

**EEN REKENEXPERIMENT VOOR DE
WADDENZEE,
DE STORM VAN 5 & 6 DECEMBER 2013**

WATERSCHAP NOORDERZIJLVEST

18 december 2014
: - Definitief
C03041.001941.0100



Management samenvatting

De Waterwet schrijft voor dat de primaire waterkeringen elke zes jaar getoetst worden aan de in de wet opgenomen veiligheidsnormen. Dat toetsen gebeurt volgens het Voorschrift Toetsen Veiligheid (VTV) met behulp van het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). Bij deze toetsing horen Hydraulische Randvoorwaarden. Ze geven de waterstands- en golfrandvoorwaarden voor de belasting van elk dijkvak.

Onzekerheden en onnauwkeurigheden in de methodes om deze Hydraulische Randvoorwaarden te bepalen, hebben geresulteerd in veiligheidscorrecties, waardoor mogelijk de randvoorwaarden te conservatief worden ingeschat, opdat de veiligheid te allen tijde wordt gewaarborgd. Dat kan leiden tot een te hoge ontwerpwaterstand voor de waterkering.

Twee aspecten die hierin een rol spelen zijn:

- De onzekerheden in de extreme waarden statistiek, waarbij verondersteld wordt dat er fysisch geen beperkingen zijn in de aandrijving van stormen en in de voortplanting van golven en waterstanden op de Noordzee en de Waddenzee. In andere woorden, extreme waarden kunnen worden opgeschaald zonder rekening te houden met fysische beperkingen zoals diepte limitering van golven.
- De onnauwkeurigheid waarmee die extreme waterstanden vanuit een select aantal stations worden vertaald naar tussenliggende punten.

Die extreme waarden statistiek en de vertaling zijn ter hand genomen door de eerste Deltacommissie (Deltacommissie, 1961) en later nog eens herzien door Rijkswaterstaat RIKZ in 1993 (Rijkswaterstaat, 1993). Inmiddels is het 2014. Dat betekent dat de tijdreeksen voor de bepaling van de extremen sinds 1961 53 jaar en sinds 1993 21 jaar langer zijn geworden. De eerste Deltacommissie gebruikte voor de basispeilen tijdreeksen van orde 100 jaar. Echter voor het Waddengebied en Den Helder, waren destijds slechts betrouwbare tijdreeksen beschikbaar vanaf 1932 (sluiting van de Afsluitdijk). Dat was slechts 28 jaar waterstandmetingen voor de stations Den Helder, Harlingen, Delfzijl en (later toegevoegd) West Terschelling. Juist daarom is dat werk voor een deel in 1993 over gedaan. Inmiddels was er voor deze 4 stations 61 jaar data beschikbaar. Dat heeft geleid tot een significante aanpassing van de extremen. Alle basispeilen voor de vier stations in het Waddengebied zijn naar beneden bijgesteld. Uit het onderzoek bleek in het algemeen dat langere tijdreeksen leidden tot minder extreme waterstanden voor de basispeilen. Het is nu 2014 en voor deze vier stations zijn inmiddels 82 jaar waterstandmetingen beschikbaar. Het verdient aanbeveling deze exercitie spoedig te herhalen. Naar verwachting zullen de basispeilen dan verder aangepast kunnen worden.

Voor de vertaling van de extremen naar andere plaatsen in de Waddenzee wordt gebruik gemaakt van numerieke modellen die relaties tussen stations afleiden. Dezelfde modellen die gebruikt worden voor de operationele voorspellingen. Inmiddels is er aan die modellen sinds 1993 enorm veel veranderd. In de modellen is meer fysica gebracht en de reken capaciteit en het geheugen van computers is enorm toegenomen. Om te onderzoeken of het inbrengen van meer fysica en betere parameterisaties van fysische processen, meer rekenkracht, betere numerieke technieken en nieuwere inzichten, daadwerkelijk helpt om betere voorspellingen te maken (dat is immers de ultieme verificatie van de gebruikte modellen), is als eerste test de Sinterklaas storm van 2013 gesimuleerd. Uiteraard speelt daarbij het voordeel dat we kunnen rekenen in zogenaamde hindcast mode (een voorspelling achteraf), waarbij alle andere gegevens goed bekend zijn. Dat is iets heel anders dan de voorspellende wijze waarmee de Stormvloedwaarschuwingsdienst haar modellen draait. Daarbij speelt ook rekentijd een grote rol. Het accent in het hier uitge-

voerde onderzoek ligt iets meer op de waterstanden dan op de exacte representatie van de door de wind genereerde golven (in het vervolg afgekort als “golven”). Dit in tegenstelling tot het gelijksoortige onderzoek van Deltares, waarbij het accent primair op de golven heeft gelegen (Deltares, 2014).

Bij het simuleren van de Sinterklaas storm is een groot aantal simulaties uitgevoerd en zijn vele gevoelheden afgetast. Hierbij is gebruik gemaakt van het door Deltares ontwikkelde DCSMv6 model. Om een zuivere beoordeling van het model zelf te krijgen is de Kalman filter techniek (de data model integratie) in deze studie niet toegepast. In operationele modellen wordt deze techniek immers toegepast om verschillen tussen model en metingen te corrigeren. Er is gerekend met Delft3D (in plaats van met WAQUA-IN-SIMONA waarin het DCSMv6 model oorspronkelijk is opgezet). Dit is gedaan omdat in Delft3D de online koppeling tussen stroming en golven (SWAN) wordt gefaciliteerd. SWAN is daarnaast steeds in-stationair toegepast. Het basisprincipe bij dit rekenexperiment is geweest: meer fysica, meer resolutie en meer interactie tussen wind, waterbeweging en golven is nodig om de werkelijk opgetreden condities beter te reproduceren.

Om te testen of dit ook daadwerkelijk het geval is, is er gesimuleerd in hoge en in lage resoluties, astronomisch en met wind, met verschillende windmodellen: Hirlam (KNMI) en WRF (genest in het NOAA/NCEP model), met verschillende windschuifspanning-parameterisaties (Zijlema et al., 2012 en Charnock, 1950), met en zonder golven, in twee dimensies en in drie dimensies, met en zonder temperatuur (Ocean Heat Flux) en zout. Daarbij zijn wij regelmatig aangelopen tegen praktische problemen, zowel softwarematige als het omgaan met de omvangrijke bestanden die bij dit soort simulaties nodig zijn.

Van sommige aspecten kan nu al geconcludeerd worden dat deze niet significant bijdrage aan het verbeteren van de gesimuleerde waterstanden, terwijl van andere aspecten alleen uitspraken kunnen worden gedaan op basis van de resultaten van deze ene storm.

Op basis van de uitgevoerde simulaties kunnen wij de volgende, algemene conclusies trekken:

- Een hogere resolutie in de ruimte (meer gridpunten), zowel in het DCSMv6 model middels domeindecompositie als in het Waddenzee model geeft een verbetering van de gesimuleerde waterstanden door een betere schematisatie van de bodemligging.
- De variatie van de middenstand over het jaar is een lastig te modelleren fenomeen, maar is wel relevant, aangezien de variaties in dezelfde orde van grootte liggen als de golf-gedreven opzet.
- Het 3D rekenen is kostbaar qua rekentijd, en leidt niet tot significant andere waterstanden.
- Het meenemen van watertemperatuur middels een Ocean Heat Flux model in de dichtheid leidt ook niet tot significant andere waterstanden.

Het woord ‘significant’ is hier gebruikt relatief ten opzichte van de effecten van andere onderzochte aspecten. Ook aspecten die hier niet zijn onderzocht, bijvoorbeeld het meenemen van de werkelijke afvoeren van rivieren met hun saliniteit (en eventueel temperatuur) als functie van de tijd, leiden mogelijk tot een groter effect op de waterstand.

Op basis van de uitgevoerde simulaties voor deze ene storm kunnen wij de volgende conclusies trekken:

- Het Charnock model voor de windschuifspanning-parametrisatie lijkt de voorkeur te hebben boven het model van Zijlema et al..
- Het meenemen van de (tweezijdige) interactie tussen golven en waterbeweging leidt tot hogere waterstanden in de Waddenzee. De resultaten voor deze storm geven aan dat dit ook leidt tot een betere reproductie van de gemeten waterstanden.

- Dit alles resulteert in de belangrijke constatering dat er wel degelijk mogelijkheden zijn de kwaliteit van de modellen die worden gebruikt voor operationele voorspellingen en daarmee de waterstandsvoorspellingen tijdens stormen significant te verbeteren.

Er zijn tijdens dit rekenexperiment een aantal vragen en problemen naar boven gekomen die nader onderzoek vergen.

De belangrijkste is wel hoe geldig de laatste serie conclusies zijn bij het modelleren van stormen in het algemeen. Wij bevelen aan een extra serie van drie historische stormen door te rekenen, waarbij niet alle aspecten van het gevoeligheidsonderzoek opnieuw dienen te worden bestudeerd, maar een focus te leggen op de één of twee meest dominante. Daarnaast verdient het aanbeveling om nog enkele andere gevoeligheden nader te onderzoeken, zoals het aantal iteraties in SWAN, de consequentie van de keuze voor 2D of 3D waterbeweging in combinatie met SWAN en hoe frequent de interactie tussen golven en stroming wordt berekend. Dit zijn tegelijk ook aspecten die samenhangen met de rekentijd van het hele modelinstrummentarium.

Daarnaast zijn de wetenschappelijke inzichten en de ontwikkelingen op het gebied van golf- en stromingsmodellering constant in beweging. Uit de zeer recent beschikbaar gekomen Deltares studie (Deltares, 2014) blijkt dat het whitecapping en brekermodel van Van der Westhuysen beter te werken voor Waddenzee toepassingen (dat model is immers afgeregeld voor Waddenzee condities). Ook het D-FLOW FM model dat wordt ontwikkeld bij Deltares biedt meer mogelijkheden om lokaal met een hogere resolutie te rekenen, waardoor geulen in het model beter kunnen worden geschematiseerd. De koppeling van dit model met golven wordt momenteel getest.

Aangezien de nauwkeurigheid van de wind heel cruciaal is bij het modelleren van stormcondities, is hier naar verwachting ook nog veel winst te behalen. Hierbij denken we aan het meenemen van de waterstand bij het bepalen van de ruwheidsveld voor het WRF-NMM model, zodat tijdens hoog water een andere ruwheid wordt toegepast dan bij laag water.

Inhoud

Management samenvatting	i
Lijst van Figuren.....	vii
Lijst van Tabellen.....	x
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel.....	2
1.3 Aanpak van de studie	2
1.3.1 Inleiding	2
1.3.2 Voorstel modellen.....	3
1.3.3 Voor de getijdenvoortplanting en de waterbeweging:	4
1.3.4 Voor de golven:	4
1.3.5 Voor de meteo condities:	5
2 Waterstanden in de Waddenzee.....	7
3 Beschrijving rekenexperiment.....	11
3.1 Keuze storm.....	11
3.1.1 Aanpak	11
3.1.2 Resultaten	13
3.1.3 Onderbouwing	13
3.2 Gebruikte gegevens	13
3.3 Modelopzet.....	19
3.3.1 Delft3D-FLOW	19
3.3.2 SWAN.....	22
3.4 Aanpassingen software.....	24
3.4.1 Aanpassingen Delft3D FLOW.....	24
3.4.2 Aanpassingen Delft3D WAVES.....	24
3.4.3 Aanpassingen SWAN.....	24
3.5 Afbakening	24
4 Resultaten.....	27
4.1 Simulaties voor Astronomische condities	27
4.1.1 Gevoeligheid langperiodieke componenten	27
4.1.2 Gevoeligheid overige componenten.....	29
4.1.3 Conclusies	29
4.2 Simulaties stormconditie, zonder golven	29
4.2.1 Gevoeligheid WRF-NMM/HIRLAM.....	33
4.2.2 Gevoeligheid resolutie meteo in ruimte en tijd.....	36
4.2.3 Gevoeligheid Zijlema et al./Charnock.....	38
4.2.4 Gevoeligheid detailmodel 2D/3D	40
4.2.5 Conclusies	43
4.3 Simulaties stormconditie, met golven	44
4.3.1 Golfvariabelen: meting-model vergelijking	44

4.3.2	Waterstanden: meting-model vergelijk.....	47
4.3.3	Conclusies	52
5	Conclusies en aanbevelingen	53
5.1	Conclusies	53
5.2	Aanbevelingen	55
	Referenties.....	56
Bijlage A	Vergelijking windmetingen en HIRLAM-WRF modellen.....	A
Bijlage B	Vergelijking berekende en afgeleide gemeten getijcomponenten.....	B
Bijlage C	Gevoeligheid waterstanden voor resolutie rekenrooster	C
Bijlage D	Gevoeligheid waterstanden voor atmosferisch model.....	D
Bijlage E	Gevoeligheid waterstanden voor resolutie atmosferische variabelen	E
Bijlage F	Gevoeligheid waterstanden voor windschuifspanning formulering.....	F
Bijlage G	Gevoeligheid waterstanden voor 2D/3D model weergave.....	G
Bijlage H	Vergelijking gemeten en gemodelleerde golfvariabelen	H
Bijlage I	Gemodelleerde waterstanden met golven.....	I

Lijst van Figuren

Figuur 3-1	Locaties meetstations Matroos.....	12
Figuur 3-2	Locaties waterstandsmetingen Waterbase.....	14
Figuur 3-3	Locaties golfmetingen westelijke Waddenzee (AZ = Amelanders zeegat, St. = Stortemelk) ...	14
Figuur 3-4	Locaties golfmetingen oostelijke Waddenzee (We = Westereems, AW = Amelanders Westgat)	15
Figuur 3-5	Gemodelleerde drukvelden (links) en windvelden (rechts) van het WRF-NMM 3 km model op 05 December 14:00 h UTC.....	16
Figuur 3-6	Locaties windmetingen	17
Figuur 3-7	Gemeten en gemodelleerde windsnelheid te Texelhors-MM voor verschillende atmosferische modellen.....	17
Figuur 3-8	Dieptegegevens vaklodingen.....	18
Figuur 3-9	Jaartal dieptegegevens vaklodingen.....	18
Figuur 3-10	Overzicht van de stromingsrekenroosters (blauw = DCSMv6, rood = DCSMnest, groen = Kustwad).	20
Figuur 3-11	Vergelijking van verschillende Cd-formuleringen.....	21
Figuur 3-12	Rekenroosters SWAN (blauw = uitgedunde versie DCSMv6, geel = uitsnede DCSMv6, rood = DCSMnest, groen = aangepast Kustwad).....	22
Figuur 3-13	Diagram die de koppeling tussen golven en stroming weergeeft en de schakeling van overall model naar detailmodel.	23
Figuur 4-1	Amplitudes van de langperiodieke componenten voor Huibertgat.	28
Figuur 4-2	Fases van de langperiodieke componenten voor Huibertgat.....	28
Figuur 4-3.	Vergelijking astronomische waterstand overall en detail model en predictie voor station Texel Noordzee.....	30
Figuur 4-4	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee.	30
Figuur 4-5.	Vergelijking waargenomen en gemodelleerde opzet overall en detail model voor station Texel Noordzee.....	31
Figuur 4-6	Vergelijking astronomische waterstand tussen overall en detail model en predictie voor station Lauwersoog.....	31
Figuur 4-7	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog.	32
Figuur 4-8	Vergelijking waargenomen en gemodelleerde opzet tussen overall en detail model voor station Lauwersoog.....	32
Figuur 4-9.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor WRF-NMM versus HIRLAM invoerdata.....	34
Figuur 4-10.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Texel Noordzee voor WRF- NMM versus HIRLAM invoerdata.....	34
Figuur 4-11.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog voor WRF-NMM versus HIRLAM invoerdata.....	35
Figuur 4-12.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Lauwersoog voor WRF-NMM versus HIRLAM invoerdata.....	35
Figuur 4-13.	Vergelijking gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor verschillende resoluties van de wind- en drukvelden van WRF-NMM voor het overall model (boven) en het detail model (onder).	37

Figuur 4-14	Vergelijking gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog voor verschillende resoluties van de wind- en drukvelden van WRF-NMM voor het overall model (boven) en het detail model (onder).	37
Figuur 4-15.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].	39
Figuur 4-16.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Texel Noordzee voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].	39
Figuur 4-17.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].	40
Figuur 4-18.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Lauwersoog voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].	40
Figuur 4-19.	Vergelijking astronomische waterstand tussen 2D en 3D detail model en predictie, station Texel Noordzee (de blauwe lijn ligt onder de rode).	41
Figuur 4-20.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor 2D versus 3D detail model (de blauwe lijn ligt onder de rode).	41
Figuur 4-21.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Texel Noordzee, 2D versus 3D detail model (de blauwe lijn ligt onder de rode).	42
Figuur 4-22.	Vergelijking astronomische waterstand tussen 2D en 3D detail model en predictie, station Kornwerderzand buiten (de blauwe lijn ligt vrijwel overal onder de rode).	42
Figuur 4-23	Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Kornwerderzand buiten, 2D versus 3D detail model.	43
Figuur 4-24.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Kornwerderzand buiten, 2D versus 3D detail model.	43
Figuur 4-25.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde golf-gerelateerde grootheden, station Amelanders Zeegat boei 12.	45
Figuur 4-26.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde golf-gerelateerde grootheden, station Westereems oost.	46
Figuur 4-27.	Vergelijking gemeten en gemodelleerde golf-gerelateerde grootheden, station Wierumerwad 1.	46
Figuur 4-28.	Vergelijking gemodelleerde totale waterstand zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Texel Noordzee.	47
Figuur 4-29.	Vergelijking gemodelleerde opzet zonder en met golven en voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Texel Noordzee.	48
Figuur 4-30.	Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Texel Noordzee.	48
Figuur 4-31	Vergelijking astronomische waterstand tussen overall en detail model en predictie, station Huibertgat.	48
Figuur 4-32.	Vergelijking gemodelleerde totale waterstand zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Huibertgat.	49
Figuur 4-33.	Vergelijking gemodelleerde opzet zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Huibertgat.	49
Figuur 4-34.	Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Huibertgat.	49
Figuur 4-35.	Vergelijking astronomische waterstand tussen overall en detail model en predictie, station Eemshaven.	50
Figuur 4-36.	Vergelijking gemodelleerde totale waterstand zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Eemshaven.	50
Figuur 4-37.	Vergelijking gemodelleerde opzet zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Eemshaven.	50

Figuur 4-38.	Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Eemshaven.	51
Figuur 4-39.	Gemodelleerde verschil in relatieve golfhoogte voor de simulatie met Charnock-windschuifspanning.	51
Figuur 4-40.	Vergelijk gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Delfzijl.	51
Figuur 4-41.	Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Nieuw-Statenzijl.	52

Lijst van Tabellen

Tabel 3-1	Overzicht van de opgetreden stormen, periode stormseizoen 2008/2009 tot heden	12
-----------	---	----

1 Inleiding

1.1 ACHTERGROND

De Waterwet schrijft voor dat de primaire waterkeringen iedere zes jaar getoetst worden aan de in de wet opgenomen veiligheidsnormen. Dat toetsen gebeurt volgens het Voorschrift Toetsen Veiligheid (VTV) met behulp van het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). Bij deze toetsing horen Hydraulische Randvoorwaarden. Ze geven de waterstands- en golfrandvoorwaarden voor de belasting van elk dijkvak.

Onzekerheden en onnauwkeurigheden in de methodes om deze Hydraulische Randvoorwaarden te bepalen, resulteren in veiligheidscorrecties, waardoor mogelijk de randvoorwaarden aan de conservatieve kant worden bepaald, opdat de veiligheid te allen tijde wordt gewaarborgd. Dit zou mogelijk kunnen leiden tot te hoge ontwerpwaterstanden voor de waterkering.

Twee aspecten die hieraan bijdragen zijn de onnauwkeurigheid waarmee stormvloedwaterstanden in de praktijk met de bestaande modellen kunnen worden gereproduceerd (hindcast mode) en de onzekerheid in de extremen-statistiek. In deze studie willen we in meer detail kijken naar dit eerste aspect.

In de praktijk blijkt dat de nauwkeurigheid waarmee we met het huidige modelinstrumentarium (het operationeel modelinstrumentarium van Rijkswaterstaat) stormvloedwaterstanden kunnen reproduceren beperkt is. De nauwkeurigheid van de voorspellingen is beduidend lager voor stormcondities dan voor normale condities. Onder normale omstandigheden blijkt het gemiddelde verschil tussen metingen en berekeningen in de orde van 5 cm. Tijdens zware stormen neemt dit verschil significant toe tot waarden van orde 20 cm en meer. Er zijn zelfs voorbeelden waarbij de voorspellingen 6 uur voor het maximum van de storm tussen een halve en een hele meter afweken. Dat is het geval voor de Allerheiligen storm van 2007 en ook voor deze Sinterklaasstorm van 2013.

In de afgelopen 10 à 20 jaar zijn de mogelijkheden van numerieke modellen flink uitgebreid en verbeterd. Door middel van online nesten (domein decompositie) kan er binnen een model lokaal een hogere resolutie worden bereikt. Tegelijkertijd is de rekenkracht van computers significant toegenomen. Deze verbeteringen zijn nog niet geïmplementeerd in het modelinstrumentarium dat nu gebruikt wordt voor het operationele voorspellingssysteem van Rijkswaterstaat. Daarnaast is de kennis met betrekking tot de waterbeweging onder invloed van stormsysteemen in de Waddenzee middels verschillende studies sterk toegenomen. Bijvoorbeeld ARCADIS A2191, SWAN Hindcast in the Eastern Wadden Sea and Eems-Dollard estuary, storm of 9 November 2007 (november 2009) en A2239 Viability study of a prototype windstorm for the Wadden Sea surges, WTI 2011 (May 2009).

Zo blijkt bijvoorbeeld het verloop van de draaiing van de windrichting tijdens een storm bepalend te zijn voor de hoeveelheid water die de Waddenzee instroomt en de snelheid waarmee dit weer kan wegstromen. Ook blijkt het meenemen van golf - stroom interactie (koppeling van golven en stromingen in beide richtingen) de opzet in de Waddenzee sterk te beïnvloeden.

Het Rekenexperiment

In maart 2012 is er in samenwerking tussen Deltares en ARCADIS een rapport verschenen met als titel: “Mogelijkheden bepaling huidige en toekomstige veiligheidsopgave ten behoeve van het Deltaprogramma Waddengebied.” (Deltares en ARCADIS, 2012). In dat rapport is het rekenexperiment uitvoerig beschreven.

Een concrete invulling van het “rekenexperiment voor de Waddenzee” treft u in voorliggend rapport. Het basale idee is dat we met behulp van een (beperkte) update van het bestaande operationeel modelinstrumentarium veel geavanceerder kunnen rekenen en de werkelijk opgetreden waterstanden in een hindcast mode aanzienlijk beter kunnen benaderen dan met het huidige modelinstrumentarium.

De basale uitgangspunten voor een verbetering van de achteraf voorspellingen zijn het in de simulaties meenemen van:

1. Een hogere resolutie in tijd en ruimte;
2. Het meenemen van meer fysica;
3. Het meenemen van meer interactie tussen de verschillende modellen.

Als we het hebben over de verschillende modellen, dan bedoelen we de drie simulatie modellen voor respectievelijk de waterbeweging, de golfvoortplanting en de meteorologie.

De bedoeling van het hier uitgevoerde en beschreven rekenexperiment is de aanbevelingen te gebruiken en toe te passen voor de simulatie van een drietal extra stormen, waarbij de afwijkingen tussen de voorspellingen en de opgetreden waterstandswaarden relatief groot waren. Eén en ander zou uiteindelijk kunnen resulteren in een advies voor een aangepaste benadering voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden in het complexe Waddengebied.

Met name de inzichten dat er een limiet bestaat in de overdracht van windenergie op golven en waterbeweging zou een belangrijke beperking kunnen betekenen in de tot nu toe toegepaste extreme waarden statistiek, voor de bepaling van de basispeilen.

1.2 DOEL

Het doel van deze studie is tweeledig:

- Stel vast of het mogelijk is waterstanden in de Waddenzee tijdens stormvloed nauwkeurig te simuleren om hiermee het huidige operationele modelinstrumentarium van Rijkswaterstaat (op termijn) te verbeteren, en
- Duiden van processen/parameters die bepalend zijn voor het nauwkeurig simuleren van de waterstanden tijdens extreme condities

1.3 AANPAK VAN DE STUDIE

1.3.1 INLEIDING

Modellen zijn een geformaliseerde representatie van de werkelijkheid en bevatten modelparameters die kunnen worden gevarieerd om de resultaten zo goed als mogelijk met de werkelijkheid overeen te laten komen. Er zijn vele combinaties van fysische en numerieke modelinstellingen mogelijk. In het bestaande operationele modelinstrumentarium zijn deze instellingen redelijk goed geoptimaliseerd. Voor het doel van deze studie richten we ons daarom niet op een verbetering van de instellingen maar vooral op de

nieuwste inzichten in de fysica van wind, golven en stromingen, om via die weg de werkelijkheid zo dicht mogelijk te benaderen.

Er bestaan veel modellen waarmee de waterbeweging kan worden gesimuleerd. Voor dit geval hebben we gekozen voor de combinatie van Delft3D voor de waterbeweging en SWAN voor de golfvoortplanting. Voornamelijk vanwege de goede ervaringen die ARCADIS in het verleden met deze combinatie van modellen heeft opgedaan, maar tevens vanwege de enorme flexibiliteit van het Delft3D systeem. De vrijwel onbeperkte mogelijkheden qua adressering in een 64 bit executabel in combinatie met opties als domeindecompositie, parallel rekenen, Ocean Heat Flux, het meenemen van temperatuur en saliniteit en de tweezijdige interactie met SWAN maakten het mogelijk deze uitdagende simulaties uit te voeren.

Tenslotte maakt het open-source karakter van dit model het mogelijk om kleine aanpassingen in de code aan te brengen, op plaatsen waar we tegen de grenzen van het toepassingsbereik aanliepen en modificatie onvermijdelijk was.

De simulaties zijn gedraaid op 12- en op 40-core Windows-PC's.

De volgende aspecten zijn in deze gevoeligheidsstudie afgetast:

- het toepassen van domeindecompositie in het CSM model;
- de wind-drag formulering;
- de ruimtelijke en temporele resolutie van de atmosferische-forcering;
- het meenemen van meer getijde componenten;
- het al dan niet meenemen van golven;
- het rekenen in 3 dimensies;
- het al dan niet meenemen van temperatuur en saliniteit;
- het verhogen van de resolutie van de stromingsmodellen;
- het toepassen van verschillende atmosferische modellen.

1.3.2 VOORSTEL MODELLEN

Aangezien de focus ligt op de Waddenzee (ruwweg het gebied tussen Callantsoog en Norderney) ligt, hebben we uiteindelijk gekozen voor de volgende twee modellen voor Delft3D te gebruiken:

1. Het eerste model is het vernieuwde en verbeterde DCSM model versie 6, resolutie 1,5 (O-W) bij 1,0 (N-Z) minuten ongeveer 1850 bij 1850 m. Dat model is omgezet naar Delft3D. Het model is gestuurd met Matsumoto (Topex Poseidon 16 kort periodieke en 7 lang periodieke¹ getijde componenten) en/of met de TPXO database, dan wel een combinatie van beiden. Tevens interne getij-aandrijving en domeindecompositie (DD) voor het Waddengebied, factor 3 fijner (orde 620 bij 620 m), zodat de werking van de Waddenzee voldoende gedetailleerd terugkomt in het grootschalige model. Van belang is nog te constateren dat dit model een groter gebied beslaat dan het oude CSM model en dat juist het meenemen van de eerder afgesneden noordwesthoek leidt tot een beter gedrag van het model.

¹ Met langperiodiek wordt hier bedoelt componenten met een periode van 2 weken of meer.

2. Een in tijd en ruimte verdichtte Delft3D versie van het Kuststrook fijn model voor het Waddengebied. Dit model is een verdichtte en gemodificeerde versie van Kuststrook fijn. Het model heeft globaal een resolutie die een factor 4,5 (1,5 bij 3) hoger is dan de resolutie van het huidige Kuststrook fijn model. Het kromlijnige model zal overigens net als het Kuststrook model zijn laagste resolutie op diep water hebben en zijn hoogste resolutie in de Waddenzee en nabij de kust. Doel van de modelschematisatie is dat de ligging van de waterstandsmeeptunten in de havens en beschutte locaties nog steeds redelijk acceptabel kunnen worden gereproduceerd. Het model rooster is deels opnieuw ontworpen om een zo nauwkeurig mogelijke representatie te kunnen geven voor de geulen in de Waddenzee en zijn omgeving. Voor de bodem zijn de meest recente opnames van Rijkswaterstaat gebruikt. Indien er gedetailleerde bodems zijn die qua opname dichter in tijd bij de te simuleren storm liggen zijn deze toegepast.

Delft3D en SWAN hebben waar mogelijk op dezelfde roosters gerekend. Echter op bepaalde plekken, was dat door de beperkingen in geheugen onmogelijk. Daar is gekozen voor een geringe aanpassing.

1.3.3 VOOR DE GETIJDENVOORTPLANTING EN DE WATERBEWEGING:

Met beide modellen zijn eerst de getijdewerking van de waterbeweging gesimuleerd, gebruikmakend van getijcomponenten en gekalibreerd op de performance van deze getijcomponenten voor alle beschikbare stations in het gehele model, maar met de focus op de stations langs de Nederlandse kust en daarbinnen met het accent op de Waddenzee. In tegenstelling tot het operationele modelinstrumentarium van Rijkswaterstaat is daarbij geen gebruik gemaakt van Kalman Filtering (Data-assimilatie). Dit is bewust gedaan, omdat zo een eerlijke vergelijking kan worden gemaakt van de kwaliteit van de gebruikte modellen.

Het grootschalige model is in 2D met zout en gemiddelde temperatuur gedraaid.

Het detailmodel rond de Waddenzee is voor de 3D simulaties gedraaid met 4 lagen in de verticaal. Zout en watertemperatuur zijn als variabelen meegenomen. Doel van dit experiment was niet zozeer om de stratificatie gedetailleerd na te bootsen, maar wel om de invloed ervan op de waterbeweging in voldoende mate mee te nemen. In het detailmodel is met het Ocean Heat Flux temperatuurmodel gerekend voor de uitwisseling van warmte tussen de atmosfeer en het water. Op de zeerand van het Waddenmodel is een gemeten temperatuur op de open zeerand opgelegd. Het meteomodel levert naast de druk-en windvelden zowel de luchttemperatuur evenals de andere benodigde parameters; bewolkingsgraad en luchtvochtigheid.

1.3.4 VOOR DE GOLVEN:

Voor de golven is gebruik gemaakt van SWAN modellen in-stationaire modus op dezelfde ruimtelijke resolutie als de stromingsmodellen. Hierbij is het Waddenmodel genest in het Noordzee rooster. In de tijd heeft er elke 10 minuten een terugkoppeling plaats gevonden van de SWAN simulaties naar de waterbeweging en omgekeerd. Daarbij is gekeken naar de beste methode van uitwisseling van gegevens; de dieptegemiddelde snelheden en waterstanden van Delft3D naar SWAN en de dissipatie, dan wel de radiation stresses en de massaflux van SWAN weer terug naar Delft3D. Bij de toepassing van SWAN is gebruik gemaakt van de nieuwste inzichten in de parametrisaties van de fysische processen. In de simulaties zijn per tijdstap steeds 3 iteraties uitgevoerd. Uiteindelijk is na communicatie met dhr. M. Zijlema (TUD) gebleken dat één iteratie voldoende is. Voor het gedetailleerde SWAN model zijn er vergelijkingen gemaakt tussen metingen en simulaties, zowel op de Noordzee als op de Waddenzee.

1.3.5 VOOR DE METEO CONDITIES:

Voor de wind is gebruik gemaakt van zowel de resultaten van het HIRLAM model van het KNMI als van de resultaten van het WRF-NMM model (REF). WRF-NMM staat voor Weather Research Forecast – Non-hydrostatic Mesoscale Model. Dat is het model dat op dit moment gebruikt wordt voor de Amerikaanse weersvoorspelling. De wind- en drukvelden, de luchttemperatuur, de relatieve vochtigheid en de bewolgingsgraad zijn geleverd op de uitvoerpunten van het de verschillende modellen, het tijdsinterval voor de velden is 10 minuten. Het model is gekalibreerd met metingen voor zover die beschikbaar zijn. Met het Meteo model zijn steeds twee simulaties gedraaid. Eenmaal op de schaal van het CSM model en eenmaal op de schaal van het Waddenzee model.

2

Waterstanden in de Waddenzee

In het algemeen kan worden gesteld dat 'de waterstand' ergens op zee wordt bepaald door een aantal processen:

- het getij,
- een opzet, die het gevolg is van:
 - dichtheidsverschillen,
 - luchtdruk verschillen,
 - wind,
 - rivierafvoeren.

Hoe groot de invloed van elk van deze processen is, hangt sterk af van de locatie op aarde.

Het getij wordt bepaald door de onderlinge positie van de zon en de maan ten opzichte van de aarde. Door de rotatie van de aarde, de baan van de maan om de aarde en de baan van de aarde om de zon, ontstaan de enkel daagse en dubbel daagse variaties in de waterstand. Op het moment dat de kracht van de zon en de maan elkaar versterken, als de zon, maan en aarde op één lijn staan, komt de waterstand hoger (springtij) dan wanneer de hoek maan-aarde loodrecht staat op de hoek tussen aarde en zon (doodtij).

Doordat de aarde een hellingshoek heeft van ongeveer $23,5^\circ$ ten opzichte van de baan van de aarde om de zon, hebben we op aarde seizoenen. Tegelijkertijd zorgt dit ervoor dat de aantrekkingskracht van de zon op een vast punt op aarde over het jaar varieert. Op het noordelijk halfrond is deze het grootst in de zomer. Ook is de baan van de aarde ellipsvormig, waardoor ook variaties in de aantrekkingskracht ontstaan. De minimale afstand 147,10 miljoen km valt rond 3 januari en de maximale afstand van 152,10 miljoen km rond 4 juli. Deze variatie zorgt dus voor een grootste aantrekkingskracht in de winter. Ook de baan van de maan om de aarde is niet constant. De baan is ellipsvormig en maakt een hoek ten opzichte van de evenaar.

Door niet-lineaire processen zoals bodemwrijving, gaan getijgolven elkaar beïnvloeden en ontstaan getij-componenten met afwijkende frequenties. Vandaar dat bij een getijanalyse zo veel verschillende componenten worden geanalyseerd. Ook wordt het getij door de geometrie van bodemligging en kustlijn beïnvloed. De waterdiepte bepaalt de voortplantingssnelheid van het getij, terwijl de kustlijn de voortplantingsrichting kan bijsturen, of bijvoorbeeld resonantie kan veroorzaken.

Al deze variaties met een gegeven frequentie zijn terug te vinden in een gemeten getijsignaal. Daarnaast is het vlak waarin de maan om de aarde draait niet gelijk aan het vlak waarin de aarde om de zon draait, en ook deze is niet constant. Relatief ten opzichte van de aarde zorgen al deze variaties voor een periodieke variatie van 18,6 jaar. Elke 18,6 jaar repeteert het getij. Bij het uitvoeren van een getijanalyse wordt deze variatie per jaar gevangen in de zogenaamde knooppactoren (een amplitudefactor en een faseverschuiving voor elke component).

De afwijking van het getij wordt de opzet genoemd. Deze kan zowel positief als negatief zijn. Het getij wordt ook wel het deterministische en dus grotendeels voorspelbare deel van de waterstand genoemd en de opzet het statistische deel, dat afhankelijk is van de omstandigheden met betrekking tot weer, temperatuur en saliniteit etc.

Op de schaal van de oceaan zorgen dichtheidseffecten voor variaties in middenstand. Maar ook een 'permanente' dichtheidsgradiënt (bijvoorbeeld zoeter water in de omgeving van een riviermonding, of warmer water in een ondiepe zee) zorgt lokaal voor een aanpassing van de middenstand. Typische tijdschalen voor temperatuurvariaties zijn een jaar (seizoensvariatie) en een dag (dag-nacht ritme). Rivierafvoeren en lozingsdebieten hebben veelal ook een seizoensvariatie, maar doordat lozingen vaak plaatsvinden onder natuurlijk verval en dus samenvallen met laag water perioden, kunnen hierbij ook getijperioden worden teruggevonden.

Een andere component van de opzet wordt door de wind veroorzaakt. Opwaaiing of afwaaiing langs de kust kan voor een significante opzet, dan wel verlaging van de waterstand zorgen. Van belang zijn dan de windsnelheid en de hoek ten opzichte van de kustlijn, de strijklengte waarover de wind invloed heeft en de waterdiepte. Daarnaast zorgt de wind voor golven, die als ze breken, eveneens een bijdrage aan de opzet geven.

Tenslotte zorgen ook luchtdrukverschillen voor waterstandverschillen. In het oog van een orkaan, waar de luchtdruk veel lager is dan in de omgeving, kan de waterstand decimeters tot een meter hoger liggen dan buiten de orkaan. Bij stormen op de Noordzee zijn de drukgradiënten veel kleiner, maar ook hier kan de luchtdruk bijdragen aan de opzet. Onder normale omstandigheden komt 1 atmosfeer qua druk overeen met 10 meter water kolom. Voor de heftige storm van 5 en 6 december 2013 werd een maximaal drukverschil over de Noordzee gemeten van orde 50 mbar overeenkomend met een waterstandsverschil van orde een halve meter over een afstand van ruwweg 1000 kilometer. Hoe lager de atmosferische druk hoe hoger de waterstand.

In deze wind en luchtdruk gerelateerde opzet zijn ook verschillende tijdschalen te herkennen. Naast een seizoens-variatie (in de tropen bijvoorbeeld de moesson, waarbij de wind over het jaar gedurende langere perioden consistent uit een bepaalde richting waait, of de typische herfst en winter stormen in onze omgeving) heeft ook een storm een bepaalde duur, die kan variëren van enkele uren tot enkele dagen.

In (Alkyon, 2009) is uitgebreid gekeken naar de relatie tussen het verloop van een storm (sterkte, duur en draaiing van de wind) en de opzet in de Waddenzee. Uit deze studie volgde dat ook de draaiing van de wind in belangrijke mate bijdraagt aan een opzet, waarschijnlijk doordat het water in de Waddenzee dan meer moeite heeft om weer terug te stromen naar de Noordzee.

Als een waterstandssignaal een voldoende lange periode dekt, kunnen deze seizoens-variaties worden gevangen middels de langperiodieke componenten, met perioden van een jaar, een half jaar, een maand en twee weken. Als de metingen beschikbaar zijn voor een jaar, kan op deze manier een indruk worden gekregen van de variaties in dat jaar. Aangezien rivierafvoeren, het weer, enzovoorts, van jaar tot jaar sterk kunnen variëren, zullen de gevonden amplitudes en fases van deze langperiodieke componenten ook sterk van jaar tot jaar variëren. We noemen ze langperiodieke componenten omdat ze een periode hebben die veel langer is dan die van de dagelijkse omwenteling van de aarde (24 uur). Indien de meetperiode meerdere jaren omvat, kan op deze manier een soort van gemiddelde seizoens-variatie worden bepaald. Het is wel van belang te constateren dat met een beperkte set van lang-periodieke getijcomponenten de werkelijke variaties maar in beperkte mate kunnen worden weergegeven.

Zoals hierboven aangegeven, is de waargenomen opzet een gevolg van verschillende processen, die allemaal tegelijkertijd optreden. Het probleem is dat het voor een waargenomen opzet onmogelijk is om de bijdragen van de verschillende processen afzonderlijk te kwantificeren. In een numerieke modelstudie kan door elk proces aan en uit te zetten, wel een beeld gekregen worden van de bijdrage van elk proces.

3

Beschrijving rekenexperiment

In dit hoofdstuk zal toegelicht worden hoe het rekenexperiment is opgezet. Als eerste wordt beschreven hoe we tot de keuze voor de 5 december 2013 storm zijn gekomen. Vervolgens wordt ingegaan op welke metingen zijn gebruikt. Als laatste wordt het modelinstrumentarium beschreven en hoe het in deze studie is toegepast.

3.1 KEUZE STORM

Voor de keuze van de storm is in dit rekenexperiment vooral gekeken naar de nauwkeurigheid waarmee het operationele modellensysteem van Rijkswaterstaat de stormvloeden kan voorspellen. Immers, juist daar waar de grootste afwijkingen optreden bestaan de beste mogelijkheden om tot significante verbeteringen te komen. Om specifiek te onderzoeken wat de oorzaak is waarom de hoogwatervoorspellingen onnauwkeurig worden, is het van belang een storm te selecteren waar die afwijking daadwerkelijk groot is geweest.

3.1.1 AANPAK

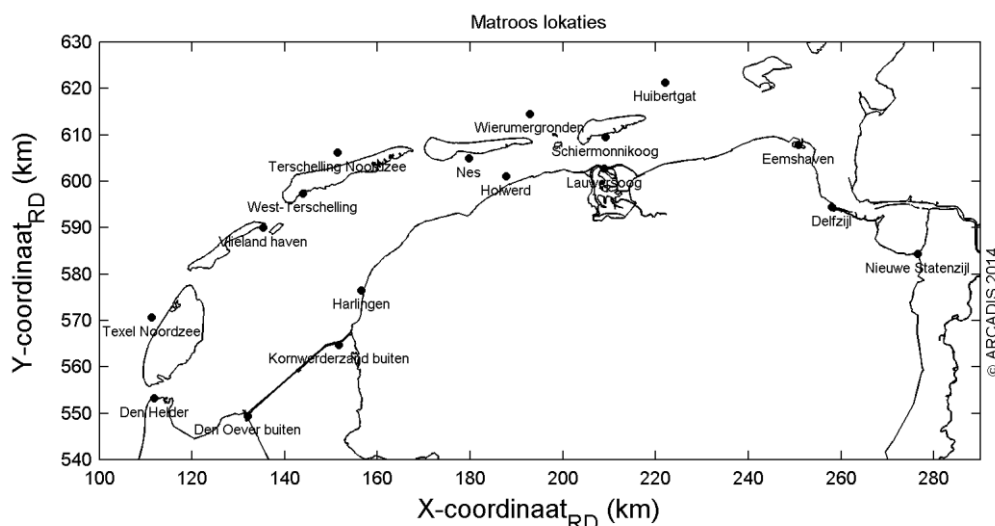
Aangezien we geïnteresseerd zijn in een storm waarvoor de verwachte waterstanden een grote afwijking hebben vertoond met de werkelijk opgetreden waterstanden, is specifiek gekeken naar de waterstandsverwachtingen zoals die door het HMCN (Hydro Meteo Centrum Noordzee) zijn bepaald. Voor deze gegevens is gebruik gemaakt van de resultaten zoals die in het Informatiesysteem van Rijkswaterstaat Matroos zijn opgenomen (parameters: observed, hmcn_csm en hmcn_kustfijn). Deze gegevens zijn beschikbaar vanaf het stormseizoen 2008/2009 tot heden.

Voor een eerste selectie van de stormperiodes is gebruik gemaakt van de stormflitsen zoals die door Rijkswaterstaat worden afgegeven. Daar waar stormen meerdere dagen omvatten of stormdagen minder dan een dag uit elkaar liggen, zijn deze samengenomen. Op deze manier zijn 28 stormen geselecteerd, zie Tabel 3-1.

Storm	periode	storm	periode
1	01 + 03 oktober 2008	15	16-17 december 2011
2	16 oktober 2008	16	23-24 december 2011
3	21-22 november 2008	17	28-30 december 2011
4	20 december 2008	18	03-07 januari 2012
5	10 februari 2009	19	12-13 januari 2012
6	04 oktober 2009	20	21-22 januari 2012
7	30 januari 2010	21	14-15 februari 2012
8	30 augustus 2010	22	09 december 2012
9	24 oktober 2010	23	30-31 januari 2013
10	12 november 2010	24	10 oktober 2013
11	04 februari 2011	25	28 oktober 2013
12	25 + 27-28 november 2011	26	04 + 06 november 2013
13	03 december 2011	27	30 november 2013
14	07-09 december 2011	28	05-07 december 2013

Tabel 3-1 Overzicht van de opgetreden stormen, periode stormseizoen 2008/2009 tot heden

Figuur 3-1 geeft een overzicht van de in het interessegebied beschikbare waterstand stations.



Figuur 3-1 Locaties meetstations Matroos

Per storm is voor elk station de maximaal bereikte waterstand bepaald en het tijdstip waarop dat is opgetreden. Hierbij is steeds de periode van één dag voor tot één dag na de bovengenoemde periode genomen. Deze aanpak leidt ertoe dat voor stormen die over meerder dagen voortduren het moment dat de maximale waterstand optreedt op een andere dag kan liggen, maar dit kan zelfs het geval zijn indien dit moment voor hetzelfde getij geldt. De looptijd van de getijgolf tussen Den Helder en Delfzijl bedraagt ongeveer 4½ tot 5 uur (Getijtafels van Nederland, 2014).

Per station is de waterstandvoorspelling van tenminste 6 uur voorafgaand aan het moment van hoog water uit Matroos opgehaald. De beschikbaarheid van de stations bleek het best in de resultaten die met het Kuststrook model zijn bepaald. Niet voor alle stormen waren resultaten voorhanden. Opvallend was dat voor de storm in de nacht van 27 op 28 november 2011 voor geen enkel station gegevens in Matroos beschikbaar zijn. De oorzaak hiervoor is onbekend.

Op basis van de voorspellingen is het voorspelde hoog water en het bijbehorende tijdstip bepaald. Waar het verschil meer dan 2½ uur bedraagt, is gekeken wat er aan de hand was. Veelal trad in de voorspelling een tweede hoogwater op, dat hoger uitkwam dan het eerste. In dat geval is handmatig het juiste hoog water en tijdstip bepaald, door te kijken naar de vorm van de getijkromme (nabij Den Helder zit er een agger in het getij rond hoog water).

3.1.2 RESULTATEN

De resultaten van de in paragraaf 3.1 beschreven analyse laten het volgende beeld zien:

- 5 jan 2012, 's middags (storm 18) toont de grootste spreiding in waterstandsverschil tussen voorspelling en meting. In vrijwel alle stations wordt de waterstand overschat. De grootste overschatting bedraagt 44 cm (Harlingen). In Delfzijl en Nieuwe Statenzijl werden hogere waterstanden verwacht dan die werkelijk zijn opgetreden. In Nieuwe Statenzijl bedroeg het verschil 36 cm (NAP + 3,57 m tegen NAP +3,21 m).
- 30-31 jan 2013 's nachts (storm 23) toont juist een kleine spreiding in afwijkingen, en een grote positieve gemiddelde afwijking. De waterstanden werden allemaal 17 tot 33 cm te hoog verwacht. De gemiddelde afwijking bedraagt voor deze storm 25 cm.
- 5-6 dec 2013 's nachts (storm 28) laat de grootste afwijking tussen verwachtte en werkelijk opgetreden waterstand zien: 74 cm te laag in Nieuwe Statenzijl (NAP +4,46 m tegen NAP +5,20 m). Vrijwel alle stations lieten lagere verwachtingen zien, -30 tot -60 cm in de westelijke Waddenzee. In het Eems-Dollard estuarium liepen de verschillen op van -31 cm in Eemshaven, -60 cm in Delfzijl tot de hierboven genoemde 74 cm in Nieuwe Statenzijl. In Huibertgat en Wierumergronden werden de waterstanden tot op 2 cm nauwkeurig voorspeld.

3.1.3 ONDERBOUWING

De laatste van de drie genoemde stormen is gekozen om in meer detail te bestuderen. Het feit dat de waterstanden op basis van de modelberekeningen te laag werden verwacht, maakt dit uit het oogpunt van operationele verwachtingen en ontwerpwaterstanden in het kader van hydraulische randvoorwaarden een interessante storm.

In (ARCADIS, 2009) is gebleken dat golf-stroom-interactie zorgt voor een extra opzet van de waterstand in de Waddenzee. Het feit dat de resultaten voor Huibertgat en Wierumergronden, buiten de Waddenzee, wel goed overeenkomen met de metingen, kan een indicatie zijn dat dit een relevant effect is, wat het waard is nader te bestuderen.

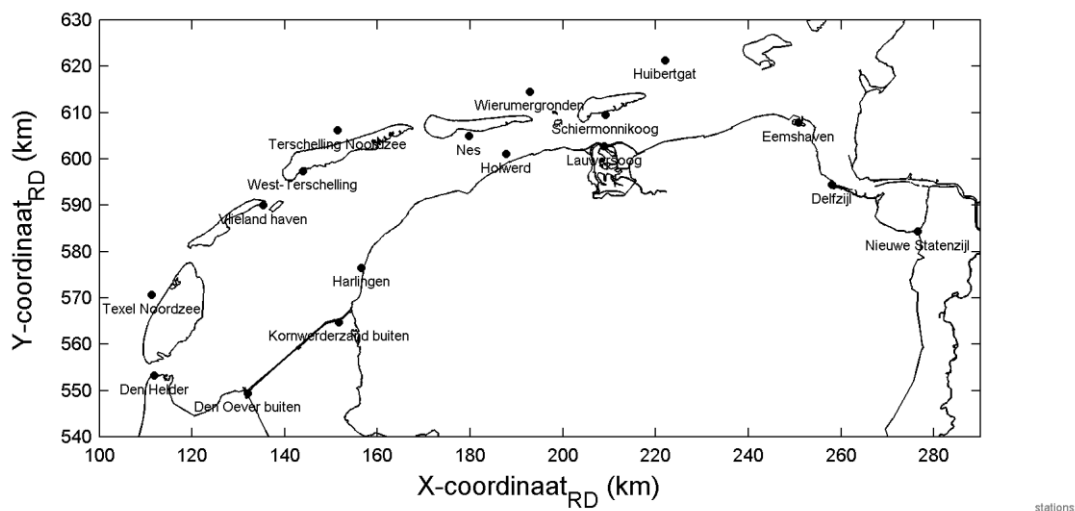
Ook als wordt gekeken naar de hoogst gemeten waterstanden voor deze storm, is dat de maximale waarde voor deze 28 stormperiodes. Deze liggen een halve tot twee meter boven de hoogste waterstanden van de stormen van 5 jan 2012, 's middags en 30-31 jan 2013 's nachts. Voor de storm in de nacht van 27 op 28 november 2011 zijn geen voorspellingen beschikbaar, maar de opgetreden waterstanden liggen in de zelfde orde van grootte als de andere twee stormen.

3.2 GEBRUIKTE GEGEVENS

Voor deze studie zijn vanuit verschillende bronnen gegevens gebruikt. Voor een deel betreft het gegevens die zijn gebruikt om het model op te zetten of aan te sturen, andere gegevens zijn gebruikt om het model te kalibreren en valideren.

Waterstanden

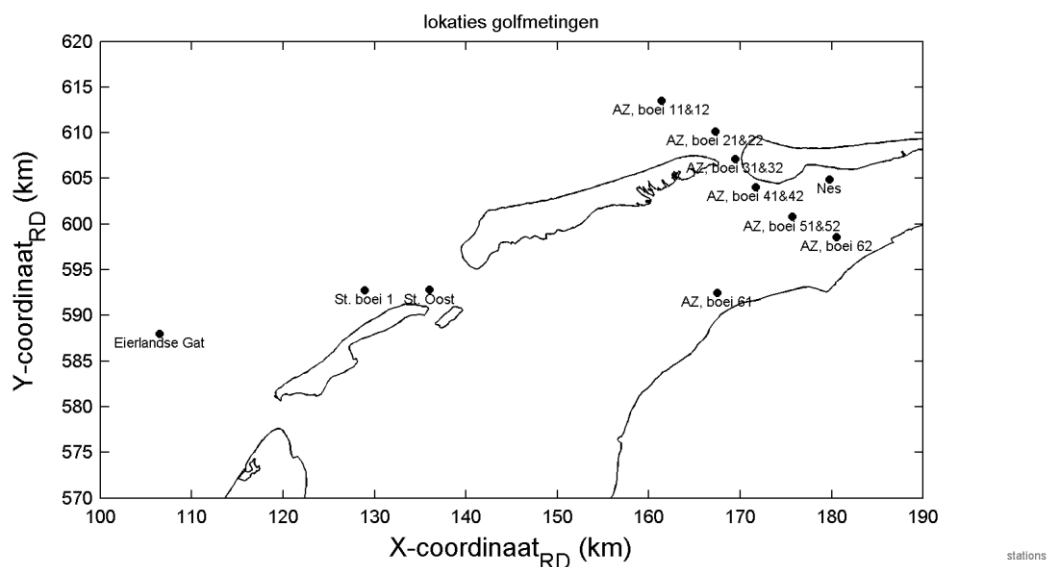
Waterstandsmetingen zijn verkregen via Waterbase (live.waterbase.nl). De stations waarvoor metingen zijn bekeken, liggen allemaal in het interessegebied. In Figuur 3-2 is de ligging van de stations weergegeven.



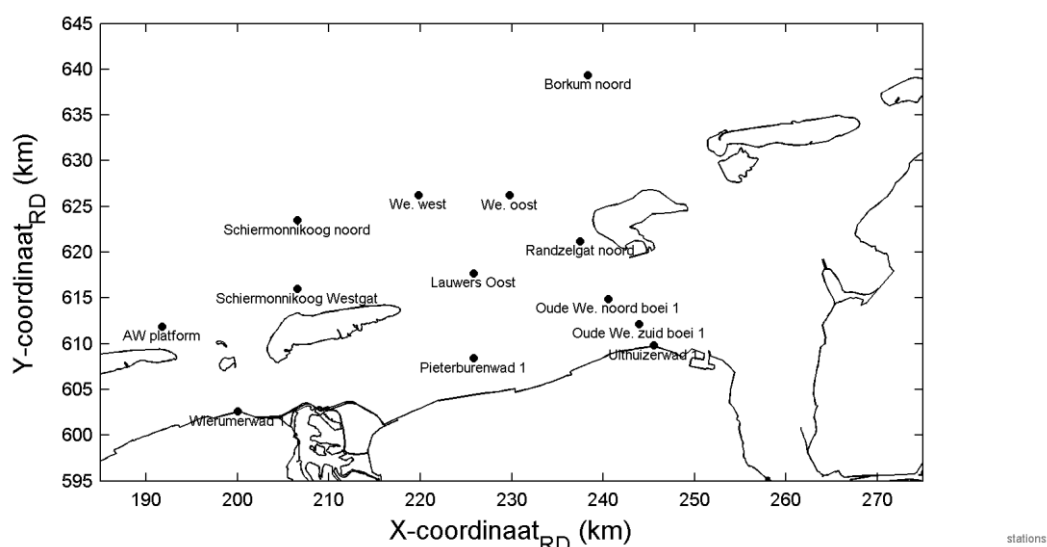
Figuur 3-2 Locaties waterstandsmetingen Waterbase

Golfgegevens

Voor de golfgegevens is gebruik gemaakt van de metingen die Deltares voor hun studie (Deltares, 2014) hebben verzameld. De locaties zijn weergegeven in Figuur 3-3 en Figuur 3-4.



Figuur 3-3 Locaties golfmetingen westelijke Waddenzee (AZ = Amelandse zeegat, St. = Stortemelk)



Figuur 3-4 Locaties golfmetingen oostelijke Waddenzee (We = Westereems, AW = Ameland Westgat)

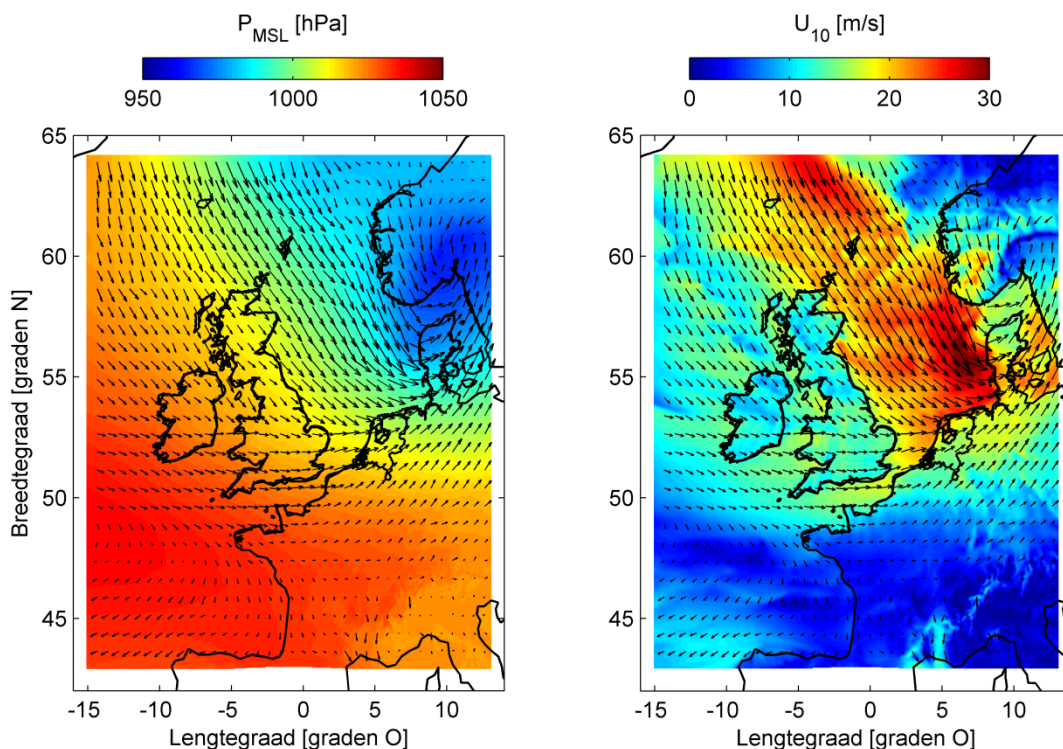
De volgende grootheden zijn gegeven, hoewel ze niet voor alle stations allemaal beschikbaar zijn:

- frequentie waar het energiespectrum maximaal is (piekfrequentie)
- significante golfhoogte uit energiespectrum van 30-500 mHz
- gemiddelde golfperiode uit spectrale momenten m-1+m0 van 30-500 mHz
- gemiddelde golfperiode uit spectrale momenten m-1+m0 van 30-1000 mHz
- gemiddelde richting uit golfrichtingsspectrum van 30-500 mHz

Meteocondities

De meteorologische condities zijn met het WRF-NMM model bepaald. Er is gebruik gemaakt van WRF-NMM (versie 3.6) op 2 rekenroosters, één met een resolutie van orde 3 km en één met een resolutie van orde 1 km. Het 3 km model is op de rand aangestuurd met GFS analyses van het NCEP. Dit 0,5 graden resolutie model (ongeveer 55 bij 35 km) geeft uitvoer elke 6 uur en is via de dataserver <http://www.nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfs4> openbaar beschikbaar. Hiervan is ook gebruik gemaakt om het model te initialiseren. De randen van het rooster zijn voldoende ver weg gekozen, om in het interessegebied geen effect te zien van deze in ruimte en tijd relatief grove resolutie. De rekentijdstap bedraagt 9 seconden. De uitvoer van het 3 km model is vervolgens geïnterpoleerd naar een regelmatig rooster met een resolutie van 0,03 bij 0,03 graad (ongeveer 33 bij 33 km) ter gebruik in de Delft3D simulaties.

Binnen het 3 km domein is het fijnere 1 km domein genest. Dit model dekt het gebied van het DCSMnest rooster. Hiervoor zijn als randvoorwaarden elk uur de resultaten van het 3 km model opgelegd. Als rekentijdstap is uitgegaan van 3 seconden. Deze resultaten zijn naar een regelmatig, 0,01 bij 0,01 graad rooster geïnterpoleerd ten behoeve van Delft3D. Een voorbeeld van de uitvoer van het WRF-NMM 3 km model wordt gegeven in Figuur 3-5. **Error! Reference source not found.** ten tijde van het hoogtepunt van de storm in de omgeving van de Waddenzee. Rond dit tijdstip ligt een lagedrukgebied gecentreerd bij het Skagerrak (Figuur 3-5 links). Langs het front komen relatief hoge windsnelheden voor (Figuur 3-5 rechts).



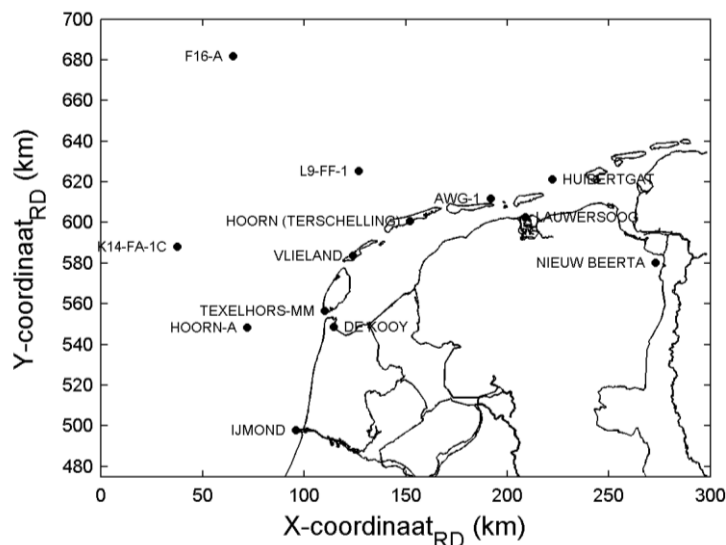
Figuur 3-5 Gemodelleerde drukvelden (links) en windvelden (rechts) van het WRF-NMM 3 km model op 05 December 14:00 h UTC.

Via het programma CALMET zijn de 1 km resultaten verder verdicht naar een 200 bij 200 m resolutie. Hierbij wordt rekening gehouden met een meer gedetailleerde bodemligging en ruwheid, waardoor zeker de land-water overgangen beter worden gerepresenteerd.

Voor alle resoluties is elke 10 minuten uitvoer gegenereerd. De voor Delft3D relevante parameters zijn:

- u- en v-windsnelheid op 10 m hoogte;
- druk op gemiddeld zeeniveau (MSL);
- temperatuur op 2 m hoogte;
- relatieve luchtvochtigheid op 2 m hoogte, en
- de bewolgingsgraad.

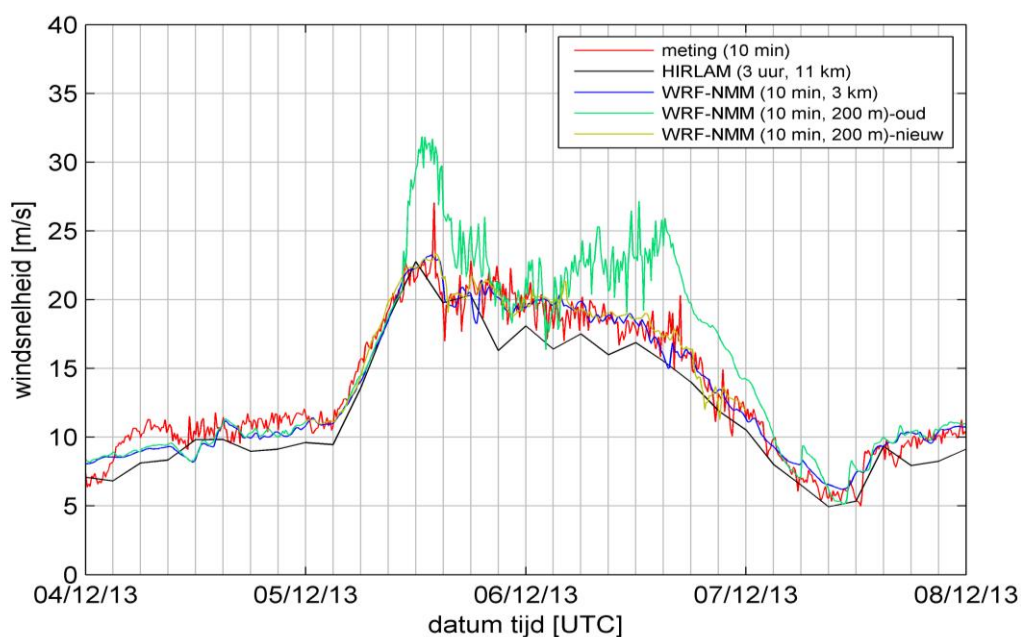
Naast de WRF-NMM velden is gebruik gemaakt van de resultaten van het HIRLAM model van het KNMI. Om te zien of de windsnelheden en -richtingen uit het WRF-NMM 3 km en het HIRLAM model goed overeenkomen met de metingen, zijn 10-minuten meetseries van de wind in een aantal stations bij het KNMI opgevraagd. Voor een aantal stations, gelegen nabij de kust of op zee, zijn de vergelijkingen gegeven in Bijlage A. De locaties zijn weergegeven in Figuur 3-6.



Figuur 3-6 Locaties windmetingen

De beide modelresultaten komen in het algemeen goed met elkaar overeen. De 1 km resultaten komen erg goed overeen met de 200 m resultaten. De SENES resultaten met een interval van 10 minuten vertonen veel meer variatie, maar niet zoveel als in de metingen. Bij de HIRLAM-uitvoer is dit vanwege de 3-uurlijkse velden helemaal niet het geval.

In eerste instantie bleken de WRF-NMM uitkomsten met 200 m resolutie significant af te wijken, zoals bijvoorbeeld voor station Texelhors-MM is weergegeven in **Figuur 3-7**. Om de oorzaak te achterhalen, is voor 5 en 6 december het model opnieuw gedraaid met een kleinere tijdstap. Blijkbaar was de atmosfeer die dag dermate instabiel, dat in het model numerieke instabiliteiten ontstonden. De resultaten (lijn 'WRF-NMM (10 min, 200 m) – nieuw') lijken veel beter op de 3 km resultaten. Aangezien deze nieuwe resultaten te laat beschikbaar kwamen, zijn deze in deze studie niet meer toegepast.



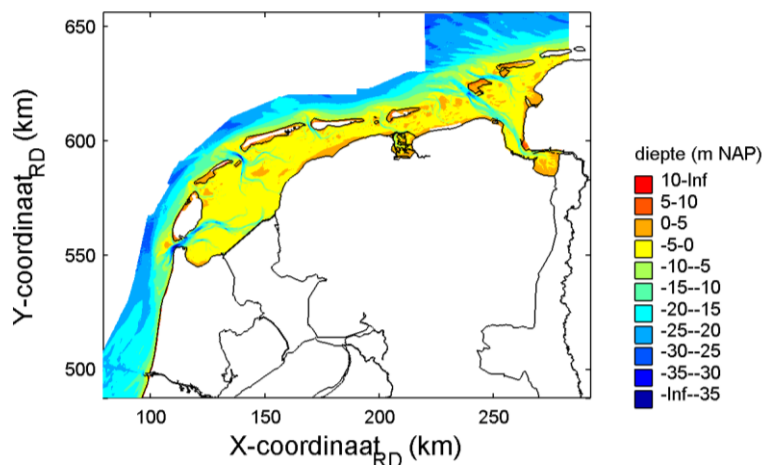
Figuur 3-7 Gemeten en gemodelleerde windsnelheid te Texelhors-MM voor verschillende atmosferische modellen.

Watertemperatuur

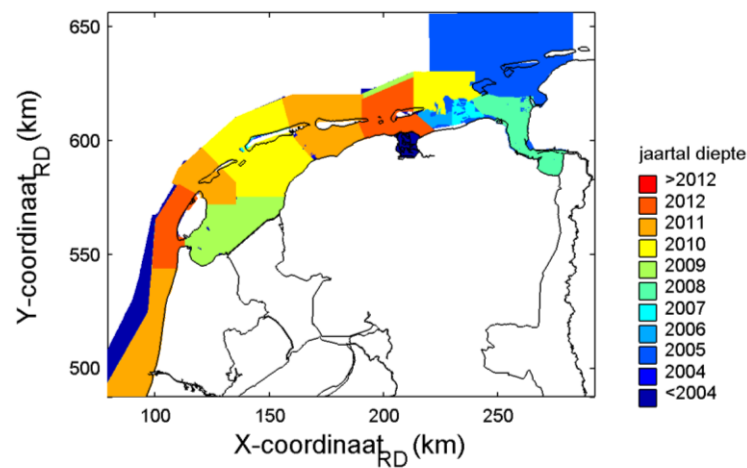
De watertemperatuur op zee en voor de rivierafvoeren zijn uit Waterbase gehaald. Op zee is platform K13 gebruikt, voor de debieten bij Den Oever en Kornwerderzand is de temperatuur in Lelystad Haven gebruikt en voor de Eems de temperatuur bij Lobith.

Bodemligging Waddenzee

Voor de bodemschematisatie in de Waddenzee is gebruik gemaakt van de 20x20 m vaklodingen van Rijkswaterstaat. Hiervan is in elk gebied steeds de meest recente waarde genomen, waardoor de bodem is samengesteld op basis van gegevens voor de periode 2003 tot en met 2012. Zie hieronder Figuur 3-8 en Figuur 3-9.



Figuur 3-8 Dieptegegevens vaklodingen.



Figuur 3-9 Jaartal dieptegegevens vaklodingen.

Daar waar geen gegevens beschikbaar zijn, is uitgegaan van de DCSMv6 bodemschematisatie.

3.3 MODELOPZET

Voor dit rekenexperiment kan onderscheid worden gemaakt in 3 typen berekeningen:

- waterbeweging – astronomisch,
- waterbeweging – met wind,
- waterbeweging – met wind en golven.

Als eerste is gekeken naar hoe nauwkeurig het model in staat is om de astronomische waterstanden te reproduceren. Vervolgens is de 5-6 december 2013 storm gesimuleerd, zonder golven. Hierbij zijn een aantal gevoeligheden van modelinstellingen en parameterisering onderzocht. Tenslotte is het model gedraaid waarin ook golven als proces zijn meegenomen. In de volgende paragrafen wordt de opzet van de verschillende modellen en de gemaakte keuzes beschreven en toegelicht.

Er is gebruik gemaakt van Delft3D tags 3574 en SWAN versie 41.01.

3.3.1 DELFT3D-FLOW

Voor de stromingsberekeningen is in deze studie uitgegaan van het nieuwe DCSMv6 model (Deltares, 2013). Dit model is gebruikt om te kijken naar de grootschalige getijvoortplanting en in meer detail naar hoe de gemiddelde waterstand over een jaar varieert.

Het rooster (in dit rapport verder aangeduid als DCSMv6) dekt het gebied, lopend van 14,975 °W tot aan de kust en in het Kattegat tot 13 °O en van 43,01667 tot 64 °N. De resolutie in west-oost richting bedraagt 0,025 graden en in zuid-noord richting 0,01667 graden. Het aantal actieve roostercellen bedraagt 849.102.

Het DCSMv6 model wordt op de open rand aangedreven met amplitudes en fases van de getijcomponenten Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, SA, 2Q1, SIGMA1, RO1, CH11, PI1, FI1, THETA1, 2N2, MU2, NU2, LABDA2, L2 en T2. Voor de perioden van deze componenten wordt verwezen naar de standaardliteratuur over getijanalyses.

Voor de randvoorwaarden is tevens gekeken naar aandrijving met componenten die afkomstig zijn van Matsumoto (Matsumoto et al, 2000). Hierbij worden de componenten Q1, O1, M1, P1, K1, J1, OO1, 2N2, MU2, N2, NU2, M2, L2, T2, S2, K2, MF, MSF, MM, MSM, SSA en SA opgelegd. De samenstelling van de componenten set is iets verschillend. Matsumoto neemt wat meer langperiodieke componenten mee. In Bijlage B wordt voor een flink aantal stations de resultaten voor de verschillende aandrijvingen vergeleken.

Voor de viscositeit is een constante waarde van 10 m²/s genomen, Manning's n waarde voor de bodemruwheid zijn uit het Deltares model overgenomen en variëren tussen 0,012 en 0,119 m^{1/3}/s. Als rekentijd-stap wordt 2 minuten aangehouden. Overigens lijken deze ruwheidswaarden niet realistisch. Ze zijn middels filter technieken bepaald.

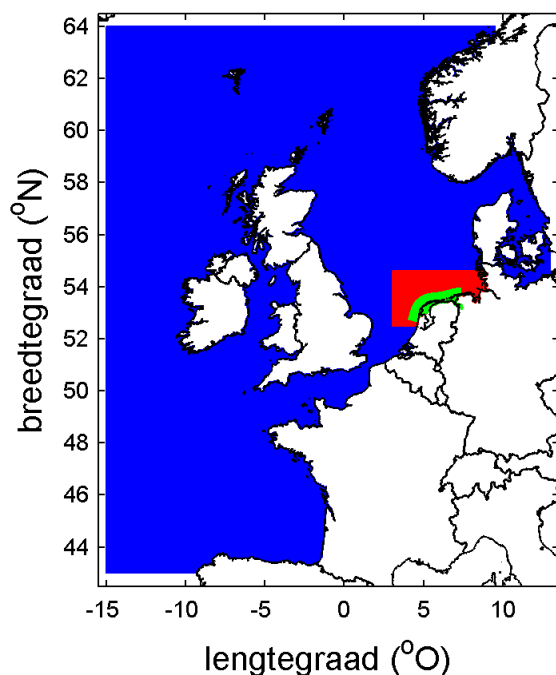
Voor de berekeningen voor de periode van de decemberstorm, is er binnen dit rooster middels domeindecompositie een met een factor 3 verfijnd rooster genest. (Bij domeindecompositie worden tijdens de berekening elke tijdstap informatie tussen beide modellen uitgewisseld.) Dit rooster (DCSM-nest) dekt het gebied van 3,05 tot 9,275 °O en 52,5 tot 54,6 °N en telt 178.850 actieve roostercellen. De bodemligging voor dit model is gebaseerd op de vaklodingen, aangevuld met geïnterpoleerde waarden van het DCSMv6 model. Omdat dit model fijner is dan het DCSMv6 model, is de rekentijdstap gereduceerd tot 1 minuut, in het gecombineerde model.

In het DCSMv6 model van Deltares zoals wij dat hebben ontvangen, worden geen rivier- en lozingsdebieten meegenomen. Aangezien we in het rekenexperiment zoet-zout effecten wel willen meenemen, zijn afvoeren uit het oorspronkelijke DCSM model van Rijkswaterstaat overgenomen:

- In Groot-Brittannië:
 - Firth of Forth
 - Humber
 - Thames
- In Frankrijk
 - Seine
- In Nederland
 - Schelde
 - Haringvliet
 - Nieuwe Waterweg
 - IJmuiden
 - Den Oever
 - Kornwerderzand
- En in Duitsland:
 - Eems
 - Weser
 - Elbe

Indien tijdseries voor 2013 beschikbaar zijn, zijn die gebruikt. Dit is het geval voor het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg. Anders zijn langjarige afvoeren opgelegd.

Het derde rooster is gebaseerd op het Kuststrook model van Rijkswaterstaat en volgt meer de oriëntatie van de kust. Ten opzichte van het Kuststrook model is het rooster langs de kust met een factor 1,5 verdicht en loodrecht op de kust met een factor 3. Het rooster dekt de Waddenzee, en loopt van Bergen aan Zee tot Norderney. De roosters zijn weergegeven in Figuur 3-10.



Figuur 3-10 Overzicht van de stromingsrekenroosters (blauw = DCSMv6, rood = DCSMnest, groen = Kustwad).

De afvoeren bij Den Oever, Kornwerderzand en de Eems zijn in het model meegenomen. Het model wordt met een rekentijdstap van 15 sec doorgerekend. Viscositeit en ruwheid zijn op constante waarden van $5 \text{ m}^2/\text{s}$ en $0,022 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gezet. In de verticaal zijn 4 lagen van elk 0,25% van de waterdiepte toegepast.

Het model is genest in het DCSMnest rooster. Op de rand op open zee worden waterstanden opgelegd, op de twee randen naar de kust toe Riemann randvoorwaarden en op de open rand ten zuiden van Norderney ook waterstanden. Naast saliniteit wordt in dit model ook temperatuur als proces meegenomen. Op de modelrand is de gemeten temperatuur van K13A Platform gebruikt, voor de rivier- en lozingsafvoeren gegevens van Waterbase. Daarnaast dienen de luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid en bewolgingsgraad voorgeschreven te worden. Deze zijn uit de meteomodellen van HIRLAM en SENES gehaald.

In de simulaties met wind- en drukvelden is op de open rand van het DCSMv6 model de drukcorrectie meegenomen, zodat het effect van de luchtdruk op de waterstand wordt meegenomen. In het geneste model is dit uiteraard niet gedaan, aangezien dit effect dan al in de overgezette randvoorwaarden zit besloten.

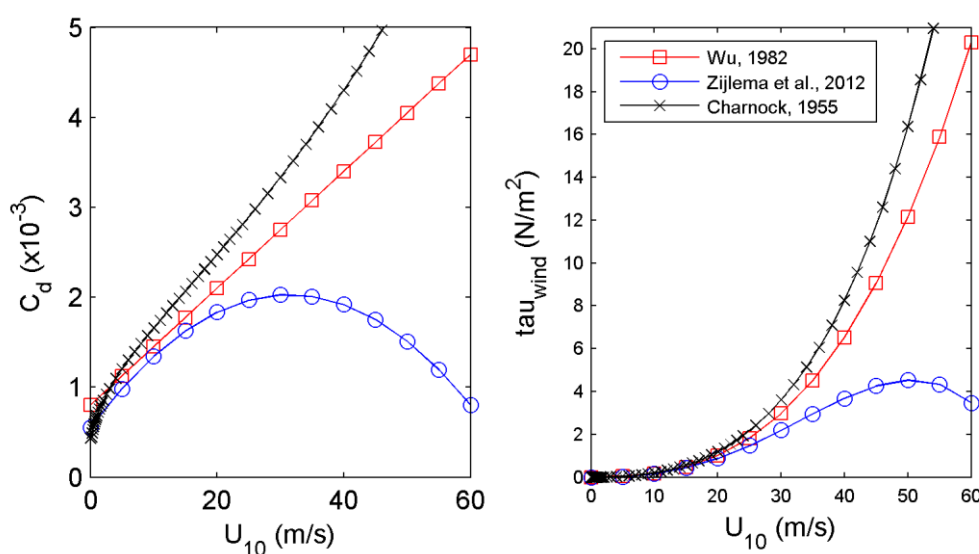
Voor de vertaling van de windsnelheid op 10 m hoogte naar de schuifspanning op het oppervlak, wordt gebruik gemaakt van de formule:

$$\tau_w = \rho_a C_d U_{10}^2$$

Vergelijking 1

Met ρ_a de dichtheid van lucht, C_d een windschuifspanningscoëfficiënt en U_{10} de windsnelheid op 10 m hoogte. De C_d is ook afhankelijk van de windsnelheid. Veel gebruikte formuleringen zijn die van (Wu, 1982), (Charnock, 1955) en (Zijlema et al, 2012). In dit rapport zullen deze worden afgekort tot Wu, Charnock en Zijlema. In het modellensysteem van Rijkswaterstaat wordt meestal gebruik gemaakt van de formulering van Charnock, terwijl in SWAN de relatie van Zijlema et al. (daar 'FIT' genoemd) standaard wordt gebruikt. In onze simulaties waar Charnock is gebruikt, is deze volgens de lineaire fit uit (Alkyon, 2009) geschematiseerd, die tot circa 25 m/s (90 km/uur) goed overeenkomt.

Figuur 3-11 laat de afhankelijkheid zien van C_d en $C_d U_{10}^2$ als functie van de windsnelheid.



Figuur 3-11 Vergelijking van verschillende C_d -formuleringen.

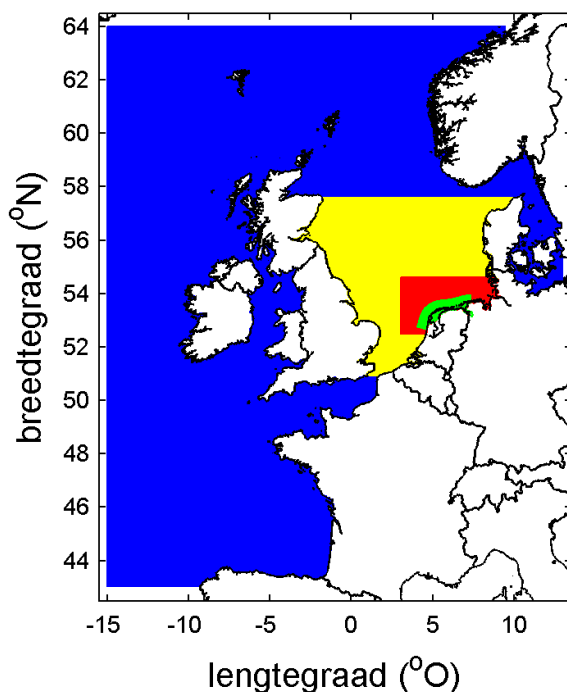
De figuur maakt duidelijk dat de C_d waarden voor Charnock en Wu bij toenemende wind blijven toenemen, hoewel deze soms ook op een waarde worden afgetopt. Volgens Zijlema et al. is de waarde voor C_d maximaal bij 31,5 m/s. De windschuifspanning met de Zijlema formulering bereikt een maximale waarde bij 51 m/s. Beide andere blijven toenemen, ook als de C_d zou zijn afgetopt. Tot circa 15 tot 20 m/s ontlopen de windschuifspanningen elkaar nauwelijks, maar daarboven beginnen toenemende verschillen op te treden. Voor de meerderheid van de opgetreden stormen zal het verschil in berekende stormopzet dus niet heel sterk afhangen van de gekozen parameterisatie. Als er echter wordt gekeken naar extreme stormen, zoals voor de hydraulische randvoorwaarden, dan begint deze keuze wel belangrijk te worden.

3.3.2 SWAN

Voor de golfvoortplantings-simulaties is in principe uitgegaan van dezelfde roosters als voor de waterbeweging. Maar door beperkingen aan het geheugengebruik, zijn er twee aanpassingen gedaan:

- Het bleek niet mogelijk om het gehele DCSMv6 rooster met die resolutie door te rekenen. Daarom is voor het verre buitengebied eerst op die schaal met een grover rooster (factor 3 in beide richtingen uitgedund) gerekend. Daarin is een uitsnede van het DCSMv6 rooster genest.
- Ook het Kustwad model bleek te groot. De resolutie op zee en in de Waddenzee is behouden, maar in de Eems vanaf Delfzijl is het rooster in de lengterichting met een factor 2 uitgedund.

De rekenroosters zijn in Figuur 3-12 weergegeven.



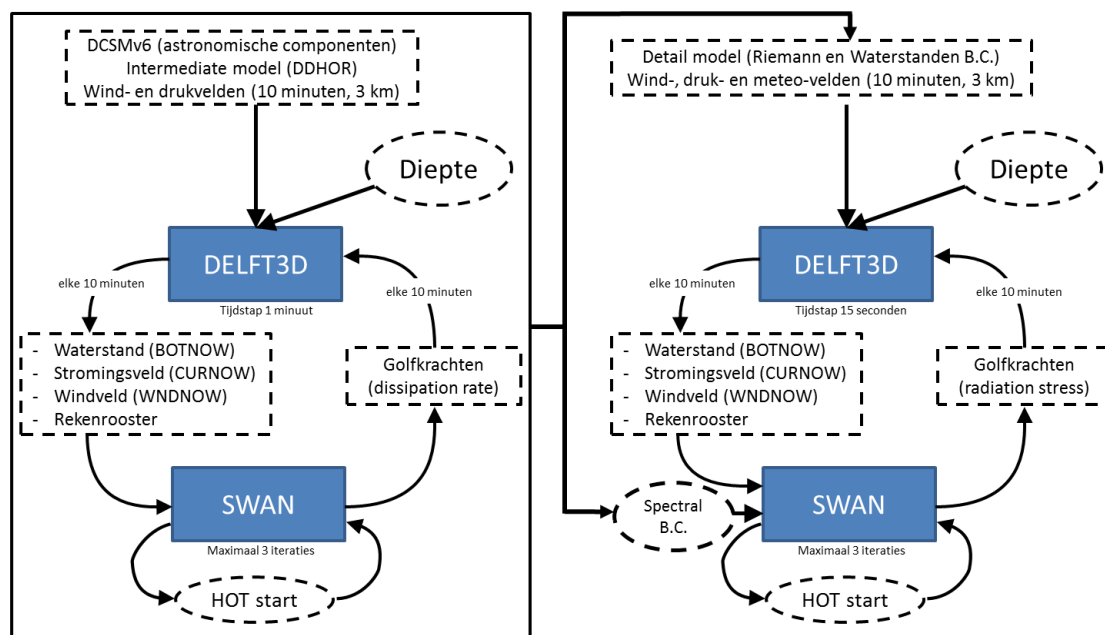
Figuur 3-12 Rekenroosters SWAN (blauw = uitgedunde versie DCSMv6, geel = uitsnede DCSMv6, rood = DCSMnest, groen = aangepast Kustwad).

Op de open rand zijn geen golfrandvoorwaarden opgelegd. Tijdens stormen worden de golven in grote mate lokaal bepaald, zodat deze keuze naar verwachting geen effect heeft op de golven in de omgeving van de Waddenzee. Binnen SWAN vindt het nesten van het ene model naar het andere plaats via 2D-spectra.

Voor de golfvoortplantings-simulaties zijn de volgende instellingen gekozen:

- niet-stationair, gebruik makend van hotstart files,
- koppelinterval 10 minuten,
- wind drag volgens Zijlema et al.,
- bodemwrijving volgens Jonswap met coëfficiënt $0,038 \text{ m}^2/\text{s}^3$,
- breker formulering van Battjes & Jansen (1978) met $\alpha = 1$ en $\gamma = 0,73$,
- whitecapping-formulering van Komen,
- geen diffractie en geen triads, wel quadruplets op basis van de DIA formulering (Hasselmann et al., 1985),
- golf geïnduceerde krachten volgens radiation stresses ("radiation stresses <2013") voor het detailmodel en volgens dissipation rate voor het overall model. Deze ruimtelijke overgang is ingegeven door praktische overwegingen; de simulatie met het detail model waarin de golf geïnduceerde krachten volgens de dissipation rate worden geformuleerd, bleek instabiel te worden.
- minimale diepte voor rekenen: 0,05 m (consistent met het stromingsmodel),
- spectrale resolutie van 10 graden (360 graden ruimte) en frequenties tussen 0,03 en 1,8 Hz (44 bins),
- maximaal aantal iteraties 3 per tijdstap (achteraf zou dit bij een tijdstap van 10 minuten kunnen worden teruggebracht tot één iteratie).

Figuur 3-13 geeft het proces weer van de wederzijdse koppeling tussen de waterbewegings- en de golfvoortplantingsmodellen.



Figuur 3-13 Diagram die de koppeling tussen golven en stroming weergeeft en de schakeling van overall model naar detailmodel.

In deze studie is voor het koppelinterval een waarde van 10 minuten gekozen. Hierbij is rekening gehouden met de aanbevelingen uit (Cats, 2014) en de beschikbaarheid van de WRF meteorogegevens.

Delft3D WAVES is de module binnen Delft3D die zorgt voor de communicatie tussen de stroming en de golven. Op het moment dat er een koppeling plaatsvindt, zorgt Delft3D WAVES ervoor dat de velden van de waterdiepte, stroomsnelheid en windsnelheid naar het rekenrooster van SWAN worden geïnterpooleerd, de invoerfile(s) van SWAN wordt klaargezet (rekening houdend met de gekozen parameters, zoals dissipatie, bodemwrijving, golf-golf-interactie, en opties, zoals stationair/instationair, wel/geen hotstart

file, enz), de SWAN-berekening(en) wordt (of worden) opgestart en na afloop worden de berekende golfkrachten weer naar het FLOW-rooster geïnterpoleerd.

3.4 AANPASSINGEN SOFTWARE

Tijdens de modelsimulaties is ARCADIS op enkele beperkingen van de gebruikte Delft3D software gestuit. Sinds 2011 is Delft3D echter Open Source, zodat het mogelijk was deze beperkingen aan te pakken en op te lossen. De sourcecode is gecompileerd met de 64 bits Intel compiler, zodat het computergeheugen minder problemen heeft met de omvang van de modellen (ruimere adresseerbaarheid).

3.4.1 AANPASSINGEN DELFT3D FLOW

De windschuifspanning wordt verondersteld een functie te zijn van de wind op 10 m hoogte. Dit is de algemeen geaccepteerde referentiehoogte die in de atmosferische modellen beschikbaar is.

In Delft3D FLOW wordt de windschuifspanning opgelegd middels 6 parameters, 3 windsnelheden en 3 bijbehorende windschuifspanningscoëfficiënten. Voor de tijdens de storm voorkomende windsnelheden (< 30 m/s) is het goed mogelijk om hiervoor de lineaire fit van (Charnock, 1955) te gebruiken. De windschuifspanningscoëfficiënt volgens (Zijlema et al, 2012) is speciaal in de code geprogrammeerd. Hiervoor is een speciale versie gecompileerd, die de opgegeven coëfficiënten negeert. In een testbakje is getest dat de aanpassing correct wordt verwerkt.

3.4.2 AANPASSINGEN DELFT3D WAVES

Voor het offline nesten van het DCSMnest en het Kustwad rooster is ervoor gekozen om het DCSMnest model 2D-spectra uit te laten voeren op de randpunten van het Kustwad rooster. Er is binnen Delft3D echter niet standaard een optie om die vervolgens tijdsafhankelijk op het geneste model op te leggen. In het verleden is ervoor gekozen om hierbij te verwijzen naar één bepaald bestand, en parallel aan de berekening een programma te laten draaien wat bijhoudt hoe ver de berekening is, en op het juiste moment het juiste nest-bestand klaarzet. Aangezien dit gevoelig is voor synchronisatie fouten, is ervoor gekozen om dit via een aanpassing in de code te laten plaatsvinden. Elk tijdstip wordt er verwezen naar een unieke bestandsnaam waarin de datum en het tijdstip van de berekening zijn verwerkt. Ook dit is uitgebreid getest op een correcte uitvoering.

3.4.3 AANPASSINGEN SWAN

Bij het nesten tussen verschillende SWAN sommen bleek de parameter ACLOC in swanser.for een waarde NaN te kunnen krijgen, waarna in de 2d-spectra nestfile de energiedichtheid werd weergegeven als een serie sterretjes. Dit probleem is nu voorlopig opgelost door de waarde op 0 te zetten. Omdat het voorkomen van dit probleem niet 1-op-1 aan één punt of een bepaald tijdstip kon worden gerelateerd, en gezien het aantal keren dat dit voorkwam klein was ten opzichte van het aantal keren dat er wordt genest in het grote aantal SWAN berekeningen, is aangenomen dat als hier enig effect van te zien is, dat dit lokaal is en niet permanent in de tijd. Naar verwachting blijft de nauwkeurigheid van het model gehandhaafd.

3.5 AFBAKENING

In de opzet van het rekenexperiment is ervan uitgegaan dat we komen tot een zo compleet mogelijke berekening, waarin zoveel als mogelijk fysica, resolutie en interactie wordt meegenomen. In de praktijk be-

tekent hoge resolutie ook lange rekentijden. De gevoeligheidsstudie zou juist antwoord moet geven op de vraag wat de beste keuzes zijn om tot optimale resultaten te komen.

Het eerste aspect waar in deze rapportage naar gekeken wordt, is het verschil tussen het grootschalige en het detail model.

Omdat de verwachting bestaat dat de wind het meest cruciale element is in een accurate waterstandsverwachting zijn vervolgens enkele gevoeligheden met betrekking tot de windforcering afgetast:

- keuze WRF-NMM of HIRLAM,
- keuze Charnock of Zijlema et al. windschuifspanningscoëfficiënt, en
- keuze ruimtelijke en temporele resolutie van velden van atmosferische variabelen.

Voor het detail model is ook het effect van 2D tegenover 3D bekeken.

Op basis van de resultaten is als laatste gekeken naar het effect van het meenemen van golven op de waterstanden. Ook hierbij is de gevoeligheid onderzocht van Charnock of Zijlema.

Daar staan een (groot) aantal aspecten tegenover die we niet hebben onderzocht:

- Bodemligging op basis van recente gegevens; er is niet gekeken naar de gevoeligheid van de resultaten voor bodemliggingen uit andere jaren.
- Keuzes binnen SWAN, we zijn nu uitgegaan van de op basis van literatuur aanbevolen instellingen.
- Andere bronnen van windinformatie (bijv. satelliet scatterometer data) of u^* uit meteomodel in plaats van de U_{10} .
- Andere stormen (in hoeverre zijn de gekozen instellingen afhankelijk van de typische karakteristieken van één storm)

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de simulaties gepresenteerd en geanalyseerd. Als eerste worden de resultaten gegeven voor sommen die gericht zijn op de astronomische waterstanden, dat is, zonder de complexe werking van wind en golven. Daarna volgen de resultaten voor de referentiesom zonder golven. Vervolgens worden een aantal gevoeligheden voor bepaalde modelkeuzes beschouwd. Tenslotte worden de resultaten van de simulaties met golven beschreven, waarvoor de instellingen gebaseerd zijn op de bevindingen van de gevoeligheidsstudie.

4.1 SIMULATIES VOOR ASTRONOMISCHE CONDITIES

4.1.1 GEVOELIGHEID LANGPERIODIEKE COMPONENTEN

Om de nauwkeurigheid van het model voor astronomische condities te bepalen is het DCSMv6 model gedraaid voor een periode van ruim een jaar. Getijanalyses voor 98 componenten zijn uitgevoerd met behulp van het programma Delft3D-TIDE. Dit is gedaan voor zowel de modelresultaten als de metingen.

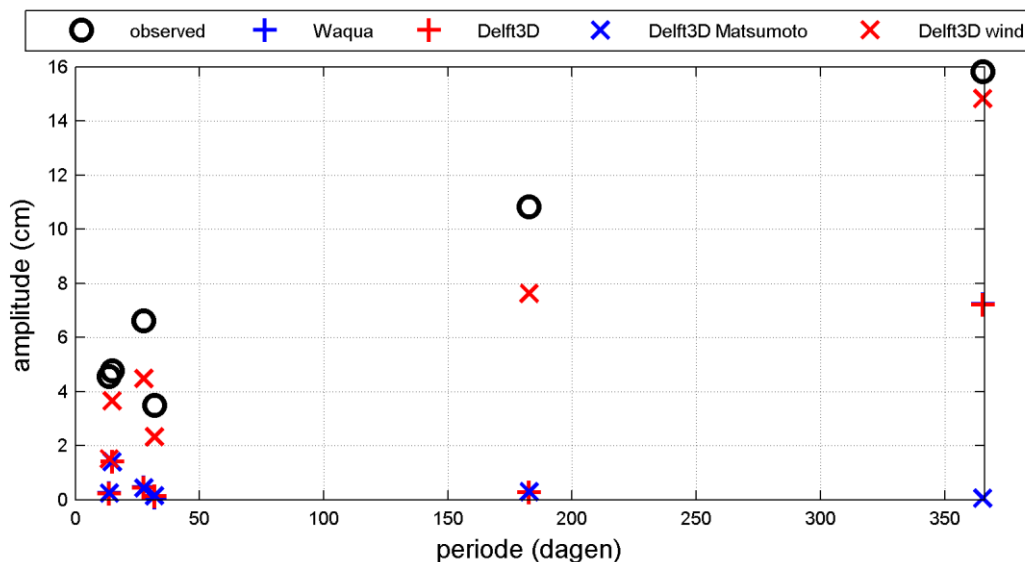
De volgende sommen zijn met elkaar vergeleken:

- oorspronkelijke WAQUA model,
- het naar Delft3D omgezette model,
- het Delft3D model met randvoorwaarden op basis van (Matsumoto, CCC), en
- het Delft3D model met de windtijdserie van IJmuiden.

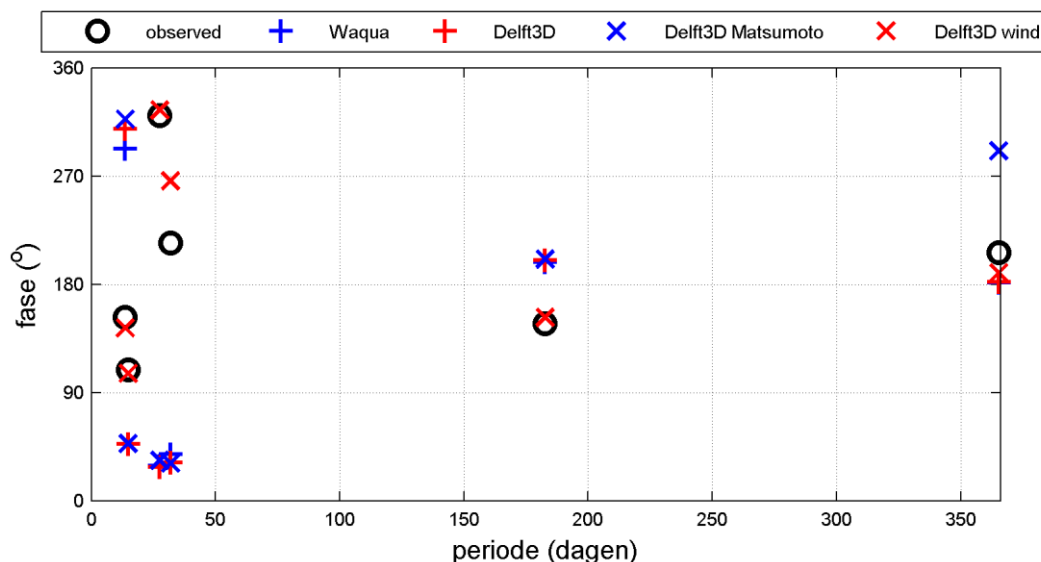
In de randvoorwaarden van Matsumoto worden meerdere langperiodieke componenten meegenomen, vandaar dat het interessant is om te kijken of daarmee een verbetering van de middenstand kan worden bereikt. Omdat naar verwachting in Nederland de middenstand voor het grootste deel wordt bepaald door de wind, is als eerste test geprobeerd om de gemeten wind bij IJmuiden (als een eerste benadering van de wind op de Noordzee) ruimtelijk uniform op het gehele model op te leggen.

Voor Huibertgat is in Figuur 4-1 de amplitude van de langperiodieke componenten vergeleken voor de metingen en de verschillende simulaties. De Waqua en Delft3D resultaten komen onderling goed met elkaar overeen. Ook de simulatie met randvoorwaarden uit (Matsumoto, CC) liggen voor de meeste componenten dicht bij elkaar, met uitzondering van de SA-component (periode 1 jaar). De opgelegde amplitude op de open rand is voor deze component zeer klein. Voor al deze resultaten zonder wind geldt dat de amplitudes veel kleiner zijn dan wat op basis van de observaties wordt verwacht. Zodra er wind op het model wordt opgelegd, komen de amplitudes al direct veel dicht bij de observaties te liggen. Dit is zichtbaar in Figuur 4-1. De aangegeven componenten hebben periodes van 1 jaar, een half jaar, rond de 28 dagen en rond de 14 dagen. Aan de rondjes is te zien dat deze componenten een significante bijdrage leveren aan de middenstand voor een bewuste storm. De componenten met een periode van een jaar en een

half jaar, zijn weliswaar te bepalen over vele jaren als een gemiddelde, echter de amplitude van deze langperiodieke componenten varieert sterk van jaar tot jaar. Ze vormen eigenlijk een mix van getij invloeden en wind invloeden. Juist doordat het ene jaar qua winter het andere jaar niet is, vormen ze wel een belangrijke bijdrage in de middenstanden tijdens een storm. Uit de resultaten van de simulaties voor deze Sinterklaasstorm blijkt bijvoorbeeld dat het astronomische getij al 10 a 20 cm lager is dan de voorspellingen voor hetzelfde station zie Figuur 4-6.



Figuur 4-1 Amplitudes van de langperiodieke componenten voor Huibertgat.



Figuur 4-2 Fases van de langperiodieke componenten voor Huibertgat.

In figuur 4.2 is dezelfde vergelijking uitgevoerd voor de fases. De fases in de som met wind komen zeer goed overeen met de observaties. Dit is een belangrijke indicatie dat de wind een belangrijke bijdrage levert aan de variaties van de middenstand over het jaar. Waarschijnlijk zullen de resultaten nog verder verbeteren indien realistische wind- en drukvelden uit HIRLAM of WRF-NMM worden toegepast, in plaats van alleen de wind bij IJmuiden, waarbij de ruimtelijke variatie in de wind wordt genegeerd.

In Bijlage B zijn in figuren 1a tot en met 5a de amplitudes en fases voor meer stations opgenomen. Figuur 6 in Bijlage B geeft de amplitudes en fases van de SA component voor alle stations in het interessegebied. De figuur maakt duidelijk dat het hierboven beschreven beeld voor Huibertgat ook voor de andere stations geldt.

4.1.2 GEVOELIGHEID OVERIGE COMPONENTEN

Op eenzelfde manier als voor de langperiodieke componenten, is eenzelfde analyse uitgevoerd voor de overige componenten. In Bijlage B zijn in figuren 1b, 1c en 1d de amplitudes weergegeven voor respectievelijk de enkel daagse, dubbel daagse en viermaal daagse componenten in station Texel Noordzee. Figuren 2 tot en met 5 laten hetzelfde zien voor een aantal andere stations. De resultaten geven aan dat de resultaten van de verschillende modellen onderling geen grote verschillen te zien geven. Dat geldt zeker voor de amplitudes. Ook de fases komen goed met elkaar overeen, met uitzondering van componenten waarvan de amplitude zeer klein is.

In figuren 7 tot en met 11 in Bijlage B zijn voor een aantal hoofdcomponenten de amplitudes en fases voor alle stations in het interessegebied weergegeven. Deze figuren bevestigen het beeld dat er geen duidelijke voorkeur voor de oorspronkelijke of de Matsumoto-randvoorwaarden is. Wel geldt dat het model (bodemplugging en ruwheid) door Deltares is afgeregeld voor de oorspronkelijke set componenten en dat er geen kalibratie is uitgevoerd voor het model met de Matsumoto-randvoorwaarden. Juist daarom is in het vervolg gekozen voor aansturing met de oorspronkelijke componenten van het model.

4.1.3 CONCLUSIES

Het DCSMv6 model geeft een goede weergave van de getijvoortplanting in het interessegebied. De getijcomponenten die standaard in het model worden toegepast resulteren in een goede overeenkomst met geobserveerde amplitudes en fases.

De variatie in middenstand wordt veel beter gemodelleerd indien er wind op het model wordt opgelegd. Zoals in hoofdstuk 2 beschreven, is het voor de metingen niet mogelijk om de middenstand te scheiden in bijdragen van wind, luchtdrukverschillen, dichtheidseffecten en rivierafvoeren. In hoeverre de gevonden verschillen verbeteren met het opleggen van werkelijke wind- en drukvelden is hier niet verder onderzocht. Ook moet opgemerkt worden dat de grote variaties in middenstand natuurlijk maar in beperkte mate met de 6 langperiodieke componenten kunnen worden beschreven.

Op basis van deze resultaten is besloten om in het vervolg van de studie de oorspronkelijke componenten set te blijven gebruiken. Er is verder niet getracht om een oplossing te vinden om de langperiodieke componenten beter aan te laten sluiten bij de werkelijke middenstandsvariaties. Naar verwachting heeft dit mogelijk enig effect op de resultaten voor wat betreft de middenstand.

4.2 SIMULATIES STORMCONDITIE, ZONDER GOLVEN

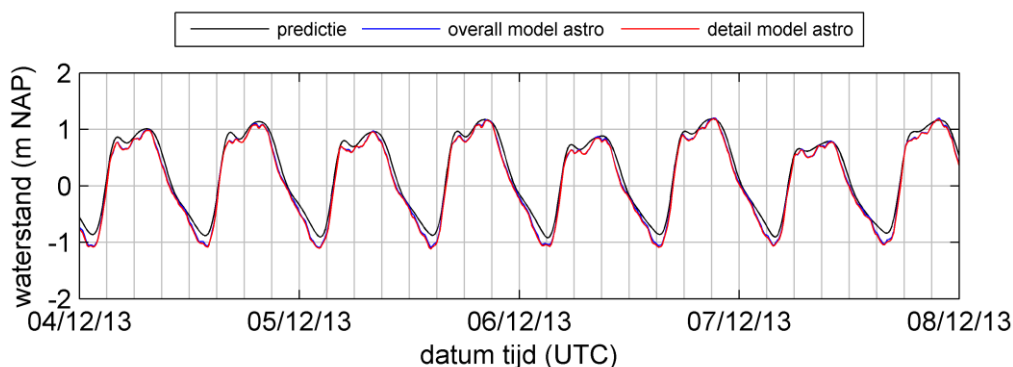
De referentiesom zonder golven omvat het overall model met het daarin geneste detail model. Voor het overall model zijn de volgende instellingen gebruikt:

- 2D, zout;
- WRF-NMM 3 km, 10 min wind/druk;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012].

Voor het detail model zijn de volgende instellingen gebruikt:

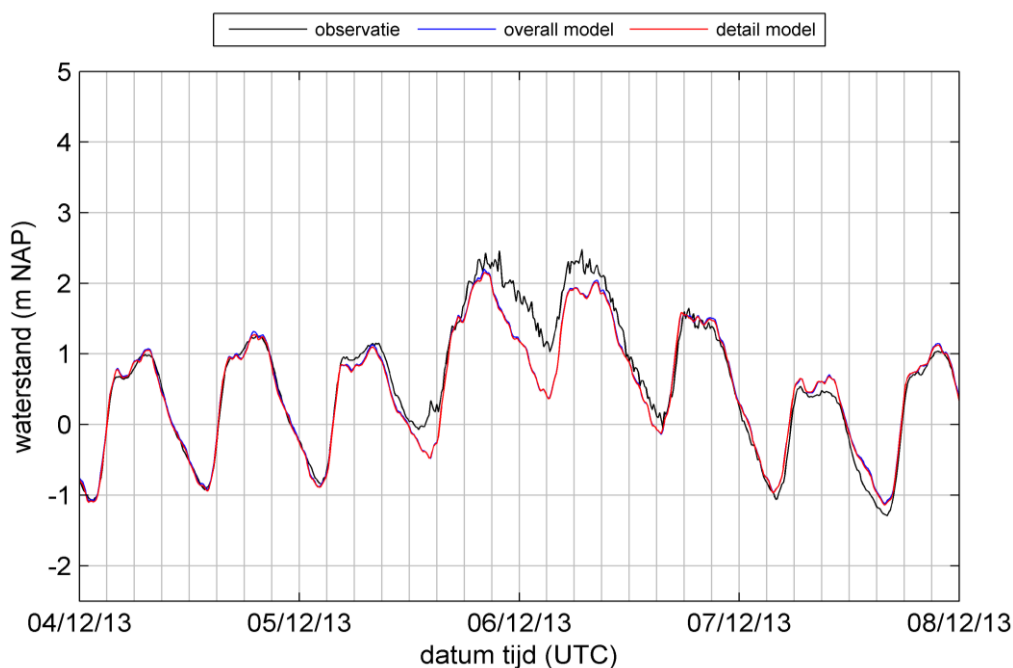
- 3D, zout, temperatuur;
- WRF-NMM 3 km, 10 min wind/druk/meteo;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012].

In Figuur 4-3 wordt voor station Texel Noordzee een vergelijking gemaakt tussen de berekende astronomische waterstand van het overall en het detail model enerzijds en de predictie, op basis van een getij-analyse van metingen, anderzijds.

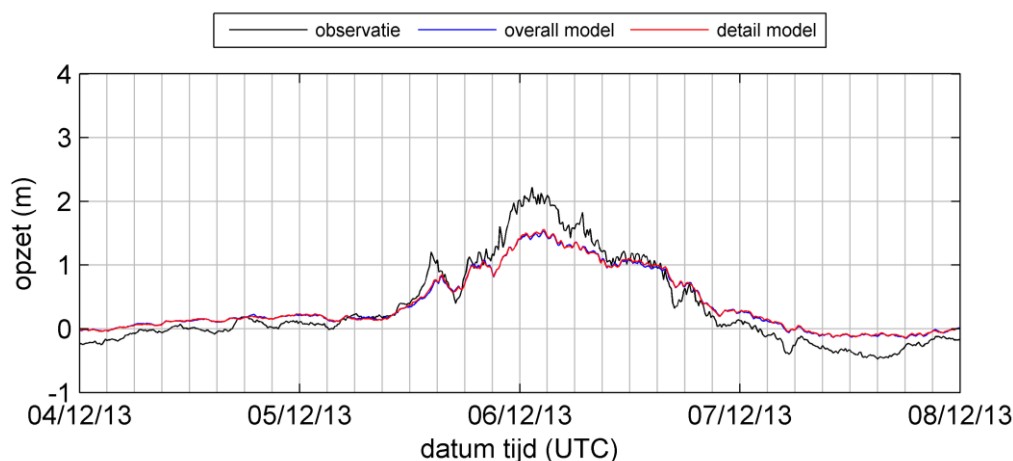


Figuur 4-3. Vergelijking astronomische waterstand overall en detail model en predictie voor station Texel Noordzee.

Zoals weergegeven in deze figuur is het verschil tussen beide modellen zeer klein. Tevens is zichtbaar dat de gemodelleerde astronomische waterstanden in sterke mate overeenkomen met de predictie. Zoals blijkt uit Figuur 4-4, geldt dit ook voor de totale waterstand, echter met uitzondering van een onderschatting van de waterstand voor de stormperiode (ongeveer 5-dec 12:00h – 6-dec 15:00h). Deze discrepantie kan meerdere oorzaken hebben. Zo kan de windopzet (totale waterstand minus de astronomische waterstand; Figuur 4-5) worden onderschat door gebruik van een te lage windschuifspanningscoëfficiënt en/of is de bijdrage van de golfopzet niet verwaarloosbaar. Hier wordt later in dit hoofdstuk verder op ingegaan.

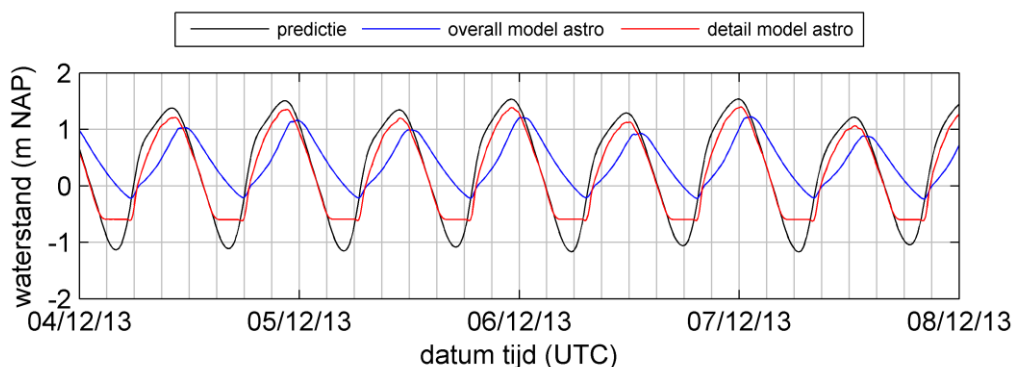


Figuur 4-4 Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee.



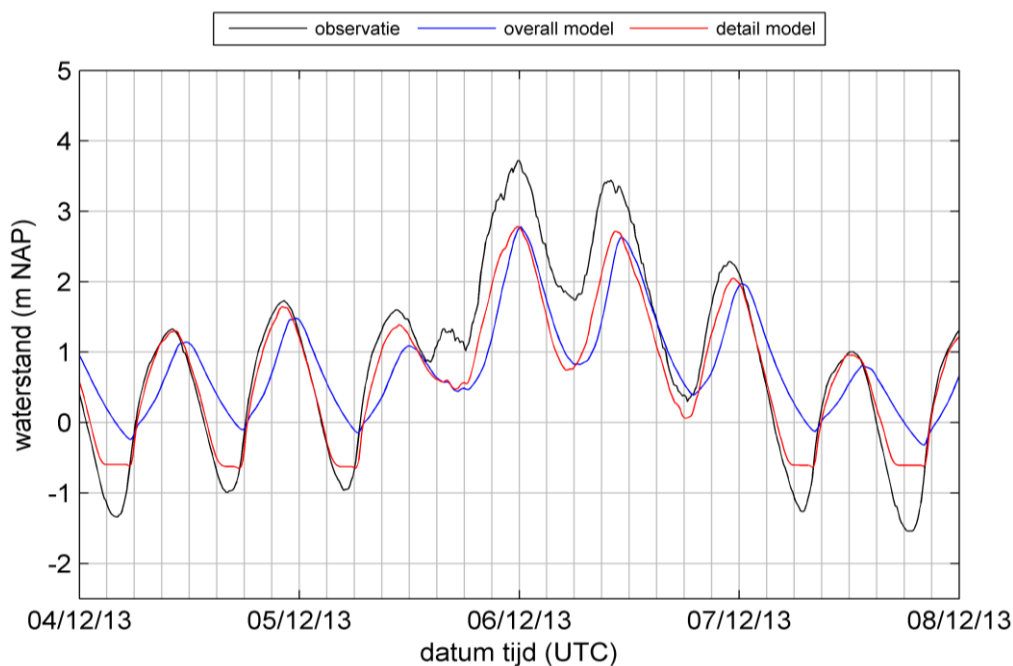
Figuur 4-5. Vergelijking waargenomen en gemodelleerde opzet overall en detail model voor station Texel Noordzee.

Eenzelfde vergelijking als bovenstaand is gemaakt voor station Lauwersoog in de Waddenzee (Figuur 4-6, Figuur 4-7, Figuur 4-8). In tegenstelling tot station Texel Noordzee bestaan te Lauwersoog grote verschillen tussen berekende astronomische waterstanden door het overall model en het detail model (Figuur 4-6). Deze verschillen zijn toe te schrijven aan de te geringe horizontale resolutie van het rekenrooster en de, hiermee samenhangende, verschillende schematisaties van de bodemligging. Het gebruik van het relatief grove overall model leidt tot forse onderschattingen van de getij-amplitude (tot ongeveer 1 m) alsmede tot behoorlijke faseverschuivingen (Figuur 4-6). Dit geldt ook voor de totale waterstand (Figuur 4-7). Het detailmodel daarentegen, toont een aanzienlijk betere reproductie van de waargenomen astronomische en gemeten waterstanden, waarbij opgemerkt wordt dat het droogvallen in het model tijdens laagwater duidt op een klein verschil in bodemhoogte met de werkelijke bodemhoogte. Overigens is het wel opvallend dat de predictie hier toch flink (10 á 20 cm) hoger is dan het detail model met astro randvoorwaarden.

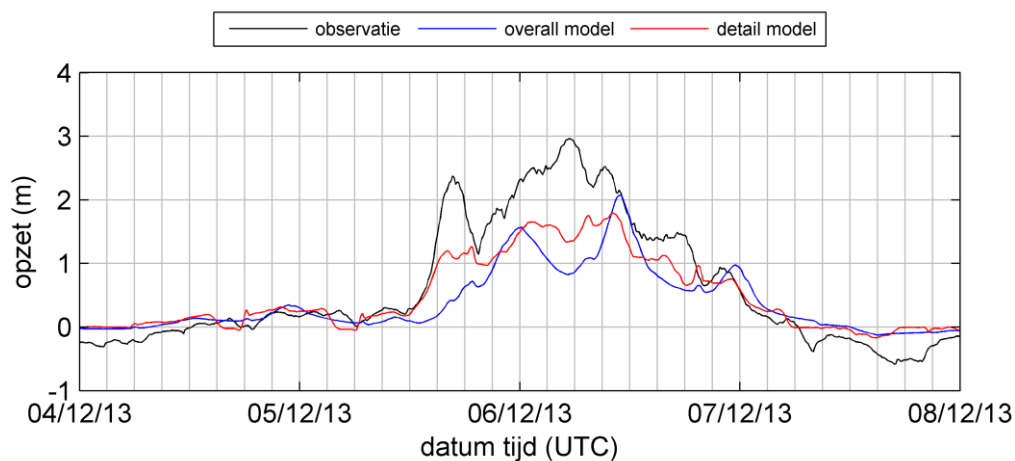


Figuur 4-6 Vergelijking astronomische waterstand tussen overall en detail model en predictie voor station Lauwersoog.

Evenals voor Texel Noordzee wordt de opzet in Lauwersoog door de modellen met genoemde instellingen onderschat (Figuur 4-8). Dit impliceert eveneens dat de windopzet wordt onderschat met de huidige modelinstellingen en/of dat de golfopzet mogelijk een significant onderdeel vormt van de totale waterstand.



Figuur 4-7 Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog.



Figuur 4-8 Vergelijking waargenomen en gemodelleerde opzet tussen overall en detail model voor station Lauwersoog.

In Bijlage C zijn ook de resultaten voor alle overige stations opgenomen. De opbouw van die figuren per station is identiek aan de in deze sectie gepresenteerde figuren voor het tweetal stations.

Op basis van de beschouwing in Hoofdstuk 2 en de gevonden verschillen, zijn de gevoeligheid van de modelresultaten voor de volgende keuzes onderzocht:

- Keuze voor het te gebruiken atmosferisch model. We onderzochten de gevoeligheid van de gemodelleerde waterstanden voor wind- en drukvelden afkomstig van twee verschillende atmosferische modellen (WRF-NMM en HIRLAM).
- Keuze voor de resolutie van de invoer uit deze atmosferische modellen. We onderzochten de gevoeligheid van de gemodelleerde waterstanden voor verschillende resoluties van deze invoervelden, zowel in de ruimte als in de tijd.

- Keuze voor de windschuifspanningscoëfficiënt in het stromingsmodel. We onderzochten de gevoeligheid van de gemodelleerde waterstanden voor een tweetal formuleringen; de traditionele Charnock [1955] formulering versus de recentelijk geïntroduceerde Zijlema et al. [2012] formulering.
- Keuze voor de weergave van de verticale dimensie in het detailmodel. We onderzochten de gevoeligheid van de gemodelleerde waterstanden voor het driedimensionaal versus het tweedimensionaal (diepte-gemiddeld) rekenen met het detailmodel.

De resultaten van deze uitgebreide simulaties inclusief de gevoeligheidsanalyse worden in de volgende paragrafen gepresenteerd.

4.2.1 GEVOELIGHEID WRF-NMM/HIRLAM

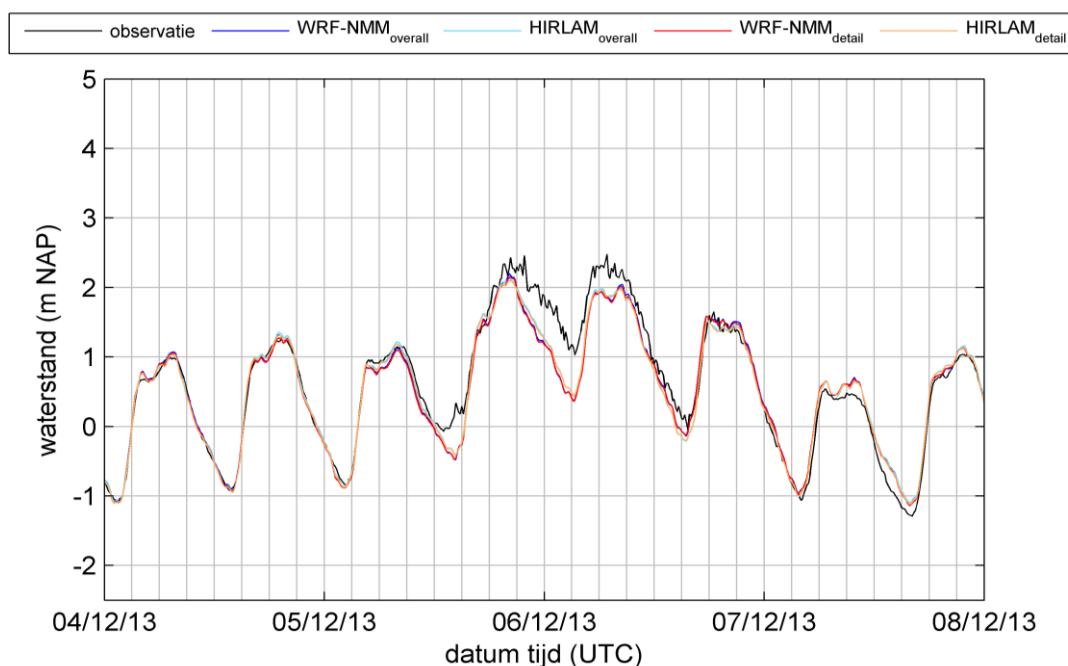
Zoals in Sectie 3.2 is beschreven, komen de windsnelheden en -richtingen uit WRF-NMM 3 km en HIRLAM 11 km goed met elkaar en de metingen overeen, ofschoon er specifieke verschillen bestaan in het gemodelleerde tijdsverloop van deze grootte. In het operationele voorspellingssysteem van Rijkswaterstaat wordt gebruik gemaakt van het HIRLAM model. Het voordeel hiervan is de directe beschikbaarheid van wind- en drukvelden. Een mogelijk nadeel betreft de beschikbare tijdsresolutie van die data (3 uur). De WRF-NMM data hebben een tijdsresolutie van 10 minuten. Het is derhalve relevant om na te gaan hoe gevoelig de gemodelleerde waterstanden zijn voor invoer uit deze verschillende atmosferische modellen. In deze paragraaf worden resultaten vergeleken van modelberekeningen met de volgende instellingen voor het overall model:

- 2D, zout;
- WRF-NMM 3 km, 10 min wind/druk/meteo versus HIRLAM 11 km, 3 uur wind/druk/meteo;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012].

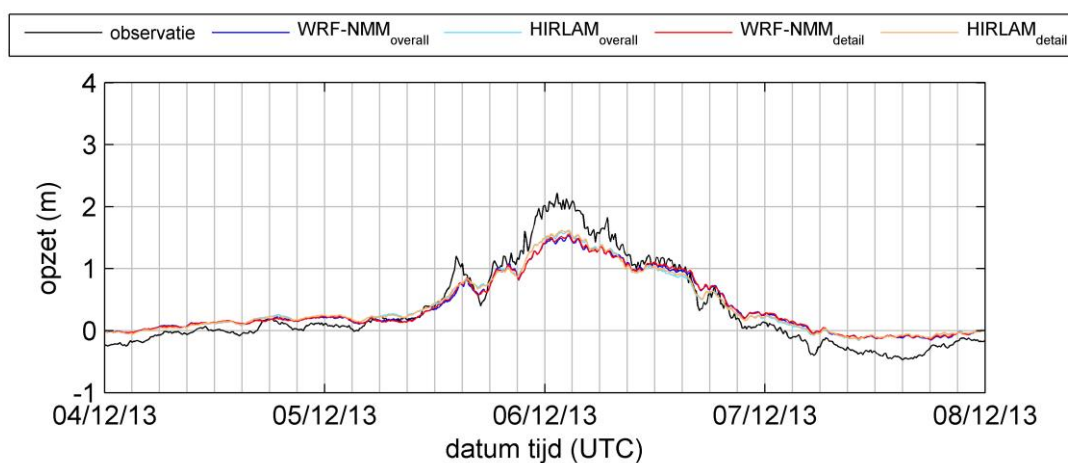
en de volgende instellingen voor het detail model:

- 3D, zout, temperatuur;
- WRF-NMM 3 km, 10 min wind/druk/meteo versus HIRLAM 11 km, 3 uur wind/druk/meteo;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012].

In Figuur 4-9 wordt een vergelijking gemaakt tussen de gemodelleerde waterstanden te station Texel Noordzee, berekend op basis van de WRF-NMM invoer enerzijds en de HIRLAM invoer anderzijds. Zowel voor het overall model (blauwtinten) als het detail model (roodtinten). Figuur 4-10 toont vervolgens de corresponderende opzet voor dit station. Zoals blijkt uit beide figuren zijn de verschillen in gemodelleerde waterstanden en opzet als gevolg van de invoer van verschillende atmosferische modellen gering (merk op dat de verschillende curves nauwelijks te onderscheiden zijn). Tevens zijn de verschillen tussen het overall model en het detail model voor beide atmosferische modelinvoer beperkt, hetgeen consistent is met wat is geconcludeerd in de vorige paragraaf.

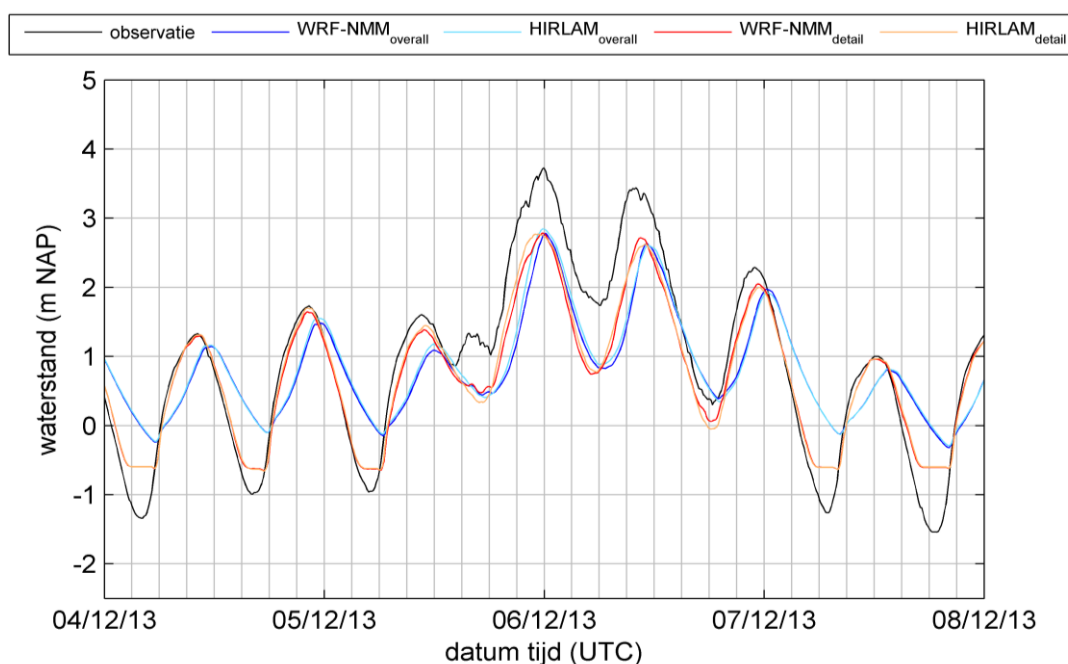


Figuur 4-9. Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor WRF-NMM versus HIRLAM invoerdata.

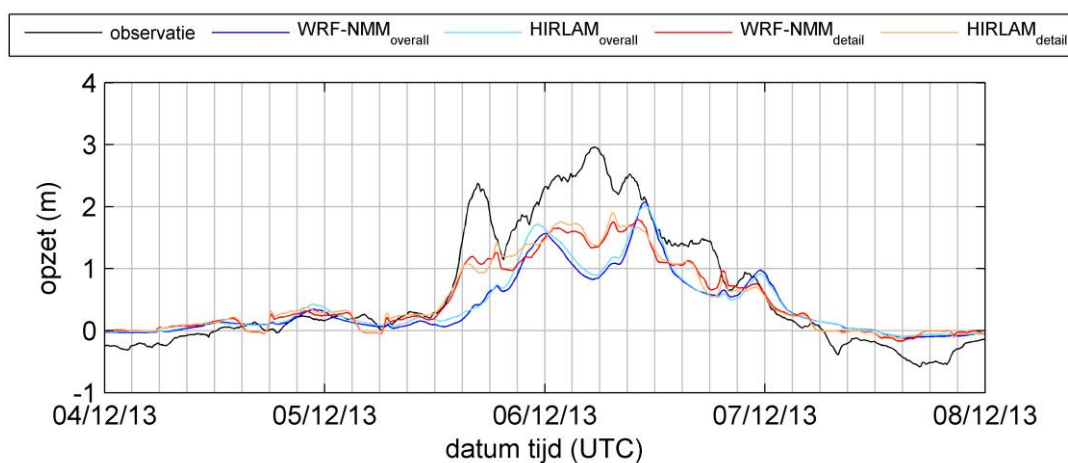


Figuur 4-10. Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Texel Noordzee voor WRF-NMM versus HIRLAM invoerdata.

Eenzelfde vergelijking is gemaakt te station Lauwersoog voor de totale waterstand en opzet in respectievelijk Figuur 4-11 en Figuur 4-12. Ook voor dit station blijkt dat de verschillen in zowel de berekende totale waterstand als de hieruit afgeleide opzet tussen beide gebruikte atmosferische modellen beperkt is. Tevens blijkt wederom dat gebruik van het detail model een betere weergave geeft van de waargenomen waterstand en de gereconstrueerde opzet dan het overall model (vergelijk blauwe curves met rode curves in beide figuren). De resultaten voor alle overige stations (opgenomen in Bijlage D) zijn consistent met deze conclusies.



Figuur 4-11. Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog voor WRF-NMM versus HIRLAM invoerdata.



Figuur 4-12. Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Lauwersoog voor WRF-NMM versus HIRLAM invoerdata.

De analyse van de resultaten in deze paragraaf toont aan dat de gemodelleerde waterstanden op basis van de huidige modelinstellingen relatief ongevoelig zijn voor de gemaakte keuze voor atmosferische model-invoer (WRF-NMM of HIRLAM). Dit suggereert dat berekende waterstanden niet sterk afhankelijk zijn van de resolutie van de atmosferische model-invoer, zowel in tijd (10 min versus 3 uur) als in ruimte (3 km versus 11 km). Echter, naast resolutie verschillen genoemde atmosferische modellen ook in velerlei opzichten (Sectie 3.2). Om na te gaan in hoeverre gemodelleerde waterstanden louter gevoelig zijn voor de temporele en ruimtelijke resolutie van atmosferische variabelen (druk, windsnelheid/richting) is een systematische variatie van de resolutie van die invoervariabelen vanuit hetzelfde atmosferische model voor het hydrodynamische model nodig. Dit aspect wordt in de volgende paragraaf behandeld.

4.2.2 GEVOELIGHEID RESOLUTIE METEO IN RUIMTE EN TIJD

De verkregen velden van atmosferische variabelen uit het WRF-NMM model zijn beschikbaar met een resolutie van respectievelijk 3 km in de ruimte en 10 minuten in de tijd. Daarnaast zijn op een hogere resolutie (1 km en 200 m) resultaten beschikbaar waarvan eerder geconstateerd is dat deze niet juist zijn (zie Sectie 3.2). Hierdoor is een directe vergelijking met metingen niet mogelijk. Echter, omdat het een onderlinge (bijvoorbeeld 200 m 10 min versus 200 m 1 uur) vergelijking betreft in de context van een gevoeligheidsstudie, is laatstgenoemde dataset toch bruikbaar.

In deze paragraaf worden de resultaten vergeleken tussen modelberekeningen met de volgende instellingen voor het overall model:

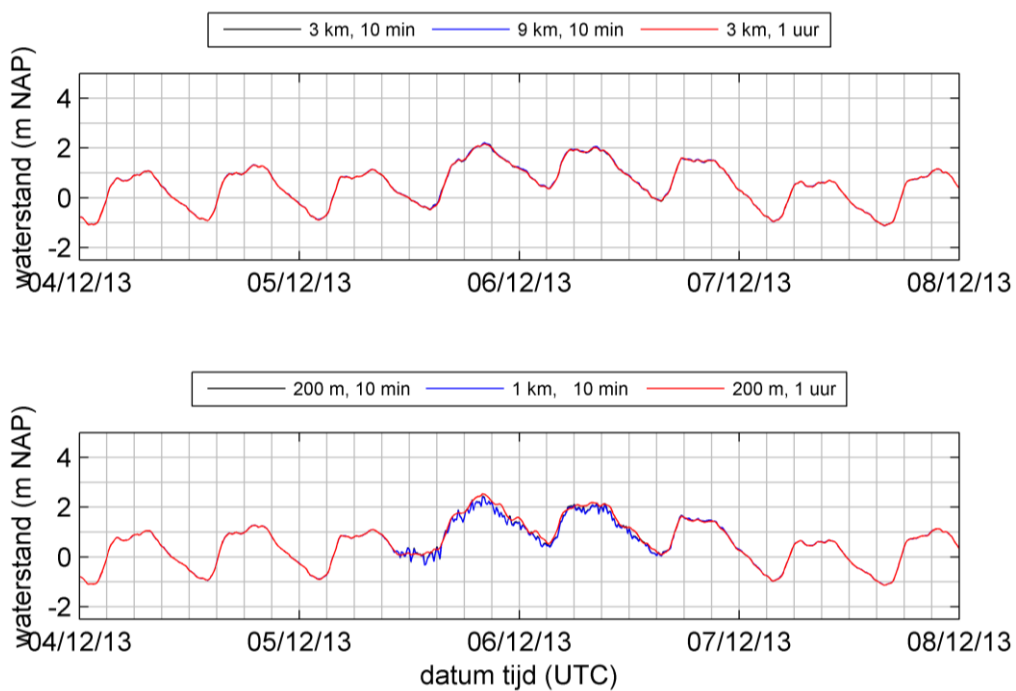
- 2D, zout;
- WRF-NMM 3 km, 10 min, of 9 km, 10 min, of 3 km, 1 uur wind/druk;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012].

en voor het detail model:

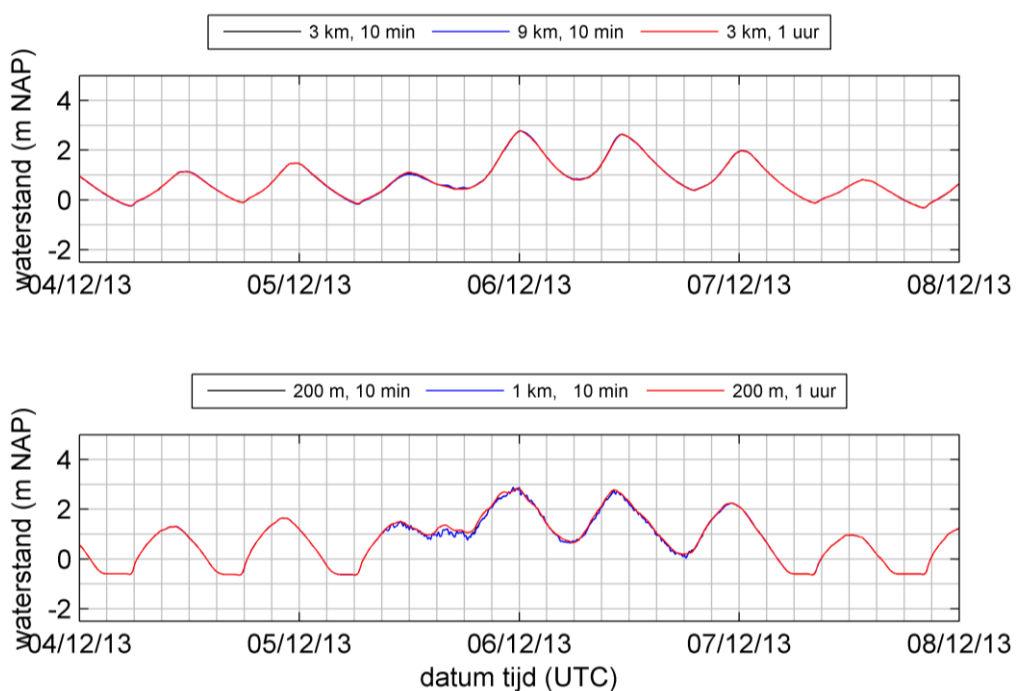
- 3D, zout, temperatuur;
- WRF 200 m, 10 min of 1 km, 10 min of 200 m, 1 uur; wind/druk/meteo;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012].

Bij het reduceren van de wind/druk/meteo-velden in de tijd is slechts 1 op de 6 velden in de tijd meegenomen. Er is dus geen middeling in de tijd toegepast; hiermee zou ongewenst relevante variatie kunnen worden gefilterd. De 3 km velden zijn naar 9 km gereduceerd door in beide richtingen 1 op de 3 waarden mee te nemen. Ook hier is dus om dezelfde reden geen middeling toegepast. De 200 m en 1 km velden betreffen twee verschillende resoluties van dezelfde WRF-NMM uitvoervelden.

In Figuur 4-13 en Figuur 4-14 zijn voor respectievelijk de stations Texel Noordzee en Lauwersoog de gemodelleerde waterstanden weergegeven voor de bovengenoemde combinaties van resoluties van de invoervelden van de atmosferische variabelen. Alle figuren voor de andere stations zijn opgenomen in Bijlage E. Zoals uit beide figuren blijkt, zijn de waterstanden van het overall model ongevoelig voor de zowel de vergroving in de ruimte (van 3 km naar 9 km) als de vergroving in de tijd (van 10 minuten naar 1 uur) van de wind- en drukvelden. De gemodelleerde waterstanden van het detail model zijn eveneens ongevoelig voor de vergroving in de ruimte (van 200 m naar 1 km), echter afwijkingen, weliswaar relatief klein, beginnen te ontstaan wanneer de resolutie van druk-, wind-, en meteo-velden in de tijd wordt teruggebracht van 10 minuten naar 1 uur. Ook de resultaten voor alle overige stations (Bijlage E) zijn consistent met deze conclusies.



Figuur 4-13. Vergelijking gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor verschillende resoluties van de wind- en drukvelden van WRF-NMM voor het overall model (boven) en het detail model (onder).



Figuur 4-14 Vergelijking gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog voor verschillende resoluties van de wind- en drukvelden van WRF-NMM voor het overall model (boven) en het detail model (onder).

4.2.3 GEVOELIGHEID ZIJLEMA ET AL./CHARNOCK

In de berekeningen tot nog toe is steeds gebruik gemaakt van de windschuifspanningsrelatie volgens Zijlema et al. [2012]. In de operationele modellen van Rijkswaterstaat wordt standaard gebruik gemaakt van Charnock [1955]. Om na te gaan wat het effect is van deze keuze wordt een vergelijking gemaakt tussen gemodelleerde waterstanden op basis van beide parameterisaties.

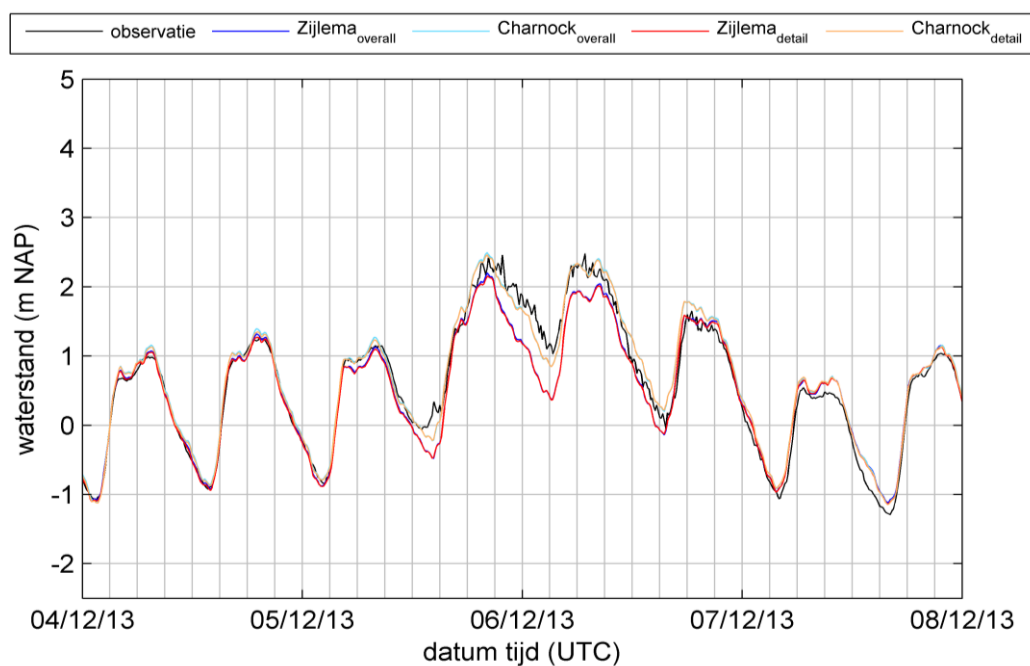
De gehanteerde model instellingen voor het overall model zijn:

- 2D, zout;
- WRF-NMM 3 km, 10 min wind/druk;
- Cd volgens Zijlema et al. versus Charnock.

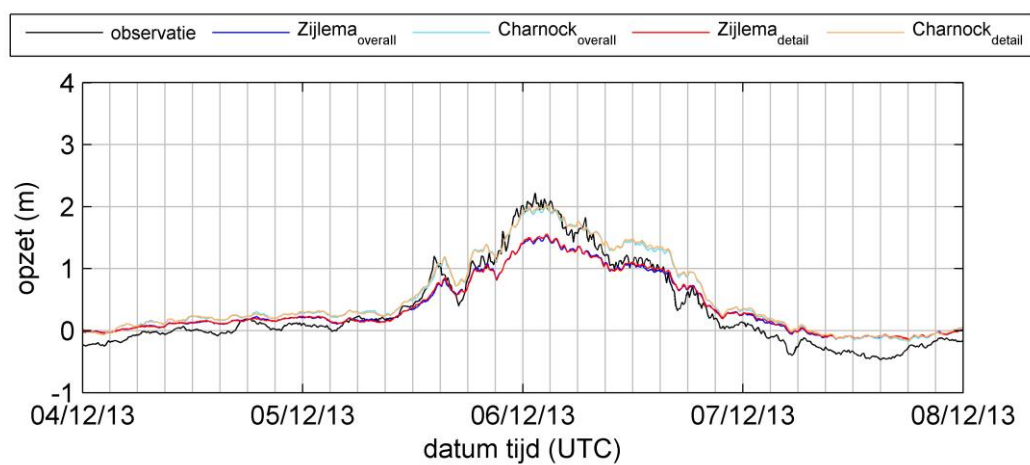
en voor het detailmodel:

- 3D, zout, temperatuur;
- WRF-NMM 200 m, 10 min wind/druk/meteo;
- Cd volgens Zijlema et al. versus Charnock.

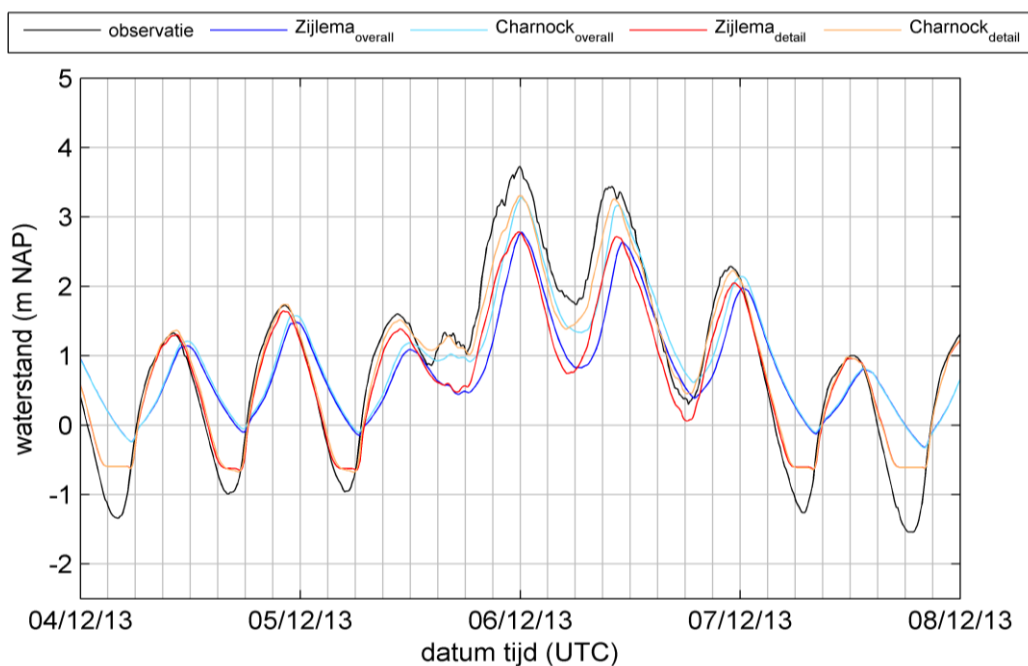
In Figuur 4-15 t/m Figuur 4-18 zijn voor respectievelijk de stations Texel Noordzee en Lauwersoog de gemodelleerde waterstanden en windopzet weergegeven voor bovengenoemde windschuifspanningsrelaties, steeds voor zowel het overall model als het detailmodel. Zoals blijkt uit deze figuren leidt gebruik van de formulering van Charnock [1955] tot significant hogere waterstanden en windopzet dan gebruik van de formulering van Zijlema et al. [2012]. Het gebruik van de Charnock relatie lijkt ook te leiden tot een betere weergave van de gemeten waterstanden en de daaruit afgeleide windopzet. Uit de figuren voor station Lauwersoog (Figuur 4-17, Figuur 4-18) blijkt tevens de relevantie van een systematische, stapsgewijze evaluatie van het effect van toevoeging of schematisatie van fysische variabelen op de gemodelleerde waterstanden. Zo zou op basis van enkel Figuur 4-17 ten onrechte kunnen worden geconcludeerd dat het gebruik van het overall model met de Charnock formulering leidt tot een betere reproductie van de stormwaterstanden dan het detail model met de Zijlema formulering. Met andere woorden, de gevoeligheid van de gemodelleerde stormwaterstanden voor de keuze van de windschuifspanning-formulering is vergelijkbaar met de gevoeligheid voor het verschil in horizontale resolutie van het rekenrooster van het overall en het detailmodel.



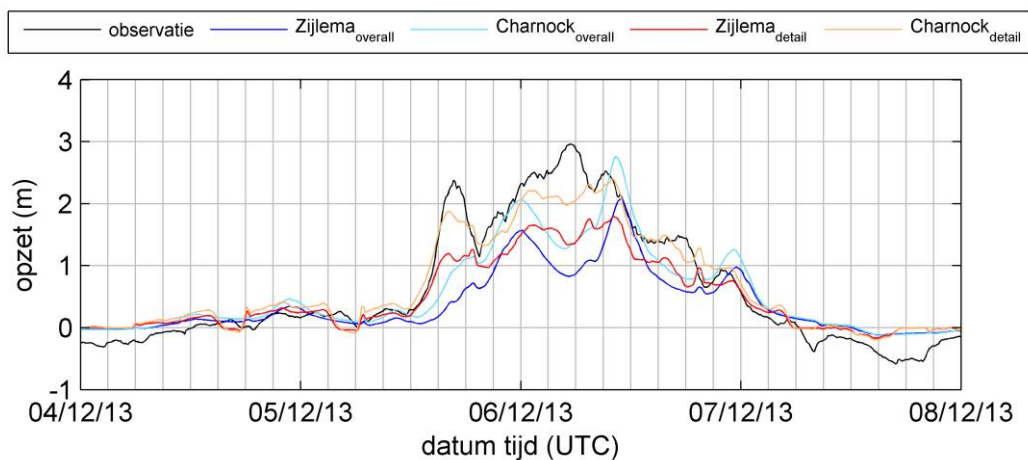
Figuur 4-15. Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].



Figuur 4-16. Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Texel Noordzee voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].



Figuur 4-17. Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Lauwersoog voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].



Figuur 4-18. Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Lauwersoog voor windschuifspanningscoëfficiënt van Zijlema et al. [2012] versus Charnock [1955].

De in de voorgaande figuren uitgezette vergelijking, aangevuld met de resultaten voor andere stations (Bijlage F) suggereert dat de simulaties waarin gebruik is gemaakt van de Charnock windschuifspanningsformulering leiden tot een betere overeenstemming met gemeten waterstanden en opzet dan de formulering van Zijlema et al. [2012].

4.2.4 GEVOELIGHEID DETAILMODEL 2D/3D

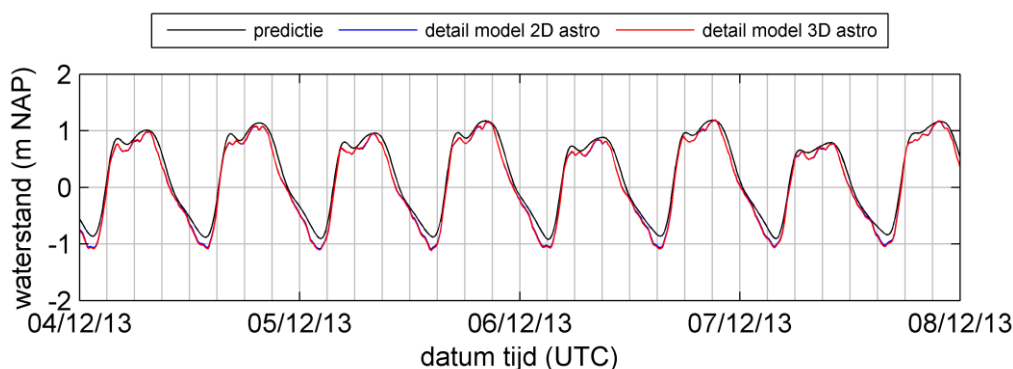
Vanuit het oogpunt van de benodigde rekeninspanning is het relevant om na te gaan wat het effect is van een 2D versus 3D benadering van de modellering van de waterstanden. Hiertoe zijn simulaties met het detailmodel in zowel 2D als in 3D uitgevoerd. Het detailmodel is gedraaid met de volgende instellingen:

- 2D/3D, zout, temperatuur;

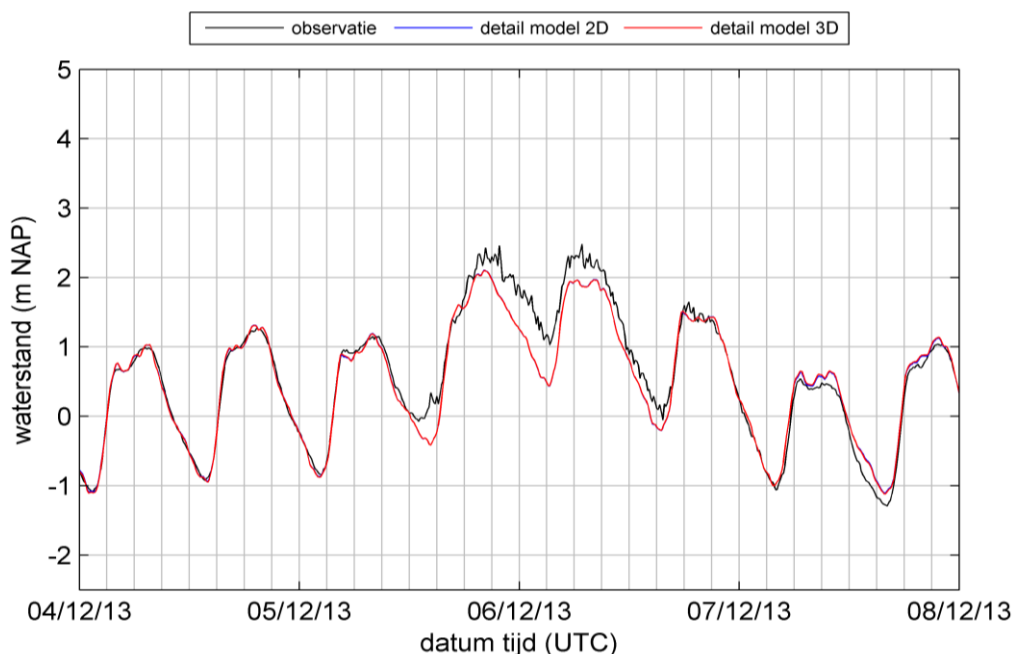
- HIRLAM, 11km, 3 uur wind/druk/meteo;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012].

Er is gebruik gemaakt van HIRLAM in plaats van WRF-NMM data, omdat in de uitvoerfase van deze studie nog geen WRF-NMM data beschikbaar was. Verwacht kan worden dat dit geen effect heeft op de geldigheid van onderstaande conclusies.

In Figuur 4-19 tot en met Figuur 4-21 zijn de gemodelleerde (astronomische) waterstanden en windopzet weergegeven voor station Texel Noordzee, voor zowel de 2D als de 3D versie van het detailmodel. Hieruit blijkt dat de verschillen in gemodelleerde waterstand en windopzet tussen de 2D en 3D schematisaties voor station Texel Noordzee zeer klein zijn.



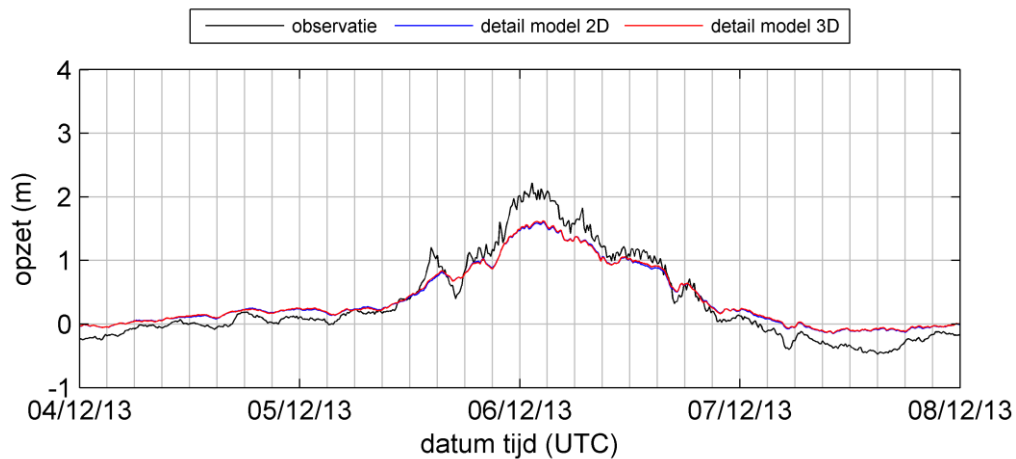
Figuur 4-19. Vergelijking astronomische waterstand tussen 2D en 3D detail model en predictie, station Texel Noordzee (de blauwe lijn ligt onder de rode).



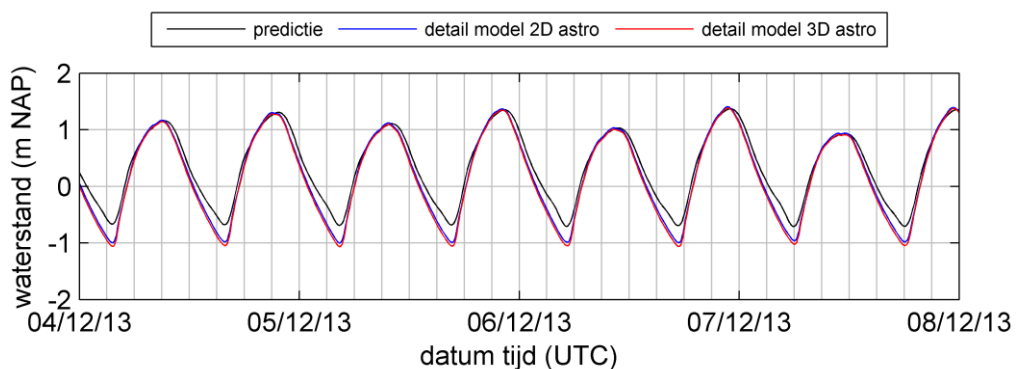
Figuur 4-20. Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Texel Noordzee voor 2D versus 3D detail model (de blauwe lijn ligt onder de rode).

Ook de resultaten voor alle overige stations (zie Bijlage G) zijn consistent met deze conclusies. Een lichte uitzondering hierop vormen de gemodelleerde waterstanden en windopzet te Kornwerderzand buiten (Figuur 4-22 t/m Figuur 4-24) en Den Oever buiten, waar kleine verschillen waarneembaar zijn tussen de

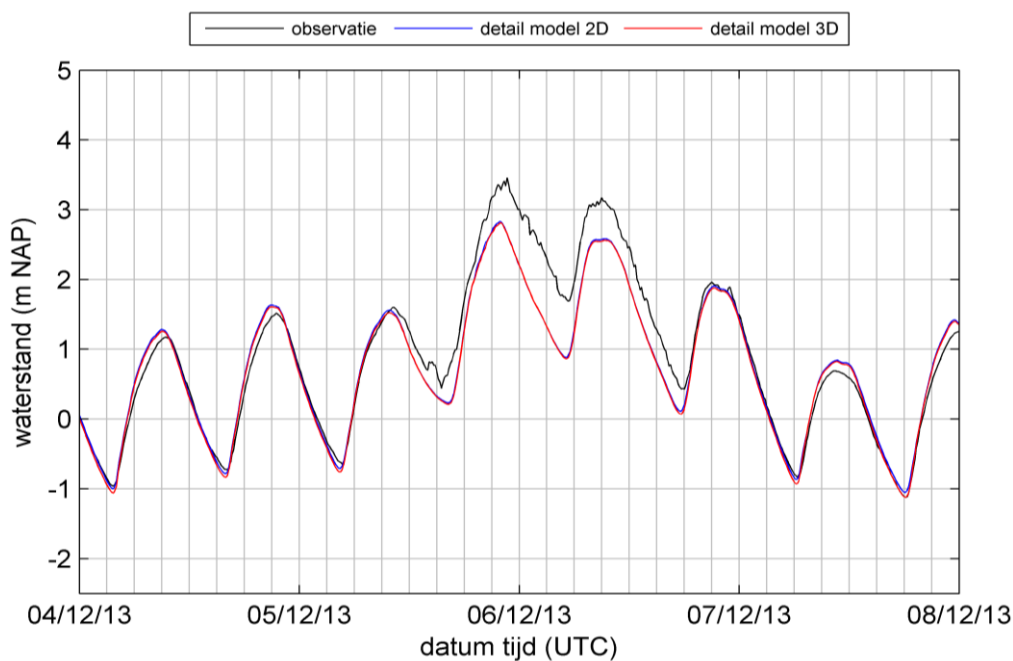
2D en 3D modellen. Deze verschillen hebben waarschijnlijk hun oorsprong in de verschillen tussen een 2D en 3D weergave van zoutgradiënten in de Waddenzee, die weer het gevolg zijn van de lozing van relatief zoet water aldaar. Overigens wordt er tijdens een storm niet geloosd bij Den Oever noch bij Kornwerderzand.



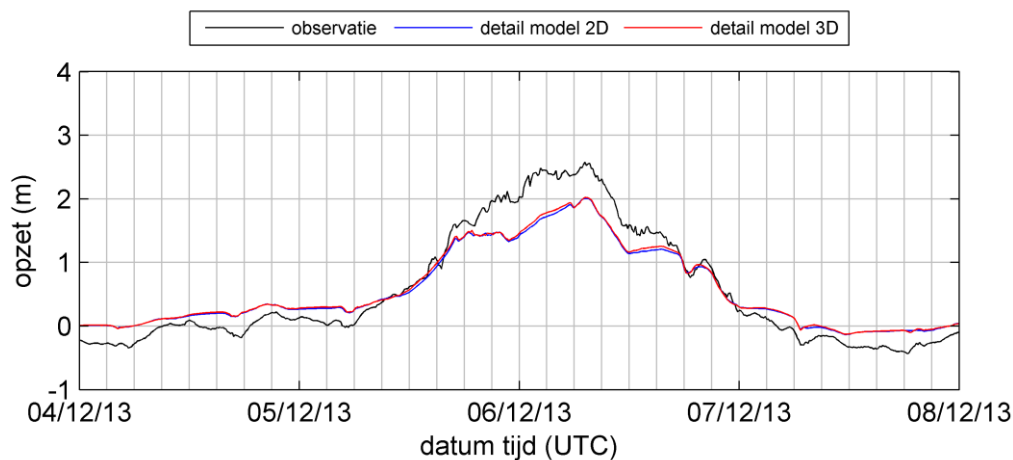
Figuur 4-21. Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Texel Noordzee, 2D versus 3D detail model (de blauwe lijn ligt onder de rode)



Figuur 4-22. Vergelijking astronomische waterstand tussen 2D en 3D detail model en predictie, station Kornwerderzand buiten (de blauwe lijn ligt vrijwel overal onder de rode).



Figuur 4-23 Vergelijking gemeten en gemodelleerde totale waterstand voor station Kornwerderzand buiten, 2D versus 3D detail model.



Figuur 4-24. Vergelijking gemeten en gemodelleerde opzet voor station Kornwerderzand buiten, 2D versus 3D detail model.

4.2.5 CONCLUSIES

Op basis van de resultaten verkregen voor de simulaties waarin golven niet zijn meegenomen in de modellen, kunnen de volgende voorlopige conclusies worden getrokken:

- Het rekenen met voldoende horizontale resolutie van het rekenrooster is onontbeerlijk om waargenomen waterstanden in fase en amplitude goed te kunnen representeren. Dit behelst met name de geometrische weergave: het fijn vertakte geulenstelsel van de Waddenzee en het Eems-Dollard estuarium stelt op natuurlijke wijze eisen aan de minimale resolutie van het rekenrooster.

- Gemodelleerde waterstanden zijn gevoeliger voor de beschouwde variatie in temporele dan in de ruimtelijke resolutie van de atmosferische invoervariabelen. Hieruit wordt geconcludeerd dat de hydrodynamische modellen het beste kunnen worden aangestuurd met de beschikbare WRF-NMM 3 km, 10 minuten velden.
- Het gebruik van de formulering van Charnock [1955] voor de windschuifspanningscoëfficiënt geeft zonder golven de beste resultaten in vergelijking tot de formulering van Zijlema et al. [2012], maar uit de volgende paragraaf zal blijken dat dit ook voor de situatie met golven het geval is.
- Het rekenen in 2D met het detailmodel geeft vergelijkbare resultaten als in 3D. Kleine verschillen zijn zichtbaar voor stations waar een grote ruimtelijke zoutgradiënt aanwezig is. Echter, het is niet op voorhand duidelijk of dieptegemiddeld rekenen in een situatie met golven ook vergelijkbare resultaten geeft als het rekenen in 3D. Er is derhalve besloten om de sommen met windgolven in 3D door te rekenen.

4.3 SIMULATIES STORMCONDITIE, MET GOLVEN

Uitgaande van bovenstaande overwegingen presenteren en analyseren we in deze sectie de uitkomsten van de simulaties met golven. In specifieke zin presenteren we de sommen met de volgende instellingen voor het detailmodel:

- 3D, zout, temperatuur;
- WRF-NMM 3 km, 10 min wind/druk/meteo;
- Cd volgens Zijlema et al. [2012] of Charnock [1955];
- Schematisatie zonder of schematisatie met golven.

Het detailmodel wordt aangestuurd door de randvoorwaarden die zijn verkregen met het overall model. Dit overall model is dan ook steeds met dezelfde instellingen gedraaid als in het detailmodel, met uitzondering van de toevoeging van temperatuur in het detailmodel en de eerdergenoemde berekeningen van de golfgeïnduceerde krachten op basis van de dissipation rate in plaats van op basis van de radiation stresses, omdat vastgesteld is dat gebruik van eerstgenoemde formulering leidt tot het instabiel worden van het detailmodel.

In paragraaf 4.3.1 presenteren en analyseren we de uitkomsten van het golfmodel en maken we een vergelijk met metingen ter plaatse van de golfstations (**Error! Reference source not found.** en **Error! Reference source not found.**). Vervolgens presenteren en analyseren we de gemodelleerde waterstanden uit het gekoppelde stroming-golfmodel in paragraaf 4.3.2. De presentatie richt zich met name op de periode vanaf 5 december 2013, omdat we het detailmodel eerst één dag inspelen met golven (op basis van een doorstart van het detailmodel met wind zonder golven).

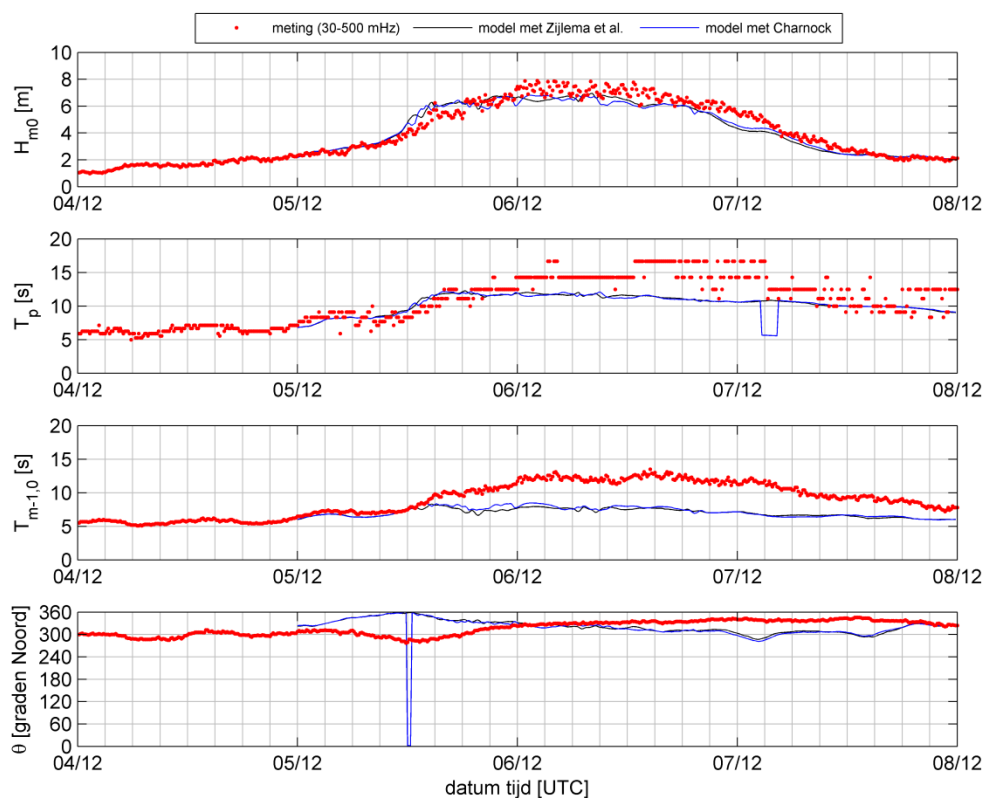
4.3.1 GOLFVARIABLEN: METING-MODEL VERGELIJKING

Alvorens de resultaten te presenteren betreffende de invloed van de golven op de gemodelleerde stormwaterstanden worden in deze paragraaf de uitkomsten van het golfmodel gepresenteerd en vergeleken met (afgeleide) golf-gerelateerde grootheden van beschikbare metingen.

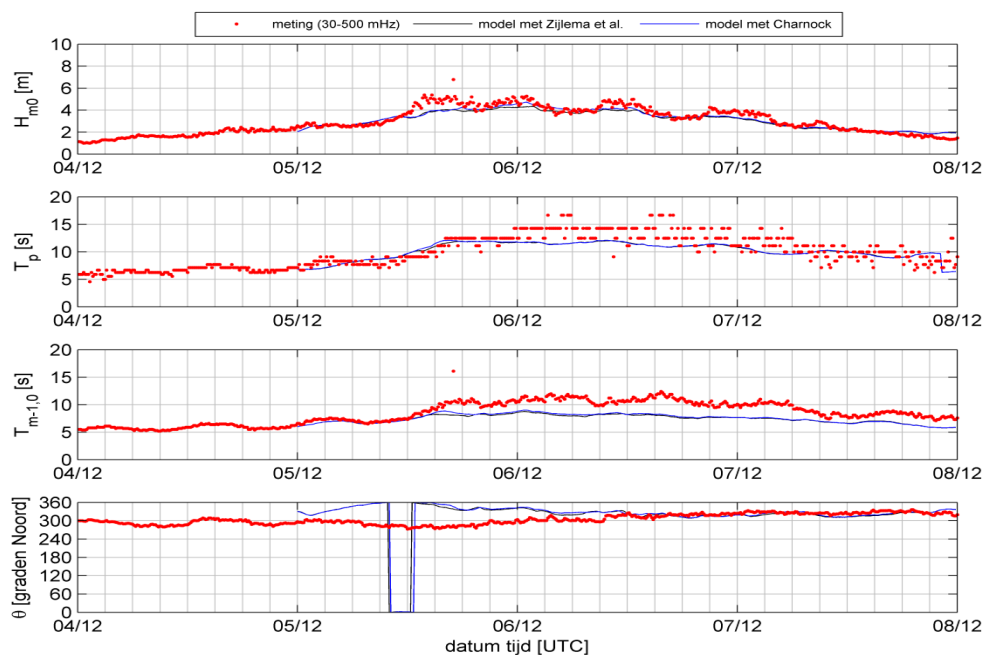
Figuur 4-25, Figuur 4-26 en Figuur 4-27 geven een vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde golfvariabelen voor de stations Amelanders Zeegat boei 12, Westereems oost en Wierumerwad. Resultaten voor alle overige stations zijn opgenomen in Bijlage H. Het betreft de significante golfhoogte (H_{m0}), de piekgolfperiode (T_p), de gemiddelde golfperiode ($T_{m-1,0}$) en de gemiddelde golfrichting (θ). Deze variabelen zijn bepaald door Rijkswaterstaat op basis van gemeten golfspectra. Uit bovengenoemde figuren blijkt dat deze variabelen in algemene zin redelijk tot zeer nauwkeurig worden gereproduceerd door het model.

Echter, we benadrukken de zorgvuldigheid die betracht moet worden bij de interpretatie van het vergelijken van metingen met modelresultaten. Een aantal voorbeelden hiervan worden uit onderstaande analyse duidelijk.

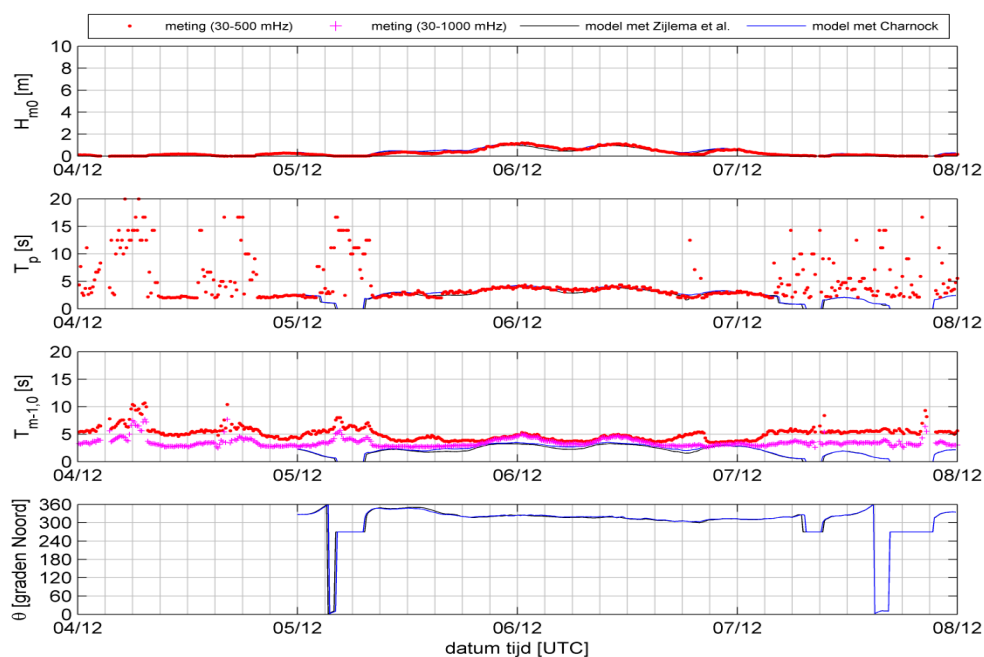
Voor veel stations geldt dat de gemodelleerde waarden voor $T_{m-1,0}$ de gemeten waarden onderschatten (bijvoorbeeld Figuur 4-25). Dit suggereert dat het model de laagfrequente energie maar met een beperkte nauwkeurigheid representeert. Echter, $T_{m-1,0}$ voor de meetstations is bepaald voor het frequentiebereik 30-500 mHz, terwijl de gemodelleerde waarden bepaald zijn voor het frequentiebereik 30-1800 mHz. Voor een aantal stations zijn $T_{m-1,0}$ waarden beschikbaar voor een groter frequentiebereik: 30-1000 mHz. Uit Figuur 4-27 blijkt dat hiermee significant lagere periodes voor dit station (Wierumerwad) worden verkregen, die beter overeenkomen met de modeluitkomsten. Voor een nauwgezet vergelijk verdient het derhalve aanbeveling om, waar beschikbaar, gemeten en gemodelleerde spectra te vergelijken (eventueel in plaats van afgeleide parameters) op basis van hetzelfde integratiebereik. Zo is bijvoorbeeld bepaling van de piek-golfperiode relatief gevoelig voor de vorm van het spectrum, waardoor relatief grote hoogfrequente variatie zichtbaar is (zie bijvoorbeeld T_p in Figuur 4-25 en Figuur 4-26, terwijl dit in Figuur 4-27 correspondeert met droogvallen), die het gevolg is van een uitgesproken bimodaal spectrum (waar bijvoorbeeld ten minste 2 pieken gekenmerkt worden door een vergelijkbare energiedichtheid, hetgeen in de tijd door energie-overdracht fluctueert).



Figuur 4-25. Vergelijking gemeten en gemodelleerde golf-gerelateerde grootheden, station Ameland Zeegat boei 12.



Figuur 4-26. Vergelijking gemeten en gemodelleerde golf-gerelateerde grootheden, station Westereems oost.



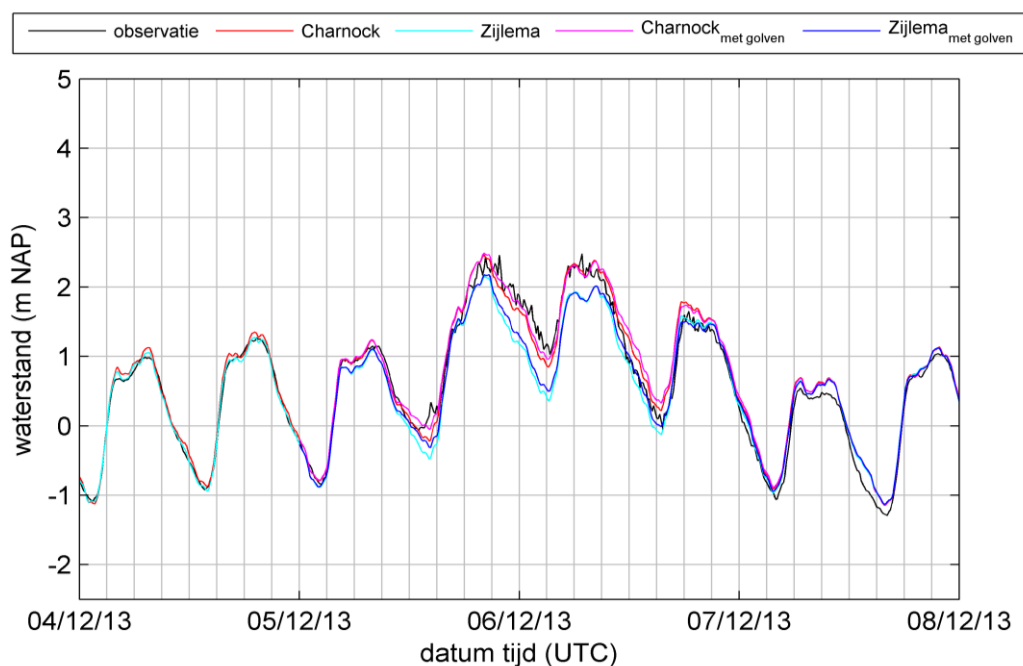
Figuur 4-27. Vergelijking gemeten en gemodelleerde golf-gerelateerde grootheden, station Wierumerwad 1.

De gemodelleerde golfhoogte en -periode wijken in sterke mate af van de metingen voor station AW platform (Bijlage H). Hoewel de fase van het golfhoogte-verloop goed door het model wordt weergegeven, onderschat het model de absolute waarde. De consistente onderschatting gedurende de stormperiode doet vermoeden dat de modeldiepte onvoldoende overeenkomt met de gemeten diepte ter plaatse van dit station. Waarschijnlijk ligt deze locatie te ondiep in het model, waardoor de dissipatie van golfenergie hier wordt overschat, hetgeen resulteert in genoemde onderschatting van de golfhoogte.

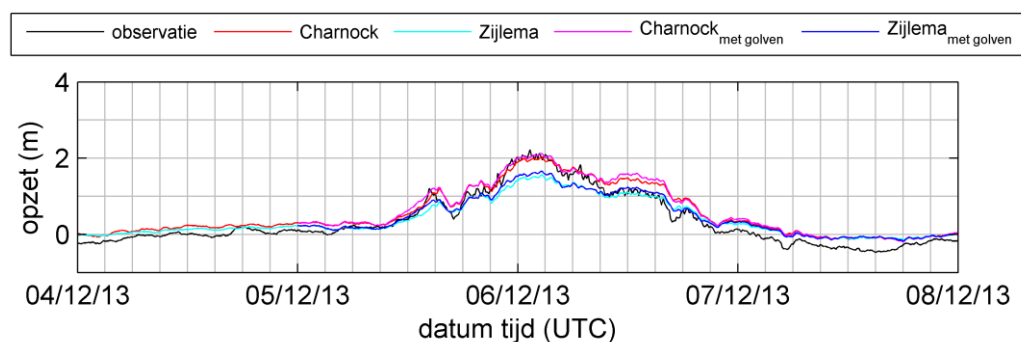
Tenslotte blijkt uit een vergelijking tussen de modeluitkomsten dat een waardeoordeel betreffende preferent gebruik van één van de windschuifspannings-formuleringen niet eenvoudig is. Vooreerst stellen we vast dat de gemodelleerde golfvelden gevoelig zijn voor deze keuze. Dit impliceert eveneens dat golfstroom interactie een belangrijk proces is in de Waddenzee voor de uitwisseling van energie. De gevoeligheid voor verschillen in windschuifspannings-formulering vertoont ook een locatie-afhankelijkheid. Zo zijn verschillen tussen het gebruik van beide formuleringen op locatie Eierlandse Gat significant, terwijl zeer vergelijkbare resultaten worden verkregen op locatie Westereems (Bijlage H). Uit de vergelijking tussen de resultaten voor de locaties Eierlandse Gat en Amelanders zeegat boei 1 blijkt tevens dat in het ene geval (Eierlandse Gat) het model met de formulering van Zijlema et al. de dalende trend van H_{m0} (in de middag van 6/12/2013 wanneer de storm tanende is) beter weergeeft, terwijl in het andere geval (Amelanders zeegat boei 1) de formulering van Charnock beter voldoet.

4.3.2 WATERSTANDEN: METING-MODEL VERGELIJK

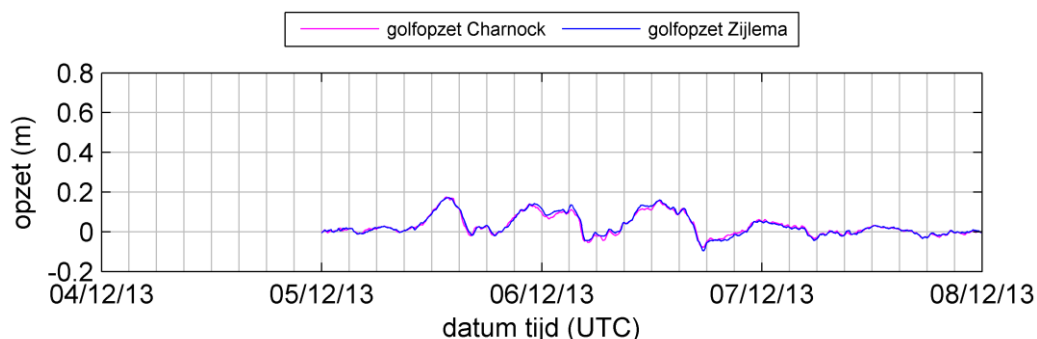
In Figuur 4-28 zijn de gemodelleerde waterstanden en de totale opzet weergegeven voor station Texel Noordzee, voor zowel de berekening met als zonder golven alsmede de berekening op basis van de Charnock formulering (voor het stromingsmodel) en de Zijlema et al. formulering. De golfopzet, (gedefinieerd als de gemodelleerde totale opzet voor de som met golven minus de gemodelleerde totale opzet voor de som zonder golven) is weergegeven in Figuur 4-30. Hieruit blijkt dat de gemodelleerde golfopzet voor dit station relatief klein, maar wel significant is; maximaal bijna 20 cm op een totale opzet van maximaal ongeveer 2 m.



Figuur 4-28. Vergelijking gemodelleerde totale waterstand zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Texel Noordzee.

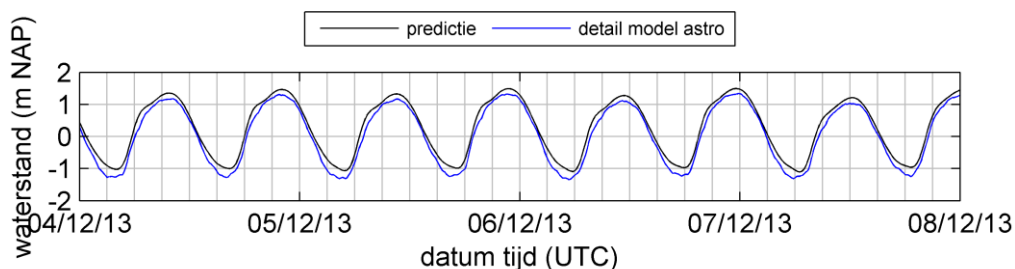


Figuur 4-29. Vergelijking gemodelleerde opzet zonder en met golven en voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Texel Noordzee.

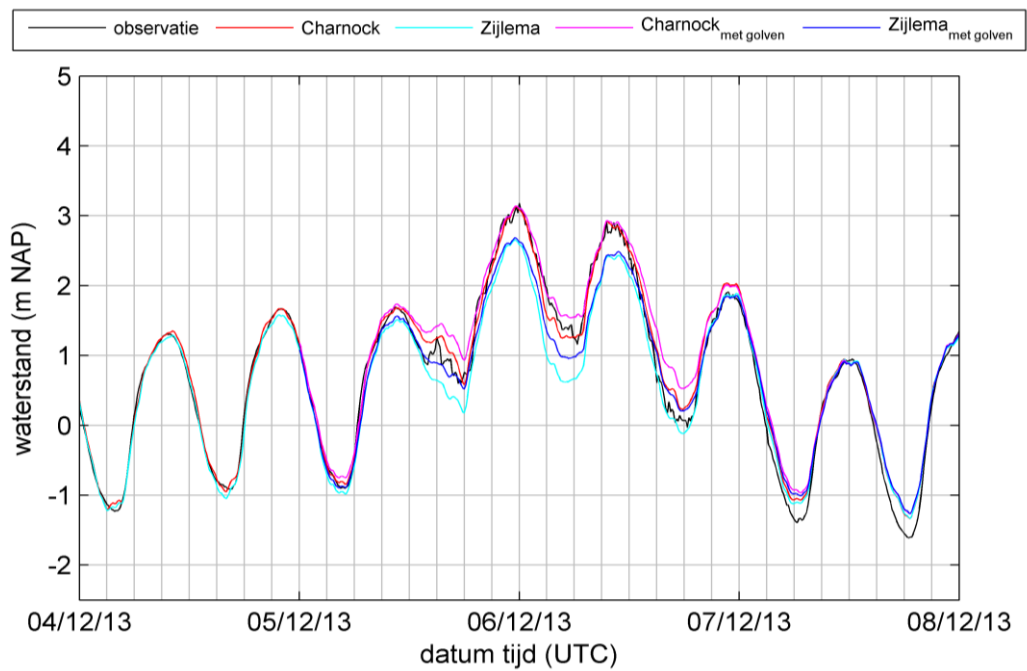


Figuur 4-30. Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Texel Noordzee.

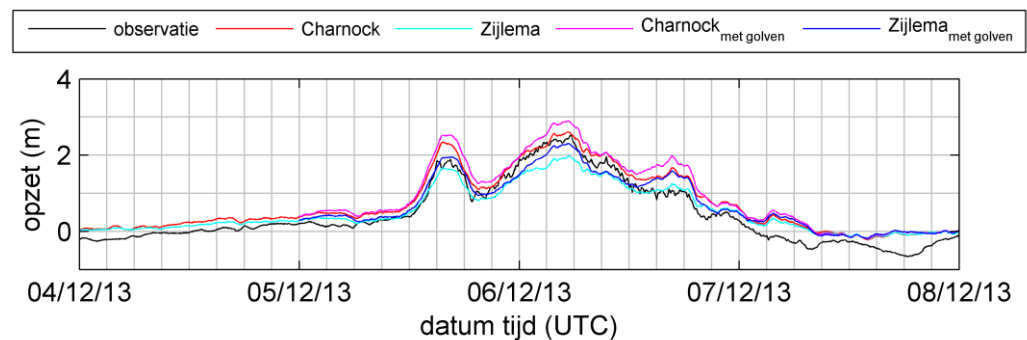
Dezelfde figuren zijn hier weergegeven voor station Huibertgat (Figuur 4-31 t/m Figuur 4-34) en station Eemshaven (Figuur 4-35 t/m Figuur 4-38). Figuren voor de overige stations zijn opgenomen in Bijlage I. Een opvallend resultaat is de waarneming dat de golfopzet een functie is van de fase van het getij (i.e. waterstand), waarbij de golfopzet maximaal is tijdens laagwater tijdens de storm (dit effect wordt logischerwijze significant vanaf een minimale windsnelheid, omdat dan de golfgroei significant wordt). Dit kan worden verklaard door de diepte-afhankelijkheid in het proces van golfbreking. Tijdens laagwater is de fractie brekende golven groter, waardoor de golfopzet dan ook hoger is ten opzichte van hoogwater. Deze constatering kan worden ondersteund met Figuur 4-39, waarin de relatieve golfhoogte (H_{m0} /lokale waterdiepte) is uitgezet, en gedefinieerd als het verschil van deze grootheid van de waarde rond laagwater in de omgeving van Huibertgat (6/12/2013 18:00h) minus de waarde rond hoogwater in de omgeving van Huibertgat (6/12/2013 09:00h). Uit deze figuur blijkt dat dit verschil voor grote delen van de centraal-oostelijke Waddenzee positief is.



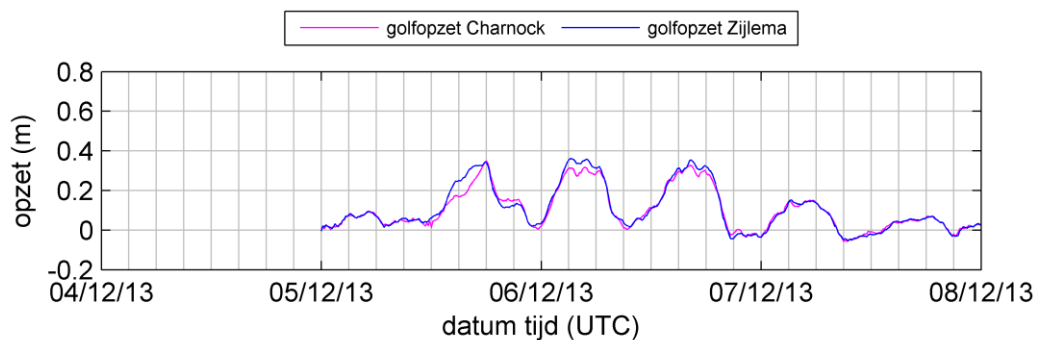
Figuur 4-31 Vergelijking astronomische waterstand tussen overall en detail model en predictie, station Huibertgat.



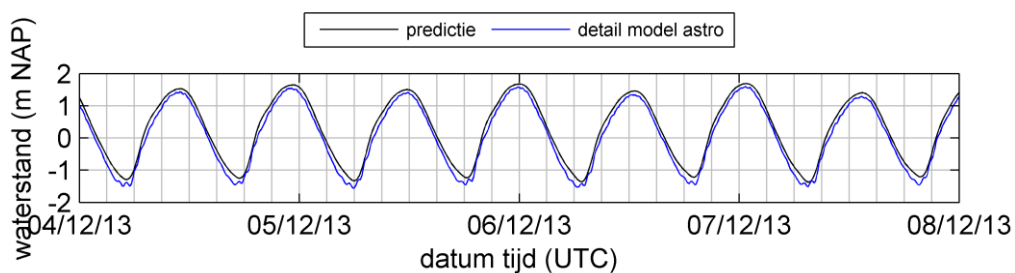
Figuur 4-32. Vergelijking gemodelleerde totale waterstand zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Huibertgat.



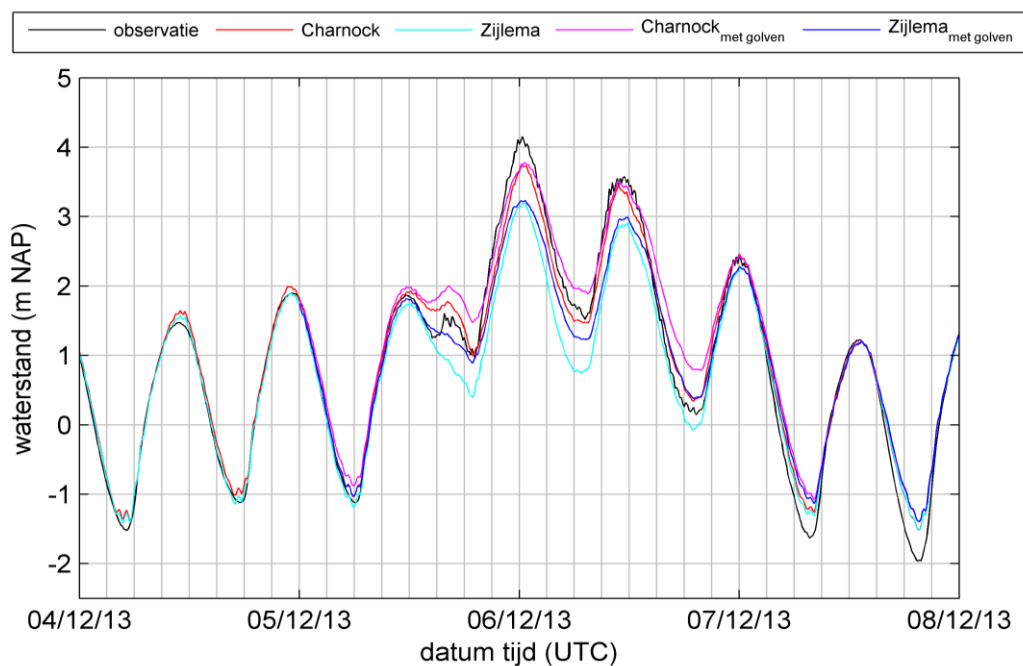
Figuur 4-33. Vergelijking gemodelleerde opzet zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Huibertgat.



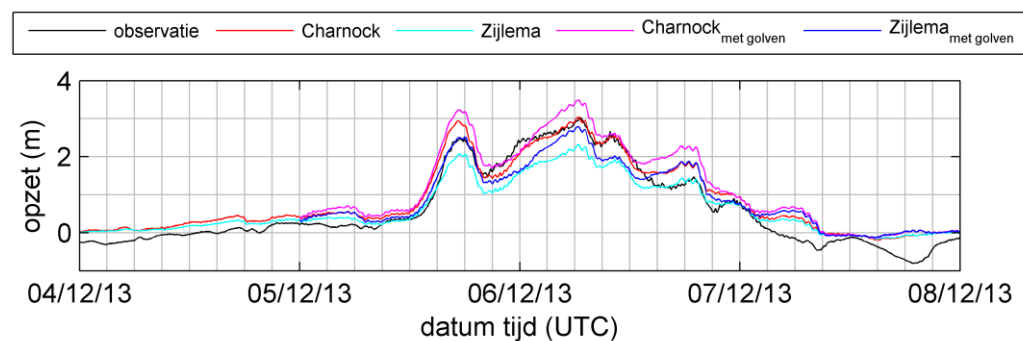
Figuur 4-34. Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Huibertgat.



Figuur 4-35. Vergelijking astronomische waterstand tussen overall en detail model en predictie, station Eemshaven.

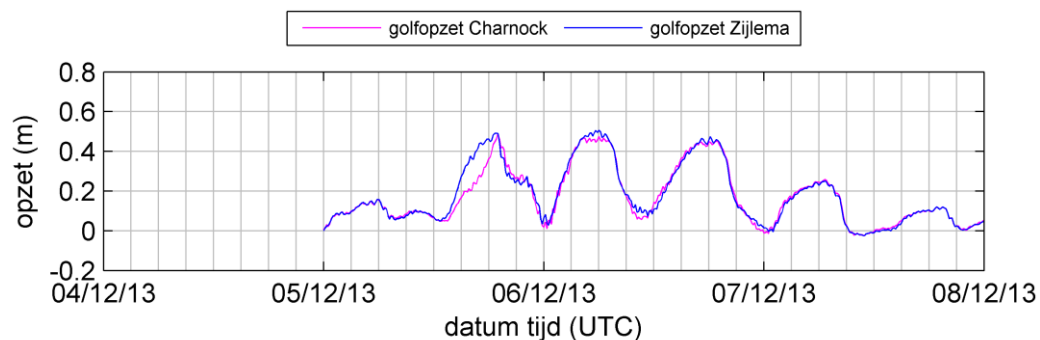


Figuur 4-36. Vergelijking gemodelleerde totale waterstand zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Eemshaven.

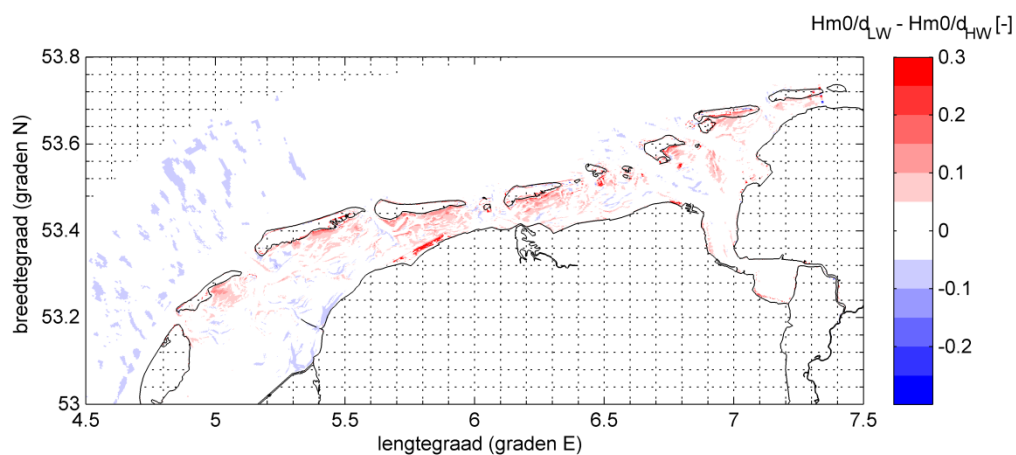


Figuur 4-37. Vergelijking gemodelleerde opzet zonder en met golven, voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Eemshaven.

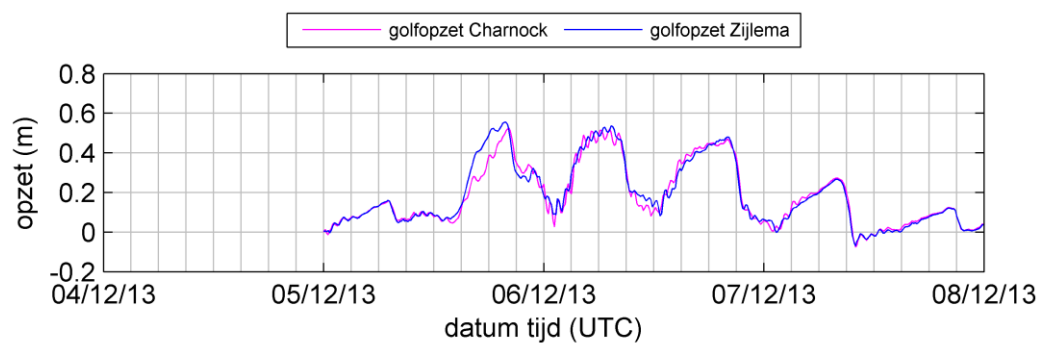
Tevens wordt de gemodelleerde golfopzet ook gekarakteriseerd door een ruimtelijke gradiënt waarbij de golfopzet toeneemt vanuit het buitengebied (Huibertgat) in de richting van het Eems-Dollard estuarium (vergelijk Figuur 4-34, Figuur 4-38, Figuur 4-40, Figuur 4-41).



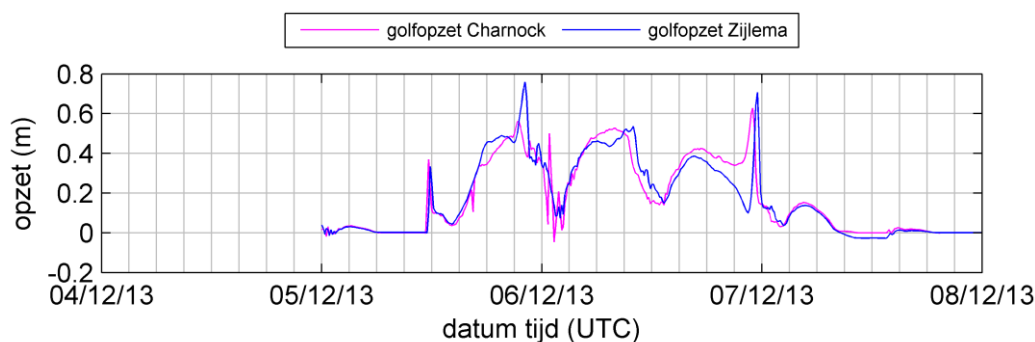
Figuur 4-38. Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Eemshaven.



Figuur 4-39. Gemodelleerde verschil in relatieve golfhoogte voor de simulatie met Charnock-windschuifspanning.



Figuur 4-40. Vergelijk gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Delfzijl.



Figuur 4-41. Vergelijking gemodelleerde golfopzet voor Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock, station Nieuw-Statenzijl.

4.3.3 CONCLUSIES

Op basis van de resultaten voor de simulaties waarin golven zijn meegenomen in de modellen, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het golfmodel is in algemene zin in staat de uit metingen afgeleide golfvariabelen redelijk tot zeer nauwkeurig weer te geven. Echter, de uitkomst van deze vergelijking is sterk plaats afhankelijk.
- Uit metingen kan niet de golfgedreven waterstandopzet worden bepaald. Echter, de modellen suggereren een significante bijdrage van golven aan de totale waterstandopzet (maximaal orde 0,5 m op een totale opzet van orde 2 á 3 m), ofschoon ondergeschikt aan de directe opzet door de wind. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het meenemen van golven in de modellering van stormwaterstanden relevant is.
- De gemodelleerde waterstanden zijn zeer gevoelig voor de gebruikte windschuifspanningsformulering. Op basis van de huidige resultaten en de gebruikte modelinstellingen wordt geconcludeerd dat de Charnock formulering het meest geschikt is voor een nauwkeurige weergave van de stormwaterstanden.
- De modeluitkomsten suggereren een waterstandsafhankelijke golfopzet, waarbij tijdens laagwater de opzet door relatief meer brekende golven hoger is dan de opzet tijdens hoogwater. Echter, vervolgonderzoek moet uitwijzen of dit realistisch is, daar tegelijkertijd wordt geconstateerd dat de totale waterstand juist tijdens laagwater op plaatsen wordt overschat.

5

Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport betreft de weergave van een rekenexperiment voor de Waddenzee waarin middels een uitgebreide set van complexe simulaties nagegaan is of de stormwaterstanden voor de Sinterklaas storm van 2013 met voldoende mate van nauwkeurigheid kunnen worden gesimuleerd en welke individuele fysische aspecten significant en insignificant bijdragen aan deze voorspelde waterstanden. Hiertoe is een gevoeligheidsstudie van een selecte set van processen/parameters uitgevoerd en is systematisch nagegaan wat de bijdrage is van dit proces/parameter aan de berekende waterstand.

Hieronder presenteren wij onze conclusies en geven wij concrete aanbevelingen die daaruit voortvloeien.

5.1 CONCLUSIES

In algemene zin concluderen we dat deze studie heeft bijgedragen aan een systematische afweging van processen/parameters die relevant zijn voor een accurate weergave van stormwaterstanden op de Waddenzee.

Uit een uitvoerige analyse van de in dit onderzoek uitgevoerde simulaties kan worden geconcludeerd dat:

1. Het DCSMv6 model een goede weergave geeft van de getijvoortplanting in de Waddenzee. Hierbij wordt opgemerkt dat de variatie in middenstand beter wordt gemodelleerd indien er wind op het model wordt opgelegd.
2. Het rekenen met voldoende horizontale resolutie van het rekenrooster onontbeerlijk is om waargenomen waterstanden in fase en amplitude goed te kunnen representeren. Deze ogenschijnlijk logische bevinding is niet triviaal daar aangetoond is dat in bepaalde gevallen gemodelleerde waterstanden dichter bij de metingen komen te liggen, echter, hieraan ligt een foutieve weergave van het fysische systeem ten grondslag.
3. De gemodelleerde waterstanden gevoeliger zijn voor de beschouwde variatie in temporele dan in de ruimtelijke resolutie van de atmosferische invoervariabelen (wind- en drukvelden, alsmede bewolgingsgraad, relatieve luchtvochtigheid en luchttemperatuur).
4. De gemodelleerde waterstanden zeer gevoelig zijn voor de gebruikte windschuifspanningsformulering. Het gebruik van de formulering van Charnock [1955] voor de windschuifspanningscoëfficiënt geeft zonder en met golven een meer nauwkeurige weergave van de stormwaterstanden in vergelijking tot de formulering van Zijlema et al. [2012]. Echter, de windsnelheden gedurende de gesimuleerde storm bevinden zich niet in een gebied waar grote afwijkingen tussen Charnock en Zijlema mogen worden verwacht. Bij extrapolatie naar zwaardere stormen zal hier nog nader naar gekeken moeten worden.
5. Het rekenen met het detail model zonder golven in 2D vergelijkbare resultaten geeft als in 3D. Kleine verschillen zijn zichtbaar voor stations waar een grotere ruimtelijke zoutgradiënt aanwezig is.

6. Het golfmodel in algemene zin in staat is de uit metingen afgeleide golfvariabelen redelijk tot zeer nauwkeurig weer te geven. Echter, de uitkomst van deze vergelijking kent een sterke plaats afhankelijkheid en kan desgewenst worden uitgebreid met de in de literatuur beschikbare gegevens [sensu Zijlema et al., 2012].
7. De gekoppelde golf - stroom modellen een significante bijdrage van golven suggereren aan de totale waterstandopzet, ofschoon ondergeschikt aan de directe opzet door wind (golfopzet is enkele decimeters tot orde 0,5 m versus windopzet van orde 2 - 3 m op een getij-amplitude van orde 1,5 m). Hieruit kan worden geconcludeerd dat het meenemen van golven in de modellering van stormvloed waterstanden in algemene zin relevant is.
8. De modeluitkomsten een waterstandsafhankelijke golfopzet suggereren, waarbij tijdens laagwater de opzet door relatief meer brekende golven hoger is dan de opzet tijdens hoogwater.

Uit onze studie is gebleken dat de directe opzet van de waterstand door wind een veelvoud is van de opzet die gegenereerd wordt door de door wind gegenereerde golven. Dit impliceert dat de nauwkeurigheid van de reproductie van waterstanden sterk afhankelijk is van de invoer van atmosferische variabelen (luchtdruk, windsnelheid, windrichting). Dit betekent dat de forecast van stormwaterstanden door het huidige modelinstrumentarium eveneens gevoelig zal zijn voor de nauwkeurigheid van de ingevoerde atmosferische variabelen.

Bovendien is gebleken dat de golfopzet significant bijdraagt aan de totale stormwaterstand, waardoor geconcludeerd kan worden dat het meenemen van golven in het huidige modelinstrumentarium de voorspellingskracht van het model kan verbeteren. Hierbij wordt opgemerkt dat de extra benodigde rekenkracht gecompenseerd zou kunnen worden door dieptegemiddeld (2D) te rekenen. Uit deze studie is namelijk gebleken dat verschillen in modeluitkomsten tussen 2D en 3D schematisaties kunnen worden verwaarloosd. Deze bevinding is gebaseerd op berekeningen zonder het effect van golven. Naar verwachting is deze conclusie ook geldig voor een 2D simulatie met golven omdat de golven alleen in 2D worden uitgerekend.

Tevens heeft de voorliggende studie uitgewezen dat berekende waterstanden zeer gevoelig zijn voor de keuze van de windschuifspanning formulering. Toepassing van de huidige modelschematisaties op meerdere stormen moet antwoord geven op de vraag hoe robuust deze bevinding blijkt in algemene zin. Op basis daarvan kunnen aanbevelingen volgen voor aanpassingen van het operationele voorspellingssysteem.

Het voorspellingsmodel dat gebruikt wordt in het operationele voorspellingssysteem van Rijkswaterstaat, maakt gebruik van de Simona modellenlijn en is minder goed vergelijkbaar, omdat er middels Kalman filtering een mix van modellen en metingen wordt gebruikt. Voor het hier gebruikte modelinstrumentarium zijn nu een aantal gevoeligheden afgetast waarvoor nu definitieve keuzes kunnen worden gemaakt. Een vergelijking tussen de resultaten van dit model instrumentarium en het door Rijkswaterstaat gebruikte modelinstrumentarium laat zien dat de resultaten in de gehele Waddenzee redelijk goed zijn. Het Eems-Dollard estuarium laat ook hier nog tekortkomingen zien die voor een deel worden veroorzaakt door twee aspecten:

- Onvoldoende resolutie van het model ter plaatse en daardoor droogvallende ondiepten;
- Een matige representatie van het getij ter plaatse. Deels veroorzaakt door voorgaand punt, deels door een matige representatie van de langperiodieke componenten van het getij.

5.2 AANBEVELINGEN

Uit voorgaande conclusies kunnen de volgende specifieke aanbevelingen worden opgesteld:

1. Er is onderzoek nodig naar de variatie van langperiodieke componenten. Hierin moet worden vastgesteld of astronomische waterstanden volgend uit voorspellingen op basis van gemeten waterstanden nauwkeuriger kunnen worden weergegeven.
2. Het verdient aanbeveling om met een fijner rekenrooster voor het detailmodel waterstanden te berekenen. Bodemgegevens van een dergelijke resolutie zijn reeds beschikbaar. Hiermee kunnen waterstanden op ondiepe stations beter worden gereproduceerd.
3. Het verdient aanbeveling de resolutie van het wind model op 10 minuten te houden, terwijl de ruimtelijke resolutie op 3 km kan worden gehandhaafd. Bovendien verdient het aanbeveling de windsnelheid nabij het wateroppervlak te gebruiken in plaats van de standaard windsnelheid op 10 m boven lokaal niveau.
4. Het verdient ook aanbeveling de waterstanden als functie van de tijd terug te voeren op het meteorologische model om zodoende een realistischer ruwheidsveld onder het wind model te realiseren.
5. Uit de vergelijkingen in dit rapport is gebleken dat de modeluitkomsten voor simulaties waarin golven niet zijn geschematiseerd, relatief ongevoelig zijn voor schematisatie van de verticale dimensie. Dit impliceert een potentiële afname van benodigde rekentijd. Echter, het verdient aanbeveling om na te gaan of dit ook geldt voor een 2D benadering waarin golven zijn opgenomen in de modellering. Het verdient eveneens aanbeveling de tijdseries van de zoetwater afvoeren in meer detail op te nemen in het model. Daarmee kunnen natuurlijke gradiënten in zoutgehalte beter worden weergegeven waarvoor het 2D-3D vergelijking nauwkeuriger wordt. Echter, gezien de dichtheidsverschillen tijdens stormen significant afnemen (er wordt bijvoorbeeld niet gespuid en de verversingssnelheid van het water neemt enorm toe), bevelen wij aan in 2D te simuleren.
6. In het huidige onderzoek zijn de instellingen in het SWAN golfmodel niet getest. Echter, Zijlema et al. [2012] toonden reeds aan dat bijvoorbeeld de keuze voor een windschuifspanningscoëfficiënt implicaties heeft voor de bodemwrijvingscoëfficiënt. Bovendien wordt in dat artikel gewezen op een aanzienlijke variatie van de bodemschuifspanningscoëfficiënt; de gebruikte waarde van $0,038 \text{ m}^2/\text{s}^3$ betreft een gemiddelde met een standaard deviatie van dezelfde orde van grootte. Daarnaast geven recente ontwikkelingen aanleiding om specifieke fysische instellingen van het golfmodel te onderzoeken in termen van de effecten op berekende waterstanden. Dit betreffen met name de recent ontwikkelde brekerformulering van Salmon et al. [2014] en de formulering voor whitecapping (e.g. Arduin et al., 2010 en Rogers et al., 2012). Wij stellen daarom voor de recent ontwikkelde brekerformulering te gebruiken en eveneens bij een tijdstap van 10 minuten slechts met 1 iteratie voor SWAN in-stationair te volstaan.
7. Het verdient aanbeveling om na te gaan of een significante golfopzet ook blijkt voor andere stormen. Dit zou belangrijke potentiële consequenties kunnen hebben op aanbevelingen voor het operationele modelinstrumentarium (namelijk om volledige golf-stroom interactie mee te nemen).
8. De geconstateerde gemodelleerde waterstandsafhankelijke golfopzet verdient nadere studie.
9. Wij bevelen aan een met de hierboven genoemde instellingen een groter aantal stormen door te rekenen.

Referenties

Alkyon, 2007. Hydro-dynamics in the Wadden Sea during storm conditions. Current and wave conditions during the storms of 1 Nov. 2006 and 18 Jan. 2007. Report A1848. (J. Adema and G.Ph. van Vledder).

Alkyon, 2008a. Simulation studies for storm winds, flow fields and wave climate in the Wadden Sea. Report A2108. (G Lipari, G. Ph. van Vledder, J. Cleveringa, J. Adema)

Alkyon, 2009. SWAN hindcast in the eastern Wadden Sea and Eems-Dollard estuary. Report A2191 (J. Adema, G.Ph. van Vledder and O.R. Koop).

Alkyon, 2009 Viability study of a prototype windstorm for the Wadden Sea surges, WTI 2011, Project A2239, May 2009

Cats, G. 2014 Numerical modeling of wave-current interaction with the use of a two way coupled system, MSc Thesis Technische Universiteit Delft, August 18, 2014

Charnock, 1955: Wind stress on a water surface. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 81:639-640, 1955

Deltares, 2013, Development of the next generation Dutch Continental Shelf Flood Forecasting models, Set-up, calibration and validation, report 1205989-003, 15 July 2013

Matsumoto, K., T. Takanezawa, en M. Ooe, 2000. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, Journal of Oceanography, 56, 567-581, 2000

Wu, J., 1982; Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No C12, Pages 9704-9706, November 1982

Zijlema, M., G.Ph. Van Vledder en L.H. Holthuijsen, 2012: Bottom friction and wind drag for wave models. Coastal Engineering 65, pp 19–26, 2012.

Rijkswaterstaat 2013. Getijtafels voor Nederland 2014. Sdu Uitgevers.

WRF-NMM Version 3 Modeling System User's Guide, April 2014

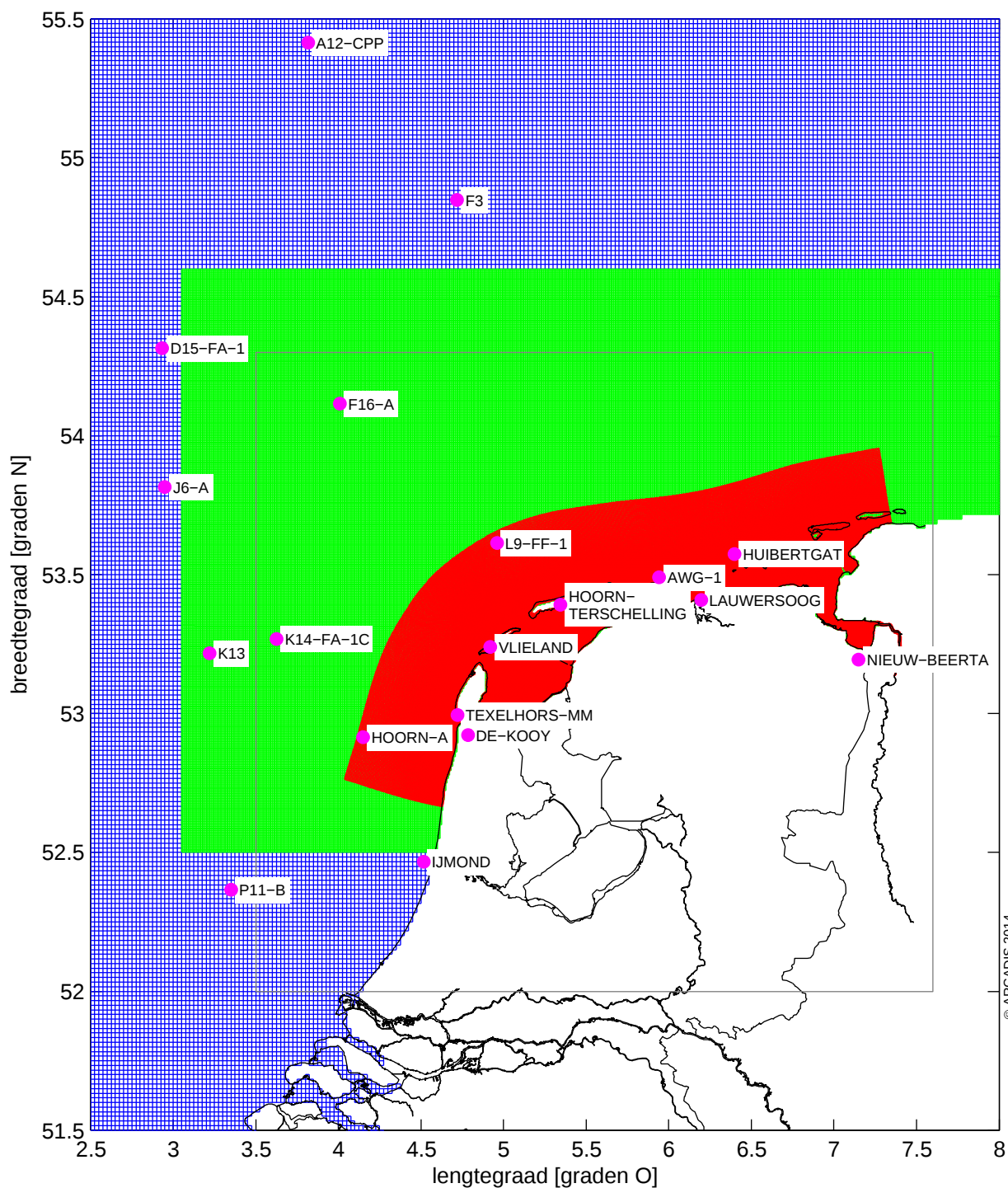
Deltares 2014. Delft3D FLOW User Manual, v.3.15.34158

Technische Universiteit Delft 2014 SWAN Manual SWAN Cycle III version 41.01

Earth Tech, Inc. 2000. A User's Guide for the CALMET meteorological model (Version 5), January 2000

Bijlage A

Vergelijking windmetingen en HIRLAM-WRF modellen



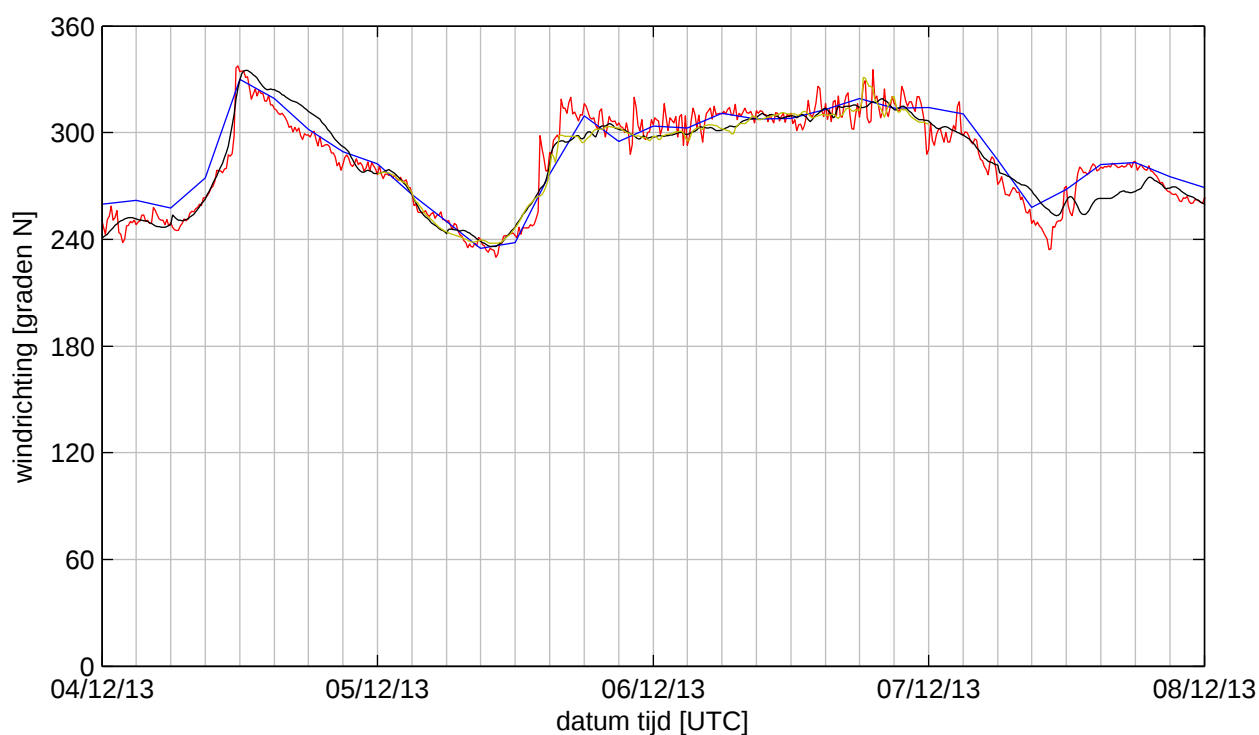
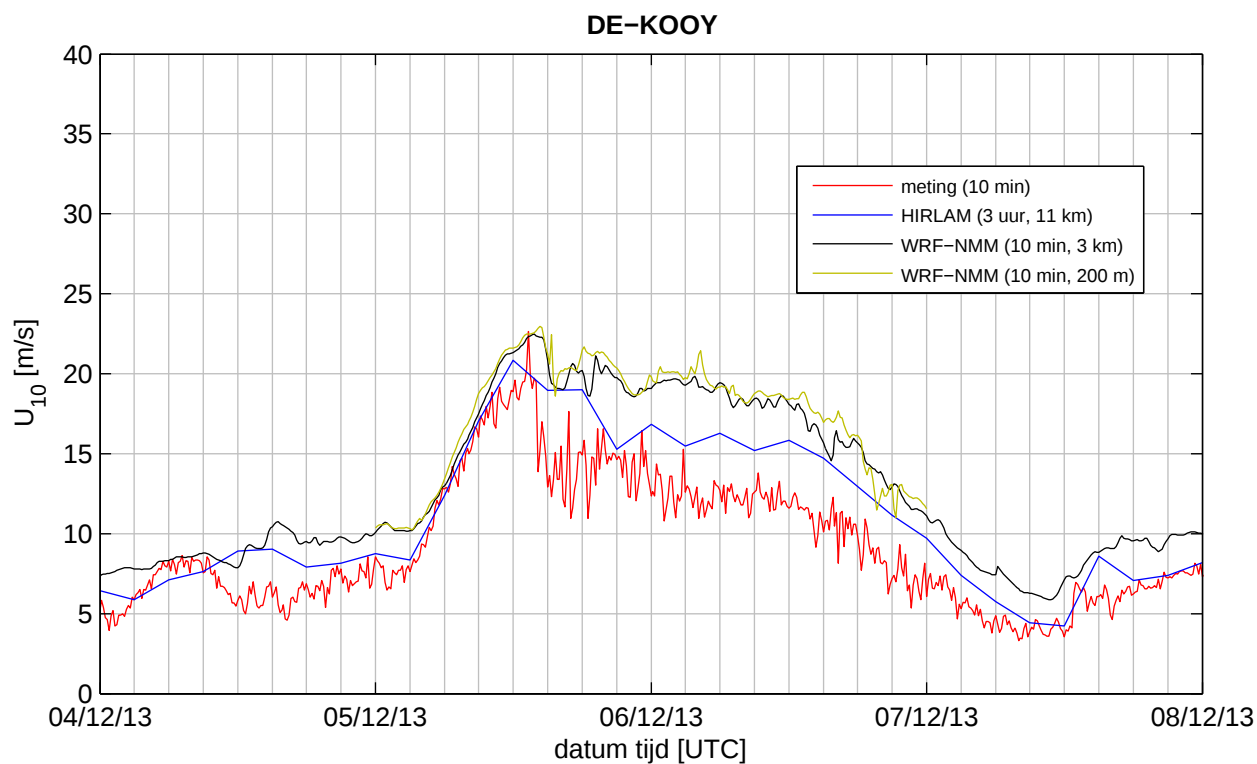
© ARCADIS 2014

Ligging meetstations KNMI (dots) t.o.v. rekenroosters modellering waterbeweging
(blauw: overall model, groen: intermediate model, rood: detailmodel)
en domeingrens WRF-NMM 200 m model (grijze box)

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.0



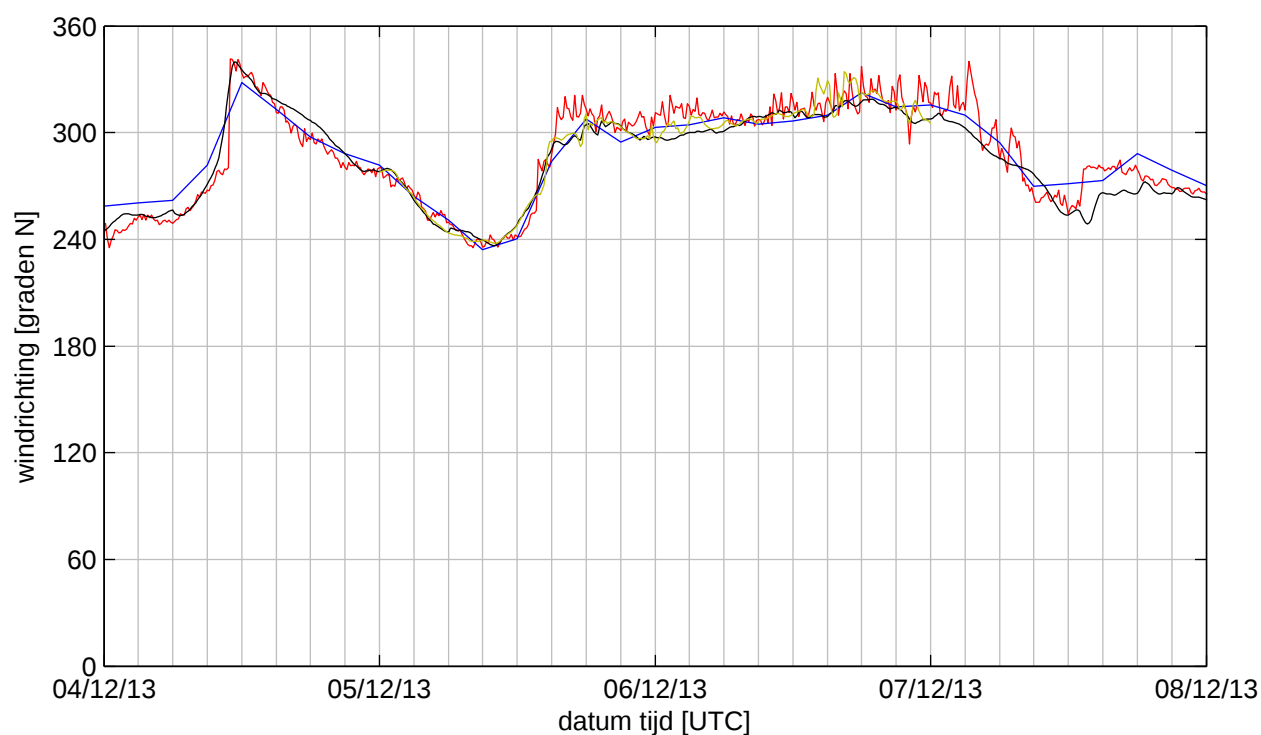
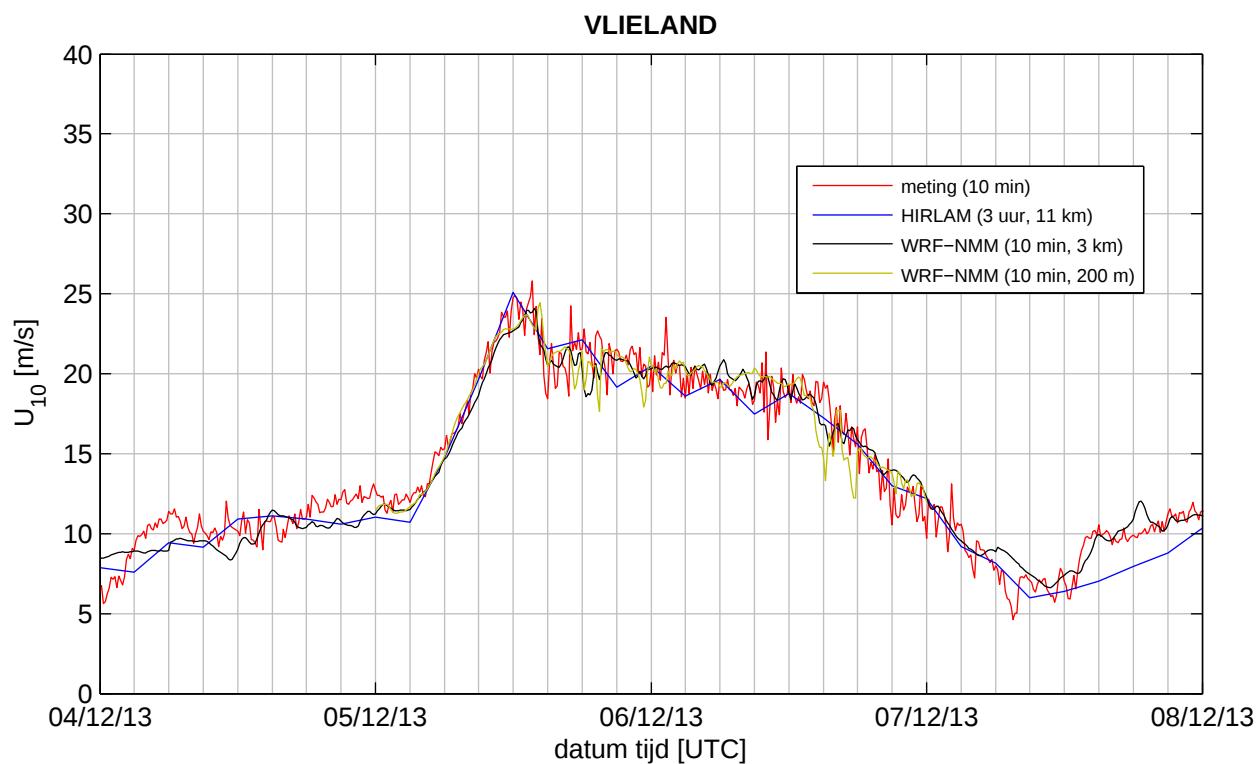
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station DE-KOOY

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.1



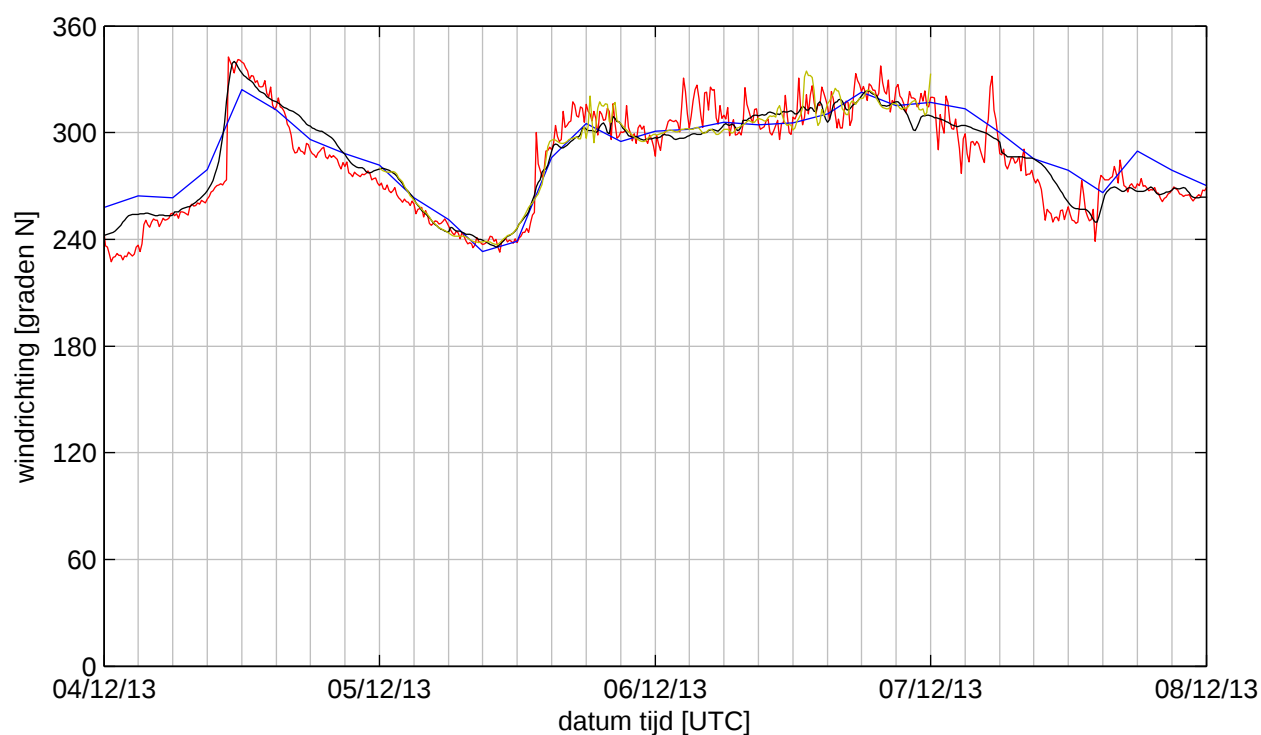
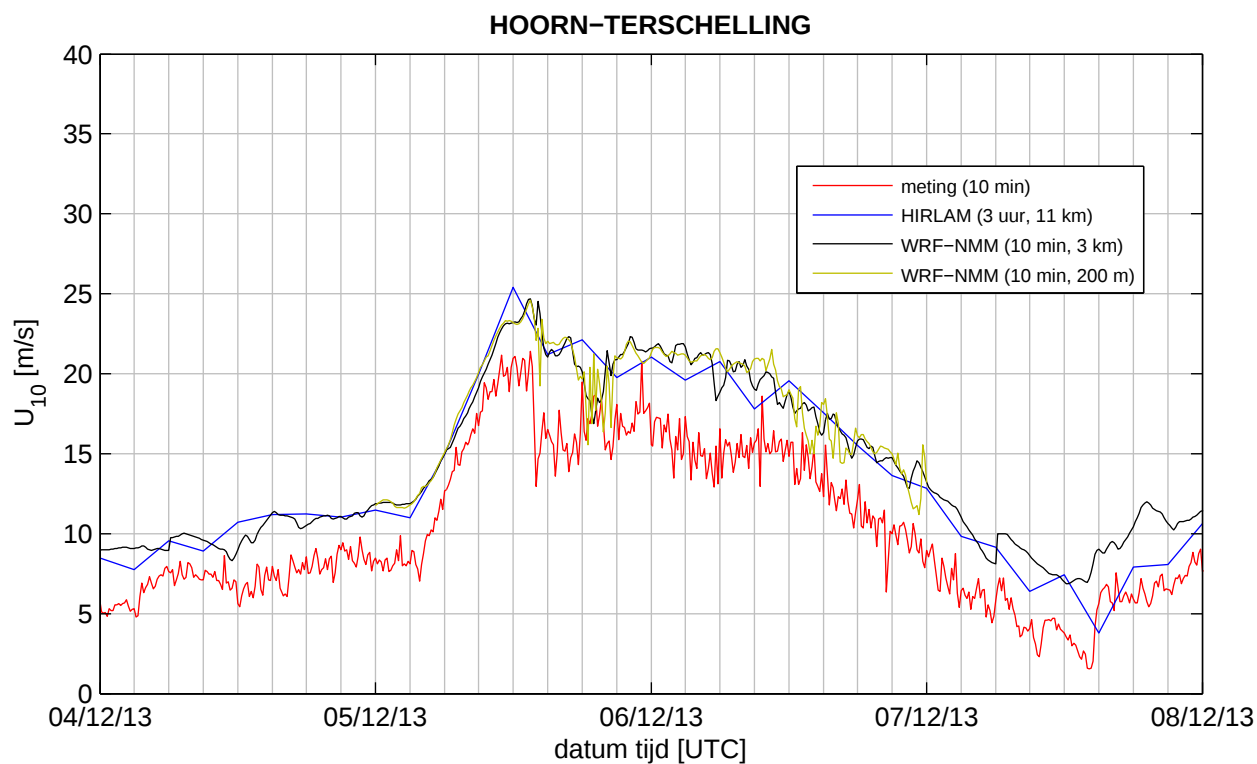
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station VLIELAND

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.2



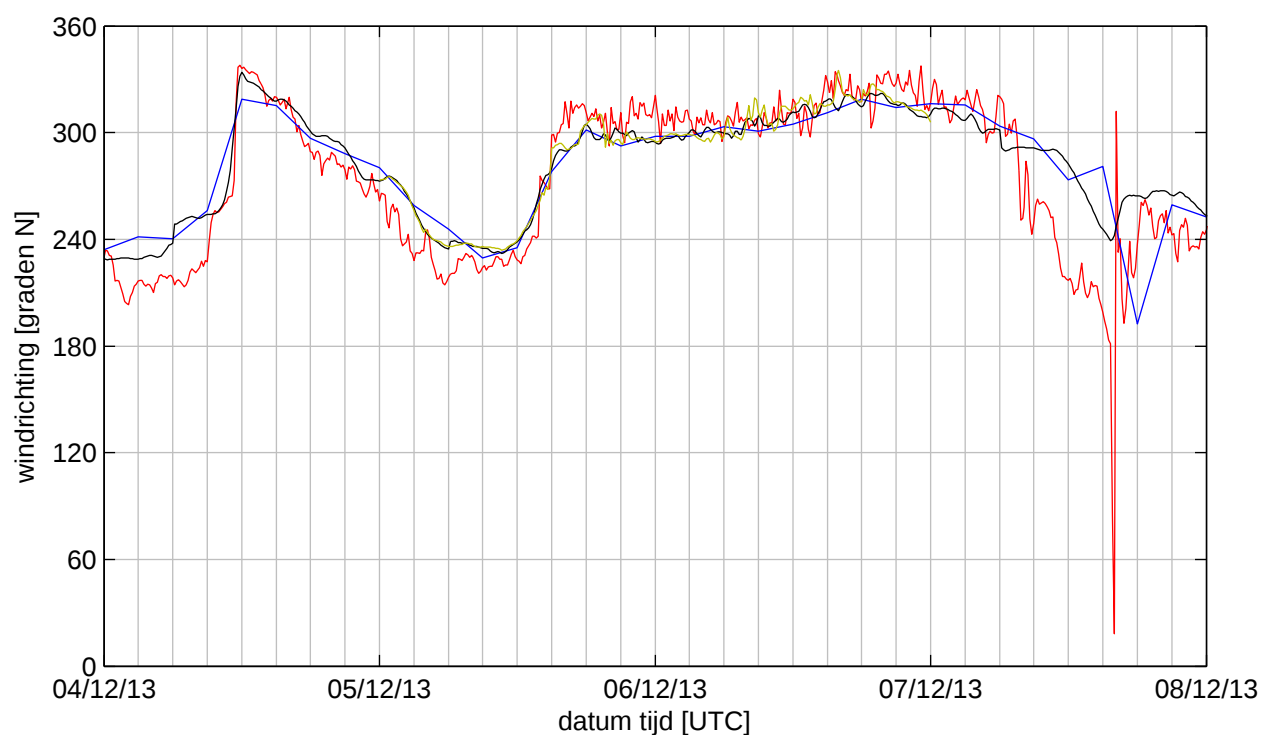
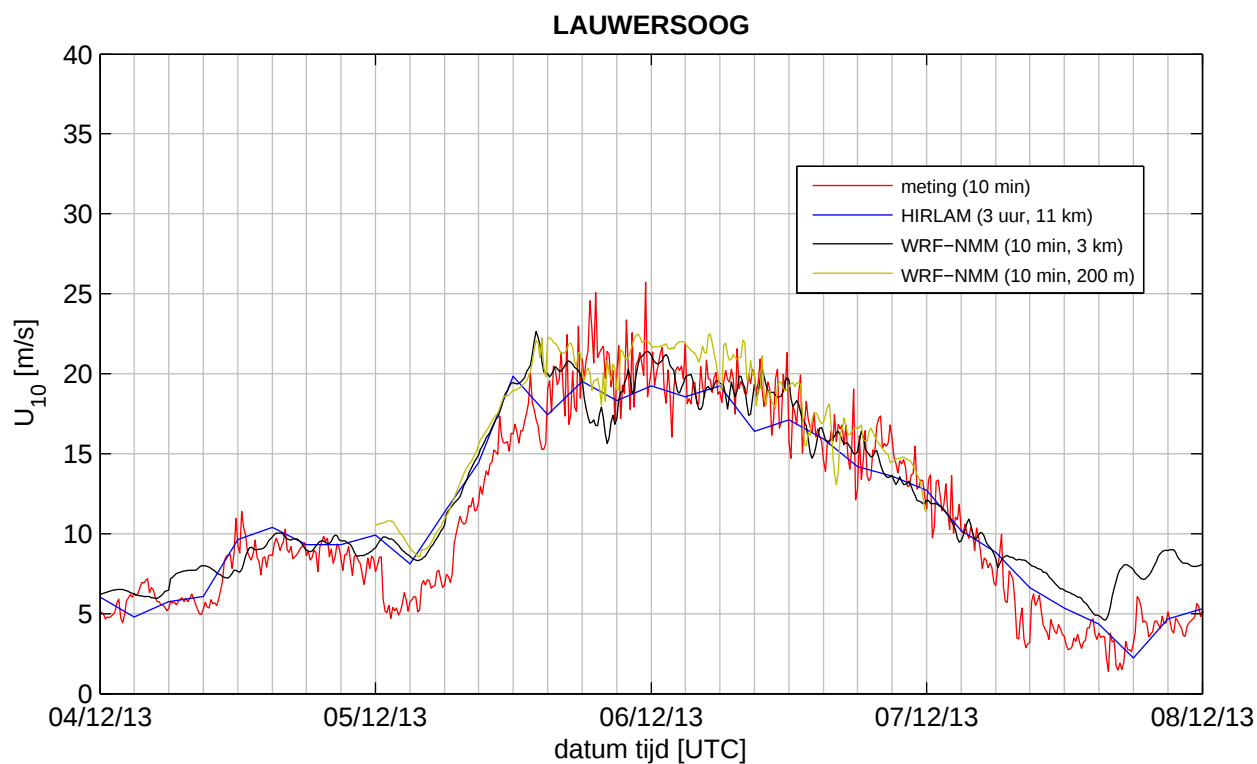
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station HOORN-TERSCHELLING

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.3



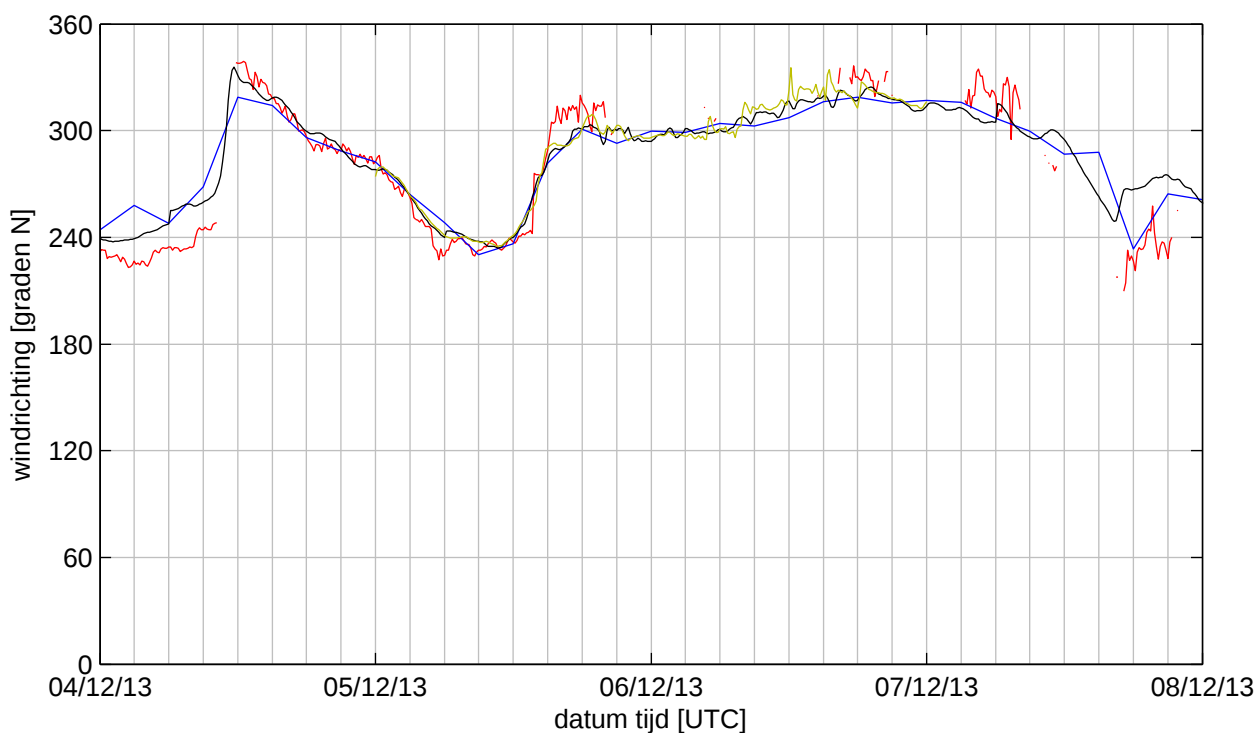
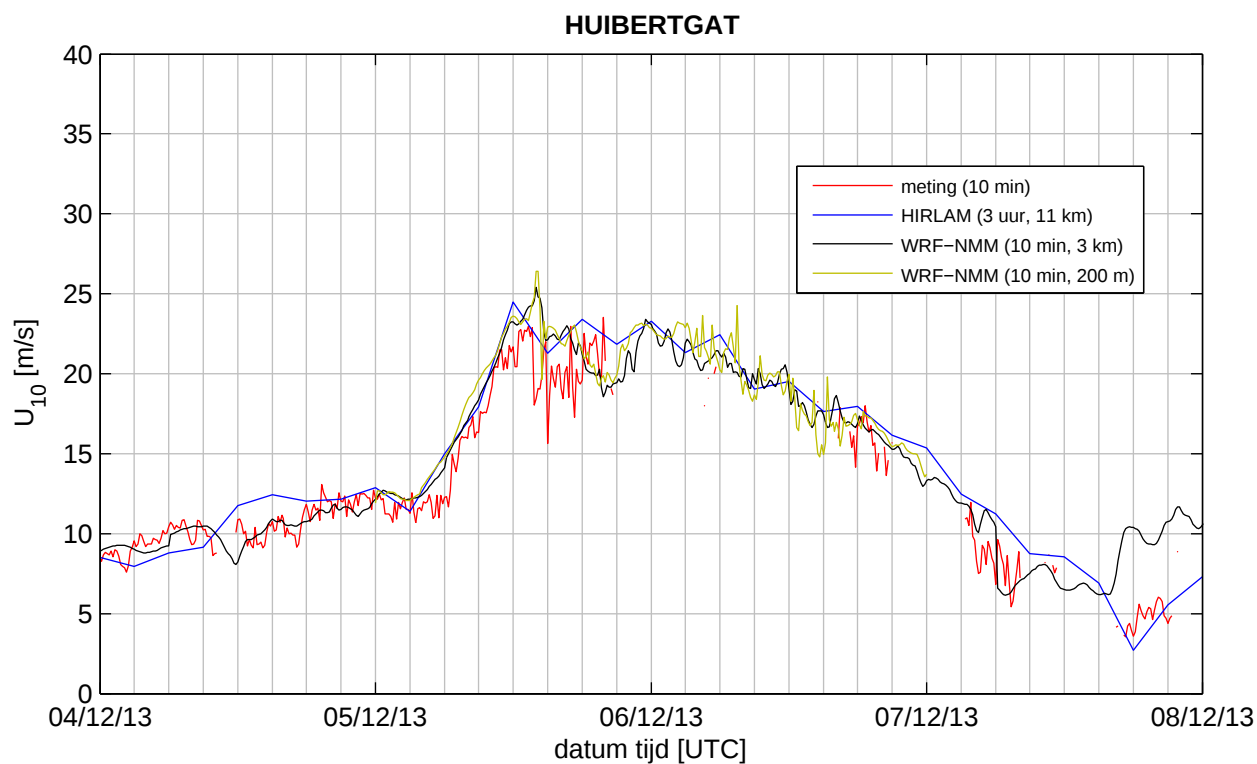
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station LAUWERSOOG

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.4



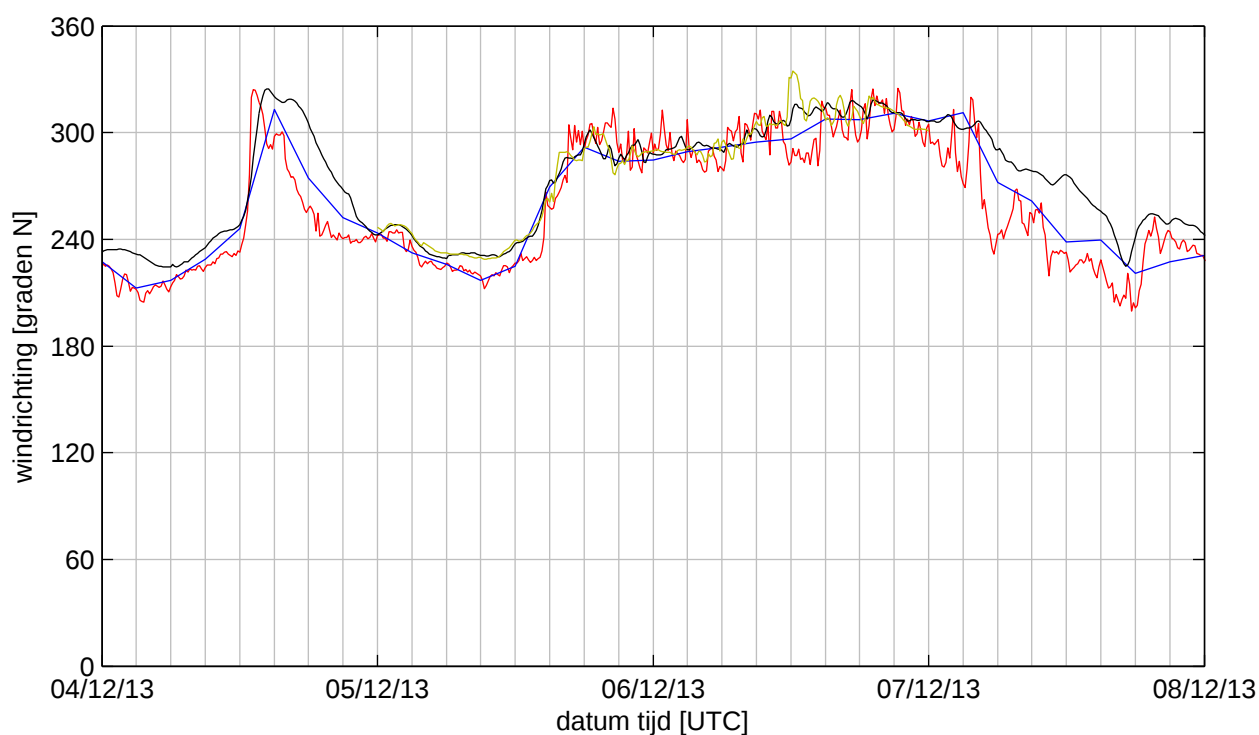
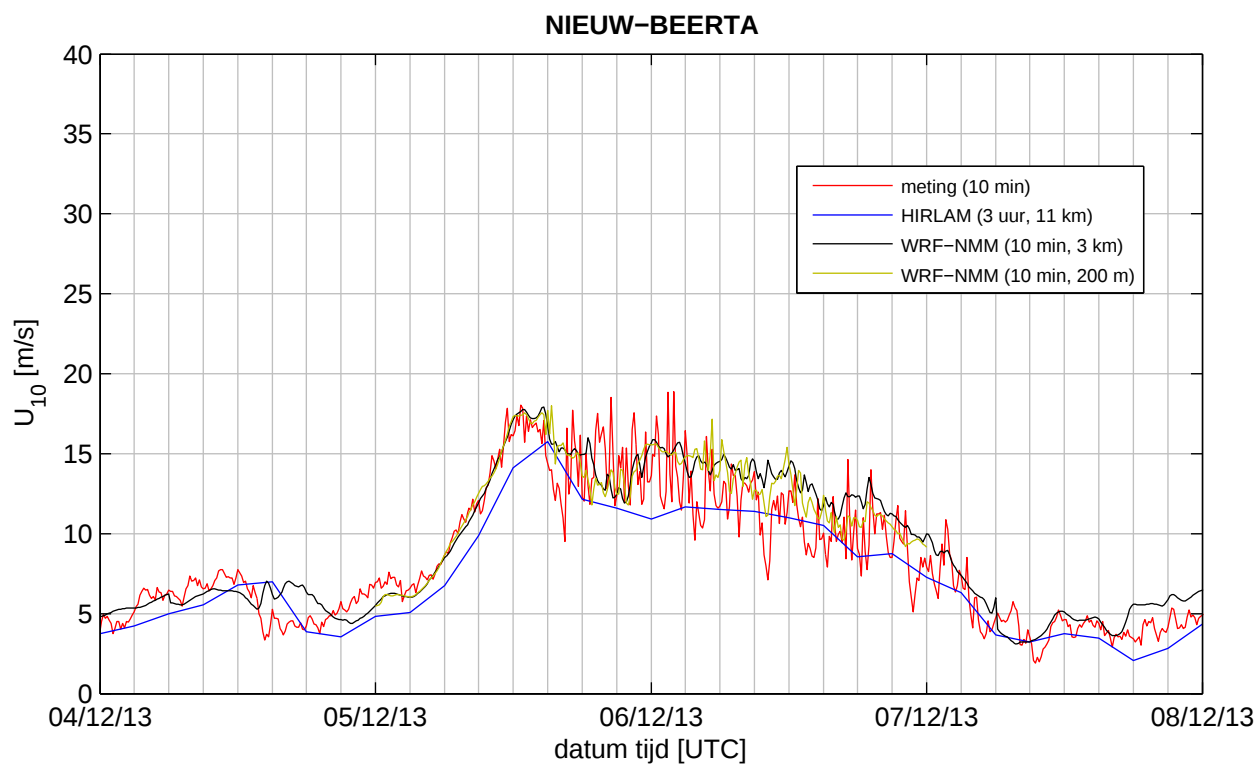
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station HUIBERTGAT

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.5



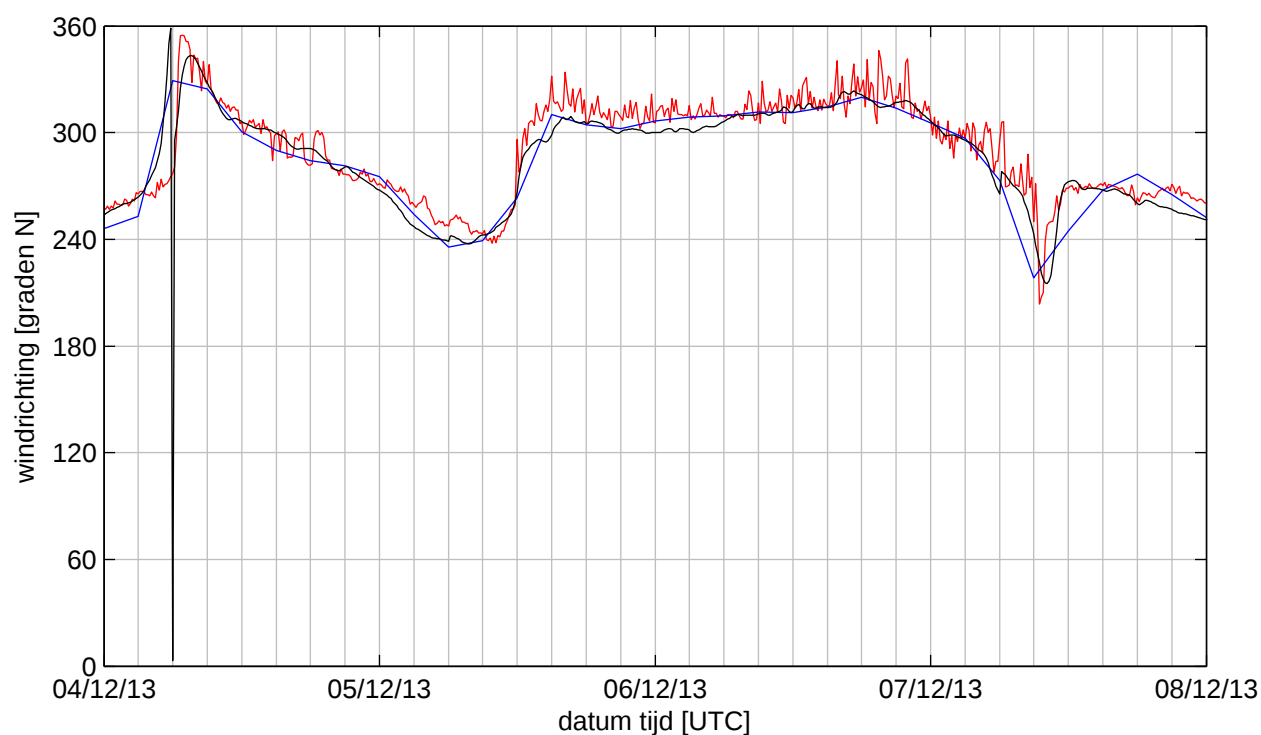
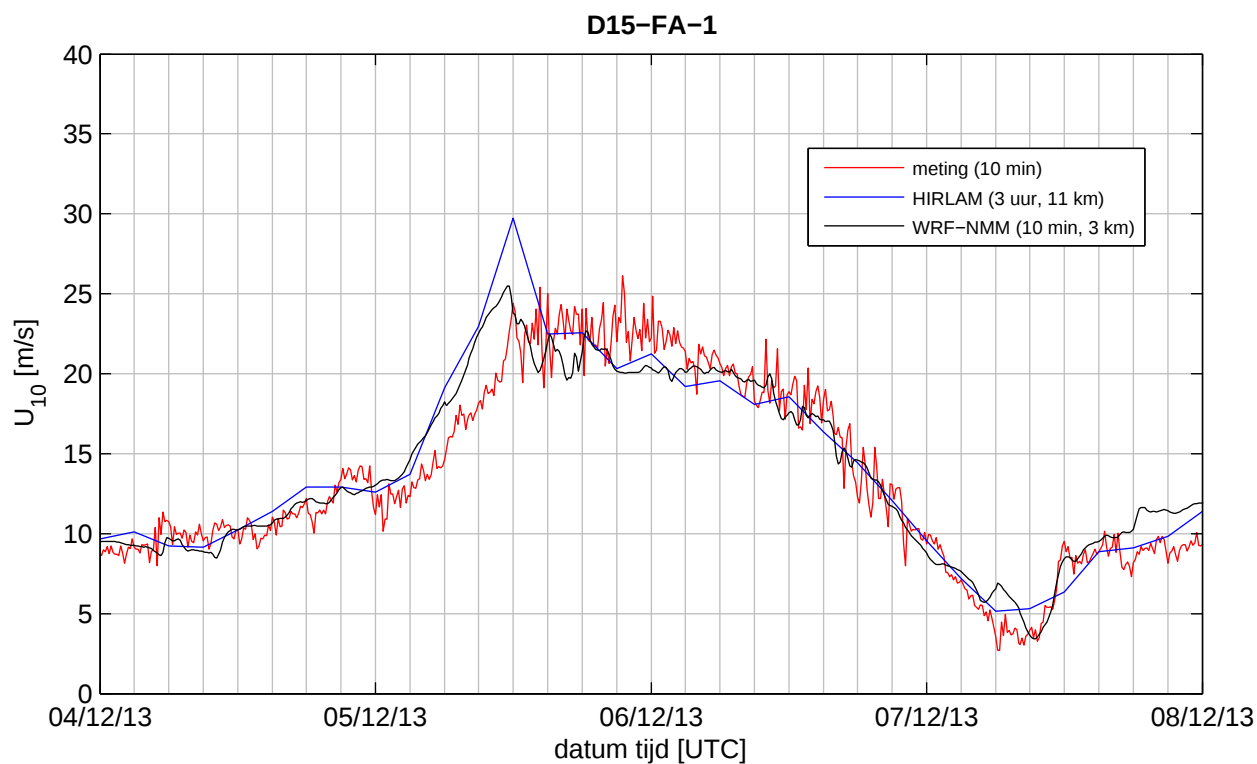
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station NIEUW-BEERTA

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.6



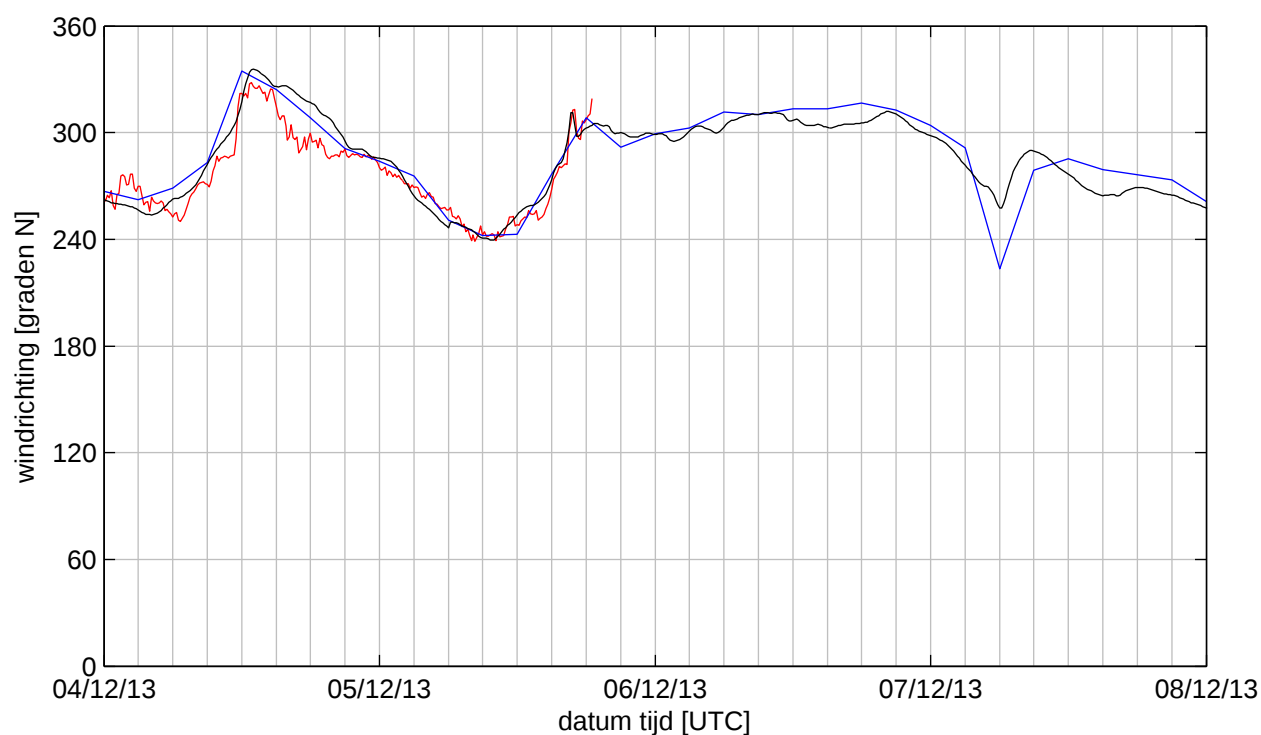
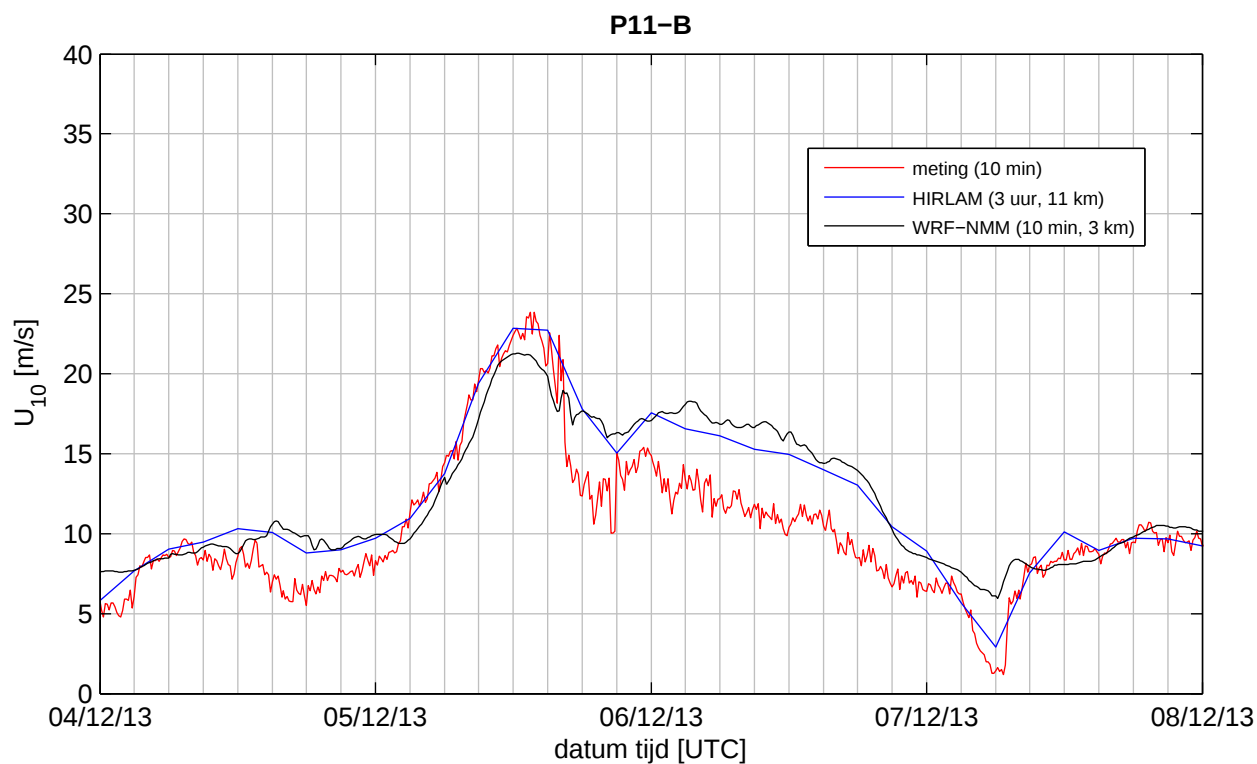
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station D15-FA-1

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.7



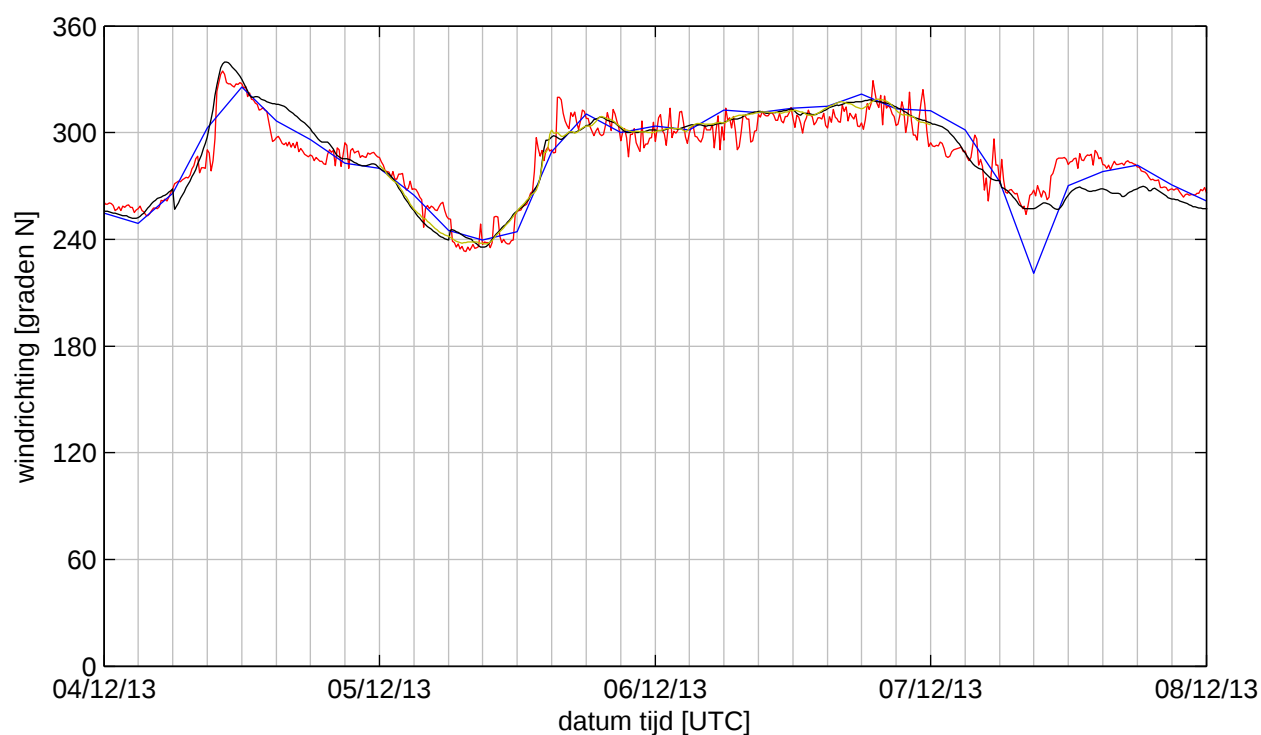
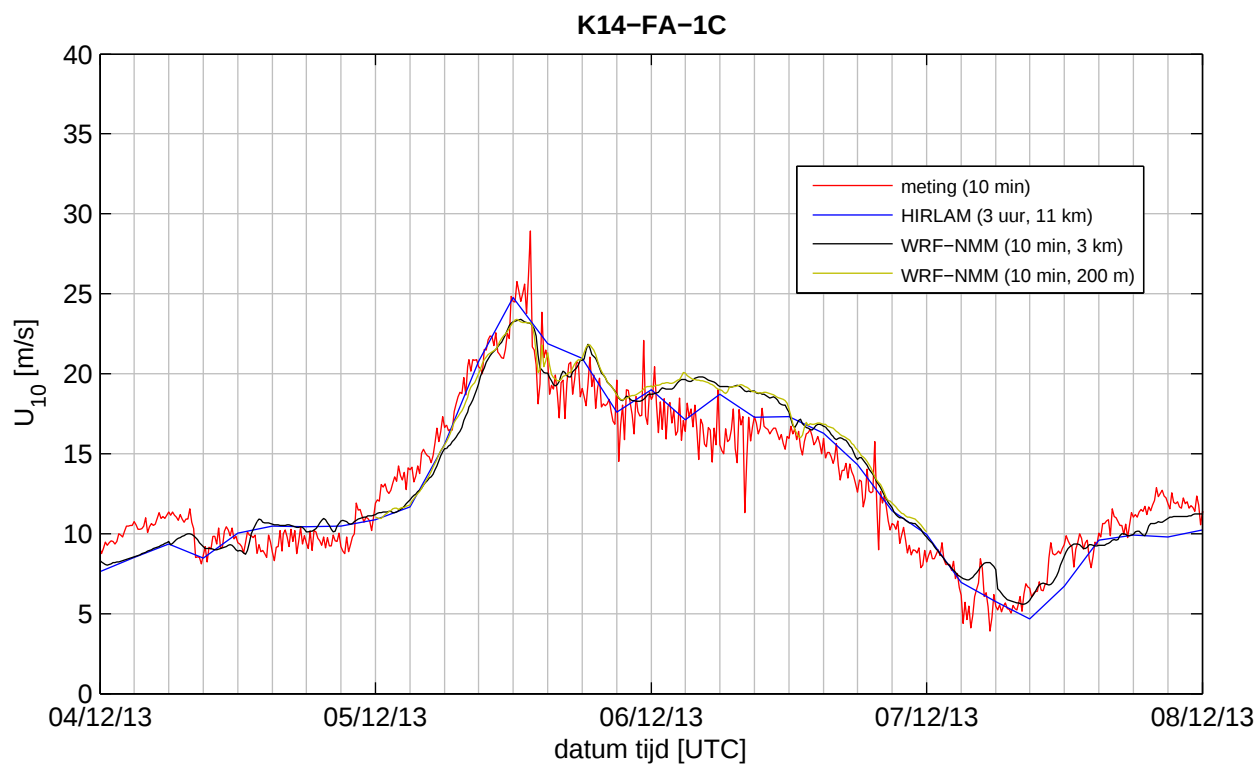
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station P11-B

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.8



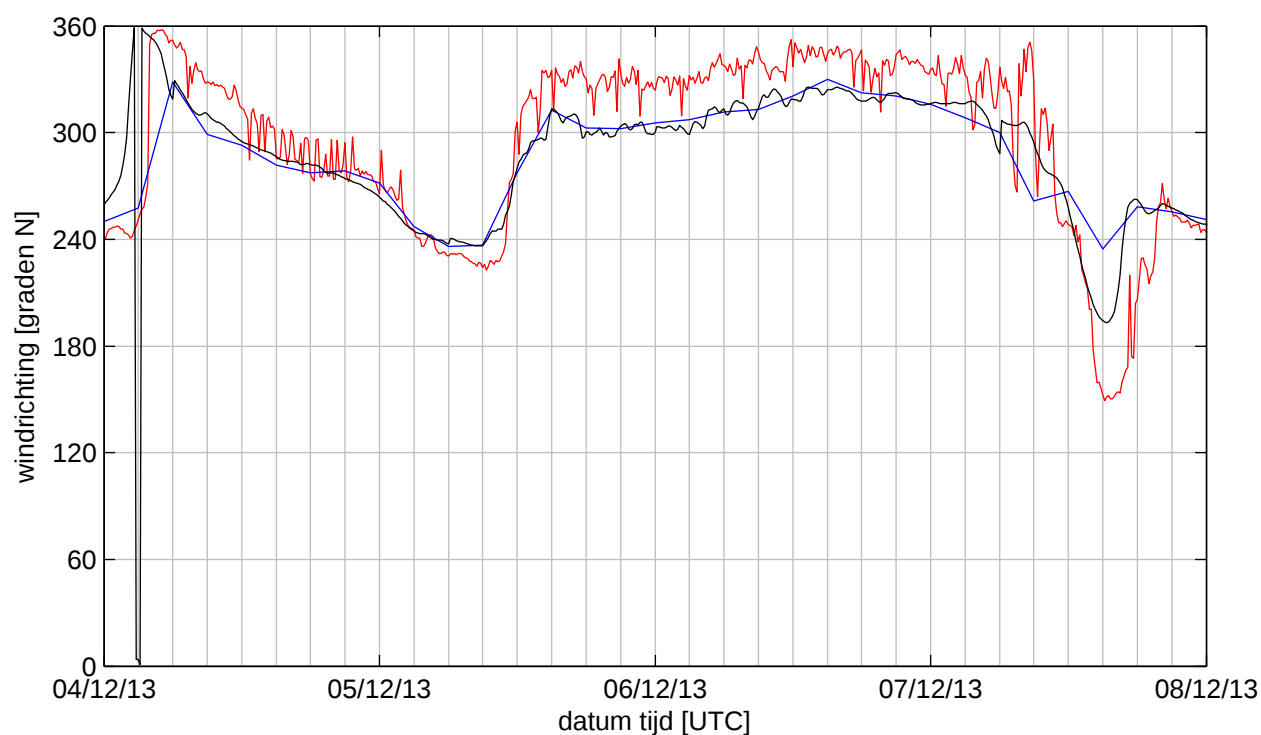
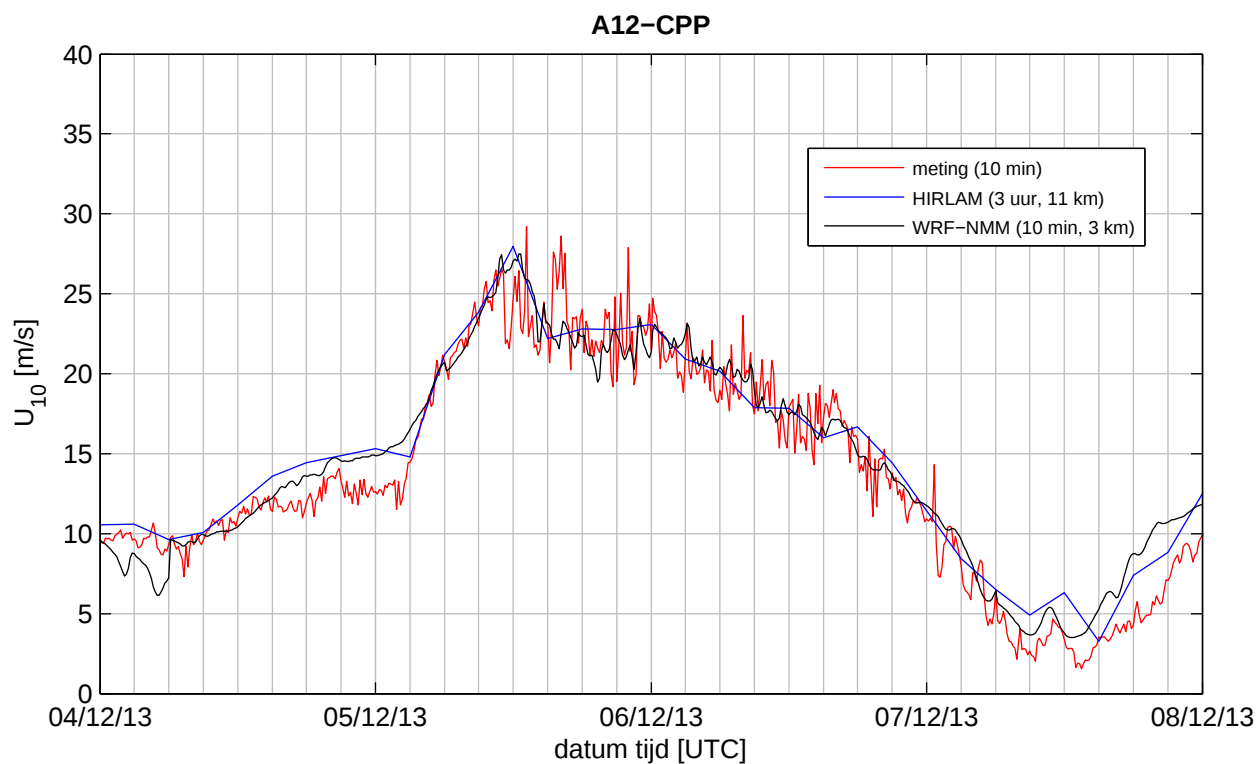
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station K14-FA-1C

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.9



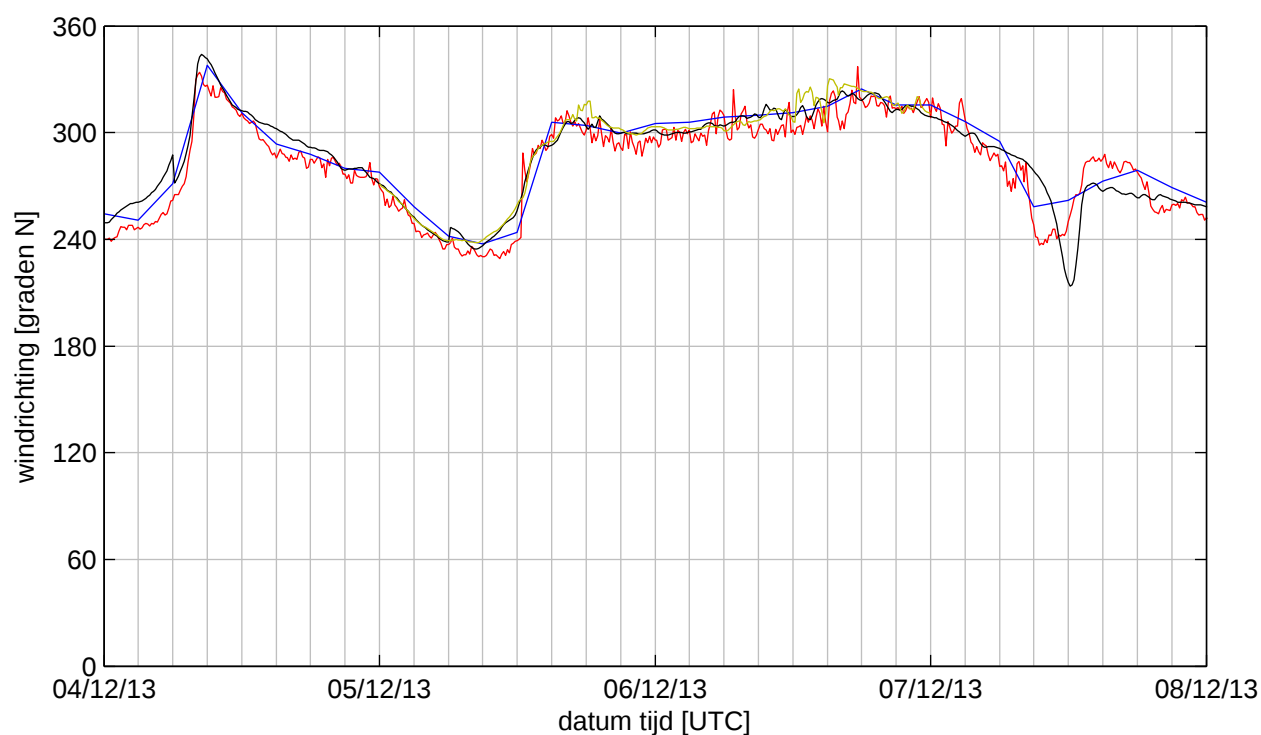
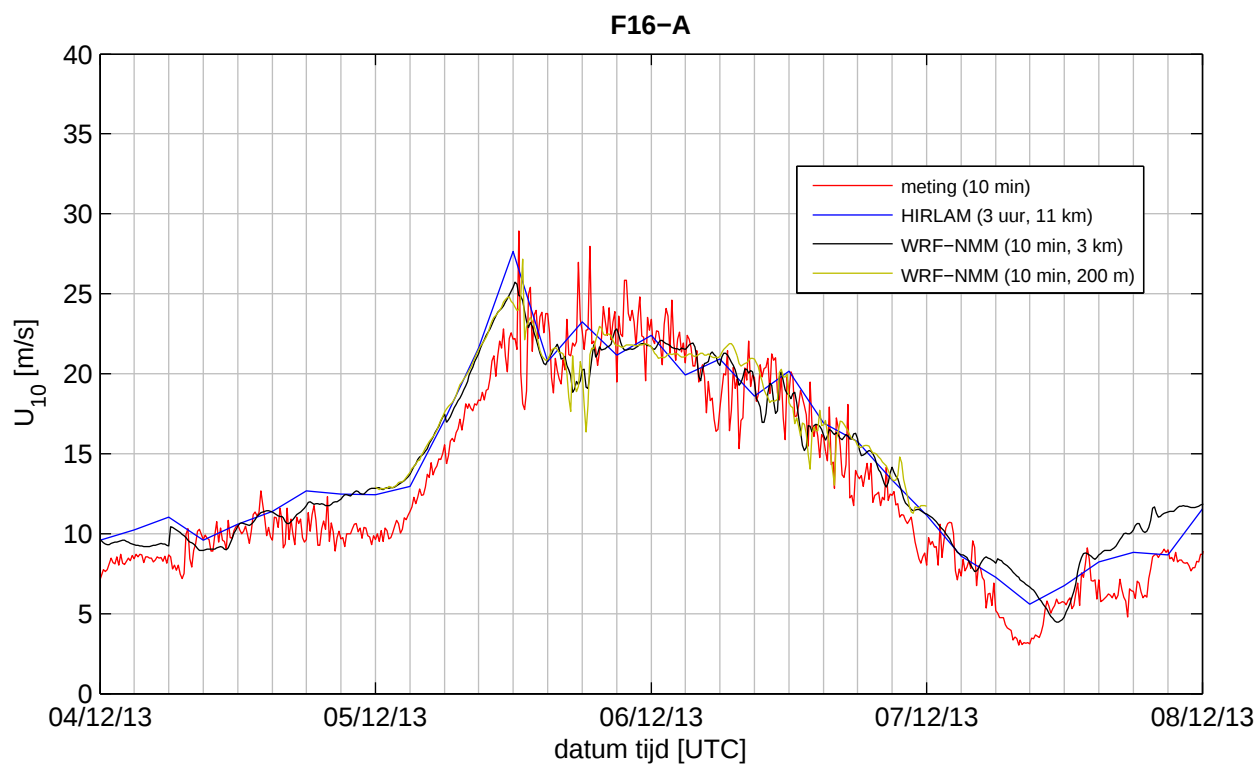
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station A12-CPP

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.10



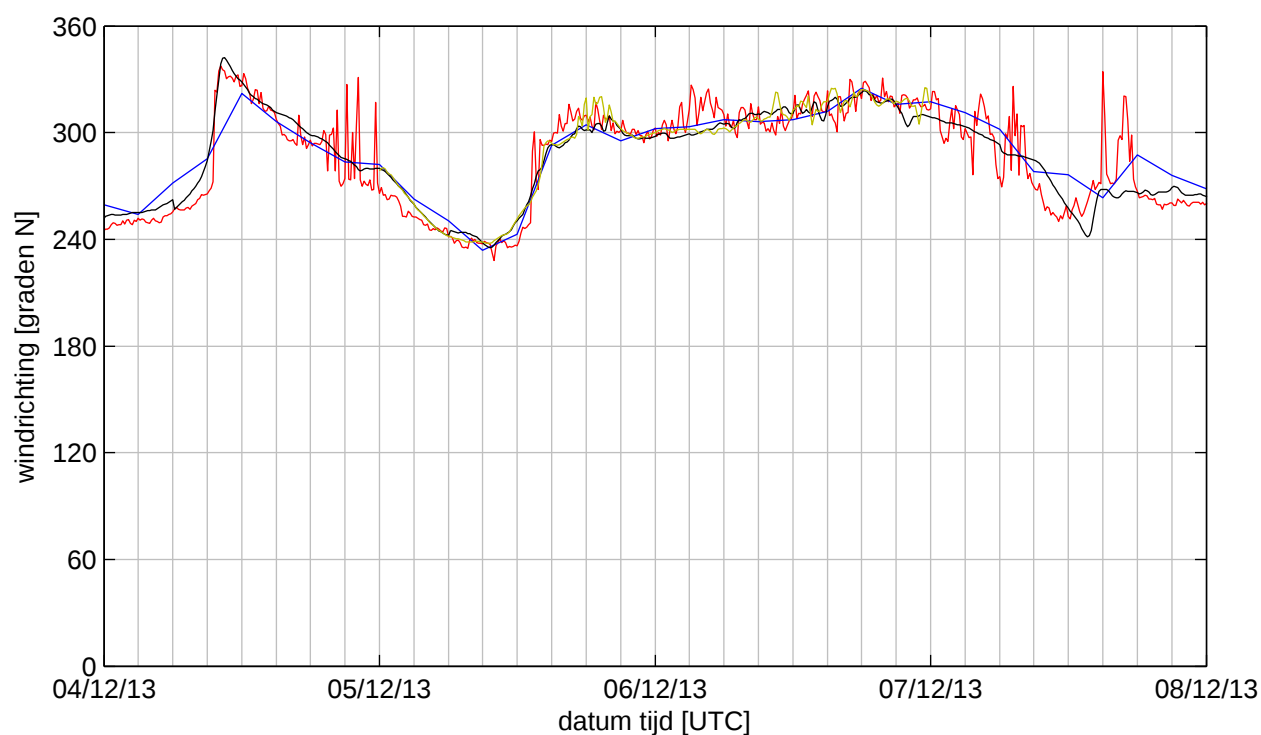
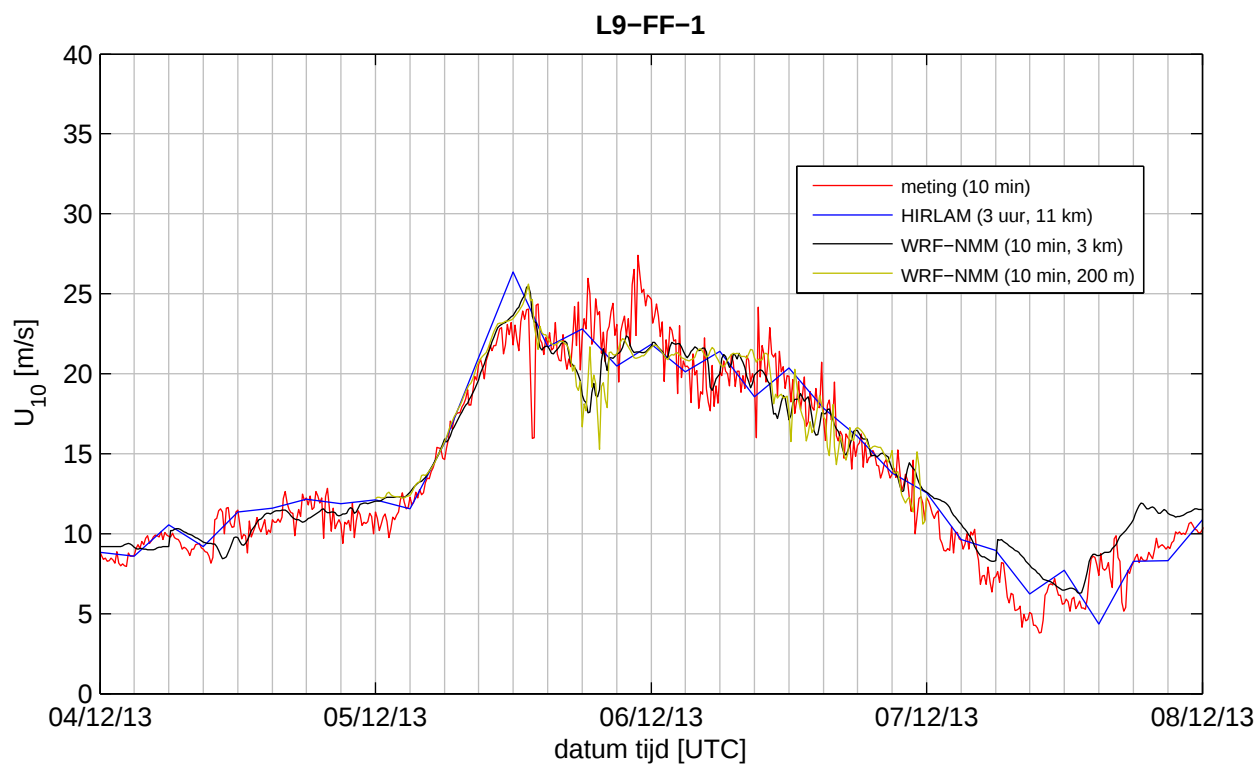
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station F16-A

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.11



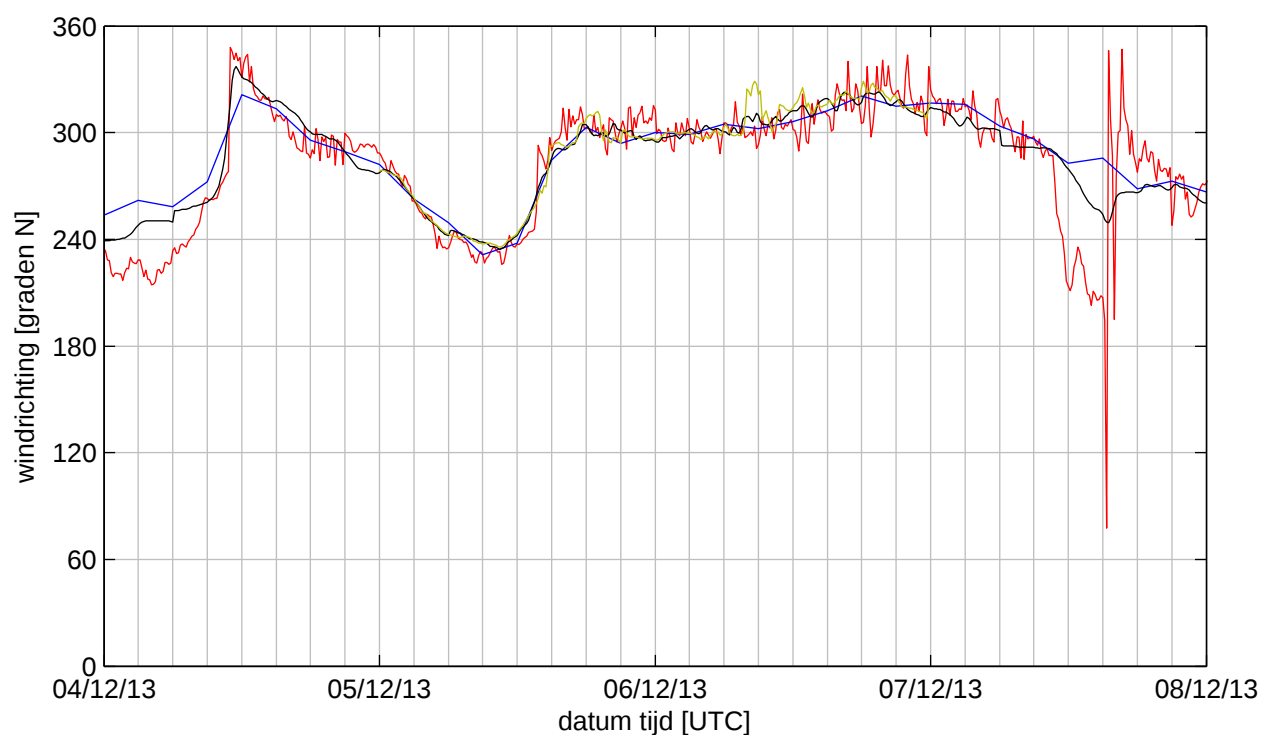
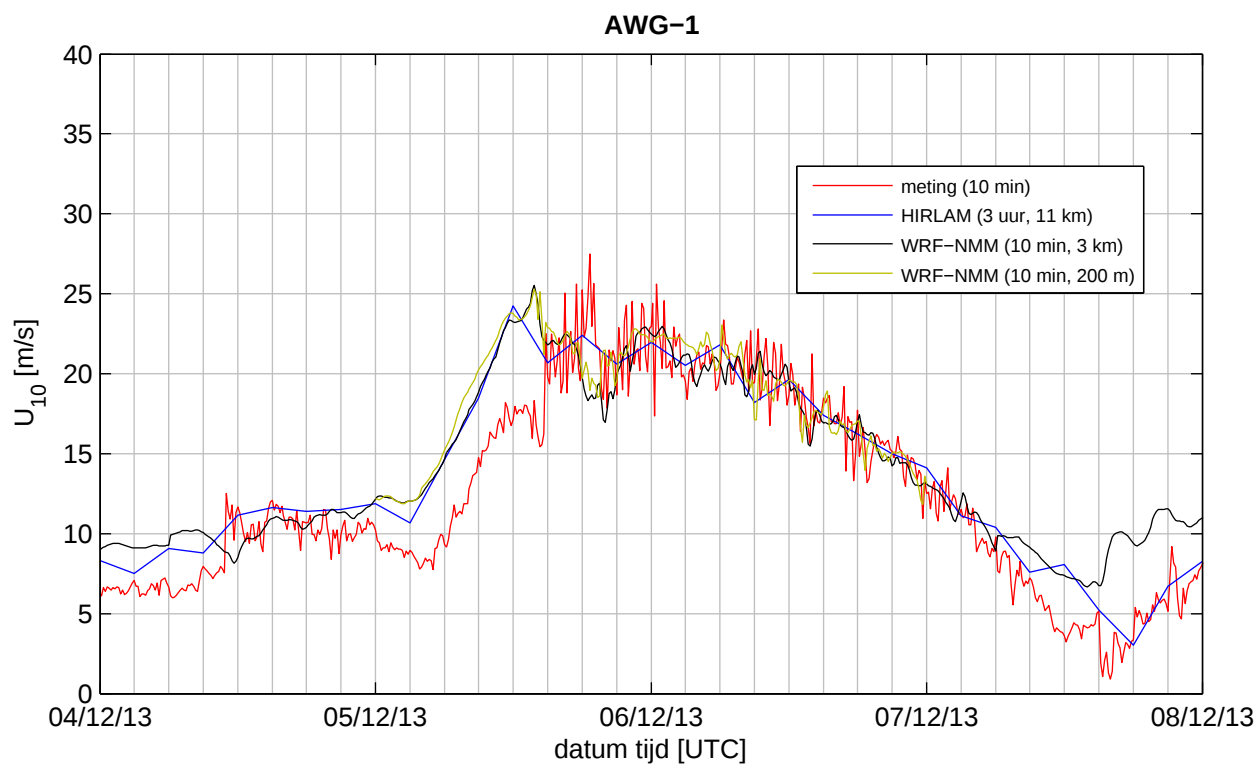
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station L9-FF-1

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.12



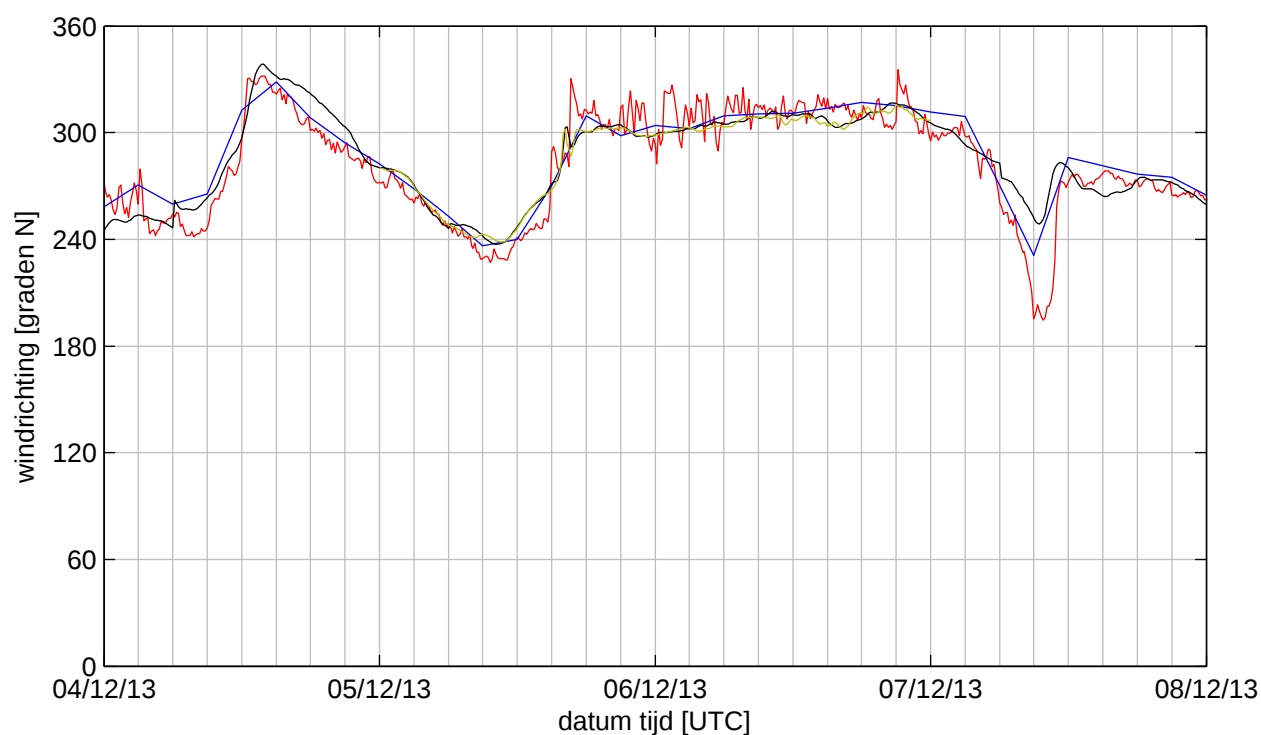
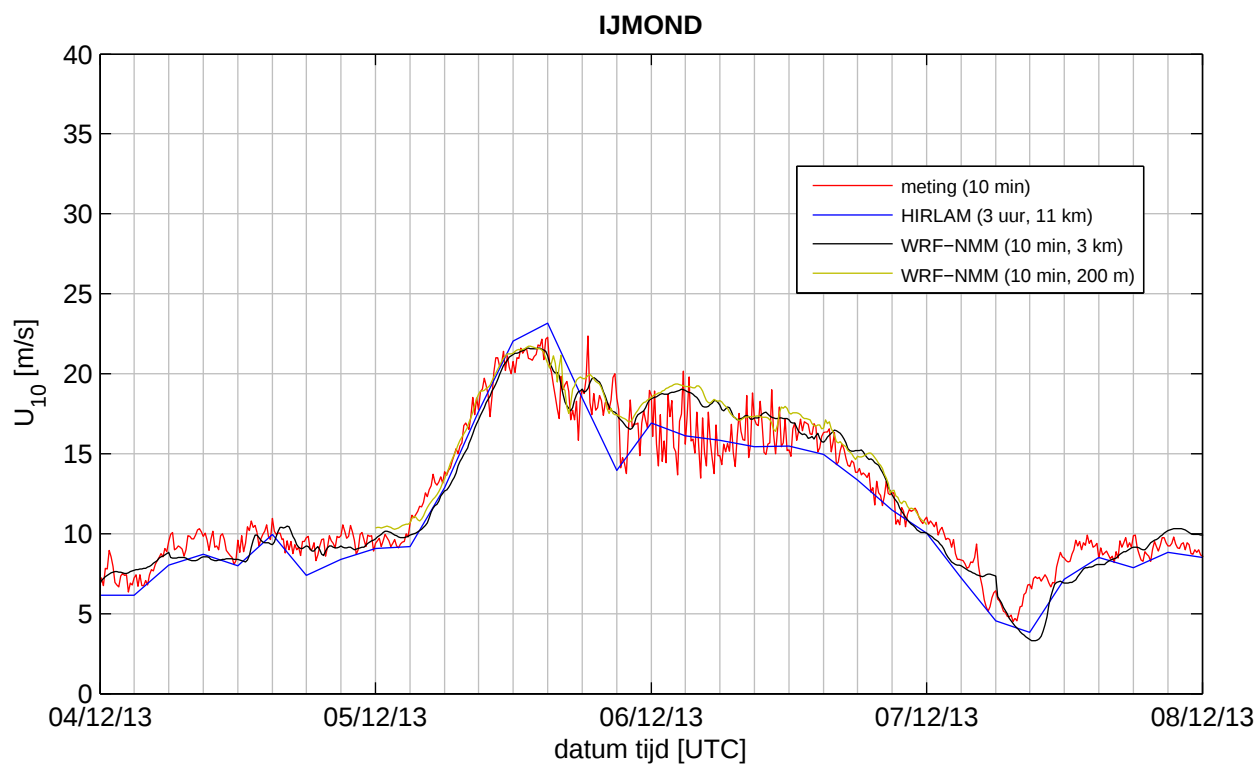
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station AWG-1

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.13



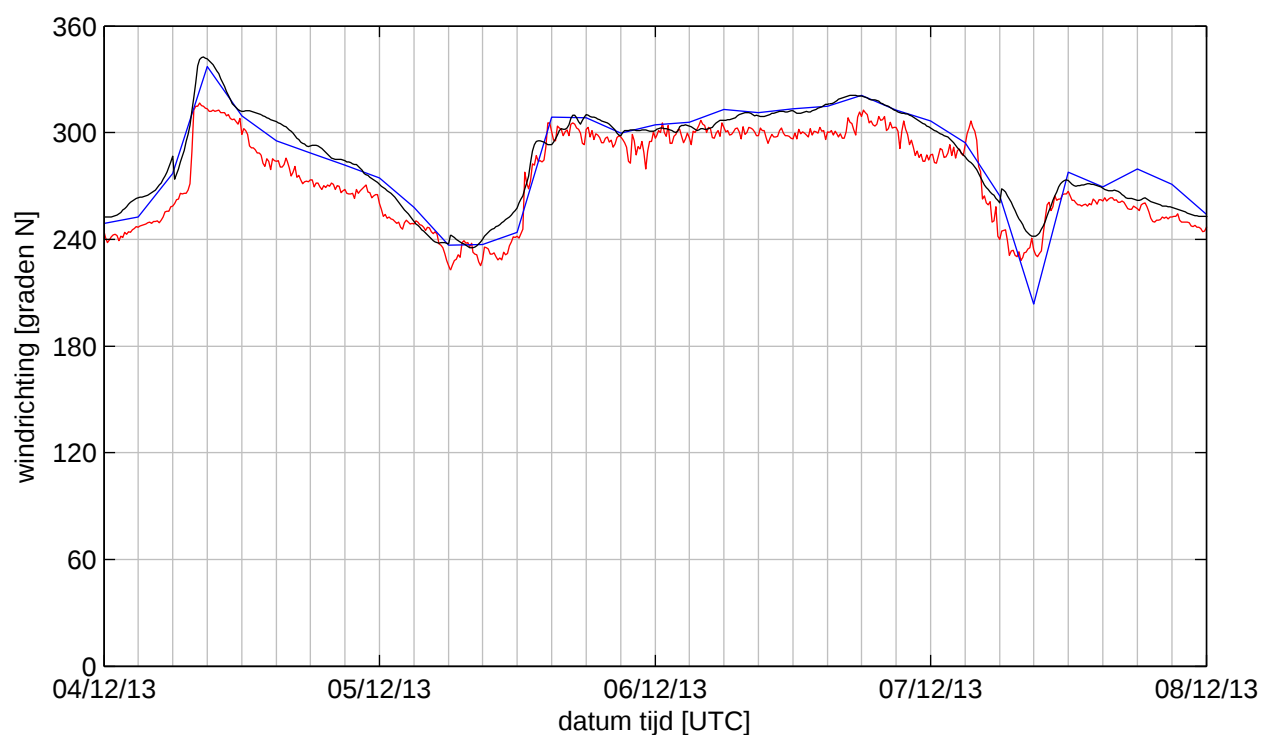
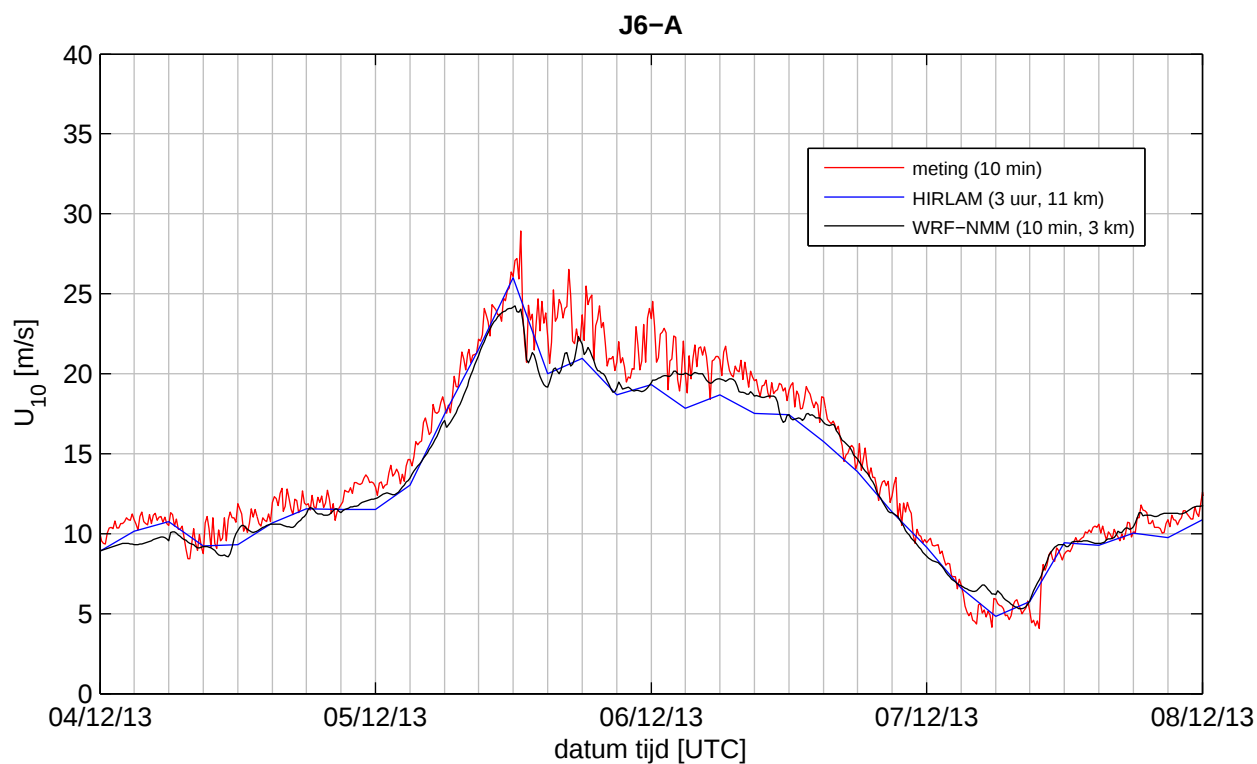
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station IJMOND

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.14



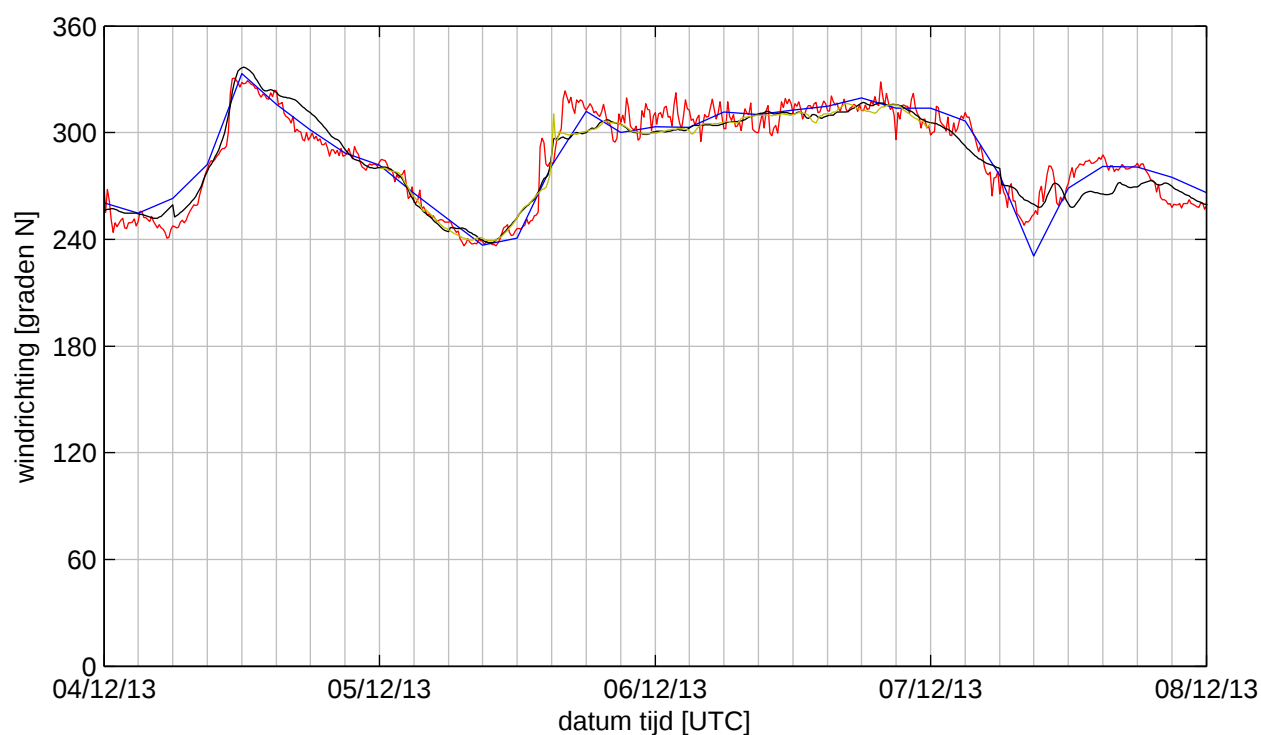
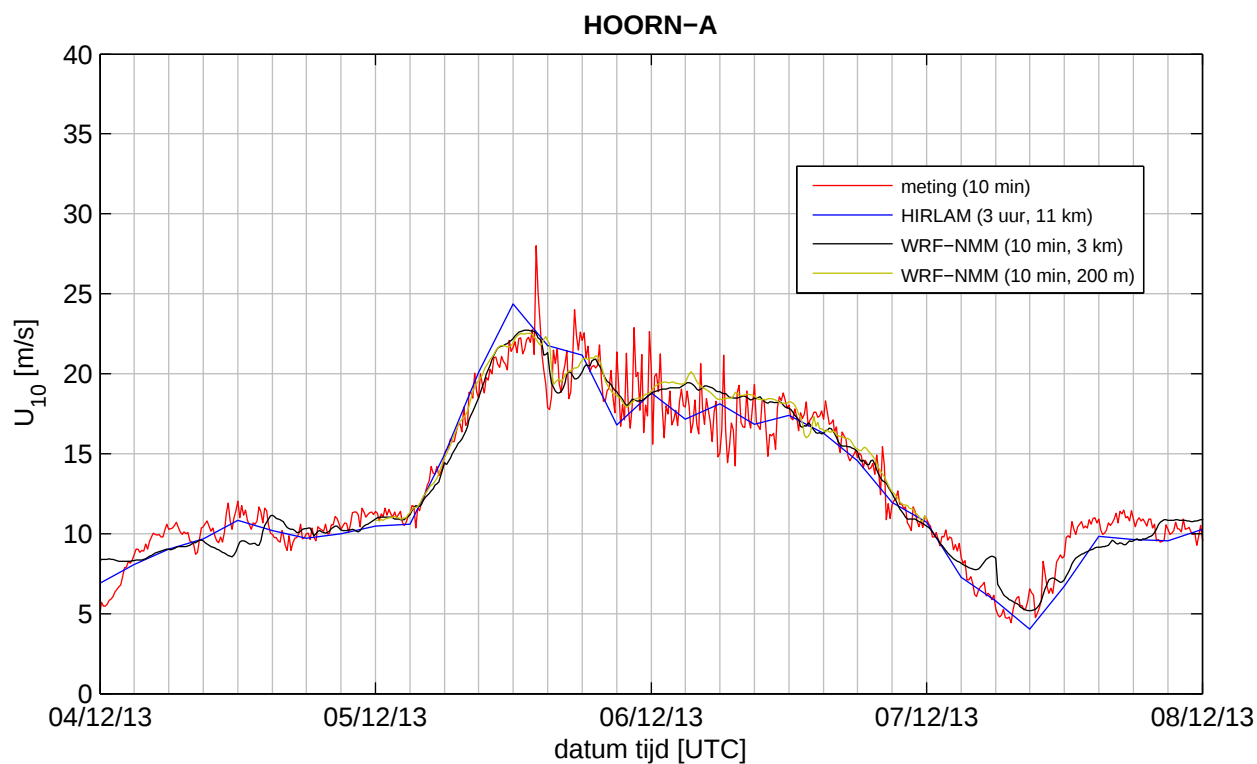
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station J6-A

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.15



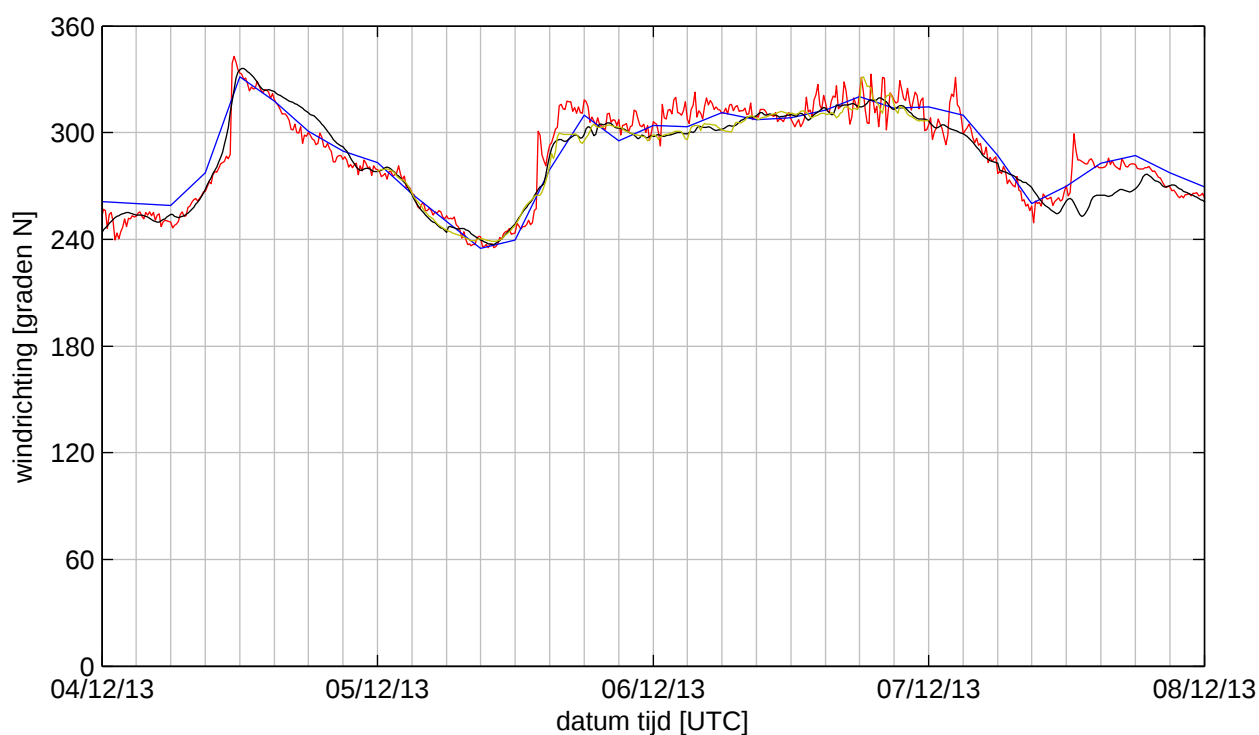
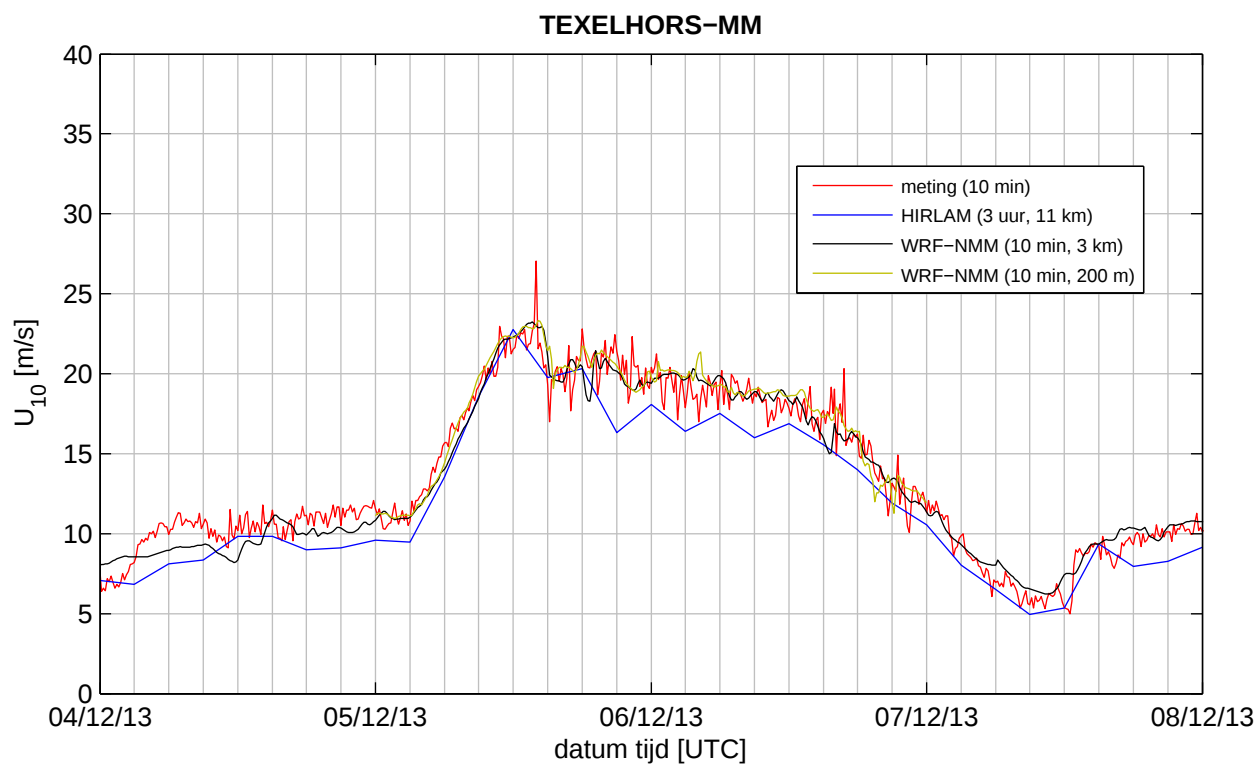
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station HOORN-A

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.16



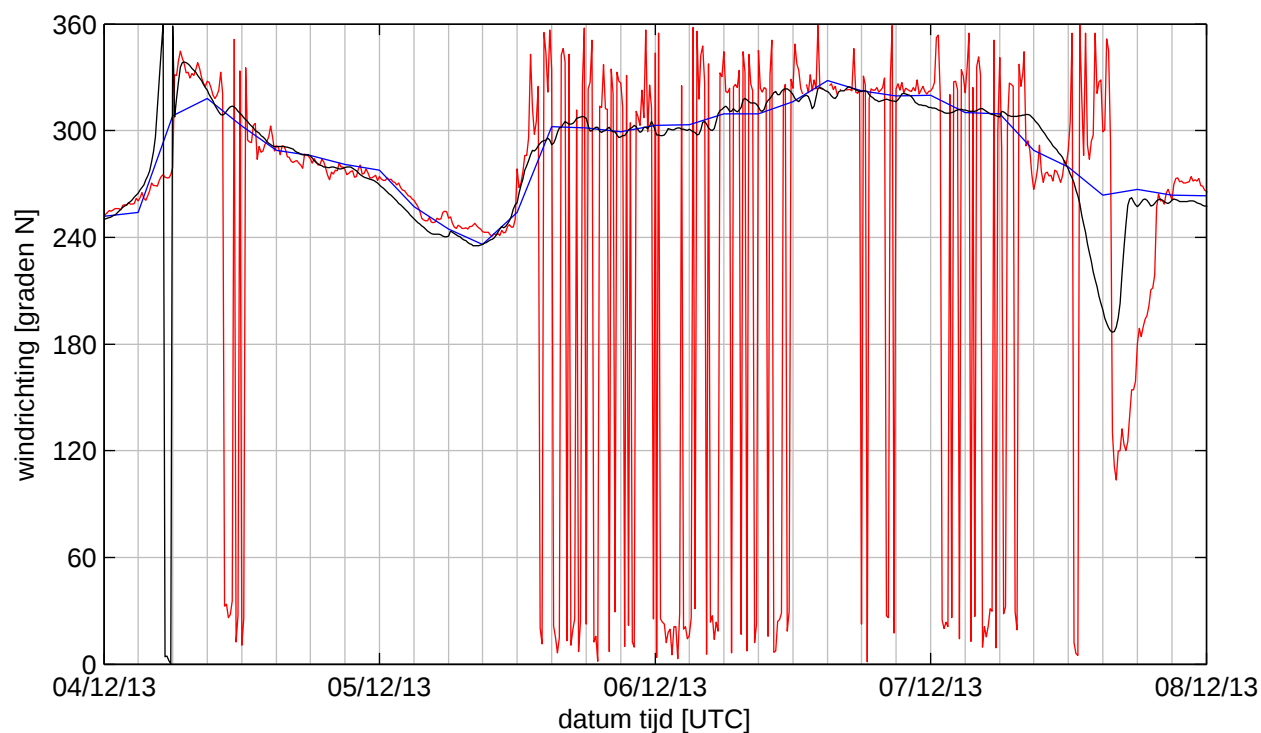
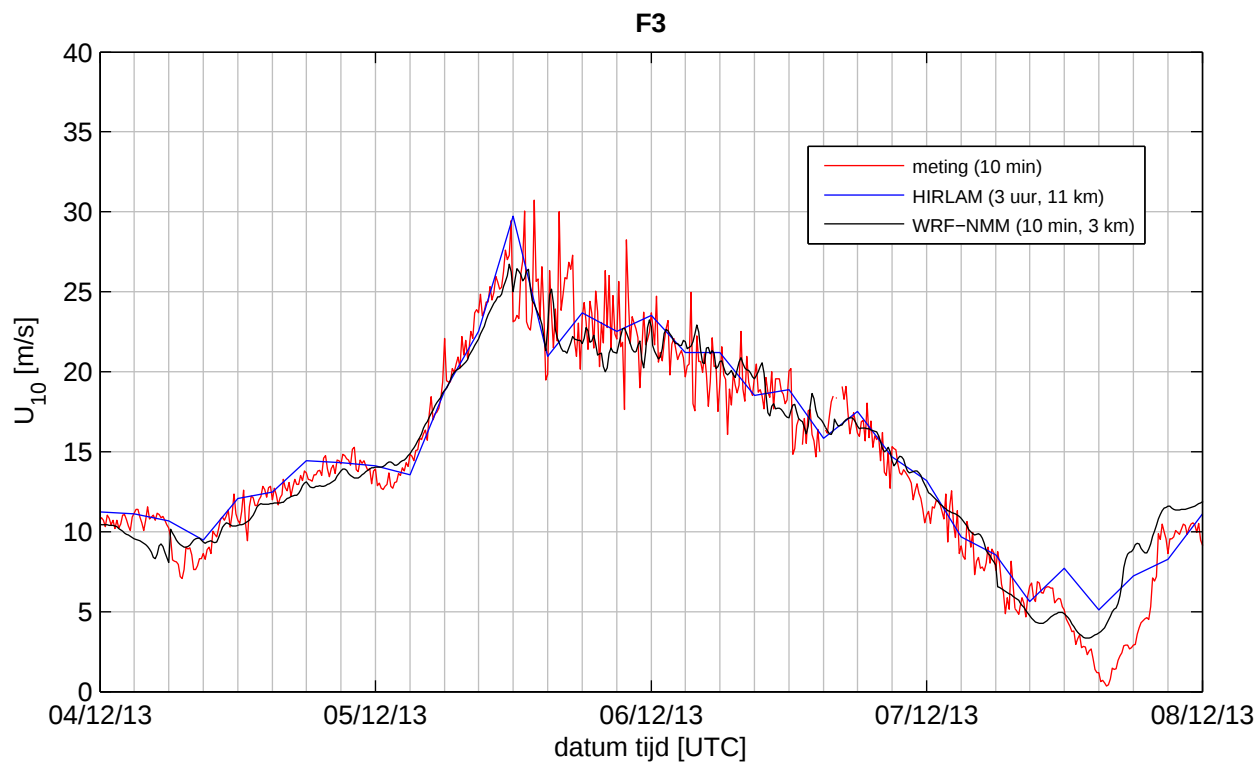
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station TEXELHORS-MM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.17



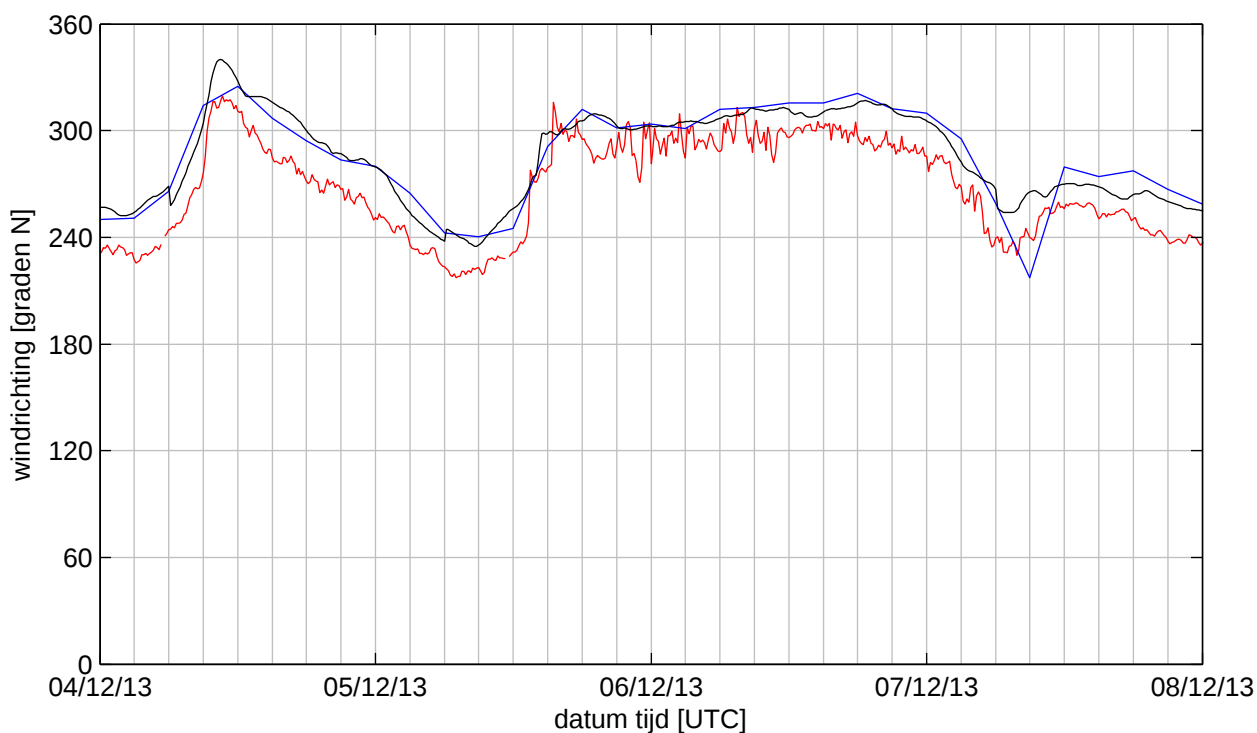
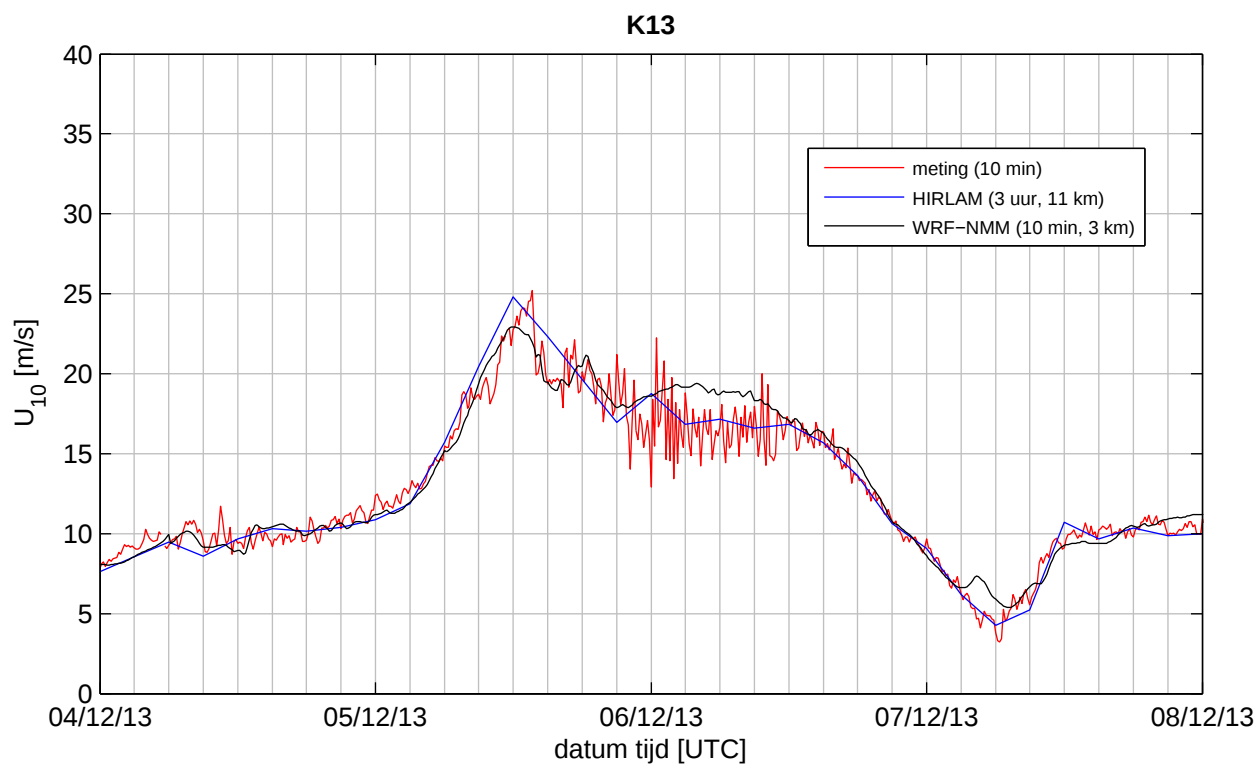
Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station F3

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. A.18



Vergelijk gemeten wind KNMI, gemodelleerde wind HIRLAM
gemodelleerde wind WRF-NMM

station K13

Rekenexperiment Waddenzee

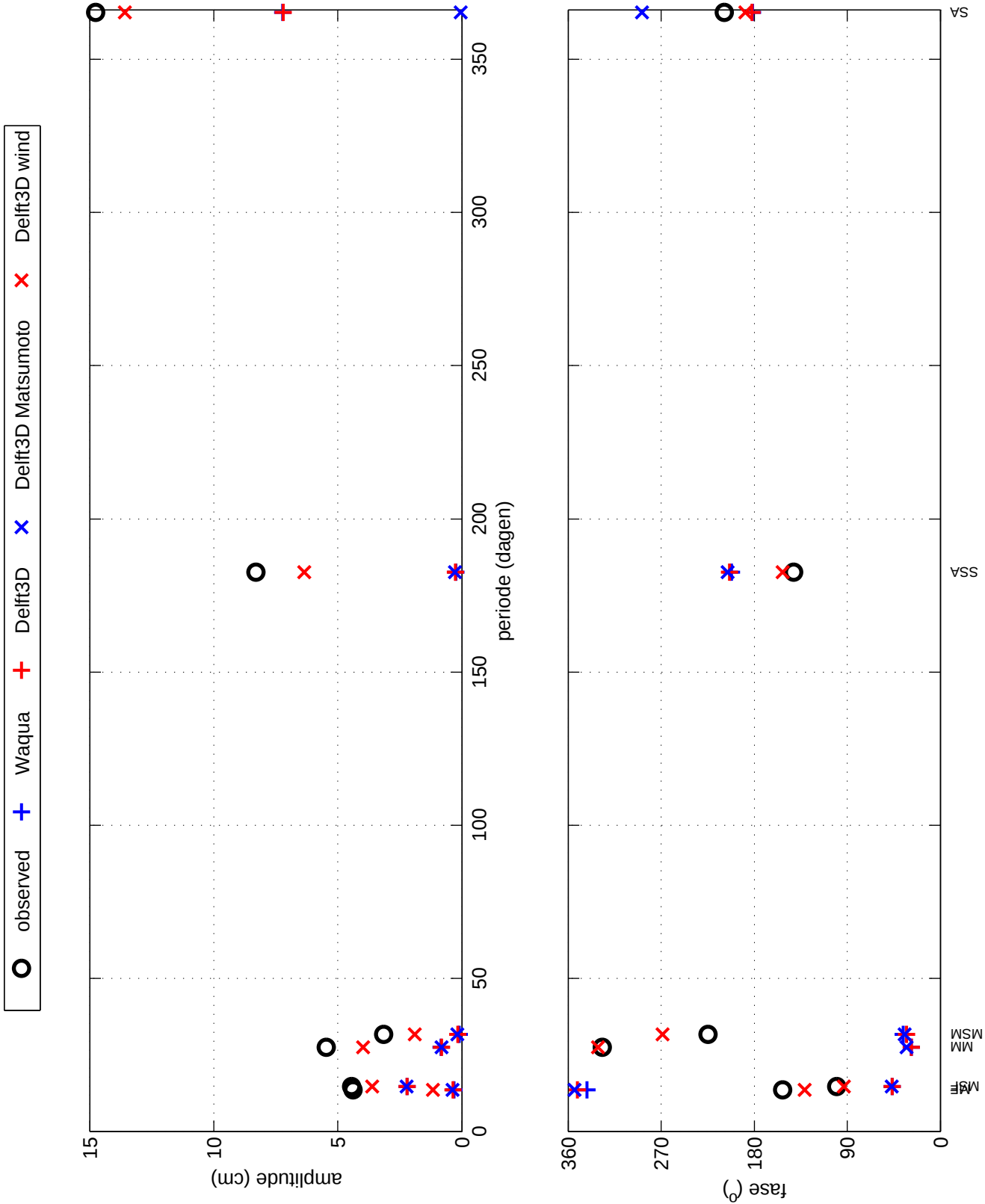
C03041.001941

Fig. A.19

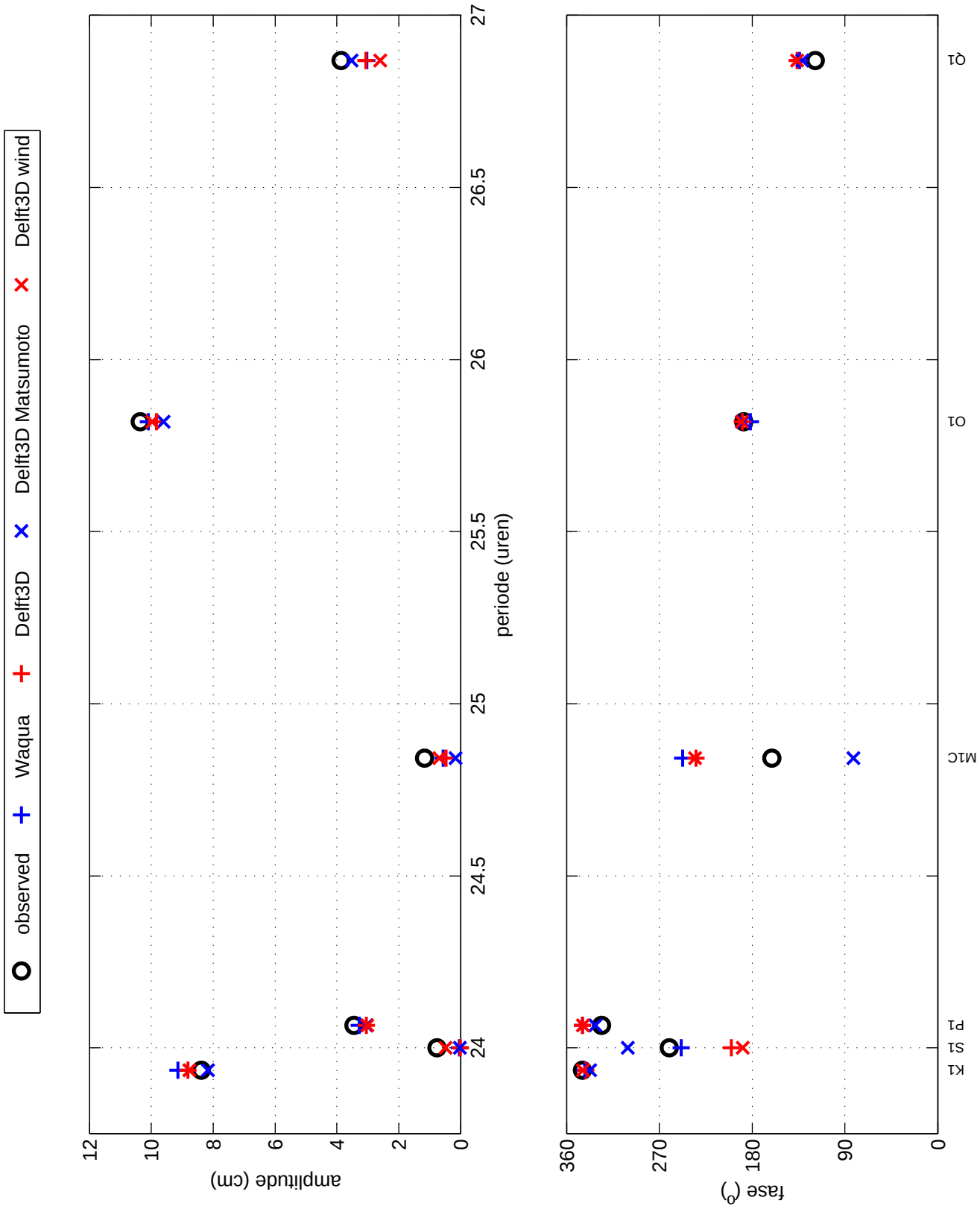
Bijlage B

Vergelijking berekende en afgeleide gemeten ge- tijcomponenten

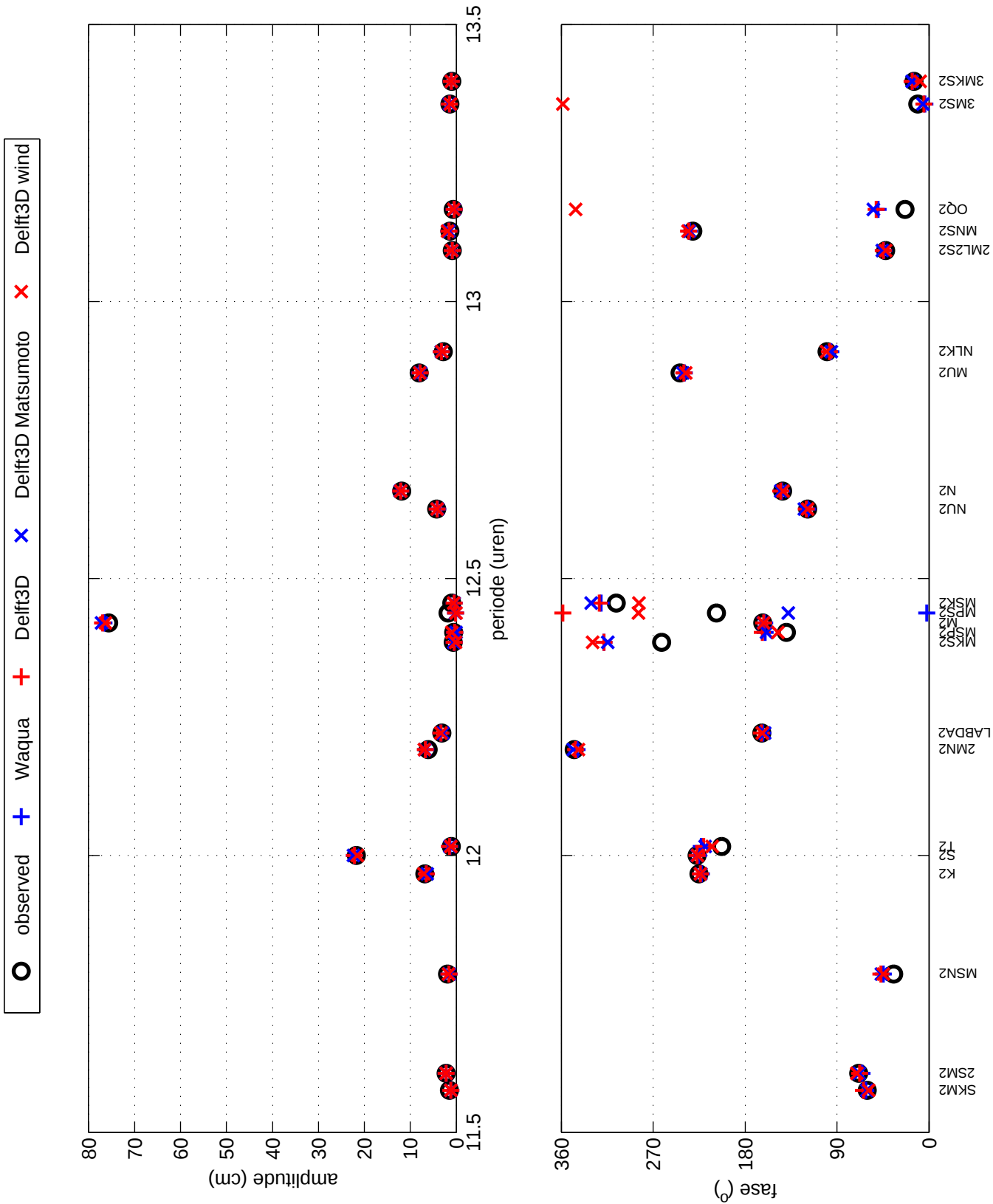
Vergelijking gemeten en berekende langjarige getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Texel Noordzee (TXN)		
	C03041.001941	Fig. B.1a
Rekenexperiment Waddenzee		



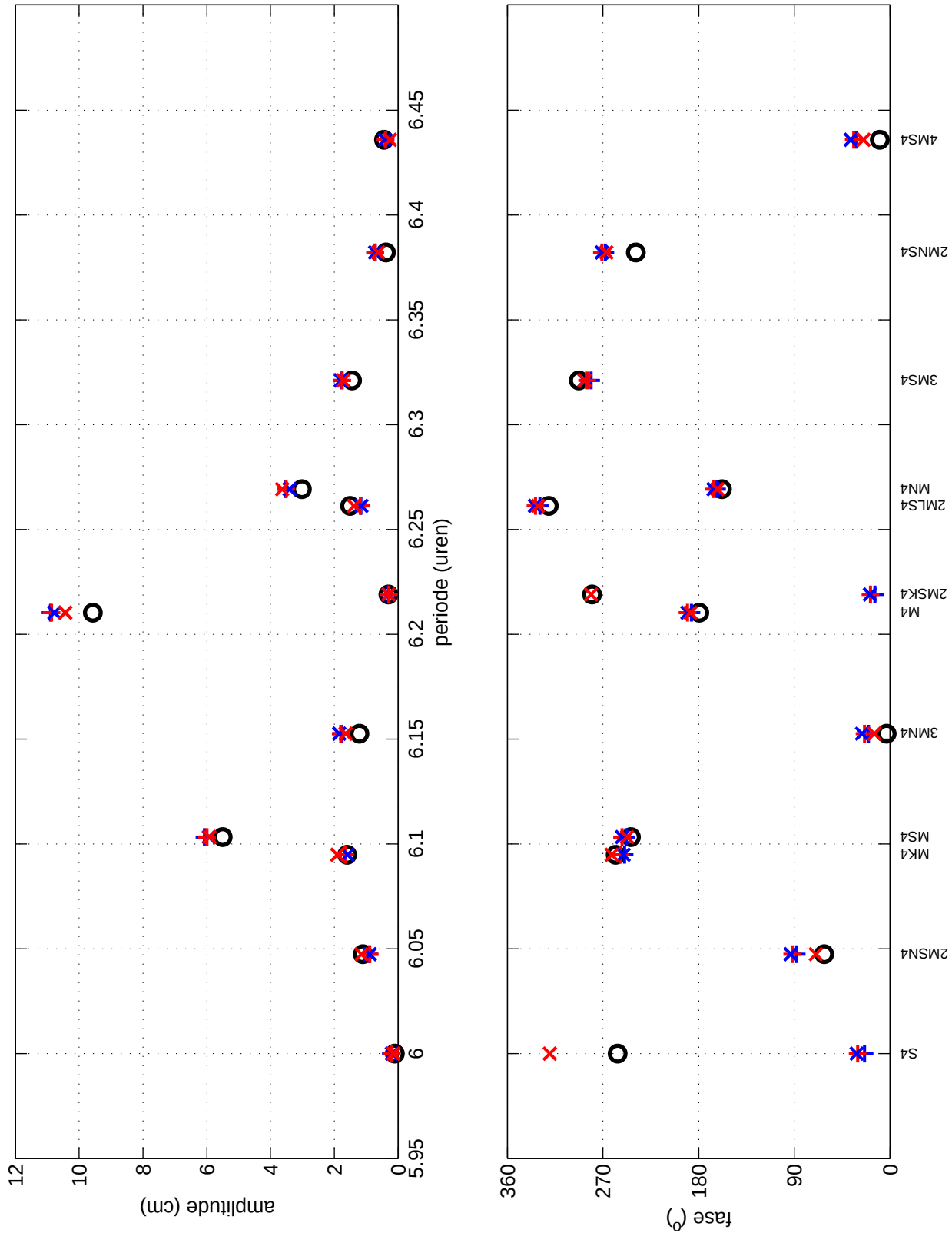
Vergelijking gemeten en berekende enkeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Texel Noordzee (TXN)		
	C03041.001941	Fig. B.1b

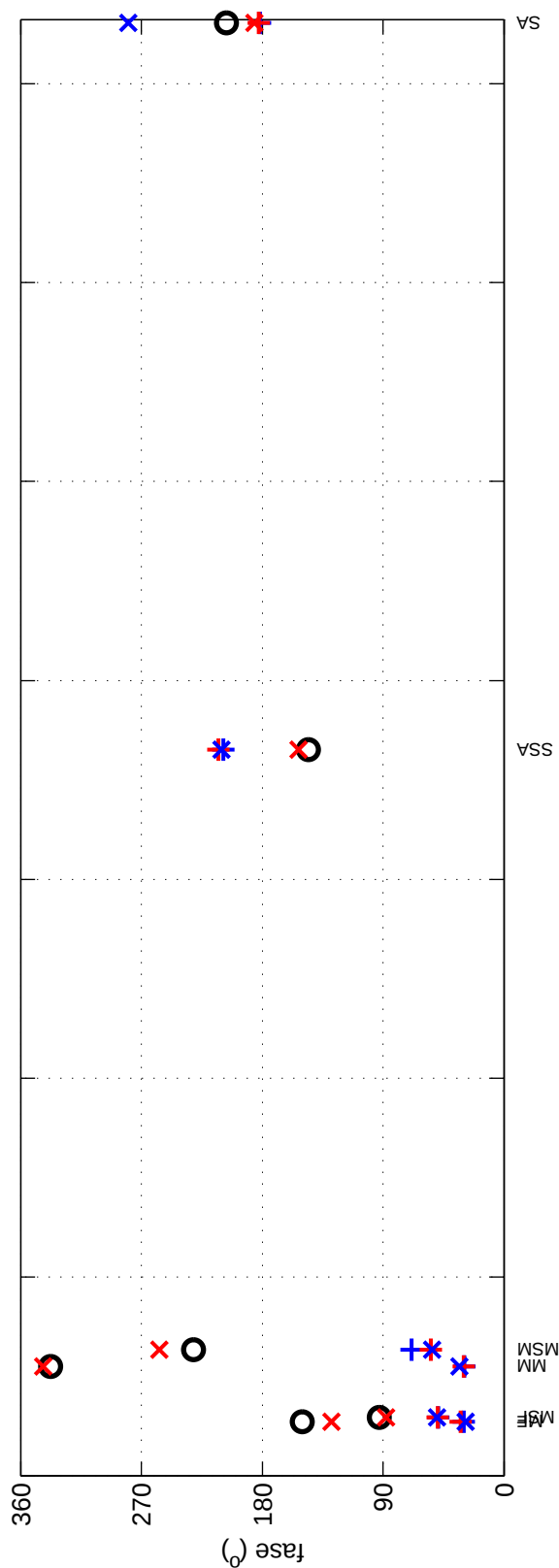
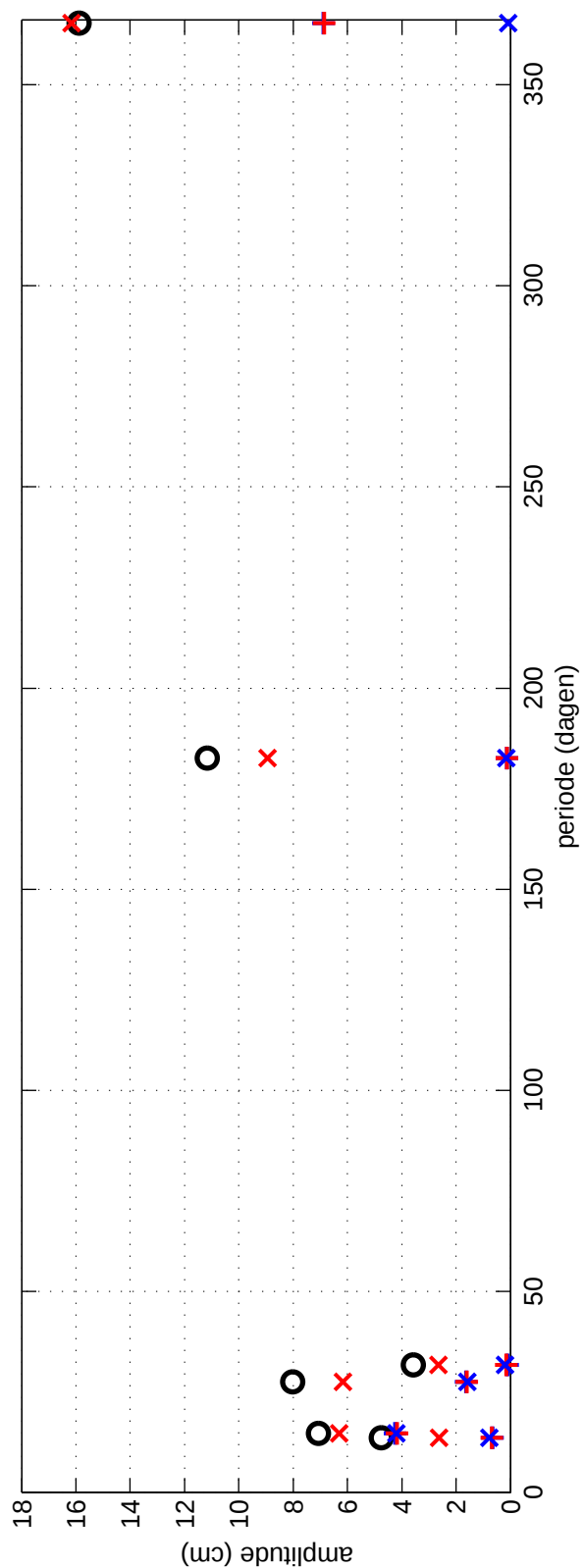


Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende dubbeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Texel Noordzee (TXN)	
	C03041.001941	Fig. B.1c



Vergelijking gemeten en berekende vier maal daagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Texel Noordzee (TXN)		
	C03041.001941	Fig. B.1d
Rekenexperiment Waddenzee		





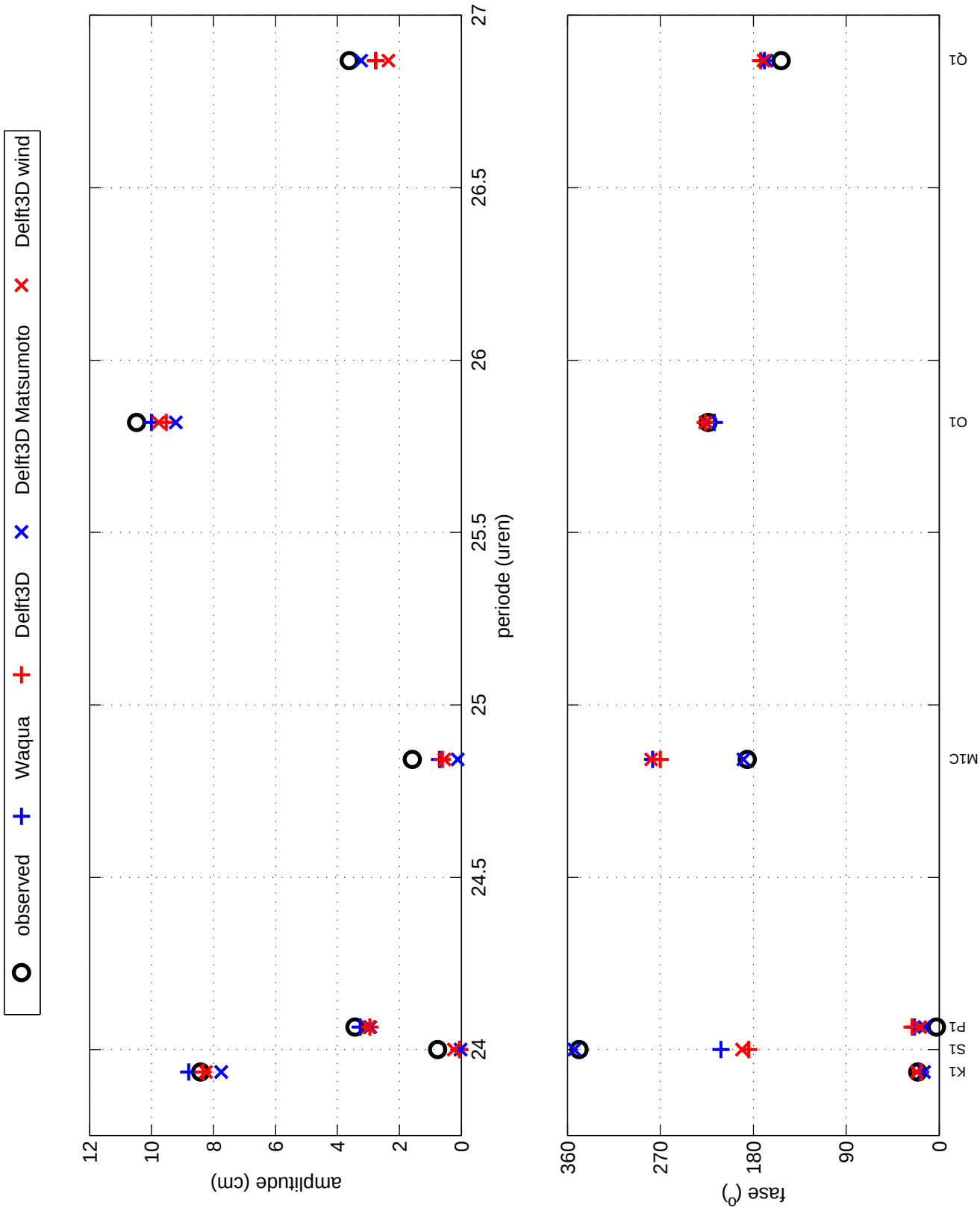
Vergelijking gemeten en berekende langjarige getij-
componenten voor verschillende Noordzee-modellen,
station Kornwerderzand (KRN)

Rekenexperiment Waddenzee

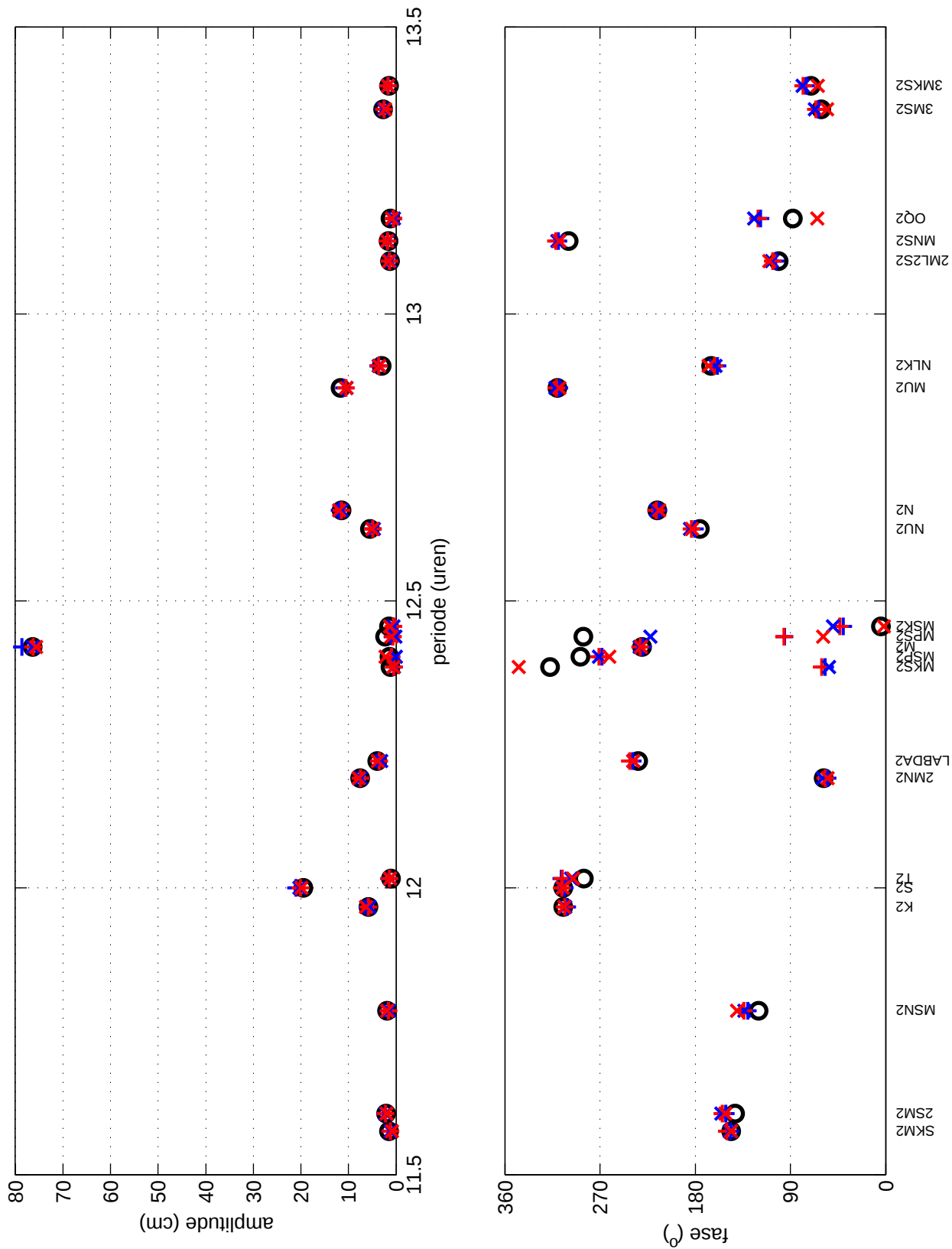
C03041.001941

Fig. B.2a

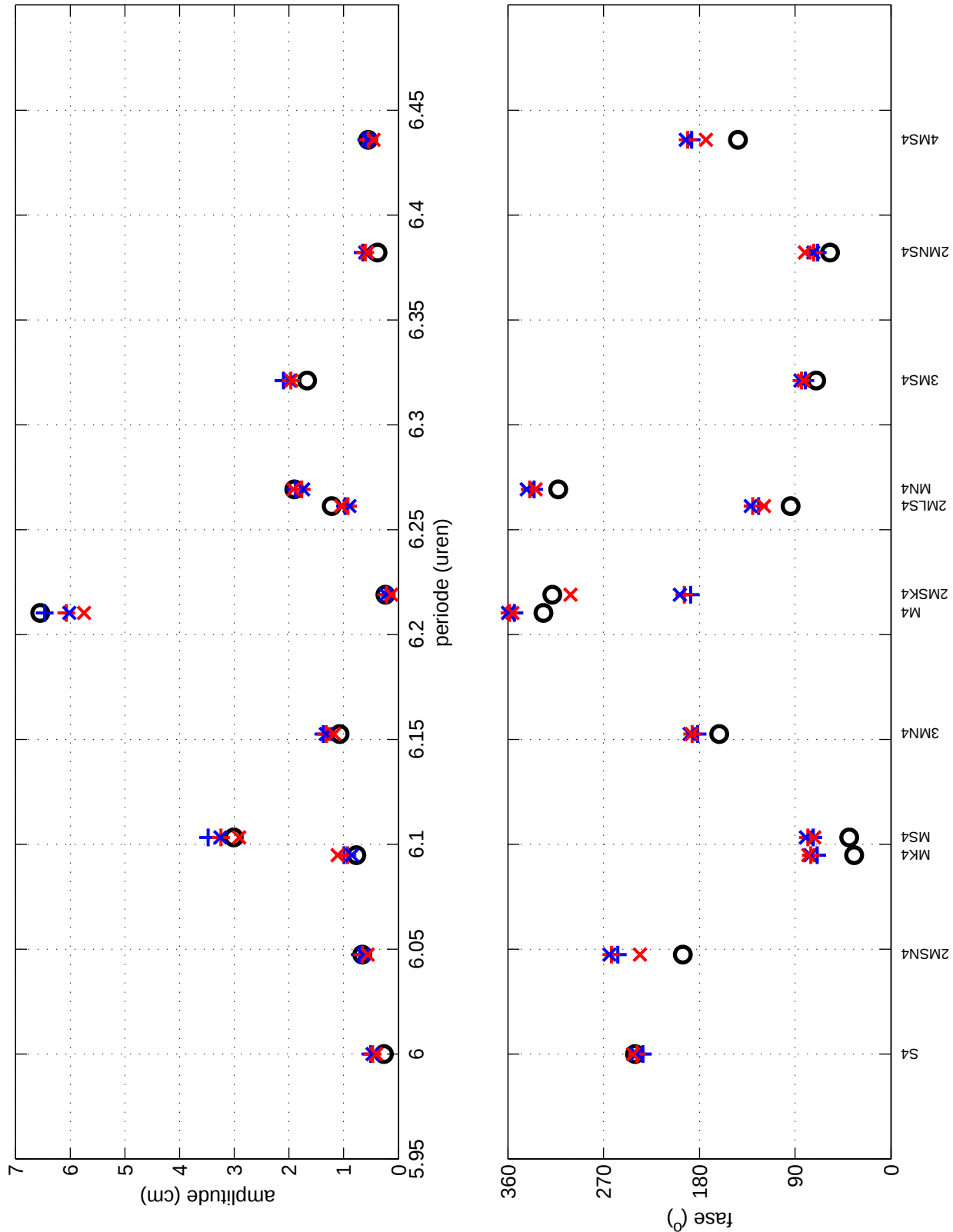
Vergelijking gemeten en berekende enkeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Kornwerderzand (KRN)		
	C03041.001941	Fig. B.2b

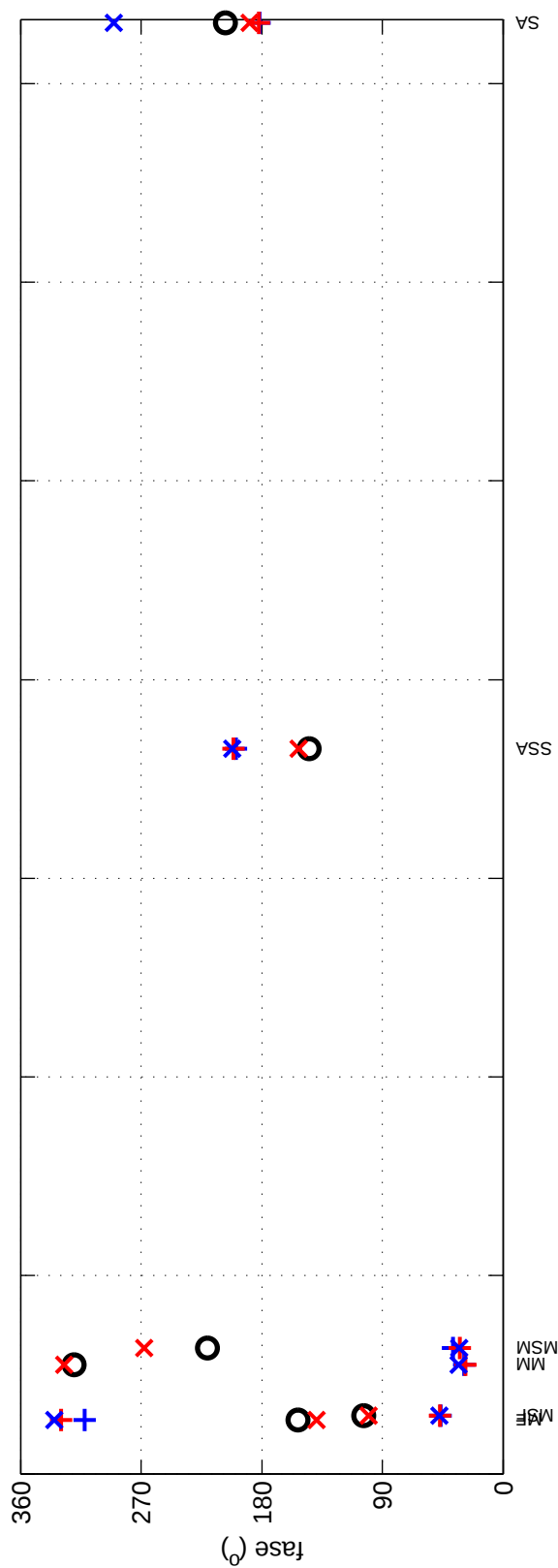
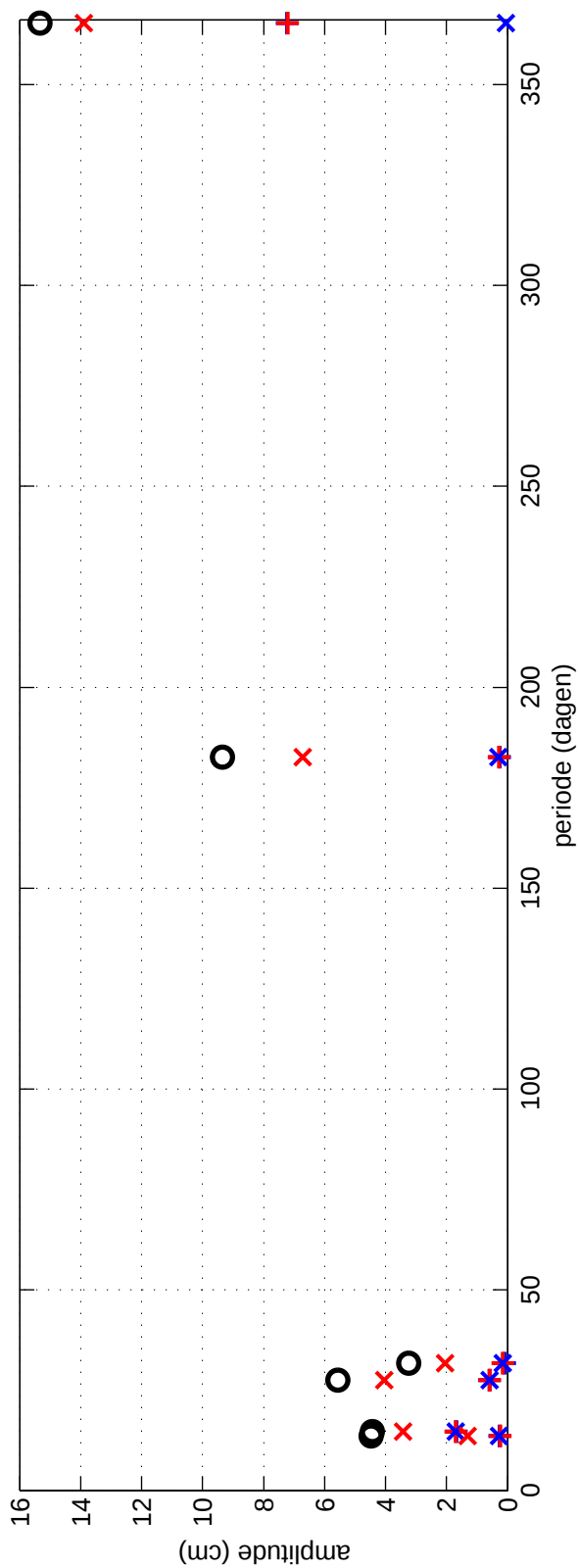


Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende dubbeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Kornwerderzand (KRN)	
	C03041.001941	Fig. B.2c



Rekenexperiment Waddenzee		
	C03041.001941	Fig. B.2d





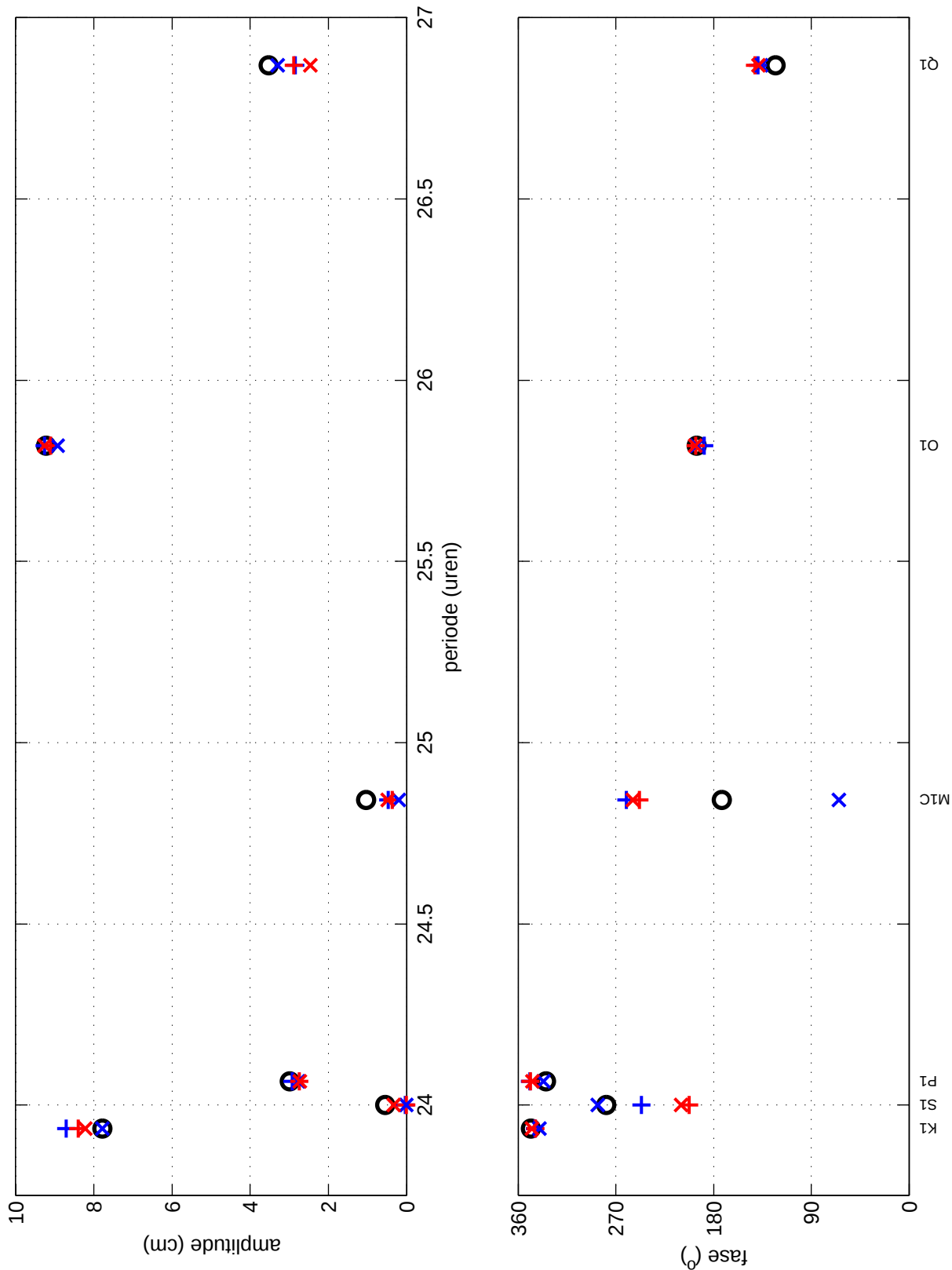
Vergelijking gemeten en berekende langjarige getij-
componenten voor verschillende Noordzee-modellen,
station Terschelling Noordzee (TRS)

Rekenexperiment Waddenzee

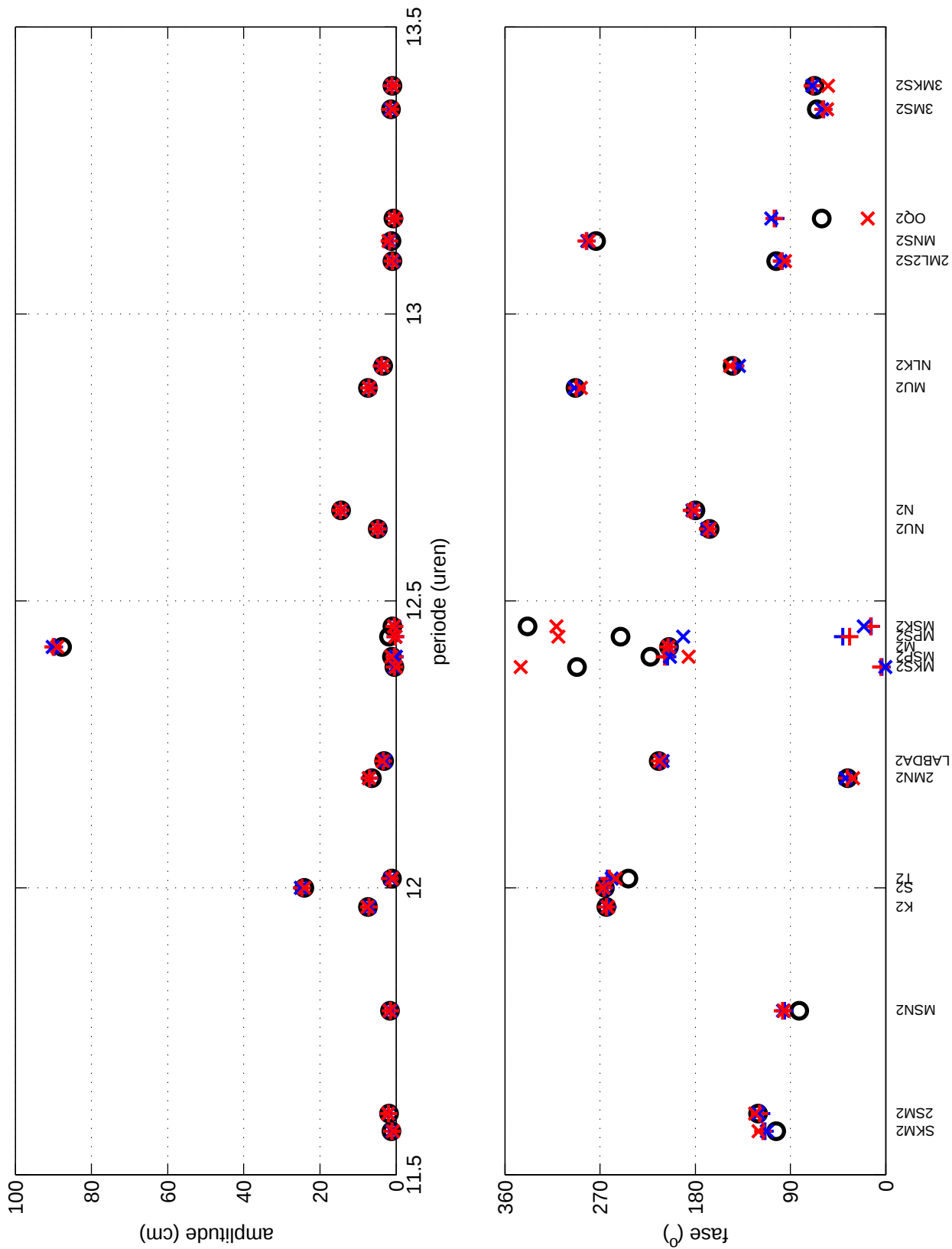
C03041.001941

Fig. B.3a

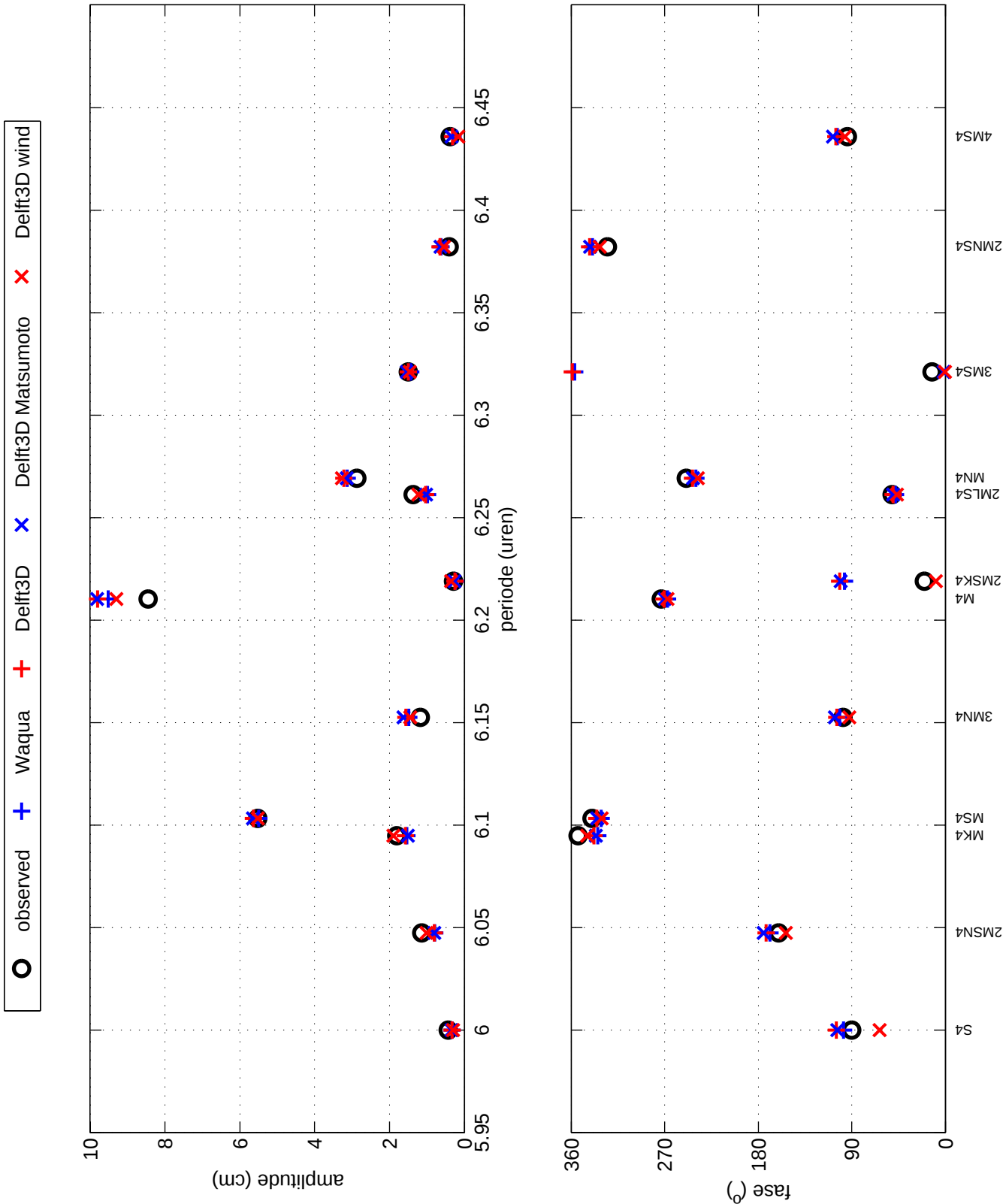
Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende enkeldaagse getij-componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Terschelling Noordzee (TRS)	
	C03041.001941	Fig. B.3b



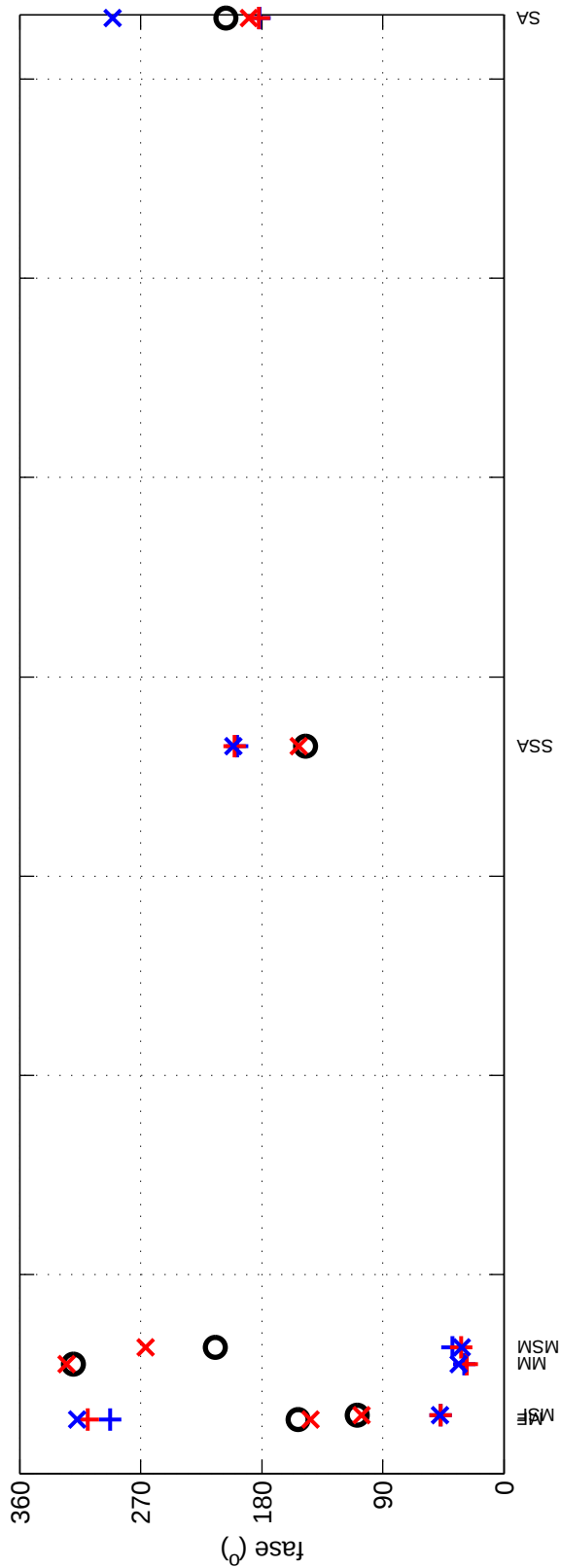
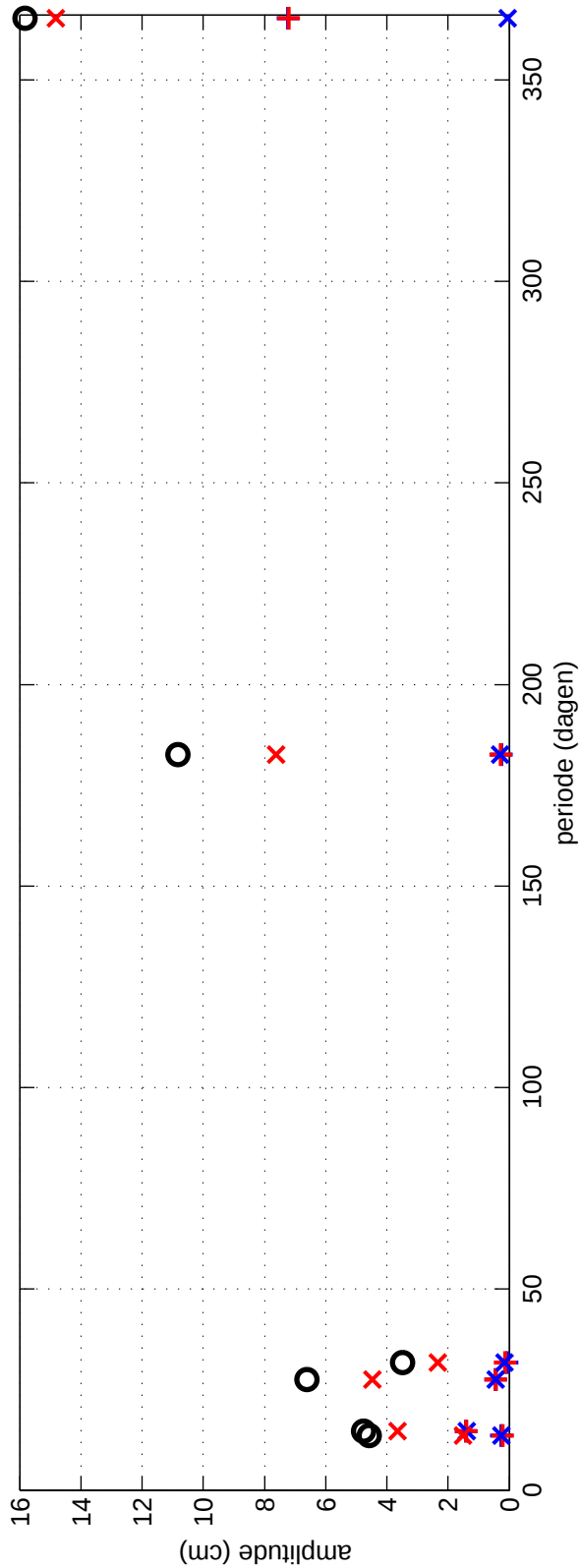
Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende dubbeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Terschelling Noordzee (TRS)	
	C03041.001941	Fig. B.3c



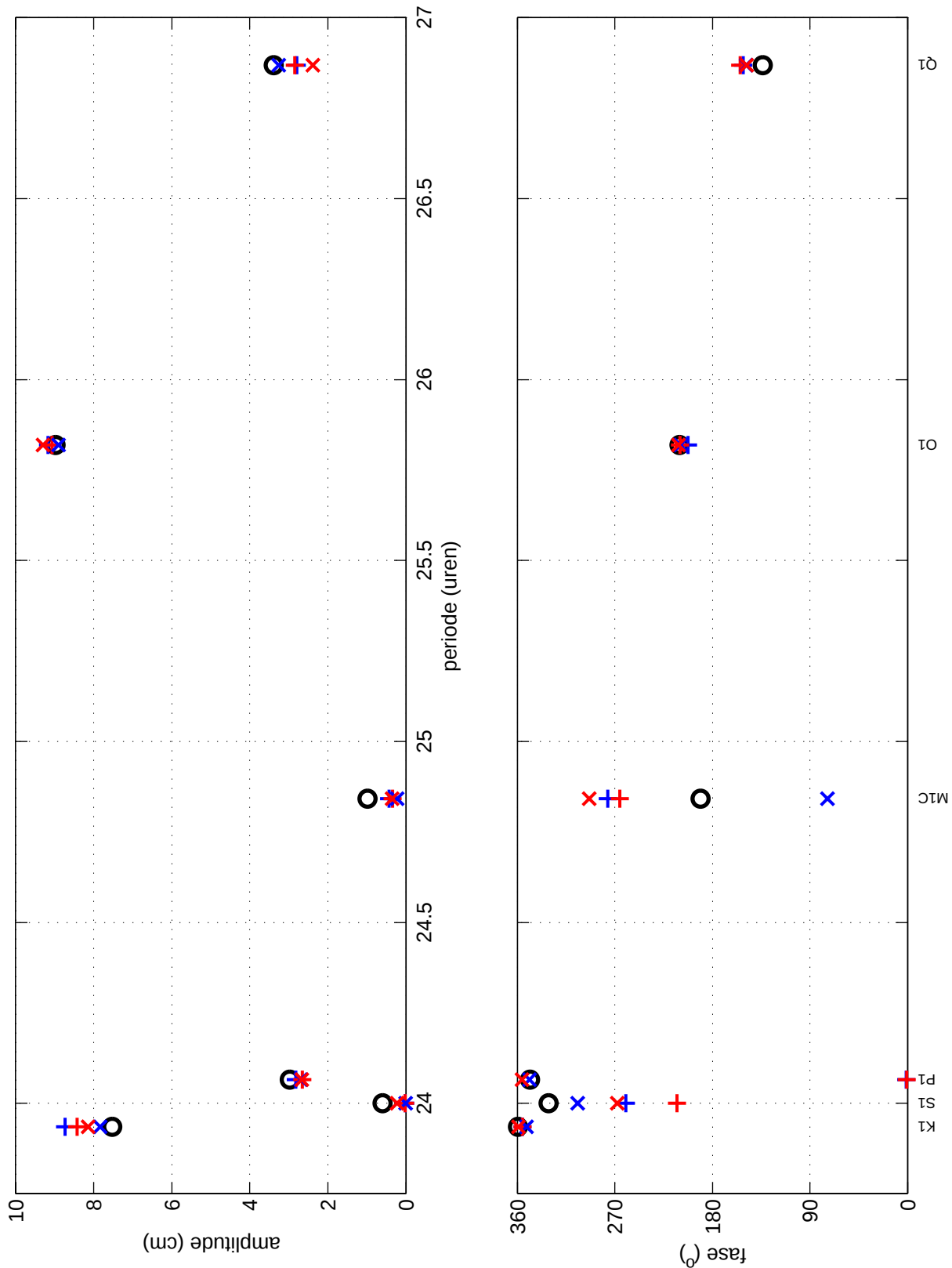
Vergelijking gemeten en berekende vier maal daagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Terschelling Noordzee (TRS)		
	C03041.001941	Fig. B.3d
Rekenexperiment Waddenzee		



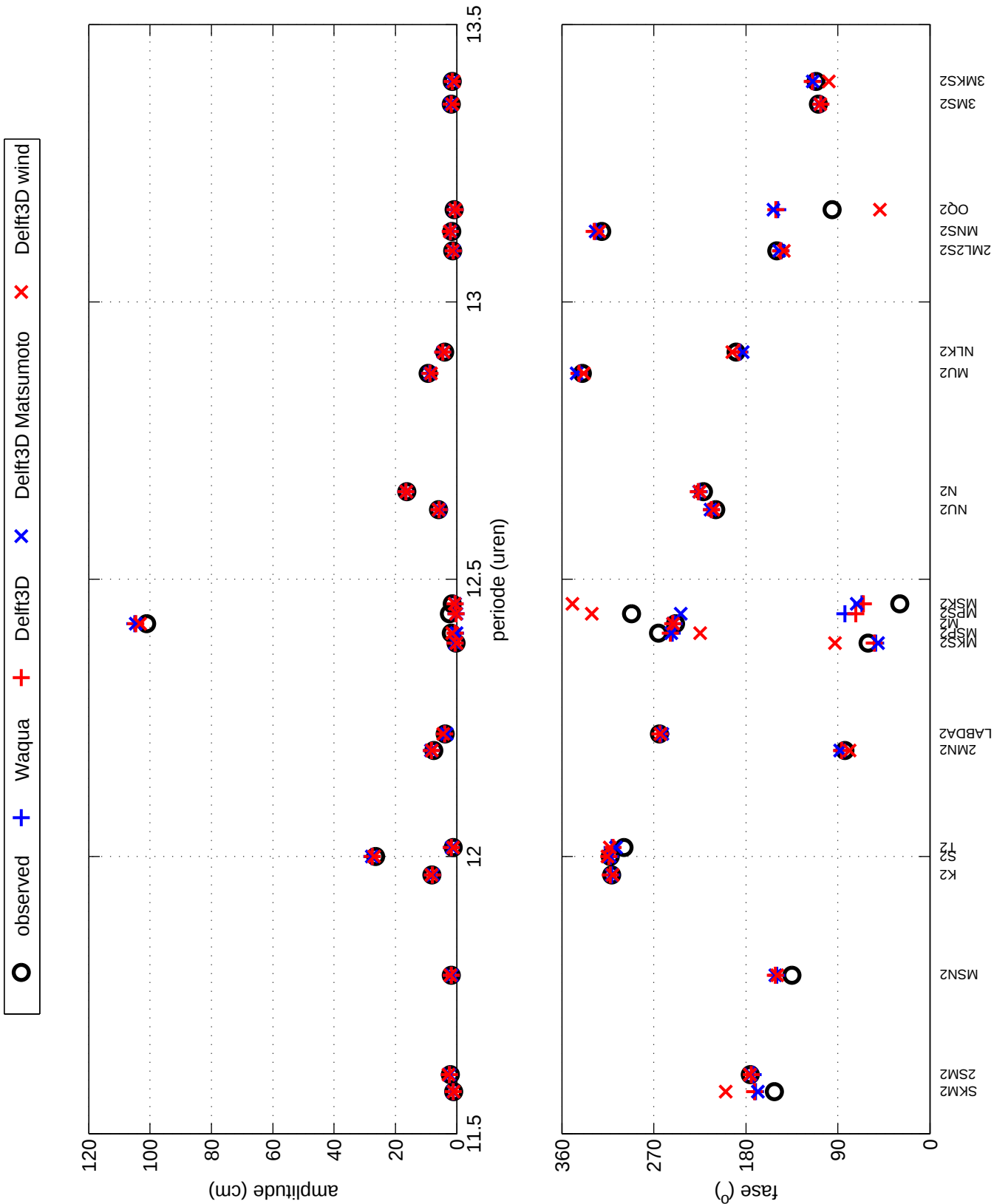
Vergelijking gemeten en berekende langjarige getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Huibertgat (HUI)		
	C03041.001941	Fig. B.4a



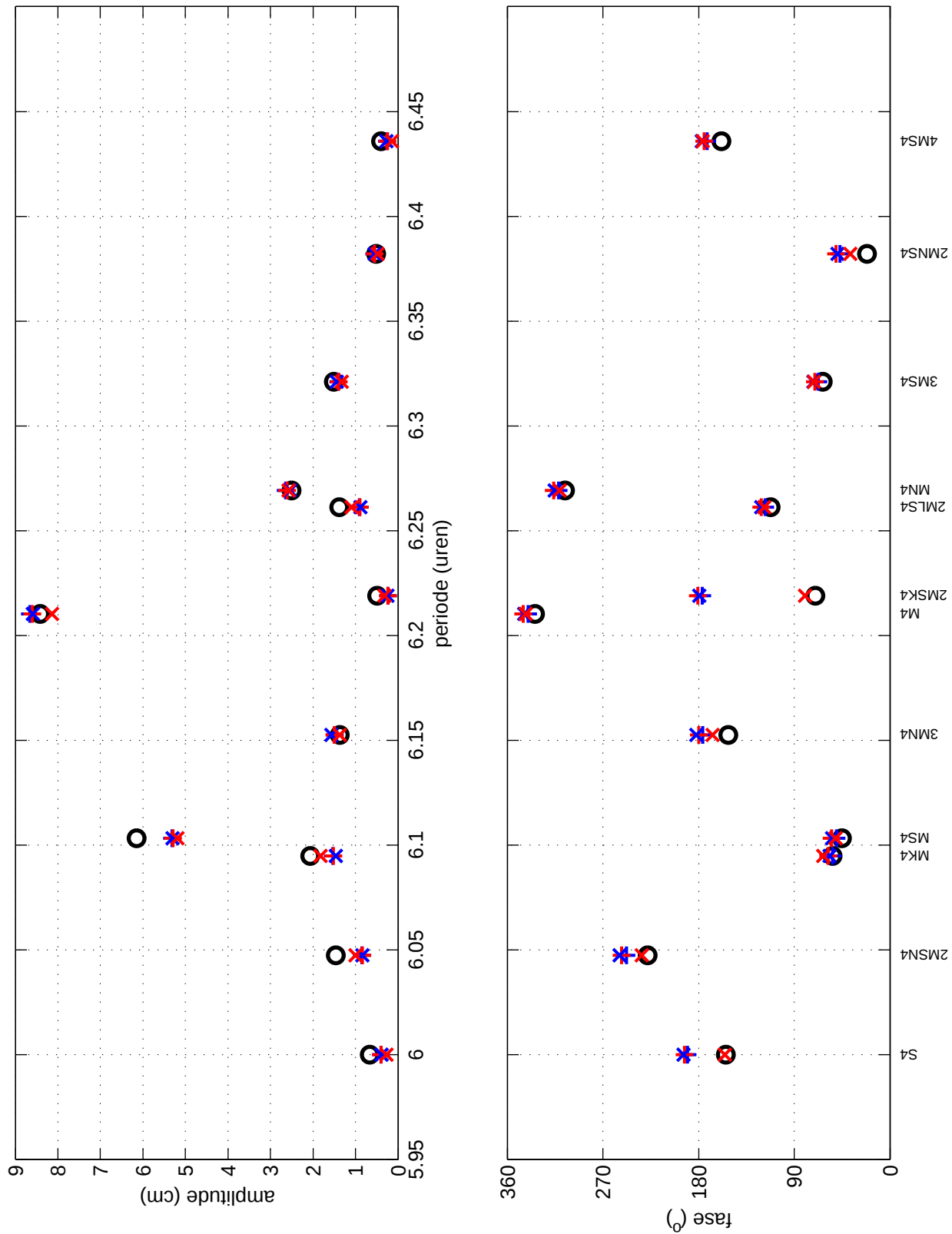
Vergelijking gemeten en berekende enkeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Huibertgat (HUI)		
	C03041.001941	Fig. B.4b



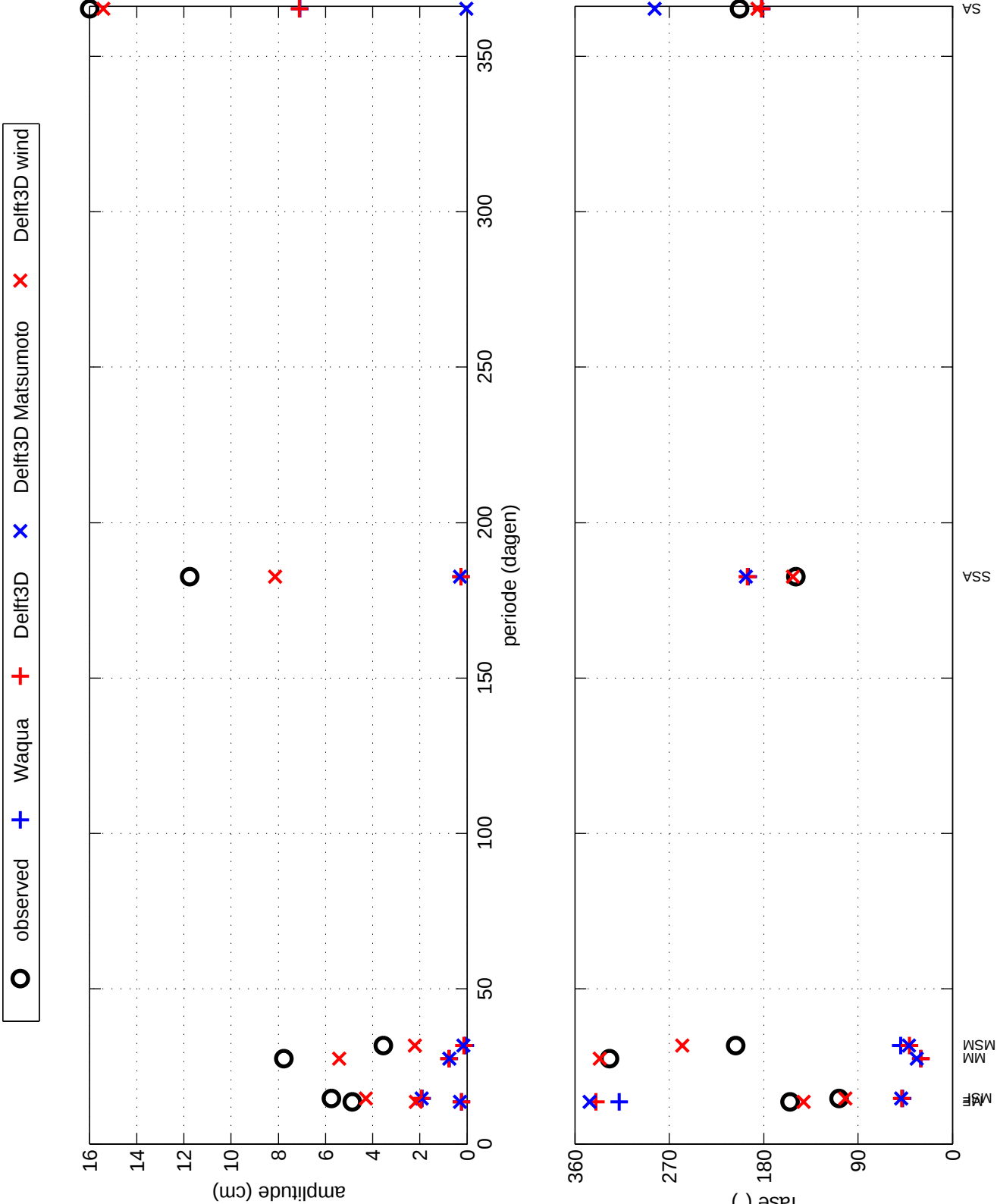
Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende dubbeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Huibertgat (HUI)	
	C03041.001941	Fig. B.4c



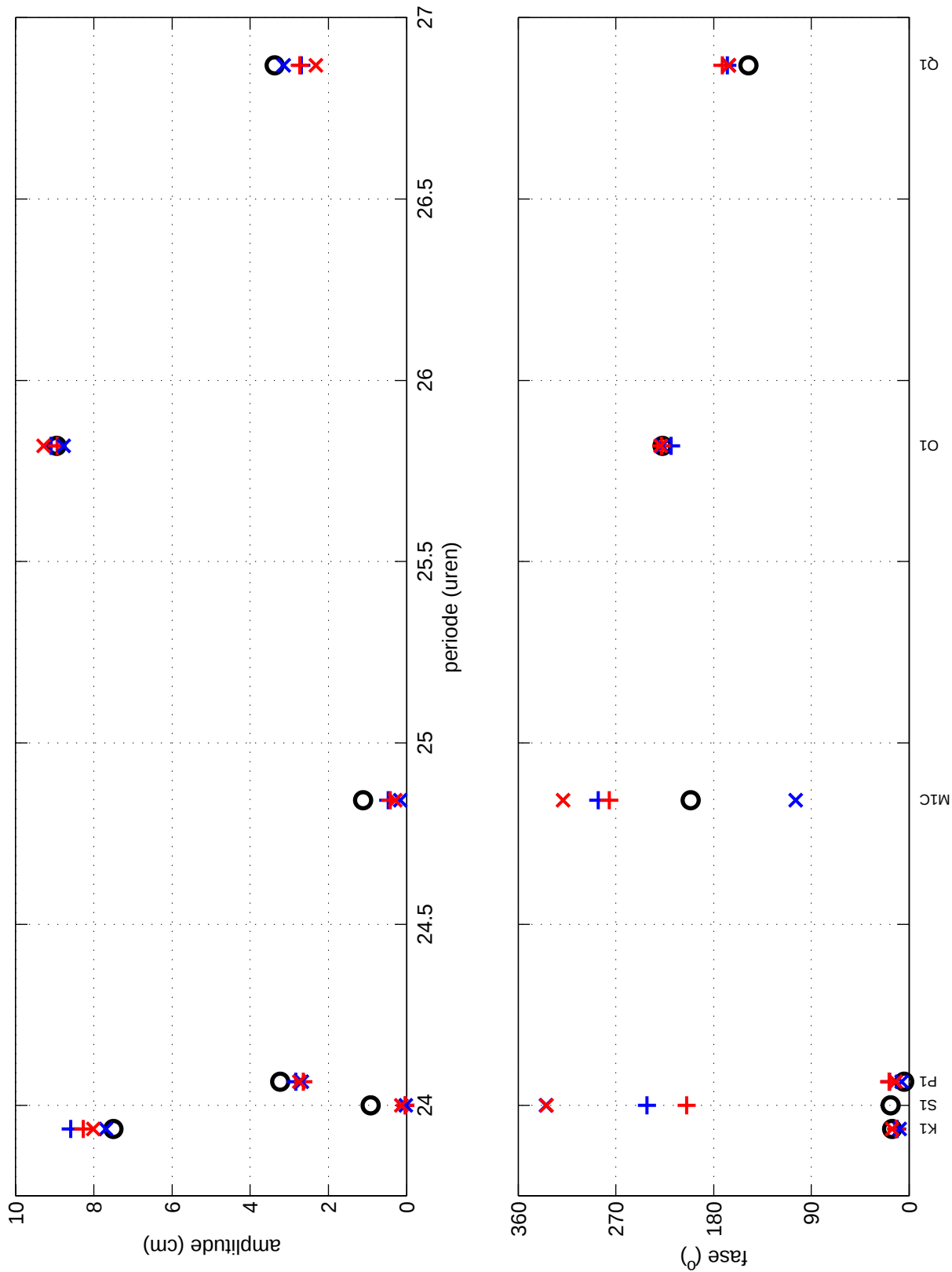
Rekenexperiment Waddenzee		
	C03041.001941	Fig. B.4d



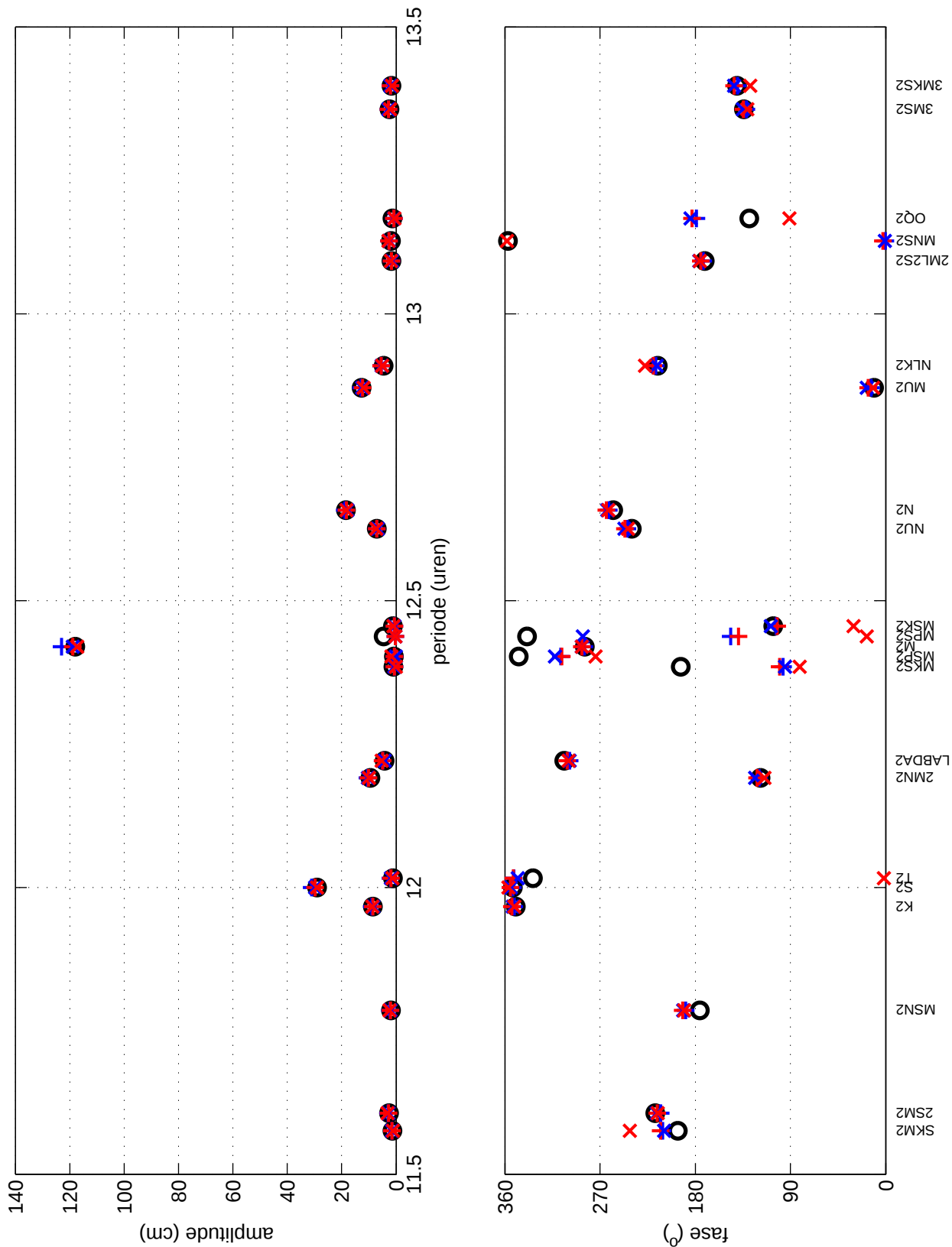
Vergelijking gemeten en berekende langjarige getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Eemshaven (EHV)		
	Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941 Fig. B.5a

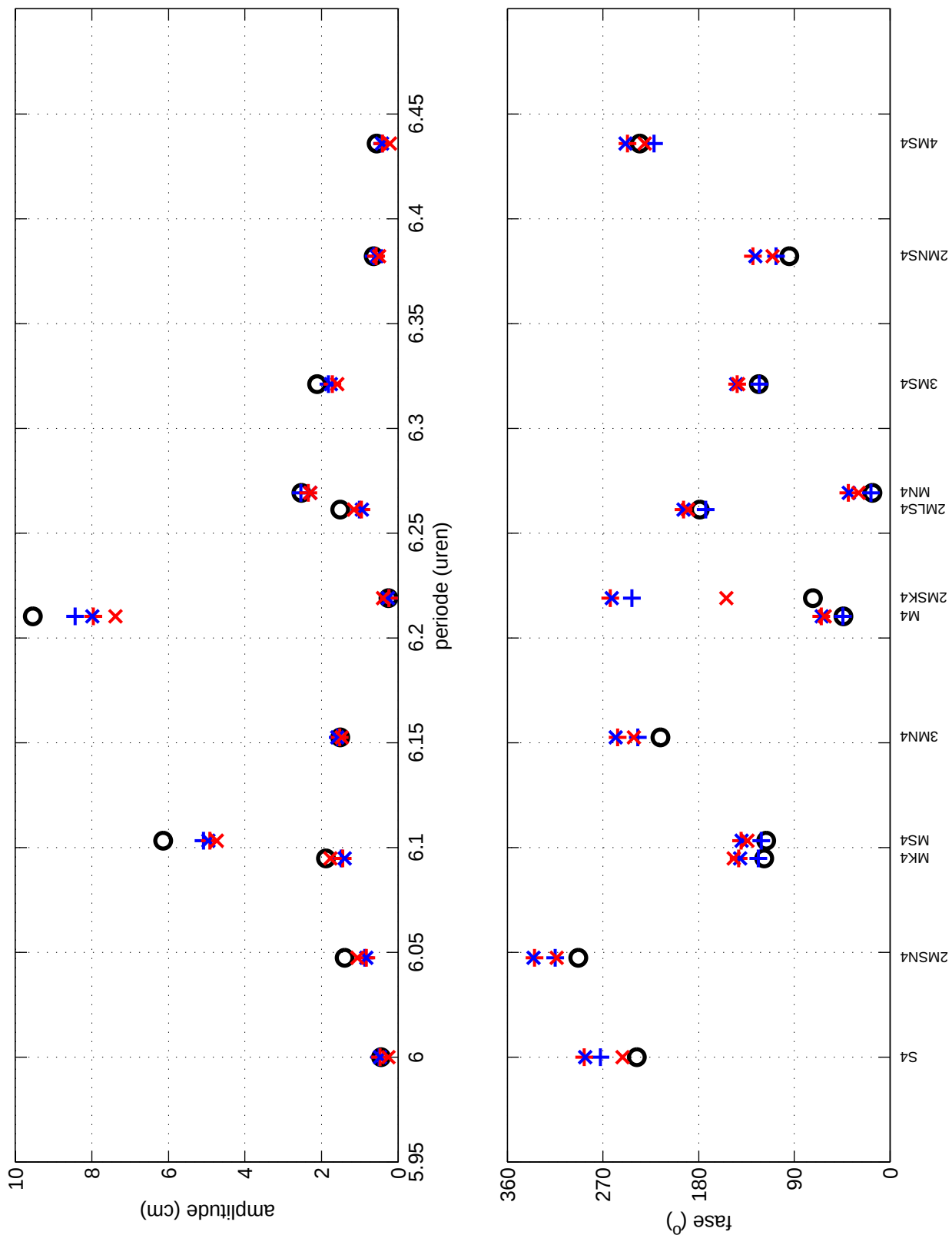


Vergelijking gemeten en berekende enkeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Eemshaven (EHV)		
	C03041.001941	Fig. B.5b
Rekenexperiment Waddenzee		



Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende dubbeldaagse getij- componenten voor verschillende Noordzee-modellen, station Eemshaven (EHV)	
	C03041.001941	Fig. B.5c



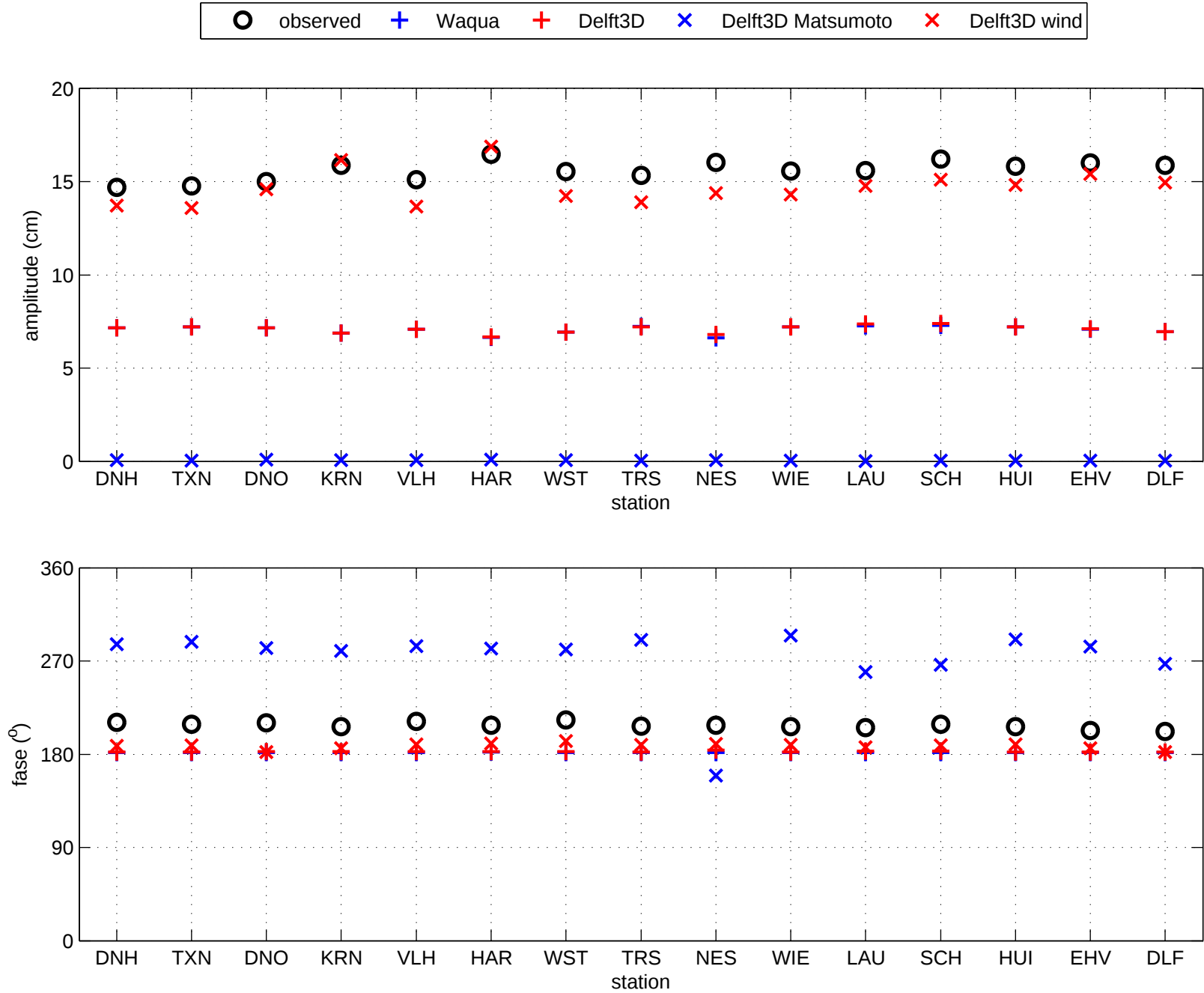


Vergelijking gemeten en berekende vier maal daagse getij-
componenten voor verschillende Noordzee-modellen,
station Eemshaven (EHV)

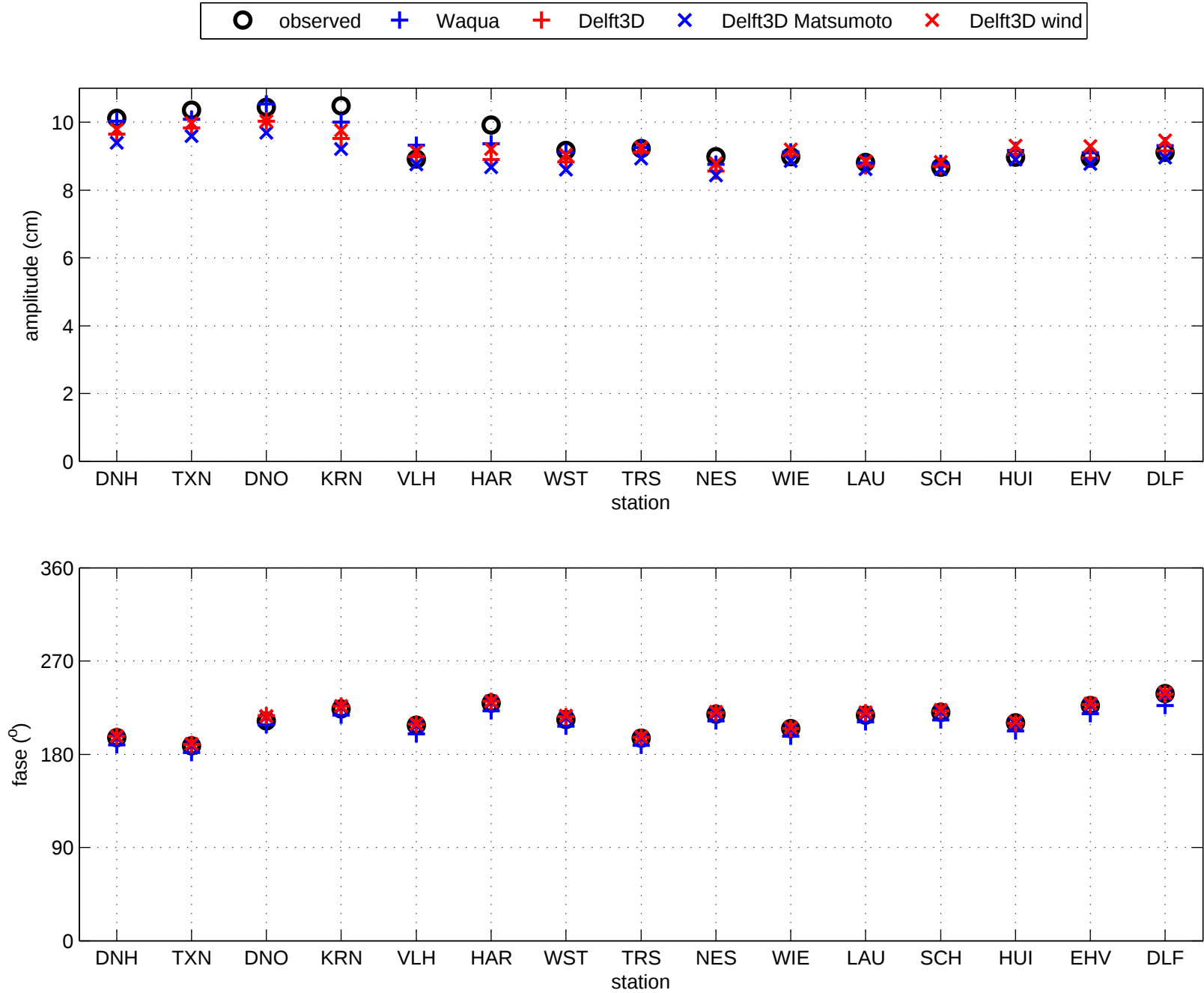
Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

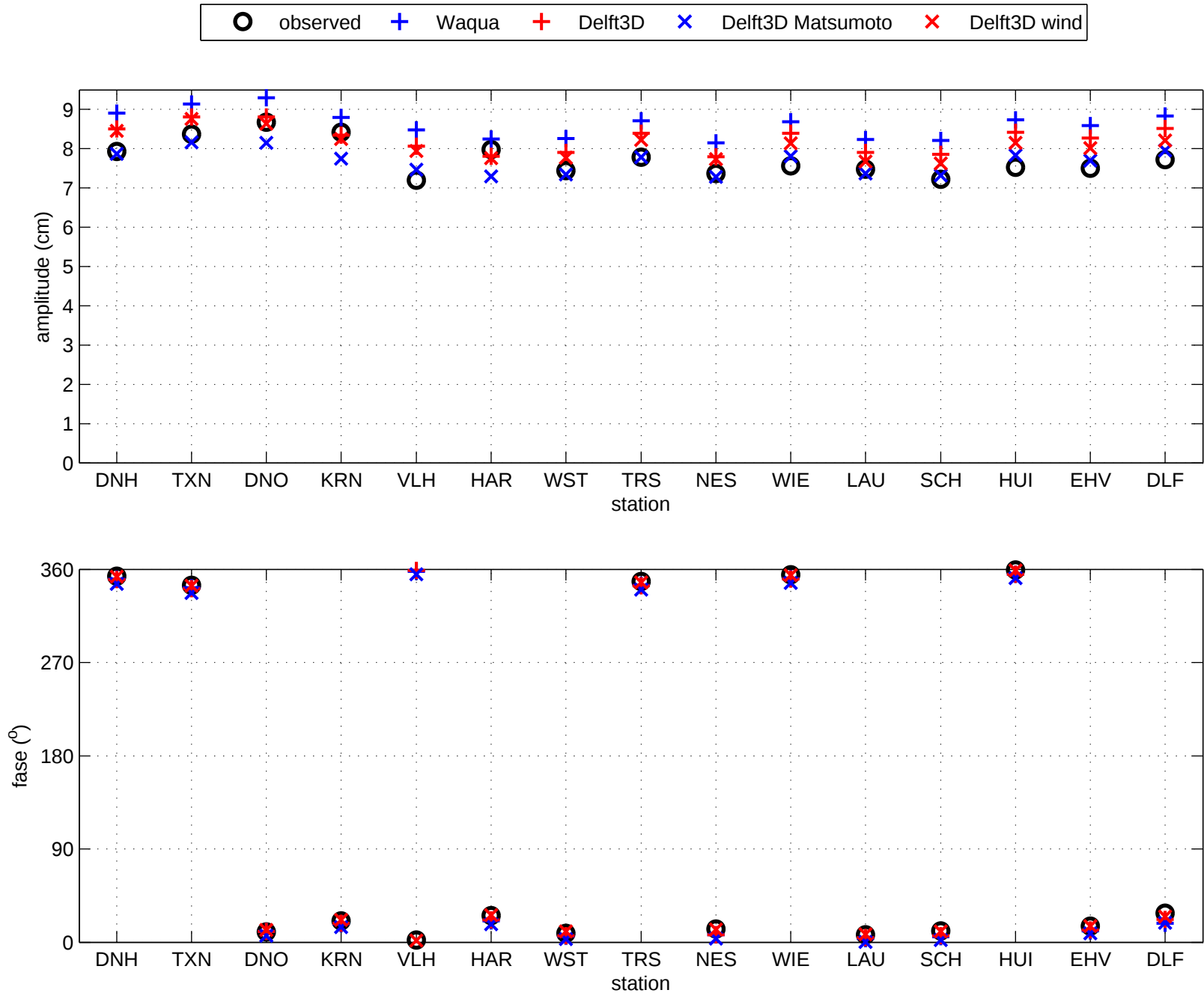
Fig. B.5d



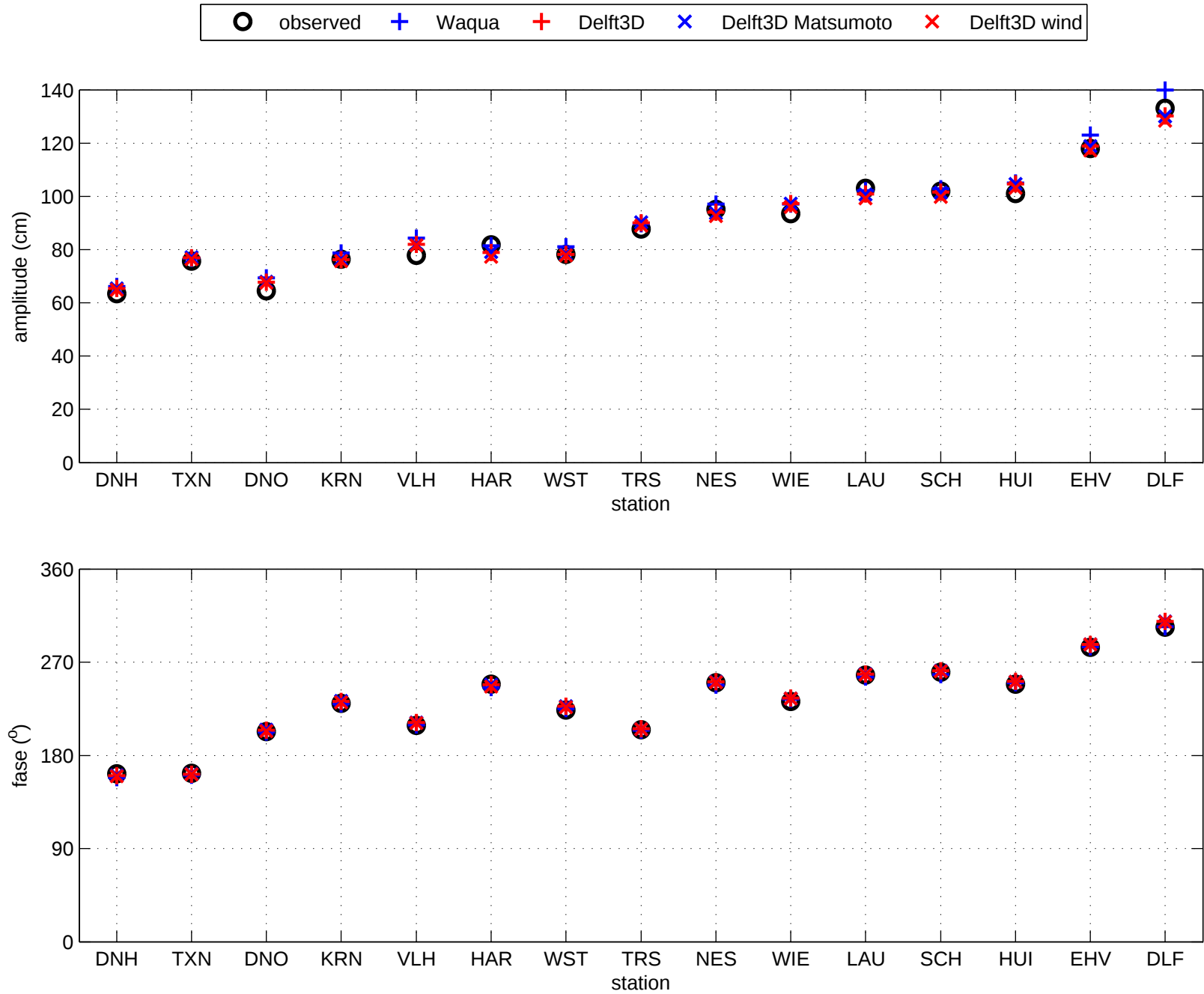
Rekenexperiment Waddenzee		Vergelijking gemeten en berekende amplitude en fase voor verschillende Noordzee-modellen voor component O1	
C03041.001941			
Fig. B.7			



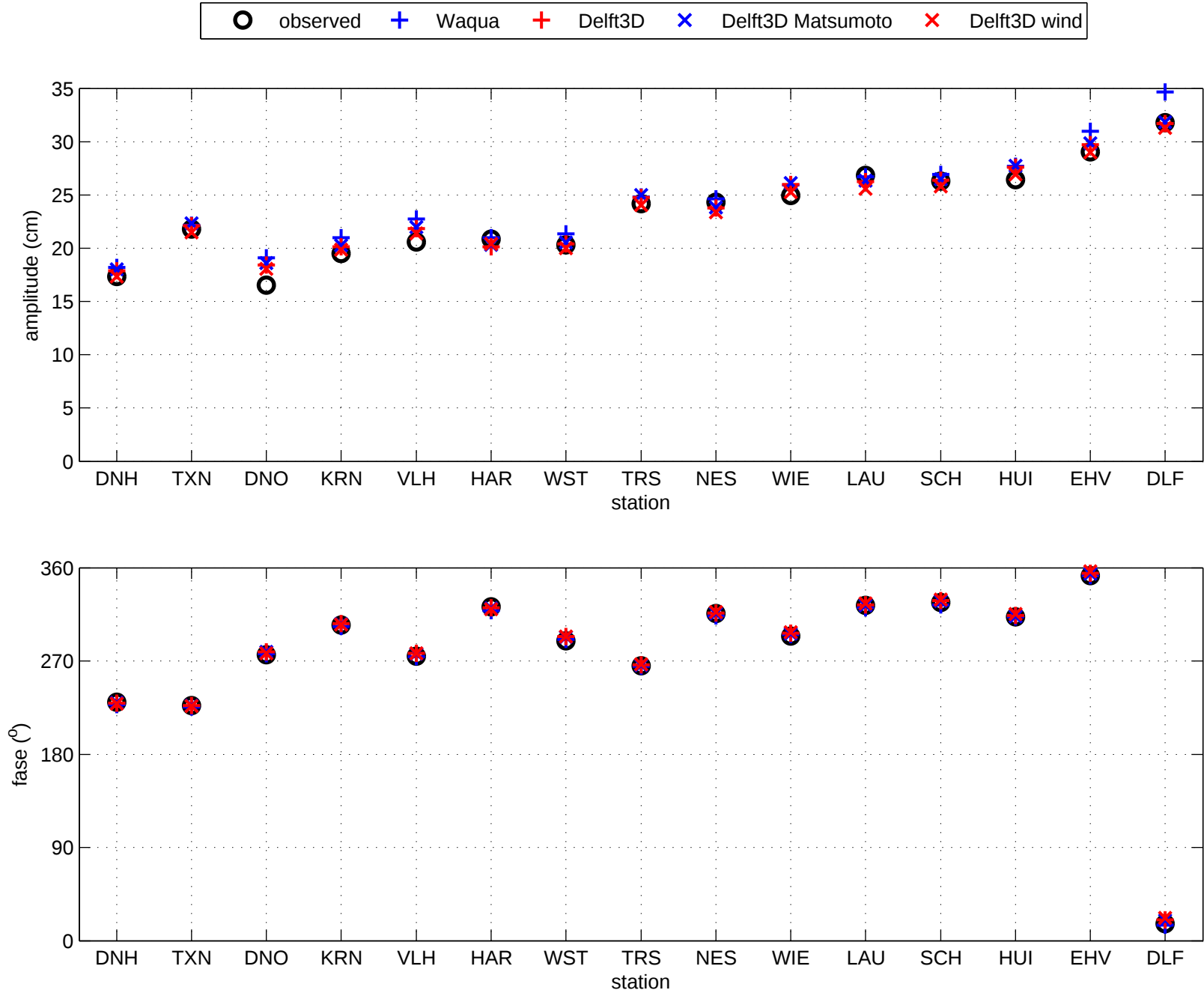
Rekenexperiment Waddenzee	
Vergelijking gemeten en berekende amplitude en fase voor verschillende Noordzee-modellen voor component K1	
C03041.001941	Fig. B.8



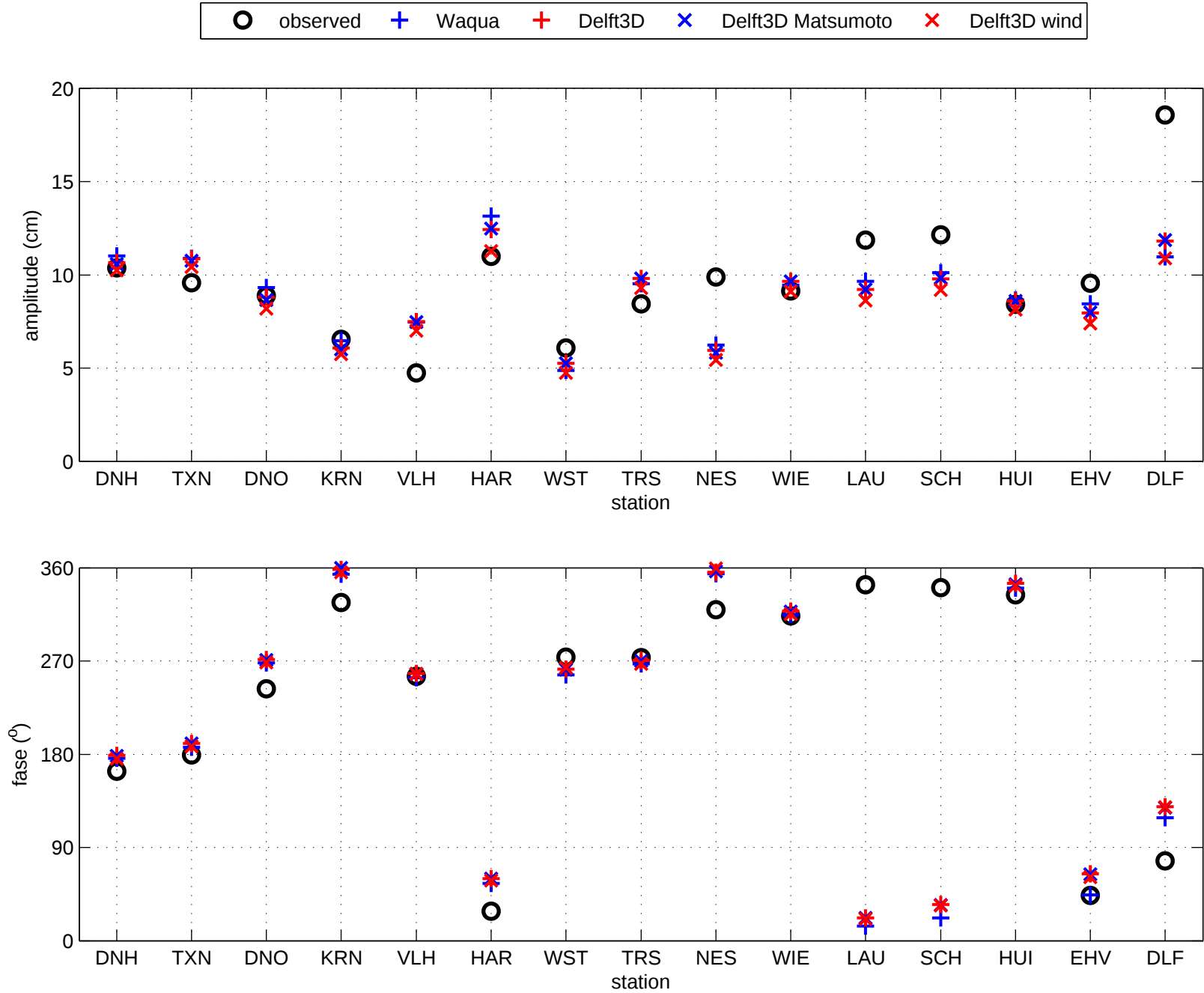
Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende amplitude en fase voor verschillende Noordzee-modellen voor component M2	
	C03041.001941	Fig. B.9



Vergelijking gemeten en berekende amplitude en fase voor verschillende Noordzee-modellen voor component S2		
Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941	Fig. B.10



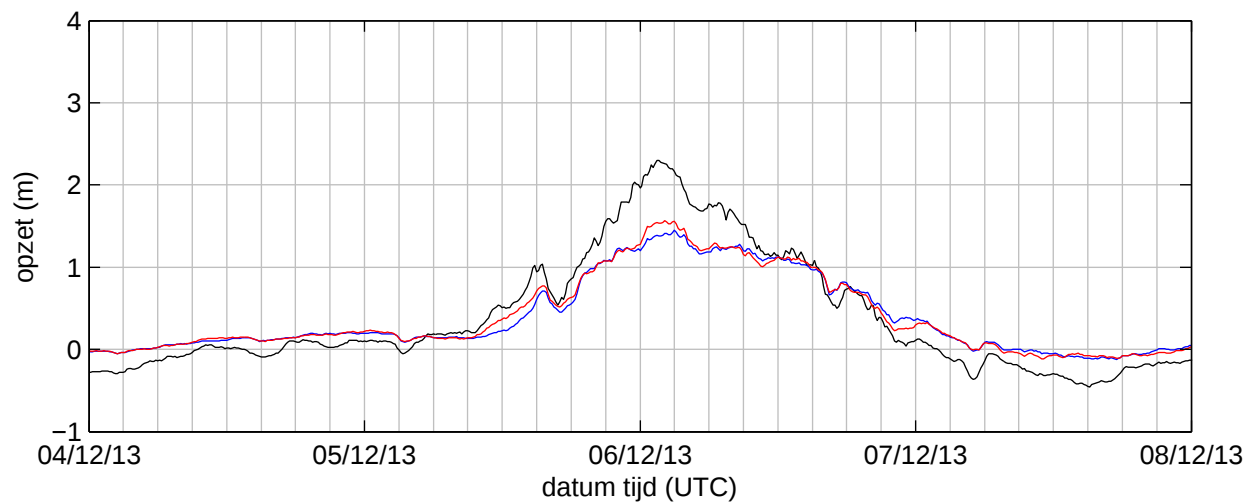
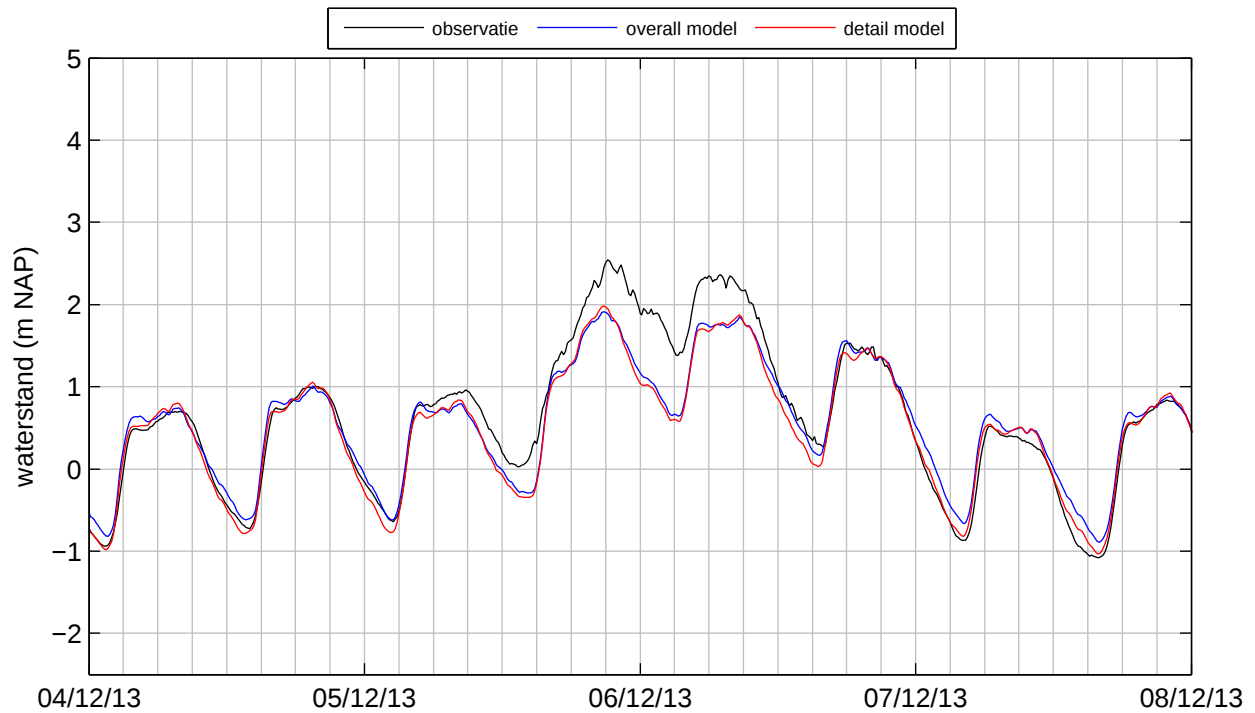
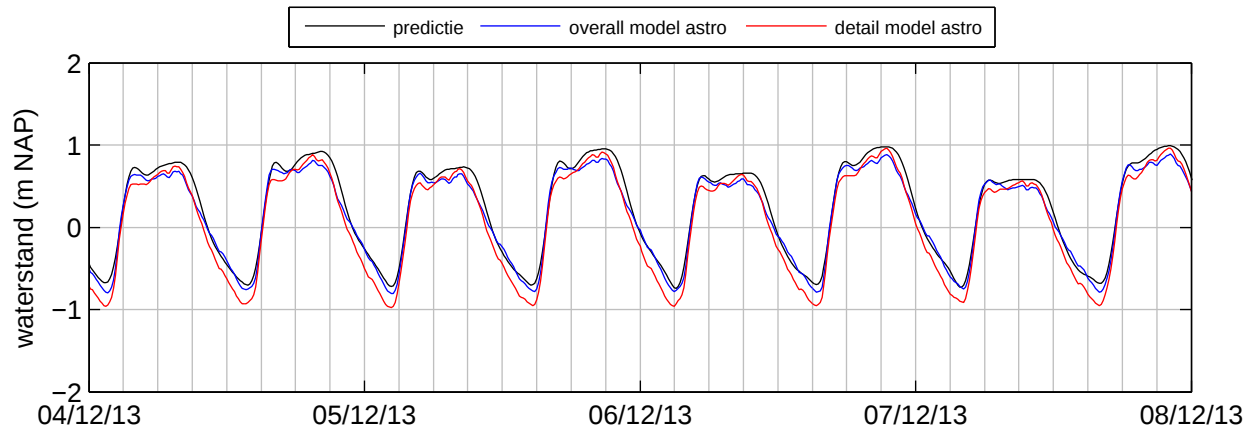
Rekenexperiment Waddenzee	Vergelijking gemeten en berekende amplitude en fase voor verschillende Noordzee-modellen voor component M4	
C03041.001941	Fig. B.11	



Bijlage C

Gevoeligheid waterstanden voor resolutie rekenrooster

DEN HELDER



Vergelijking overall en detail model, station Den Helder,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

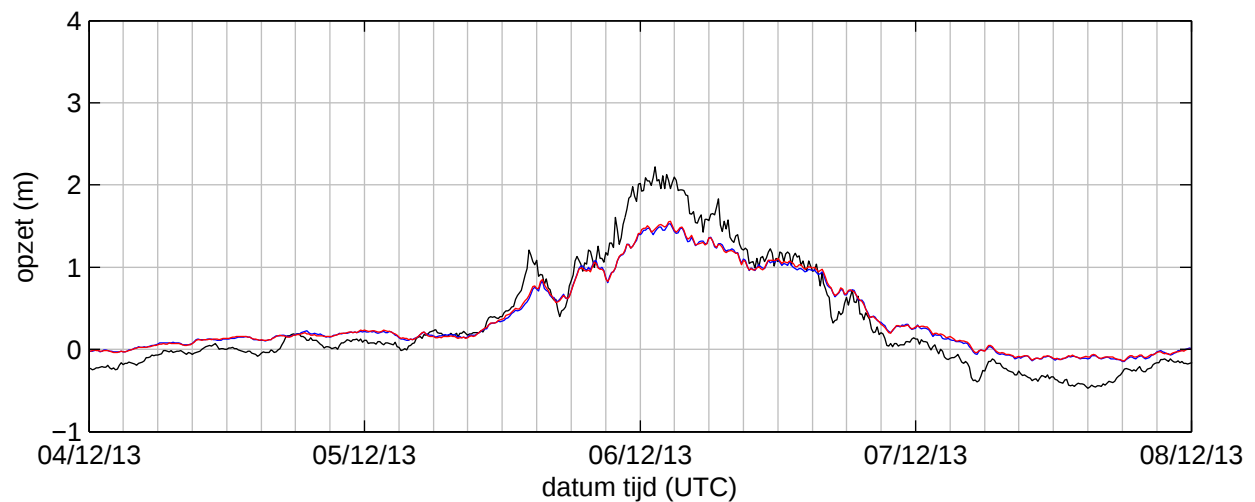
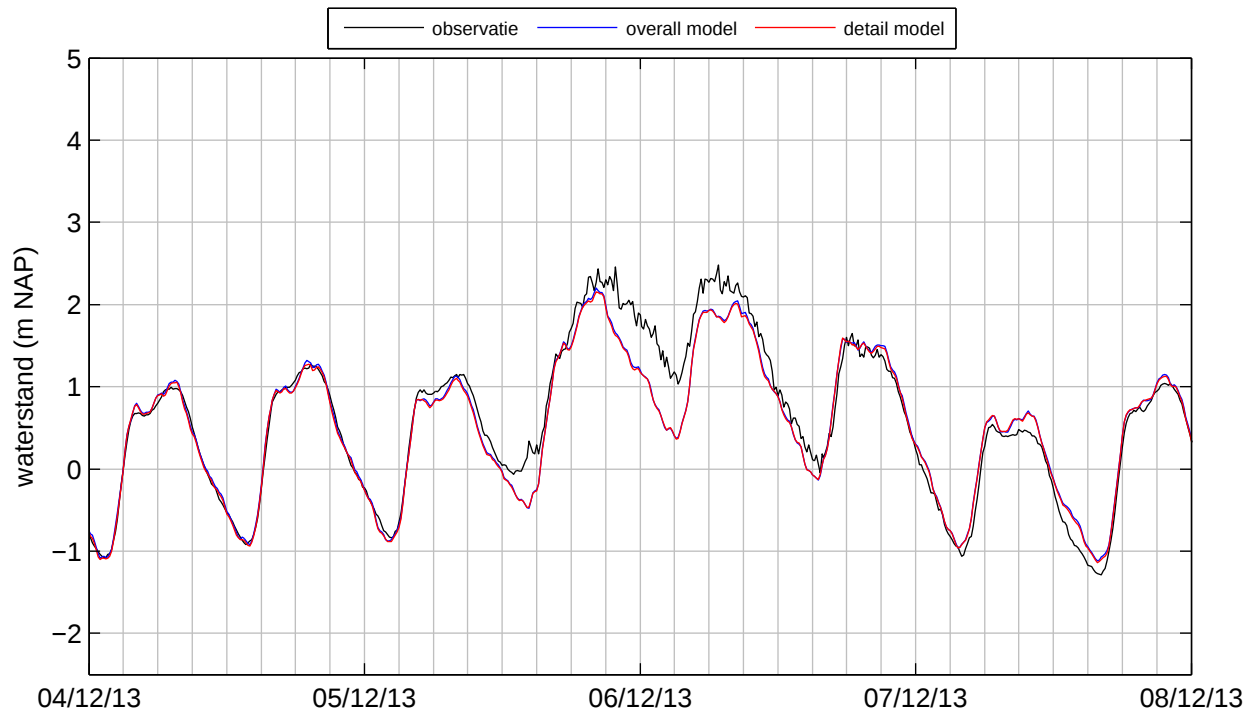
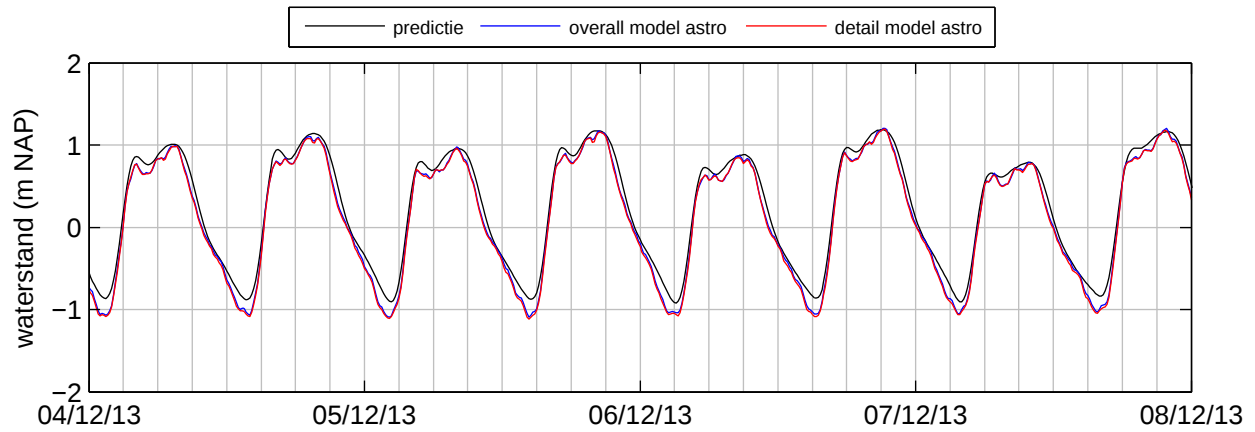
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.1

TEXEL NOORDZEE



Vergelijking overall en detail model, station Texel Noordzee, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

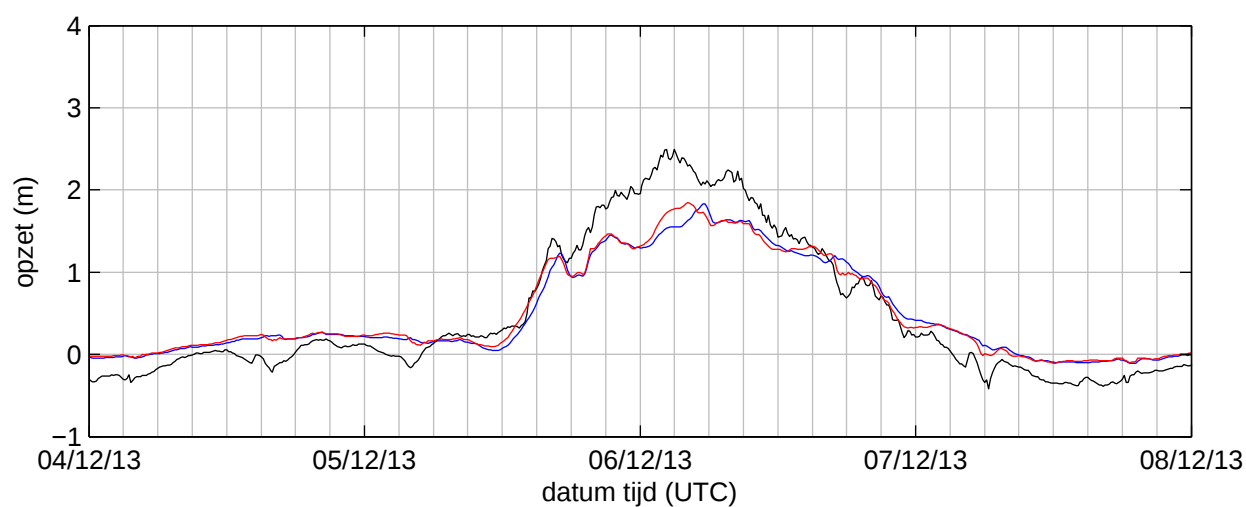
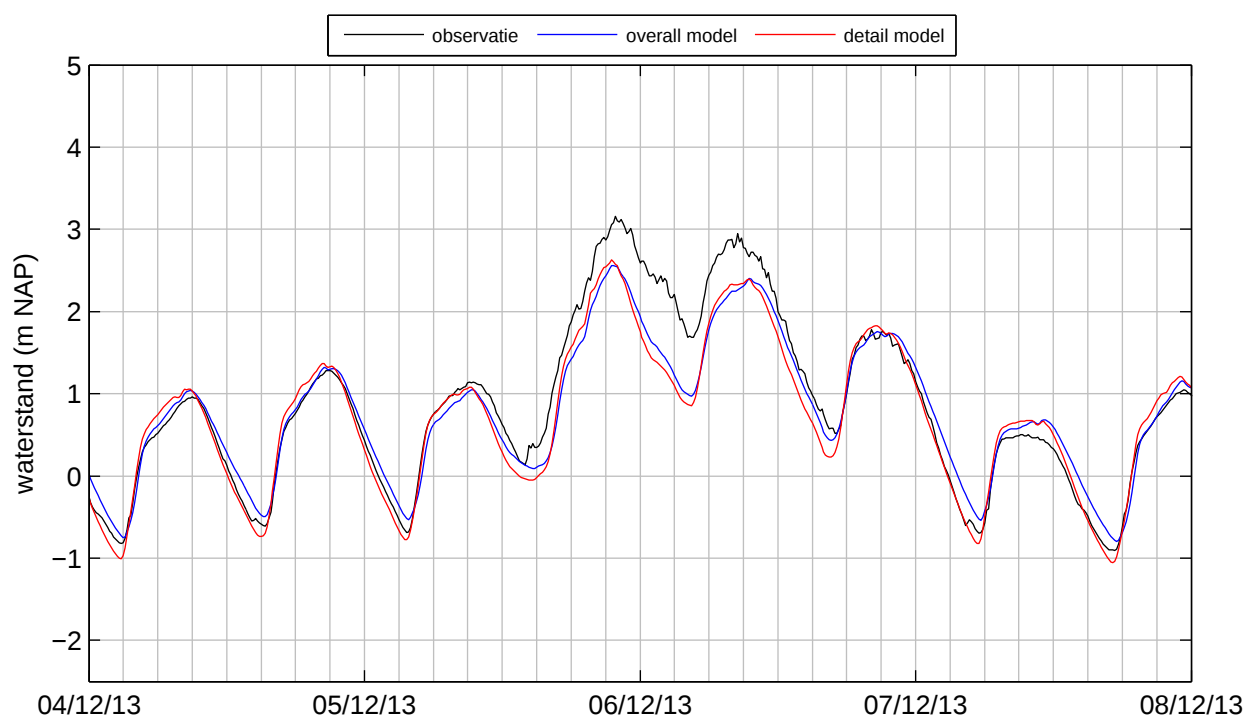
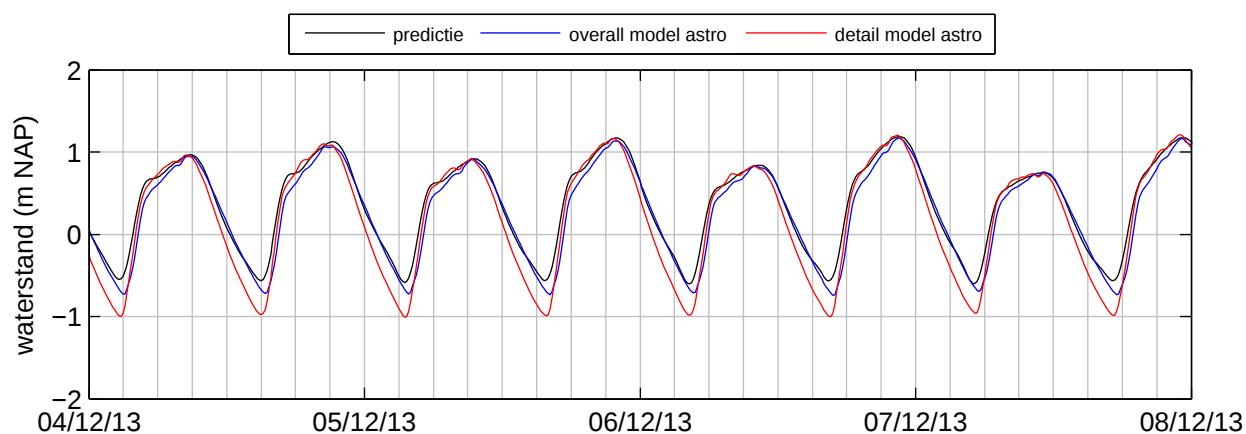
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.2

DEN OEVER BUITEN



Vergelijking overall en detail model, station Den Oever buiten,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

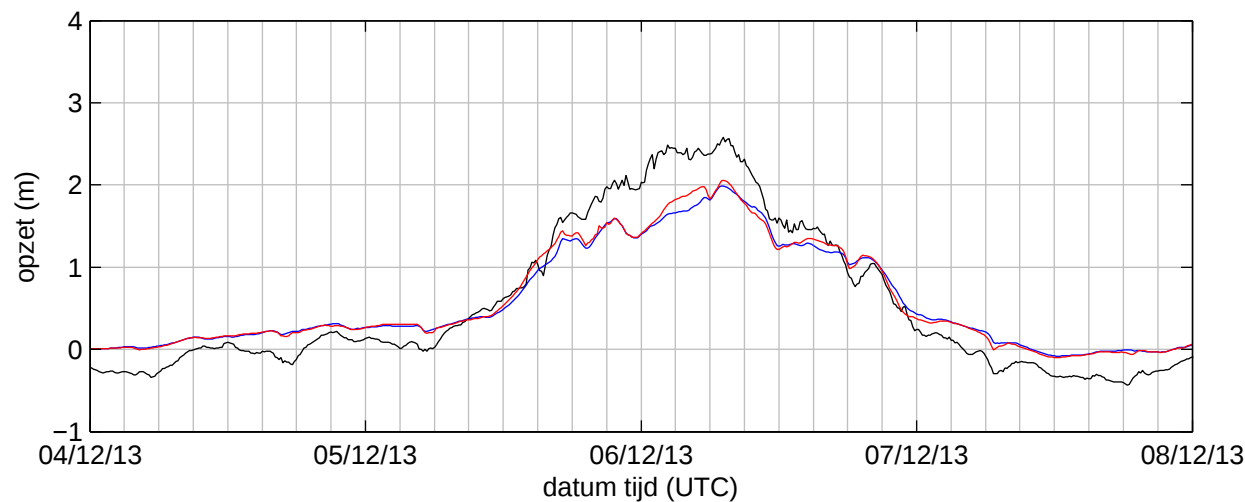
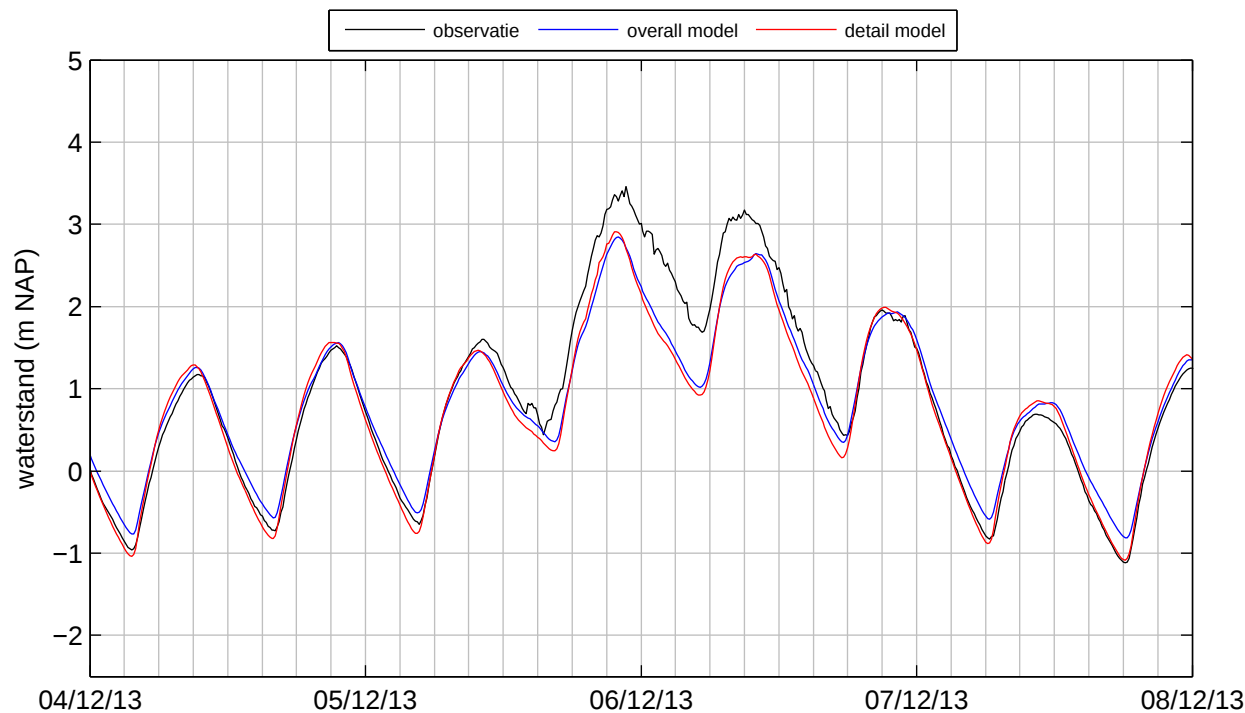
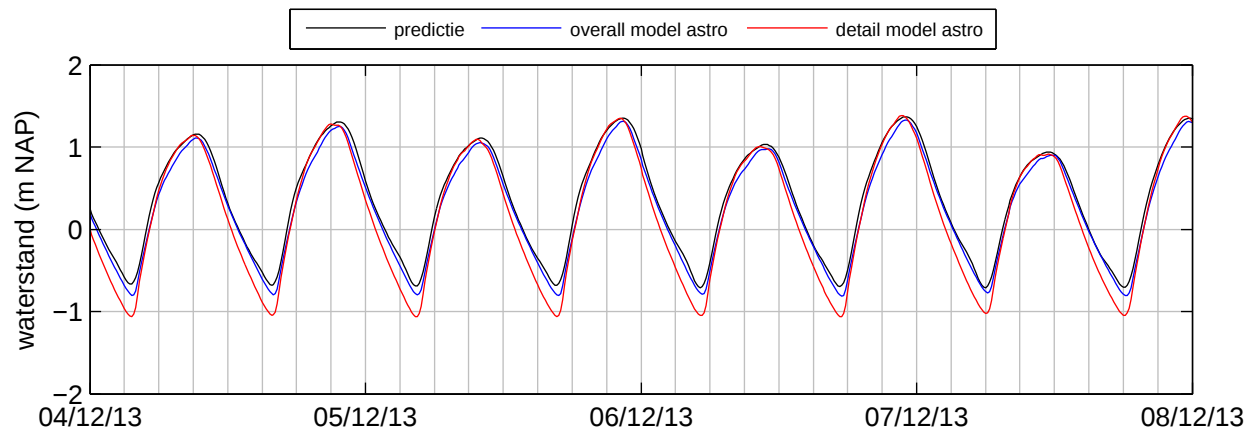
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

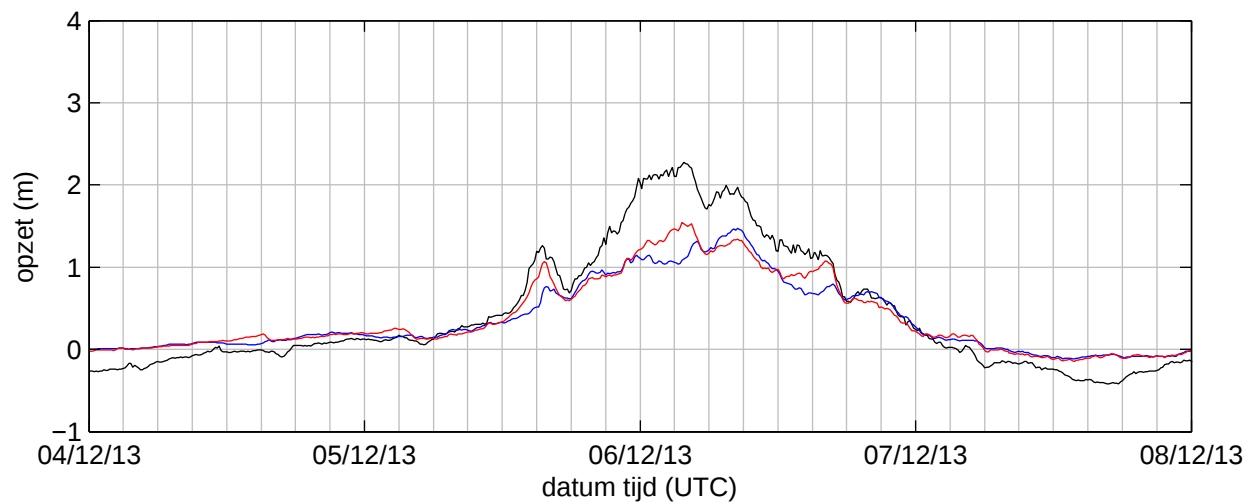
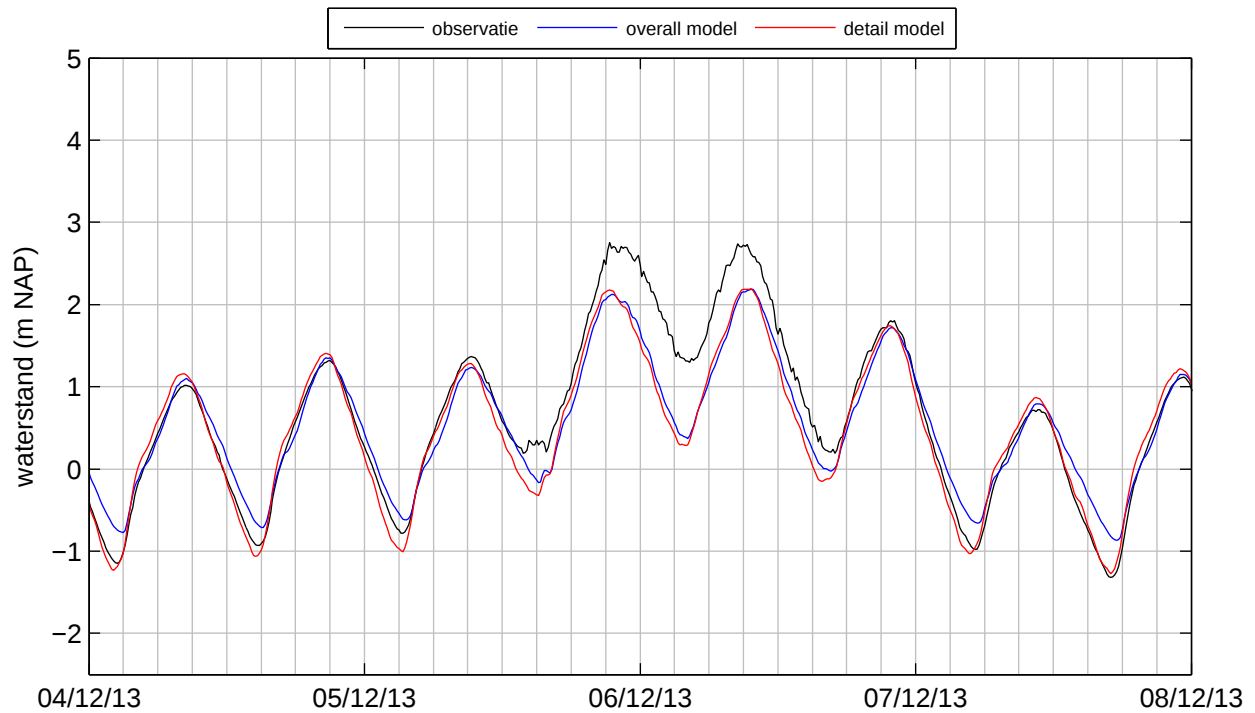
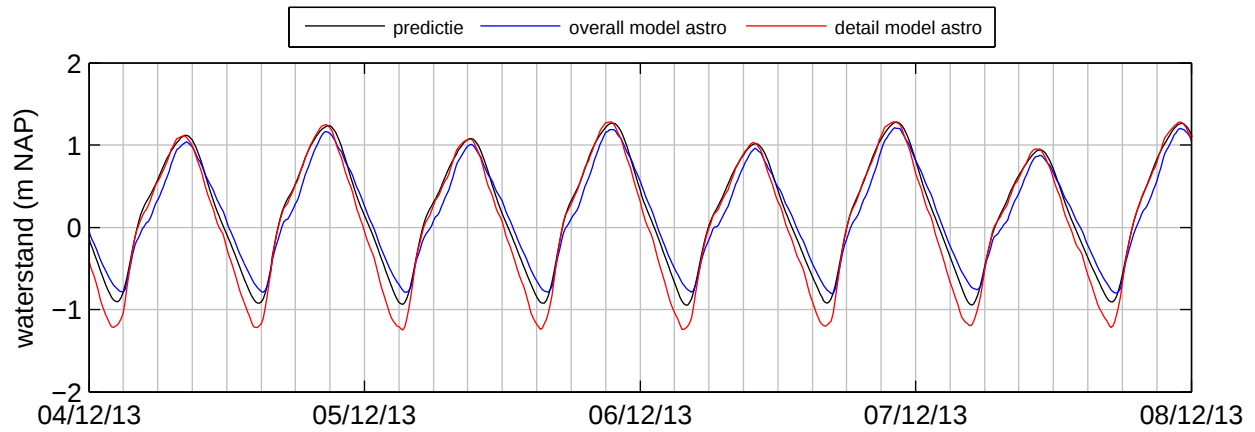
Fig. C.3

KORNWERDERZAND BUI



Vergelijking overall en detail model, station Kornwerderzand bui, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)	Cd-Zijlema	zonder golven
	overall versus detail model	
Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941	Fig. C.4

VLIELAND HAVEN



Vergelijking overall en detail model, station Vlieland haven,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

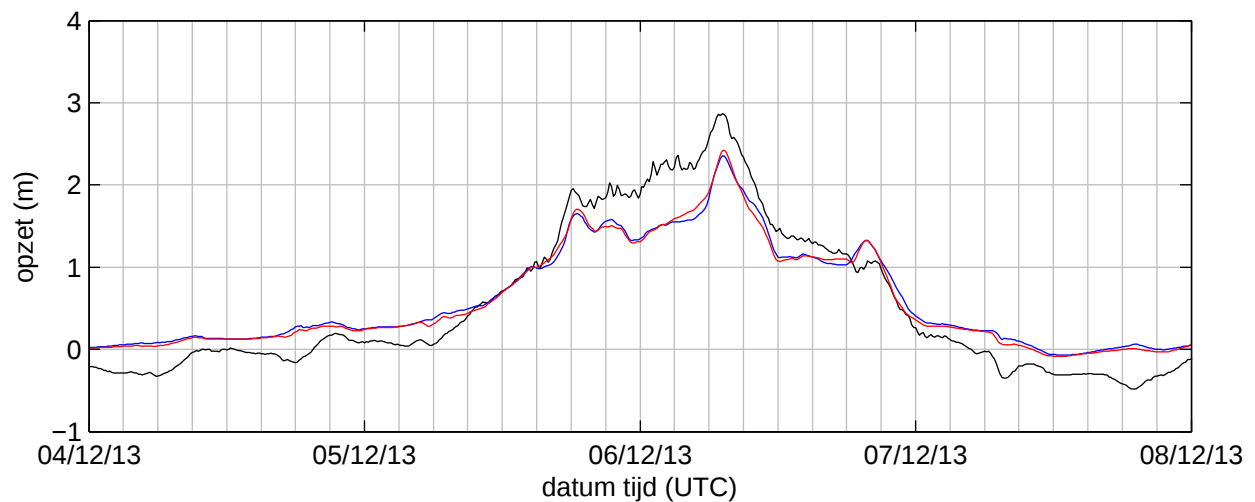
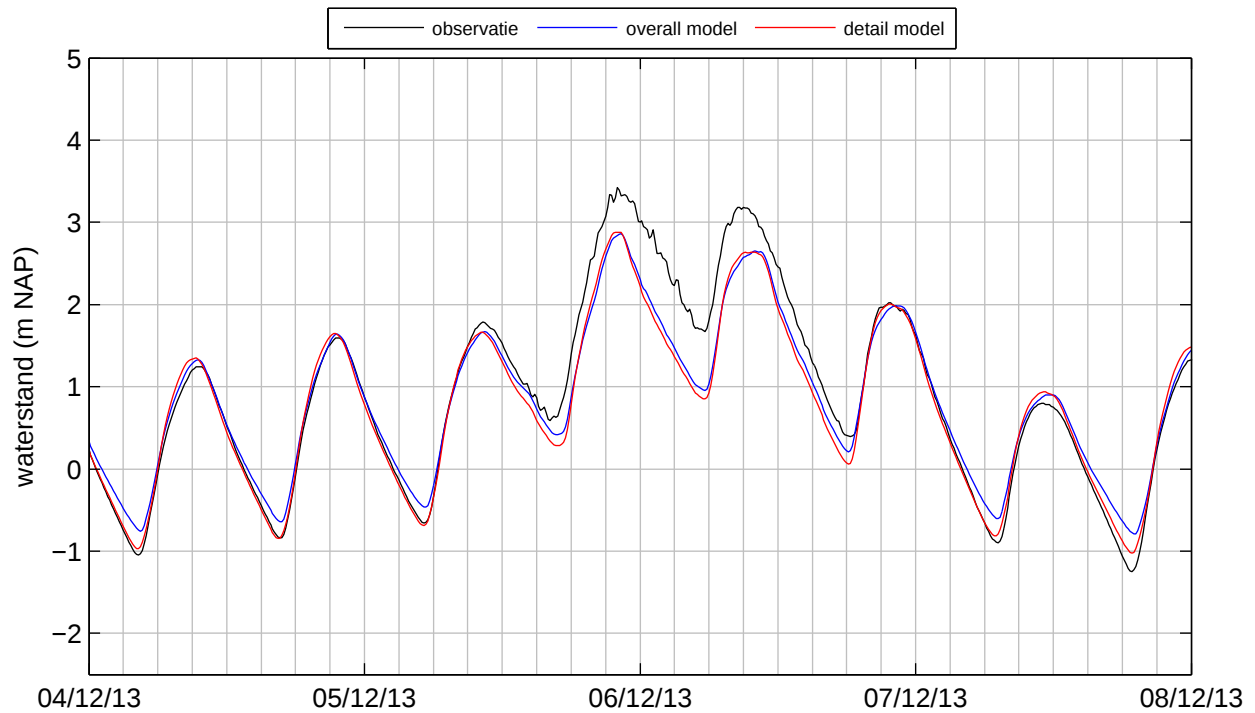
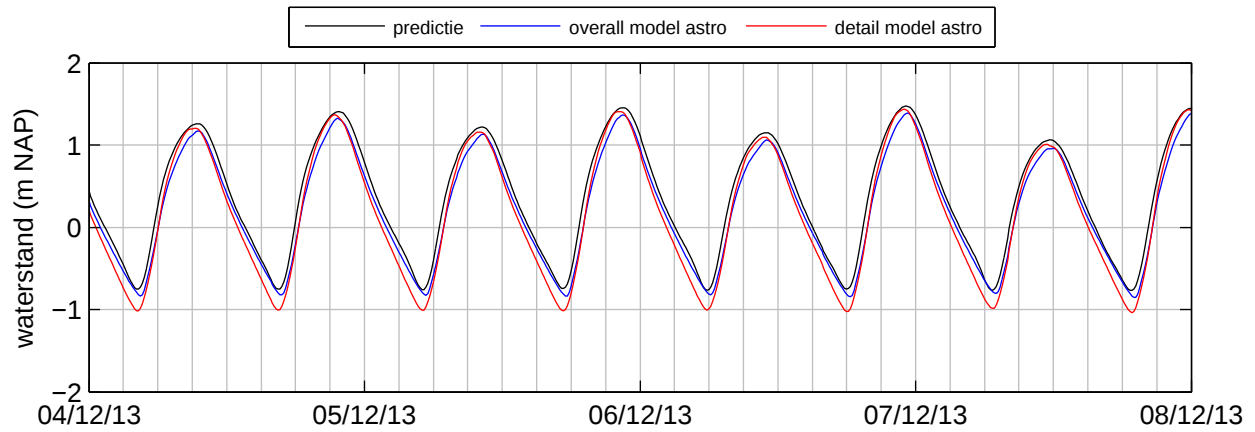
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.5

HARLINGEN



Vergelijking overall en detail model, station Harlingen,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

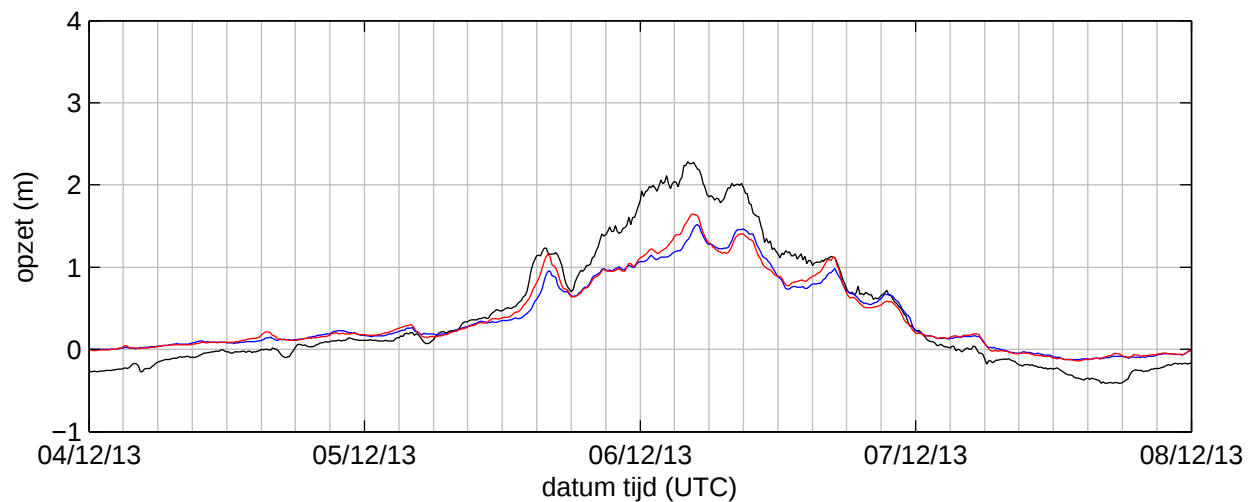
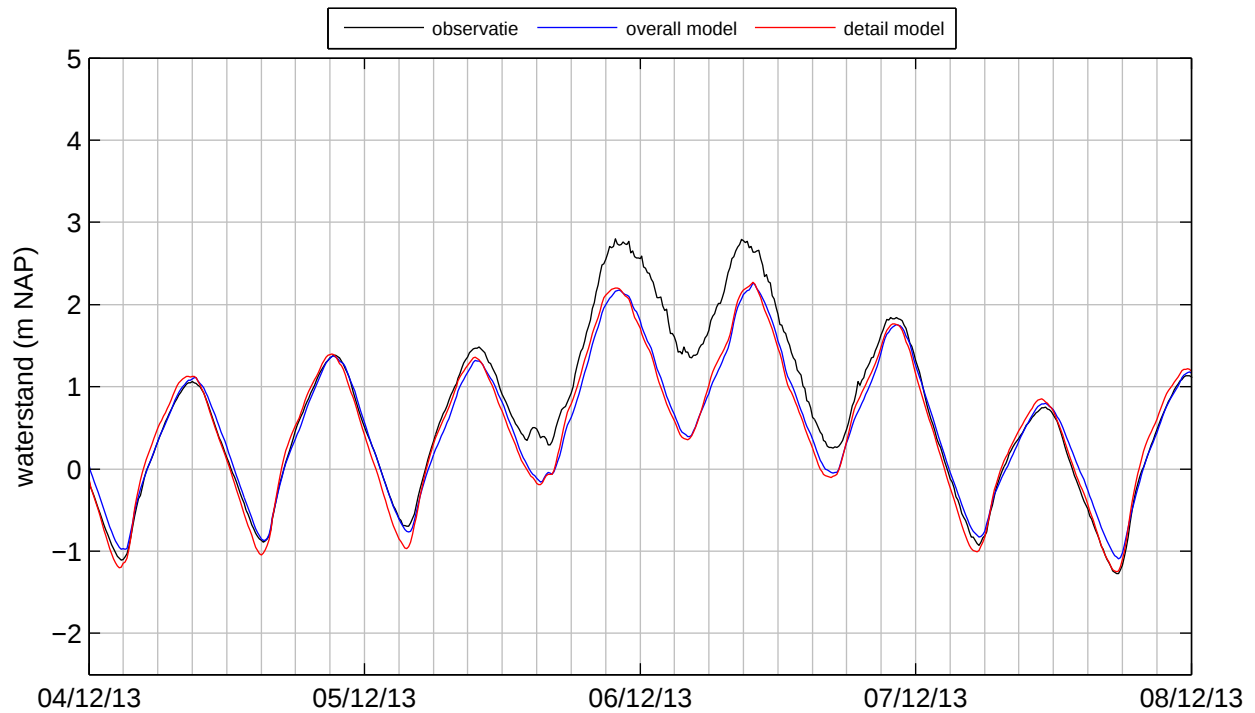
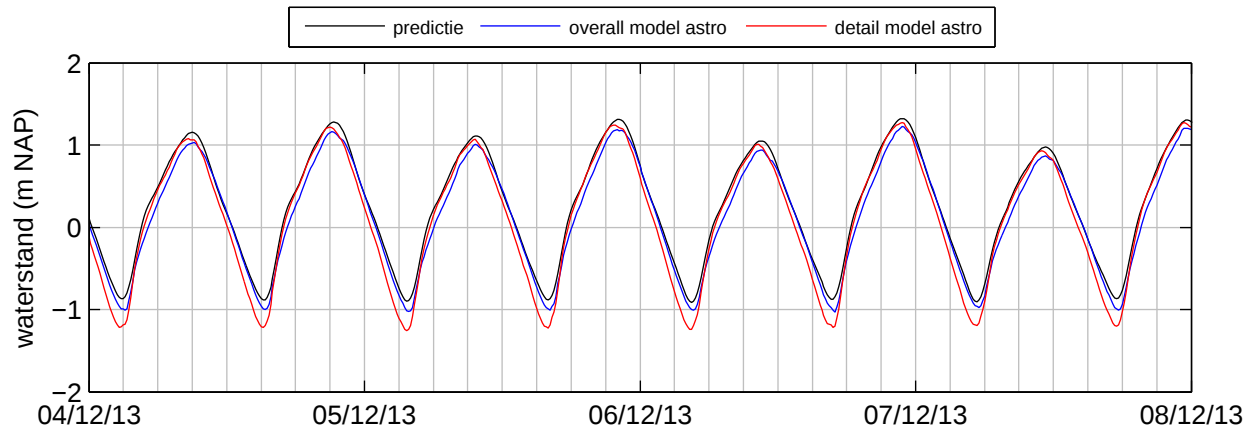
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.6

WEST-Terschelling



Vergelijking overall en detail model, station West-Terschelling, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

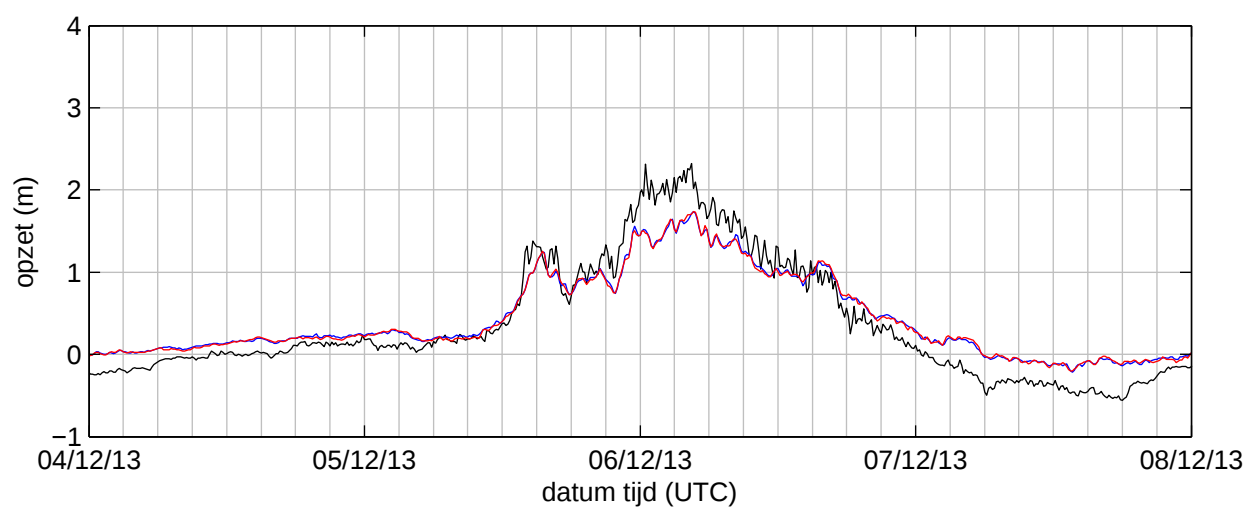
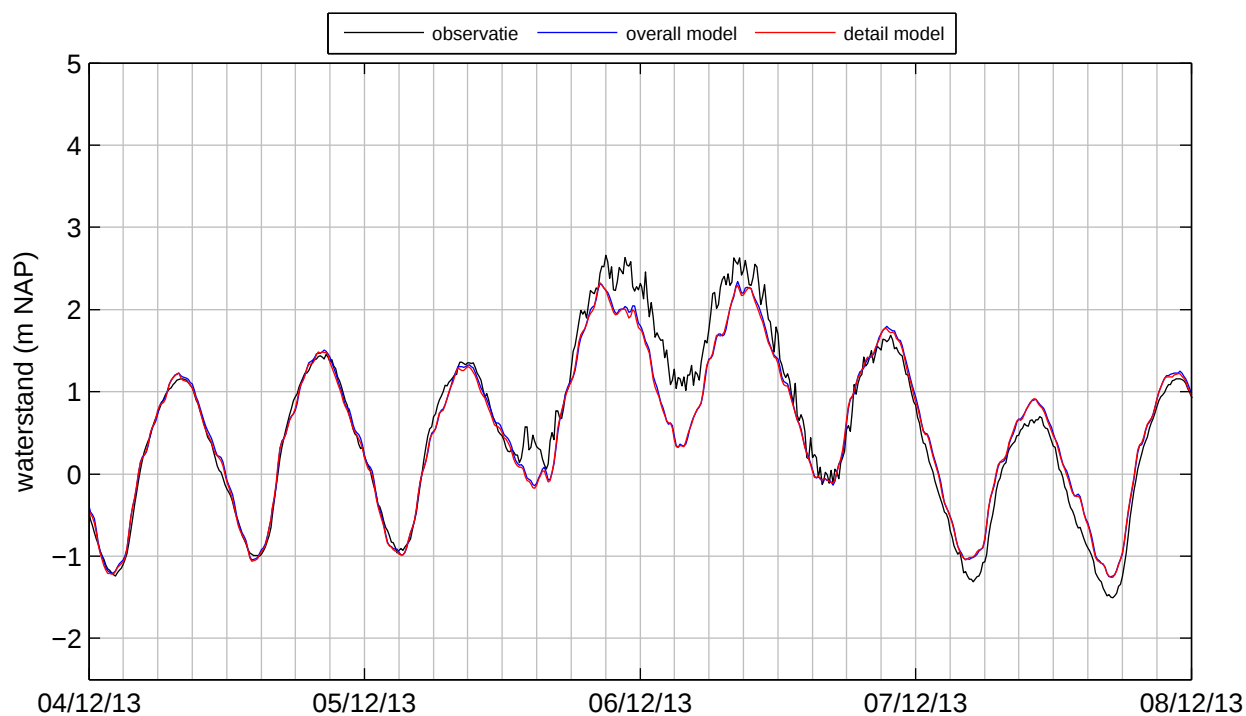
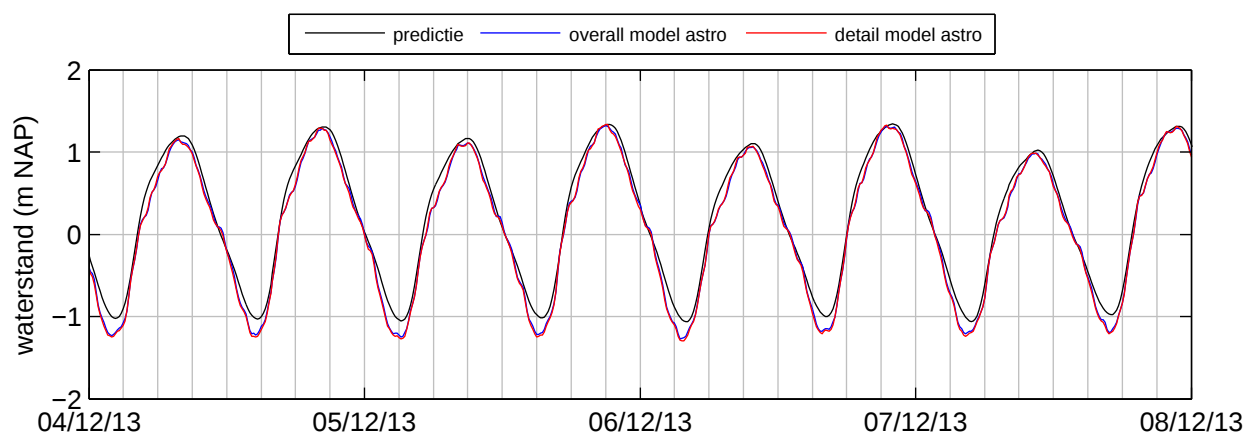
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.7

TERSCHELLING NRDZ



Vergelijking overall en detail model, station Terschelling Nrdz,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

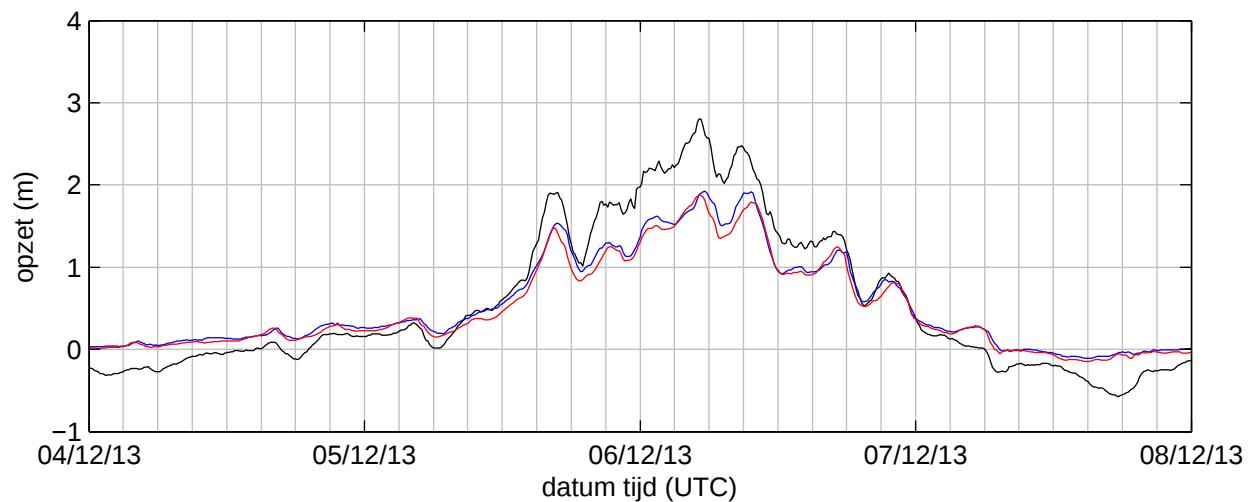
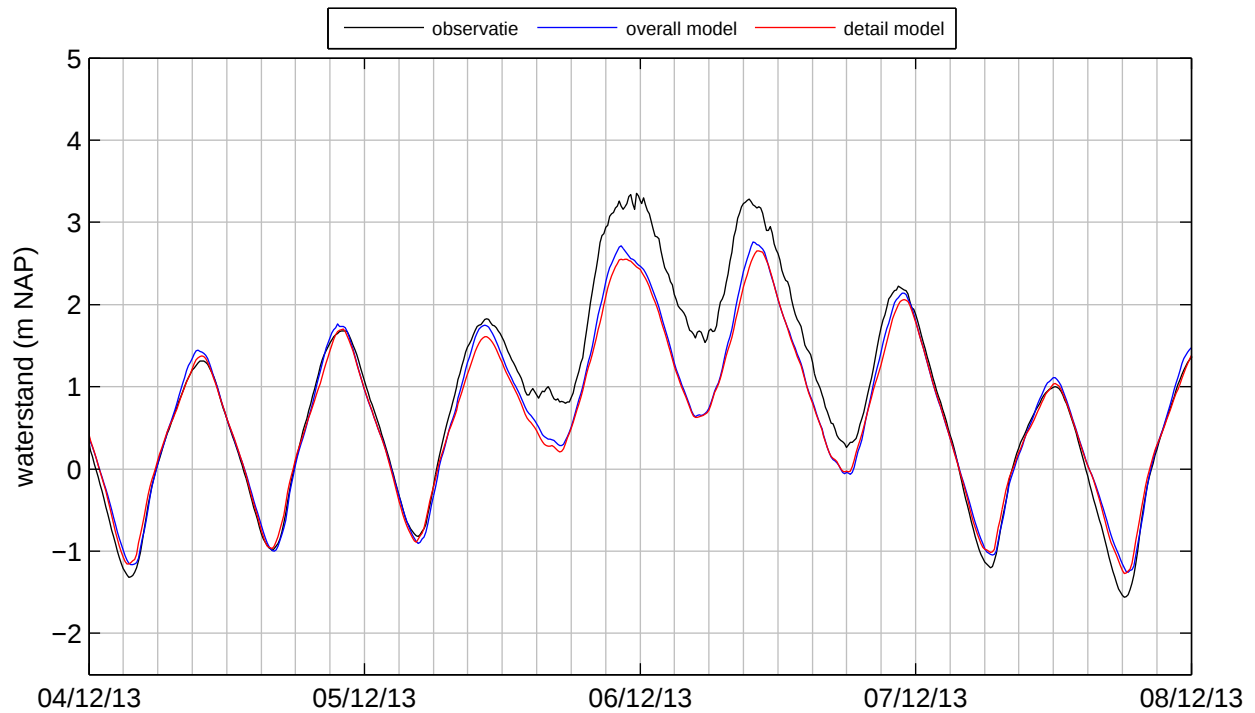
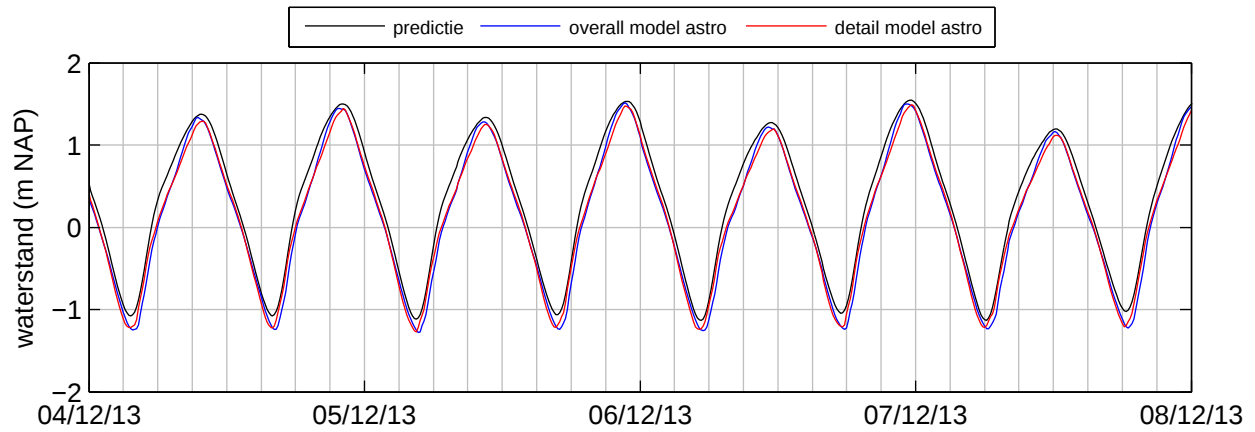
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.8

NES



Vergelijking overall en detail model, station Nes,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

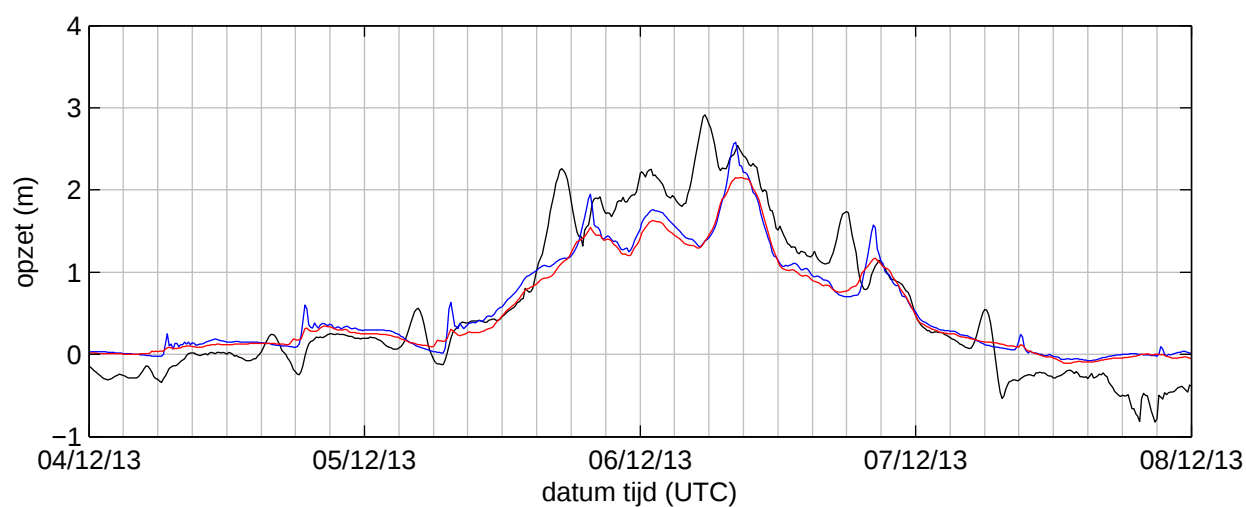
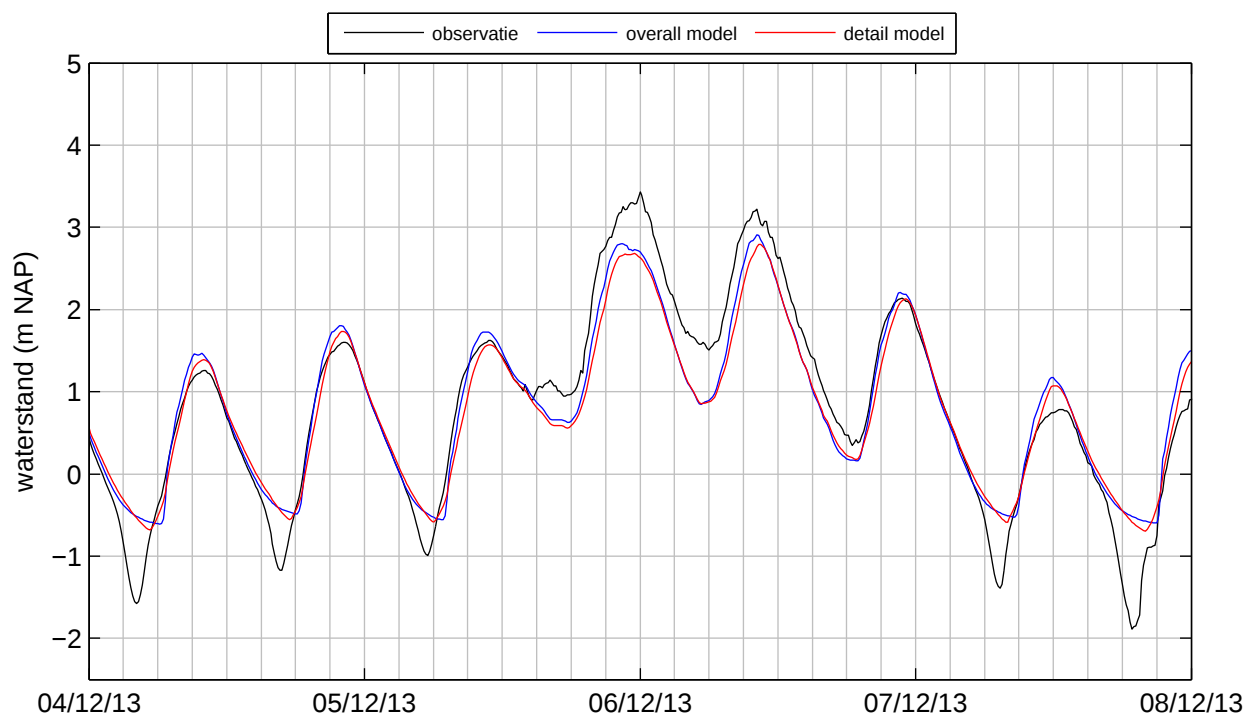
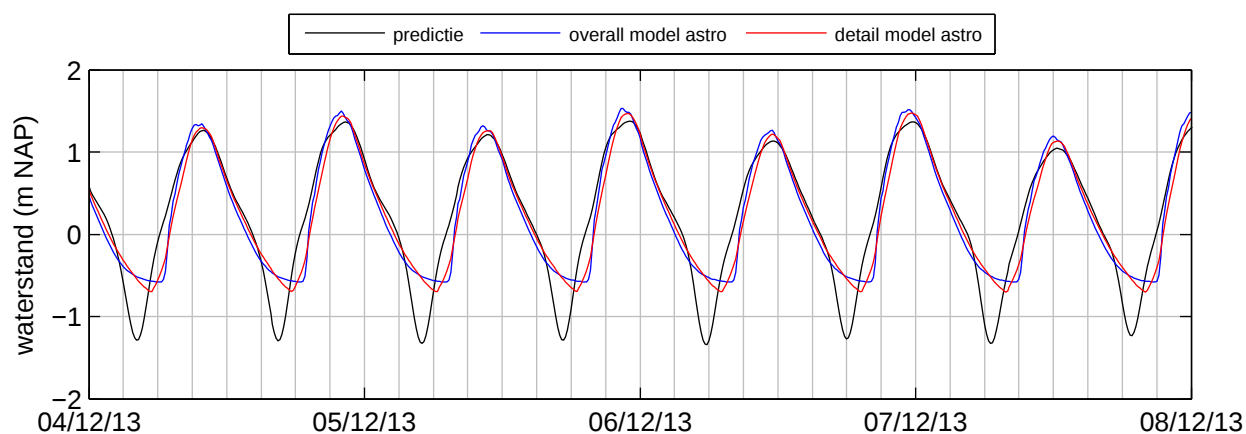
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.9

HOLWERD



Vergelijking overall en detail model, station Holwerd,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

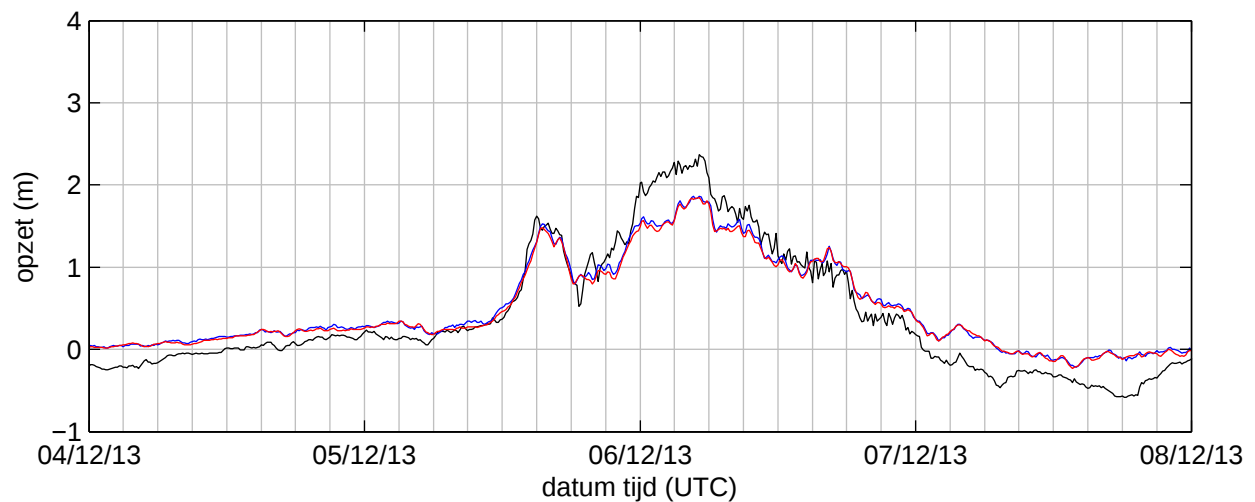
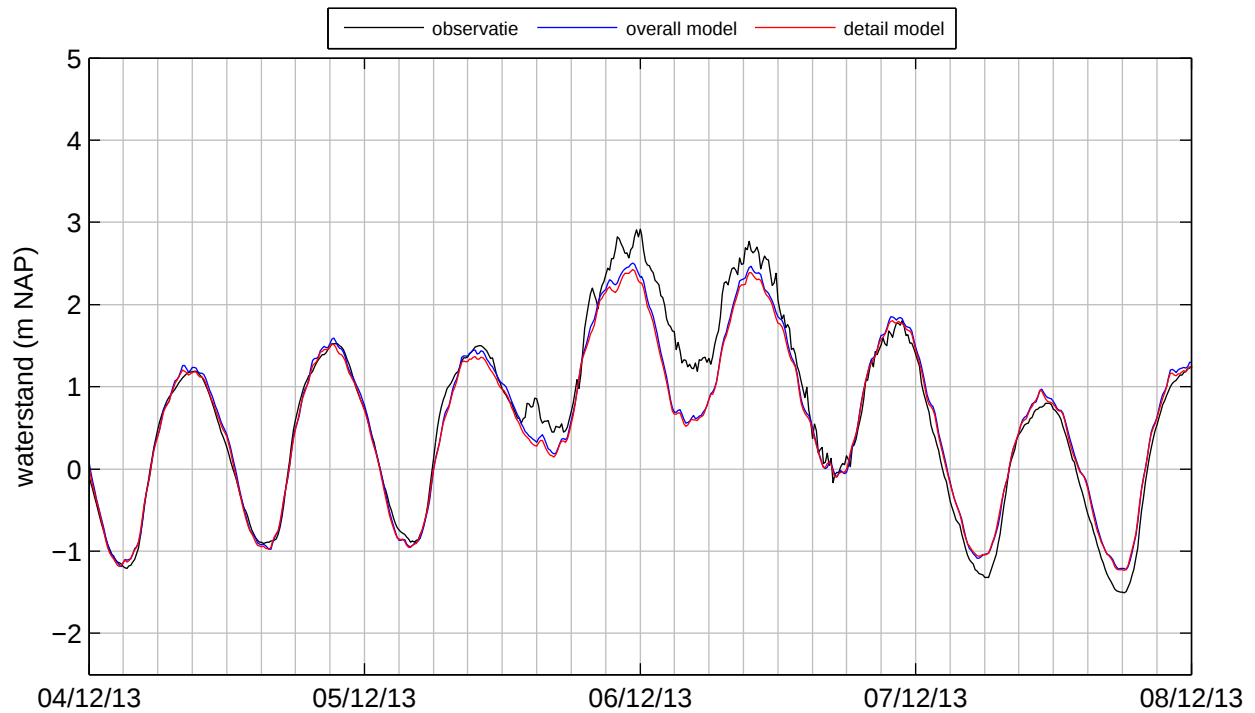
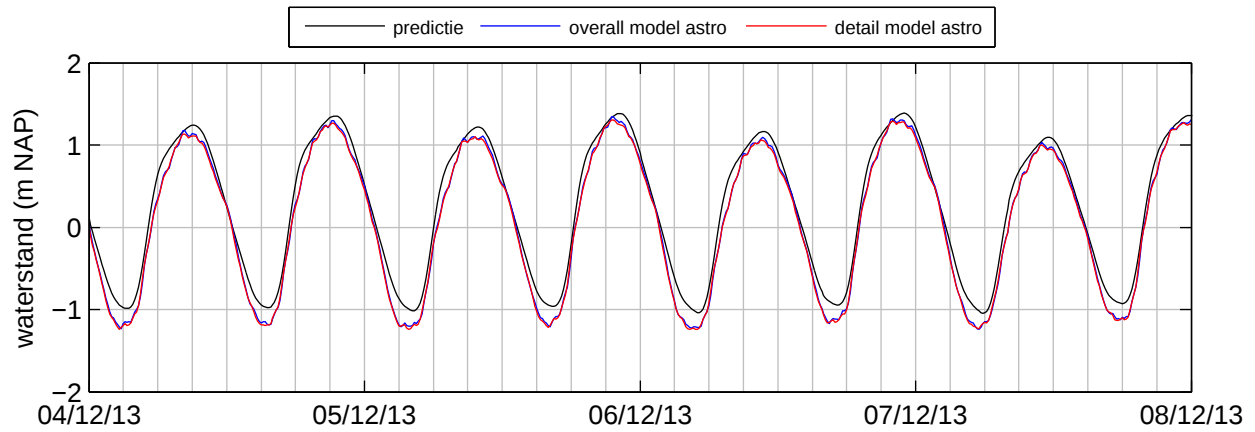
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.10

WIERUMERGRONDEN



Vergelijking overall en detail model, station Wierumergronden, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

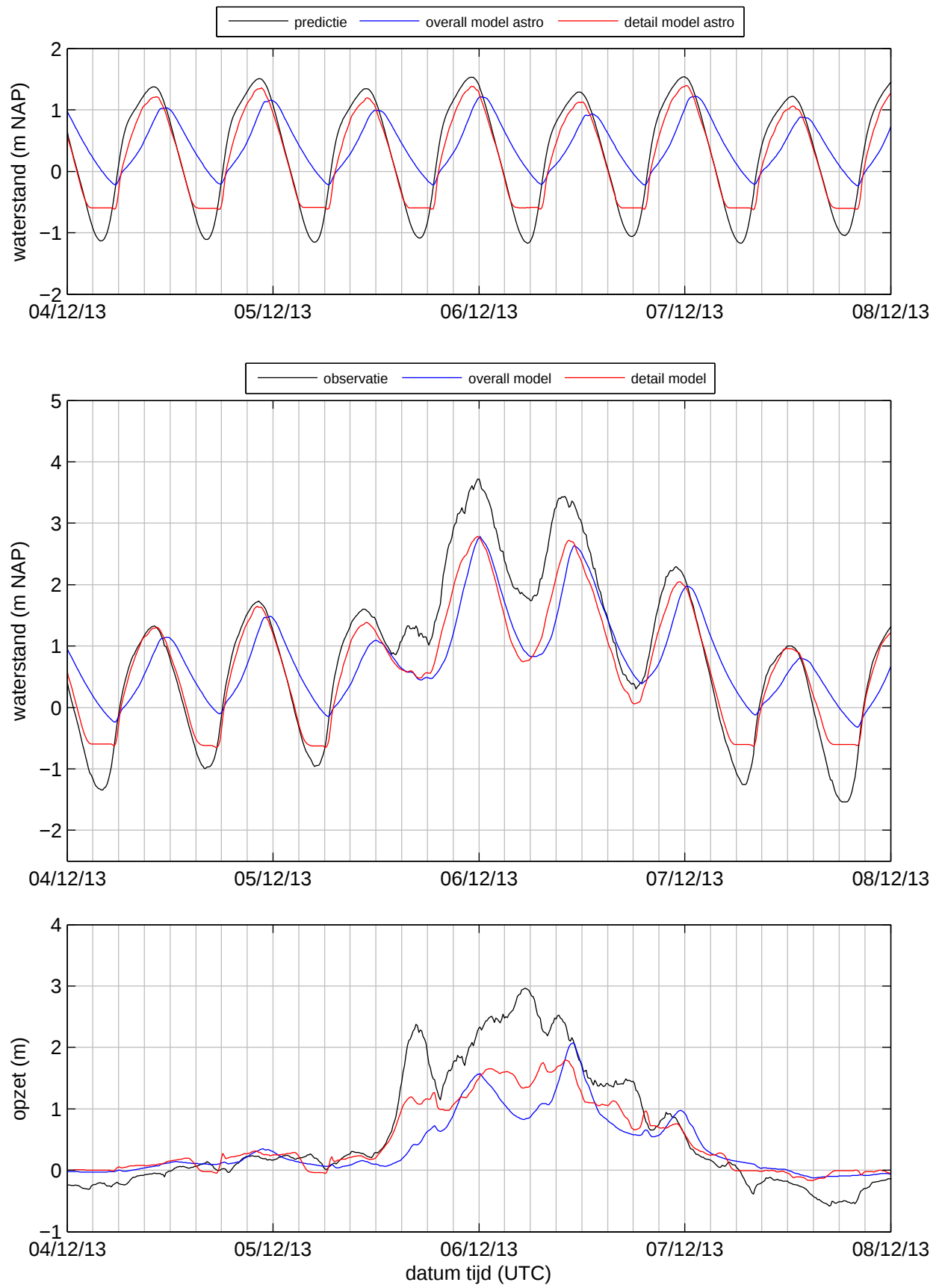
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.11

LAUWERSOOG



Vergelijking overall en detail model, station Lauwersoog, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

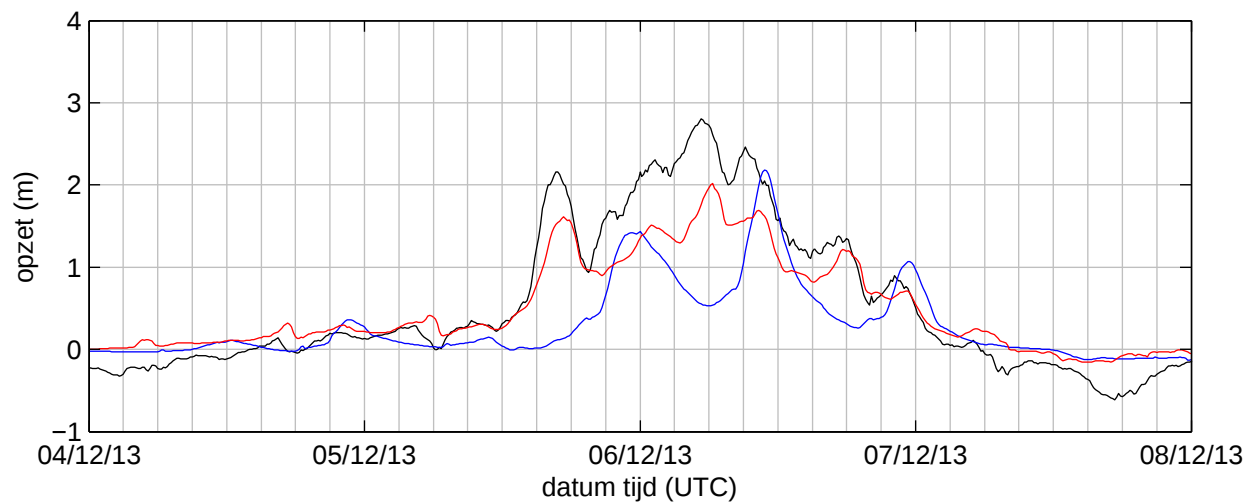
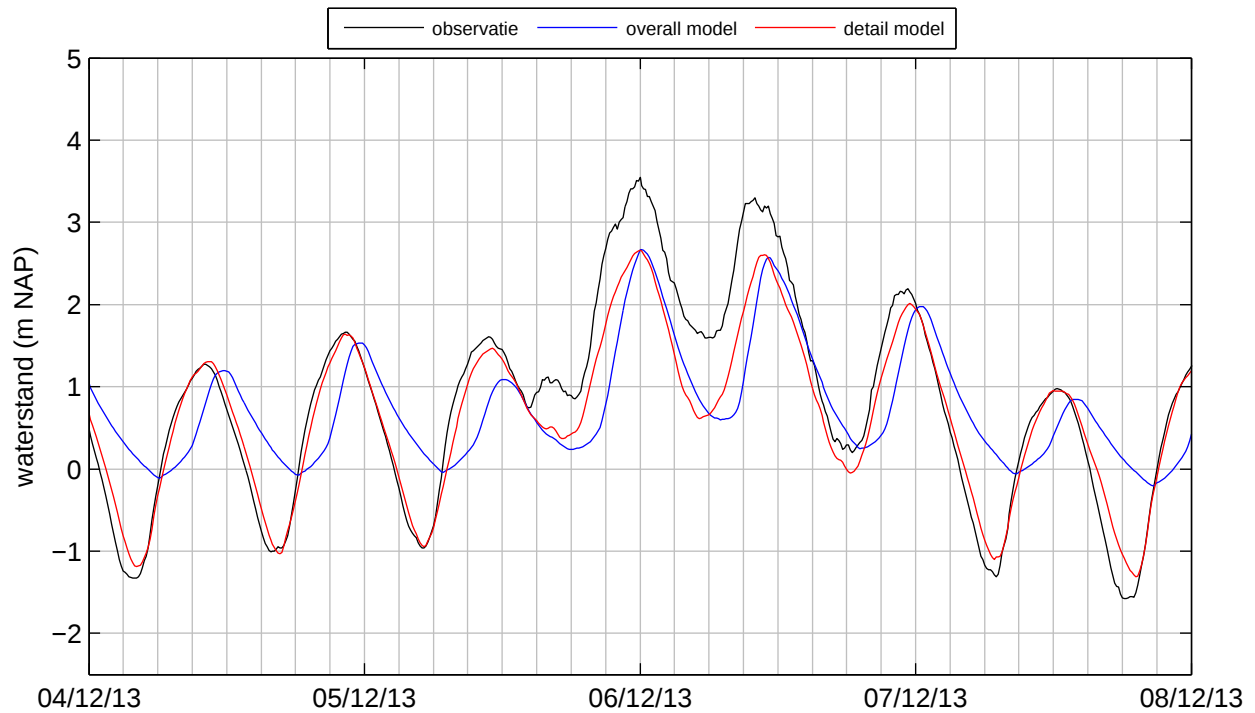
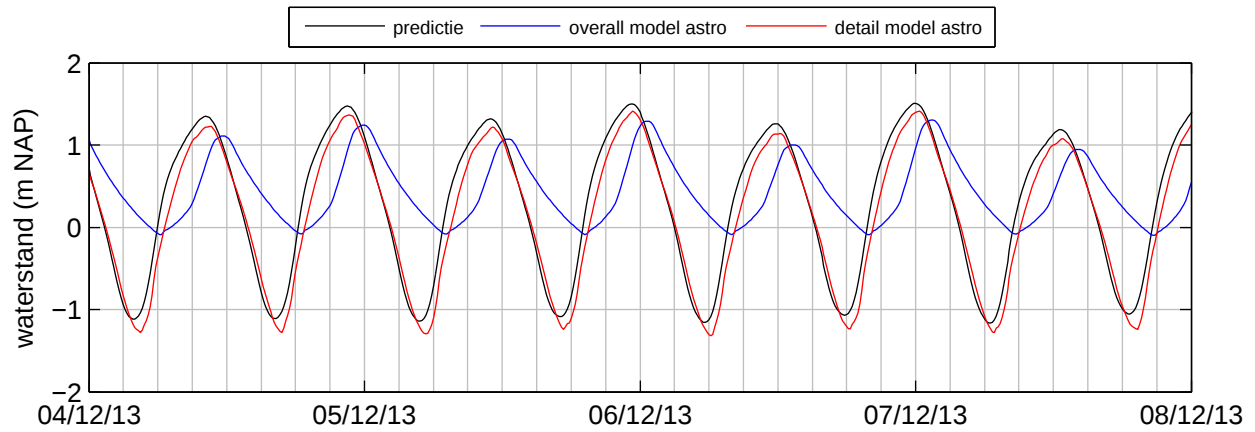
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.12

SCHIERMONNIKOOG



Vergelijking overall en detail model, station Schiermonnikoog, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

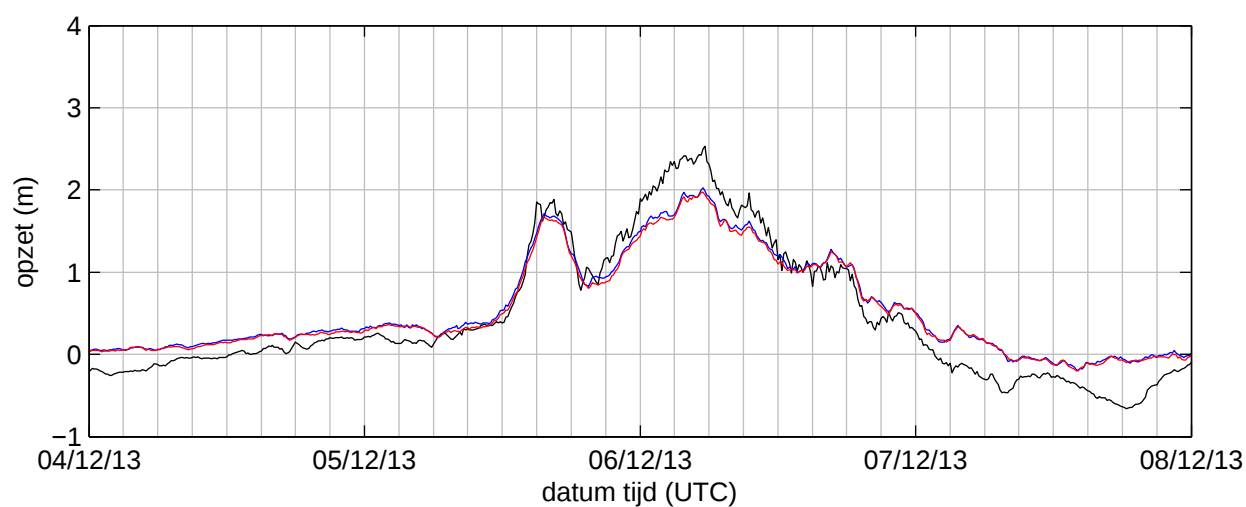
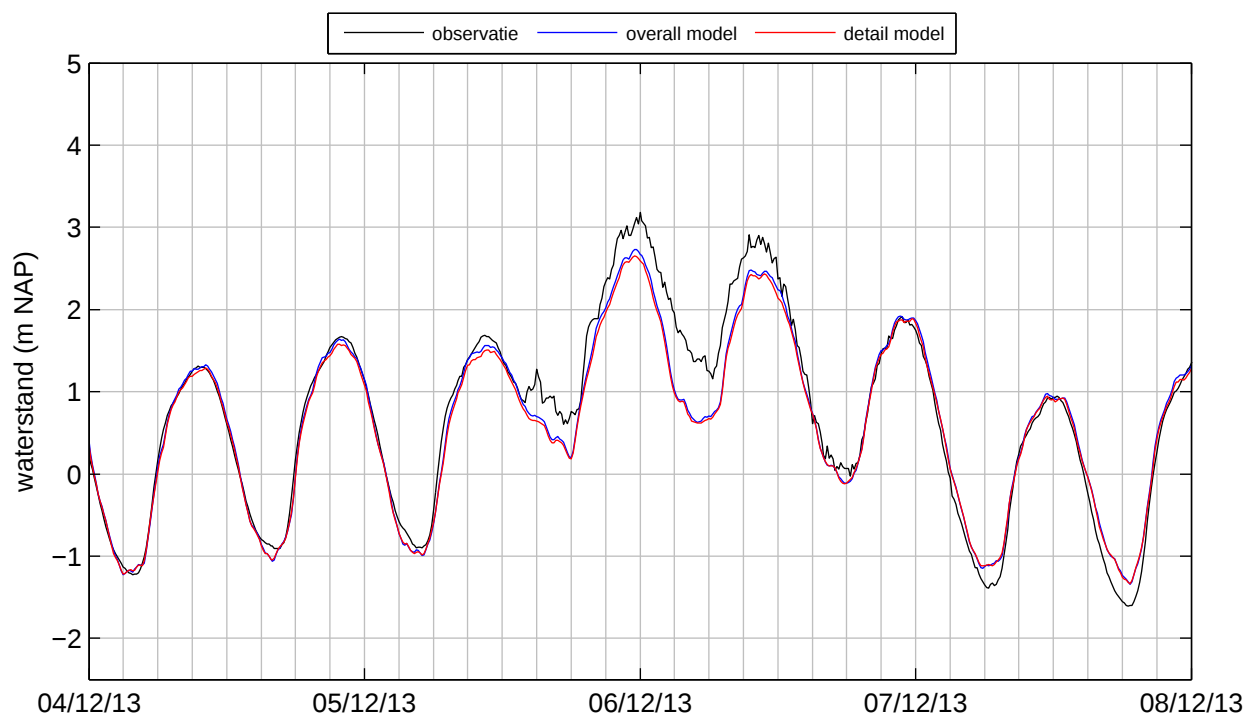
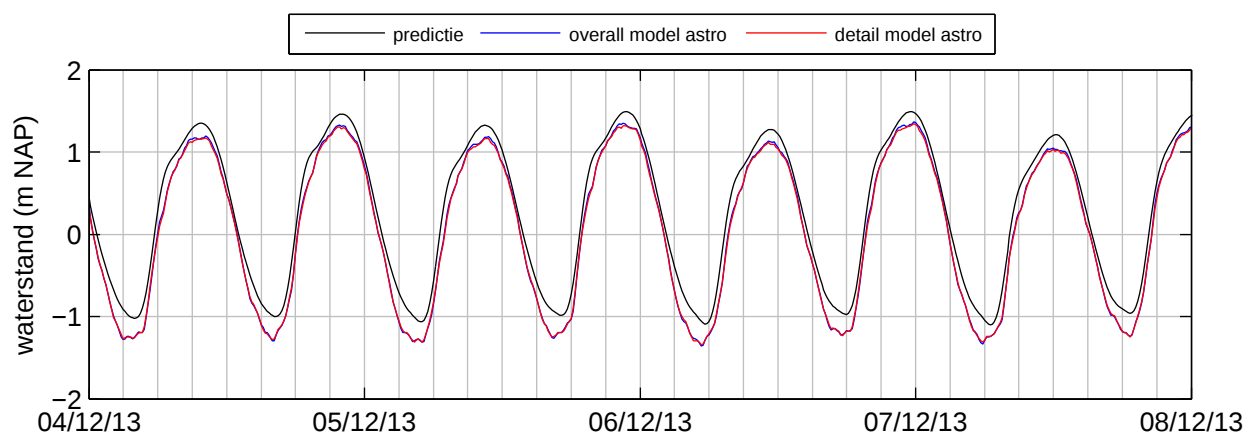
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.13

HUIBERTGAT



Vergelijking overall en detail model, station Huibertgat,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

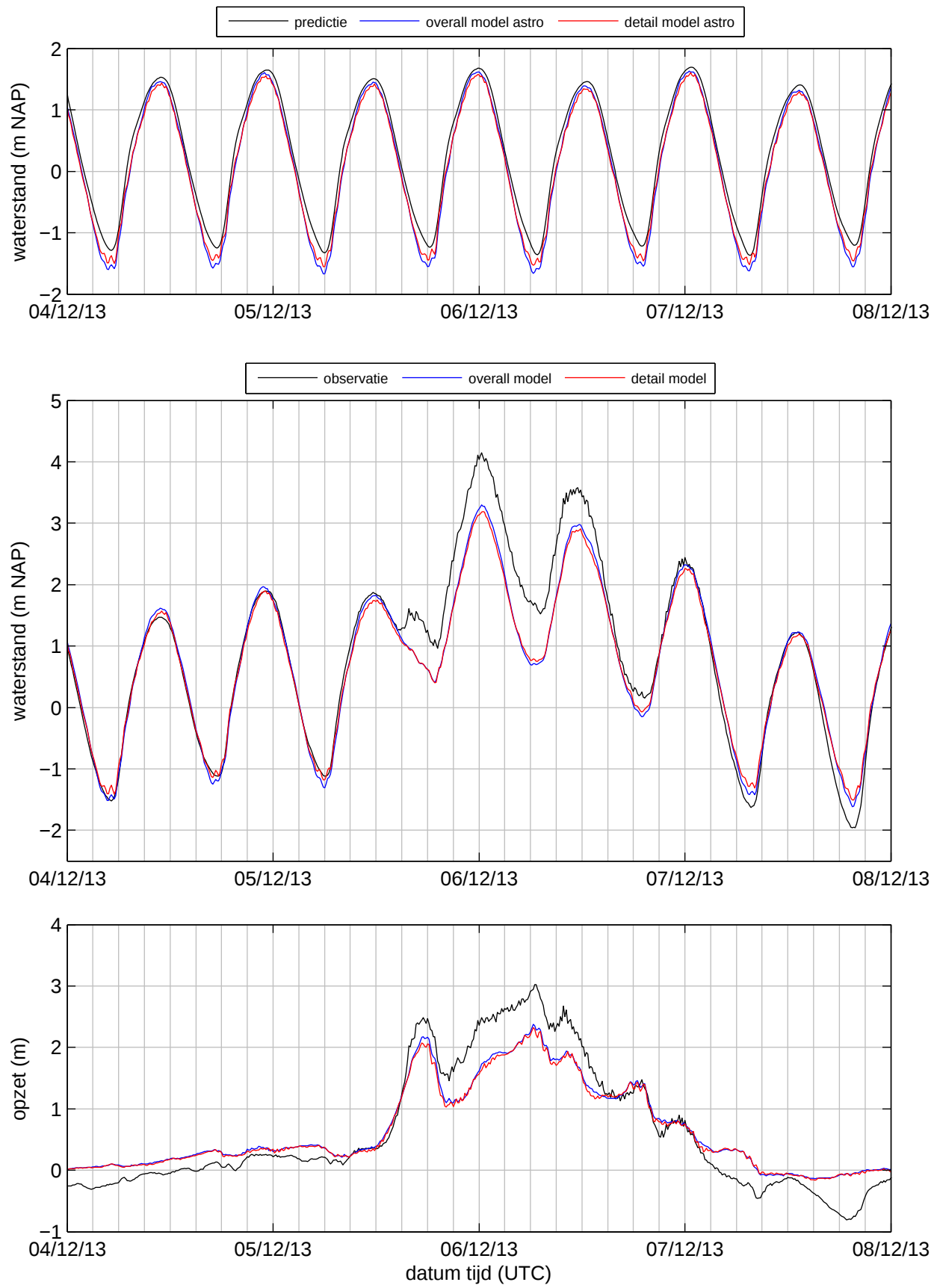
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

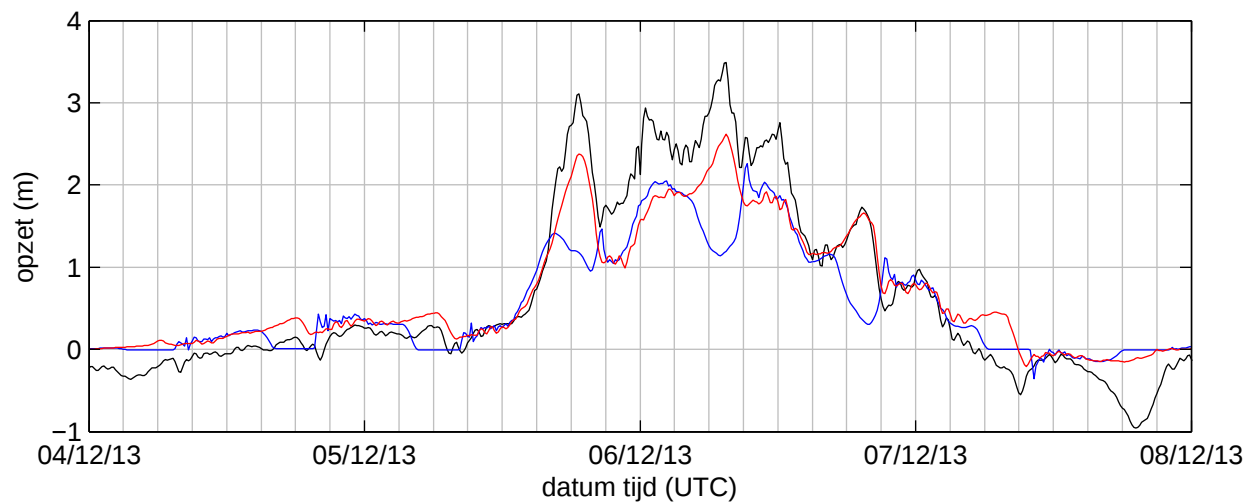
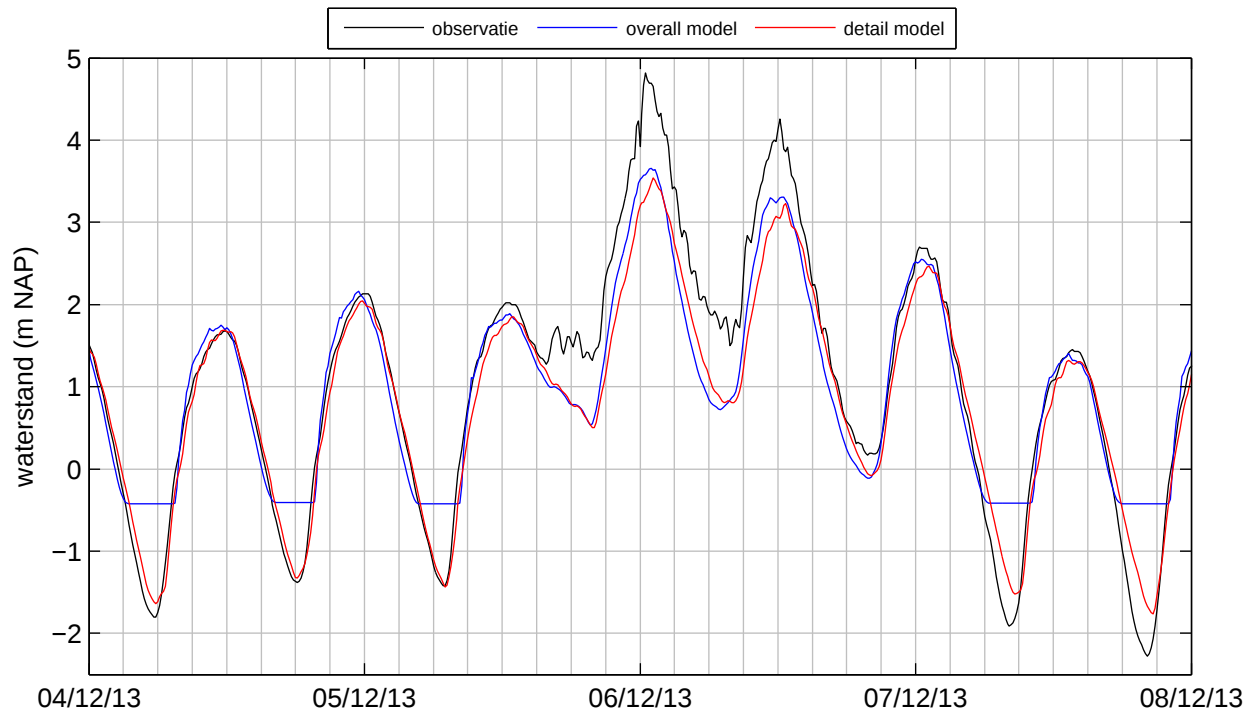
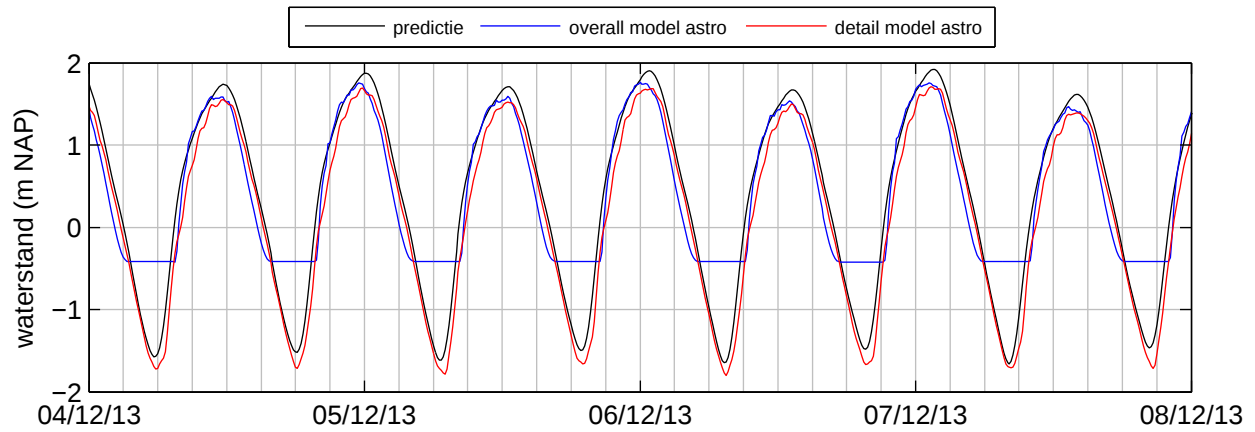
Fig. C.14

EEMSHAVEN



Vergelijking overall en detail model, station Eemshaven, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)	Cd-Zijlema	zonder golven
	overall versus detail model	
Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941	Fig. C.15

DELFIJL



Vergelijking overall en detail model, station Delfzijl,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

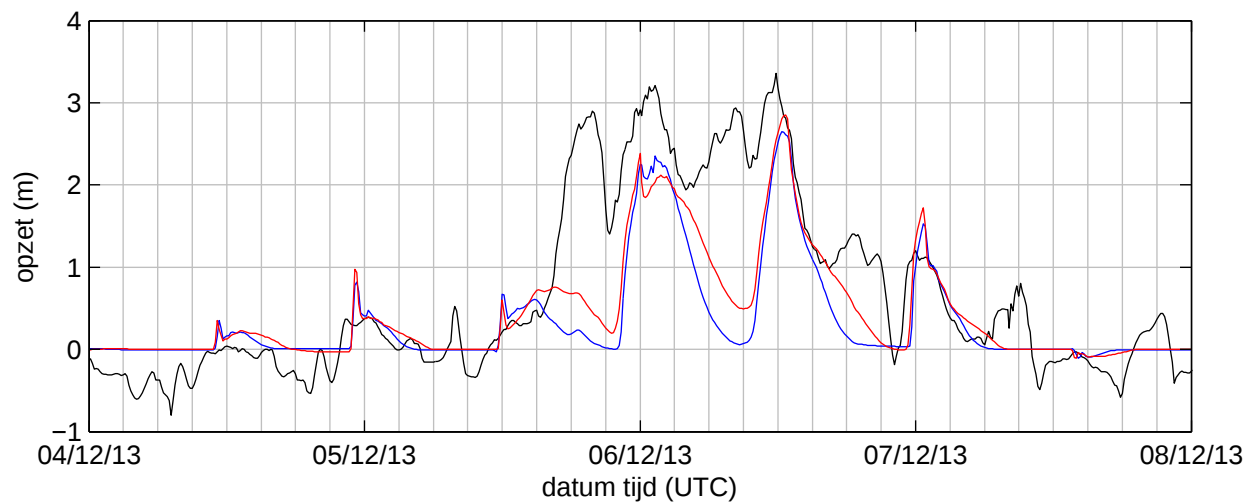
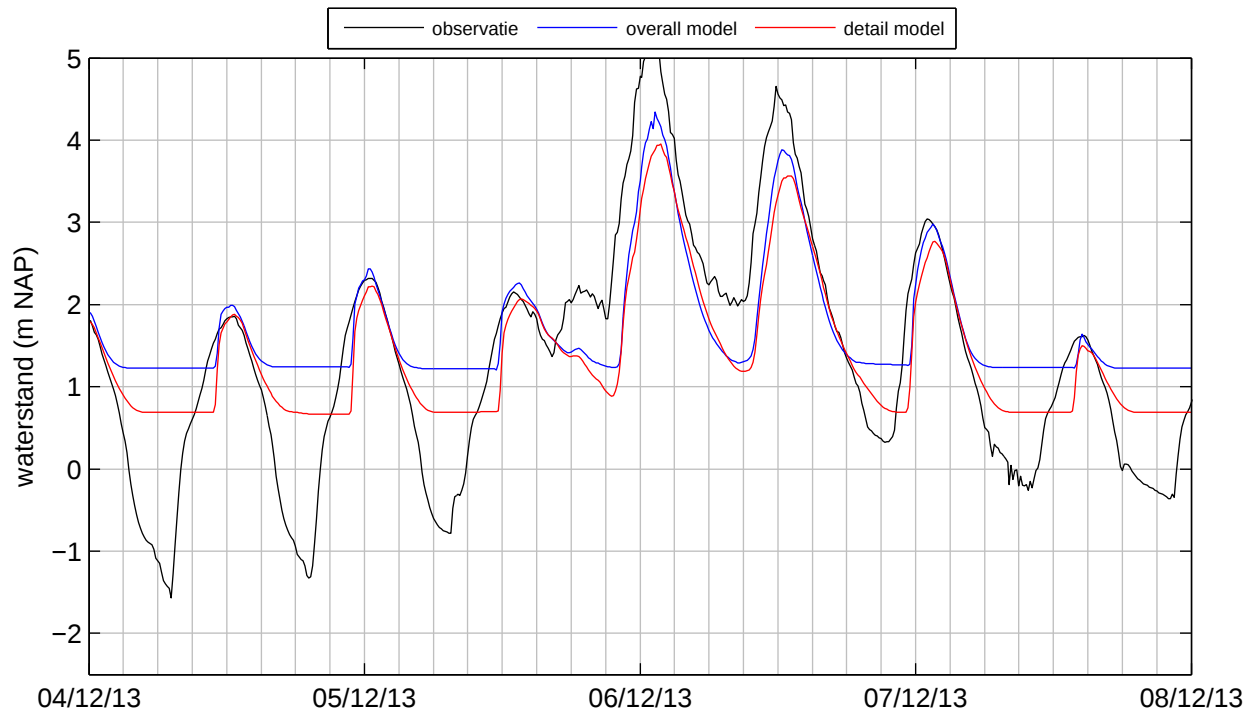
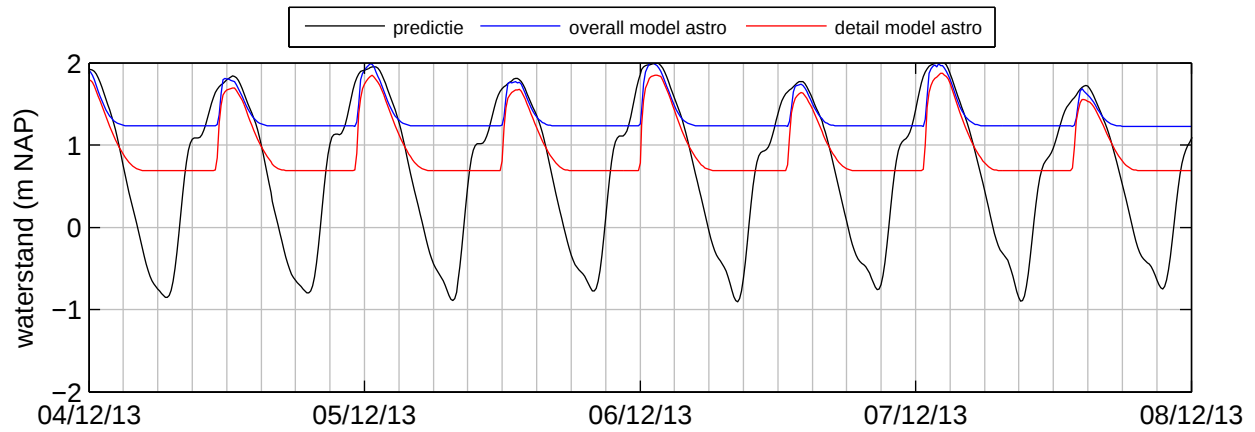
overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. C.16

NIEUWE STATENZIJL



Vergelijking overall en detail model, station Nieuwe Statenzijl, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

overall versus detail model

Rekenexperiment Waddenzee

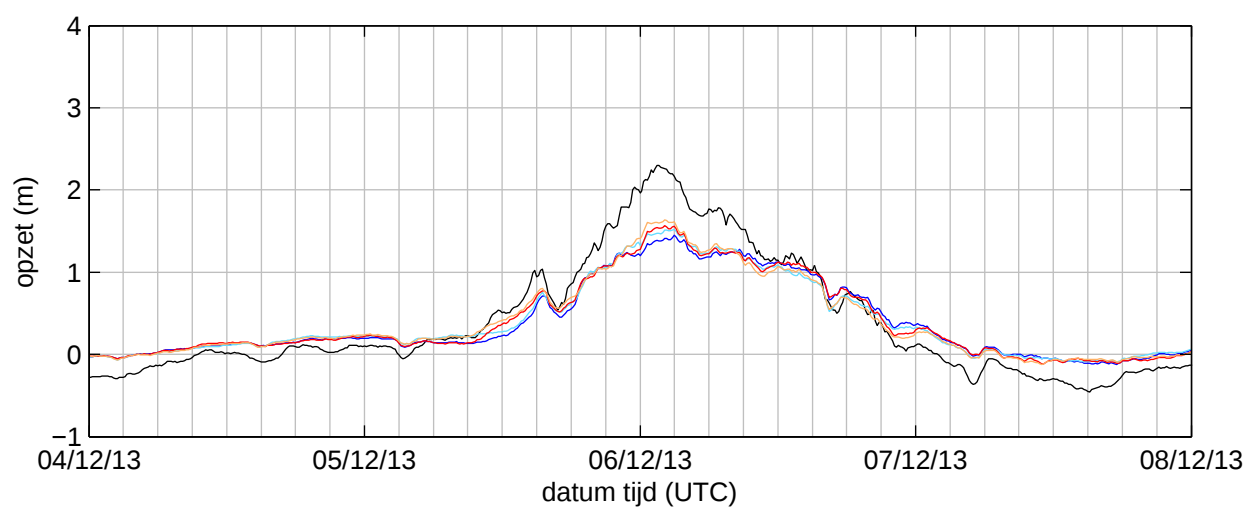
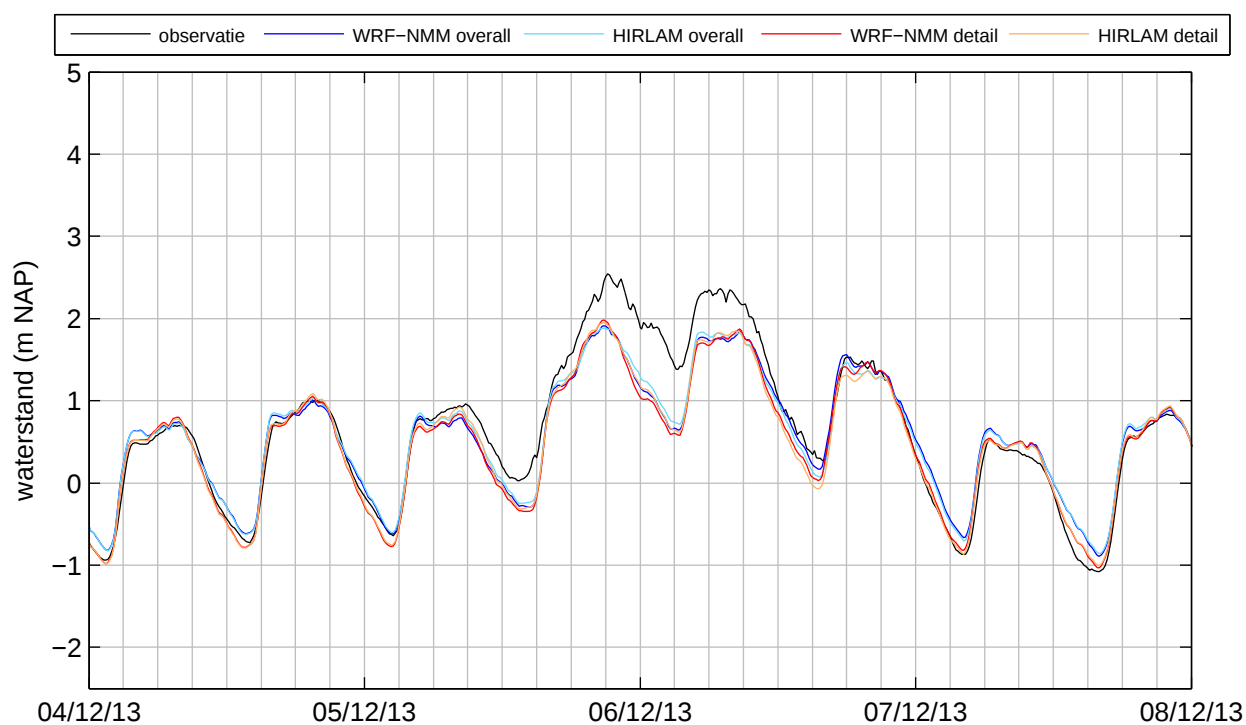
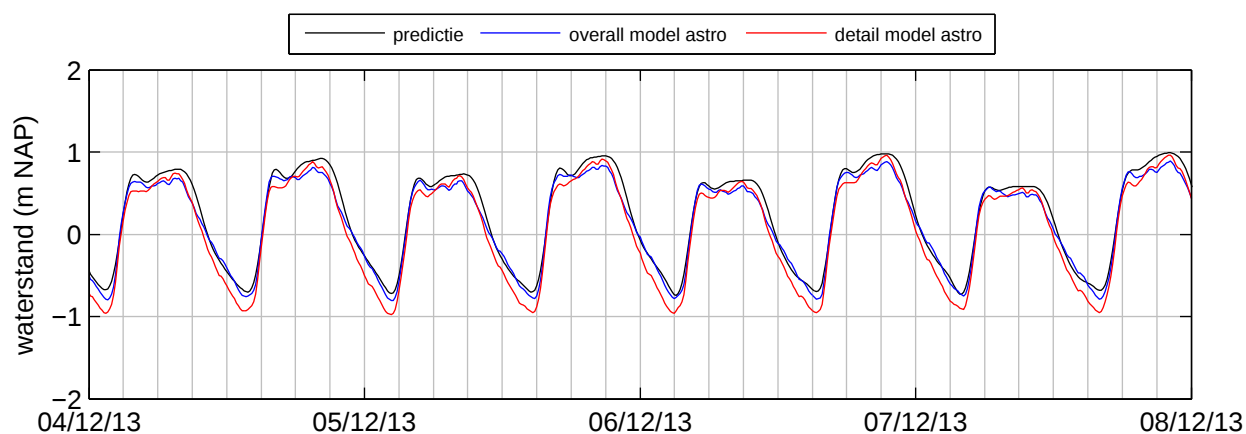
C03041.001941

Fig. C.17

Bijlage D

Gevoeligheid waterstanden voor atmosferisch model

DEN HELDER



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Den Helder,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

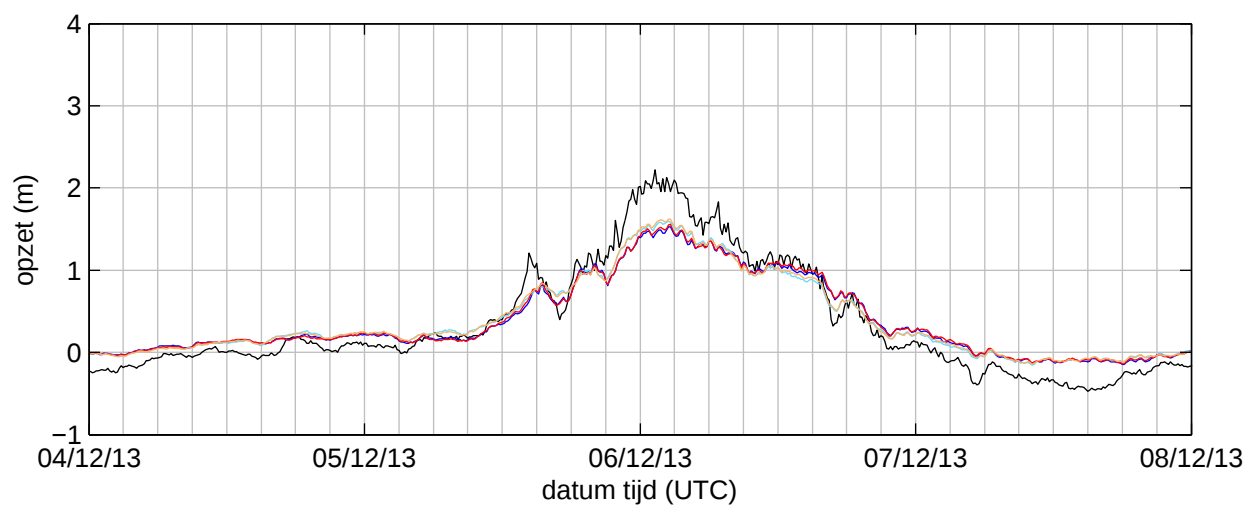
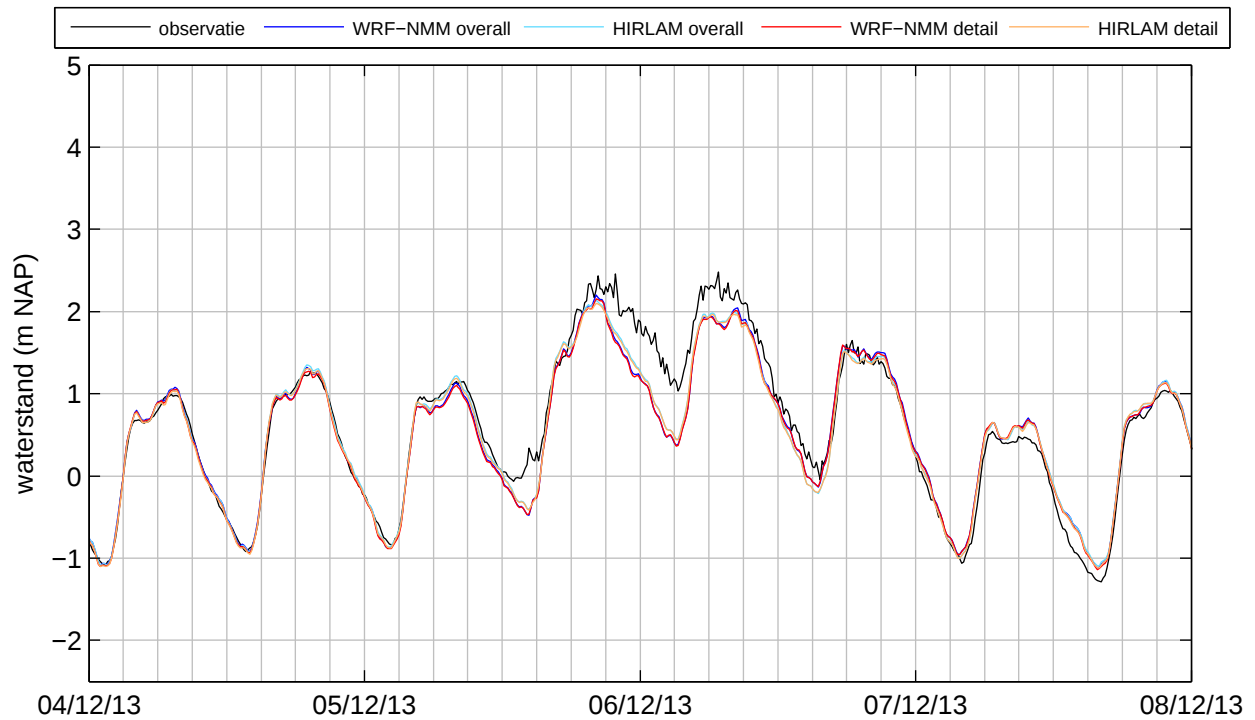
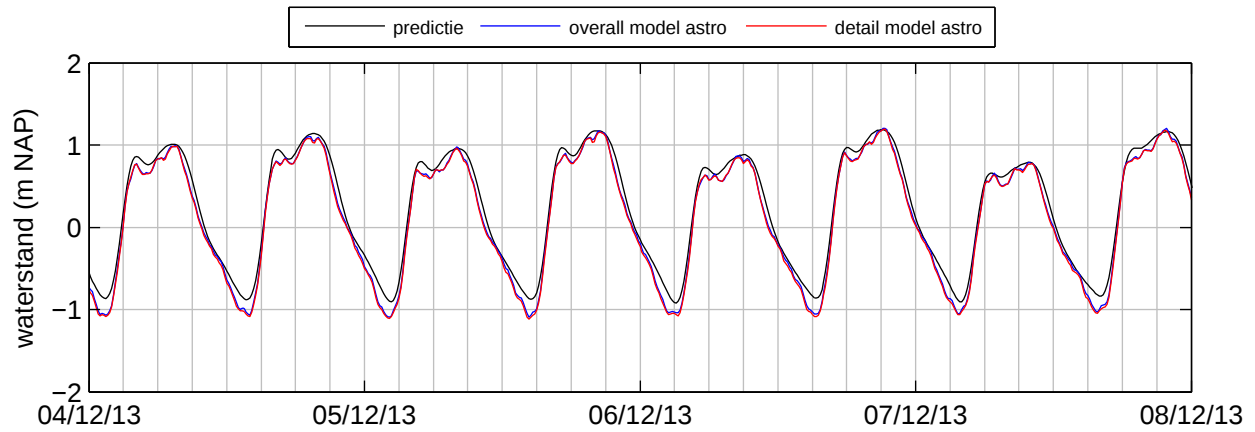
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.1

TEXEL NOORDZEE



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Texel Noordzee, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

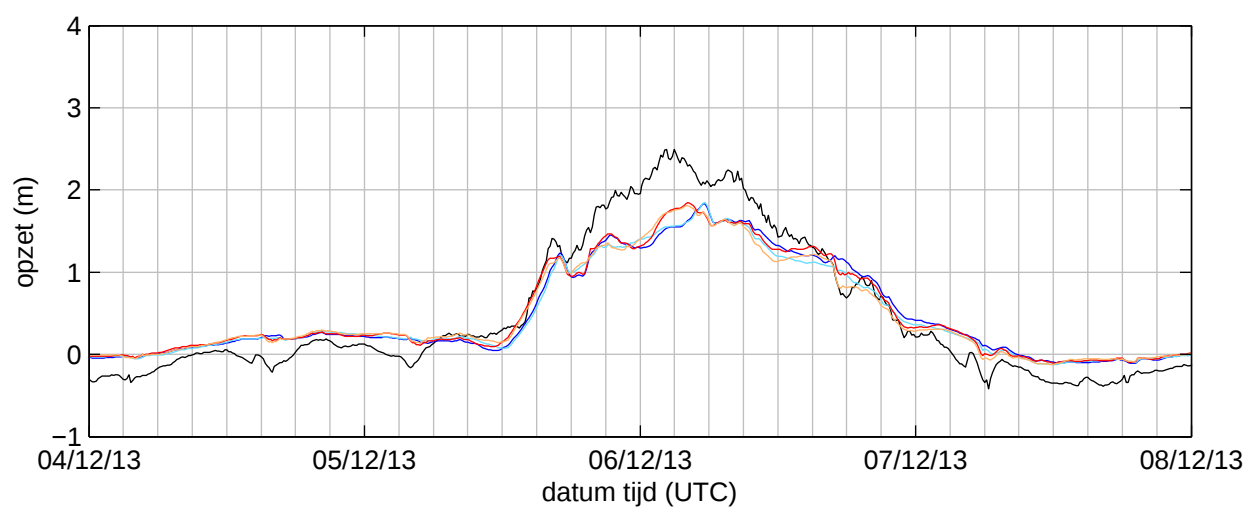
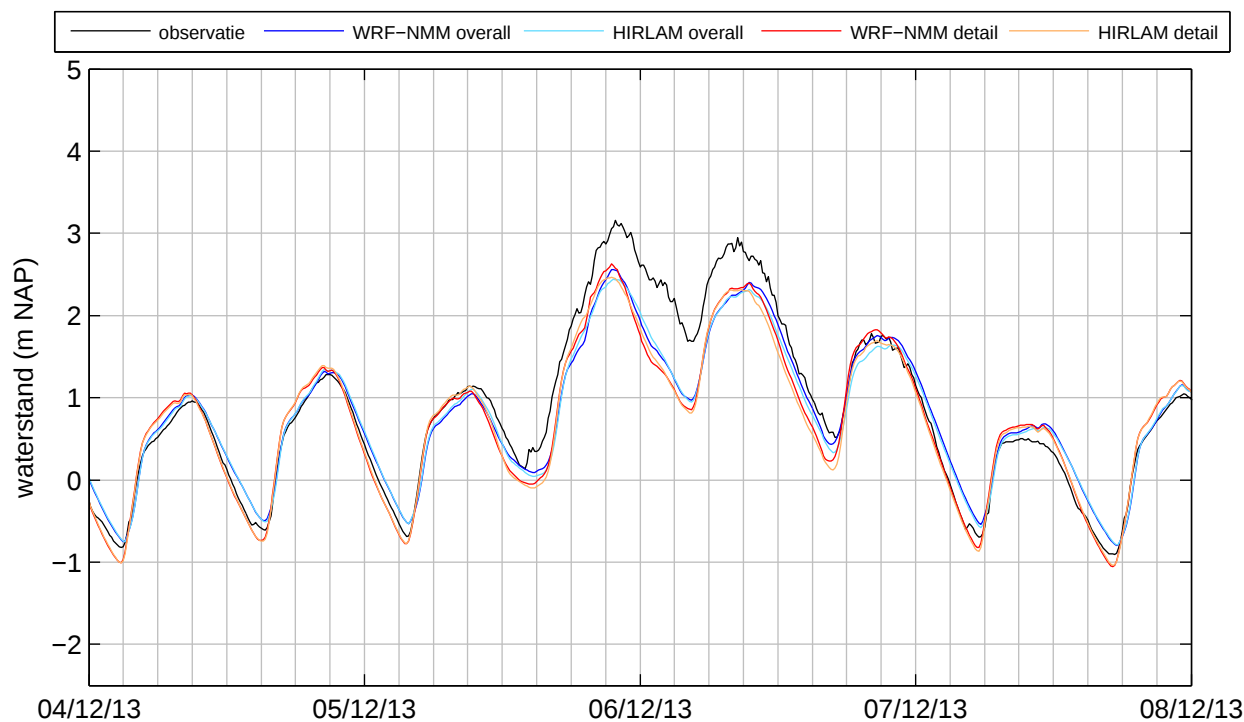
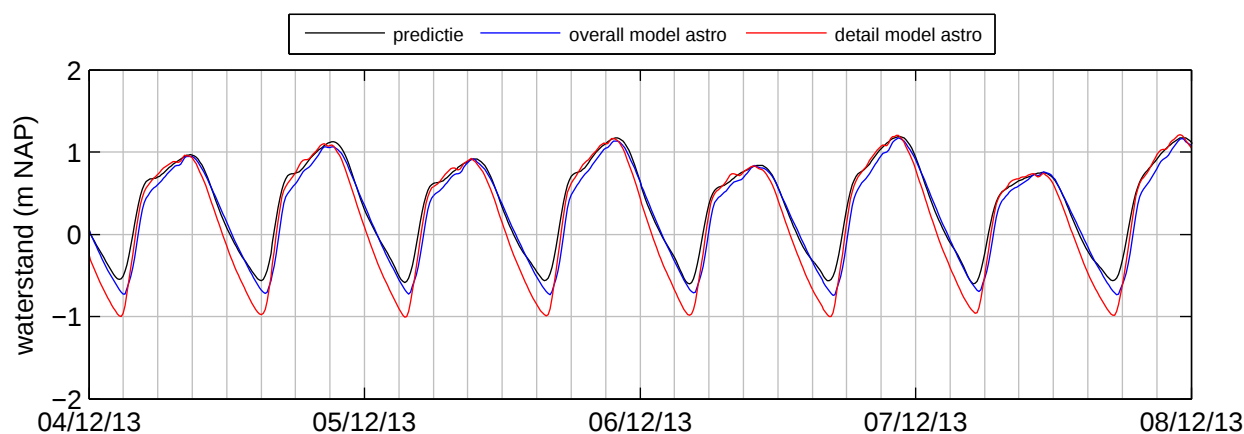
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.2

DEN OEVER BUITEN



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Den Oever buiten,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

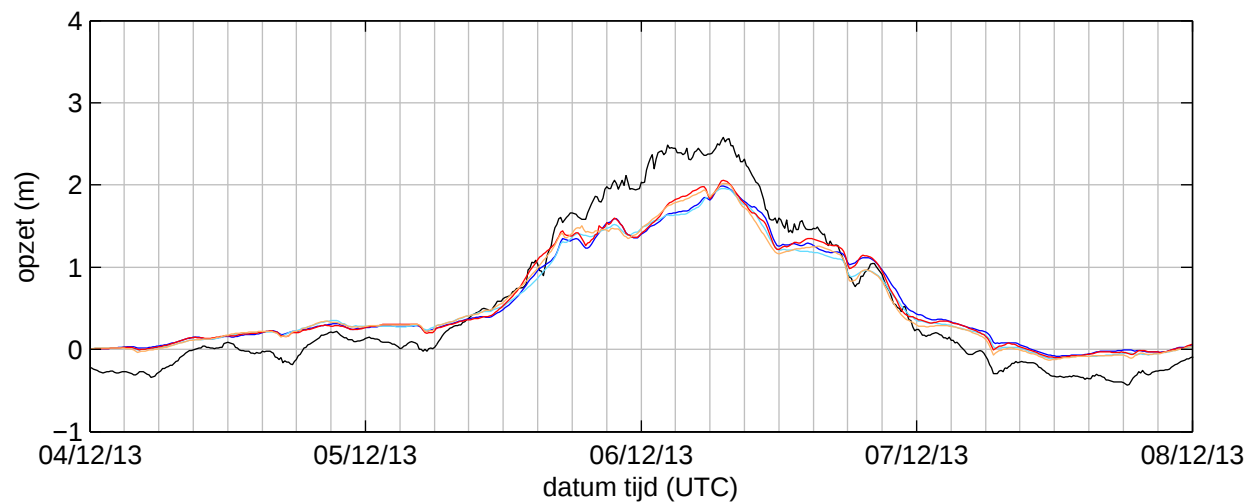
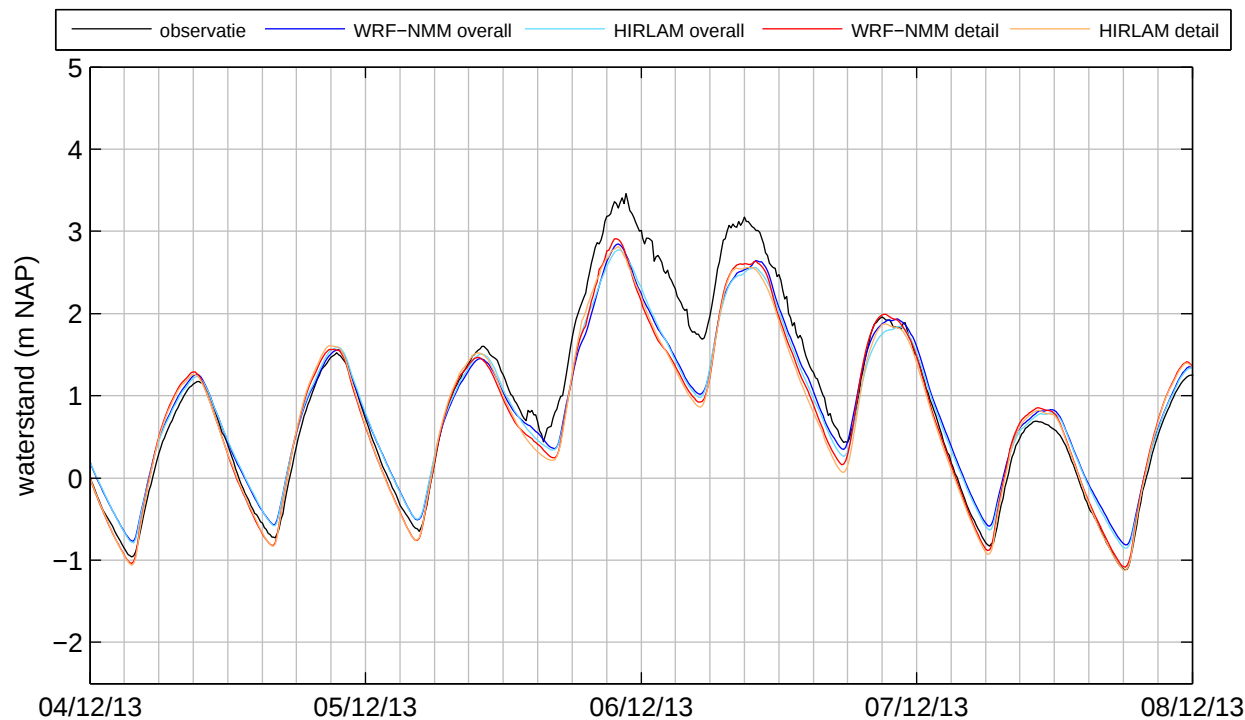
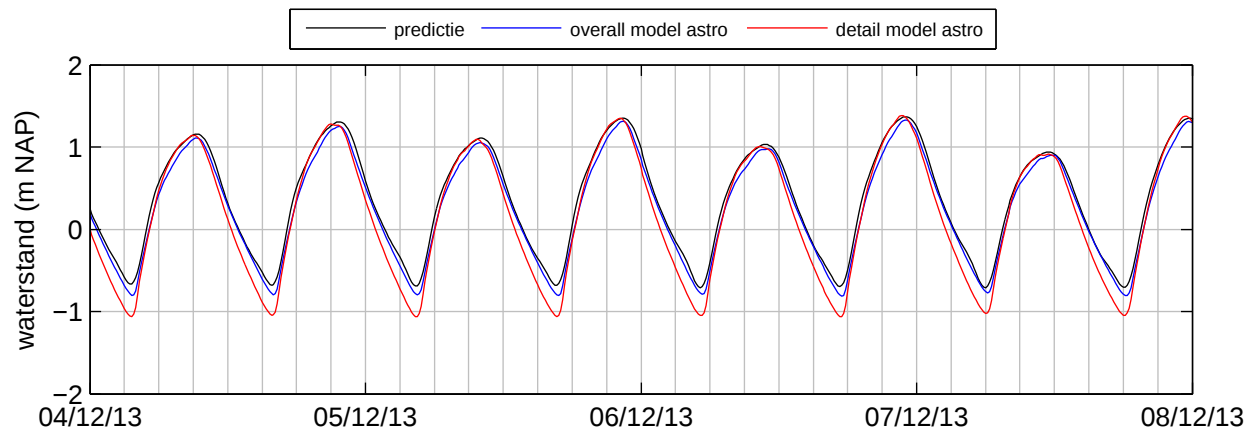
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.3

KORNWERDERZAND BUI



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Kornwerderzand bui,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

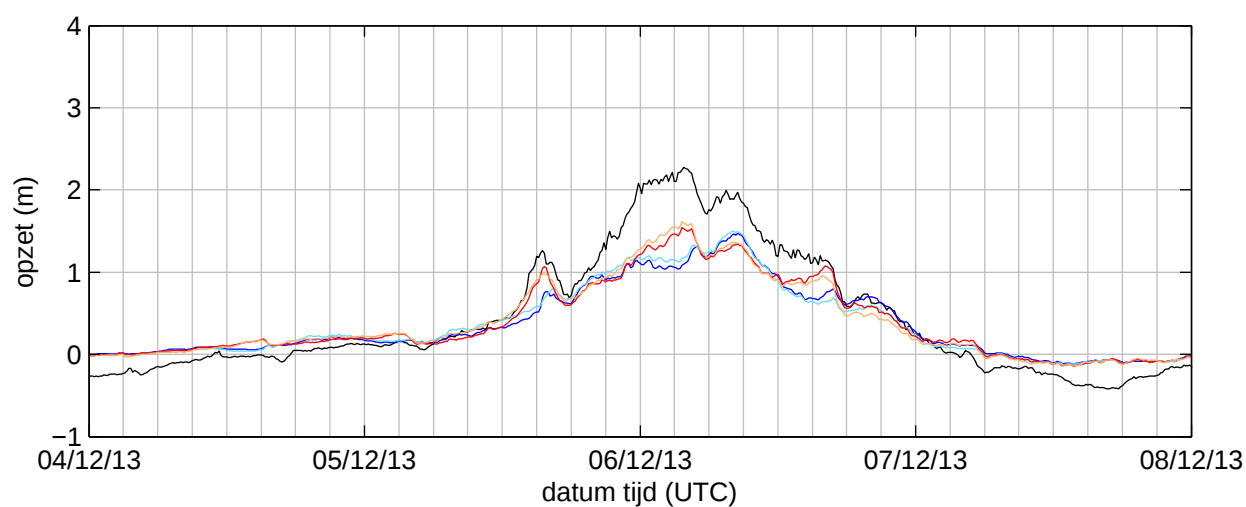
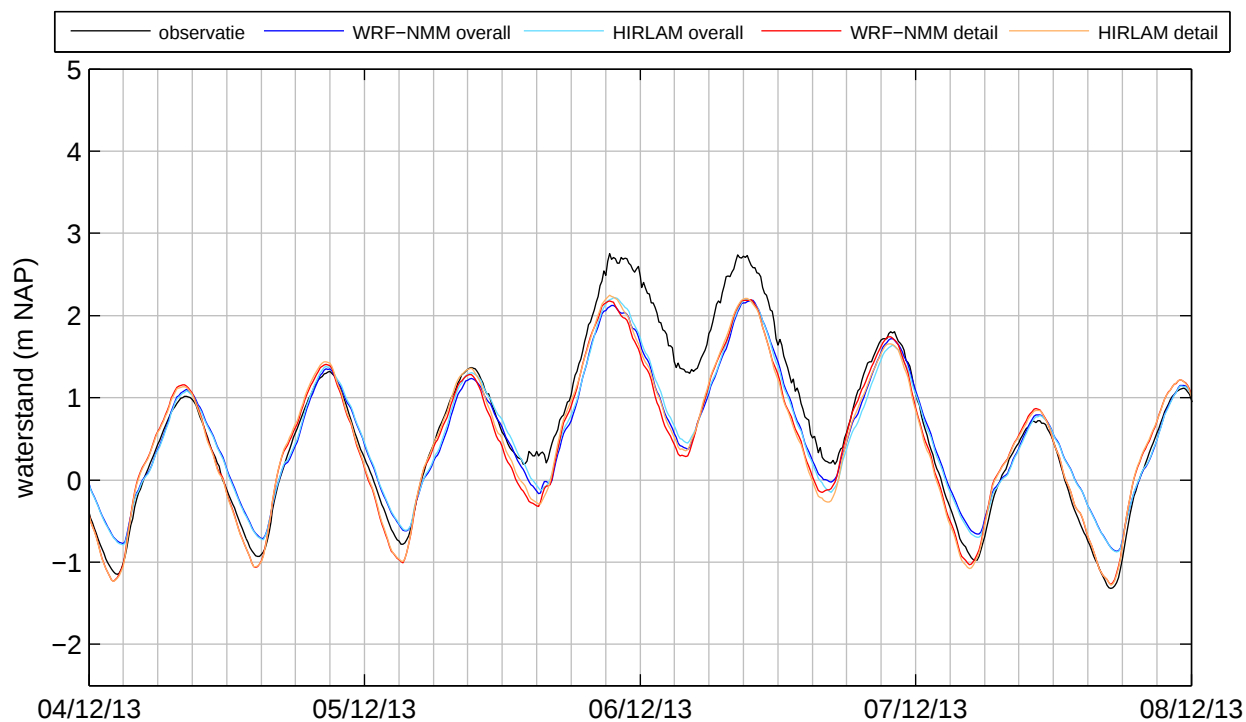
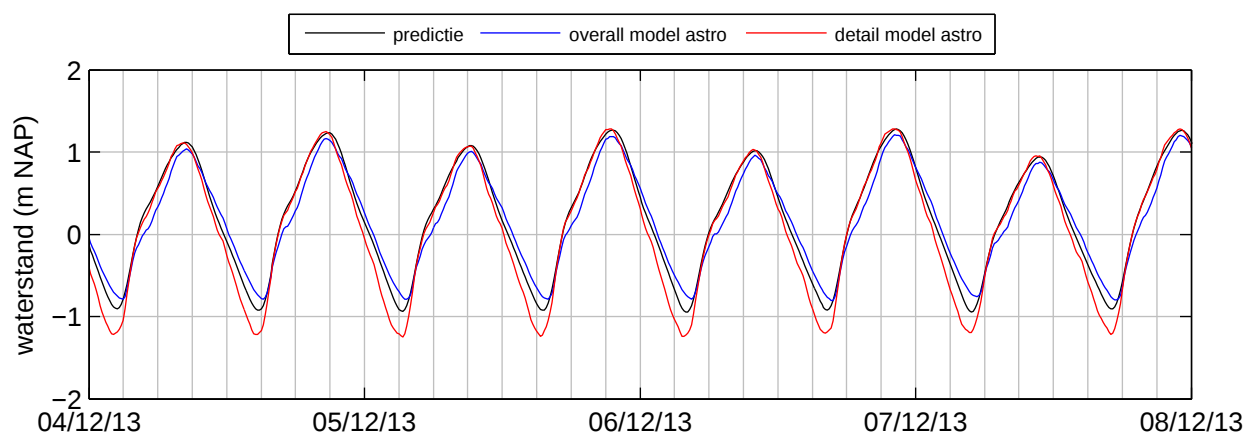
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.4

VLIELAND HAVEN



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Vlieland haven,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

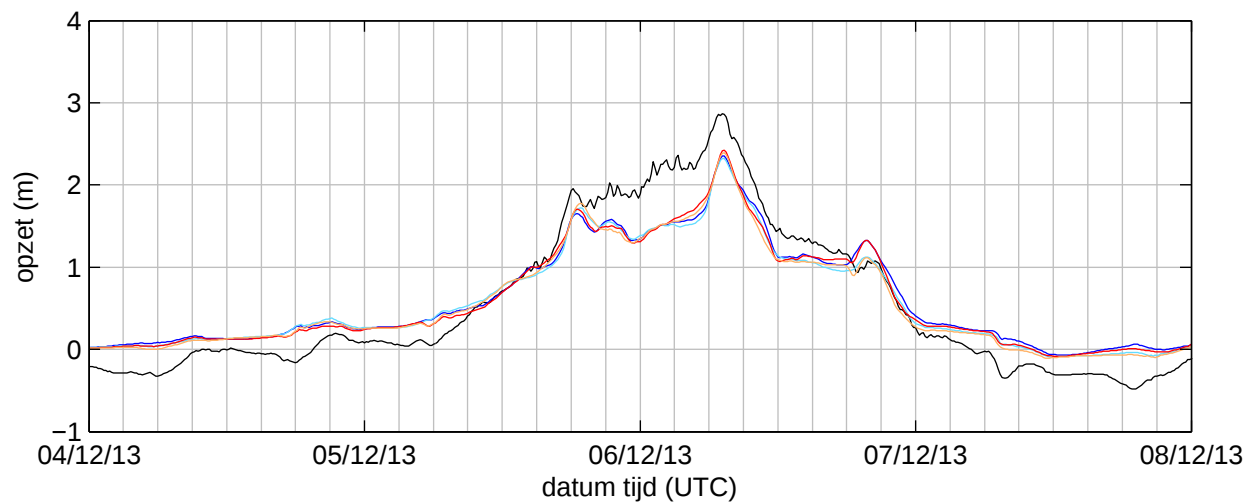
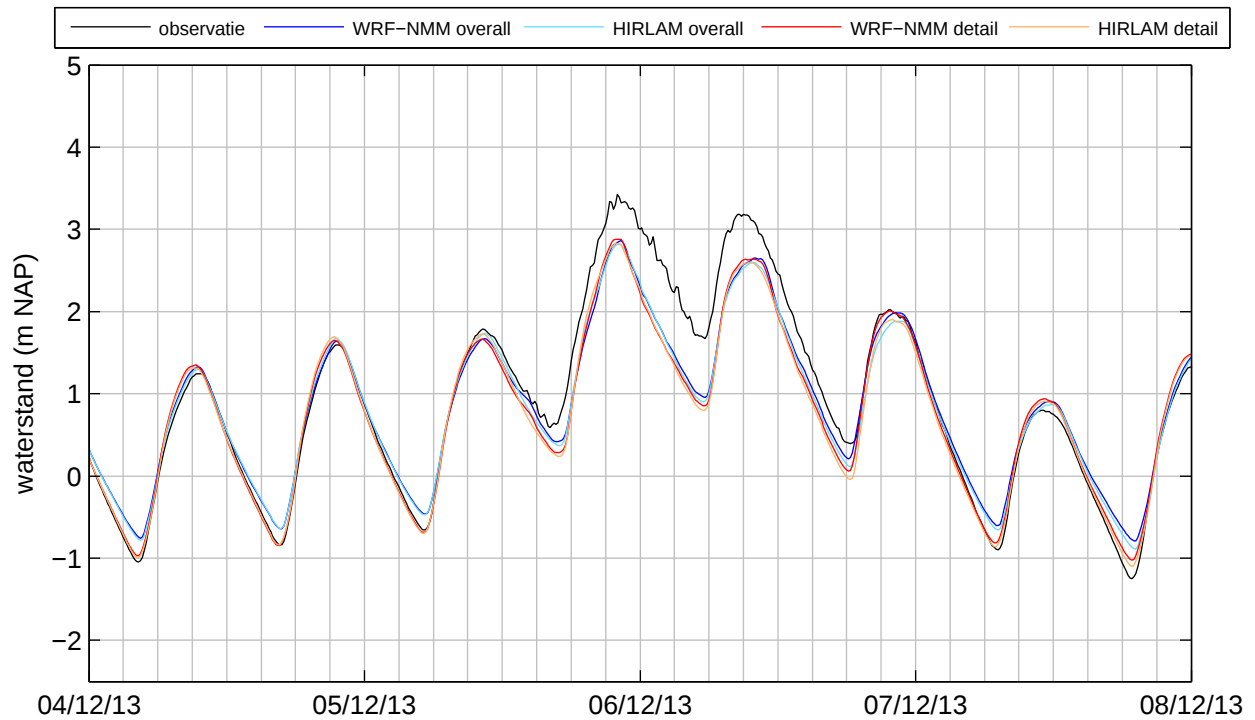
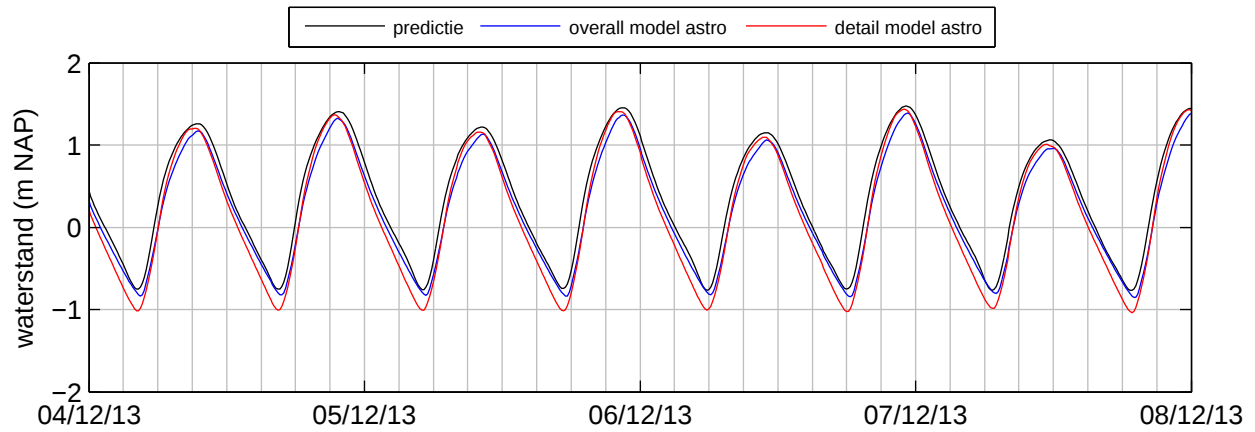
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.5

HARLINGEN



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Harlingen,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

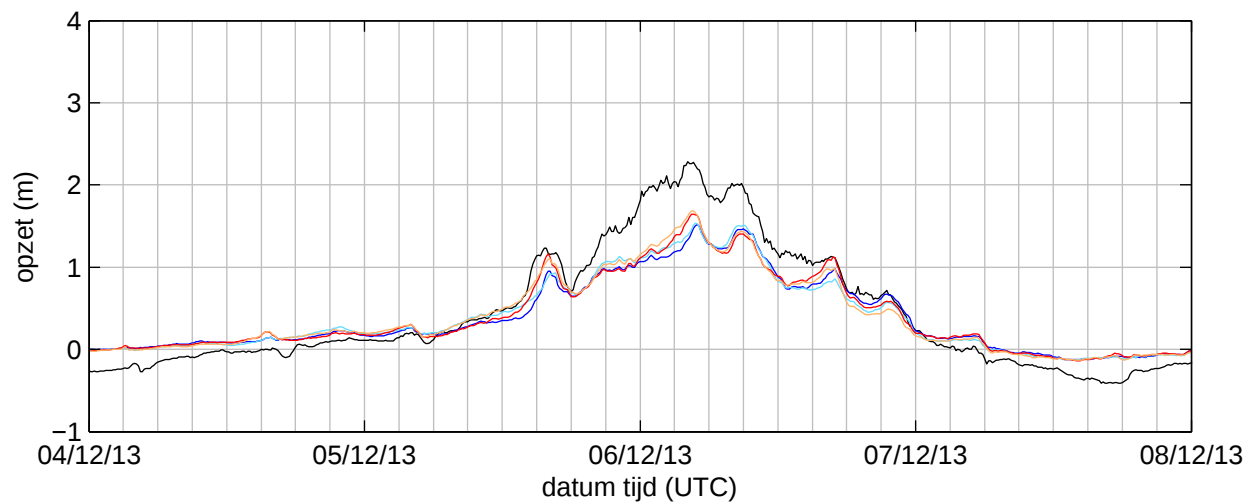
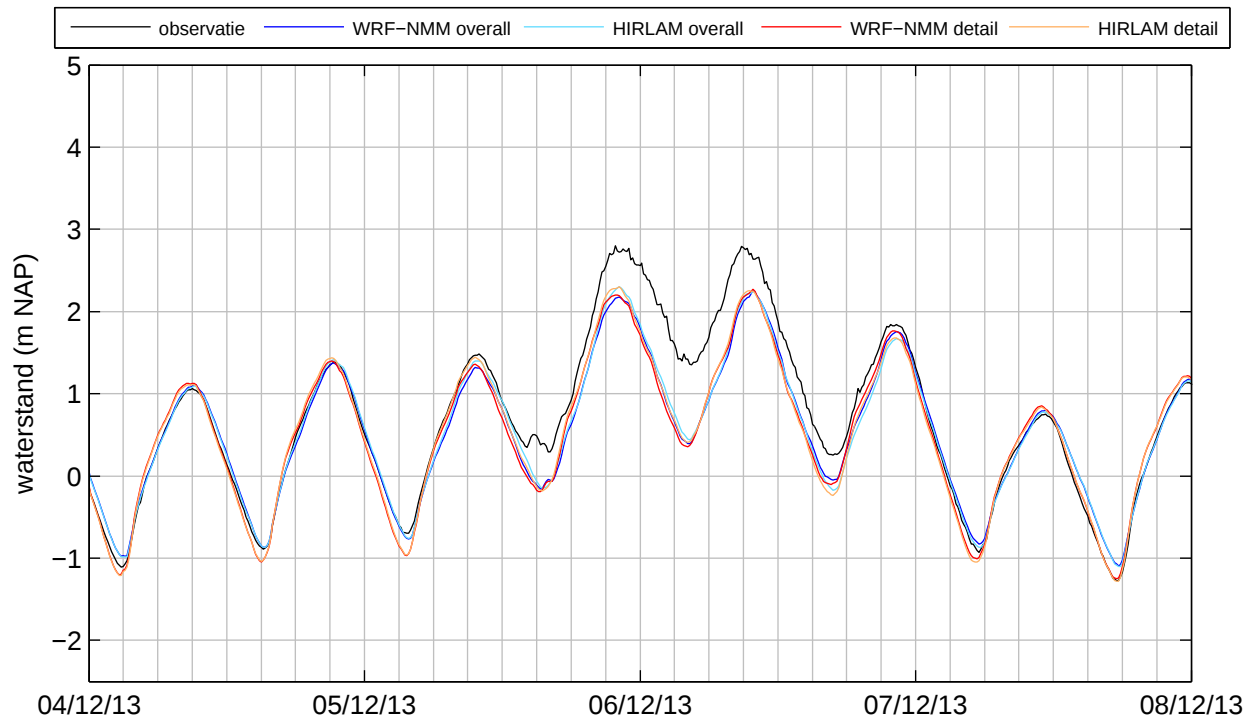
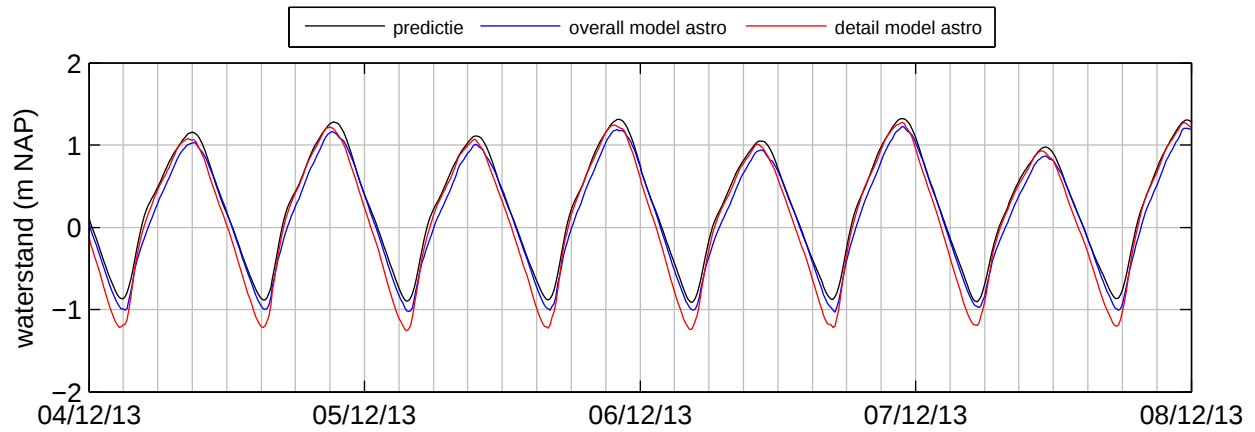
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.6

WEST-TERSCHELLING



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station West-Terschelling,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

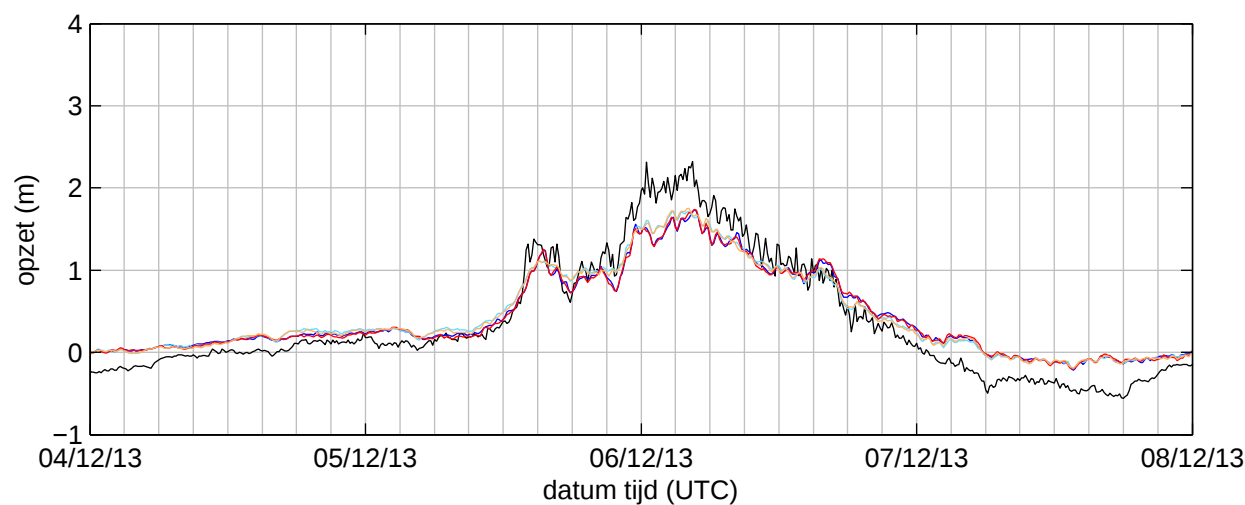
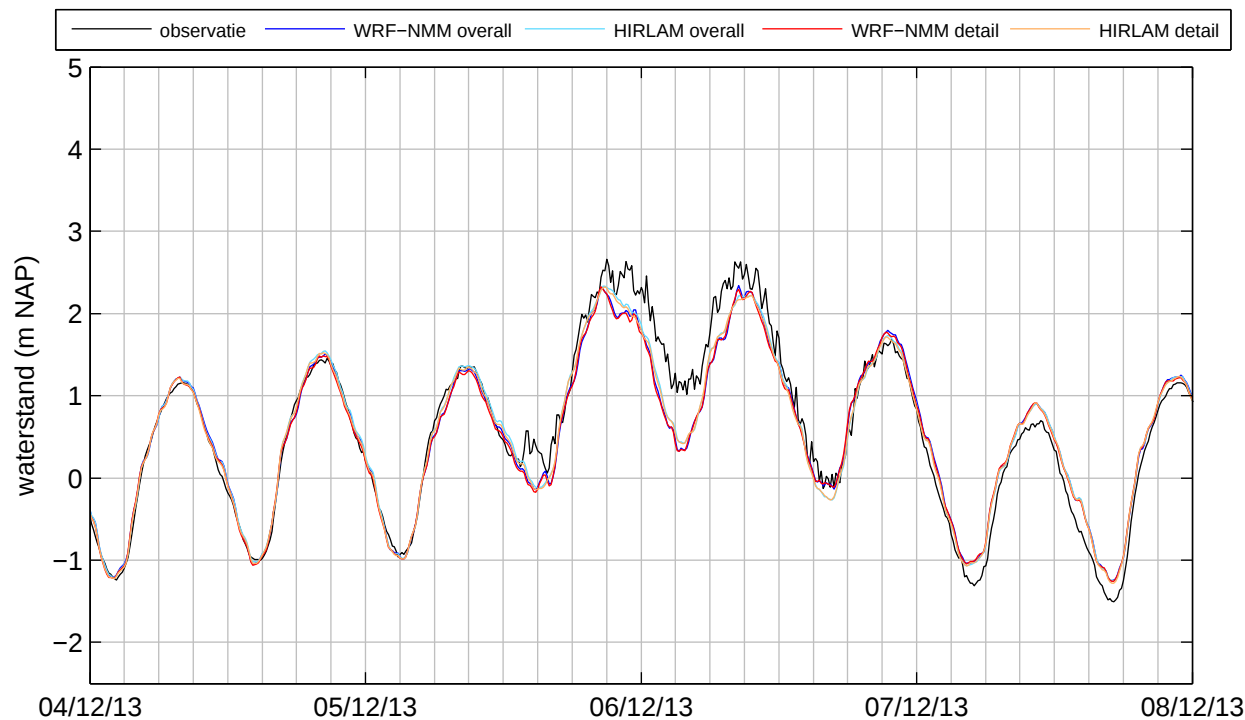
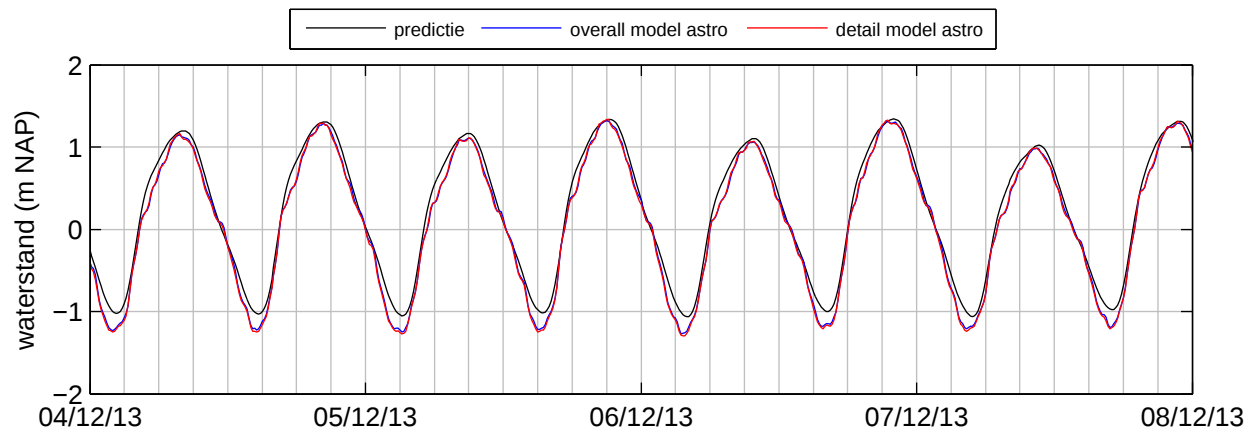
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.7

TERSCHELLING NRDZ



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Terschelling Nrdz, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

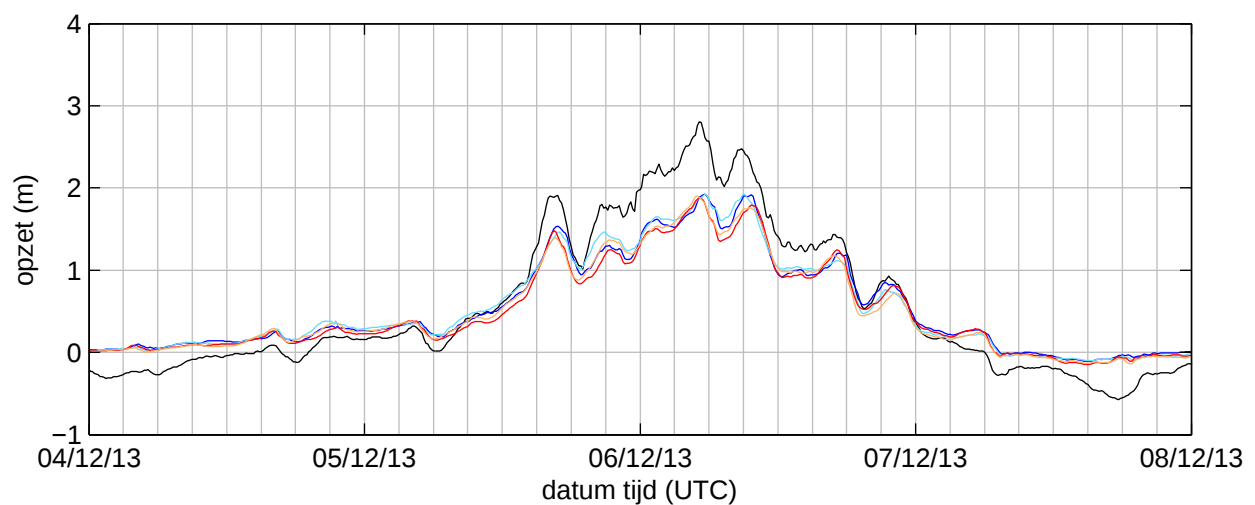
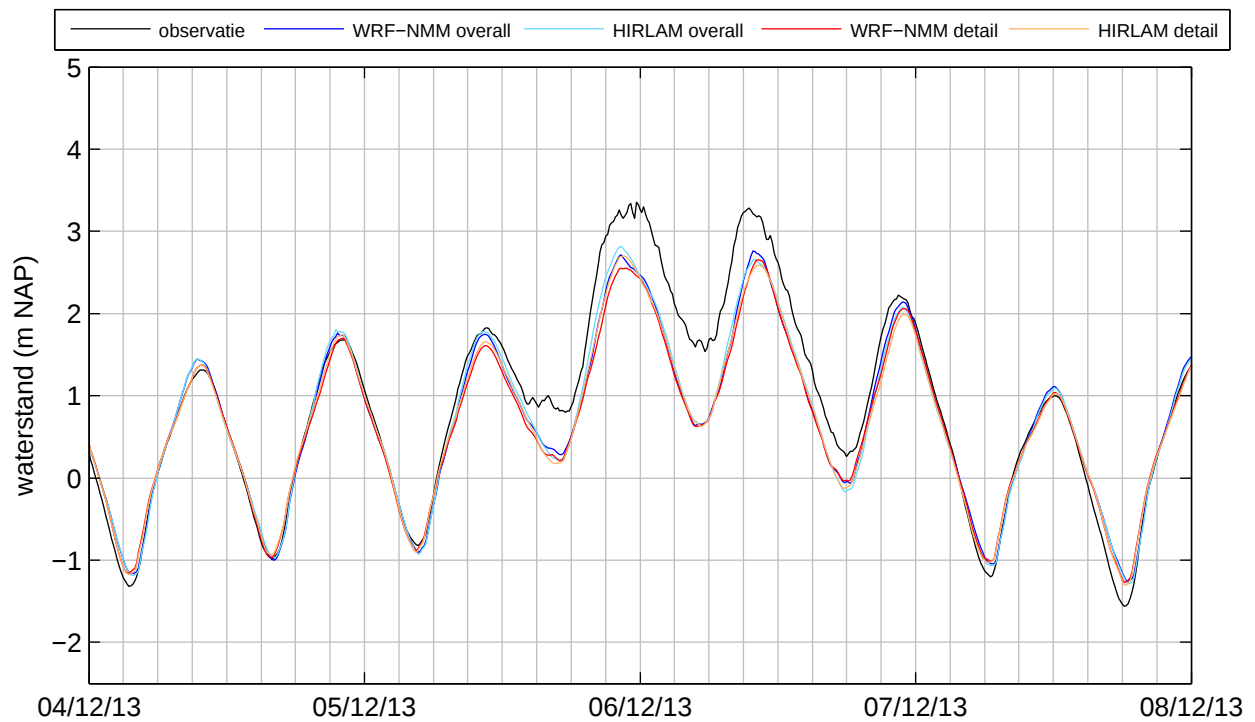
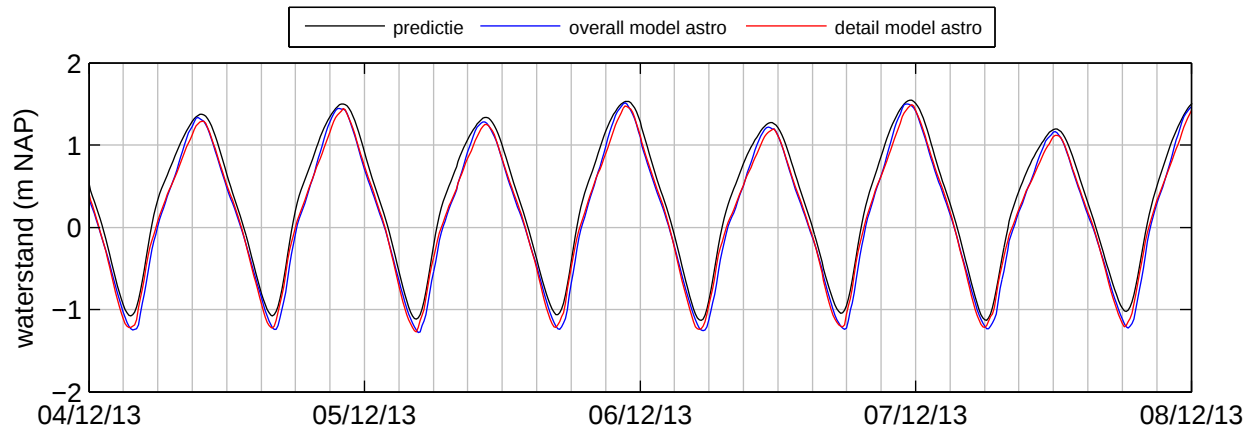
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.8

NES



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Nes,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

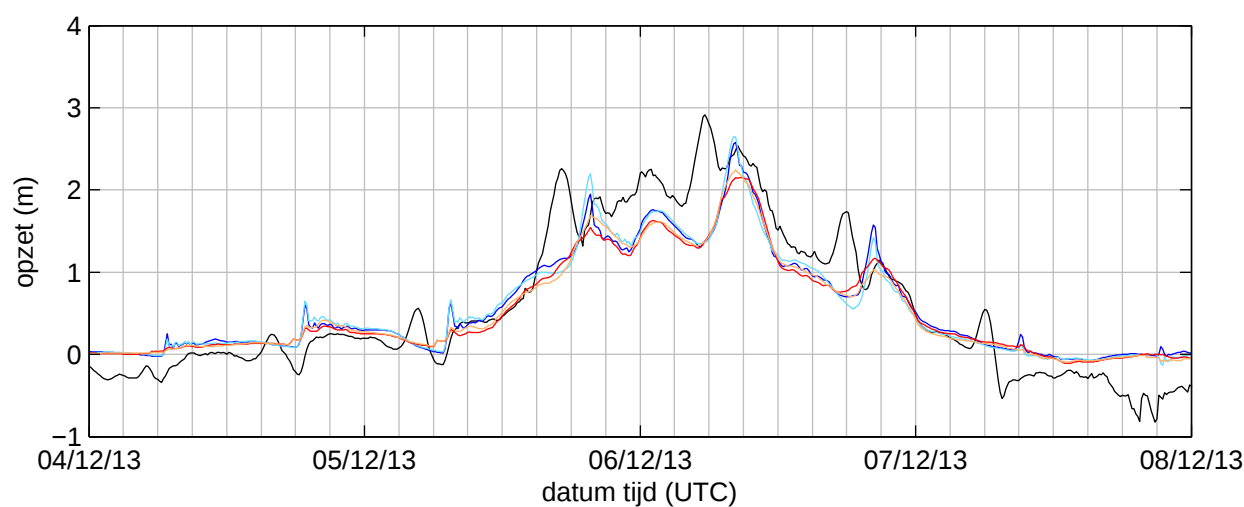
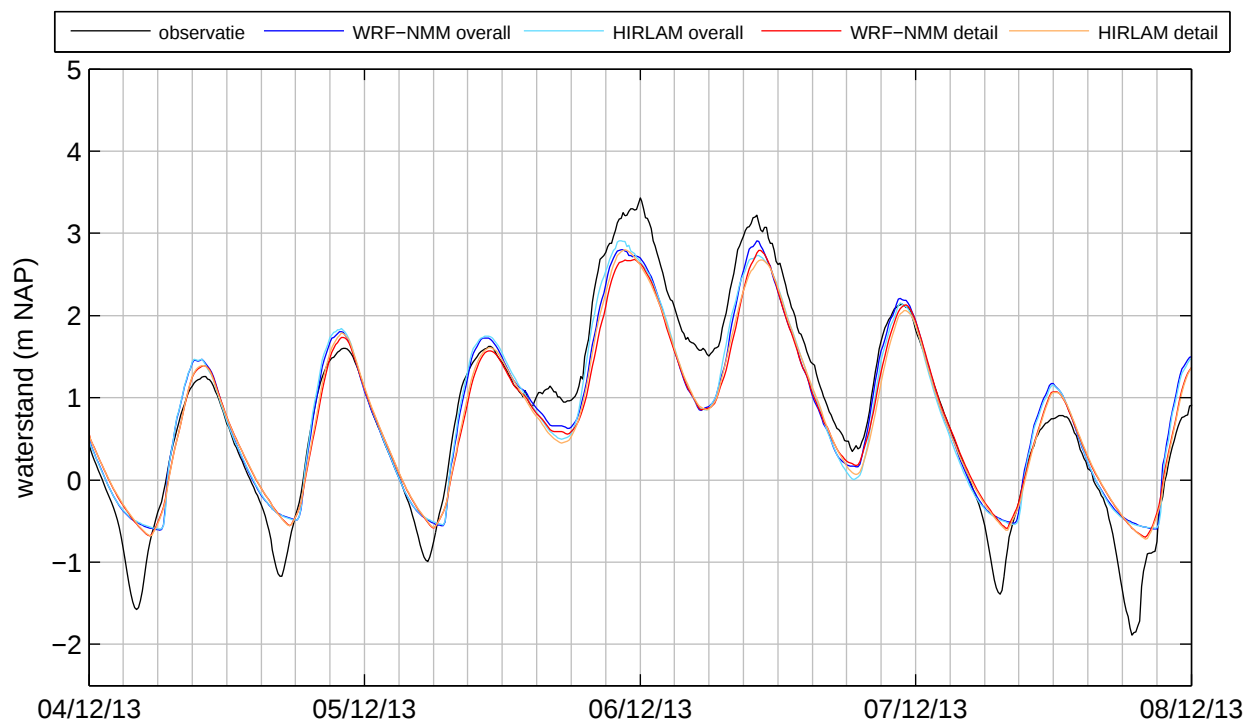
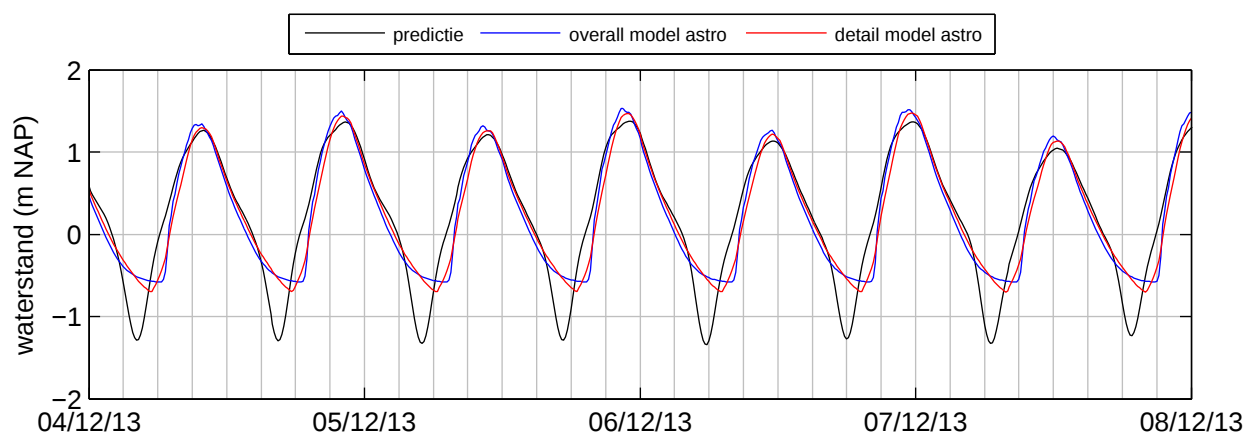
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.9

HOLWERD



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Holwerd,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

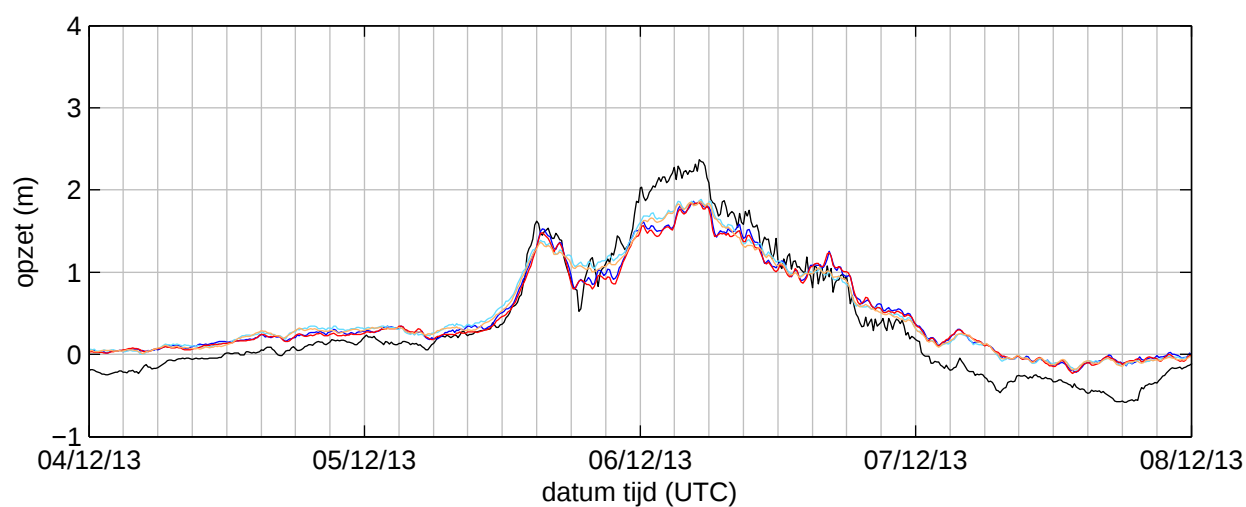
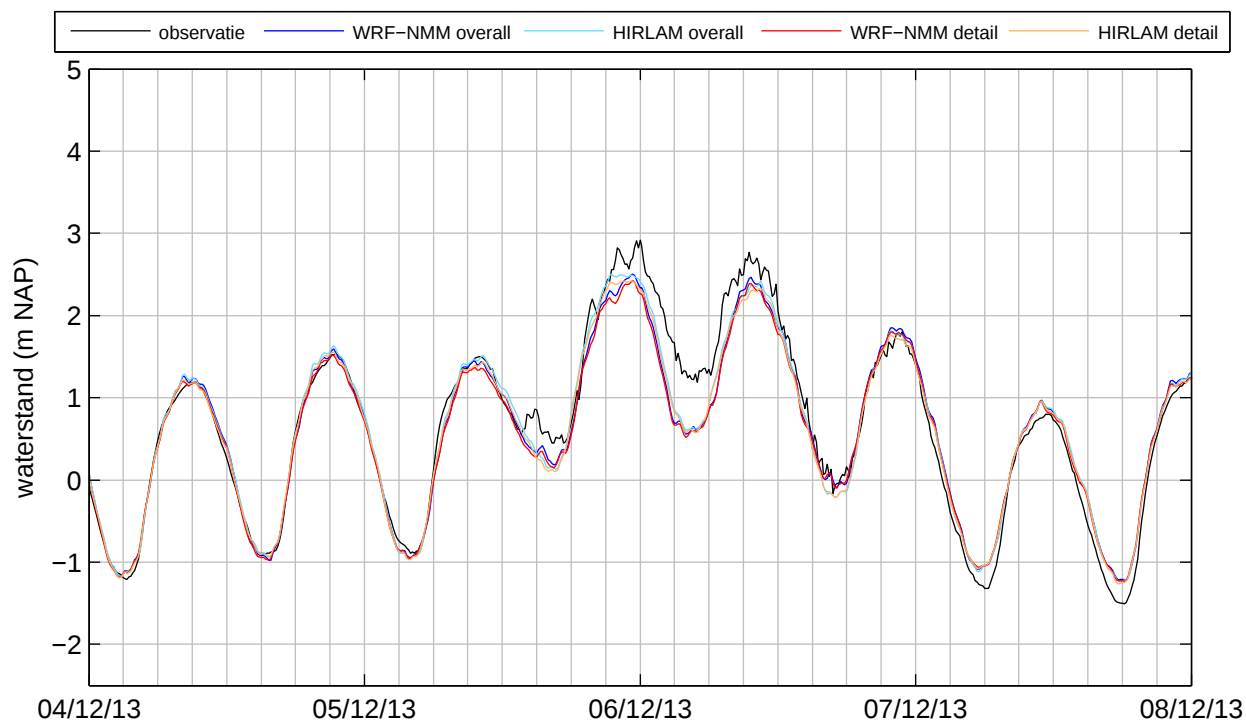
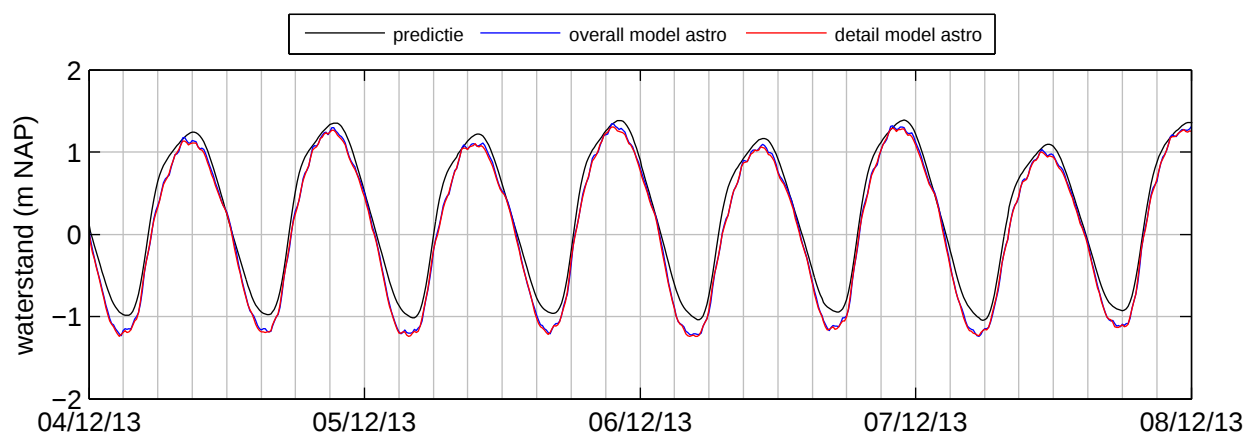
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.10

WIERUMERGRONDEN



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Wierumergronden,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

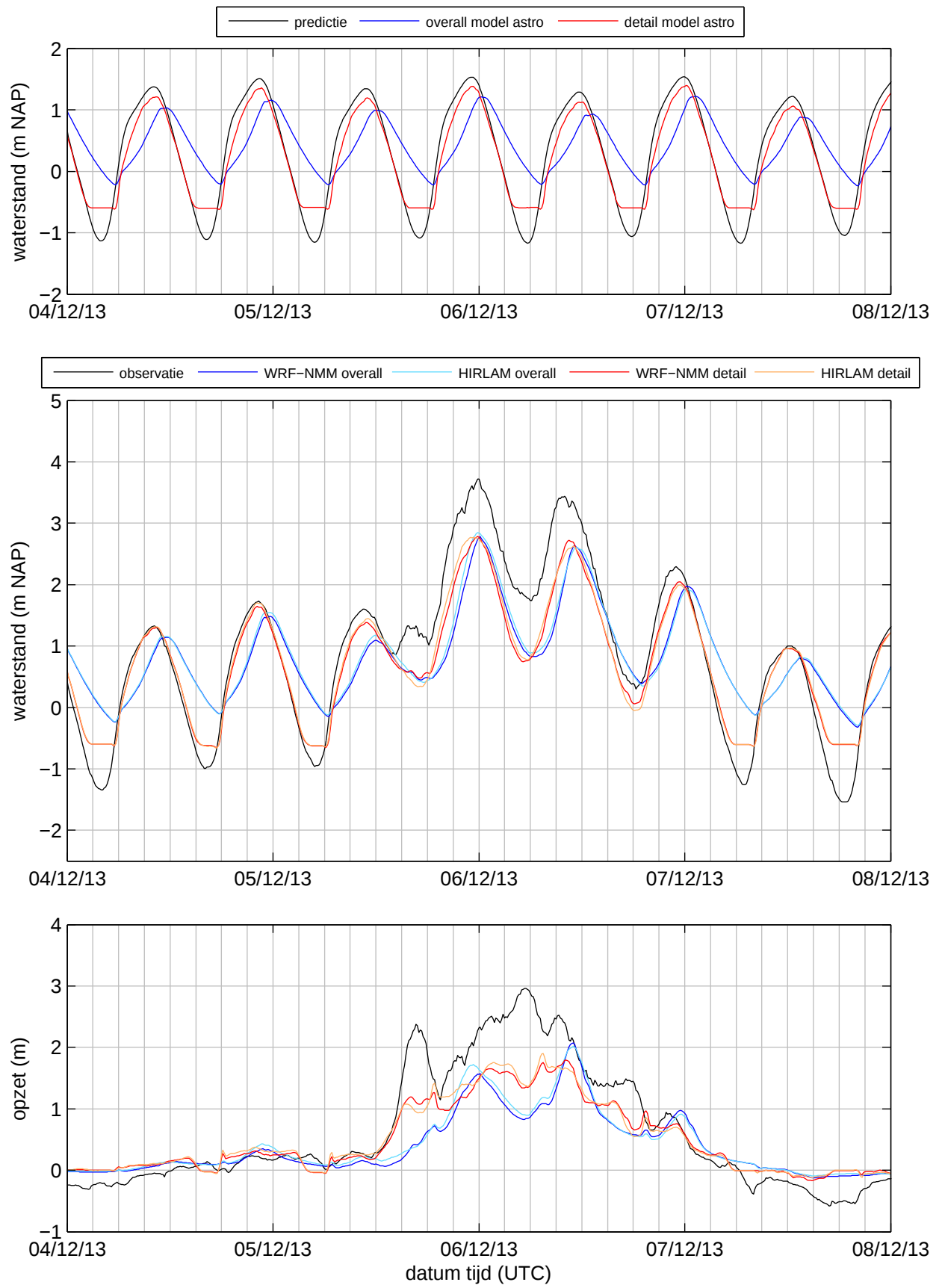
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.11

LAUWERSOOG



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Lauwersoog,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

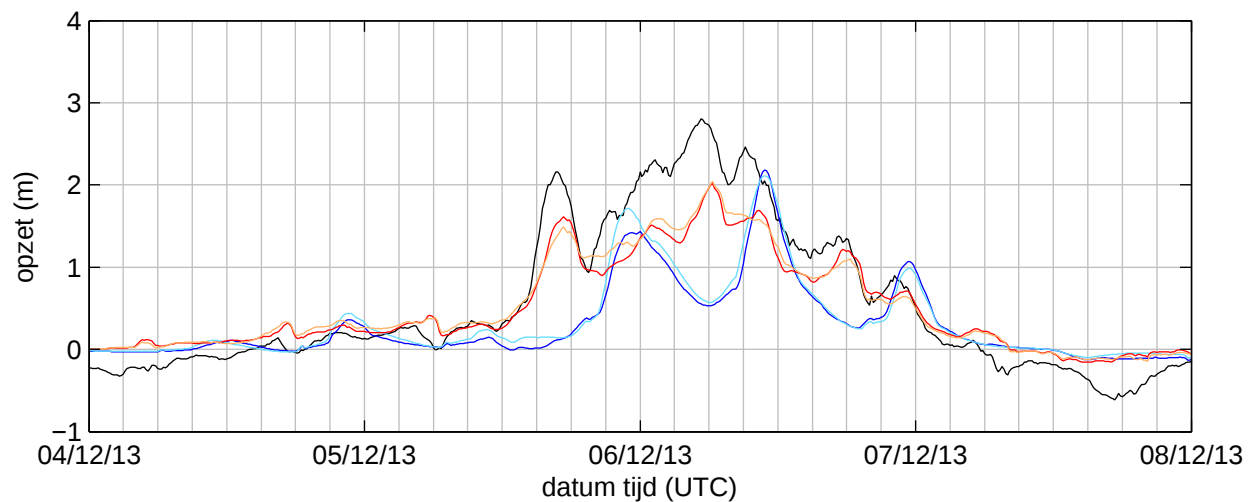
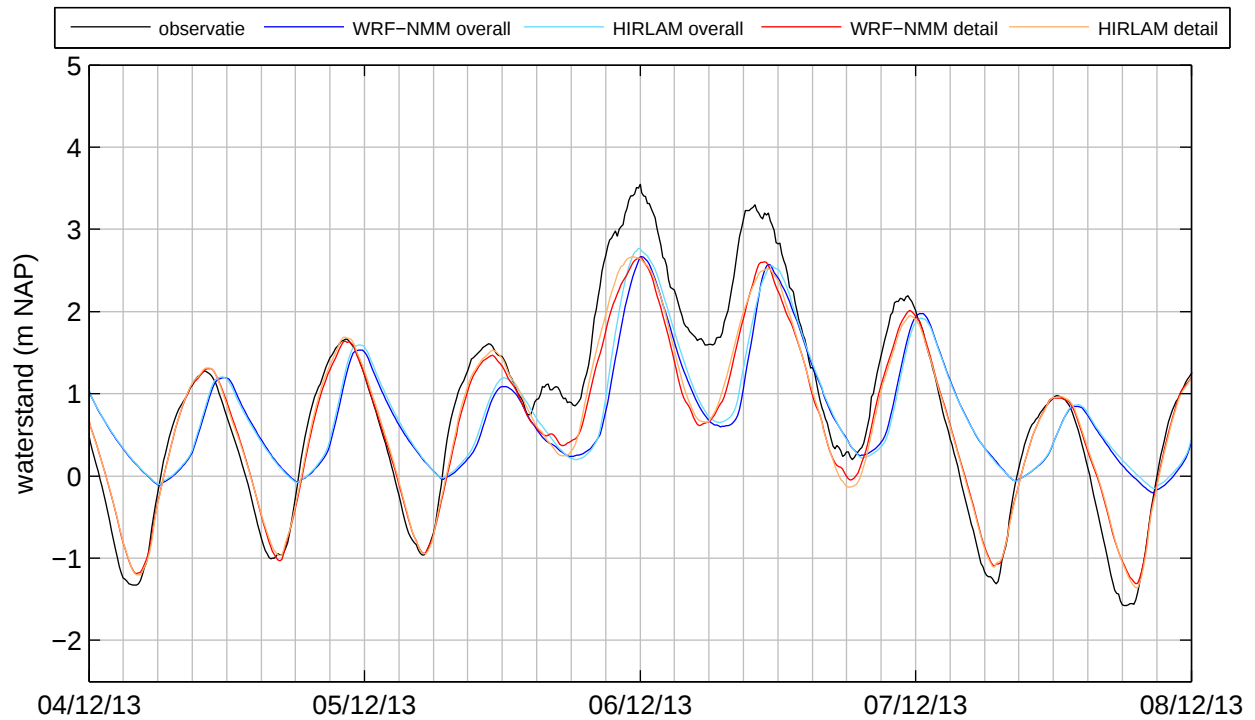
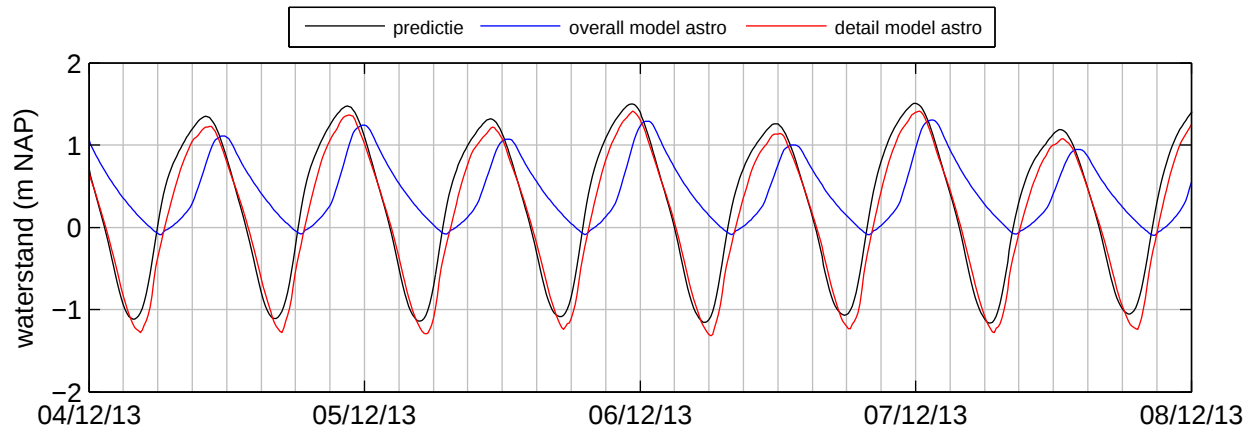
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.12

SCHIERMONNIKOOG



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Schiermonnikoog, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

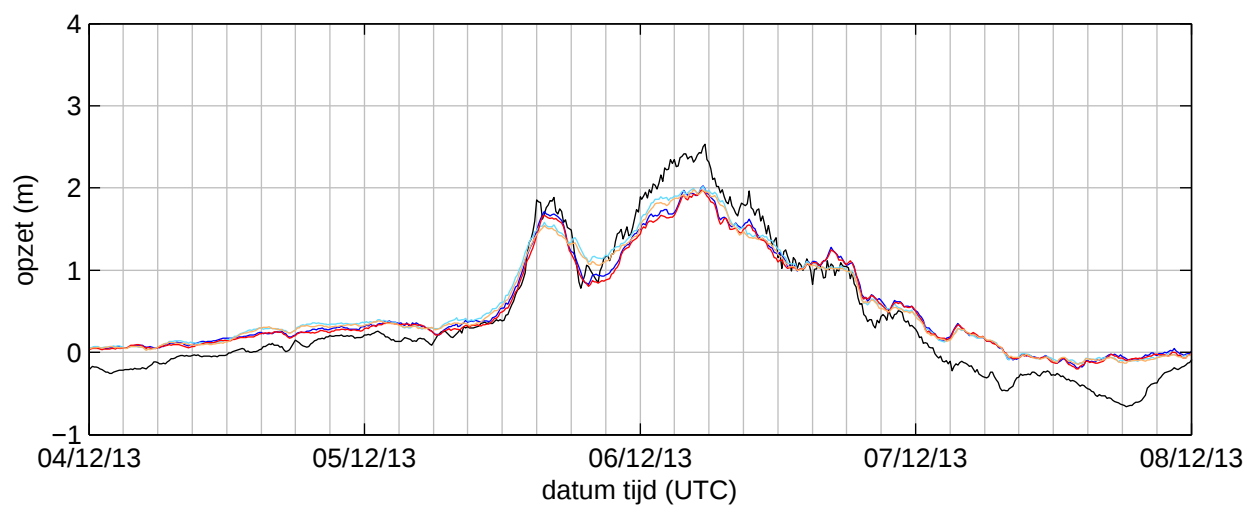
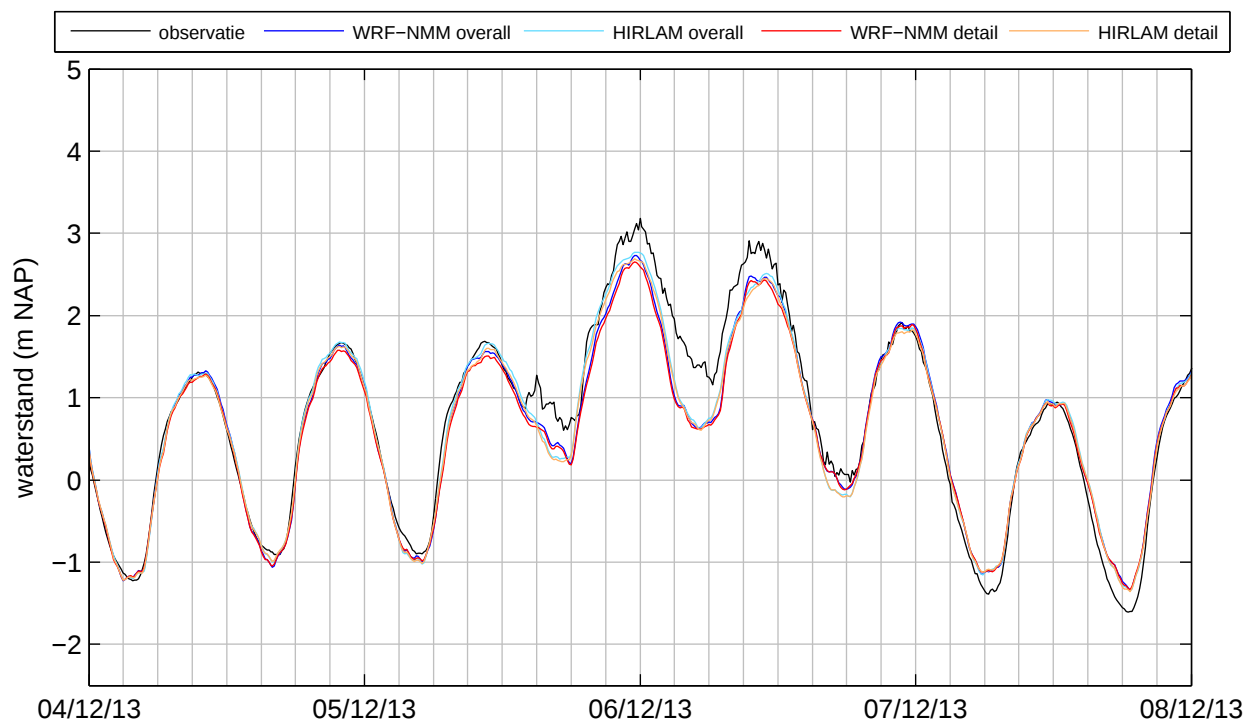
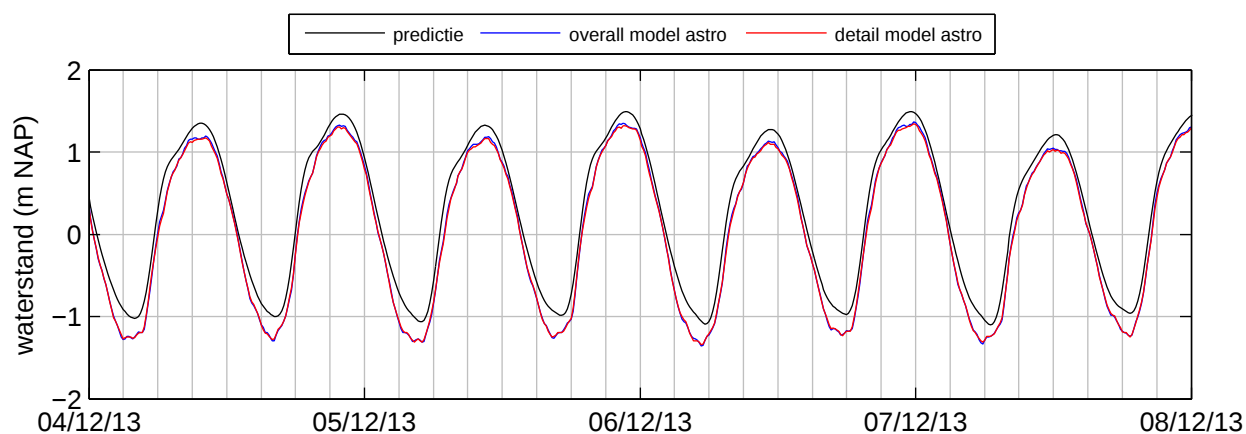
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.13

HUIBERTGAT



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Huibertgat,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

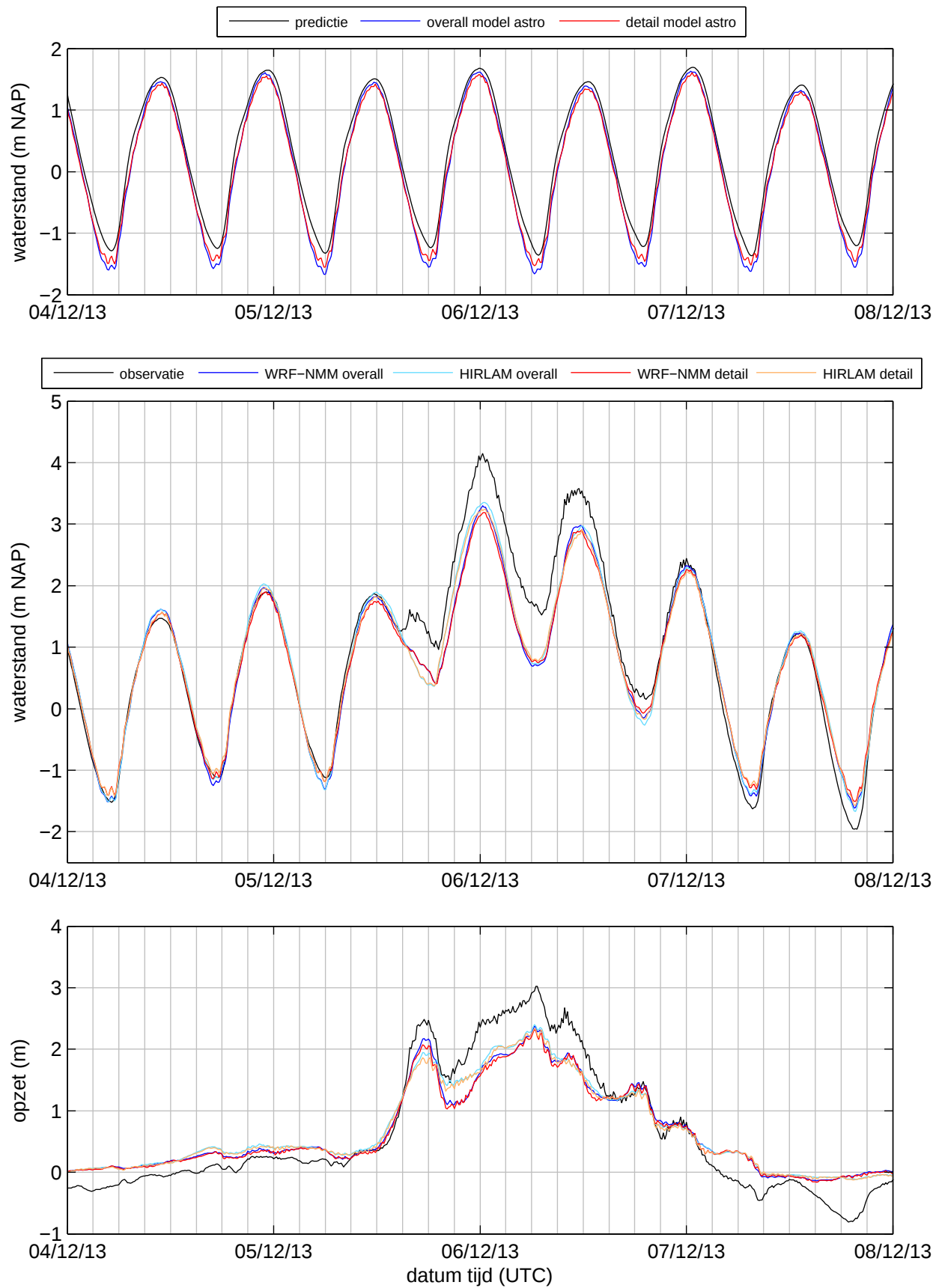
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.14

EEMSHAVEN



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Eemshaven,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

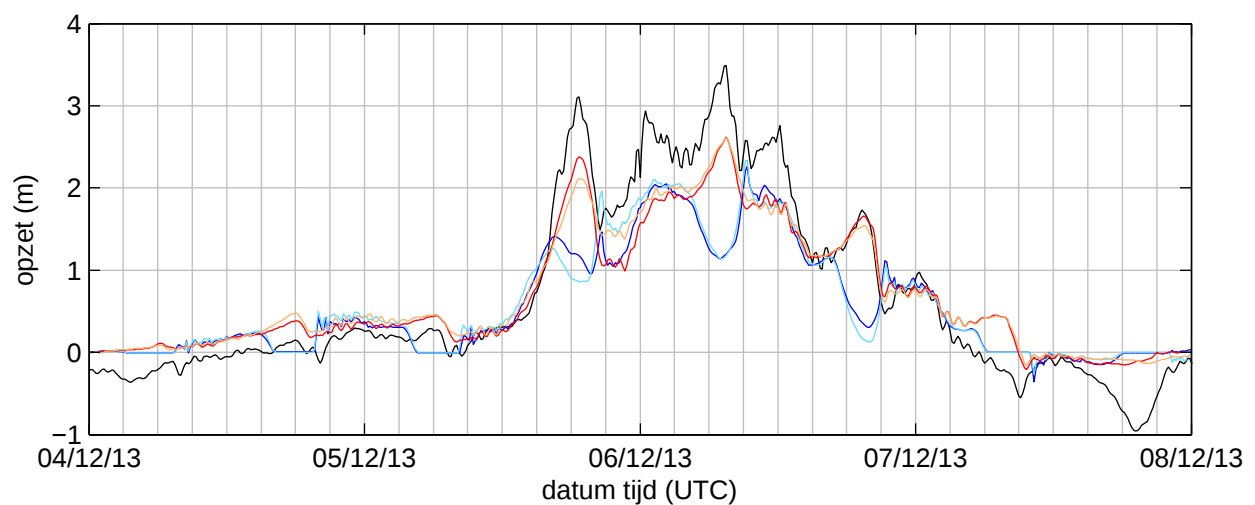
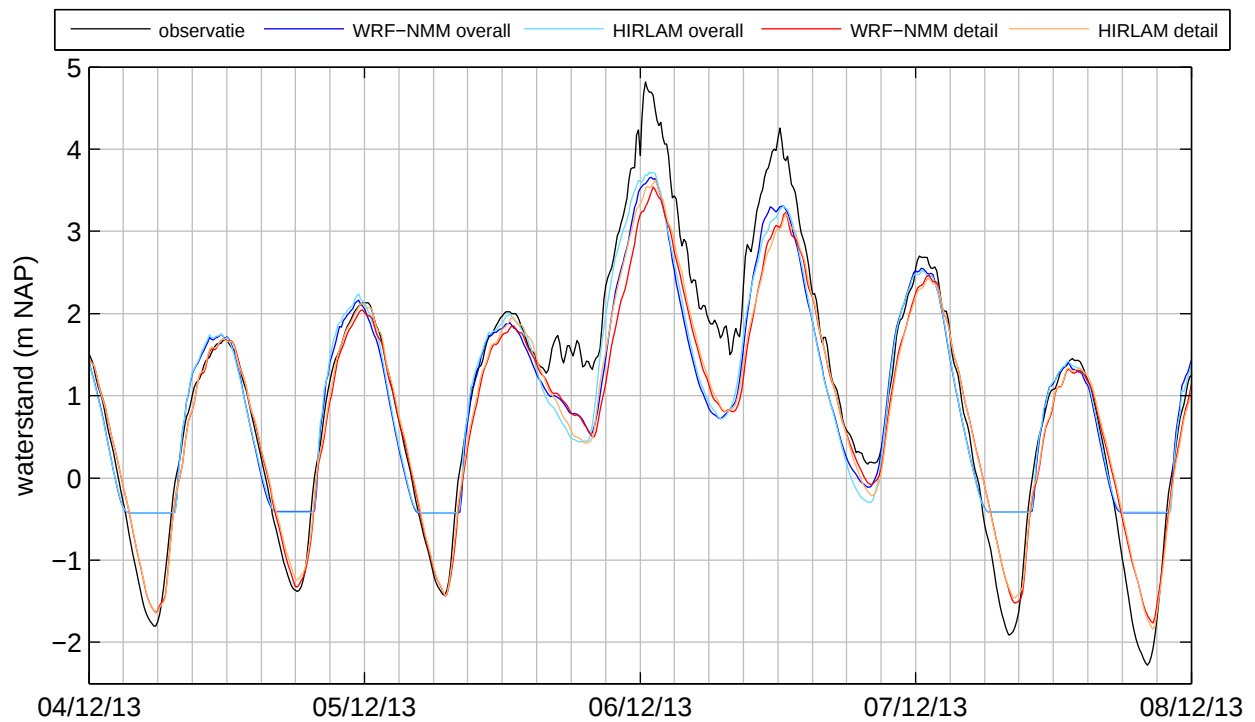
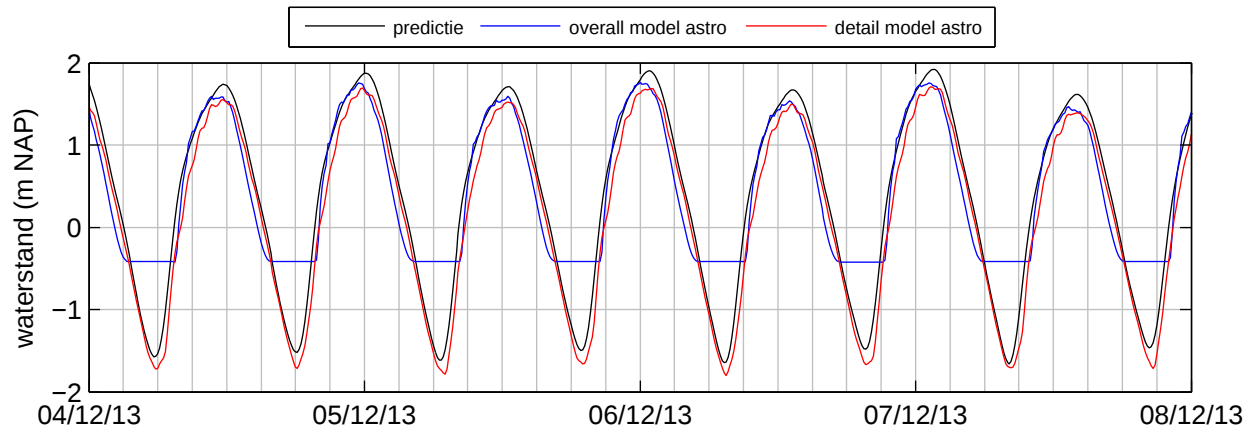
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.15

DELFIJL



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Delfzijl,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

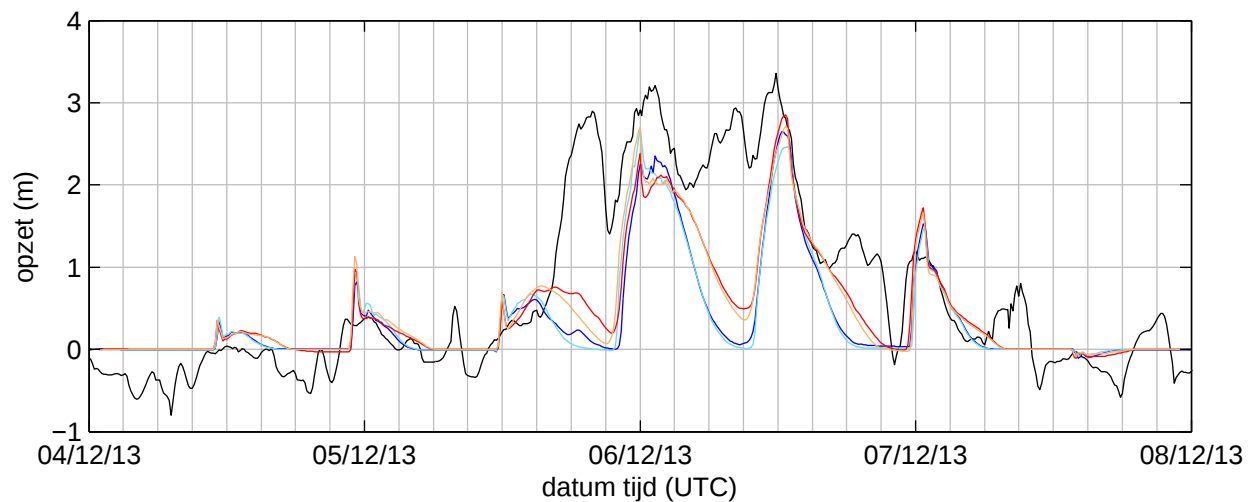
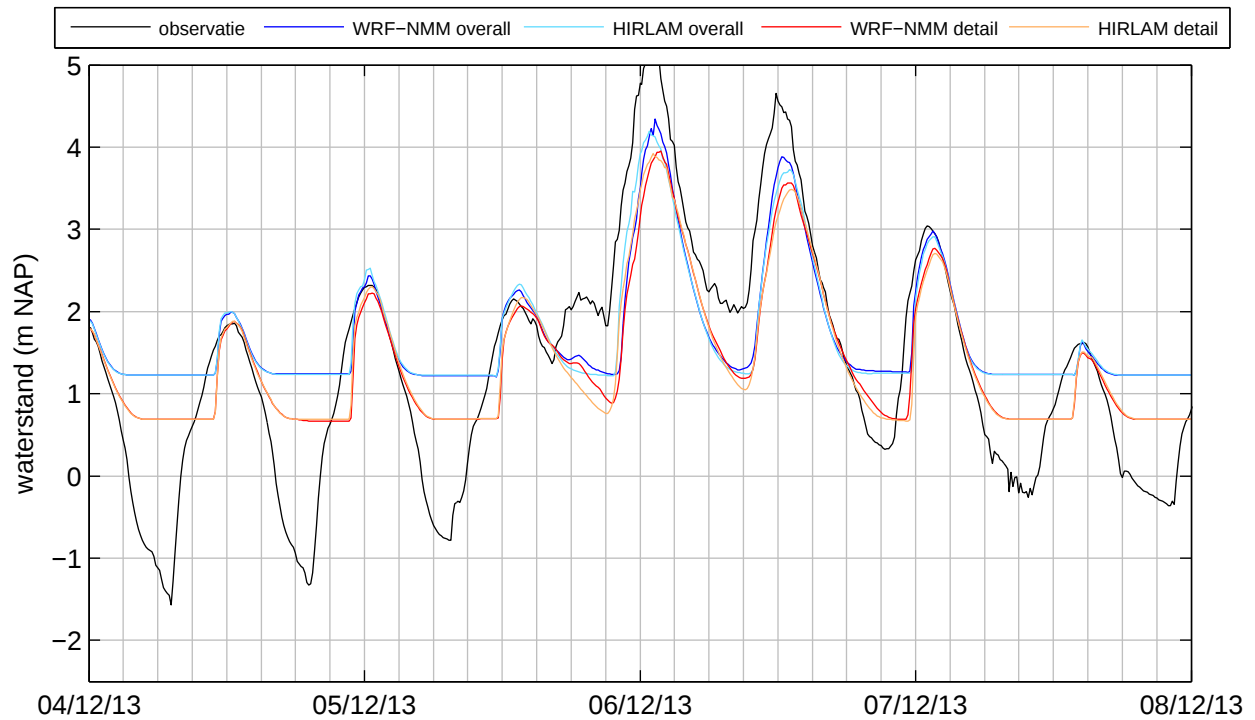
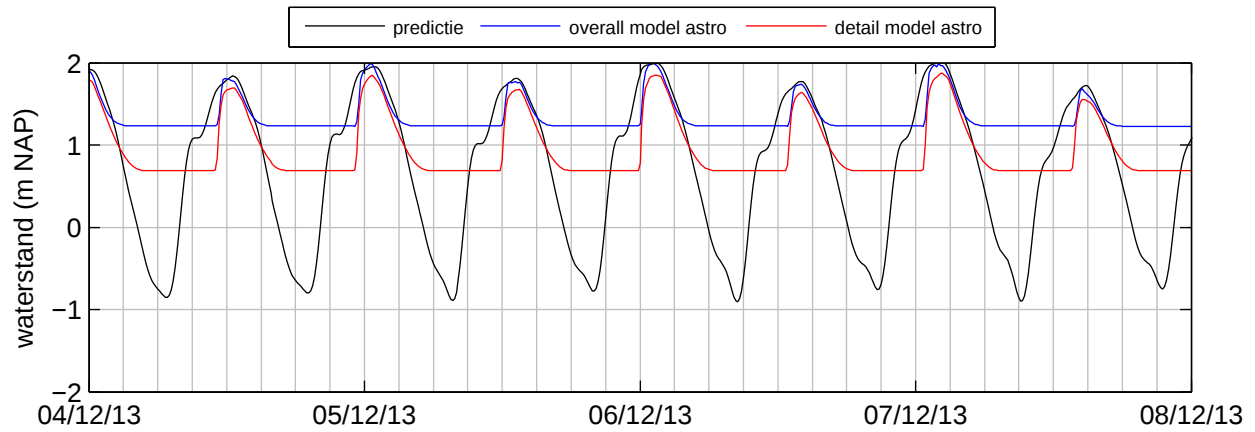
WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. D.16

NIEUWE STATENZIJL



Vergelijking WRF-NMM en HIRLAM voor station Nieuwe Statenzijl,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

WRF-NMM versus HIRLAM

Rekenexperiment Waddenzee

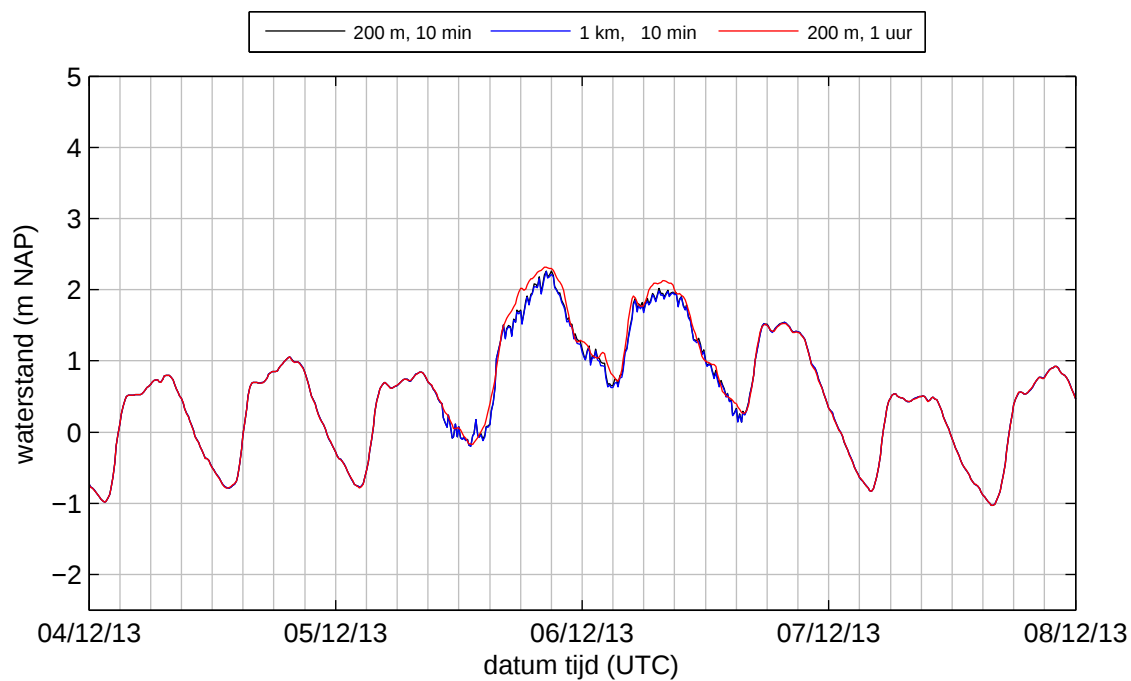
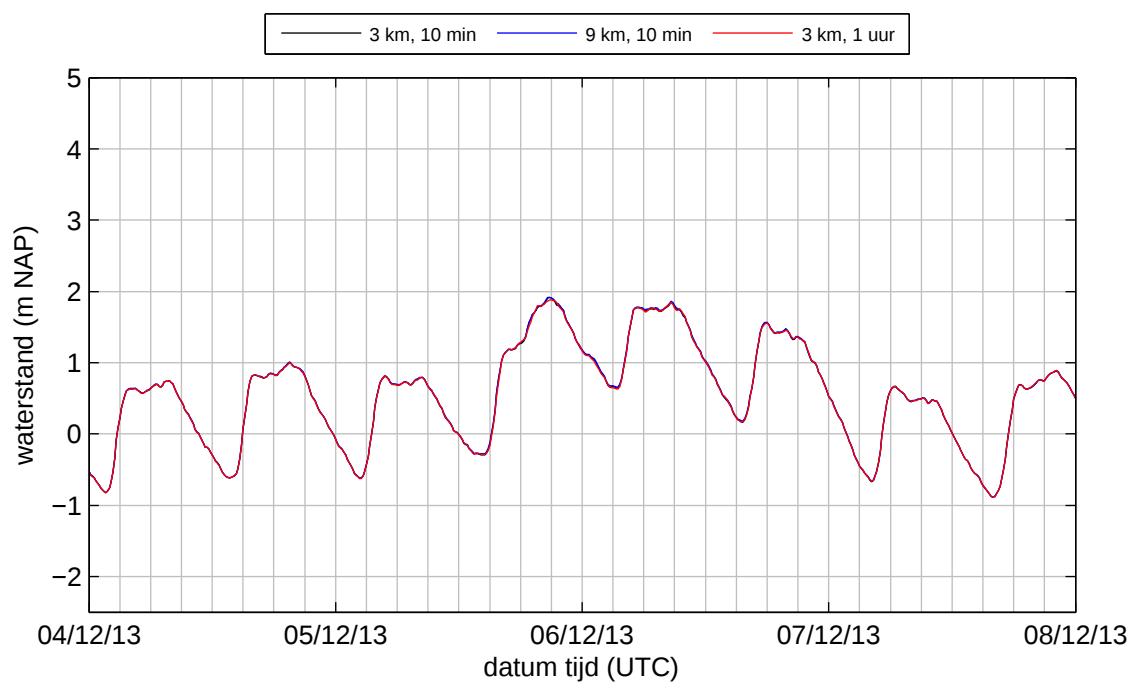
C03041.001941

Fig. D.17

Bijlage E

Gevoeligheid waterstanden voor resolutie atmosferische variabelen

DEN HELDER



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Den Helder,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

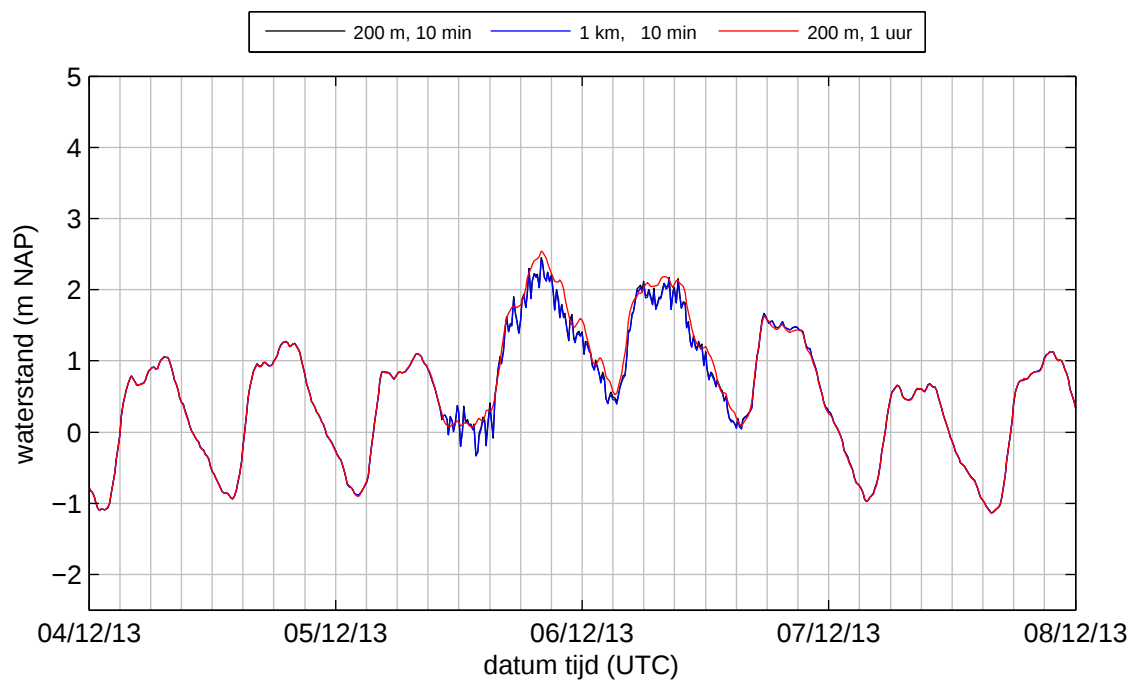
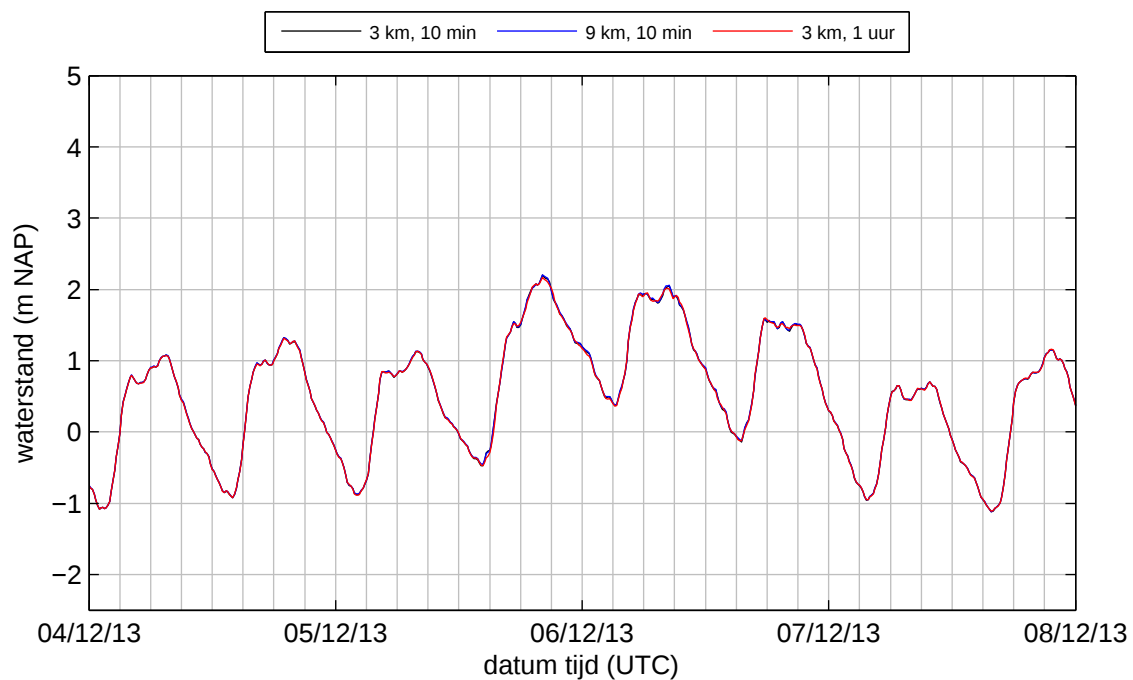
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.1

TEXEL NOORDZEE



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Texel Noordzee,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

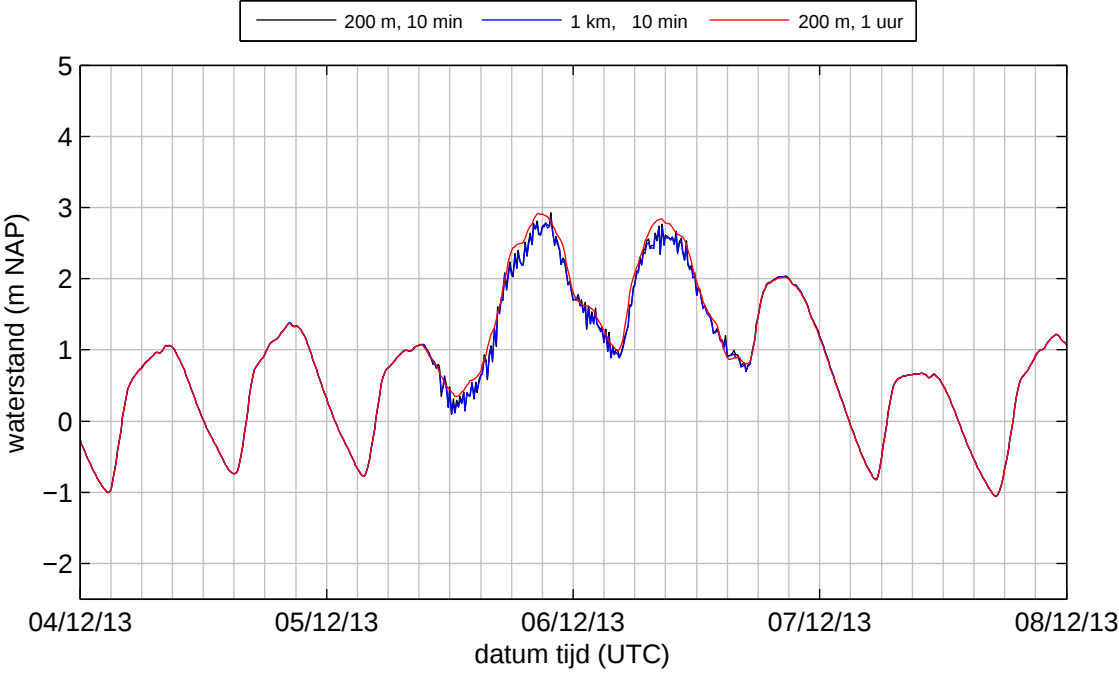
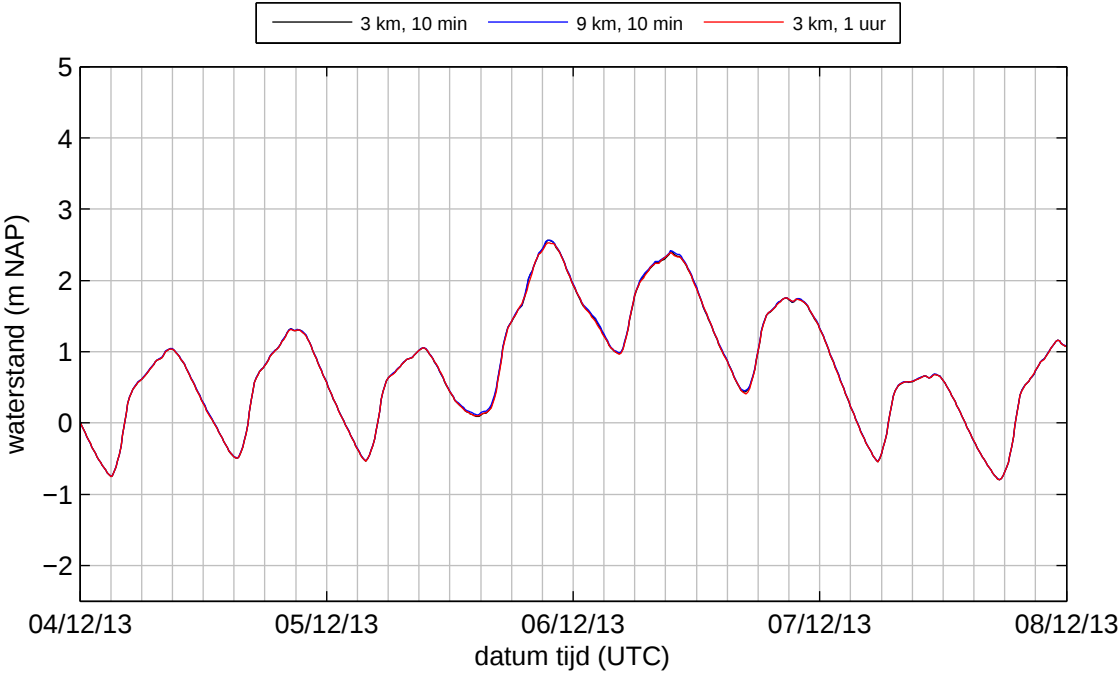
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.2

DEN OEVER BUITEN



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Den Oever buiten,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

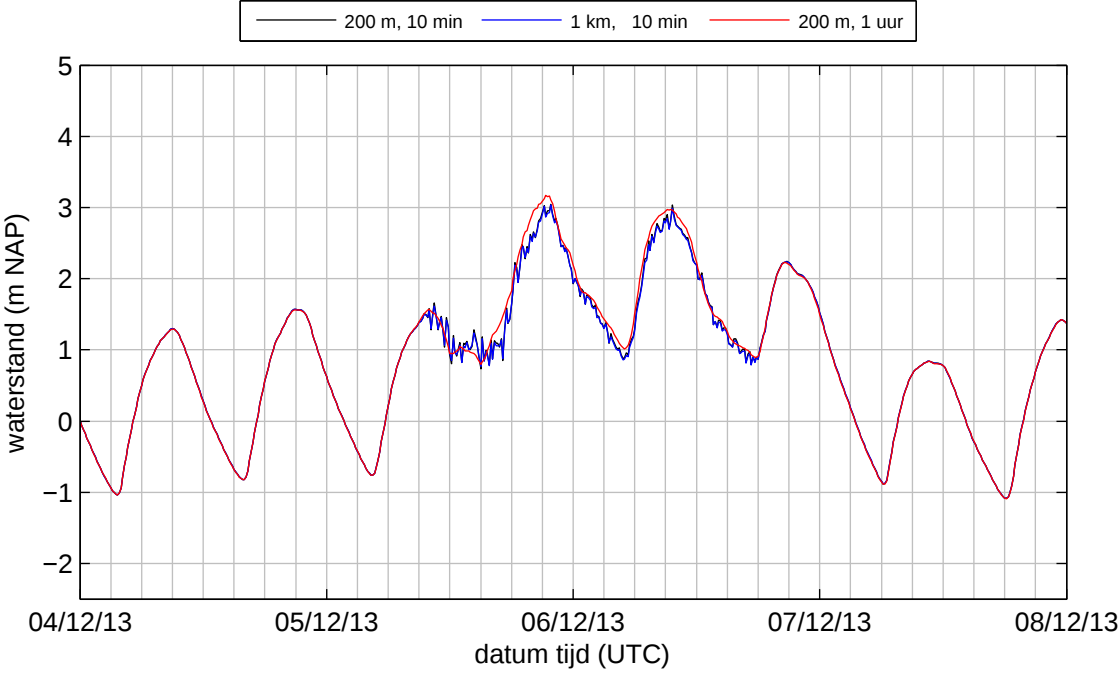
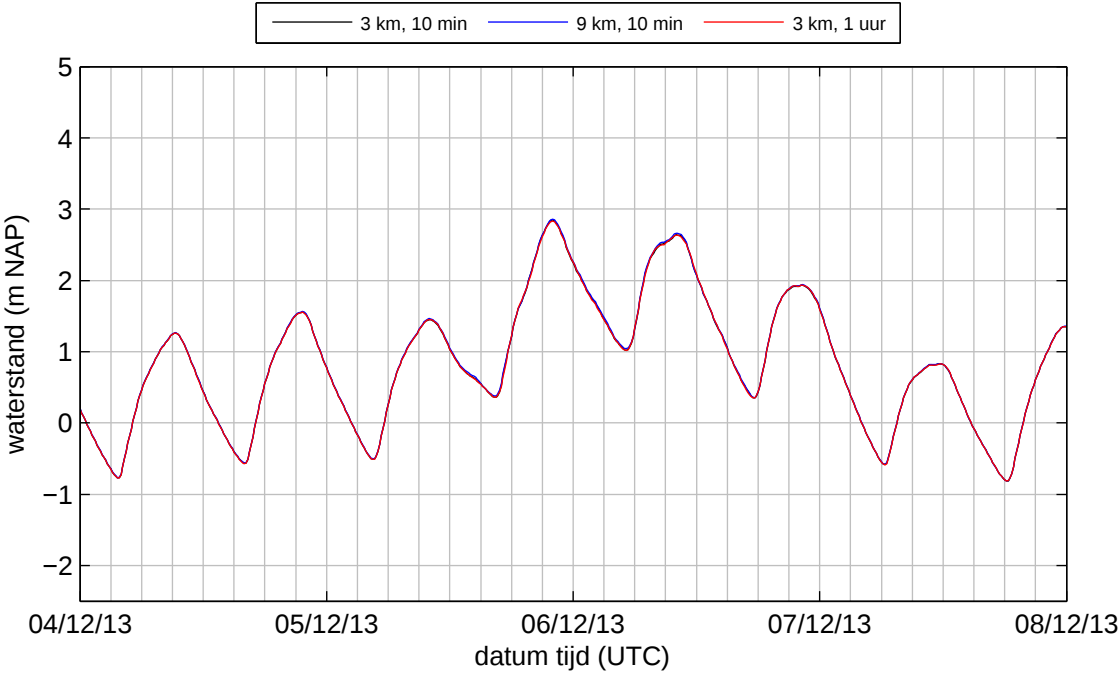
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.3

KORNWERDERZAND BUI



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Kornwerderzand bui,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

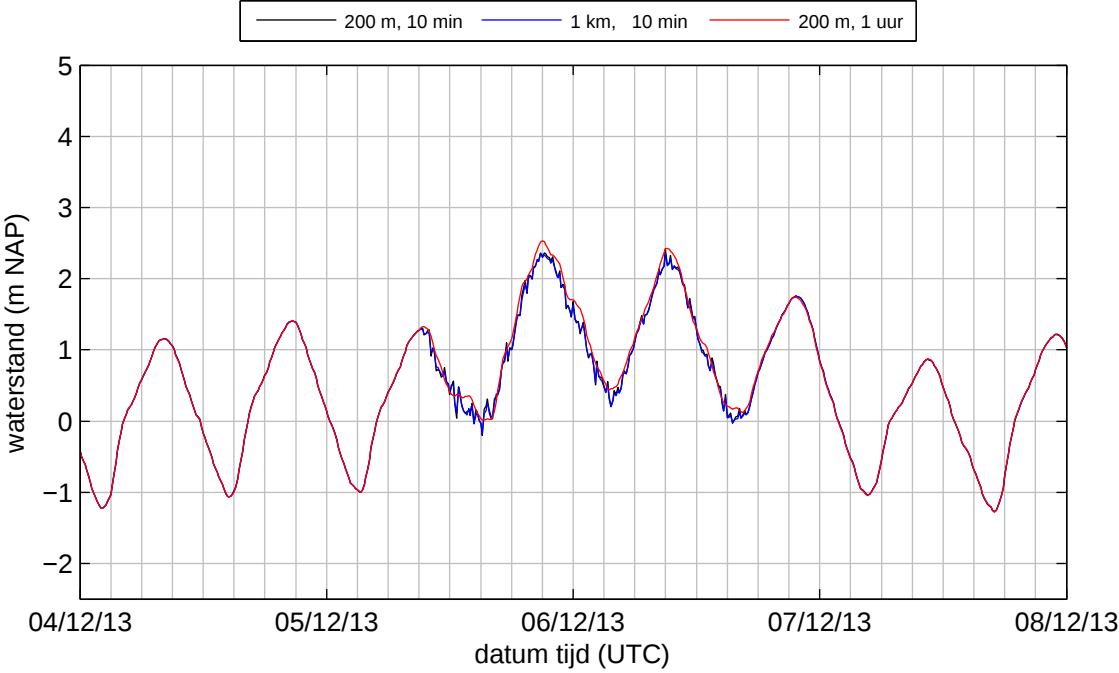
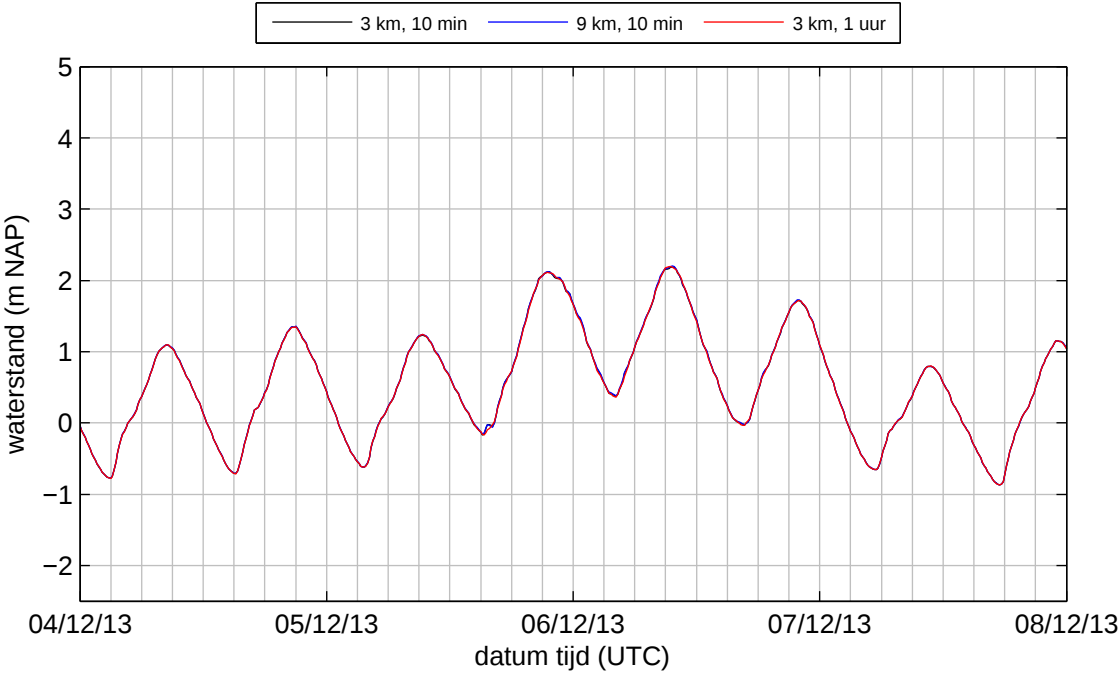
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.4

VLIELAND HAVEN



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Vlieland haven,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

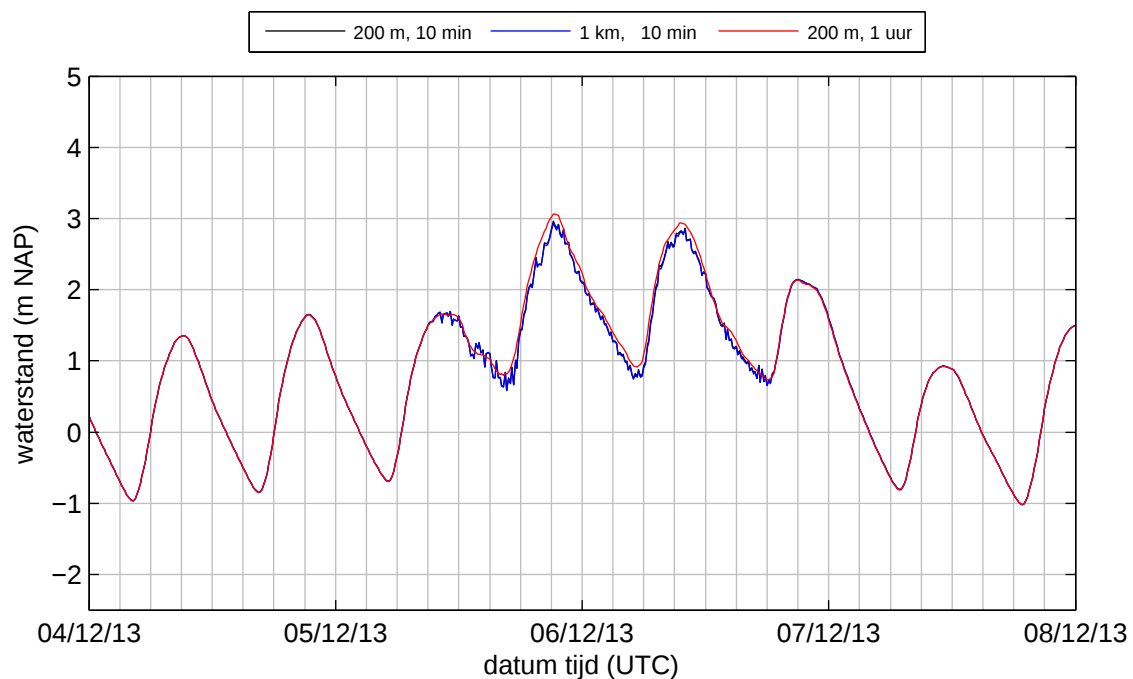
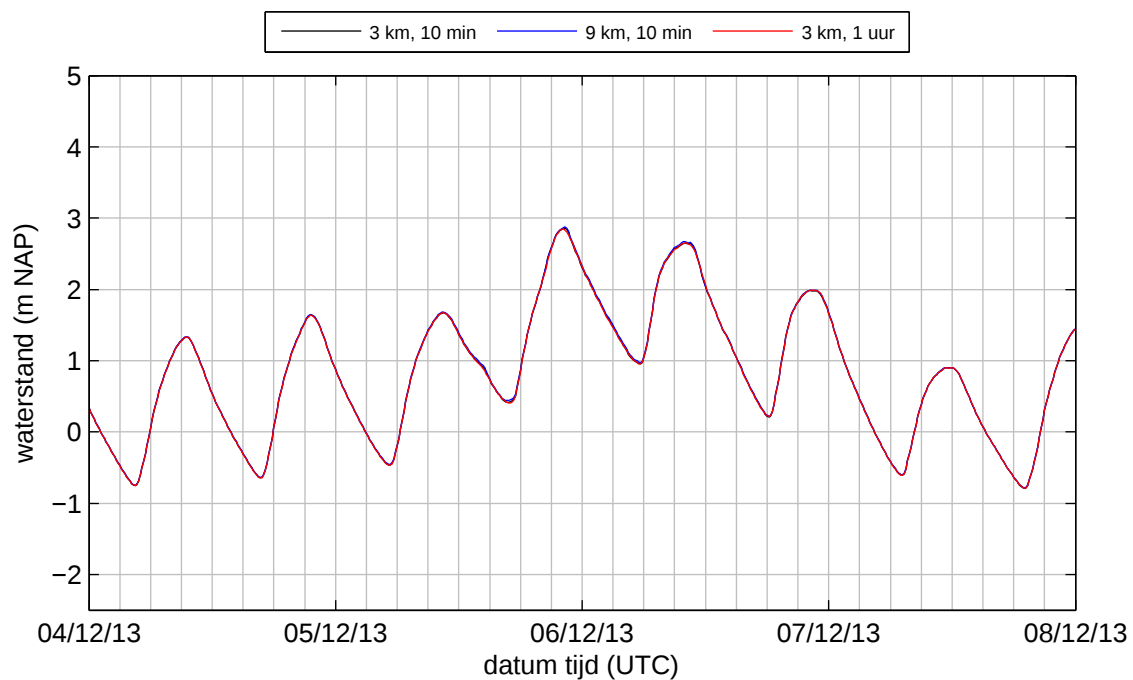
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.5

HARLINGEN



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Harlingen,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

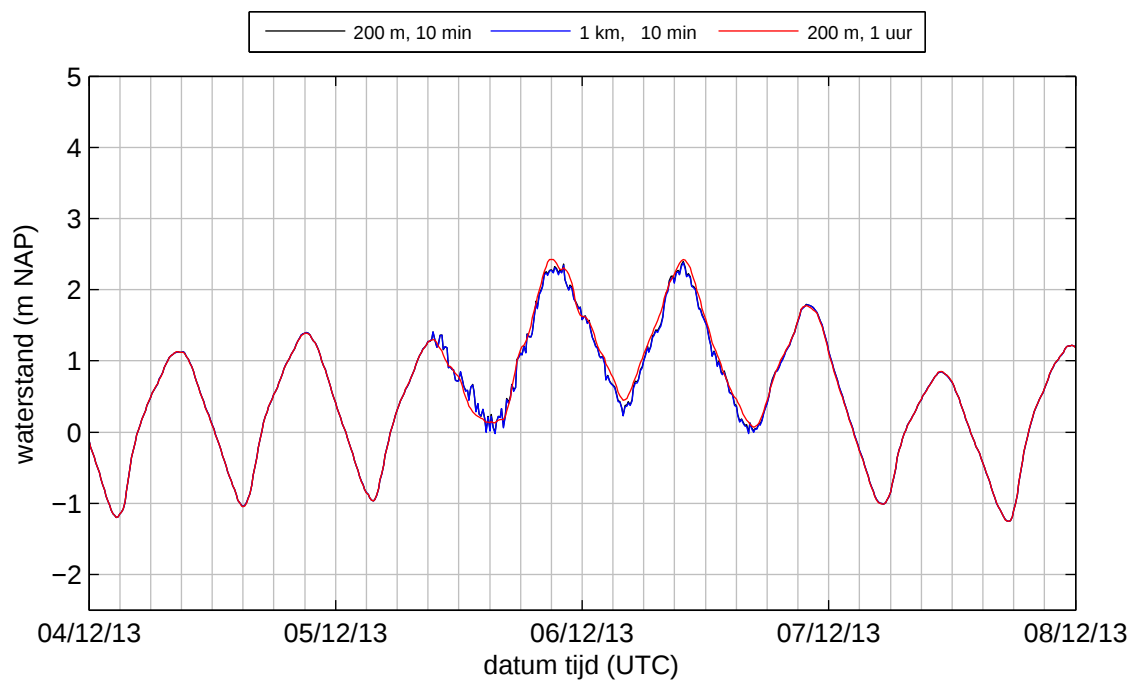
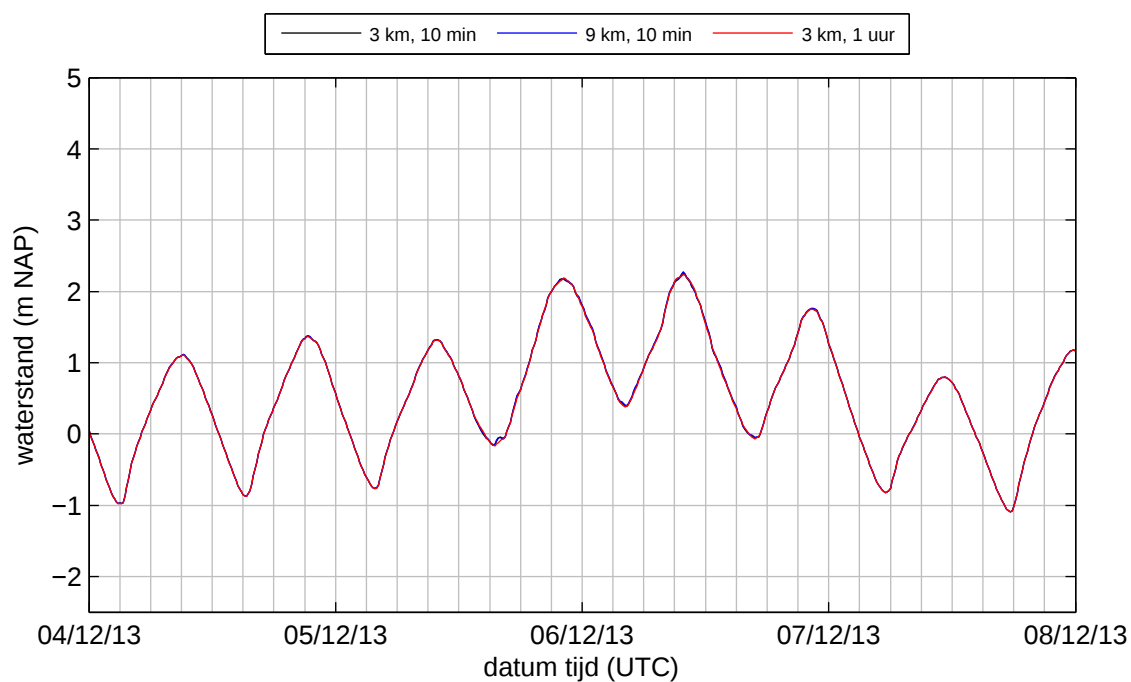
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.6

WEST-TERSCHELLING



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station West-Terschelling,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

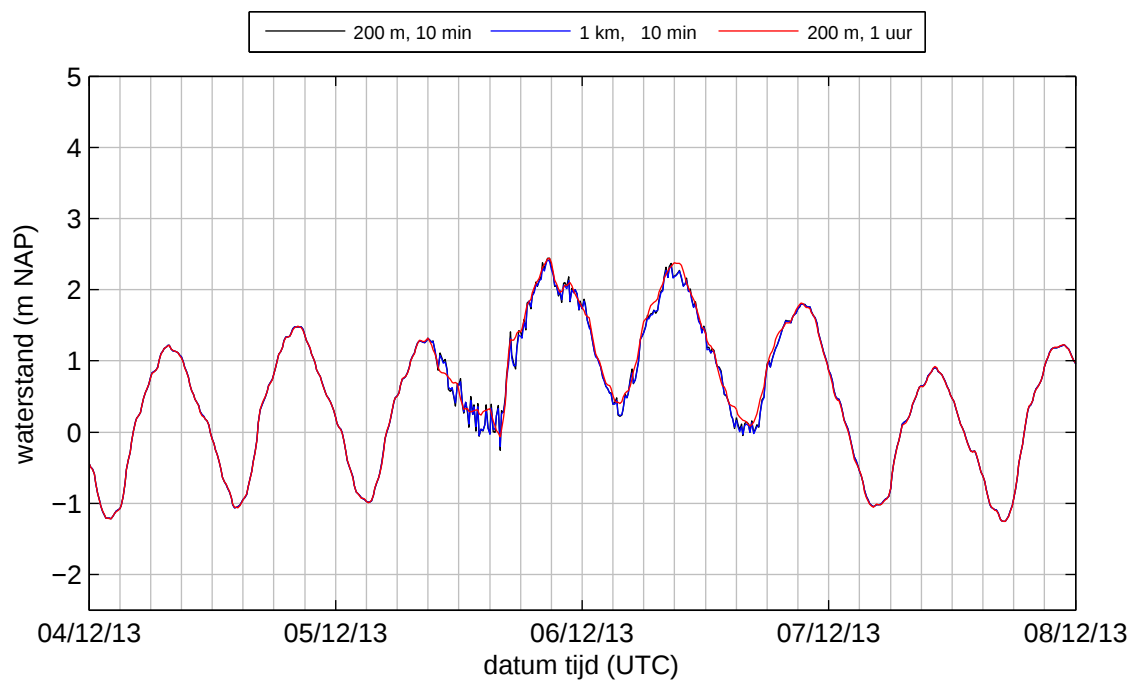
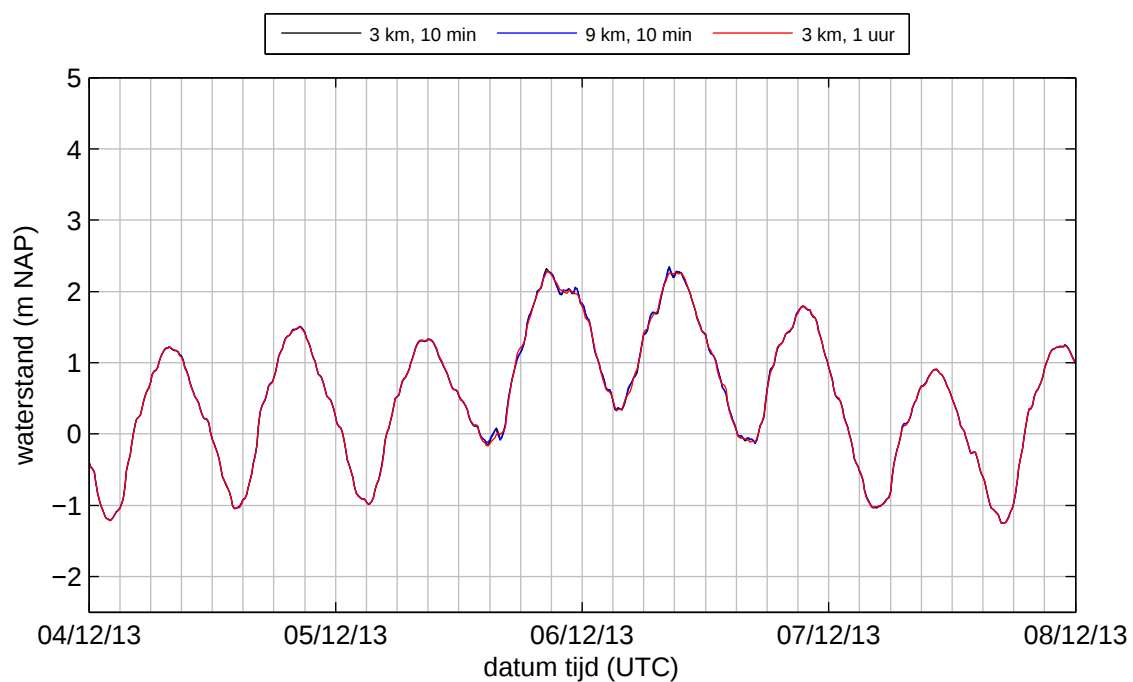
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.7

TERSCHELLING NRDZ



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Terschelling Nrdz,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

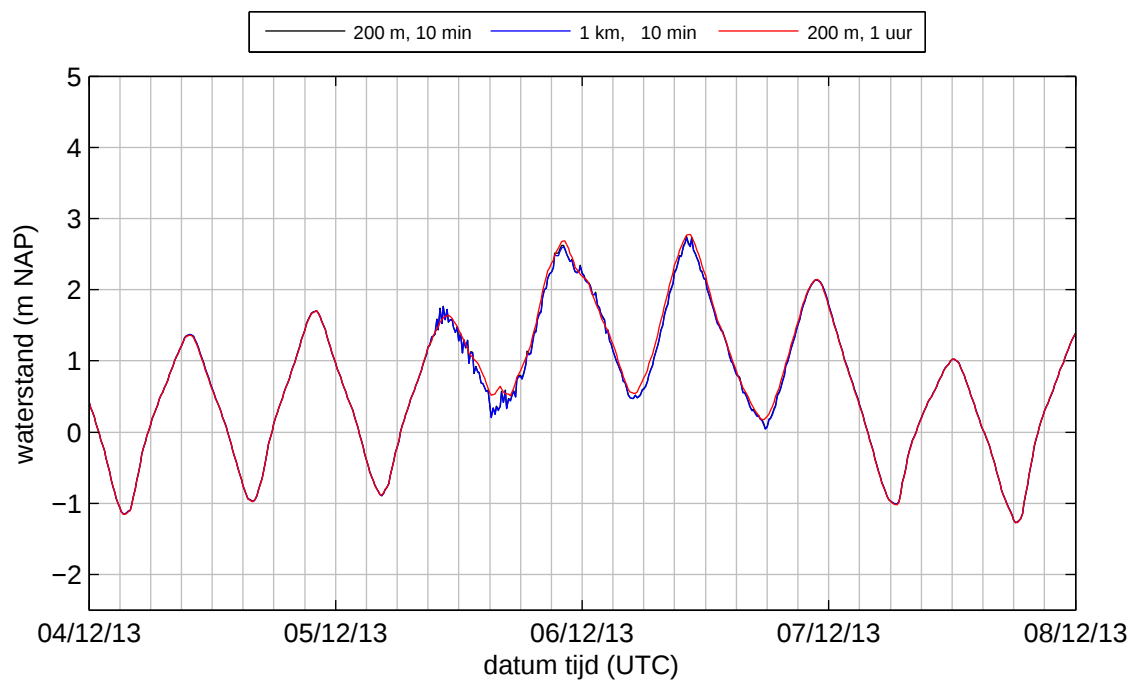
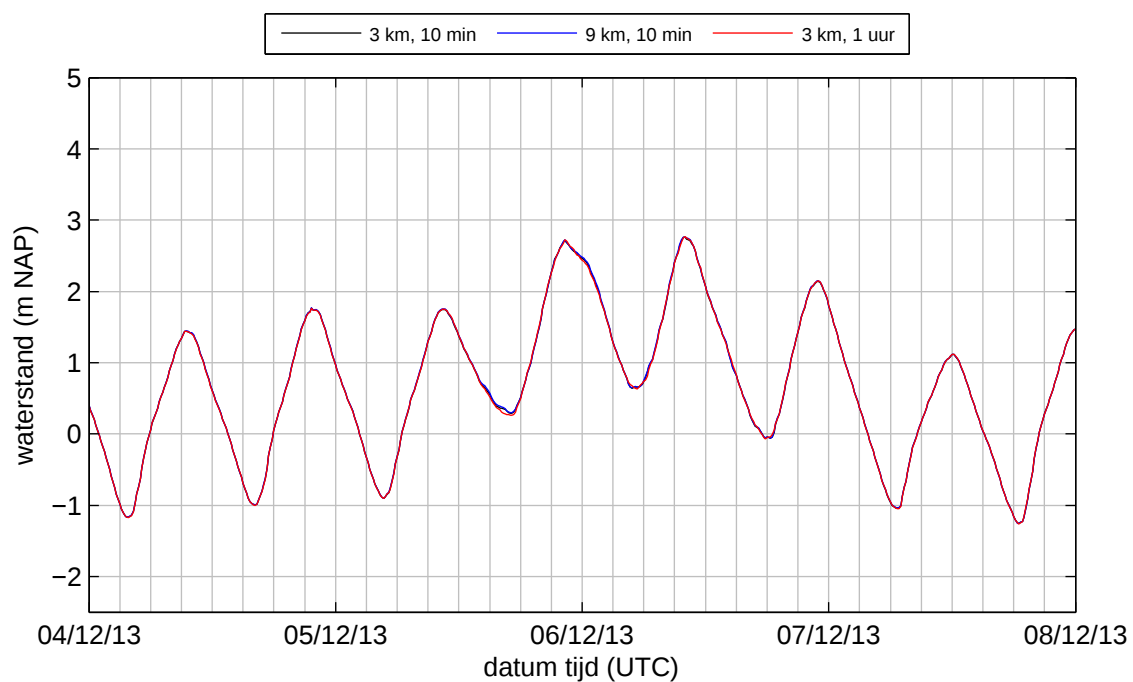
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.8

NES



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Nes,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

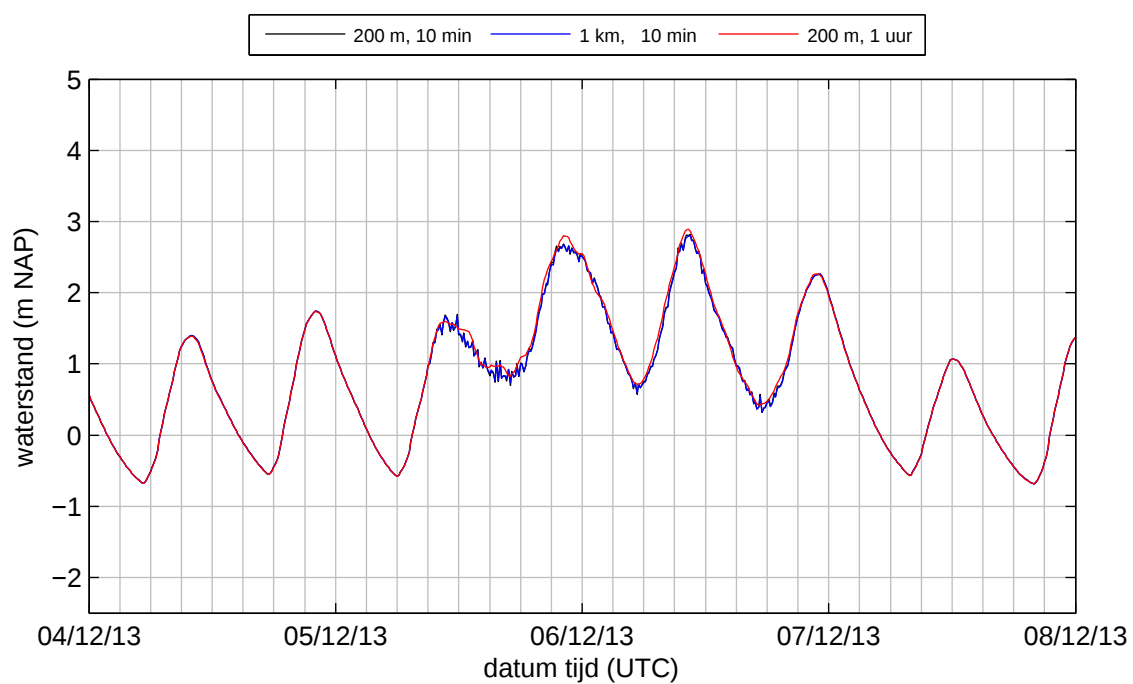
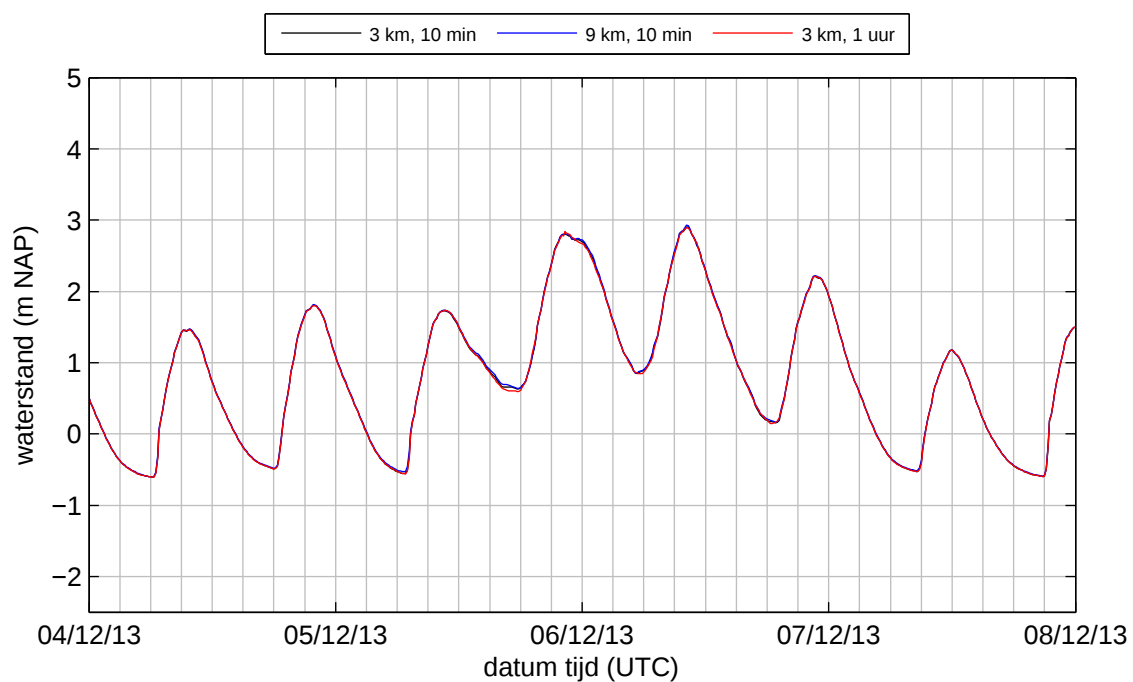
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.9

HOLWERD



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Holwerd,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

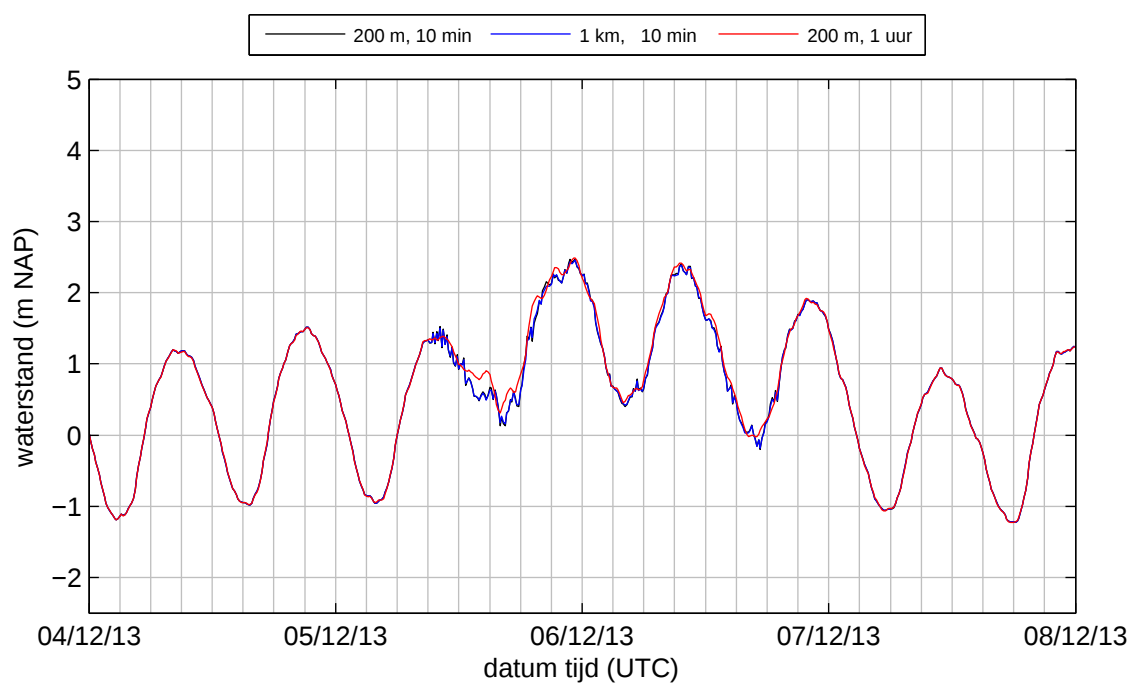
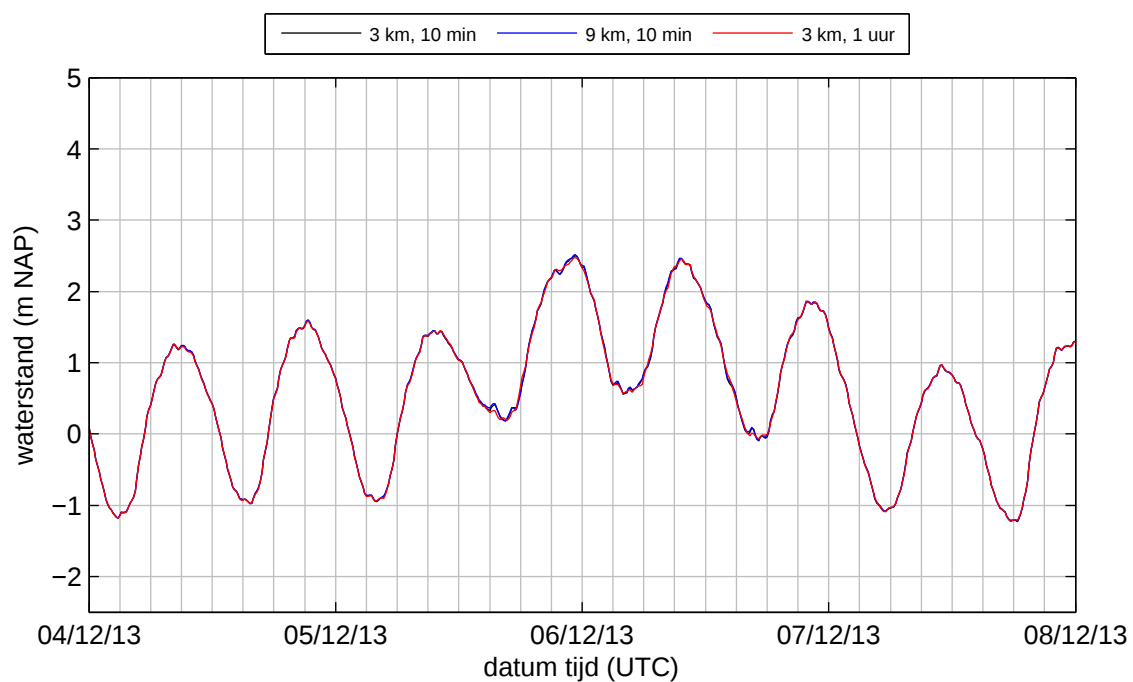
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.10

WIERUMERGRONDEN



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Wierumergronden,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

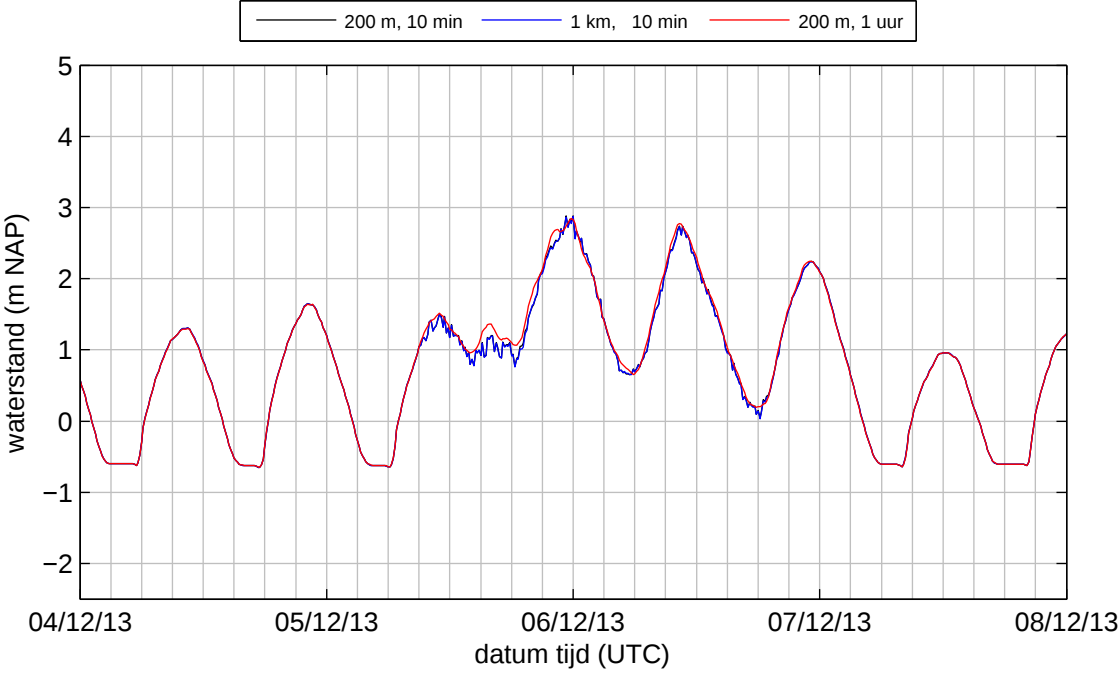
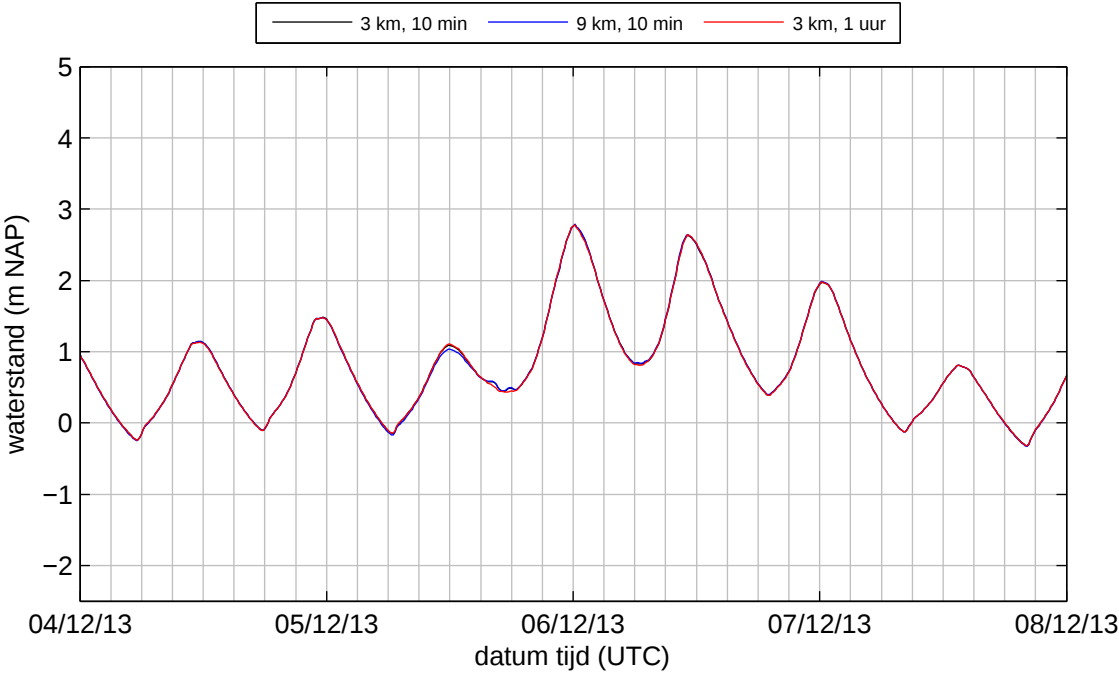
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.11

LAUWERSOOG



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Lauwersoog,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

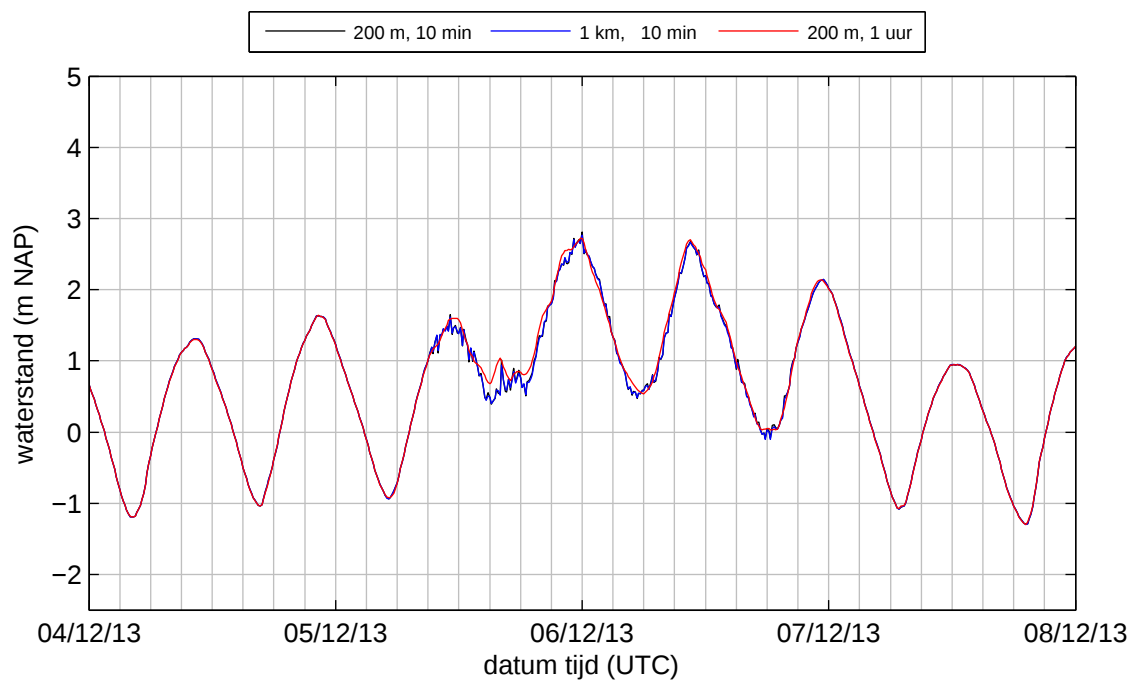
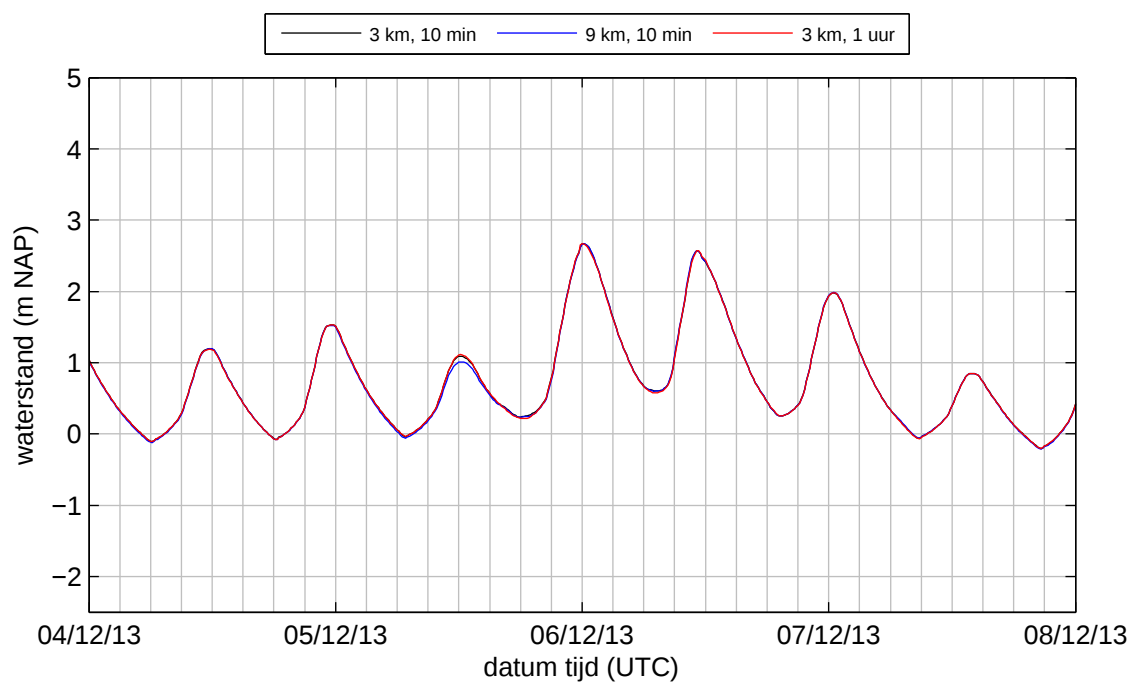
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.12

SCHIERMONNIKOOG



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Schiermonnikoog,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

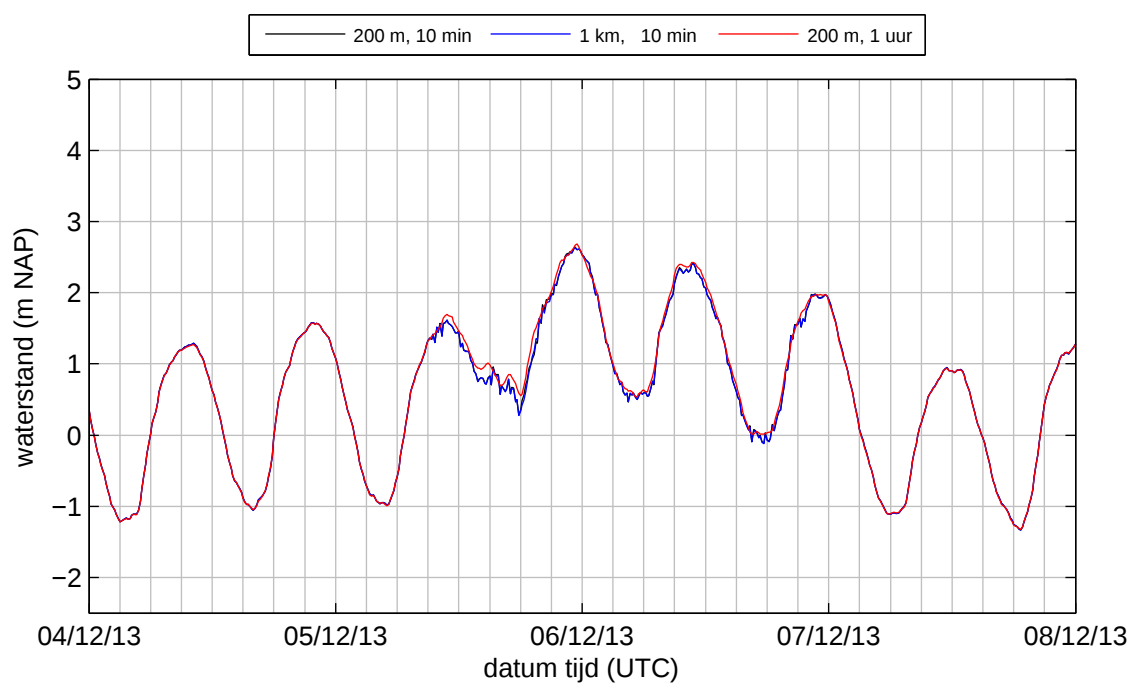
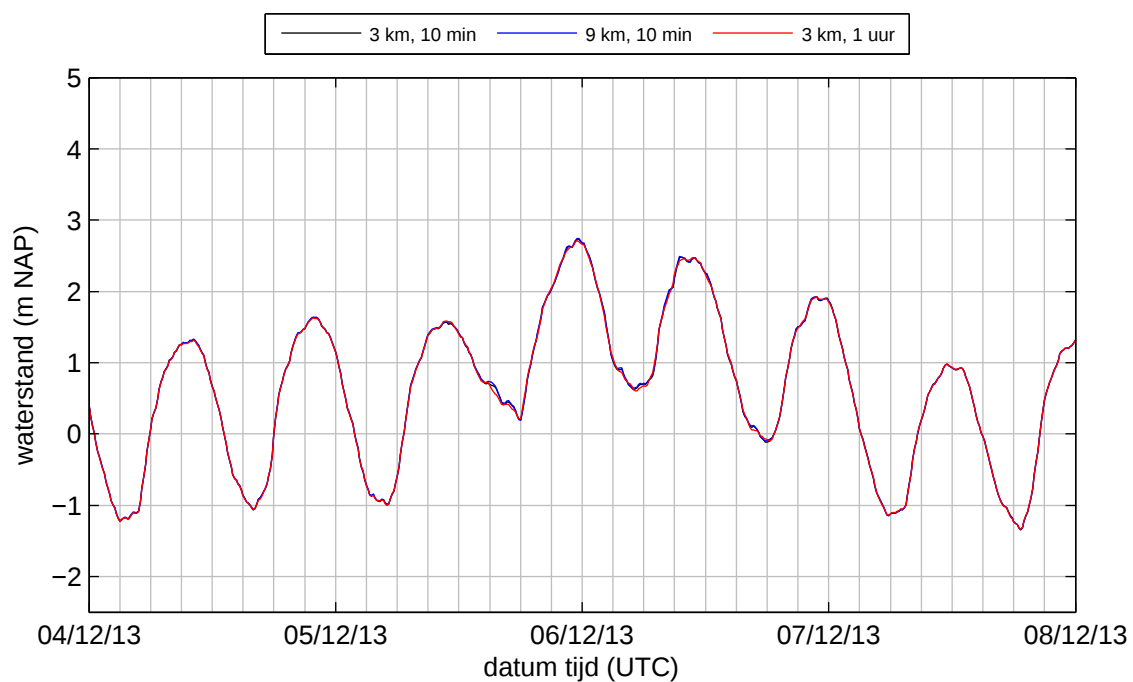
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.13

HUIBERTGAT



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Huibertgat,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

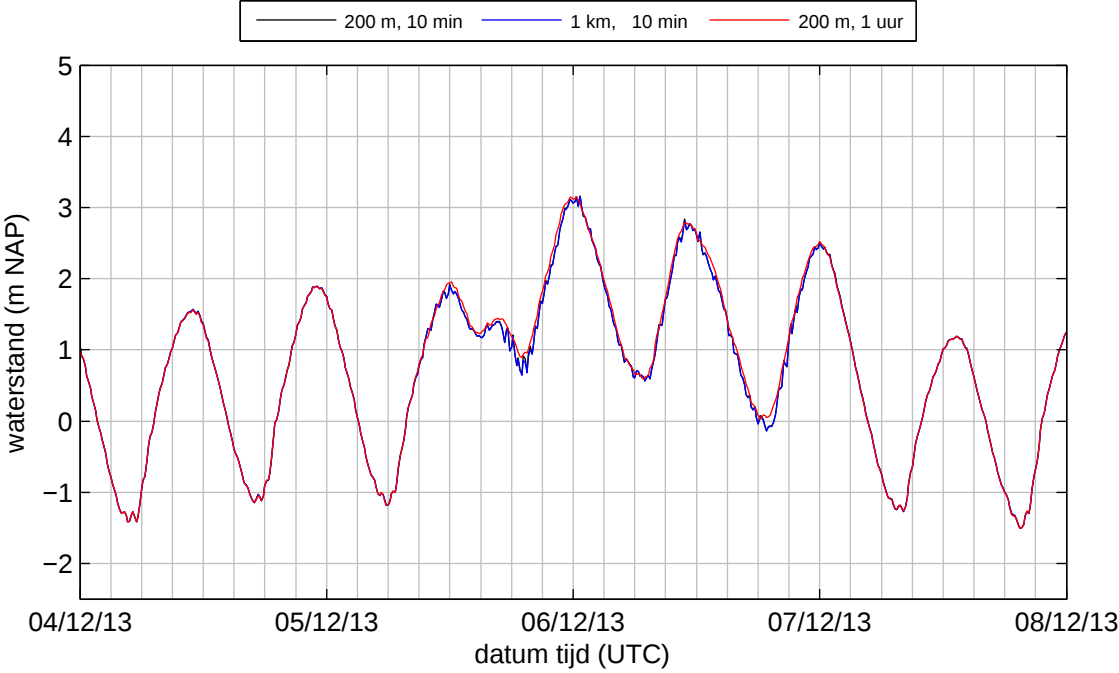
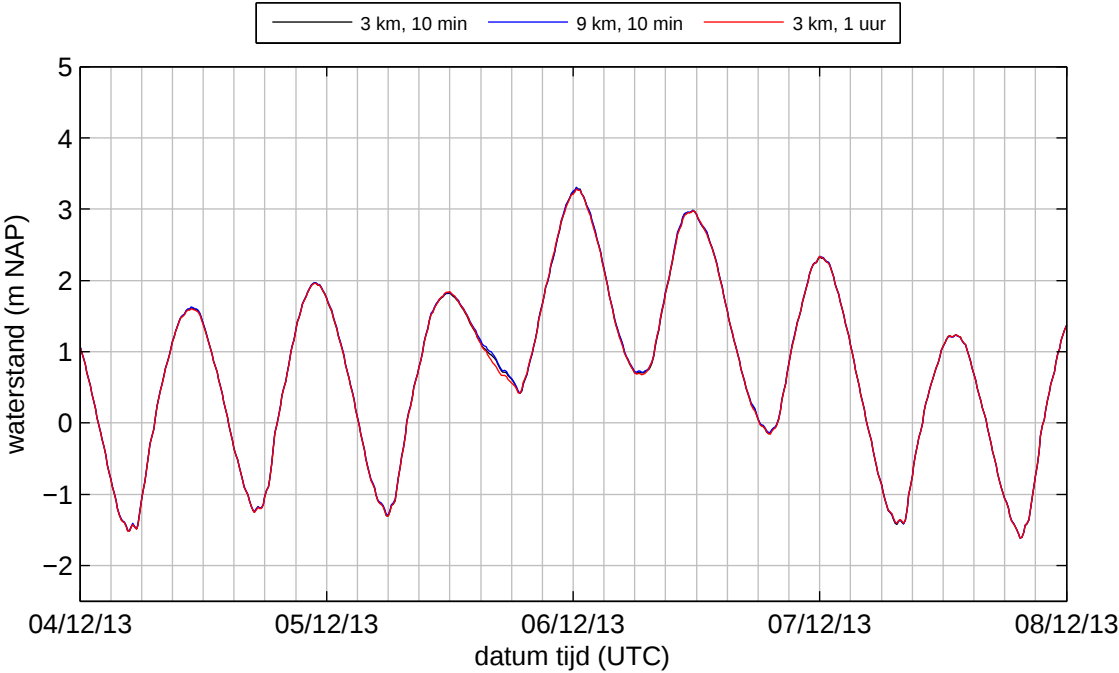
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.14

EEMSHAVEN



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Eemshaven,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

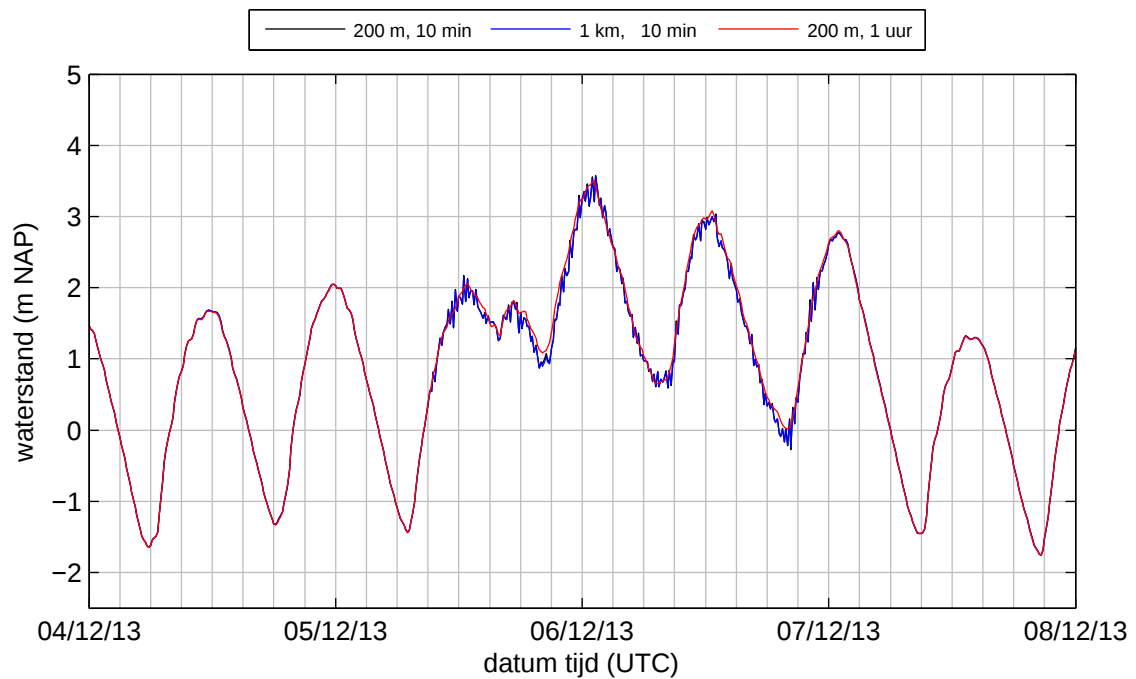
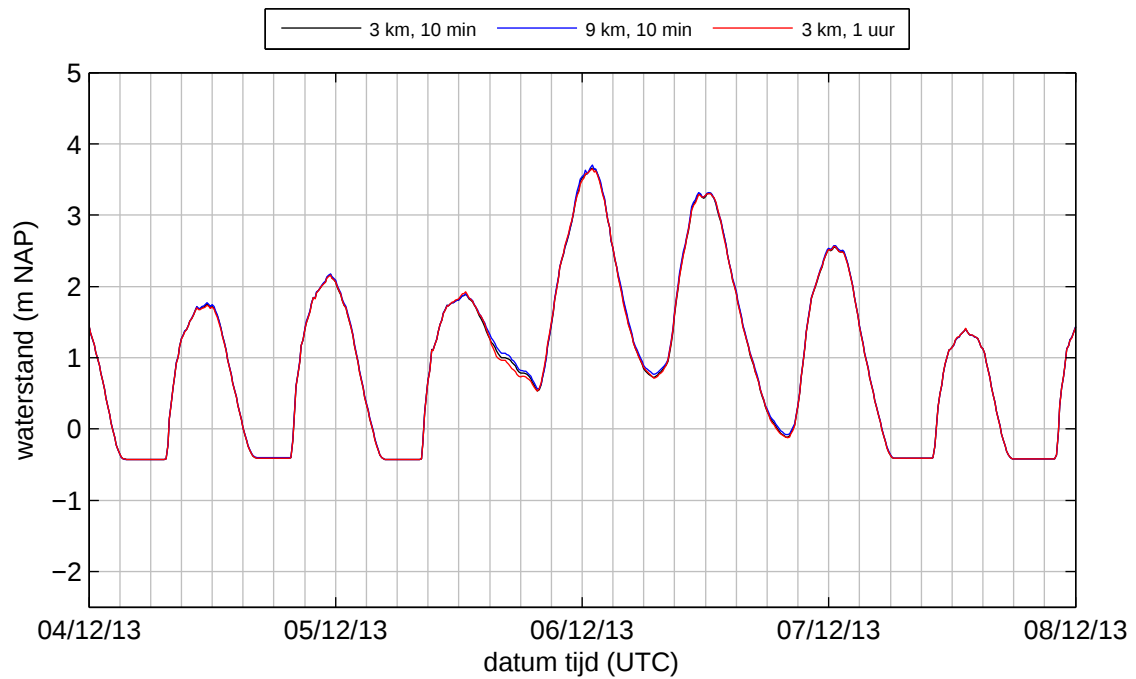
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.15

DELFIJL



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Delfzijl,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

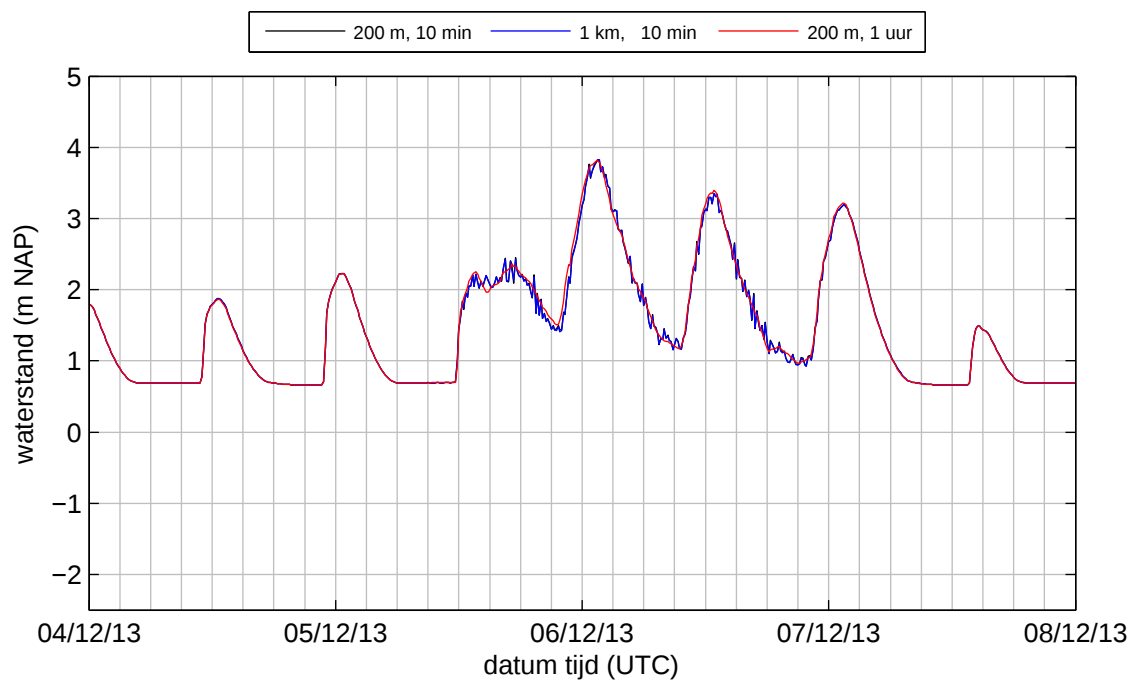
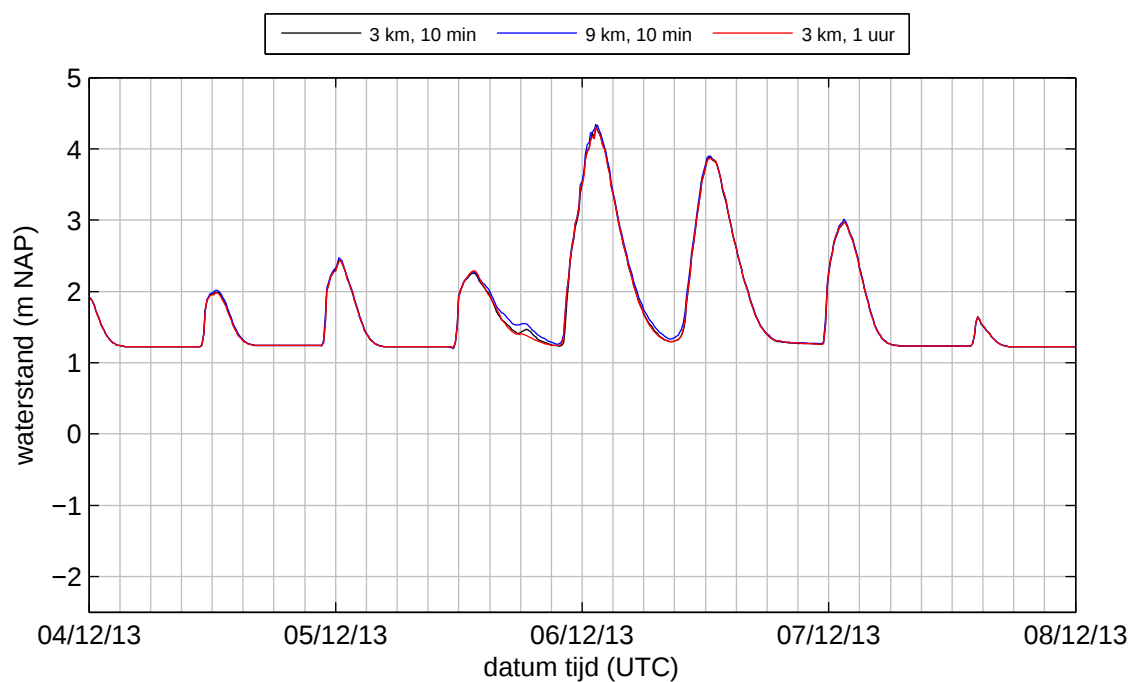
WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. E.16

NIEUWE STATENZIJL



Vergelijking resolutie WRF-NMM voor station Nieuwe Statenzijl,
voor overall model (boven) en detail model (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

WRF-NMM resoluties

Rekenexperiment Waddenzee

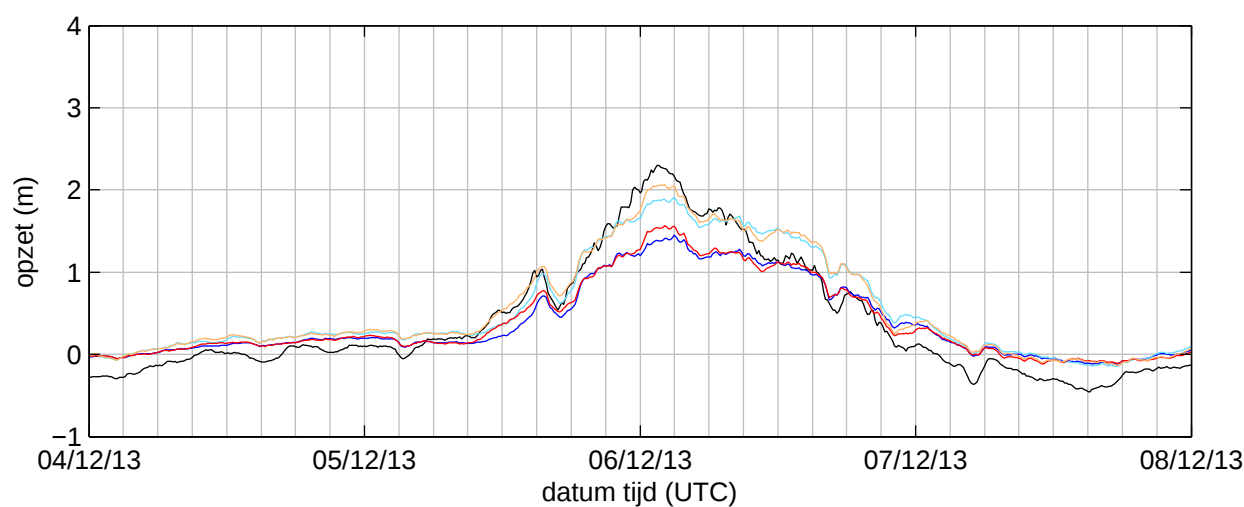
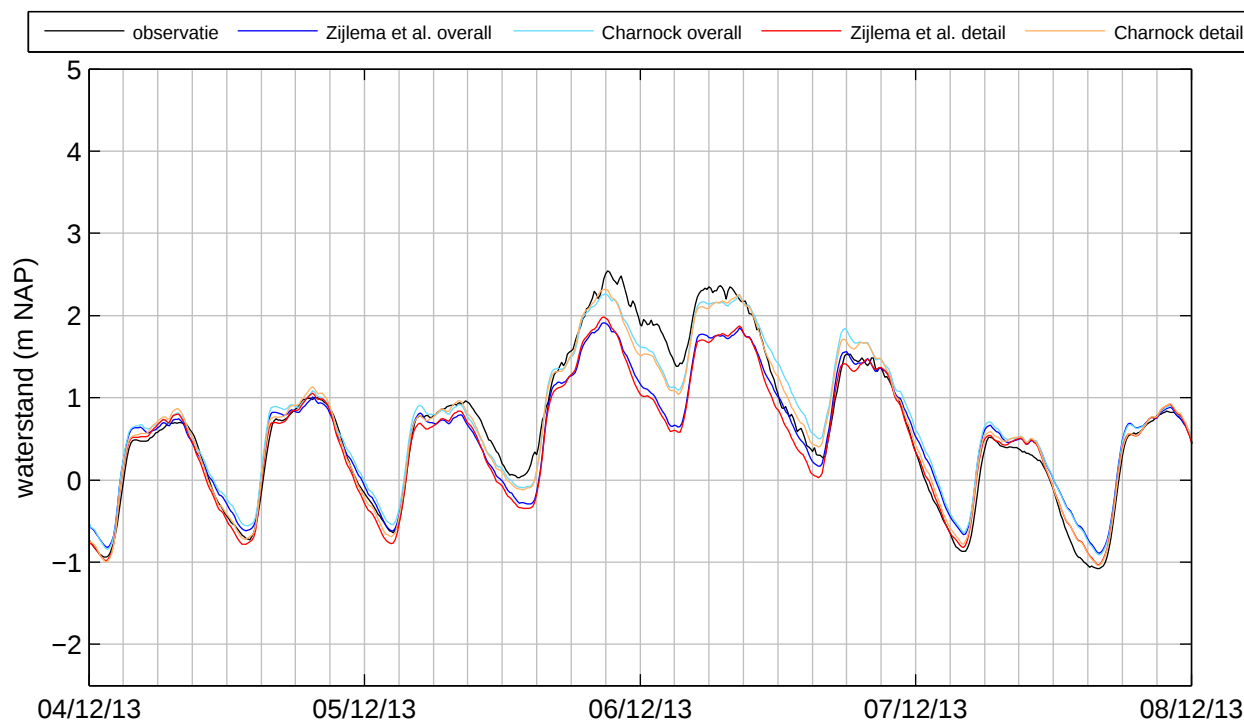
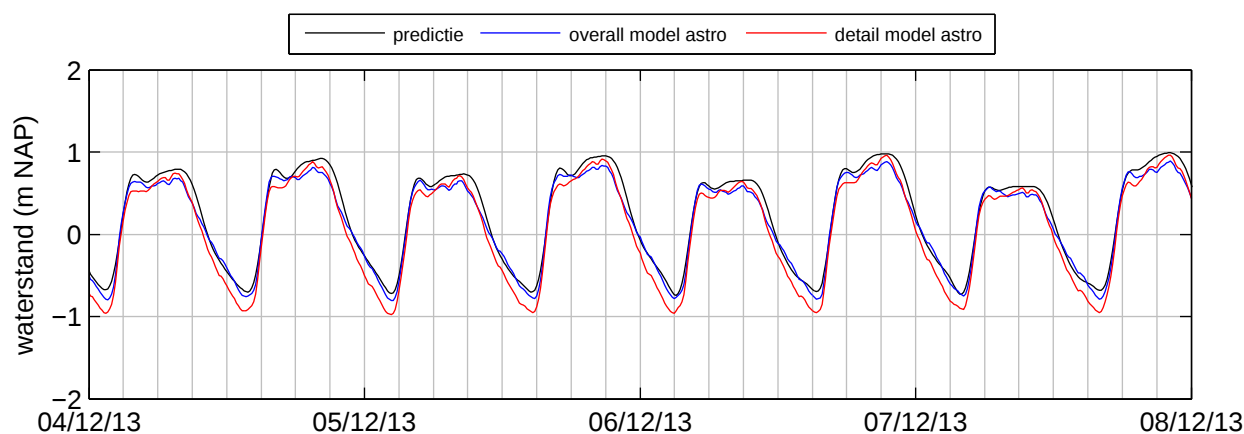
C03041.001941

Fig. E.17

Bijlage F

Gevoeligheid waterstanden voor windschuifspanning formulering

DEN HELDER



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Den Helder, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

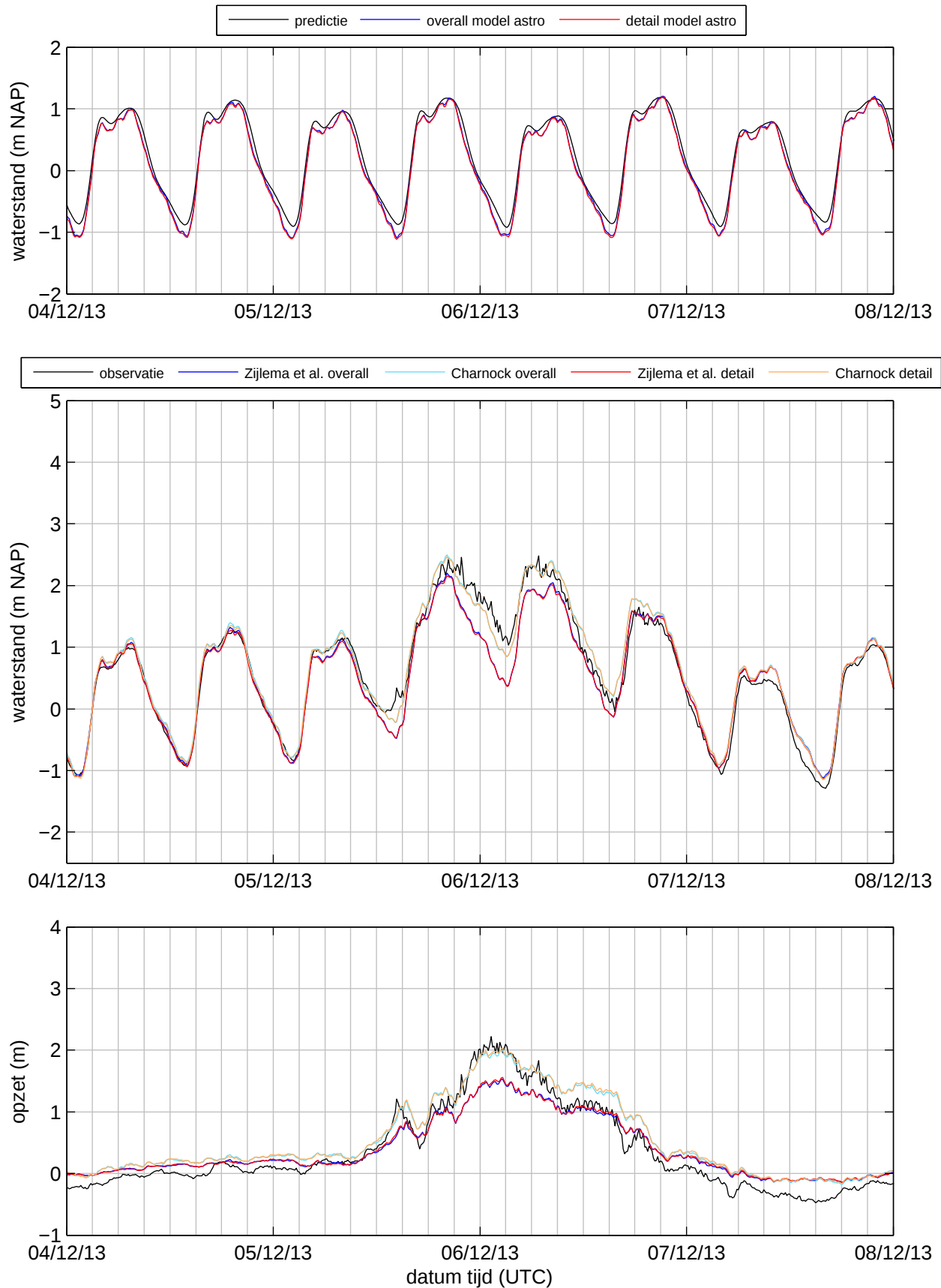
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.1

TEXEL NOORDZEE



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Texel Noordzee, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

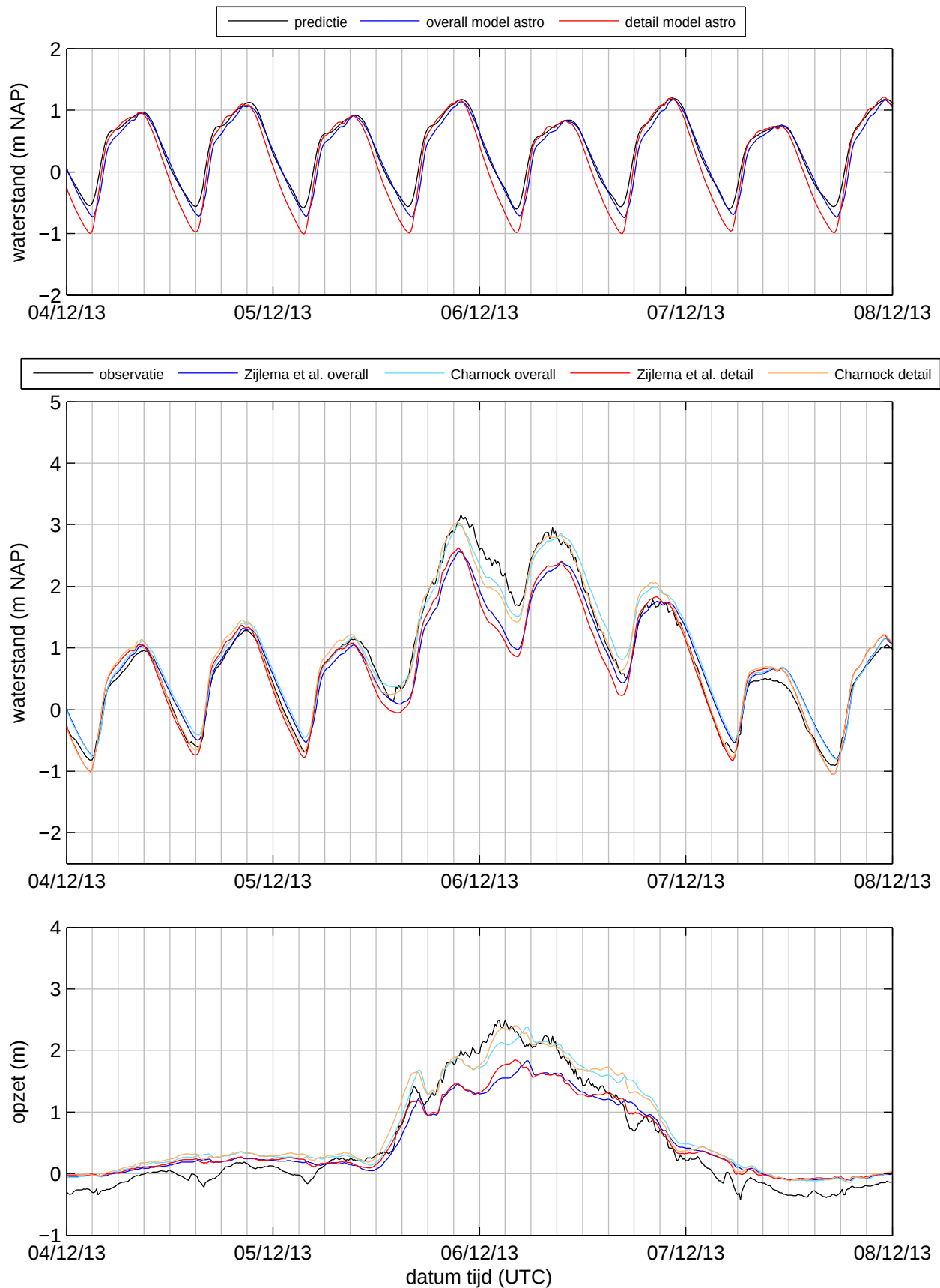
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

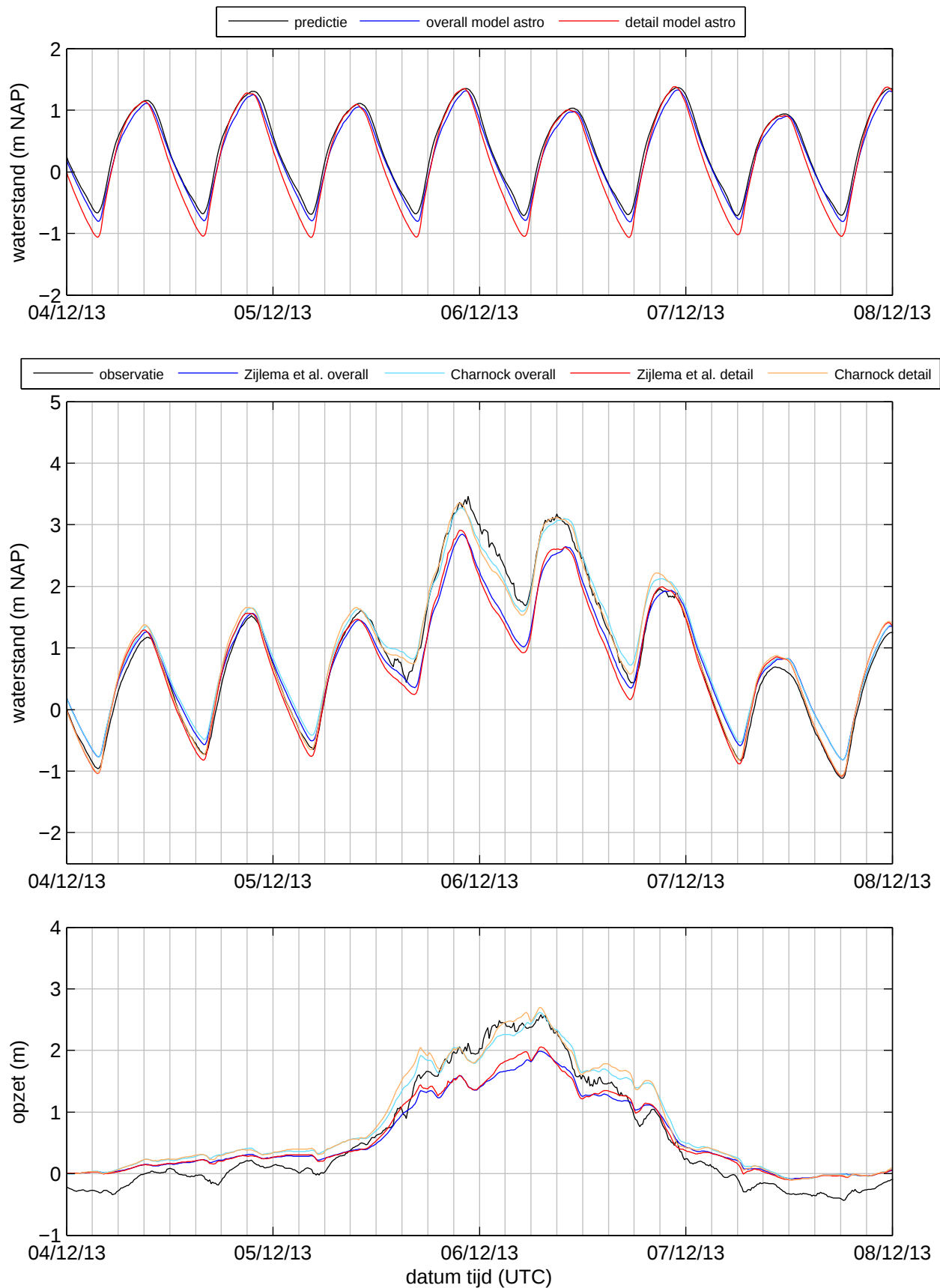
Fig. F.2

DEN OEVER BUITEN



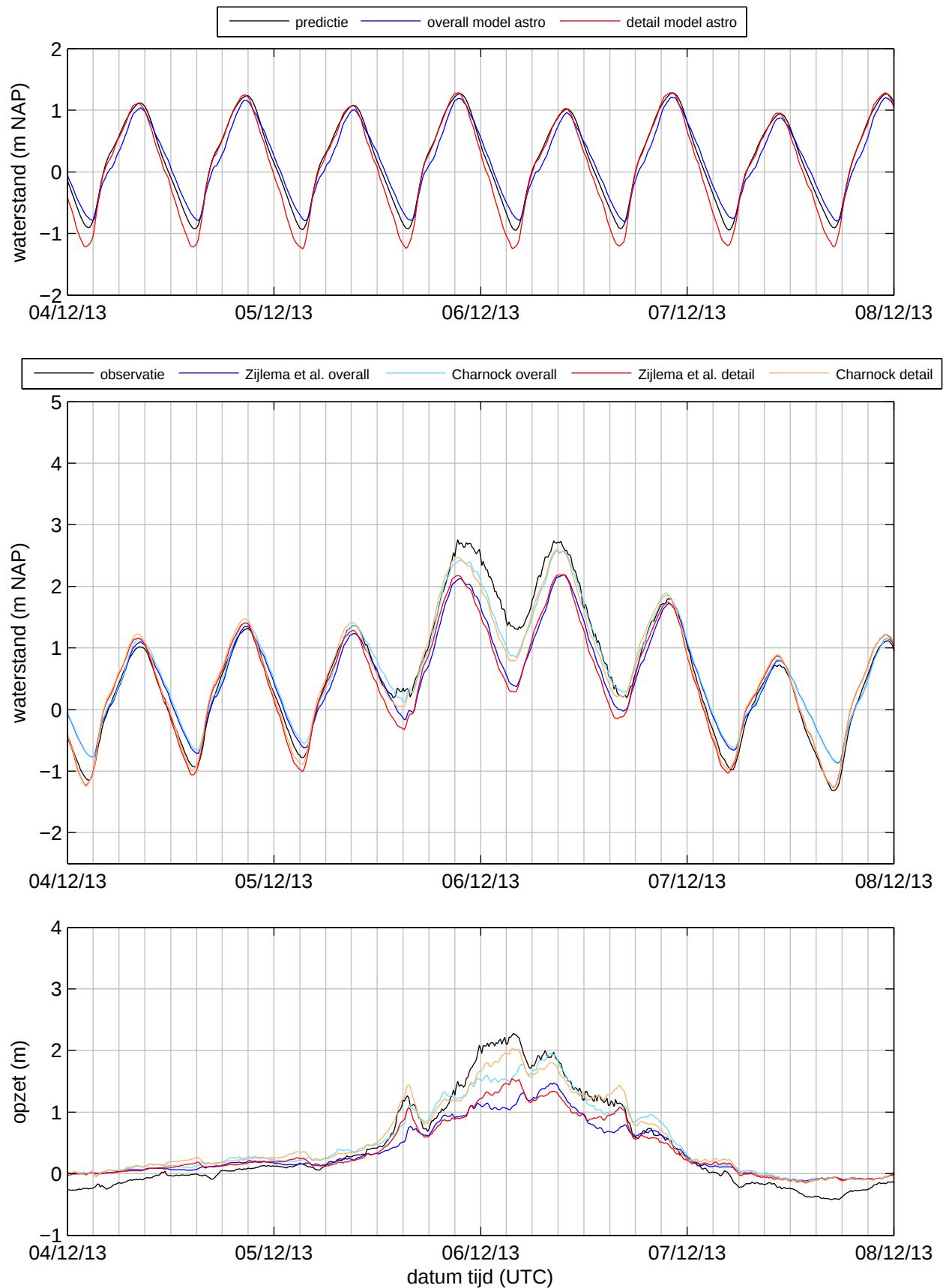
Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Den Oever buiten, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)		zonder golven
	Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock	
Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941	Fig. F.3

KORNWERDERZAND BUI



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Kornwerderzand bui, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)		zonder golven
	Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock	
Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941	Fig. F.4

VLIELAND HAVEN



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Vlieland haven,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

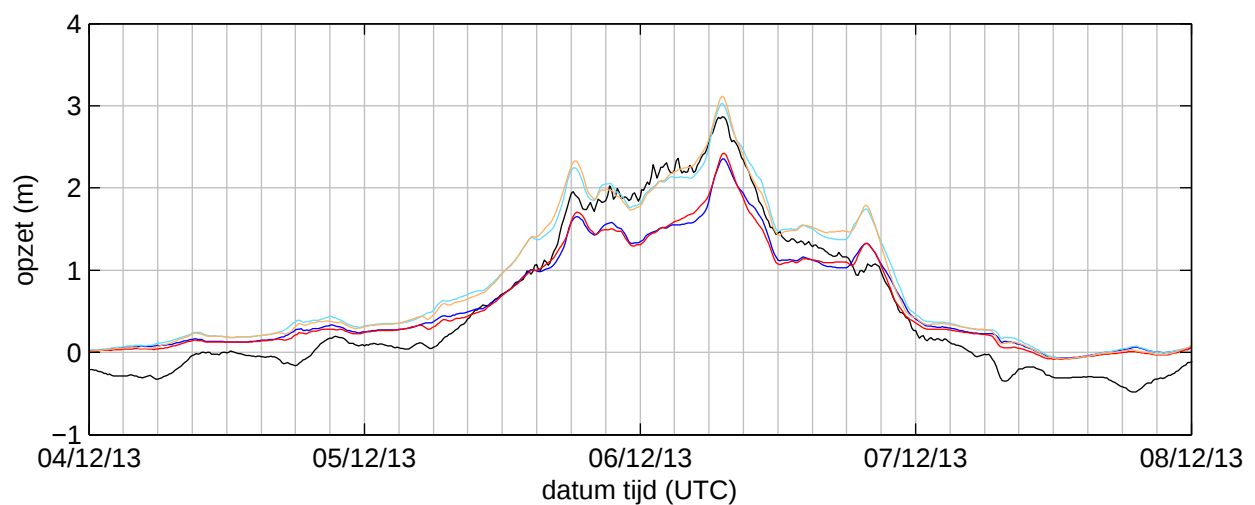
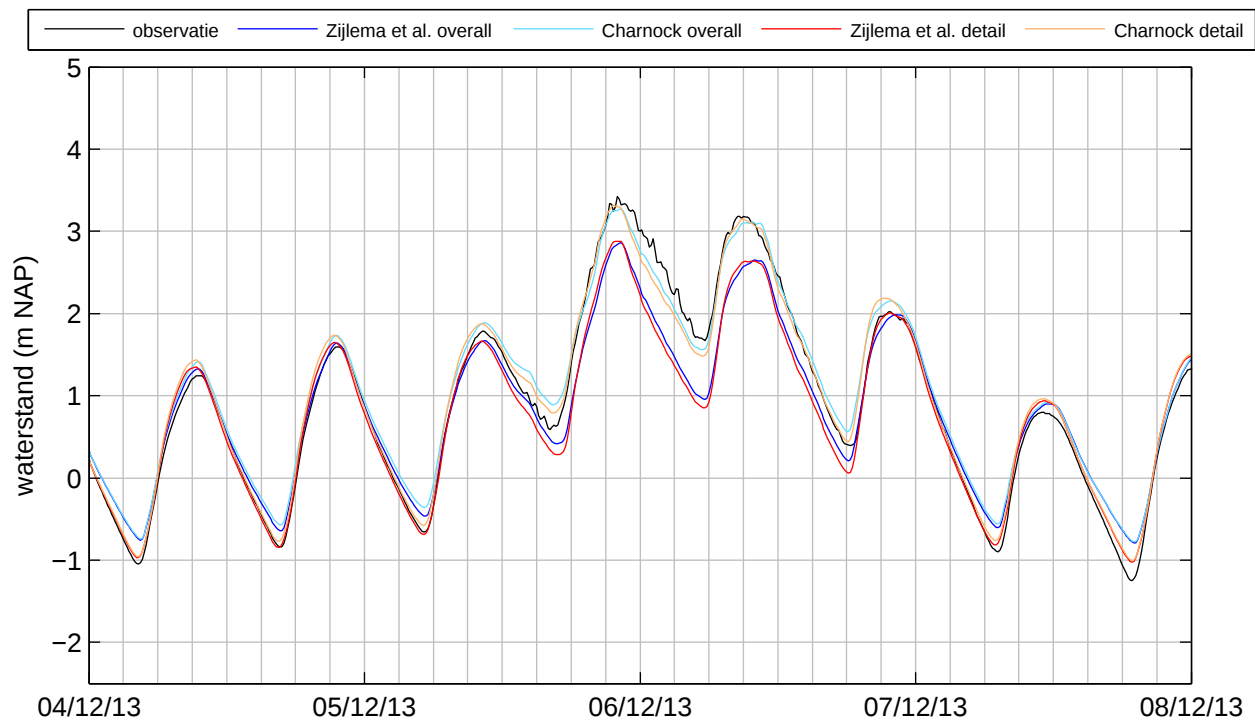
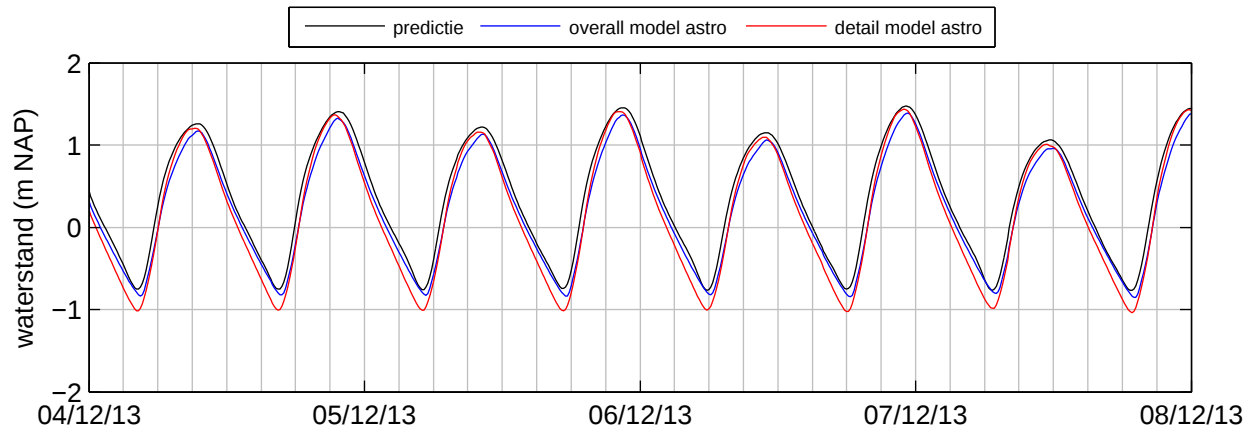
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.5

HARLINGEN



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Harlingen,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

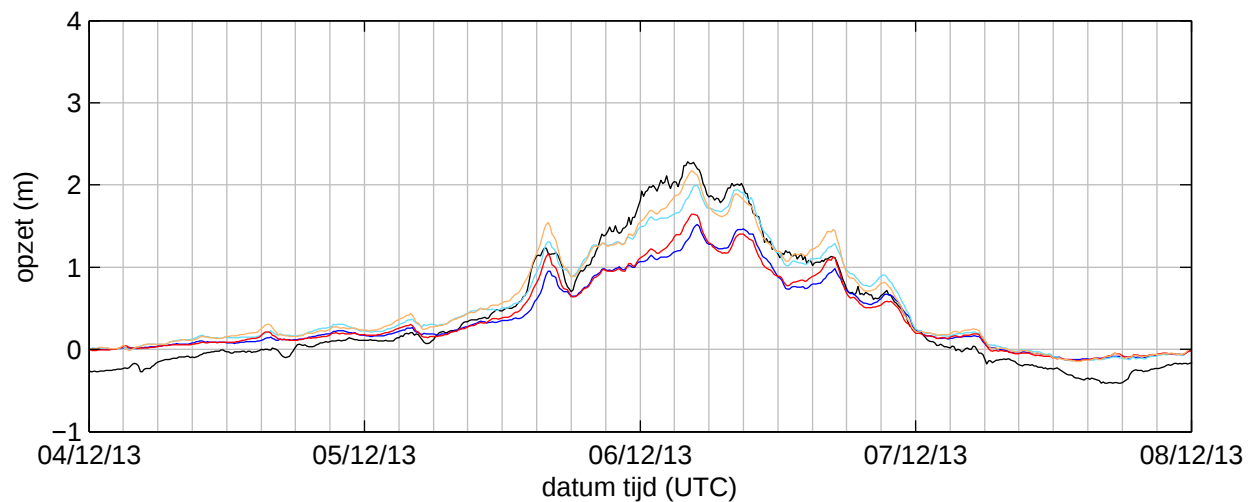
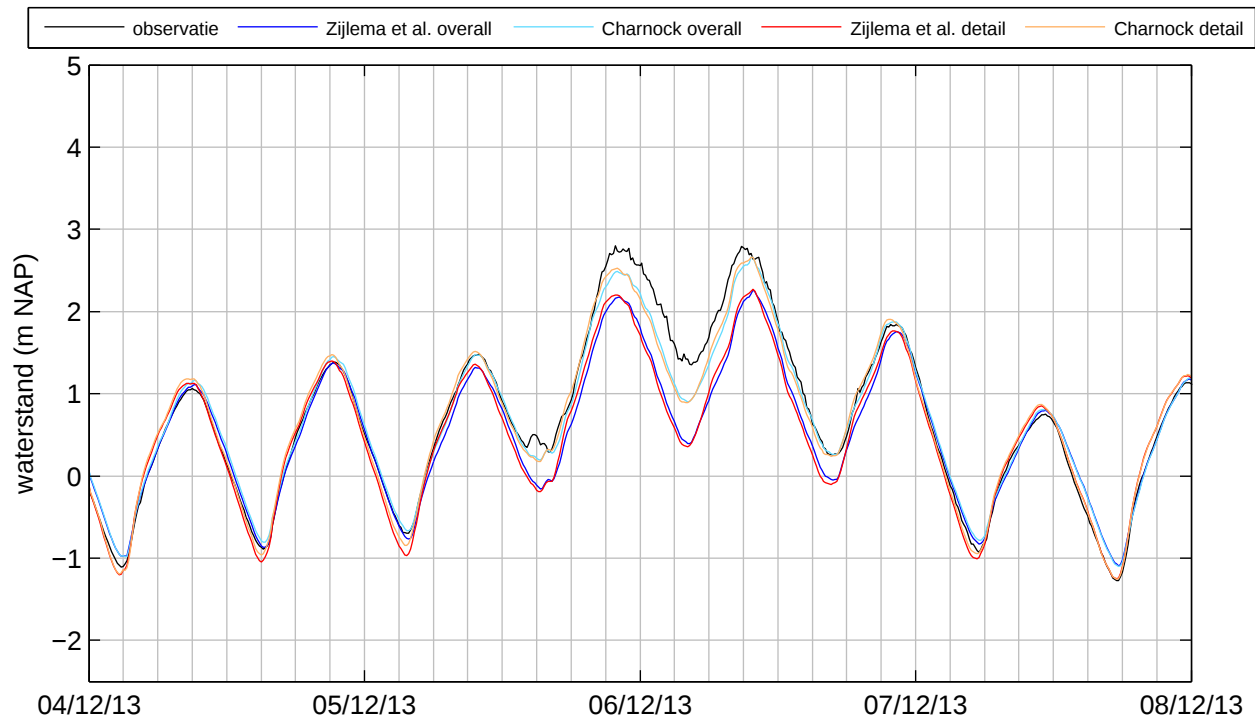
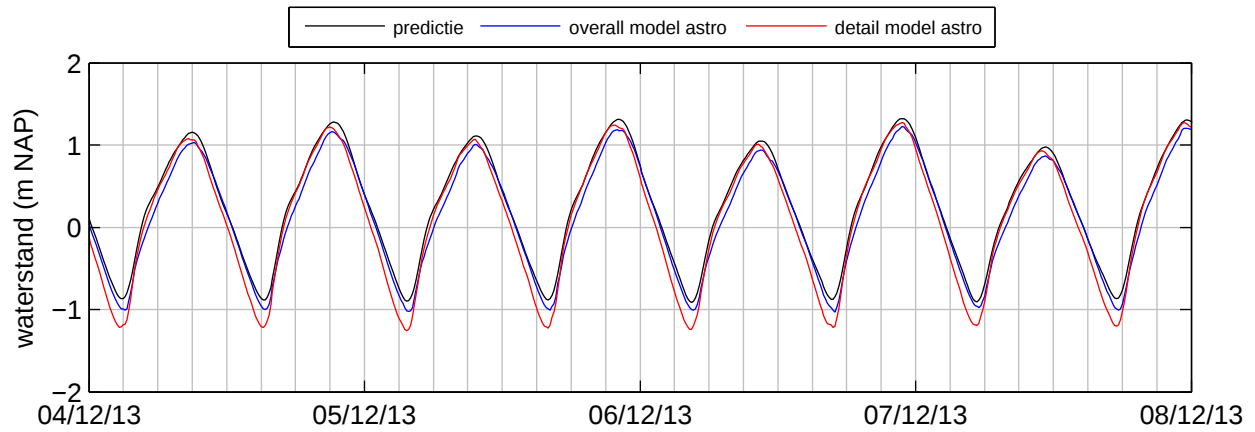
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.6

WEST-TERSCHELLING



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station West-Terschelling, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

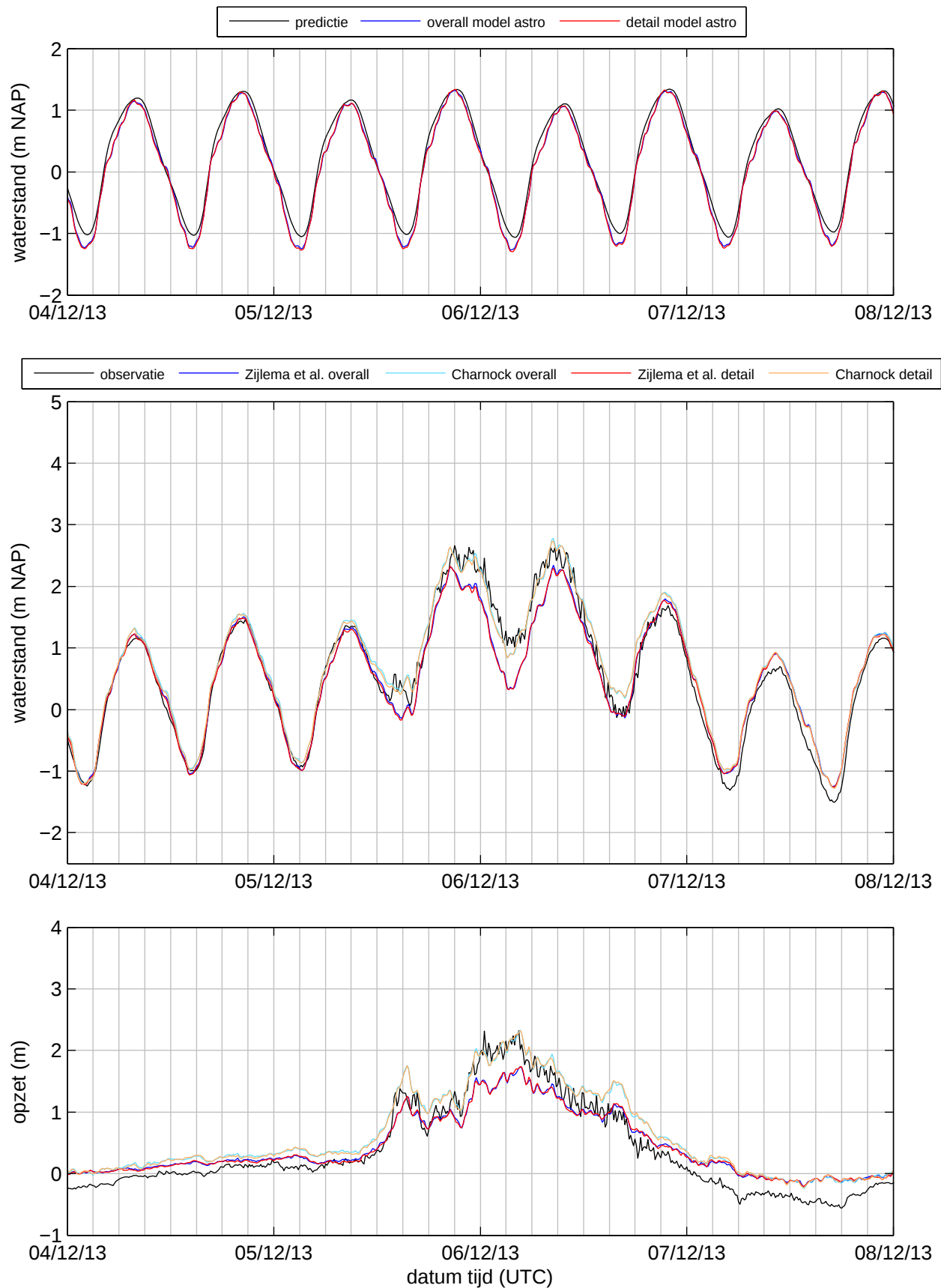
zonder golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.7

TERSCHELLING NRDZ



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Terschelling Nrdz, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

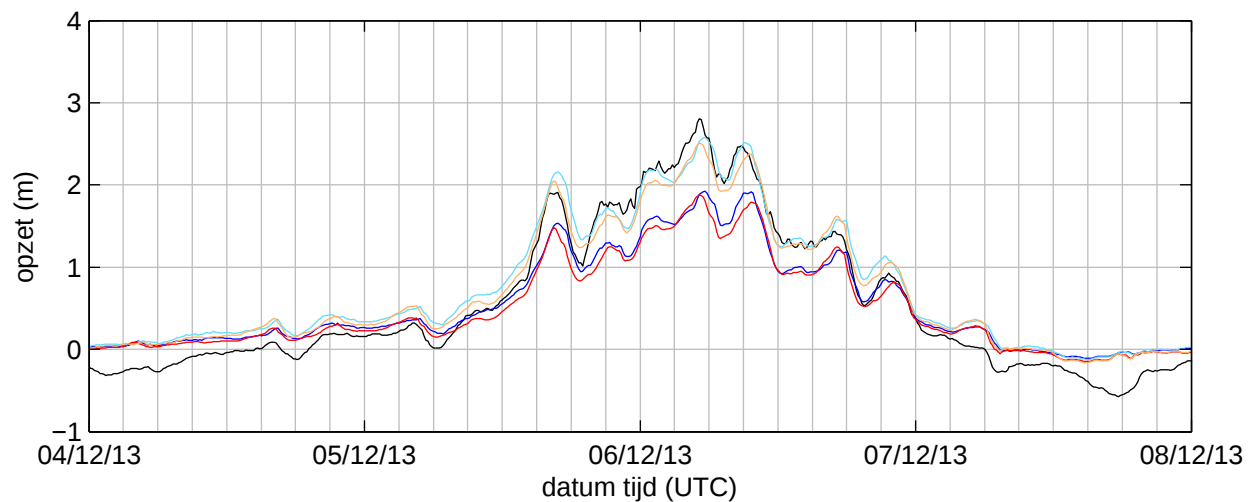
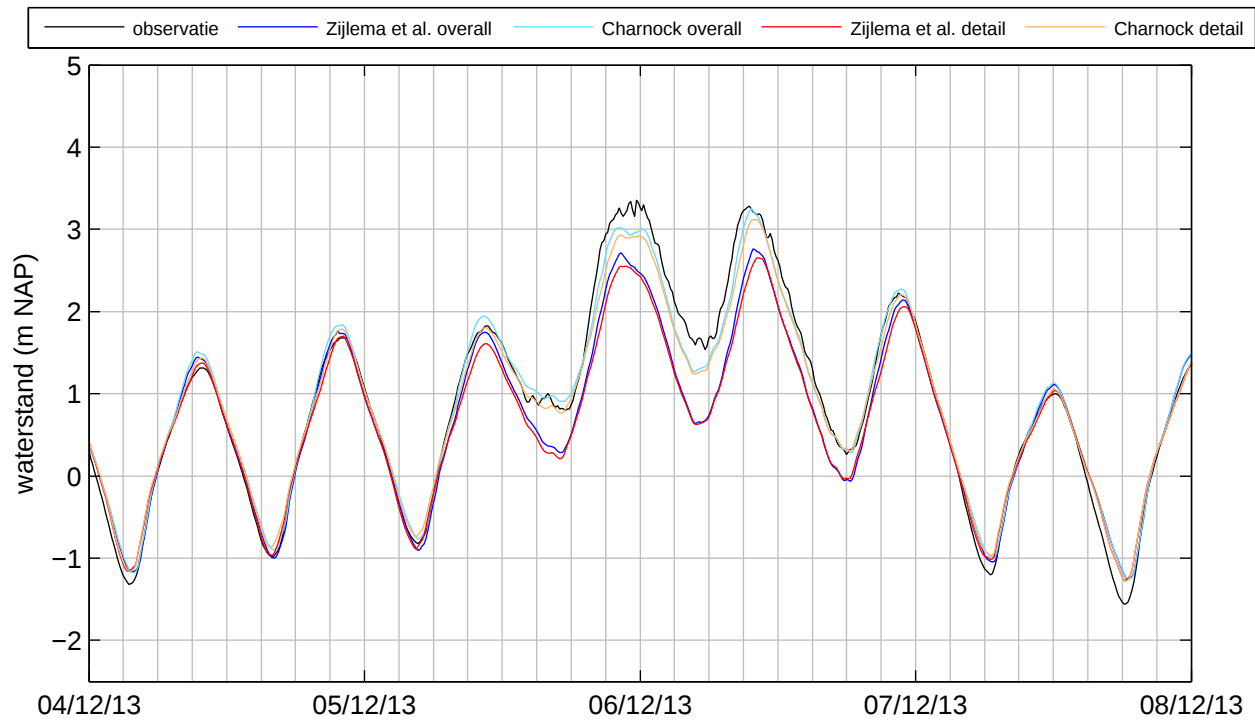
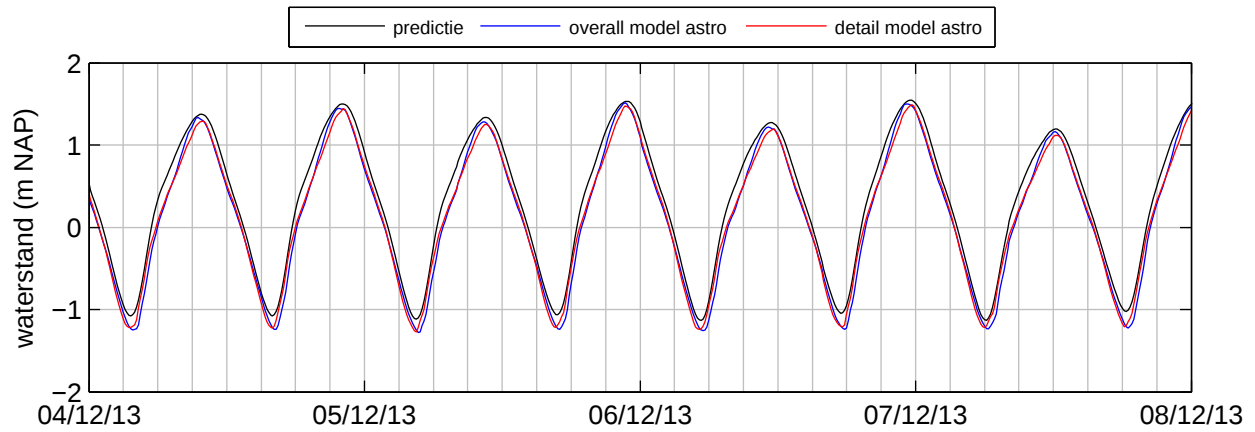
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.8

NES



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Nes,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

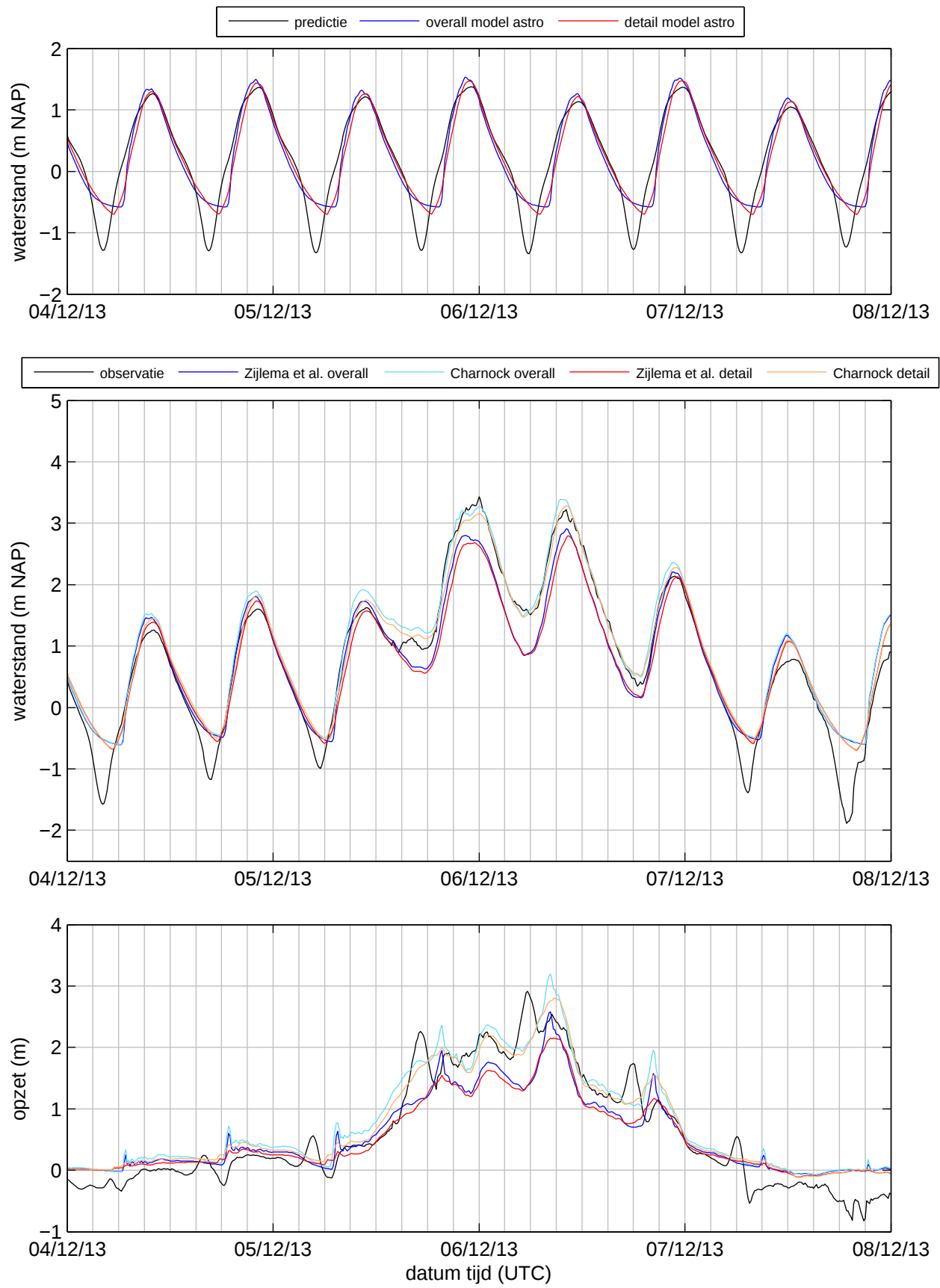
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.9

HOLWERD

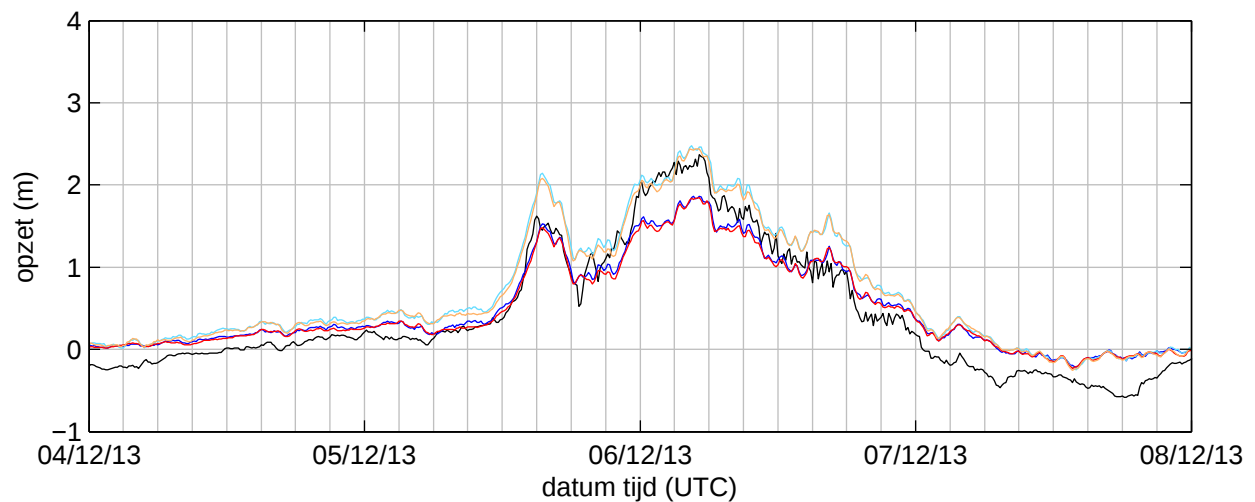
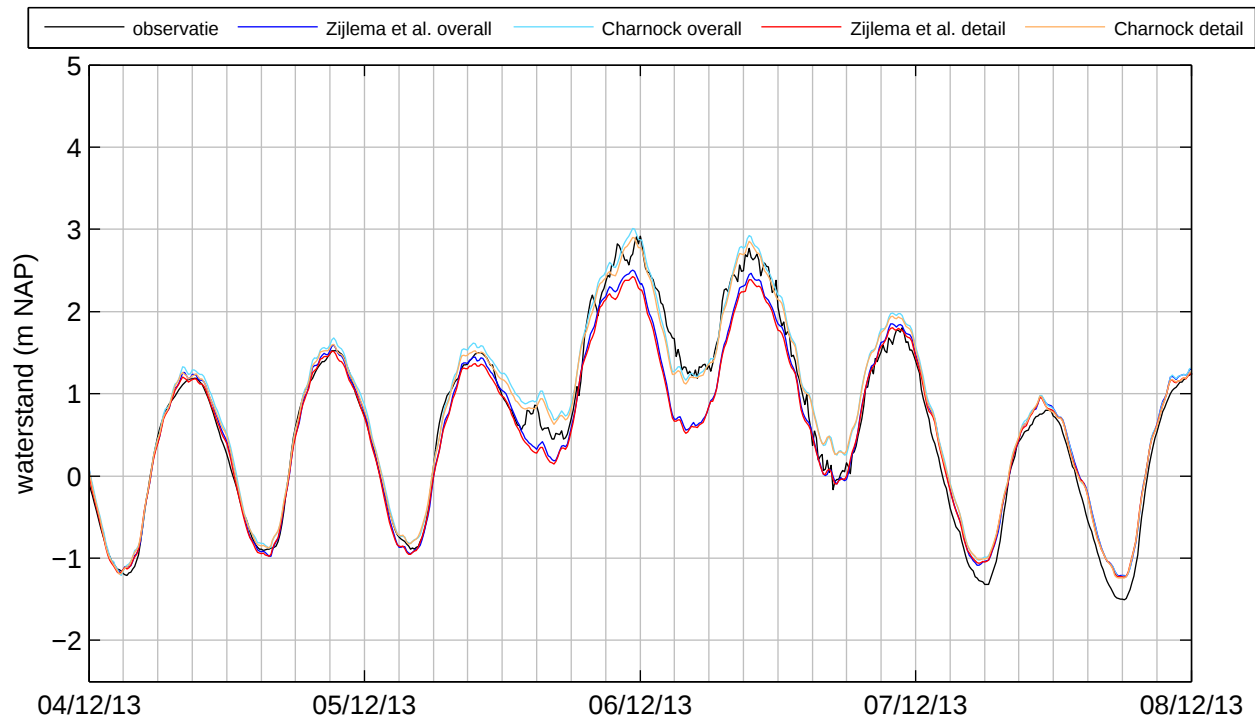
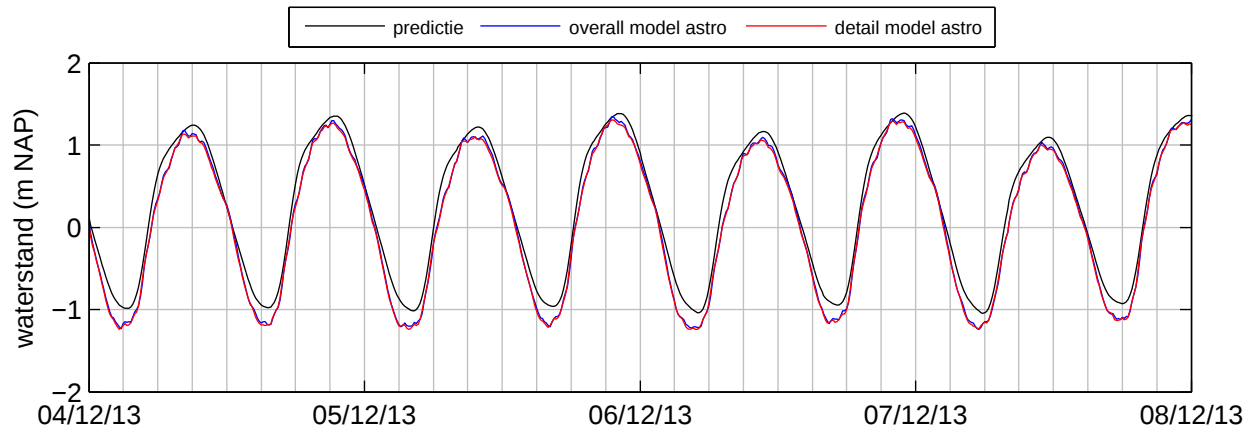


Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Holwerd,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

WIERUMERGRONDEN



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Wierumergronden,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

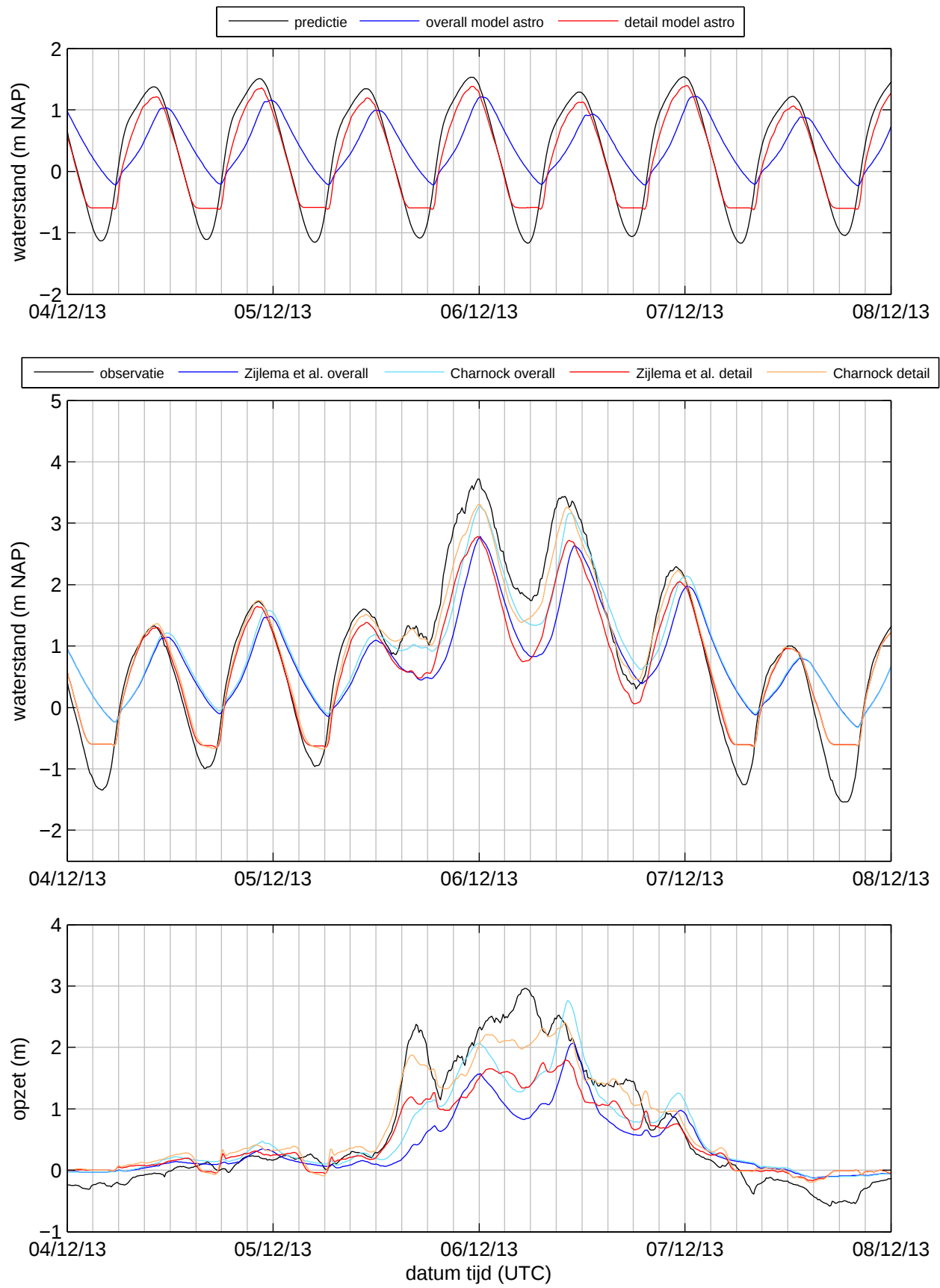
zonder golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.11

LAUWERSOOG

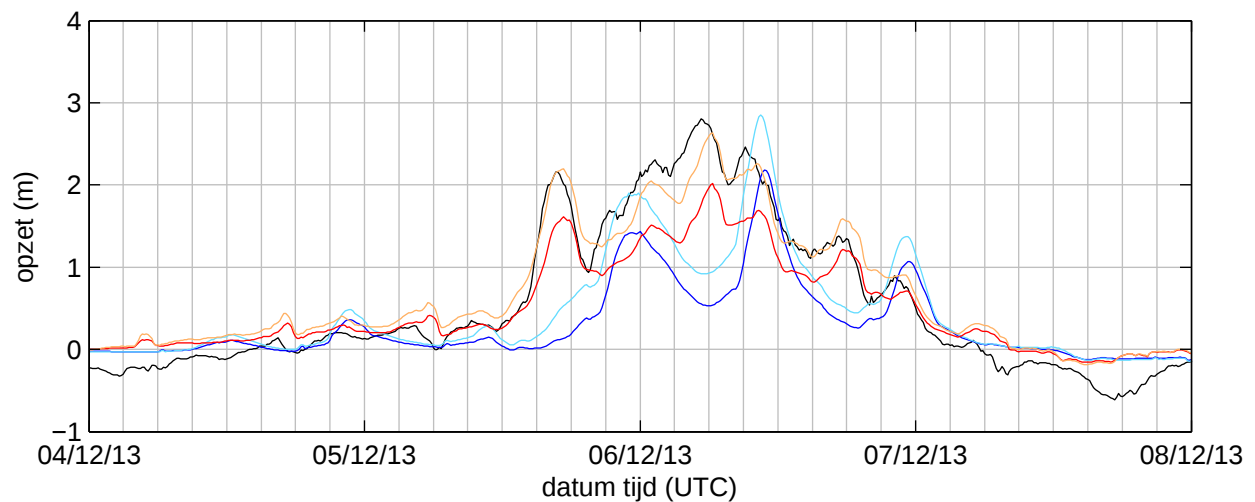
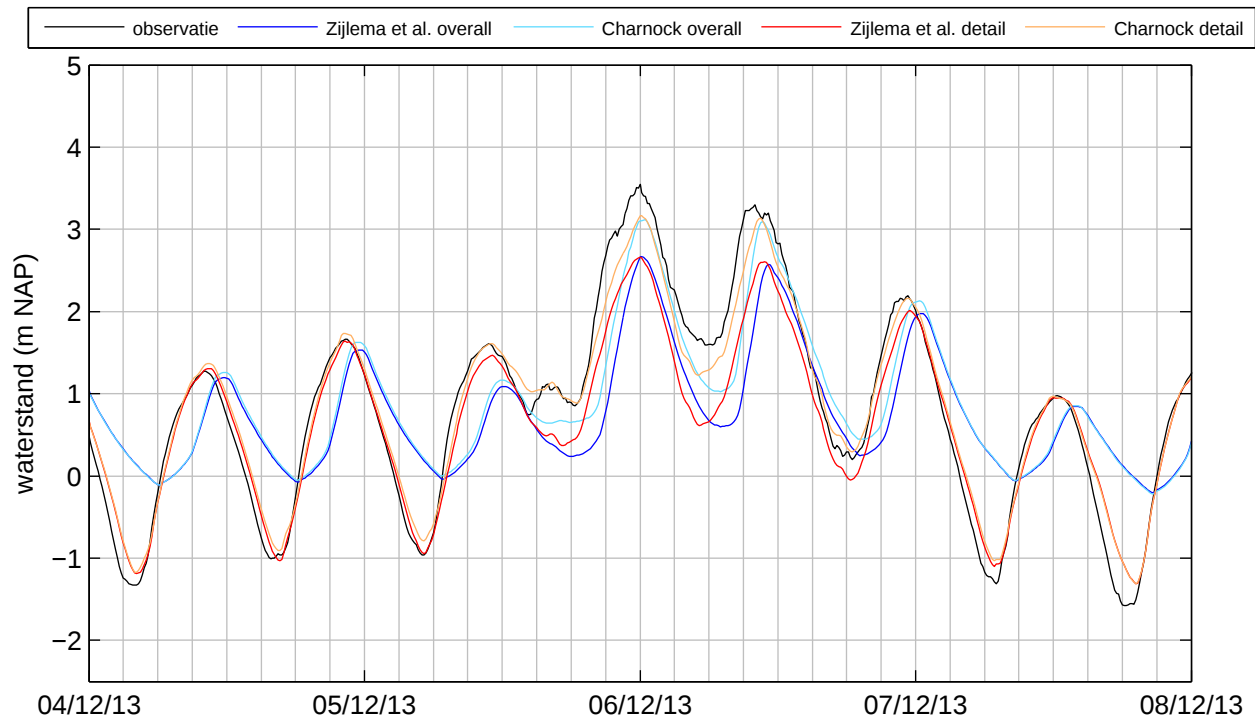
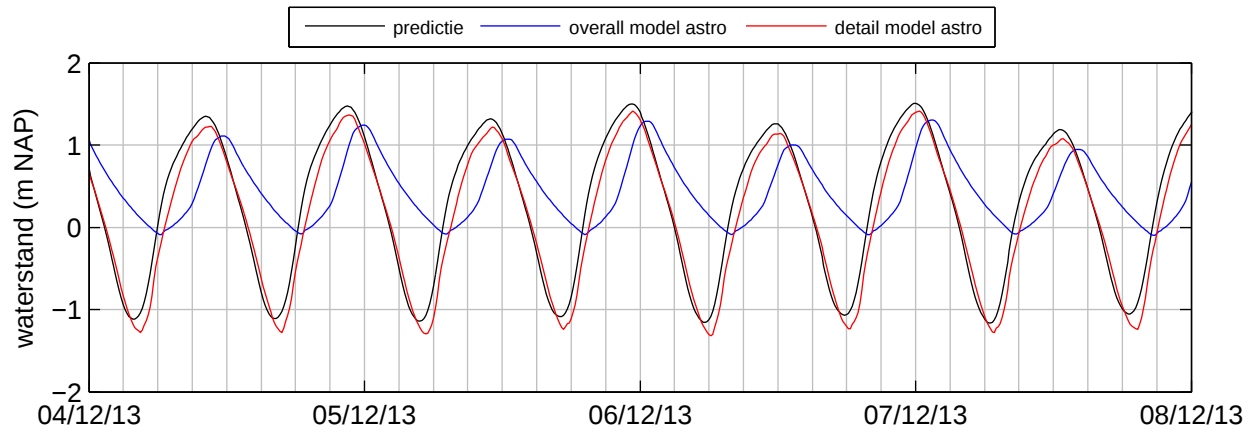


Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Lauwersoog, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

SCHIERMONNIKOOG



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Schiermonnikoog, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

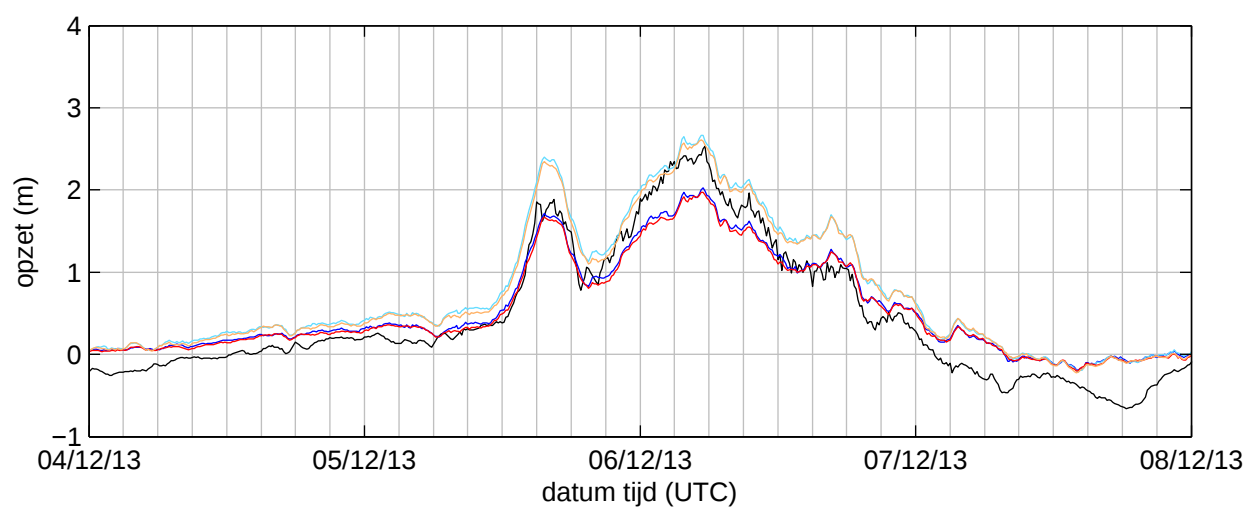
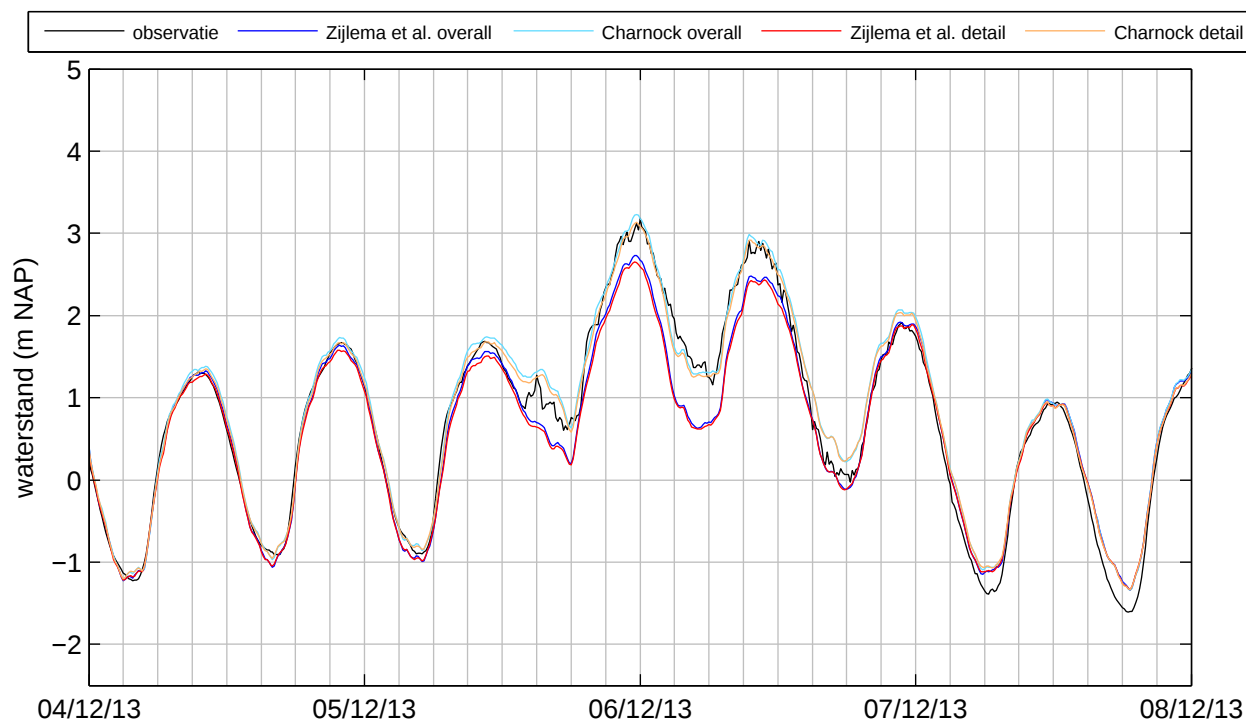
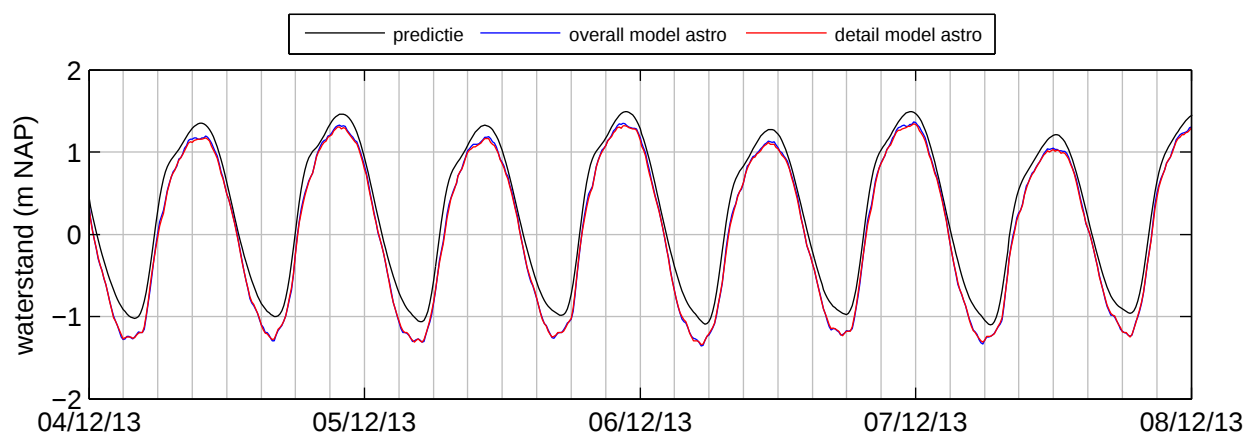
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.13

HUIBERTGAT



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Huibertgat,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

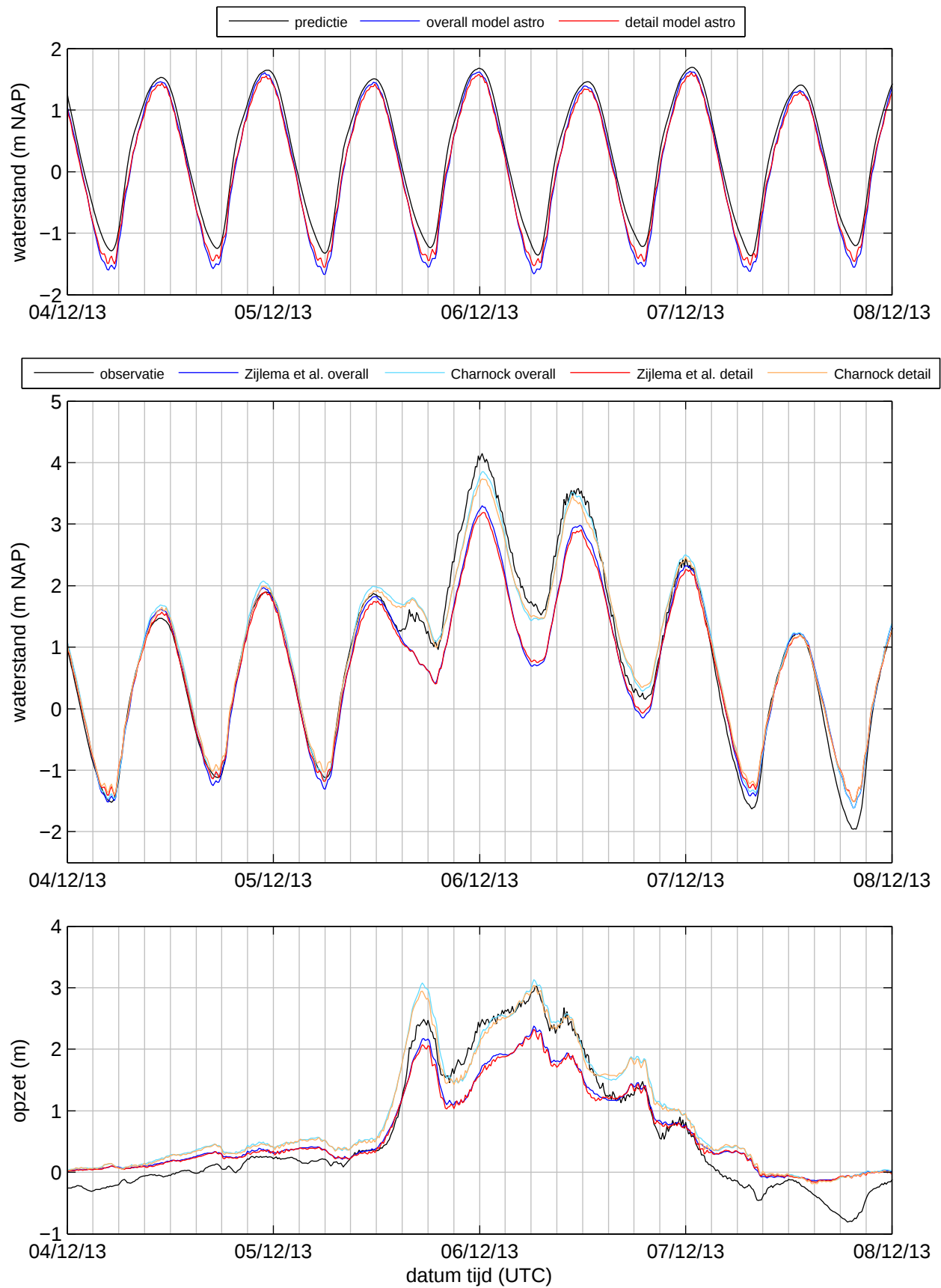
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.14

EEMSHAVEN

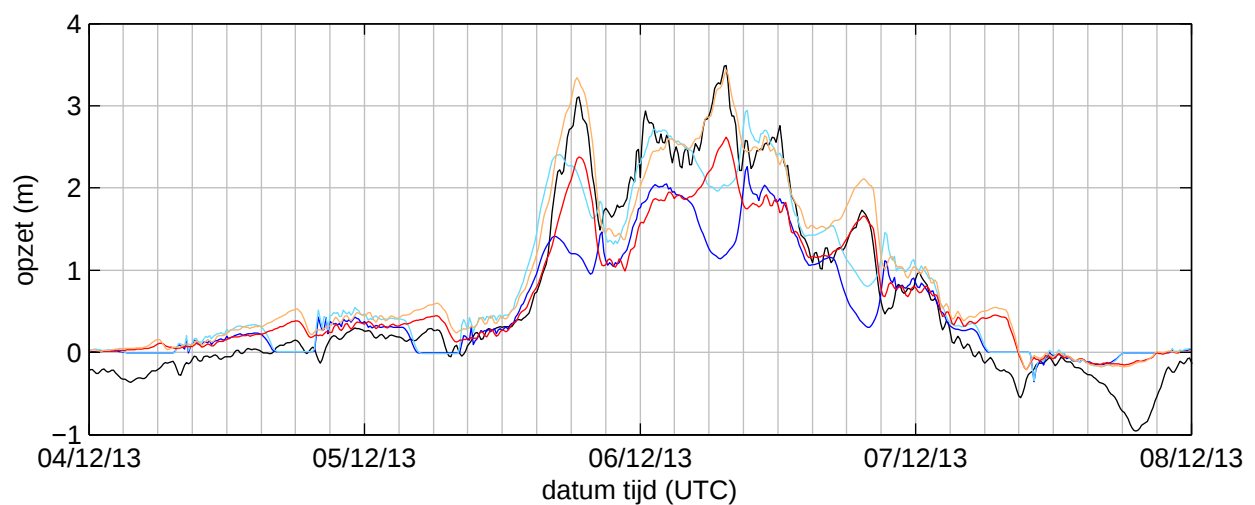
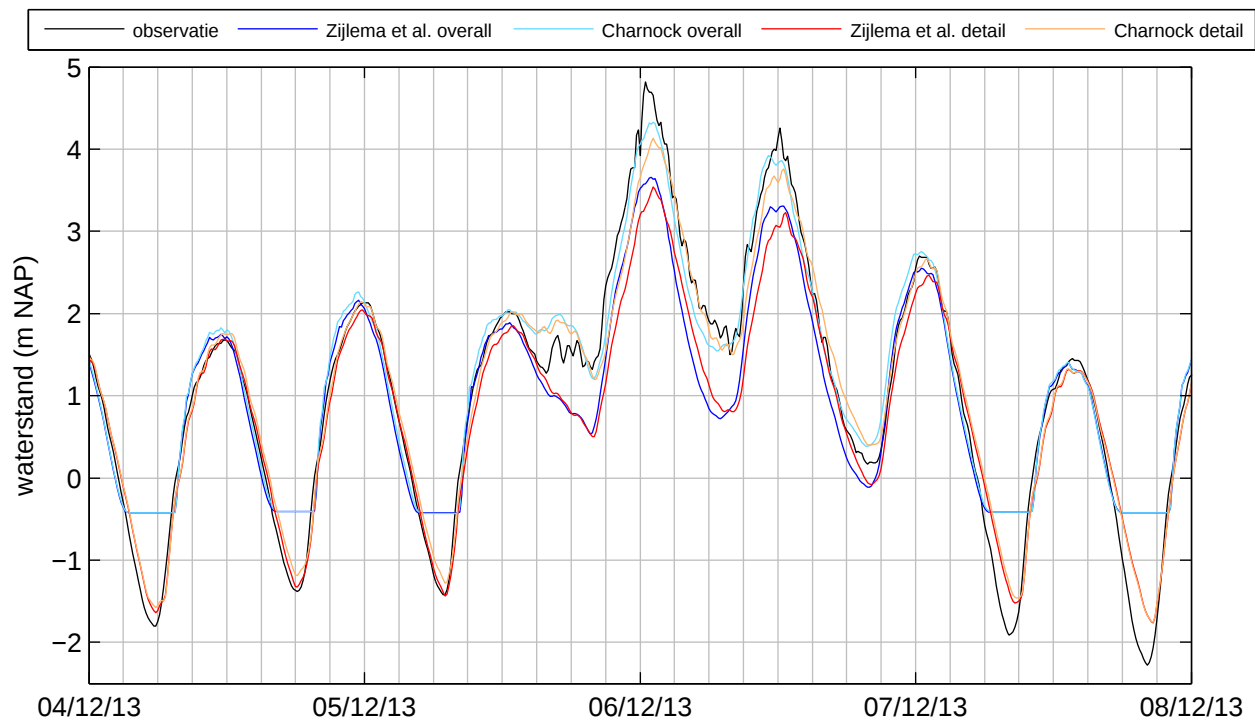
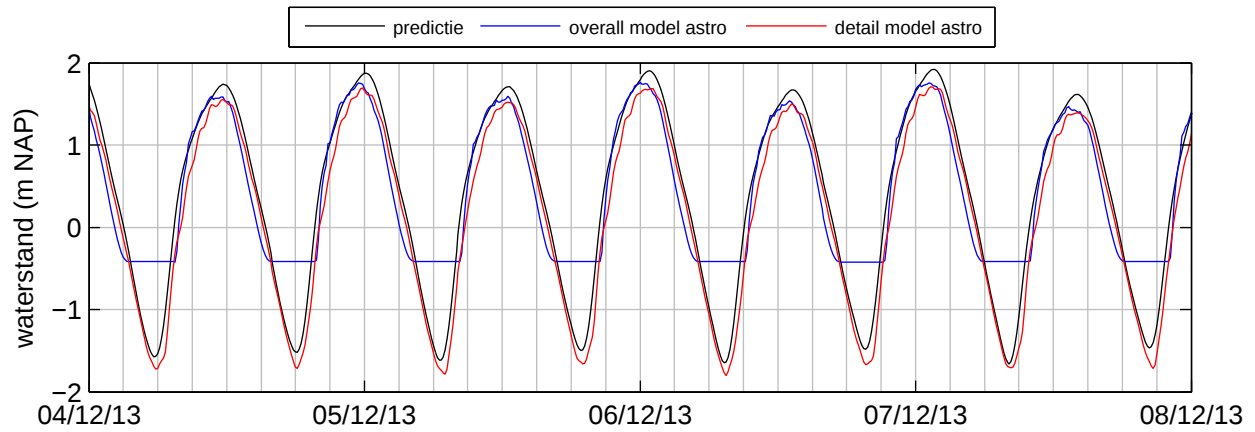


Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Eemshaven, voor overall en detail model: astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

DELFIJL



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Delfzijl,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

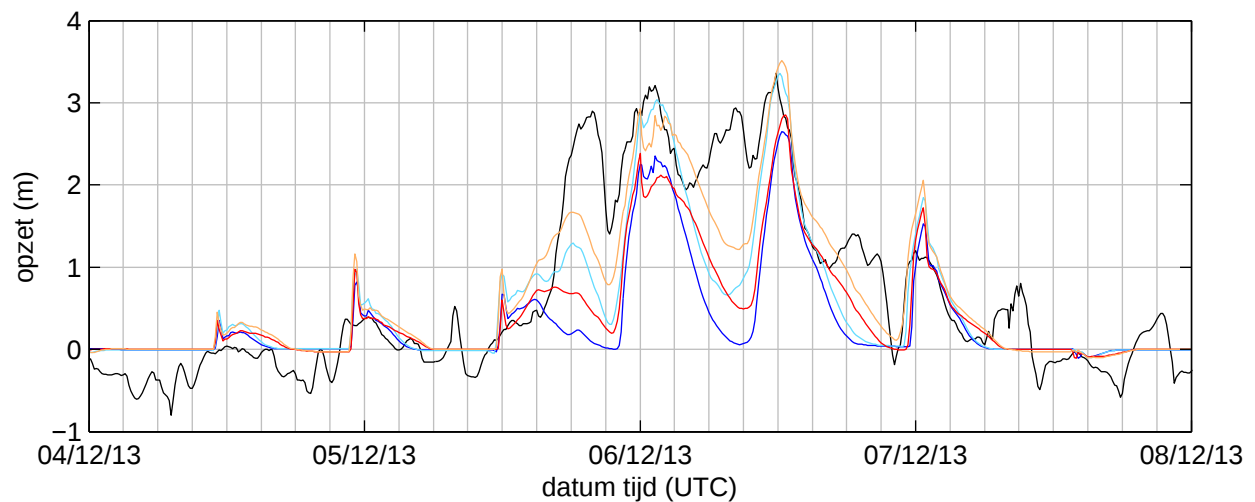
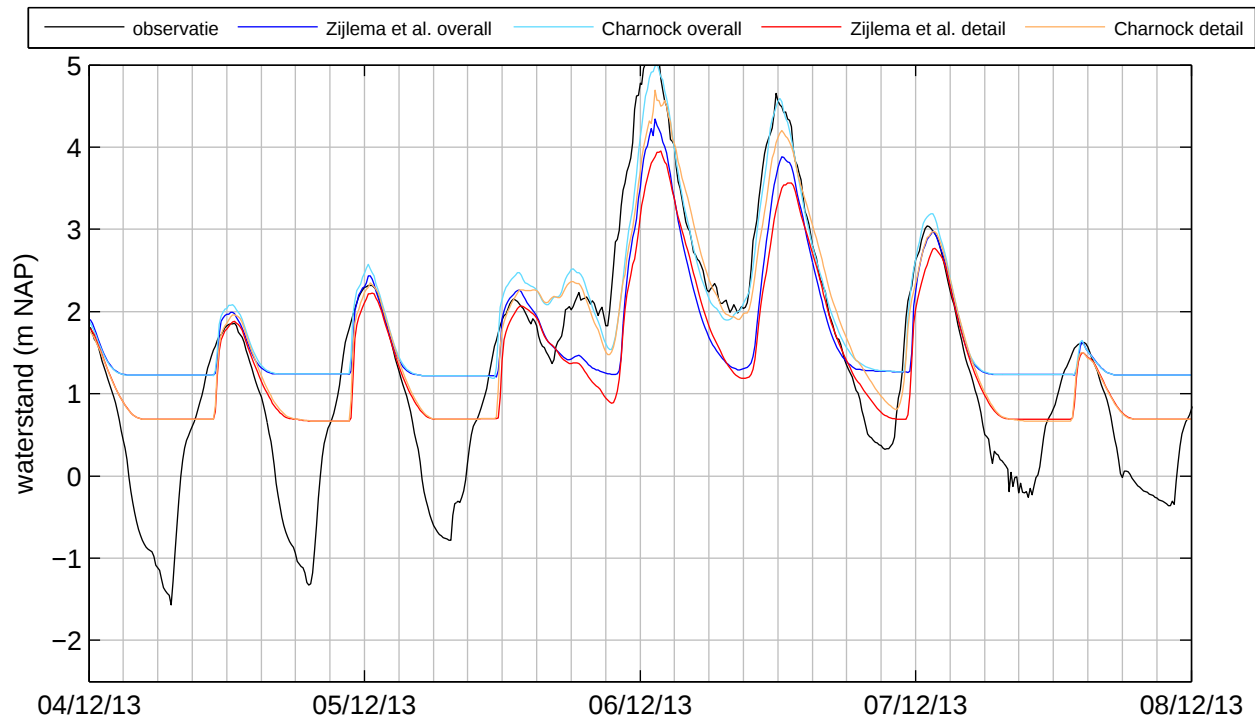
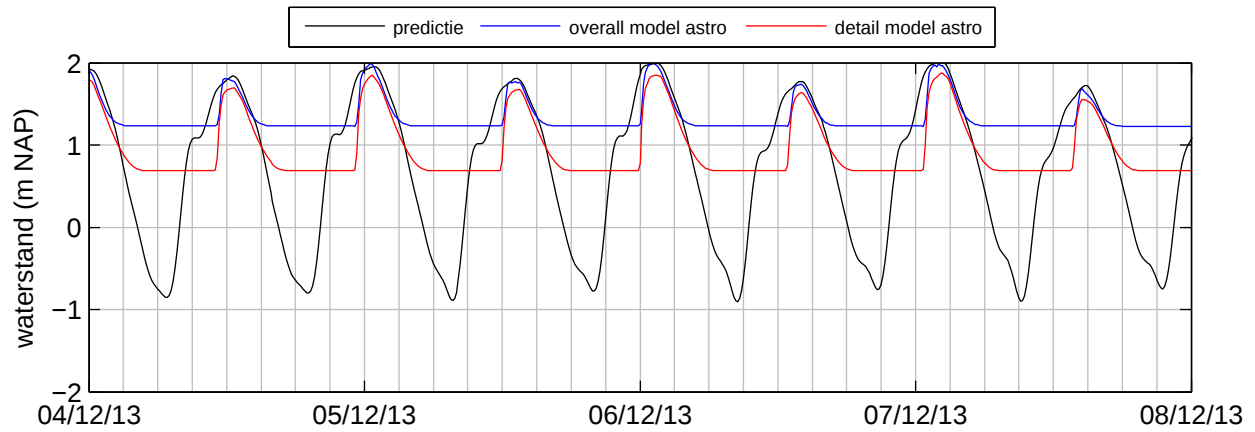
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. F.16

NIEUWE STATENZIJL



Vergelijking Cd-Zijlema et al. en Cd-Charnock voor station Nieuwe Statenzijl,
voor overall en detail model: astronomische component (boven),
totale waterstand (midden) en opzet (onder)

zonder golven

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

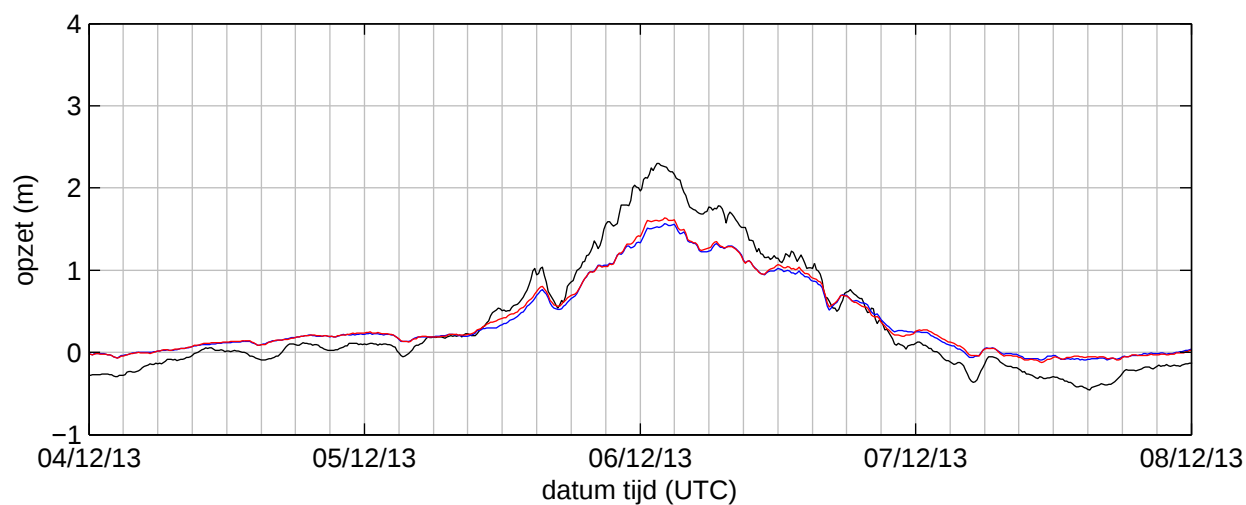
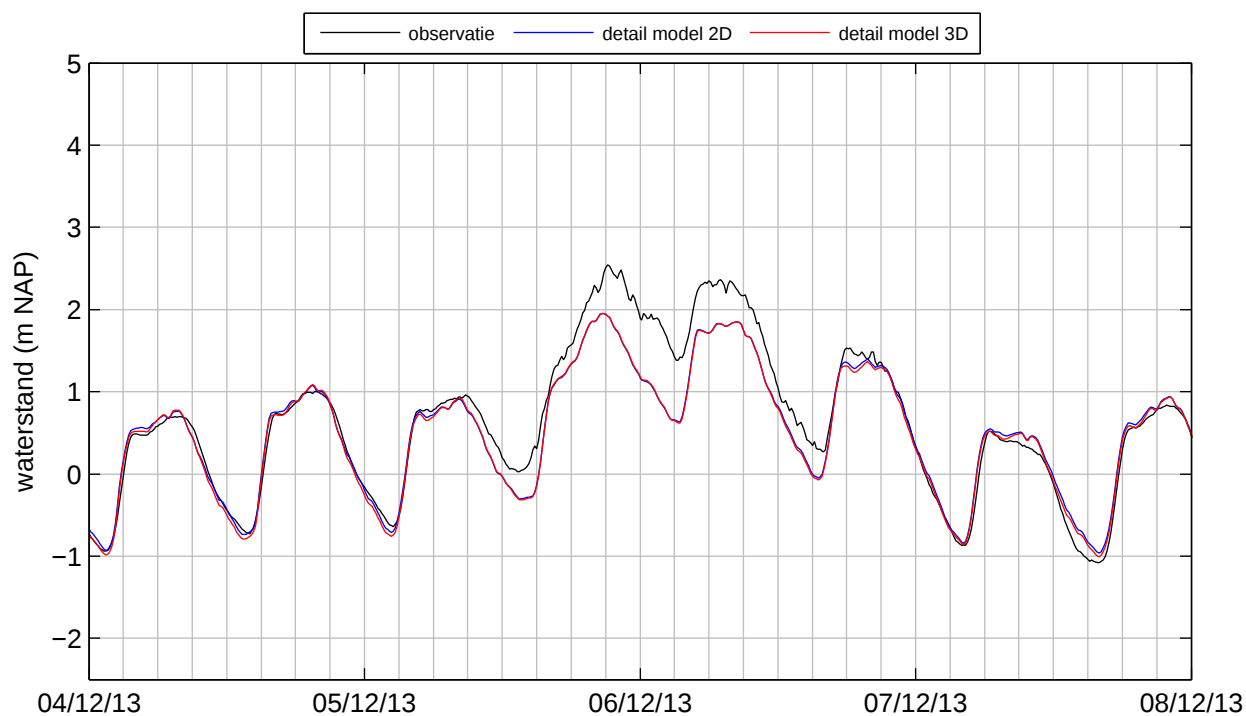
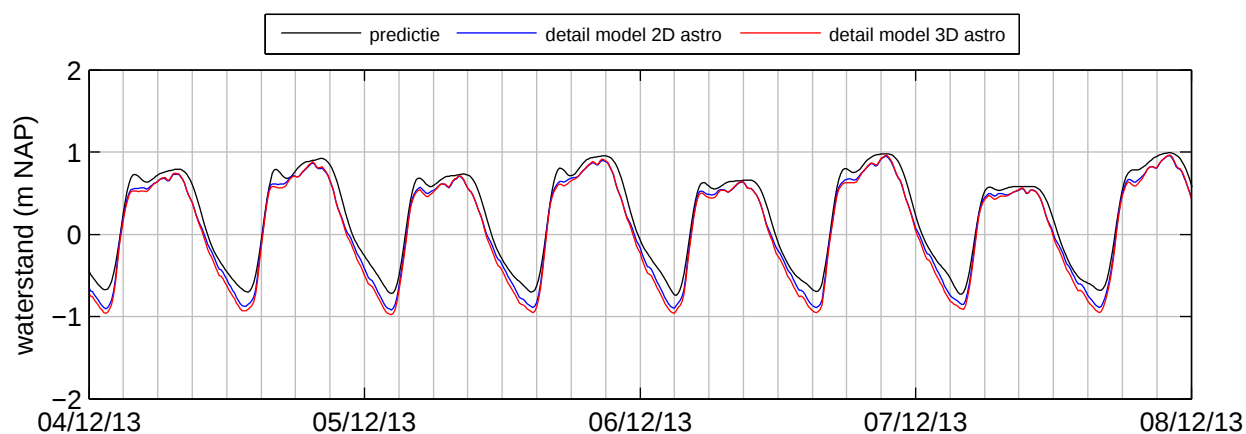
C03041.001941

Fig. F.17

Bijlage G

Gevoeligheid waterstanden voor 2D/3D model weergave

DEN HELDER



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Den Helder,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

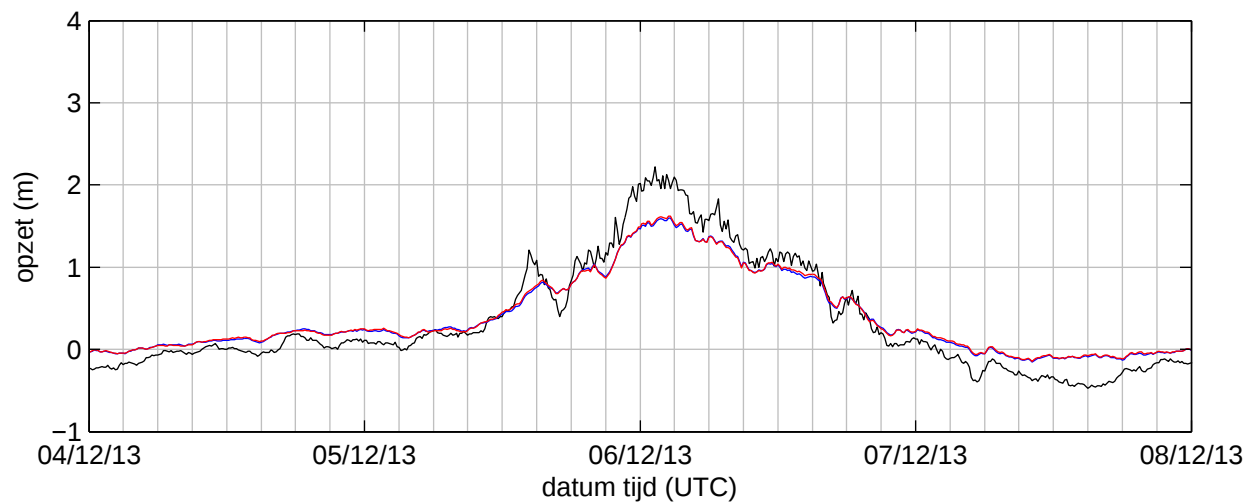
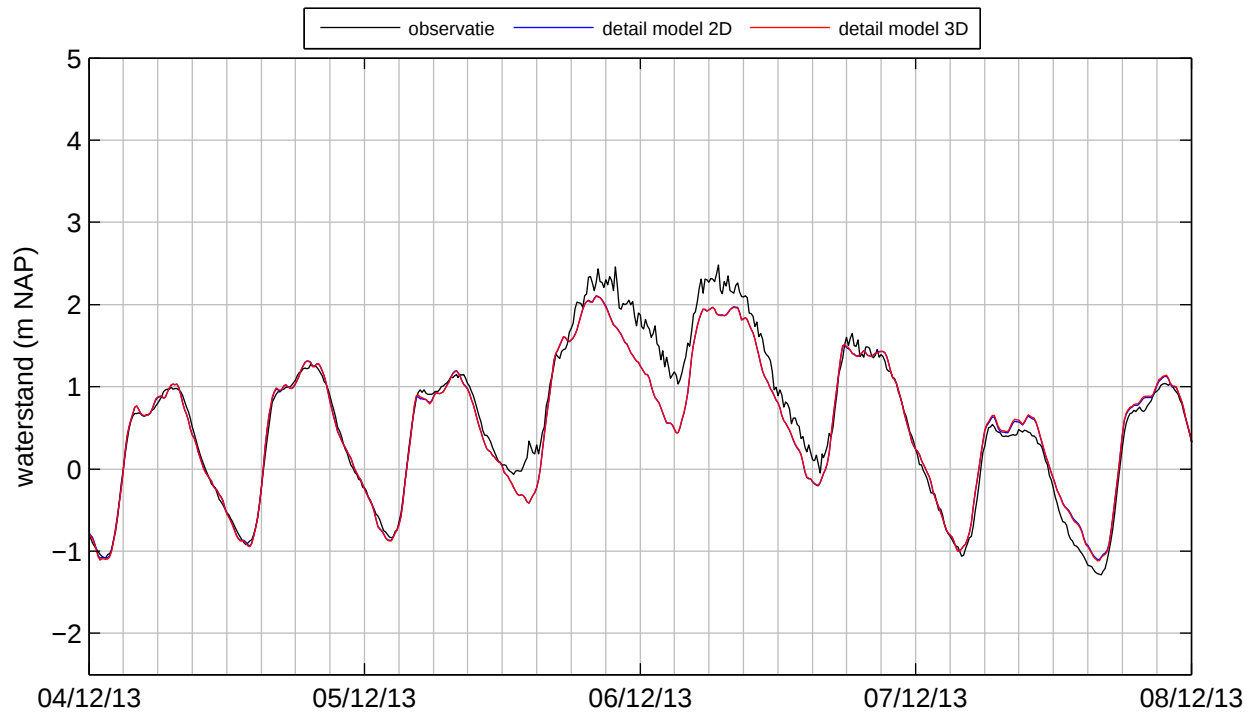
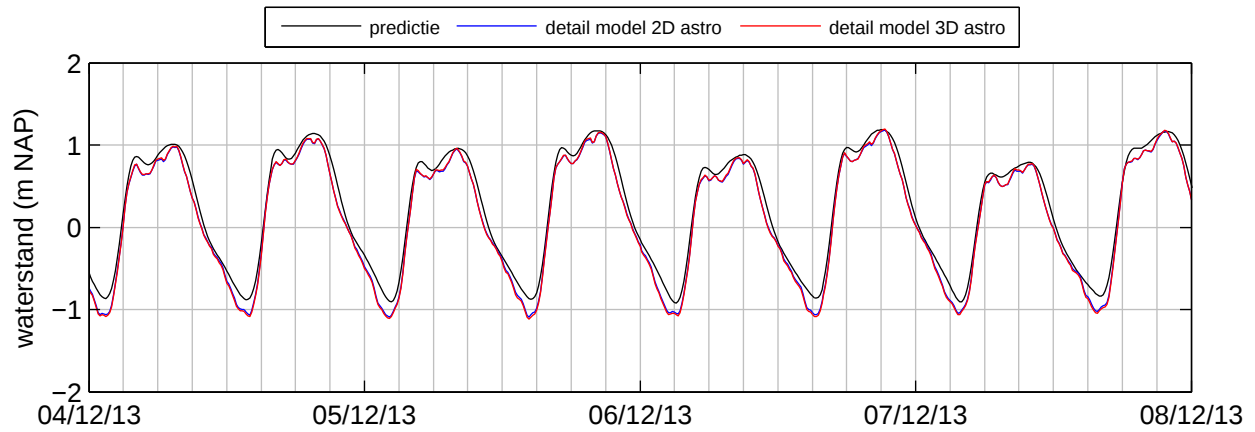
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.1

TEXEL NOORDZEE



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Texel Noordzee, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

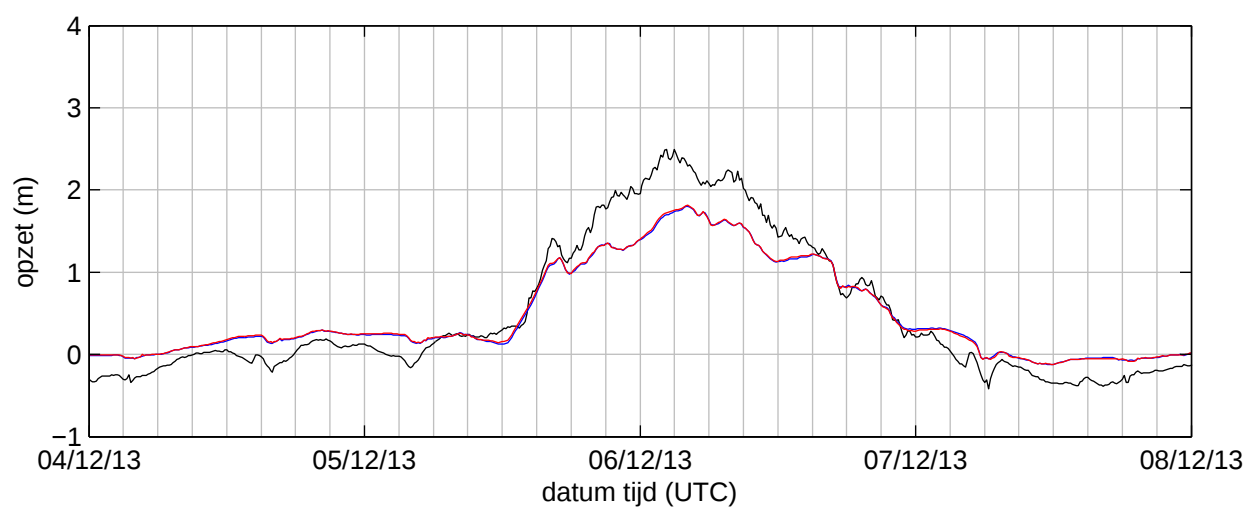
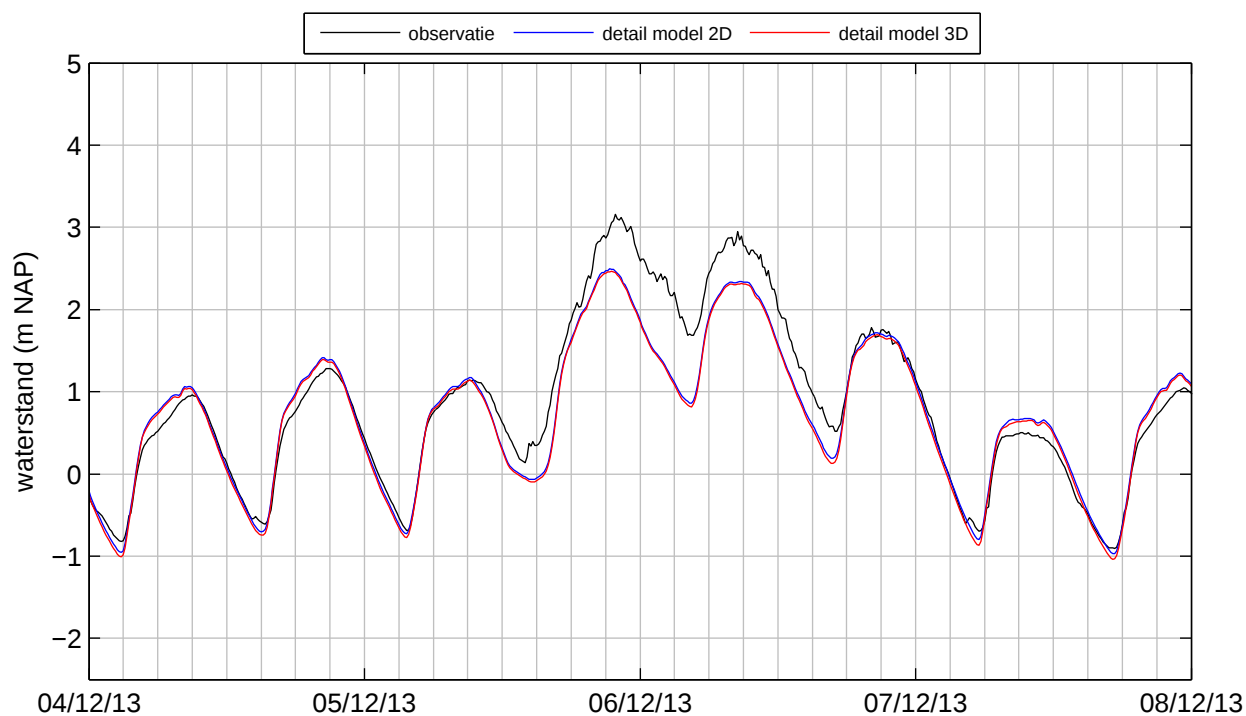
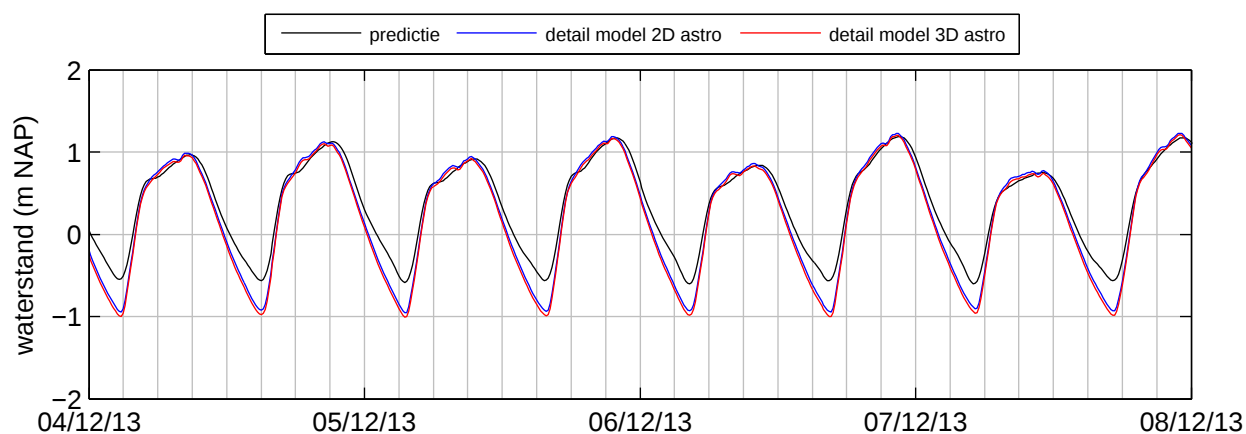
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.2

DEN OEVER BUITEN



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Den Oever buiten,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

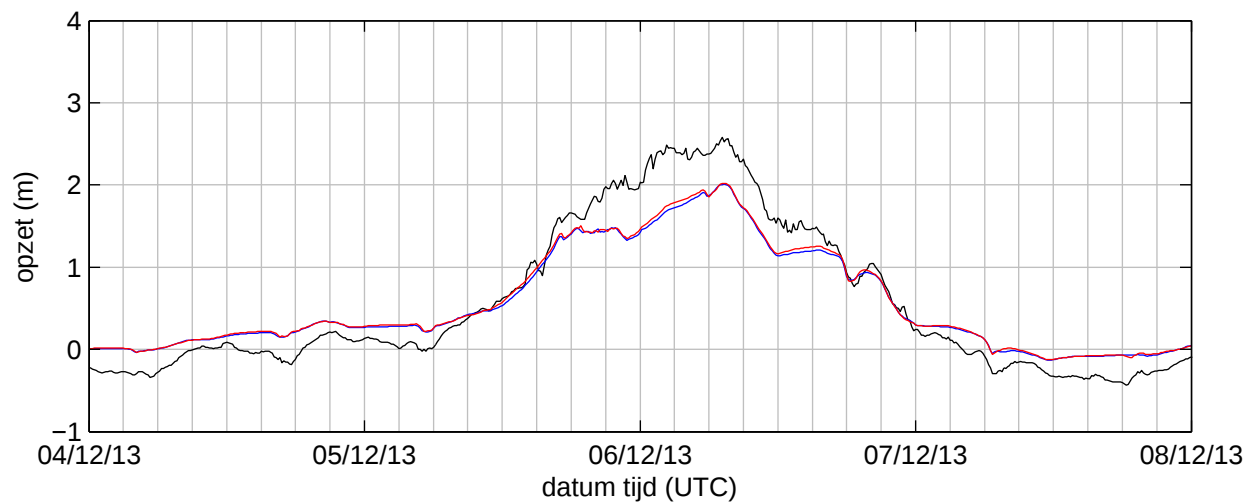
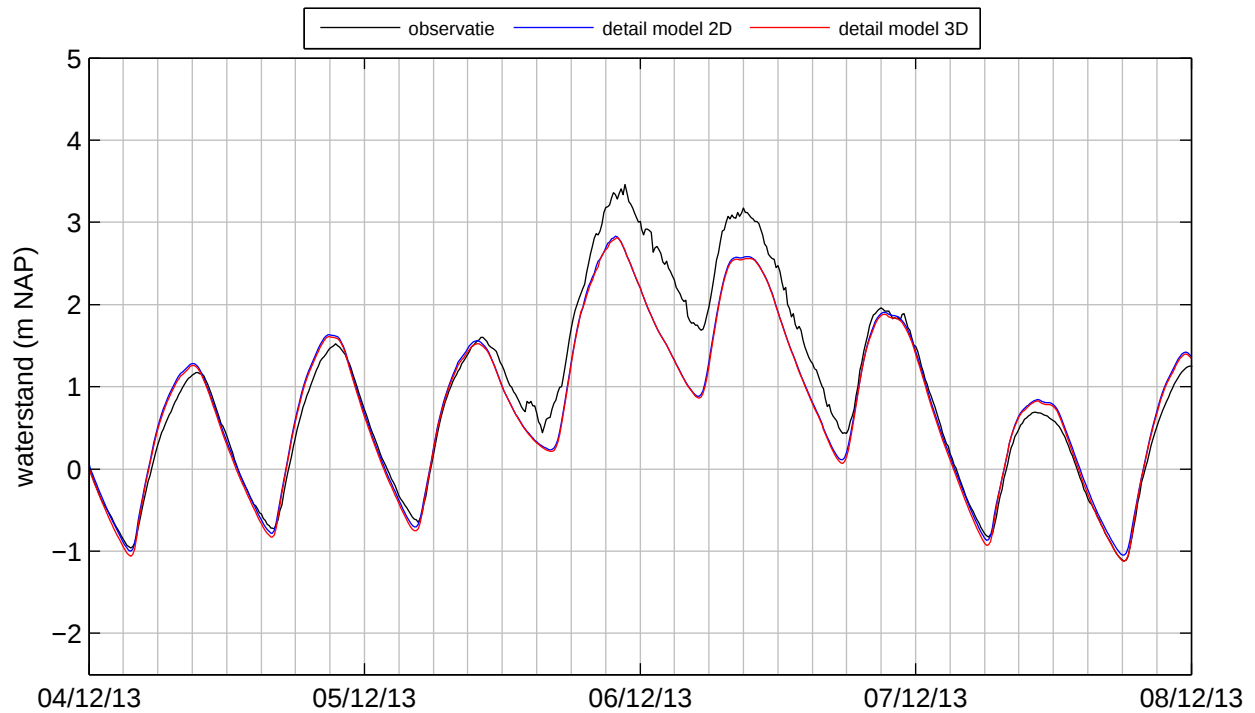
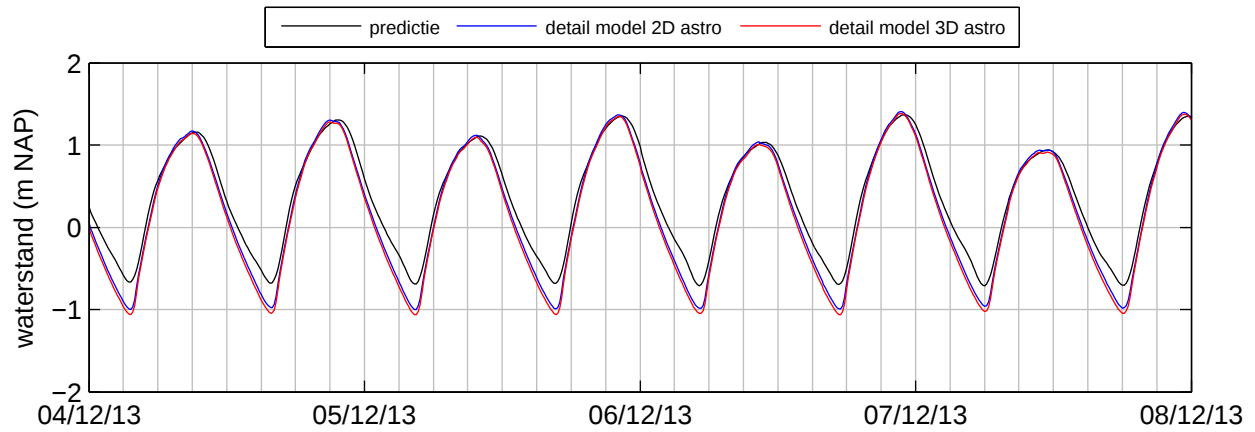
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.3

KORNWERDERZAND BUI.



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Kornwerderzand bui.,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

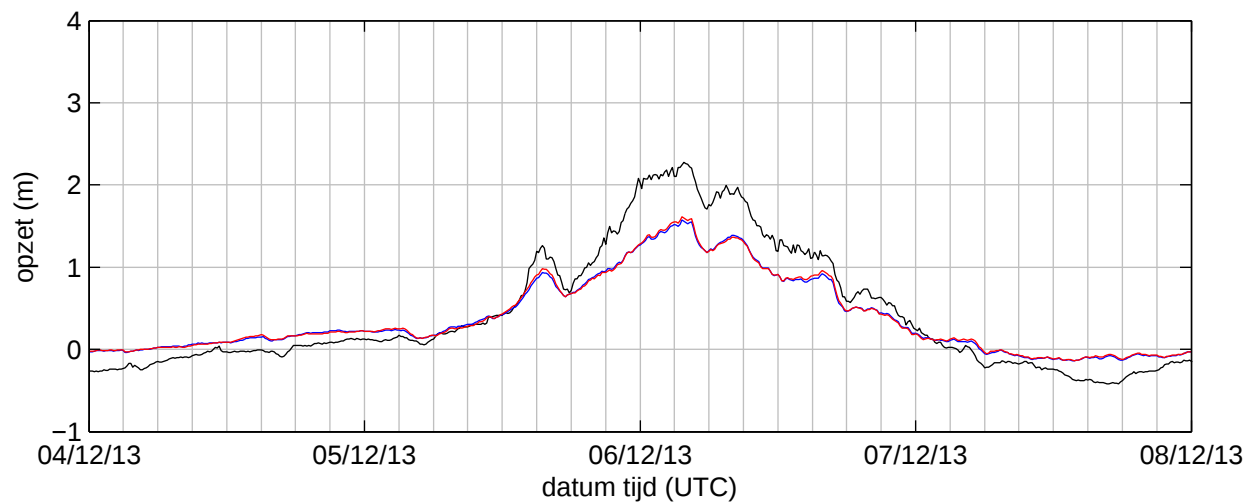
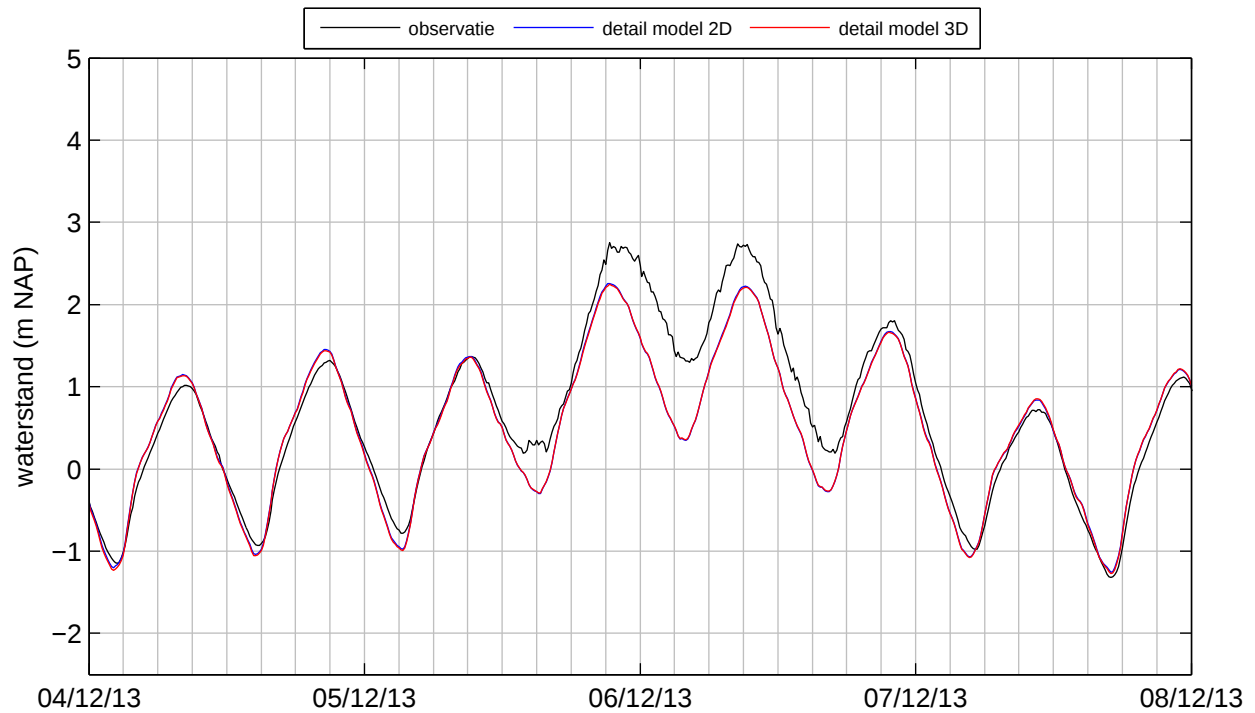
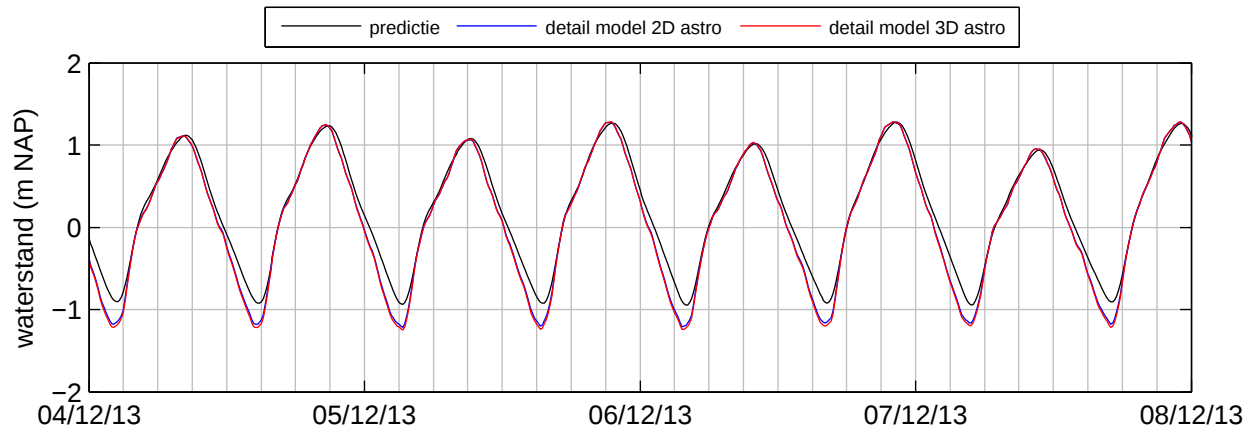
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.4

VLIELAND HAVEN



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Vlieland haven,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

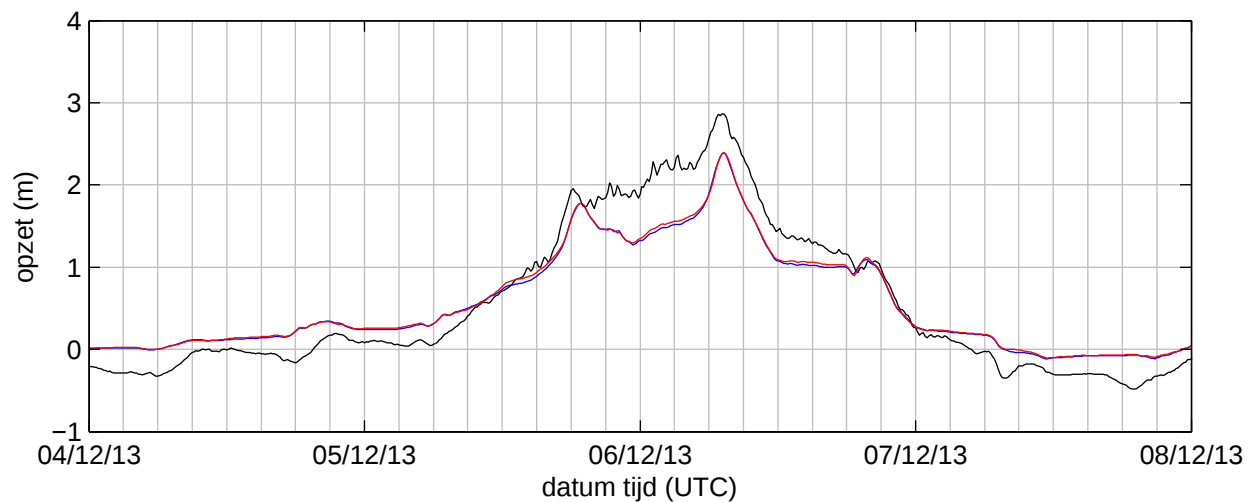
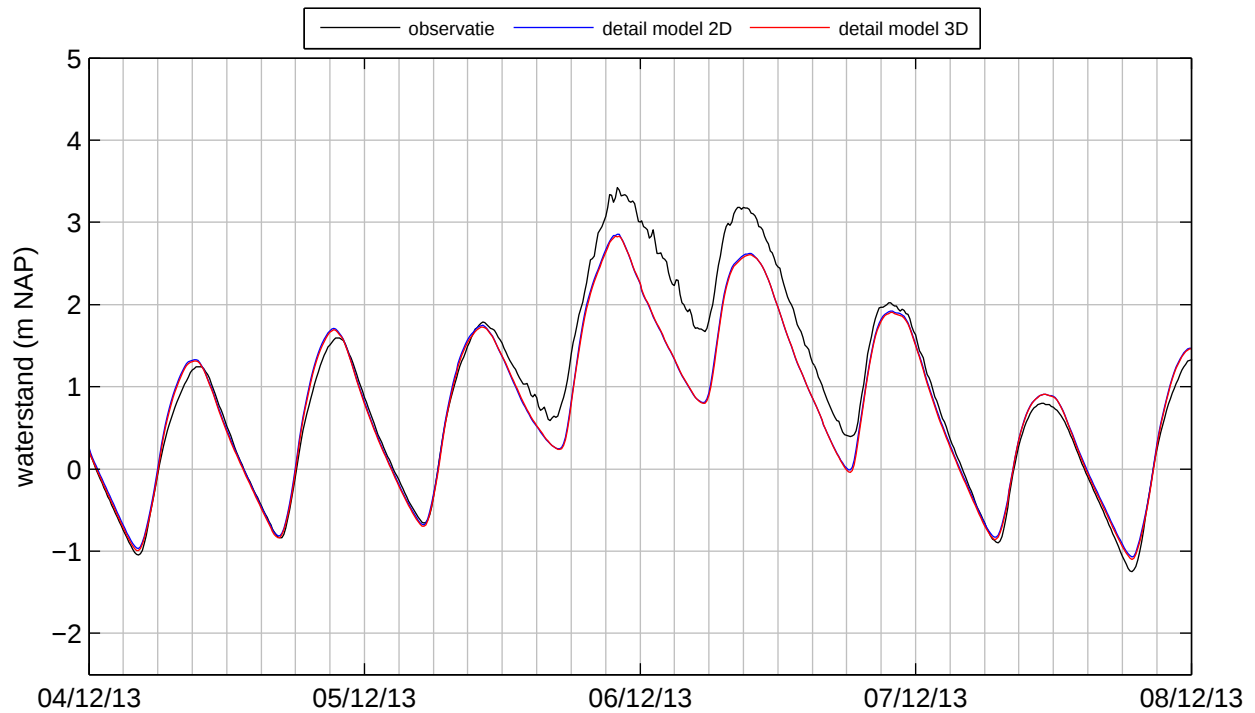
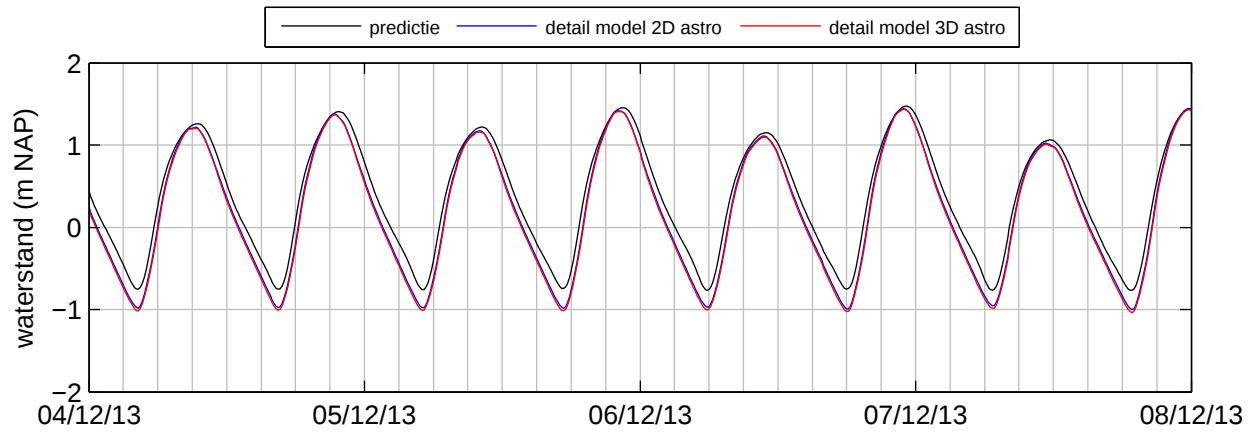
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.5

HARLINGEN



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Harlingen, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

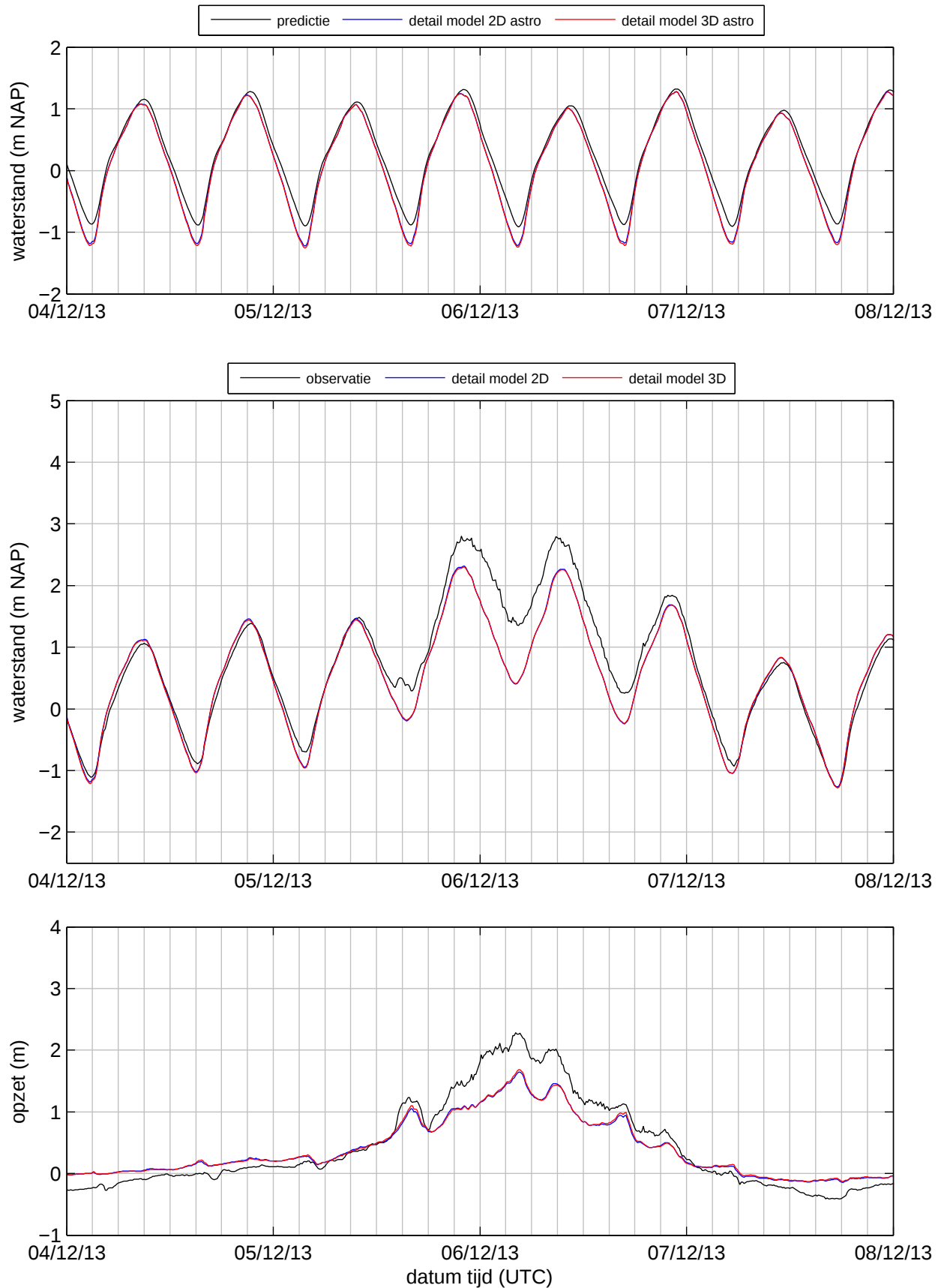
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.6

WEST-Terschelling



Vergelijking 2D en 3D detail model, station West-Terschelling, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

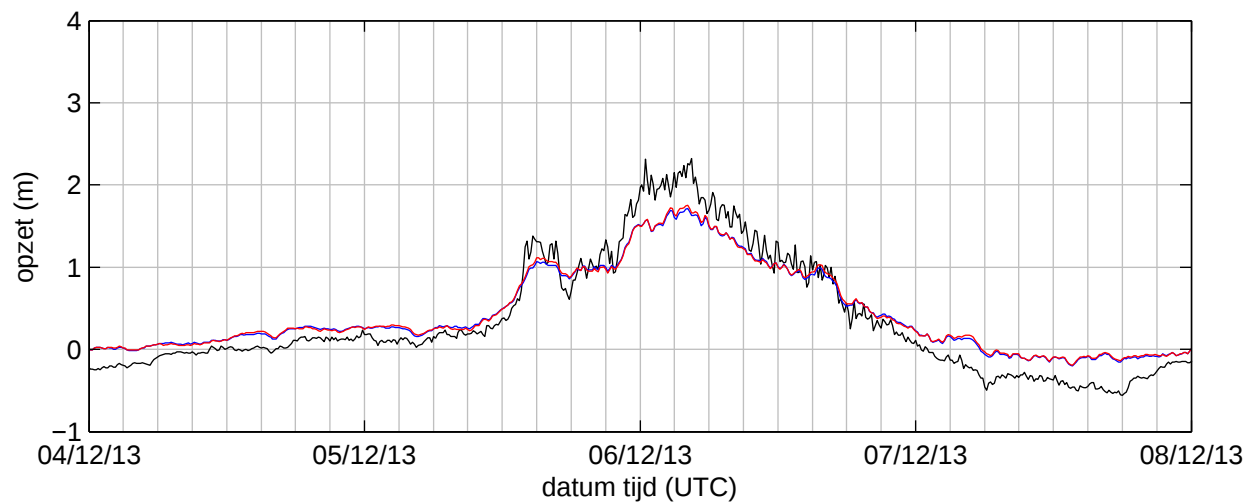
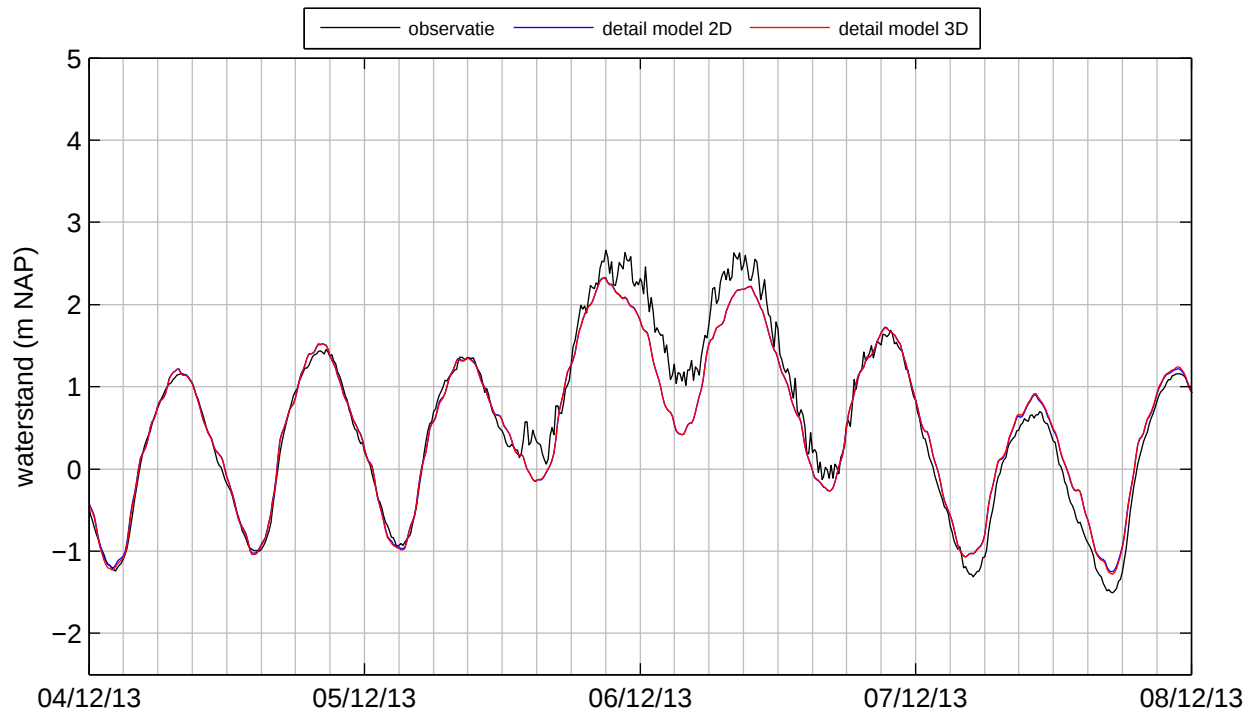
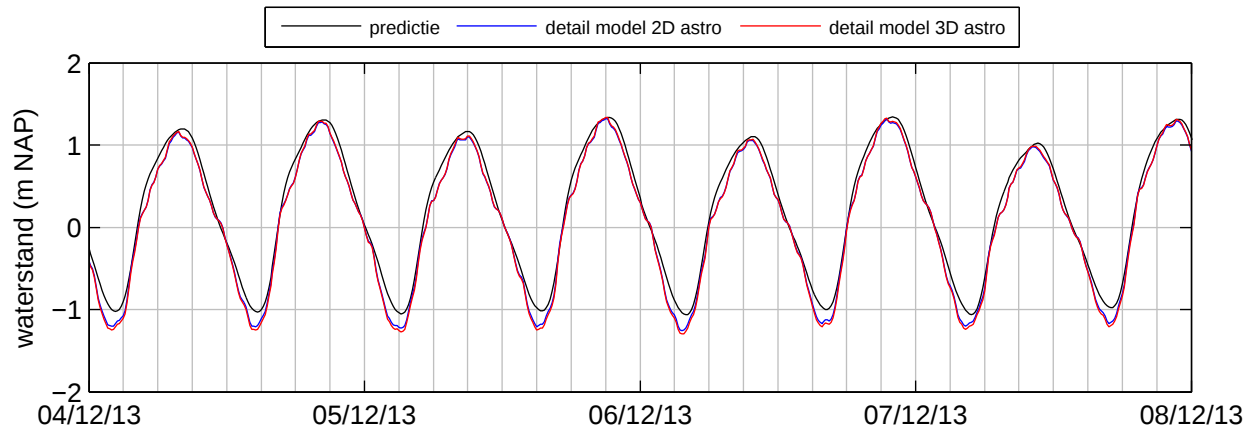
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.7

TERSCHELLING NOORDZ.



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Terschelling Noordz.,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

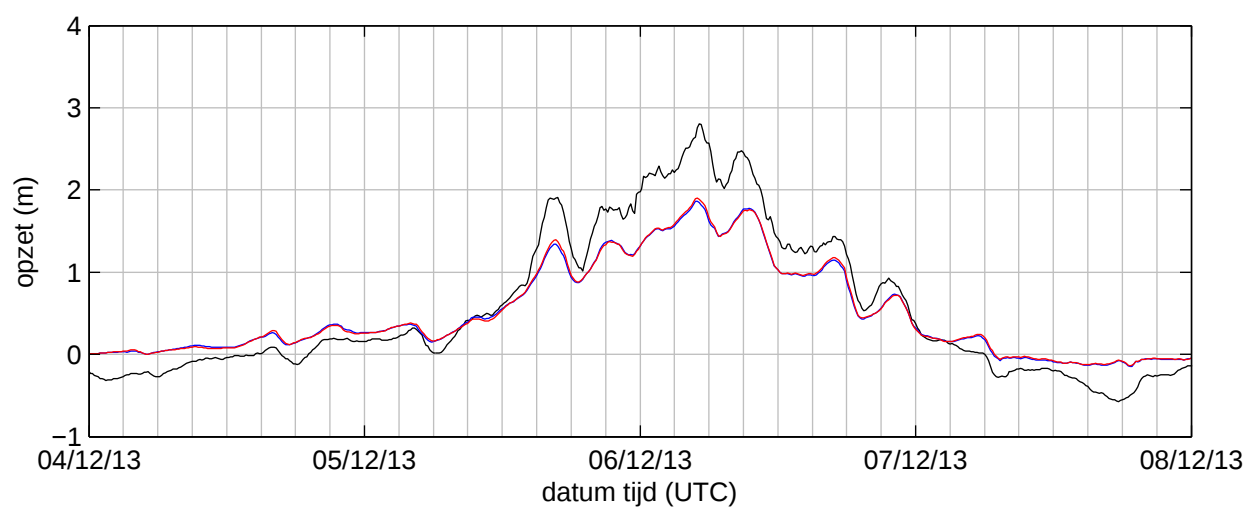
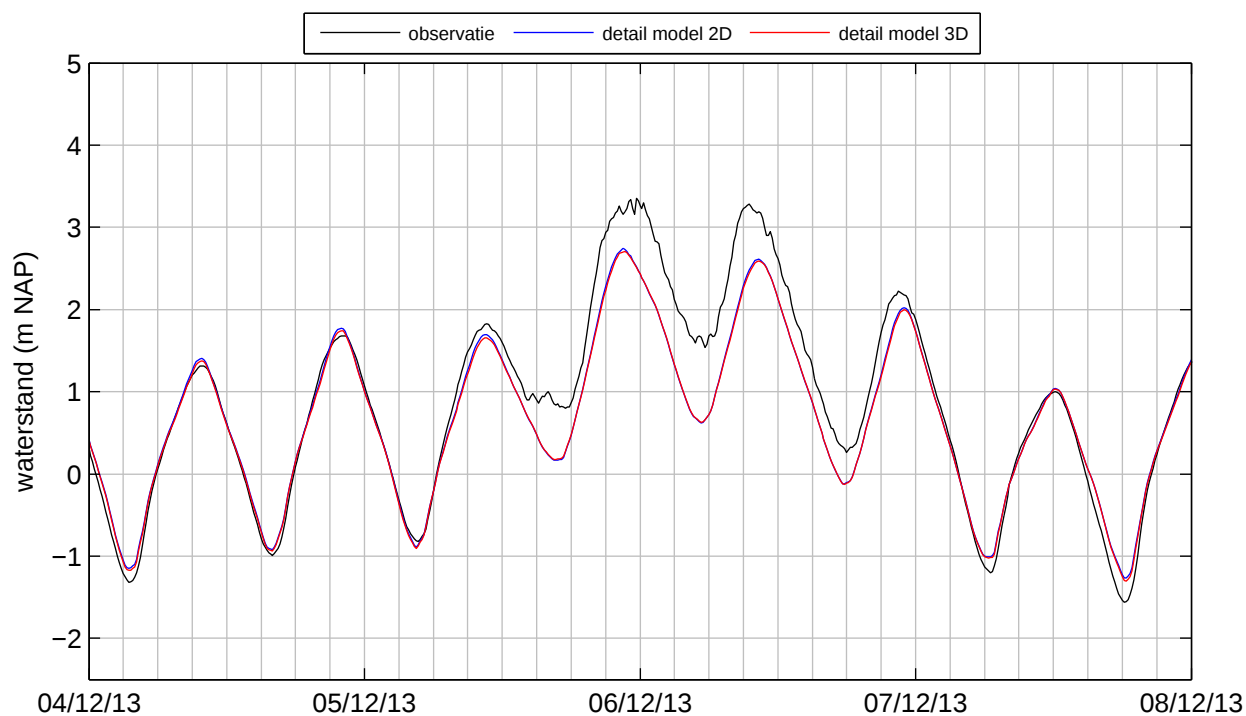
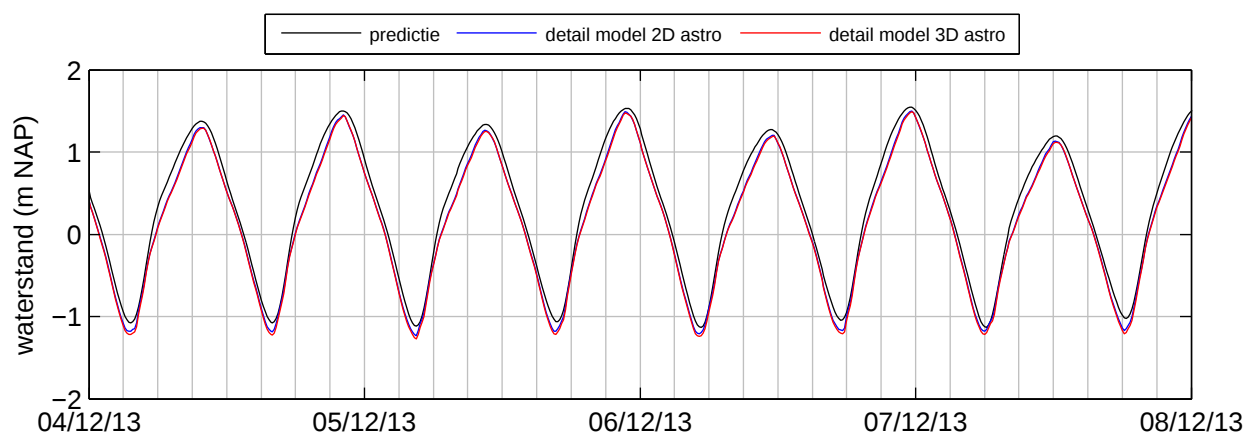
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.8

NES



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Nes,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

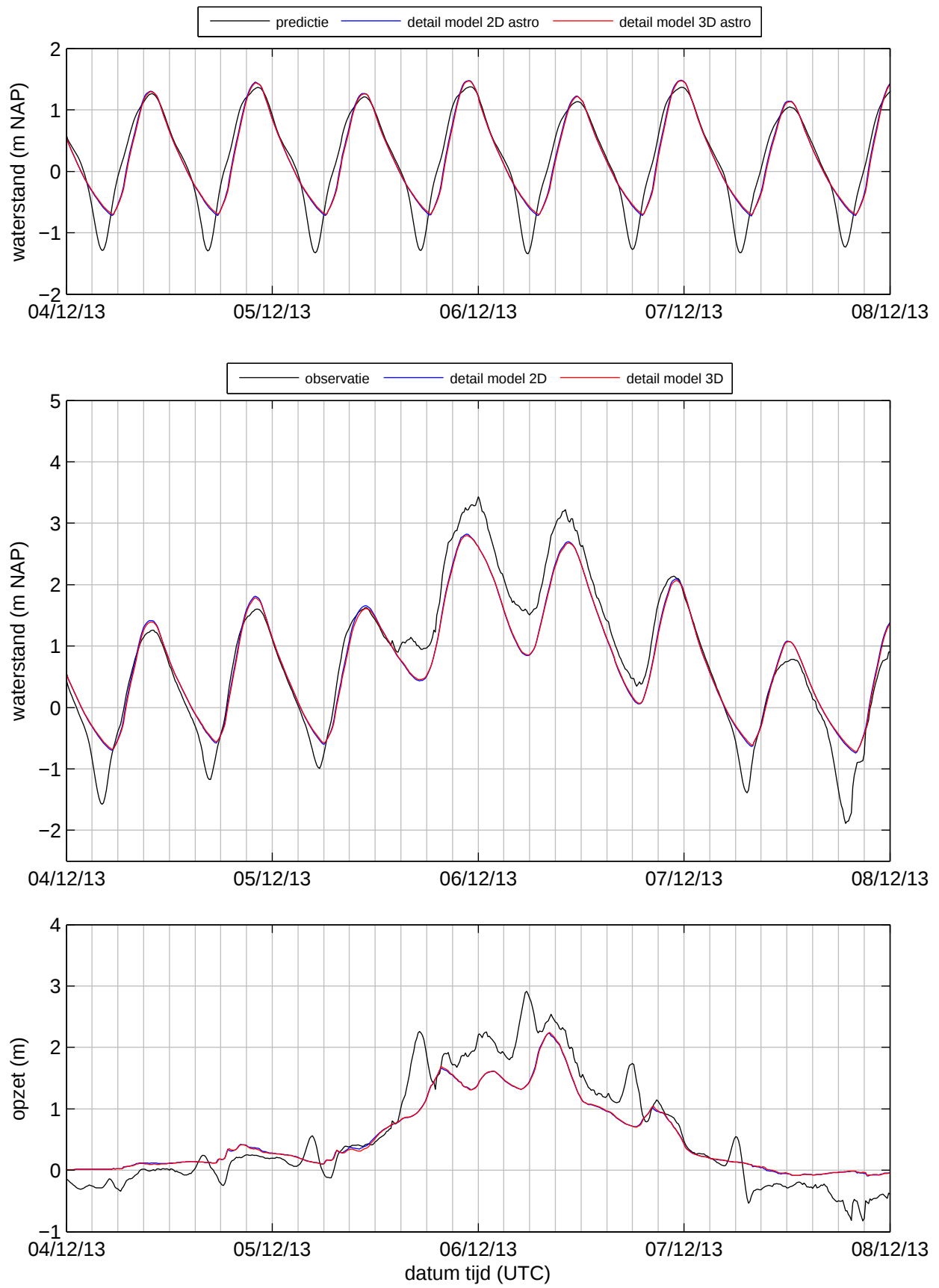
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

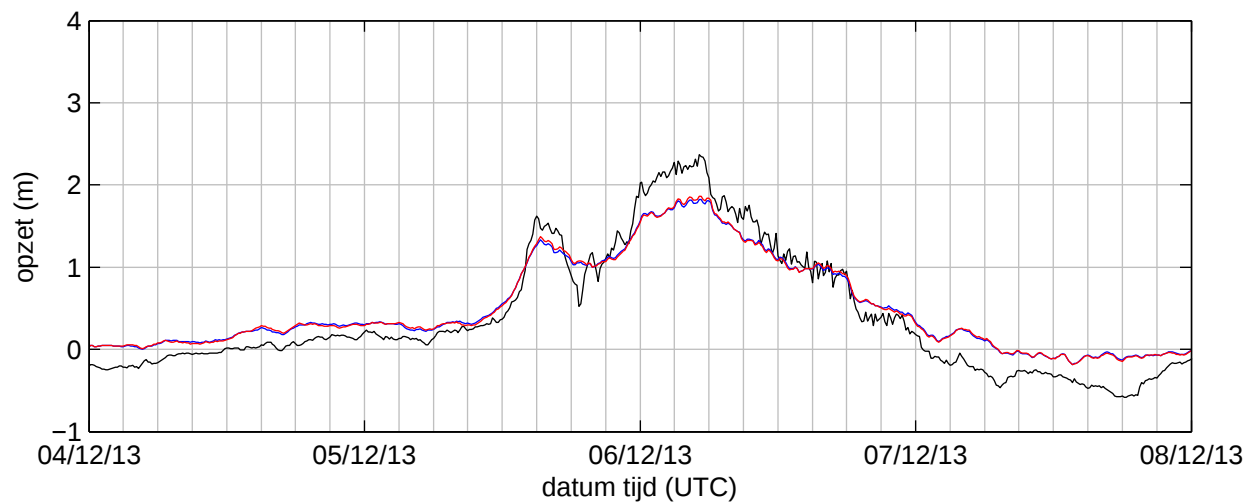
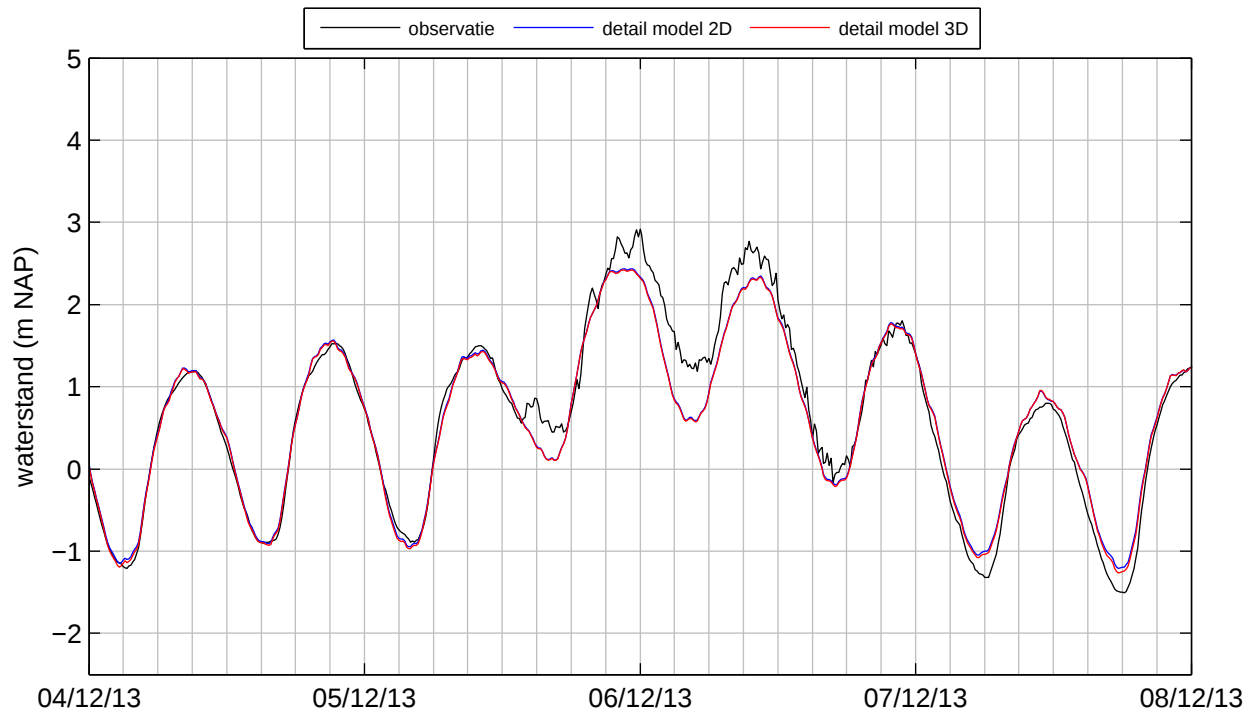
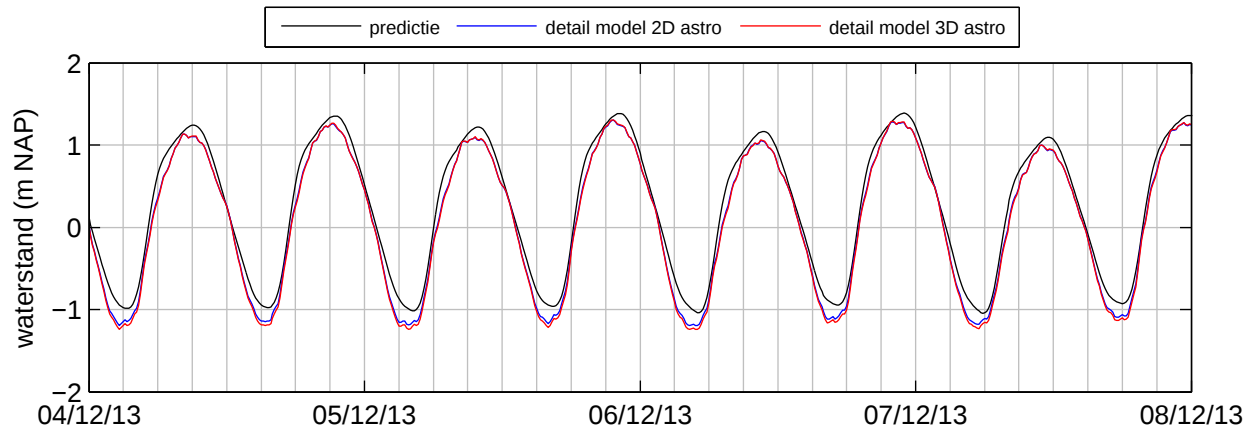
Fig. G.9

HOLWERD



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Holwerd, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)	Cd-Zijlema	zonder golven
	2D versus 3D detail model	
Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941	Fig. G.10

WIERUMERGRONDEN



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Wierumergronden, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

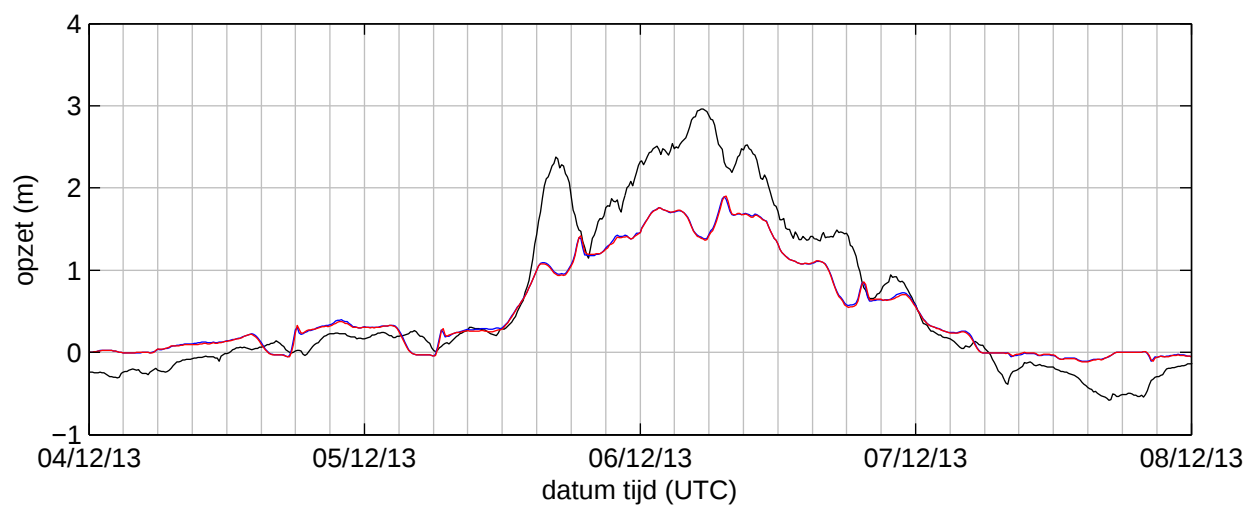
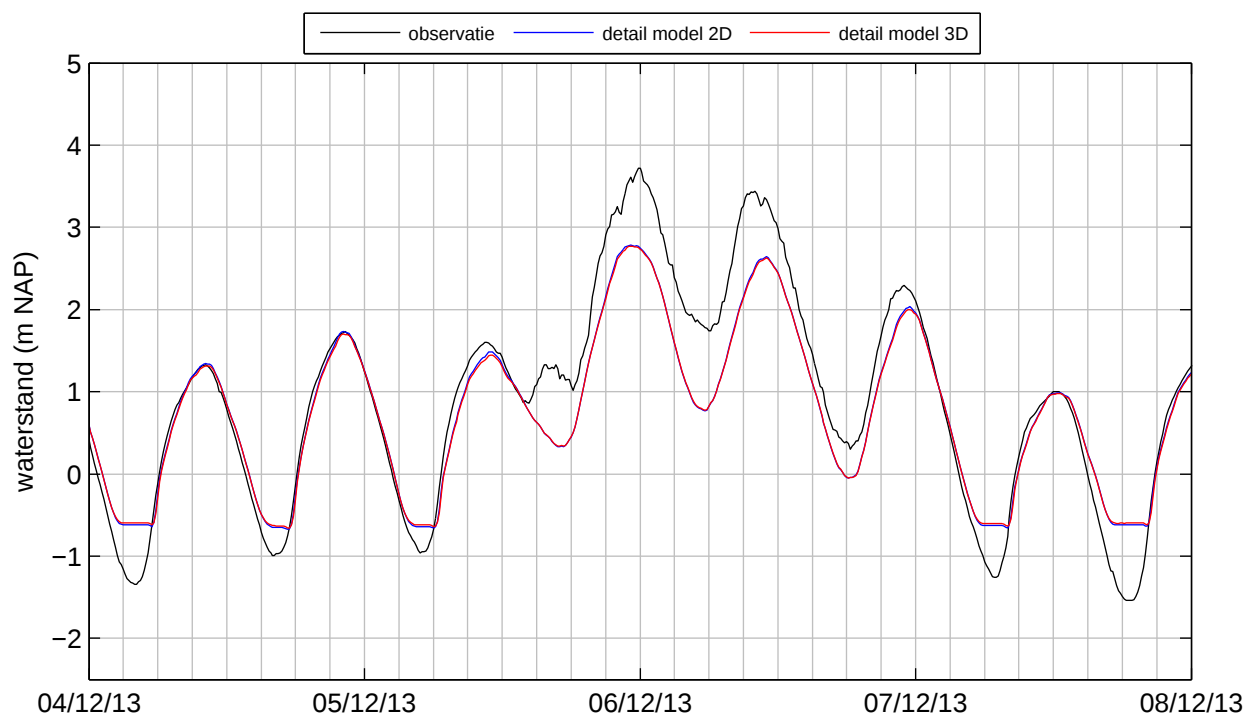
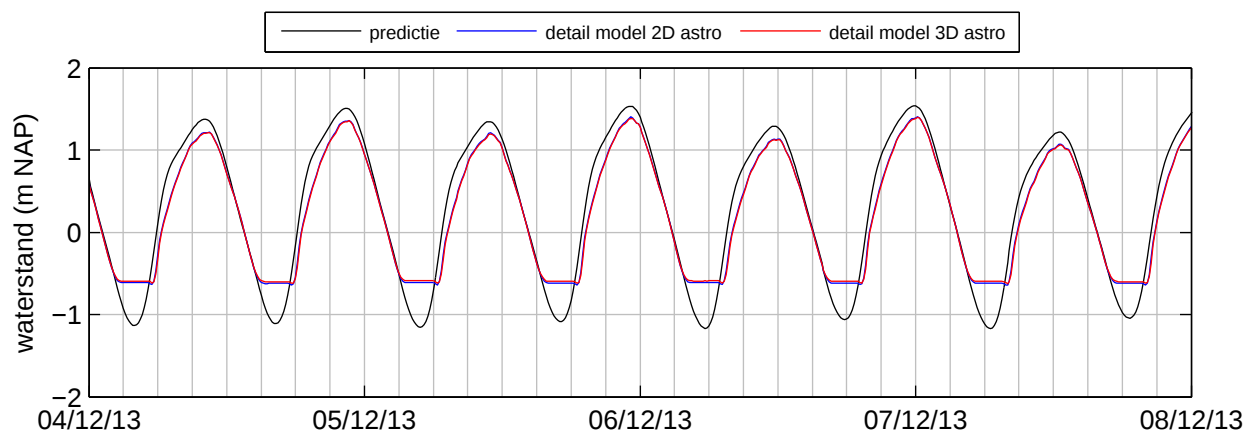
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.11

LAUWERSOOG



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Lauwersoog, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

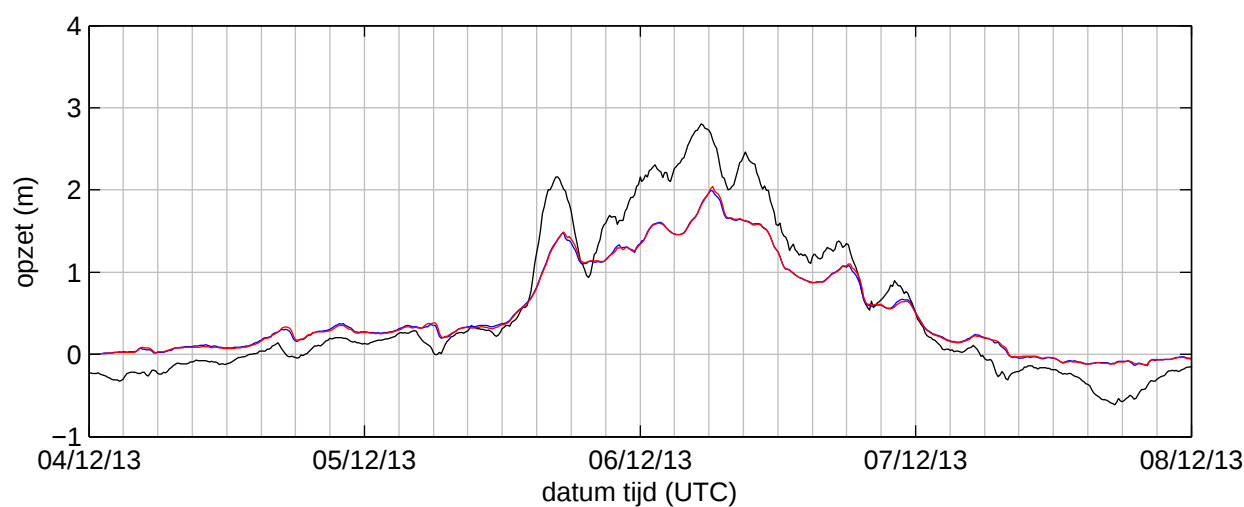
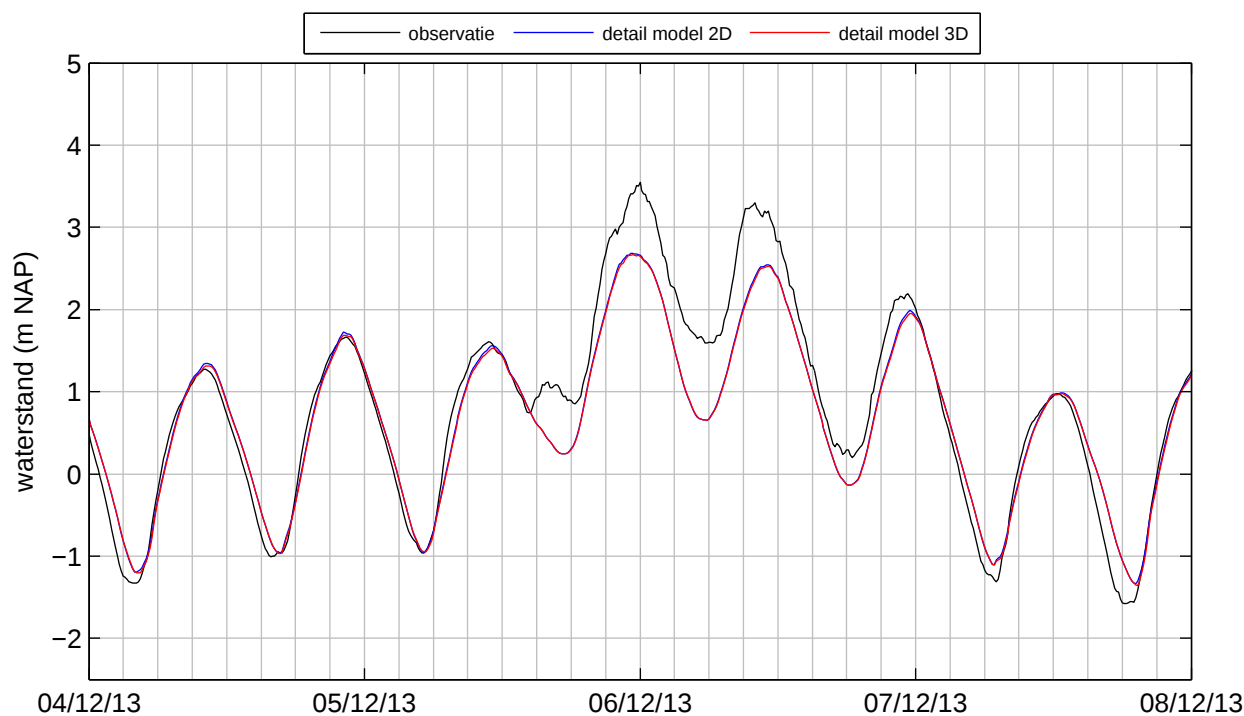
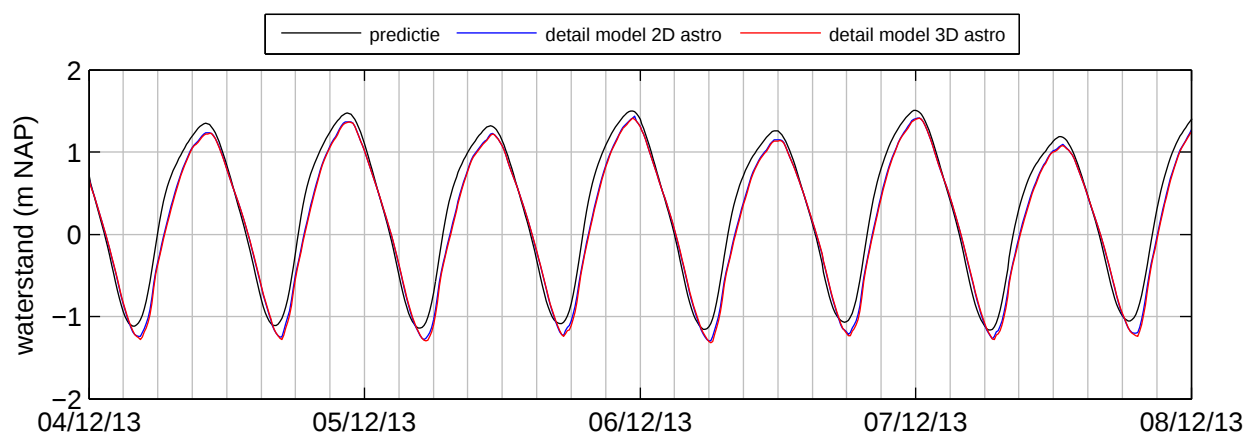
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.12

SCHIERMONNIKOOG



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Schiermonnikoog, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

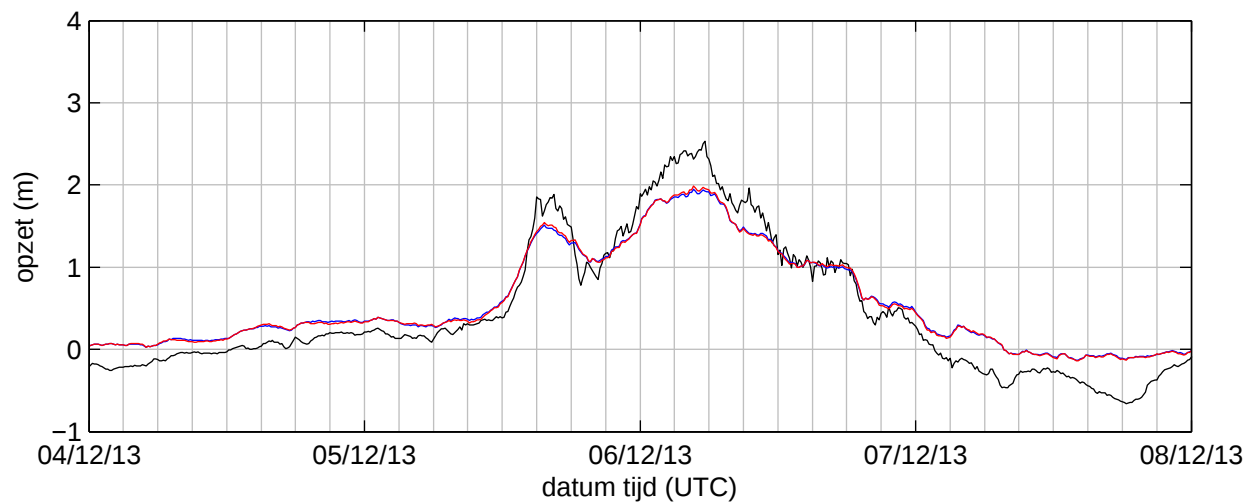
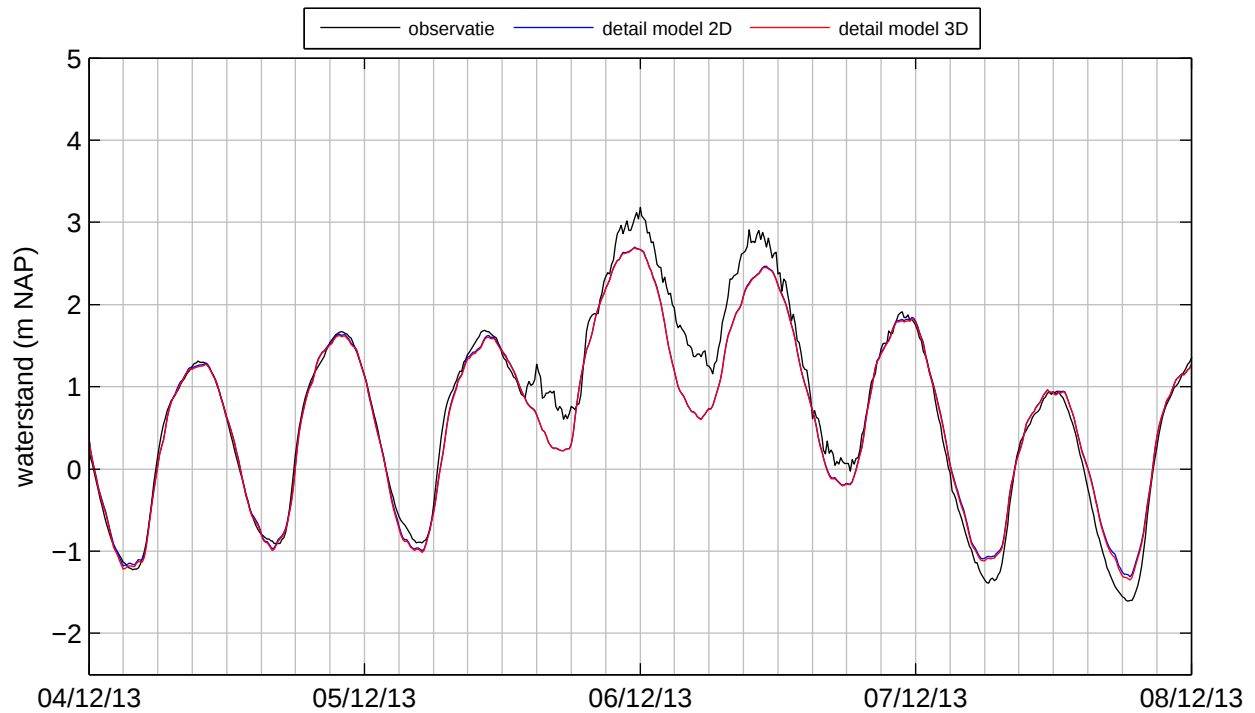
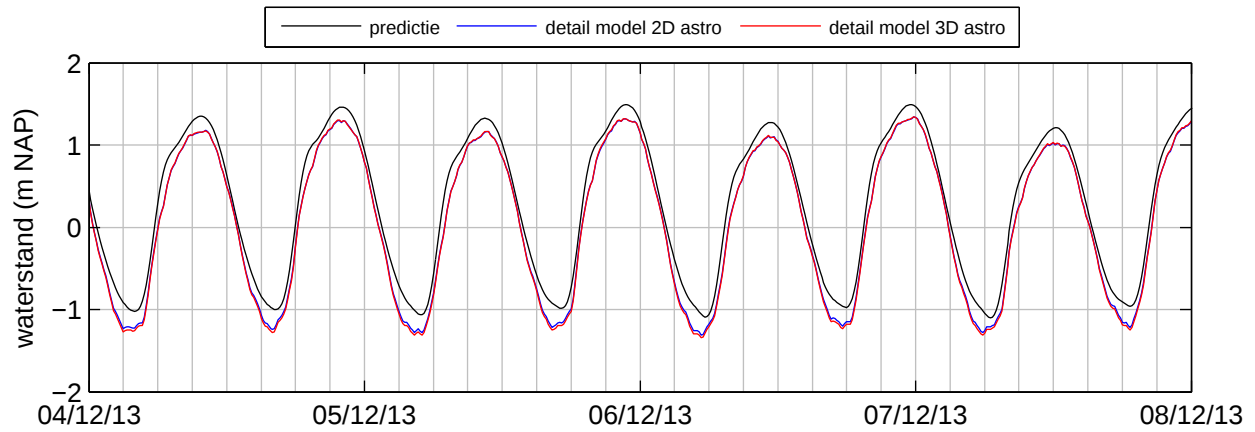
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.13

HUIBERTGAT



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Huibertgat,
astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

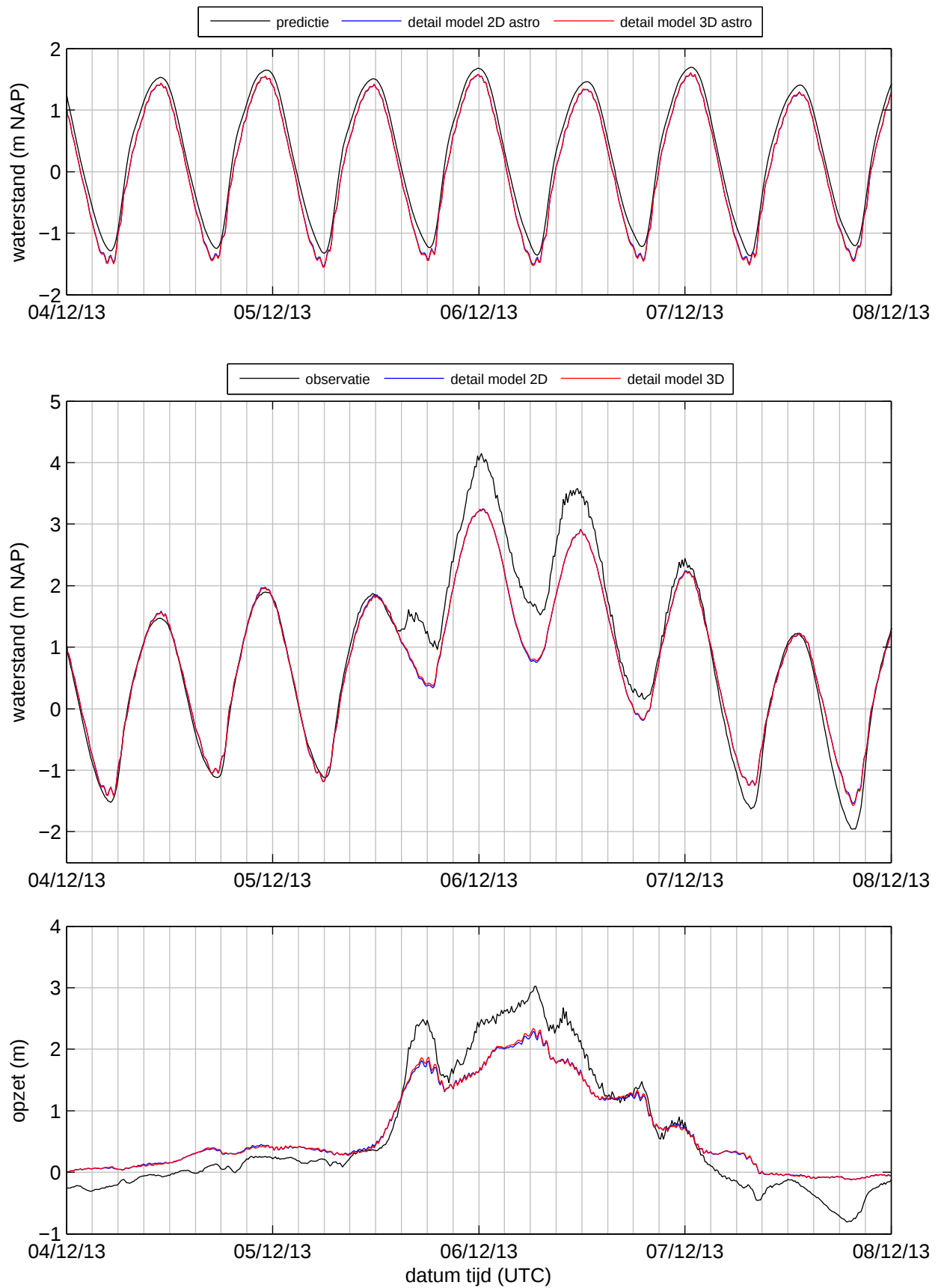
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

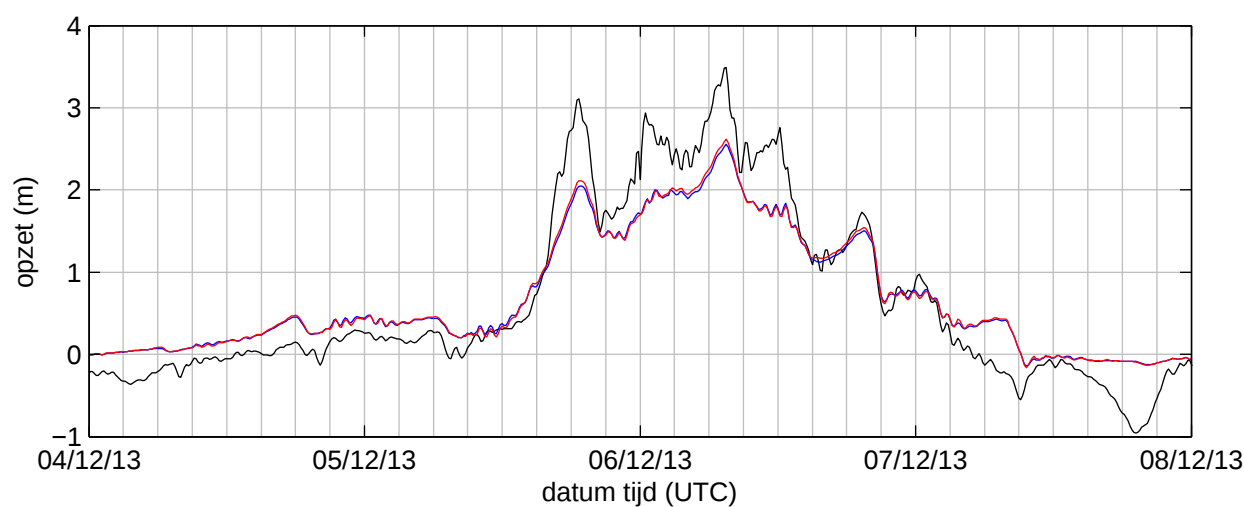
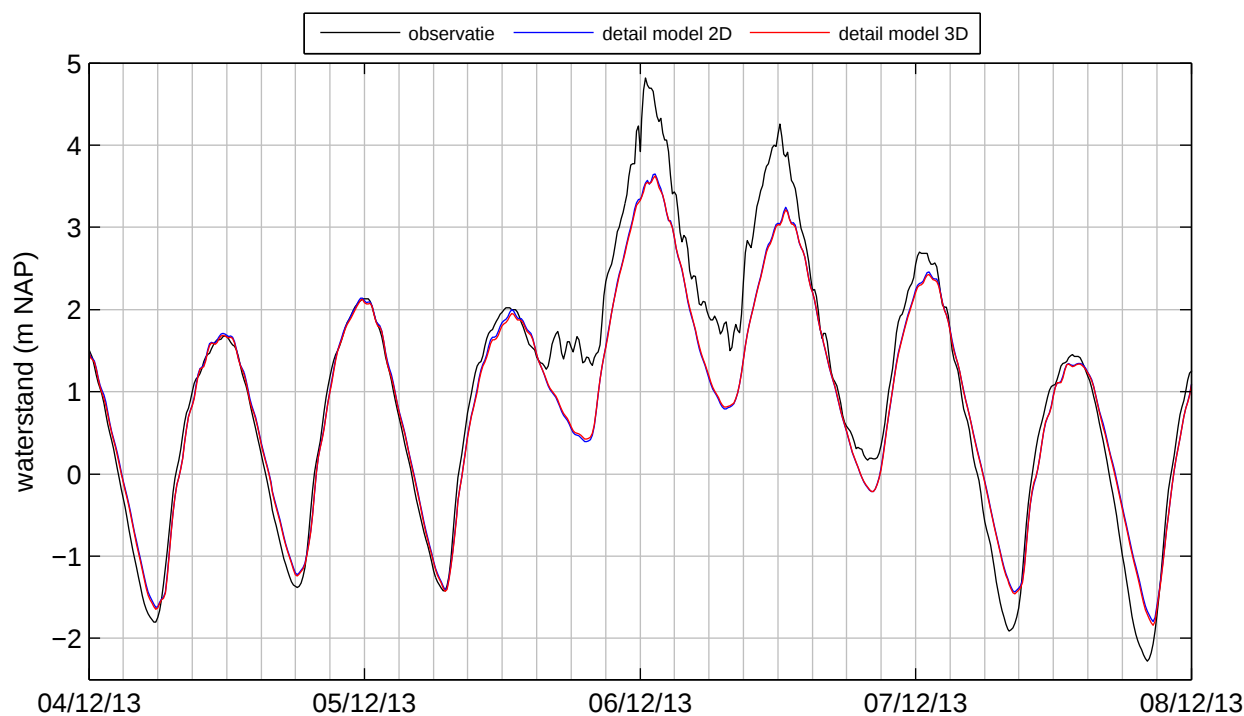
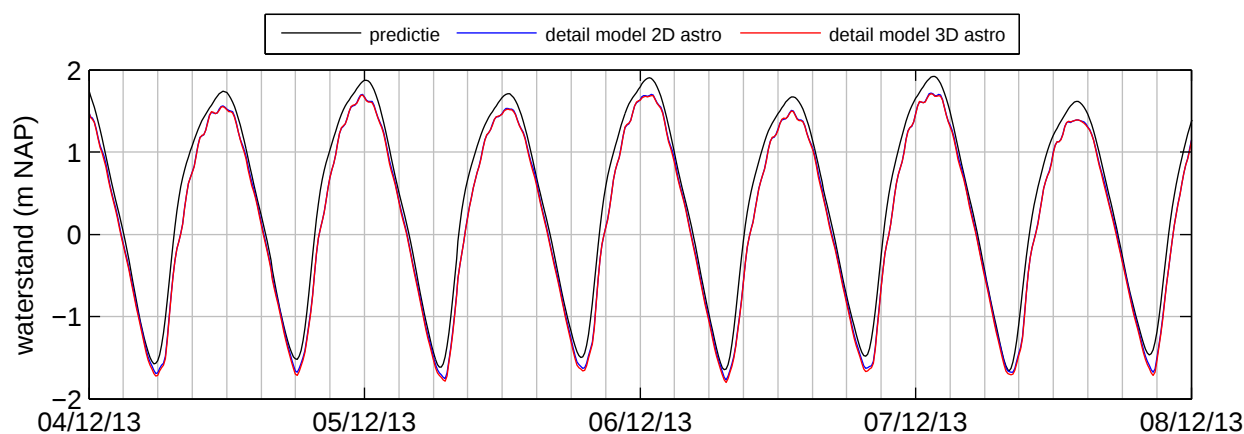
Fig. G.14

EEMSHAVEN



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Eemshaven, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)	Cd-Zijlema	zonder golven
	2D versus 3D detail model	
Rekenexperiment Waddenzee	C03041.001941	Fig. G.15

DELFIJL



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Delfzijl, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

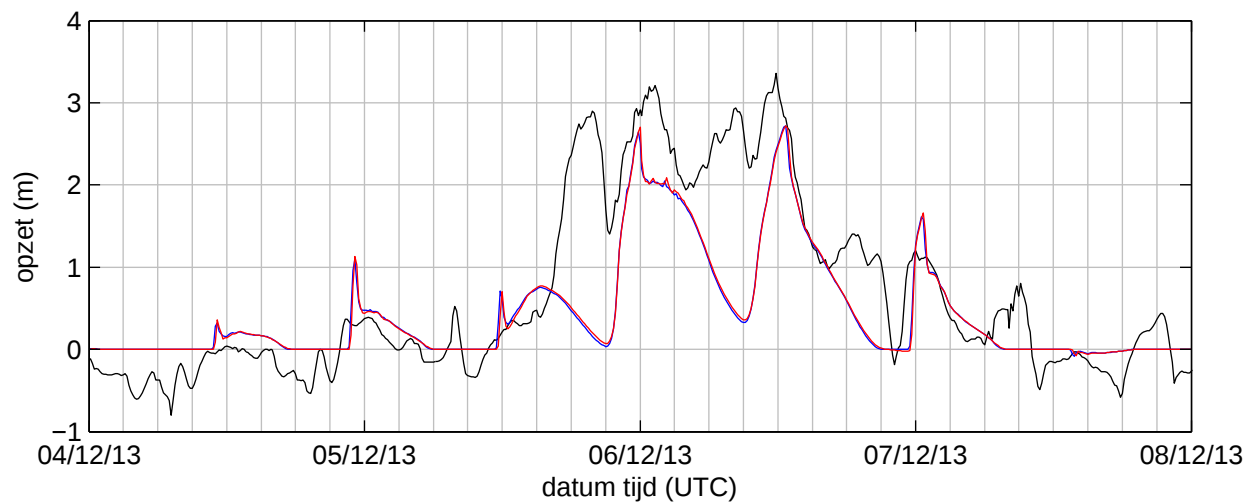
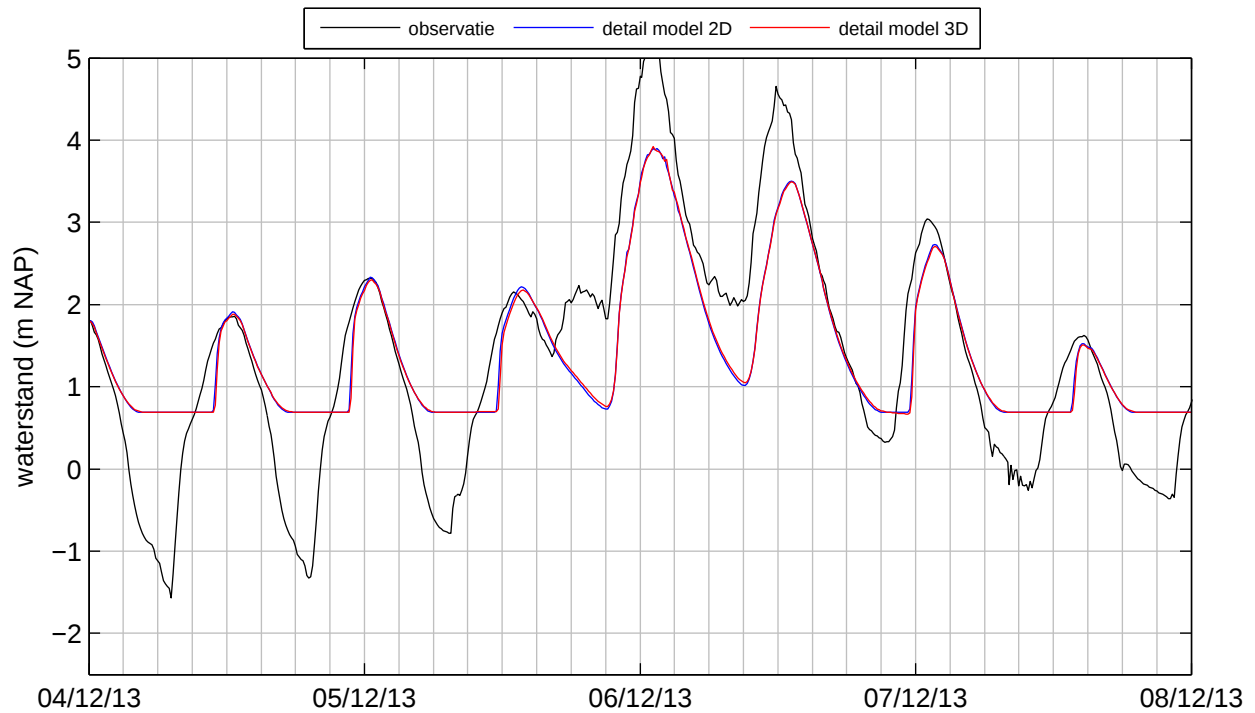
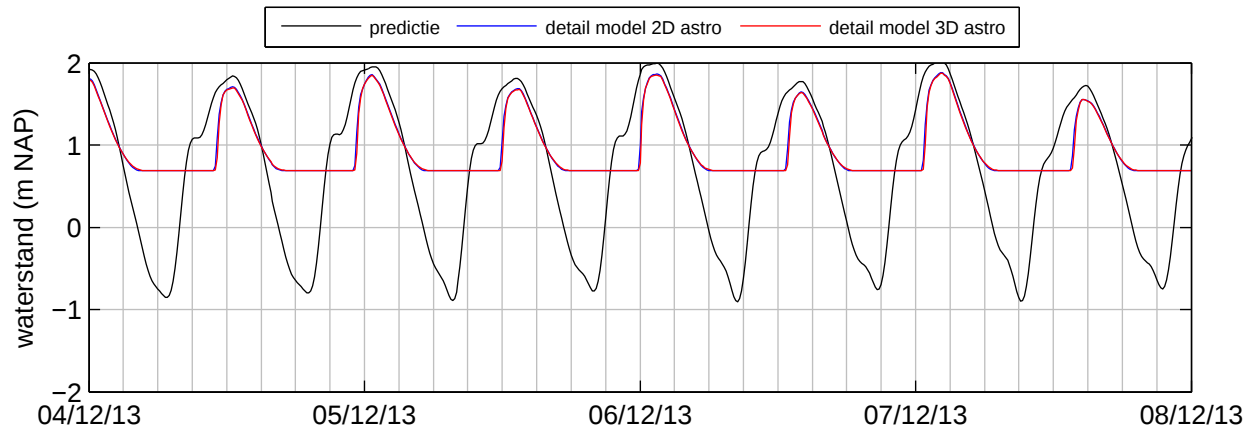
2D versus 3D detail model

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.16

NIEUWE STATENZIJL



Vergelijking 2D en 3D detail model, station Nieuwe Statenzijl, astronomische component (boven), totale waterstand (midden) en opzet (onder)

Cd-Zijlema

zonder golven

2D versus 3D detail model

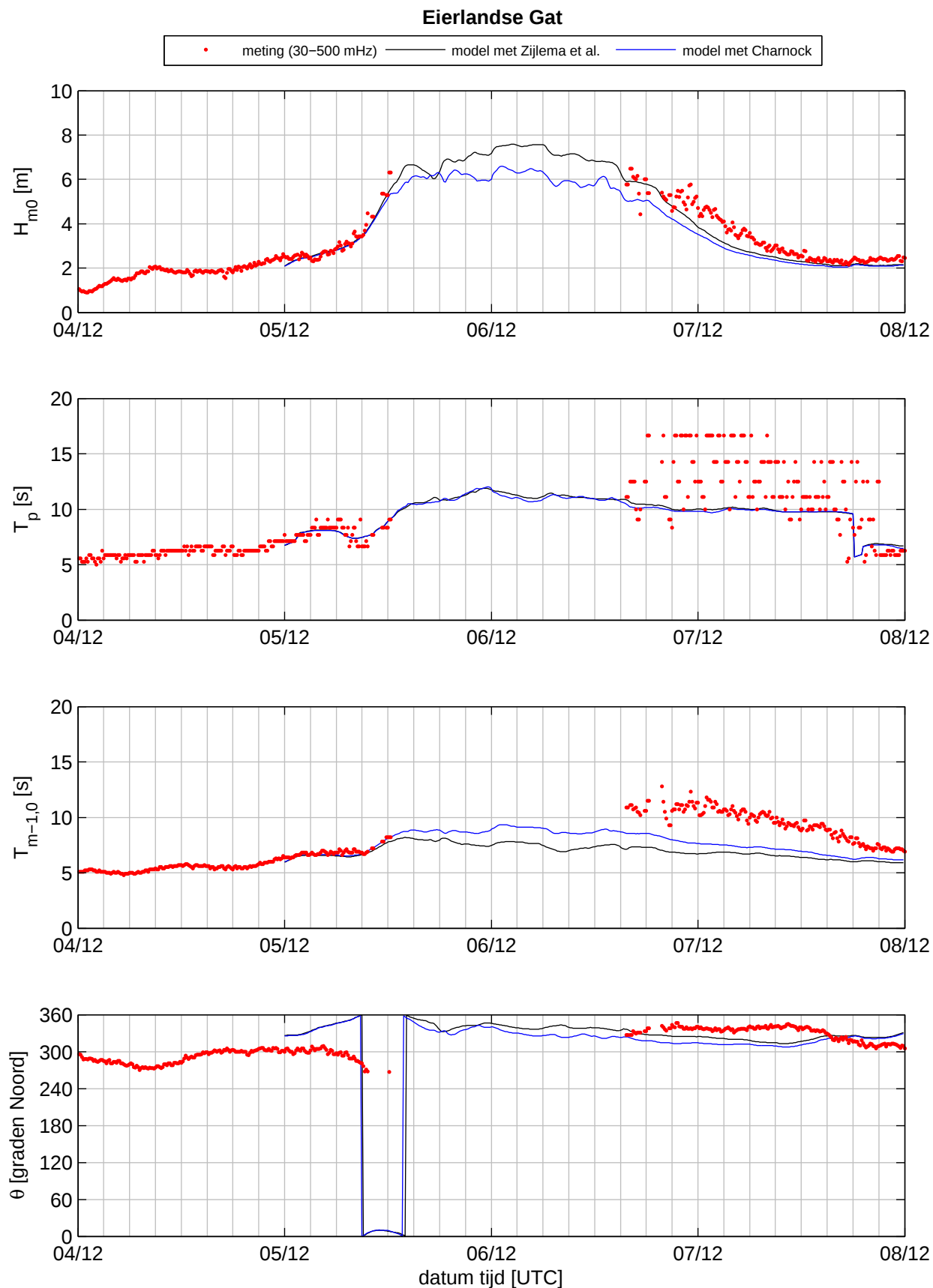
Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. G.17

Bijlage H

Vergelijking gemeten en gemodelleerde golfvaria- belen



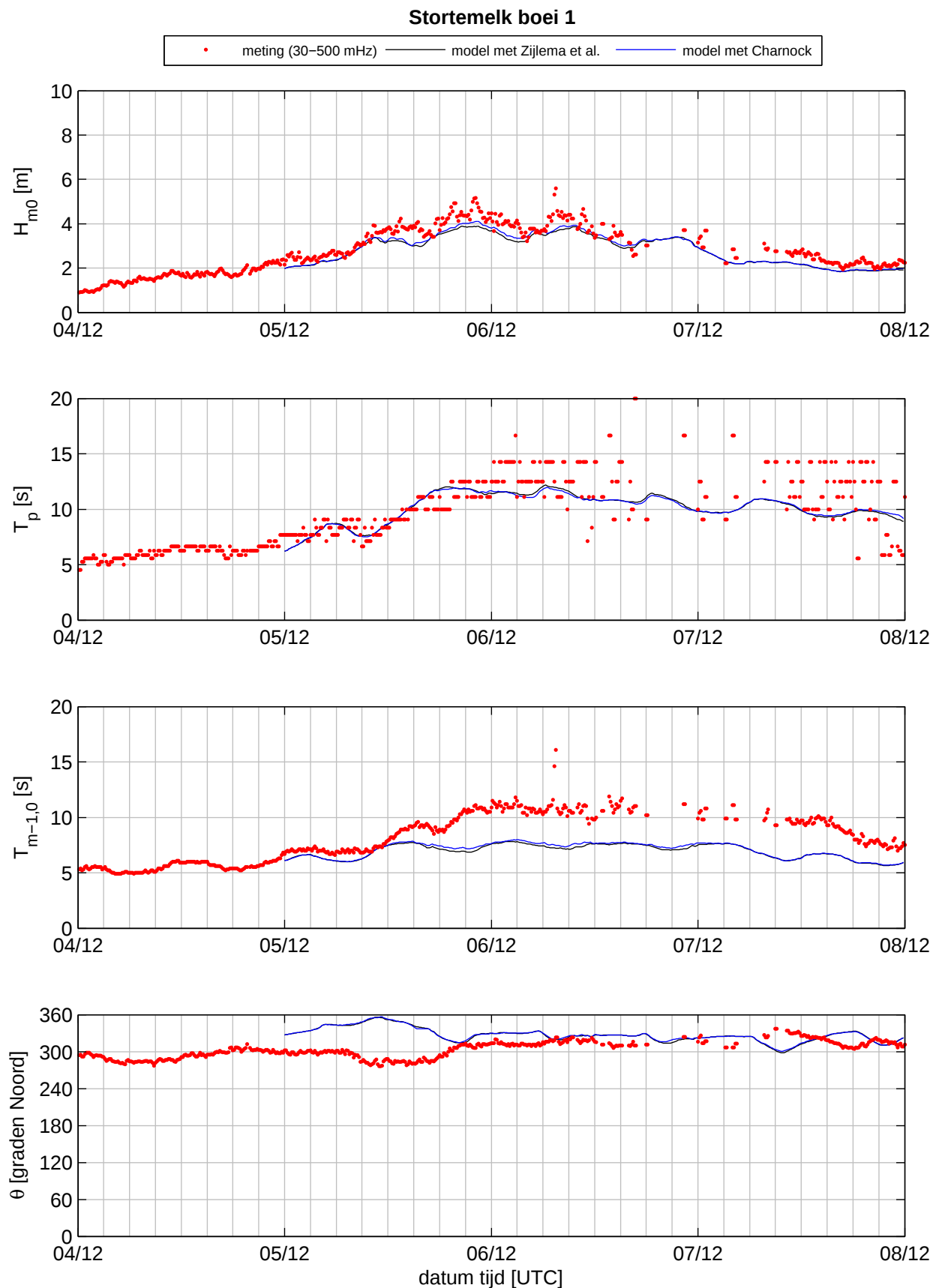
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Eierlandse Gat

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.1



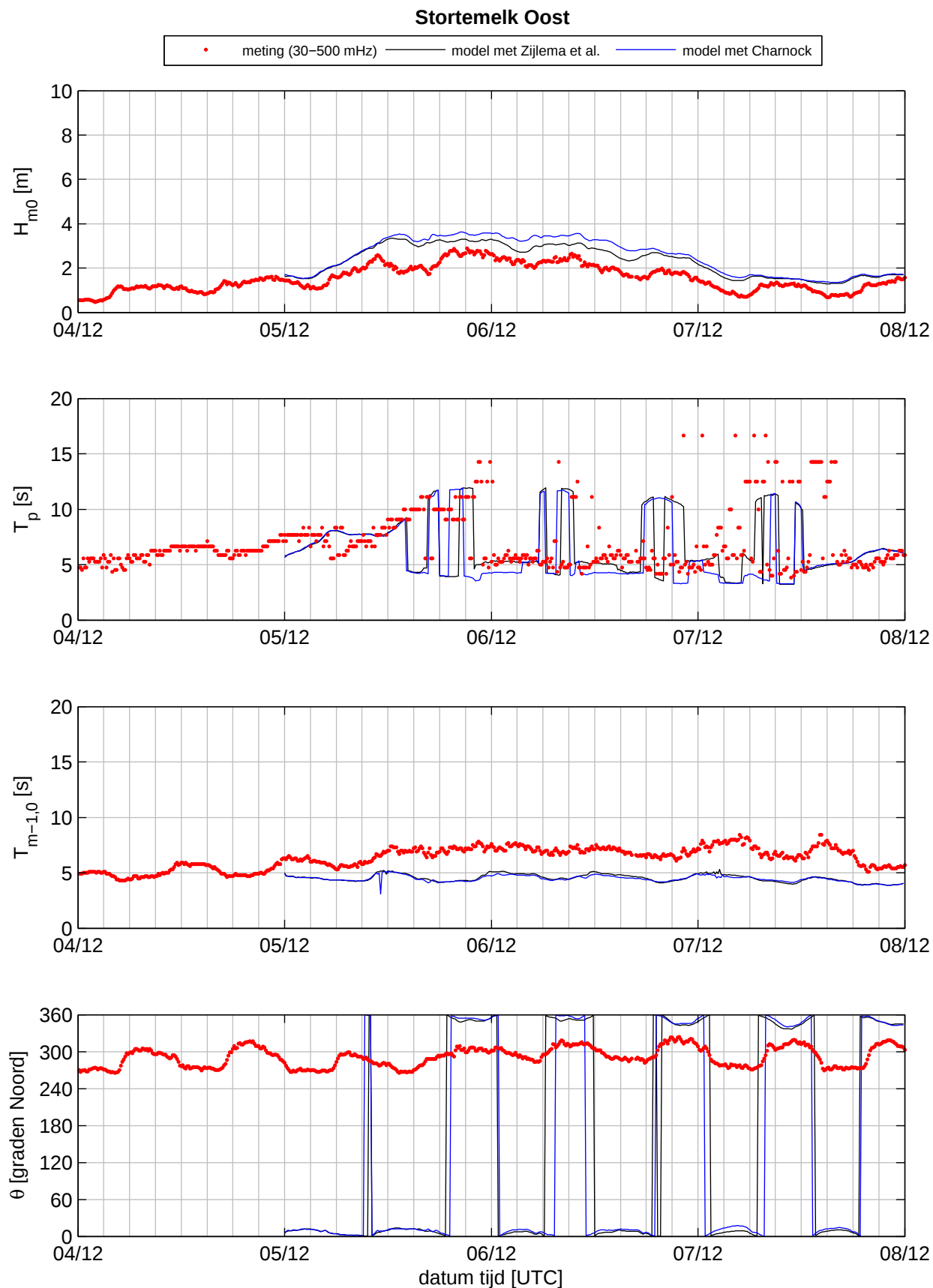
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Stortemelk boei 1

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.2



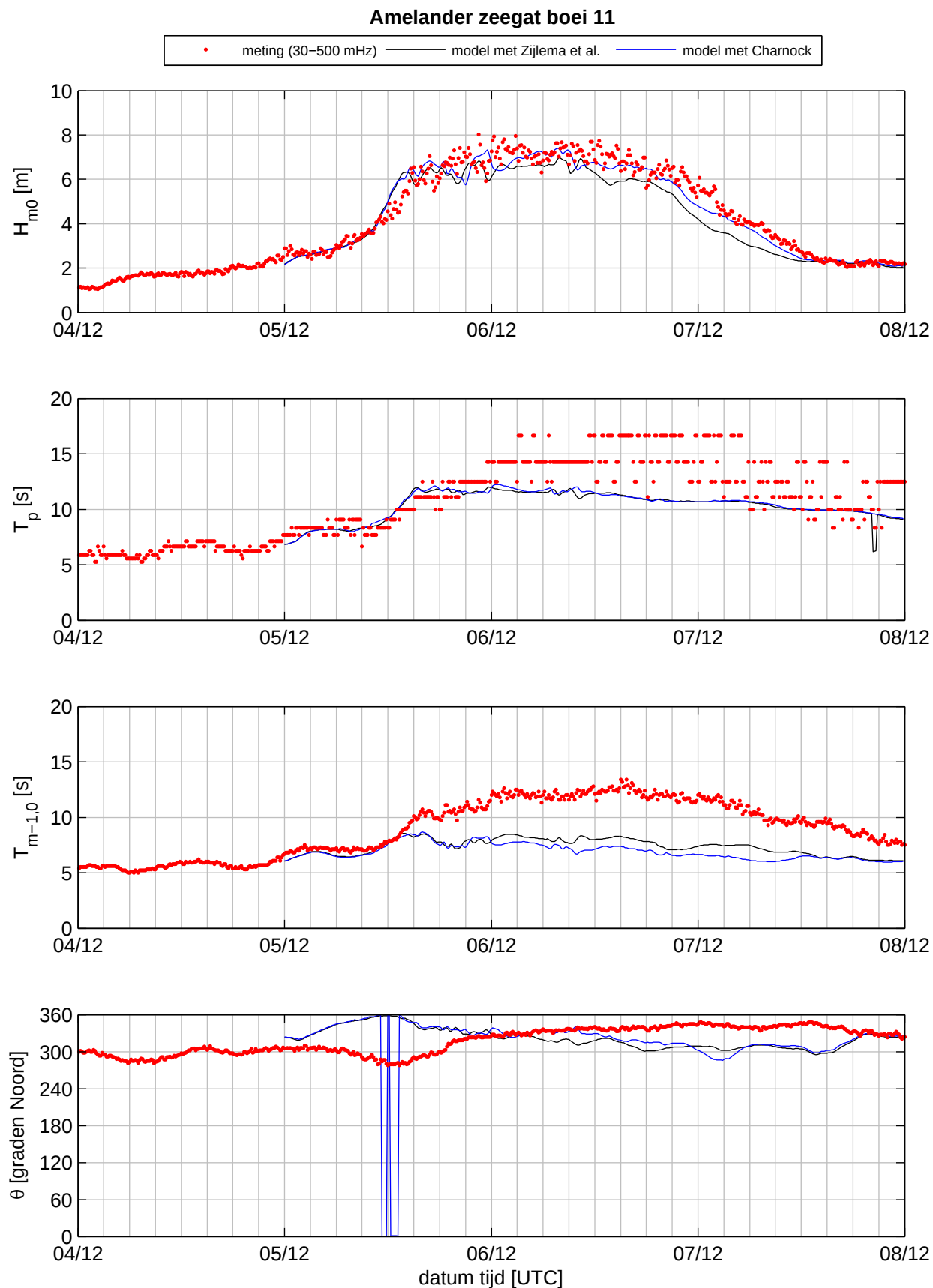
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Stortemelk Oost

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.3



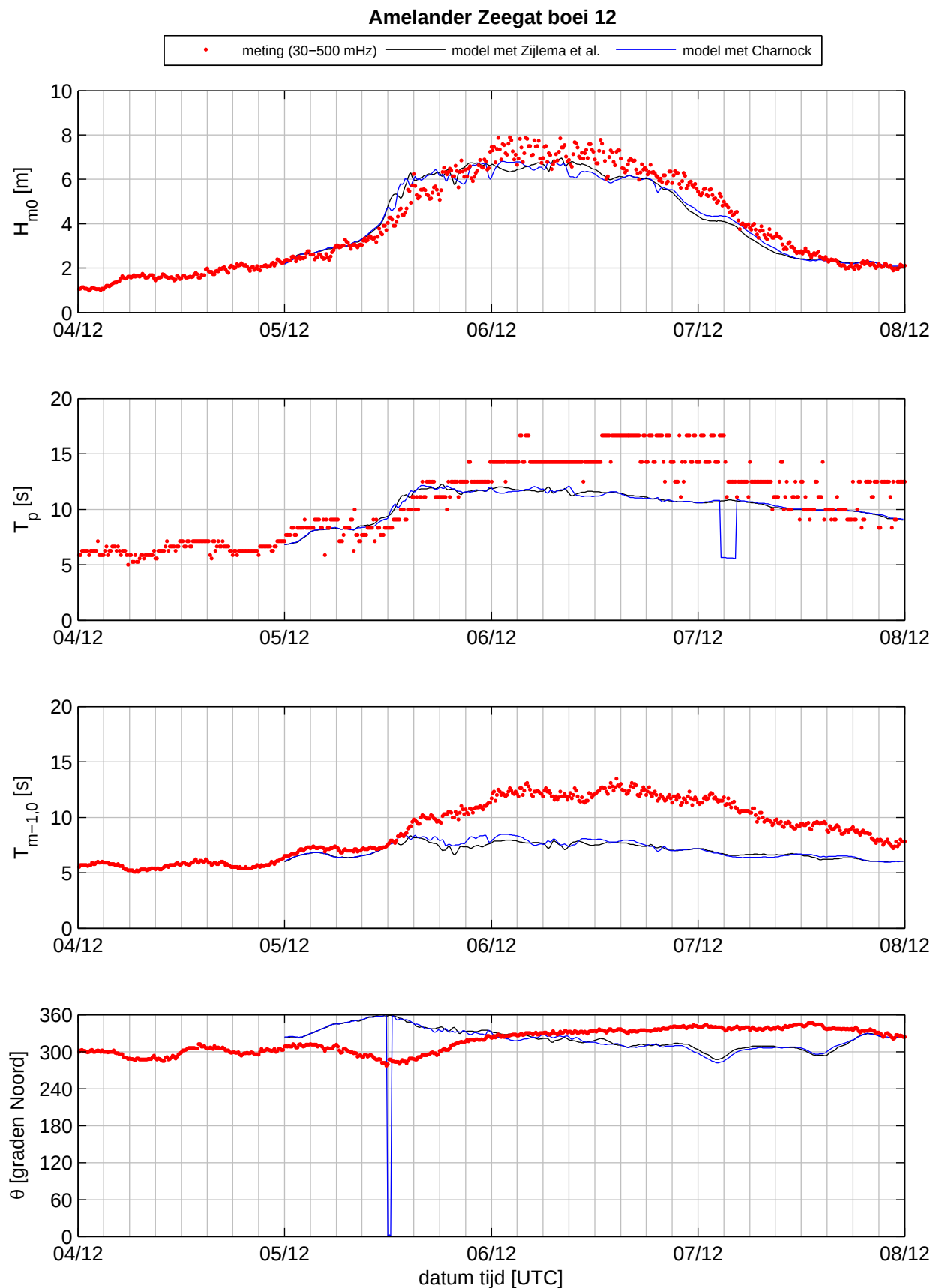
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelander zeegat boei 11

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.4



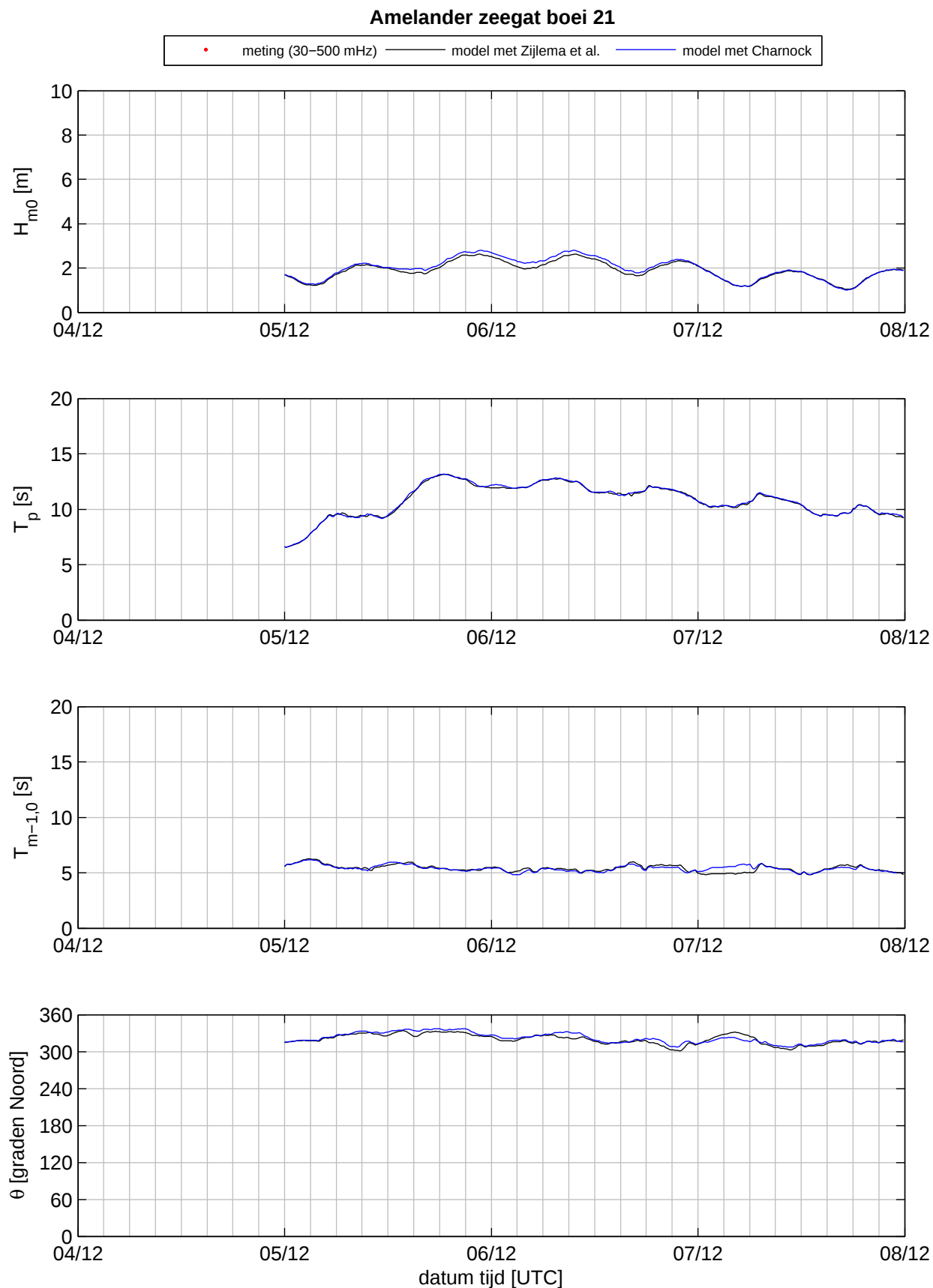
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelander Zeegat boei 12

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.5



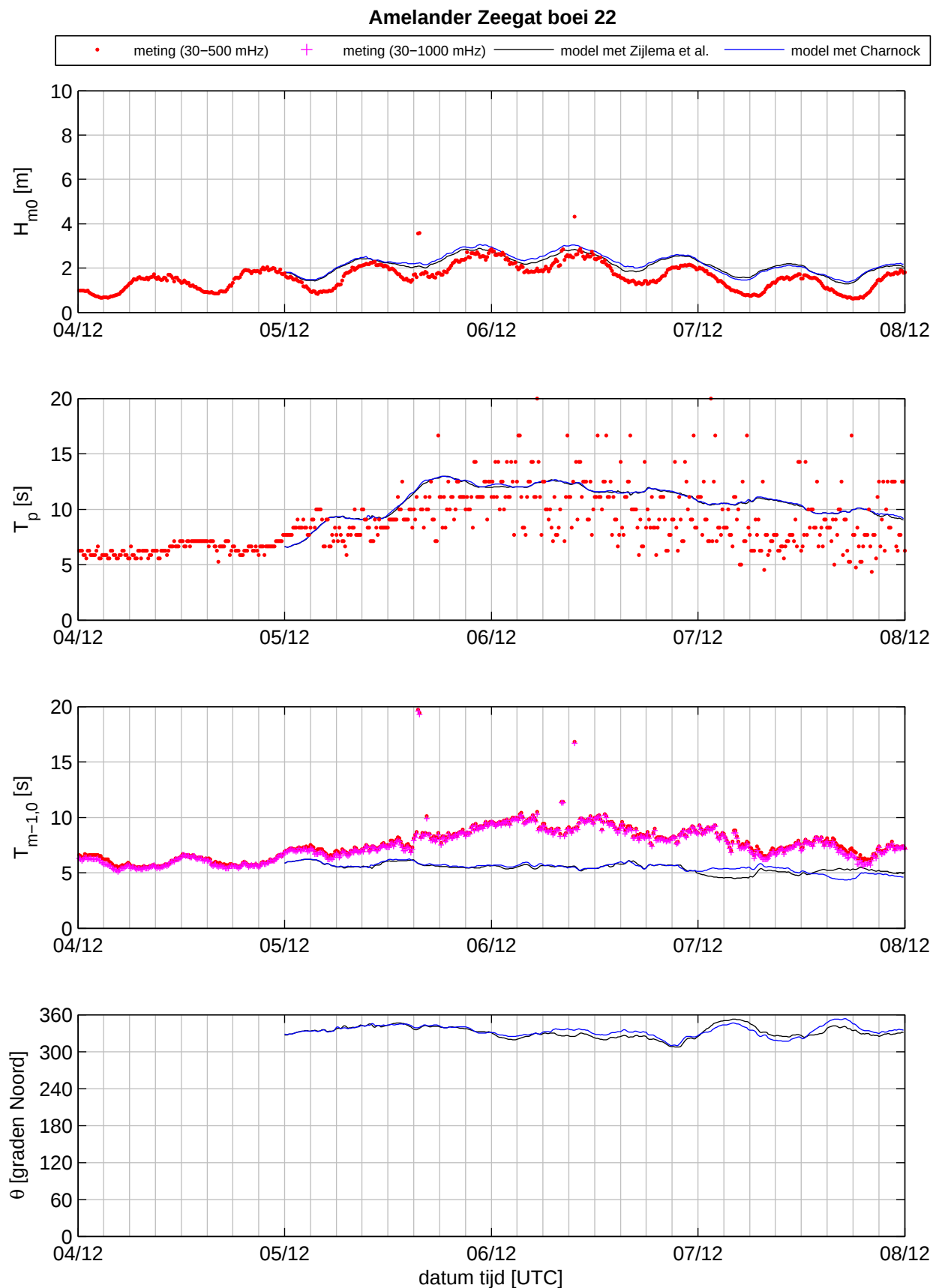
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelanders zeegat boei 21

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.6



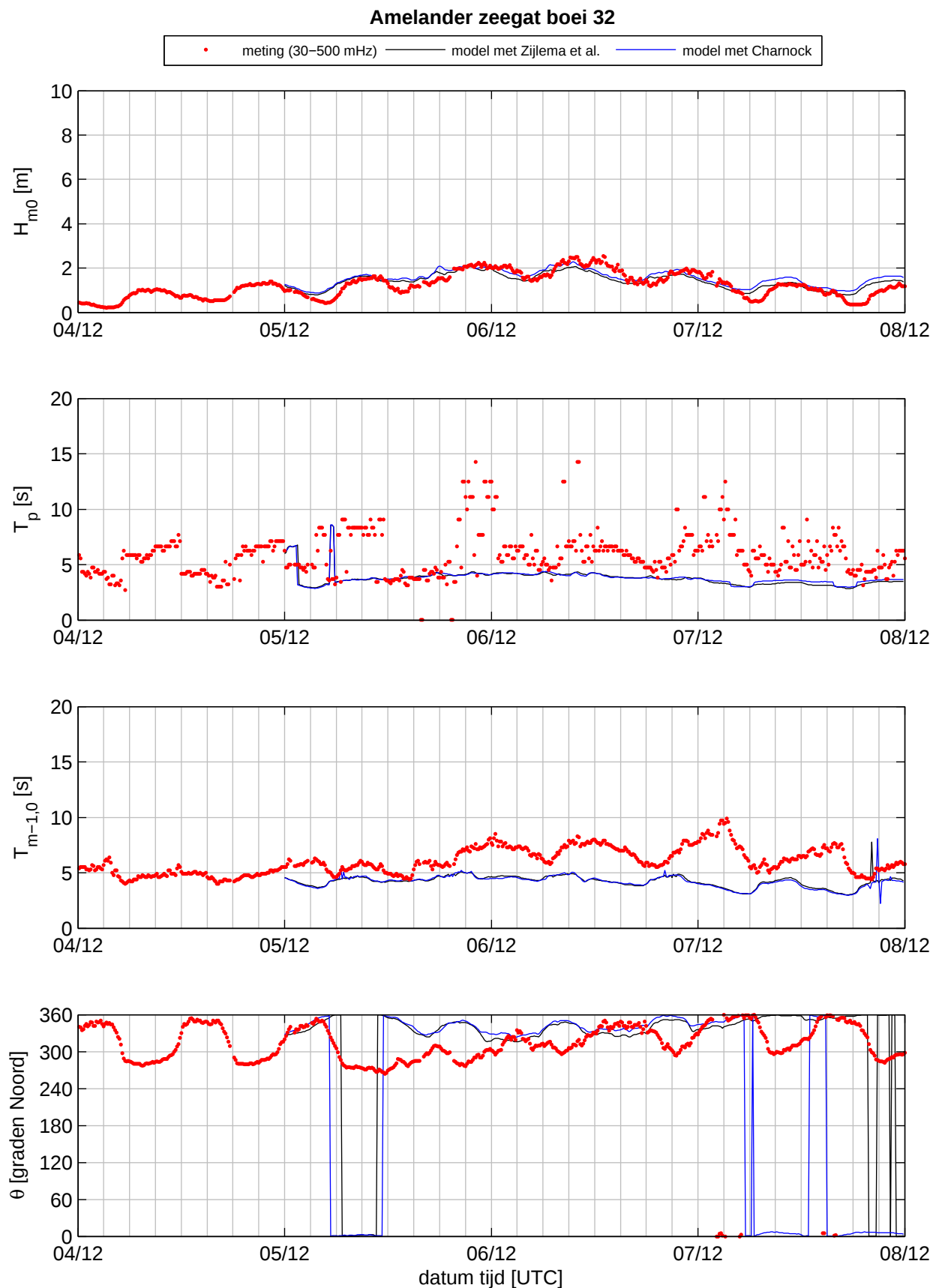
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelanders Zeegat boei 22

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.7



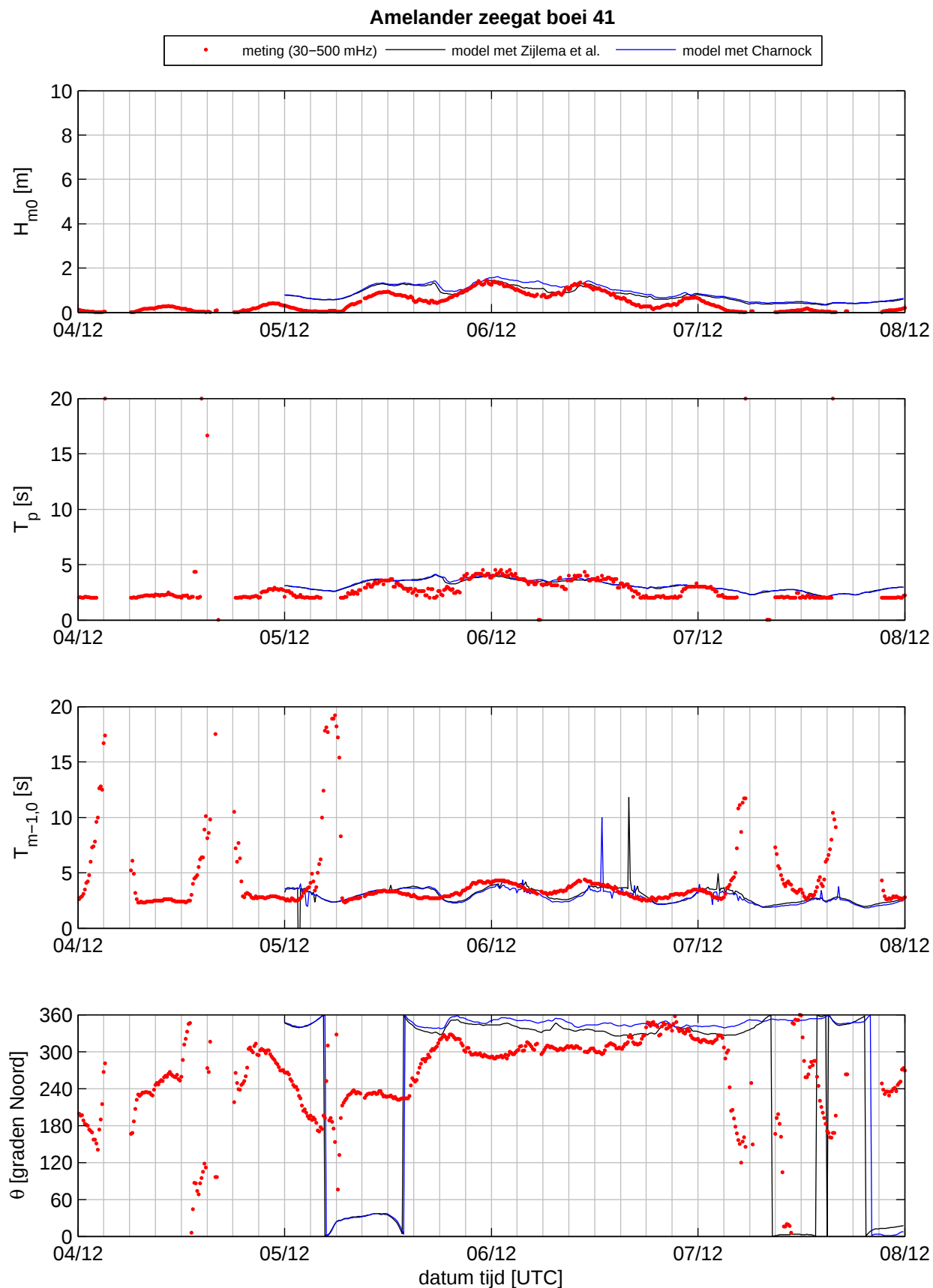
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelander zeegat boei 32

Cd–Zijlema et al. versus Cd–Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.8



Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelanders zeegat boei 41

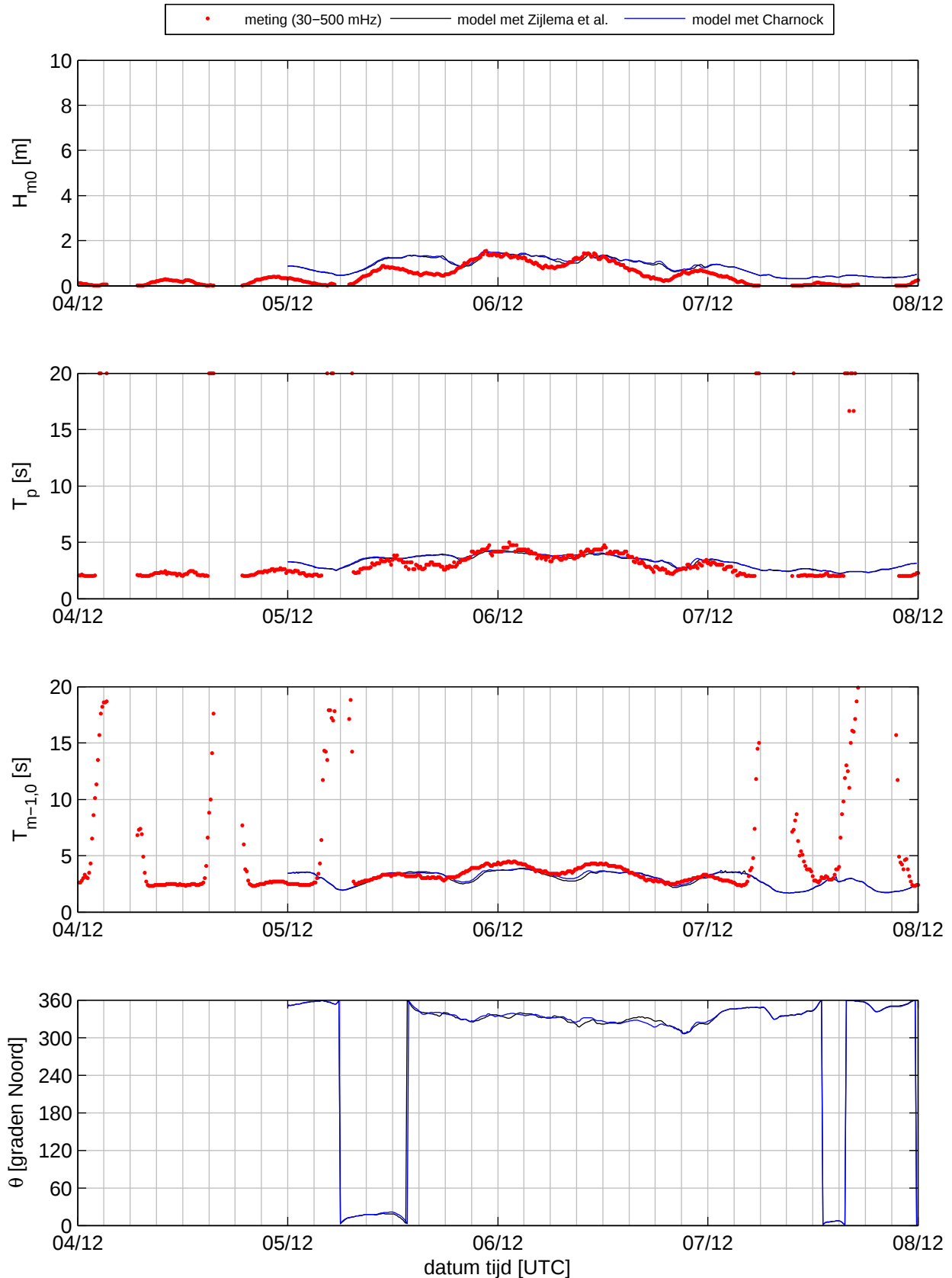
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.9

Amelande Zeegat boei 51



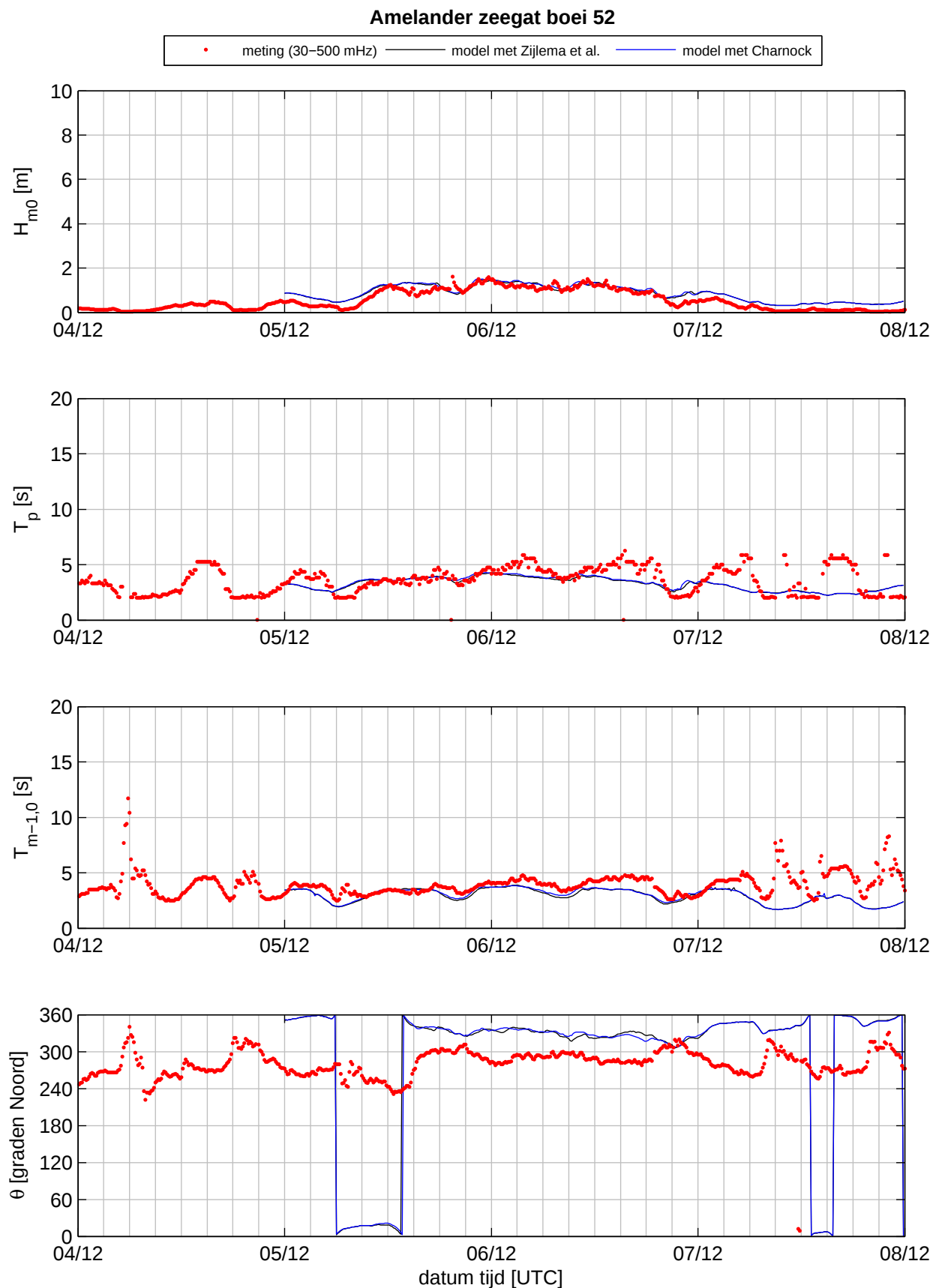
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelande Zeegat boei 51

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.10



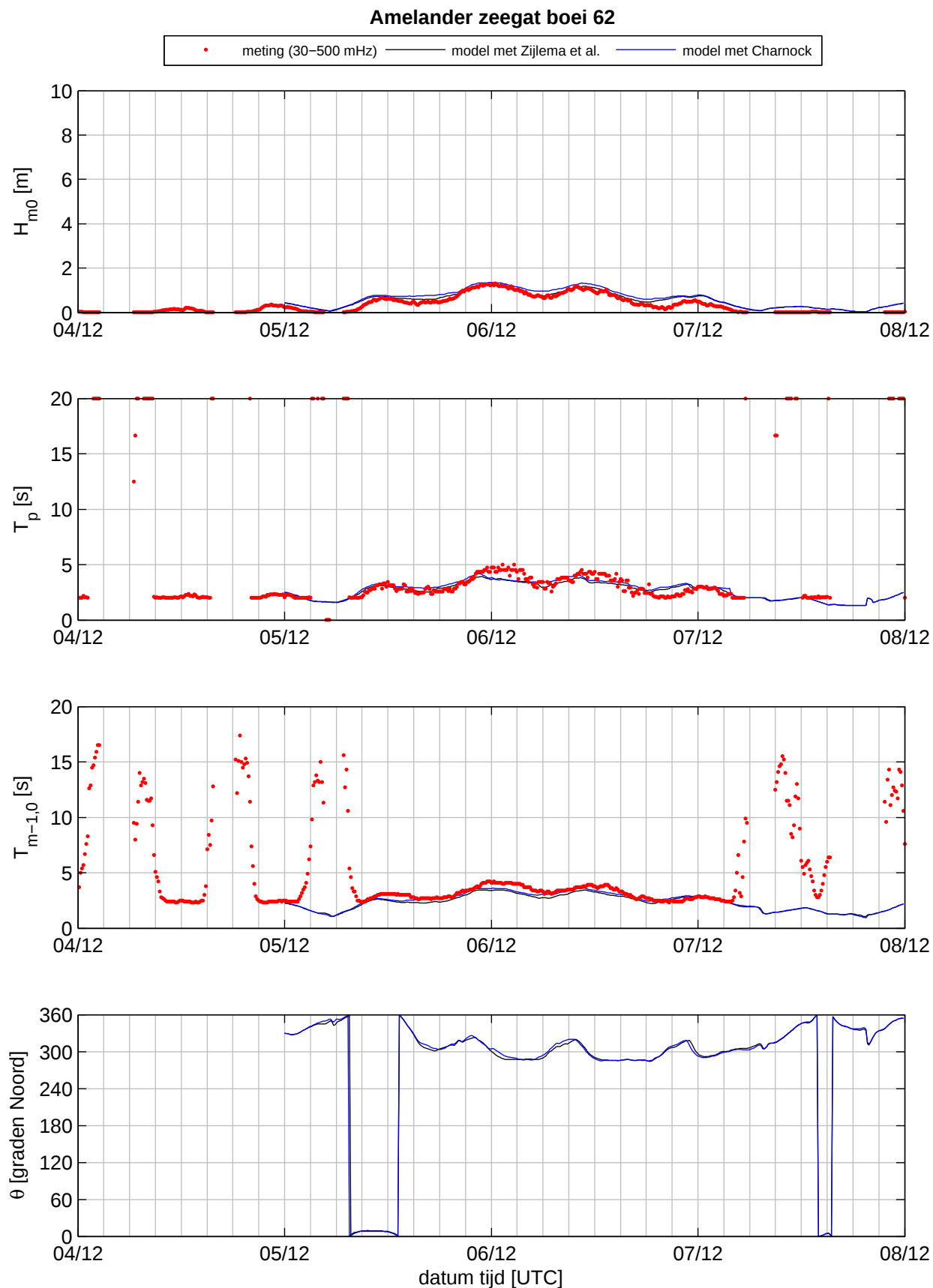
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelander zeegat boei 52

Cd–Zijlema et al. versus Cd–Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.11



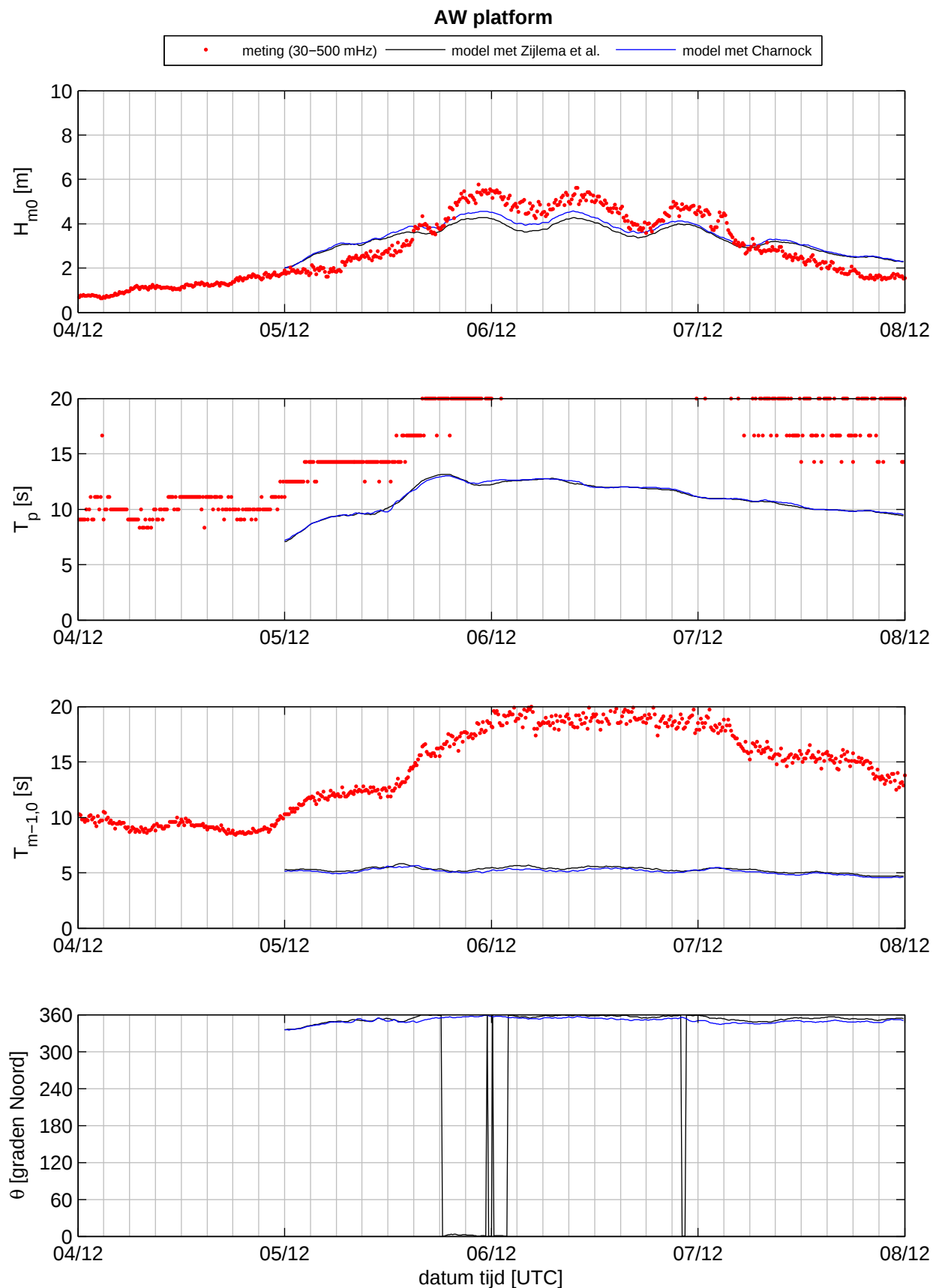
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Amelander zeegat boei 62

Cd–Zijlema et al. versus Cd–Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.12



Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station AW platform

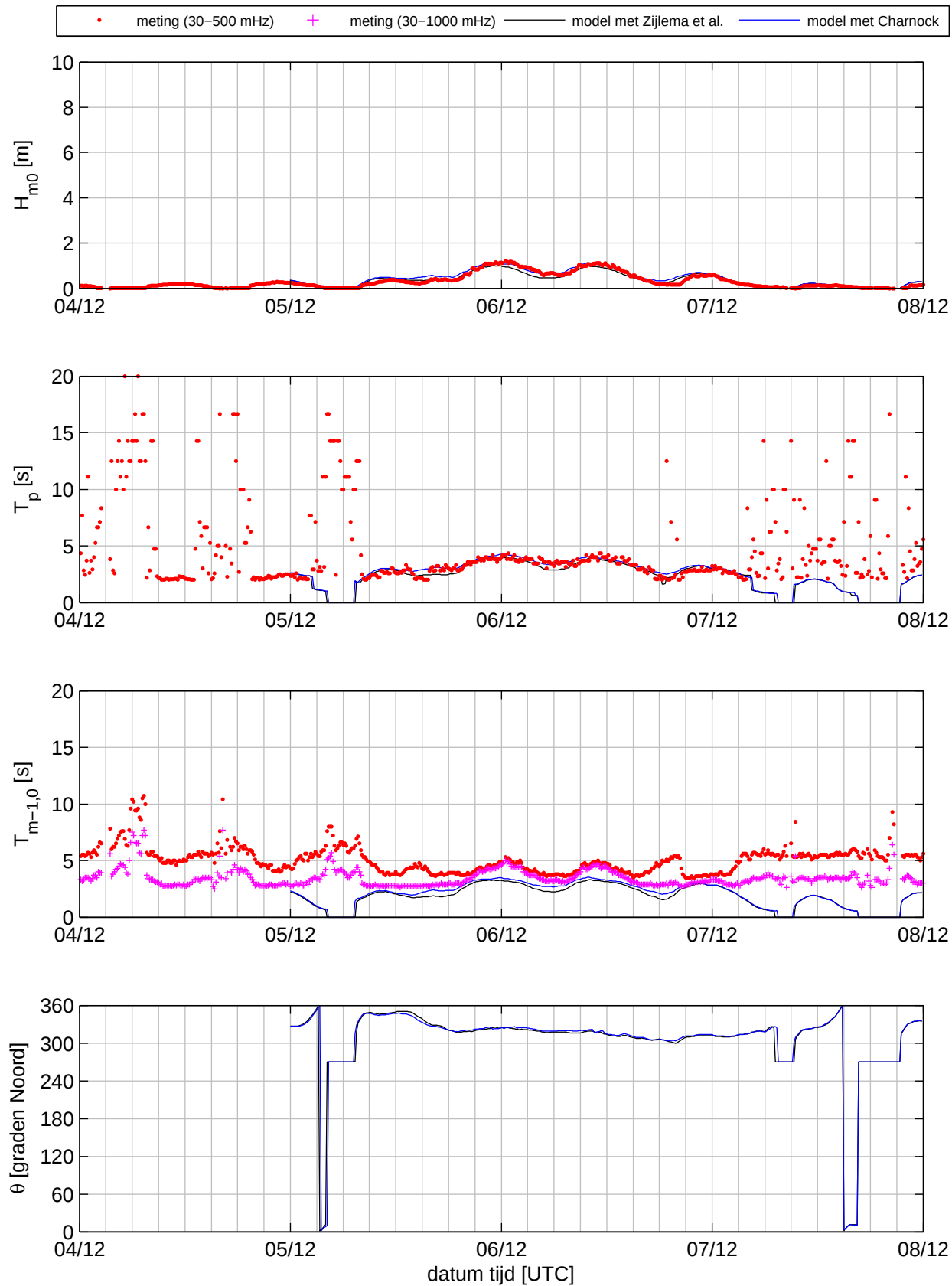
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.13

Wierumerwad 1



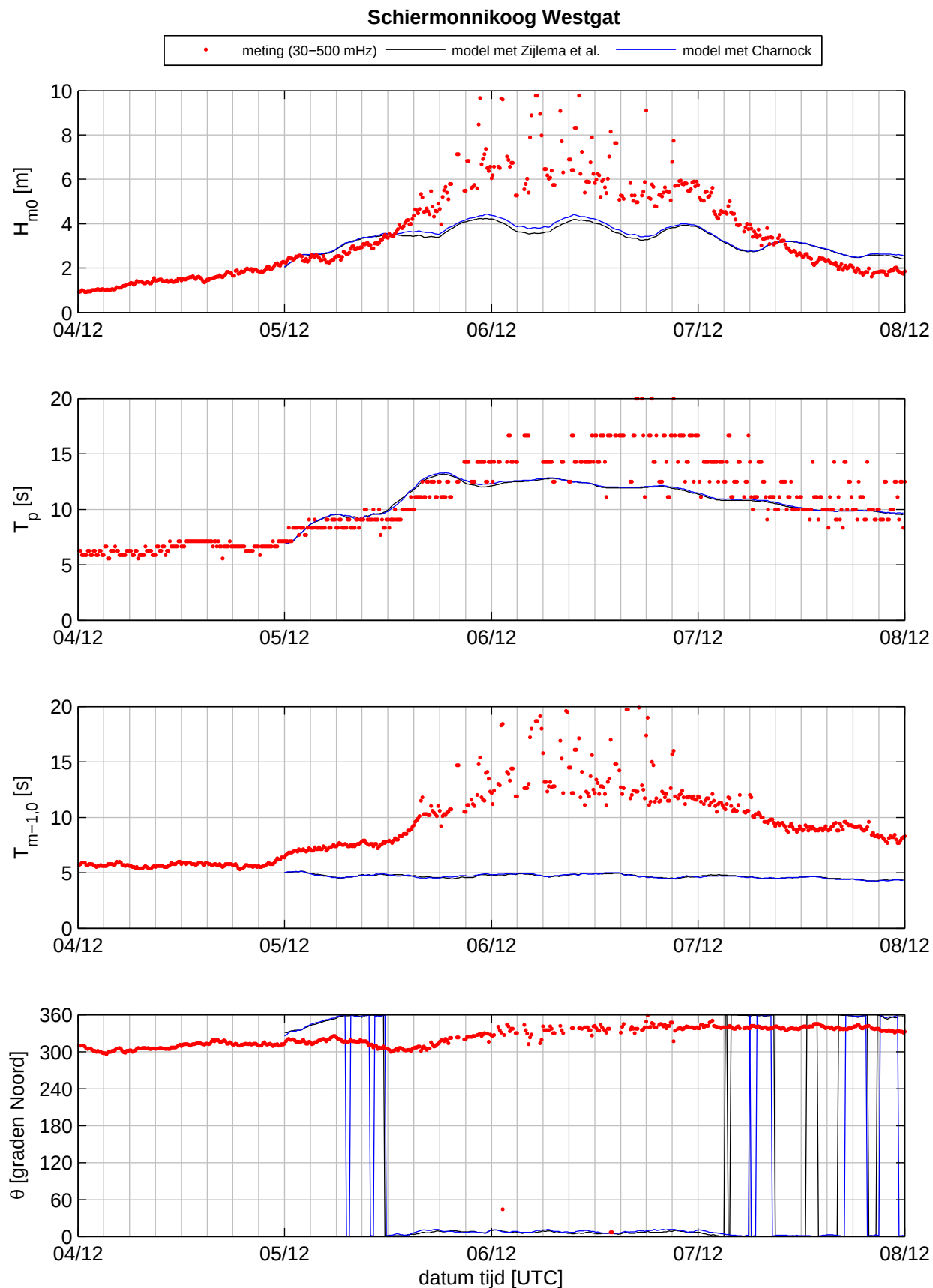
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
(centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
station Wierumerwad 1

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.14



Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Schiermonnikoog Westgat

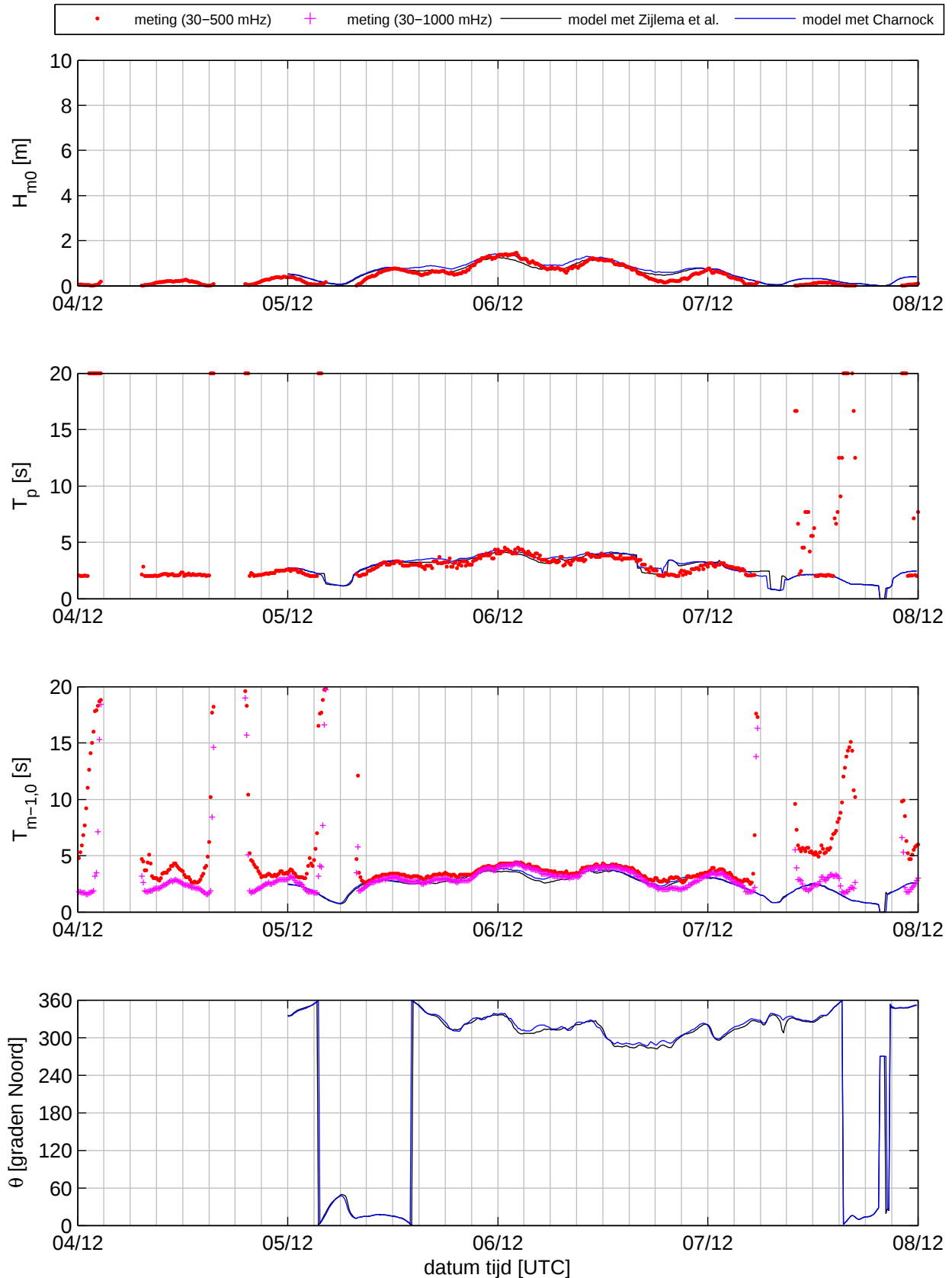
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.15

Pieterburenwad 1



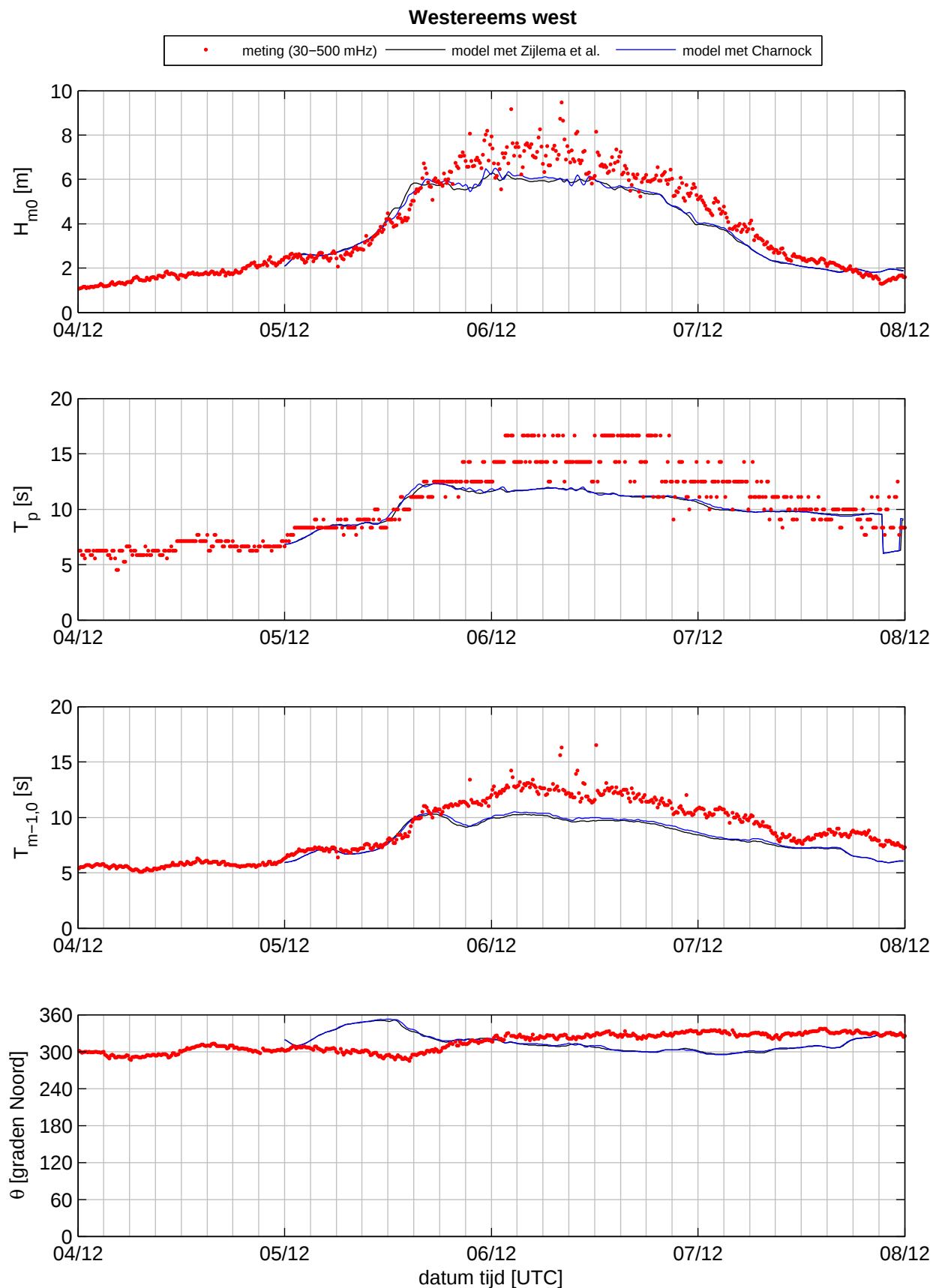
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Pieterburenwad 1

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.16



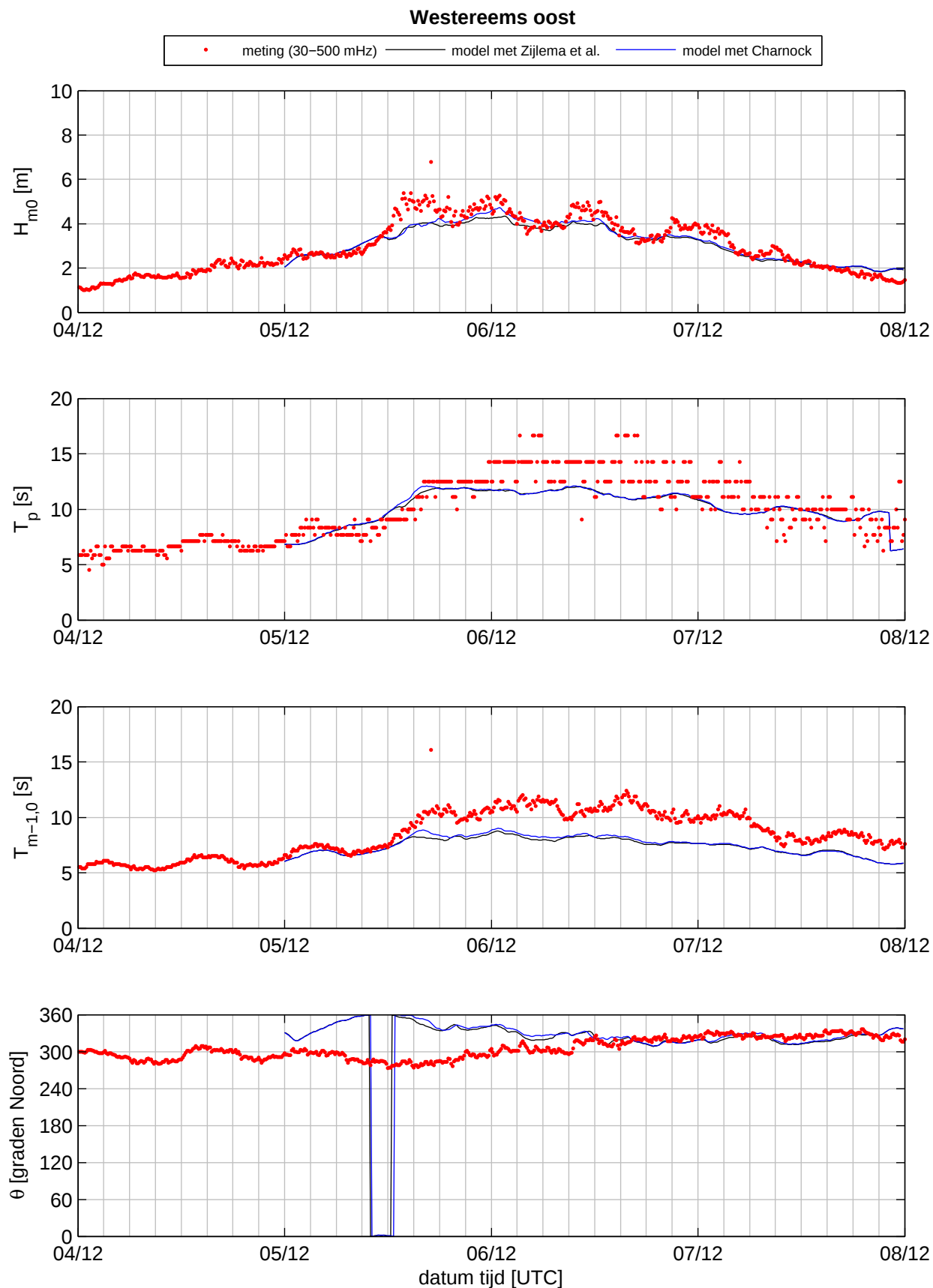
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Westereems west

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.17



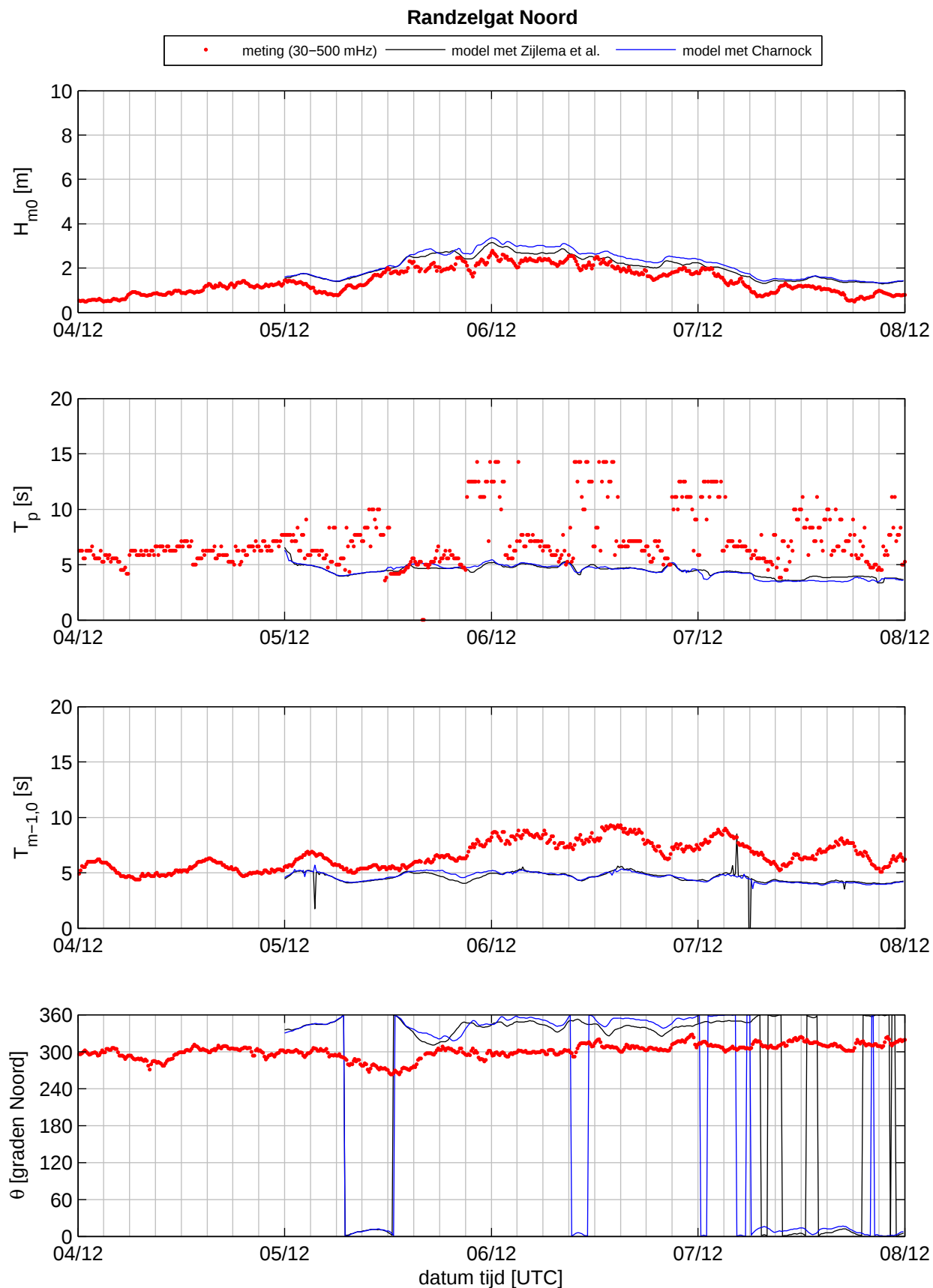
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Westereems oost

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.18



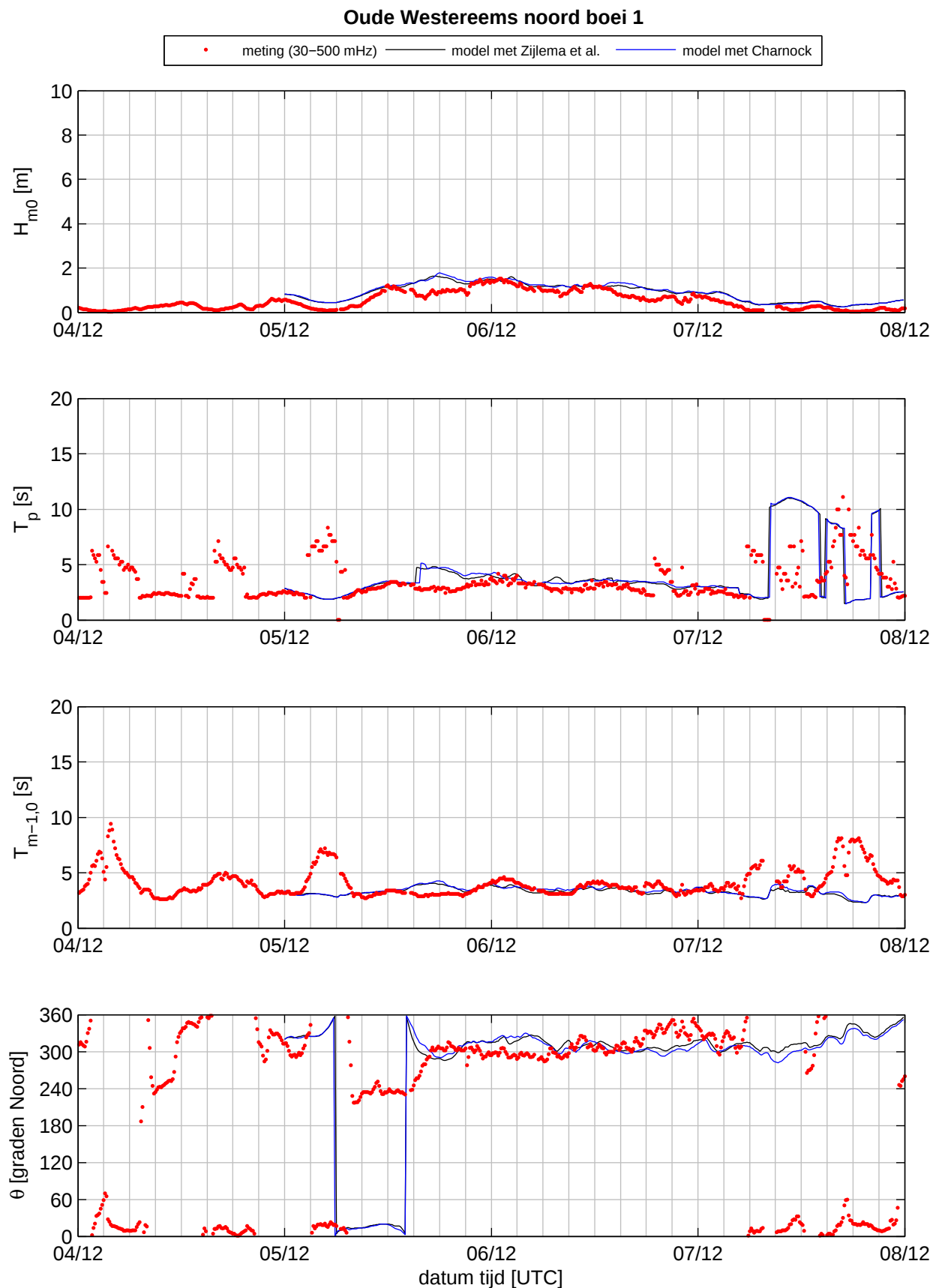
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Randzelgat Noord

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.19



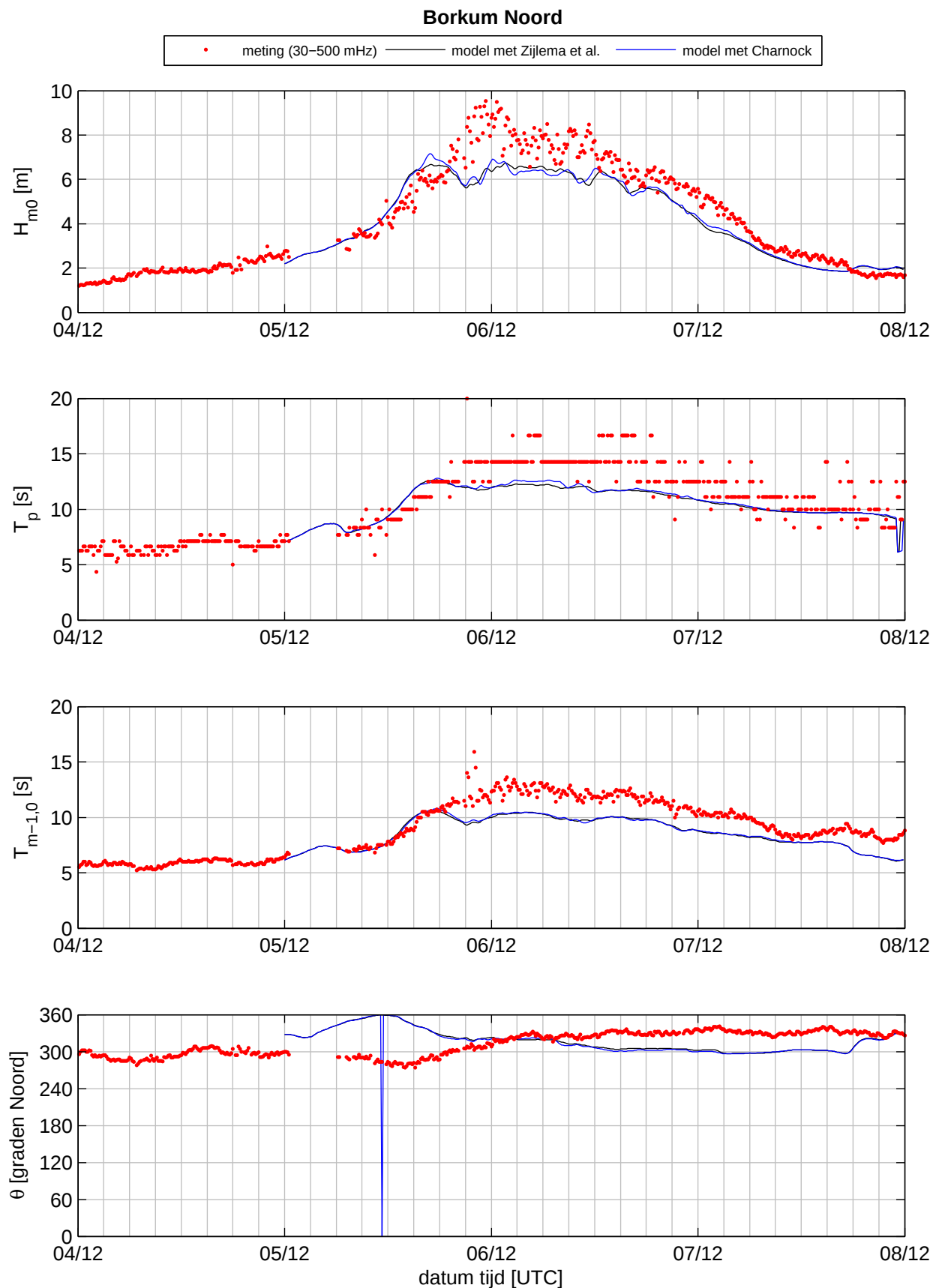
Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Oude Westereems noord boei 1

Cd–Zijlema et al. versus Cd–Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. H.20



Gemeten en gemodelleerde significante golfhoogte [m] (boven),
 piek-golfperiode [s] (centraal-boven), gemiddelde golfperiode [s]
 (centraal-onder) en gemiddelde golfrichting (onder)
 station Borkum Noord

Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

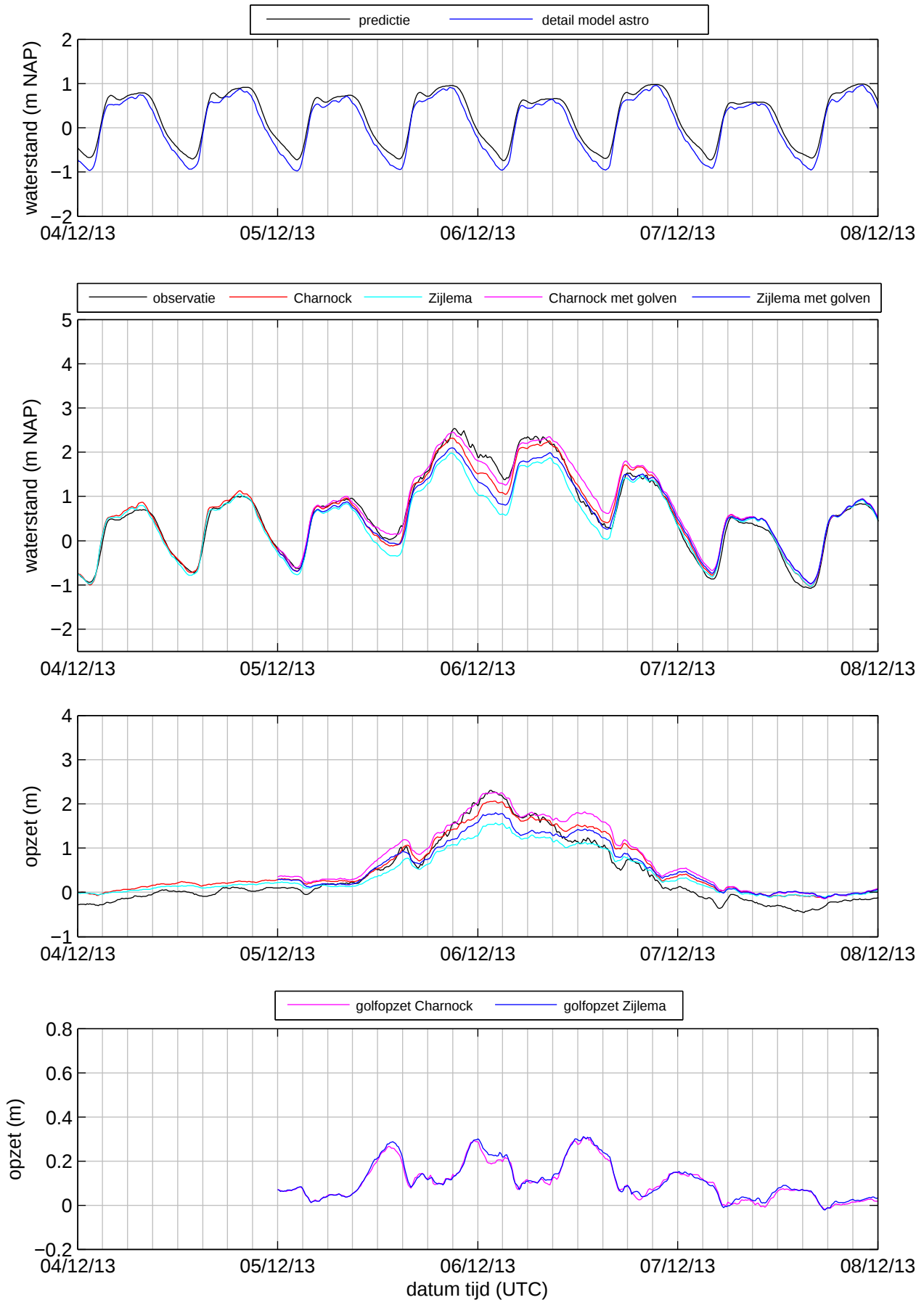
C03041.001941

Fig. H.21

Bijlage I

Gemodelleerde waterstanden met golven

DEN HELDER



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Den Helder, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

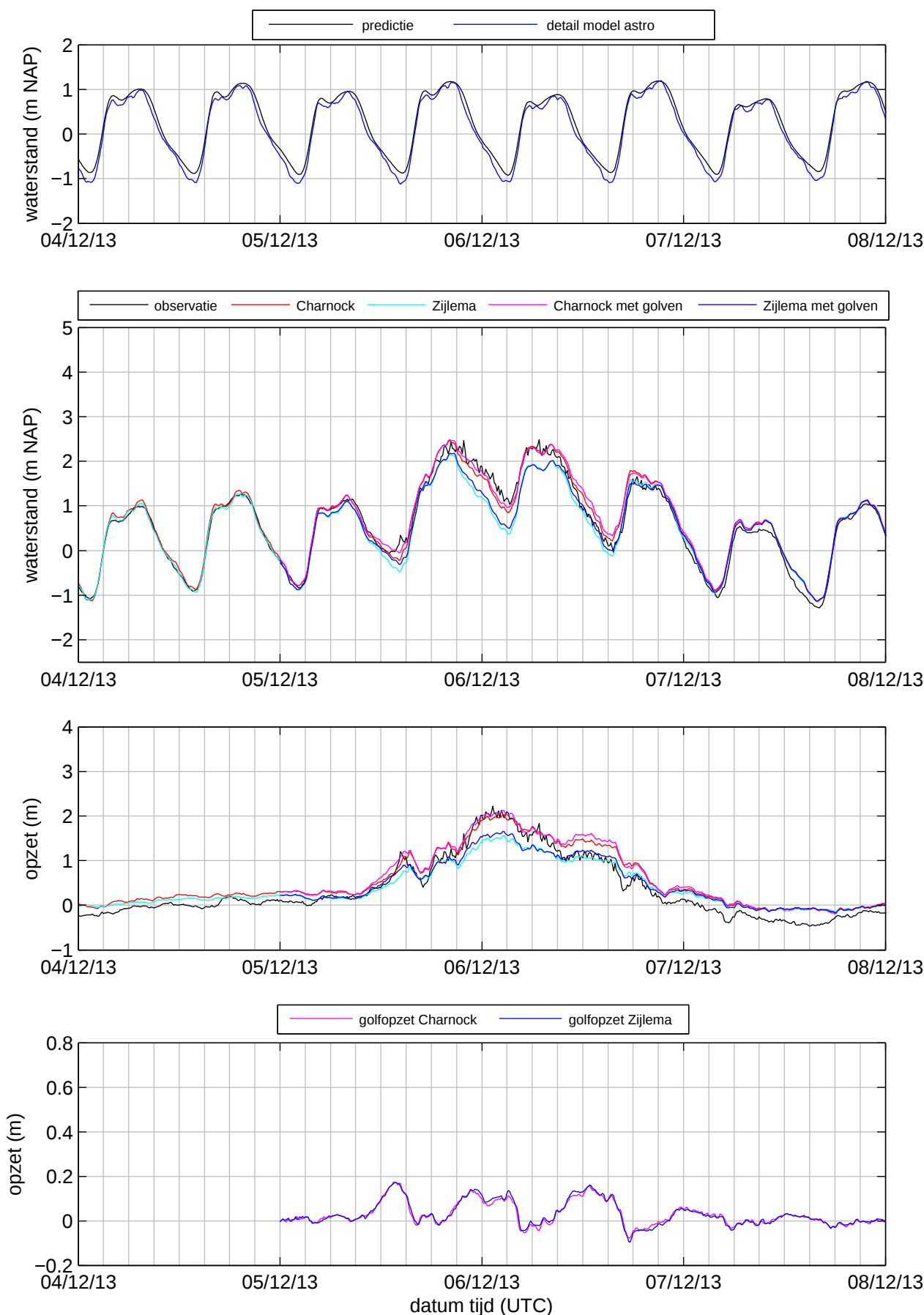
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.1

TEXEL NOORDZEE



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Texel Noordzee, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

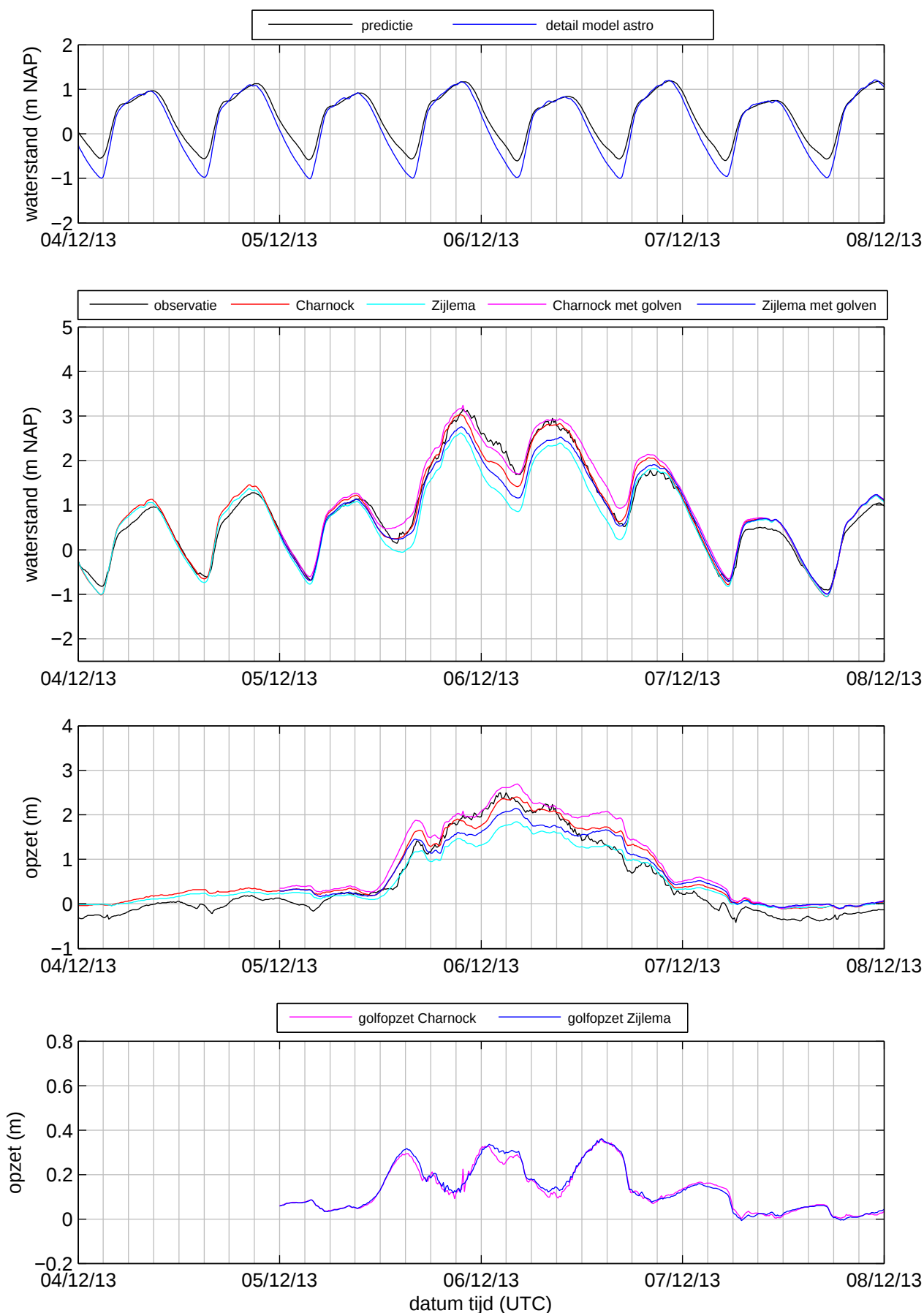
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.2

DEN OEVER BUITEN



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Den Oever buiten, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

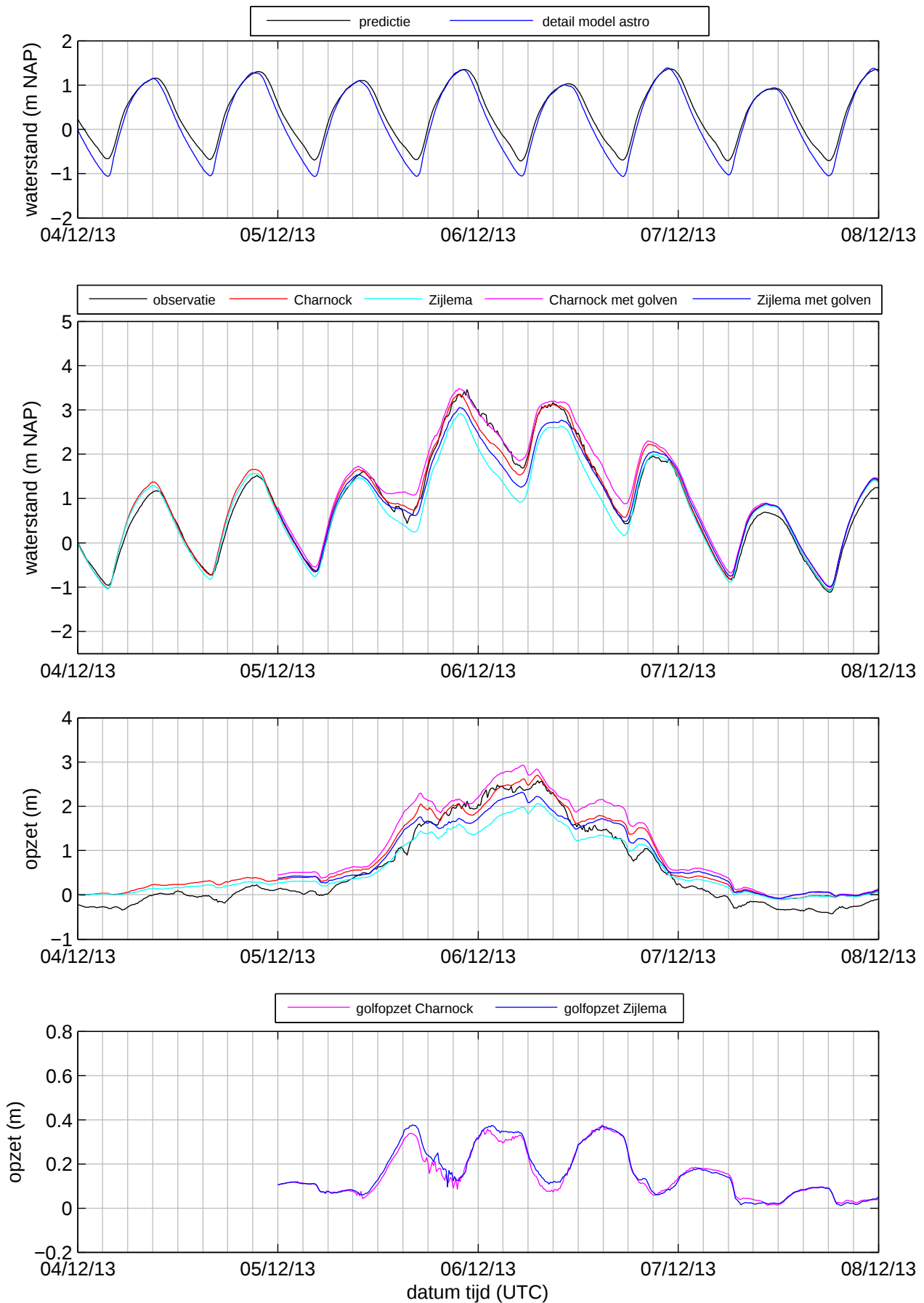
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.3

KORNWERDERZAND BUI.



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Kornwerderzand bui., astronomische component (boven) totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

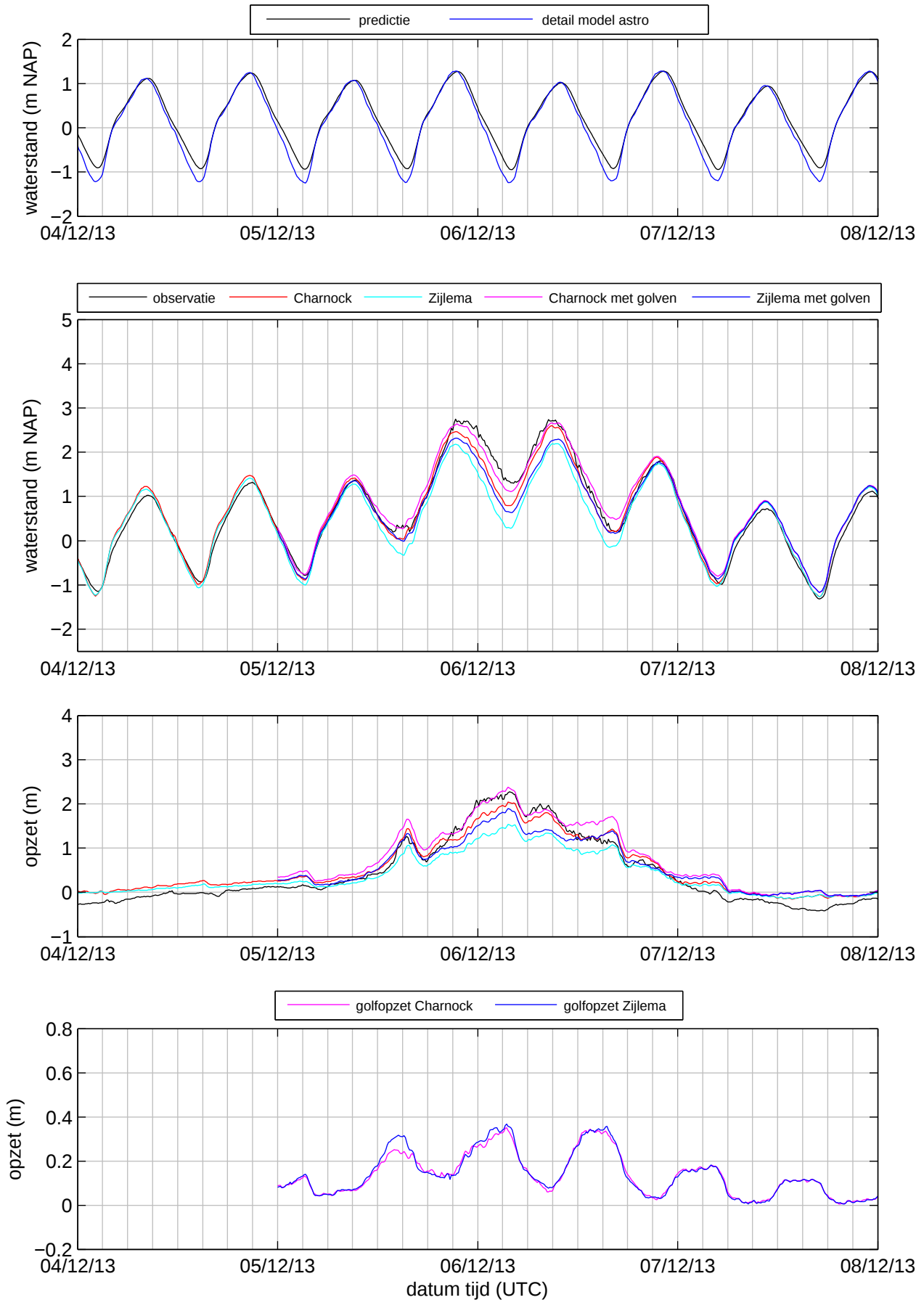
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.4

VLIELAND HAVEN



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Vlieland haven, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

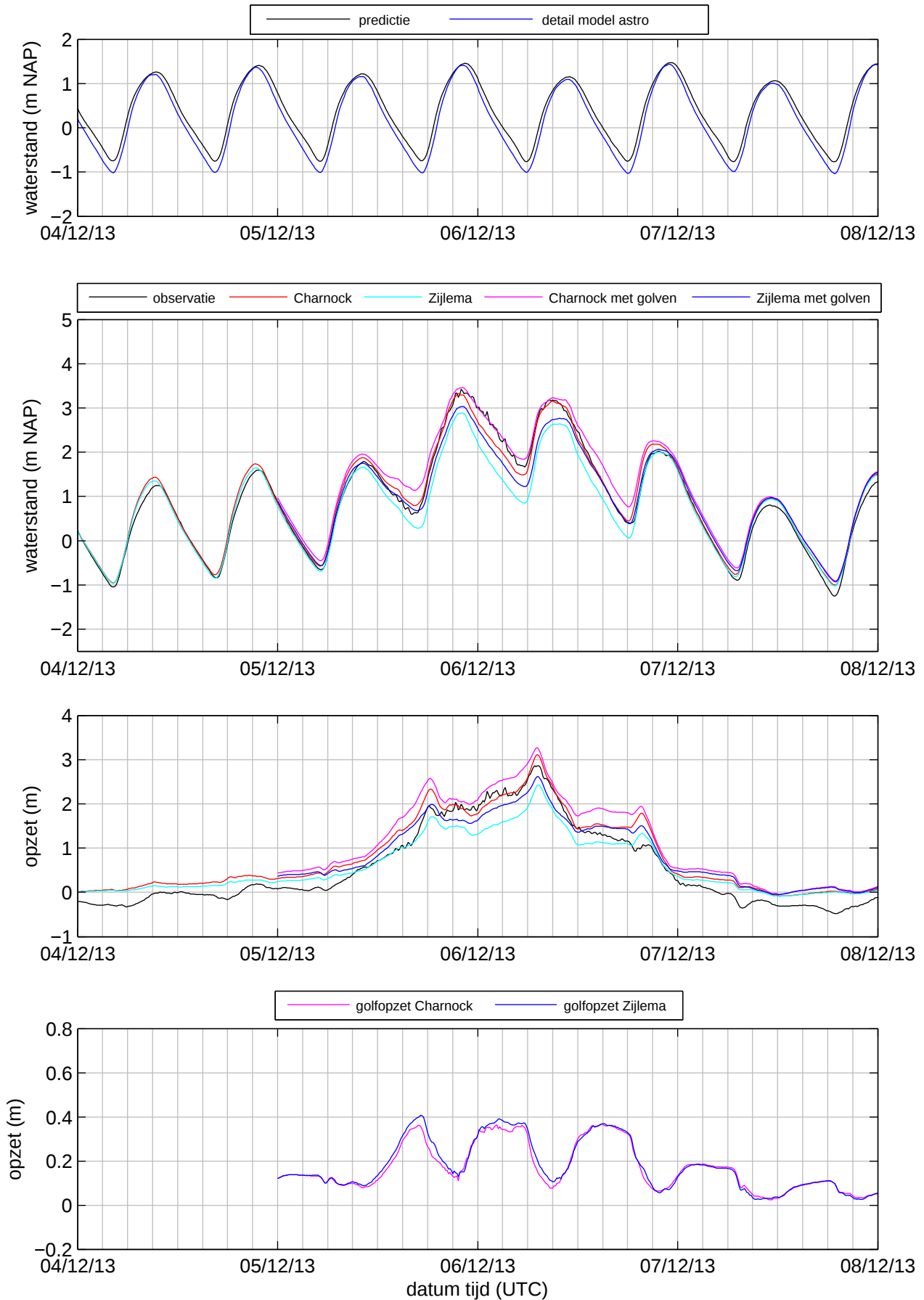
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.5

HARLINGEN



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Harlingen, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

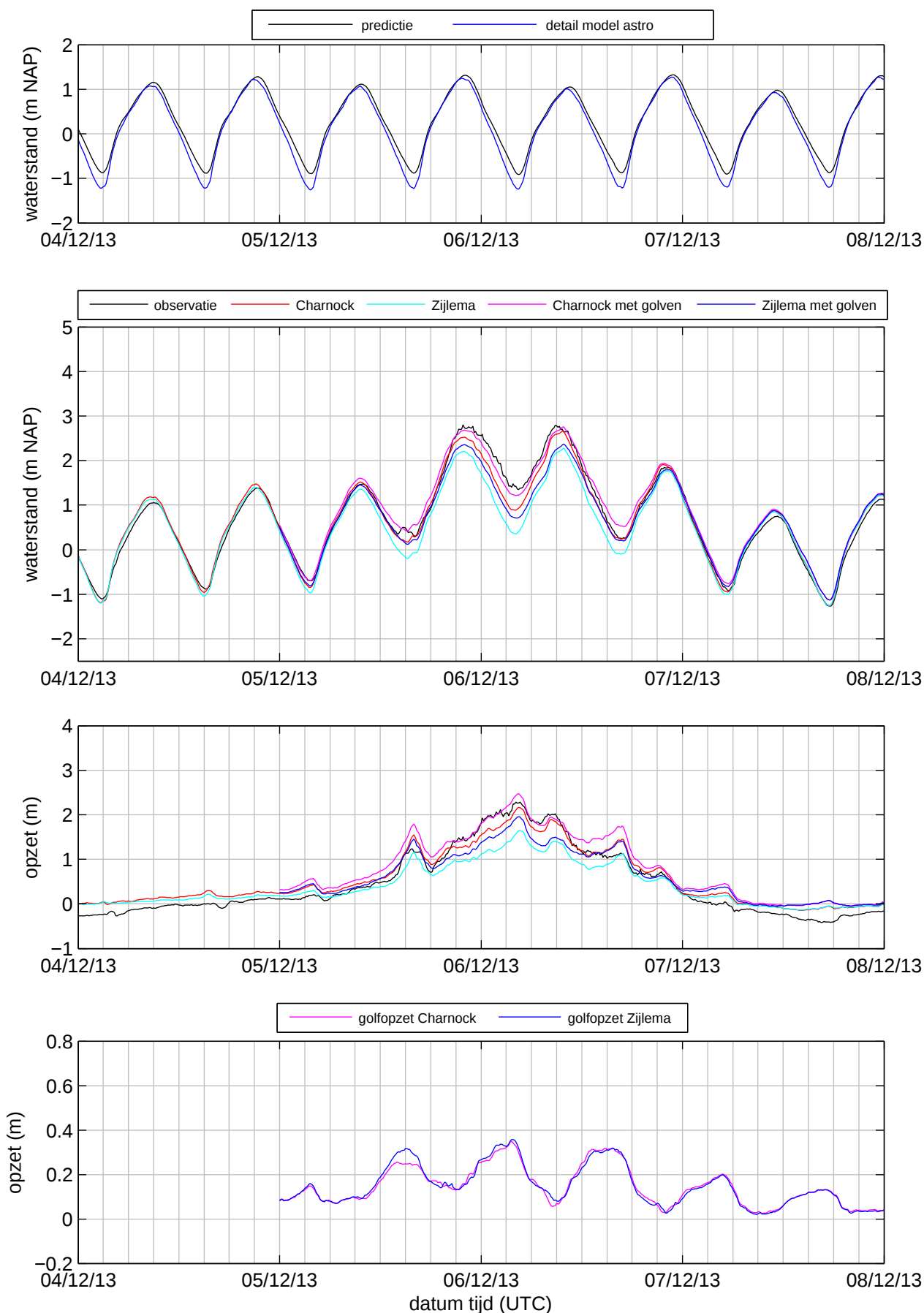
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.6

WEST-Terschelling



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station West-Terschelling, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

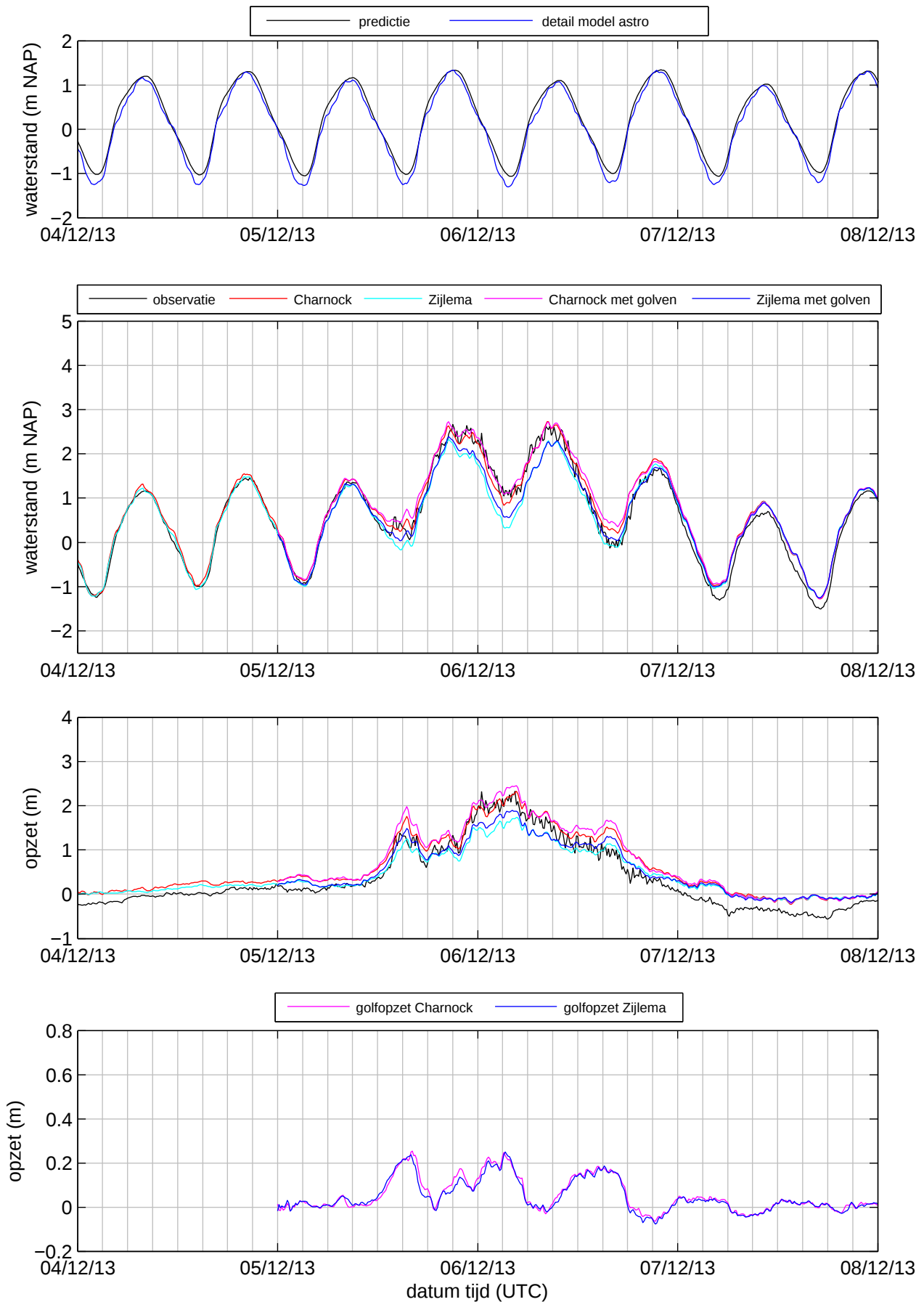
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.7

TERSCHELLING NOORDZ.



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Terschelling Noordz., astronomische component (boven) totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

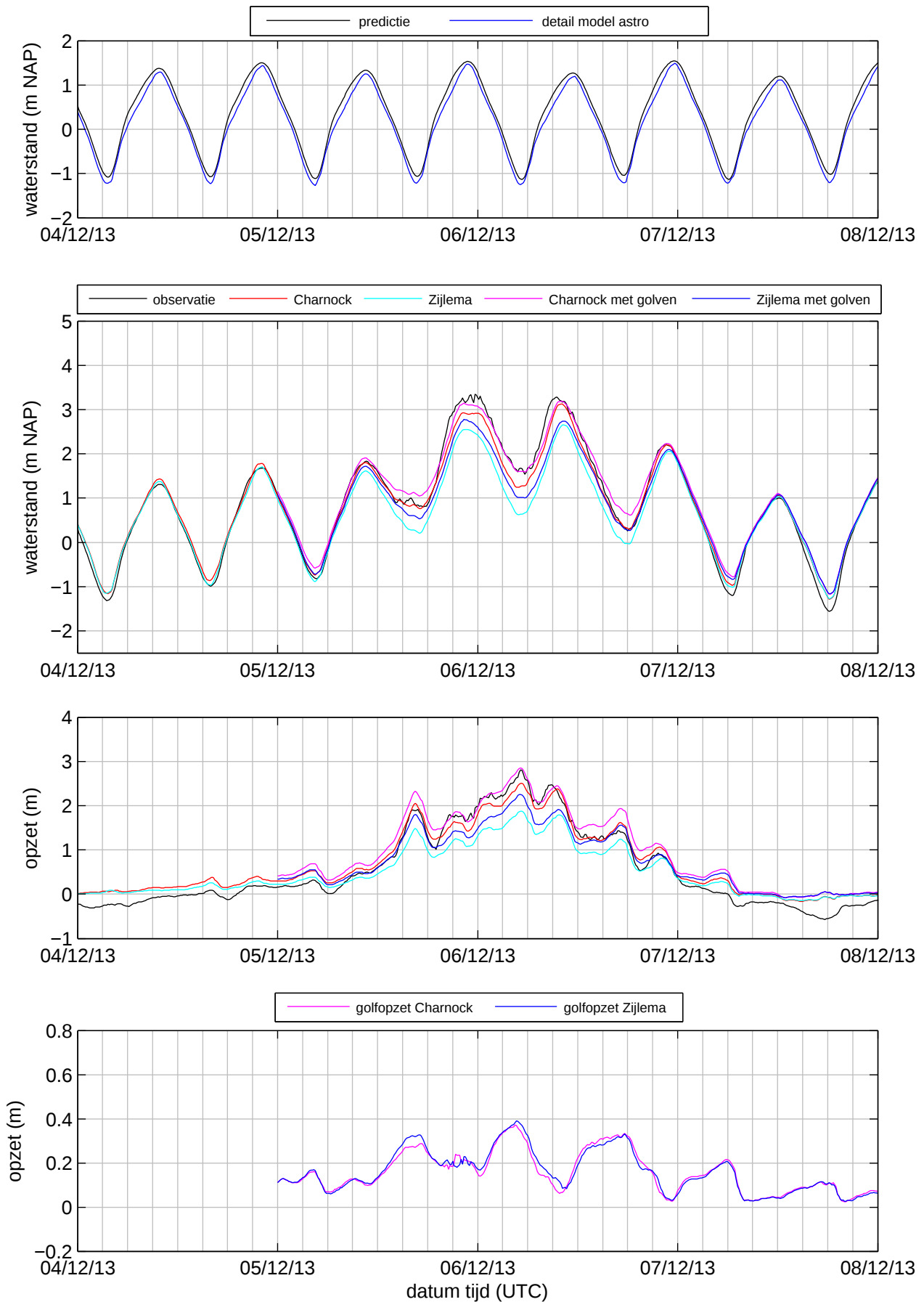
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.8

NES



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Nes, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

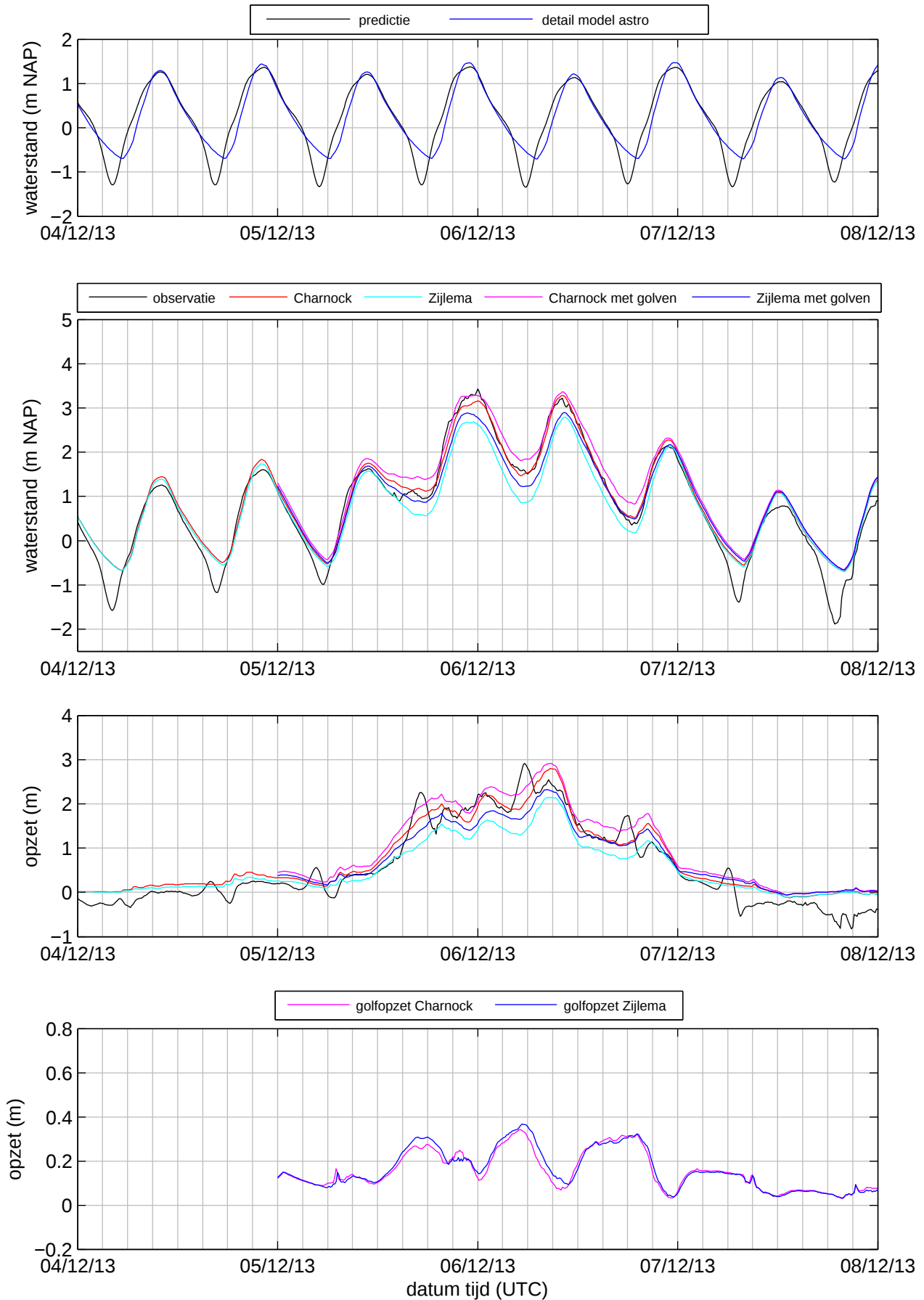
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.9

HOLWERD



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Holwerd, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

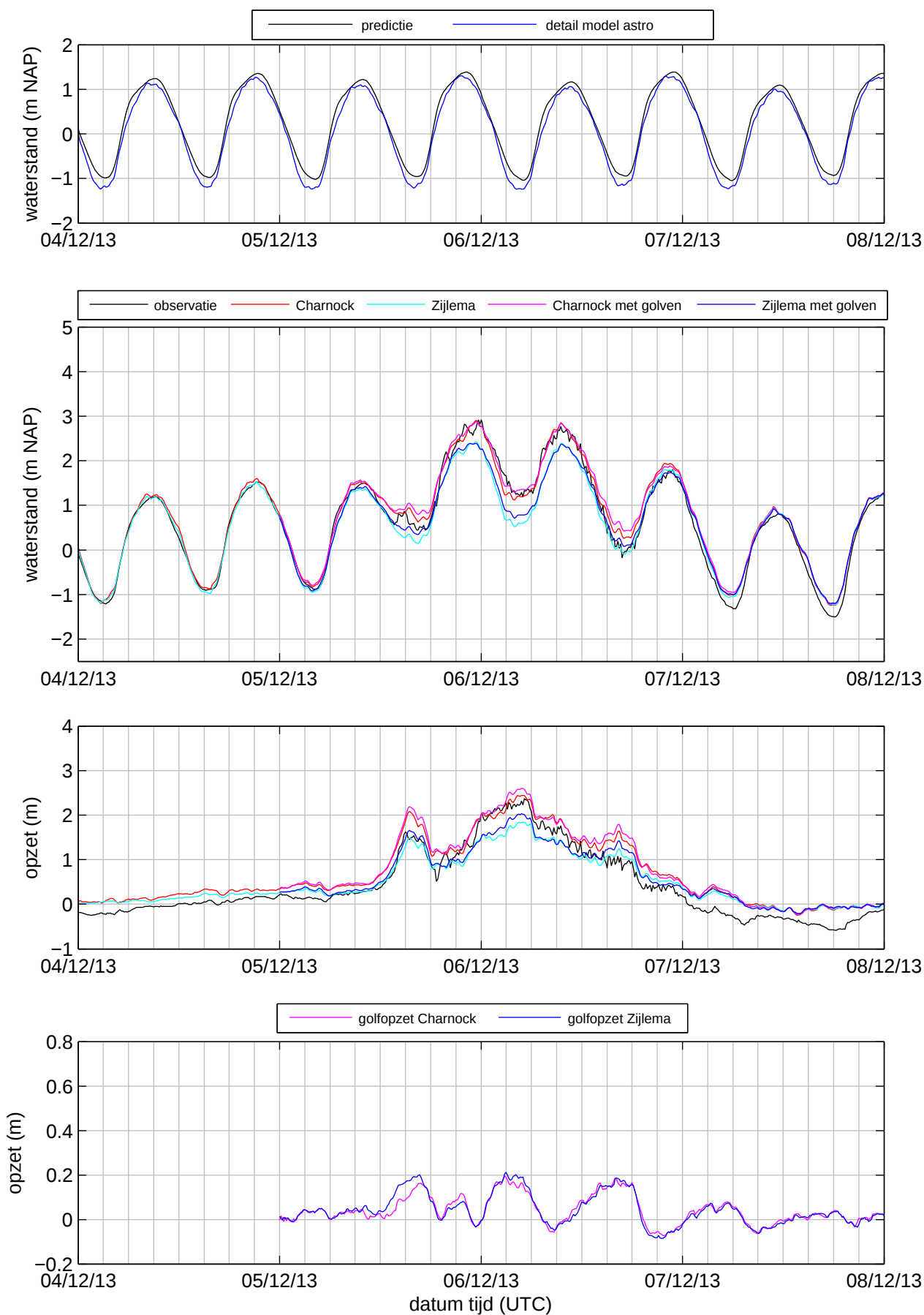
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.10

WIERUMERGRONDEN



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Wierumergronden, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

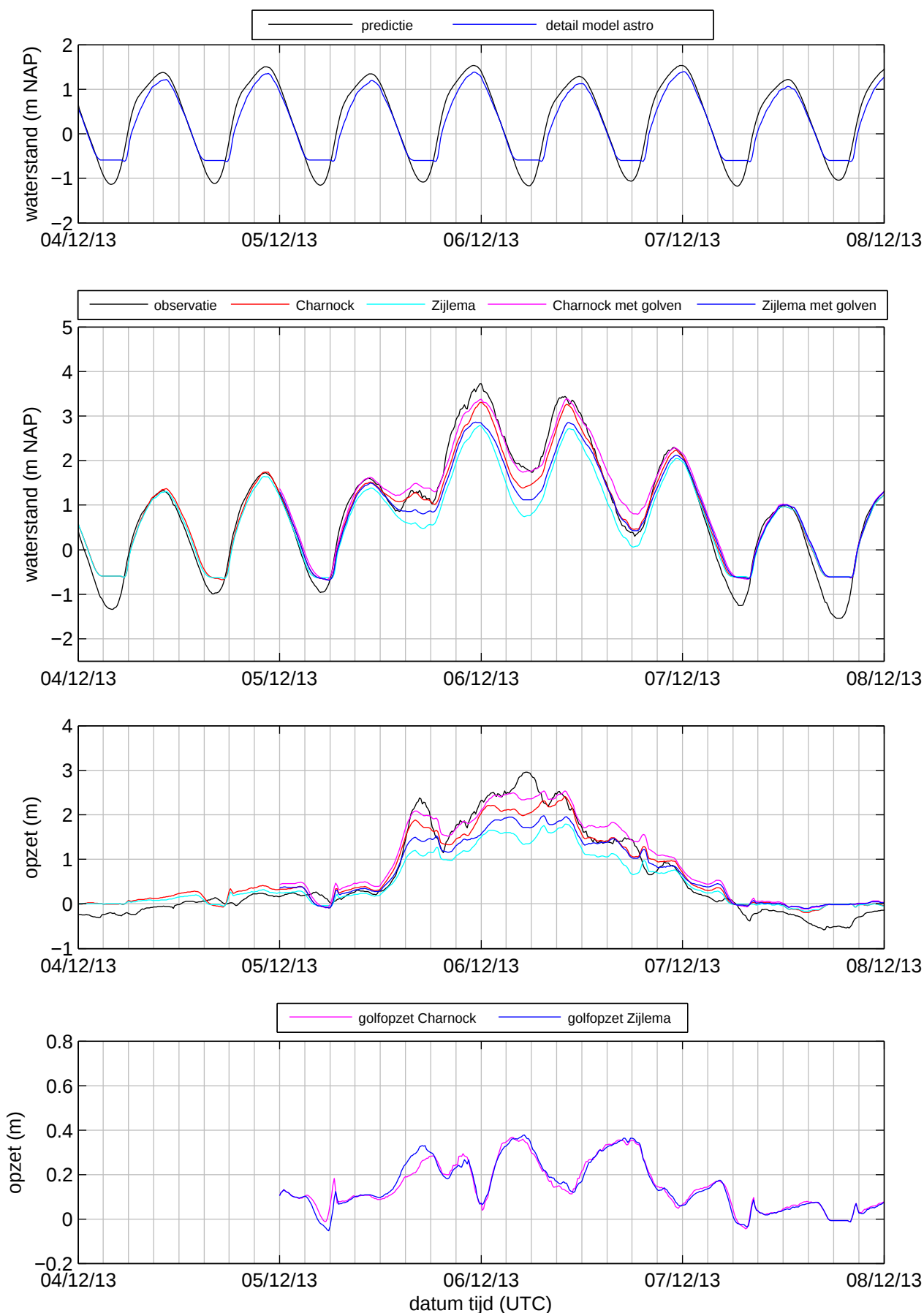
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.11

LAUWERSOOG



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Lauwersoog, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

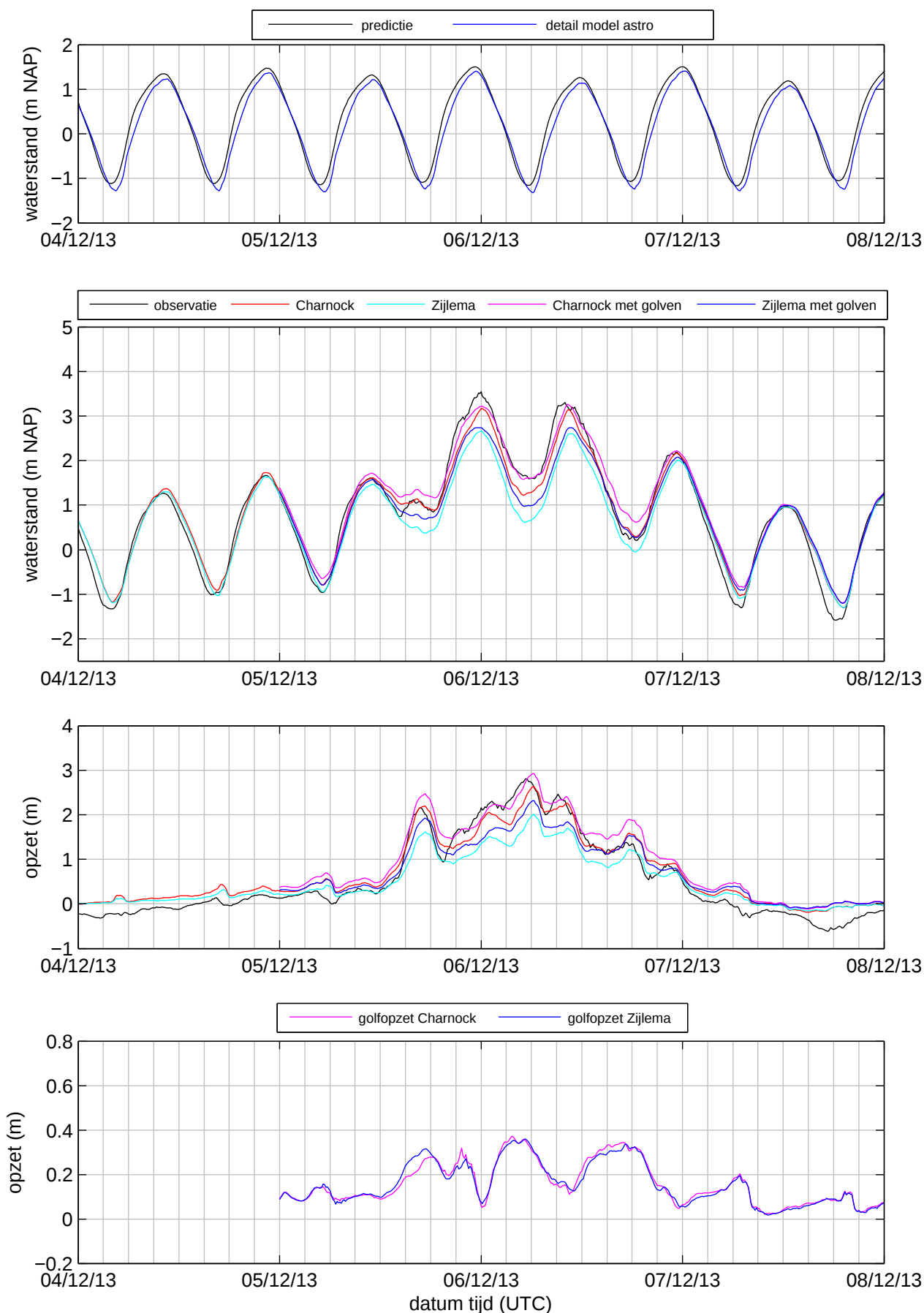
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.12

SCHIERMONNIKOOG



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Schiermonnikoog, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

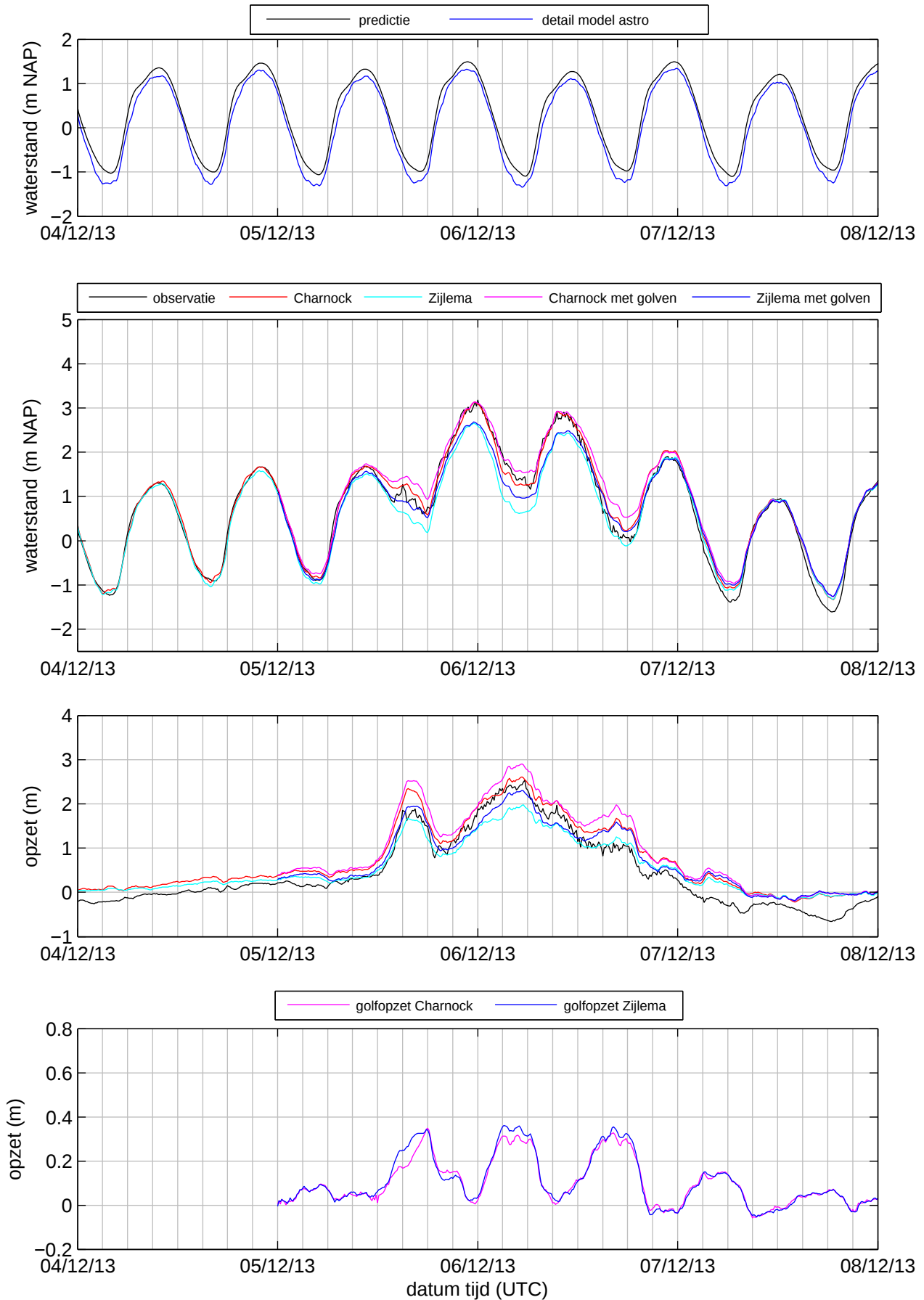
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.13

HUIBERTGAT



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Huibertgat, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

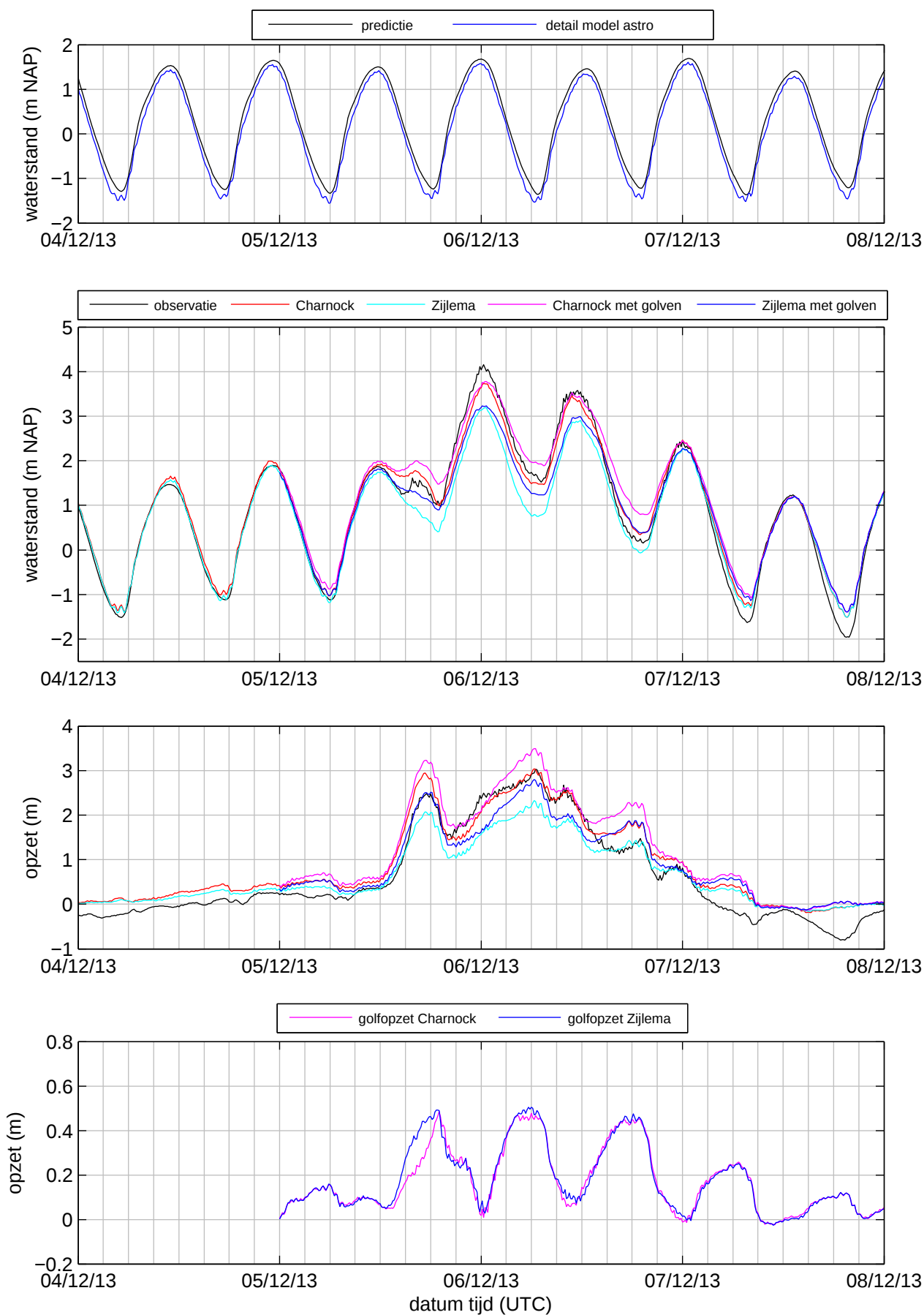
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.14

EEMSHAVEN



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Eemshaven, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

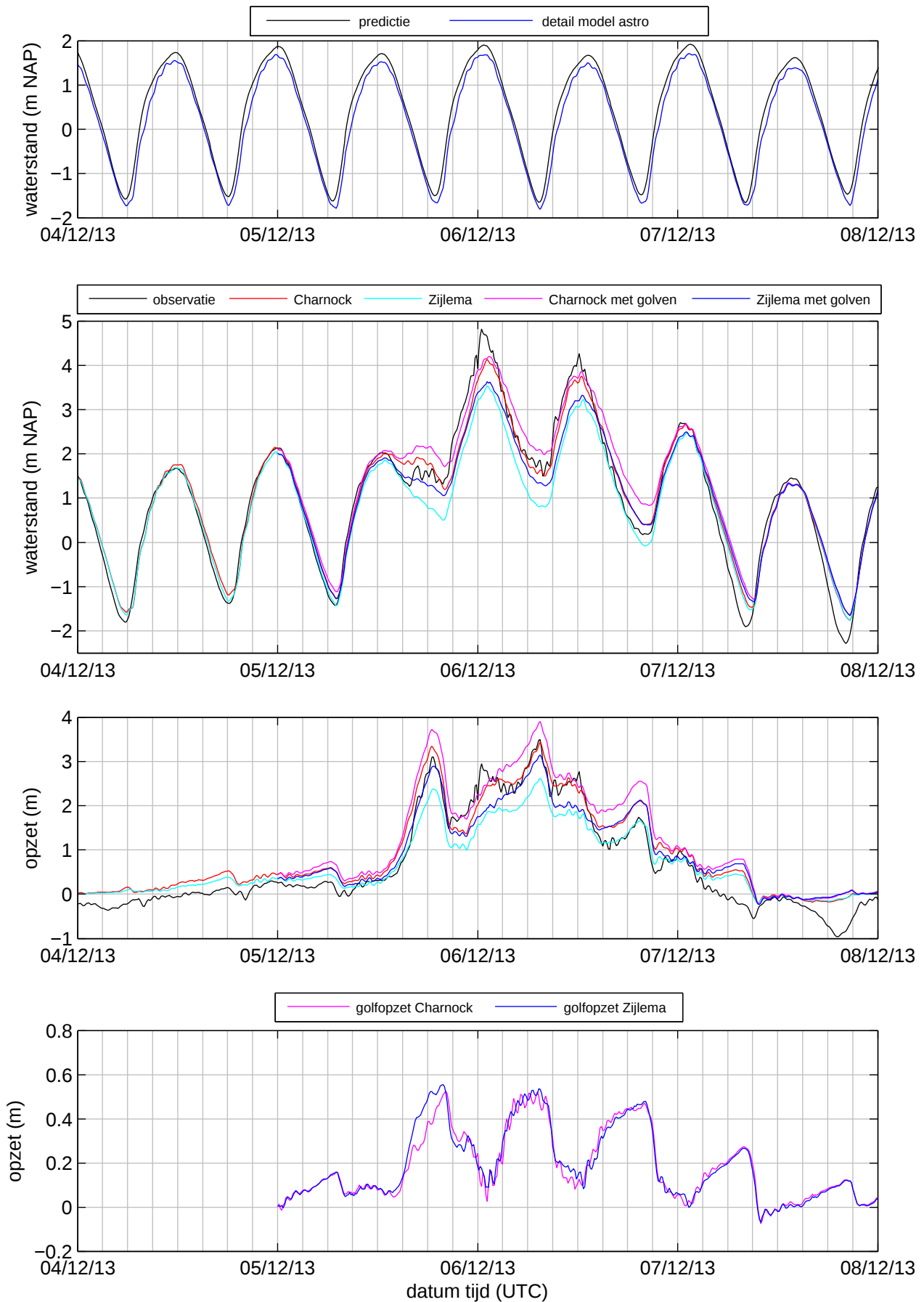
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.15

DELFZIJL



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Delfzijl, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

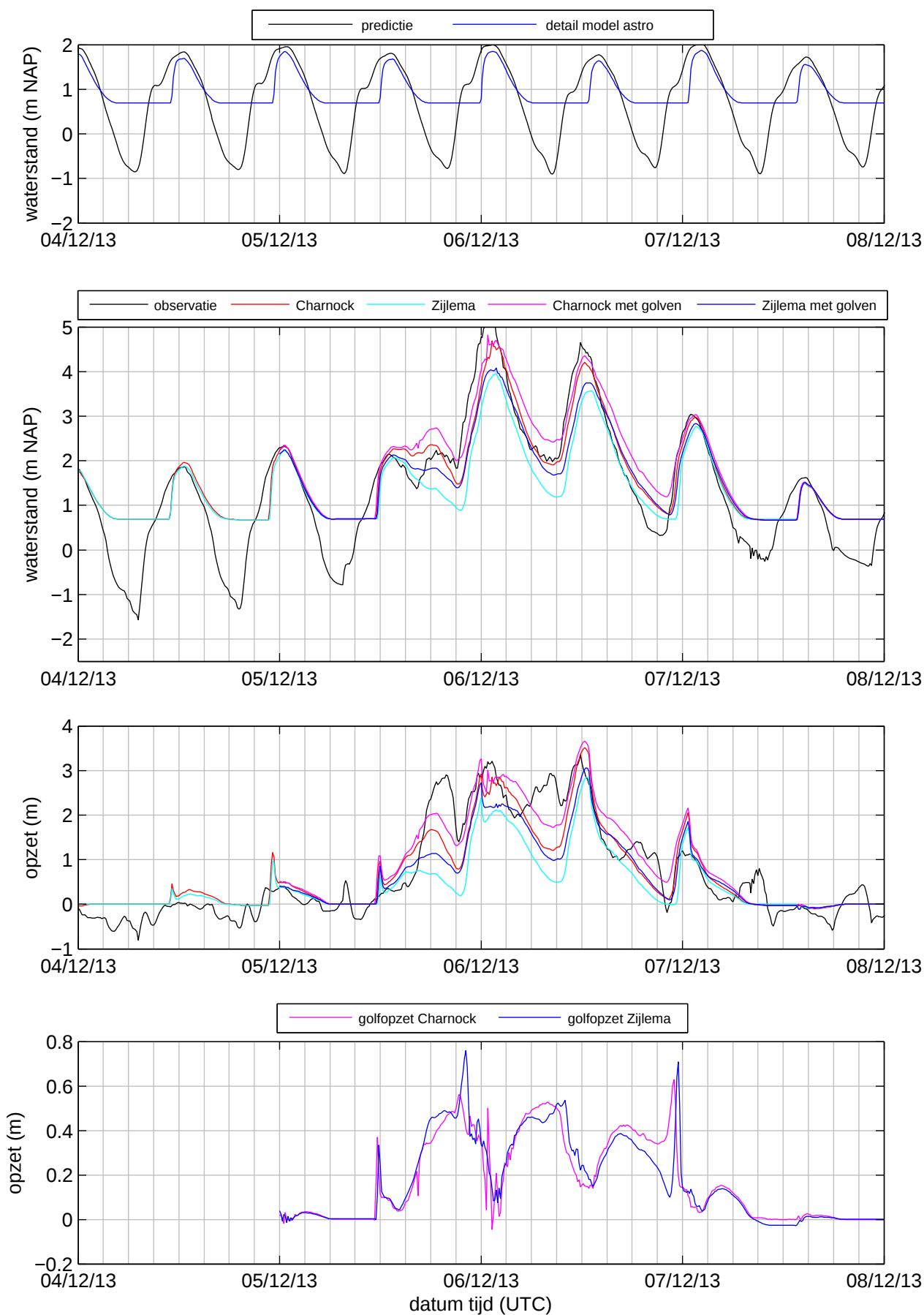
zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.16

NIEUWE STATENZIJL



Vergelijking zonder en met golven en schuifspanningscoëfficiënt Zijlema et al., versus Charnock, station Nieuwe Statenzijl, astronomische component (boven), totale waterstand (centraal-boven), opzet (centraal-onder), golfopzet (onder)

zonder versus met golven
Cd-Zijlema et al. versus Cd-Charnock

Rekenexperiment Waddenzee

C03041.001941

Fig. I.17

Colofon

EEN REKENEXPERIMENT VOOR DE WADDENZEE, DE STORM VAN 5 & 6 DECEMBER 2013

OPDRACHTGEVER:

Waterschap Noorderzijlvest

STATUS:

Definitief

AUTEUR:

Jeroen Adema
Nathanaël Geleynse
Bosko Telenta

GECONTROLEERD DOOR:

Gijs van Banning

VRIJGEGEVEN DOOR:

18 december 2014

ARCADIS NEDERLAND BV
Hanzelaan 286
Postbus 137
8000 AC Zwolle
Tel +31 38 7777 700
Fax +31 38 7777 710
www.arcadis.nl
Handelsregister 09036504

©ARCADIS. Alle rechten voorbehouden. Behoudens uitzonderingen door de wet gesteld, mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbenden niets uit dit document worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, digitale reproductie of anderszins.