


Figuur 15: Samenvatting metingen seiche-event Lemmer op 5 december 2013. Ongefilterde waterstand te Lemmer [cm t.o.v. NAP], luchtdruk [hPa] te Lelystad, windsnelheid [m/s] en windrichting [graden] te meetpaal FL02 Tijd in CET (UTC+1) van 04.12.2013 tot 07.12.2013, etmaal van 5 december tussen zwarte verticale stippellijnen

4.2 HIRLAM operationele modelprestatie

Figuur 16 en Tabel 7 geven de verschillen weer tussen de gemeten waterstanden in Lemmer en de operationele waterstandsverwachtingen op basis van gedownscalede HIRLAM-weersverwachtingen. Het absolute gemiddelde verschil over het etmaal van 5 december 2013 bedraagt 0,12m. De correlatie coëfficiënt is 0,81. De ratio tussen het verschil van de laagste en hoogste waterstand uit de verwachting en uit de observaties is 0,84.

De opzet van de storm wordt goed en tijdig verwacht door de operationele modellentrein. Wel bereikt het te vroeg een piek in de verwachte waterstand, die ook langer aanhoudt dan gemeten. De snelle, fijne fluctuaties die zijn gemeten worden niet weergegeven door de operationele waterstandsverwachtingen. Aangaande de seiche wordt de snelle waterstandsval redelijk tijdig verwacht, maar is er niet de extreme daling zichtbaar die is gemeten. Wel wordt het naslingeren gevat van de waterstand na de initiële plotselinge waterstandsval.



Figuur 16: Operationele waterstandsverwachtingen o.b.v. gedownscalede HIRLAM-verwachtingen (zwart) versus observaties (rood). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

Tabel 7: Statistiek Operationele waterstandsverwachtingen o.b.v. gedownscalede HIRLAM-verwachtingen in vergelijking met observaties.

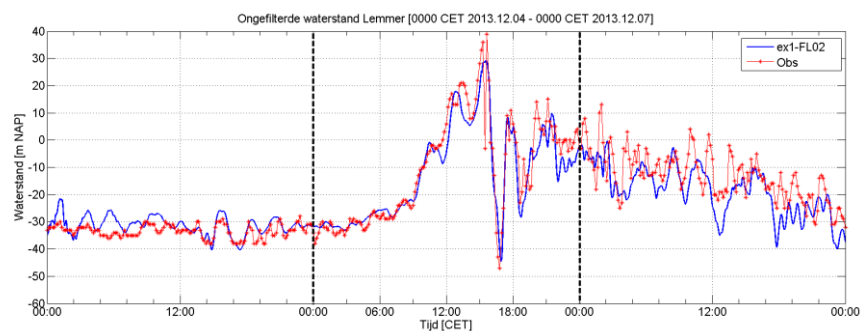
Statistiek	Obs.	HIRLAM
Tijdsresolutie (min)		60
Gemiddelde (m)	-0,11	-0,03
Standaard afwijking (m)	0,19	0,23
Mean absolute error (m)		0,12
RMSE		0,16
normalized root mean square error		0,80
Pearson's correlation r		0,81
Bereikratio		0,84

5 Resultaten: case study modelverkenning

5.1 Testen WAQUA-configuratie

Eerste benadering: ex1

De uniform opgelegde wind van meetpaal FL02 (Rotterdamse Hoek) met een tijdsresolutie van 10 minuten en een lineaire relatie voor de windstress geeft een goede eerste benadering van de waterstanden in Lemmer, zie Figuur 17. De amplitude van de seiche wordt niet volledig gevat. WAQUA mist ruim 10 centimeter van de seichepiek. De timing van de stormopzet en het plotselinge dalen van de waterstand komt goed overeen met de geobserveerde waarden.



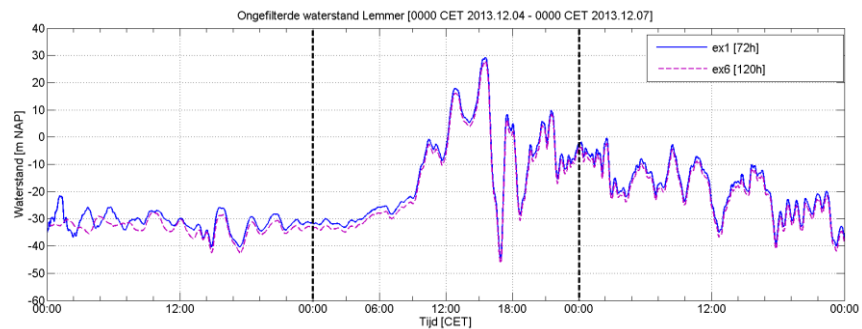
Figuur 17: Eerste benadering ex1 (blauw) versus observaties (rood). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

Padafhankelijkheid en simulatietijd: ex1-ex6

Figuur 18 en Tabel 8: Statistiek verschil padafhankelijkheid geven de verschillen tussen simulaties ex1 en ex6 weer. Het absolute gemiddelde verschil tussen de run van 5 dagen, en de run van 3 dagen over de overlappende 3 dagen bedraagt 0,02m. De correlatie coëfficiënt is 0,99. Beide runs vatten de timing en de amplitude van de waterstandsfluctuatie goed. Hieruit valt te concluderen dat 3 dagen, te starten op 00CET 04.12.2013, tijdig genoeg is om de hydrodynamica te vatten die resulteert in de waterstandsfluctuatie in de namiddag op 5 december. Ook heeft WAQUA dus in zoverre geen last van padafhankelijkheid van de initiële staat op 00CET 04.12.2013.

Tabel 8: Statistiek verschil padafhankelijkheid

Statistiek	ex1	ex6
Tijdsresolutie (min)	10	10
Simulatieduur (dagen)	3	5
Mean absolute difference (m)	0,02	
Root mean square difference (m)	0,02	
Pearson's correlation r	0,99	



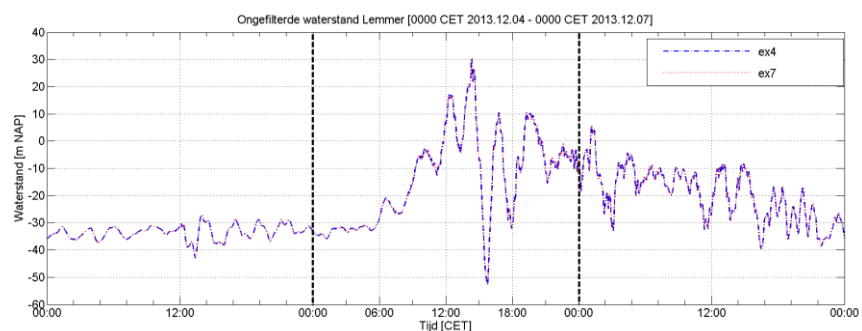
Figuur 18: Padafhankelijkheid initialisatie en simulatietijd: ex1 (blauw) versus ex6 (paars gebroken). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

Numerieke stabiliteit interne discretisatie: ex4 – ex7

Figuur 19 en Tabel 9 geven de verschillen tussen simulaties ex4 en ex7 weer. Het absolute gemiddelde verschil tussen de run met een interne tijdstap van 0,25 min en de run met een interne tijdstap van 0,0625 min is verwaarloosbaar. De correlatie coëfficiënt is 1. WAQUA heeft bij een windforcering in tijdsinterval van 1 minuut blijkbaar voldoende aan een interne rekenstap van een kwart minuut.

Tabel 9: Statistiek interne discretisatie

Statistiek	ex4	ex7
Tijdsresolutie (min)	1	1
Interne tijdstap	0,25	0,0625
Mean absolute difference (m)	0,00038	
Root mean square difference (m)	0,00056	
Pearson's correlation r	1,00000	



Figuur 19: Numerieke stabiliteit interne discretisatie: ex4 (blauw gebroken) versus ex7 (roze stippellijn). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

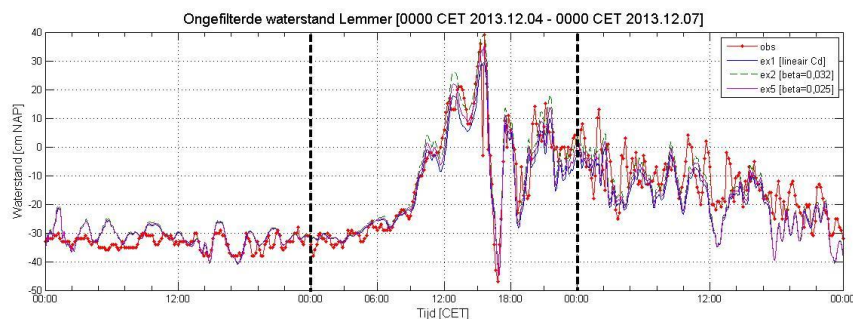
Test windstressconversie: ex1-ex2-ex5.

Figuur 20 en Tabel 10 geven de verschillen tussen de geobserveerde waterstand en die van de simulaties ex1, ex2 en ex5. Alle drie de simulaties correleren goed met de observaties. Aan de bereikratio is te zien dat de simulaties met een Charnock relatie voor de windstress nader tot het maximale uitwijking van de observaties komen dan ex1 waar de windstress een lineair variabele relatie aanneemt. Ook is de error kleiner bij de simulaties met een Charnock relatie. In de vergelijking tussen ex2 en ex5 komt ex5 (beta = 0,025) beter in de buurt bij het gemiddelde en de standaardafwijking over 5 december van de observaties. De default beta van

WAQUA (0,032) geeft een hogere standaardafwijking, wat te verwachten valt omdat de impulsoverdracht groter is bij een hogere Charnock constante. Ook met een hogere Charnock coëfficiënt bereikt de waterstand een hogere piek dan gemeten.

Tabel 10: Statistiek experimenten windstressconversie in vergelijking met observaties.

Statistiek	Observed	ex1	ex2	ex5
Tijdsresolutie (min)		10	10	10
Windstress		Lineair	beta = 0,032	beta = 0,025
Gemiddelde (m)	-0,11	-0,13	-0,09	-0,11
Standaard afwijking (m)	0,19	0,17	0,20	0,19
Mean absolute error (m)		0,05	0,04	0,04
RMSE (m)		0,07	0,07	0,06
normalized root mean square error		0,35	0,35	0,32
Pearson's correlation r		0,94	0,94	0,91
Bereikratio		0,86	0,98	0,93



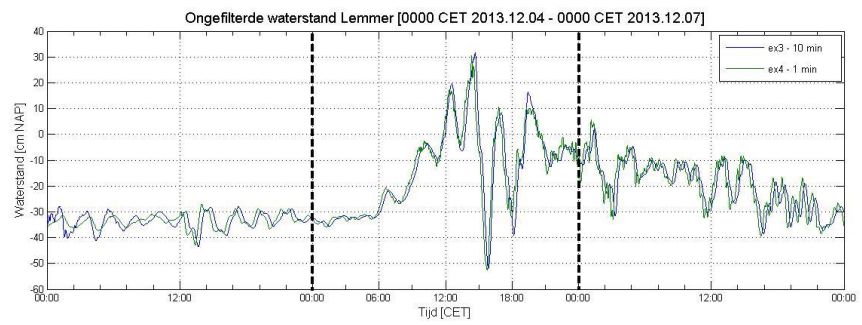
Figuur 20: Test windstressconversie: ex1 (blauw), ex2 (groen gebroken) en ex5 (paars). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

Gevoeligheid fijne tijdsresolutie: ex3 – ex4

Figuur 21 en Tabel 11 geven de verschillen tussen simulaties ex3 en ex4 weer, vooruitlopend op de WAQUA-experimenten die worden geforceerd met hoge tijdsresolutie HARMONIE-windvelden. De vergelijking is tussen twee runs waarin 1-minuut en 10-minuten Stavoren uniforme windvelden zijn opgelegd. Het absolute gemiddelde verschil bedraagt 0,03m. De correlatie coëfficiënt is 0,95. In beide runs is de waterstandsfluctuatie te zien die ook in de metingen zichtbaar is. Het maximale bereik van de waterstanden is vergelijkbaar tussen de runs. Wel is er een verschil in fijnheid waarmee de waterstand verandert; ex3 is een gladdere functie dan ex4.

Tabel 11: Statistiek gevoeligheid fijne tijdsresolutie

Statistiek	ex3	ex4
Tijdsresolutie (min)	10	1
Mean absolute difference (m)	0,03	
Root mean square difference (m)	0,05	
Pearson's correlation r	0,95	



Figuur 21: Gevoeligheid fijne tijdsresolutie: ex3 (blauw) en ex4 (groen). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

5.2 Uniforme windvelden

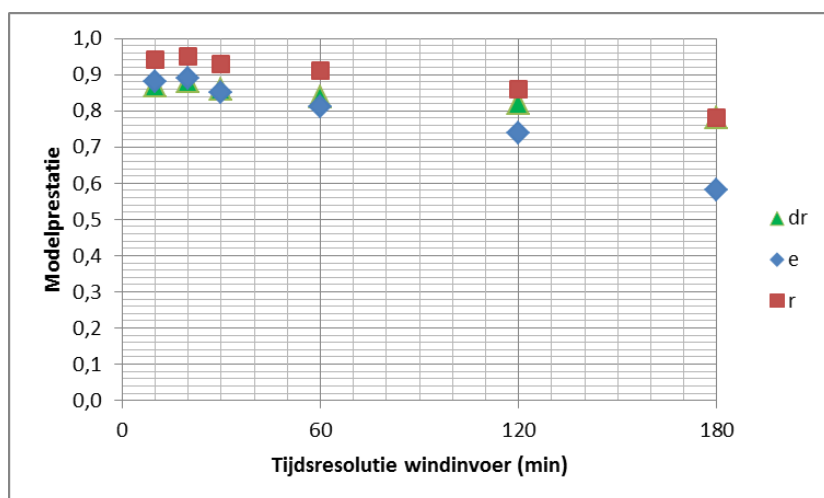
Tabel 12 geeft statistieken voor de experimenten voor de tijdsgevoeligheid met uniforme windvelden. In Figuur 22 en Figuur 23 is de gevoeligheid van de *goodness of fit* en van de error voor de tijdsresolutie geplot. Het is duidelijk dat met het vergroten van de tijdsresolutie de absolute error afneemt. Voor het domein van tijdsintervallen waarvoor getest is lijkt deze het best te beschrijven met een lineaire relatie. Ook is er een lineaire verbetering te zien voor het verhogen van de tijdsresolutie van de correlatie coëfficiënt r , de refined index of agreement d_r en de coefficient of efficiency E .

Figuur 24 laat zien hoe de waterstand zich ontwikkelt over de simulatieperiode voor de observatie en de experimenten in uiterste tijdsresoluties 10 minuten en 180 minuten. Met hogere tijdsresolutie is meer fijne variabiliteit te zien in de waterstandsverwachtingen, maar de algehele tendentie van de experimenten met tussenliggende tijdsresoluties valt binnen het bereik van deze twee experimenten.

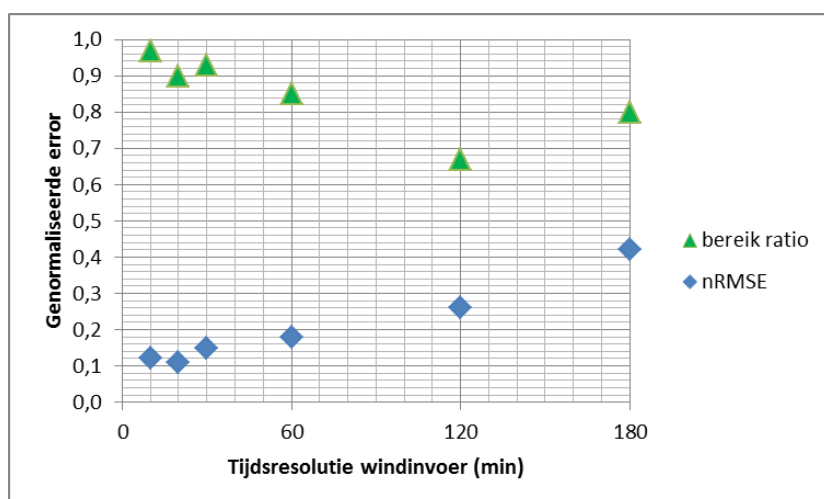
De waterbeweging van het hele IJsselmeer die WAQUA laat zien in de simulaties met uniform opgelegde wind is als volgt. Voorafgaand aan de koufrontpassage is er opwaaiing aan de oostelijke kant van het IJsselmeer. Deze wind-geïnduceerde opzet geeft een scheefstand van het waterlichaam. Tijdens de koufrontpassage start het waterlichaam een oscillatie beginnend vanuit de opwaaiingstoestand over de noord-zuid as van het IJsselmeer. Dit duurt totdat een nieuwe evenwichtstoestand bereikt is. In de trechtervormige haven van Lemmer is de impact van deze oscillatie vergroot omdat de afstand die golfbeweging hier kan afleggen, tussen het zuiden van de Friese kust en het noorden van de Noordoostpolder, niet groot is.

Tabel 12: Statistiek gevoeligheid tijdsresolutie uniforme wind

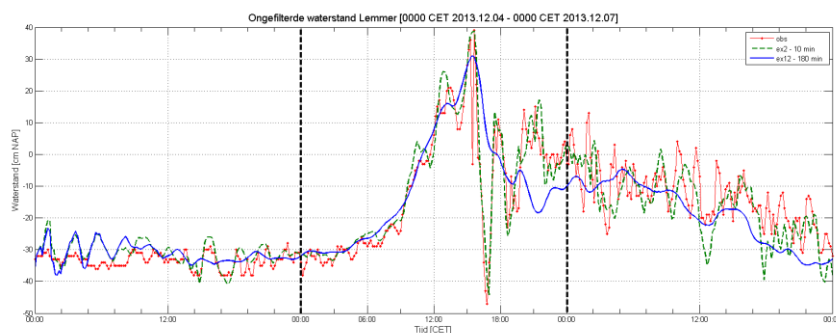
Statistiek	Obs	ex2	ex10	ex8	ex9	ex11	ex12
Tijdsresolutie (min)	10	10	20	30	60	120	180
Gemiddelde (m)	-0,10	-0,09	-0,09	-0,09	-0,10	-0,11	-0,10
Standaard afwijking (m)	0,19	0,20	0,19	0,20	0,19	0,16	0,18
Mean absolute error (m)		0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08
Root mean square error (m)		0,07	0,06	0,07	0,08	0,10	0,13
normalized root mean square error		0,35	0,33	0,39	0,43	0,51	0,65
Pearson's correlation r		0,94	0,95	0,93	0,91	0,86	0,78
Refined index of agreement d_r		0,87	0,88	0,86	0,84	0,82	0,78
Coefficient of efficiency e		0,88	0,89	0,85	0,81	0,74	0,58
Bereikratio		0,97	0,90	0,93	0,85	0,67	0,80



Figuur 22: Gevoeligheid modelprestatie voor de tijdsresolutie van uniform opgelegde windvelden dr is de refined index of agreement, e de coefficient of efficiency en r de Pearson correlatiecoëfficiënt.



Figuur 23: Gevoeligheid van de error en de bereikratio voor de tijdsresolutie van de uniform opgelegde windvelden.



Figuur 24: Tendentie experimenten uniforme windvelden: observaties (rood), 10 minuut forcing ex2 (groen) en 180 minuut forcing ex2 (blauw). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

5.3 Ruimtelijk variërende windvelden

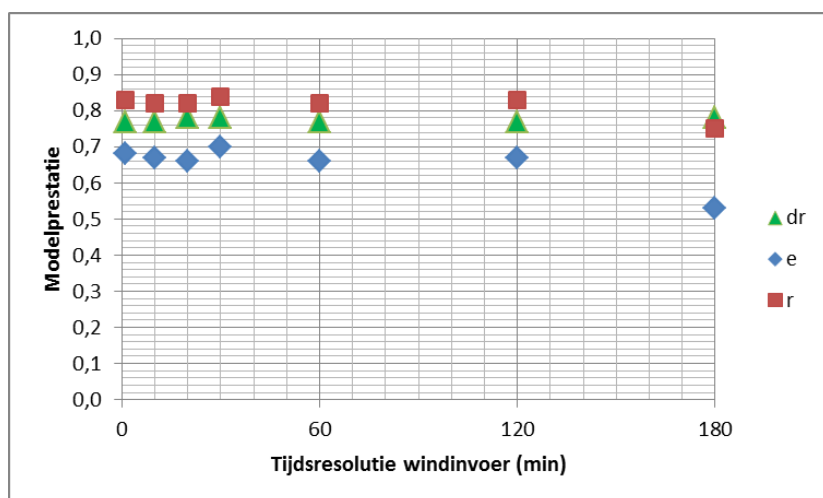
Tabel 13 geeft statistieken voor de experimenten voor de tijdsgevoeligheid met ruimtelijk variërende wind- en drukvelden. In Figuur 25 en Figuur 26 is de gevoeligheid van de goodness of fit en van de error voor de tijdsresolutie geplot. Voor het verhogen van de tijdsresolutie is er niet een trend te zien in de *correlatie coëfficiënt* r , de *refined index of agreement* d_r en de *coëfficiënt of efficiency* E . Minder duidelijk dan de experimenten met gemeten wind uniform opgelegd is te zien dat met het vergroten van de tijdsresolutie de error afneemt en de ratio van de gemodelleerde uitwijking die van de observaties nadert. De gevoeligheid is echter niet goed te beschrijven met een lineaire relatie.

Figuur 27 laat zien hoe de waterstand zich ontwikkelt over de simulatieperiode voor de observatie en de experimenten in uiterste tijdsresoluties 1 minuten en 180 minuten. Ook in deze simulaties is met een hogere tijdsresolutie meer fijne variabiliteit te zien in de waterstandsverwachtingen, en valt de algehele tendentie van de experimenten met tussenliggende tijdsresoluties binnen het bereik van deze twee experimenten.

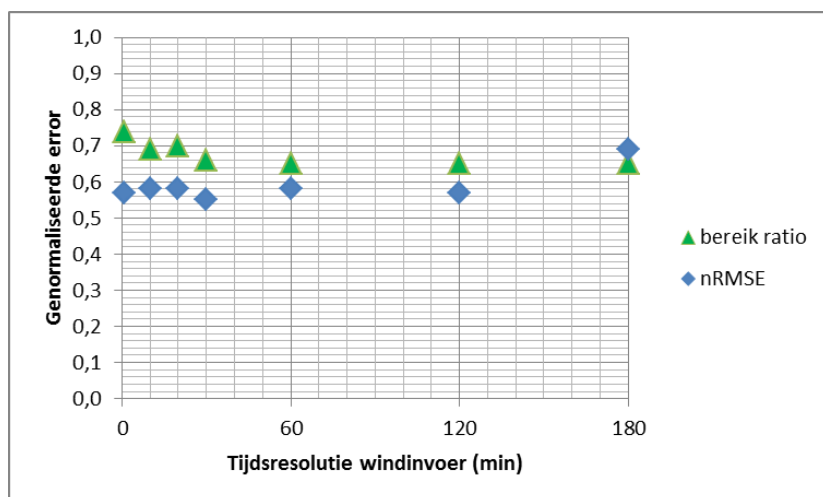
De waterbeweging van het hele IJsselmeer die WAQUA laat zien in de simulaties met ruimtelijk variërende velden is in grote lijnen vergelijkbaar met de tendentie van de beweging van simulaties met uniform opgelegde gemeten wind. De opwaaiing voorafgaand aan de koufrontpassage aan de oostelijke kant van het IJsselmeer is aanwezig, en geeft een scheefstand van het waterlichaam. De reactie van het water bij de koufrontpassage is minder abrupt dan gemeten. Het waterlichaam oscilleert ook hier vanuit opwaaiingstoestand over de noord-zuid as van het IJsselmeer totdat een nieuwe evenwichtstoestand bereikt is. Echter de energie in deze schommeling is minder groot dan die in de simulaties met gemeten wind.

Tabel 13: Statistiek gevoeligheid tijdsresolutie ruimtelijk variërende wind- en drukvelden

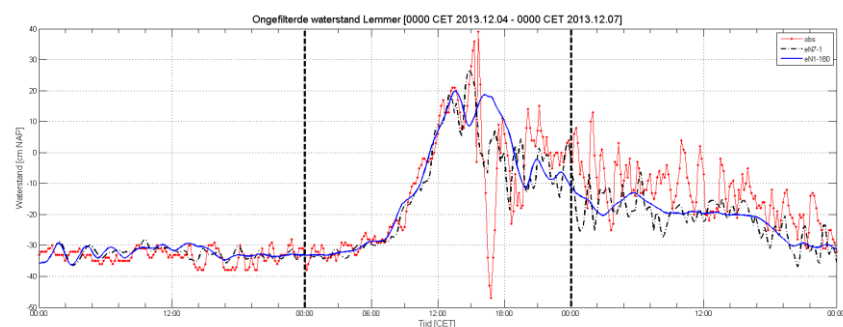
Statistiek	Obs	eN1	eN2	eN3	eN4	eN5	eN6	eN7
Tijdsresolutie (min)	10	180	120	60	30	20	10	1
Gemiddelde (m)	-0,10	-0,21	-0,22	-0,21	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
Standaard afwijking (m)	0,19	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,17
Mean absolute error (m)		0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
Root mean square error (m)		0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
normalized root mean square error		0,69	0,57	0,58	0,55	0,58	0,58	0,57
Pearson's correlation r		0,75	0,83	0,82	0,84	0,82	0,82	0,83
Refined index of agreement d_r		0,78	0,77	0,77	0,78	0,78	0,77	0,77
Coefficient of efficiency e		0,53	0,67	0,66	0,70	0,66	0,67	0,68
Bereikratio		0,65	0,65	0,65	0,66	0,70	0,69	0,74



Figuur 25: Gevoeligheid modelprestatie voor de tijdsresolutie van de ruimtelijk variërende wind- en drukvelden. dr is de refined index of agreement, e de coefficient of efficiency en r de Pearson correlatiecoëfficiënt.



Figuur 26: Gevoeligheid van de error en de bereikratio voor de tijdsresolutie van de ruimtelijk variërende wind -en drukvelden.

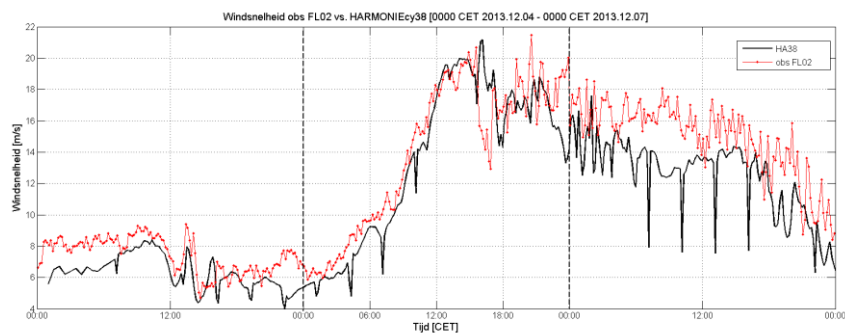


Figuur 27: Tendentie experimenten HARMONIE velden: observaties (rood), 1 minuut forcing eN7 (groen) en 180 minuut forcing eN1 (blauw). Waterstand in cm NAP, 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.

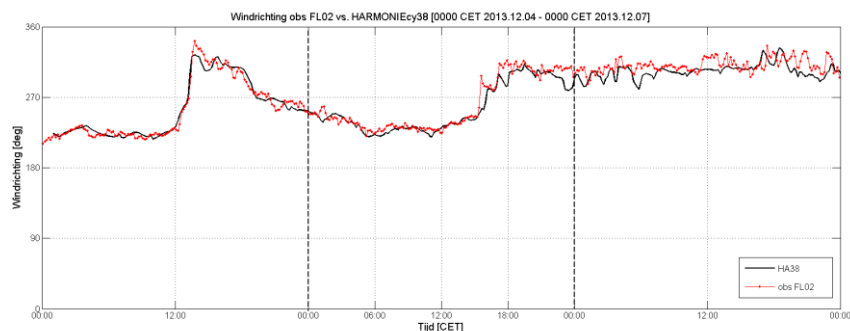
5.4 Vergelijking invoervelden

In Figuur 28 en Figuur 29 is de windsnelheid en de windrichting afgebeeld zoals gemeten bij meetpaal FL02 en zoals is gesimuleerd door HARMONIE in de gridbox waarin de coördinaten van meetpaal FL02 liggen. Figuur 30 laat de observaties en simulatiewaarden van luchtdruk zien. De meest relevante verschillen tussen de observaties en de simulatiewaarden zijn die die plaatshebben wanneer de seiche begint. Dat is rond 15.00 CET. Voor de windsnelheid is duidelijk te zien dat in de observaties de windsnelheid eerder en meer abrupt afneemt dan zoals HARMONIE verwacht. Wat betreft windrichting is de draaiing in de observaties scherper en meer plotseling dan gesimuleerd. Voor de luchtdruk komen observaties en simulatiewaarden goed overeen.

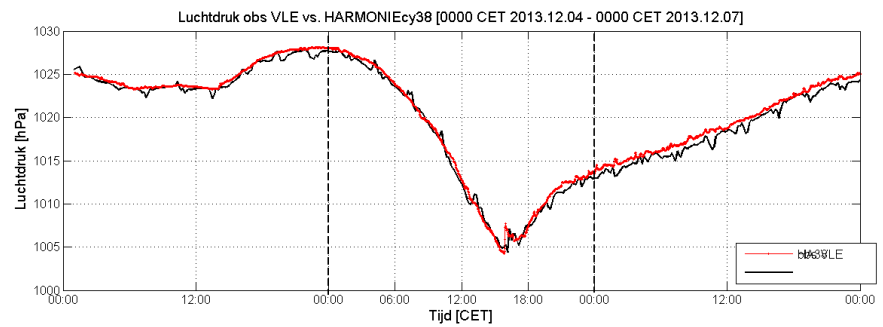
De verschillen in windsnelheid en windrichting tussen de observaties en de simulatiewaarden kunnen goed verklaren waarom de WAQUA-berekeningen met uniform opgelegde gemeten wind de seiche beter vatten dan de berekeningen met HARMONIE-invoer. Bij de koufrontpassage neemt de windsnelheid uit westelijke richting plotseling af want de wind draait naar het noordwesten. De constante energieoverdracht die de scheefstand van het waterlichaam in stand veroorzaakt, valt weg. Bij het wegvallen van de wind begint een schommeling in het waterlichaam. De weersverwachtingsvelden missen de scherpste van de windafname en –draaiing. De reactie van het waterstanden gebeurt daarom minder plotseling en met minder energie.



Figuur 28: Windsnelheid [m/s] van observaties FL02 (rood) en van HARMONIE in de gridbox waarin de coördinaten van meetpaal FL02 liggen (zwart). 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen.



Figuur 29: Windrichting [deg] van observaties FL02 (rood) en van HARMONIE in de gridbox waarin de coördinaten van meetpaal FL02 liggen (zwart). 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen



Figuur 30: Luchtdruk [hPa] van observaties Lelystad luchthaven (rood) en van HARMONIE in de gridbox waarin de coördinaten van Lelystad luchthaven liggen (zwart). 00CET 05.12.2013 – 00CET 06.12.2013 tussen zwarte verticale stippellijnen

6 Discussie

Koppeling eerdere verkenningen seiches in Lemmer

De Jong et al. (2006) vinden seiches in het Lemmer met een primaire en secundaire dominante periodiciteit van de 1,5 en 2,3 uur. Dit is in overeenstemming met de bevindingen in dit rapport. 85% van de gevonden seiches heeft een dominante periode van de waterstandsfluctuatie tussen de 1,5 en 2,5 uur.

Koppeling seiches Lemmer aan seicheverwachtingen kust en weerswaarschuwingen KNMI

In geval van overduidelijke samenhang zou een weerwaarschuwing een niet-kwantitatief maar makkelijk hulpmiddel zijn in de beoordeling of er seiches te verwachten zijn. Zoals met het koppelen van weerwaarschuwingen aan seiche-events is het hetzelfde van toepassing voor de koppeling met seicheverwachtingen langs de kust. In geval van overduidelijke samenhang zou een seicheverwachting langs de kust ook in overweging kunnen worden genomen in de beoordeling of er seiches in Lemmer te verwachten zijn. Statistische significantie tussen de gevonden relaties kan niet getest worden daar het aantal seiche-events te klein is, en de onderzochte periode te kort.

Meteo-invoervelden: luchtdruk

In de *Spatially Varying Wind & Pressure* (SVWP) velden is uit de HARMONIE-simulatie de oppervlakedruk opgenomen. WAQUA haalt uit de SVWP-velden de gradiënt van de luchtdruk. Dit wordt meegenomen in de berekening van de waterstandgradiënt, daarmee wordt het aandeel van de stroming verantwoord dat de barotropische drukgradiënt volgt. De luchtdrukgradiënt is met name belangrijk in de simulatie van storm- en onweersituaties, wanneer een grote en snelle verandering in de luchtdruk kan plaatsvinden.

Om het effect van luchtdrukgradiënt mee te nemen, moet het drukveld ten opzichte van een gelijk refentieniveau gegeven zijn. Druk ten opzichte van gemiddeld zeeniveau is hierin een veilige keuze. Oppervlakedruk is dat niet, hoewel het referentieniveau over het hele IJsselmeer gelijk is (winterstreefpeil -0,40 NAP; zomerstreefpeil -0,20NAP). Hoogteverschillen in het omliggende landschap, zoals de Veluwe, worden door WAQUA dan ten onrechte aangezien voor lagedrukgebieden waar water heen wil stromen. In het vervolg wordt voor de zekerheid beter luchtdruk ten opzichte van gemiddelde luchtdruk op zeeniveau ingevoerd in de SVWP-velden.

Meteo-invoervelden: wind

De conversie van HARMONIE-windstress naar 10-meter wind dat binnen HARMONIE zelf gebeurt, is niet op een lijn met de conversie 10-meter wind naar windstress van WAQUA. HARMONIE voert bijvoorbeeld een stabiliteitscorrectie uit voor wind op land. Hoewel nu niet de praktijk, onzekerheden en mogelijke vergrootte modelerrors die door deze inconsistente conversie veroorzaakt worden, zouden voorkomen kunnen worden door de windstress uit HARMONIE direct op te leggen aan WAQUA.

HARMONIE relatie tussen ruimtelijke en temporale resolutie

In numerieke stromingsleer dient de lengte van de tijdstap en de grootte van de tweedimensionale naast elkaar geplaatste ruimtelijke gridboxen te voldoen aan de Courant Friedrichs Lewy (CFL) conditie (Lynch, 2008). De ratio van de temporale resolutie tot de ruimtelijke resolutie is gebonden aan de magnitude van de algehele

circulatiedoorloopsnelheid om het signaal voldoende interne rekentijd te geven zich voort te zetten in de modelruimte. Hiermee wordt divergentie voorkomen in de eindige benadering van de differentiaalvergelijkingen waar het model uit bestaat.

Dit is zowel van toepassing voor weermodellen als voor hydrodynamische modellen. WAQUA is dusdanig fijnmazig dat het opleggen van 1-minuut windvelden geen probleem is. HARMONIE heeft een ruimtelijke resolutie van 2,5 bij 2,5 kilometer. Het model heeft ten minste enkele minuten modeltijd nodig de differentiaalvergelijkingen van een gridbox door te rekenen. Een tijdsresolutie van modeluitvoer van 1 minuut is daarmee niet zinnig, en ook over de waarde van modeluitvoer van 10 minuten valt te twisten. Het is de vraag of HARMONIE überhaupt zulke snelle winddraaiingen kan simuleren zoals die zijn gemeten bij FL02 in de Sinterklaasstorm 2013. HARMONIE kan modeluitvoer geven in deze fijne tijdsresoluties, echter moet goed in gedachte gehouden worden dat het een fijnheid kan pretenderen niet gefundeerd is vanuit de modelopzet.

Vergelijking observaties met HARMONIE-invoer

De opmerking die gemaakt moet worden over de vergelijkingen van de observaties van wind en luchtdruk met de waardes van de corresponderende gridboxen uit de HARMONIE-invoervelden is dat de observaties puntmetingen zijn, waar de HARMONIE-gridbox een gebied van 2,5 bij 2,5 kilometer beslaat. Dit is niet zozeer van toepassing op luchtdruk. Het kan wel van toepassing zijn op de wind. De windmetingen zijn afkomstig van meetpaal FL02, die redelijk dicht tegen de Noordoostpolder aan ligt. Zeker wind op land kan ruimtelijk erg variëren door de ruwheid van het landoppervlakte. In dit geval zijn de winden afkomstig van zuidwestelijk tot noordwestelijke richting, dus zal de invloed van nabijgeleden land gering zijn.

HIRLAM versus HARMONIE

Processen die plaatsvinden op een ruimtelijke schaal kleiner dan de resolutie van het weermodel worden geparameteriseerd. Deze formuleringen bevatten constanten die empirisch en niet fysisch bepaald zijn. Windsnelheid wordt vertaald vanuit windstress, dit is de kracht die uitgeoefend wordt op het water. De vertaling kan gedaan worden met verschillende formuleringen. Kortdurende processen zoals windstoten of buistoten zijn niet in HIRLAM opgenomen, en worden gemist in de verwachting. HARMONIE is fijnschaliger en neemt kleinschaligere processen dus ook fysisch mee. De verwachting is dat dit een verbetering met zich meebrengt in de voorspelkwaliteit wat betreft wind.

De operationele waterstandverwachtingen zoals opgehaald uit WaterCoach voor de Sinterklaasstorm van 5 december 2013 zijn geforceerd in uurlijks tijdsinterval met gedownscalede HIRLAM-verwachtingen die elke 6 uur geupdate worden. In de simulaties van WAQUA in uurlijks tijdsinterval geforceerd met HARMONIE (eN3) wordt het weermodel elke 3 uur geassimileerd. In die zin zijn de twee sets waterstandsverwachtingen niet goed vergelijkbaar.

Het bovenstaande in overweging nemende is duidelijk dat de HARMONIE-waterstandsverwachtingen voor Lemmer minder afwijken van de observaties dan die van HIRLAM in dezelfde tijdsresolutie (60 minuten). Waar HARMONIE het onderschat, overschat HIRLAM de piekwaterstand. De simulatie met HIRLAM heeft een betere bereikratio dan van HARMONIE, die een meer afgevlakte waterstandstendentie laat zien. In deze tijdsresolutie zijn beiden niet in staat de snelle fluctuatie van de seiche te vatten.

7 Conclusies

Typering van seiche-fenomenen

Hoe is een seiche te karakteriseren in termen van frequentie van optreden, duur, amplitude, periodiciteit?

Seiches in Lemmer zijn in de periode 2009-2015 22 keer voorgekomen met een gemiddelde amplitude van 0,47 meter. 85% van de gevonden seiches heeft een dominante periode van de waterstandsfluctuatie tussen de 1,5 en 2,5 uur.

Hoe is de synoptische situatie te karakteriseren wanneer seiches voorkomen?

Seiches bij Lemmer komen voor veelal bij het overtrekken van een buienlijn vanuit zuidwestelijk tot noordwestelijke richting. Deze kan veroorzaakt worden door het overtrekken van een koufront of een of meerdere troggen. Wanneer er een weeralarm wordt uitgegeven voor het KNMI voor zware windstoten of zware onweersbuien is er een grotere kans op seiches in Lemmer. Dit geldt ook wanneer er een seicheverwachting wordt uitgegeven voor de kustregio voor type A, B of D.

In welke mate is er een empirische relatie tussen wind- en druk variabiliteit, en variabiliteit in de waterstand?

De dominantie periodiciteit van de schommelingen in de windsnelheid ligt op 3 uur gemiddeld. De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid in de oost-west richting (u-wind) is met 2,5 uur kleiner dan de dominante periodiciteit in de v-wind (3,5 uur). De luchtdruk fluctueert niet zoals de waterstand en de wind. Wel is er vaak een gestage daling bij de passage van een koufront, of een snelle schommeling bij het overtrekken van een buienlijn met onweer voorafgaand of ten tijde van de waterstandsfluctuatie.

De relatie tussen variabiliteit in wind en variabiliteit in de waterstand bij Lemmer is in dezelfde orde van grootte. Er bestaat een marge binnen de verschillende periodiciteiten die aanwezig zijn in de windfluctuaties waar het water op kan reageren, ofwel in de windsnelheid, ofwel in een van de windcomponenten. Waar een reactie van de waterstand op is, is niet afhankelijk van het type seiche. Een schatting van deze marge waarmee de periodiciteit in windfluctuaties samenhangt met periodiciteit van de seiche is een uur. Deze overlap lijkt in Lemmer zo dat beweging in wind en water dusdanig voldoende samenvallen dat een seiche ontstaat.

Modelleren van het seiche-fenomeen

In hoeverre kunnen seiches worden gesimuleerd met het waterstandsmodel WAQUA geforceerd met uniform opgelegde gemeten wind?

De seiche in Lemmer tijdens de Sinterklaasstorm van 2013 wordt goed gesimuleerd met WAQUA wanneer gemeten wind uniform wordt opgelegd. De correlatie coëfficiënt tussen de observaties en de simulatie waarin elke 10 minuten wind wordt aangegeven is 0,94. De gemiddelde absolute error is 0,04 meter over het etmaal van 5 december.

In hoeverre kunnen seiches worden gesimuleerd met het waterstandsmodel WAQUA geforceerd met HARMONIE-windvelden?

In deze storm mist HARMONIE de scherpste van de winddraaiing en –afname die nodig zijn voor WAQUA om de seiche bij Lemmer volledig te simuleren. De modelperformance van WAQUA binnen de orde van grootte van het bereik van waterstandsfluctuaties die geëvalueerd zijn, hangt hoofdzakelijk af van de kwaliteit van de meteorologische invoer. De gevoeligheid voor de tijdsresolutie opgelegd is klein, voor accuratere waterstandsverwachtingen helpt het weinig HARMONIE-velden op hogere tijdsresolutie aan WAQUA op te leggen.

Wat zijn de minimale voorwaarden om een seichesignaal te simuleren met betrekking tot de tijdsresolutie van de windforcering?

Afhankelijk van hoeveel van het seichesignaal gevat dient te worden, kan op basis van deze case study gezegd worden dat een tijdsresolutie van 30 minuten uniforme opgelegde wind voldoende is om 90% van de extreme waarden in de observaties te vatten en 90% correlatie in de tendentie van de observaties te behalen.

8 Referentielijst

- De Jong, M. P. C. (2004). *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-9017925-9.
- De Jong, M. P. C., & Stolker, C. (2004). *Verkenning seiches in WAQUA: studie naar waterstandslingeren in het IJsselmeergebied*. Deltares (WL). [uuid:263e3065-b3e4-4747-bf86-7aff6b8e8005](#)
- De Jong, J. (2006). *Bijzondere vloedgolf op het IJsselmeer, de Lemster Rissaga*. MeteoConsult weer archief. Verkregen op 11 juli 2016: <http://archieff.weer.nl/?menu=view&cat=onweer&item=lemsterrissaga20082006.wn>
- De Jong, M.P.C., M. Bottema, R.J. Labeur en C. Stolker (2006) Atmospherically generated scale water-level fluctuations in a closed basin, *Proc. 30th Int. Conf. Coastal Eng.*, Vol. 2, pp. 1184-1196, San Diego, USA.
- Deltares (2011a), *5de generatie IJVD WAQUA model - Bouw, kalibratie en verificatie*, 1209449-007-ZWS-0008, auteur: M. van der Mheen.
- Deltares (2011b), *Bijlagen rapport WAQUA-model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht*, 1202108-001-ZWS-0005-vj, auteur: M. van der Mheen.
- Deltares (2015), *Inventarisatie van potentiële seiche-locaties in Nederland - Verkenning en Plan van Aanpak*, 1220039-010-VEB-0001, auteur: M.P.C. de Jong.
- Deltares (2016). *Seiches – Invloed op waterkeringen, beperkingen in opwekking en analyse waterstandsmetingen* [concept], 1230042-007 -ZWS-0001, auteurs: M.P.C. de Jong, S.P. Reijmerink, J.v.L. Beckers.
- Graps, A. (1995). An introduction to wavelets. *IEEE computational science and engineering*, 2(2), 50-61.
- Groen, P, en Dorrestein, R., *Zeegolven*, 3e herz. druk, Staatsdrukkerij, 's-Gravenhage, 1976
- KNMI (2004). *Werkinstructie 'Seichesverwachting voor het Rotterdams Havengebied'*, versie 1.0, auteur: K. Dekker.
- KNMI (2008). *Meteorologische onstandigheden tijdens het optreden van type C seiches in de Rotterdamse Haven – Een aanzet tot het verbeteren van seichesverwachting*. Maart 2008, auteur: M. van Schaik.
- KNMI (2012). *KNMI HARMONIE R&D and operations*. Auteurs: S. Tijm, Siebren de Haan, Sibbo van der Veen. Verkregen op 01 september 2016: http://srnwp.met.hu/Annual_Meetings/2012/download/monday/posters/poster_Netherlands.pdf
- KNMI (2016). *Uitleg over KNMI Waarschuwingen*. Verkregen op 17 augustus 2016 van <http://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/knmi-waarschuwingen>
- Lynch, P. (2008). The origins of computer weather prediction and climate modeling. *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3431-3444.
- Makin, V. K., Kudryavtsev, V. N., & Mastenbroek, C. (1995). Drag of the sea surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 73(1-2), 159-182
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I— A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- RIZA (1999). *Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied, deelrapport 5, Modelling waterbeweging (WAQUA)*, RIZA rapport 99.042, ISSN 1383-7761, ISBN 9036952662. RIZA, Lelystad. Auteurs: C. Bak & D. Vlag.
- RWS Waterberichtgeving (2016). *Projecten seiches: seiches pagina*. Verkregen op 17 augustus 2016 van http://waterberichtgeving.rws.nl/nl/projecten_seiches_seiches-operationeel.htm
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., ... & Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976-991.

- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.
- Wilcox, B. P., Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Wight, J. R. (1990). Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. *Water Resources Research*, 26(10), 2401-2410.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088-2094.
- WMCN-KUST (2014). *Stormvloedrapport van 5 t/m 7 december 2013 (SR91): Sint-Nicolaasvloed 2013*. Watermanagementcentrum Nederland, Rijkswaterstaat.

Bijlage A WAQUA configuratie

```
# =====
# geometry of the model
# =====

# ----- define grid
MESH

GRID
  AREA
    MMAX      = 533
    NMAX      = 3733
    KMAX      = 1
    STEPSIZE  = 1.00
    ANGLEGRID = 0.0
    LATITUDE  = 52.69
    LONGITUDE = 0.00
    COOR_ID   = 'USER'

  CURVILINEAR
    RGFFile = '../ijvd40m_5-v1.rgf'

# ----- computational grid
BOUNDARIES
  ENCLOSURES
    INCLUDE '../randen/rrb.001'

  OPENINGS
    #INCLUDE '../locaties/randem-1.001'    note: rand Waddenzee dicht
    open1 = line(p5101,p5102,'01st')
    open2 = line(p5103,p5104,'Hesselmulertbrug')

  BARRIERS
    INCLUDE '../kunstwerken/barriers.001'

# ----- define bottom level
BATHYMETRY
  GLOBAL
    CONST_VALUES = 0.0
    DPD_GIVEN
    METH_DPS      = 'max_dpuv'
    LAYOUT        = 1
    DEPMULTIPLIER = 1.00
    THRESHOLD     = 0.00

set noecho

LOCAL
  INCLUDE '../bodem/bodem.001'

DRYPOINTS
  CLOSEU
    INCLUDE '../schotjes/schotarea-u.001'
  INCLUDE '../schotjes/schothwvl-u.001'
    INCLUDE '../schotjes/schotrrb-u.001'

  CLOSEV
    INCLUDE '../schotjes/schotarea-v.001'
  INCLUDE '../schotjes/schothwvl-v.001'
```



```

        INCLUDE '../schotjes/schotrrb-v.001'

WEIRS
    INCLUDE '../overlaten/overlaat.001'

set echo

# =====
# flow problem
# =====

FLOW
    PROBLEM
        TIMEFrame
            DATE      = '04 DEC 2013'
            TSTART    = 0.
            TSTOP     = 4320. # 3 dagen
            TIMEZONE  = 'MET'

    METHODVARIABLES
        TSTEP        = 0.25
        ITERCON       = 20
        TERMOM        = 8
        CHECKCONT     = 'wl'
        ITERACCURWL   = 0.0005
        ITERACCURVEL  = 0.005

    SMOOTHING
        TLSMOOTH = 0.0

    DRYING
        CHECK_WL           = 'yes'
        THRES_UV_FLOODING = 0.01
        THRES_WL_FLOODING = 0.01
        UPWIND_ZETA        = 'yes'

    FRICTION
        GLOBAL
            TICVAL          = 0.25
            FORMULA         = 'white-c'
        UDIREC
            GLOBAL
                CONST_VALUES = 0.2
        VDIREC
            GLOBAL
                CONST_VALUES = 0.2

```

Bijlage B HARMONIE details

B.1 Configuratie settings

```

uit scr/Harmonie_domains.pm:
  'NETHERLANDS'=>{
    'TSTEP'  => '60',
    'NLON'   => '800',
    'NLAT'   => '800',
    'LONC'   => '4.9',
    'LATC'   => '51.967',
    'LON0'   => '0.0',
    'LAT0'   => '52.5',
    'GSIZE'  => '2500.',
  },

# **** High level forecast options ****
DYNAMICS="nh"                # Hydrostatic or non-hydrostatic
dynamics (h|nh)
PHYSICS="arome"              # Main model physics flag (arome|alaro)
SURFACE="surfex"            # Surface flag (old_surface|surfex)
DFI="none"                   # Digital filter initialization
                                # (idfi|fdfi|none)
                                # idfi : Incremental dfi
                                # fdfi : Full dfi
                                # none : No initialization (AROME case)

# **** Nesting ****
HOST_MODEL="ifs"             # Host model (ifs|hir|ald|ala|aro)
                                # ifs : ecmwf data
                                # hir : hirlam data
                                # ald : Output from aladin physics
                                # ala : Output from alaro physics
                                # aro : Output from arome physics

# **** Assimilation ****
                                # Apply Wedi/Hortal vorticity
                                # dealiasing
ANAATMO=3DVAR                # Atmospheric analysis
                                # (3DVAR|4DVAR|blending|none)
ANASURF=CANARI_OI_MAIN       # Surface analysis (CANARI|
                                CANARI_OI_MAIN|CANARI_EKF_SURFEX|none)
                                # CANARI : Old style CANARI
                                # CANARI_OI_MAIN : CANARI + SURFEX OI
                                # CANARI_EKF_SURFEX : CANARI + SURFEX
                                # EKF ( experimental )
                                # none : No surface
                                # assimilation
FCINT=03                     # Assimilation cycle interval [h]

# **** Model geometry ****
DOMAIN=NETHERLANDS          # See definitions in

```

```

VLEV=65
# scr/Harmonie_domains.pm
# Vertical level definition.
# HIRLAM_60, MF_60,HIRLAM_40, or
# BOUNDARIES = same number of levs as
# on boundary file.
# See the other choices from
# scr/Vertical_levels.pl

```

B.2 Parameterdetails

HARMONIE schrijft primaire atmosfeer output naar de upper air history files. Deze files zijn een snapshot van de modelstaat in een gegeven punt in tijd. De Surfex files bevatten diagnostische landoppervlakte variabelen, de postprocessed files bevatten opgegeven variabelen die moeten worden teruggerekend naar bijvoorbeeld andere verticale coördinaten. Zie de HARMONIE 38h1.1 systeem documentatie voor meer details.

GRIBfiles uit HARMONIE:
Filenaam conventie

Type	id	naam
History	H	HAvv_Rgg_yyyymmddhh00_hhhmi_GB
Surfex	S	HAvv_Sgg_yyyymmddhh00_hhhmi_GB
Postprocessed	P	HAvv_Pgg_yyyymmddhh00_hhhmi_GB

Hierin is vv de Harmonie versie (38 voor 38h1), gg een indicatie voor de resolutie (25 voor 2.5km), en de rest volgens de standaard APL conventie.

De HARMONIE-velden om WAQUA mee te forceren zijn de volgende hisstory-files: HA38_R25_201312ddhh00_hhhmi_GB van 040000 tot 070000.

Parameters uit de history files; luchtdruk, en de windcomponenten, zijn relatief ten opzicht van het oppervlakte:

HARMONIE-38h1 parameter list

2D Surface, prognostic/diagnostic near-surface and soil variables

FA name	Unit	Parameter	Type	Level	Note
SURFPRESSION	Pa	1	105	0	Surface pressure
CLSVENT.ZONAL	ms-1	33	105	10	U10m, relative to the model coordinates
CLSVENT.MERIDIEN	ms-1	34	105	10	V10m, relative to the model coordinates

Bijlage C Statistiek analyse

Statistische analyse voor observaties O , modelwaardes P en index i (van 00CET 05.12.2013 tot 00CET 06.12.2013):

Verschilmaten

Statistieken om observatiewaarden met simulatiewaarden, of simulatiewaarden onderling, te vergelijken zijn de *Mean Absolute Error (MAE)* en de *Root Mean Square Error (RMSE, of Root Mean Square Difference RMSD* in de vergelijkingen van simulaties onderling) en de *bereikratio* gegeven. Eenheden: MAE en RMSE in meter boven NAP, bereikratio is dimensieloos.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i|$$

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}$$

$$nRMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

$$bereik\ ratio = \frac{\left| \max_{0 \leq i \leq end} (P) \right| + \left| \min_{0 \leq i \leq end} (P) \right|}{\left| \max_{0 \leq i \leq end} (O) \right| + \left| \min_{0 \leq i \leq end} (O) \right|}$$

Maten voor modelprestatie

Om de modelprestatie te beoordelen de *Pearson product-moment coefficient of linear correlation* r , de *refined Index of Agreement* d_r en de *coefficient of efficiency* E . Waardes van r liggen in het interval $[-1,1]$, met 1 als perfecte score. Waardes van d_r liggen in het interval $[0, 1]$, ook met 1 als perfecte score. Waardes van E liggen in het interval $[-\infty, 1]$, ook met 1 als perfecte score.

De *Pearson product-moment coefficient of linear correlation* r is de verhouding tussen de covariantie die bestaat tussen de modelwaardes P en observatiewaarden O , en het product van hun standaard deviaties. Waardes van r liggen in het interval $[-1,1]$. Het wordt geïnterpreteerd als het deel van de standaard afwijking in de observaties dat door het model verklaard wordt. Hoe hoger de absolute waarde van r , hoe sterker de lineaire relatie tussen de twee tijdseries. Het teken van r geeft aan of het om een negatieve of positieve relatie gaat. Nadeel van r is dat het alleen de tendentie van de tijdseries meeneemt, en niet magnitude. Ook is r disproportioneel gevoelig voor uitschieters.

De *refined Index of Agreement* d_r met $c=2$ is de grootte van de verschilsom tussen observaties en modelwaarden ten opzichte van de som van observatieafwijkingen en 'perfect model'-afwijkingen ($P_i=O_i$) van het gemiddelde (Willmot et al., 2012). Door de gestelde voorwaarden is het bereik van d_r beperkt tot $[-1,1]$ met waarde van 1 voor perfecte modelprestatie, 0 wanneer de errorsom is gelijk aan de som van observatieafwijkingen en 'perfecte-model'-afwijkingen. Wanneer de lower limiet benaderd wordt zijn modelgeschatte afwijkingen rond het gemeten gemiddelde slechte schattingen van de geobserveerde afwijkingen, maar het kan ook een teken zijn dat er weinig geobserveerde variabiliteit bestaat. Interpretatie van d_r nabij -1 dient dus zorgvuldig te gebeuren.

De *coefficient of efficiency* E is de ratio van de Mean Square Error (MSE) tot de variantie in de geobserveerde data, afgetrokken van 1 (Nash & Sutcliffe, 1970; Wilcox et al., 1990). Waardes van E liggen in het interval $[-\infty, 1]$. Wanneer het kwadraat van de afwijkingen tussen de gemodelleerde waarden en de geobserveerde waarden kleiner is dan de variantie in de observaties, dan $E > 0$. Wanneer het geobserveerde gemiddelde heeft meer voorspelkracht dan het model, dan $E < 0$ dan.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]}{[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2]^{\frac{1}{2}} [\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$d_r = \begin{cases} 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|}, & \text{when } \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \leq c \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}| \\ \frac{c \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}|}{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|} - 1.0, & \text{when } \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| > c \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}| \end{cases}$$

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

Bijlage D Beschrijvingen seiches Lemmer 2009 – 2015

D.1 Toelichting

In de volgende bijlages worden de seiches in Lemmer beschreven die plaatsvonden in de periode tussen januari 2009 en december 2015. Opzet van de beschrijvingen is als volgt: eerst een beschrijving van de observaties. Dat is de gemeten waterstandsfluctuatie en de fluctuatie in de gemeten windsnelheid, en in hoeverre er overeenkomsten zijn tussen deze fluctuaties in timing en periodiciteit. Ook wordt de gemeten luchtdruk beschreven. Dan volgt een verhandeling met doel de seiche te classificeren. Hierbij wordt de synoptische situatie aan de hand van weerkaarten beschreven. Ook radarbeelden ten tijde van de seiche en etmaalsomkaarten van neerslag en bliksemontladingen worden beschreven.

De figuren in de bijlages voor het respectievelijke seiche-event zijn (Tijd: CET):

- Waveletanalyse gefilterde waterstanden (Tijd: CET)
- Waveletanalyse windsnelheid (Tijd: CET)
- Waveletanalyse windsnelheid u-component (Tijd: CET)
- Waveletanalyse windsnelheid v-component (Tijd: CET)
- Waterstanden van Lemmer (Tijd: CET)
- Windmetingen van meetopstelling FL02 (Tijd: CET)
- Luchtdrukmetingen van Luchthaven Lelystad (Tijd: CET)
- Weerkaarten (2 of 3, tijd: UTC) (wintertijd = UTC + 1)(bron: KNMI)
- Neerslagradark kaart etmaalsom (bron: KNMI)
- Radark kaart ten tijde van seiche (Tijd: CET) (bron: KNMI)
- Bliksemkaart etmaalsom (bron: KNMI)

D.2

Event op 8 mei 2009

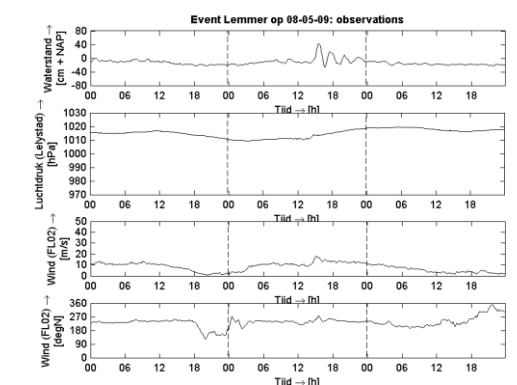
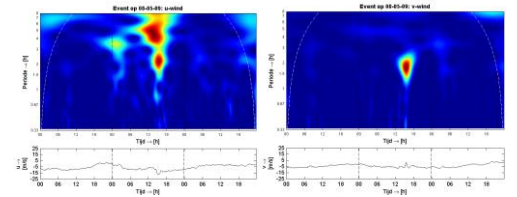
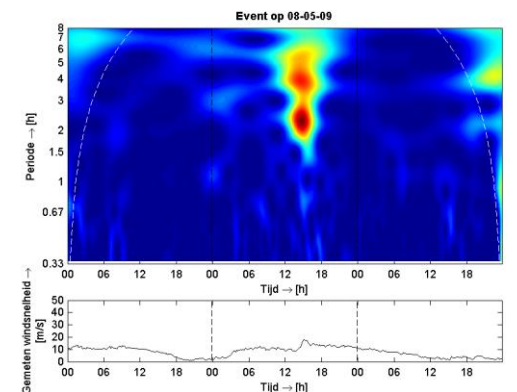
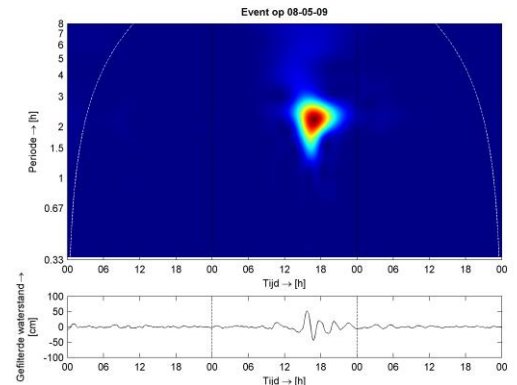
Op 8 mei 2009 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 15.00 CET. Buiten de seiche is er geen verhoogde waterstand. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2,5 uur die over een tijdsbestek van 6 uur uitdempt.

In de windsnelheid is te zien dat de dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid overeen komt met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties; ongeveer 2,5 uur. Er zijn echter ook fluctuaties in de windsnelheid met een grotere periode aanwezig die niet van invloed lijken op de waterstanden. Uit de windcomponenten is een duidelijke relatie te zien tussen de waterstandsfluctuatie en de fluctuatie in de v-wind.

In de luchtdrukmetingen is een snelle stijging te zien van bijna 2.5 hPa in een half uur (van 1011.2 hPa om 14:17 naar 1013.6 hPa om 14:47), waarna de druk geleidelijk blijft toenemen. Op dat moment in de tijd gaat het harder waaien en ruimt de wind.

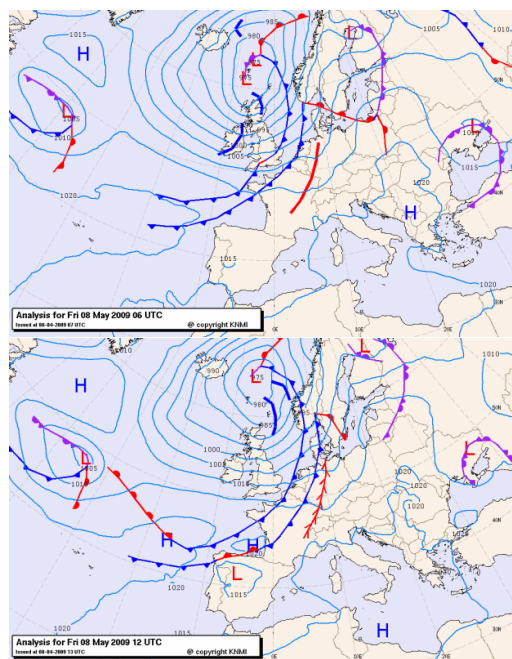
Op de weerkaart van 06UTC (07CET) zijn twee koufronten ten westen van Nederland te zien. Deze verplaatsen zich over Nederland in westelijke richting. Verder is een convergentielijn aanwezig over west Duitsland en midden Frankrijk, waar een stijgende luchtbeweging ontstaat.

Op de neerslagradarkkaart is te zien dat er redelijk wat regen gevallen is. Dit ging gepaard met bliksem ten tijde van de waterstandsfluctuatie.

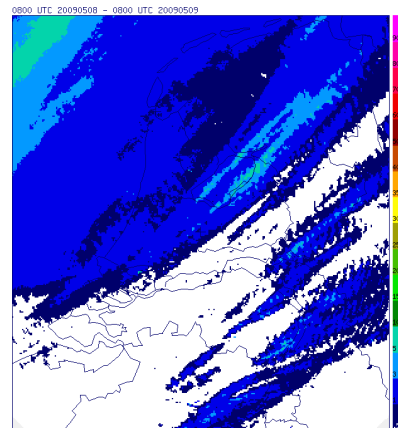


Voor type B voldoet het in zoverre dat het een actief koufront is uit westelijke richtingen met zware buiten en windstoten. Echter mist een markante windruiming na frontpassage. Type D is ruim gedefinieerd als post-frontale buienlijn met zware buiten en windstoten in stroming tussen zuidwest en noord achter het koufront, waaraan de synoptische situatie van dit event volledig voldoet.

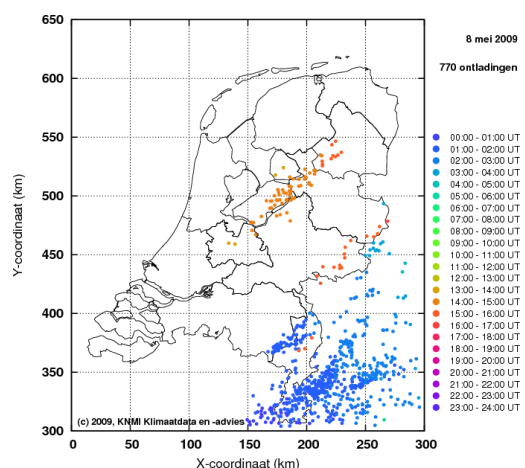
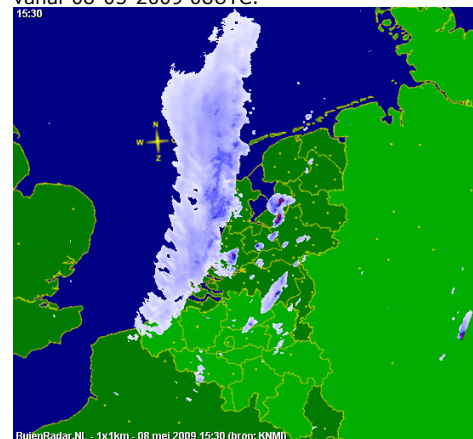
Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type D.



Figuur A1.1: Weerkaarten van 08-05-2009 06UTC en 12UTC.



Figuur A1.2: Neerslagradarkaart etmaalsom vanaf 08-05-2009 08UTC.



Figuur A1.3: Bliksemkaart 08-05-2009.

D.3

Event op 26 mei 2009

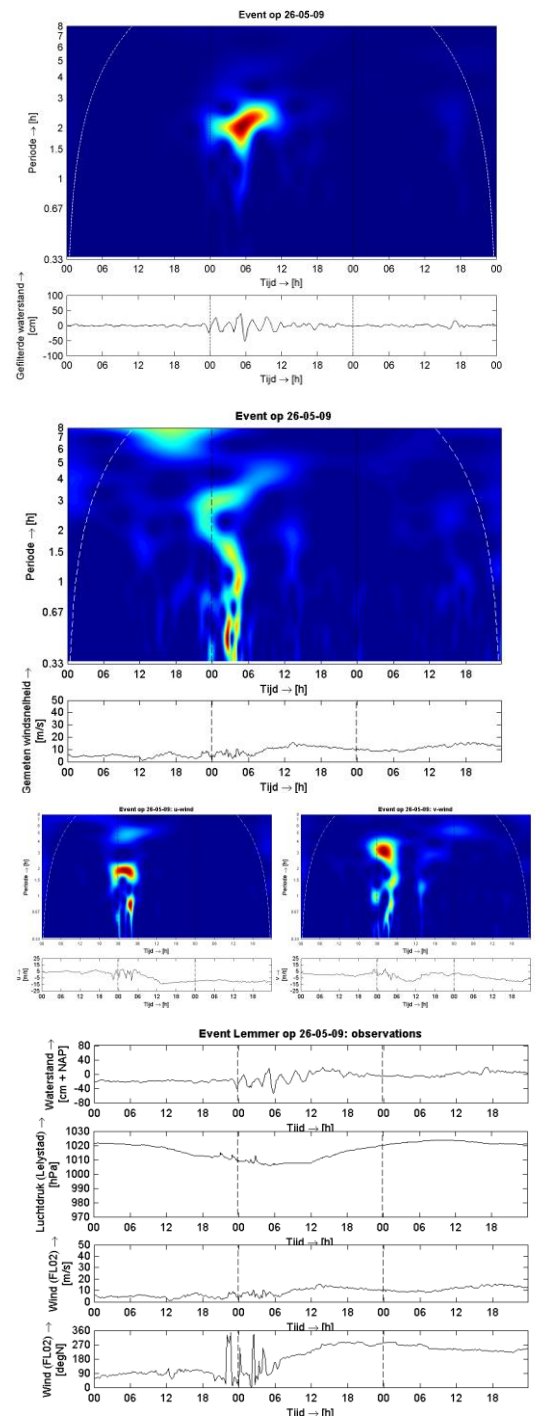
Op 26 mei 2009 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 05.00 CET. Tijdens en na de seiche vindt er een verhoging in de waterstand plaats. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2 uur die over een tijdsbestek van 12 uur opzet en weer uitdempt.

De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties, de timing is wel goed. De windrichting is erg veranderlijk voor en gedurende de waterstandsfluctuatie. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) een grotere periodiciteit hebben dan die in de u-windsnelheid (oost-west). Evengoed komt de periodiciteit niet overeen, ook niet als factor.

In de luchtdrukmetingen zijn snelle fluctuaties te zien, de eerste om 21:00 op 25 mei. De laatste is de meest extreme met een luchtdrukstijging van ruim 5 hPa in 15 minuten (van 1007.5 hPa om 02:35 naar 1012.7 hPa om 02:50).

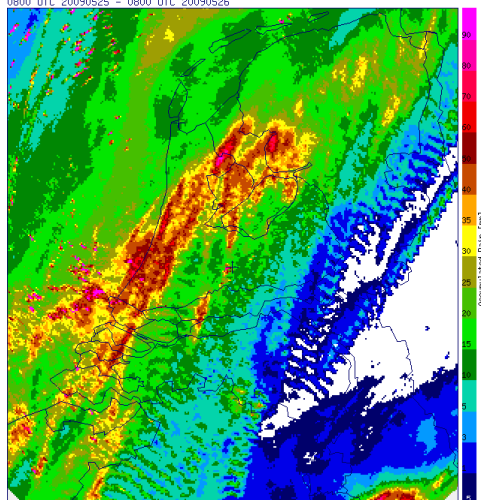
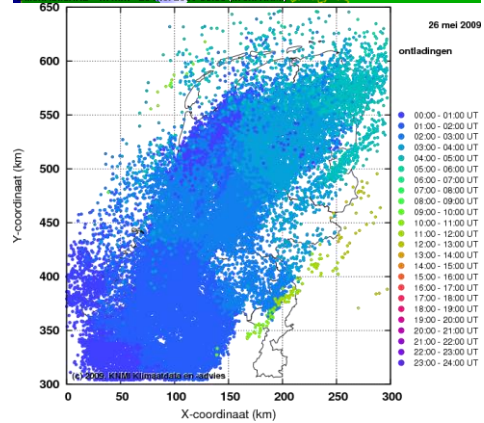
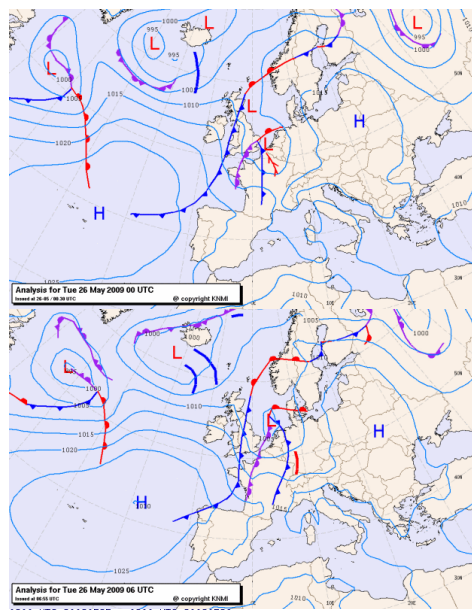
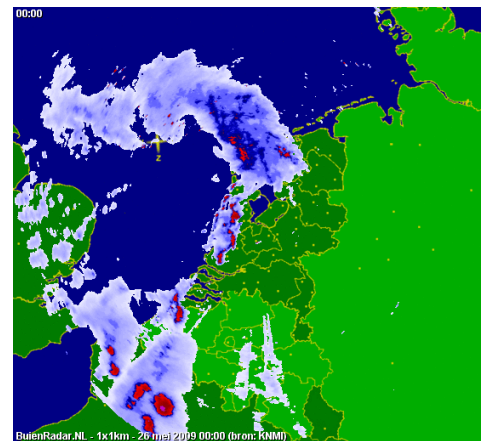
Op de weerkaart van 00UTC (01CET) is een lagedrukgebied over Nederland. Ten zuiden ligt een convergentiezone. Een koufront trekt gedurende de volgende 6 uur over in noordoostelijke richting.

Op de neerslagradark kaart is hevige neerslag te zien in som tussen 08UTC 25 mei en 08 UTC 26 mei. Voor de waterstandsfluctuatie, zo rond middernacht heeft het veel geonweerd onder een variabele windrichting. Na de frontpassage is er een opvallende windruiming.



De seiche gaat vooraf aan de passage van het koufront. De buienlijn beweegt zich vanuit het zuidwesten over het land.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type A.



D.4**Event op 4 september 2009**

Op 4 september 2009 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 30 cm rond 20.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2.5 uur die over een tijdsbestek van 6 uur opzet en weer uitdempt.

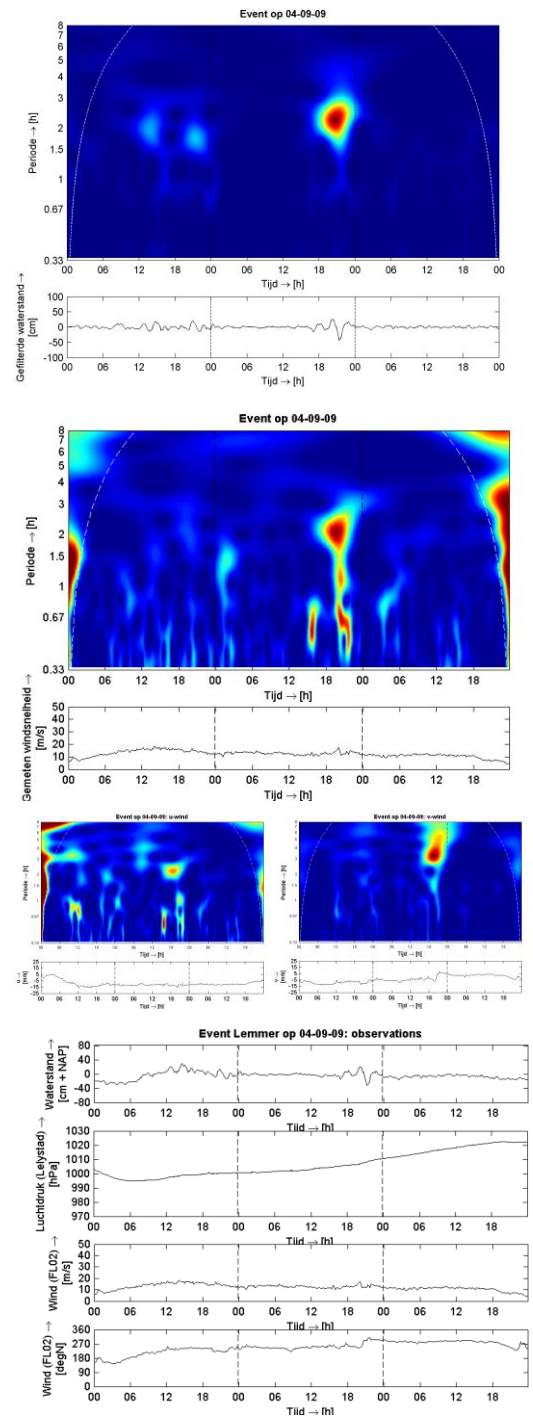
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De wind ruimt gedurende de waterstandsfluctuatie. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) een grotere periodiciteit en impact hebben dan die in de u-windsnelheid (oost-west).

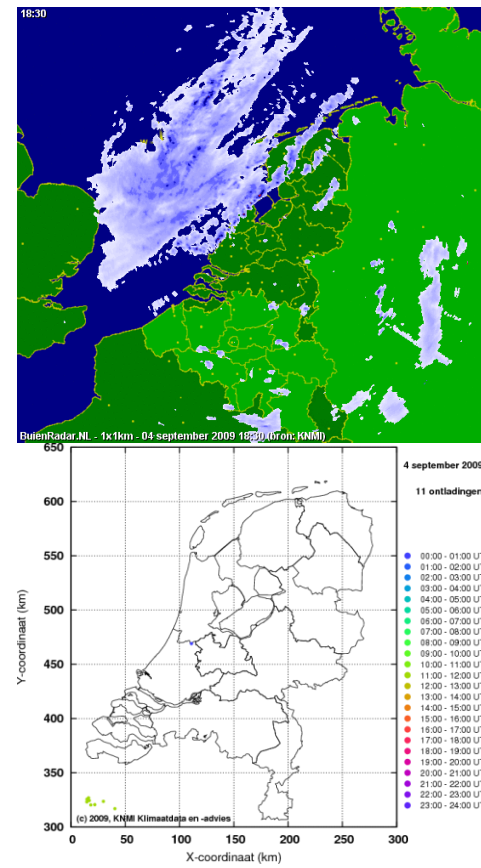
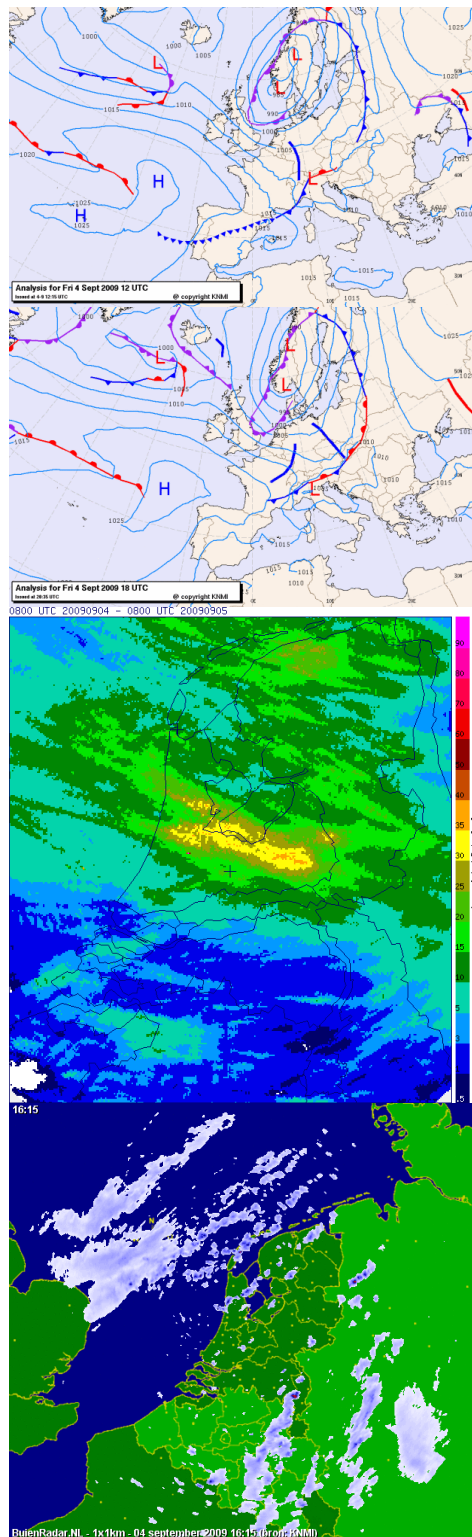
In de luchtdrukmetingen is een geleidelijke druktoename te zien. Dit begint 36 uur voor het seiche-event, en duurt tot 24 uur erna. Over de loop van dit tijdsbestek stijgt de luchtdruk met ruim 25 hPa.

Op de weerkaart van 12UTC (13CET) is een koufront al enige tijd gepasseerd, alsook daarna een trog. Op de kaart van 18UTC heeft zich een tweede trog gevormd, die ook over Nederland lijkt te zijn getrokken richt het zuidoosten. Ten tijden van de seiche trekt er een occlusie aan de grond over het land.

Op de neerslagradark kaart is te zien dat het voorbijkomen van de occlusie samengaat met neerslag. Daarbij geen onweer. Na de frontpassage is er enige windruiming.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type D.





D.5

Event op 26 november 2009

Op 26 november 2009 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 12.00 CET. Buiten de seiche is er geen verhoging van de waterstand. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2,5 uur die over een tijdsbestek van 12 uur opzet en weer uitdempt.

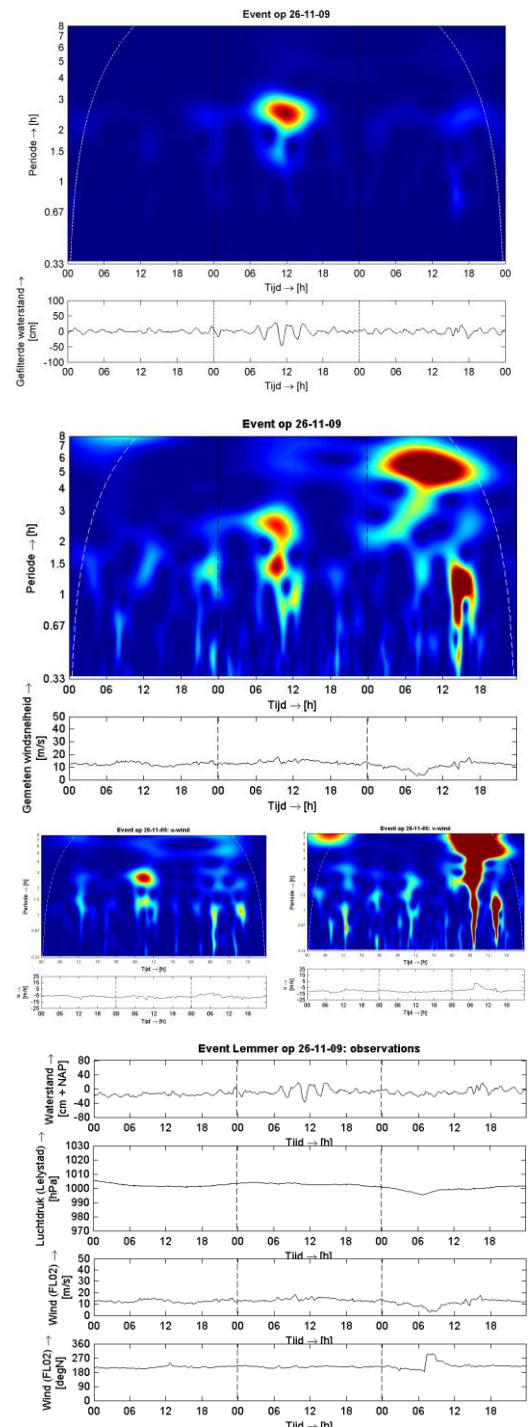
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties, de timing is wel goed. De windrichting is stabiel uit het zuidwesten voor en gedurende de waterstandsfluctuatie. De periodiciteit in de fluctuatie van de u-component (oost-west) komt wel overeen met de waterstandsfluctuatieperiodiciteit.

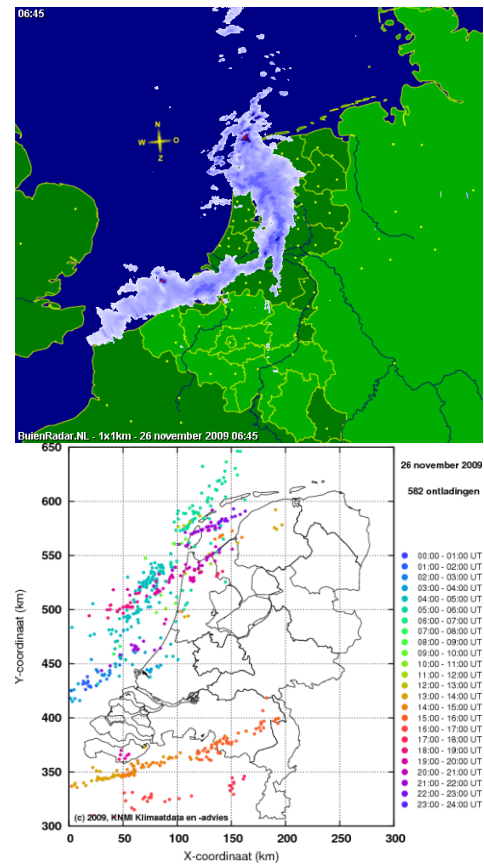
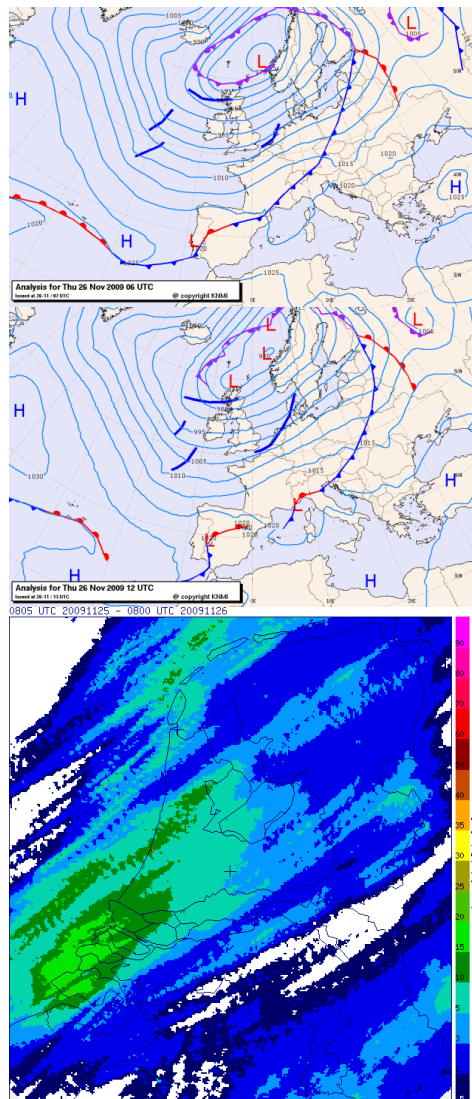
In de luchtdrukmetingen is geen duidelijke forcering te zien voor het seiche-event. Over de hele dag de druk rond de 1005 hPa.

Op de weerkaart van 06UTC (07CET) is een ontwikkeld lagedrukgebied over Noorwegen te zien. Het koufront is al gepasseerd. Er ligt een trog over Nederland. De kaart van 12UCT laat zien dat het lagedrukgebied stationair is. De trog heeft zich inmiddels uitgebreid.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 25 november en 08 UTC 26 november. Voor en na de seiche vinden wat onweersontladingen plaats. De wind komt uit zuidwestelijke richting, de windsnelheid tijdens het seiche-event is variable tussen de 10 en 20 m/s.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type D: postfrontale buienlijn.





D.6**Event op 23 augustus 2010**

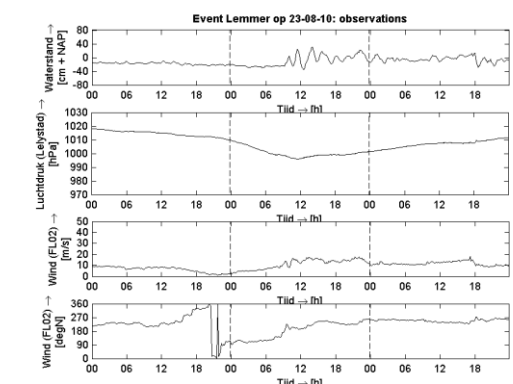
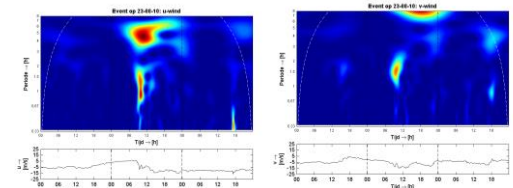
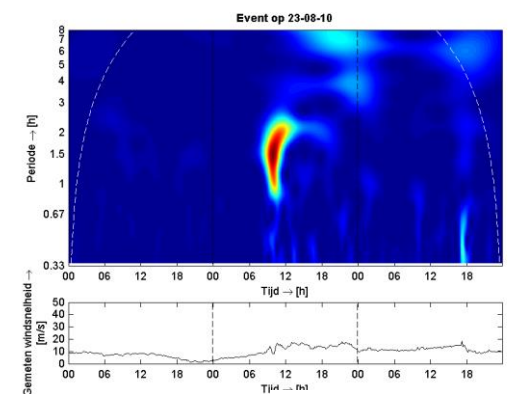
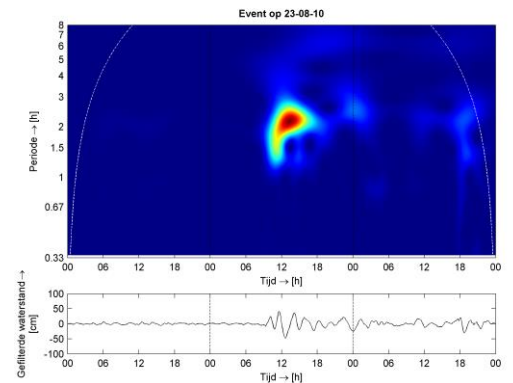
Op 23 augustus 2010 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 12.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2,5 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet zo mooi overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De windvariabiliteit kent een brede range van periodes; tussen de 1 uur en 3 uur. In ieder geval neemt de wind toe een paar uur voordat het water begint te slingeren. De windrichting is aan het draaien geweest voor het seiche-event, van zuidwestelijk naar noordwest een dag eerder. Op de 23^e draait de wind verder naar het oosten tot het uiteindelijk weer uit het zuidwesten waait na de waterstandsfluctuatie.

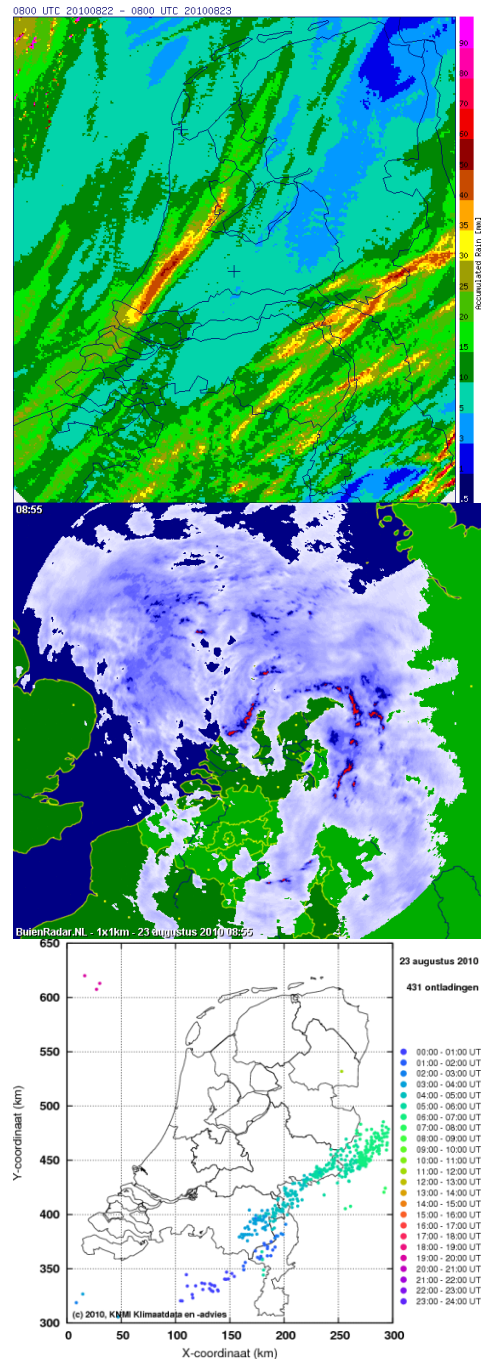
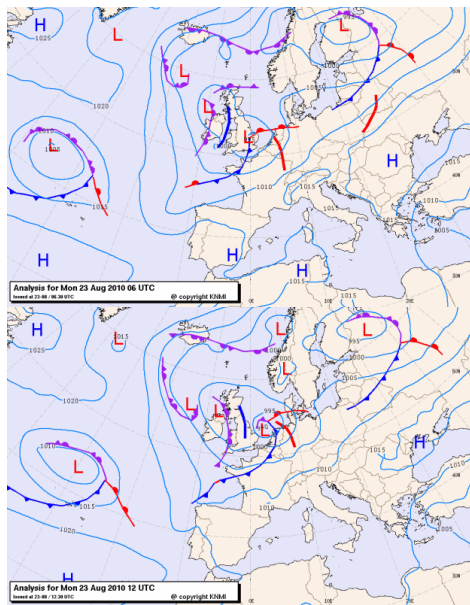
In de luchtdrukmetingen is een rappe daling te zien vanaf middernacht. Tot het middaguur bedraagt de drukafname bijna 15 hPa.

Op de weerkaart van 06UTC is een lagedruksysteem te zien over Londen. Op dat moment ligt er een convergentielijn over Nederland. In de 6 uur die volgen beweegt een koufront dat eerder over de Franse noordkust lag zich richting Nederland.

Op de neerslagkaart van 08UTC 22 augustus tot 08UTC 23 augustus is te zien dat er plaatselijk veel neerslag valt, met name over Zuid-Holland. Ook over het zuidoosten van het land valt aanzienlijke neerslag, die gepaard gaat met onweer voorafgaand aan het seiche-event.



Ten tijde van de seiche ruimt de wind. Deze windruiming gaat vooraf aan de frontpassage. Het lijkt erop dat de seiches worden opgewerkt door de onweersbui die vooraf gaat aan de frontpassage. Daarom is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type A: prefrontale buienlijn. Omdat dit event ook karakteristieken heeft van type B, kan het zijn dat de passage van het koufront reden is voor de continuering van de waterstandsfluctuatie.



D.7**Event op 28 juni 2011**

Op 28 juni 2011 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een maximale hoogte van ongeveer 40 cm rond 21.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2 uur die over een tijdsbestek van 5 uur opzet en weer uitdempt.

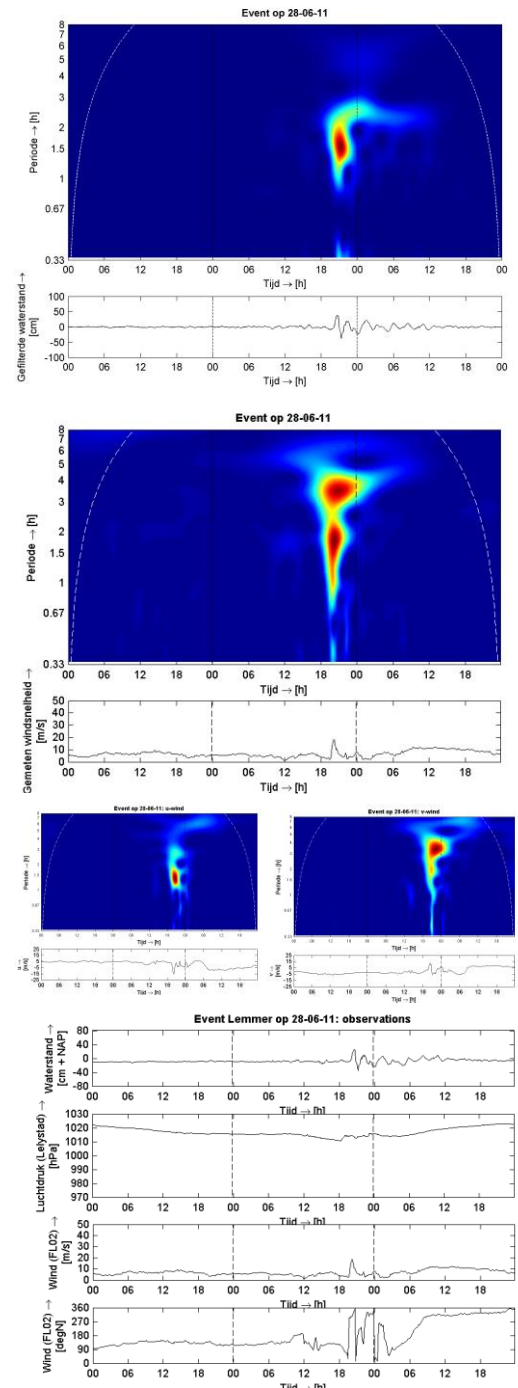
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De windrichting is erg veranderlijk voor en gedurende de waterstandsfluctuatie. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) een grotere periodiciteit hebben dan die in de u-windsnelheid (oost-west), net zoals op 26 mei 2009.

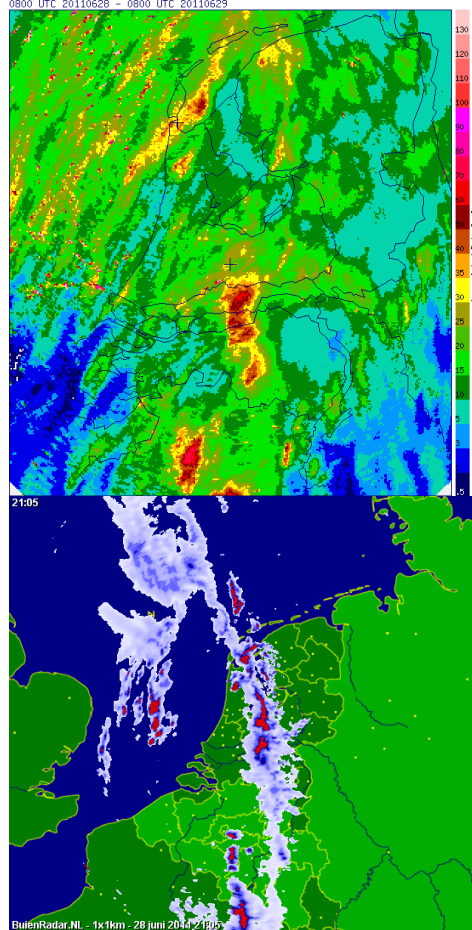
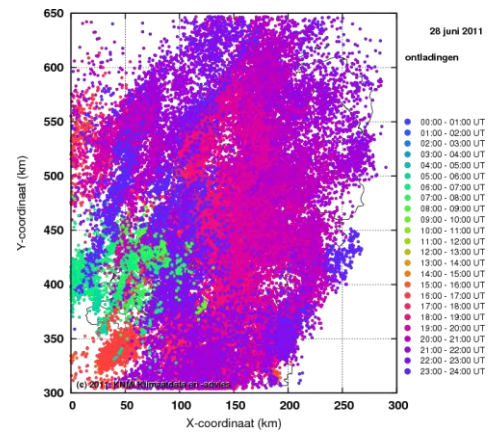
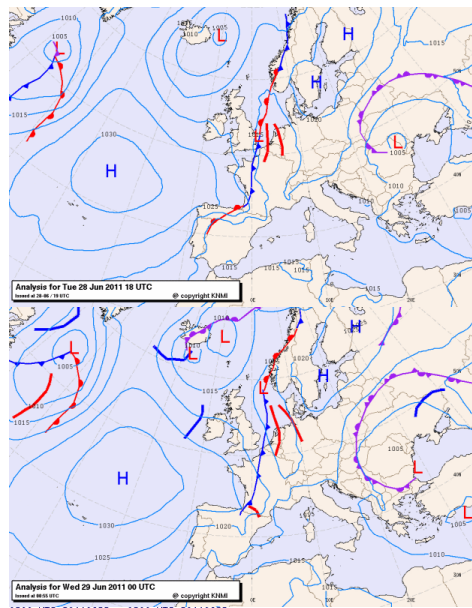
De luchtdruk daalt voor het seiche-event, met daarin een versnelling tussen 12CET en 18CET die totaal 5 hPa bedraagt. Ten tijde van het begin van het seiche-event, rond 19 CET stijgt de druk met 4 hPa binnen een uur. Daarna zijn wat schommelingen te zien tot middernacht voordat een geleidelijke luchtdrukstijging inzet.

Op de weerkaart van 18UTC (19CET) is een lagedrukgebied voor de Nederlandse kust, met ten zuiden daarvan een koufront over Frankrijk. Twee convergentiezones liggen vlak achter elkaar boven Nederland. Een koufront komt gedurende de volgende 6 uur dichterbij in noordelijke richting.

Op de neerslagradark kaart is hevige neerslag te zien in som tussen 08UTC 28 juni en 08 UTC 26 mei. Ten tijde van de seiche, om 21:05 CET is een heftige buienlijn te zien. Ook heeft het vanaf halverwege de avond veel geonweerd onder een variable windrichting. Het koufront is dan nog niet gepasseerd.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type A.





D.8**Event op 9 december 2011**

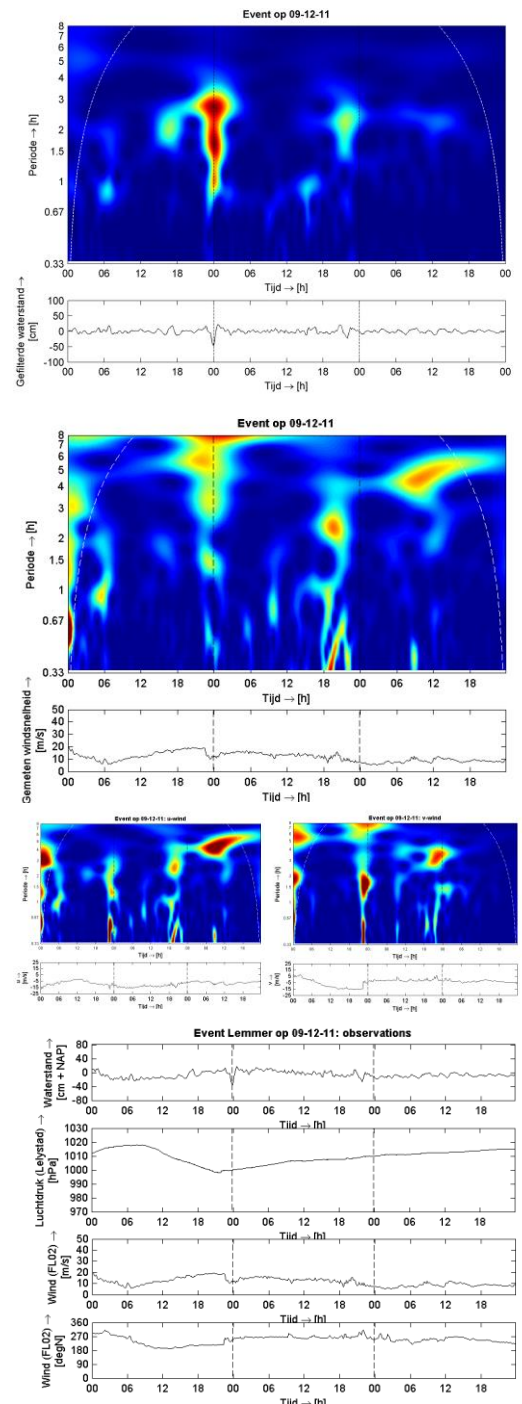
Op 9 december is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 00.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 1,5 uur die over een tijdsbestek van 6 uur opzet en weer uitdempt.

De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De windrichting is zuid voor het seiche-event, en draait daarna naar het westen. De periodiciteit van fluctuaties in de waterstand komt wel goed overeen met de periodiciteit in de v-windcomponent (zuid-noord). Voor de u-wind (oost-west) zijn heel kleinschalige windvariatie te zien, tussen de 20 en 40 minuten.

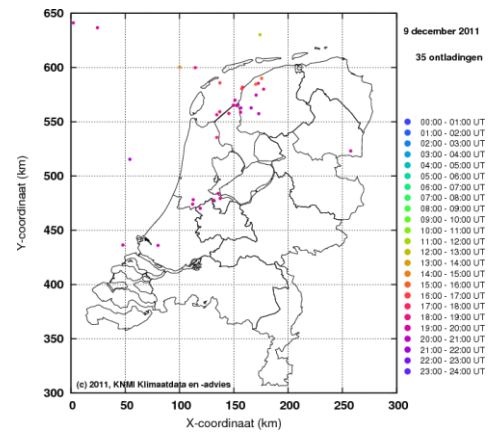
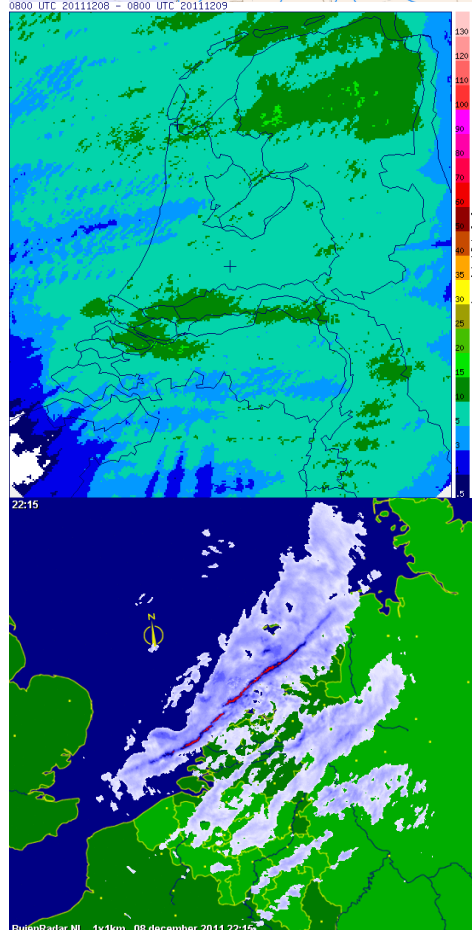
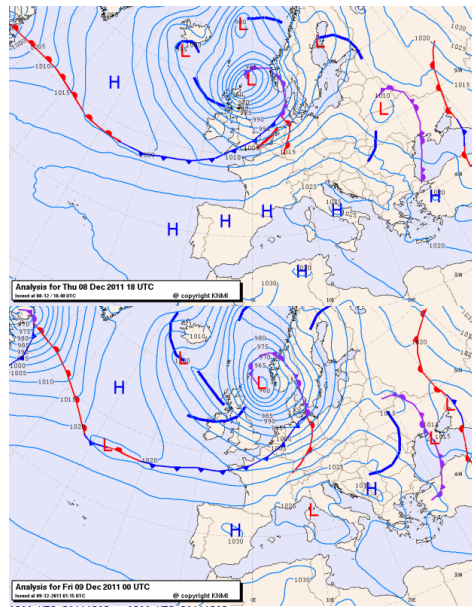
In de luchtdrukmetingen grote daling te zien van 20 hPa over de 18 uur voorafgaand aan het seiche-event. Dieptepunt van 998 hPa om 21:30 CET. Daarna begint de luchtdruk weer geleidelijk toe te nemen.

Op de weerkaart van 18UTC 8 december ligt een sterk lagedrukgebied ten noorden van Ierland. Een warmfront ligt al over west Duitsland, terwijl een koufront nog over de Noordzee ligt. Daartussenin een convergentielijn. In de 6 uur daarna trekt het koufront over Nederland.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 8 december en 08 UTC 9 december. Er hebben een paar onweersontladingen plaats aan het begin van de avond op 9 december, in het noorden van het land. Dit is echter al na de seiche, dus niet relevant. De wind voor het seiche-event komt uit het zuidwesten. Na de frontpassage is er een windruiming, en komt de wind uit het westen.



Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.



D.9**Event op 24 december 2011**

Op 24 december 2011 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 04.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2,5 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

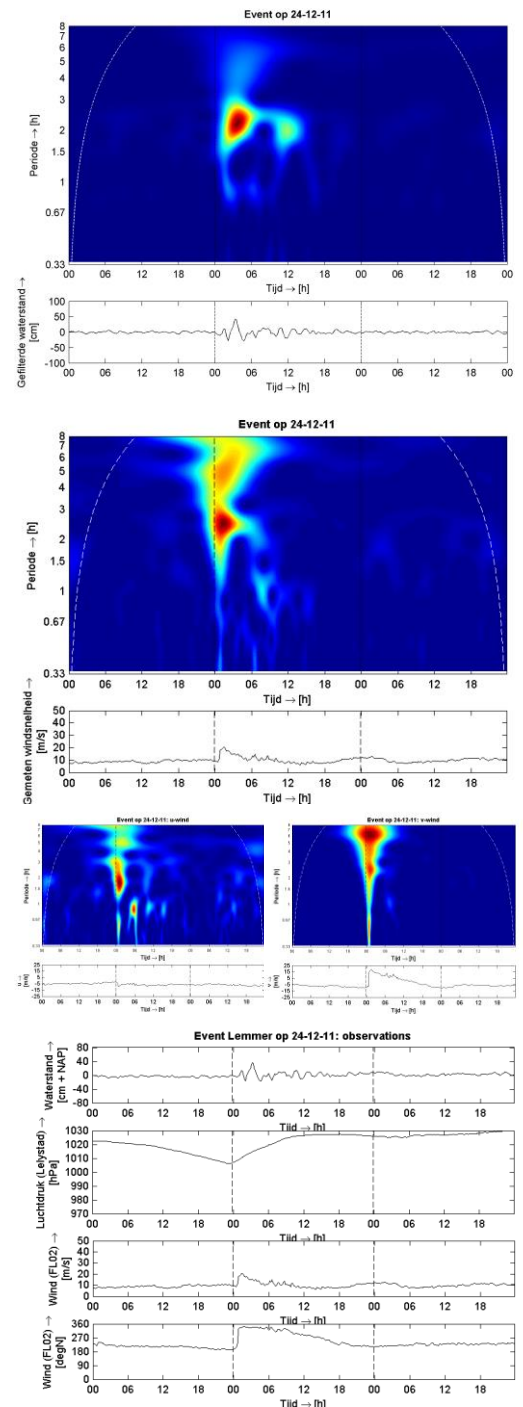
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. Voor het seiche-event komt de wind uit het zuidwesten. Daarna is een opvallende windruiming te zien. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) een grotere periodiciteit hebben dan die in de u-windsnelheid (oost-west), zoals ook het geval op 26 mei 2009 en 28 mei 2011.

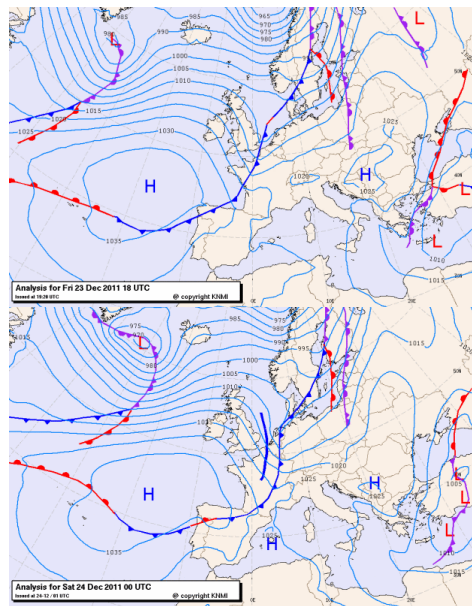
In de luchtdrukmetingen grote daling te zien van ruim 20 hPa over de 24 uur voorafgaand aan het seiche-event. Dieptepunt van 1006 hPa om 23:15 CET. Daarna begint de luchtdruk weer geleidelijk toe te nemen.

Op de weerkaart van 18UTC 23 december ligt een koufront over de Noordzee. Deze trekt in de 6 uur daarna langzaam over Nederland.

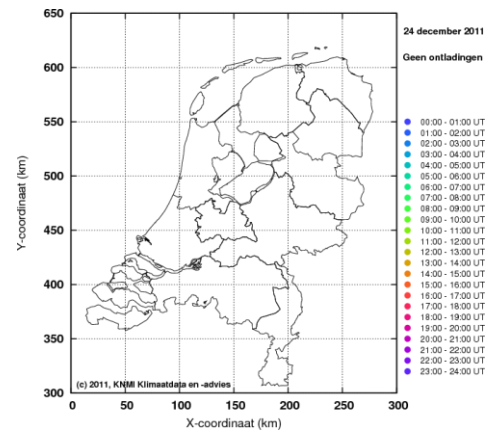
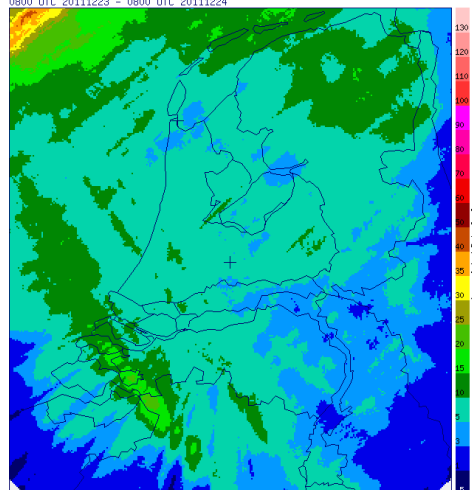
Op de neerslagradarkkaart is enige mate van neerslag te zien in som tussen 08UTC 24 december en 08 UTC 25 december. Er hebben geen onweersontladingen plaatsgevonden. De wind komt uit het zuidwesten voor de frontpassage. Na de frontpassage is er een opvallende windruiming, bijna noordelijke wind. Dit is ook te zien aan de isobaren in de weerkaarten.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





0800 UTC 20111223 - 0800 UTC 20111224



D.10**Event op 3 januari 2012**

Op 3 januari 2012 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 18.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

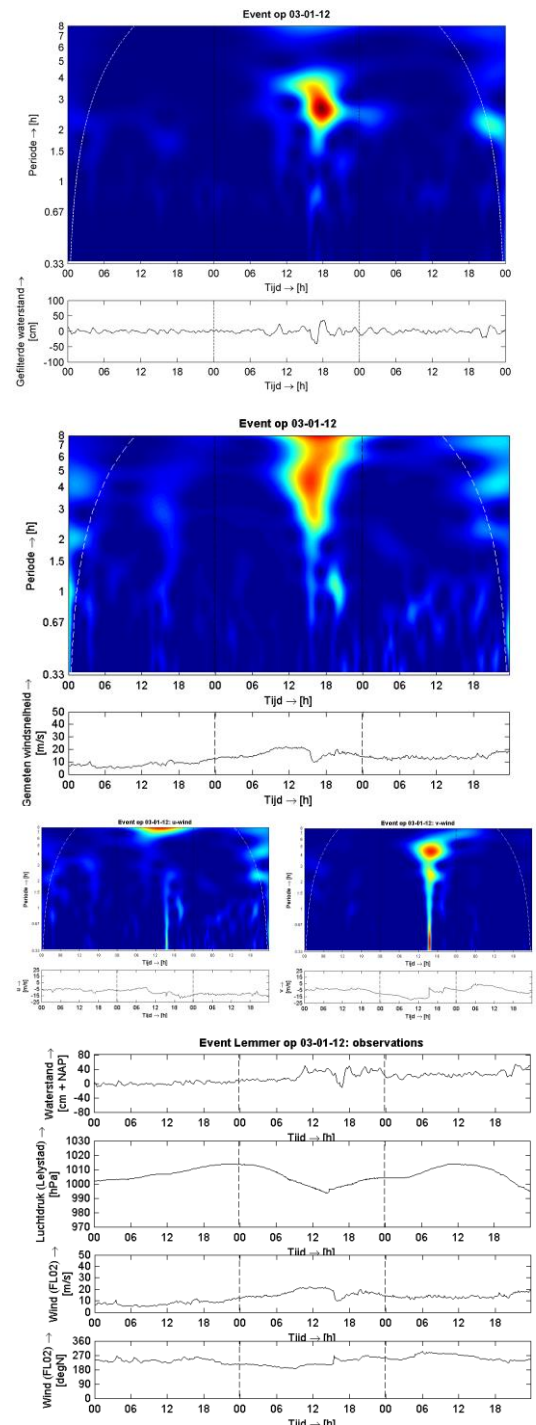
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De windrichting is zuidwestelijk aan het begin van de dag, en draait geleidelijk naar het westen. De fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) zijn meer van invloed op de waterstanden dan die in de u-windsnelheid (oost-west).

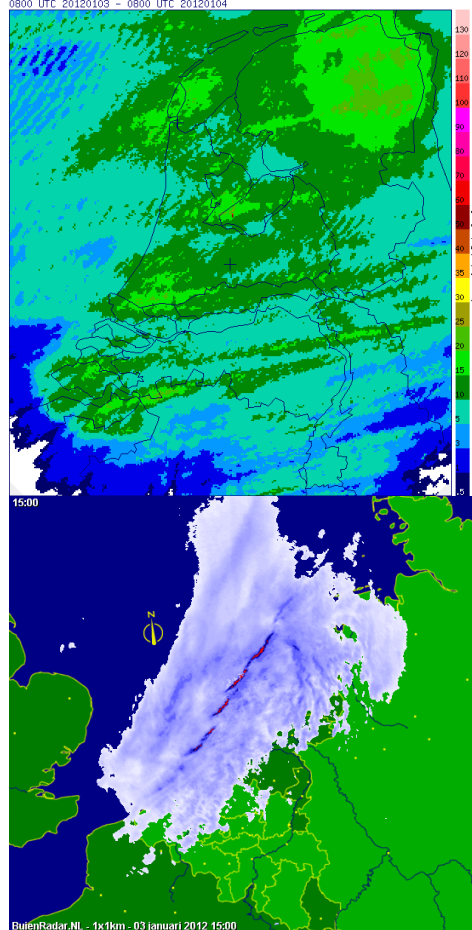
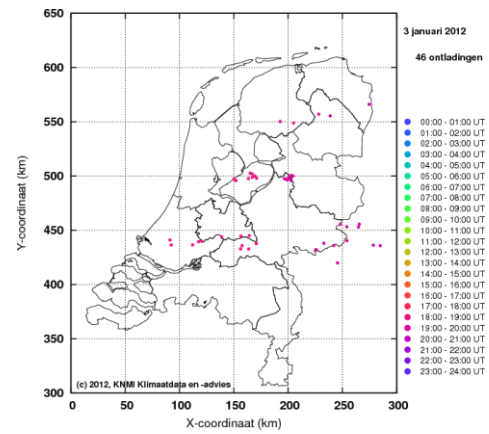
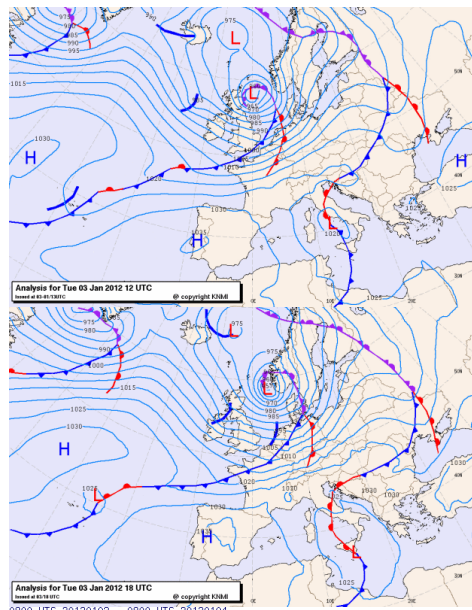
In de luchtdrukmetingen grote daling te zien van ruim 20 hPa over de 18 uur voorafgaand aan het seiche-event. Dieptepunt van 994 hPa om 14:30 CET. Daarna begint de luchtdruk weer geleidelijk toe te nemen.

Op de weerkaart van 12UTC ligt een sterk lagedrukgebied over Ierland. Een warmfront ligt al over west Duitsland, terwijl een koufront nog over de Noordzee ligt. In de 6 uur daarna trekt het koufront over Nederland. Daarachter vormt zich een trog.

Op de neerslagradarkkaart is matige neerslag te zien in som tussen 08UTC 3 januari en 08 UTC 4 januari. Ten tijde van de waterstandsfluctuatie vinden er enige onweersontladingen plaats. De windrichting is zuidelijke. Na de frontpassage is er een windruiming.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





D.11**Event op 29 april 2012**

Op 29 april 2012 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 12.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 20 uur opzet en weer uitdempt.

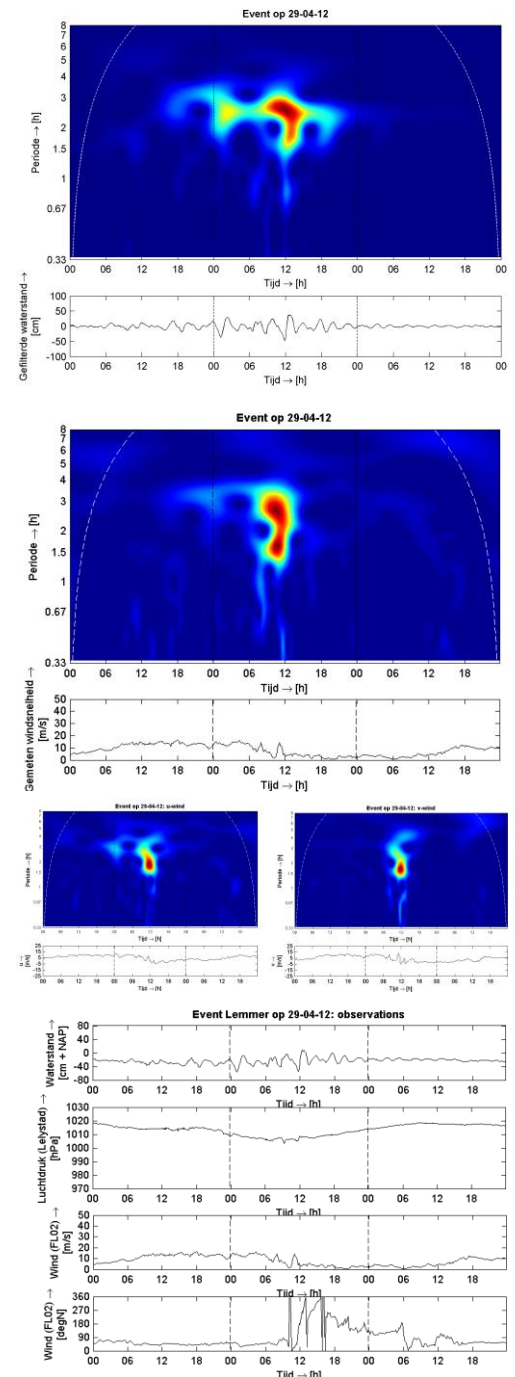
Er zijn twee dominante periodes in de fluctuaties in de windsnelheid. Beiden komen overeen met de periodiciteit in de waterstandsfluctuaties, de ene goed en de andere als factor. De windrichting is erg veranderlijk voor en gedurende het seiche-event. Vooraf komt de wind uit het oosten, draait twee keer tegen de klok in de windroos rond over een tijdsbestek van 6 uur, en eindigt krimpens van zuidwestelijk tot zuidelijke richting.

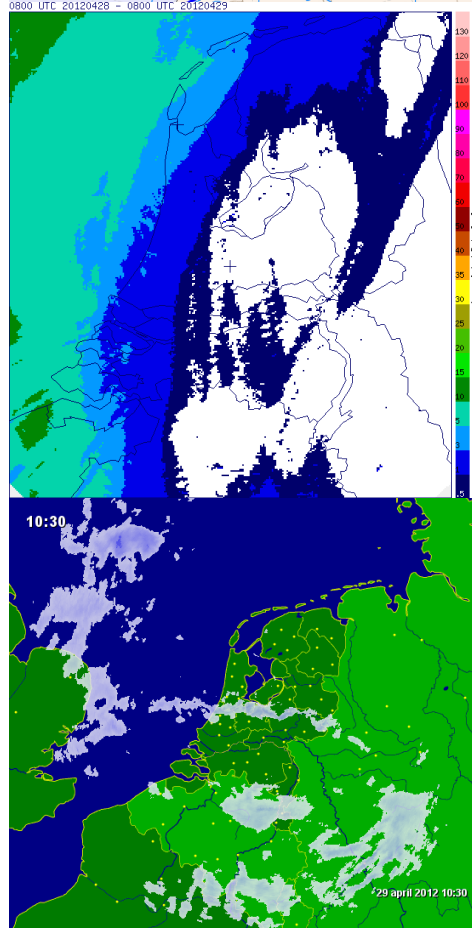
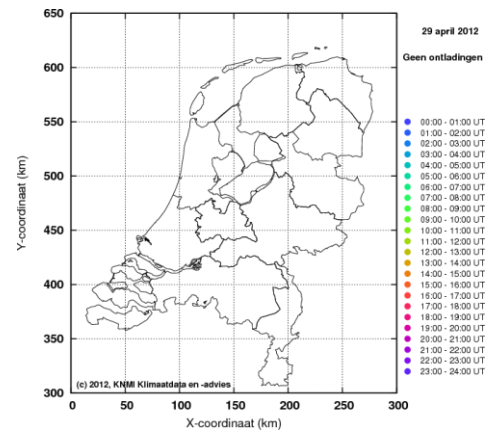
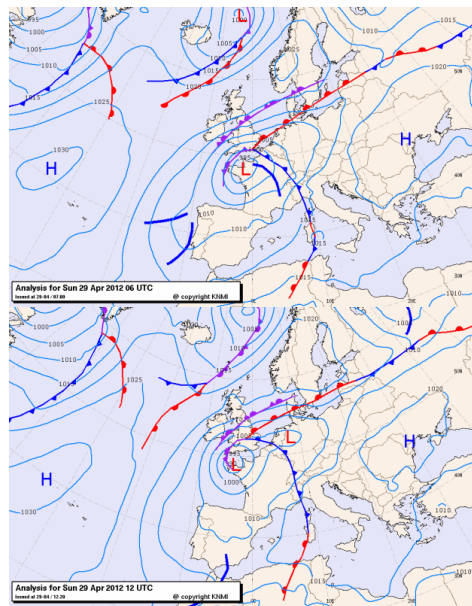
In de luchtdrukmetingen is een geleidelijke daling te zien in het etmaal voor het seiche-event. Ten tijde van de seiche zijn snelle luchtdrukfluctuaties te zien in een range van 5 hPa.

Op de weerkaart van 06UTC (07CET) ligt een lagedrukgebied over Bretonse kust. Een warmtefront is Nederland net gepasseerd. Het bijbehorende koufront ligt over Noord-Frankrijk en beweegt zich de volgende 6 uur langzaam in noordoostelijke richting.

Op de neerslagradark kaart is weinig neerslag te zien in som tussen 08UTC 29 april en 08 UTC 26 mei. Er zijn geen bliksemontladingen gedetecteerd die dag. Op de buienradark kaart is ten tijde van de seiche een scherpe buienlijn te zien, maar een met weinig neerslag. Tijdens de seiche is de windrichting erg variabel.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type A.





D.12**Event op 29 juli 2012**

Op 29 juli 2012 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 50 cm rond 23.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 12 uur opzet en weer uitdempt.

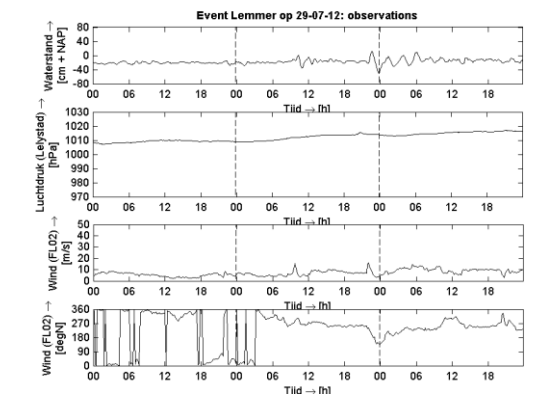
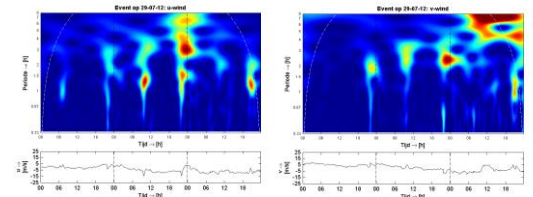
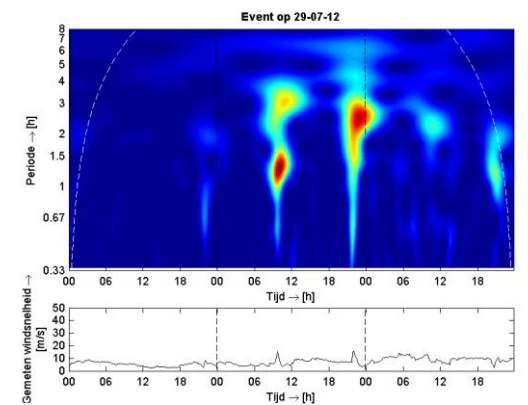
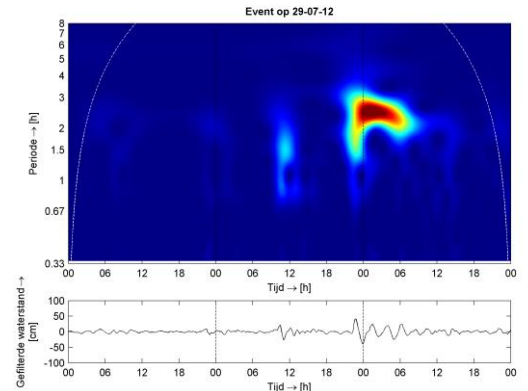
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties ten tijde van de seiche. De windrichting is erg veranderlijk voorafgaand aan en gedurende de waterstandsfluctuatie. Voorafgaand aan de seiche zijn er windfluctuaties te zien van een kleinere periodiciteit, die niet veel impact op de waterstand lijken te hebben.

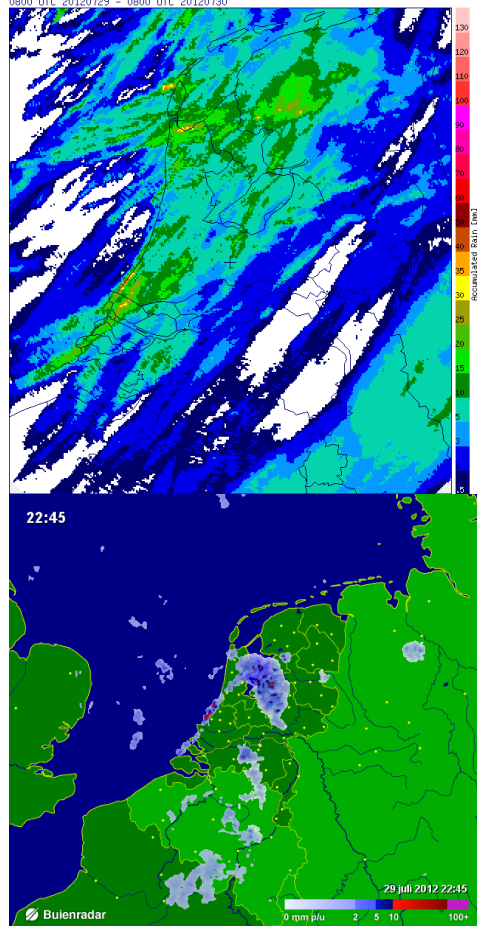
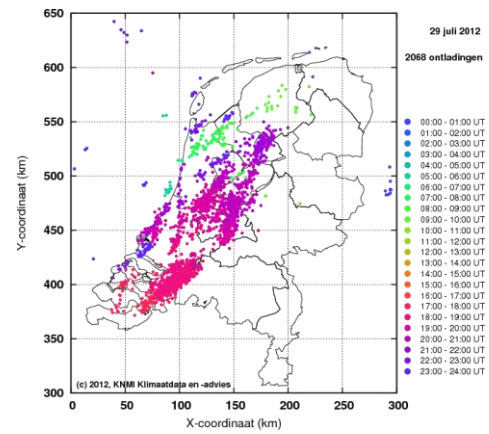
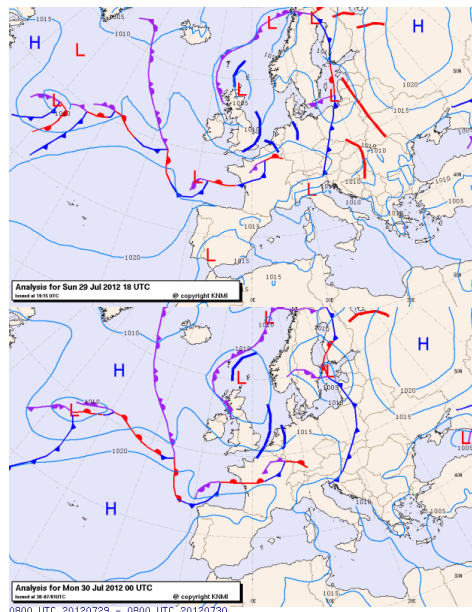
In de luchtdrukmetingen is een geleidelijke drukstijging te zien. Even voor het seiche-event is een kleine schommeling te zien, van ongeveer 1 hPa over een uur, maar verder is er geen duidelijke forcering.

Op de weerkaart van 12UTC (13CET) ligt een koufront over Oost-Europa. In het zuiden van Nederland ligt een trog. 6 uur later is de synoptische situatie nog ongeveer gelijk. De trog is over het land getrokken. Er heeft zich inmiddels een tweede, langere trog gevormd langs de Noordzeekust.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 29 juli en 08 UTC 30 juli, vooral in het noorden en westen van het land. Ten tijde van de eerste kleine en de tweede heftigere waterstandsfluctuatie, trekt er een onweersbui over. De windsnelheid piekt dan ook. De seiches lijken samen te vallen met de trogp passages.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type D: postfrontale opwekking.





D.13**Event op 19 augustus 2013**

Op 19 augustus 2013 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 40 cm rond 10.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2 uur die over een tijdsbestek van 6 uur opzet en weer uitdempt.

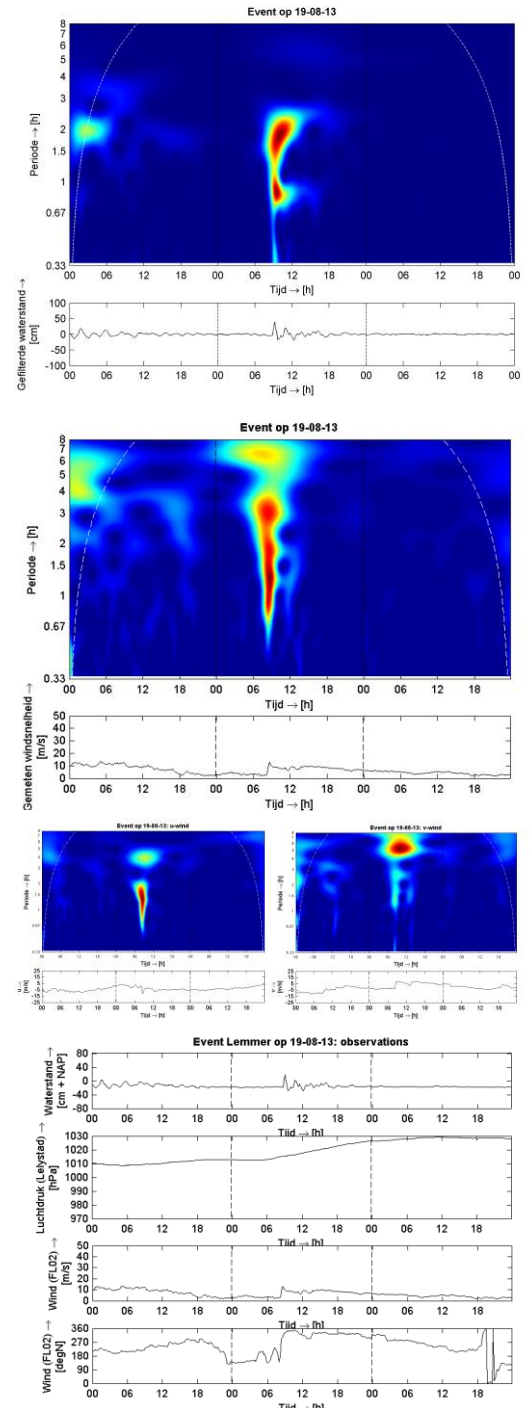
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. Verder is de windrichting erg veranderlijk voorafgaand aan en gedurende de waterstandsfluctuatie. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) een grotere periodiciteit hebben dan die in de u-windsnelheid (oost-west), zoals ook tijdens de seiches van 26/05/09, 28/05/11 en 24/12/11.

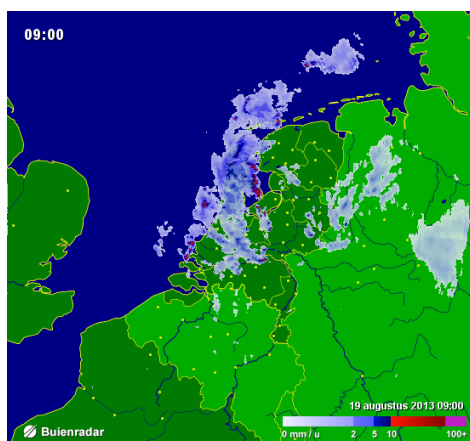
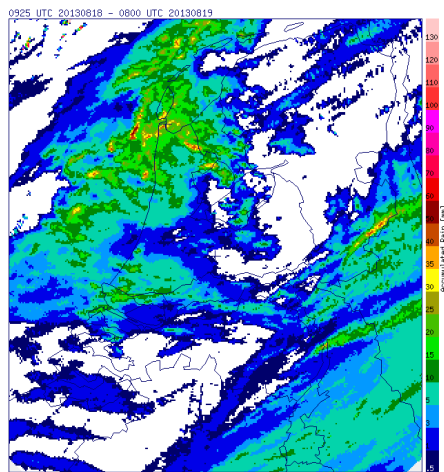
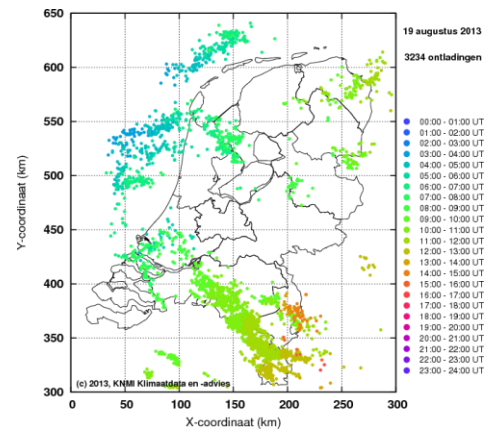
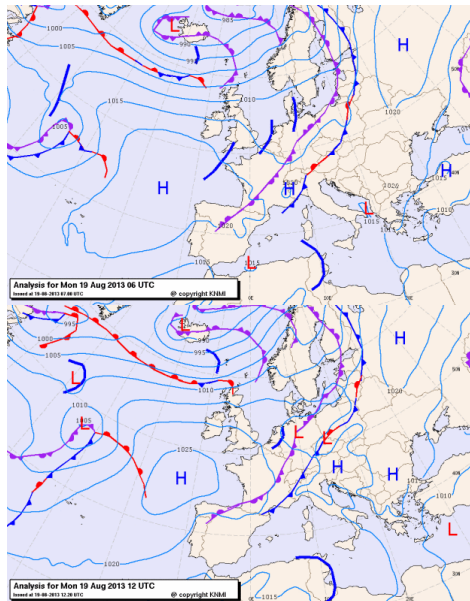
In de luchtdrukmetingen is een geleidelijke drukstijging te zien, die zich versnelt vanaf een uur voor het seiche-event.

Op de weerkaart van 06UTC (07CET) ligt een occlusie over Oost-Europa. Tegen de kust van Nederland ligt een trog. 6 uur later begint zich een lagedrukgebied te vormen over Duitsland. De trog is inmiddels over het land getrokken.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 18 augustus en 08 UTC 19 augustus, vooral in het noordwesten van het land. Ten tijde van de seiche trekt een onweersbui vanuit de Zuid-Hollandse kust, over Brabant en Zuid-Limburg. De windsnelheid piekt dan ook. De seiche lijkt samen te vallen met de trogpassage.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type D: postfrontale opwekking.





D.14**Event op 16 september 2013**

Op 16 september 2013 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer -40 cm rond 03.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2 uur die over een tijdsbestek van 6 uur opzet en weer uitdempt.

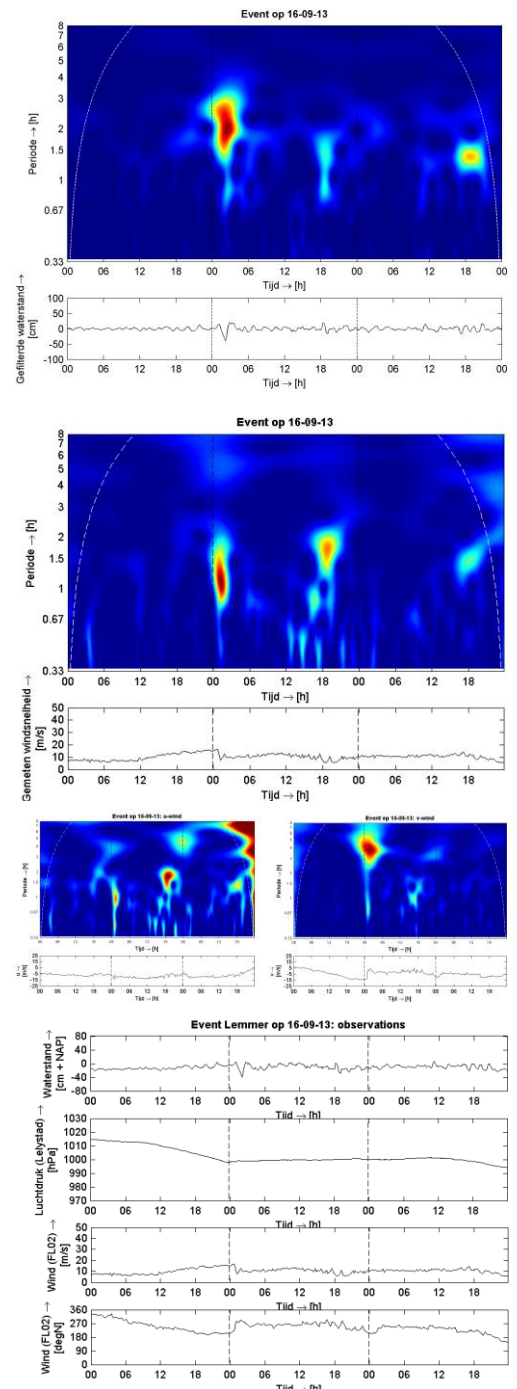
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt als factor overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. Voor de waterstandsfluctuatie krimpt de wind. Daarna schommelt de windrichting tussen NW en ZW. Wederom is te zien dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) een grotere periodiciteit en impact hebben dan die in de u-windsnelheid (oost-west).

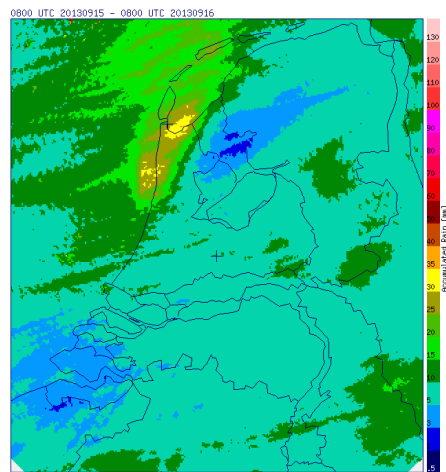
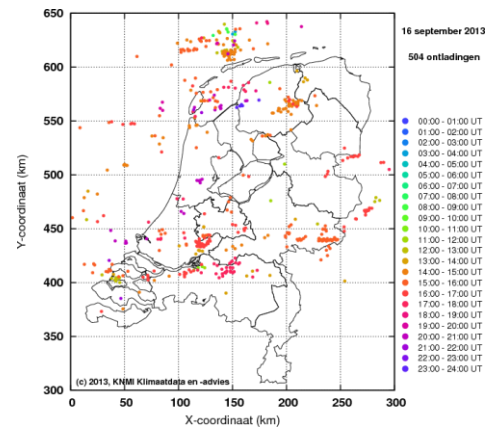
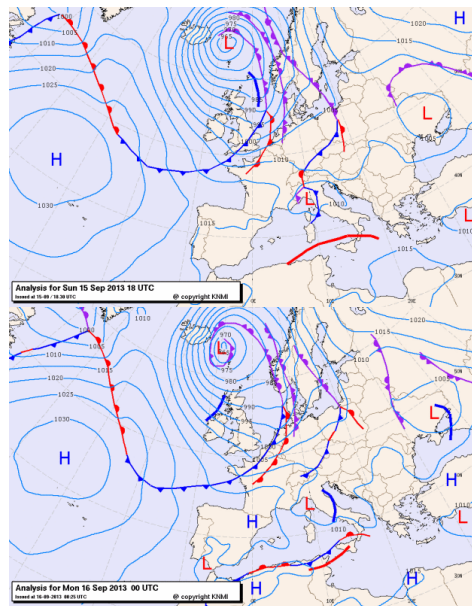
In de luchtdrukmetingen is grote daling (ruim 15 hPa) te zien in de 24 uur voorafgaand aan de seiche. Daarna stabiliseert de luchtdruk.

Op de weerkaart van 18UTC 15 september ligt een sterk lagedrukgebied bij IJsseland. Een warmfront ligt voor de kust, terwijl een koufront over west Engeland ligt. In de 6 uur daarna trekken beide fronten achtereen over Nederland.

Op de neerslagradark kaart is wat neerslag te zien in som tussen 08UTC 15 september en 08 UTC 16 september, voornamelijk over de Waddenzee. Voor en tijdens de waterstandsfluctuatie heeft geen onweer plaatsgevonden. In aanloop naar de seiche krimpt de wind. Na de frontpassage is er een opvallende windruiming.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





D.15**Event op 28 oktober 2013**

Op 28 oktober 2013 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 60 cm rond 12.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 30 minuten die over een tijdsbestek van 3 uur opzet en weer uitdempt.

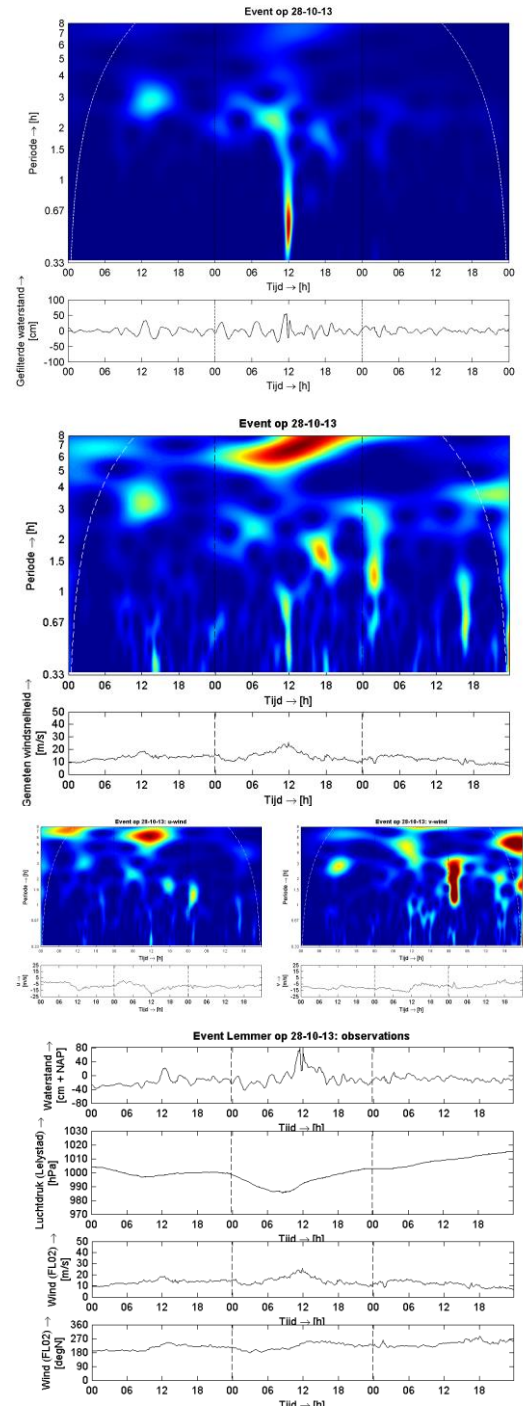
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De windrichting is redelijk stabiel zo uit zuid, zuidwestelijke richting voor en gedurende en na de seiche. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) geen aandeel hebben in deze seiche, u-windsnelheid wel maar in een periode van meer dan 8 uur.

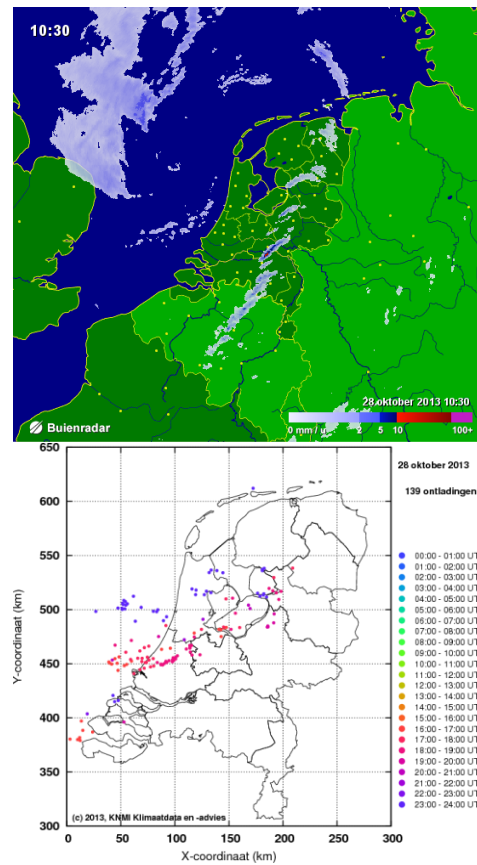
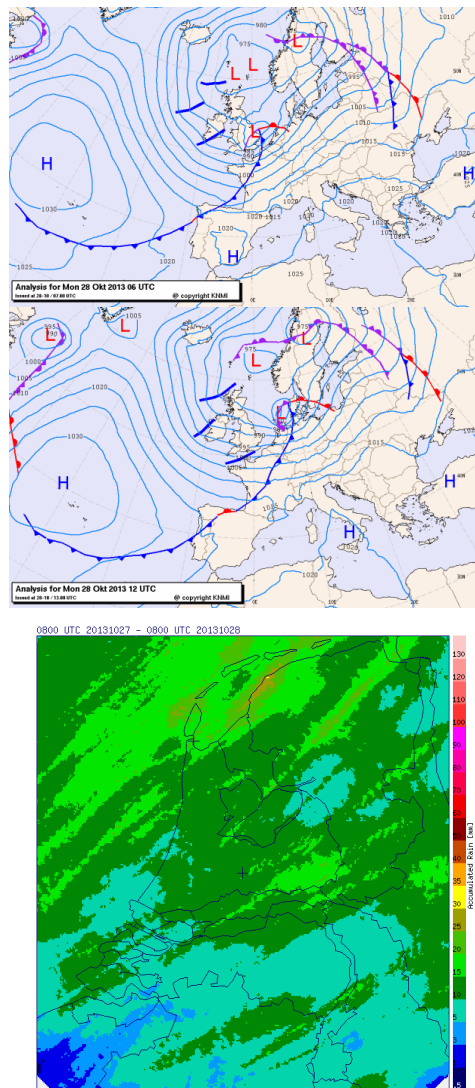
De luchtdrukmetingen laten een grootschalige schommeling zien. Over 24 uur daalt en stijgt de druk ruim 15 hPa. Het dal van 986 hPa om 09 CET is een paar uur voordat de seiche zijn piek bereikt.

Op de weerkaart van 06UTC (07CET) is een lagedrukgebied over Londen. Het bijbehorende koufront trekt in de volgende 6 uur over het land in westelijke richting.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 27 oktober en 08 UTC 27 oktober. Ten tijde van de waterstandsfluctuatie heeft er geen onweer plaatsgevonden. De windrichting is zuid, na de frontpassage is er een opvallende windruiming.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





D.16**Event op 3 november 2013**

Op 3 november 2013 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer -50 cm rond 21.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

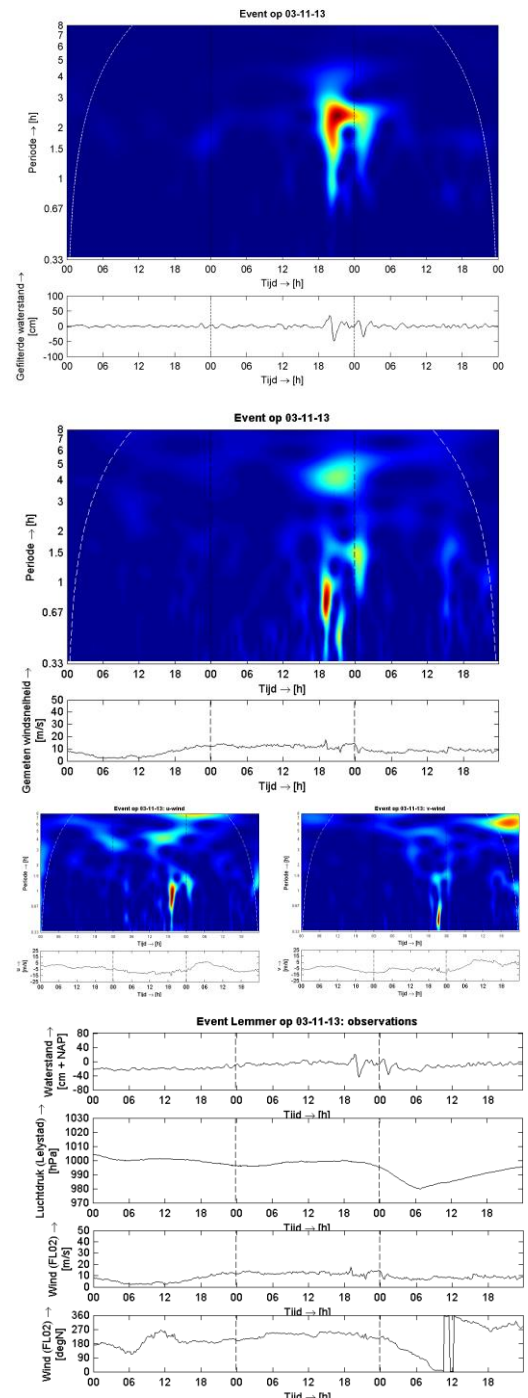
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt in factor overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. Ook de v-windfluctuaties komen in periodiciteit in factor overeen. De u-wind fluctueert ook ten tijde van de seiche, maar niet in het juiste bereik. De windrichting is westelijk, en krimpt gedurende en na de waterstandsfluctuatie.

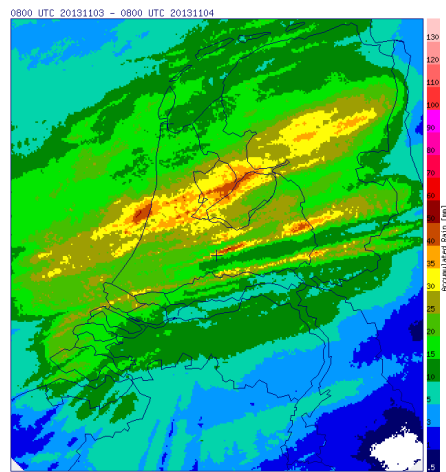
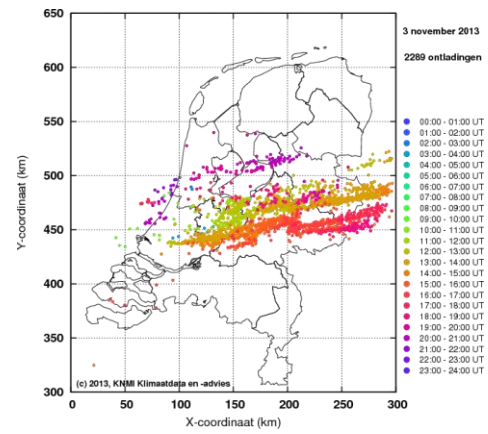
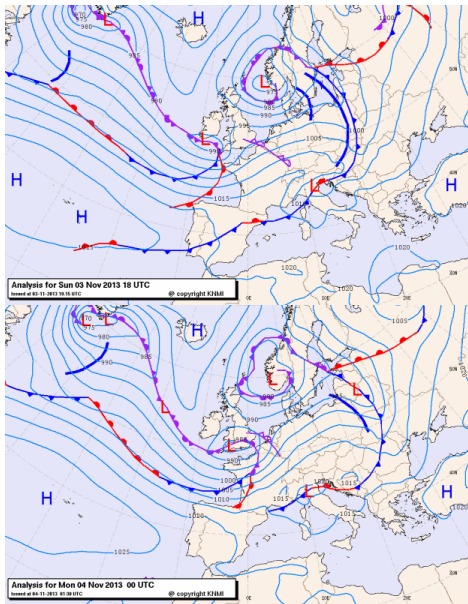
Voor en tijdens de seiche is de luchtdruk stabiel rond 1000 hPa. Na het event wordt een grote drukkaling ingezet, van ruim 20 hPa in 6 uur.

Op de weerkaart van 18UTC (19CET) ligt een koufront over Oost-Europa met daarachter twee troggen. Een tweede trog ligt over Nederland. 6 uur later deze is de synoptische situatie nog ongeveer gelijk al heeft zich in hogere luchtlagen boven Nederland een occlusie gevormd.

Op de neerslagradark kaart is hevige neerslag te zien over het midden van het land in som tussen 08UTC 3 november en 08 UTC 4 november. Voorafgaand aan en ten tijde van de eerste waterstandsfluctuatie vinden hier ook onweersontladingen plaats. De windsnelheid piekt dan ook.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type D: postfrontale opwekking.





D.17**Event op 5 december 2013**

Op 5 december 2013 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer -50 cm rond 17.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

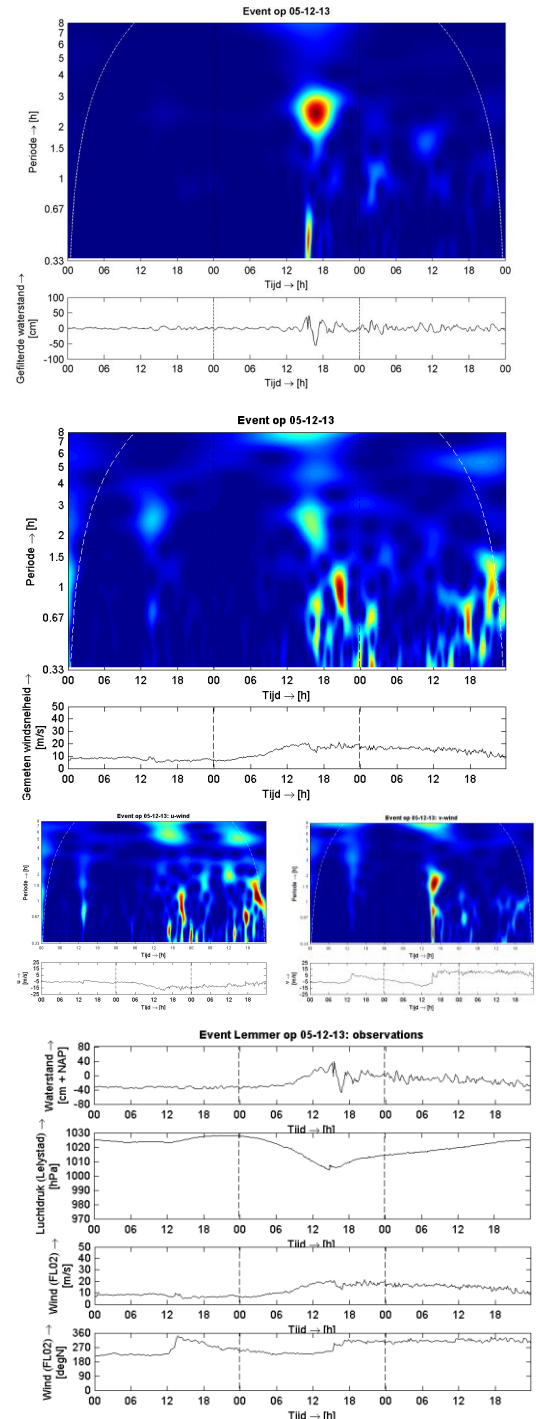
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet goed overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. Rond de tijd van de seiche is wel veel variatie te zien in de windsnelheid, ook in de windsnelheid van de componenten, maar een duidelijke relatie met waterstanden ontbreekt.

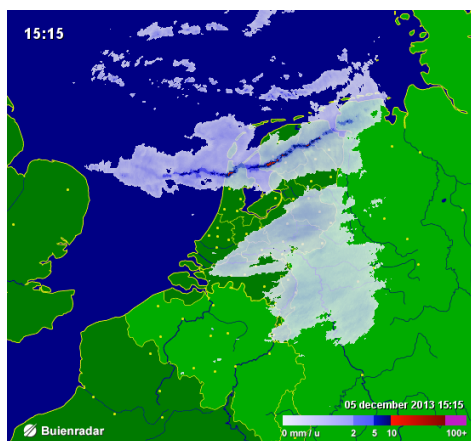
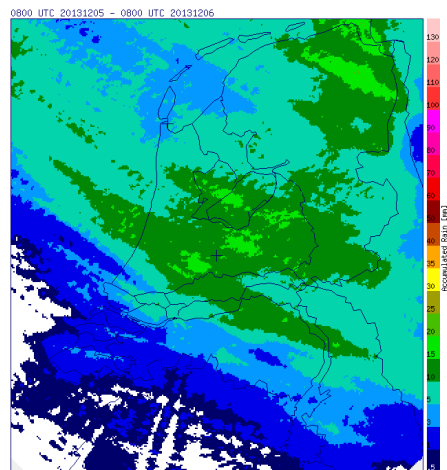
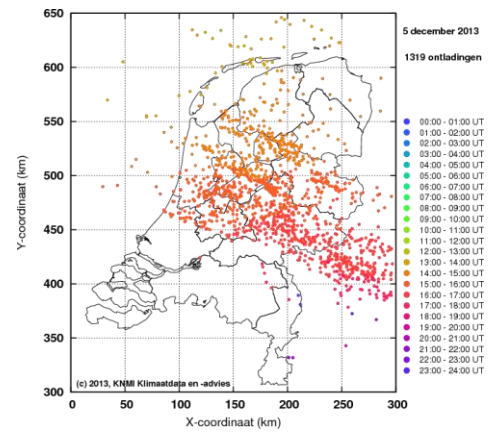
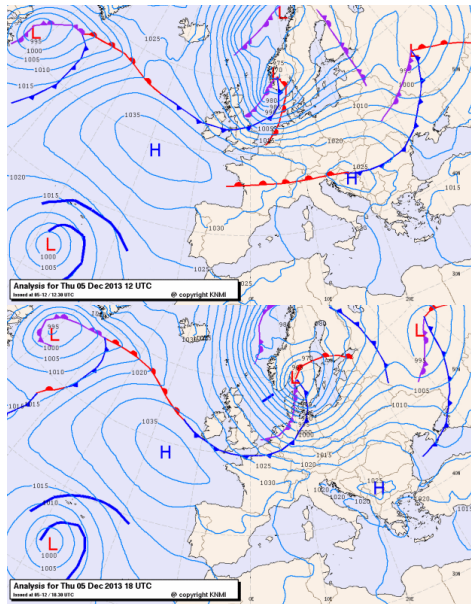
In de luchtdrukmetingen is een grote daling te zien voorafgaand aan de seiche: bijna 25 hPa over 15 uur tijd. Vervolgens is er een snelle, heftige schommeling: tussen 14:50 en 15:00 CET stijgt de druk 3 hPa, waarna het met 2 hPa daalt in de volgende drie kwartier.

Op de weerkaart van 00UTC (01CET) is een lagedrukgebied over Noorwegen ten zien. Een warmfront ligt over Nederland, met een koufront daar ten westen van. Het koufront beweegt zich snel, en trekt gedurende de volgende 6 uur over in zuidoostelijke richting.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 5 december en 08 UTC 6 december. Een lijn met onweer trekt voorafgaand aan de seiche vanuit het noordoosten over. De wind is zuidwestelijk, en ruimt na de frontpassage.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





D.18**Event op 10 juni 2014**

Op 10 juni 2014 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer -80 cm rond 07.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

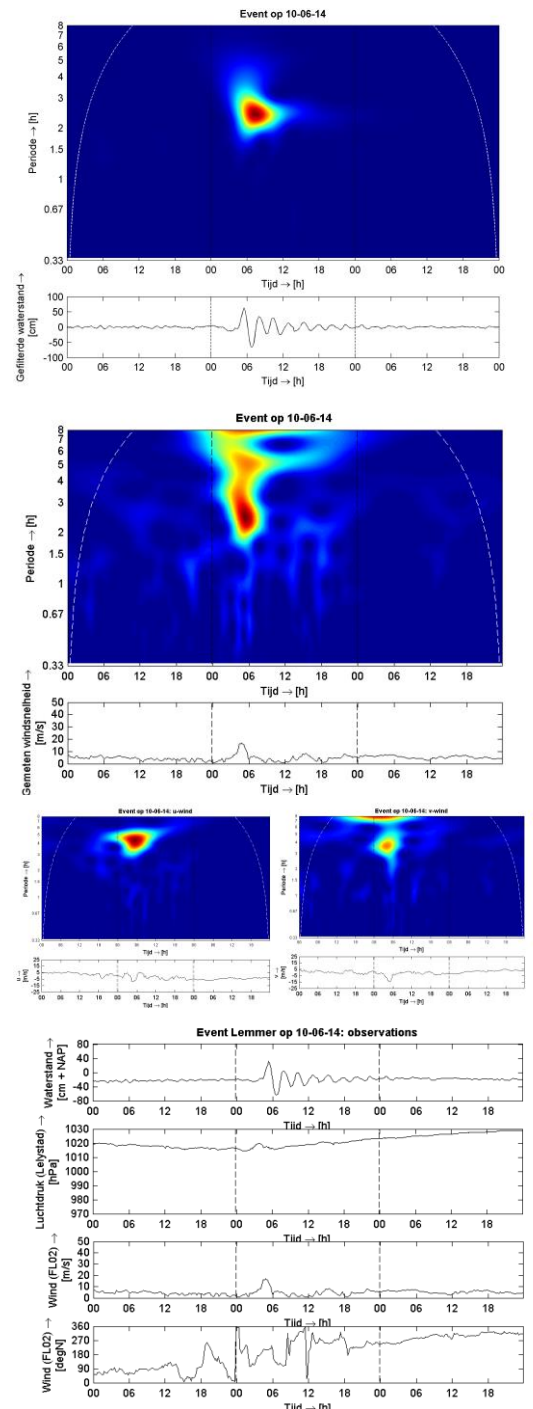
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De windrichting is erg veranderlijk voorafgaand aan en gedurende de waterstandsfluctuatie. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de u-windsnelheid (west-oost) een grotere impact op de waterstanden hebben dan die in de v-windsnelheid (zuid-noord).

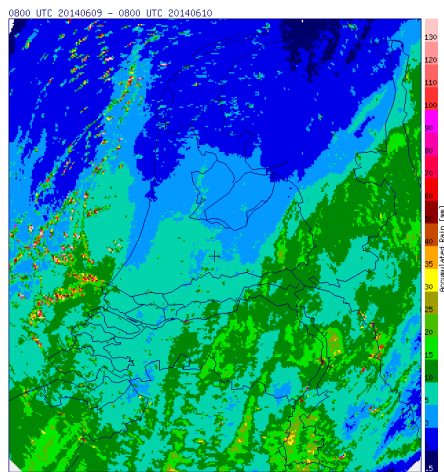
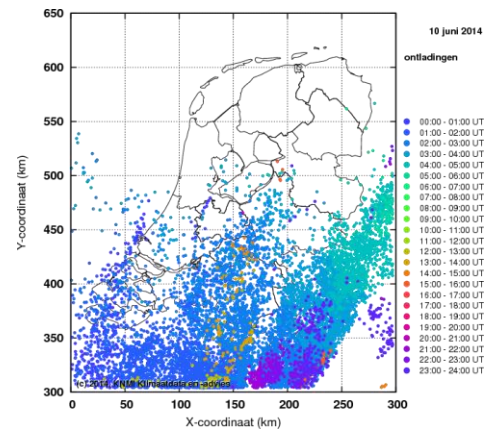
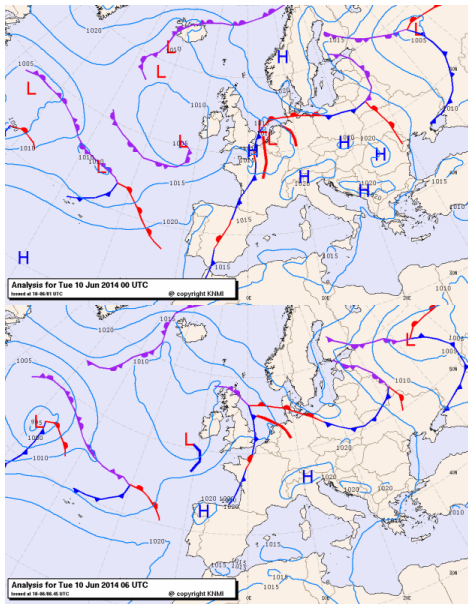
De luchtdruk is aan het dalen de dag voorafgaand aan de seiche. Er is een snelle stijging in de tijdserie waarneembaar die samenvalt met het begin van de seiche: in anderhalf uur stijgt de druk 5 hPa.

Op de weerkaart van 00UTC (01CET) ligt een koufront voor de kust van Nederland. Ten noordoosten en zuidwesten liggen convergentielijnen. 6 uur later ligt het koufront nog steeds over de Noordzee. Een van de convergentielijnen is over het land getrokken in noordoostelijke richting.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 25 mei en 08 UTC 26 mei vooral in het zuiden. Voor en tijdens de waterstandsfluctuatie, zo tussen middernacht en 06CET heeft het veel geonweerd onder een variable windrichting.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type A.





D.19**Event op 28 januari 2015**

Op 28 januari 2015 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 40 cm rond 18.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 6 uur opzet en weer uitdempt.

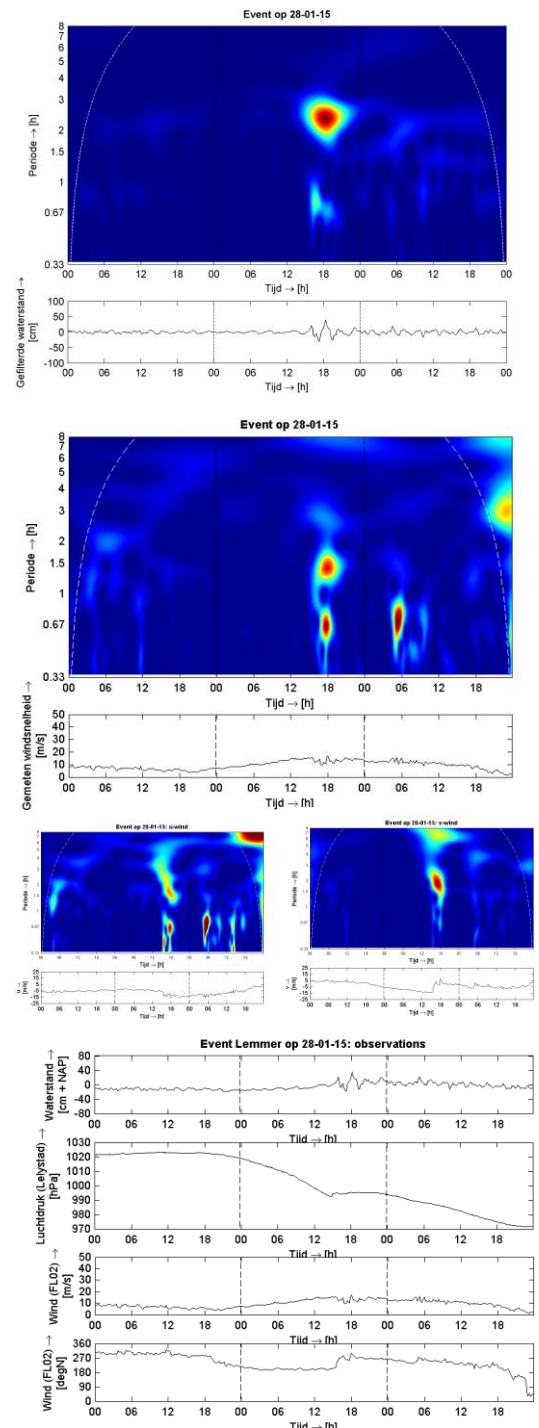
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De windrichting is zuidwestelijk voorafgaand aan de seiche, en ruimt gedurende de seiche naar het noordwesten. Gesplitst in de u- en v-componenten wordt duidelijk dat fluctuaties in de v-windsnelheid (zuid-noord) een grotere periodiciteit hebben dan die in de u-windsnelheid (oost-west), zoals ook het geval op 26/05/09, 28/05/11, 24/12/11 en 19/08/13.

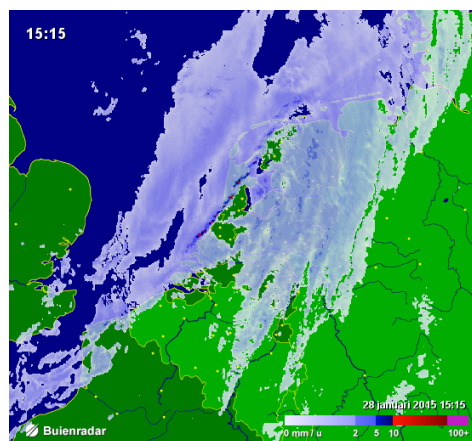
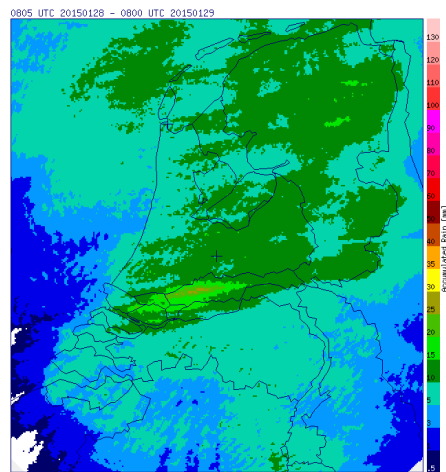
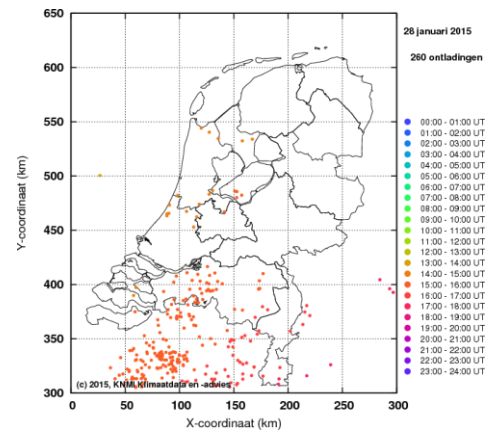
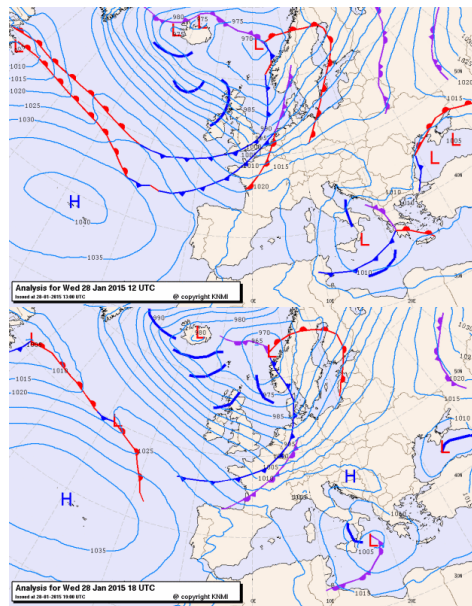
In de luchtdrukmetingen grote daling te zien van 30 hPa over de 22 uur voorafgaand aan het seiche-event. Dieptepunt van 992.5 hPa om 15:00 CET. Daarna vlakt de daling in de luchtdruk af om later weer geleidelijk te versnellen.

Op de weerkaart van 12UTC (13CET) zijn twee koufronten achter elkaar aanwezig over de Noordzee. Deze trekken gedurende de volgende 6 uur over het land in noordoostelijke richting. Na de frontpassage is een windruiming waarneembaar.

Op de neerslagradark kaart is wat neerslag te zien in som tussen 08UTC 28 januari en 08 UTC 29 januari. Er zijn geen onweersontladingen geweest tijdens de seiche.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





D.20**Event op 31 maart 2015**

Op 31 maart 2015 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 60 cm rond 05.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

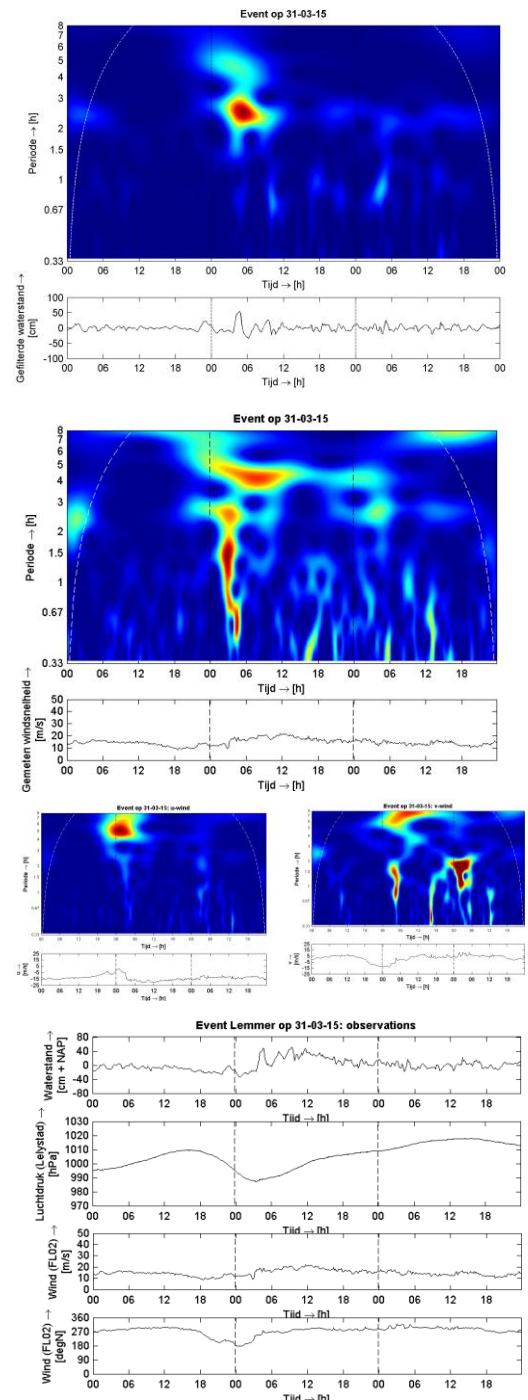
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties, de timing is wel goed. De wind ruimt voor en gedurende de seiche. De periodiciteit van de u-component (oost-west) van de wind komt in factor wel overeen met de periodiciteit in de waterstandsfluctuatie. In de v-component (zuid-noord) zijn fluctuaties te zien in een brede range van periodes.

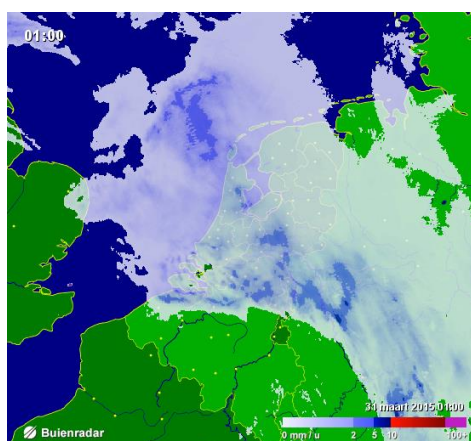
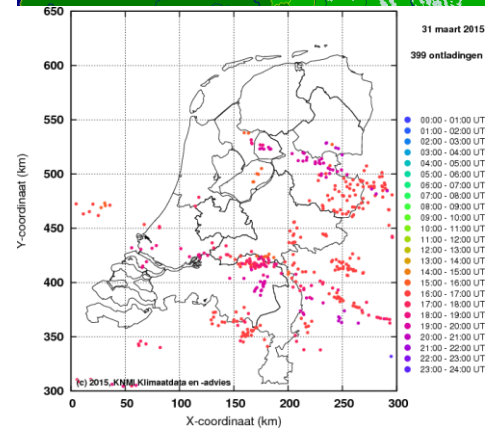
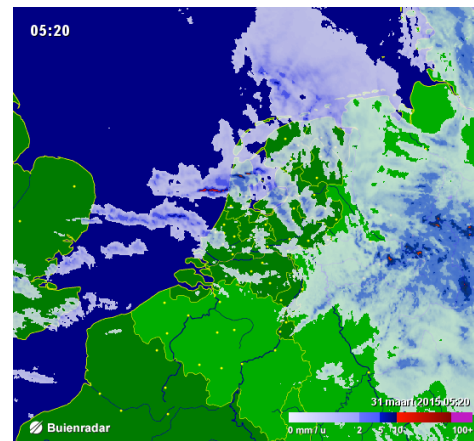
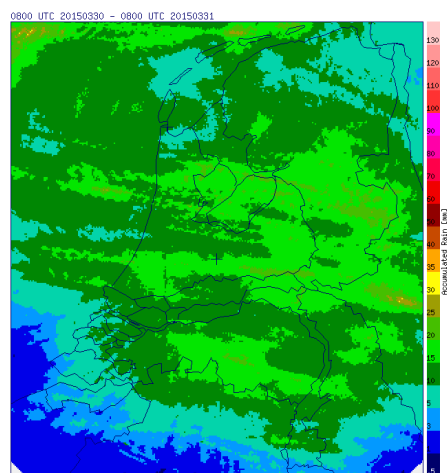
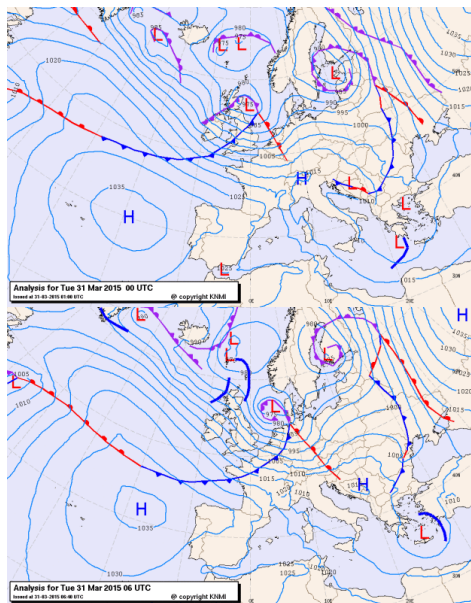
In de luchtdrukmetingen grote daling te zien van 20 hPa over de 9 uur voorafgaand aan het seiche-event. Dieptepunt van 987.5 hPa om 03.00CET. Daarna neemt de luchtdruk weer geleidelijk toe.

Op de weerkaart van 00UTC (01CET) is een lagedrukgebied te zien over Ierland met daaraan een warmfront dat over Nederland ligt. In de volgende 6 uur beweegt het lagedrukgebied zich richting Nederland, waarbij ook het koufront dat achter het warmfront ligt het land passeert. Na de frontpassage is er een opvallende windruiming.

Op de neerslagradarkkaart is wat neerslag te zien in som tussen 08UTC 30 maart en 08 UTC 31 maart. Er zijn geen onweersontladingen geweest tijdens de waterstandsfluctuatie.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





D.21**Event op 6 mei 2015**

Op 6 mei 2015 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 40 cm rond 14.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 2,5 uur die over een tijdsbestek van 6 uur opzet en weer uitdempt.

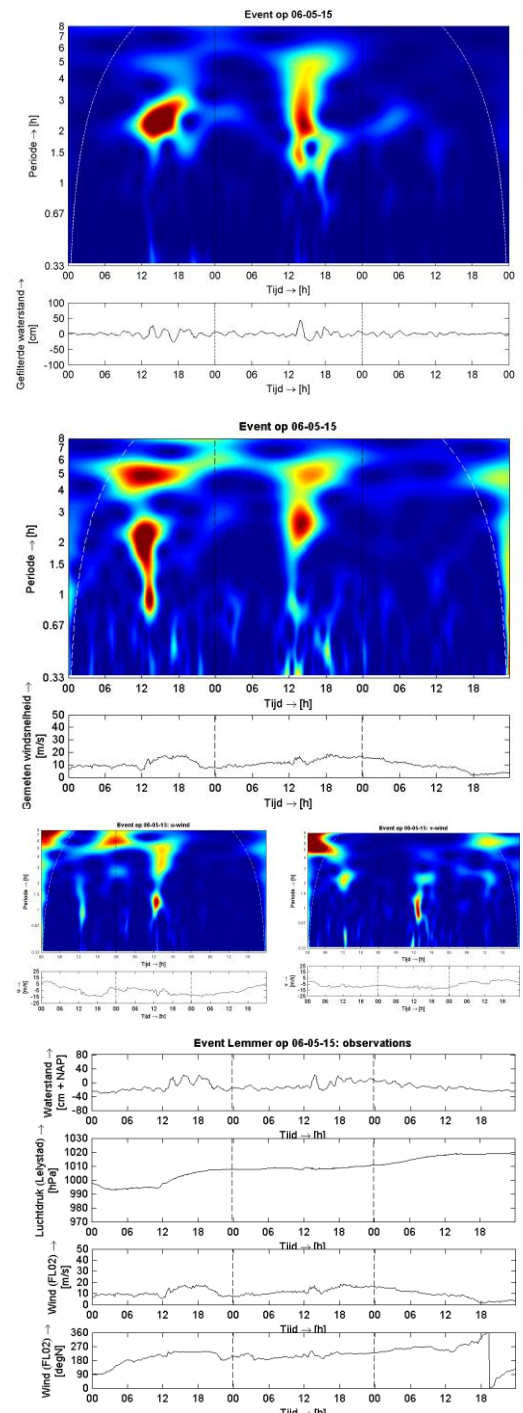
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De wind komt constant uit het zuiden voorafgaand aan, gedurende en na de seiche. Zowel in de u- en v-componenten zijn fluctuaties te zien, maar niet binnen de periodiciteit van de waterstandsfluctuatie.

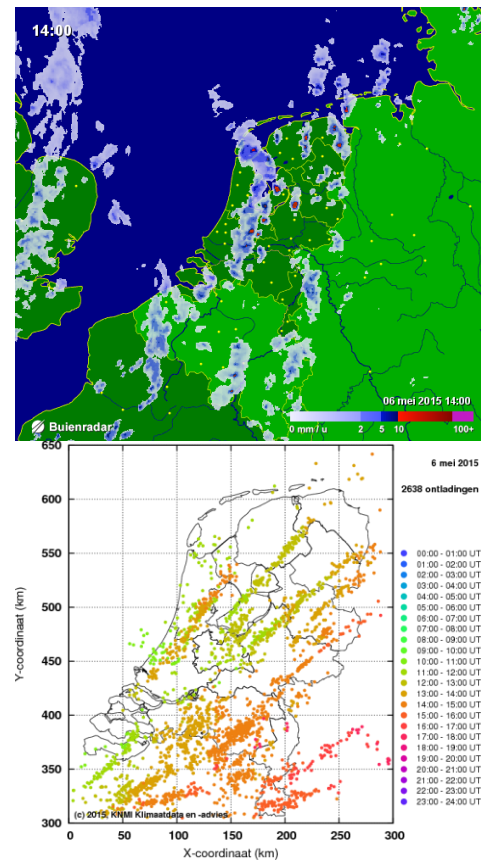
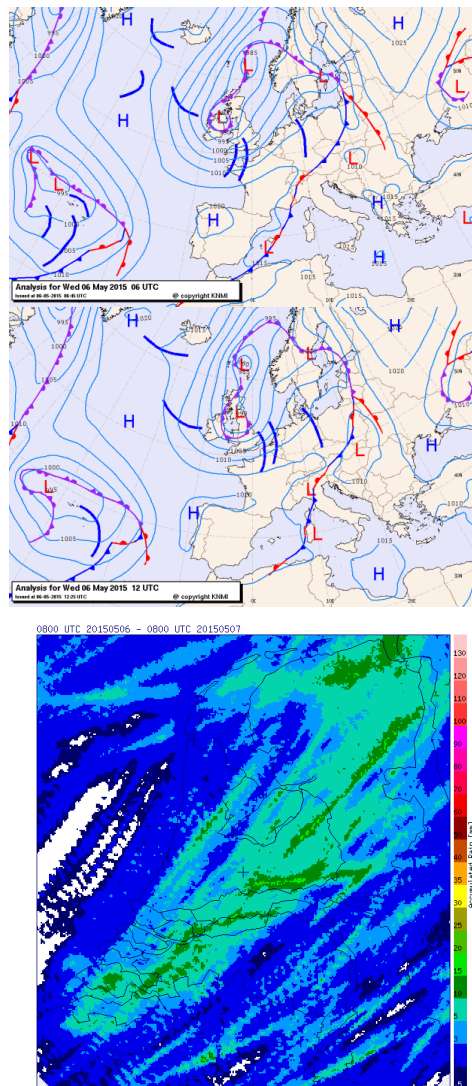
De luchtdruk is stabiel rond 1007 hPa gedurende de dag. Geen duidelijke forcering voor de seiche is waarneembaar, hoewel er rond 12.00CET een luchtdrukschommeling van 1 hPa in een uur plaatsvindt.

Op de weerkaart van 06UTC (07CET) ligt een koufront over Oost-Europa. Over het midden van Duitsland ligt een trog, en nog twee komen eraan die zich nu boven het Kanaal bevinden. 6 uur bevindt 1 van de twee troggen zich boven Nederland, de andere nadert de Zeeuwse kust.

Op de neerslagradark kaart is enige neerslag te zien in som tussen 08UTC 6 mei en 08 UTC 7 mei. Voorafgaand aan en ten tijde van de waterstandsfluctuatie trekt er een onweersbui over in zuidoostelijke richting. De windsnelheid piekt dan ook. De seiche lijken samen te vallen met de trogpassage.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type D: postfrontale opwekking.





D.22**Event op 5 juli 2015**

Op 5 juli 2015 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 40 cm rond 16.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 3 uur die over een tijdsbestek van 9 uur opzet en weer uitdempt.

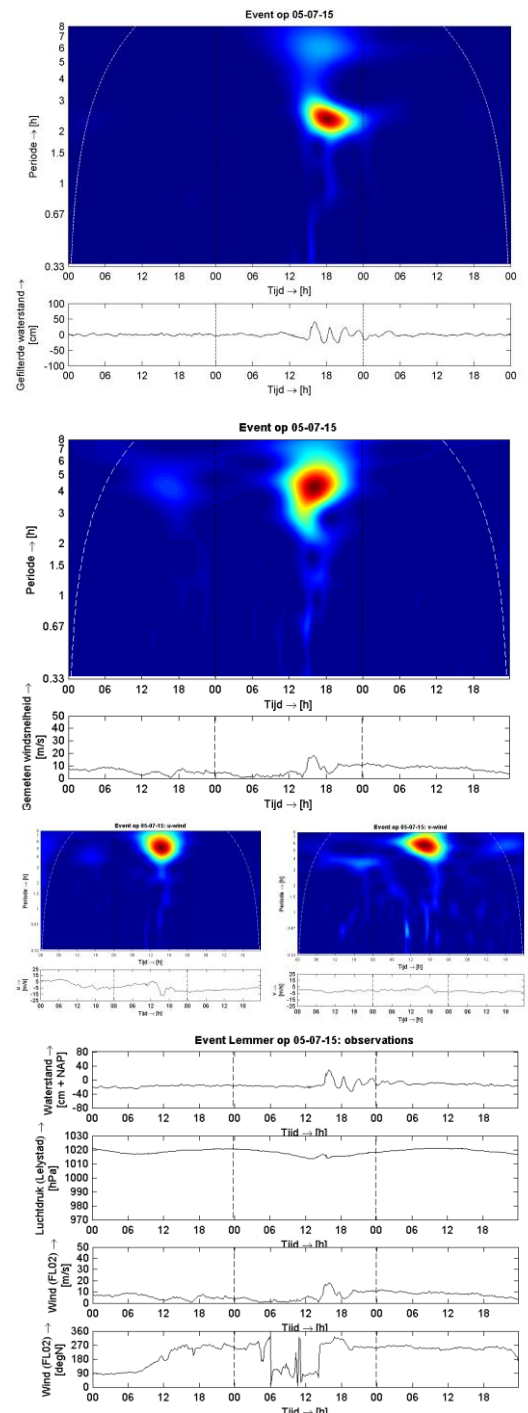
De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt niet goed overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties, de timing is wel goed. De windrichting is erg veranderlijk voor en gedurende de waterstandsfluctuatie. Ook in de u- en v-componenten vinden ten tijde van de seiche fluctuaties plaats die niet goed overeenkomen met de waterstandsfluctuaties.

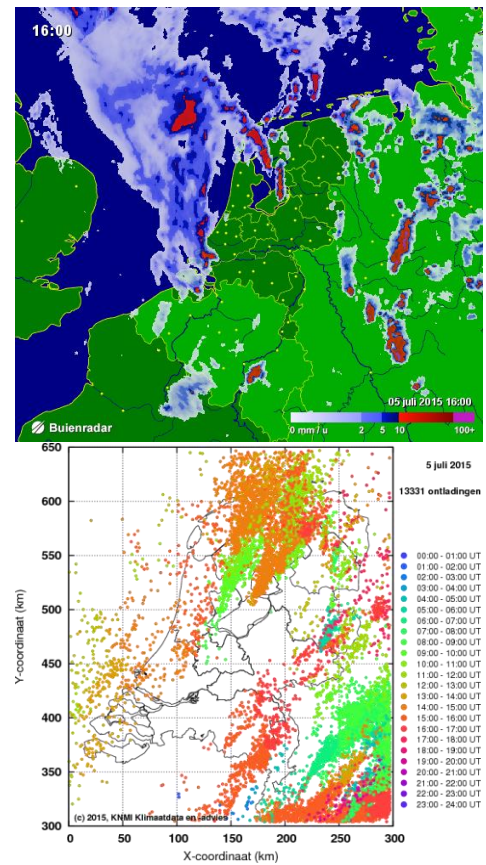
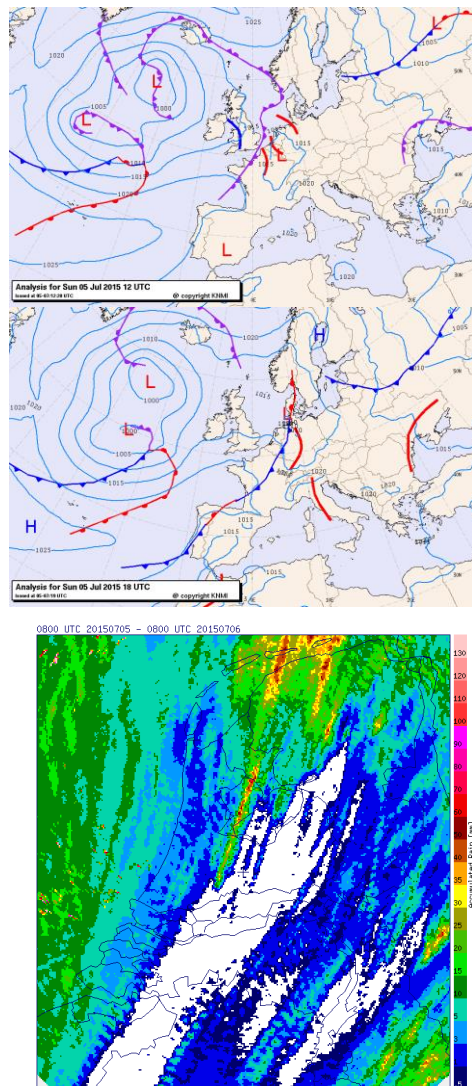
In de luchtdrukmetingen is een snelle fluctuaties te zien: stijging van 1013,6 hPa om 13.30 CET naar 1017 hPa om 15.00 CET, gevolgd door een daling naar 1014,4 hPa om 15.30 hPa.

Op de weerkaart van 12UTC ligt een sterk lagedrukgebied in de atlantische oceaan. Tussen Ierland en Noorwegen een occlusie en het lijkt of er zich daar een nieuw lagedrukgebied gaat vormen. In de 6 uur blijkt dat het geval. Vermoedelijk is ten tijde van de seiche het koufront dat eraan zit over Nederland getrokken.

Op de neerslagradark kaart is neerslag te zien in som tussen 08UTC 5 juli en 08 UTC 6 juli, voornamelijk in het noorden. Voorafgaand aan en tijdens de waterstandsfluctuatie heeft verspreid over het land onweer plaatsgevonden. In aanloop naar de seiche is de windrichting erg variabel, er is er een duidelijk piek in windsnelheid. Na de frontpassage is er een opvallende windruiming.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.





D.23**Event op 26 augustus 2015**

Op 26 augustus 2015 is een waterstandsfluctuatie waargenomen, met een piekamplitude van ongeveer 40 cm rond 21.00 CET. Periodiciteit in de waterstandsfluctuatie is rond de 20 minuten voor een tijd van een uur, en rond de 2,5 uur over een tijdsbestek van 6 uur.

De dominante periodiciteit van fluctuaties in de windsnelheid komt overeen met de periodiciteit van de waterstandsfluctuaties. De wind komt eerst uit het zuiden, om gedurende de seiche naar het westen te draaien. De v-component heeft kortdurende fluctuaties gemeen met de waterstandsschommelingen. De u-component laat juist fluctuaties van grotere periodiciteit zien, die in factor overeenkomen met de periodiciteit van de seiche.

De luchtdruk is redelijk stabiel tot een snelle stijging inzet een paar uur voorafgaand aan de seiche. Binnen het uur schiet de luchtdruk 3 hPa omhoog.

Op de weerkaart van 18UTC (19CET) is een convergentielijn met daarachter een lagedrukgebied te zien ten westen van Nederland. Dit systeem verplaatst zich langzaam richting het oosten, en ligt 6 uur later boven het land.

Op de neerslagradark kaart is hevige neerslag te zien in som tussen 08UTC 26 aug en 08 UTC 27 aug. Voor en tijdens de waterstandsfluctuatie, tussen 18CET en 21 CET, heeft het veel geonweerd. Deze onweersbui kwam in het zuidwesten het land binnen. Het verliet het land in het noordoosten. Na de frontpassage is er een opvallende windruiming.

Gegeven het bovenstaande is het opwekkingsmechanisme van deze seiche te classificeren als type B.

