

1 Inleiding

1.1 Voorafgaand

In de haven van Oostende wordt de vaargeul verbreed naar de binnenhaven toe. Hiertoe dient een nieuw talud ontworpen te worden ter hoogte van de Halve Maan.

Ter ondersteuning van dit ontwerp zijn reeds 3 adviezen opgesteld omtrent de hydraulische randvoorwaarden tijdens een 100- en 1000-jarige storm ter hoogte van de Halve Maan (Vanneste *et al.*, 2016, De Roo *et al.*, 2017a; b).

1.2 Doel van dit advies

Bijkomend wenst Afdeling Maritieme Toegang (dr. ir. H. Verhaeghe) de jaarlijkse en 10-jarige golfcondities te kennen ter hoogte van de Halve Maan, alsook de 100-jarige golfcondities bij laagwater.

Er is echter geen numeriek model voorhanden dat de gewenste golfkarakteristieken kan berekenen. Daarom is voorgesteld deze golfcondities te bepalen ter hoogte van de haveningang aan de hand van ter beschikking zijnde meetdata.

Hoofdstuk 2 behandelt de methodologie. Zowel voor het jaarlijks als 10-jarig golfklimaat, alsook voor de bepaling van de golfcondities bij laagwater is voor een andere werkwijze geopteerd.

Hoofdstuk 3 geeft de golfkarakteristieken weer ter hoogte van de haveningang voor de voormelde condities.

Hoofdstuk 4 besluit dit advies.

2 Methodologie

2.1 Jaarlijks golfklimaat

Het jaarlijkse golfklimaat is bepaald gebruik makende van de Matlab tool 'Golfklimaat', ontwikkeld in het project 'Afstemming Vlaamse en Nederlandse voorspelling golfklimaat op ondiep water' (International Marine and Dredging Consultants, 2009a). Als uitvoerlocatie is voor 'Oostende Oosterstaketsel' geopteerd, i.e. de locatie waar een Directionele Waverider als golfboei ligt (vroeger een Waverider).

De transformatiematrix voor golfkarakteristieken, initieel opgesteld in De Mulder *et al.*, 2004 en uitgebreid in Technum *et al.*, 2002, werd in dat project verbeterd en verder gevalideerd. Het doel van deze methode is om op een vluigere manier lokale golfkarakteristieken te bekomen in vergelijking tot het doorrekenen van verschillende hydrometeorologische condities met een numeriek golfmodel, bijv. SWAN.

Gemeten hydrometeorologische waarden (tijdsvenster 01/05/1996-31/08/2005) op de invoerlocatie Westhinder (met gemeten waterstanden te Oostende) worden aldus geïnterpoleerd in de invoermatrix. Vervolgens worden de (multilineaire) interpolatiekarakteristieken toegepast op de uitvoermatrix van Oostende, wat de getransformeerde golfkarakteristieken oplevert.

2.2 Tienjaarlijks golfklimaat

De 10-jarige golfcondities zijn bepaald gebruik makende van een gelijkaardige transformatie als in het Hydraulisch Randvoorwaardenboek (De Roo *et al.*, 2016) maar dan met normale hydraulische randvoorwaarden als invoer.

Deze transformatie houdt in dat een matrix van hydraulische randvoorwaarden op diep water, i.e. meetlocatie Westhinder, wordt doorgerekend voor elke zeewaartse windsector. De matrix is opgesteld aan de hand van overschrijdingskansen van verschillende klassen van significante golfhoogtes H_{m0} (zie bijv. vergelijking 4.3 in De Roo *et al.*, 2016). Voor deze kansen worden de bijhorende waterstand h en windsnelheid u_w bepaald. Er wordt dus verondersteld dat, indien een 10-jarige significante golfhoogte H_{m0} voorkomt, de waterstand en windsnelheid ook een 10-jarige terugkeerperiode T hebben (voor dezelfde windsector). Aldus heeft elke simulatie een bepaalde kans van voorkomen.

Bemerk dat de statistische verdeling waarop deze kansberekening wordt uitgevoerd initieel is opgesteld voor het berekenen van golfhoogtes horende bij extreme terugkeerperiodes, bijv. $T = 1000$ jaar. Dit betekent dat deze verdelingsfunctie enkel geldig is boven de geselecteerde drempelwaarde van de grootheid (zie Tabel 4-4 in De Roo *et al.*, 2016). De hier gewenste golfhoogtes bevinden zich (net) boven de ondergrens van de verdeling. De gerelateerde terugkeerperiodes resulteren in waterstanden en windsnelheden die ook binnen hun respectievelijke toepassingsgrenzen vallen (te vinden in Tabel 4-1 en 4-6 in De Roo *et al.*, 2016).

Na de transformatie worden voor kustsectie 117, i.e. de haven van Oostende, de 10-jarige golfkarakteristieken berekend op het uitvoerpunt gelegen op de -5m TAW dieptelijn. Voor de significante golfhoogte H_{m0} is de totale, omnidirectionele kans van voorkomen berekend uit de som der kansen van de directionele significante golfhoogtes H_{m0} . Op deze discrete punten is vervolgens een Weibull verdeling gefit die resulteert in de locatiespecifieke verdeling van de significante golfhoogte H_{m0} voor terugkeerperiodes T tussen 1.5 en 60 jaar. Het verband tussen de significante golfhoogtes H_{m0} en –piekperiodes T_p kan als volgt uitgedrukt worden:

$$T_p = A \cdot H_{m0}^B \quad (1)$$

Gegeven de berekende significante golfhoogte H_{m0} resulteert uit (1) de bijhorende golfpiekperiode T_p .

2.3 Reductie golfhoogtes tijdens laagwater gedurende een storm?

In plaats van de 100-jarige golfcondities bij laagwater te proberen bepalen, is gesteld dat, indien kan aangetoond worden dat er geen reductie van golfhoogte optreedt gedurende lager water tijdens eenzelfde stormevent, de 100-jarige condities voor hoogwater dan ook gelden.

Ter bepaling van het verloop van de golfcondities gedurende een stormevent zijn de 10 grootste stormen (op basis van stormopzet) van de voorbije 10 jaar geanalyseerd.

Hierbij zijn de gemiddelde windkarakteristieken, i.e. windsnelheid en -richting, van Meetpaal 0 en Meetpaal 7 vergeleken met de optredende significante golfhoogtes H_{m0} te Westhinder (Directionele Waverider) en Oostende (Waverider) en dit ten opzichte van de (astronomische en werkelijke opgetreden) waterstand te Oostende. Verdere uitleg omtrent de meetdata is te vinden in Hoofdstuk 2 van De Roo, Trouw, Ruiz Parrado, Willems *et al.*, 2016.

3 Golfkarakteristieken ter hoogte van haveningang

3.1 Jaarlijks golfklimaat

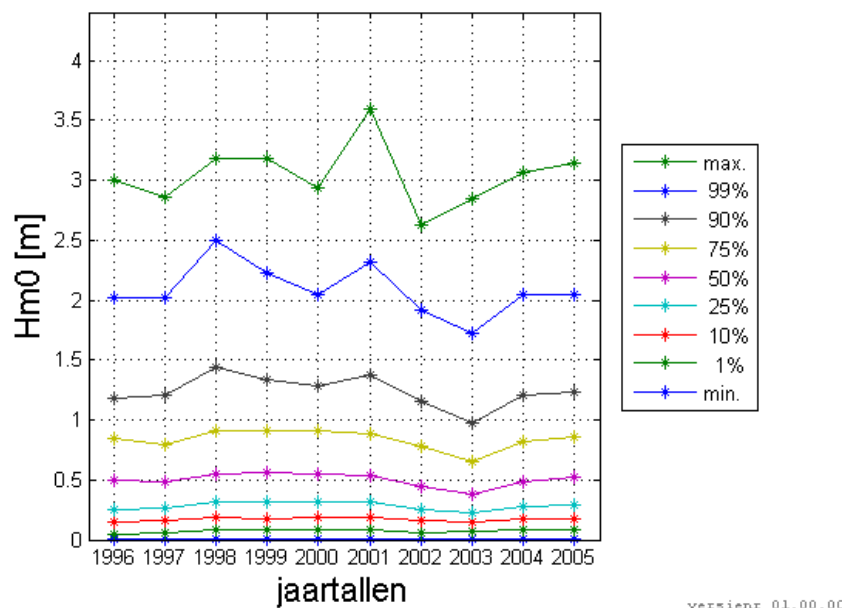
Figuur 1 geeft een statistisch overzicht van de gemeten significante golfhoogte H_{m0} te Oostende in het tijdsvenster 1996-2005. Diens absolute maximum bedraagt 3.6m en gemiddeld is slechts 1% van de golven hoger dan 2m.

Figuur 2 toont de seizonale variatie in significante golfhoogte H_{m0} . Deze illustreert enerzijds de verwachte hogere golfhoogtes tijdens de wintermaanden (cf. stormseizoen van 15/09-15/03), waarbij maximale significante golfhoogtes tot 3.5m kunnen optreden en anderzijds een gematigder golfklimaat tijdens de zomermaanden ($H_{m0,max} < 3m$). Bemerkt dat bij lagere percentielwaarden de golfhoogtes licht onderschat worden (International Marine and Dredging Consultants, 2009b).

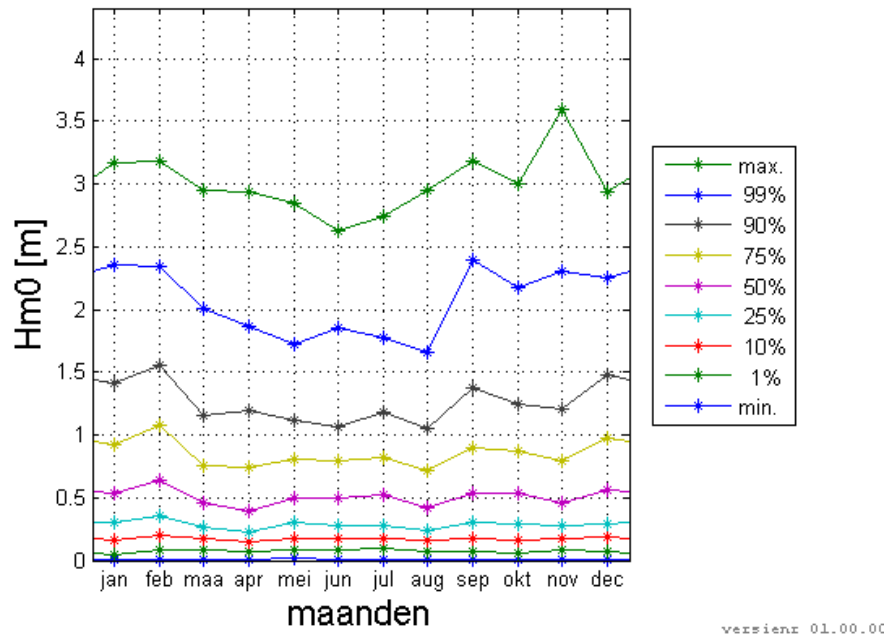
De overheersende richting (van de hoogfrequente golven, *RHF*) is West maar deze vertoont eveneens seizonale afhankelijkheid. Westzuidwest wordt belangrijker tijdens het stormseizoen, (Noord)noordwest is relevant tijdens de lente (Figuur 3). Hogere golfhoogtes komen echter voor in sectoren Noord tot West, waarbij Noordnoordwest tot Noordwest van groter belang zijn voor golfindringing in de haven (Figuur 4). Deze golfrichtingen leiden tot een maximale directionele significante golfhoogte H_{m0} van 3.6 en 3.5 m respectievelijk (Figuur 5).

Figuur 6 vat de voorkomensfrequentie van verschillende klassen van golfhoogtes H_{m0} en hun gerelateerde -piekperiodes *TPE* samen. Hoe hoger de windgegeneerde golven, hoe groter uiteraard hun golfperiode (machtsfunctie relatie). De cumulatieve distributiefunctie voor de significante golfhoogte H_{m0} duidt aan dat slechts 10% van de golven hoger is dan 1.5m en geeft aan dat de golfhoogtes een Weibull verdeling volgen (Figuur 7). Voor de golfpiekperiode *TPE* duidt deze kansverdeling op een tweeledige voorkomensklasse, i.e. 50% van de golven heeft een golfpiekperiode rond 2-4.5s en 40% tussen 4.5 en 7s (Figuur 7). Slechts 1% van de golven heeft een golfpiekperiode groter dan 8.9s.

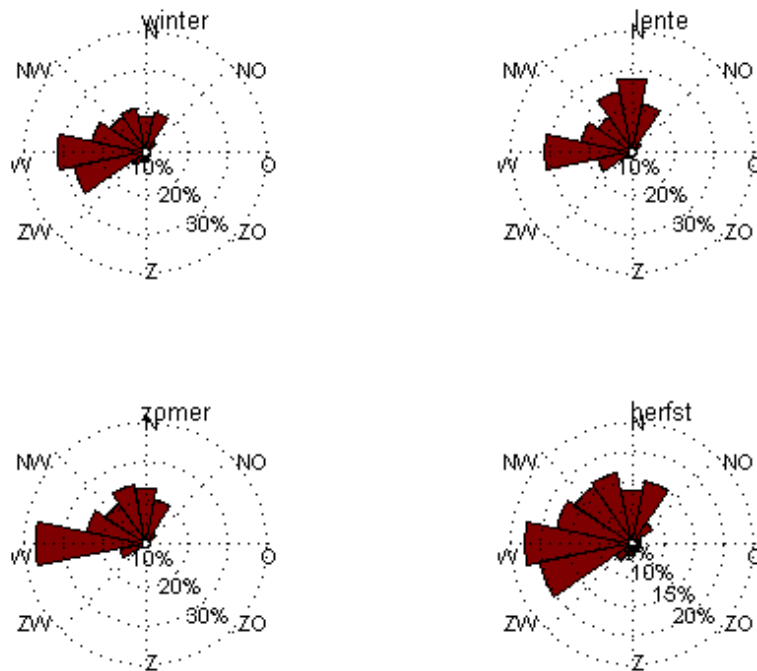
Figuur 1 - Statistiek van de gemeten significante golfhoogte H_{m0} te Oostende in het tijdsvenster 01/05/1996- 31/08/2005



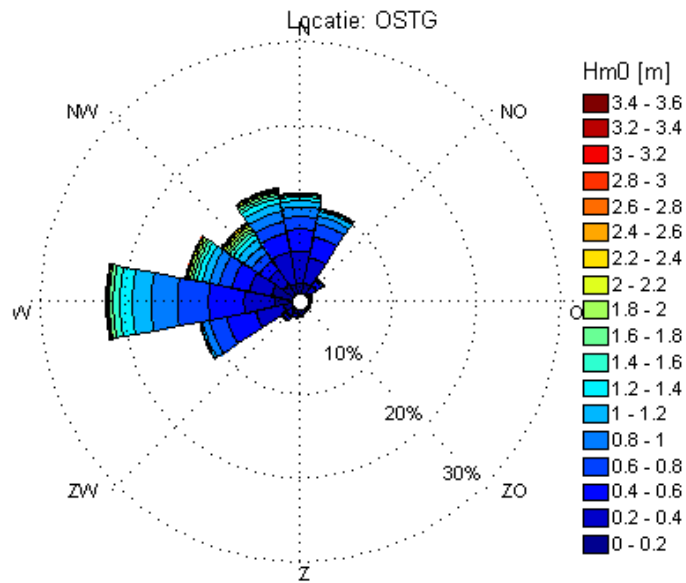
Figuur 2 - Sezonale variatie in gemeten significante golfhoogte H_{m0} te Oostende in het tijdsvenster 01/05/1996- 31/08/2005



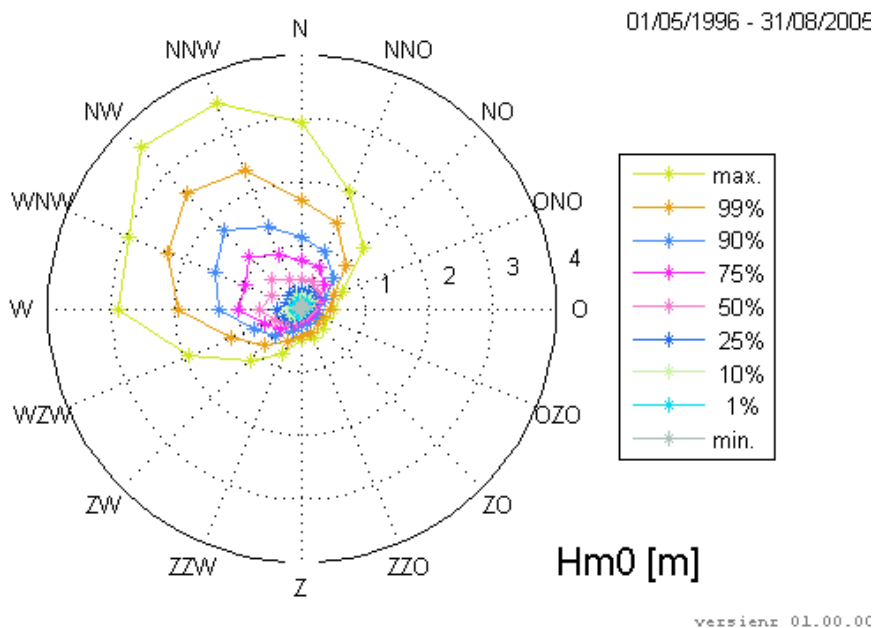
Figuur 3 - Sezonale frequentieverdeling van de golfrichting RHF (01/05/1996- 31/08/2005)



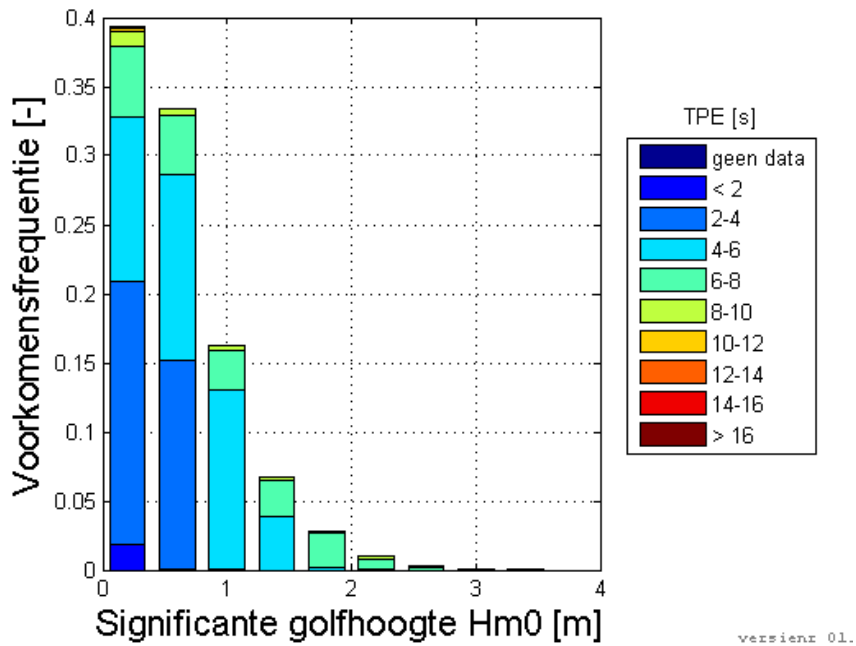
Figuur 4 - Samengestelde frequentieverdeling van significante golfhoogte H_{m0} en –richting RHF te Oostende
 (01/05/1996- 31/08/2005)



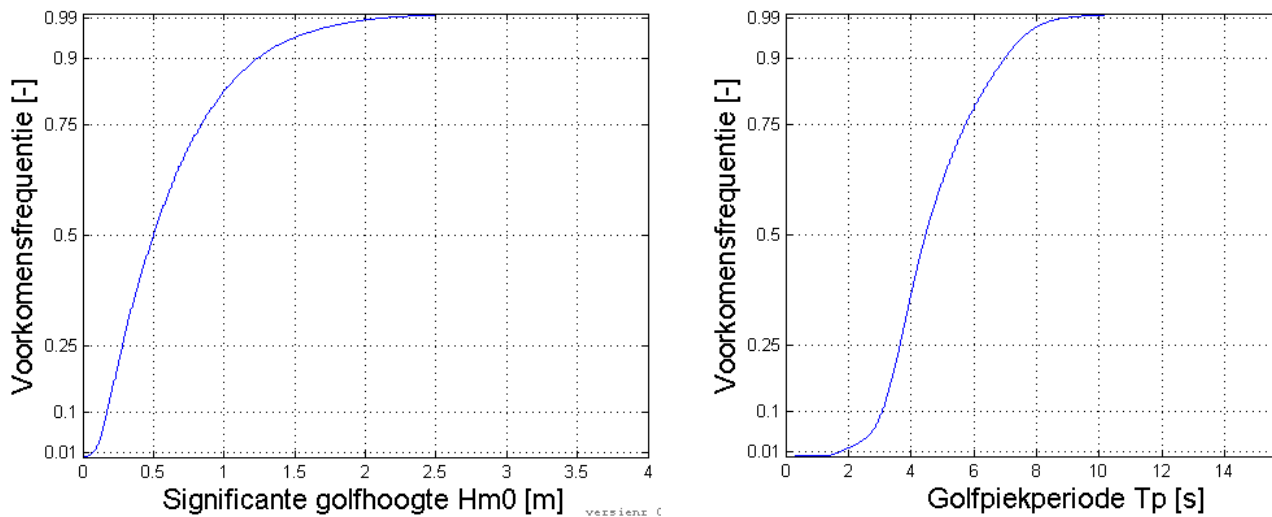
Figuur 5 - Kwantielwaarden van de significante golfhoogte H_{m0} in functie van de golfrichting RHF



Figuur 6 - Samengestelde frequentieverdeling van significante golfhoogte H_{m0} en –piekperiode TPE te Oostende
 (01/05/1996- 31/08/2005)



Figuur 7 - Cumulatieve voorkomensfrequentie van de significante golfhoogte H_{m0} (links) en –piekperiode TPE (rechts) te Oostende
 (01/05/1996- 31/08/2005)

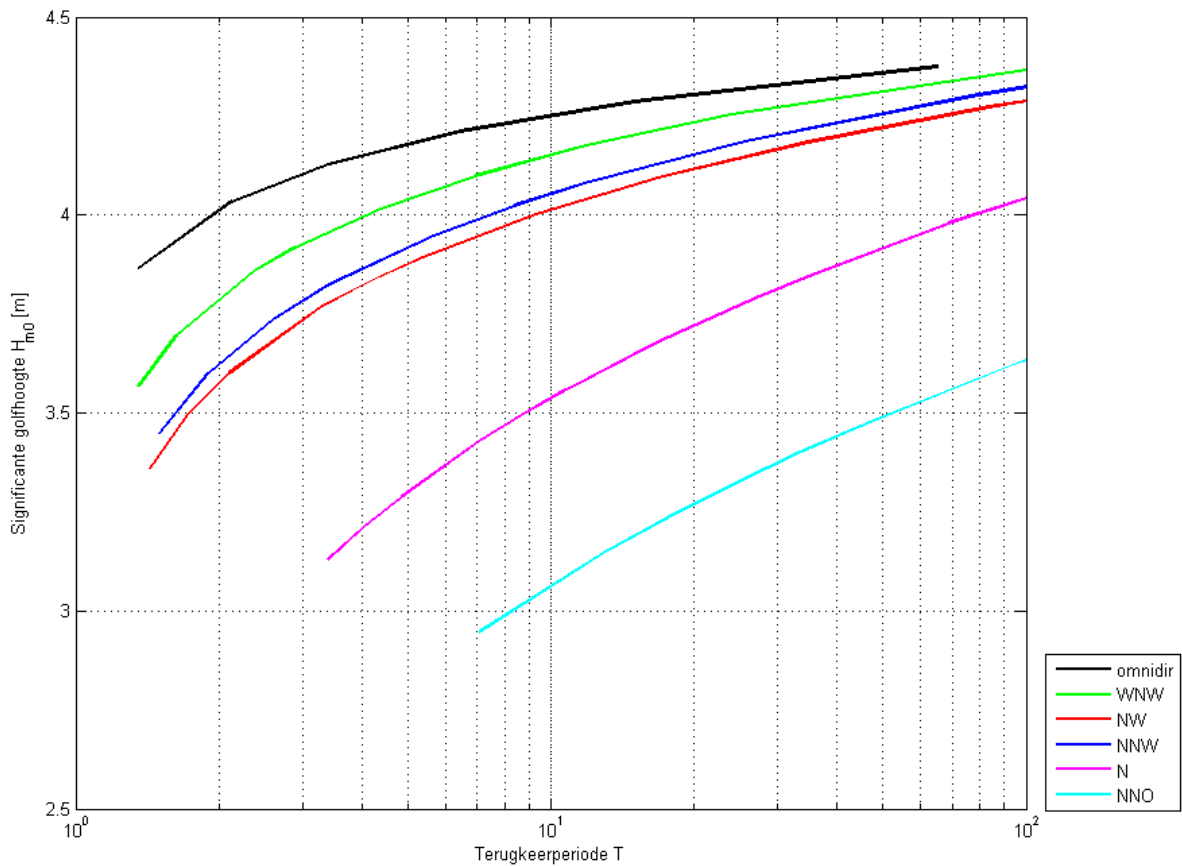


3.2 Tienjaarlijks golfklimaat

Figuur 8 illustreert de (omni)directionele golf randvoorwaarden voor kustsectie 117 (voor $T = 10$ jaar, zie Tabel 1). Sectoren WNW en NNW hebben de belangrijkste bijdrage tot de omnidirectionele significante golfhoogte H_{m0} , terwijl de invloed van sector NNO verwaarloosbaar is.

De 10-jarige omnidirectionele waterstand h bedraagt +5.9 m TAW (zie ook Figuur 4-1 in De Roo *et al.*, 2016).

Figuur 8 - Kustsectie 117 (Haven Oostende): (omni)directionele Weibull verdeling voor de significante golfhoogte H_{m0}



Tabel 1 - Kustsectie 117: (omni)directionele golfkarakteristieken voor een 10-jarig golfklimaat

	H_{m0} [m]	T_p [s]
omnidir	4.25	9.87
WNW	4.15	9.67
NW	4.01	9.40
NNW	4.05	9.52
N	3.54	8.87
NNO	3.07	8.06

3.3 Reductie golfhoogtes tijdens laagwater gedurende een storm?

Aangezien geen numeriek model voorhanden is voor een lage(re) waterstand dan +6.4m TAW kunnen de 100-jarige golfkarakteristieken enkel voor een 100-jarig hoogwater berekend worden ter hoogte van de Halve Maan (cf. De Roo *et al.*, 2017b). Ter bepaling van de golfkarakteristieken bij een lage(re) waterstand is daarom geopteerd voor een bewijs uit het ongerijmde, i.e. aan de hand van meetdata is nagegaan of de waterstand een invloed heeft op het verloop van de golfkarakteristieken tijdens een storm.

Figuur 9 illustreert de hydrometeorologische condities optredend tijdens de storm op 1 maart 2008. Op deze dag treden 2 hogere hoogwaters en 1 hoger laagwater op. Echter, hogere golven worden reeds opgemeten vanaf 29/02 21u en houden aan tot rond 15u de volgende dag. Het verloop van deze significante golfhoogtes volgt (logischerwijze want oorzakelijk) het gedrag van de windsnelheid.

Een gelijkaardig patroon is op te merken in de dagen rond het stormevent op 4-5 januari 2012 (Figuur 10). Het verloop van de golfhoogtes volgt mooi de evolutie van de windsnelheid, en dit onafhankelijk van de optredende waterstandsverschillen, bijv. een aanhoudende (West)noordwestelijke wind met een snelheid van 20 m/s resulteert in golven van 3.75m en 3m te Westhinder en Oostende respectievelijk ongeacht het optredende hoog- en laagwater.

Bemerk evenwel dat de windrichting een invloed heeft op de golfhoogtes te Oostende. Hogere windsnelheden uit West(noordwest) leiden tot hogere golfhoogtes in vergelijking tot gelijkaardige windsnelheden uit (West)zuidwest ten gevolge van de oriëntatie van de kustlijn, bijv. $H_{m0,OST} = 1.75\text{m}$ op 05/01 0u en $H_{m0,OST} = 2.9$ op 05/01 15u bij een windsnelheid ≈ 22 m/s uit ZW en WNW resp.

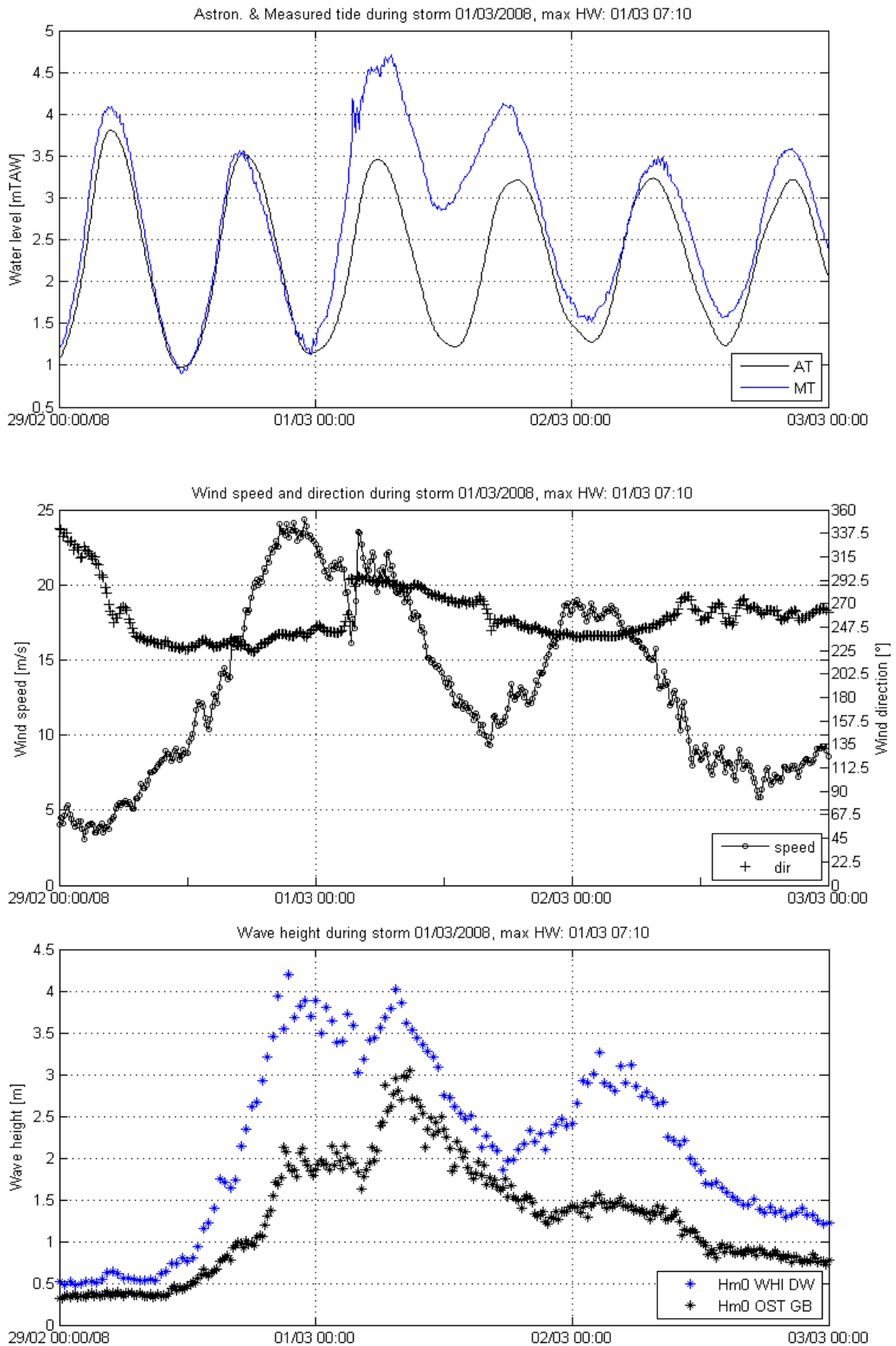
Bijlage A geeft een overzicht van de hydrometeorologische condities van alle geanalyseerde stormevents. Bovenstaande bemerkingen gelden voor al deze stormevents waardoor indirect besloten wordt dat de golfhoogte onafhankelijk is van de waterstand op voorwaarde dat geen diepte-geïnduceerde golfbreking kan optreden.

Aldus kunnen de significante golfhoogtes horende bij een storm met terugkeerperiode $T = 100$ jaar ook tijdens lagere waterstanden aangehouden worden. Tabel 2 vat deze (omni)directionele golfkarakteristieken samen (cf. De Roo *et al.*, 2017b). De 100-jarige omnidirectionele waterstand h bedraagt +6.4 m TAW (zie ook Figuur 4-1 in De Roo *et al.*, 2016).

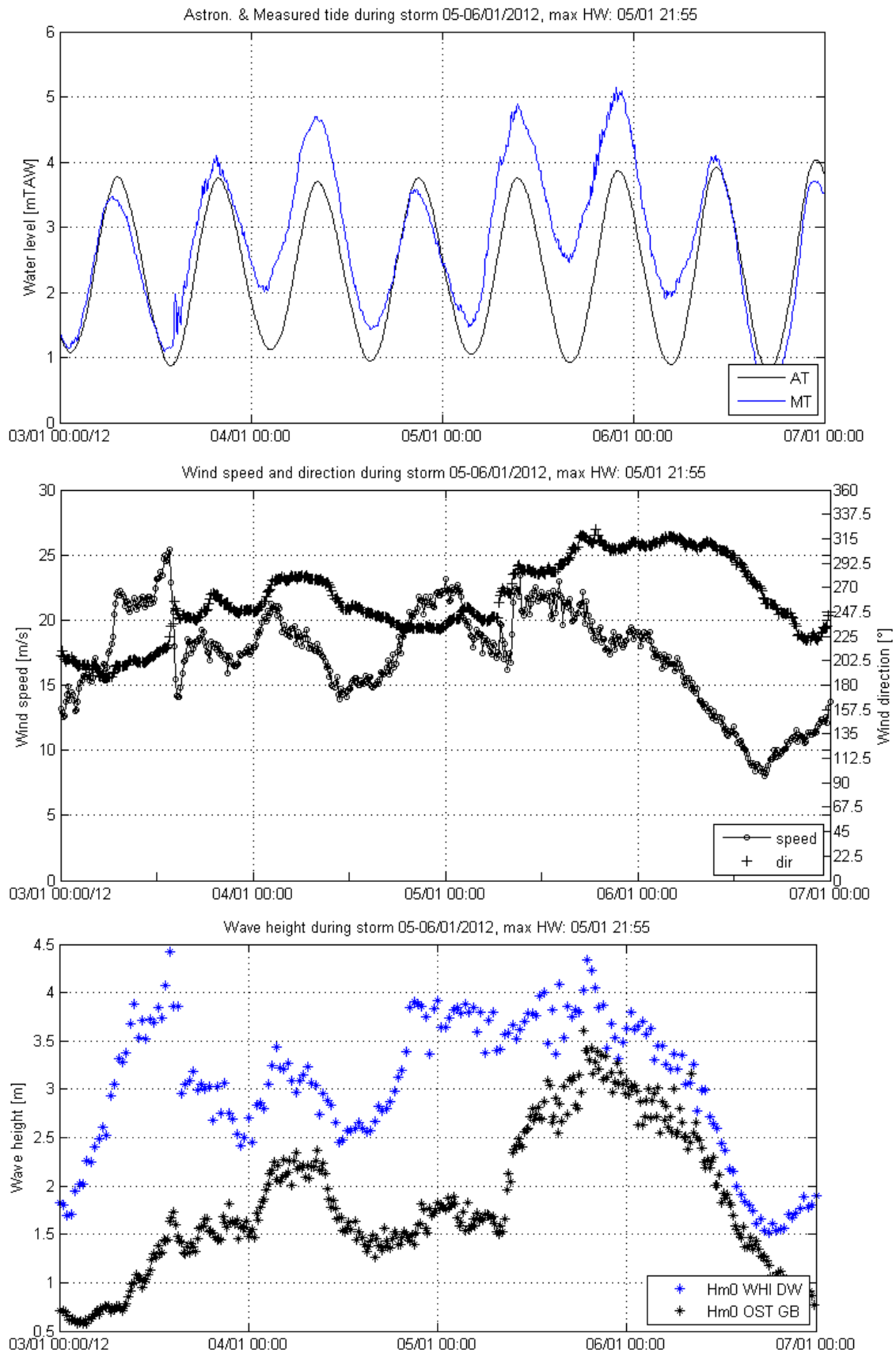
Tabel 2 - Kustsectie 117: (omni)directionele golfkarakteristieken voor een 100-jarig golfklimaat

	H_{m0} [m]	T_p [s]
omnidir	4.83	10.85
WNW	4.79	10.77
NW	4.39	10.18
NNW	4.56	10.44
N	4.25	10.13
NNO	3.64	8.94

Figuur 9 - Hydrometeorologische condities rond de storm van 1 maart 2008. (a: astronomische (AT) en werkelijk opgetreden (MT) waterstand; b: windsnelheid en -richting; c: significante golfhoogtes te Westhinder (WHI) en Oostende (OST))



Figuur 10 - Hydrometeorologische condities rond de storm van 4-5 januari 2012. (a: astronomische (AT) en werkelijk opgetreden (MT) waterstand; b: windsnelheid en -richting; c: significante golfhoogtes te Westhinder (WHI) en Oostende (OST))



4 Besluit

In dit advies zijn het jaarlijkse en tienjaarlijkse golfklimaat ter hoogte van de haventoeegang tot Oostende berekend. Rekening houdend met de mogelijkheid tot golfindringing in de haven, en meer bepaald in de richting van de Halve Maan site, kan gesteld worden dat:

- Voor het jaarlijkse golfklimaat

De maximale omnidirectionele jaargemiddelde significante golfhoogte H_{m0} bedraagt 3.5m, en heeft een golfpiekperiode T_p van ongeveer 9s. Hogere golfhoogtes komen vnl. voor uit West tot Noord, waarbij vnl. Noordwest en Noordnoordwest belangrijk zijn voor golfindringing in de haven. De respectievelijke maximale directionele significante golfhoogtes H_{m0} bedragen 3.6 en 3.5m; slechts 10% van de golven is echter hoger dan resp. 1.8 en 1.5m.

- Voor het tienjaarlijkse golfklimaat

De omnidirectionele 10-jarige significante golfhoogte H_{m0} bedraagt 4.25m, en heeft een golfpiekperiode T_p van 9.87s. De relevante directionele significante golfhoogtes H_{m0} uit Noordwest en Noordnoordwest zijn slechts iets lager, i.e. 4.01 en 4.05m respectievelijk.

Verder is indirect aangetoond dat de golfhoogtes tijdens een storm onafhankelijk zijn van het waterstandsverloop op voorwaarde dat geen diepte-geïnduceerde golfbreking kan optreden. Bijgevolg geldt het opgestelde 100-jarige golfklimaat, i.e. een omnidirectionele significante golfhoogte H_{m0} van 4.83m en golfpiekperiode T_p van 10.85s, ook bij laagwater.

5 Referenties

De Mulder, T.; Monbaliu, J.; Mostaert, F. (2004). Veiligheidsniveau Vlaanderen kustverdediging: opmaak van een numerieke golfdatabank voor de Vlaamse kust. *WL Rapporten*, 644. KU Leuven: Antwerpen

De Roo, S.; Trouw, K.; Ruiz Parrado, I.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Het Hydraulisch Randvoorwaardenboek (2014). *WL Rapporten*, 14_014_2. Waterbouwkundig Laboratorium/Fides Engineering: Antwerpen

De Roo, S.; Trouw, K.; Ruiz Parrado, I.; Willems, P.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2014: achtergrondrapport. *WL Rapporten*, 14_014_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

De Roo, S.; Vanneste, D.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017). Golfklimaat ter hoogte van de Halve Maan (haven Oostende). Kort- en langkruinige golfkarakteristieken en reflectie-analyse. *WL Rapporten*, 16_069_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

De Roo, S.; Vanneste, D.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017). Kortkruinig golfklimaat ter hoogte van de Halve Maan (haven Oostende). Golfindringing voor een storm met T = 100 jaar en T = 1000 jaar. *WL Rapporten*, 16_096_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

International Marine and Dredging Consultants. (2009a). Afstemming Vlaamse en Nederlandse voorspelling golfklimaat op ondiep water: deelrapport 3. Ontwikkeling van post processing tools. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

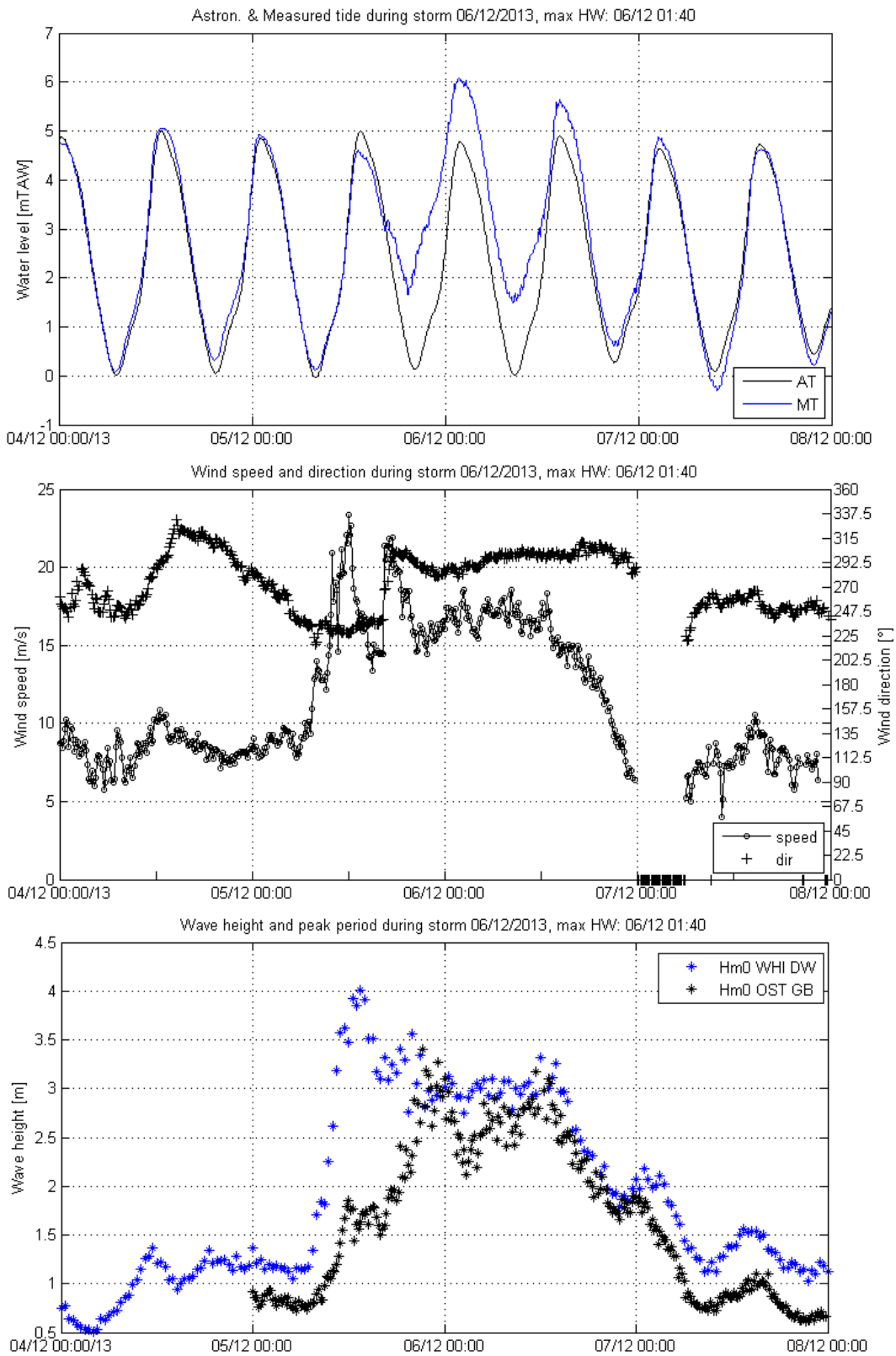
International Marine and Dredging Consultants. (2009b). Afstemming Vlaamse en Nederlandse voorspelling golfklimaat op ondiep water: deelrapport 5. Rapportage jaargemiddelde golfklimaat. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Technum; IMDC; Alkyon. (2002). Structureel herstel van de kustverdediging te Oostende en verbetering van de haventoegean naar de haven van Oostende. Hydrodynamische randvoorwaarden voor het ontwerp. ISBN 3152724810

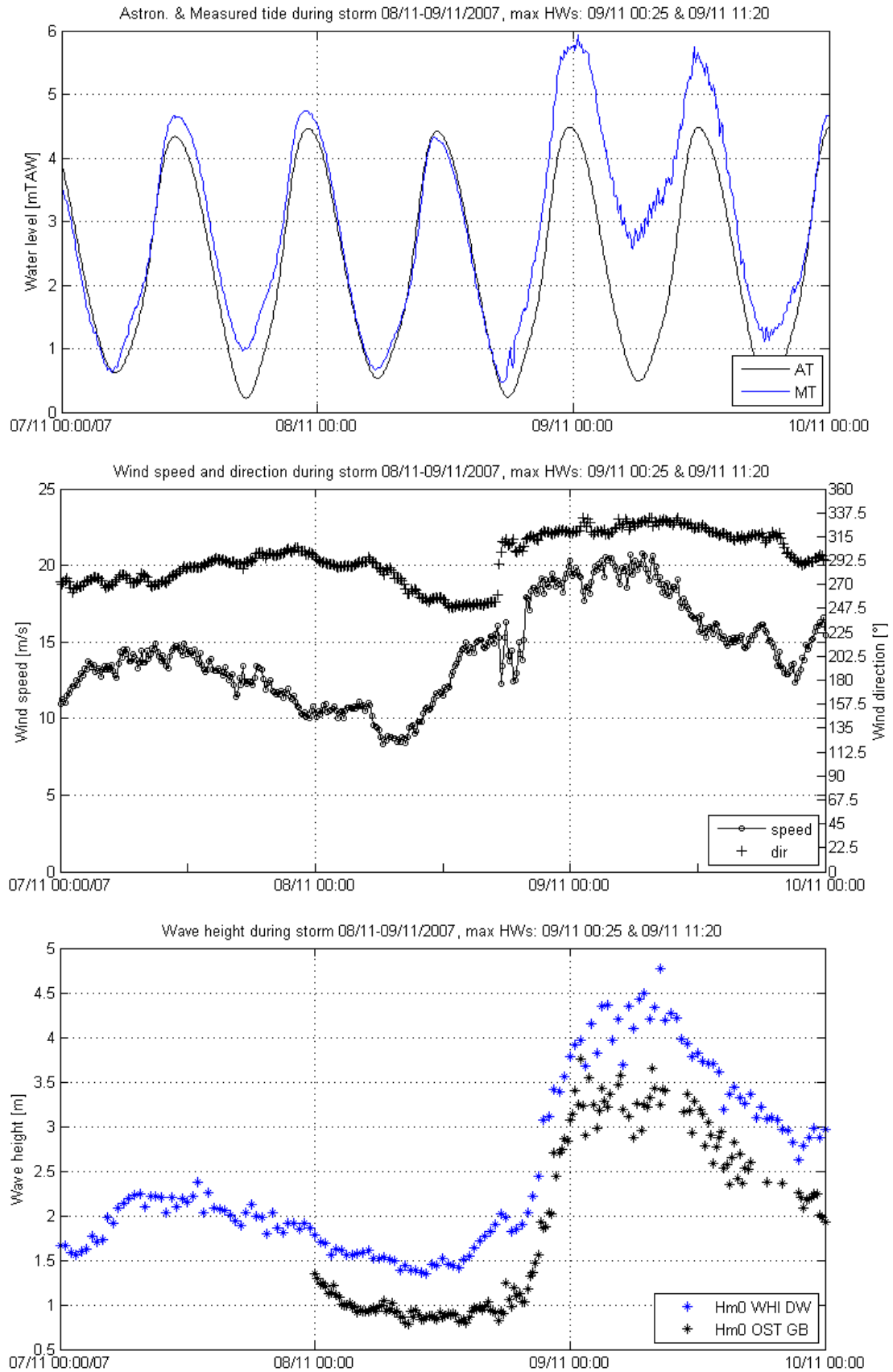
Vanneste, D.; De Roo, S.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Golf Randvoorwaarden Halve Maan, haven Oostende. *WL Adviezen*, 16_051_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Bijlage A Verloop golfhoogtes tijdens een stormevent

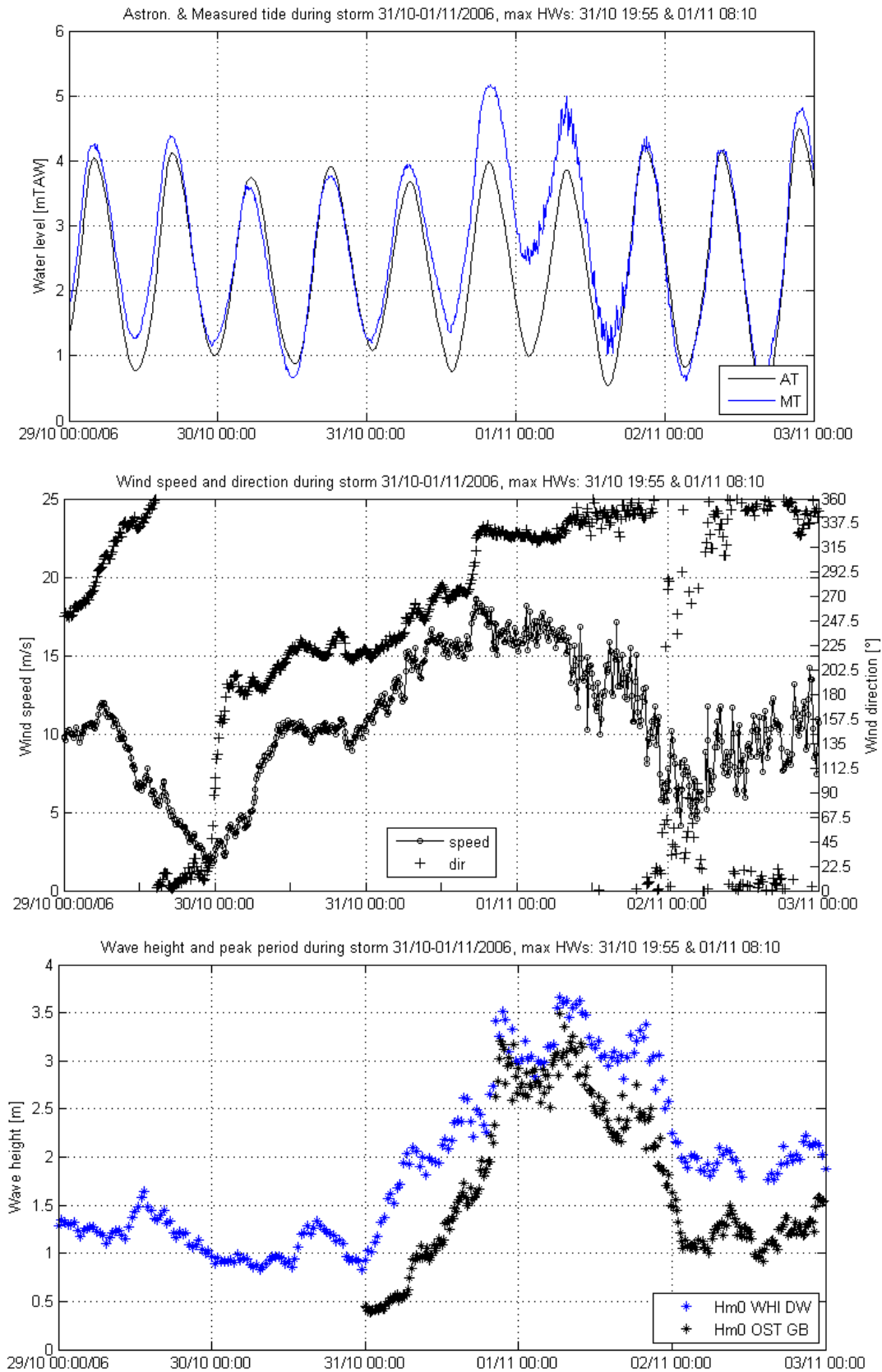
Figuur 11 - Hydrometeorologische condities rond de storm van 6 december 2013. (a: astronomische (AT) en werkelijk opgetreden (MT) waterstand; b: windsnelheid en -richting; c: significante golfhoogtes te Westhinder (WHI) en Oostende (OST))



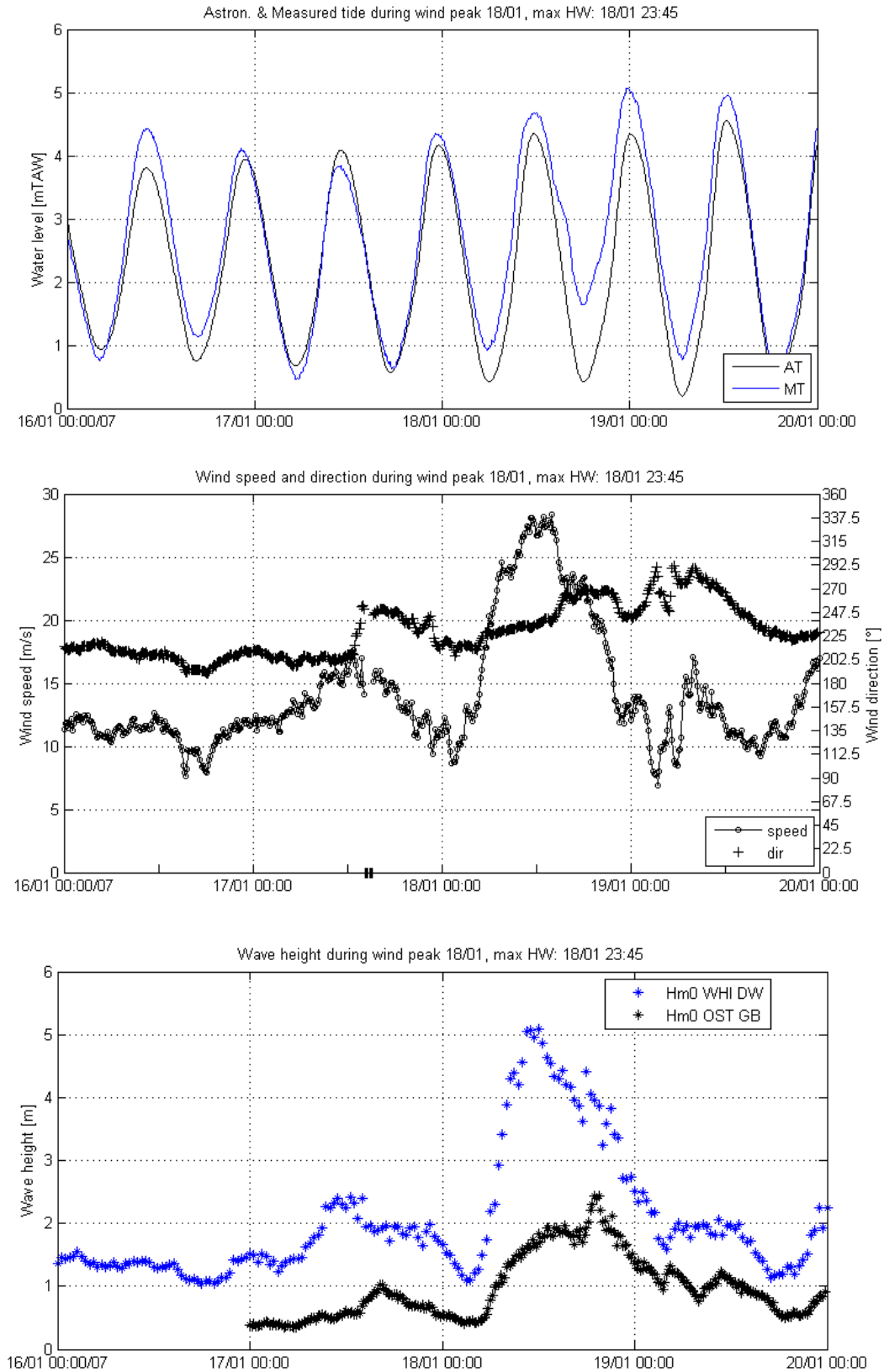
Figuur 12 - Hydrometeorologische condities rond de storm van 8-9 november 2007. (a: astronomische (AT) en werkelijk opgetreden (MT) waterstand; b: windsnelheid en -richting; c: significante golfhoogtes te Westhinder (WHI) en Oostende (OST))



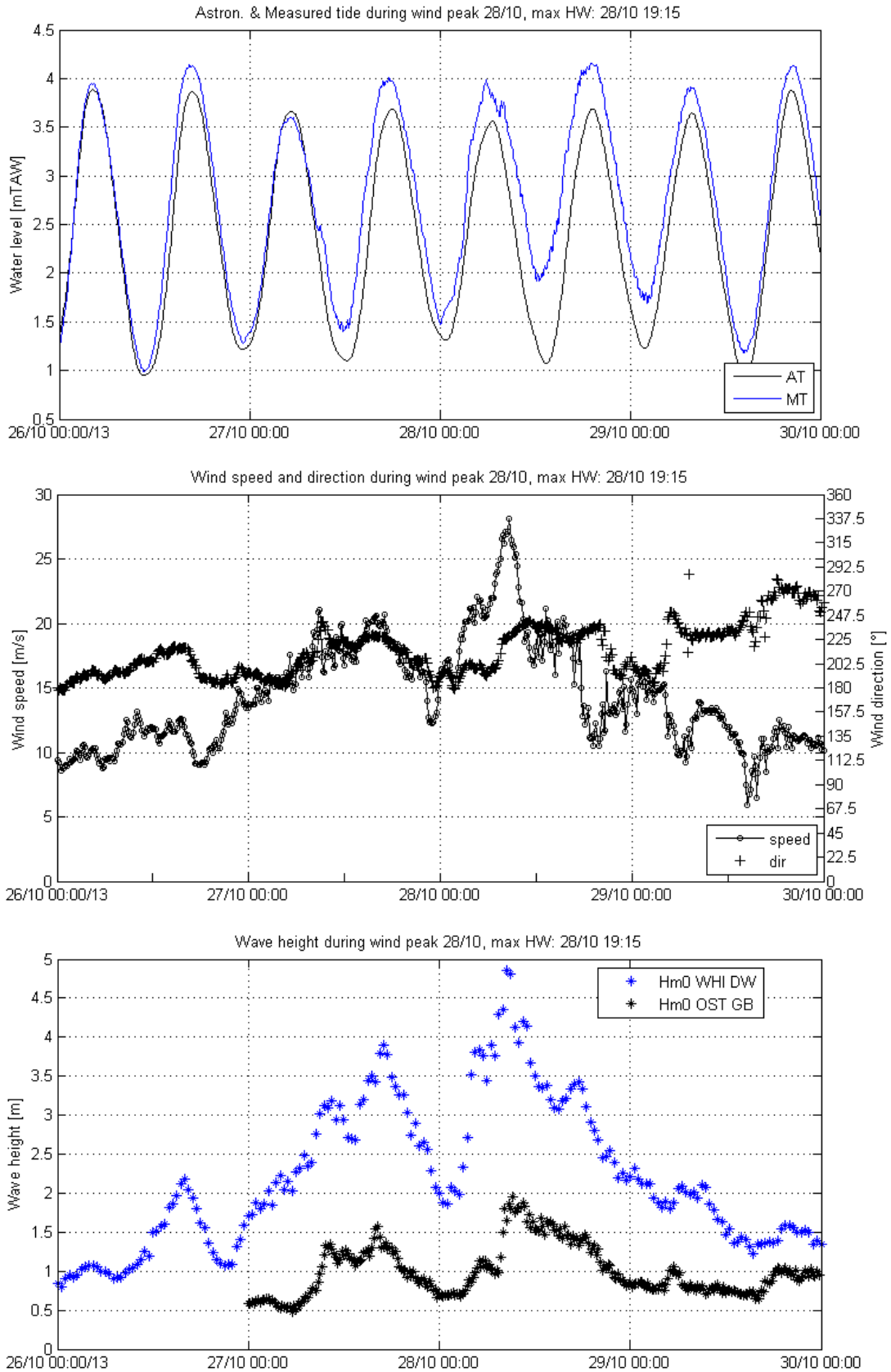
Figuur 13 - Hydrometeorologische condities rond de storm van 31 oktober – 1 november 2006. (a: astronomische (AT) en werkelijk opgetreden (MT) waterstand; b: windsnelheid en –richting; c: significante golfhoogtes te Westhinder (WHI) en Oostende (OST))



Figuur 14 - Hydrometeorologische condities rond windpiek van 18 januari 2007. (a: astronomische (AT) en werkelijk opgetreden (MT) waterstand; b: windsnelheid en -richting; c: significante golfhoogtes te Westhinder (WHI) en Oostende (OST))



Figuur 15 - Hydrometeorologische condities rond windpiek van 28 oktober 2013. (a: astronomische (AT) en werkelijk opgetreden (MT) waterstand; b: windsnelheid en -richting; c: significante golfhoogtes te Westhinder (WHI) en Oostende (OST))



DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be