

Vlaanderen
is wetenschap

13_059_4
WL rapporten

Squatformule cape size bulkcarriers op basis van ware-grootte metingen en sleeptankproeven

Eindrapport

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Squatformule cape size bulkcarriers op basis van ware-grootte metingen en sleeptankproeven

Eindrapport

Verwilligen, J.; Mansuy, M.; Vantorre, M.; Peeters, P.; Mostaert, F.

Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaanderen is wetenschap

Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2016

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017
D/2017/3241/88

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verwilligen, J.; Mansuy, M.; Vantorre, M.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017). Squatformule cape size bulkcarriers op basis van waregroottemetingen en sleeptankproeven: Eindrapport. Versie 4.0. WL Rapporten, 13_059_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Gemeenschappelijk Nautisch Beheer	Ref.:	WL2017R13_059_4
Keywords (3-5):	squat, bulkcarrier, waregroottemeting		
Tekst (p.):	86	Bijlagen (p.):	73
Vertrouwelijk:	☒ Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2020
		Uitzondering:	☒ Vlaamse overheid

Auteur(s):	Verwilligen, J.; Mansuy, M.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vantorre, M. (UGent)	
Projectleider:	Verwilligen, J.	

Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Peeters, P.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Abstract

Het objectief van studie 13_059 betreft een zo nauwkeurig mogelijke voorspelling van de maximale squat van een cape size bulkcarrier (290 m x 45 m x 16.5 m) tijdens het traject tussen de Wandelaar en Vlissingen-Sloehaven. Hiertoe werd zowel gebruik gemaakt van sleeptankproeven op modelschaal als van waregroottemetingen.

In het kader van het project werden zeven waregroottemetingen – waarvoor de scheepsmetingen uitgevoerd werden door het Nederlands Loodswezen – verwerkt tot dynamische en stationaire (squat) verticale scheepsbewegingen ten opzicht van het wateroppervlak. Bovendien werden de relevante omgevingsparameters zoals getij, bodemdiepte, blockage, golven, wind en ander scheepvaartverkeer gereproduceerd.

Verschillende verzamelingen squatgegevens (zowel uit sleeptankproeven als waregroottemetingen) werden toegepast in een regressieanalyse op basis van drie formules. Waarbij de bekomen squatmodellen getoetst werden op nauwkeurigheid en toepasbaarheid.

Uiteindelijk werd een formule met vorm ontleend aan Verwilligen *et al.* (2007), gecombineerd met regressiecoëfficiënten bepaald op basis van sleeptankproeven, geselecteerd als meest gunstige voor de voorspelling van de maximale squat van een cape size bulkcarrier.

Scheepsbeweging > Squat > Schaalmodelproeven
Scheepsbeweging > Squat > Natuurmetingen

Inhoudstafel

Abstract III
Inhoudstafel V
Lijst van de tabellen VIII
Lijst van de figuren X
1 Situering 1
1.1 Kielspeling en verticale scheepsbeweging 1
1.2 Squatformule cape size bulkcarriers op basis van ware-grootte metingen en sleeptankproeven 2
2 Squat op basis van sleeptankproeven 3
2.1 Schaalmodel Cape Mexico (T01) 3
2.2 Proevenprogramma 3
2.2.1 Proeftypes 3
2.2.2 Proevenprogramma 4
2.3 Squat 4
3 Verwerking waregroottemetingen 7
3.1 Input-data 7
3.1.1 Scheepsmetingen 7
3.1.2 Getij en Stroom 10
3.1.3 Bathymetrie 11
3.1.4 Golfklimaat 12
3.1.5 Windklimaat 13
3.1.6 AIS 13
3.2 Verwerking 14
3.2.1 Scheepsbeweging in zes vrijheidsgraden 14
3.2.2 Getij en Stroom 21
3.2.3 Bodemdiepte en blockage 30
3.2.4 Verticale scheepspositie 34
3.2.5 Squat en verticale beweging 35
3.2.6 Golven 38
3.2.7 Scheepsontmoetingen 38
3.3 Output 40
3.3.1 Grafieken 40

3.3.2 KMZ-representatie vaartrajecten 42
3.3.3 Scheepsontmoetingen 42
4 Resultaten waregroottemetingen 43
4.1 Hydro-Meteo data 46
4.1.1 Getij 46
4.1.2 Stroomsnelheid 46
4.1.3 Golven 47
4.1.4 Wind 49
4.2 Vaarsnelheden en kielspelingen 50
4.2.1 Vaarsnelheden 50
4.2.2 Kielspelingen (bruto) en blockage 52
4.3 Dynamische scheepsbewegingen 54
4.4 Squat 55
4.4.1 Invloed van scheepsinteractie 55
4.4.2 Invloed van vaarsnelheid 57
4.4.3 Invloed van kielspeling en blockage 58
4.5 Totale verticale beweging en kielspelingen 58
4.5.1 Totale verticale beweging 58
4.5.2 Kielspelingen (Netto) 59
4.6 Nauwkeurigheid 60
5 Squatmodellering 61
5.1 Formules 61
5.1.1 Formule 1: Verwilligen *et al.* (2007) 61
5.1.2 Formule 2: Optimalisatie kielspeling 63
5.1.3 Formule 3: Vereenvoudigde formule 63
5.2 Regressie op basis van sleeptankproeven 64
5.3 Regressie op basis van waregroottemetingen 69
5.4 Vergelijking met meetdata 74
5.4.1 Statistische analyse overeenstemming meetdata 74
5.4.2 Invloed statische vertrimming 76
5.5 Selectie squatmodel 76
5.6 Sensitiviteit stroomsnelheid Formule1_TT 78
5.7 Vergelijking met generieke squatformules 80
5.7.1 Derde squatformulering van Barrass (*Barrass3*) 80
5.7.2 De formulering volgens *ICORELS*. 81
6 Samenvatting en Conclusie 83

6.1 Meetvaarten 83
6.2 Squatformule 84
6.3 Aanbevelingen 85
7 Referenties 86
Bijlage 1: Overzichtsgrafieken meetvaarten B1
Bijlage 2: Ontmoetingstabellen B44
Bijlage 3: Overeenstemming squatformules met waregroottemetingen B49
Regressiemodellen op basis van sleeptankresultaten B50
Regressiemodellen op basis van meetvaart Asian Blossom B51
Regressiemodellen op basis van meetvaart Wisdom of the Sea B52
Regressiemodellen op basis van meetvaart Lancelot B53
Regressiemodellen op basis van meetvaart Bulk Mexico B54
Regressiemodellen op basis van vier meetvaarten B55
Bijlage 4: KMZ-bestanden B56
Bijlage 5: Eindpresentatie B57

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Naamgeving stationaire en dynamische verticale bewegingen (Nederlands) 1

Tabel 2 – Naamgeving stationaire en dynamische verticale bewegingen (Engels)..... 1

Tabel 3 – Ware grootte afmetingen van het schip Cape Mexico (T01) in de sleeptank getest op schaal 1/70.3

Tabel 4 – Proefcondities getest in de sleeptank..... 4

Tabel 5 – Gegevens meetvaarten zoals bekomen van Nederlands Loodswezen..... 7

Tabel 6 – Metadata toegepast voor de uitlijning van de GPS-antennes zoals aangeleverd door Nederlands Loodswezen 10

Tabel 7 – Baanafstand van de voornaamste boeien in het studiegebied 20

Tabel 8 – Baanafstand van de onderzochte meetlocaties in het studiegebied 23

Tabel 9 – Instellingen toegepast voor de automatische generatie van de bodemmeshes..... 31

Tabel 10 – Dominante periodes voor de verticale vrijheidsgraden zoals bekomen voor Asian Blossom..... 37

Tabel 11 – Significante golfhoogte bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken 48

Tabel 12 – Dominante golfrichting bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken 48

Tabel 13 – Significante deiningshoogte bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken 48

Tabel 14 – Dominante deiningsrichting bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken 48

Tabel 15 – Windsnelheid bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken..... 49

Tabel 16 – Windrichting bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken 49

Tabel 17 – Windconditie tijdens meetvaarten 49

Tabel 18 – Regressieresultaten squat aan boeg op basis van sleeptankproeven 64

Tabel 19 – Regressieresultaten squat aan boeg op basis van waregroottemetingen 70

Tabel 20 – Overeenstemming regressiemodellen voor squat aan boeg met waregroottemetingen..... 75

Tabel 21: Regressiecoëfficiënten voor Formule 1 bekomen op basis van sleeptankmetingen van boeg squat (Formule1_TT) 77

Tabel 22: Regressiecoëfficiënten voor Formule 3 bekomen op basis van sleeptankmetingen van boeg squat (Formule3_TT) 77

Tabel 23 – Meetvaartcondities en squatvoorspelling bij baanafstand -15 km 79

Tabel 24 – Meetvaartcondities en squatvoorspelling Formule1_TT bij baanafstand -15 km bij variatie vaarsnelheid 79

Tabel 25 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Asian Blossom..... B45

Tabel 26 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Cape Canary..... B45

Tabel 27 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Wisdom of the Sea B46

Tabel 28 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Lancelot B46
Tabel 29 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Bulk Mexico B47
Tabel 30 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Cape Harmony B48
Tabel 31 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Panormos B48

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Inzinking ter hoogte van de voorloodlijn zoals gemeten tijdens stationaire sleeptankproeven 5

Figuur 2 – Inzinking ter hoogte van de achterloodlijn zoals gemeten tijdens stationaire sleeptankproeven .. 6

Figuur 3 – Posities en naamgeving van GPS-antennes van het meetsysteem Full-plus SNMS 9

Figuur 4 – Onderzochte meetlocaties waterstanden ten opzichte van het door de Asian Blossom afgelegde traject op 27/07/2015. 11

Figuur 5 – Visualisatie van de peilingen uit de Schelde-ECS Databank het traject afgelegd door de Cape Canary op 29/07/2015..... 12

Figuur 6 – Golfmeetboeien binnen het Meetnet Vlaamse Banken (directioneel (groen) en non-directioneel (blauw)) en binnen het Landelijk Meetnet Water (non-directioneel (rood)) gecombineerd met het vaartraject van de Wisdom of the Sea op 24/09/2015. 13

Figuur 7 – AIS-ontvangststations in beheer van Schelde Radar Keten (Bron: Schelde Radar Keten) 14

Figuur 8 – Visualisatie definitie referentiepunt op basis van POS..... 16

Figuur 9 – Visualisatie scheepsvaste coördinatenstelsel gerelateerd aan statische scheepspositie. 16

Figuur 10 – Definitie slingervlak met orthogonale projectie van HDG1..... 17

Figuur 11 – Evolutie van de helling en de dynamische slingerhoek tijdens de statische meting op de Asian Blossom. 17

Figuur 12 – Definitie trimvlak met orthogonale projectie van HDG2. 18

Figuur 13 – Visualisatie trimhoek tijdens statische meting..... 18

Figuur 14 – Evolutie van de trim en de dynamische stamphoek tijdens de statische meting Asian Blossom.19

Figuur 15 – KML-weergave in Google Earth™ van het traject afgelegd door de Asian Blossom op 27/07/'15 te Vlissingen-Sloehaven..... 21

Figuur 16 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Asian Blossom (27/07/2015). 23

Figuur 17 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Cape Canary (29/07/2015). 24

Figuur 18 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Wisdom of the Sea (24/09/2015. 24

Figuur 19 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Lancelot (08/10/2015). 25

Figuur 20 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Bulk Mexico (19/11/2015). 25

Figuur 21 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Cape Harmony (29/06/2016). 26

Figuur 22 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Panormos (02/10/2016). 26

Figuur 23 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 27/07/2015..... 27

Figuur 24 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 29/07/2015 27

Figuur 25 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 24/09/2015 28

Figuur 26 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 08/10/2015 28

Figuur 27 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 19/11/2015 29

Figuur 28 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 29/06/2016 29

Figuur 29 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 01-02/10/2016 30

Figuur 30 – Verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals toegepast tijdens de meetvaarten. 30

Figuur 31 – Bodemmesh zoals toegepast voor meetvaart Asian Blossom 31

Figuur 32 – Conversie LAT-ETRS89 langsheen referentietraject zoals toegepast door meetdiensten Schelde ECS 32

Figuur 33 – Definitie van blockage op basis van invloedsbreedte 33

Figuur 34 – Hoogteconversie voor de referentiebaan tussen WGS84 en NAP/MSL op basis van PC-Trans en de conversie tussen WGS84 en NAP zoals toegepast in de studie 35

Figuur 35 – Berekening squat op basis van verticale positie scheepskiel 37

Figuur 36 – Presentatie visualisatie Asian Blossom en gefilterde AIS-trajecten tijdens invaart Sloehaven. .. 39

Figuur 37 – Bedieningspaneel animaties in Google Earth™ 42

Figuur 38 – KMZ-visualisatie meetvaart Asian Blossom met gefilterde AIS-scheepvaart 43

Figuur 39 – KMZ-visualisatie meetvaart Cape Canary met gefilterde AIS-scheepvaart 43

Figuur 40 – KMZ-visualisatie meetvaart Wisdom of the Sea met gefilterde AIS-scheepvaart 44

Figuur 41 – KMZ-visualisatie meetvaart Lancelot met gefilterde AIS-scheepvaart 44

Figuur 42 – KMZ-visualisatie meetvaart Bulk Mexico met gefilterde AIS-scheepvaart 44

Figuur 43 – KMZ-visualisatie meetvaart Cape Harmony met gefilterde AIS-scheepvaart 45

Figuur 44 – KMZ-visualisatie meetvaart Panormos met gefilterde AIS-scheepvaart 45

Figuur 45 – Reproductie van waterstanden langsheen het vaartraject voor de uitgevoerde meetvaarten .. 46

Figuur 46 – Stroomsnelheden ZUNOv4-hindcast berekeningen langsheen het vaartraject voor de uitgevoerde meetvaarten 47

Figuur 47 – Vaarsnelheid over de grond toegepast tijdens de geanalyseerde meetvaarten 51

Figuur 48 – Vaarsnelheid door het water toegepast tijdens de geanalyseerde meetvaarten 51

Figuur 49 – Bruto kielspelingen ter hoogte van de boeg zoals bekomen voor de geanalyseerde meetvaarten 53

Figuur 50 – Blockage bekomen voor de geanalyseerde meetvaarten 53

Figuur 51 – Maximale dynamische verticale beweging van de boeg, afgeleid uit de geanalyseerde meetvaarten 54

Figuur 52 – Squat ter hoogte van de boeg zoals bekomen op basis van de geanalyseerde meetvaarten 55

Figuur 53 – Maximale verticale beweging van de boeg, afgeleid uit de geanalyseerde meetvaarten 59

Figuur 54 – Netto kielspelingen ter hoogte van de boeg op basis van de maximale totale verticale beweging voor de geanalyseerde meetvaarten 59

Figuur 55 – Kwaliteit regressie squat aan boeg op basis van sleeptankproeven 65

Figuur 56 – Regressiemodel Formule 1 op basis van sleeptankproeven vergeleken met stationaire sleeptankresultaten 65

Figuur 57 – Regressiemodel Formule 2 op basis van sleeptankproeven vergeleken met stationaire sleeptankresultaten 66

Figuur 58 – Regressiemodel Formule 3 op basis van sleeptankproeven vergeleken met stationaire sleeptankresultaten 67

Figuur 59 – Vergelijking tussen drie regressiemodellen op basis van sleeptankproeven 68

Figuur 60 – Vergelijking tussen drie regressiemodellen op basis van vier meetvaarten 71

Figuur 61 – Vergelijking regressiemodellen Formule 1 op basis van verschillende brongegevens 72

Figuur 62 – Vergelijking regressiemodellen Formule 2 op basis van verschillende brongegevens 73

Figuur 63 – Vergelijking regressiemodellen Formule 3 op basis van verschillende brongegevens 74

Figuur 64 – Vergelijking tussen drie voorgestelde regressiemodellen 78

Figuur 65 – Vergelijking tussen squatmodellen *Barrass3, Formule1_TT en Formule2_TT* voor de inzinking ter hoogte van de boeg. 81

Figuur 66 – Vergelijking tussen *ICORELS, Formule1_TT en Formule3_TT* voor de inzinking ter hoogte van de boeg. 82

1 Situering

1.1 Kielspeling en verticale scheepsbeweging

De vereiste kielspeling voor een veilige vaart naar en van de Scheldehavens wordt in grote mate bepaald door de te verwachten verticale bewegingen van het schip over het vaartraject. Deze verticale bewegingen kunnen opgesplitst worden in dynamische bewegingen en stationaire bewegingen. De dynamische bewegingen betreffen de responsie van het schip op zeegang en zijn bijgevolg sterk afhankelijk van het heersende golfklimaat. De stationaire verticale beweging van het schip is het gevolg van een drukdaling langsheen een varend schip waardoor het schip gaat inzinken en vertrimmen. Deze stationaire verticale beweging wordt aangeduid met de term **squat**. Belangrijke parameters die de squat beïnvloeden betreffen:

- de vaarsnelheid door het water van het schip;
- de verticale (waterdiepte) en horizontale (oeverafstanden) begrenzing van de vaarweg;
- de scheepsvorm;
- gebruik van voortstuwing;
- ander scheepvaartverkeer.

In voorliggend rapport wordt de naamgeving gehanteerd zoals weergegeven in Tabel 1 (Nederlandstalig) en Tabel 2 (Engelstalig) voor de definitie van stationaire en dynamische componenten van de verticale scheepsbeweging.

Tabel 1 – Naamgeving stationaire en dynamische verticale bewegingen (Nederlands)

Vrijheidsgraad	Stationair	Dynamisch
Dompen	Inzinking (midscheeps)	Dynamische dompbeweging
Slingeren	Helling	Dynamische slingerbeweging
Stampen	Trim	Dynamische stampbeweging

Tabel 2 – Naamgeving stationaire en dynamische verticale bewegingen (Engels)

Motion	Steady	Unsteady
Heave	Sinkage (midships)	Unsteady heave
Roll	Heel	Unsteady roll
Pitch	Trim	Unsteady pitch

1.2 Squatformule cape size bulkcarriers op basis van ware-grootte metingen en sleeptankproeven

De studie is een antwoord op een offertevraag ontvangen op 11/08/2014 (Rijkswaterstaat - Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2014). Doel van de studie betreft de ontwikkeling van een voorspellingsmodel voor squat van diepgeladen bulkcarriers over het traject naar de haven Vlissingen-Sloehaven dat valt onder het werkingsgebied van het GNB[1].

Onderwerp van de studie betrof de kennisopbouw van de verticale bewegingen van cape size bulkcarriers met focus op squat. Met het oog op de implementatie van de onderzoeksresultaten in de DKS[2]-berekening van WESP[3], is het eindproduct van het onderzoek een squat-formule die gebaseerd is op en gevalideerd is met behulp van:

- squat opgemeten op schaalmodellen van een gelijkaardige scheepsvorm beproefd in de sleeptank voor manoeuvres in ondiep water (samenwerking Waterbouwkundig Laboratorium en Universiteit Gent, afdeling Maritieme Techniek)
- waregroottemetingen uitgevoerd door het Nederlandse Loodswezen regio Scheldemonden op uiteindelijk zeven cape size bulkcarriers (afmetingen ca. 290 m x 45 m) tijdens hun opvaart naar Vlissingen-Sloehaven.

Voorliggend rapport betreft het eindrapport van studie 13_059 waarin het uitgevoerde onderzoek gepresenteerd wordt in onderstaande hoofdstukken.

- H2, p.3, Squat op basis van sleeptankproeven: Algemene beschrijving van squat en de bepalende parameters op basis van de resultaten opgemeten in de sleeptank voor manoeuvres in ondiep water (samenwerking Waterbouwkundig Laboratorium en Universiteit Gent, afdeling Maritieme Techniek)
- H3, p.7, Verwerking waregroottemetingen: Presentatie van de inputdata en de dataverwerking toegepast op de meetvaarten
- H4, p.43, Resultaten waregroottemetingen: Beschrijving van de hydro-meteo data, kielspelingen, verticale scheepsbewegingen en scheepsontmoetingen.
- H5, p.61, Squatmodellering: Presentatie van drie onderzochte squatformules met regressie-coëfficiënten en overeenstemming bij gebruik van verschillende inputgegevens uit sleeptankproeven en waregroottemetingen.
- H6, p. 83, Samenvatting en Conclusie.

[1] GNB: Gemeenschappelijk Nautisch Beheer
[2] DKS: Dynamische KielSpeling: projectnaam voor de implementatie van een probabilistische berekeningsmethodiek in WESP
[3] WESP: WESterschelde Planner

2 Squat op basis van sleeptankproeven

2.1 Schaalmodel Cape Mexico (T01)

In 2014 werden in de sleeptank voor manoeuvres in ondiep water (samenwerking WL en UGent, afdeling Maritieme Techniek) gedwongen manoeuvreerproeven uitgevoerd met een schaalmodel (1/70) van een cape size bulkcarrier met afmetingen zoals weergegeven in Tabel 3. Deze scheepsafmetingen komen erg goed overeen met de afmetingen van diepgeladen bulkcarriers naar Vlissingen-Sloehaven.

Tabel 3 – Ware grootte afmetingen van het schip Cape Mexico (T01) in de sleeptank getest op schaal 1/70.

Bulkcarrier (T01) – enkele schroef – enkel roer			
L_{OA} (m)	292.0	# Schroefbladen	4
L_{PP} (m)	282.0	D_P (m)	8.197
B (m)	45.0	P/D (-)	0.752
T (m)	16.5	AEP (-)	0.445
C_B (-)	0.831	Roer opp. (m²)	94.1
Deplacement (kg)	$1.81\ 10^8$	Schaal	1:70
GM (m)	2.765	GM_L (m)	371.14

2.2 Proevenprogramma

2.2.1 Proeftypes

Naargelang de bewegingen die giertafel, langs- en dwarswagen uitvoeren, kunnen verschillende proeven onderscheiden worden. Zo is bij een stationaire proef enkel de langsas van de sleepwagen actief, en neemt deze een constante snelheid aan. In het geval van een multimodale proef kunnen volgende grootheden harmonische bewegingen uitvoeren waarvan de gemiddelde waarde, de amplitude, de periode en de fasehoek onafhankelijk van elkaar kunnen gekozen worden:

- de langsscheepse snelheidscomponent;
- de dwarsscheepse snelheidscomponent;
- de giersnelheid;
- het toerental van de schroef;
- de roerhoek.

Bij de uitvoering van gedwongen manoeuvreerproeven is het schaalmodel vrij om in te zinken en te vertrimmen (enkel de horizontale beweging is gedwongen) en wordt de inzinking voor en achter opgemeten. Indien de afstand tussen de kiel en de bodem te klein wordt, wordt de proef afgebroken om mogelijke schade aan het scheepsmodel te vermijden.

2.2.2 Proevenprogramma

Het ruime proevenprogramma uitgevoerd op het schaalmodel T01 omvatte variatie van een groot aantal parameters. Ten behoeve van de squatmodellering werden echter enkel deze proeven geselecteerd waarvoor voldaan werd aan onderstaande voorwaarden:

- de scheepssnelheid is groter dan 0 kn;
- het toerental is groter dan of gelijk aan 0 rpm;
- de roerhoek is gelijk aan 0°;
- de drifthoek van het schip is gelijk aan 0°.

Rekening houdend met bovenstaande filtering, werd een proefmatrix zoals weergegeven in Tabel 4 toegepast voor de beoordeling van de squat van het schip. Hierbij werden vier kielspelingen (10%, 20%, 40% en 100%) beproefd bij vier verschillende snelheden. De maximale vaarsnelheid welke beproefd werd bij de drie laagste kielspelingen betrof 14 kn, terwijl de hoogste kielspeling beproefd werd tot 16 kn. Elk van de combinaties van snelheid en kielspeling werden bovendien onderzocht bij vier schroeftoerentallen. Deze schroeftoerentallen stemmen overeen met 0%, 20%, 40% en 80% van het toerental overeenkomstig telegraafstand Sea Full (91 rpm).

Tabel 4 – Proefcondities getest in de sleeptank.

UKC	U	n
[%]	[kn]	[rpm]
10	2, 4, 8, 14	0, 36, 55, 73
20	2, 4, 8, 14	0, 36, 55, 73
40	2, 4, 8, 14	0, 36, 55, 73
100	2, 4, 8, 16	0, 36, 55, 73

(waarden omgerekend naar ware grootte, condities in grijs werden voortijdig afgebroken)

2.3 Squat

De inhoudelijke bespreking van de squatresultaten opgemeten in de sleeptank werd gebaseerd op de resultaten van stationaire proeven uitgevoerd bij de condities zoals weergegeven in Tabel 4.

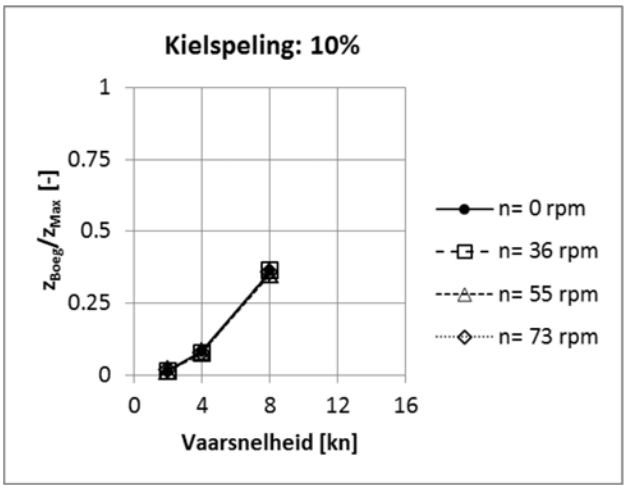
In geval van volle scheepsvormen (zoals het geval is bij een bulkcarrier) zal bij gelijklastige ladingscondities de maximale inzinking steeds ter hoogte van de boeg optreden. Bij de bespreking werden de squatwaarden dimensieloos gemaakt op basis van de maximale inzinking die opgemeten werd in het proevenprogramma (z_{Max}).

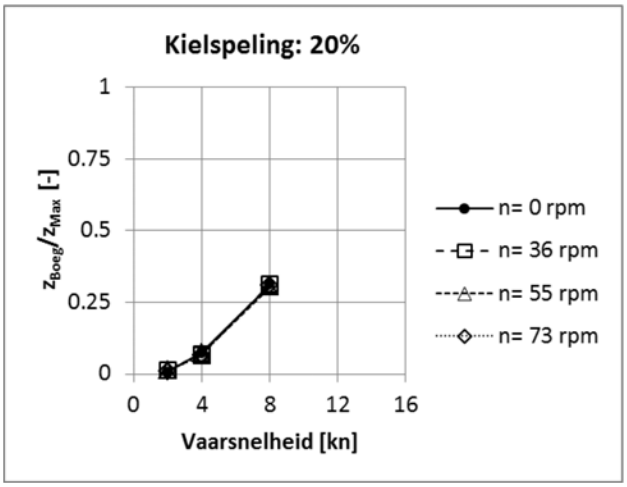
De inzinkingen ter hoogte van boeg en hek worden in respectievelijk Figuur 1 en Figuur 2 weergegeven bij de beproefde kielspelingen, snelheden en toerentallen. Vergelijking van beide figuren illustreert de hogere inzinkingen opgemeten ter hoogte van de boeg. Op basis van de sleeptanktesten blijkt dat de verhouding tussen de inzinking aan de boeg en de inzinking aan het hek bij kielspeling 40% en vaarsnelheid 14 kn ca. 2.7 bedraagt. Voor kielspeling 100% en vaarsnelheid 16 kn bedraagt deze verhouding ca. 3.3.

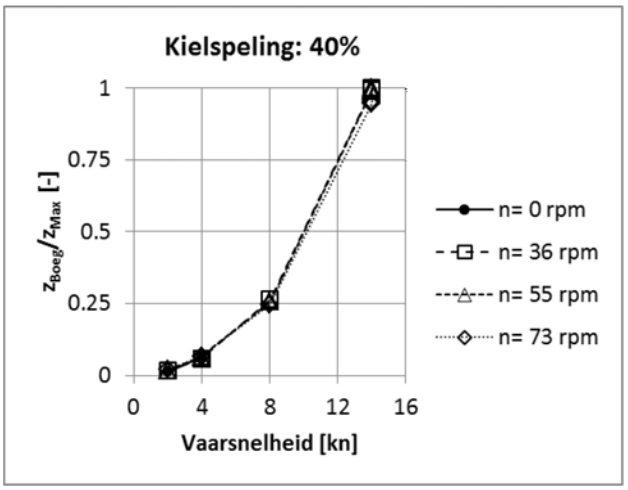
In Figuren 1 en 2 worden de inzinkingen weergegeven voor verschillende schroeftoerentallen. Hierbij blijkt de invloed van het schroeftoerental op de inzinking ter hoogte van de boeg verwaarloosbaar. Het schroeftoerental blijkt wel een invloed te hebben (zij het beperkt) op de inzinking achteraan.

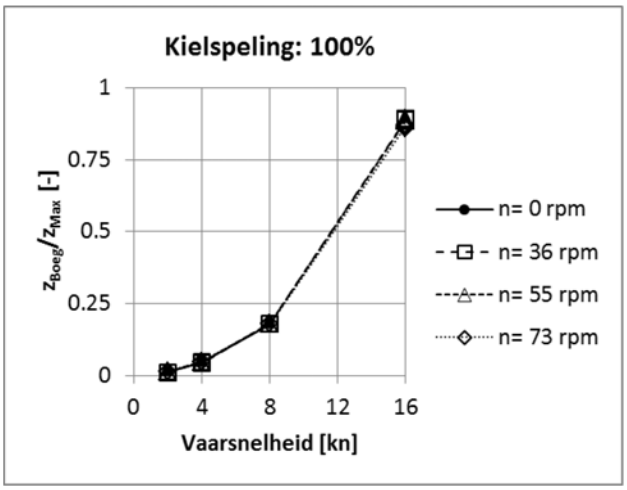
Verder illustreren Figuren 1 en 2 de relatie tussen squat en enerzijds de vaarsnelheid (meer dan kwadratisch) en anderzijds de kielspeling. Uit onderzoek naar horizontale beperkingen van de vaarweg (Lataire & Vantorre, 2008) blijkt dat de invloed van de vaaromgeving op squat niet beperkt is tot de kielspeling maar eveneens door de horizontale begrenzing van de vaarweg.

Figuur 1 – Inzinking ter hoogte van de voorloodlijn zoals gemeten tijdens stationaire sleeptankproeven

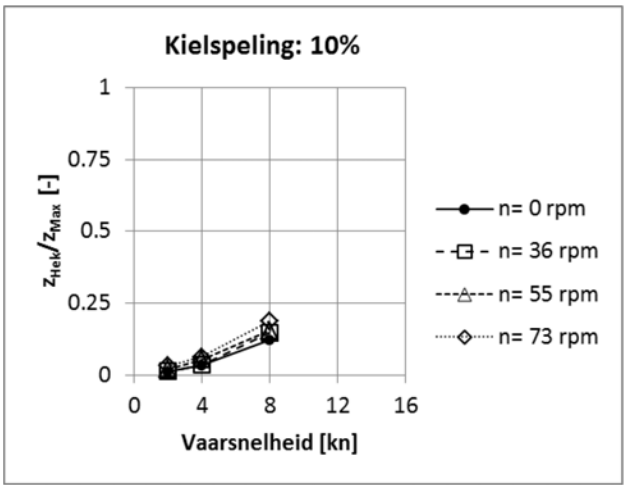


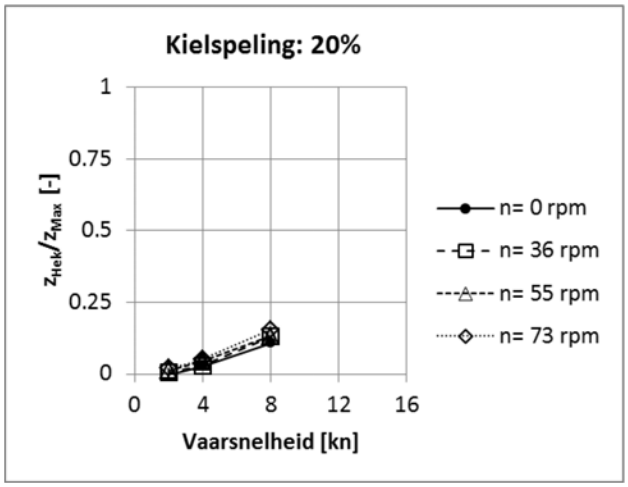


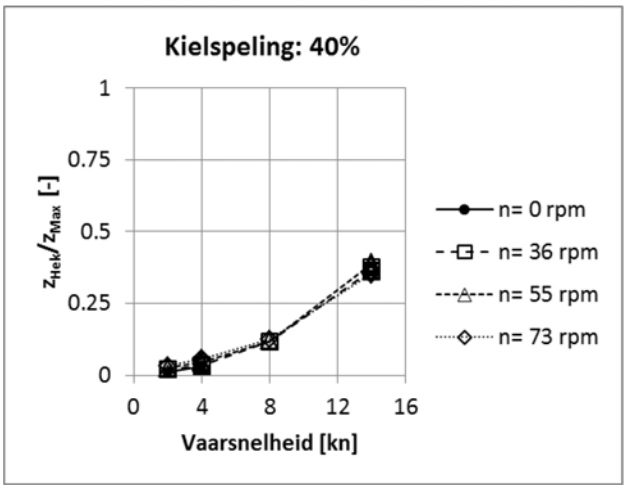


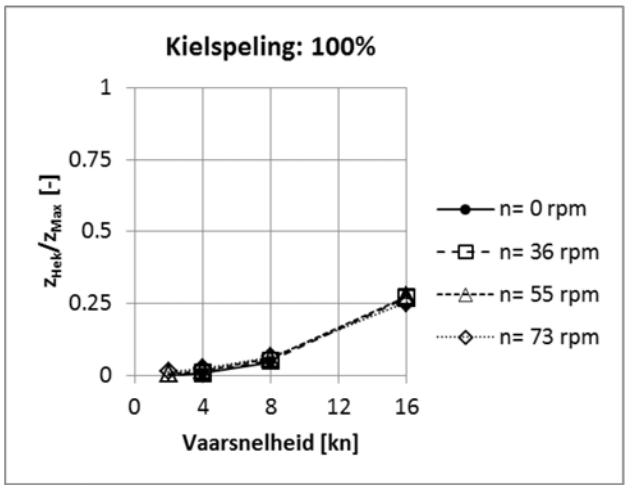


Figuur 2 – Inzinking ter hoogte van de achterloodlijn zoals gemeten tijdens stationaire sleeptankproeven









3 Verwerking waregroottemetingen

In 2015-2016 werden er door het Nederlandse Loodswezen zeven meetvaarten uitgevoerd op cape size bulkcarriers welke in het kader van studie 13_059 door het Waterbouwkundig Laboratorium verder verwerkt werden tot scheepsbewegingen en squat, en aangevuld werden met omgevingsparameters zoals waterdieptes, bodemsecties, scheepsontmoetingen, golven en wind.

De belangrijkste gegevens met betrekking tot de meetvaarten worden weergegeven in Tabel 5. Hieruit blijkt dat de horizontale dimensies van de zeven schepen quasi gelijk zijn en overeenkomen met het schaalmodel beproefd in de sleeptank (zie Tabel 3). Voor de eerste zes schepen geldt dat de diepgang voor en achter zich steeds tussen 16.4 en 16.5 m bevond. Het zevende schip (Panormos) had tijdens de meetvaart een maximale diepgang gelijk aan 16.25 m (achterschip) gecombineerd met een vertrimming naar achter waardoor de diepgang ter hoogte van de boeg slechts 15.5m bedroeg.

Tabel 5 – Gegevens meetvaarten zoals bekomen van Nederlands Loodswezen

Vessel	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panormos
Date	27/07/'15	29/07/'15	24/09/'15	8/10/'15	19/11/'15	29/06/'16	1/10/'16
L_{OA} (m)	291.98	292	292	291.8	292	292	292
L_{PP} (m)	283.8	288	283	282.2	278	282	282
B (m)	45	45	45	45	45	45	45
T_F (m) at 1025 kg/m³	16.43	16.5	16.4	16.44	16.5	16.5	15.55
T_A (m) at 1025 kg/m³	16.43	16.5	16.4	16.47	16.5	16.5	16.25
GM (m)	5.59	4.86	5.76	5.36	-	6	5.38

3.1 Input-data

In §3.1 worden de input-data gepresenteerd welke toegepast werden in de studie. De verwerking die op deze data uitgevoerd werd wordt beschreven in §3.2.

3.1.1 Scheepsmetingen

Meetopstelling Nederlands Loodswezen (Full SNMS)

Voor het begeleiden van marginale schepen wordt door zowel het Vlaamse (DABL) als het Nederlandse loodswezen gebruik gemaakt van een nauwkeurig positioneringssysteem Full SNMS[4] (van Buuren, 2005).

[4] SNMS: Schelde Navigator voor Marginale Schepen

De SNMS console (ontwikkeld door QPS[5]) laat toe om het schip weer te geven ten opzichte van een elektronische nautische kaart die onder andere de meest recente peilingen bevat. De positie van een scheepscontour wordt in de SNMS-applicatie gedefinieerd door middel van een horizontale positie en koers van een referentiepunt aan boord van het schip. In geval van een Lite SNMS wordt hiervoor de positiebepaling van het schip toegepast welke onder de vorm van AIVDO-NMEA-strings via de Pilot Plug beschikbaar gesteld wordt. De nauwkeurigheid van de positiebepaling is bij Lite SNMS afhankelijk van de scheepsapparatuur en bijgevolg niet gegarandeerd, waardoor deze zich niet leent als hulpmiddel voor het manoeuvreren. In geval van een Full SNMS is de horizontale positiebepaling gebaseerd op twee RTK-GPS antennes die door de bevoegde loodsen aan boord gebracht worden en ontplooid worden aan boord van het schip. Door de RTK-GPS antennes op vooraf uitgemeten posities te plaatsen wordt de scheepscontour erg accuraat weergegeven in de SNMS-applicatie, waardoor deze als hulpmiddel kan toegepast worden tijdens het manoeuvreren. Zo kan, in geval van Full SNMS, de SNMS-applicatie toegepast worden in een '*Lock Approach Mode*' (waarbij de uitlijning van het schip ten opzichte van de kolkmuren uitgelezen wordt) of in een '*Docking Mode*' (waarbij de afstand tot een kaaimuur accuraat weergegeven wordt).

In 2013 besliste het Nederlandse Loodswezen, Regio Scheldemonden om te investeren in een uitbreiding van hun Full SNMS positioneringstoepassing teneinde meetvaarten uit te kunnen voeren waarbij behalve de horizontale scheepspositie ook de verticale scheepspositie gemonitord wordt. Het objectief van het Nederlandse Loodswezen was hierbij om meer inzicht te bekomen in de effectieve kielspeling welke door marginale schepen naar Vlissingen-Sloehaven gerespecteerd werd. In overleg met de ontwikkelaar van Full SNMS (QPS) werd beslist om het meten van de scheepspositie in zes vrijheidsgraden te realiseren door een extra RTK-GPS antenne toe te voegen aan het meetsysteem. Doorheen voorliggend rapport wordt dit meetsysteem Full-Plus SNMS genoemd.

GPS-posities antennes

De drie GPS-antennes welke deel uitmaken van het Full-plus SNMS meetsysteem betreffen (zie Figuur 3):

- POS-antenne: ten opzichte van deze antenne worden in de Full SNMS applicatie de afstanden tot de scheepscontour gedefinieerd. De RTK-correcties worden via een GPRS-modem ontvangen voor de positie van de POS-antenne en worden overgenomen door de andere antennes;
- HDG1-antenne: deze antenne wordt toegepast om de koers van het schip (heading) te meten. De hoek tussen POS en HDG1 ten opzichte van het scheepsassenstelsel dient door de loods gedefinieerd te worden. Hierbij wordt er in de Qastor-software vanuit gegaan dat de antennes POS en HDG1 zich ofwel loodrecht op de lengteas (90° of -90°) ofwel volgens de lengteas (0° -180°) van het schip bevinden. Bij ontplooiing van Full SNMS op een bulkcarrier zullen de antennes POS en HDG1 steeds op dezelfde langsafstand geïnstalleerd worden (de ene op de stuurboord- en de andere op de bakboordvleugel).
- HDG2-antenne: deze antenne werd aan het meetsysteem toegevoegd om de verticale scheepsbewegingen te monitoren. Deze antenne dient zich op een andere langspositie op het schip te bevinden. Bij ontplooiing van Full-plus SNMS op een bulkcarrier zal de HDG2-antenne geïnstalleerd worden ter hoogte van de boeg.

De posities van de drie antennes worden real-time verstuurd naar een centrale unit door middel van WIFI-verbinding en daar gelogd.

De meetgegevens bekomen door middel van het Full-plus SNMS meetsysteem werden in de vorm van een ascii-bestand aangeleverd aan het WL. Het ascii-bestand betreft een export uit Qinsy™ uitgevoerd door het Nederlands Loodswezen en bevat volgende gegevens:

1. ADX POS Time: tijdstip van de meting gerefereerd ten opzichte van UTC (dit werd gevalideerd door vergelijking met AIS-gegevens). Bij een onverstoorde werking bedraagt de meetfrequentie 5Hz.

[5] QPS: Quality Positioning Services B.V.

2. Fix Status: Status van de werking.
3. ADX POS Satellite Count: aantal GPS en GLONASS satellieten ontvangen door de POS-antenne.
4. ADX POS Differential Age: tijd sinds de laatste ontvangst van RTK-correcties door de POS-antenne [s].
5. ADX POS Easting: x-positie van de POS-antenne [m WGS84 UTM 31N].
6. ADX POS Northing: y-positie van de POS-antenne [m WGS84 UTM 31N].
7. ADX POS Height: z-positie (hoogte) van de POS-antenne [m t.o.v. WGS84 ellipsoïde].
8. ADX HDG1 Easting: x-positie van de HDG1-antenne [m WGS84 UTM 31N].
9. ADX HDG1 Northing: y-positie van de HDG1-antenne [m WGS84 UTM 31N].
10. ADX HDG1Height: z-positie (hoogte) van de HDG1-antenne [m t.o.v. WGS84 ellipsoïde].
11. ADX HDG2 Easting: x-positie van de HDG2-antenne [m WGS84 UTM 31N].
12. ADX HDG2 Northing: y-positie van de HDG2-antenne [m WGS84 UTM 31N].
13. ADX HDG2 Height: z-positie (hoogte) van de HDG2-antenne [m t.o.v. WGS84 ellipsoïde].
14. ADX POS Sd Latitude: standaardvariatie van de latitude [cm]
15. ADX POS Sd Longitude: standaardvariatie van de longitude [cm]

Figuur 3 – Posities en naamgeving van GPS-antennes van het meetsysteem Full-plus SNMS



Posities GPS-antennes op schip

Teneinde op basis van de antenneposities de positie van het schip te berekenen is er bijkomende informatie vereist betreffende de positie van de antennes op het schip. In Tabel 6 worden de bijkomende gegevens opgelijst welke door het Loodswezen opgemeten werden tijdens de meetvaart en welke toegepast werden bij de verwerking. Bij de verwerking werd enkel die gegevens toegepast welke strikt noodzakelijk waren. Dit betreffen de langsafstand tussen de boeg en de antenne POS (ADX_POS_x); de dwarsafstand (positief naar stuurboord) tussen de hartlijn van het schip en de antenne POS (ADX_POS_y). Bovendien werd aangenomen dat de antennes POS en HDG1 zich steeds op dezelfde langspositie bevinden (ADX_POS_x = ADX_HDG1_x). Dit stemt overeen met de wijze waarop de loodsen de antennes aan boord installeren. De relatieve posities van de antennes zoals toegepast voor de studie en aangeleverd door het Loodswezen worden samengevat in Tabel 6.

Behalve deze gegevens werd ter referentie van de scheepsbewegingen uitgegaan van onderstaande aannames/afspraken geldig voor een statisch (d.i. stilliggend) schip:

- de squat is nul;
- de trimhoek is nul;
- de slingerhoek is nul.

Tabel 6 – Metadata toegepast voor de uitlijning van de GPS-antennes zoals aangeleverd door Nederlands Loodswezen

Vessel	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panormos
Date	27/07/'15	29/07/'15	24/09/'15	8/10/'15	19/11/'15	29/06/'16	1/10/'16
ADX_POS_x	-252.35	-253.55	-248.67	-249.93	-250.57	-254.85	-249.42
ADX_POS_y	22.40	22.40	22.40	22.39	21.52	22.40	22.40
ADX_HDG1_x	-252.35	-253.55	-248.67	-249.93	-250.57	-254.85	-249.42

3.1.2 Getij en Stroom

De nauwkeurigheid waarmee de waterstanden langsheen het vaartraject gereproduceerd kunnen worden heeft een rechtstreekse impact op de nauwkeurigheid van de squatmetingen. Bijgevolg werd er in deze studie veel aandacht besteed aan de verwerking van het getij.

Numerieke modelresultaten ZUNOv4

Teneinde gebiedsdekkende informatie te bekomen voor waterstanden en stroomvectoren, werd gebruik gemaakt van hindcast berekeningen uitgevoerd door middel van het numerieke model ZUNOv4 (verder ZUNO-model). Deze werden als NetCDF-bestanden aangeleverd door Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving, afdeling Modellen en Applicaties (contactpersoon Jan-Rolf Hendriks). Deze bestanden bevatten per 30 minuten een gebiedsdekkend grid met onderstaande parameters:

- waterstand [m];
- stroomvector in oostelijke richting [m/s];
- stroomvector in noordelijke richting [m/s].

De hindcastberekeningen werden bekomen door aan de randen van het model waterstanden op te leggen overeenkomstig gemeten data. Deze waterstanden werden gedefinieerd ten opzichte van het verticale referentievlak MSL[6]. Echter doordat in het ZUNO-model de barocliene dichtheidseffecten niet volledig gerepresenteerd worden stemmen de bekomen waterstanden niet over het volledige gebied perfect overeen met MSL.

Om een zo nauwkeurig mogelijk representatie van de waterstanden ten opzichte van een vast referentievlak te bekomen werden op de waterstanden uit het ZUNOv4-model een correctie uitgevoerd. Hiervoor werden de modelresultaten vergeleken met beschikbare waterstandsmetingen in het interessegebied.

Waterstandsmeting Kaloothaven

De nauwkeurigheid van de waterstand is bepalend voor de nauwkeurigheid van de squat. Met name tijdens de statische meting op het schip de waterstand nauwkeurig gekend te zijn. Hiertoe werd door Rijkswaterstaat een bijkomende waterstandsmeter geïnstalleerd in de Kaloothaven (zie Figuur 4). Deze leverde elke tien minuten waterstanden gerefereerd ten opzichte van NAP[7].

[6] MSL: Mean Sea Level. MSL wordt geacht op land over te gaan in NAP.
[7] NAP: Normaal Amsterdams Peil

Meetnet Vlaamse Banken

Het meetnet Vlaamse Banken (beheerd door Vlaamse Hydrografie) bevat waterstandsmetingen op verschillende locaties in het studiegebied. Voor de correctie van het ZUNO-model werden onderstaande meetlocaties onderzocht (zie Figuur 4):

- Wandelaar (MP0);
- Bol van Heist (MP3);
- Bol van Knokke (MP4);

De waterstandsmetingen uit het meetnet Vlaamse Banken bevatten elke vijf minuten waterstanden gerefereerd ten opzichte van TAW[8]. Deze werden geconverteerd naar NAP door toepassing van een constante offset tussen beide referentievlakken. Deze offset bedroeg 2.303 m en werd overgenomen uit (Belspo *et al.*, 2010).

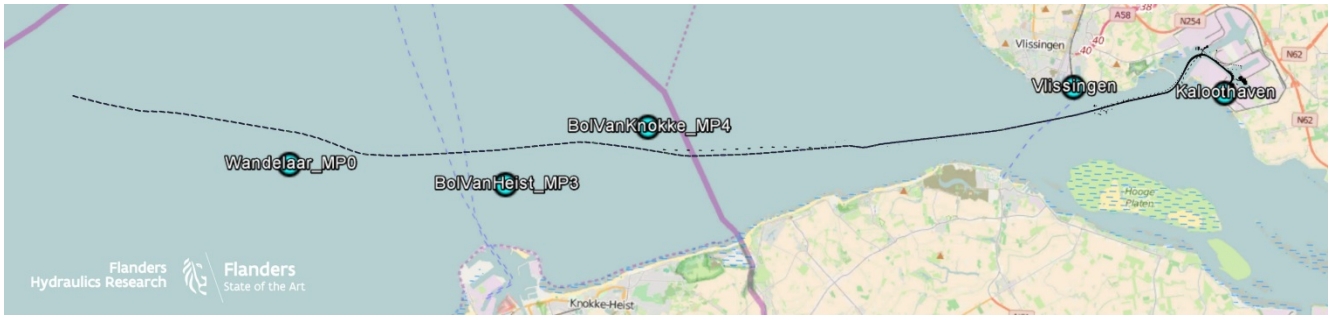
Landelijk Meetnet Water

Gelijkaardig aan het meetnet Vlaamse Banken bevat ook het Landelijk Meetnet Water (beheerd door Rijkswaterstaat) waterstandsmetingen in het studiegebied. Voor de verticale correctie van het ZUNO-model werden onderstaande meetlocaties onderzocht (zie Figuur 4):

- Vlissingen.

De waterstandsmetingen uit het Landelijk Meetnet Water bevatten elke tien minuten waterstanden gerefereerd ten opzichte van NAP.

Figuur 4 – Onderzochte meetlocaties waterstanden ten opzichte van het door de Asian Blossom afgelegde traject op 27/07/2015.



3.1.3 Bathymetrie

De kielspeling en blockage welke het schip ervaart, hebben een belangrijke invloed op de squat van het schip. In de studie werd er getracht om de bathymetrie omheen het schip zo goed als mogelijk te reproduceren. Hiervoor werd er gebruik gemaakt van verschillende databronnen.

Vaklodingen

Het studiegebied omvat de vaaromgeving Vlaamse Baaien, Wielingen, Westerscheldemonding en Westerschelde. De bathymetrische data op deze locatie wordt gemonitord door Vlaamse Hydrografie en Rijkswaterstaat en gepubliceerd on de vorm van vaklodingen. Als initiële bathymetrie werden (indien geen recentere gegevens beschikbaar op basis van de Schelde-ECS databank) de vaklodingen van 2014 (meest recente lodingen beschikbaar tijdens de opdracht) toegepast.

[8] TAW: Tweede Algemene Waterpassing

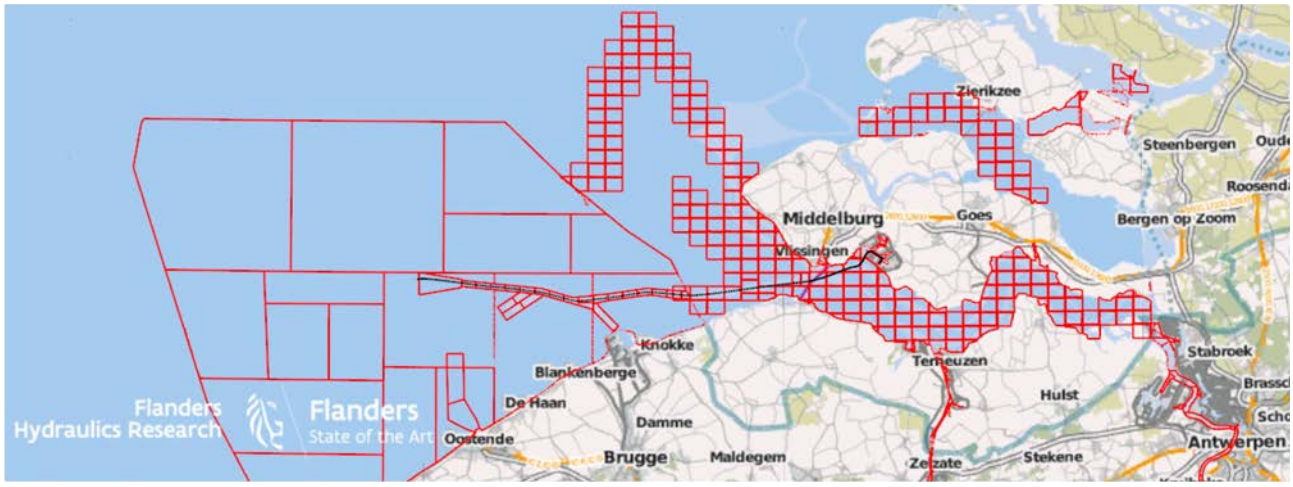
Schelde-ECS

Echter om accurater het bodemprofiel ten tijde van de meetvaarten te reproduceren, werd de bathymetrie verder verfijnd op basis van gegevens uit de Schelde-ECS databank. De Schelde-ECS databank bevat de peilingen welke door de loodsen toegepast worden op hun PPU/Full SNMS tijdens de uitvoering van de meetvaarten. De tegels met bathymetrische gegevens waaruit de Schelde-ECS database opgebouwd is worden voor het studiegebied weergegeven Figuur 5. De bodemdiepte in de Schelde-ECS databank wordt gedefinieerd ten opzichte van het verticale referentieniveau LAT[9].

Nieuwe peilingen worden onder de vorm van nieuwe edities (ascii-formaat) toegevoegd aan de corresponderende tegel uit de Schelde-ECS databank opdat deze steeds de meest recente actuele bathymetrie zou bevatten. Eens per kwartaal worden de verouderde edities verwijderd van de databank en kunnen op basis van de Schelde-ECS databank geen historische peilingen opgevraagd worden. Sedert het vierde kwartaal van 2015 echter (oktober 2015) maakt de beheerder voorafgaand een back-up van de database onder de vorm van een zip-bestand. De datum van de ascii-bestanden in dit zip-bestand stemmen overeen met de datum waarop de editie voor het eerst gedefinieerd werd in de Schelde-ECS databank. De inhoud van de zip-file laat aldus toe om voor een historische datum de toenmalige bodemconditie te reproduceren. Dit bestand werd sindsdien na afsluiting van elk kwartaal consequent doorgestuurd naar het WL en gebruikt als input voor de reproductie van de bathymetrie tijdens de meetvaarten.

Echter tijdens de eerste drie meetvaarten (uitgevoerd voor oktober 2015) was dit zip-bestand nog niet beschikbaar. Voor deze meetvaarten werden de meest recente edities opgevraagd via contactpersoon Kaatje Vandaele opgevraagd bij Vlaamse Hydrografie (agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, afdeling Kust). Om tegemoet te komen aan de vraag van WL, werden door Vlaamse Hydrografie en Rijkswaterstaat een eenmalige inspanning geleverd om de meest recente edities van de ECS-peilingen op te zoeken voor de drie eerste meetvaarten uitgevoerd (op 27/07/2015; 29/07/2015 en 24/09/2015).

Figuur 5 – Visualisatie van de peilingen uit de Schelde-ECS Databank het traject afgelegd door de Cape Canary op 29/07/2015



3.1.4 Golfklimaat

Hoewel het voornaamste objectief van de studie is om een zo nauwkeurig mogelijke squatmeting te bekomen, biedt de verwerking eveneens interessante informatie betreffende de dynamische bewegingen van een schip in zeegang. Om de dynamische scheepsbewegingen te relateren aan het optredende golfklimaat werd er enkele statistische golfparameters berekend voor de beschikbare directionele golfboeien in het studiegebied.

[9] LAT: Lowest Astronomical Tide

De meetstations waarop directionele golfspectra opgemeten worden, maken deel uit van het Meetnet Vlaamse Banken. Het betreffen de meetstations:

- Westhinder;
- Kwintebank;
- Bol van Heist.

De locaties van de meetstations wordt weergegeven in Figuur 6.

Figuur 6 – Golfmeetboeien binnen het Meetnet Vlaamse Banken (directioneel (groen) en non-directioneel (blauw)) en binnen het Landelijk Meetnet Water (non-directioneel (rood)) gecombineerd met het vaartraject van de Wisdom of the Sea op 24/09/2015.



3.1.5 Windklimaat

Ter hoogte van de meetstations Westhinder en Wandelaar worden er behalve golfmetingen ook windmetingen uitgevoerd. De windgegevens voor deze twee locaties (eveneens onderdeel van het Meetnet Vlaamse Banken) werden opgezocht voor het tijdstip waarop de schepen zich tijdens de meetvaart het dichtste bij het meetstation bevonden.

3.1.6 AIS

Een ontmoeting tussen twee varende schepen kan een belangrijke invloed hebben op de squat. Hoewel de modellering van squat ten gevolge van scheepsontmoetingen buiten de scope van het onderzoek valt, werd het scheepvaartverkeer in het studiegebied geanalyseerd om meer inzicht te bekomen in de ontmoetingen uitgevoerd door het studieschip tijdens de meetvaart. Hiervoor werd gebruik gemaakt van AIS-gegevens welke opgevraagd werden bij de Schelde Radar Keten (SRK).

De Schelde Radar Keten (SRK) beheert de AIS-ontvangststations in het studiegebied (zie Figuur 7). De ontvangen AIS-boodschappen worden door SRK gelogd samen met metadata betreffende het tijdstip (UTC) waarop de boodschap ontvangen werd en het ontvangststation waar het signaal gecapteerd werd. Bovendien wordt op de centrale server gecontroleerd op dubbele boodschappen (bv. ontvangen door twee ontvangststations) en wordt enkel de vroegste boodschap weerhouden.

Per etmaal worden de logfile weggeschreven in een ais-bestand (binair) waarvan de bestandsgrootte ca. 0.5 GByte bedraagt.

Voor de identificatie van scheepsontmoetingen werden de ais-bestand voor de dagen overeenkomstig de uitvoeringsperiode van de meetvaart opgevraagd bij en bekomen van SRK (contactpersoon Gerrie Eikenhout).

Figuur 7 – AIS-ontvangststations in beheer van Schelde Radar Keten (Bron: Schelde Radar Keten)



3.2 Verwerking

3.2.1 Scheepsbeweging in zes vrijheidsgraden

De verwerking van de scheepsbewegingen hield in dat de positiemetingen van de drie GPS-antennes uit het Full-plus SNMS meetsysteem verwerkt werden tot:

- de aardvaste positie (x, y, z) van referentiepunt gelegen in het symmetrievlak van het schip;
- de heading van het schip ten opzichte van het Noorden;
- de slingerhoek en trimhoek van het schip (dus ten opzichte van het scheepsassenstelsel) relatief ten opzichte van de statische positiemeting.

Importeren ascii-bestand

In eerste instantie werd het ascii-bestand met de posities van de antennes (§3.1.1) ingelezen. Vervolgens werd onderstaande filtering toegepast:

- Waargenomen spikes in de positie van HDG1 werden manueel verwijderd.
- Enkel data die voldeed aan onderstaande voorwaarden werd weerhouden
    - *Fix Status* gelijk aan ‘Normal’;
    - *Data beschikbaar voor de drie GPS-antennes;*
    - *ADX POS Sd Latitude* en *ADX POS Sd Longitude* kleiner dan of gelijk aan 10 cm;
    - *ADX POS Differential Age* kleiner dan of gelijk aan 4 s;
    - *ADX POS Satellite Count* groter dan of gelijk aan 8;
    - *HDG1 Northing* verschillend van 0.

Positietransformaties

Om de posities van de GPS-antennes te herrekenen naar scheepsposities in zes vrijheidsgraden wordt gebruik gemaakt van de meetgegevens bij verwaarloosbare snelheid. Deze meetgegevens worden de statische meting genoemd.

STATISCHE METING

De statische meting wordt gedefinieerd als de meetgegevens overeenkomstig de periode nadat de scheepssnelheid (berekend op basis van de POS-antenne) minder dan 0.01 m/s bedroeg.

De statische waarden voor de posities van de drie antennes werden berekend als het gemiddelde van de posities tijdens de statische meting.

HEADING EN GIERSNELHEID

De heading wordt berekend op basis van de posities van de GPS-antennes POS en HDG1. Op basis van de horizontale posities van beide antennes kan de hoek loodrecht op de baseline berekend worden door middel van:

$$Ortho_{POS_HDG1} = \text{atan2}\left(y_{HDG1} - y_{POS}; x_{HDG1} - x_{POS}\right) \quad (1)$$

Waarbij:

- $Ortho_{POS_HDG1'}$ Oriëntatie ten opzichte van Noorden loodrecht op de baseline tussen POS en HDG1 [°];
- y y-coördinaat ten opzichte van aardvast coördinatenstelsel [m];
- x x-coördinaat ten opzichte van aardvast coördinatenstelsel [m].

Wanneer beide antennes zich precies op dezelfde langsafstand bevinden (dit was één van de uitgangspunten in de verwerking, zie §3.1.1), dan stemt deze hoek overeen met de heading van het schip.

De giersnelheid werd berekend door het verschil in heading tussen twee opeenvolgende meetpunten te delen door de tijd tussen twee trajectpunten.

COÖRDINATEN IN SCHEEPSVAST ASSENSTELSEL EN REFERENTIEPUNT

Op basis van de heading tijdens de statische meting, werden de aardvaste horizontale coördinaten van de GPS-antennes HDG1 en HDG2 omgerekend naar een statisch scheepsvast coördinatenstelsel. Dit statische scheepsvaste assenstelsel werd als volg gedefinieerd (zie Figuur 9):

- het assenstelsel heeft POS als oorsprong;
- de x-as heeft een horizontale oriëntatie en is evenwijdig met het symmetrievlak van het schip. De x-as is positief in de richting van de boeg (dus volgens de richting van de statische trimhoek en heading);
- de y-as staat loodrecht op het symmetrievlak van het schip. De y-as is positief in de richting van stuurboord (dus volgens de richting van de statische hellingshoek);
- de z-as heeft tijdens de statische meting een verticale oriëntatie met positieve richting naar beneden (dus loodrecht op de statische waterlijn).

Uit Tabel 6 bleek tijdens de meetvaart op de Asian Blossom de afstand tussen de POS-antenne en het symmetrievlak van het schip 22.4 m bedroeg (deze maat werd afgemeten door het Nederlandse Loodswezen). Hiermee rekening houdende werd een **referentiepunt** gedefinieerd als een punt op de lijn tussen POS en HDG1 die zich op de door het loodswezen aangeleverde afstand (Tabel 6) dwars van POS bevindt.

De definitie van het referentiepunt op basis van heading en dwarspositie van POS wordt geïllustreerd in Figuur 8. Het vlak evenwijdig met het xz-vlak en door het referentiepunt wordt gedefinieerd als het (scheepsvaste) trimvlak.

Figuur 8 – Visualisatie definitie referentiepunt op basis van POS



Figuur 9 – Visualisatie scheepsvaste coördinatenstelsel gerelateerd aan statische scheepspositie.



SLINGERBEWEGING

De hellingshoek van het schip werd berekend als de afwijking ten opzichte van de statische hellingshoek.

Hierbij werd de slingerhoek berekend ten opzichte van een scheepsvast vlak dat op basis van de statische meting gedefinieerd werd door POS en loodrecht op de horizontale as met richting de heading (d.i. het slingervlak, zie Figuur 10). De slingerhoek werd berekend door de orthogonale projectie van HDG1 op dit vlak (HDG1')[10]. De slingerhoek wordt berekend op basis van het hoogteverschil en de afstand tussen POS en HDG1':

$$Roll = \text{atan}\left(\frac{z_{HDG1'} - z_{POS}}{y_{s_HDG1'} - y_{s_POS}}\right) - Roll_0 \qquad (2)$$

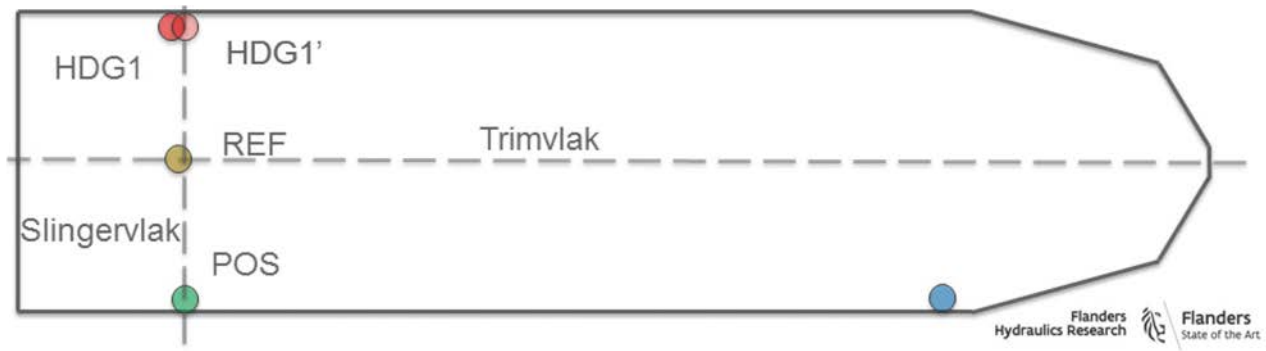
Waarbij:

- Roll — Slingerhoek relatief ten opzichte van statische meting [°];
- $Roll_0$ — Statische scheepshelling [°];
- z — z-coördinaat ten opzichte van aardvast coördinatenstelsel [m NAP];
- y_s — y-coördinaat ten opzichte van scheepsvast coördinatenstelsel [m];

[10] Door de aanname dat tijdens de metingen uitgevoerd door het Nederlandse Loodswezen, HDG1 en POS zich op dezelfde langsafstand bevonden, geldt voor de onderzochte meetvaarten dat HDG1 en HDG1' samenvallen.

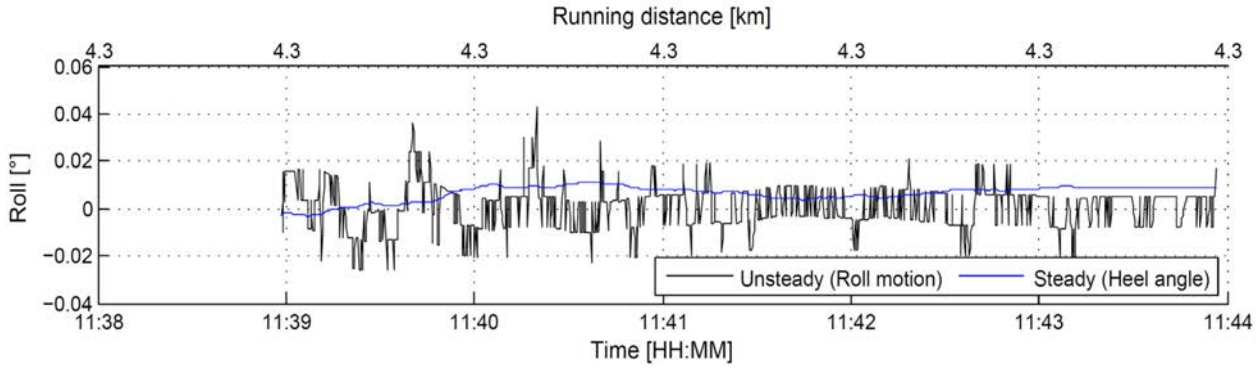
De statische scheepshelling bedroeg voor de Asian Blossom 0.22°. Deze waarde werd afgetrokken van de gemeten slingerhoeken over het volledige traject om tot de uiteindelijke slingerhoek van het schip te komen.

Figuur 10 – Definitie slingervlak met orthogonale projectie van HDG1.



In Figuur 11 wordt de evolutie van de slingerhoek weergegeven tijdens de statische meting op het schip Asian Blossom[11]. Deze figuur toont aan dat de slingerbeweging van het schip tijdens de statische meting beperkt bleef tot 0.04° ten opzichte van de evenwichtsconditie.

Figuur 11 – Evolutie van de helling en de dynamische slingerhoek tijdens de statische meting op de Asian Blossom.



TRIMHOEK

Door voorgaande verwerkingen, welke louter gebaseerd werden op de posities van POS en HDG1, zijn reeds onderstaande parameters bekend:

- De positie van het referentiepunt in een scheepsvast assenstelsel;
- De positie van GPS-antenne POS in een aardvast assenstelsel;
- De heading van het schip;
- De slingerhoek van het schip.

Op basis van deze vrijheidsgraden kan de ligging van het scheepsvaste trimvlak berekend worden voor elk trajectpunt (zie Figuur 8).

Teneinde het tijdsverloop van de stamphoek van het schip te bepalen werd de positie van HDG2 loodrecht geprojecteerd op het trimvlak (zie Figuur 12). Het aldus bekomen punt wordt HDG2' genoemd. De trimhoek

[11] Voor de andere meetvaarten wordt de evolutie van de verticale scheepsbewegingen tijdens de statische metingen weergegeven in Bijlage 1.

van het schip kon dan berekend worden als de oriëntatie van de vector tussen REF en HDG2'. Hiervoor werden onderstaande parameters berekend:

$$p = \frac{z_{HDG2'} - z_{REF}}{\cos(Roll)} \tag{3}$$

$$Trim = \text{asin}\left(\frac{p}{\sqrt{\left(x_{s_HDG2} - x_{s_REF}\right)^2 + \left(z_{s_HDG2} - z_{s_REF}\right)^2}} \right) - Trim_0 \tag{4}$$

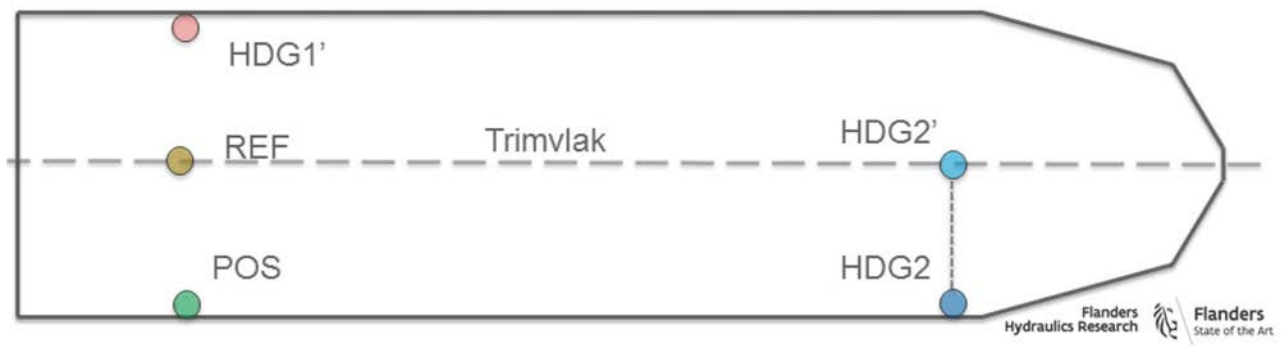
Waarbij:

- p verschil in afstand ten opzichte van het scheepsvaste xy-vlak tussen REF en HDG2' [m];
- Trim Stamphoek relatief ten opzichte van statische meting [°];
- $Trim_0$ Statische trimhoek [°].

Om de statische trimhoek te bekomen werd, gedurende de statische meting, de gemiddelde waarde berekend van de trimhoek zoals berekend in (4) waarbij $Trim_0$ gelijkgesteld werd aan nul. De statische vertrimming toegepast op het schip Asian Blossom bedroeg -5.84°. vanzelfsprekend is dit niet de statische trim van de kiel. De statische trim zoals berekend, wordt voornamelijk bepaald door het verschil in hoogteligging van de GPS-antennes POS (geïnstalleerd op de brugvleugel) en HDG2 (geïnstalleerd) ter hoogte van het dek.

Door de stamphoeken langsheen het traject te verminderen met de statische trimhoek worden de uiteindelijke stamphoeken bekomen.

Figuur 12 – Definitie trimvlak met orthogonale projectie van HDG2.

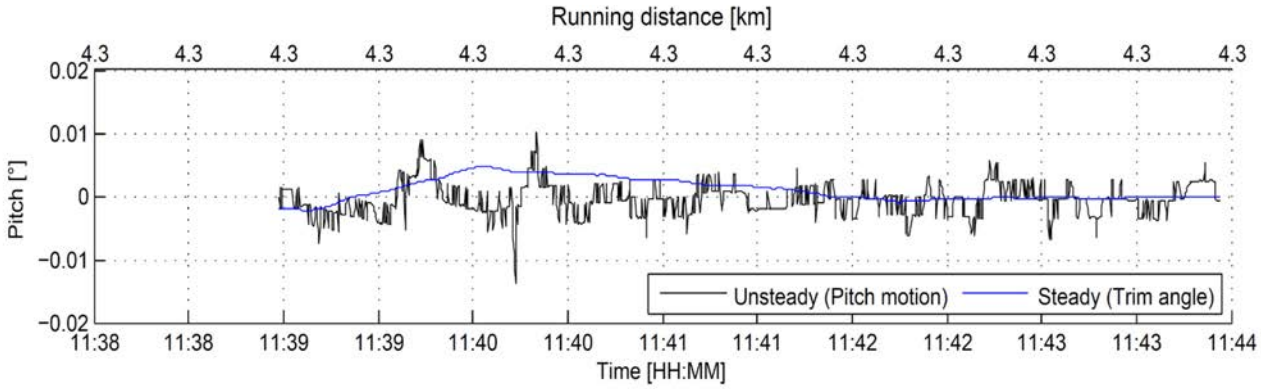


Figuur 13 – Visualisatie trimhoek tijdens statische meting



In Figuur 14 wordt de evolutie van de stamphoek weergegeven tijdens de statische meting op het schip Asian Blossom. Deze figuur toont aan dat de stampbeweging van het schip tijdens de statische meting beperkt bleef tot 0.013° ten opzichte van de evenwichtsconditie.

Figuur 14 – Evolutie van de trim en de dynamische stamphoek tijdens de statische meting Asian Blossom.



RESAMPLING

De scheepsbewegingen werden uiteindelijk geresampeld met frequentie 5 Hz. Deze frequentie stemt overeen met de frequentie van een optimaal werkend Full-plus SNMS meetsysteem. Door de resampling werden de gaten in de meetdata opgevuld door interpolatie van de aangrenzende data. Bij de presentatie van de resultaten in Bijlage 1, worden echter enkel gegevens vertoond voor datapunten overeenkomstig de voorwaarden gedefinieerd in §3.2.1.

Referentiebaan en baanafstand

Om de impact van de geografische parameters (zoals blockage, bodemdiepte ed.) te kunnen beoordelen werd ook de baanafstand langsheen een referentiebaan berekend. Hierbij werd de referentiebaan gedefinieerd als het traject van de Asian Blossom op 27/07/2015 en werd de baanafstand berekend op basis van de opeenvolgende horizontale positiemetingen. Als nul-waarde voor de baanafstand werd de positie van de havendammen van Vlissingen-Sloehaven langsheen het traject gehanteerd. Hierdoor stemmen positieve baanafstanden overeen met een positie in de haven en negatieve baanafstanden met een positie in het buitengebied. Bovendien werd de referentiebaan afwaarts uitgebreid (tot boei VG1) op basis van het midden van de vaarweg.

Bovendien laat deze referentiebaan toe om sommige parameters (zoals de conversie tussen verschillende verticale referentievlakken) eendimensionaal te definiëren in functie van de baanafstand langsheen de referentiebaan. De baanafstand van een willekeurige positie wordt hierbij gedefinieerd als de baanafstand van de orthogonale projectie van de positie op de referentiebaan.

In Tabel 7 worden de baanafstanden weergegeven voor de belangrijkste navigatiekenmerken in het studiegebied.

Tabel 7 – Baanafstand van de voornaamste boeien in het studiegebied

Boei [-]	X WGS84 UTM31 [m]	Y WGS84 UTM31 [m]	Baanafstand [km]
VG1	487313	5696233	-60.3
VG3	491797	5696262	-55.8
VG5	497591	5695478	-49.8
SVG	499910	5695292	-47.4
S3	503388	5694866	-44.0
S5	507305	5693757	-40.0
SZ	510031	5693020	-37.4
S7	512082	5694293	-35.2
S9	517374	5695112	-29.8
SW	521127	5694602	-26.0
S14	522801	5695434	-24.4
Fort Maisonneuve	524922	5694741	-22.3
W2	524989	5695694	-22.1
W5	528404	5694956	-18.8
W7	531611	5695531	-15.6
W9	535273	5696200	-11.8
Songa	539010	5696602	-8.1
RV2	540517	5698711	-6.1
RV4	540949	5698687	-5.7
RV6	541378	5698673	-5.3
SS1	542549	5696958	-4.7
BHV	542090	5698912	-4.5
H-SS	543373	5698066	-3.5
1	544243	5698365	-2.6
3	545226	5698746	-1.6
5	546212	5698699	-0.7

Kmz-export

Een visualisatie van het afgelegde traject werd gegenereerd in KML[12]-formaat en vervolgens gecomprimeerd tot een KMZ[13]-bestand. KMZ-bestanden betreffen GIS-bestanden welke ondersteund worden door verschillende GIS-tools waaronder Google Earth™. De KMZ-bestanden zijn tijdsafhankelijk zodat een replay van het afgelegde traject gevisualiseerd kan worden in Google Earth™. Bij de KMZ-generatie werd -de scheepscontour gedefinieerd ten opzichte van het referentiepunt op basis van de hoofdafmetingen van het schip en de afstanden opgemeten door het Nederlandse Loodswezen.

In Figuur 15 wordt als voorbeeld een visualisatie weergegeven voor het scheepstraject van de Asian Blossom afgelegd te Vlissingen-Sloehaven. De KMZ-bestanden worden als bijlage toegevoegd aan voorliggend rapport (zie Bijlage 2).

[12] KML: Keyhole Markup Language
[13] KMZ: Zipped KML-file

Figuur 15 – KML-weergave in Google Earth™ van het traject afgelegd door de Asian Blossom op 27/07/'15 te Vlissingen-Sloehaven.



Samenvatting

Door verwerking van de posities van drie GPS-antennes uit het Full-plus SNMS meetsysteem werden voor een referentiepunt gelegen in het symmetrievlak van het schip onderstaande parameters bekomen:

- x-positie in WGS84 UTM 31 N;
- y-positie in WGS84 UTM 31 N;
- z-positie t.o.v. WGS84 ellipsoïde;
- de koers gedefinieerd ten opzichte van het Noorden in wijzerzin;
- de slingerhoek gedefinieerd ten opzichte van de statische hellingshoek van het schip. Positief wanneer de bakboordzijde opwaarts bewoog;
- de stamphoek van het schip ten opzichte van de statische vertrimming. Positief wanneer de boeg opwaarts bewoog.

Op basis hiervan is de positie en oriëntatie van het schip eenduidig bepaald.

Het afgelegde scheepstraject werd gevisualiseerd door middel van een tijdsgeanimeerd KMZ-bestand.

3.2.2 Getij en Stroom

De herkomst van de informatie van getij en stroom werd gerapporteerd in §3.1.2. Toepassing van de beschikbare gegevens vereiste onderstaande verwerkingen:

- Importeren en filteren (op basis van tijd en positie) Net-CDF-bestanden in Matlab™-structuur;
- Interpoleren van waterstanden en stroom naar het vaartraject;
- Bias correctie naar NAP op basis van waterstandsmetingen.

Interpolatie ZUNO-model

De gegevens uit het ZUNO-model bevatten gebiedsdekkende gridvelden voor elke 10 minuten. In eerste instantie werd een geografische interpolatie toegepast om de gridvelden te projecteren op het vaartraject. Vervolgens werd door middel van een kubische spline methode een tijds-interpolatie uitgevoerd om voor elk meetpunt de waterstand te bekomen.

GEOGRAFISCHE INTERPOLATIE

De geografische interpolatie werd uitgevoerd door de beschikbare grids te trianguleren en vervolgens de waterstand op het traject van het referentiepunt te berekenen. Hierbij werd onderstaande berekeningsmethode gebruikt:

- voor het traject afwaarts de havendammen van Vlissingen-Sloehaven (buitentraject) werd gebruik gemaakt van een triangulaire interpolatie gebaseerd op barycentrische coördinaten;
- voor het traject opwaarts de havendammen van Vlissingen-Sloehaven (binnentraject) werd gebruik gemaakt van het dichtstbijzijnde gridpunt.

Door toepassing van bovenstaande methode kon voor elk trajectpunt[14] de evolutie van de waterstand en stroomvectoren in functie van tijd (elke 30 minuten) bekomen worden.

TIJDSINTERPOLATIE

De tijdsinterpolatie naar het effectieve tijdstip van het trajectpunt werd uitgevoerd door uitvoering van een kubische spline-interpolatie.

Bias correctie naar NAP

Teneinde de waterstanden bekomen uit het ZUNOv4-model te refereren ten opzichte van NAP, werden voor de verschillende beschikbare waterstandsmetingen (beschikbaar in NAP) de metingen vergeleken met de ZUNOv4-resultaten op dezelfde locatie (zie Figuren 16 tot 22). Uit deze vergelijking bleek dat het verschil tussen meting en hindcastberekening zowel plaatsafhankelijk (verschillend per meetstation) als tijdsafhankelijk was. Hierdoor werd besloten om de hindcastberekeningen te corrigeren door middel van plaats- en tijdsafhankelijke correctiefactoren. Hiervoor werd per meetstation het lopende gemiddelde over 30 minuten berekend van de verschillen tussen het meetsignaal en het ZUNOv4 resultaat.

De correcties bekomen ter hoogte van meetstations MP3 en MP4 werden samengevoegd om meer gelijkmatig evoluerende correctiefactoren te bekomen.

Om de correctiefactor langsheen het traject te berekenen werd deze achtereenvolgens geografisch geïnterpoleerd op basis van de baanafstand van de meetstations en werd vervolgens een lineaire tijdsinterpolatie uitgevoerd op basis van de 30 minuut-gemiddeldes. De correctiefactor wordt geacht de hoogte te beschrijven tussen het referentievlak van het ZUNOv4 model en het referentievlak NAP. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het meest afwaartse station (MP0) overeenstemt met een baanafstand gelijk aan -45.7 km. Locaties afwaarts MP0 (baanafstanden kleiner -43.9 km) vallen buiten het bereik van de correctiefactoren. Voor deze locaties werd de correctiefactor voor MP0 toegepast.

De tijds- en plaatsafhankelijke correcties weergegeven in Figuren 23 tot 29 werden toegepast om de ZUNO-waterstanden langsheen het vaartraject te converteren naar NAP. Uit deze figuren blijkt dat de correctiefactoren op de berekende dagen, over het algemeen eenzelfde grootteorde en evolutie in tijd vertonen.

De effectief toegepaste correctiefactoren langsheen het vaartraject worden weergegeven in Figuur 30. Deze figuur toont aan dat (mede doordat de schepen steeds bij een gelijkaardige tijconditie varen), de

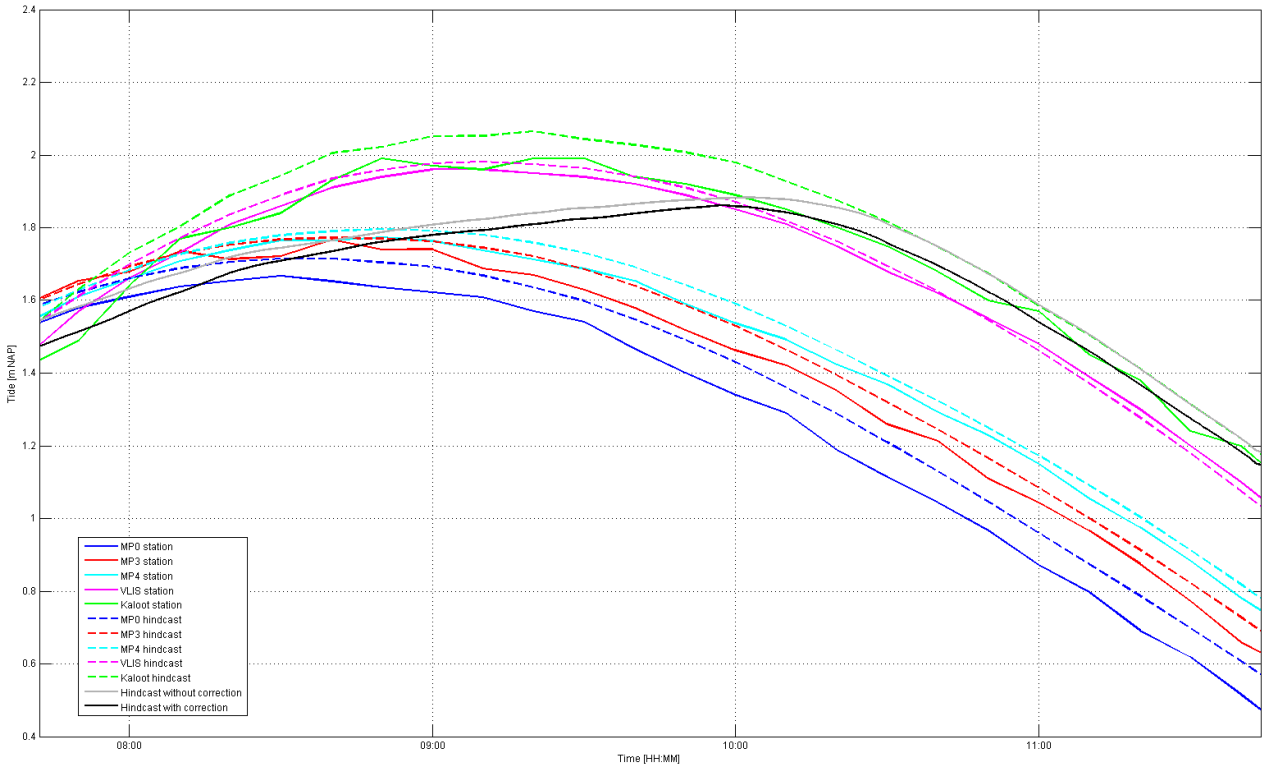
[14] Doordat de waterstand in vergelijking met de scheepsbewegingen slechts traag varieert werd de waterstand langsheen het traject per minuut berekend in plaats van voor de volledige dataset met frequentie 5 Hz. Hierdoor kon de rekentijd drastisch gereduceerd worden zonder een verlies aan nauwkeurigheid.

correctiefactoren in het buitengebied een gelijkaardige tendens vertonen voor de zeven meetvaarten. In het binnengebied is de relatie tussen correctiefactor en baanafstand afhankelijk van de duur van het manoeuvre in de Sloehaven. Zo blijken de opvaarten die gepaard gingen met een zwaaimanoeuvre in de haven (Cape Canary en Bulk Mexico) vanwege de tijdsafhankelijkheid gepaard te gaan met hogere correctiefactoren dan de opvaarten waarbij het schip voorwaarts afgemeerd werd.

Tabel 8 – Baanafstand van de onderzochte meetlocaties in het studiegebied

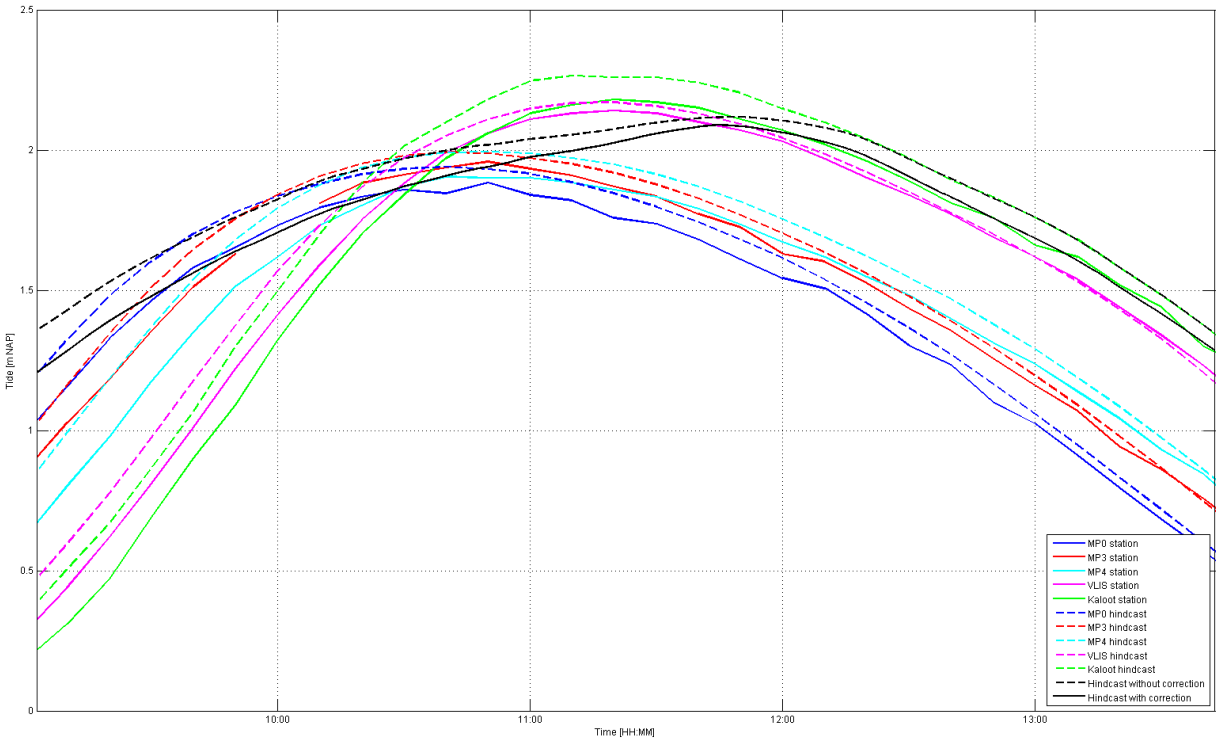
Meetlocatie	Baanafstand
	[km]
Wandelaar (MP0)	-43.9
Bol van Heist (MP3)	-33.5
Bol van Knokke (MP4)	-26.5
Vlissingen	-6.8
Kaloothaven	+4.3

Figuur 16 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Asian Blossom (27/07/2015).



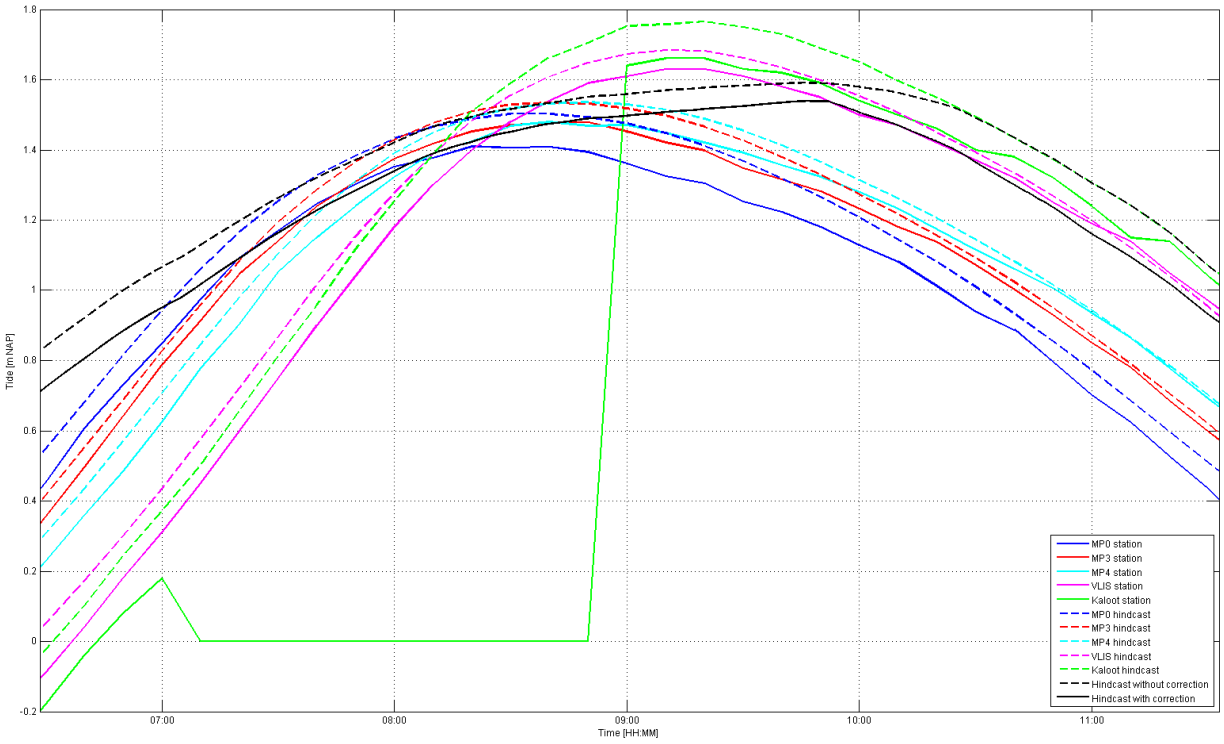
Stations: MP0, MP3, MP4, VLIS en KALOOT.
Waterstand langsheen traject: overeenkomstig ZUNOv4 (grijs), na toepassing van correctie (zwart).

Figuur 17 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Cape Canary (29/07/2015).



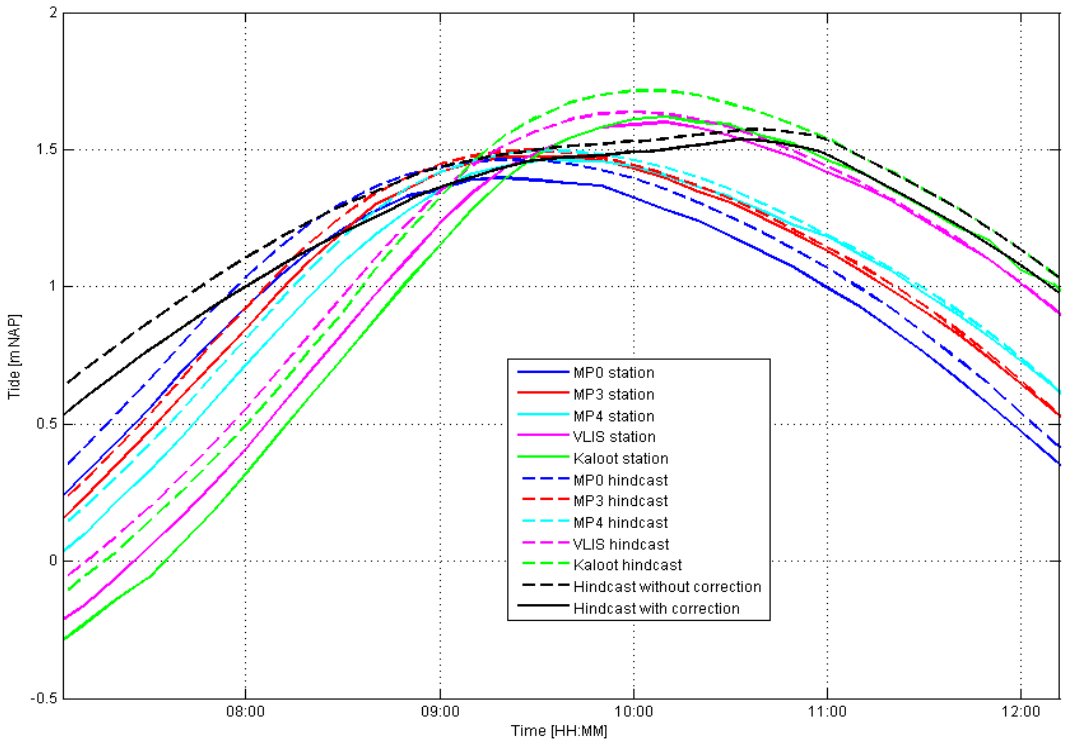
Stations: MP0, MP3, MP4, VLIS en KALOOT.
Waterstand langsheen traject: overeenkomstig ZUNOv4 (zwarte streeplijn), na toepassing van correctie (zwarte volle lijn).

Figuur 18 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Wisdom of the Sea (24/09/2015.



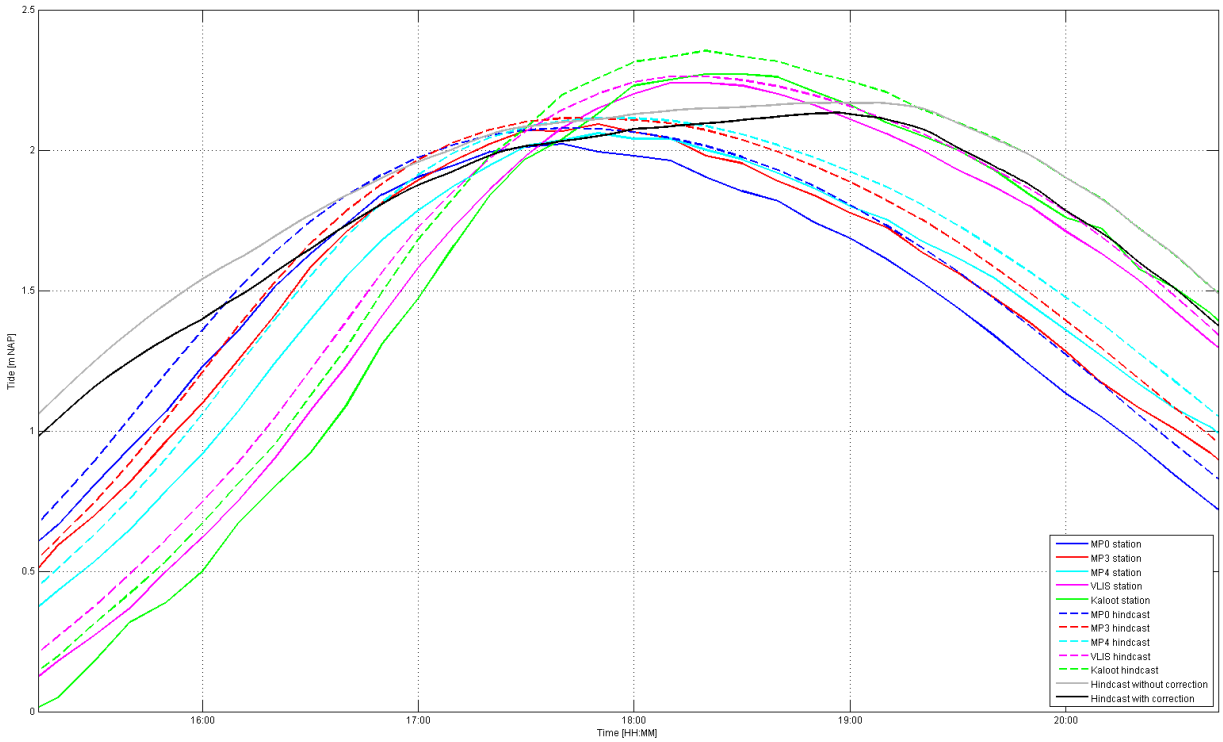
Stations: MP0, MP3, MP4, VLIS en KALOOT (uitval tussen 07h00 en 09h00).
Waterstand langsheen traject: overeenkomstig ZUNOv4 (zwarte streeplijn), na toepassing van correctie (zwarte volle lijn).

Figuur 19 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Lancelot (08/10/2015).



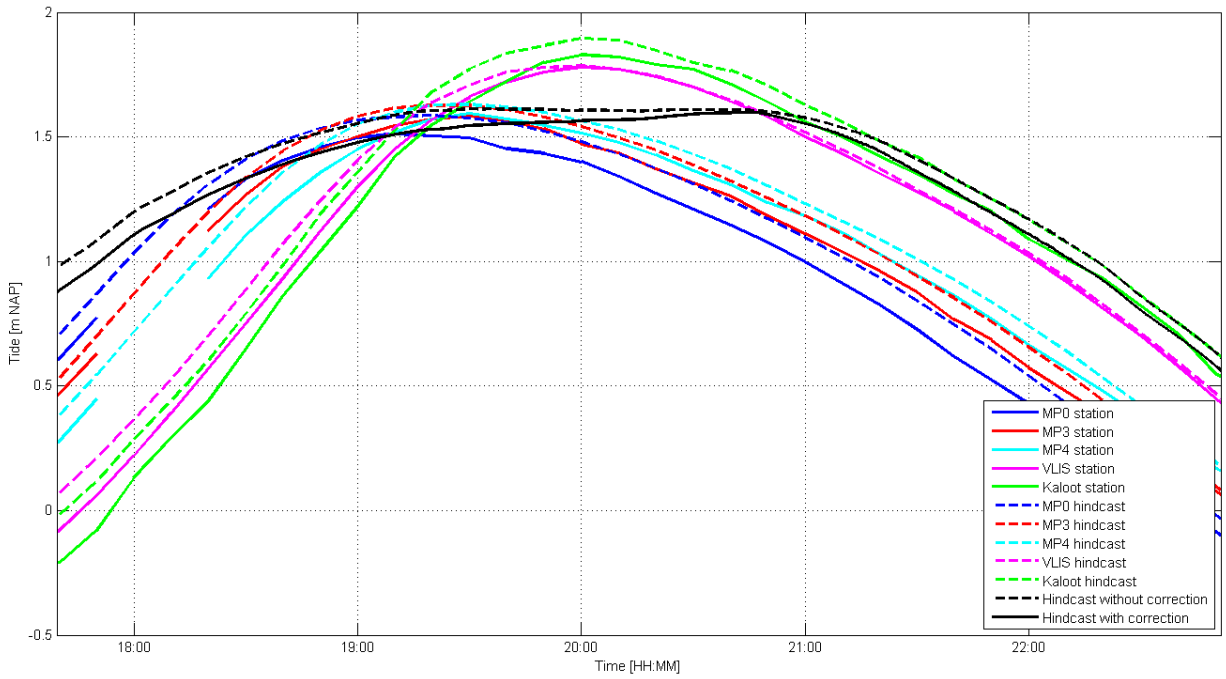
Stations: MP0, MP3, MP4, VLIS en KALOOT.
Waterstand langsheen traject: overeenkomstig ZUNOv4 (zwarte streeplijn), na toepassing van correctie (zwarte volle lijn).

Figuur 20 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Bulk Mexico (19/11/2015).



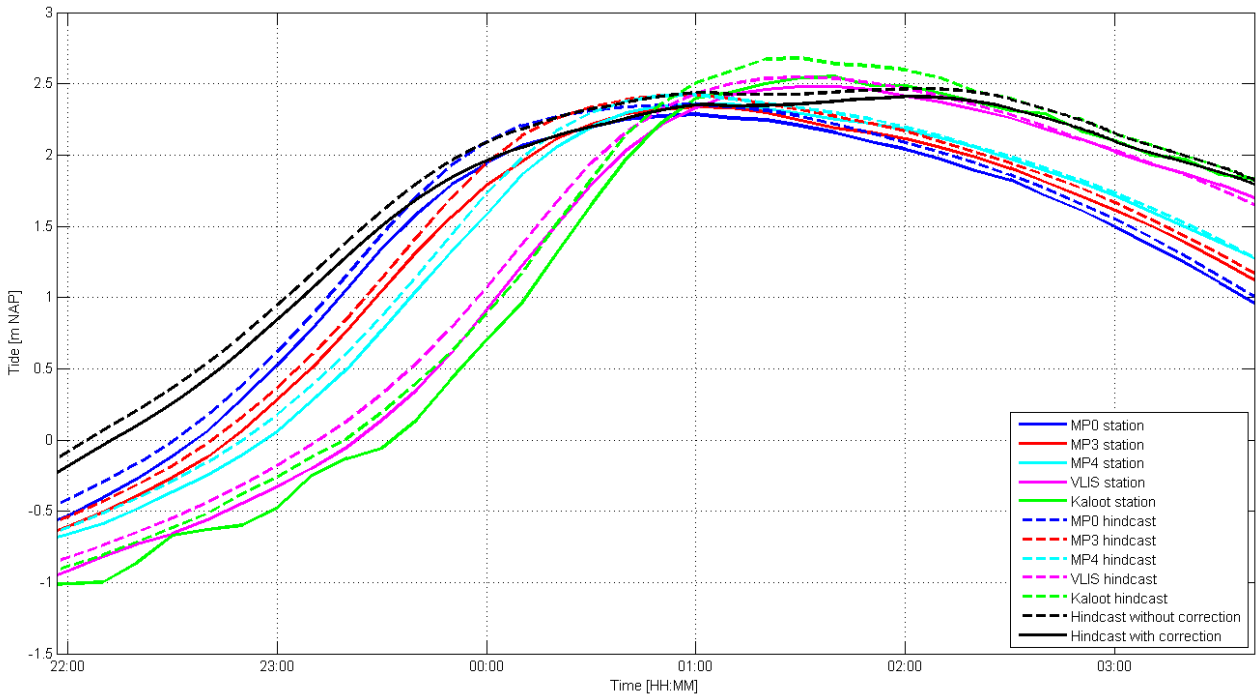
Stations: MP0, MP3, MP4, VLIS en KALOOT.
Waterstand langsheen traject: overeenkomstig ZUNOv4 (grijs), na toepassing van correctie (zwart).

Figuur 21 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Cape Harmony (29/06/2016).



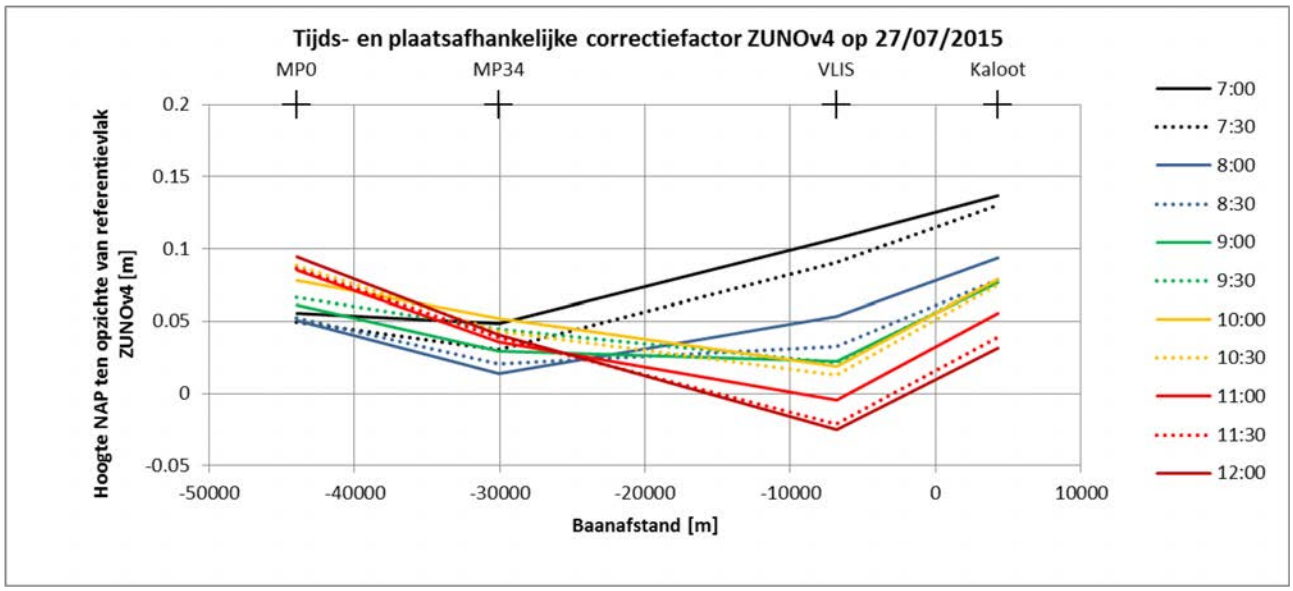
Stations: MP0, MP3, MP4, VLIS en KALOOT.
Waterstand langsheen traject: overeenkomstig ZUNOv4 (zwarte streeplijn), na toepassing van correctie (zwarte volle lijn).

Figuur 22 – Vergelijking tussen gemeten waterstanden en Zuno v4 hindcastresultaten voor Panormos (02/10/2016).

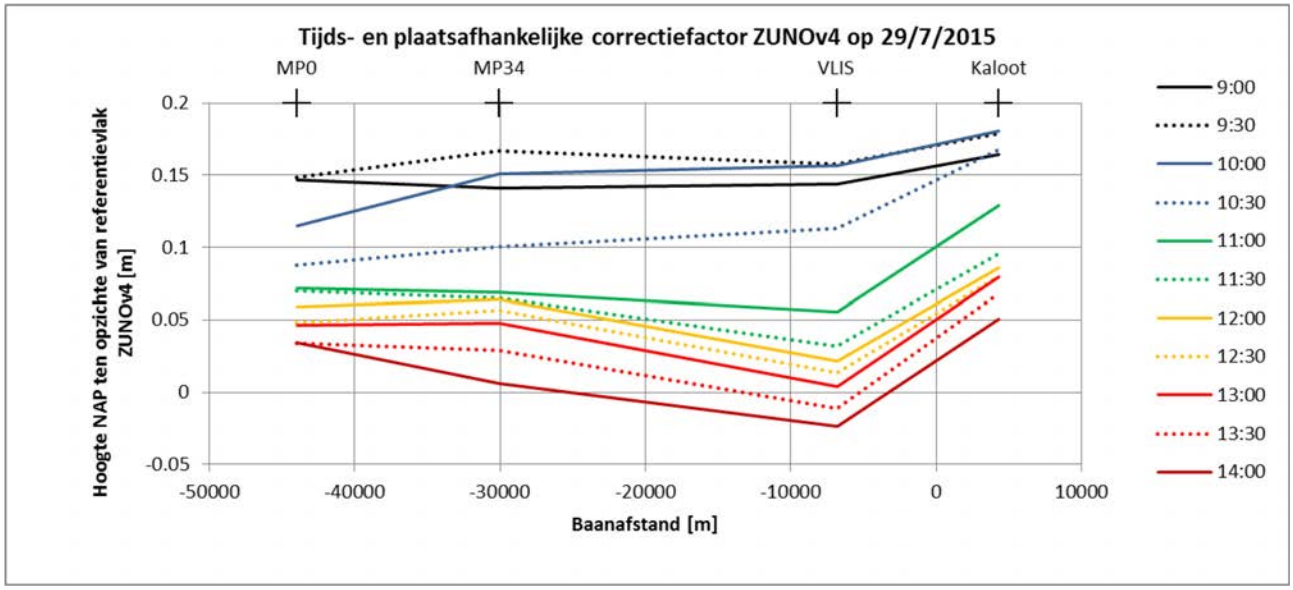


Stations: MP0, MP3, MP4, VLIS en KALOOT.
Waterstand langsheen traject: overeenkomstig ZUNOv4 (zwarte streeplijn), na toepassing van correctie (zwarte volle lijn).

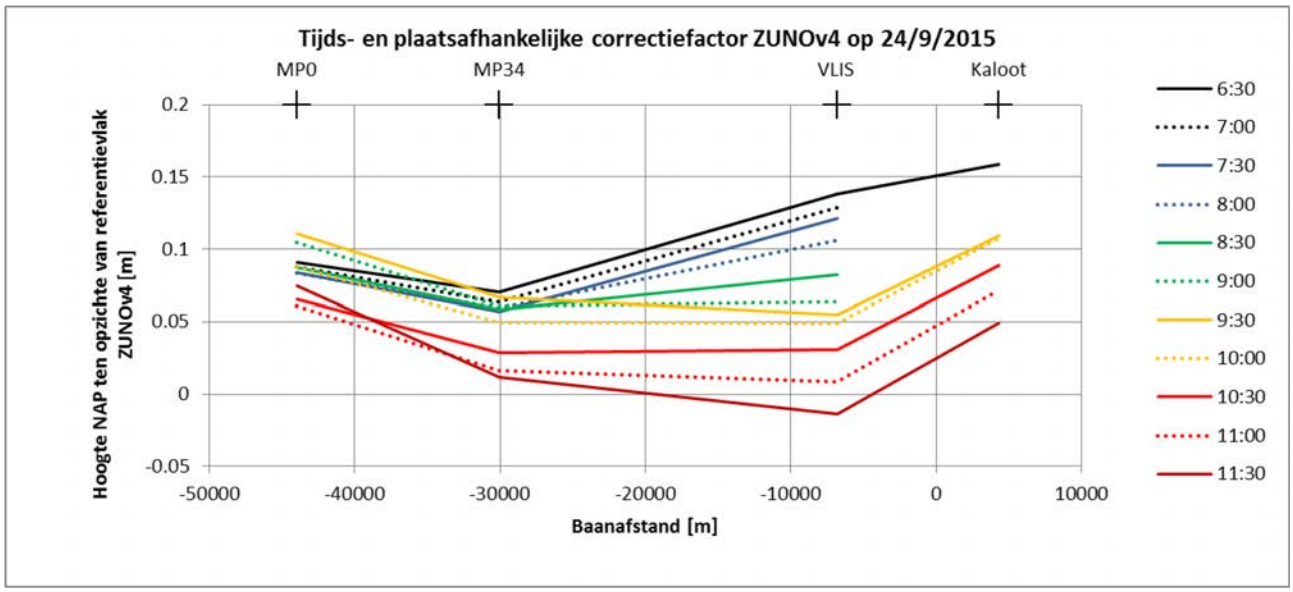
Figuur 23 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 27/07/2015



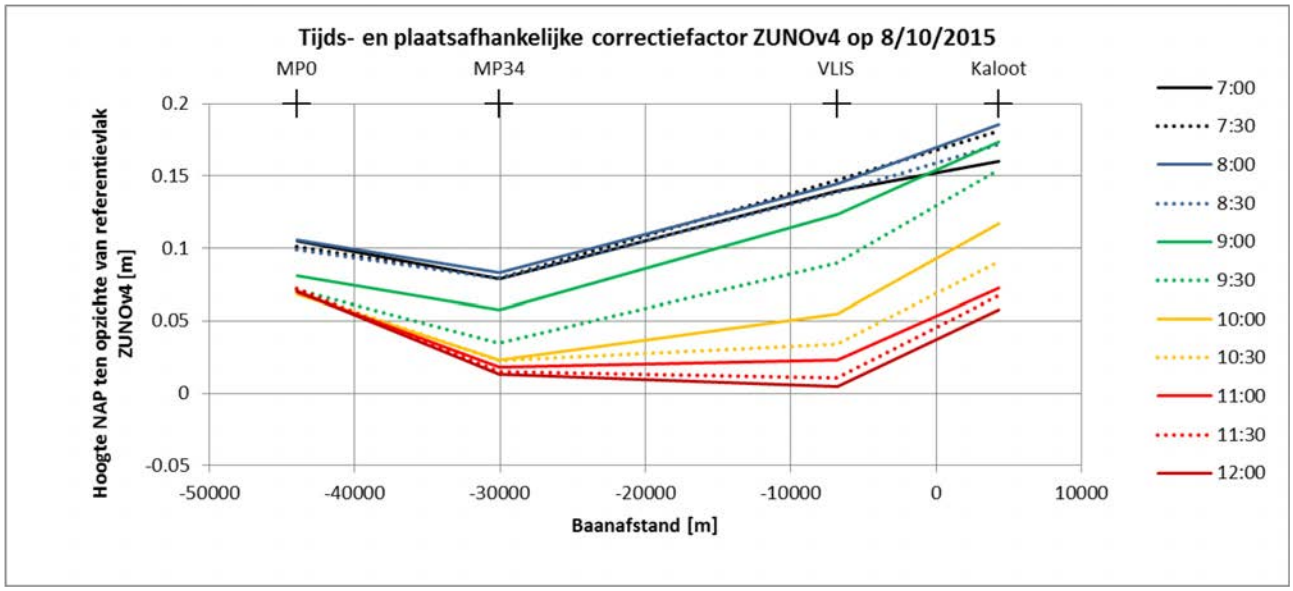
Figuur 24 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 29/07/2015



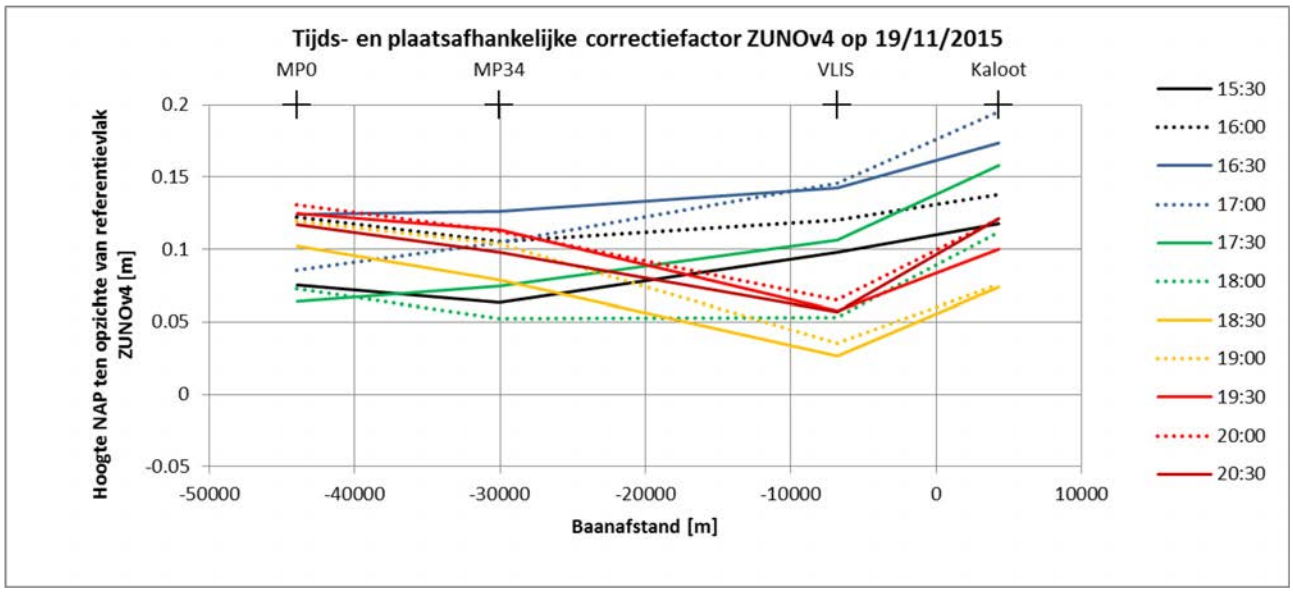
Figuur 25 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 24/09/2015



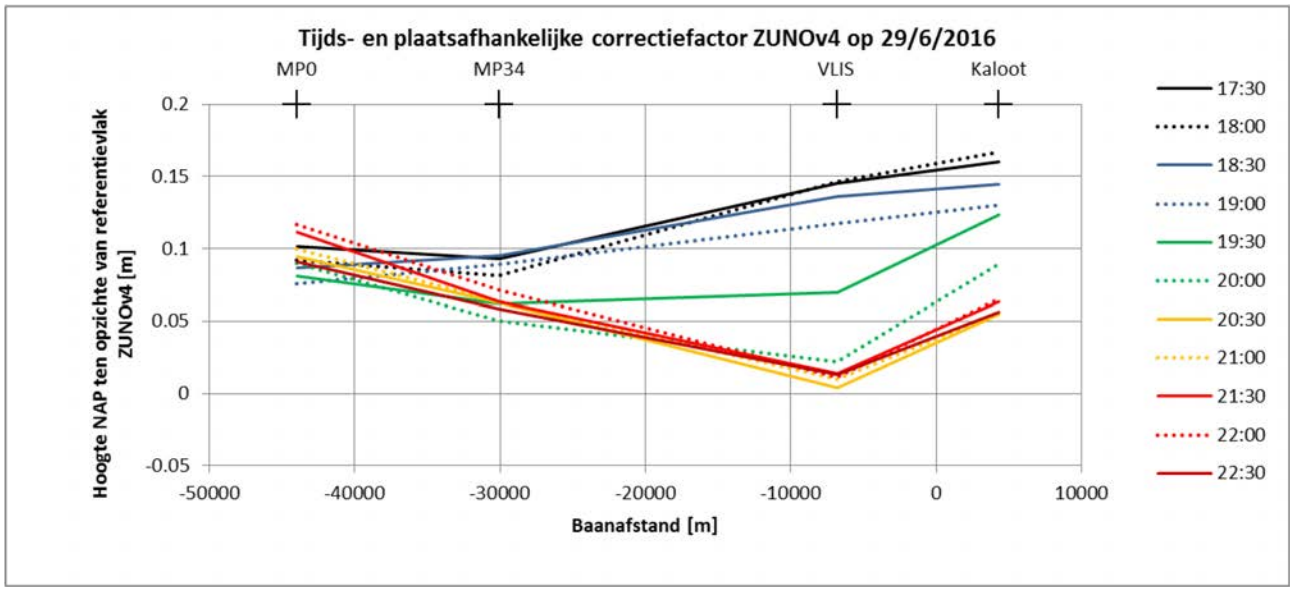
Figuur 26 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 08/10/2015



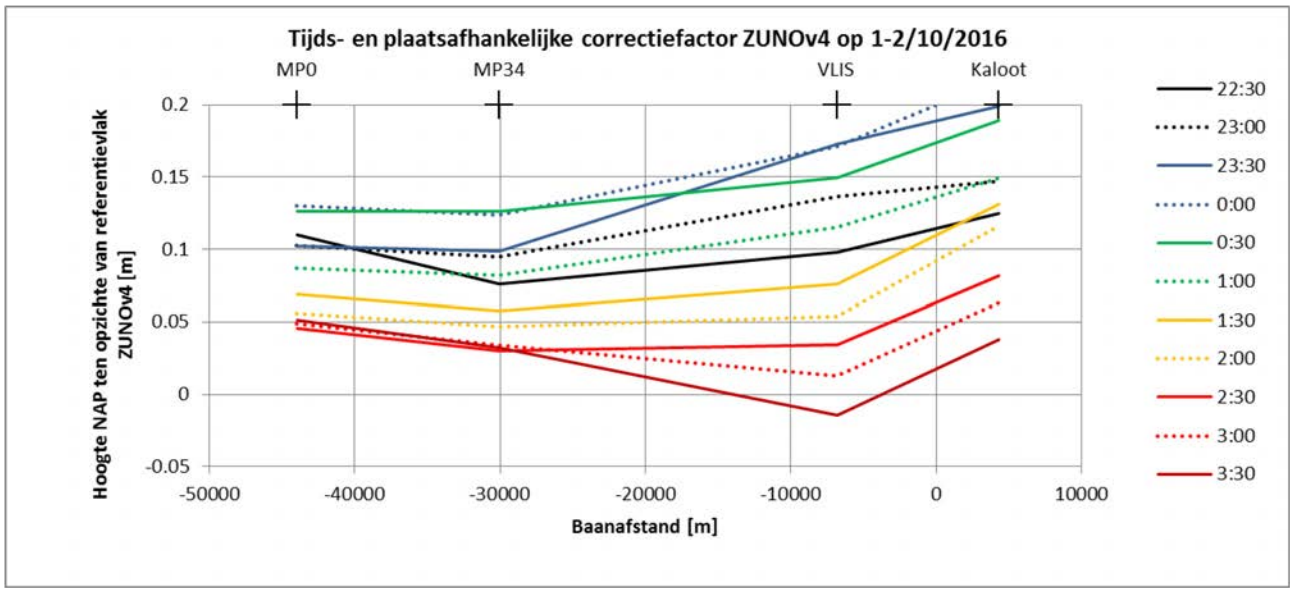
Figuur 27 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 19/11/2015



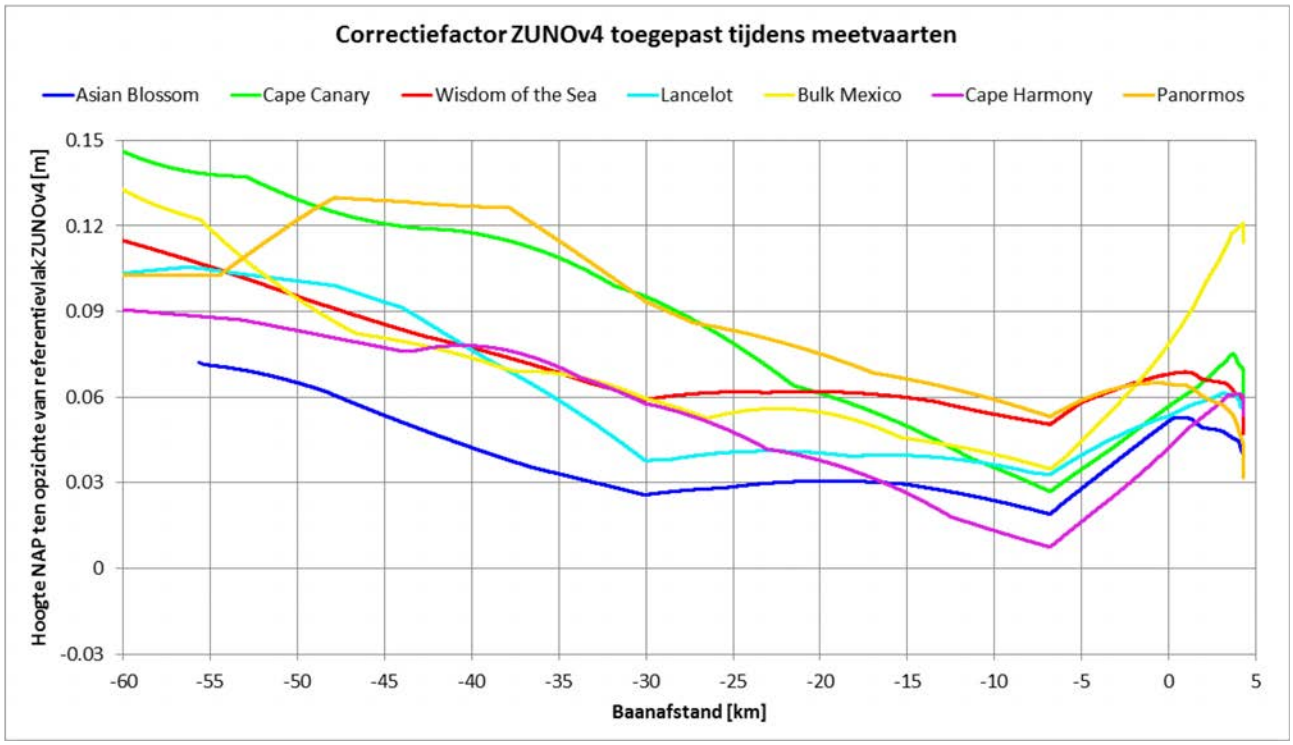
Figuur 28 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 29/06/2016



Figuur 29 – Tijds- en plaatsafhankelijke verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals bekomen voor 01-02/10/2016



Figuur 30 – Verticale correctie ZUNOv4 naar NAP zoals toegepast tijdens de meetvaarten.



3.2.3 Bodemdiepte en blockage

Zoals beschreven in §3.2.3, werden de bathymetrische gegevens ten tijde van de meetvaart bekomen voor verschillende peilingen beschikbaar in de Schelde-ECS databank. De editie overeenkomstig met de meetvaart werd gedefinieerd als deze die het dichtst bij de meetvaart toegevoegd werd aan de databank.

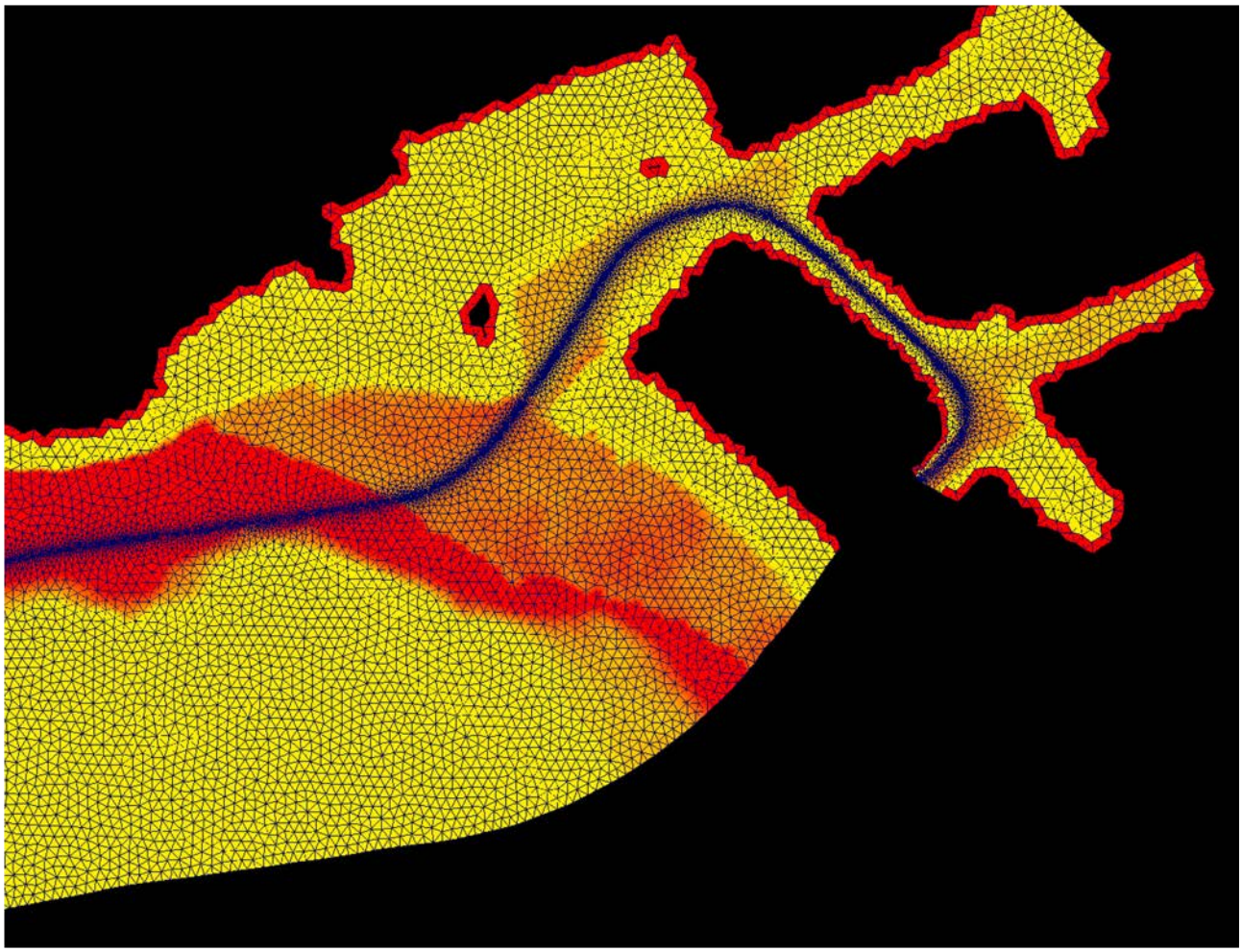
Bodemmesh

Teneinde de bathymetrie omheen het schip te bekomen werd automatisch een bmesh gegenereerd omheen het vaartraject, waarbij de nauwkeurigheid van de mesh toenam naarmate de afstand tot het vaartraject kleiner was. Aan de rechter- en linkerzijde van het vaartraject werd de mesh begrensd door een vooraf gedefinieerde vaarwegbegrenzing. De automatische mesh werd gegenereerd met instellingen zoals weergegeven in Tabel 9. In Figuur 31 wordt een visualisatie getoond van de bodemmesh toegepast voor Asian Blossom. In eerste instantie worden op deze bodemmesh, de vaklodingen beschreven in §3.1.3 geprojecteerd (omgezet naar ETRS89 op basis van de Vlaamse conversiematrix).

Tabel 9 – Instellingen toegepast voor de automatische generatie van de bodemmeshes

Nauwkeurigheid ter hoogte van vaartraject	[m]	10
Celgrootte gradiënt	[-]	1%
Maximale celgrootte	[m]	50

Figuur 31 – Bodemmesh zoals toegepast voor meetvaart Asian Blossom

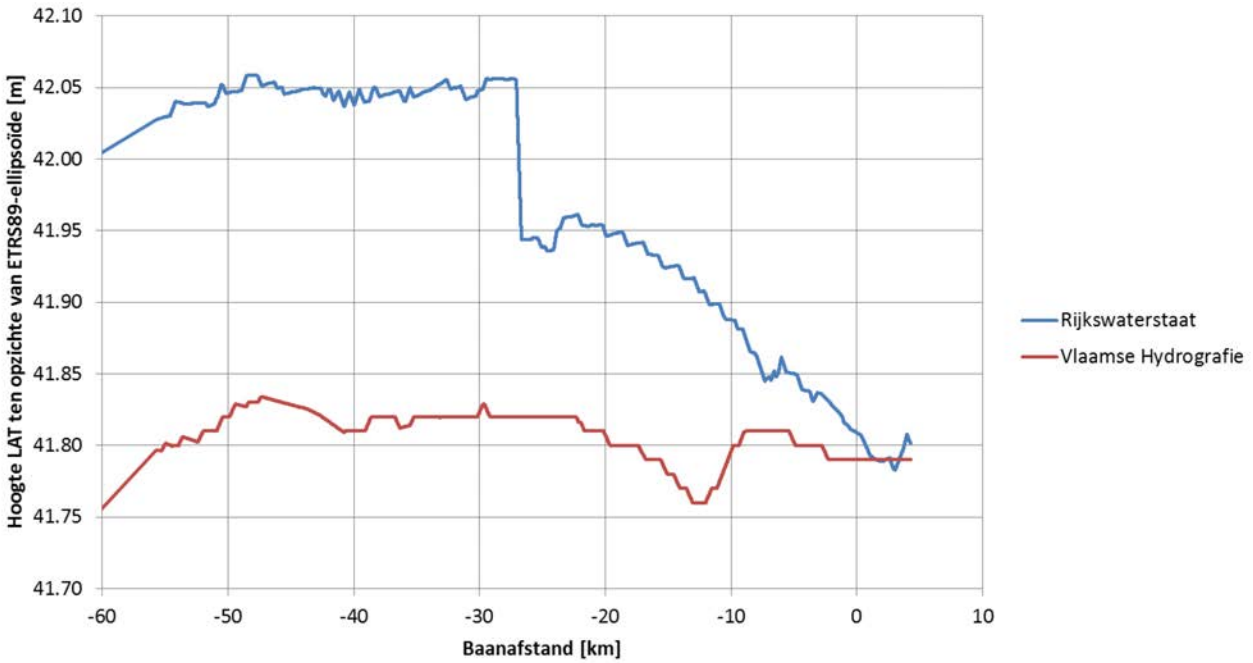


Conversie LAT-ETRS89

De peilingen gedefinieerd in de Schelde-ESC databank, worden gerefereerd naar LAT. Om deze peilingen te genereren echter, hanteren de beide betrokken meetdiensten een verschillende conversiemethode tussen de hoogte van de ellipsoïde (ETRS89) en LAT. Bijgevolg betrof de eerste verwerking toegepast op de Schelde-ECS peilingen, de verticale conversie van de dieptewaarden van LAT naar ETRS89. Afhankelijk van de bron van de peiling werd hiervoor de Vlaamse of Nederlandse conversiematrix toegepast.

In Figuur 32 worden de conversiewaarden langsheen het in de studie toegepaste referentietraject weergegeven. De Belgisch-Nederlands grens stemt overeen met een baanafstand gelijk aan -24.4 km (Boei S14). Op korte afstand afwaarts de grens, vertoont de conversiematrix toegepast door Rijkswaterstaat een discontinuïteit. Op de grens en in de Wielingen bedraagt het verschil tussen beide conversiemethodes ca. 0.14 m.

Figuur 32 – Conversie LAT-ETRS89 langsheen referentietraject zoals toegepast door meetdiensten Schelde ECS



Selectie ECS-peilingen

De geselecteerde edities van alle ECS-peilingen worden verder verwerkt indien deze datapunten bevatten die zich op minder dan 2000 m van het vaartraject bevinden. Op deze peilingen worden achtereenvolgens onderstaande bewerkingen uitgevoerd:

1. triangulatie;
2. driehoeken waarvan de langste zijde langer was dan tweemaal de resolutie van de peiling worden verwijderd;
3. z-conversie naar ETRS89 op basis van de conversiematrix overeenkomstig de uitgever (VL/NL) van de peiling;
4. projectie op de bodemmesh.

Uiteindelijk (na verwerking van alle ECS-peilingen) wordt zo een gebiedsdekkende bathymetrie bekomen met bodemdieptes ten opzichte van ETRS89.

Waterdieptemesh

Door bij de bathymetrie de tijstanden (zie §3.2.2) langsheen het traject op te tellen wordt de waterdieptemesh bekomen. De hiervoor vereiste conversie van de bathymetrie naar NAP wordt uitgevoerd op dezelfde wijze als deze toegepast voor de conversie van de verticale scheepsposities (zie §3.2.4). Hierbij wordt een verschil in hoogte tussen de ellipsoïden WGS84 en ETRS89 verwaarloosd.

Blockage

De waterdieptemesh wordt toegepast om de blockage van de vaarweg te berekenen. De blockage betreft de verhouding van de natte scheepssectie ten opzichte van de vaarwegsectie. Doorheen de studie wordt bij de berekening van de blockage de breedte van de vaarweg beperkt op basis van een invloedsbreedte ontleend aan (Lataire & Vantorre, 2008). De berekening van de blockage wordt gevisualiseerd in Figuur 33.

$$Fr_h = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h}} \tag{5}$$

$$W_{inf} = 10 \cdot (1 + Fr_h) \cdot B \tag{6}$$

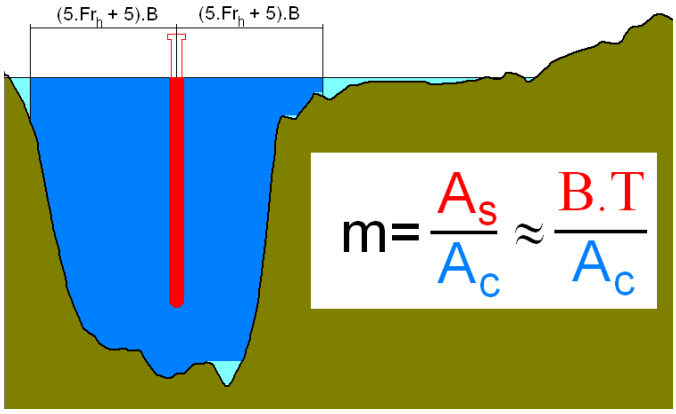
$$m = \frac{B \cdot T}{A_c} \tag{7}$$

Waarbij:

- Fr_h Froudegetal op basis van waterdiepte (5) [-];
- u langsscheepse snelheid [m/s];
- h waterdiepte [m];
- g gravitatieversnelling (9.81 m/s²);
- W_{inf} Invloedsbreedte (6) [m];
- B scheepsbreedte [m];
- m blockage (7) [-];
- T scheepsdiepgang midscheeps [m];
- A_c vaarwegsectie beperkt tot invloedsbreedte

De vaarwegsectie en de daaruit afgeleide blockage werden elke 20 m langsheen het vaartraject berekend. Hiertoe werd de waterdieptemesh doorsneden door een verticaal vlak loodrecht op de koers van het schip. De natte oppervlakte van de aldus bekomen sectie (beperkt tot de halve invloedsbreedte aan bakboord en aan stuurboord) betreft A_c.

Figuur 33 – Definitie van blockage op basis van invloedsbreedte



Waterdiepte en kielspeling

Voor de waterdiepte werd dezelfde methode gehanteerd als deze toegepast voor de blockage. Hiervoor echter werd niet uitgegaan van de bodemmesh, maar van het afgelegde traject van de boeg, het scheepsmidden en het achterschip. Dit om het verlies aan nauwkeurigheid door toepassing van de bodemmesh te vermijden bij de waterdiepteberekening.

De waterdiepte op de drie onderzochte scheepsposities werd geconverteerd naar een procentuele bruto kielspeling op basis van de lokale diepgang:

$$UKC_X = \frac{h_X - T_X}{T_X}[\%] \tag{8}$$

Waarbij:

- UKC_X bruto kielspeling overeenkomstig scheepspositie X (8) [%];
- T_X diepgang overeenkomstig scheepspositie X [m];
- h_X ogenblikkelijke en lokale waterdiepte [m];
- X F, M, A overeenkomstig voorloodlijn, midscheeps en achterloodlijn.

3.2.4 Verticale scheepspositie

Voor de berekening van squat dient de verticale scheepspositie gekend te zijn ten opzichte van hetzelfde verticale referentievlak als de waterstand. Voor de verwerking van meetvaarten werd ervoor gekozen om alle verticale parameters (scheepspositie, waterstand en bodemdiepte) te relateren aan het referentievlak NAP. De metingen uitgevoerd door het Loodswezen echter leveren verticale scheepsposities gerelateerd aan de WGS84 ellipsoïde.

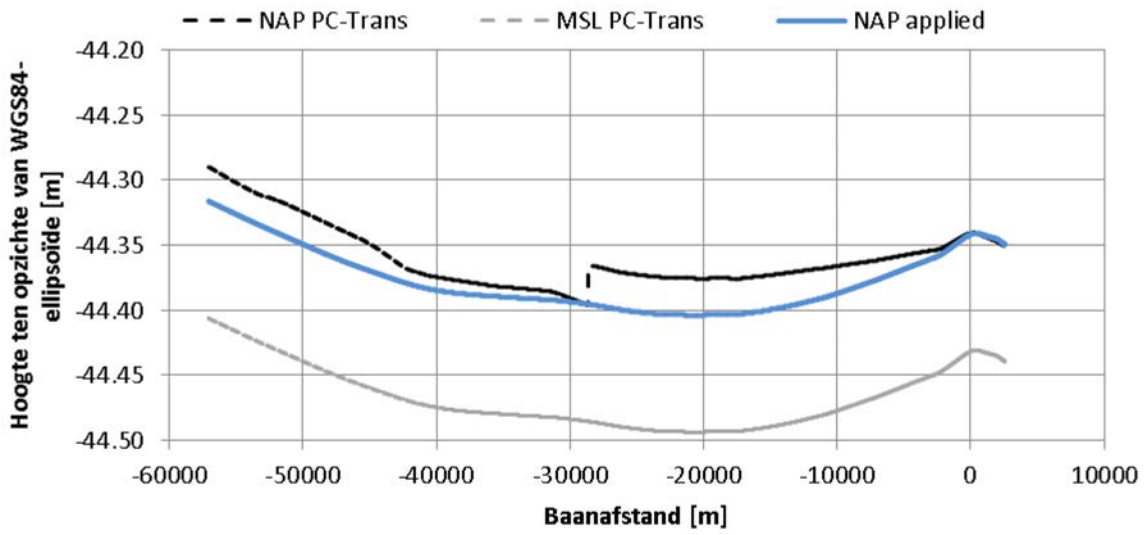
Conversie WGS84 naar NAP

De conversie van WGS84 naar NAP werd gebaseerd op de resultaten bekomen door middel van de softwaretool PCTrans 4.2.10. PCTrans wordt kosteloos ter beschikking gesteld door de Nederlandse Marine en laat onder andere de conversie toe van WGS84 naar NAP en MSL[15]. Voor de conversie van WGS84 naar NAP wordt in PCTrans gebruik gemaakt van RDNAPTRANS^{TM}2008 terwijl de conversie naar MSL gebaseerd was op het geoïde-grid GEONZ97.

In Figuur 34 worden de resultaten van deze conversies uitgevoerd voor de referentiebaan uitgedrukt in functie van de baanafstand. Hieruit blijkt dat de NAP-conversie in RDNAPTRANSTM2008 een discontinuïteit vertoont in het buitengebied. Bovendien blijkt dat het verschil tussen NAP en MSL relatief constant is, en gelijk is aan 0.09 m. Hiermee rekening houdend werd beslist om een continue WGS84-NAP conversie toe te passen door NAP op exact 0.09 m boven MSL te veronderstellen. Het aldus bekomen hoogteverschil tussen WGS84 en NAP wordt in blauw weergegeven in Figuur 34. De maximale afwijking ten opzichte van de NAP-conversie bedraagt 0.03 m en is derhalve even groot als de discontinue sprong in de WGS84-NAP conversie welke door PC-Trans berekend werd.

[15] MSL: Mean Sea Level

Figuur 34 – Hoogteconversie voor de referentiebaan tussen WGS84 en NAP/MSL op basis van PC-Trans en de conversie tussen WGS84 en NAP zoals toegepast in de studie.



3.2.5 Squat en verticale beweging

De squat werd berekend op basis van de verticale positie van het referentiepunt en de waterstand. Bijgevolg is de nauwkeurigheid van de squatmeting afhankelijk van:

- De nauwkeurigheid van de verticale positie van het schip;
  - verticale positie van het referentiepunt;
  - trim;
- De nauwkeurigheid van de waterstandsbepaling;
  - Hindcast model ZUNOv4;
  - Tijdsafhankelijke correctie op basis van metingen.

De squat van het schip kan beschouwd worden als de extra stationaire inzinking ten opzichte van de statische verticale scheepspositie. De berekening van squat is bijgevolg gebaseerd op onderstaande methode:

1. Berekening van de verticale afstand tussen het referentiepunt en de waterlijn voor het volledige traject;
2. Berekening van de gemiddelde waarde tijdens een statische meting. Wanneer bij deze afstand de diepgang van het schip ter hoogte van het referentiepunt opgeteld wordt, dan bekomt met de verticale afstand tussen het referentiepunt en de scheepskiel;
3. Berekening van de dynamische squat ter hoogte van het referentiepunt door de verticale afstand tussen het referentiepunt en de waterstand (§3.2.2) te verminderen met de statische waarde;
4. Berekening van inzinkingen over de lengte van het schip (boeg, hek, scheepsmidden) door combinatie van de squat ter hoogte van het referentiepunt met de trimhoek van het schip.

In onderstaande paragraaf wordt bovenvermelde methode meer in detail besproken.

Berekening van inzinking ten opzichte van wateroppervlak op basis van statische meting

Het principe van de verwerking van de meetgegevens tot de inzinking ten opzichte van het wateroppervlak wordt geïllustreerd in Figuur 35. In deze figuur wordt aangegeven dat deze inzinking berekend kan worden op basis van:

$$Sinkage(x_{REF}) = z_{REF_KIEL} - z_{TIJ} + T_0(\rho) \quad (9)$$

$$z_{REF_KIEL} = z_{REF} + z_{S_REF_KIEL} \quad (10)$$

Waarbij:

- Sinkage(x_{REF}) De inzinking ten opzichte van het wateroppervlak ter hoogte van het referentiepunt [m];
- z_{REF_KIEL} De verticale positie van de kiel ter hoogte van het referentiepunt [m NAP]
- z_{TIJ} De waterstand [m NAP]
- $T_0(\rho)$ De statische diepgang van het schip in functie van de waterdensiteit[16] [m]
- z_{REF} De verticale positie van het referentiepunt [m NAP]
- $z_{S_REF_KIEL}$ De verticale afstand tussen de kiel en het referentiepunt [m]

Hierbij geldt dat de waarde van $z_{S_REF_KIEL}$ een constante is. Het is immers de afstand tussen twee punten die zich op een vaste positie op het schip bevinden. Bovendien kan de waarde van $z_{S_REF_KIEL}$ berekend worden op basis van de statische meting. Aangezien voor de statische meting geldt dat de inzinking gelijk is aan nul, kunnen (9) en (10) herschreven worden tot:

$$z_{S_REF_KIEL} = z_{TIJ_NAP} - T_0(\rho) - z_{REF} \quad (11)$$

Tijdens de statische meting zijn de waterstand, scheepsdiepgang en de hoogte van het referentiepunt bekend. $Z_{S_REF_KIEL}$ wordt dan berekend als de gemiddelde waarde van (11) tijdens de statische meting.

Nu $z_{S_REF_KIEL}$ bekend is, kan de inzinking ter hoogte van het referentiepunt op basis van (9) berekend worden voor elk trajectpunt. Hierbij dient opgemerkt te worden dat hoewel de statische diepgang van het schip gebruikt wordt voor de berekening van de verticale positie van de kiel, de berekende inzinking onafhankelijk is van de veronderstelde diepgang. De nauwkeurigheid van de diepgangsaflezing door de loodsen heeft bijgevolg geen invloed op de inzinkingen die met bovenstaande methode bekomen werden. De diepgang heeft wel een invloed op de berekende positie van de kiel en op de berekende (netto) kielspeling.

Op basis van de inzinking in het referentiepunt en de stamphoek van het schip kan de inzinking van het schip berekend worden op elke langsafstand van het schip door middel van onderstaande formule:

$$Sinkage(x) = Sinkage(x_{ref}) + (x - x_{REF}) \sin(pitch) \quad (12)$$

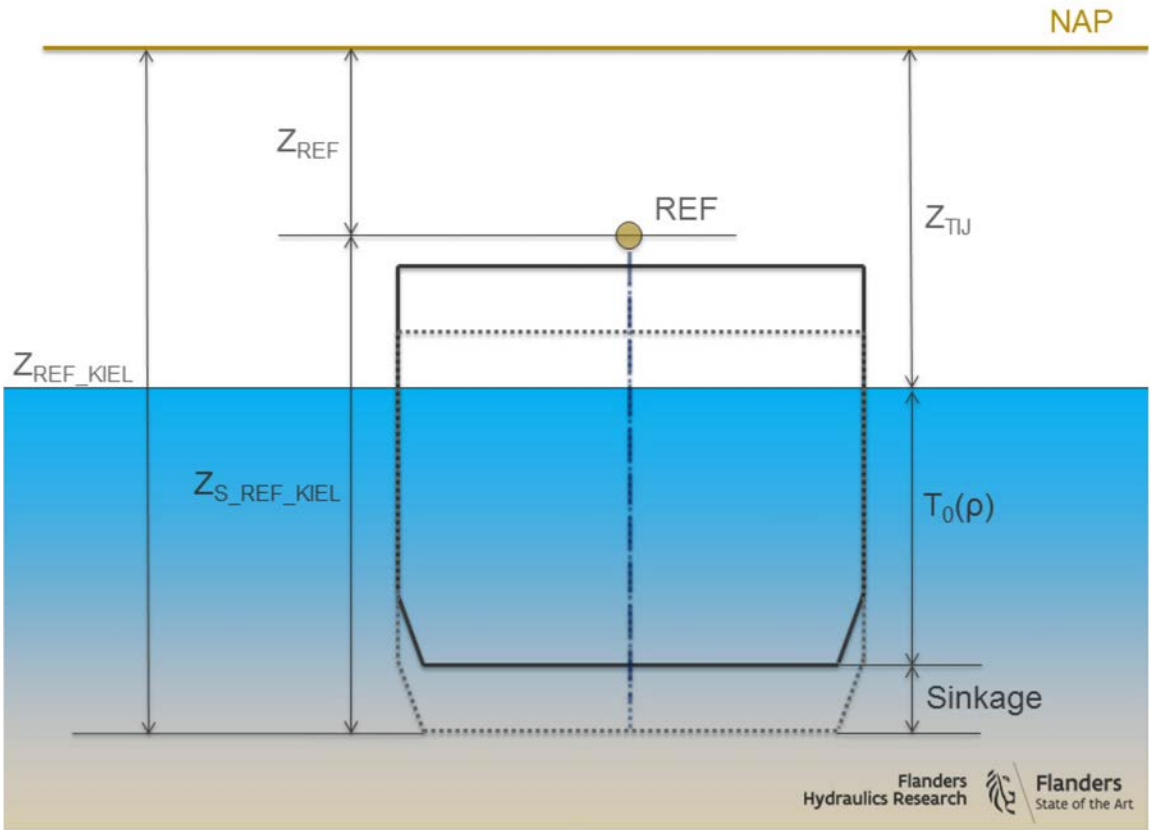
Waarbij:

- Sinkage(x) De inzinking ter hoogte van een langsscheeps punt op het schip [m];
- x De longitudinale positie in het scheepsassenstelsel [m];
- x_{REF} De longitudinale positie in het scheepsassenstelsel van het referentiepunt [m];
- pitch De stamphoek van het schip (relatief ten opzichte van de statische trim) [°].

[16] In het onderzoek werd de verandering van diepgang in functie van densiteit niet meegenomen. Er werd verondersteld dat op het traject tussen de Wandelaar en Vlissingen-Sloehaven de verandering van diepgang door densiteitsverschillen verwaarloosbaar is.

Door toepassing van (12) werd de squat berekend ter hoogte van de boeg, midscheeps en ter hoogte van het achterschip.

Figuur 35 – Berekening squat op basis van verticale positie scheepskiel



Stationaire en dynamische verticale bewegingen

De uitgevoerde verwerking levert dynamische scheepsbewegingen met frequentie 5 Hz. Zoals beschreven in §1.1, dient voor de verticale scheepsbewegingen (dompen, stampen en slingeren) een onderscheid gemaakt te worden tussen de dynamische bewegingen (zeegang) en de stationaire bewegingen (squat). Aangezien het onderwerp van de studie de beoordeling van squat betrof dienden op basis van de hoogfrequente dataset de stationaire verticale scheepsbewegingen afgeleid te worden. Hiervoor werd op basis van een fouriertransformatie de dominante periode berekend voor de drie verticale vrijheidsgraden. Deze resultaten worden weergeven in Tabel 10. De stationaire component van deze bewegingen werd bekomen als het lopende gemiddelde genomen over viermaal de dominante periode van de beweging. De dynamische component werd vervolgens bekomen door het oorspronkelijke signaal te verminderen met de stationaire component.

Tabel 10 – Dominante periodes voor de verticale vrijheidsgraden zoals bekomen voor Asian Blossom

Vrijheidsgraad	Dominante periode	Dominante frequentie
	[s]	[Hz]
Dompen	11.9	0.0842
Slingeren	12.6	0.0793
Stampen	13.4	0.0745

Maximale verticale beweging

Door een combinatie van de drie verticale vrijheidsgraden, zal de grootste verticale beweging veelal optreden ter hoogte van de voor- of achterschouders van het schip. Ter beoordeling van de maximale verticale beweging werd de verticale beweging berekend van de vier hoekpunten van de omhullende rechthoek (L_{OA} x B) rond het schip. Hierbij wordt met andere woorden abstractie gemaakt van de scheepsvorm.

Aangezien de maxima van de dynamische bewegingscomponenten per definitie slechts kortstondig optreden, werd bij de definitie van de maximale dynamische bewegingscomponent gebruik gemaakt van een omhullende. Hoewel deze maximale dynamische beweging slechts korte tijd optreedt, kan men er van uitgaan dat deze potentieel over een langere periode kan voorkomen. De omhullende van de verticale dynamische beweging werd berekend per hoekpunt en voor elk trajectpunt door de hoogste waarde te behouden welke optrad binnen vijfmaal (voor en na) de dominante periode van de verticale beweging. Hierbij werd de dominante periode van de verticale beweging gedefinieerd als het maximum van de dominante periodes voor dompen, slingeren en stampen. Op die manier werd de dynamische beweging uitgesmeerd in tijd en kon de totale verticale beweging welke op een bepaalde locatie potentieel kan voorkomen, berekend worden als de som van de stationaire verticale beweging met de omhullende van de verticale beweging.

3.2.6 Golven

Voor de beschikbare directionele golfspectra werden de onderstaande parameters berekend:

- significante golfhoogte [m];
- dominante golfrichting [°];
- deiningshoogte (op basis van de laag frequente golven (≤0.1Hz)) [m];
- deiningsrichting [°].

3.2.7 Scheepsontmoetingen

Teneinde de scheepsontmoetingen uitgevoerd door het studieschip te onderzoeken, werd gebruik gemaakt van het ais-bestand van die dag (zie §3.1.4). In het kader van een eerder onderzoek (Verwilligen *et al.*, 2014) werden reeds verwerkingsmethodes ontwikkeld om de informatie in deze AIS-bestanden om te zetten naar scheeps- en trajectinformatie. Deze verwerking werd uitgebreid met een filtermethode die enkel de vaartrajecten behoudt welke zowel in afstand als tijd het vaartraject van het studieschip benaderden.

Hiervoor werd gebruik gemaakt van een filtering op basis van onderstaande formule:

$$\sqrt{\frac{\left(x_{AIS}-x_{REF}\right)^2+\left(y_{AIS}-y_{REF}\right)^2}{A^2}+\frac{\left(t_{AIS}-t_{REF}\right)^2}{B^2}} \le 1 \qquad (13)$$

Waarbij:

- x_{AIS}, y_{AIS} Horizontale positie AIS-traject [m];
- x_{REF}, y_{REF} Horizontale positie referentiepunt studieschip [m];
- t_{AIS} Tijdstip (UTC) van het bijhorende AIS-trajectpunt [d]
- t_{REF} Tijdstip (UTC) van het bijhorende trajectpunt van het studieschip [s]
- A filterparameter gebaseerd op afstand [m];
- B filterparameter gebaseerd op tijd [s].

De filterparameters A en B worden zodanig gekozen dat enkel die AIS-trajecten overgehouden werden die zich op een tijdstip dat beperkt afwijkt van dat het referentietraject (B) binnen een maximale afstand van het referentiepunt (A) bevonden. De waarde van A wordt bepaald als de maximale afstand waarop een AIS-schip zich gelijktijdig met het studieschip bevond. Terwijl B berekend werd als het maximale tijdsverschil waarop AIS-schip en studieschip zich op dezelfde positie bevonden.

Bij de toepassing van bovenstaande formule voor de berekening van scheepsontmoetingen met een cape-size bulkcarrier naar Vlissingen-Sloehaven werden onderstaande waarden gehanteerd voor de filterparameters:

- A = 2000 m;
- B = 630 s.

De AIS-trajecten welke voldoen aan de filtering werden gevisualiseerd door middel van KMZ-bestanden welke samen met het vaartraject van het studieschip gevisualiseerd kunnen worden in Google Earth™. Een voorbeeld van dergelijke visualisatie wordt weergegeven in Figuur 36.

Vervolgens werden de meest relevante ontmoetingen samengevat in een tabel. De criteria welke toegepast werden opdat een ontmoeting relevant genoemd werd, zijn:

- De snelheid over de grond van het referentieschip was groter dan 2 kn;
- De snelheid over de grond van het AIS-schip was groter dan 2 kn;
- De passeerafstand tussen beide schepen was kleiner dan 500 m;
- Het AIS-schip was langer dan 60 m;
- De minimale afstand tussen beide schepen vond plaats wanneer beide schepen zich langszij bevonden.

Figuur 36 – Presentatie visualisatie Asian Blossom en gefilterde AIS-trajecten tijdens invaart Sloehaven.



3.3 Output

3.3.1 Grafieken

De belangrijkste resultaten van de meetvaartverwerking worden weergegeven in Bijlage 1. Deze Bijlage bevat zes pagina's met grafieken welke thematisch gecombineerd werden. In deze grafieken wordt op de onderste horizontale as de tijd (UTC) uitgezet, terwijl op de bovenste horizontale as de baanafstand (zie §3.2.1) weergegeven wordt.

- Pagina 1: Verticale bewegingen: Dynamisch en Stationair
  - Grafiek 1: Dompbeweging midscheeps [m, positief naar beneden]
    - Dynamische dompbeweging;
    - Stationaire dompbeweging (squat midscheeps).
  - Grafiek 2: Stampbeweging [°, positief boeg omhoog]
    - Dynamische stampbeweging;
    - Stationaire stampbeweging (trim).
  - Grafiek 3: Slingerbeweging [°, positief bakboord omhoog]
    - Dynamische slingerbeweging;
    - Stationaire slingerbeweging (helling).
  - Grafiek 4: Totale verticale beweging boeg [m, positief naar beneden]
    - Hoekpunt vooraan stuurboord (groen);
    - Hoekpunt vooraan bakboord (rood);
  - Grafiek 5: Totale verticale beweging achterschip [m, positief naar beneden]
    - Hoekpunt vooraan stuurboord (groen);
    - Hoekpunt vooraan bakboord (rood);
- Pagina 2: Gierbeweging en Stationaire Verticale Bewegingen
  - Grafiek 1: Stationaire dompbeweging (squat midscheeps) [m, positief naar beneden]
  - Grafiek 2: Stationaire stampbeweging (trim) [°, positief boeg omhoog]
  - Grafiek 3: Stationaire slingerbeweging (helling) [°, positief bakboord omhoog]
  - Grafiek 4: Heading [° ten opzichte van Noorden, wijzerzin]
  - Grafiek 5: Giersnelheid [°/min, positief naar stuurboord]
- Pagina 3: Squat
  - Grafiek 1: Squat boeg [m, positief naar beneden]
    - Gemeten squat (zwart);
  - Grafiek 2: Squat achterschip [m, positief naar beneden]
    - Gemeten squat (zwart);
  - Grafiek 3: Vaarsnelheid [kn, positief vooruit]
    - Snelheid over de grond;
    - Snelheid door het water.
  - Grafiek 4: Kielspeling [% van de scheepsdiepgang]
    - Bruto kielspeling boeg (zwart);
    - Bruto kielspeling achterschip (blauw).
  - Grafiek 5: Blockage [-]
- Pagina 4: Maximale verticale bewegingen hoekpunten van schip
  - Grafiek 1: Dynamische verticale bewegingen hoekpunten boeg [m, positief naar beneden]
    - Hoekpunt vooraan stuurboord (groen)
      - Dynamische beweging;
      - Omhullende van de dynamische beweging;
    - Hoekpunt vooraan bakboord (rood)
      - Dynamische beweging;
      - Omhullende van de dynamische beweging;

    - Grafiek 2: Dynamische verticale bewegingen hoekpunten achterschip [m, positief naar beneden]
        - Hoekpunt achteraan stuurboord (groen)
            - Dynamische beweging;
            - Omhullende van de dynamische beweging;
        - Hoekpunt achteraan bakboord (rood)
            - Dynamische beweging;
            - Omhullende van de dynamische beweging;
    - Grafiek 3: Stationaire verticale bewegingen hoekpunten schip [m, positief naar beneden]
        - Hoekpunt vooraan stuurboord (groene volle lijn)
        - Hoekpunt vooraan bakboord (rode volle lijn)
        - Hoekpunt achteraan stuurboord (groene gebroken lijn)
        - Hoekpunt achteraan bakboord (rode gebroken lijn)
    - Grafiek 4: Totale verticale beweging (potentieel) [m, positief naar beneden]
        - Hoekpunt vooraan stuurboord (groene volle lijn)
        - Hoekpunt vooraan bakboord (rode volle lijn)
        - Hoekpunt achteraan stuurboord (groene gebroken lijn)
        - Hoekpunt achteraan bakboord (rode gebroken lijn)
    - Grafiek 5: Procentueel aandeel stationaire beweging ten opzichte van totale verticale beweging [%]
        - Hoekpunt vooraan stuurboord (groene volle lijn)
        - Hoekpunt vooraan bakboord (rode volle lijn)
        - Hoekpunt achteraan stuurboord (groene gebroken lijn)
        - Hoekpunt achteraan bakboord (rode gebroken lijn)
- Pagina 5: Omgevingsparameters
    - Grafiek 1: Stroomsnelheid [kn]
    - Grafiek 2: Stroomrichting [° ten opzichte van Noorden, wijzerzin]
    - Grafiek 3: Waterhoogte (getij) [m ten opzichte van NAP]
    - Grafiek 4: Bodemdiepte [m ten opzichte van NAP]
- Pagina 6: Verticale bewegingen tijdens statische meting: Dynamisch en Stationair
    - Grafiek 1: Dompbeweging midscheeps [m, positief naar beneden]
        - Dynamische dompbeweging;
        - Stationaire dompbeweging (squat midscheeps).
    - Grafiek 2: Stampbeweging [°, positief boeg omhoog]
        - Dynamische stampbeweging;
        - Stationaire stampbeweging (trim).
    - Grafiek 3: Slingerbeweging [°, positief bakboord omhoog]
        - Dynamische slingerbeweging;
        - Stationaire slingerbeweging (helling).
    - Grafiek 4: Totale verticale beweging boeg [m, positief naar beneden]
        - Hoekpunt vooraan stuurboord (groen);
        - Hoekpunt vooraan bakboord (rood);
    - Grafiek 5: Totale verticale beweging achterschip [m, positief naar beneden]
        - Hoekpunt vooraan stuurboord (groen);
        - Hoekpunt vooraan bakboord (rood);

3.3.2 KMZ-representatie vaartrajecten

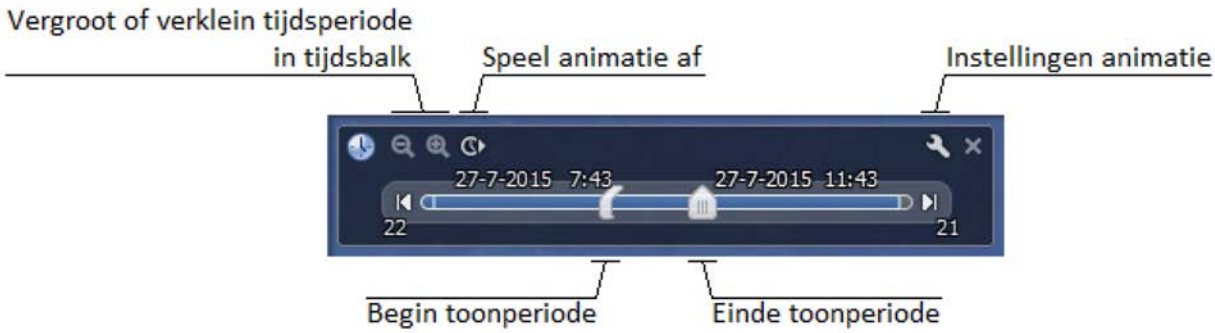
De vaartrajecten van het studieschip en van de gefilterde AIS-schepen worden in de vorm van KMZ-bestanden digitaal toegevoegd aan dit rapport (Bijlage 4). De KMZ-bestanden bevatten elke minuut een tijdsgerefereerde (UTC) visualisatie van de scheepsposities. Voor elke meetvaart werden twee KMZ-bestanden toegevoegd aan de rapportering:

1. Traject van het schip (vb. *01_Asian_Blossom.kmz*)
2. Traject van het schip gecombineerd met de AIS schepen die op korte afstand van het schip (zie §3.2.6) gevaren hebben (vb. *01_Asian_Blossom_with_AIS.kmz*). Het AIS-traject van het schip zelf is eveneens opgenomen in de kmz-bestand maar wordt standaard niet weergegeven.

Deze bestanden kunnen middels de gratis GIS-viewer Google Earth™ gevisualiseerd en afgespeeld worden. De animatie kan afgespeeld worden door middel van het bedieningsvenster weergegeven in Figuur 37 dat automatisch verschijnt in de linker bovenhoek. Om de animatie af te spelen dienen onderstaande handelingen uitgevoerd te worden:

1. Verplaats de slider *Begin toonperiode* tot tegen de slider *Einde toonperiode*. Zo wordt er slechts één tijdstip vertoond.
2. Verplaats de slider *Einde toonperiode* naar het tijdstip waarop je de animatie wil starten. Je ziet de scheepvaart weergegeven worden voor de geselecteerde toonperiode.
3. Speel de animatie af. De afspeelsnelheid kan je sturen door de instellingen aan te passen of door de tijdsperiode in de tijdsbalk te vergroten of te verkleinen.

Figuur 37 – Bedieningspaneel animaties in Google Earth™



3.3.3 Scheepsontmoetingen

Behalve op basis van de KMZ-bestanden, worden in Bijlage 2 de belangrijkste ontmoetingen ook opgelijst in tabellen. In deze tabellen wordt onderstaande informatie aangeboden:

- datum en tijd van ontmoeting;
- naam referentieschip;
- snelheid over de grond van het referentieschip;
- naam van het AIS-schip;
- lengte AIS-schip;
- breedte AIS-schip;
- diepgang AIS-schip;
- snelheid over de grond van het AIS-schip;
- passeerafstand tussen de rompen van de beide schepen op basis van een vereenvoudigde vijfhoek representatie van de scheepscontour.

4 Resultaten waregroottemetingen

De resultaten van de waregroottemetingen worden door middel van de output gedefinieerd in H3 gerapporteerd. In voorliggend hoofdstuk wordt een meer algemene beschrijving van de meetvaarten gegeven met betrekking tot de scheepsbewegingen in het buitengebied. Om een vergelijking tussen de meetvaarten onderling mogelijk te maken, werden samenvattende figuren gegenereerd die de meest relevante parameters weergegeven ten opzichte van de baanafstand.

In Figuren 38 tot 44 wordt een weergave vertoond van de KMZ-bestanden inclusief AIS-ontmoetingen voor de zeven geanalyseerde meetvaarten.

Figuur 38 – KMZ-visualisatie meetvaart Asian Blossom met gefilterde AIS-scheepvaart



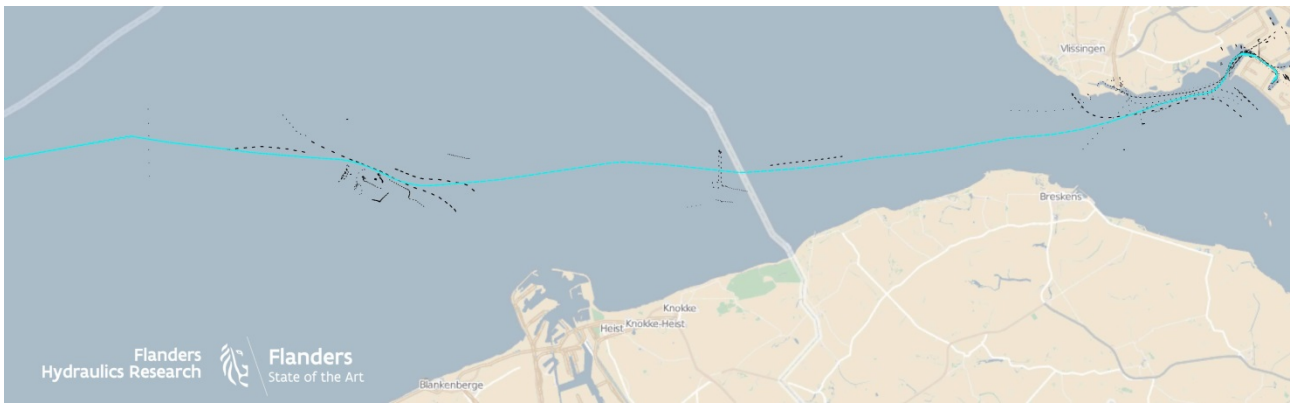
Figuur 39 – KMZ-visualisatie meetvaart Cape Canary met gefilterde AIS-scheepvaart



Figuur 40 – KMZ-visualisatie meetvaart Wisdom of the Sea met gefilterde AIS-scheepvaart



Figuur 41 – KMZ-visualisatie meetvaart Lancelot met gefilterde AIS-scheepvaart



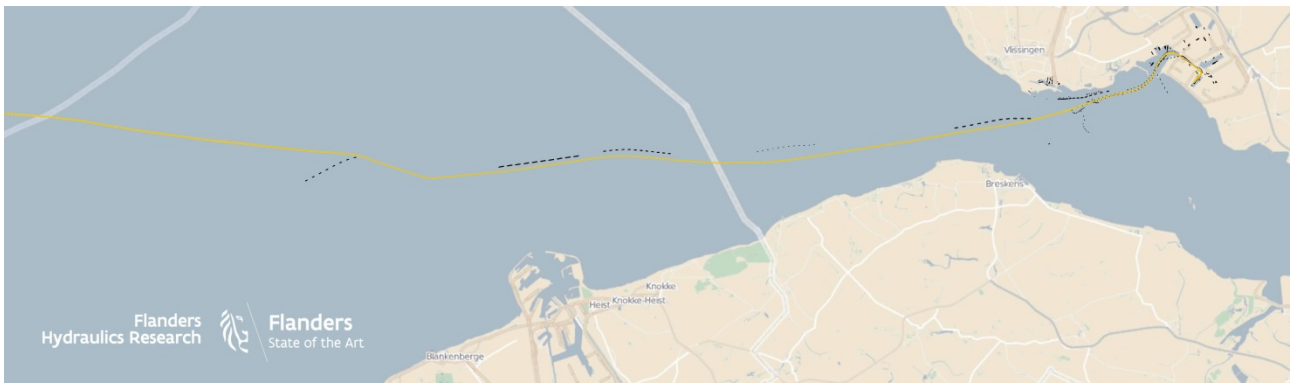
Figuur 42 – KMZ-visualisatie meetvaart Bulk Mexico met gefilterde AIS-scheepvaart



Figuur 43 – KMZ-visualisatie meetvaart Cape Harmony met gefilterde AIS-scheepvaart



Figuur 44 – KMZ-visualisatie meetvaart Panormos met gefilterde AIS-scheepvaart



4.1 Hydro-Meteo data

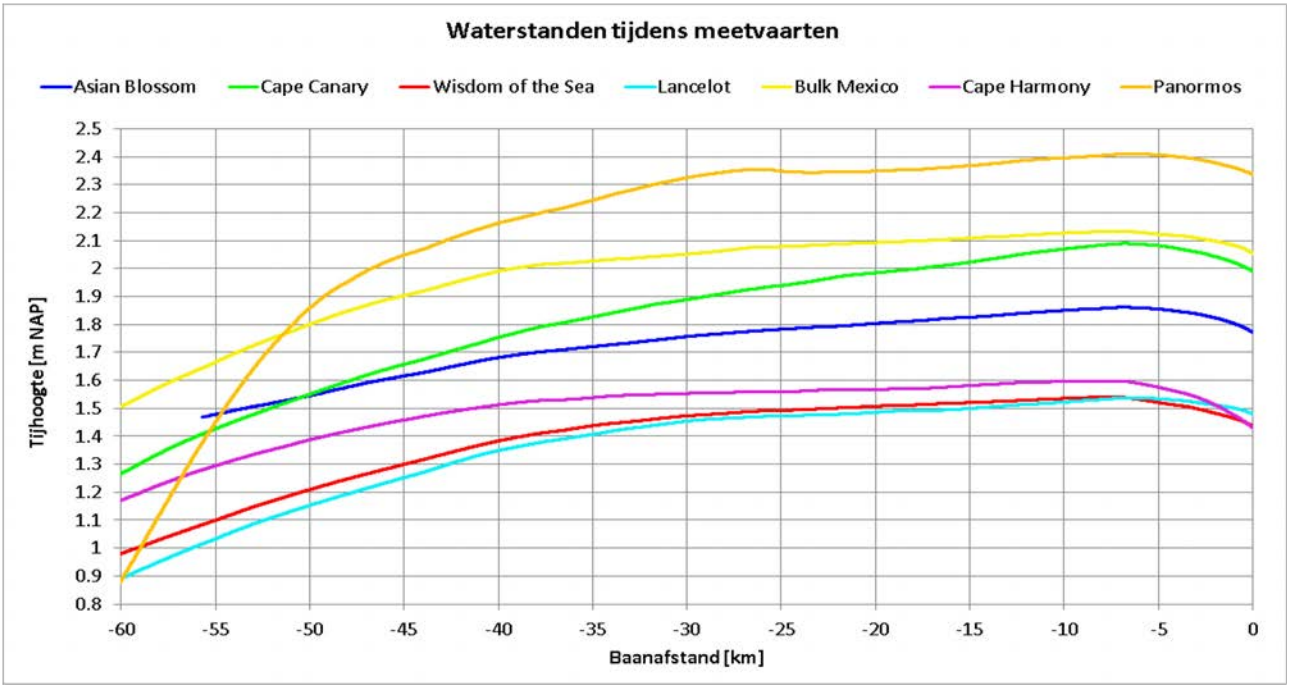
In eerste instantie wordt een overzicht gegeven van de meteorologische omgevingsparameters heersend tijdens de meetvaarten. Het betreffend de parameters:

- getij;
- golven;
- wind.

4.1.1 Getij

In §3.1.2 werd de methode gepresenteerd, welke toegepast werd om de waterstanden langsheen het vaartraject te bekomen. In Figuur 45 worden de resultaten van deze verwerking weergegeven voor de zeven meetvaarten. Uit deze figuur blijkt dat het hoog water waarbij de meetvaarten uitgevoerd werden, varieerde tussen +1.44 m NAP voor de meetvaarten Lancelot en Wisdom of the Sea tot +2.41 m NAP voor het schip Panormos. Daar opvarende bulkvaart naar Vlissingen-Sloehaven gehouden is aan een strikte stroompoort overeenkomstig het Stil van Hoog bij het invaren van de haven[17], varen alle schepen bij een gelijkaardige tijconditie. Zo werd voor de zeven meetvaarten de hoogste waterstand bereikt ter hoogte van de Rede van Vlissingen.

Figuur 45 – Reproductie van waterstanden langsheen het vaartraject voor de uitgevoerde meetvaarten



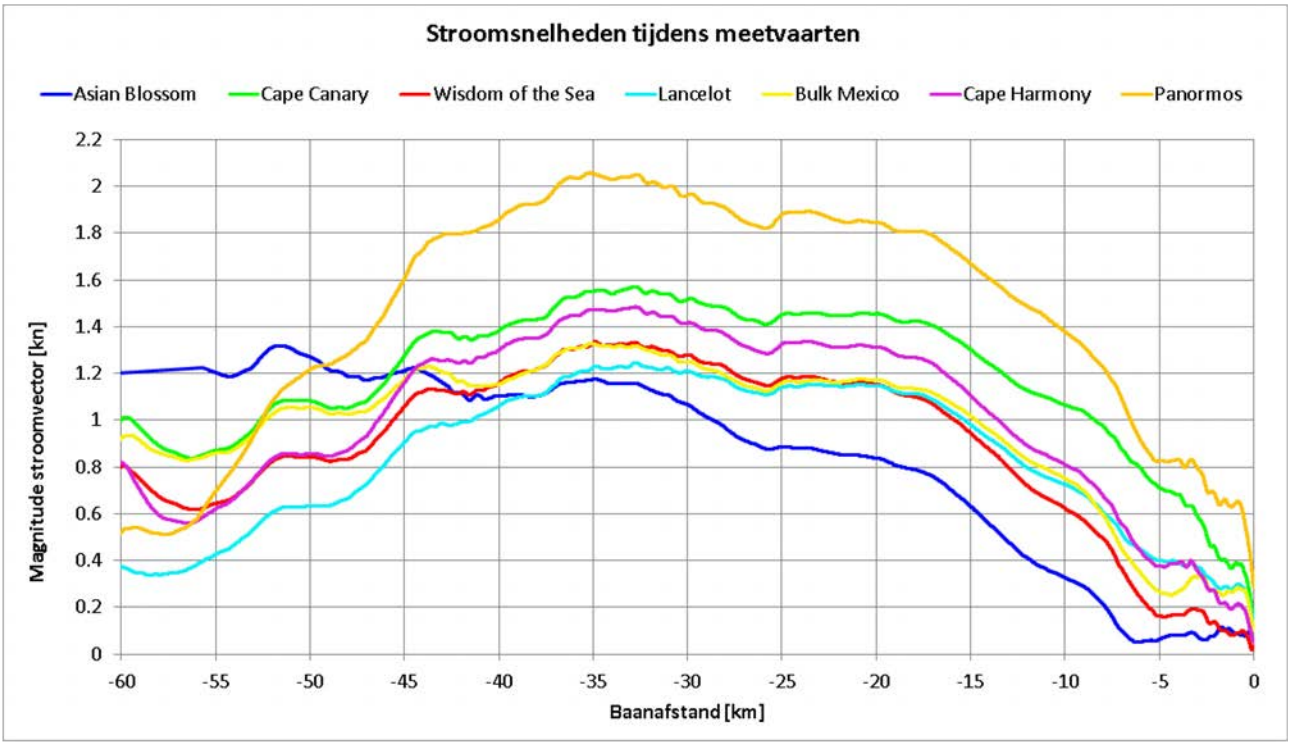
4.1.2 Stroomsnelheid

De stroomsnelheid langsheen de uitgevoerde vaartrajecten bekomen uit ZUNOv4 hindcast-berekeningen wordt weergegeven in Figuur 46. Het gelijkaardige verloop tussen de verschillende meetvaarten onderling illustreert dat de schepen de opvaart op eenzelfde tijdstip van het getij uitvoeren. Dit wegens de vereiste

[17] Als vuistregel wordt vaak aangenomen dat Stil van Hoog ter hoogte van de havendammen van Sloehaven optreedt 70 minuten na het Hoog Water te Vlissingen. Deze vuistregel kan beschouwd worden als een gemiddelde. In realiteit zal het tijdstip van Stil van Hoog ten opzichte van Hoog Water Vlissingen variëren naar gelang de getijslag (dood tij/spring tij).

dat het schip de haven dient op te varen bij Stil van Hoog. Getuige hiervan zijn bovendien de erg kleine stroomsnelheden bij het invaren van de haven (baanafstand 0 km). Bovendien blijkt dat er geen eenduidige relatie is tussen de getijslag en de stroomsnelheden. Zo blijken de stroomsnelheden waargenomen op Bulk Mexico en Wisdom of the Sea erg gelijkaardig, terwijl het Hoog Water tijdens deze meetvaarten met 0.6 m verschilde.

Figuur 46 – Stroomsnelheden ZUNOv4-hindcast berekeningen langsheen het vaartraject voor de uitgevoerde meetvaarten



4.1.3 Golven

De dynamische scheepsbewegingen zullen voornamelijk door golven geïnduceerd worden. De berekende statistische golfparameters (zie §3.1.4) worden weergegeven in Tabellen 11 tot 14. Hieruit blijkt dat voor alle meetvaarten het belangrijkste golfklimaat opgemeten werd ter hoogte van het meetstation Westhinder.

Uit Tabel 11 blijkt dat de significante golfhoogte het grootste was tijdens de meetvaart op de Asian Blossom, waarbij de waarde te Westhinder 2.59 m bedroeg. Voor de andere meetvaarten varieerde de significante golfhoogte te Westhinder tussen ca. één en twee meter.

Wanneer de significante golfhoogtes uit Tabel 11 vergeleken worden met de deiningshoogtes uit Tabel 13, dan blijken deze onderling weinig correlatie te vertonen. Terwijl op basis van de significante golfhoogte, het golfklimaat tijdens de meetvaart op de Bulk Mexico (1.34 m) als gematigd beoordeeld kan worden, blijkt voor deze meetvaart de deiningshoogte (0.28 m) het grootste. Hoewel de significante golfhoogte voor Bulk Mexico slechts de helft bedroeg van de significante golfhoogte voor de Asian Blossom, blijkt de deiningshoogte bijna het dubbel te bedragen voor de Bulk Mexico.

Verder blijkt dat ook de golfrichtingen variaties vertonen tussen de meetdagen onderling en wanneer gebaseerd op het volledige golfspectrum of enkel op de deiningscomponenten. De golfrichtingen varieerden tussen zuidwestelijke en noordelijke richtingen. Verder valt op dat voor de meetvaart met de belangrijkste deining (Bulk Mexico) de deining noordelijk gericht was terwijl de significante golfhoogte eerder een westelijke (tot zuidwestelijke) oriëntatie had.

Tabel 11 – Significante golfhoogte bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken

	Significante Golfhoogte [m]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panor-mos
Kwintebank	2.26	1.36	1.29	0.86	1.18	1.36	0.86
Westhinder	2.59	1.40	1.61	0.98	1.34	1.96	1.22
Bol van Heist	1.87	1.16	0.99	0.75	0.90	no data	0.76

Tabel 12 – Dominante golfrichting bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken

	Golfrichting [°]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panor-mos
Kwintebank	248	280	259	311	284	260	255
Westhinder	224	271	236	305	228	231	236
Bol van Heist	259	293	262	311	288	no data	259

Tabel 13 – Significante deiningshoogte bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken

	Significante Deiningshoogte [m]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panor-mos
Kwintebank	0.11	0.07	0.06	0.06	0.27	0.07	0.07
Westhinder	0.15	0.08	0.08	0.07	0.28	0.12	0.10
Bol van Heist	0.10	0.07	0.04	0.07	0.26	no data	0.09

Tabel 14 – Dominante deiningsrichting bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken

	Deiningsrichting [°]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panor-mos
Kwintebank	260	280	221	316	343	240	328
Westhinder	231	354	240	340	7	225	298
Bol van Heist	264	323	238	332	333	no data	335

4.1.4 Wind

De resultaten van windmetingen tijdens de meetvaarten worden weergegeven in Tabel 16 en Tabel 17. In Tabel 17 werd hieruit de windconditie uitgedrukt in functie van de Beaufortschaal en kompasrichting weergegeven. Deze tabellen tonen aan dat de meetvaart met de hoogste significante golfhoogte (Asian Blossom) ook gepaard ging met de grootste windsnelheden. Anderzijds blijkt dat de meetvaart gepaard gaande met de grootste deiningshoogtes gepaard ging met erg lage windsnelheden. De reden hiervoor is dat de deiningsconditie gecreëerd wordt door een belangrijk windklimaat in de dagen voorafgaand aan de opvaart van de Bulk Mexico.

Tabel 15 – Windsnelheid bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken

	Windsnelheid [m/s]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panor-mos
Westhinder	16.27	10.66	12.89	6.46	5.21	14.14	7.65
Wandelaar	17.80	12.25	11.75	6.51	4.53	10.39	11.54

Tabel 16 – Windrichting bekomen uit directionele golfmetingen uit het Meetnet Vlaamse Banken

	Windrichting [°]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panor-mos
Westhinder	239	271	210	285	261	215	222
Wandelaar	247	275	206	294	285	205	207

Tabel 17 – Windconditie tijdens meetvaarten

	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panor-mos
Windconditie [Bft]	WZW 7	W 6	ZZW 6	WNW 4	W 3	ZZW 6	ZW 5 ZZW 6

4.2 Vaarsnelheden en kielspelingen

De belangrijkste parameters bij de bepaling van squat, maar eveneens in de berekening van een vaarplan en tijpoort betreffen de kielspeling en vaarsnelheid. Hierdoor worden, voorafgaand aan de bespreking van de verticale scheepsbewegingen, de vaarsnelheden en kielspelingen overeenkomstig de zeven meetvaarten gepresenteerd.

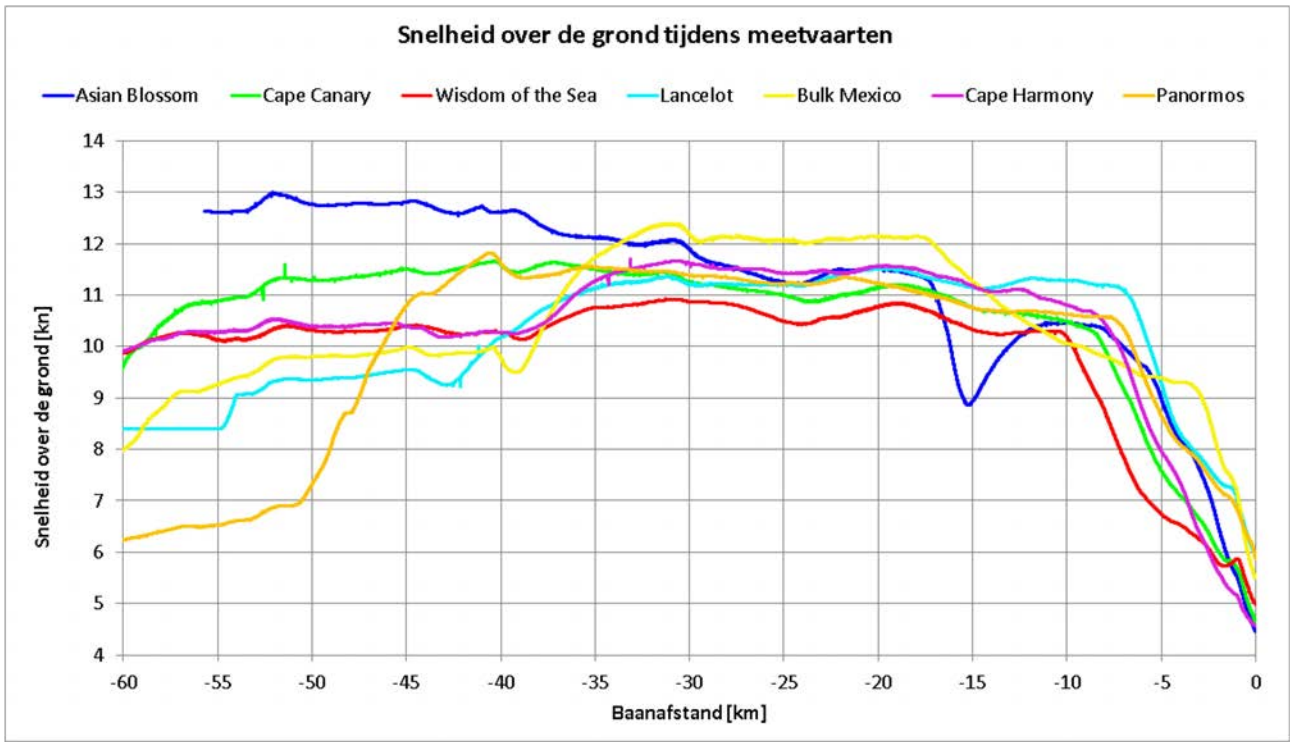
4.2.1 Vaarsnelheden

De vaarsnelheid bekomen uit de meetgegevens betreft de vaarsnelheid over de grond en wordt voor de zeven meetvaarten weergegeven in Figuur 47. Voor hydrodynamische effecten op het schip (waaronder squat) is echter de vaarsnelheid door het water relevant. Deze werd bekomen als het verschil tussen de vaarsnelheid over de grond en de langsscheepse component van de stroomsnelheid. De vaarsnelheid door het water wordt weergegeven in Figuur 48. Hierbij dient opgemerkt dat door de afwezigheid van stroommetingen, de nauwkeurigheid van de stroomsnelheden niet gecontroleerd kon worden.

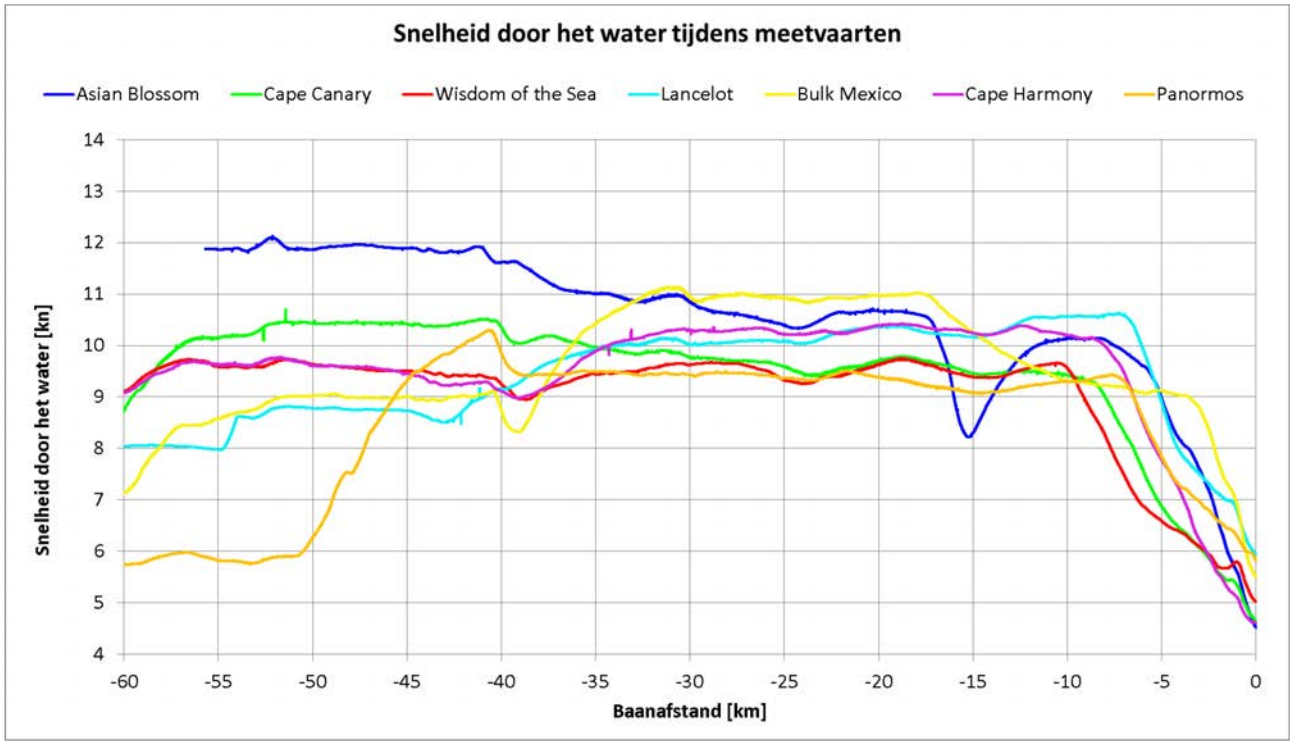
Uit Figuur 48 blijkt dat de grootste vaarsnelheden (tot 12 kn) toegepast werden tijdens de opvaart van het schip Asian Blossom. Voor het traject tussen VG1 en Scheur-West vertonen de meetvaarten onderling een grote variatie in vaarsnelheid. Zo werd de opvaart op het schip Lancelot in dit vaargebied slechts uitgevoerd aan een vaarsnelheid gelijk aan ca. 9.5 kn. Voor de meetvaart op het schip Panormos bedroeg de vaarsnelheid op het traject afwaarts boei VG5 zelfs minder dan 6 kn. Voor het vaargebied Scheur-Oost en Wielingen werden tijdens alle meetvaarten vaarsnelheden door het water tussen 9.5 kn en 11 kn toegepast. Enkel het schip Asian Blossom diende in de Wielingen de snelheid tijdelijk terug te brengen voor het aan boord nemen van passagiers wat gepaard ging met een kortstondige daling van de vaarsnelheid.

Vanaf de Rede van Vlissingen werd de vaarsnelheid stelselmatig teruggebracht opdat de passage van de havendammen te Vlissingen-Sloehaven uitgevoerd kon worden aan snelheid variërend tussen 4.5 kn en 6 kn.

Figuur 47 – Vaarsnelheid over de grond toegepast tijdens de geanalyseerde meetvaarten



Figuur 48 – Vaarsnelheid door het water toegepast tijdens de geanalyseerde meetvaarten



4.2.2 Kielspelingen (bruto) en blockage

De kielspelingen welke gepresenteerd worden in voorliggend rapport betreffen enerzijds bruto en anderzijds netto kielspelingen. Hierbij geldt de bruto kielspeling als het verschil tussen de waterdiepte en de (statische) diepgang van het schip zoals weergegeven in Tabel 5. De bruto kielspeling stemt bijgevolg overeen met de hoogte onder kiel welke beschikbaar is onder een stilliggend schip. De netto kielspeling betreft de bruto kielspeling verminderd met de verticale scheepsbewegingen van het schip en stemt bijgevolg overeen met de effectieve beschikbare ruimte tussen scheepskiel en scheepsbodem.

Tenzij anders aangegeven wordt met de term kielspeling steeds de bruto kielspeling bedoeld. De bruto kielspelingen zoals beschikbaar tijdens de geanalyseerde meetvaarten worden weergegeven in Figuur 49. In Figuur 49 worden enkel de kielspelingen vertoond kleiner dan 35% van de diepgang. De onderlinge verschillen kunnen te wijten zijn aan wijzigingen in de bathymetrie, door de verschillende tijcondities tijdens de meetvaarten of door een verschillende scheepsdiepgang. Zo zijn de hoge kielspelingen voor het schip Panormos het gevolg van de kleinere diepgang van dit schip en de hoge waterstanden.

Algemeen kan gesteld worden dat de kielspelingen eenzelfde verloop vertonen. Dit is niet verwonderlijk aangezien de kielspeling in de eerste plaats afhankelijk is van de bodemgesteldheid, welke tussen de meetvaarten onderling weinig verschil vertoonden. Opmerkelijk is dat voor de meetvaart Cape Harmony, de bodemdiepte een sprong van ca. 5% (ca. 0.8 m) vertoonde ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens. Deze afwijking wordt geweten aan een onnauwkeurige peiling in de Schelde-ECS databank en werd gecorrigeerd bij de toepassing van de kielspelingen als input voor de squatformules (zie §5.3). De kielspeling toegepast voor de berekening van de regressiecoëfficiënten van de squatformules werd voor baanafstanden tussen -27.43 km en -24.17 km voor Cape Harmony aangepast aan de overeenkomstige bodemdieptes (en blockages) bekomen voor de meetvaart Lancelot.

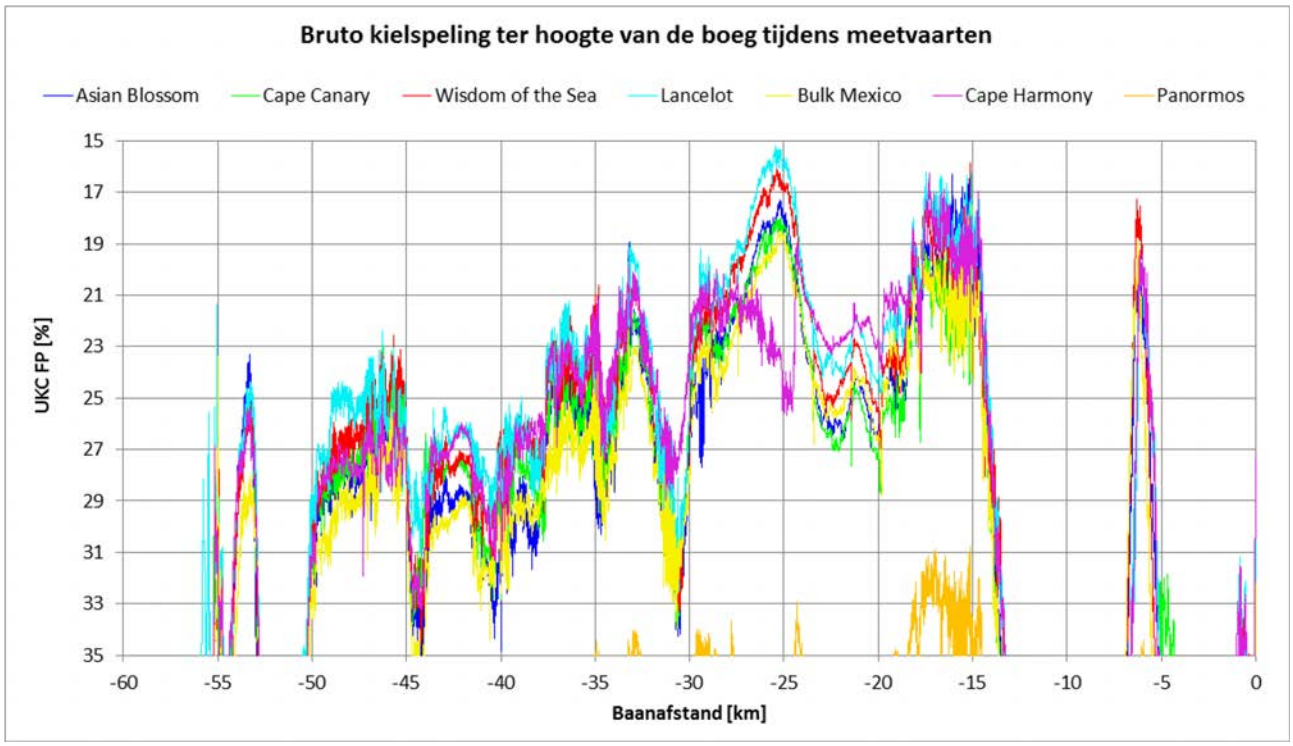
Uit Figuur 49 blijkt verder dat er vier locaties optreden waarop de kielspeling een belangrijk minimum vertoont:

- s = -34.5 km: Boei S7;
- s = -25.3 km: Boei SW;
- s = -15.0 km: Boei W7;
- s = -06.0 km: Boei RV2 (drempel Vlissingen).

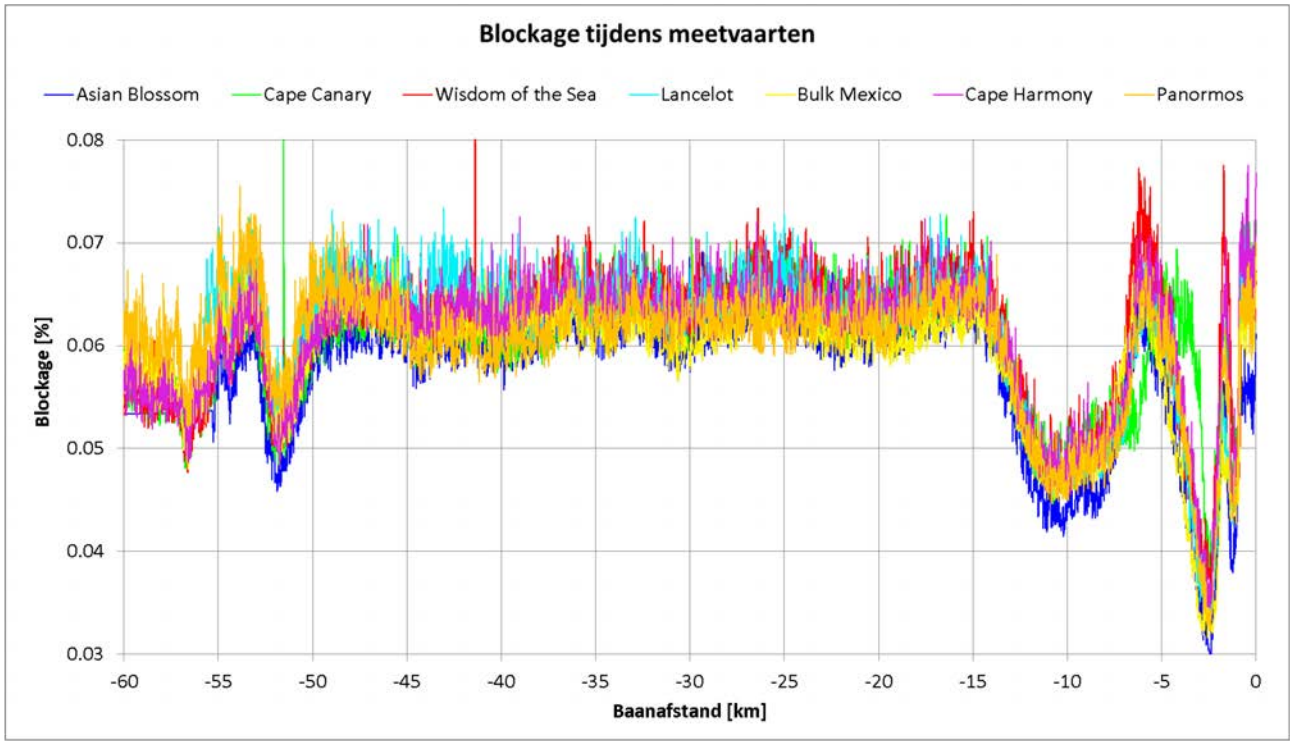
Verder toont Figuur 49 aan dat de kleinste kielspeling ervaren werd door het Schip Lancelot ter hoogte van Boei SW. De bruto kielspeling bedroeg daar slechts de minimaal vereiste deterministische waarde (15%).

Behalve voor kielspelingen werd de bathymetrie ook geanalyseerd naar blockage. De resultaten van deze verwerking worden weergegeven in Figuur 50. Hieruit blijkt dat de variaties in blockage langsheen het vaartraject erg beperkt waren en bovendien sterk gedreven zijn door de verticale variatie van de vaarweg. De reden hiervoor is dat bij de blockage berekening (7) de vaarweg dwars begrensd werd door de invloedsbreedte (6). Daar tijdens de meetvaartcondities de invloedsbreedte kleiner was dan de horizontale afstand tussen het schip en de oevers, werd de blockage voornamelijk beïnvloed door verticale vaarwegvariaties. Men kan stellen dat de onderzochte vaarweg dermate breed is, dat de horizontale beperking van de vaarweg geen invloed heeft op de blockage (of op de squat).

Figuur 49 – Bruto kielspelingen ter hoogte van de boeg zoals bekomen voor de geanalyseerde meetvaarten



Figuur 50 – Blockage bekomen voor de geanalyseerde meetvaarten



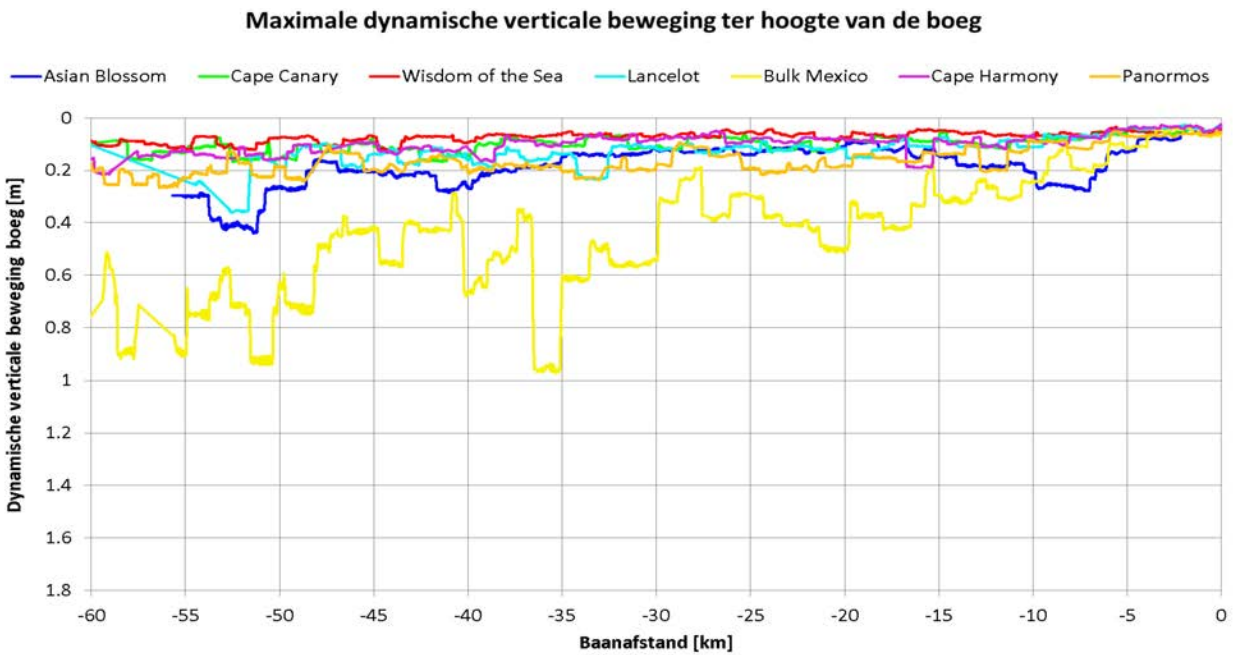
4.3 Dynamische scheepsbewegingen

De dynamische scheepsbewegingen werden gedefinieerd als het hoogfrequente signaal uit de geanalyseerde scheepsmetingen (zie §3.2.5.2). Het betreft met andere woorden het verschil tussen de totale verticale scheepsbeweging en de stationaire scheepsbeweging (squat). De dynamische en stationaire bewegingen worden in Bijlage 1 weergegeven op de eerste pagina van elk meetvaartrapport. Doordat de dynamische bewegingen een hoogfrequent signaal vormen, werden voor de onderlinge vergelijking van de meetvaarten de maximale verticale dynamische bewegingen ter hoogte van de boeg weergegeven. Deze werden bekomen door de totale verticale beweging (zie §3.2.5.3) te verminderen met de squat. Dit resultaat wordt weergegeven in Figuur 51.

Uit Figuur 51 blijkt duidelijk dat de dynamische scheepsbewegingen het grootst waren tijdens de opvaart van de Bulk Mexico. Voor dit schip werden dynamische bewegingen tot ca. 1.0 m waargenomen. Voor de andere meetvaarten waren de dynamische bewegingen significant lager. Zo bleek het schip Asian Blossom ondanks de hoge significante golfhoogte (2.6 m) slechts een dynamische beweging van maximaal 0.4 m te vertonen. Op basis hiervan kan gesteld worden dat de significante golfhoogte (zie Tabel 11) een weinig relevante parameter is voor de beoordeling van scheepsbewegingen. De deiningshoogte (zie Tabel 13) daarentegen blijkt wel sterk gerelateerd met de verticale scheepsbewegingen van de onderzochte cape size bulkcarriers. Hierbij dient bovendien opgemerkt te worden dat de deiningsrichting eveneens een invloed lijkt te hebben op de dynamische scheepsbewegingen. Zo blijkt het schip Lancelot een relatief grote dynamische scheepsbeweging te vertonen ondanks een erg beperkte deining. De noordelijke deiningsrichting zoals aanwezig tijdens de opvaarten van Bulk Mexico en Lancelot lijkt aanleiding te geven tot belangrijkere dynamische bewegingen dan de meetvaarten uitgevoerd bij meer westelijk georiënteerde deining.

De dynamische scheepsbewegingen worden vrijwel uitsluitend bepaald door het optredende golfklimaat. Bovenstaande beschrijving illustreert deze afhankelijkheid. Echter door het grote aantal variaties in de mogelijke golfspectra, laat de analyse van zeven meetvaarten niet toe om alle afhankelijkheden tussen golfparameters en dynamische scheepsbewegingen te beoordelen (dit was ook niet het onderwerp van de studie). Wel geven de scheepsmetingen een beschrijving van de effectief opgetreden scheepsbewegingen en bieden deze derhalve een betrouwbare referentie voor de verificatie van zeegangsmodellen welke toegepast zullen worden in het DKS-rekenhart van WESP.

Figuur 51 – Maximale dynamische verticale beweging van de boeg, afgeleid uit de geanalyseerde meetvaarten

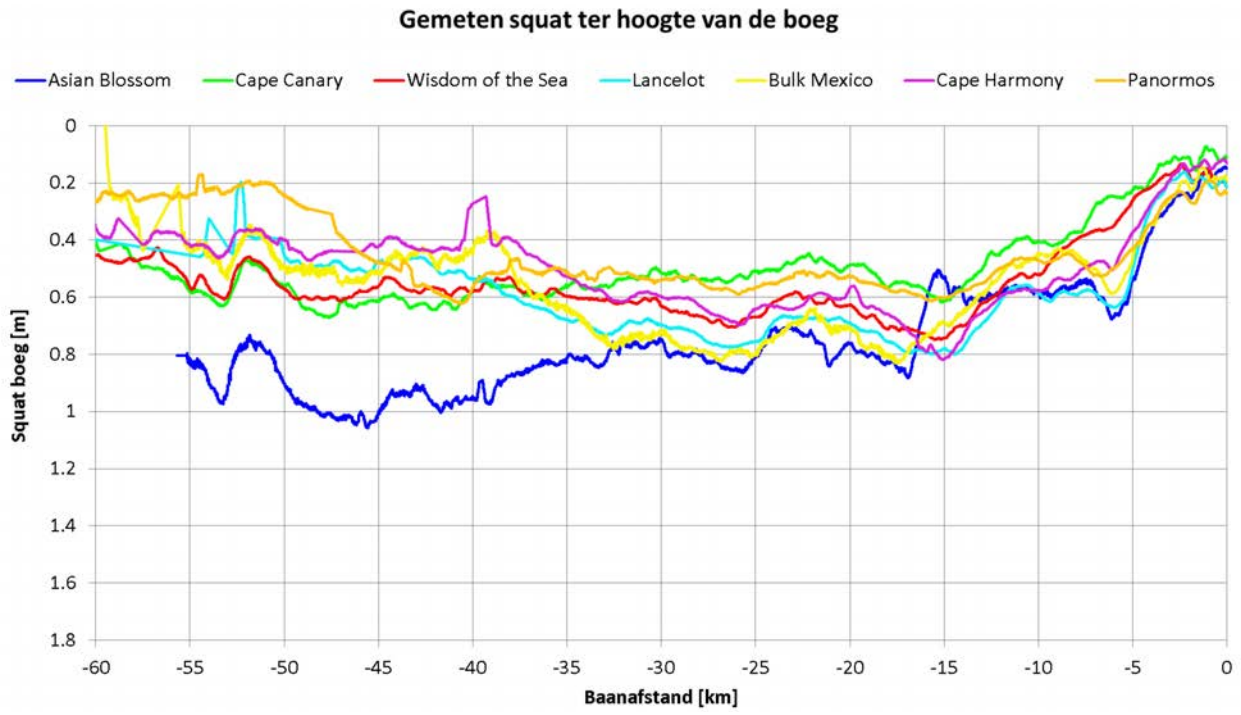


4.4 Squat

De squat van een schip wordt in de verwerking van de meetvaarten gedefinieerd als de stationaire verticale beweging in het symmetrievlak van het schip (zie §3.2.5). In Bijlage 1 worden de squatwaarden samen met de belangrijkste parameters weergegeven op pagina 3 van elk meetvaartrapport. In de rapporttekst worden enkel de resultaten voor de squat ter hoogte van de boeg gepresenteerd. Voor alle meetvaarten blijkt immers dat door squat het schip naar voor zal vertrimmen. Dit gold ook voor het schip Panormos, welke gekenmerkt werd door een statische vertrimming naar het hek.

De squat zoals bekomen voor de geanalyseerde meetvaarten wordt weergegeven in Figuur 52. Deze figuur toont aan dat de grootste squat gerealiseerd werd door het schip Asian Blossom en daarbij waarden groter dan 1.0 m aannam. Door vergelijking van Figuur 52 met eerder gepresenteerde grafieken kunnen er verschillende afhankelijkheden geïllustreerd worden. In eerste instantie echter werd per meetvaart beoordeeld of scheepsontmoetingen een impact hadden op de verticale bewegingen van het schip.

Figuur 52 – Squat ter hoogte van de boeg zoals bekomen op basis van de geanalyseerde meetvaarten



4.4.1 Invloed van scheepsinteractie

De studie had niet tot doel om de invloed van scheepsontmoetingen op squat te modelleren. Echter om de verstoring van het signaal door scheepsontmoetingen te begroten, was een analyse van de uitgevoerde ontmoetingen wel noodzakelijk. Bovendien geeft deze analyse inzicht in te verwachten bijkomende scheepsinzinking door scheepsontmoetingen, en kan aldus mogelijks richtinggevend zijn voor verder onderzoek.

Per meetvaart worden de relevante ontmoetingen in tabelvorm weergegeven in Bijlage 2. In de squat-grafieken in Bijlage 1 (pagina 3 van elk meetvaartrapport) wordt het tijdstip van de ontmoeting weergegeven door middel van een verticale blauwe lijn opdat de mogelijkse impact van de ontmoeting op de scheepsinzinking bepaald kan worden. Een meer gedetailleerd beeld van de scheepsontmoetingen (ook de niet relevante) kan bekomen worden door middel van de KMZ-bestand bijgevoegd bij dit rapport.

Asian Blossom

De opvaart op de Asian Blossom ging gepaard met vijf significante ontmoetingen. De belangrijkste ontmoeting werd uitgevoerd om 9h32 met het containerschip Pucon (304 m x 40 m x 11.8 m) dat aan 15.7 kn ontmoette op een passeerafstand gelijk aan 345 m. De ontmoeting vond plaats ter hoogte van de drempel W7. De squatgrafieken vertonen een beperkte toename in squat die mogelijks toegeschreven kan worden aan passage van het schip Pucon. De squatvariatie tijdens de ontmoeting is echter beperkt tot enkele centimeters. Ook voor de andere ontmoetingen werden geen noemenswaardige squatvariaties waargenomen onder invloed van de ontmoeting.

Cape Canary

Voor het schip Cape Canary werden er zes significante ontmoetingen waargenomen. Rekening houdend met de scheepsafmetingen, vaarsnelheden en passeerafstand, kan de ontmoeting met het schip NOCC Oceanic als het meest kritieke beschouwd worden. Deze ontmoeting vond om 11h22 plaats op een gelijkaardige locatie als de ontmoeting tussen Asian Blossom en Pucon. Het schip NOCC Oceanic (199 m x 32 m x 9.6 m) respecteerde tijdens de ontmoeting een vaarsnelheid gelijk aan 16.1 kn en passeerde de Cape Canary op 260 m afstand. De variaties in squat omstreeks 11h20 vertonen een duidelijke relatie met de verandering van kielspeling en vaarsnelheid en konden niet toegeschreven worden aan scheepsontmoetingen.

Wisdom of the Sea

Ook voor Wisdom of the Sea werden er zes significante ontmoetingen geregistreerd. De scheepsafmetingen, vaarsnelheden en passeerafstanden zijn echter allen minder kritiek dan deze waargenomen voor het schip Cape Canary. Ook de squatgrafieken vertonen geen variaties omstreeks de ontmoetingstijdstippen.

Lancelot

Een gelijkaardige conclusie geldt voor het schip Lancelot. Alle ontmoetingen gingen gepaard met gematigde condities en er kon geen impact op de squat waargenomen worden.

Bulk Mexico

Tijdens de opvaart van de Bulk Mexico werden er 11 significante ontmoetingen uitgevoerd. De ontmoetingen met twee relatief grote schepen om 18h37 (MSC Suez) en 18h48 (MV Dimitris Y) gaven geen aanleiding tot een waarneembare wijziging in squat. Om 19h14 werd een ontmoeting uitgevoerd met het kleinere Flevogracht (136 m x 20 m x 5.6 m). Dit schip liep de Bulk Mexico op op slechts 87 m aan een vaarsnelheid gelijk aan 16.7 kn. Dit oploopmanoeuvre lijkt aanleiding gegeven te hebben tot een beperkte squatvariatie (enkele centimeters) op de Bulk Mexico.

Cape Harmony

De opvaart op de Cape Harmony ging gepaard met één ontmoeting met een bovenmaats schip. Het betrof de ontmoeting met de Aida Prima (300 m x 48 m x 8.3 m) omstreeks 18h17 afwaarts VG3. De kwaliteit van het meetsysteem was op dat ogenblik onvoldoende om de squat te beoordelen. Rekening houdend met eerdere gelijkaardige ontmoetingen wordt er geen invloed op de squat verwacht.

Om 20h19 werd een ontmoeting uitgevoerd met de Glasgow Express (280 m x 32 m x 12.3 m) bij een passeerafstand gelijk aan 250 m. De vaarsnelheid van beide schepen bedroeg meer dan 11 kn. Deze ontmoeting is waarneembaar in de squat resultaten maar wederom zijn de variaties beperkt tot maximaal enkele centimeters.

Panormos

Wanneer de ontmoetingen van de zeven meetvaarten beschouwd worden, dan blijkt de belangrijkste ontmoeting waargenomen tijdens de meetvaart op Panormos. Om 0h42 werd hierbij het containerschip MSC Matilde (294 m x 32 m x 10.6 m) ontmoet. Panormos voer op dat ogenblik aan een snelheid over de grond gelijk aan 11.8 kn, terwijl de snelheid van MSC Matilde, 15.1 kn bedroeg. De passeerafstand tussen beide schepen bedroeg 211 m. Deze ontmoeting lijkt waarneembaar in de gemeten squat aan de boeg. De grootte van de squatverandering ten gevolge van de ontmoeting blijkt echter beperkt tot ca. 0.03 m.

Samenvatting

Voor geen van de meetvaarten kon er een noemenswaardige squatvariatie waargenomen worden onder invloed van de ontmoeting met andere scheepvaart. Enkele ontmoetingen tonen een beperkte variatie (ordegrootte centimeters) die echter buiten de nauwkeurigheid van de verwerkingsmethode vallen. Er werd bij de bepaling van de squatmodellering bijgevolg geen rekening gehouden met variaties ten gevolge van ander scheepvaartverkeer.

4.4.2 Invloed van vaarsnelheid

De vaarsnelheid (zie Figuur 48) heeft een belangrijke invloed op squat. Voor een gegeven vaarwegprofiel zal de squat meer dan kwadratisch toenemen met de vaarsnelheid. De hoogste vaarsnelheden door het water (12 kn) werden gehanteerd door de Asian Blossom. Figuur 52 toont aan dat de hoogste vaarsnelheden eveneens gepaard gingen met de grootste squatwaarden (1.05 m).

Een sprekend voorbeeld van de relatie tussen vaarsnelheid en squat betreft de snelheidsreductie tussen baanafstand -17 km en -15 km toegepast door de Asian Blossom. De oorspronkelijke vaarsnelheid bedroeg 11 kn en gaf aanleiding tot een squat ter hoogte van de boeg gelijk aan 0.85 m. Een afname van de vaarsnelheid tot 8 kn resulteerde in een squatvermindering tot 0.5 m. Door een verdieping van de vaarweg gaf de daaropvolgende toename van de vaarsnelheid tot 10 kn slechts aanleiding tot een beperkte toename van de squat tot 0.6 m.

Ook de snelheidsreductie bij het naderen van Vlissingen-Sloehaven toont duidelijk de invloed van vaarsnelheid op squat. Bij vaarsnelheden kleiner dan 6 kn toegepast in de haven, blijkt de squat nog maximaal 0.2 m te bedragen.

Ook toont de vergelijking van verschillende meetvaarten onderling de grote invloed van vaarsnelheid op de squat ter hoogte van de boeg. Zo blijken in Scheur-Oost en Wielingen de hoogste vaarsnelheden veelal gepaard te gaan met de hoogste squatwaarden. Opvallend hierbij zijn echter de lage squatwaarden voor de schepen Cape Canary en Cape Harmony vergeleken met de andere meetvaarten. Zo blijkt in de Wielingen de squat van Cape Canary opvallend lager dan van Wisdom of the Sea ondanks gelijkaardige snelheden, en blijkt de squat van Cape Harmony gelijk aan deze van Wisdom of the Sea terwijl Cape Harmony significant hogere vaarsnelheiden hanteerde.

De vaststelling betreffende de significant lagere squatwaarden aan de boeg van de schepen Cape Canary en Cape Harmony ten opzichte van de andere meetvaarten is opvallend. Dit wordt nog beter geïllustreerd wanneer de squatmetingen in H5 vergeleken worden met verschillende squatformules. De kleinere squat aan de boeg gemeten bij het schip Cape Canary wordt toegeschreven aan de boegvorm van dit schip. Op basis van op het internet beschikbaar fotomateriaal van de geanalyseerde schepen, kon immers vastgesteld worden dat het schip Cape Canary het enige schip was zonder bulb. De bulb zal bij operationele snelheden een golfdal veroorzaken ter hoogte van de boeg. Het is bijgevolg plausibel dat de aanwezigheid van de bulb een toename van de squat aan de boeg zal veroorzaken. De afwezigheid van een bulb bij het schip Cape Canary wordt geacht verantwoordelijk te zijn voor de kleinere squat van de boeg van dit schip. Een gelijkaardige opmerking kan gemaakt worden voor Cape Harmony. Hoewel fotomateriaal illustreert dat dit schip wel voorzien is van een bulb, blijkt deze minder uitgesproken dan bij de andere schepen met bulb.

4.4.3 Invloed van kielspeling en blockage

De invloed van de beschikbare vaarwegsectie op de squat werd gemodelleerd op basis van de waterdiepte (zie Figuur 49) en de blockage (zie Figuur 50). Ook voor deze parameters blijkt de invloed op de squat duidelijk op basis van de geanalyseerde metingen.

Een eerste illustratie betreft het traject tussen VG3 en VG5 (baanafstand -55.8 km tot -49.8 km) dat gekenmerkt wordt door een lokale verdieping van de vaarweg. Bij een constante vaarsnelheid blijkt een verdieping van de vaarweg overeenkomstig een kielspeling van initieel 23% naar meer dan 55% aanleiding te geven tot een evolutie van de squat ter hoogte van de boeg van initieel 1.0 m naar 0.75 m (voorbeeld Asian Blossom).

Een andere illustratie betreft de vaarwegondiepte ter hoogte van baanafstand -15.0 km. Voor drie van de zeven meetvaarten (Wisdom of the Sea, Lancelot en Cape Harmony) wordt op deze locatie de grootste squatwaarde waargenomen. Niet toevallig betreffen het de drie meetvaarten die gepaard gingen met het laagste Hoog Water en bijgevolg met de kleinste kielspelingen. Zo blijkt de meetvaart op het schip Bulk Mexico (uitgevoerd bij hoge waterstanden) aanleiding te geven tot kielspelingen gelijk aan ca. 20% terwijl voor de schepen Lancelot en Cape Harmony de kielspeling 17% bedroeg en voor de Wisdom of the Sea 16%. Zo geldt op deze locatie dat de vaarsnelheid gehanteerd door Bulk Mexico (10.3 kn) hoger was dan deze toegepast door de Wisdom of the Sea (9.4 kn), maar dat door de kleinere kielspeling voor de Wisdom of the Sea de squat van dit schip 0.04 m groter was dan voor de Bulk Mexico.

Ook ter hoogte van de drempel van Vlissingen (baanafstand -6 km) blijkt een lokale vaarwegondiepte aanleiding te geven tot een toename van de squat ter hoogte van de boeg.

4.5 Totale verticale beweging en kielspelingen

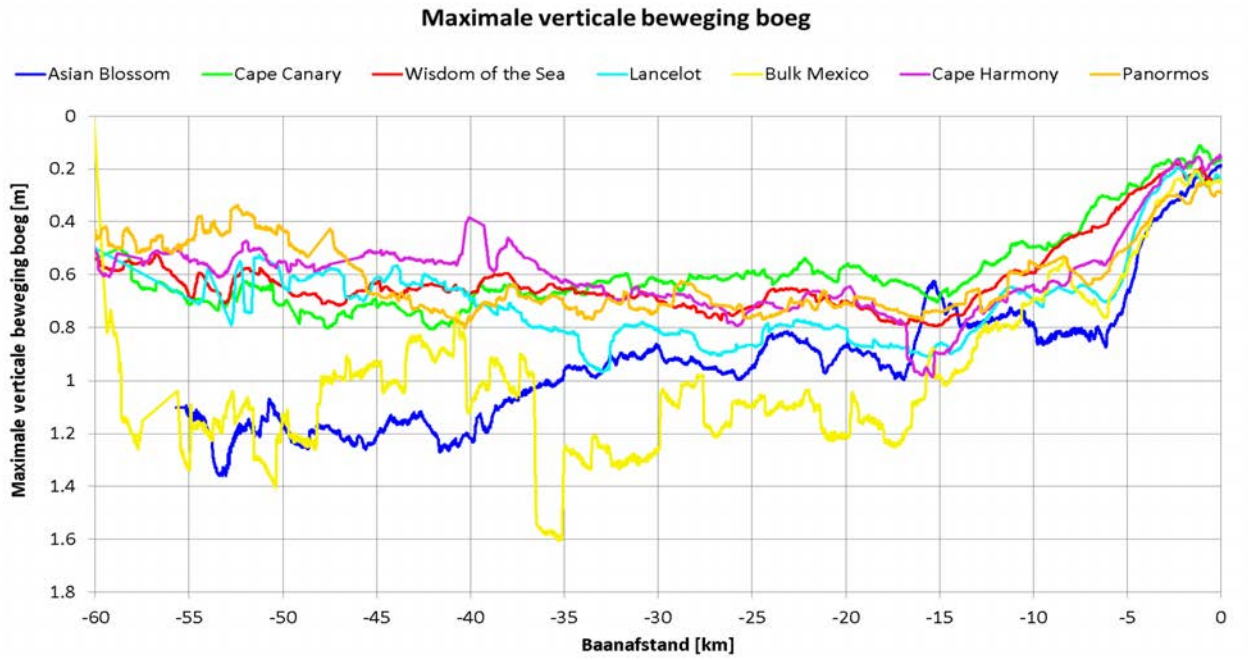
Bij de berekening van een probabilistisch criterium zoals de kans op bodemraking dient de totale verticale beweging beschouwd te worden in combinatie met de beschikbare kielspeling.

4.5.1 Totale verticale beweging

De totale verticale beweging werd berekend volgens de methodiek gepresenteerd in §3.2.5.3. De totale verticale beweging betreft de som van de dynamische verticale beweging (zie §4.3) en de squat (zie §4.4).

Voor de zeven uitgevoerde meetvaarten bleken de grootste verticale bewegingen op te treden voor de schepen Asian Blossom (squat gedreven door hoge vaarsnelheden) en Bulk Mexico (dynamische bewegingen onder invloed van deiningsgolven). De maximale magnitude die hierbij opgemeten werd betrof 1.6 m (Bulk Mexico) en stemt overeen met ca. 10% van de scheepsdiepgang van het onderzochte schip. Hierbij dient genuanceerd te worden dat de maximale dynamische scheepsbewegingen en de maximale squat niet op hetzelfde ogenblik optraden. De maximale dynamische scheepsbeweging waargenomen over de zeven meetvaarten bedroeg ca. 1.0 m (zie Figuur 51), terwijl de maximale opgemeten squat 1.03 m bedroeg (zie Figuur 52).

Figuur 53 – Maximale verticale beweging van de boeg, afgeleid uit de geanalyseerde meetvaarten

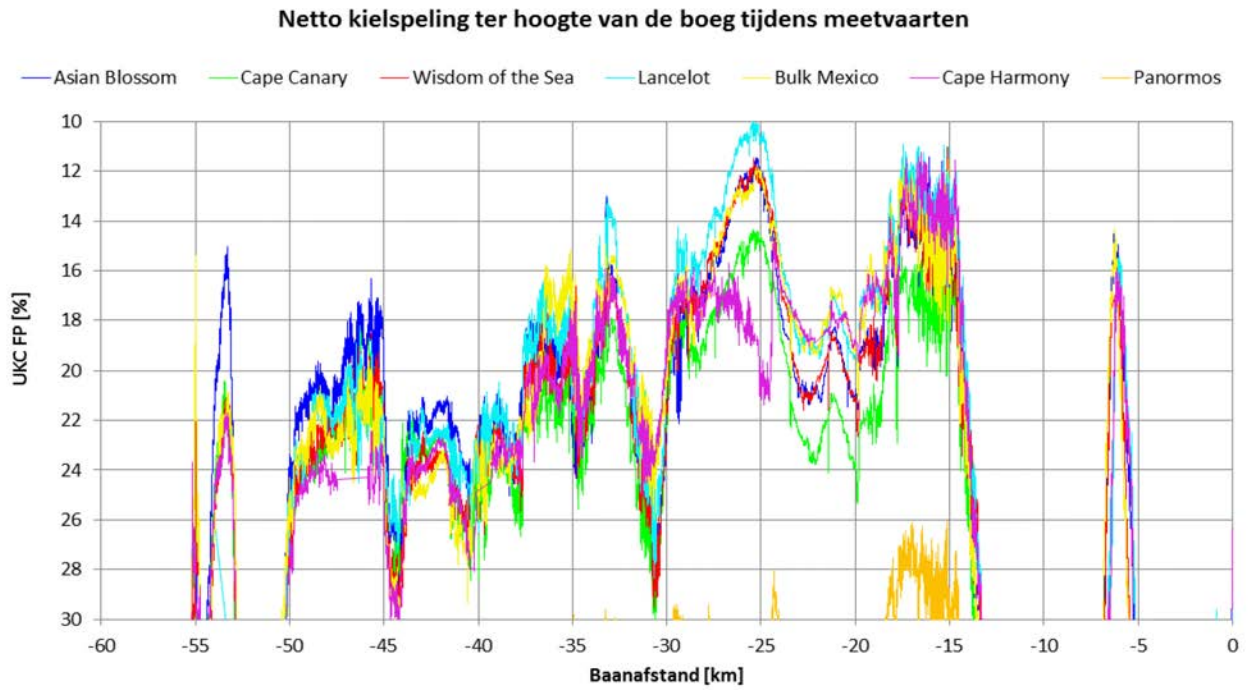


4.5.2 Kielspelingen (Netto)

In §4.5.1 werd aangetoond dat de grootste verticale beweging opgemeten tijdens de zeven meetvaarten gelijk was aan 10% van de scheepsdiepgang. Tijdens de meetvaarten echter was de beschikbare kielspeling (zie Figuur 49) over het algemeen groter dan de minimaal vereiste kielspeling op het zeetraject (15%).

Om een beter inzicht te bekomen in de veiligheidsmarges met betrekking tot bodemraking worden in Figuur 54 de netto kielspelingen ter hoogte van de boeg weergegeven welke overgehouden werden wanneer de bruto kielspelingen (zie Figuur 49) verminderd werden met de totale verticale beweging (zie Figuur 53).

Figuur 54 – Netto kielspelingen ter hoogte van de boeg op basis van de maximale totale verticale beweging voor de geanalyseerde meetvaarten



4.6 Nauwkeurigheid

Bij het uitvoeren van metingen is de bepaling van de nauwkeurigheid (of fout) van de meting een belangrijk gegeven. Voor de squatmeting gelden onderstaande parameters als mogelijke oorzaken van onnauwkeurigheid:

- onnauwkeurigheid van de verticale positiemeting Nederlands Loodswezen:
  - tijdens de statische meting;
  - tijdens het vaartraject;
- onnauwkeurigheid van de tijberekening:
  - tijdens de statische meting;
  - tijdens het vaartraject.

Op basis van de informatie aangeleverd door het Nederlands Loodswezen en de technische mogelijkheden van RTK-GPS antennes wordt de nauwkeurigheid van de verticale positiemeting gelijk aan 0.03 m verondersteld. De nauwkeurigheid van de waterstandsberekening is moeilijker te bepalen maar wordt op basis van de bekomen correctiefactoren (zie §3.2.2.2) geschat op 0.05 m.

5 Squatmodellering

Het eindproduct van de studie betreft een squatformule die zo goed als mogelijk de maximale squat van een cape size bulkcarrier met diepgang 16.5 m in opvaart naar Vlissingen-Sloehaven modelleert. Hiervoor worden in eerste instantie enkele formules gepresenteerd welke geschikt geacht worden om de squat aan de boeg van een vol schip te modelleren.

5.1 Formules

In 2007 werd door UGent in opdracht van WL in het kader van een toegankelijkheidsstudie tot de haven van Antwerpen voor ULCS[18] een squatmodellering afgeleid en gerapporteerd in (Verwilligen *et al.*, 2007) en (Eloot *et al.*, 2008). De modellering Verwilligen *et al.* (2007) neemt onderstaande factoren in rekening bij de berekening van squat:

- schip:
  - diepgang;
  - scheepsvorm;
- operationeel:
  - langse vaarsnelheid;
- omgeving
  - waterdiepte;
  - vaarwegsectie.

Daar containerschepen in tegenstelling tot bulkcarriers in ondiep water een maximale inzinking ter hoogte van het achterschip vertonen werd de squatmodellering gebaseerd op een voorspellingsmodel voor de inzinking achteraan en voor de vertrimming ten gevolg van squat.

5.1.1 Formule 1: Verwilligen *et al.* (2007)

De eerste formule welke toegepast werd voor de modellering van de squat aan de boeg van een bulk carrier werd ontleend aan Verwilligen *et al.* (2007). De basis van deze squatmodellering betreft het Froude-getal aangepast aan een scheepsafhankelijke (k_s) en blockage (k_m) afhankelijke parameter.

Het Froude-getal beschrijft de verhouding van de vaarsnelheid ten opzichte van de kritische snelheid van een schip in een vaarwegsectie. De blockage werd hierbij gedefinieerd als de verhouding van de midscheepse dwarssectie van het schip en de vaarwegsectie waarin gevaren werd (zie §3.2.3.5).

In de squatmodellering Verwilligen *et al.* (2007) wordt de kritische snelheid van een schip in een vaarweg berekend als:

$$V_{crit,schip} = \sqrt{k_m \cdot k_s \cdot g \cdot h} \tag{14}$$

$$k_m = \left[2 \cdot \sin\left(\frac{\mathrm{Arcsin}(1-m)}{3} \right) \right]^3 \tag{15}$$

$$k_s = C_i + \frac{T}{B} \cdot C_{i+1} \tag{16}$$

[18] ULCS: Ultra Large Container Ships

Waarbij:

- $V_{crit,\ schip}$ kritische snelheid van het schip (14) [m/s];
- g gravitatieversnelling (9.81 m/s²);
- k_m blockage afhankelijke correctiecoëfficiënt (15) [-];
- k_s scheepsafhankelijke correctiecoëfficiënt (16) [-];
- m blockage (7) [-];
- C_x twee regressiecoëfficiënten die de scheepsafhankelijkheid van de kritische snelheid in rekening brengen (verschillend voor de modellering van inzinking en trim) [-].

De Froude-getallen waarop de squatmodellering Verwilligen *et al.* (2007) gebaseerd werd, werd bekomen als:

$$Fr_h = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \tag{17}$$

$$Fr_m = \frac{V}{\sqrt{k_m \cdot g \cdot h}} \tag{18}$$

$$Fr_{ms} = \frac{V}{V_{Crit}} = \frac{V}{\sqrt{k_m \cdot \left(C_i + \frac{T}{B} \cdot C_{i+1} \right) \cdot g \cdot h}} \tag{19}$$

Waarbij:

- Fr_h Froudegetal op basis van waterdiepte (5) [-];
- V vaarsnelheid door het water [m/s];
- Fr_m Froudegetal op basis van waterdiepte aangepast aan blockage (18) [-];
- Fr_{ms} Froudegetal op basis van waterdiepte aangepast aan blockage en scheepsvorm (19) [-];

De formule Verwilligen *et al.* (2007) voor de maximale inzinking heeft de onderstaande vorm:

$$\frac{z}{T_{ref}} = \left[\left(C_{S1} \cdot \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{ref}} \right) + C_{S2} \right) \cdot \frac{T}{h} + C_{S3} \cdot \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{ref}} \right) + C_{S4} \right] \cdot \frac{\frac{Fr_m^2}{C_{S5} + \frac{T}{B} \cdot C_{S6}}}{\sqrt{1 - \frac{Fr_m^2}{C_{S5} + \frac{T}{B} \cdot C_{S6}}}} \tag{20}$$

Waarbij:

- z inzinking ter hoogte van de voorloodlijn of ter hoogte van de achterloodlijn [m];
- T_{ref} referentiediepgang (16.5 m) [m];
- C_{Sx} (x=1,…,6) zes regressiecoëfficiënten voor inzinking [-].

De squatformule welke bekomen dient te worden in studie 13_059 is beperkt tot cape size bulkcarriers met diepgang 16.5 m. De afhankelijkheid van diepgang kan bijgevolg uit de formule verwijderd worden waardoor (20) herschreven wordt tot Formule 1:

$$z = \left[C_{S1} \cdot \frac{T}{h} + C_{S2} \right] \cdot \frac{\frac{Fr_m^2}{C_{S3}}}{\sqrt{1 - \frac{Fr_m^2}{C_{S3}}}} \tag{21}$$

of

$$z = \left[C_{S1} \cdot \frac{T}{h} + C_{S2} \right] \cdot \frac{\left(\frac{u}{\sqrt{k_m \cdot C_{S3} \cdot g \cdot h}} \right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{\sqrt{k_m \cdot C_{S3} \cdot g \cdot h}} \right)^2}} \tag{22}$$

Formule 1 betreft een squatmodellering gebaseerd op slechts drie coëfficiënten.

5.1.2 Formule 2: Optimalisatie kielspeling

Op basis van de uitgevoerde meetvaarten bleek de inzinking een bepalende factor voor squat aan de boeg. Hoewel de kielspeling reeds meegenomen werd in Formule 1 (21), werd het nuttig geacht om de meerwaarde van een tweede gelijkaardige formule toe te passen welke een betere regressie van de kielspelingsimpact mogelijk maakte. In overeenstemming met de modellering van manoeuvreergedrag in functie van de kielspeling, werd in Formule 2 de kielspeling gerepresenteerd door middel van de verhouding van de diepgang tot de kielspeling:

$$z = \left[C_{S1} + C_{S2} \cdot \left(\frac{T}{h - T} \right)^{C_{S3}} \right] \cdot \frac{\frac{Fr_m^2}{C_{S4}}}{\sqrt{1 - \frac{Fr_m^2}{C_{S4}}}} \tag{23}$$

Formule 2 betreft een squatmodellering gebaseerd op vier coëfficiënten.

5.1.3 Formule 3: Vereenvoudigde formule

In §4.2.2 werd aangetoond dat de variatie van de blockage op het zeetraject erg beperkt was. Bovendien gaat de berekening van de blockage gepaard met een grotere complexiteit dan de berekening van de andere bepalende parameters. Bijgevolg werd er voor meer algemene toepassing (bijvoorbeeld in het DKS-rekenhart) een vereenvoudigde formule gemodelleerd. In Formule 3 werd uitgegaan van de kwadratische relatie tussen de squat en de vaarsnelheid door het water:

$$z = \left[C_{S0} + C_{S1} \cdot \left(\frac{T}{h - T} \right)^{C_{S2}} \right] \cdot V^2 \tag{24}$$

Bijkomend voordeel van de vereenvoudigde formule betreft dat deze formule gesplitst kan worden in twee termen welke de squat van het schip in open water (C_{S0}) en de bijkomende squat ten gevolge van ondiep water (C_{S1} en C_{S2}) modelleren. Belangrijk nadeel aan Formule 3 is dat deze niet geldig is in beperkte vaarwegen maar enkel in open water. Hierbij wordt open water gedefinieerd als een vaarweg breder dan de invloedsbreedte rond het schip (6).

5.2 Regressie op basis van sleeptankproeven

Door middel van regressie worden de coëfficiënten overeenkomstig de drie formules bepaald op basis van verschillende brongegevens. Een eerste verzameling squatgegevens betreffen de metingen van de squat aan de boeg uitgevoerd tijdens sleeptankproeven (zie H2). Het betroffen de resultaten van 80 stationaire en 748 multimodale sleeptankcondities (zie §2.2.1).

De kwaliteit van de regressieresultaten wordt gerapporteerd door middel van een vergelijking tussen de meetwaarden welke als input dienden voor de regressie en de resultaten bekomen door toepassing van de regressiecoëfficiënten in de formule (modelresultaten). Deze overeenstemming wordt gerapporteerd door middel van:

- Een grafiek die de meetwaarden en de modelresultaten ten opzichte van elkaar weergeeft
- De R^2-waarde als maat voor de afwijking tussen model en meting;
- De helling (a) van de lineaire trendlijn tussen model en meting. Indien deze helling meer dan 1 bedraagt dan worden de meetresultaten gemiddeld overschat door het model, indien de helling minder dan 1 bedraagt dan zal het model de meetresultaten gemiddeld onderschatten.

Voor de drie onderzochte formules worden de regressieresultaten op basis van sleeptankproeven weergegeven in Figuur 55 en Tabel 18. De kwaliteit van Formule 1 en Formule 2 blijkt identiek, terwijl Formule 3 een kleinere R^2-waarde vertoont. Op basis van de helling a (zie Tabel 18) blijkt Formule 1 gemiddeld een grotere squat te vertonen dan Formule 2.

De overeenkomst tussen de regressieformules en de squat gemeten tijdens sleeptankproeven, wordt verder geïllustreerd in de figuren 56 tot 58 waarin de modelresultaten weergegeven worden ten opzichte van de resultaten van stationaire sleeptankproeven. In Figuur 59 worden de resultaten van de drie formules onderling vergeleken.

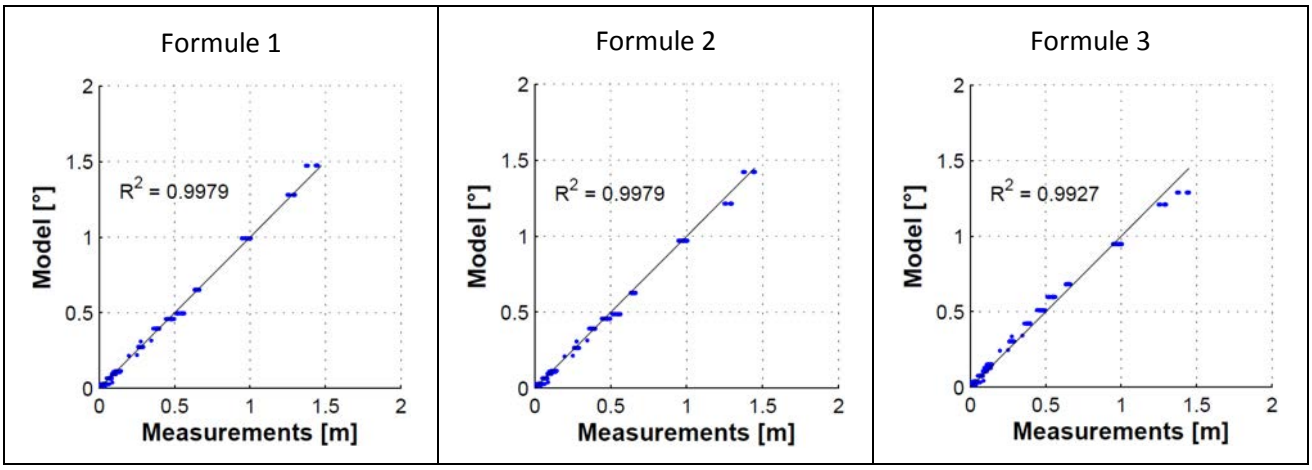
Algemeen kan gesteld worden dat:

- Formule 1 en Formule 2 aanleiding geven tot erg gelijkaardige squatresultaten bij kielspelingen kleiner dan 40%;
- De overeenstemming met sleeptankproeven het minst is voor de modellering op basis van Formule 3;
- Formule 3 bij de kielspelingen lager dan 20% aanleiding geeft tot grotere squatwaarden dan Formule 1 en 2 bij de vaarsnelheden waargenomen tijdens de meetvaarten.

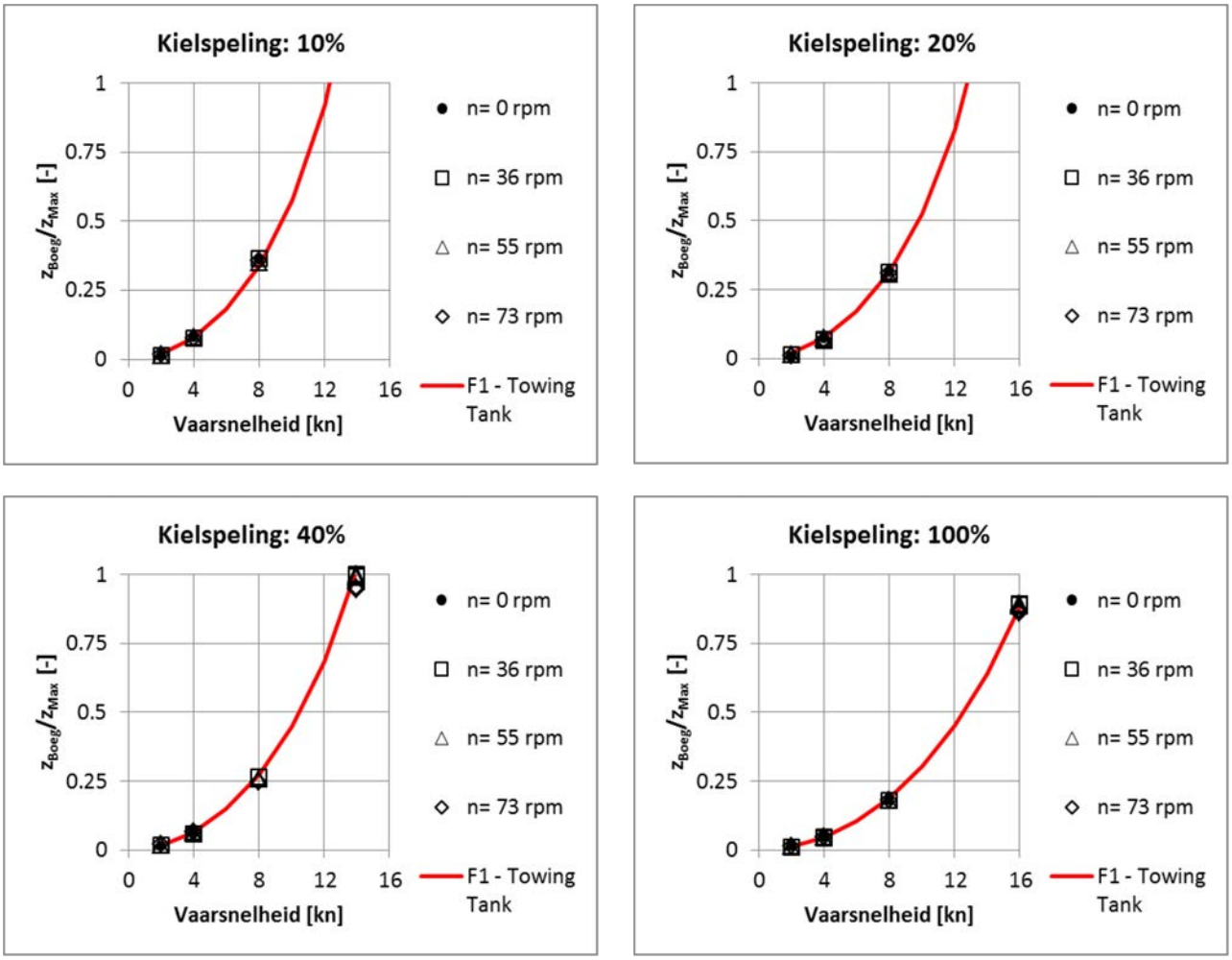
Tabel 18 – Regressieresultaten squat aan boeg op basis van sleeptankproeven

	R^2	a
Formule 1	0.9979	1.0015
Formule 2	0.9979	0.9738
Formule 3	0.9927	0.9963

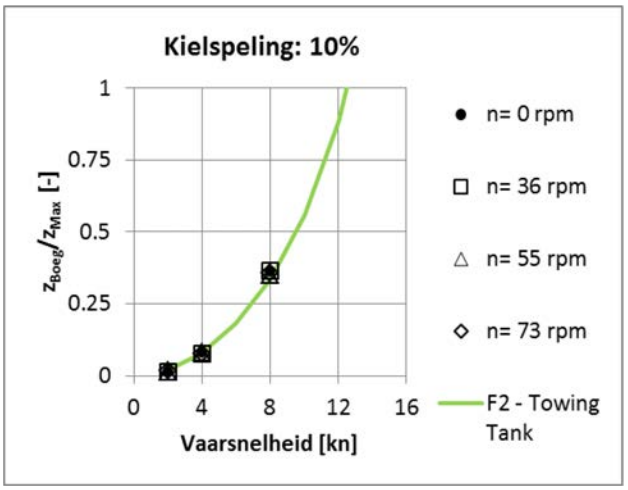
Figuur 55 – Kwaliteit regressie squat aan boeg op basis van sleeptankproeven

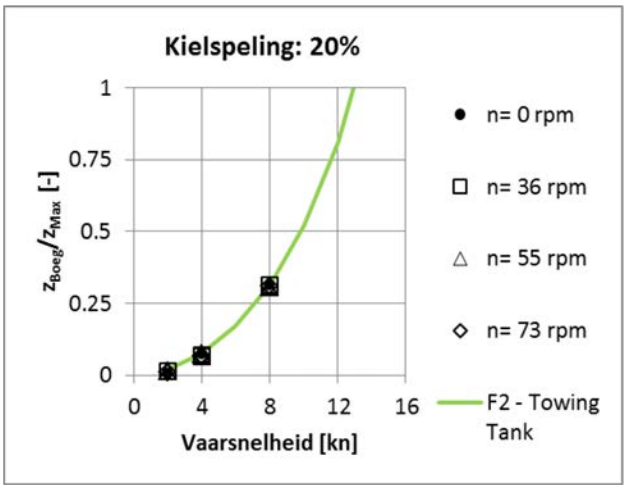


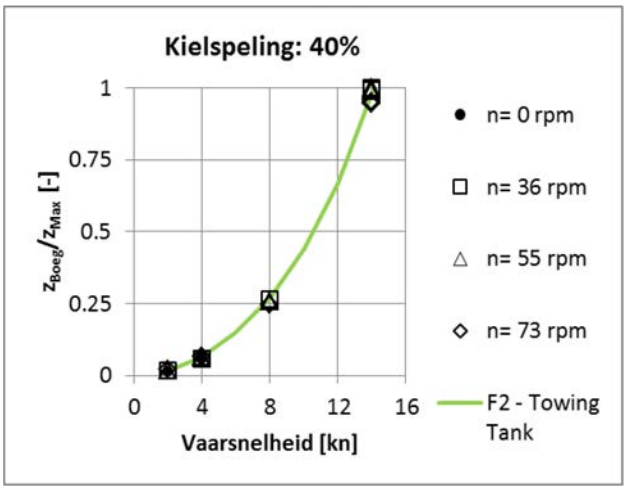
Figuur 56 – Regressiemodel Formule 1 op basis van sleeptankproeven vergeleken met stationaire sleeptankresultaten

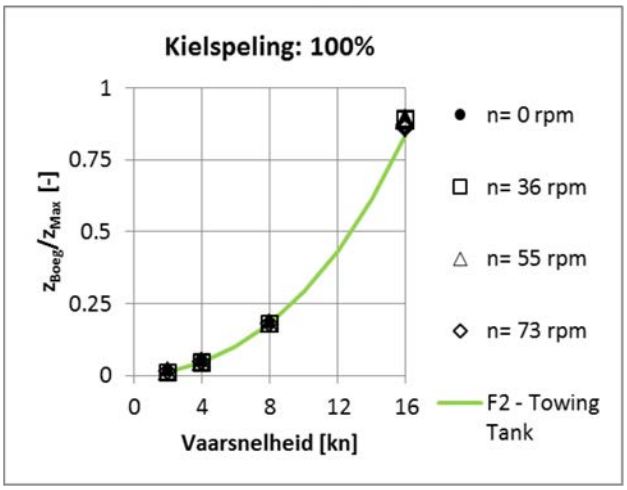


Figuur 57 – Regressiemodel Formule 2 op basis van sleeptankproeven vergeleken met stationaire sleeptankresultaten

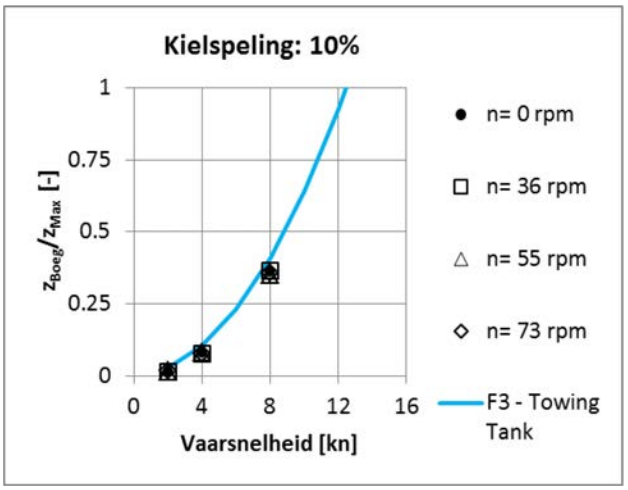


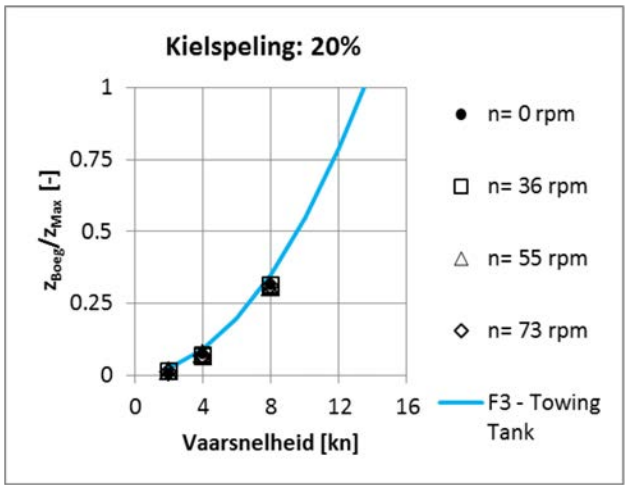


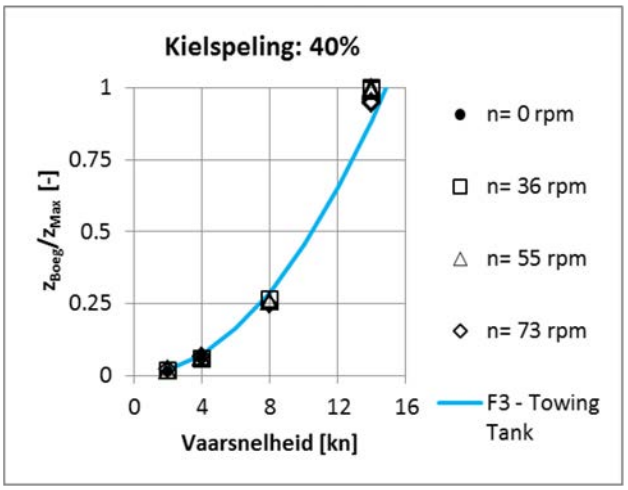


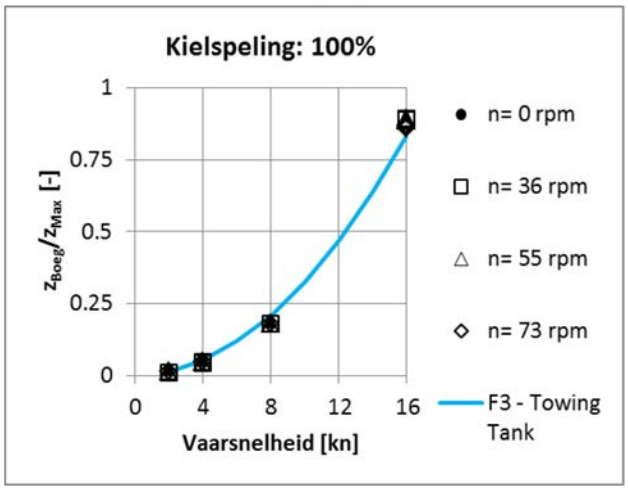


Figuur 58 – Regressiemodel Formule 3 op basis van sleeptankproeven vergeleken met stationaire sleeptankresultaten

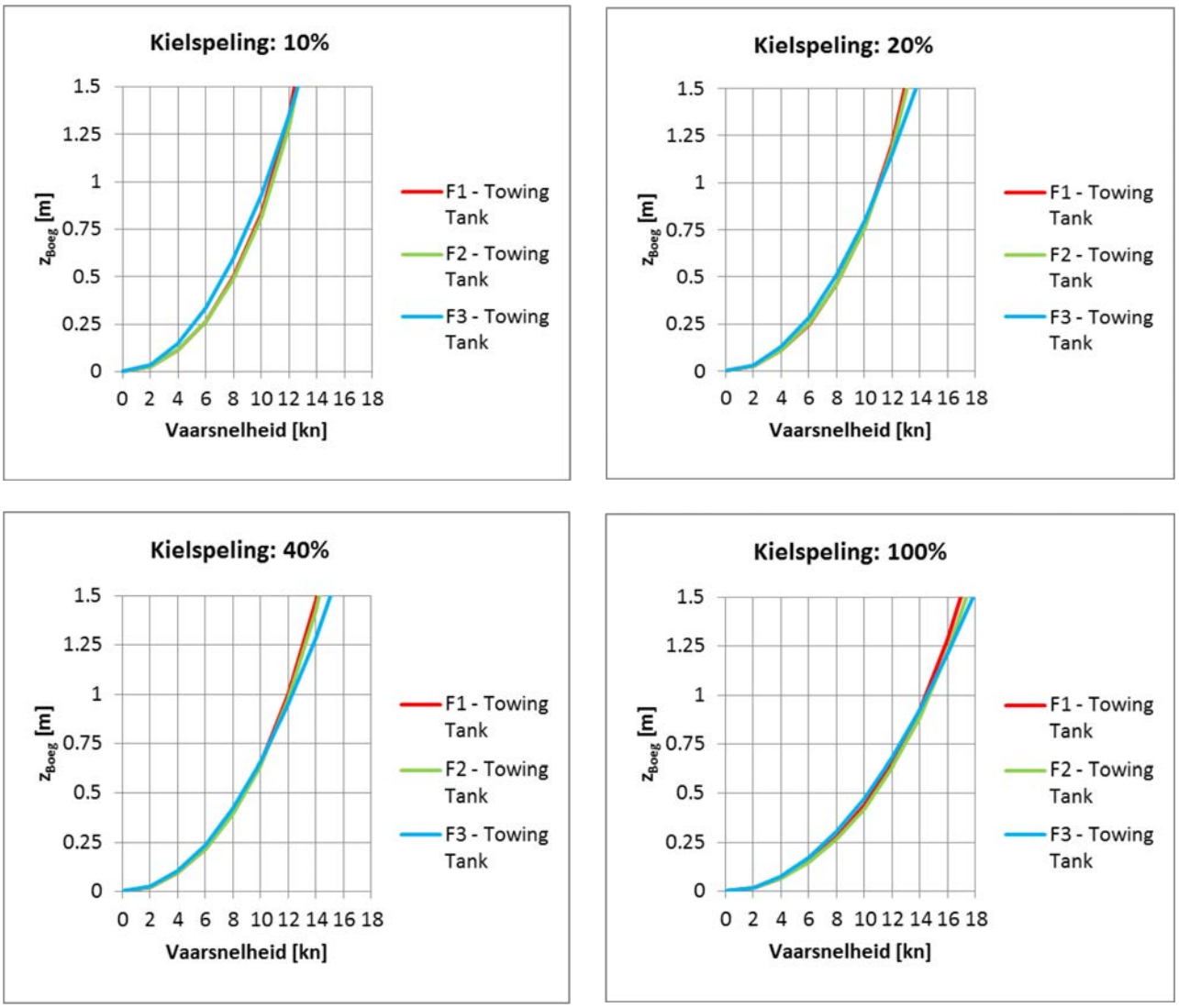








Figuur 59 – Vergelijking tussen drie regressiemodellen op basis van sleeptankproeven



5.3 Regressie op basis van waregroottemetingen

Ook de squat ter hoogte van de boeg zoals bekomen op basis van de meetvaarten kan samen met de parameters vereist voor de modellering als input dienen voor een regressie van de coëfficiënten.

Bij het selecteren van de meetgegevens welke als input dienden voor de regressie, werden onderstaande data uitgesloten:

- De meetvaart uitgevoerd op Cape Canary wegens de afwijkende boegvorm en de daaruit volgende kleinere squatwaarden;
- De meetvaart uitgevoerd op Cape Harmony wegens de afwijkende resultaten (kleinere squat) vergeleken met de andere meetvaarten (vermoedelijk eveneens wegens afwijkende boegvorm);
- De meetvaart uitgevoerd op Panormos door de afwijkende diepgangen en vertrimming ten opzichte van het vooropgestelde squatmodel voor een gelijklastige cape size bulkcarrier met 16.5 m diepgang.
- De squatresultaten in de haven, daar deze niet relevant zijn wegens de lage waarden en de lage vaarsnelheden;
- De squatresultaten afwaarts baanafstand -60 km, daar deze zich buiten het studiegebied bevinden.

Wanneer toegepast als input voor de regressie werden de kielspeling en de blockage herrekend als de respectievelijk minimale en maximale aanwezig onder de volledige lengte van het schip[19].

Door uitsluiting van bovenstaande data werden vijf verzamelingen van brongegevens uit meetvaarten geselecteerd voor het uitvoeren van de regressieanalyses:

- Resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Asian Blossom;
- Resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Wisdom of the Sea;
- Resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Lancelot;
- Resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Bulk Mexico;
- Resultaten bekomen voor de meetvaarten op de vier hoger vermelde schepen.

De resultaten van de regressie van de onderzochte formules op basis van de bovenvermelde brongegevens worden weergegeven in Tabel 19. Hieruit blijkt dat de overeenstemming tussen het model en de brondata het beste was voor de regressie op basis van de Asian Blossom en de minst gunstige overeenstemming vertoonde voor de meetvaart Lancelot. Verder is opvallend dat voor drie van de vier toegepaste meetvaarten (uitzondering is Bulk Mexico) de beste overeenstemming bekomen wordt door middel van Formule 3.

In Figuur 60 worden de resultaten van de drie voorgestelde squatformules weergegeven voor regressiecoëfficiënten conform de resultaten van de vier geselecteerde meetvaarten. Uit deze figuur blijkt het verwaarloosbare verschil tussen de resultaten voor Formule 1 en Formule 2 wanneer de regressie gevoed werd met de data van de vier meetvaarten. Ook de overeenstemming met Formule 3 is relatief groot.

In Figuren 61 tot 63 worden per formule de resultaten weergegeven overeenkomstig regressiecoëfficiënten bepaald op basis van sleeptankmetingen en waregroottegegevens. Uit deze figuren blijkt dat:

- ongeacht de brongegevens toegepast voor de regressie middels Formule 1 de resultaten weinig variatie vertonen. Deze variatie is opmerkelijk groter bij voor Formule 2 en 3;
- de regressie voor Formule 2 een ongunstig resultaat vertoont wanneer de meetgegevens van Lancelot toegepast worden voor de regressie. De aldus bekomen formule blijkt niet toepasbaar bij snelheden groter dan 14 kn[20];

[19] Voor de output van kielspeling en blockage weergegeven in Bijlage 1 worden de lokale resultaten ter hoogte van respectievelijk boeg/achterschip en midscheeps weergegeven.

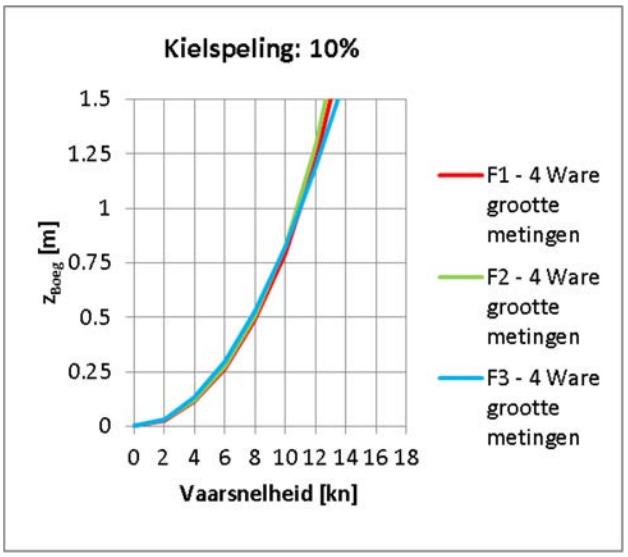
[20] Deze snelheid valt mogelijks buiten het realistische snelheidsbereik van de studieschepen. Echter voor toepassing in een toegankelijkheidsberekening wordt een robuuste formule vooropgesteld.

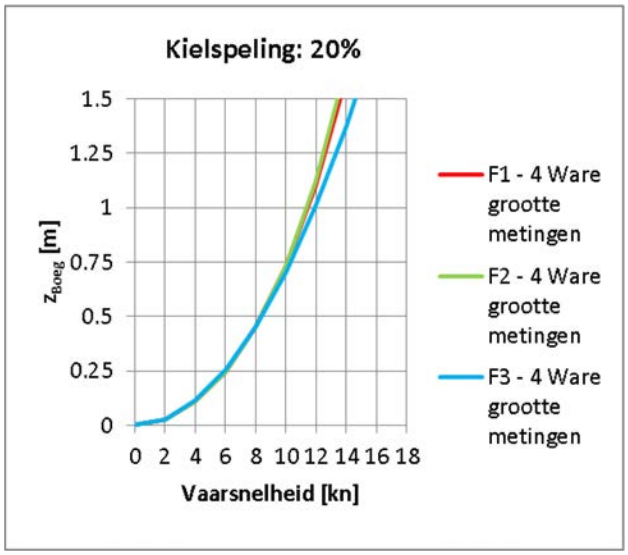
- voor Formule 1 en Formule 3 worden binnen het relevante kielspelingsbereik (<40%) de grootste squatwaarden bekomen indien de sleeptankdata toegepast werden als input voor de regressie.

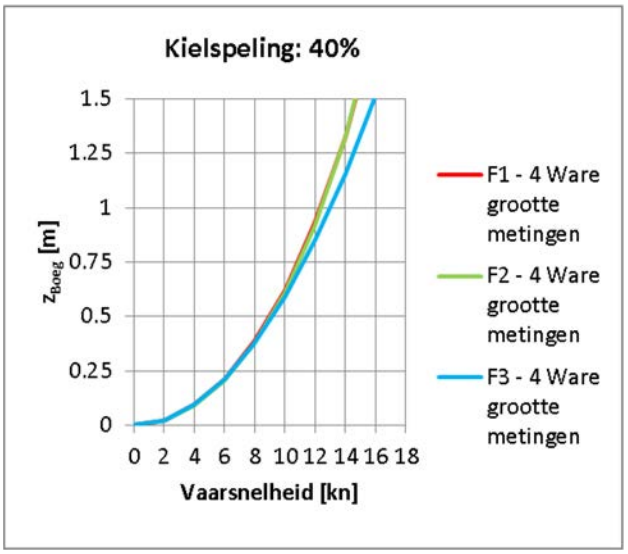
Tabel 19 – Regressieresultaten squat aan boeg op basis van waregroottemetingen

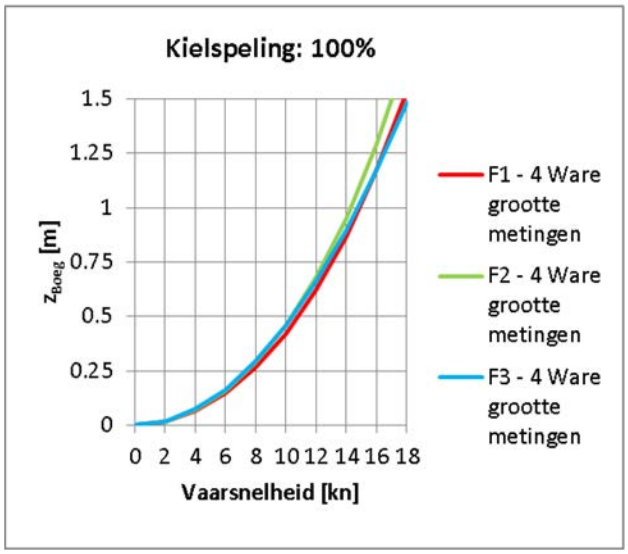
Input gegevens voor regressie	Regressie Formule	R^2	a
Asian Blossom	Formule 1	0.97211	0.994703
	Formule 2	0.968129	0.996367
	Formule 3	0.979815	0.99809
Wisdom of the Sea	Formule 1	0.943123	0.993936
	Formule 2	0.94051	0.991163
	Formule 3	0.960123	0.996474
Lancelot	Formule 1	0.963514	0.996518
	Formule 2	0.965375	0.995104
	Formule 3	0.969878	0.997147
Bulk Mexico	Formule 1	0.952351	0.995584
	Formule 2	0.953961	0.993595
	Formule 3	0.95865	0.996601
4 metingen	Formule 1	0.948792	0.994643
	Formule 2	0.952627	0.992311
	Formule 3	0.956609	0.995384

Figuur 60 – Vergelijking tussen drie regressiemodellen op basis van vier meetvaarten

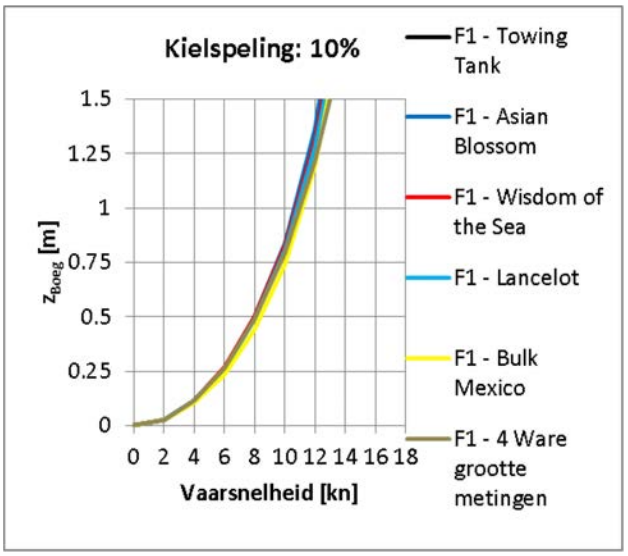


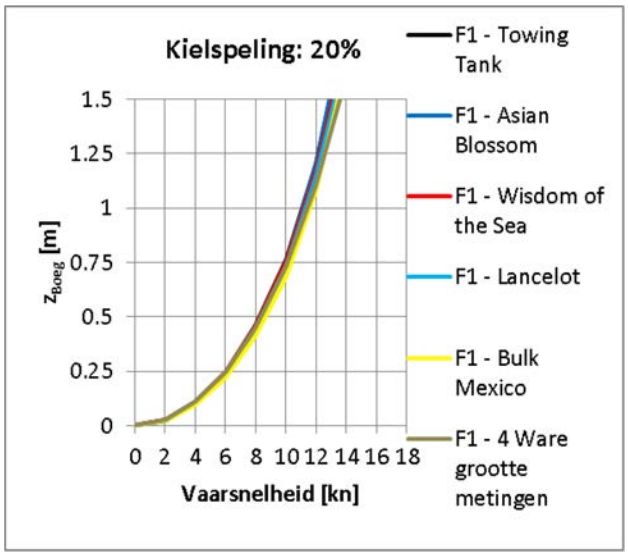


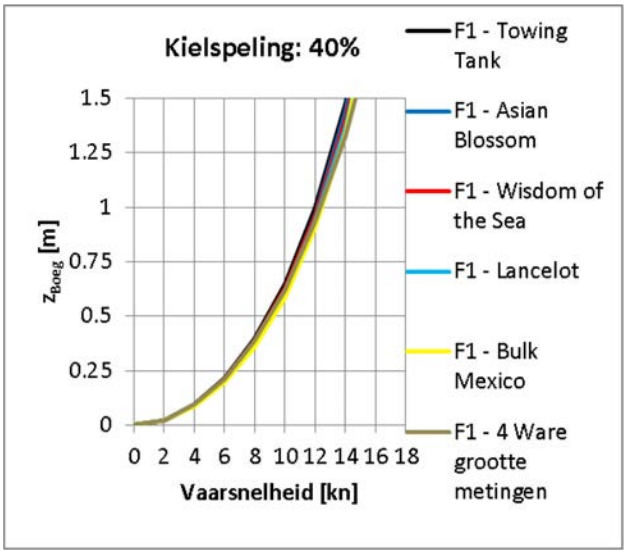


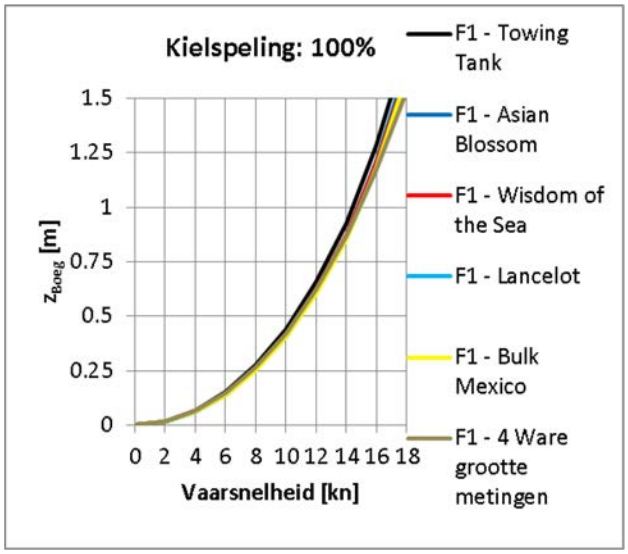


Figuur 61 – Vergelijking regressiemodellen Formule 1 op basis van verschillende brongegevens

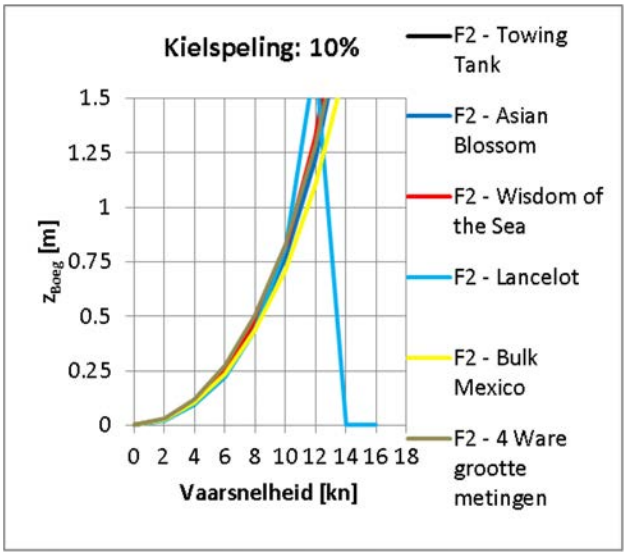


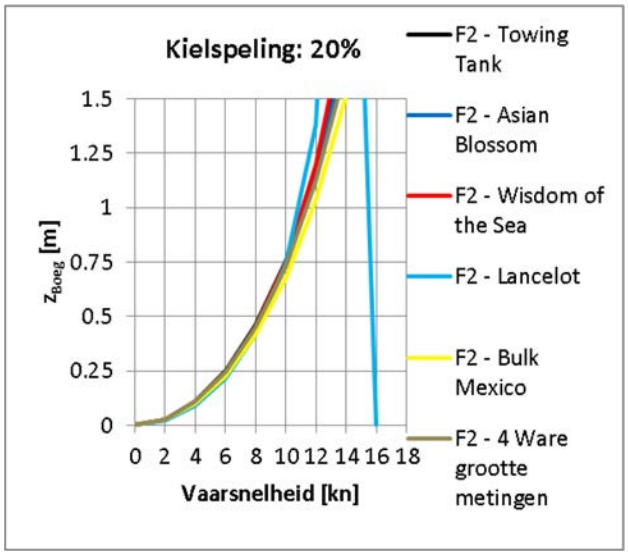


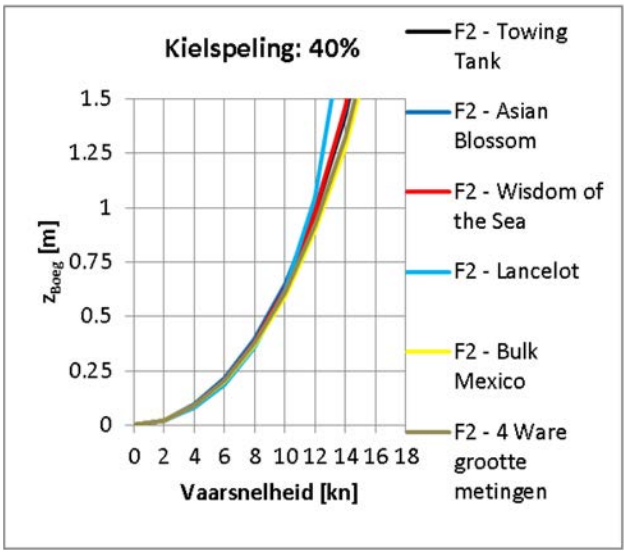


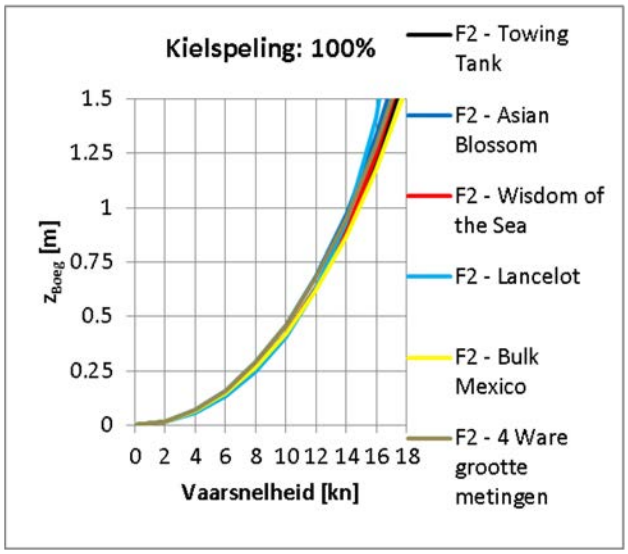


Figuur 62 – Vergelijking regressiemodellen Formule 2 op basis van verschillende brongegevens

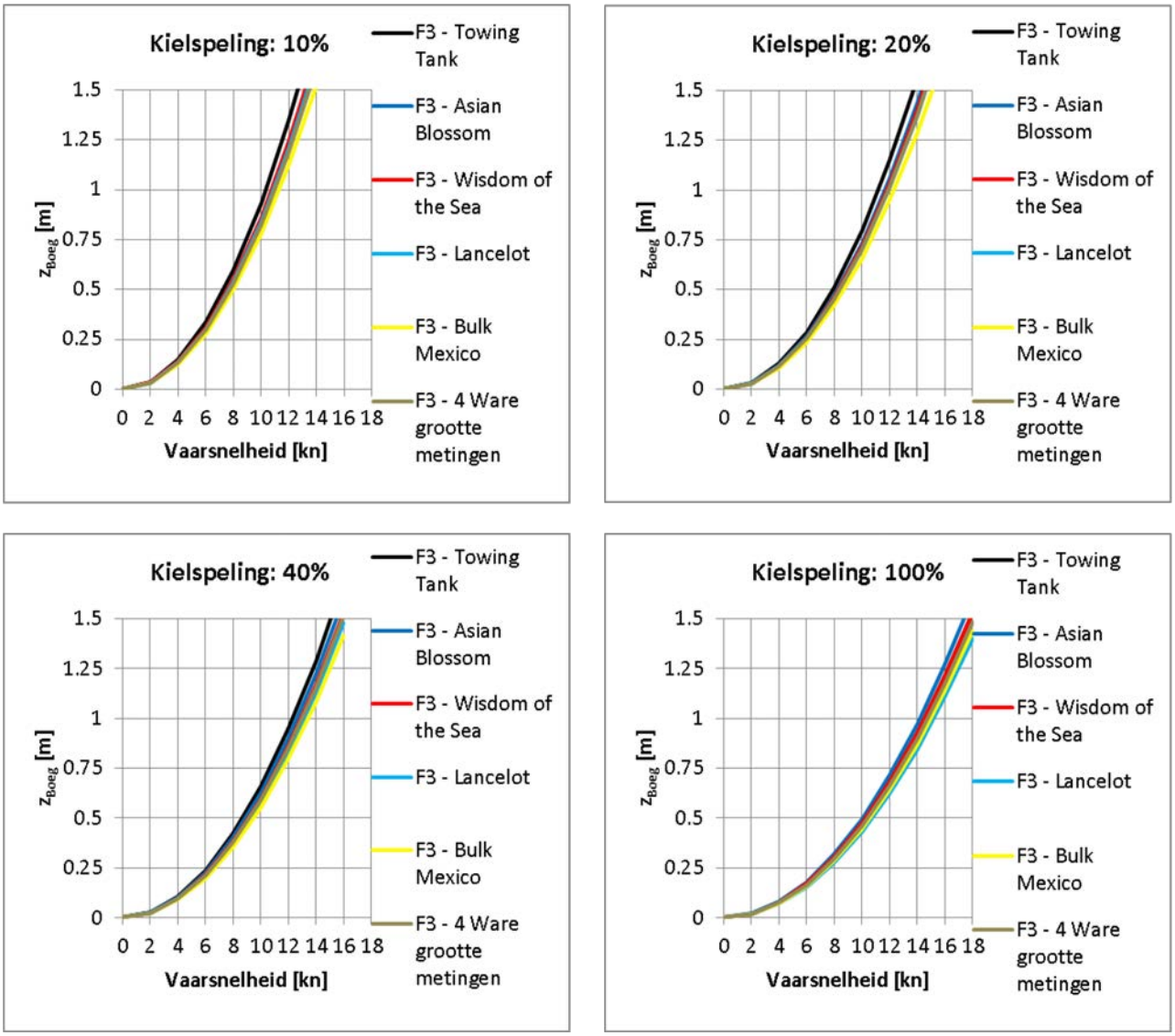








Figuur 63 – Vergelijking regressiemodellen Formule 3 op basis van verschillende brongegevens



5.4 Vergelijking met meetdata

In §5.2 en §5.3 werden verschillende regressiemodellen bepaald op basis van drie formules en zes verzamelingen brongegevens (sleeptank, vier meetvaarten en combinatie van vier meetvaarten). De resultaten van deze regressiemodellen werden onderling vergeleken in §5.3. In §5.4 worden de resultaten van de 18 squatmodellen vergeleken met de geanalyseerde waregroottemetingen. Hiervoor werden in Bijlage 3 voor de resultaten van de verschillende squatmodellen weergegeven ten opzichte van de metingen aan boord van de zes meetvaarten waarbij het schip (bij benadering) een diepgang gelijk aan 16.5 m had. Bovendien werden er statistische gegevens verzameld betreffende de overeenstemming tussen het squatmodel en de squatmetingen overeenkomstig de vier meetvaarten die eerder weerhouden werden als input voor de regressie.

5.4.1 Statistische analyse overeenstemming meetdata

De statistische parameters welke gerapporteerd worden ter beoordeling van de overeenstemming met waregroottemetingen zijn:

- de R^2-waarde als maat voor de afwijking tussen model en meting;
- de helling (a) van de lineaire trendlijn tussen model en meting als maat voor de onderschatting of overschatting van het model;
- de maximale onderschatting van de squat door het model en de locatie en meetvaart waarbij deze optrad.

De resultaten van squatmodellen vergeleken met de geanalyseerde meetvaarten op schepen met diepgang 16.5 m (Bijlage 3) illustreren:

- de significant lagere squatwaarden ter hoogte van de boeg zoals gemeten op de schepen Cape Canary en Cape Harmony welke toegeschreven worden aan de afwezigheid van een bulb bij de boeg van dat schip of de minder uitgesproken bulb;
- de stelselmatige onderschatting (door elk model) van de squat ter hoogte van boei W7 (baanafstand -15 km) en de doorgaans overschatting van de squat boven de drempel Vlissingen (baanafstand -6 km).

De statistische parameters zoals hierboven beschreven worden weergegeven in Tabel 20. Hieruit blijkt dat de nauwkeurigheid van de verschillende formules op basis van de R^2-parameter slechts beperkte verschillen tonen. Grotere afwijkingen worden er vastgesteld indien de helling a van de verschillende squatmodellen vergeleken wordt. Zo blijkt de Formule 3 gebaseerd op sleeptankdata aanleiding te geven tot een gemiddelde overschatting van de meetdata met 12%. Zoals reeds eerder opgemerkt stemt ook voor de andere formules de variant afgeleid uit sleeptankdata overeen met de grootste squatwaarden. Verder blijkt dat de modellen een sterke overeenstemming vertonen indien ze gevoed worden met de resultaten uit de vier weerhouden meetvaarten (zie eveneens Figuur 60).

Tabel 20 – Overeenstemming regressiemodellen voor squat aan boeg met waregroottemetingen

Input gegevens voor regressie	Regressie Formule	R^2	a	Maximale onderschatting		
				waarde [m]	s [km]	meetvaart
Sleeptank	Formule 1	0.9486	1.0383	0.15	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9476	1.0263	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9531	1.1191	0.06	-3.0	Asian Blossom
Asian Blossom	Formule 1	0.9487	1.0137	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9445	1.0169	0.18	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9570	1.0437	0.11	-16.9	Asian Blossom
Wisdom of the Sea	Formule 1	0.9490	1.0147	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9475	1.0180	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9570	1.0108	0.13	-16.9	Asian Blossom
Lancelot	Formule 1	0.9490	0.9937	0.17	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9388	1.0135	0.17	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9546	0.9845	0.14	-16.9	Asian Blossom
Bulk Mexico	Formule 1	0.9479	0.9368	0.22	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9463	0.9333	0.23	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9573	0.9311	0.19	-16.9	Asian Blossom
4 metingen	Formule 1	0.9488	0.9946	0.18	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9526	0.9923	0.17	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9566	0.9954	0.15	-16.9	Asian Blossom

5.4.2 Invloed statische vertrimming

Voor de laatste meetvaart gold dat het schip Panormos een statische vertrimming naar het hek vertoonde. Zo blijkt uit Tabel 5 dat voor Panormos de diepgang voor 15.55 m en achteraan 16.25 m bedroeg. De beladingsconditie van dit schip wijkt bijgevolg af van de vooropgestelde conditie welke een gelijklastig schip met diepgang 16.5 m betreft. Om deze reden werden de squatmetingen op het schip Panormos niet toegepast voor de squatmodellering in §5.3. Desalniettemin kon op basis van Bijlage 1 vastgesteld worden dat ook voor Panormos de maximale squat optrad aan de boeg. De resultaten uit Bijlage 3 tonen bovendien aan dat de regressiemodellen op basis van sleeptanktesten en weerhouden meetvaarten ook een goede overeenstemming vertonen met de maximale squat gemeten aan boord van Panormos. Er kan geconcludeerd worden dat de statische vertrimming naar het hek geen significante vermindering van de maximale inzinking door squat tot gevolg heeft. Anderzijds geldt dat de statische vertrimming naar het hek zoals toegepast op Panormos steeds impliceert dat de maximale effectieve diepgang (dit is de diepgang vermeerderd met de squat) maximaal was ter hoogte van het achterschip. Het verschil in statische diepgang (0.7 m) is immers groter dan het maximale verschil tussen de squat ter hoogte van de boeg en de squat ter hoogte van het achterschip (maximaal 0.35 m voor de meetvaart op Panormos). Hieruit volgt dat voor eenzelfde massa een statische vertrimming naar het hek een gunstige invloed zal hebben op de kans op bodemraking en de manoeuvreermarge van het schip, daar in dat geval de maximale diepgang overeenstemt met de minimale squat.

5.5 Selectie squatmodel

Op basis van de resultaten wordt de Formule 1 gecombineerd met de coëfficiënten gebaseerd op sleeptankproeven voorgesteld als de meest geschikte squatformule voor cape size bulkcarriers met diepgang 16.5 m in opvaart naar Vlissingen-Sloehaven. Hiervoor worden onderstaande argumenten gehanteerd:

- De sleeptankmetingen werden uitgevoerd in gecontroleerde laboratoriumcondities waardoor deze condities (vaarsnelheid door het water, kielspeling, ed.) eenduidiger bepaald zijn dan tijdens waregroottemetingen.
- De regressie van Formule 1 op basis van sleeptankvaarten heeft een significant betere overeenstemming met de sleeptankmetingen dan Formule 3 (zie §5.2). Ook is de gemiddelde overschatting van de waregroottemetingen kleiner voor Formule 1 dan Formule 3 bij coëfficiënten gebaseerd op sleeptankresultaten (zie Tabel 20);
- Formule 1 en Formule 2 op basis van sleeptankproeven gaan gepaard met kleinere onderschatting van de waargenomen squat tijdens waregroottemetingen dan wanneer gebaseerd op meetvaarten (zie Tabel 20);
- Formule 1 levert wanneer gevoed met verschillende brongegevens steeds een squatformule met erg gelijkaardige resultaten (zie Figuur 56);
- Formule 1 wordt slechts gemodelleerd op basis van drie coëfficiënten. Het toevoegen van een vierde coëfficiënt voor de invloed van de kielspeling bij Formule 2 bleek geen meerwaarde te betekenen en leidde in sommige gevallen zelfs tot een onrealistisch model bij combinatie van relatief kleine kielspelingen met relatief hoge (doch niet onmogelijke) vaarsnelheden (zie Figuur 57).

De coëfficiënten overeenkomstig de voorgestelde squatformule worden gepresenteerd in Tabel 21. Deze formule wordt verder aangeduid met *Formule1_TT*, waarbij TT staat voor Towing Tank.

Een nadeel aan Formule 1 betreft de afhankelijkheid van de blockage. De blockage betreft een moeilijker te bepalen omgevingsparameter dan de bodemdiepte en wordt mogelijks niet (of niet op dezelfde wijze) berekend door het DKS-rekenhart. Bovendien dient opgemerkt dat de blockage slechts weinig variatie vertoont langsheen het vaartraject naar Vlissingen-Sloehaven.

Wanneer het uit operationeel oogpunt aangewezen is om een squatformule zonder blockage-afhankelijkheid te hanteren, dan kan Formule 3 gecombineerd met de coëfficiënten (zie Tabel 22) bekomen op basis van sleeptankproeven (*Formule3_TT*) voorgesteld worden. Belangrijk nadeel aan Formule 3 ten opzichte van Formule 1 is dat deze in het relevante snelheids- en kielspelingsbereik een belangrijke overschatting geeft van de resultaten uit Formule 1. Dit wordt duidelijk geïllustreerd op de eerste pagina in Bijlage 3 waarbij de voorspellingen op basis van *Formule1_TT* en *Formule3_TT* weergegeven worden bij de meetvaartcondities. Uit Tabel 20 blijkt dat *Formule3_TT* bij de waregroottecondities gemiddeld 7.8% hogere squatwaarden levert dan *Formule1_TT*.

Een alternatieve methode om tot een blockage onafhankelijke squatformule te komen die beter aansluit bij de resultaten van *Formule1_TT* betreft de veronderstelling van een conservatieve blockage-waarde in deze formule. Op basis van Figuur 50 blijkt dat er tijdens de meetvaarten geen blockage waarden geregistreerd werden groter dan 0.08 Dit impliceert dat de factor $k_m.C_{S3}$ een constante wordt welke indien gebaseerd op de coëfficiënten van *Formule1_TT* en een blockage gelijk aan 0.08 een waarde bereikt gelijk aan 0.498. Echter wanneer de blockage constant verondersteld wordt op 0.079375, dan bedraagt de parameter $k_m.C_{S3}$ precies 0.5. Wegens een vereenvoudigde schrijfwijze van de formule wordt deze waarde toegepast. En kan *Formule1_TT* als volgt herschreven worden tot een blockage-onafhankelijke variant:

$$z = \left[C_{S1} \cdot \frac{T}{h} + C_{S2} \right] \cdot \frac{\left(\frac{u}{\sqrt{0{,}5 \cdot g \cdot h}} \right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{\sqrt{0{,}5 \cdot g \cdot h}} \right)^2}} \tag{25}$$

De waarden van C_{S1} en C_{S2} zijn identiek aan deze overeenkomstig *Formule1_TT* en worden weergegeven in Tabel 21.

In Figuur 64 worden de resultaten van de drie weerhouden squatmodellen weergegeven. Hieruit blijkt dat voor kielspelingen tot 20% de blockage onafhankelijke variant van *Formule1_TT* erg goed overeenstemt met de waarden van de oorspronkelijke formule.

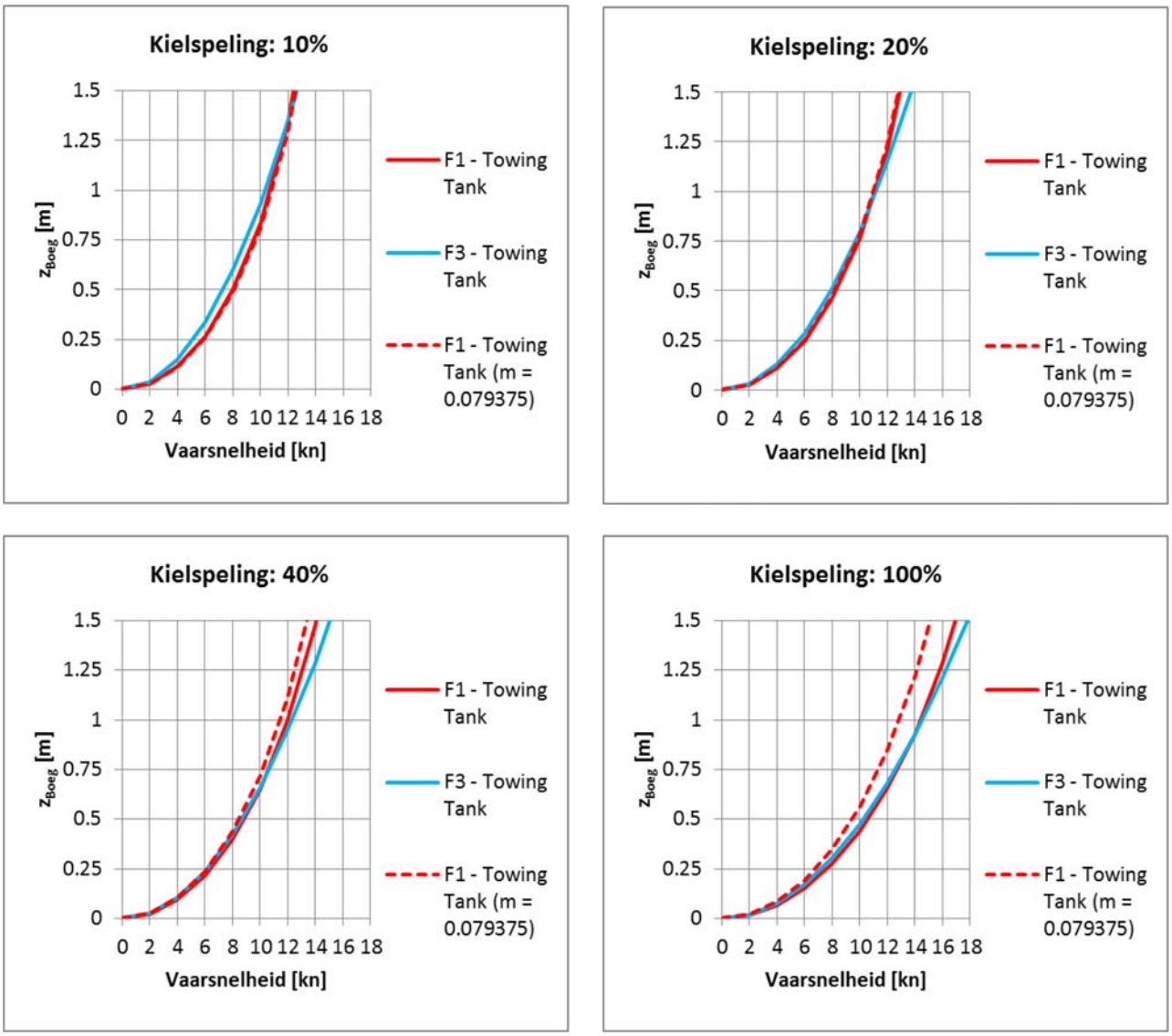
Tabel 21: Regressiecoëfficiënten voor Formule 1 bekomen op basis van sleeptankmetingen van boeg squat (Formule1_TT)

Regressie Formule	C_{S1}	C_{S2}	C_{S3}
Formule 1	-2.082	4.173	1.138

Tabel 22: Regressiecoëfficiënten voor Formule 3 bekomen op basis van sleeptankmetingen van boeg squat (Formule3_TT)

Regressie Formule	C_{S0}	C_{S1}	C_{S2}
Formule 3	0.572	-0.555	-0.0139

Figuur 64 – Vergelijking tussen drie voorgestelde regressiemodellen



5.6 Sensitiviteit stroomsnelheid Formule1_TT

Op basis van Bijlage 3 kan vastgesteld worden dat met name ter hoogte van boei W7 en meer bepaald omstreeks baanafstand -15.0 km, de gemeten squat van het schip vaak onderschat wordt. In Tabel 27 worden de condities op deze baanafstand weergegeven. Voor *Formule1_TT* blijkt deze locatie gepaard te gaan met een onderschatting van de squat zoals bekomen op basis van drie van de vier meetvaarten welke als input dienden voor de squatmodellering (de onderschatting is het grootste voor Wisdom of the Sea, 0.08 m). Deze onderschatting werd groter indien coëfficiënten gehanteerd werden op basis van waregrootteresultaten (zie Tabel 20). Voor het schip Bulk Mexico echter wordt de squat op de onderzochte locatie overschat door *Formule1_TT* (0.09 m).

De resultaten zijn bijkomend verwonderlijk omdat in vrijwel alle meetvaarten (ook deze niet weerhouden voor de squatmodellering), de squat een maximum lijkt te bereiken bij een baanafstand gelijk aan -15.0 km (zie Bijlages 1 en 3). Ondanks intensief onderzoek naar de waterdieptemesh van de meetvaarten (zie §3.2.3.5) konden er geen afwijkende bodemconditie of vaarwegsectie waargenomen op deze locatie ten

opzichte van de ondiepte ter hoogte van Boei SW (baanafstand-25.3 km) of ten opzichte van de eveneens ondiepe zone tussen baanafstand -18 tot -15 km. Bovendien zijn er geen aanwijzingen dat op deze locatie de tijberekening of de scheepsmeting minder betrouwbaar zou zijn. Bijgevolg wordt aangenomen dat de afwijkende resultaten te wijten zijn aan de onzekerheid betreffende de stroomsnelheid. De snelheid door het water toegepast in de squatformules wordt immers bekomen op basis van de vaarsnelheid over de grond en de stroomvector. De stroomvectoren werden rechtstreeks overgenomen uit de ZUNOv4 hindcastberekeningen. Het is echter bekend dat deze modellen (welke afgeijkt worden op waterstanden) minder goed presteren voor stroomsnelheden. De impact van de onzekerheid betreffende de stroomsnelheid op de squatresultaten wordt geïllustreerd door in de geselecteerde condities voor baanafstand -15 km (zie Tabel 23) de resultaten toe te voegen bij veronderstelling van de vaarsnelheid die 0.5 kn hoger en lager was dan bekomen op basis van de stroomberekeningen ZUNOv4 (zie Tabel 24). Uit Tabel 24 blijkt dat wanneer voor de meetvaarten uitgevoerd op de Asian Blossom en Wisdom of the Sea een exacte overeenkomst bekomen wordt tussen de gemeten squat aan de boeg en het resultaat van Formule1_TT indien de vaarsnelheid 0.5 kn hoger verondersteld wordt dan bekomen op basis van de stroomberekening. Omgekeerd geldt dat de squat gemeten op Bulk Mexico te baanafstand -15 km goed overeenstemt met Formule1_TT indien een vaarsnelheid aangenomen werd die 0.5 kn lager is dan bekomen uit de dataverwerking. Tabel 24 toont bovendien aan dat bij kleine kielspelingen (15.9 % in geval van Wisdom of the Sea) een vaarsnelheid gelijk aan 10 kn aanleiding geeft tot een squat die 0.08 m meer bedraagt dan wanneer aan 9.5 kn gevaren wordt. Dit voorbeeld illustreert de grote sensitiviteit voor de vaarsnelheid op de squatvoorspelling en bijhorend het grote belang van een correcte stroomvoorspelling.

Een mogelijke verklaring voor de onderschatting van de squat op baanafstand -15 km bij meetvaarten met relatie laag Hoog Water (Wisdom of the Sea, Lancelot) ten opzichte van de overschatting bij de meetvaart met relatief hoog Hoog Water (Bulk Mexico) betreft de afwijkingen van de stroomvoorspelling in deze condities.

Tabel 23 – Meetvaartcondities en squatvoorspelling bij baanafstand -15 km

	STW	M	UKC	Gemeten squat (FP)	Formule1_TT
	[kn]	[-]	[%]	[m]	[m]
Asian Blossom	8.34	0.065	16.6	0.53	0.47
Wisdom of the Sea	9.47	0.071	15.9	0.74	0.66
Bulk Mexico	10.44	0.063	17.5	0.69	0.77
Lancelot	10.22	0.068	16.2	0.78	0.76

Tabel 24 – Meetvaartcondities en squatvoorspelling Formule1_TT bij baanafstand -15 km bij variatie vaarsnelheid

	STW	m	UKC	Gemeten squat (FP)	Formule1_TT	Formule1_TT (STW +0.5kn)	Formule1_TT (STW -0.5kn)
	[kn]	[-]	[%]	[m]	[m]	[m]	[m]
Asian Blossom	8.34	0.065	16.6	0.53	0.47	0.53	0.42
Wisdom of the Sea	9.47	0.071	15.9	0.74	0.66	0.74	0.60
Bulk Mexico	10.44	0.063	17.5	0.69	0.77	0.86	0.71
Lancelot	10.22	0.068	16.2	0.78	0.76	0.85	0.70

5.7 Vergelijking met generieke squatformules

In de vakliteratuur werden er reeds verschillende generieke formules gepubliceerd ter voorspelling van de maximale inzinking van een schip. De resultaten van twee van deze voorspellingsmethoden worden vergeleken met de resultaten van *Formule1_TT* en *Formule3_TT*. De onderzochte squatformuleringen betreffen:

- De derde squatformulering van Barrass (M J Briggs, 2011);
- De formulering volgens ICORELS (Michael J. Briggs *et al.*, 2013).

De theoretische beschrijving van deze formules werd gebaseerd op (Vantorre *et al.*, 2014).

5.7.1 Derde squatformulering van Barrass (*Barrass3*)

De squatformulering *Barrass3* wordt als volgt gedefinieerd:

$$K_{B3} = 5.7 \cdot m^{0.76} \qquad 1 \le K_{B3} \le 2 \tag{26}$$

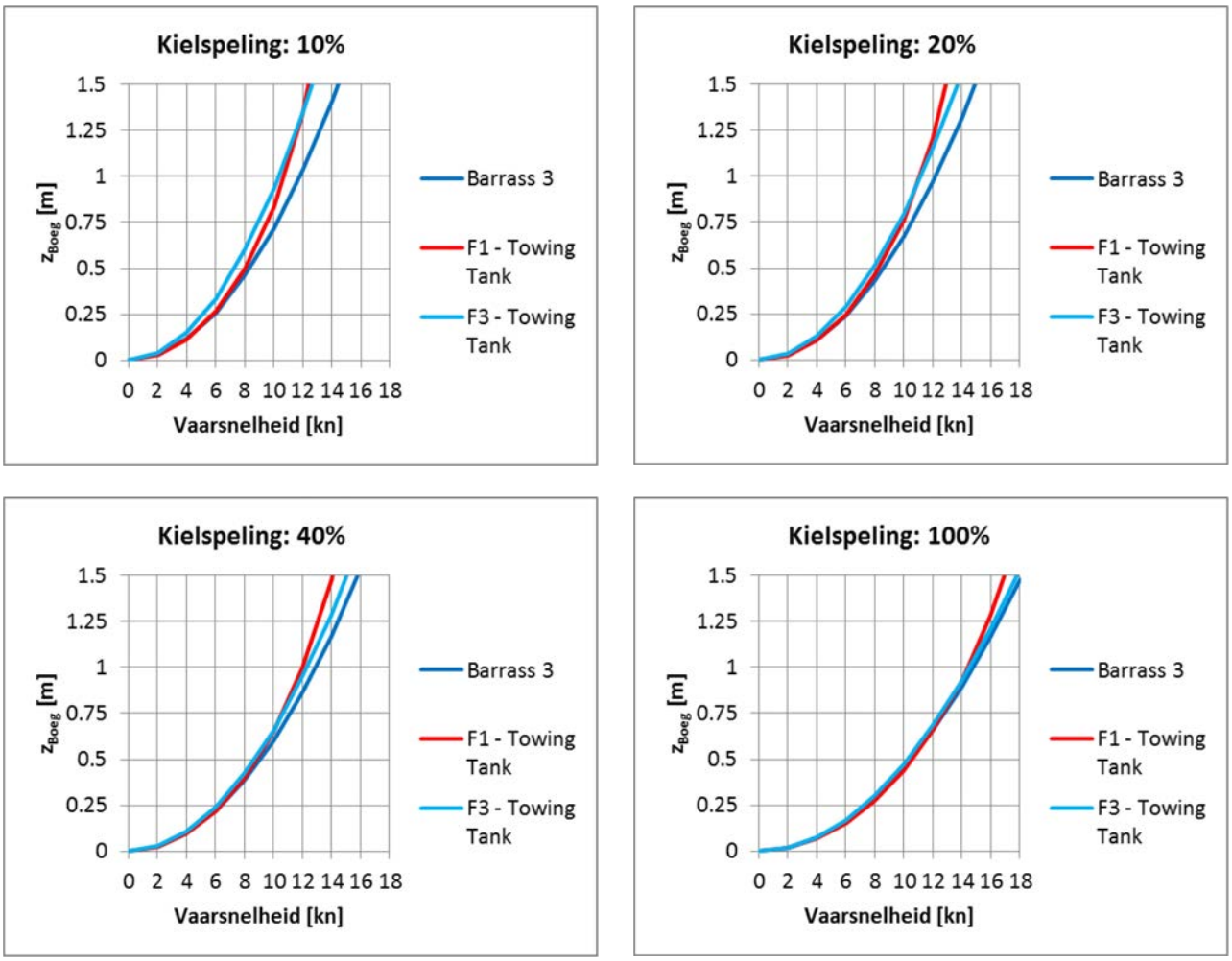
$$z_{B3,Max} = \frac{K_{B3} \cdot C_B \cdot V^2}{100} = \begin{cases} z_{FP,B3} \Leftarrow C_B > 0.7 \\ z_{AP,B3} \Leftarrow C_B \le 0.7 \end{cases} \tag{27}$$

Waarbij:

- K_{B3} blockage factor gedefinieerd door *Barrass3* (26) [-];
- $z_{B3,Max}$ maximale inzinking van het schip berekend op basis van *Barrass3* (27) [m];
- $z_{FP,B3}$ inzinking ter hoogte van de boeg [m];
- $z_{AP,B3}$ inzinking ter hoogte van het hek [m];
- C_B blokcoëfficiënt van het schip [-];
- V vaarsnelheid van het schip [kn].

De vergelijking tussen de squatvoorspellingen op basis van *Formule1_TT en Formule3_TT* en *Barrass3* wordt weergegeven in Figuur 66. Hieruit blijkt dat wanneer toegepast op de inzinking van een cape size bulkcarrier bij relatief kleine kielspelingen (< 40%) gecombineerd met vaarsnelheden groter dan 8 kn, *Barrass3* aanleiding geeft tot een onderschatting van de inzinking ter hoogte van de boeg ten opzichte van de squatformules *Formule1_TT* en *Formule3_TT*.

Figuur 65 – Vergelijking tussen squatmodellen *Barrass3, Formule1_TT en Formule2_TT* voor de inzinking ter hoogte van de boeg.



5.7.2 De formulering volgens *ICORELS*.

De squatformulering volgens *ICORELS* wordt als volgt gedefinieerd:

$$K_{IC} = \begin{cases} 7.45 \cdot m + 0.76 & m > 0.03 \\ 1.0 & m \le 0.03 \end{cases} \tag{28}$$

$$z_{IC,max} = 2.4 \cdot \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \cdot \sqrt{\frac{Fr_h^2}{1 - Fr_h^2}} \cdot K_{IC} = 2.4 \cdot \frac{C_B \cdot B \cdot T}{L_{pp}} \cdot \sqrt{\frac{Fr_h^2}{1 - Fr_h^2}} \cdot K_{IC} \tag{29}$$

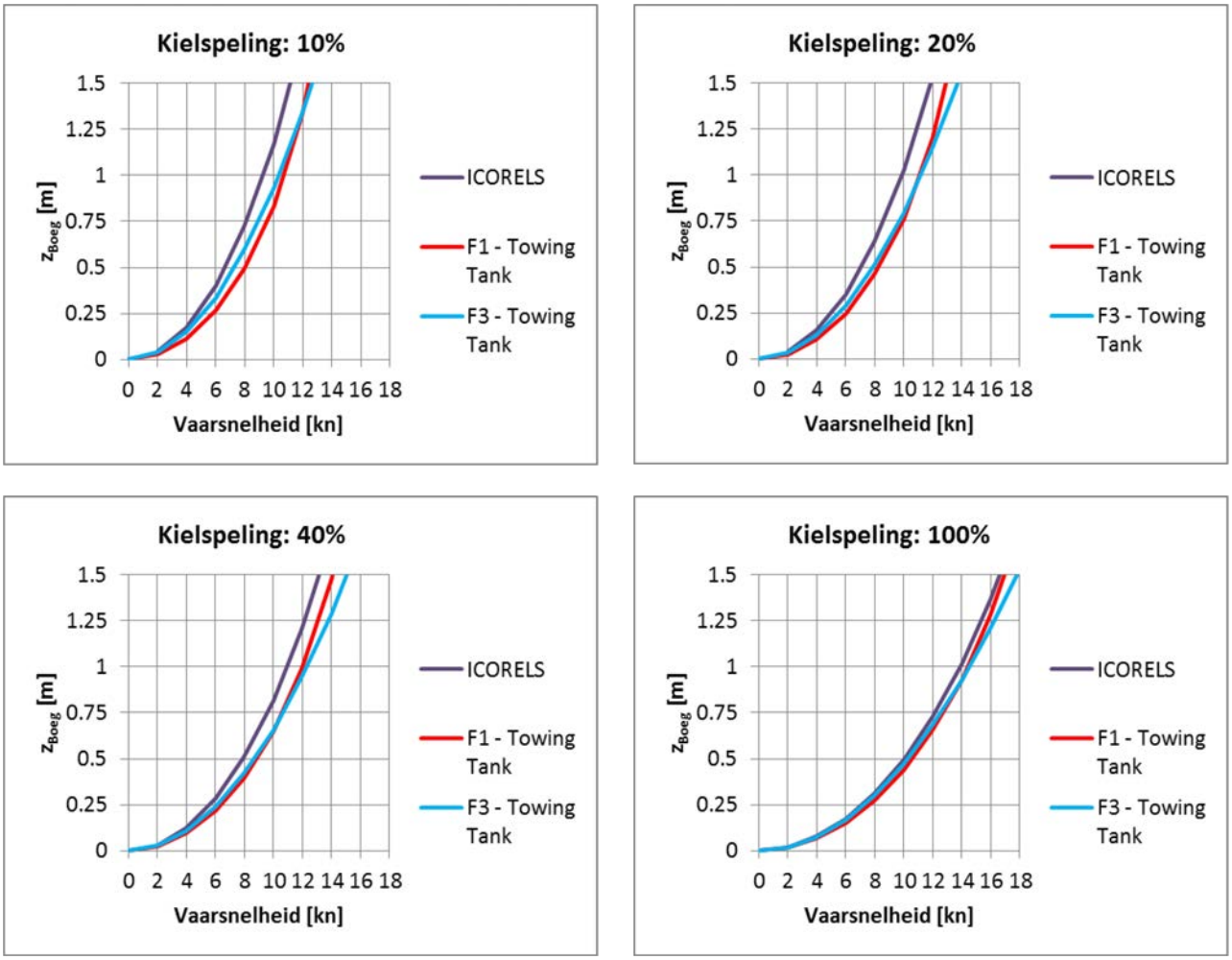
Waarbij:

- K_{IC} blockage factor gedefinieerd door *ICORELS* (28) [-];
- $Z_{IC,Max}$ maximale inzinking van het schip berekend op basis van *ICORELS* (29) [m];
- ∇ Deplacement schip [-];
- L_{PP} Scheepslengte tussen de loodlijnen [m].

De blockagewaarden die optraden tijdens de sleeptankproeven variëren tussen 0.046 (UKC 100%) en 0.084 (UKC 10%). Bijgevolg dient in (29) de waarde van K_{IC} aangepast te worden aan (28). Indien rekening gehouden wordt met de blockage van de sleeptank en K_{IC} bijgevolg berekend wordt op basis van (28), dan

blijkt de inzinking ter hoogte van de boeg, hoger dan deze voorspeld door *Formule1_TT en Formule3_TT* (zie Figuur 66).

Figuur 66 – Vergelijking tussen *ICORELS, Formule1_TT en Formule3_TT* voor de inzinking ter hoogte van de boeg.



6 Samenvatting en Conclusie

De vereiste kielspeling voor een veilige vaart naar en van de Scheldehavens wordt in grote mate bepaald door de te verwachten verticale bewegingen van het schip tijdens het vaartraject. Deze verticale bewegingen kunnen opgesplitst worden in dynamische bewegingen en stationaire bewegingen. De dynamische bewegingen betreffen de responsie van het schip op zeegang en zijn bijgevolg sterk afhankelijk van het heersende golfklimaat. De stationaire verticale beweging van het schip is het gevolg van een drukdaling langsheen een varend schip waardoor het schip gaat inzinken en vertrimmen. Deze stationaire verticale beweging wordt aangeduid met de term squat.

Het objectief van studie 13_059 betreft een zo nauwkeurig mogelijke voorspelling van de maximale squat van een cape size bulkcarrier (290 m x 45 m x 16.5 m) tijdens het traject tussen de Wandelaar en Vlissingen-Sloehaven. Hiertoe werd zowel gebruik gemaakt van sleeptankproeven op modelschaal als van waregroottemetingen.

De resultaten van de studie werden op 22 februari 2017 gepresenteerd aan de begeleidingsgroep. De bijhorende slides worden weergegeven in Bijlage 5.

6.1 Meetvaarten

De meetvaarten uitgevoerd door het Nederlands Loodswezen leveren nauwkeurige positiewaarden voor drie RTK-GPS antennes vast verbonden met het schip. Op basis van een statische meting (schip langs de kade) werden de relatieve posities van de GPS-antennes ten opzichte van het schip gedefinieerd en werden de posities van de GPS-antennes langsheen het traject geconverteerd naar de zes vrijheidsgraden van een schip.

Teneinde de squat en de dynamische scheepsbewegingen te kunnen bepalen diende de verticale positiemeting van het schip gerelateerd te worden aan de waterstand langsheen het traject. De nauwkeurige bepaling van deze waterstand was bijgevolg van groot belang en werd bekomen door combinatie van hindcastberekeningen uit het ZUNO v4 model en waterstandsmetingen op discrete punten langsheen de vaarweg.

Om bovendien alle relevante parameters voor squat te kunnen beoordelen werden ook onderstaande parameters in detail onderzocht:

- stroomsnelheid;
- bodemdiepte;
- vaarwegsectie en blockage;
- scheepsontmoetingen en ander scheepvaartverkeer.

In totaal werden er zeven meetvaarten verwerkt. De hoofdafmetingen van de onderzochte schepen worden weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 – Gegevens meetvaarten zoals bekomen van Nederlands Loodswezen

Vessel	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panormos
Date	27/07/'15	29/07/'15	24/09/'15	8/10/'15	19/11/'15	29/06/'16	1/10/'16
L_{OA} (m)	291.98	292	292	291.8	292	292	292
L_{PP} (m)	283.8	288	283	282.2	278	282	282
B (m)	45	45	45	45	45	45	45
T_F (m) at 1025 kg/m³	16.43	16.5	16.4	16.44	16.5	16.5	15.55
T_A (m) at 1025 kg/m³	16.43	16.5	16.4	16.47	16.5	16.5	16.25
GM (m)	5.59	4.86	5.76	5.36	-	6	5.38

De resultaten van de dataverwerking worden onder de vorm van verschillende thematisch gecombineerde grafieken toegevoegd aan dit rapport (Bijlage 1). Het traject afgelegd door de studieschepen en de andere scheepvaart in de nabijheid van het studieschip werden in de vorm van KMZ-bestanden opgeleverd (Bijlage 4).

De nauwkeurigheid van de squat bekomen door de uitgevoerde processing wordt 0.08 m geschat.

De verticale scheepsbewegingen bekomen uit de meetvaarten werden verdeeld in dynamische en stationaire bewegingen. De dynamische bewegingen bleken een duidelijk verband te tonen met de deiningsgolven op het zeetraject. Een relatie tussen de significante golfhoogte en de dynamische scheepsbewegingen bleek niet te gelden voor de studieschepen. De stationaire verticale bewegingen (squat) werden toegepast voor de bepaling van de vooropgestelde squatformule.

De maximale dynamische verticale beweging die opgemeten werd bedroeg 1.0m, terwijl de maximaal opgemeten squat 1.03 m bedroeg.

6.2 Squatformule

Zowel sleeptankonderzoek als meetvaarten toonden aan dat de maximale squat van een gelijklastig geladen bulkcarrier met diepgang 16.5 m steeds optreed aan de boeg. Bovendien bleek op basis van sleeptankproeven de squat aan de boeg onafhankelijk van het schroeftoerental.

Op basis van eerder onderzoek en rekening houdend met de conclusies uit de meetvaarten werden er drie squatformules gedefinieerd waarvoor de coëfficiënten bepaald werden door regressie op basis van verschillende inputgegevens. De inputgegevens die toegepast werden om de regressiecoëfficiënten te bepalen betroffen:

- resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Asian Blossom;
- resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Wisdom of the Sea;
- resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Lancelot;
- resultaten bekomen voor de meetvaart op het schip Bulk Mexico;
- resultaten bekomen voor de meetvaarten op de vier hoger vermelde schepen;
- resultaten bekomen uit sleeptank voor manoeuvres in ondiep en beperkt water (samenwerking WL en UGent, afdeling Maritieme Techniek)

Op basis van de overeenstemming met sleeptankproeven enerzijds en waregroottemetingen anderzijds werd de formule ontleend aan Verwilligen *et al.* (2007) het meest gunstig geacht. Deze formule is gebaseerd op drie coëfficiënten en houdt rekening met de vaarsnelheid (door het water), de kielspeling en

de blockage om de squat ter hoogte van de boeg te bekomen. Wanneer in deze formule een conservatieve waarde gehanteerd wordt voor de blockage dan bekomt men onderstaande formule voor cape size bulkcarriers met diepgang 16.5 m:

$$z = \left[-2.082 \cdot \frac{T}{h} + 4.173 \right] \cdot \frac{\left(\frac{u}{\sqrt{0{,}5 \cdot g \cdot h}} \right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{\sqrt{0{,}5 \cdot g \cdot h}} \right)^2}} \tag{30}$$

Een beperkte sensitiviteitsanalyse toonde aan dat de vaarsnelheid een erg belangrijke parameter is voor squat. De vaarsnelheden door het water bekomen uit meetvaarten werden berekend op basis van hindcast stroomberekeningen door middel van het ZUNOv4-model. De nauwkeurigheid van deze stroomberekening kon echter (door de afwezigheid van stroommetingen) niet gevalideerd worden. Wegens de onzekerheid betreffende de vaarsnelheden door het water bij waregroottemetingen, werden de regressiecoëfficiënten bepaald op basis van sleeptankdata verkozen. Deze coëfficiënten stemmen bovendien overeen met meer conservatieve squatformules dan wanneer deze coëfficiënten bepaald werden op basis van waregroottemetingen.

Vergelijking van de bekomen formule met de generieke squatformules Barras3 en Icorels, toonde aan dat de formule afgeleid uit de studie gepaard gaat met tussenliggende squatvoorspellingen.

6.3 Aanbevelingen

Het uitgangspunt voor de studie betrof de validatie van de het DKS-rekenhart door middel van waregroottemetingen. Daar het Waterbouwkundig Laboratorium niet geselecteerd werd als leverancier van het DKS-rekenhart kon in het kader van studie 13_059 geen vergelijking uitgevoerd worden tussen de voorspelling van verticale bewegingen door het DKS-rekenhart met de resultaten uit de meetvaarten. Een dergelijke validatie van het DKS-rekenhart is daarentegen absoluut vereist om de nauwkeurigheid van de modellen en de bijhorende statistische onzekerheid te bepalen. De statistische onzekerheid voor de voorspelling van verticale scheepsbeweging heeft immers een belangrijke impact op de uiteindelijke kans op bodemraking waarop DKS gebaseerd is. Het Waterbouwkundig Laboratorium beveelt dan ook de nacalculatie van de meetvaarten door middel van het DKS-rekenhart aan.

Uit de squatmetingen blijkt de grote invloed van de vaarsnelheid door het water op de inzinking. In het studiegebied wordt de vaarsnelheid door het water in belangrijke mate bepaald door de stroomsnelheid van het water. Deze stroomsnelheden wordt op heden aangeleverd aan WESP door het voorspellingsmodel ZUNOv4. De overstap naar een probabilistische rekenmethode stelt echter bijkomende eisen aan de nauwkeurigheid van de stroomvoorspellingen. Er wordt aanbevolen om de nauwkeurigheid van de stroomvoorspellingen zoals bekomen door middel van het ZUNOv4 model te onderzoeken. Bovendien geldt ook de aanname van vaarsnelheden (over de grond) tijdens het traject als een belangrijke parameter bij een probabilistische tijpoortberekening. Er wordt aanbevolen om een probabilistische tijpoortberekening uit te voeren bij een realistisch spectrum aan vaarsnelheden langsheen het traject.

De meetvaart op het schip Panormos ging gepaard met een statische vertrimming naar het hek. Ook voor deze beladingsconditie bleek de maximale squat op te treden aan de boeg. Een statische vertimming naar het hek zal bijgevolg een gunstige invloed hebben op de kans op bodemraking aangezien de maximale diepgang (achteraan) overeenstemt met de kleinste squat. Er wordt aanbevolen om de invloed van statische trim enerzijds en de inzinking en vertrimming ten gevolge van squat anderzijds in rekening te brengen bij de berekening van de dynamische kielspeling. Bovendien dient opgemerkt dat het onderzoek beperkt was tot cape size bulk carriers bij diepgang 16.5 m. Het uitbreiden van het bereik van de squatformule naar afwijkende diepgang en vertrimming vereist de uitvoering van bijkomende sleeptankproeven.

7 Referenties

Belspo; Royal Belgian Institute of Natural Sciences Management - Unit of the Mathematical Models of the North Sea; National Geographic Institute - Department of Geodesy; University of Ghent - Department of Geography; Agentschap voor Maritiem Dienstverlening en Kust - Afdeling Kust - Flemish Hydrography. (2010). Relationships between vertical reference planes in the Belgian marine area – Final Report (May 2010). NR/AP/00/3: Brussels. 114 pp.

Briggs, M.J. (2011). Sensitivity of PIANC Ship Squat Formulas in Unrestricted Channels. *PIANC E-magazine 142* (*January*): 13–24

Briggs, M.J.; Kopp, P.J.; Ankudinov, V.K.; Silver, A.L. (2013). Comparison of Measured Ship Squat with Numerical and Empirical Methods. *J. Sh. … 57*(*June*): 73–85. Available at: http://www.ingentaconnect.com/content/sname/jsr/2013/00000057/00000002/art00001 [date of retrieval: 14/08/2013]

Eloot, K.; Verwilligen, J.; Vantorre, M. (2008). An Overview of Squat Measurements for Container Ships in Restricted Water, ***in***: (2008). *International Conference on Safety and Operations in Canals and Waterways SOCW 2008, 15-16 September*: Glasgow, UK. pp.106–116

Lataire, E.; Vantorre, M. (2008). Ship-Bank Interaction Induced by Irregular Bank Geometries, ***in***: (2008). *27th Symposium on Naval Hydrodynamics*: Seoul, Korea. pp.5–10

Rijkswaterstaat - Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2014). Systematische bepaling van inzinking en vertrimming (squat) – Plan van Aanpak t.b.v offertevraag. 11 augustus 2014Versie 1.1.

van Buuren, W. (2005). Beschrijving van de NMS type ADX. November 2005. Versie 0.1 (Nederlands Loodswezen, Ed.)

Vantorre, M.; Candries, M.; Verwilligen, J. (2014). Probabilistisch Toelatingsbeleid, Sensitiviteitsonderzoek (afdeling M. T. Universiteit Gent, Ed.)

Verwilligen, J.; Vantorre, M.; Eloot, K. (2007). Op- en afvaartregeling voor 8000 (en meer) TEU containerschepen tot de haven van Antwerpen bij een maximale diepgang van 145dm: Deelopdracht 1: SQUAT. *WL rapporten*, 689_04. Universiteit Gent/Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verwilligen, J.; Vantorre, M.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2014). Vergelijking en optimalisatie toegankelijkheidstools Schelde: deelrapport 3 – AIS-analyse 2012-2013. *WL Rapporten*, 13_015. Universiteit Gent: Antwerpen

Bijlage 1: Overzichtsgrafieken meetvaarten

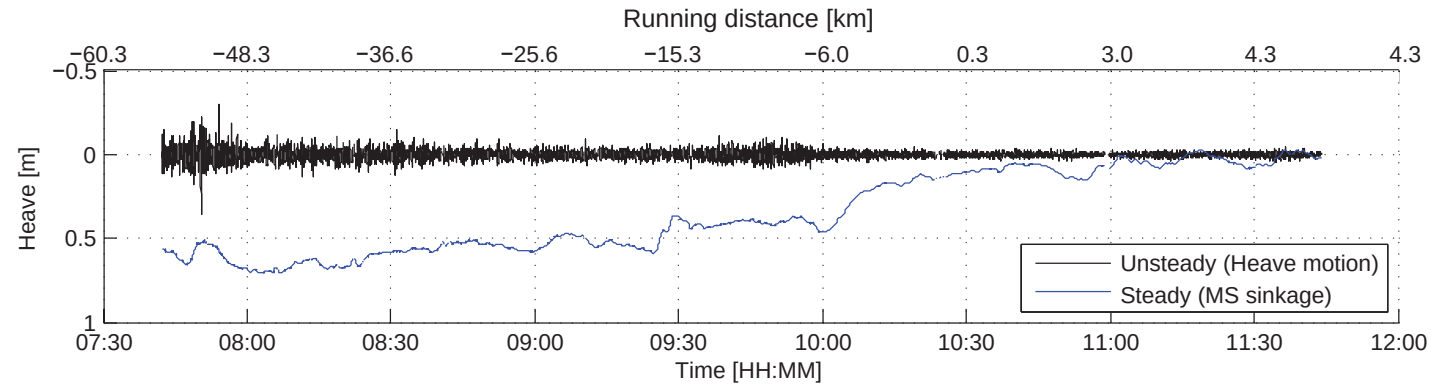
Bijlage 1 bevat per meetvaart zes pagina's met overzichtsgrafieken welke de tijdsevolutie van de belangrijkste parameters weergeven. De inhoud van deze overzichtsgrafieken wordt in detail besproken in §3.3.1

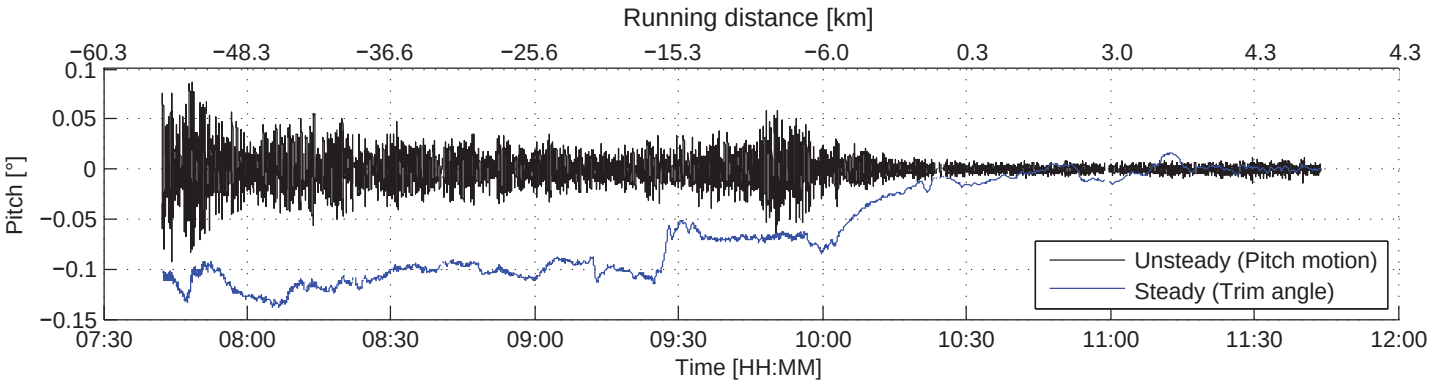
- Asian Blossom B2
- Cape Canary B8
- Wisdom of the Seas B14
- Lancelot B20
- Bulk Mexico B26
- Cape Harmony B32
- Panormos B38

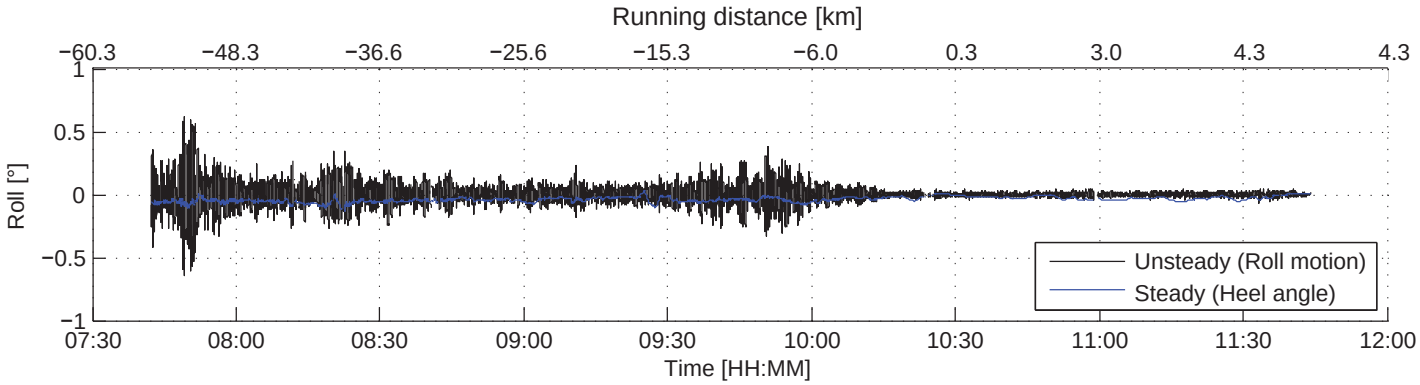
Asian Blossom
T= 16.43 m

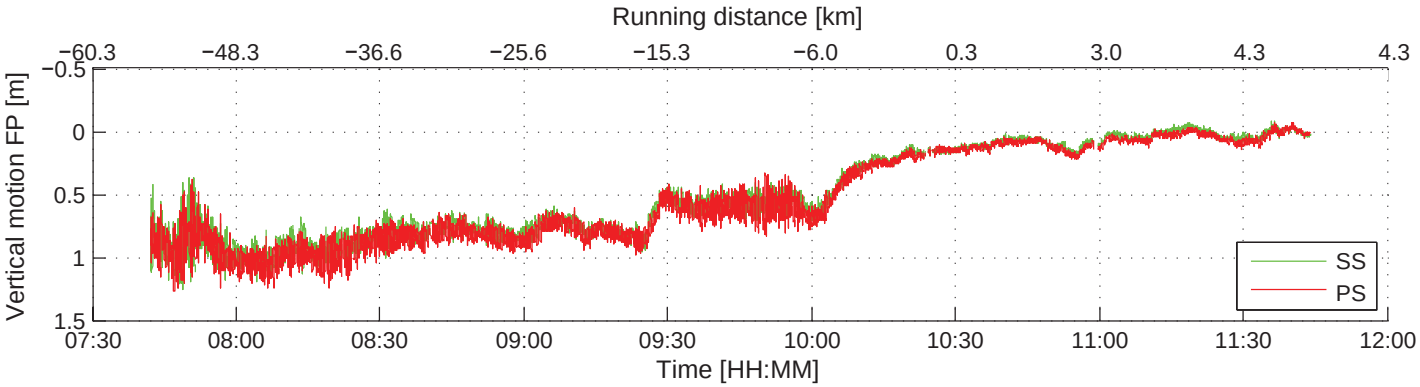
Vertical motions: unsteady and steady (running average)

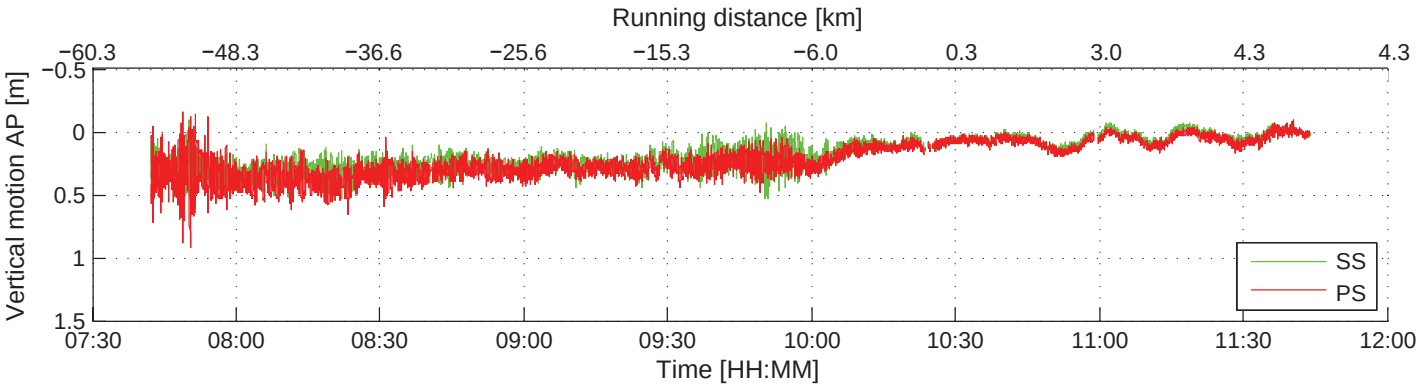
Kaloothaven







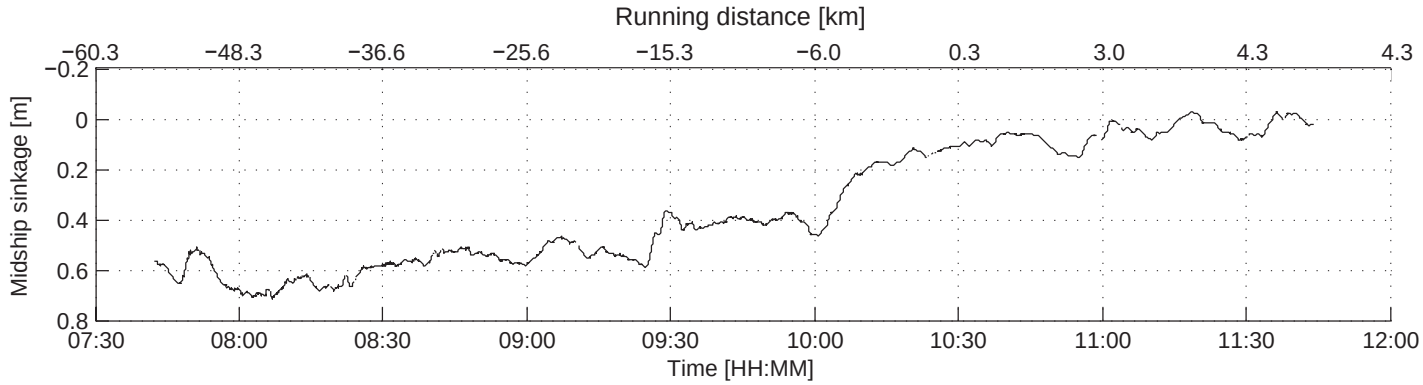


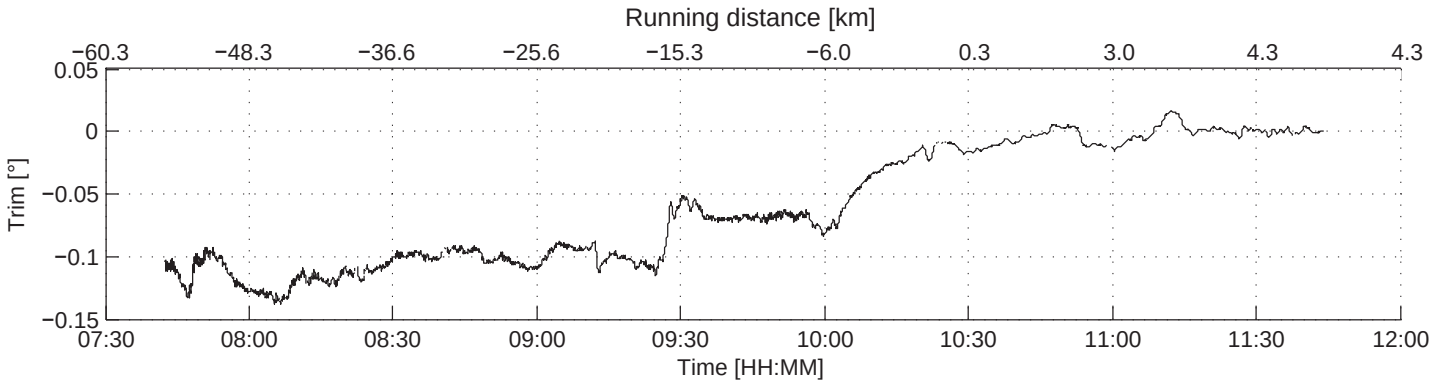


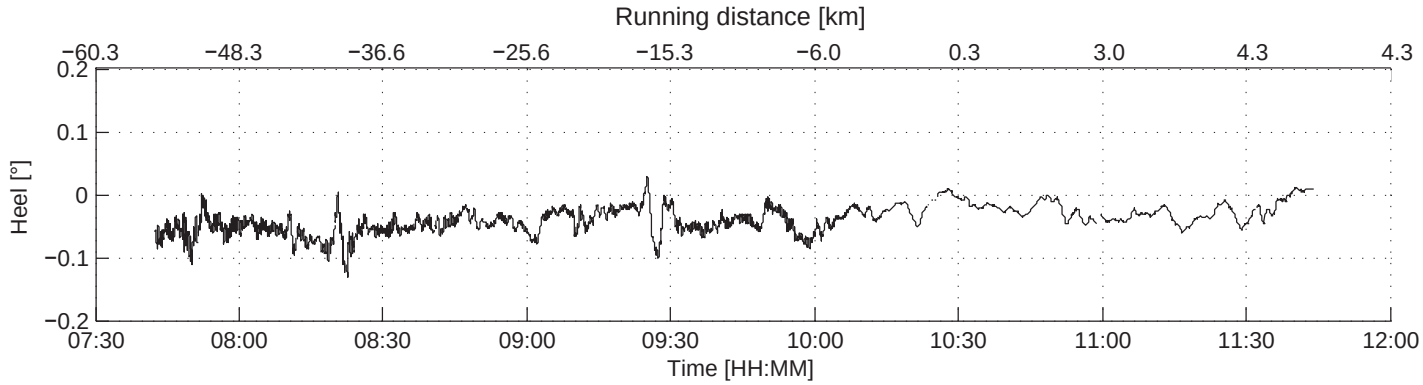
Asian Blossom
T= 16.43 m

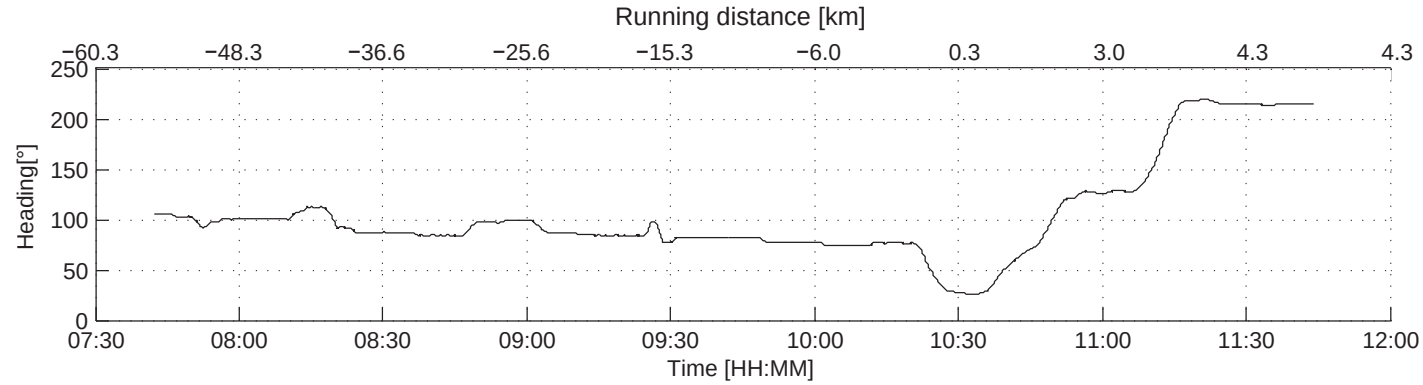
Steady motions and vessel's course

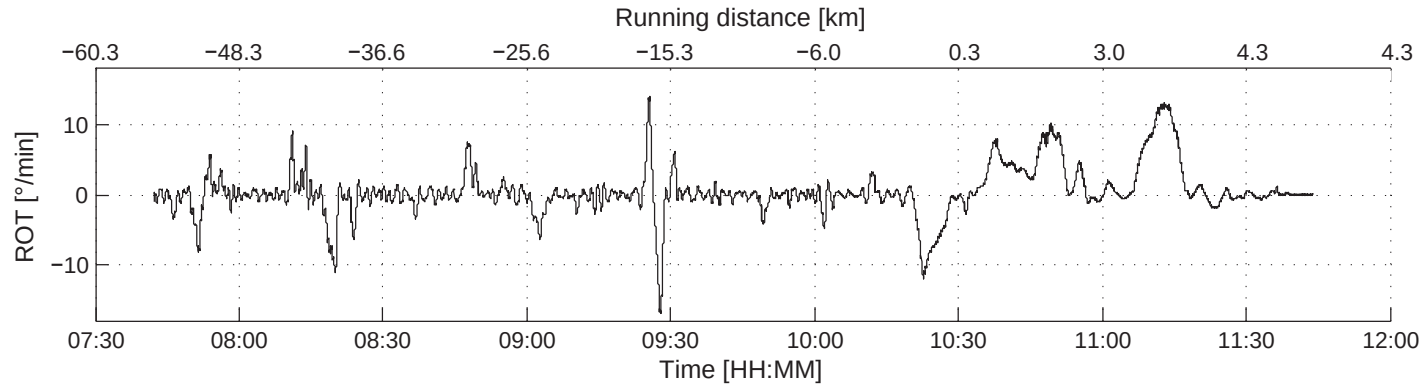
Kaloothaven







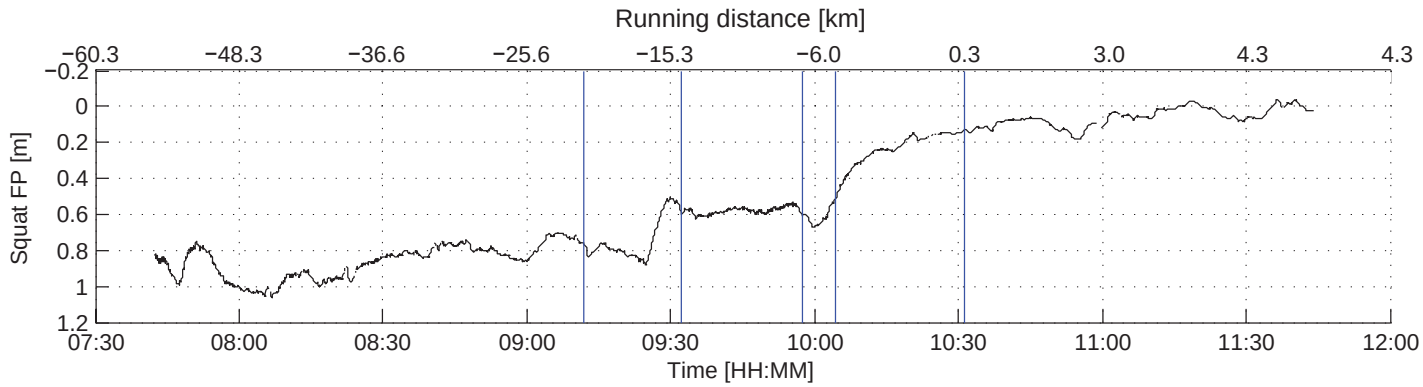


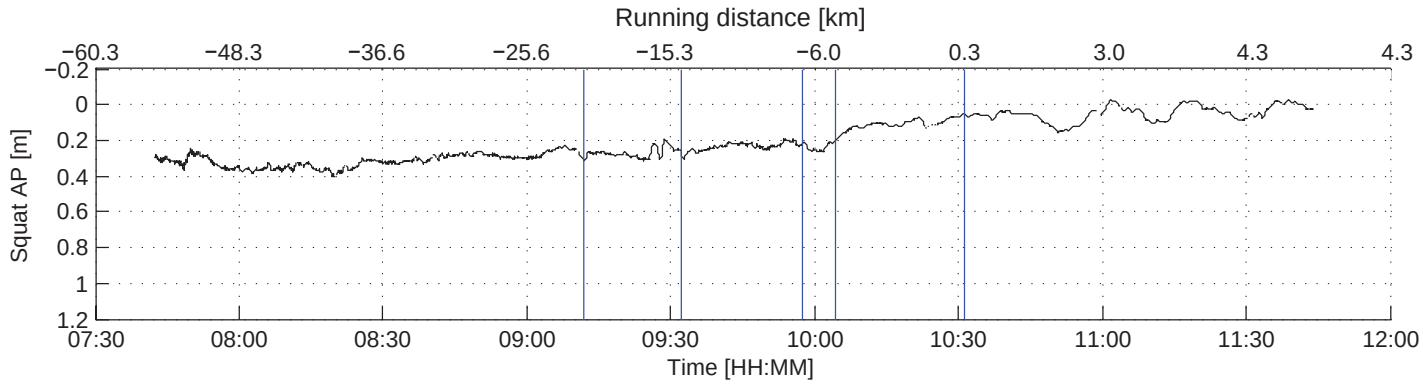


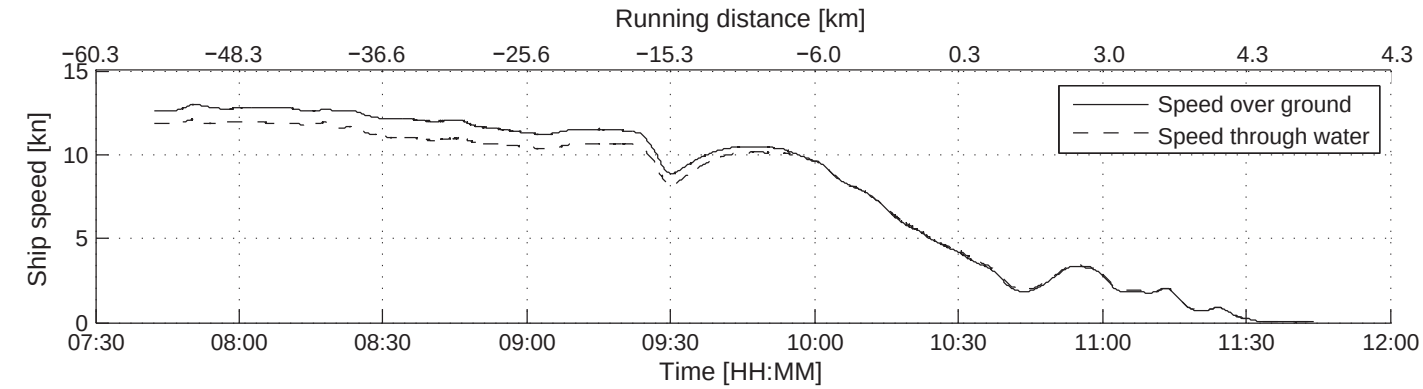
Asian Blossom
T= 16.43 m

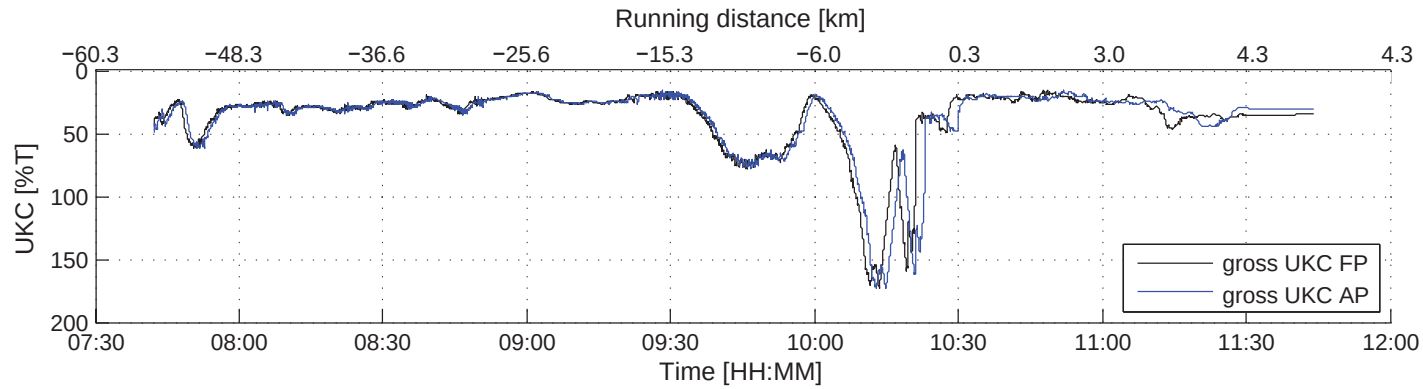
SQUAT analysis

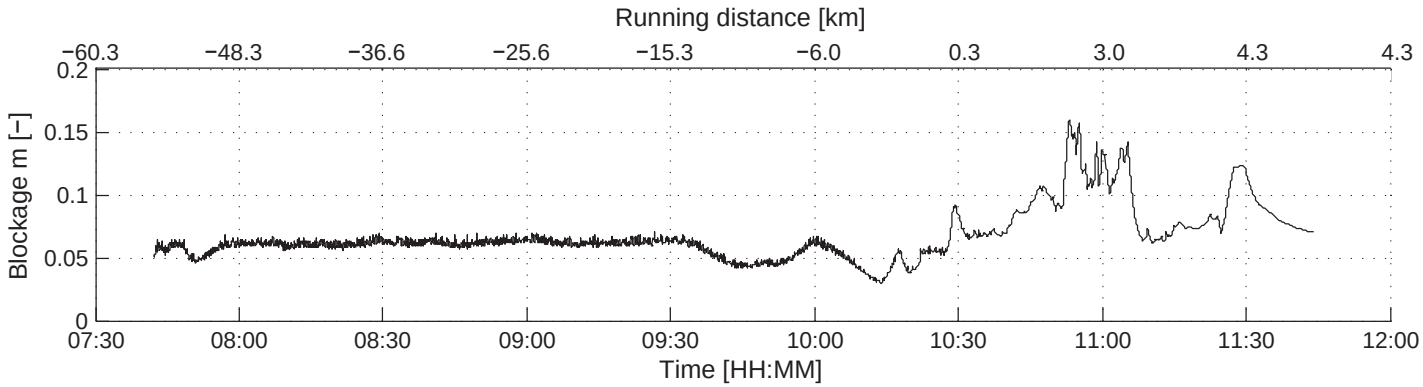
Kaloothaven







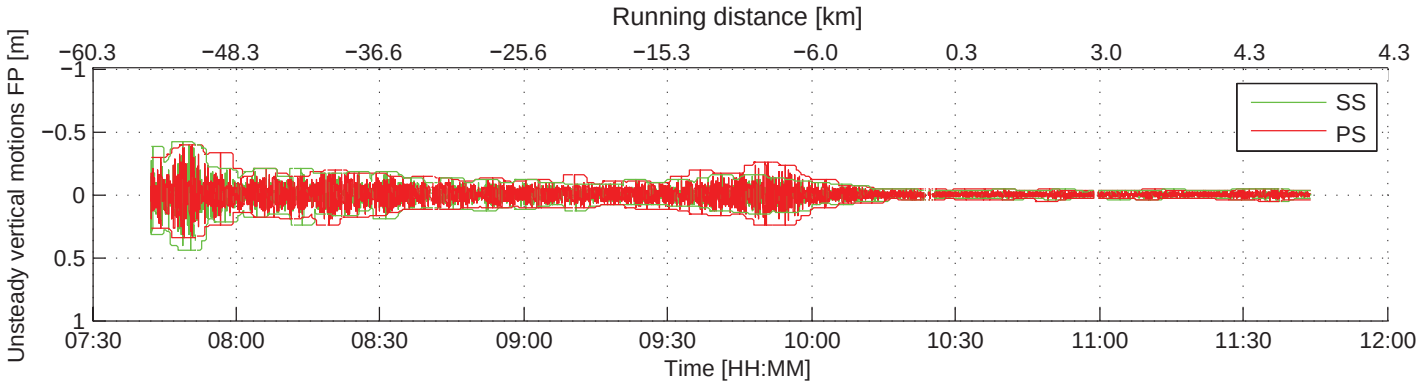


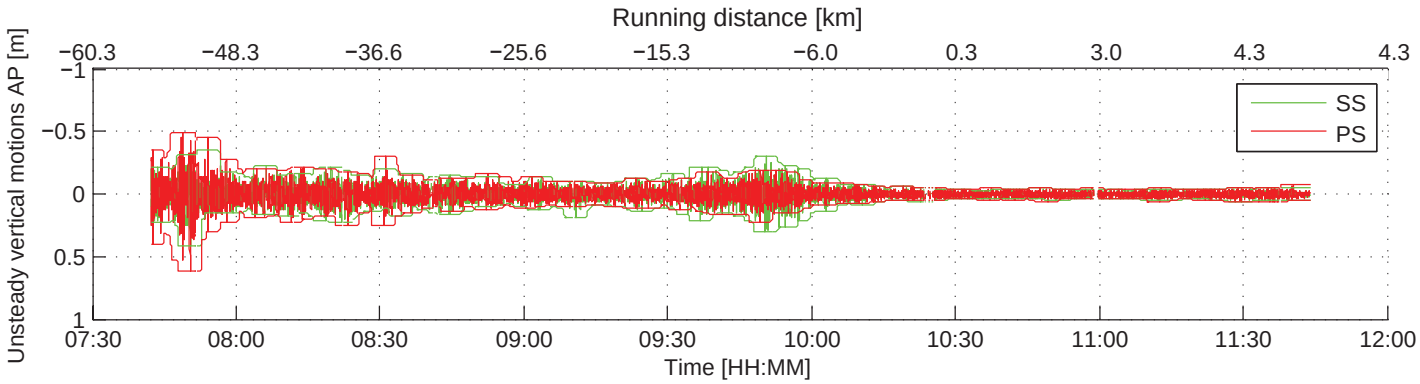


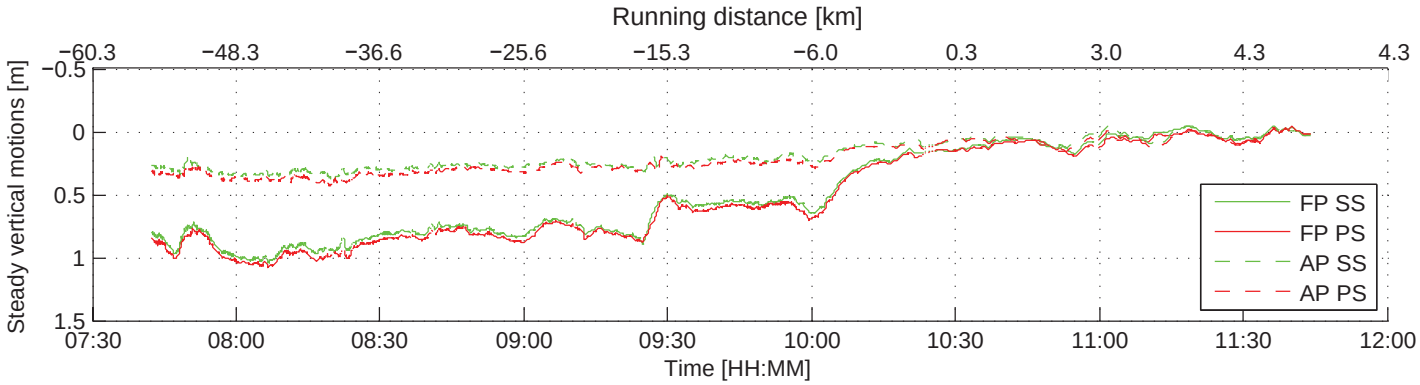
Asian Blossom
T= 16.43 m

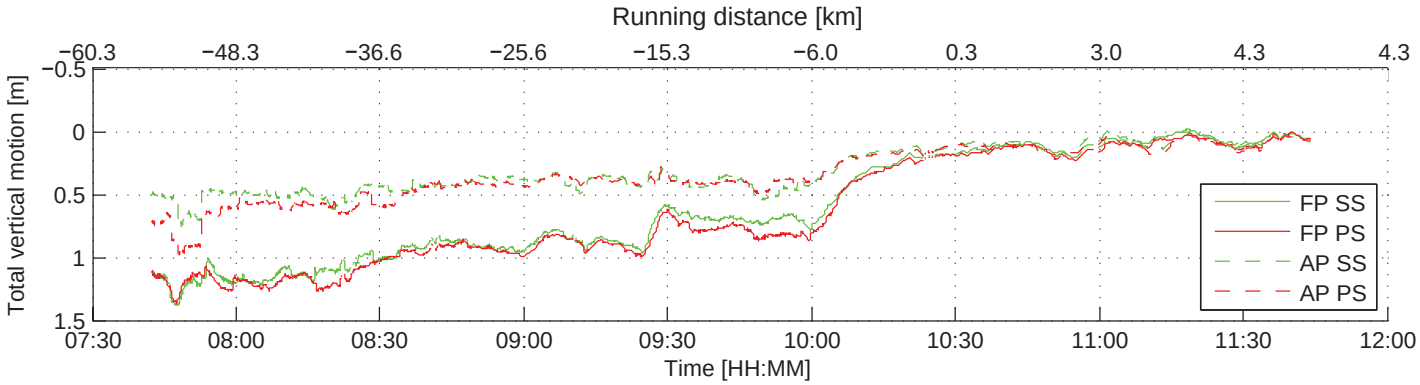
Maximum vertical motions

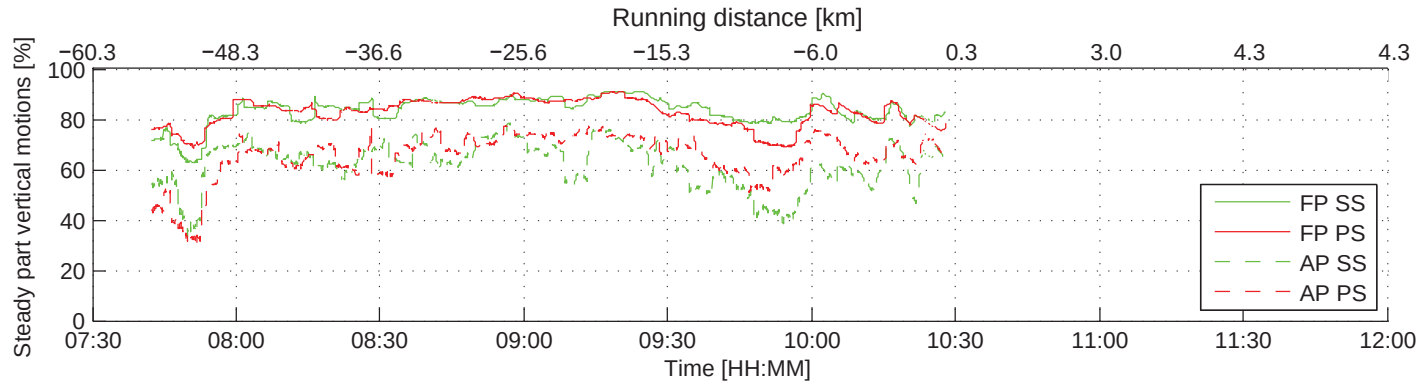
Kaloothaven







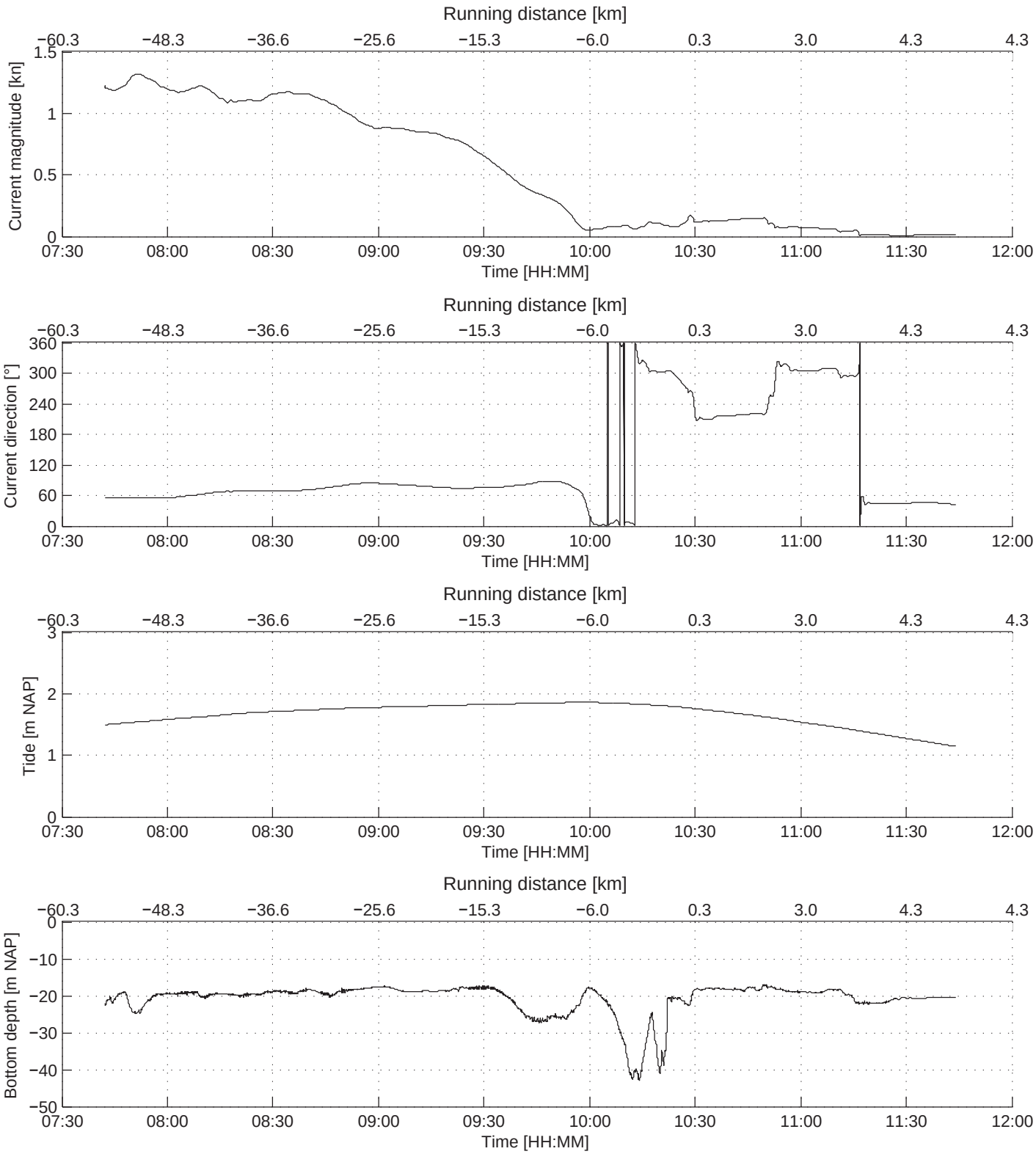




Asian Blossom
T= 16.43 m

Environment

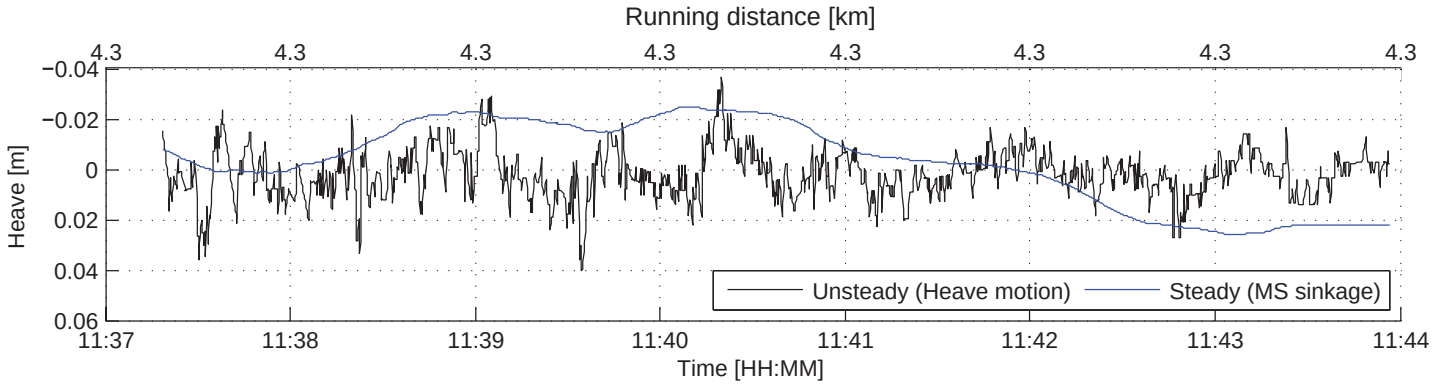
Kaloothaven

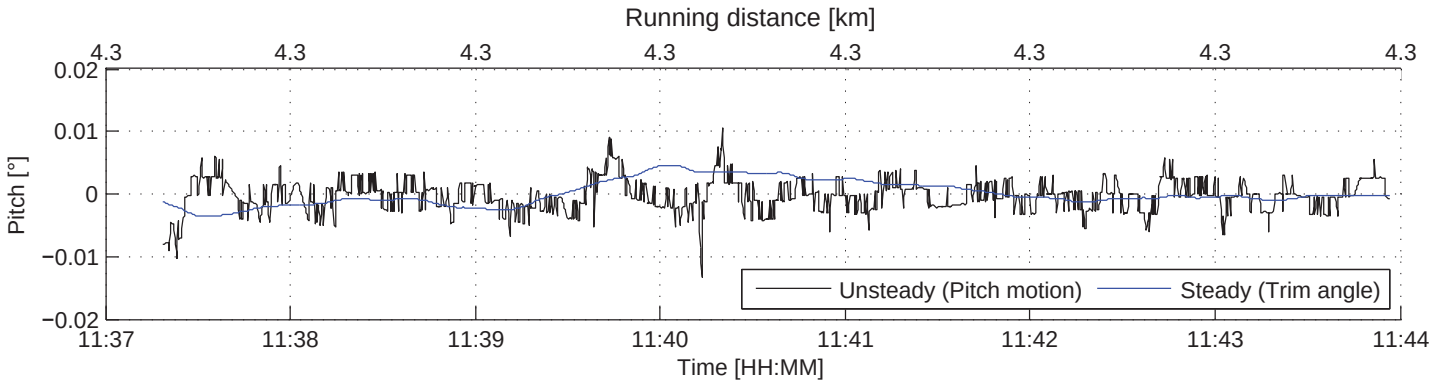


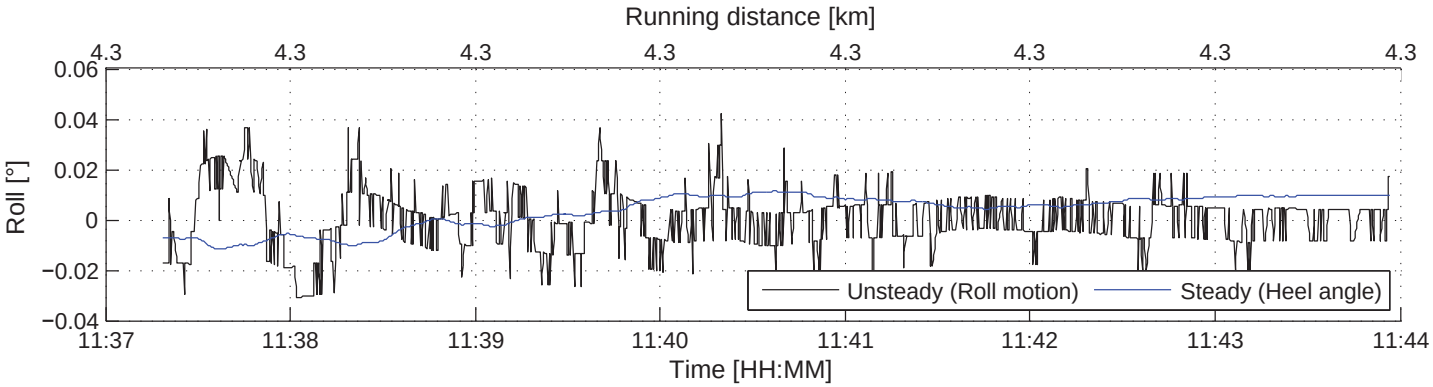
Asian Blossom
T= 16.43 m

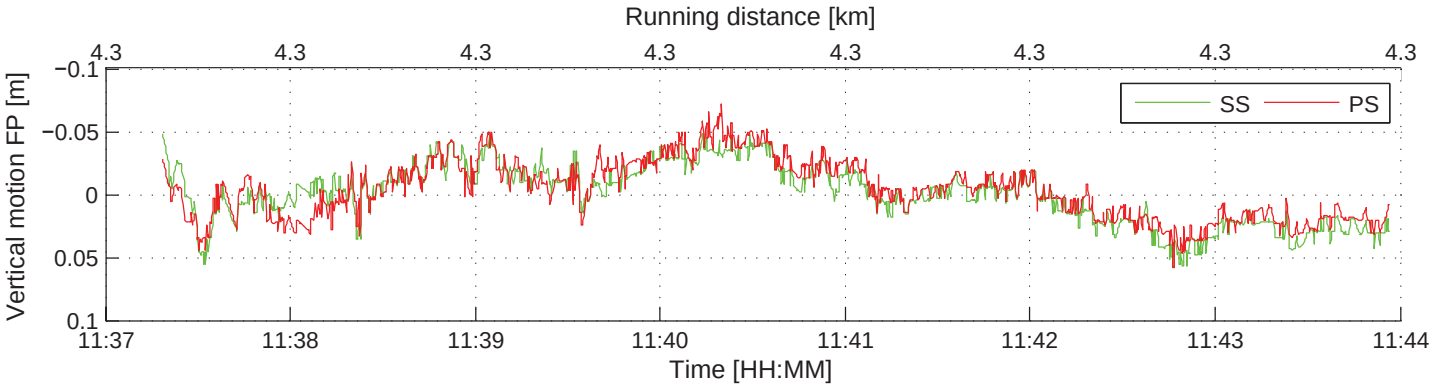
Initial static position

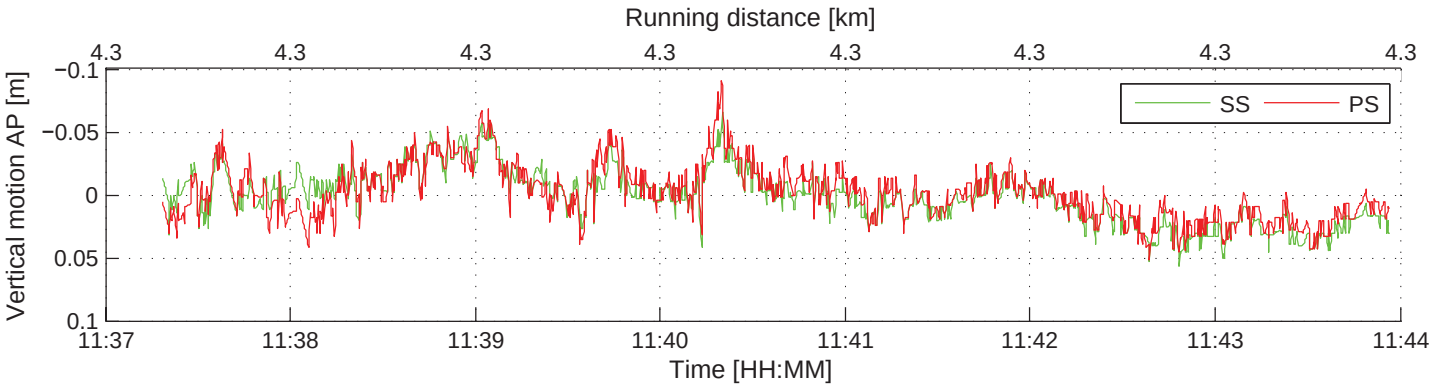
Kaloothaven







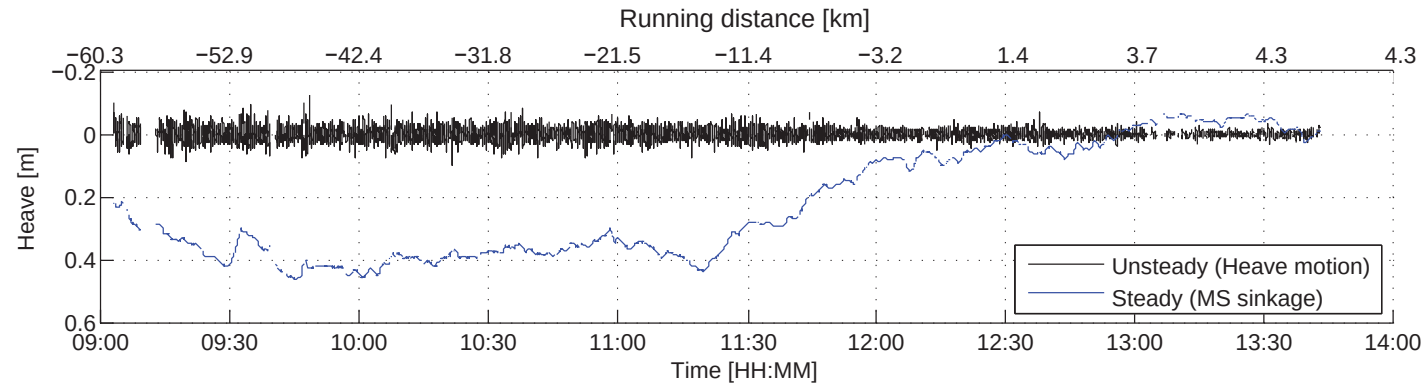


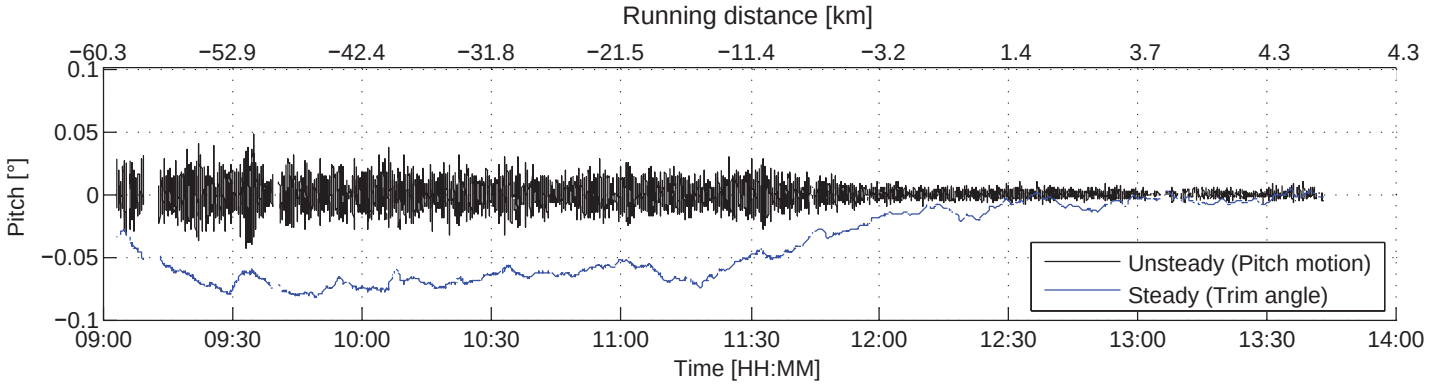


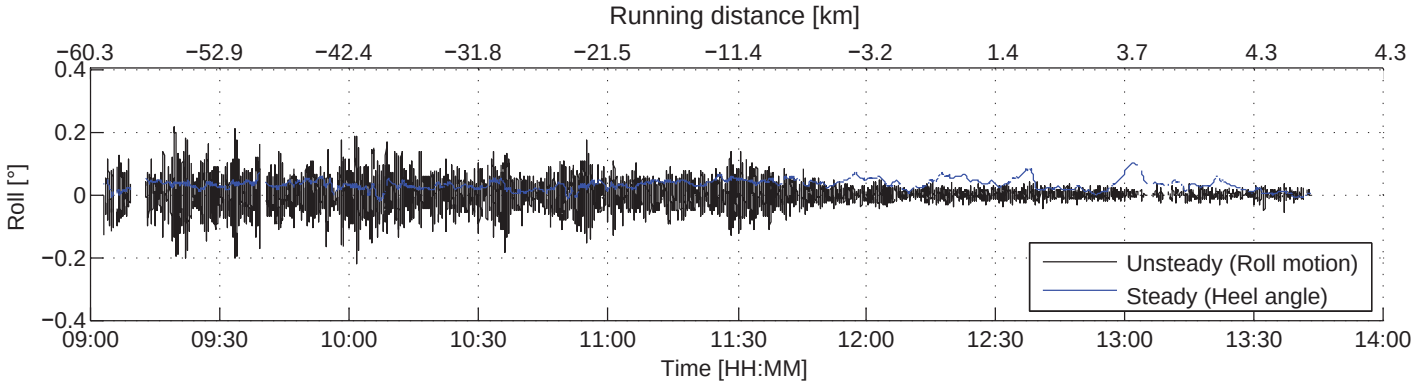
Cape Canary
T= 16.5 m

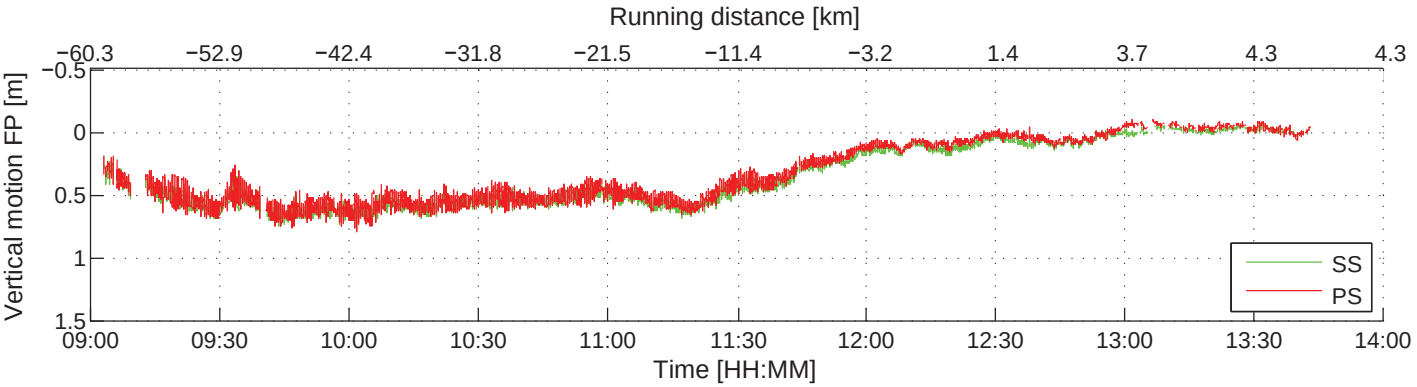
Vertical motions: unsteady and steady (running average)

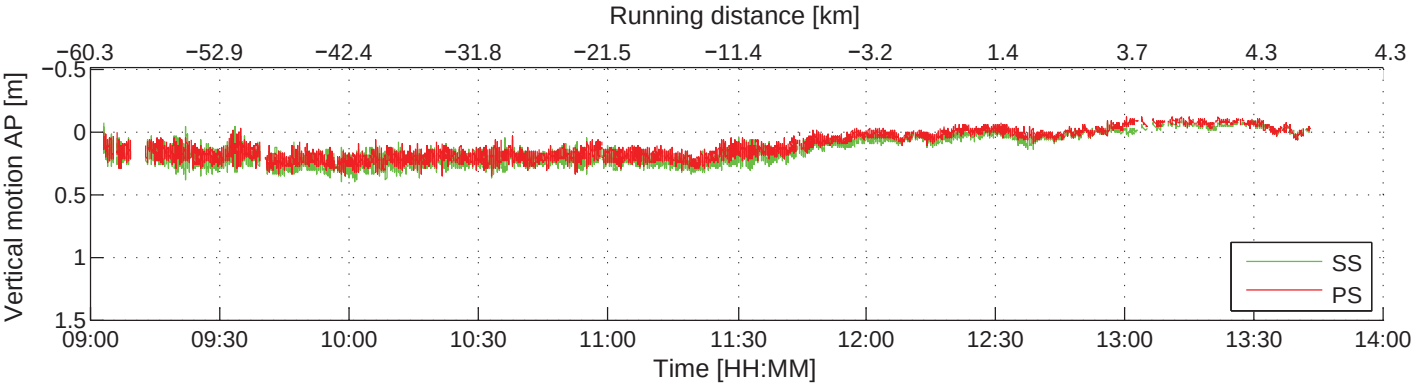
Kaloothaven







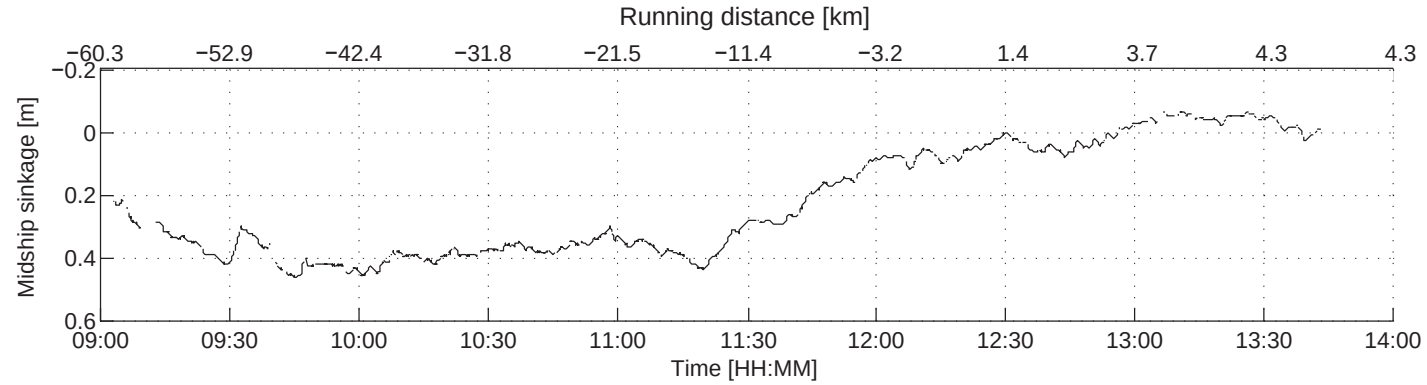


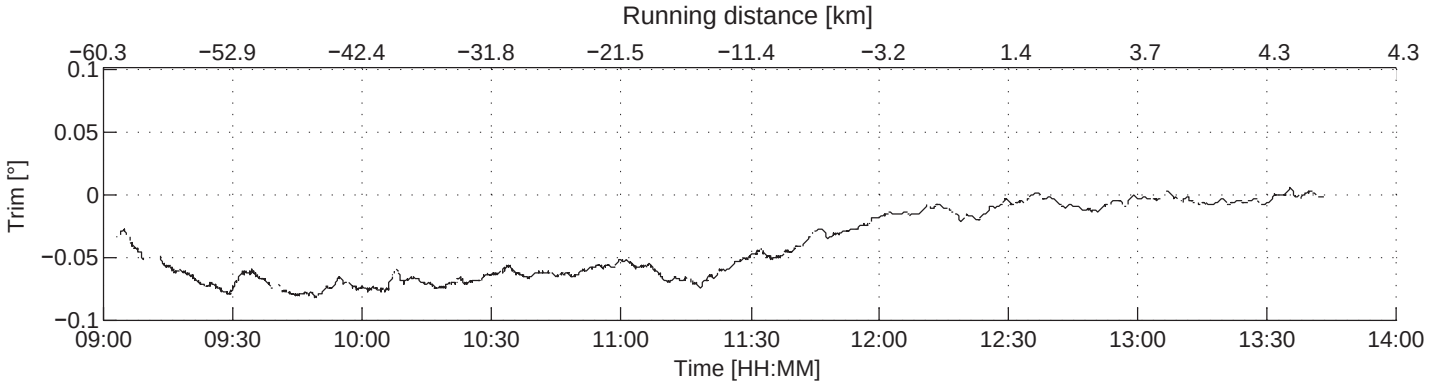


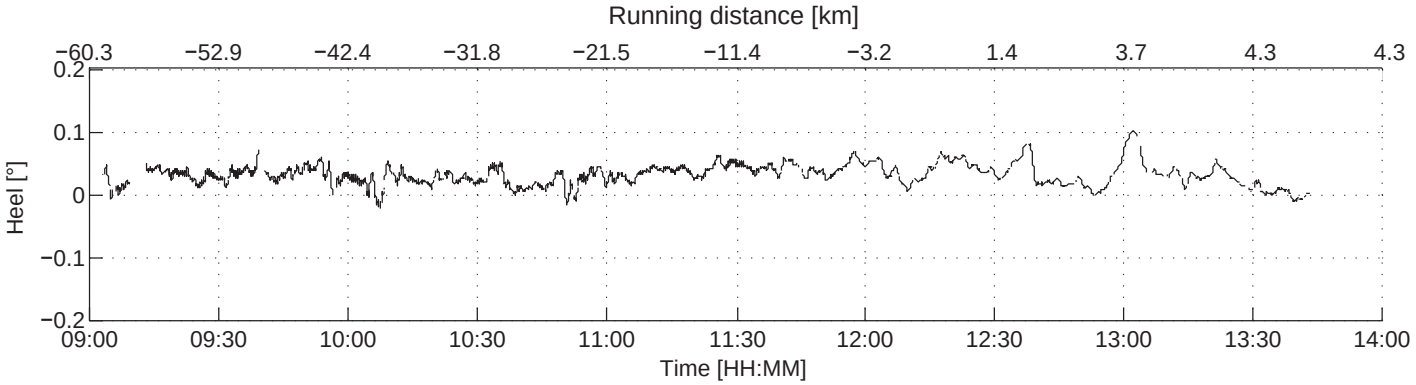
Cape Canary
T= 16.5 m

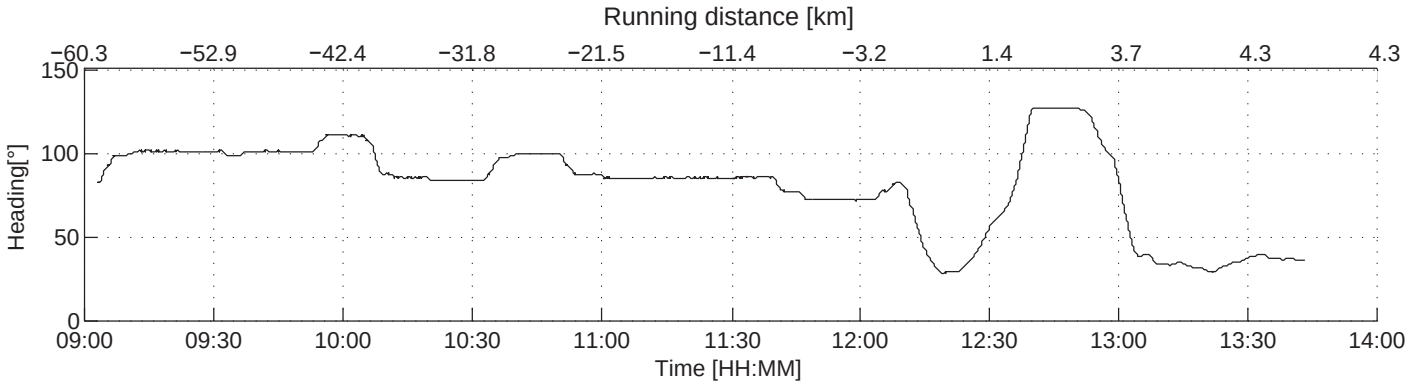
Steady motions and vessel's course

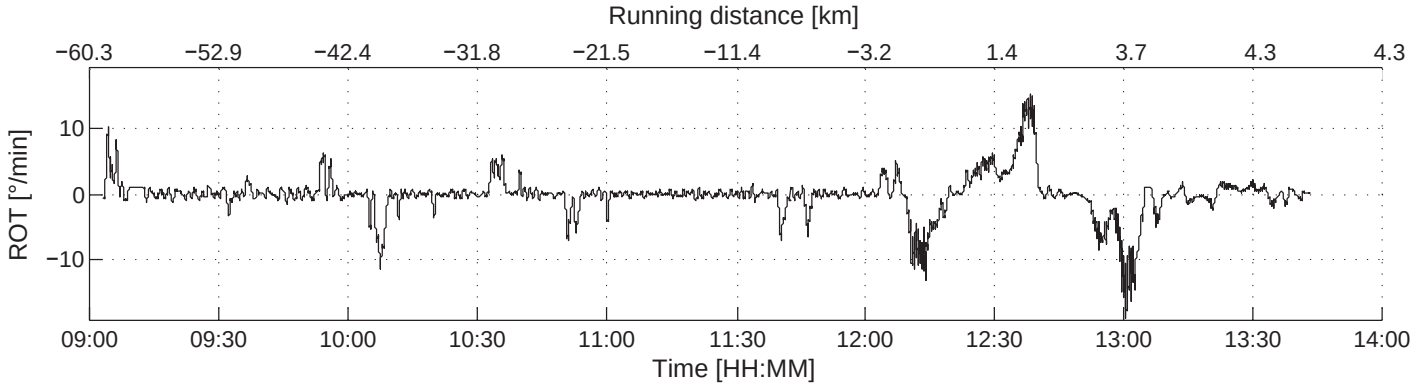
Kaloothaven







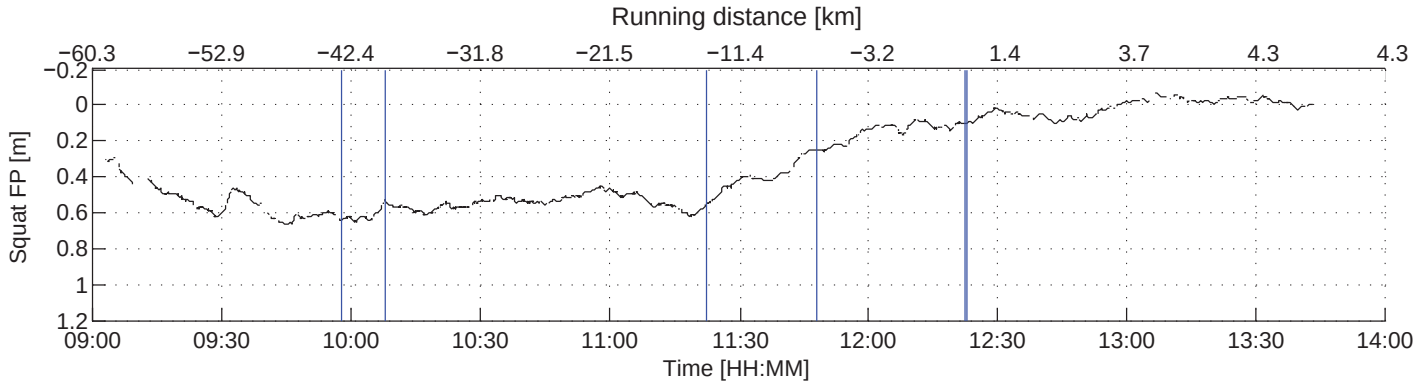


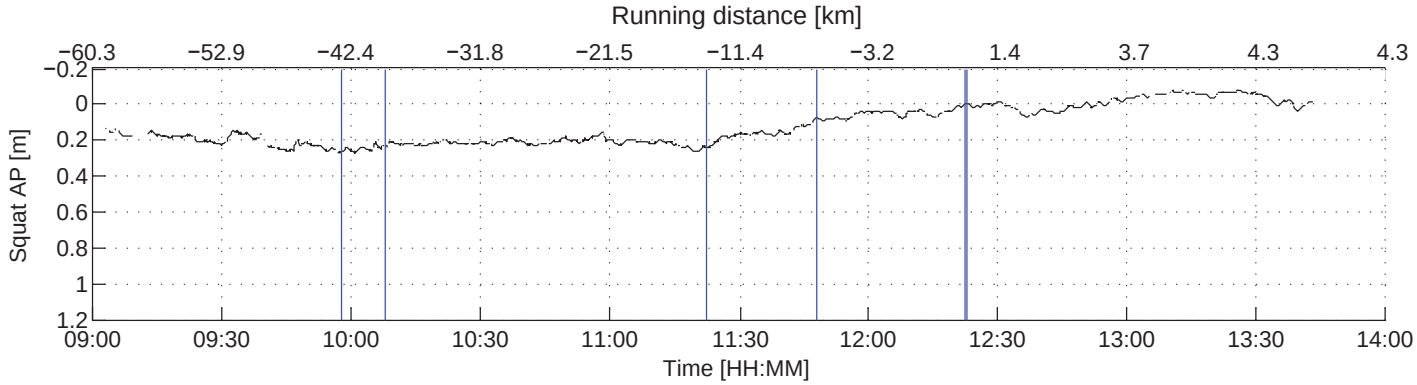


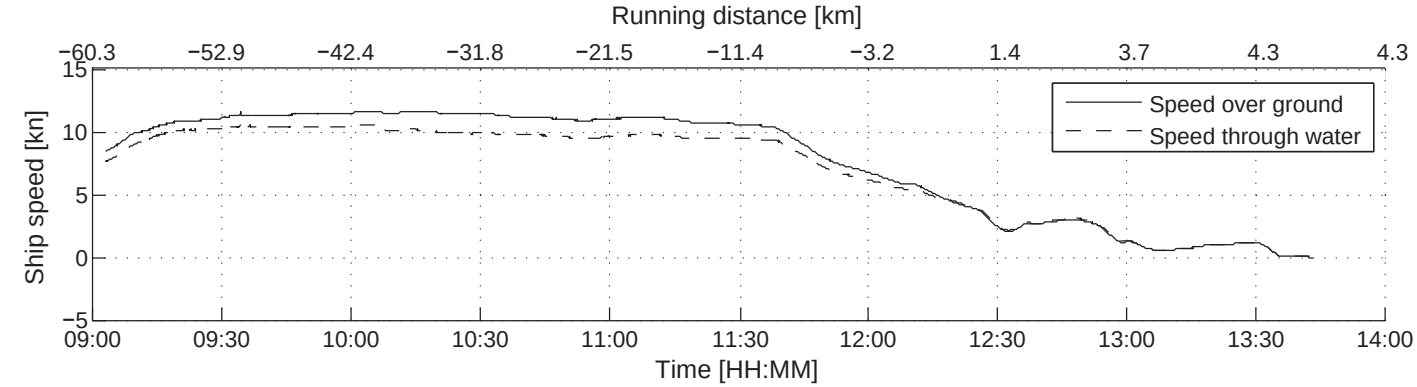
Cape Canary
T= 16.5 m

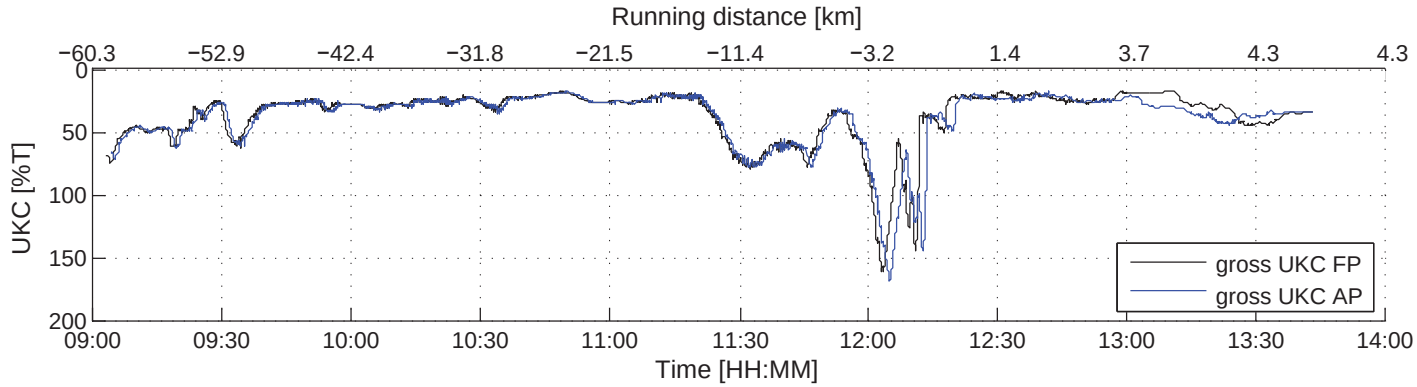
SQUAT analysis

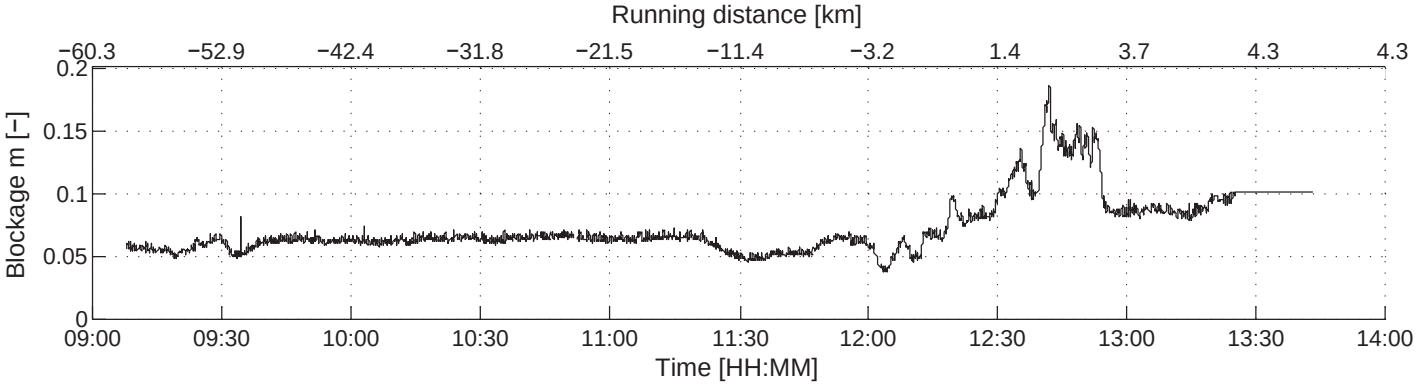
Kaloothaven







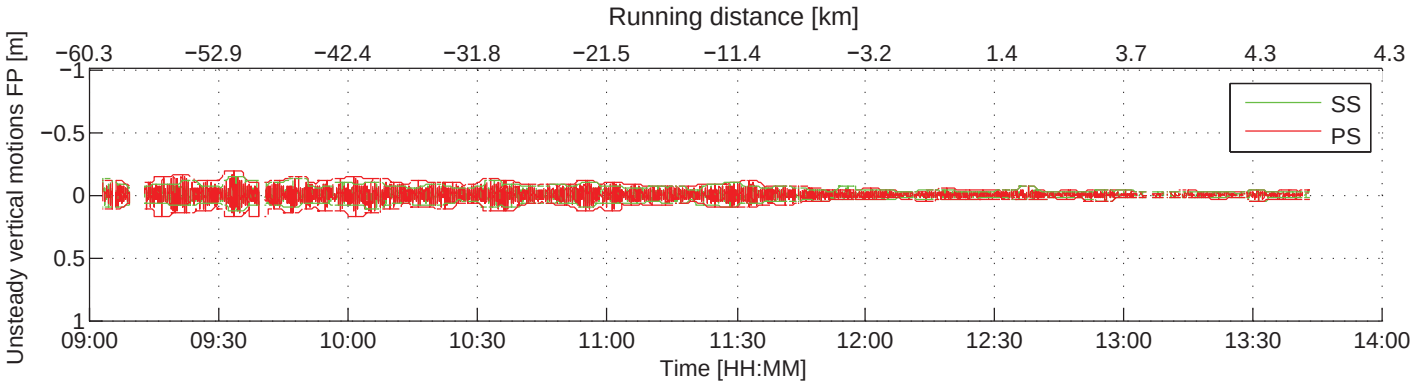


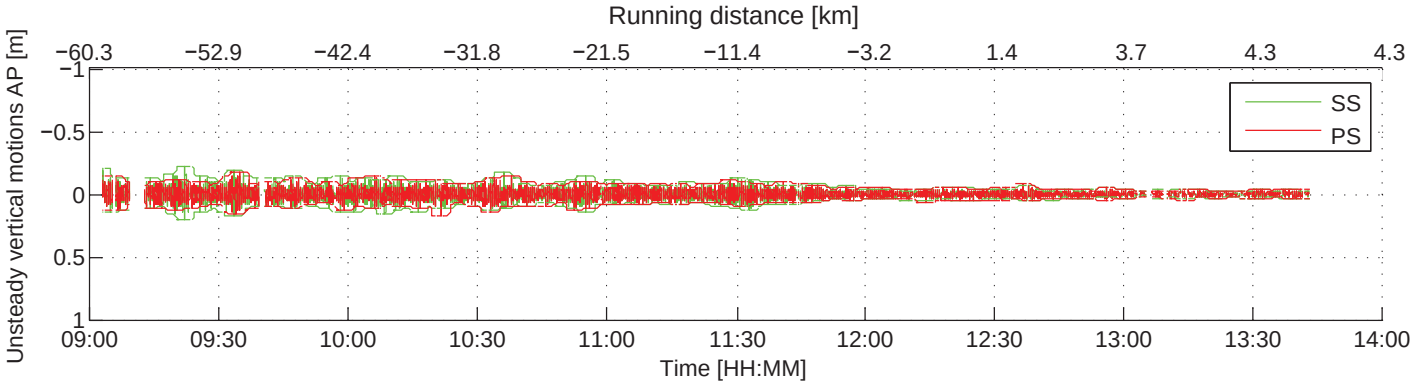


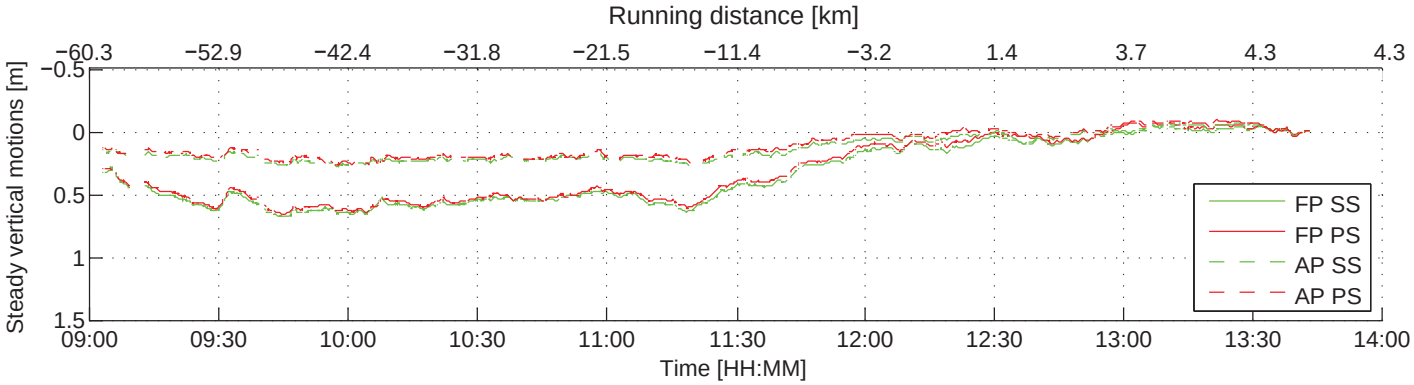
Cape Canary
T= 16.5 m

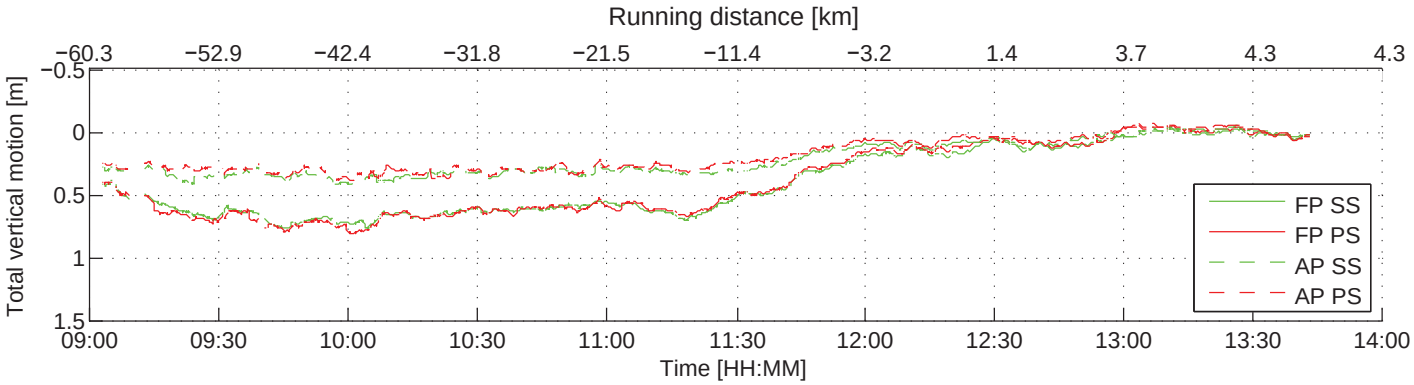
Maximum vertical motions

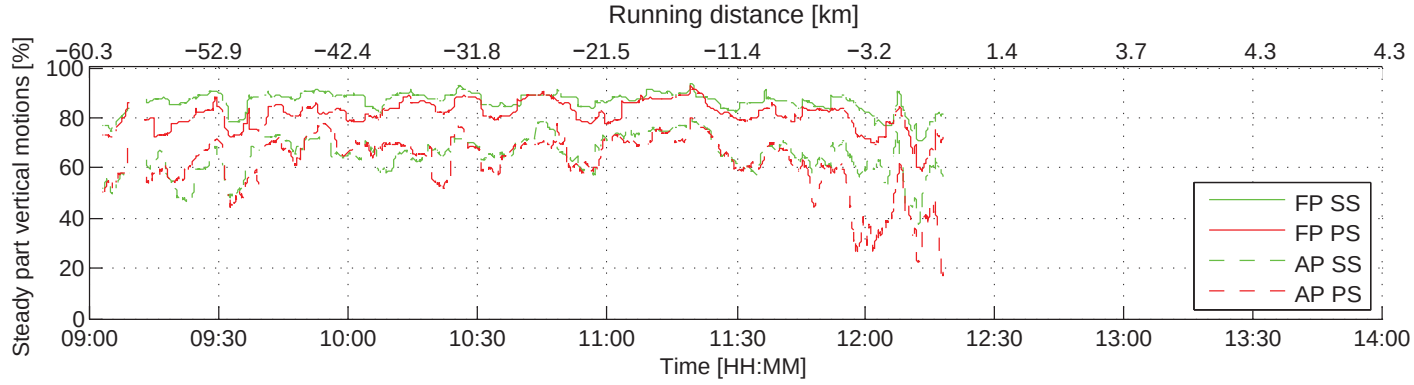
Kaloothaven







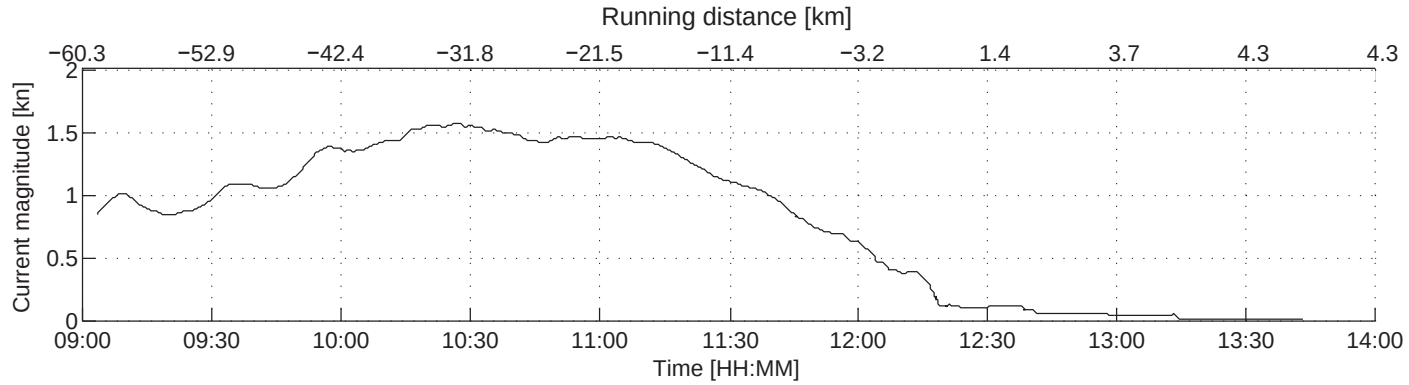


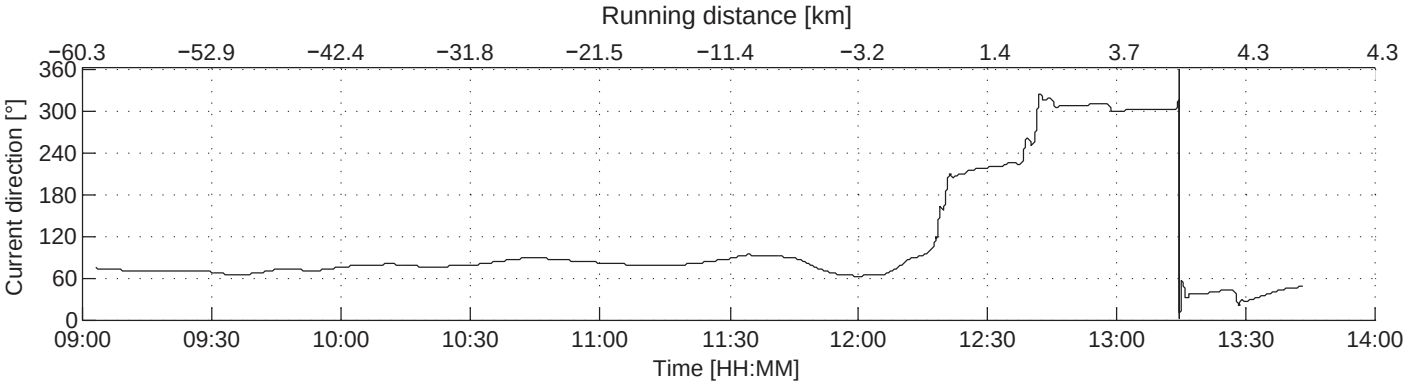


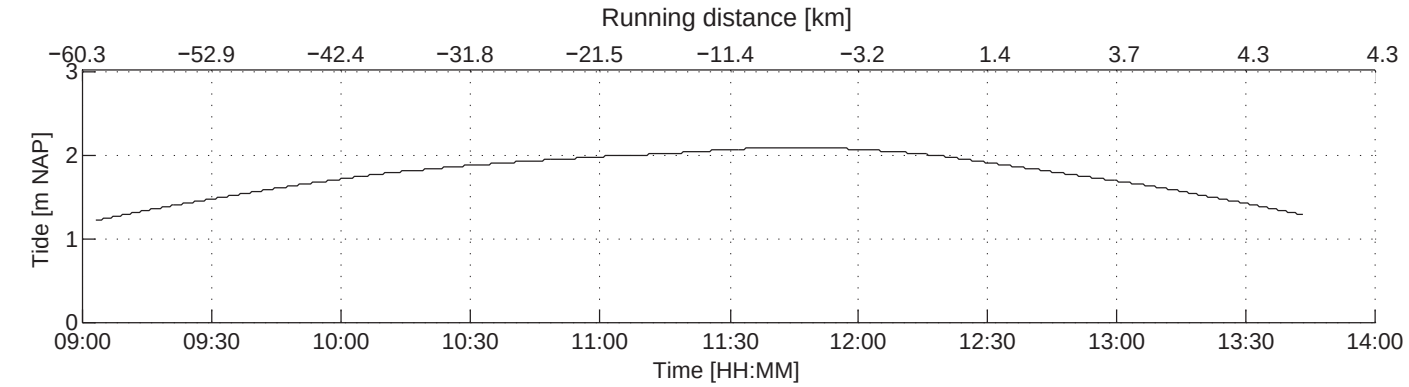
Cape Canary
T= 16.5 m

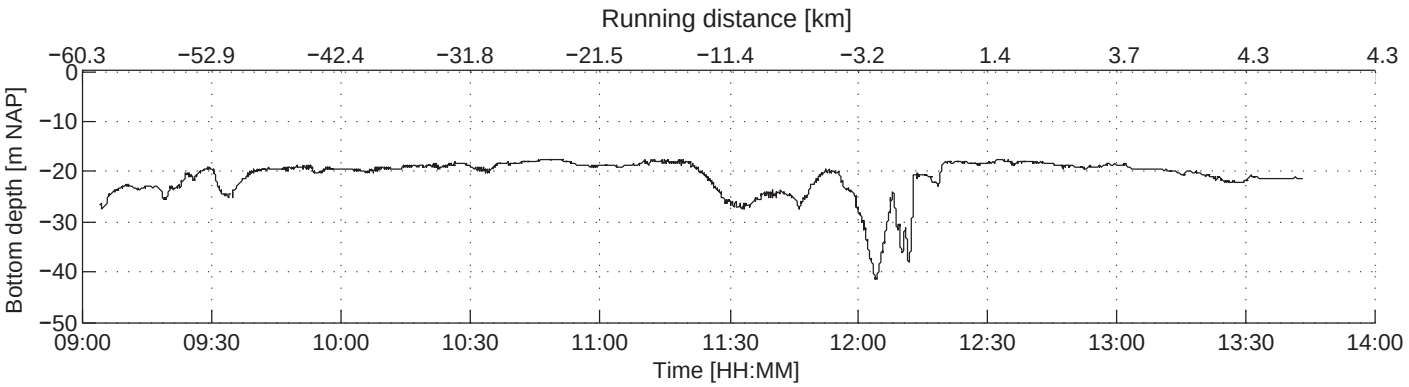
Environment

Kaloothaven





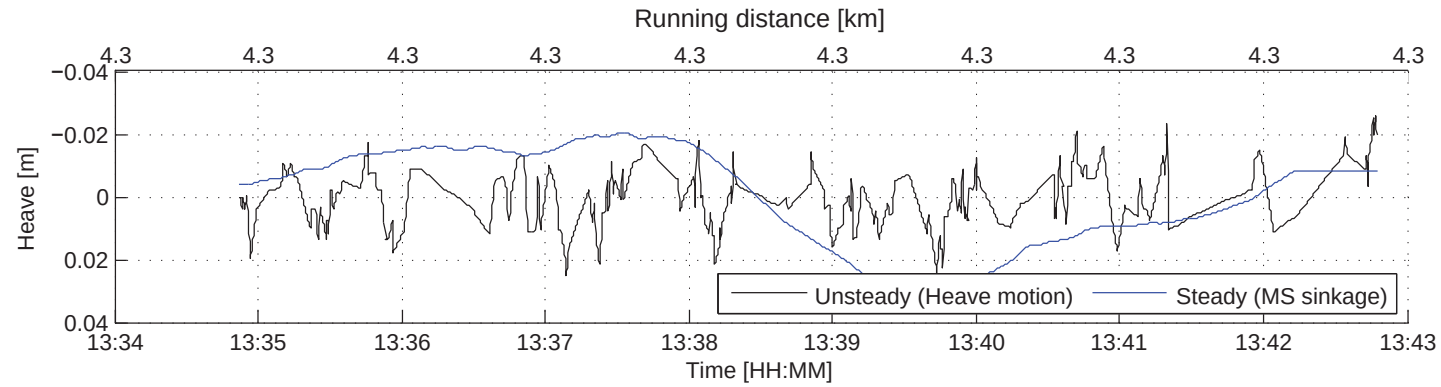


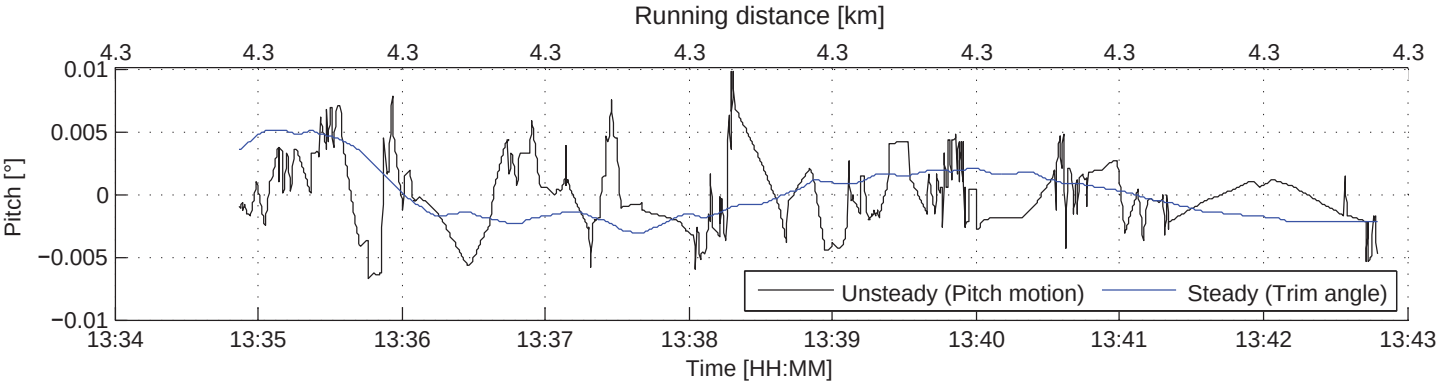


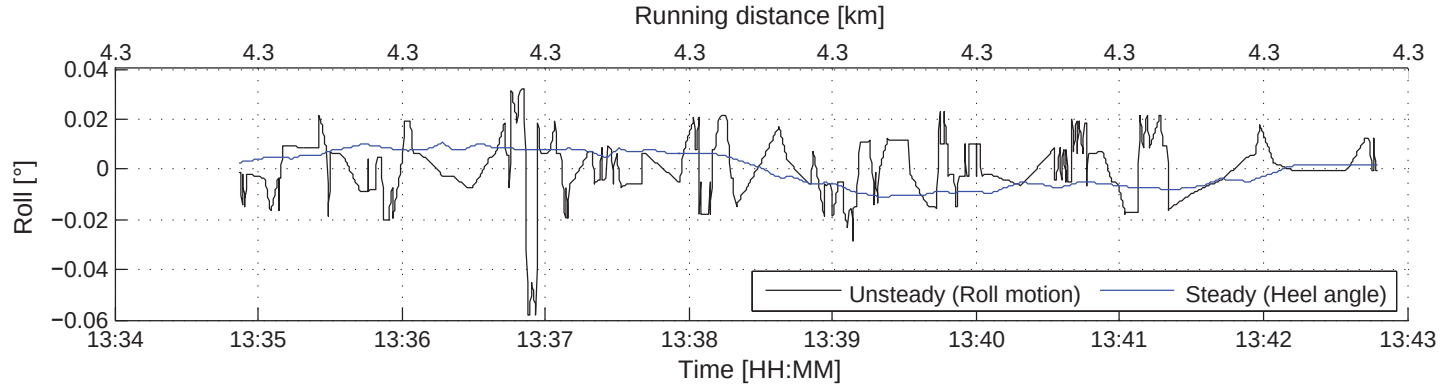
Cape Canary
T= 16.5 m

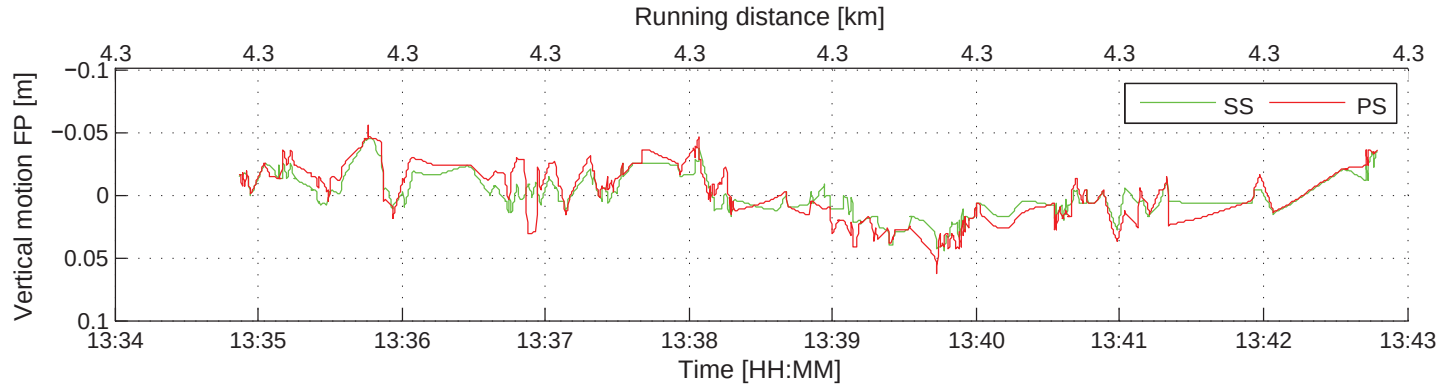
Initial static position

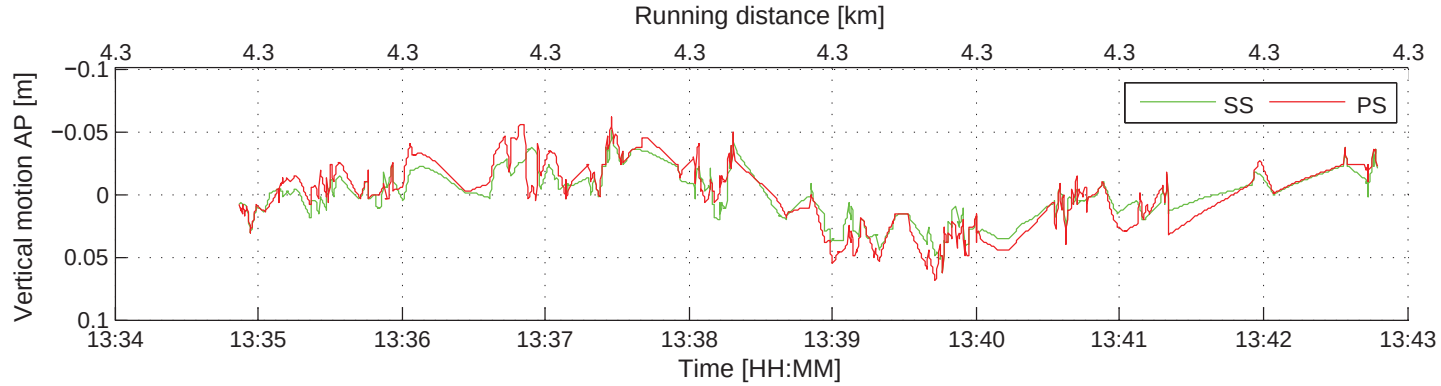
Kaloothaven







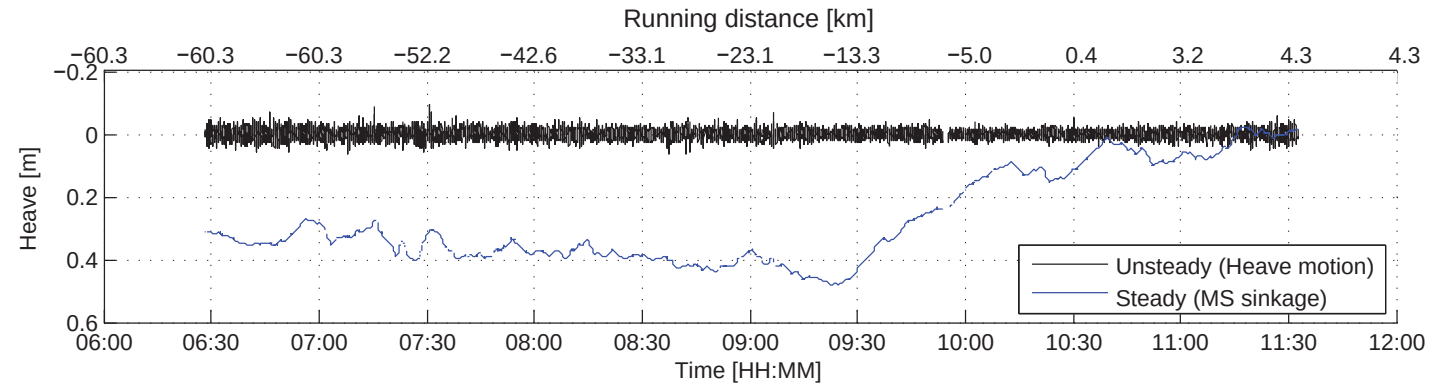


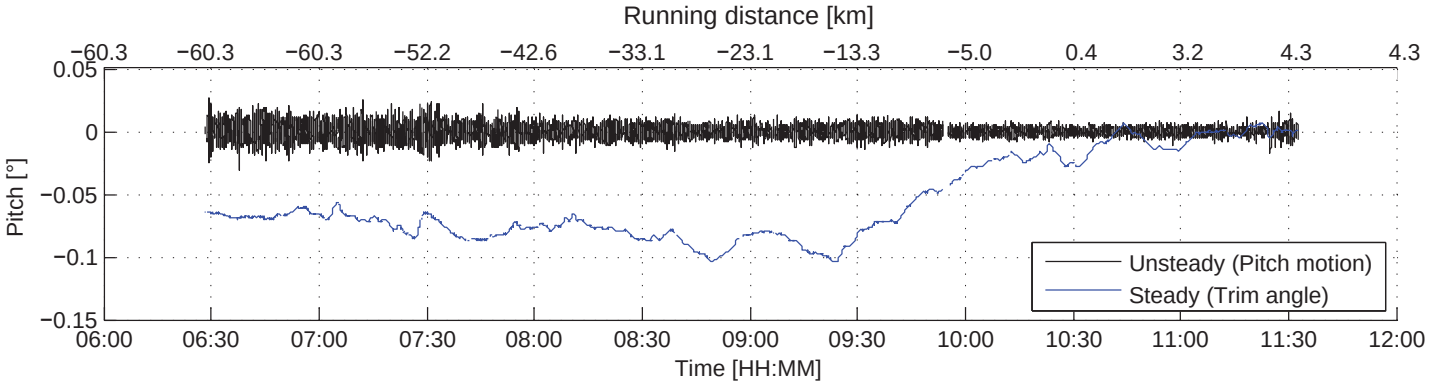


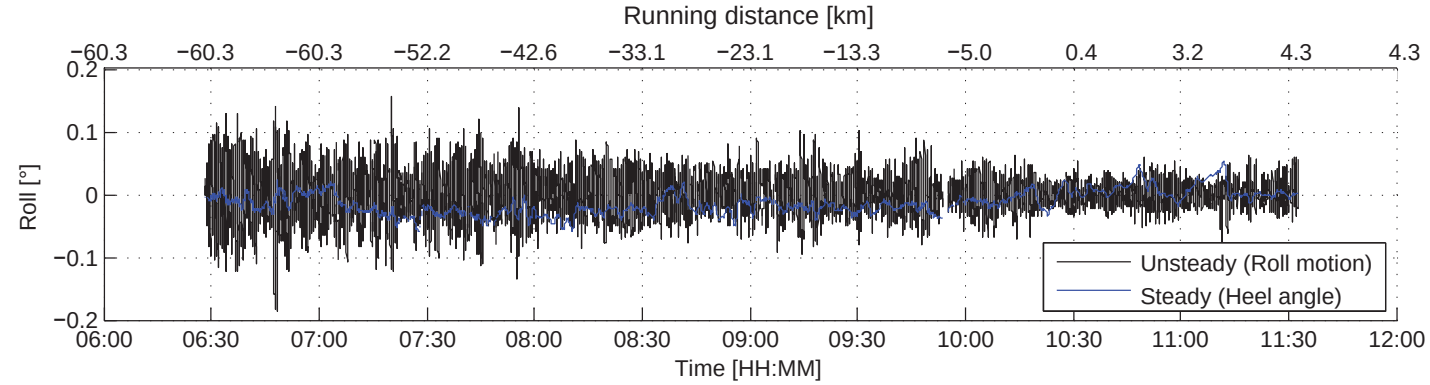
Wisdom of the Sea
T= 16.3625 m

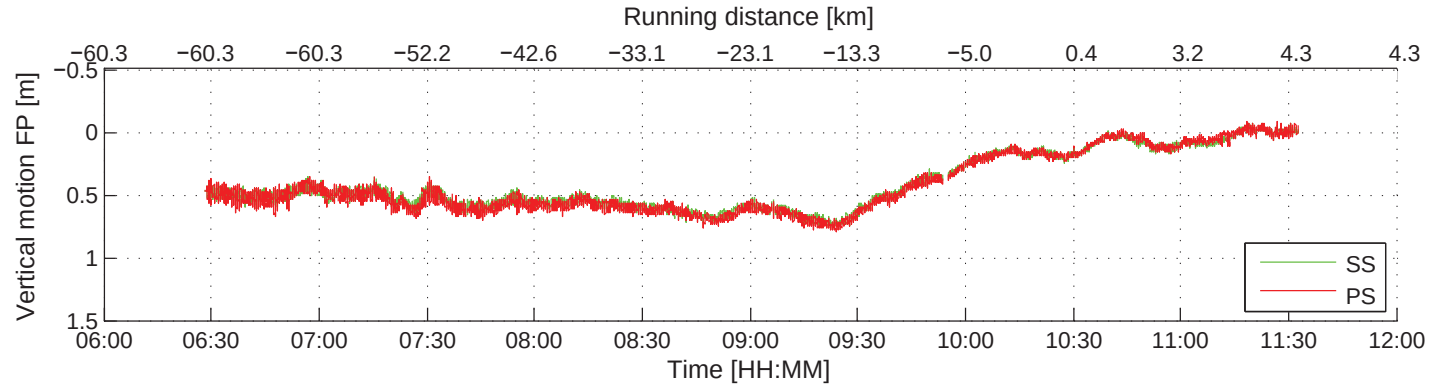
Vertical motions: unsteady and steady (running average)

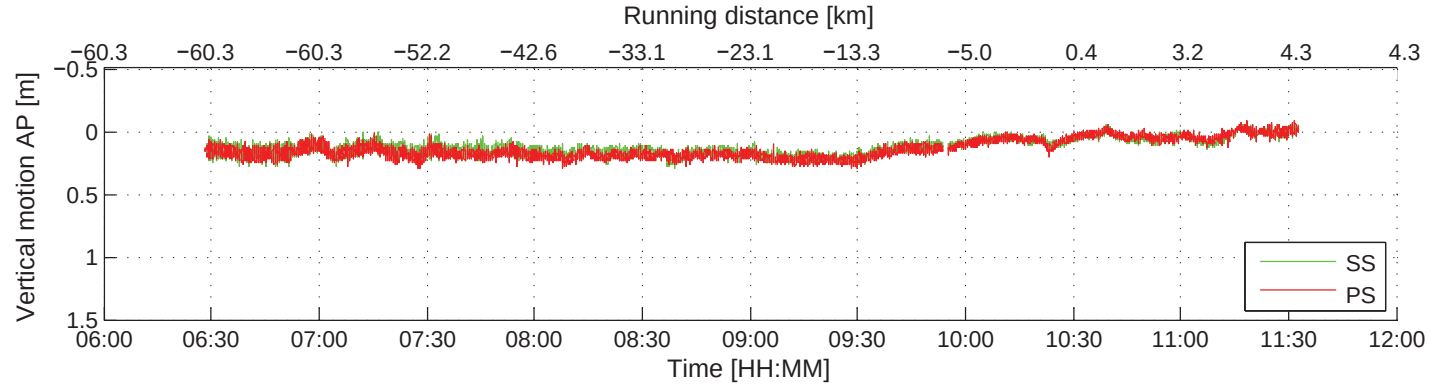
Kaloothaven







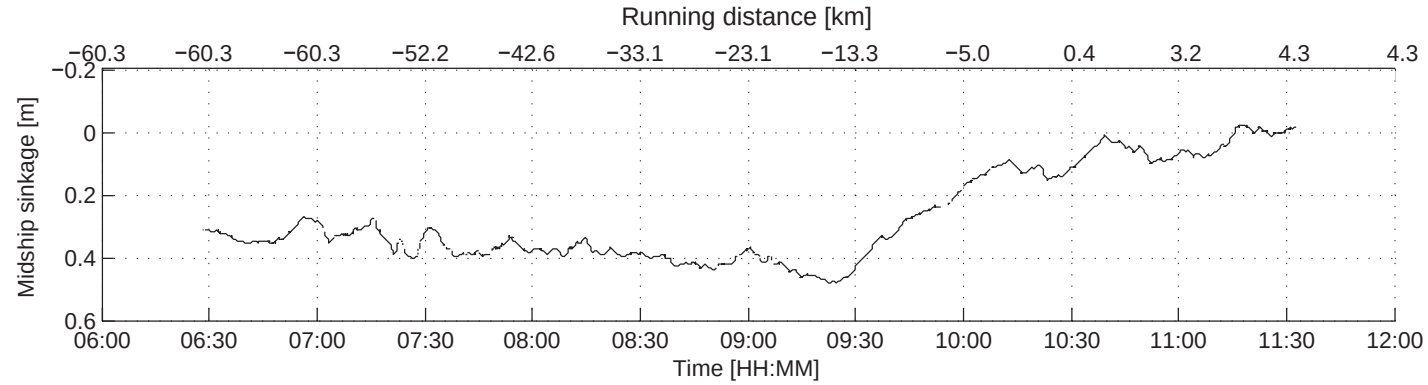


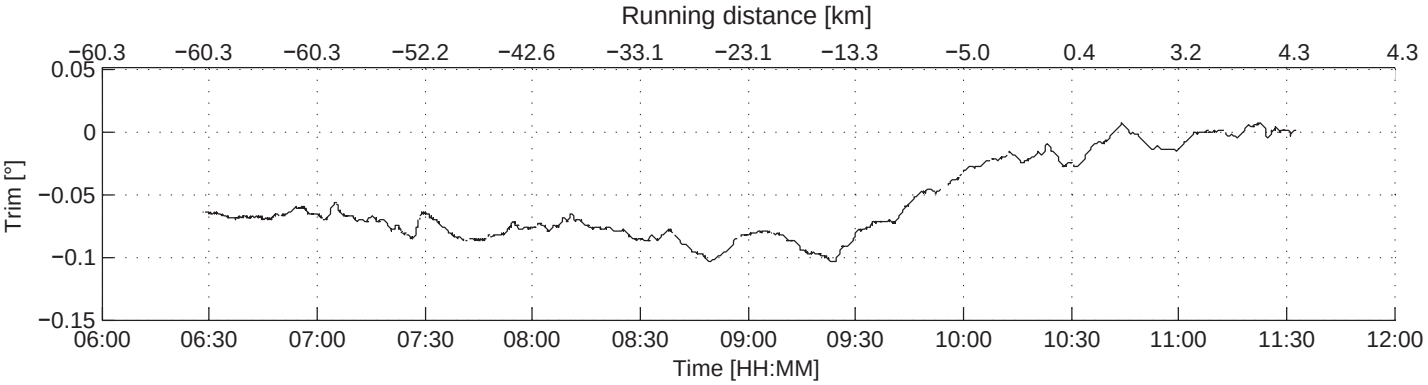


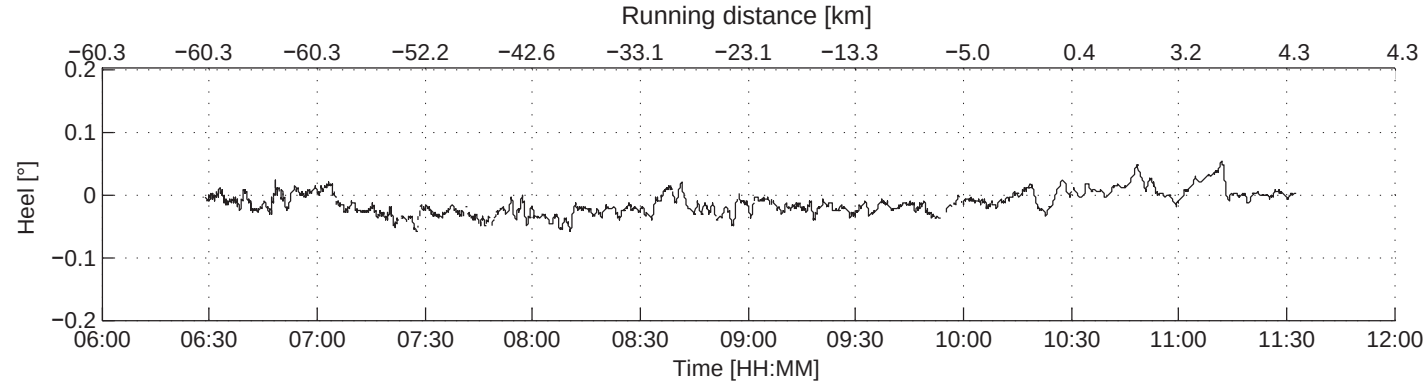
Wisdom of the Sea
T= 16.3625 m

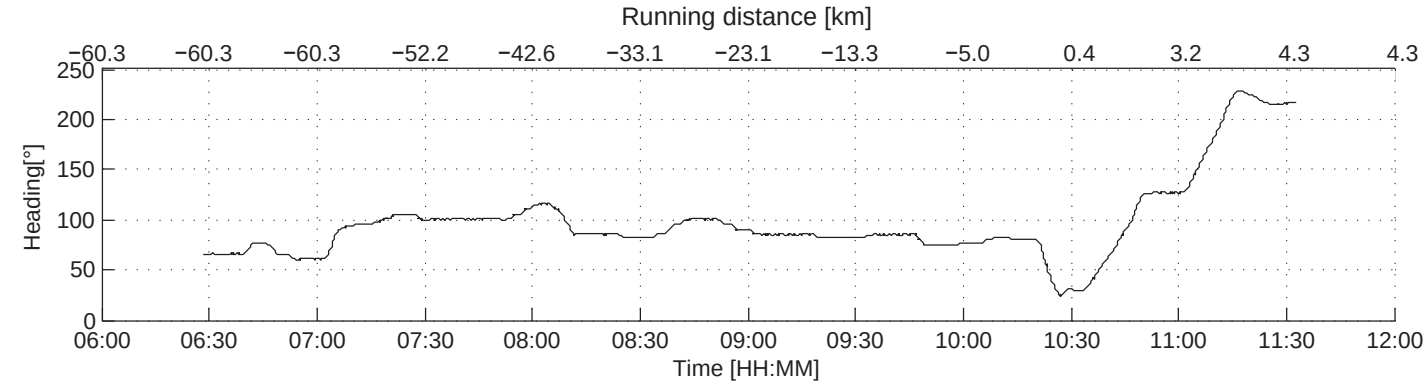
Steady motions and vessel's course

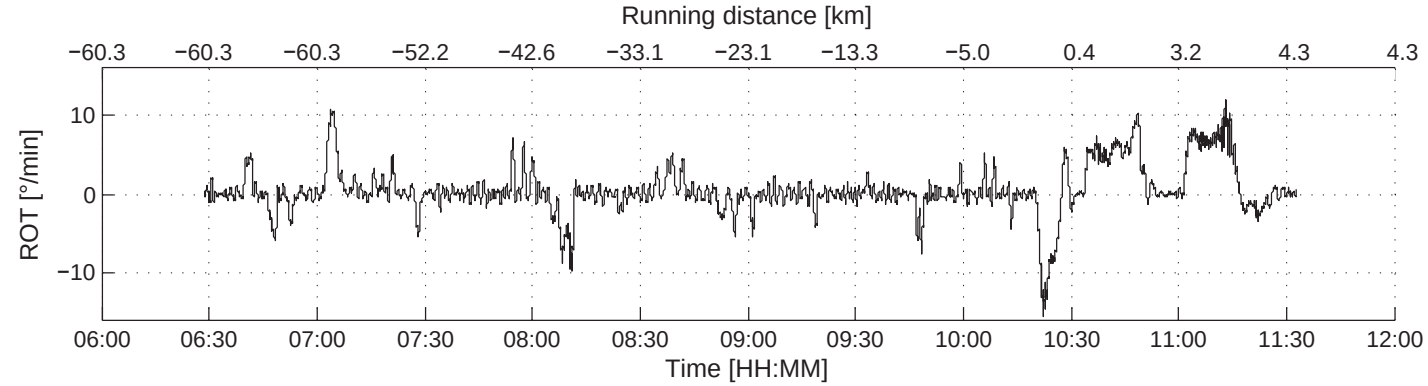
Kaloothaven







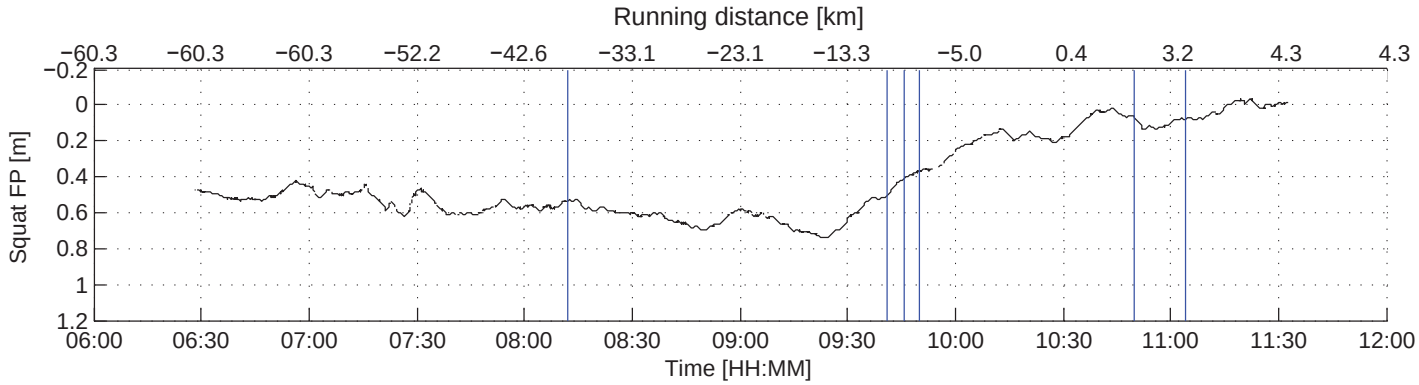


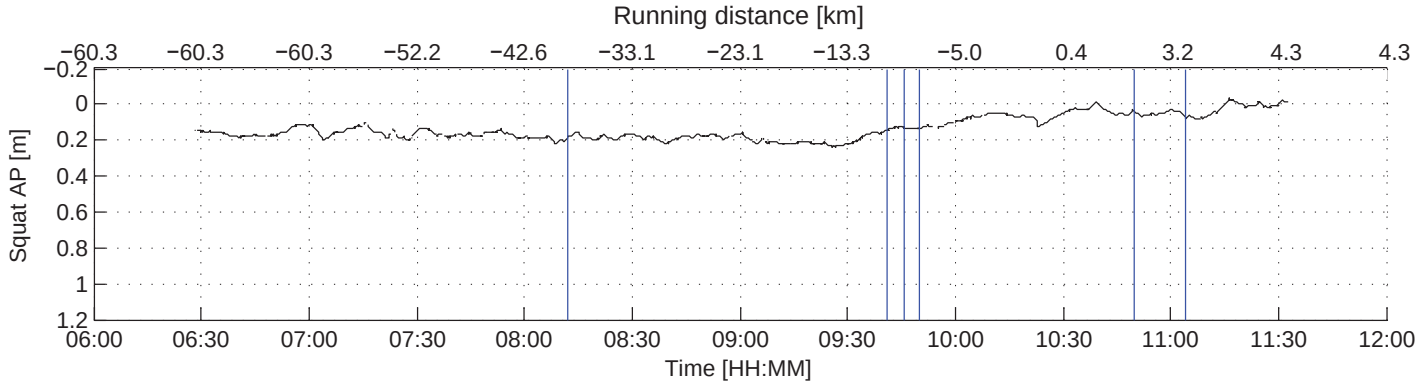


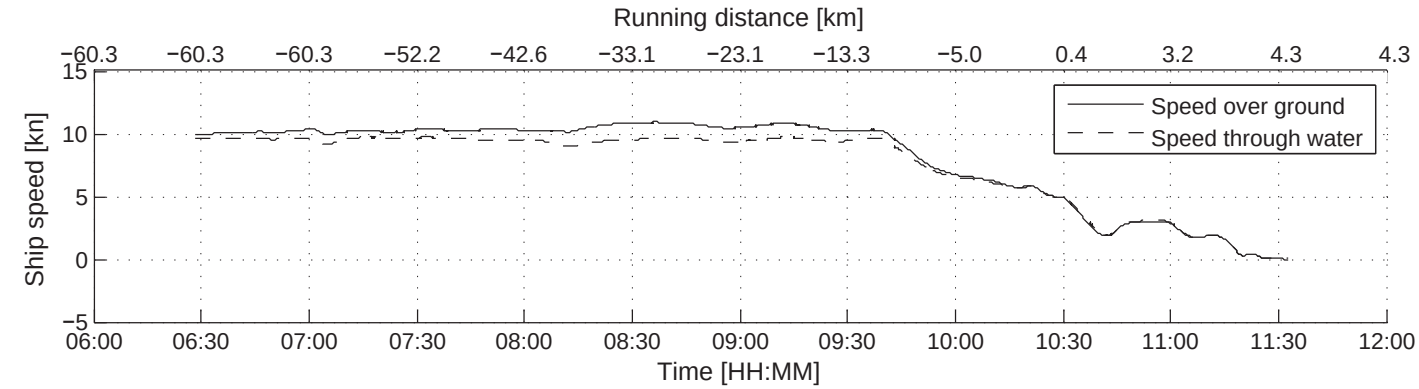
Wisdom of the Sea
T= 16.3625 m

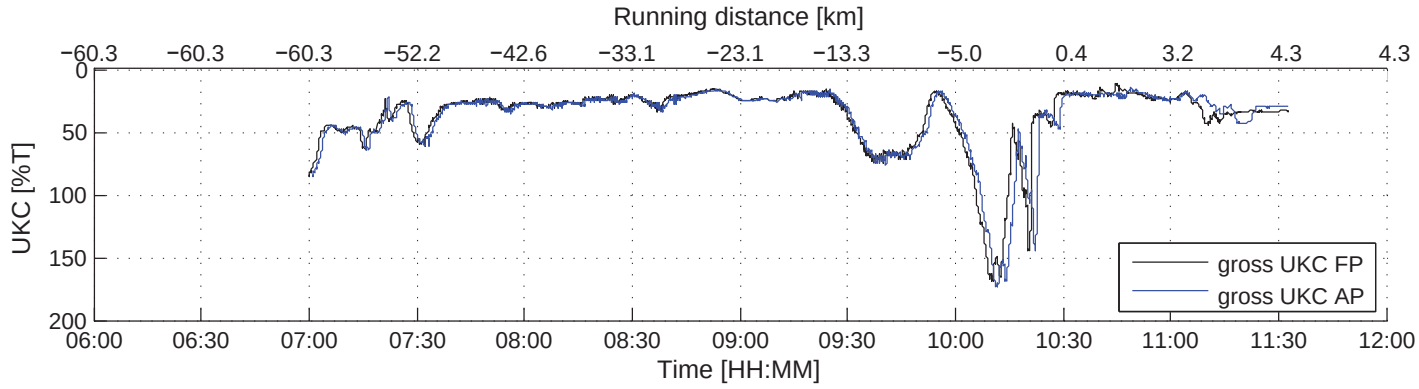
SQUAT analysis

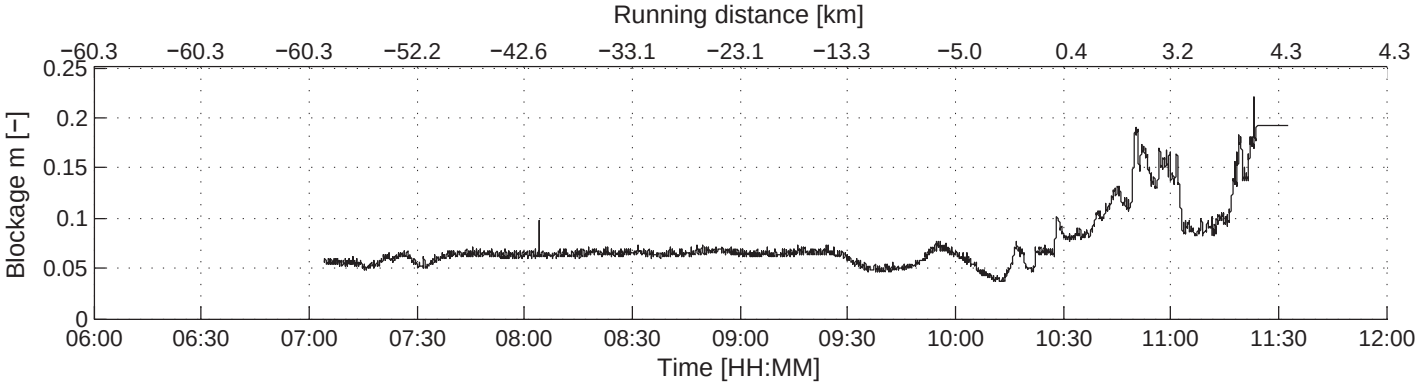
Kaloothaven







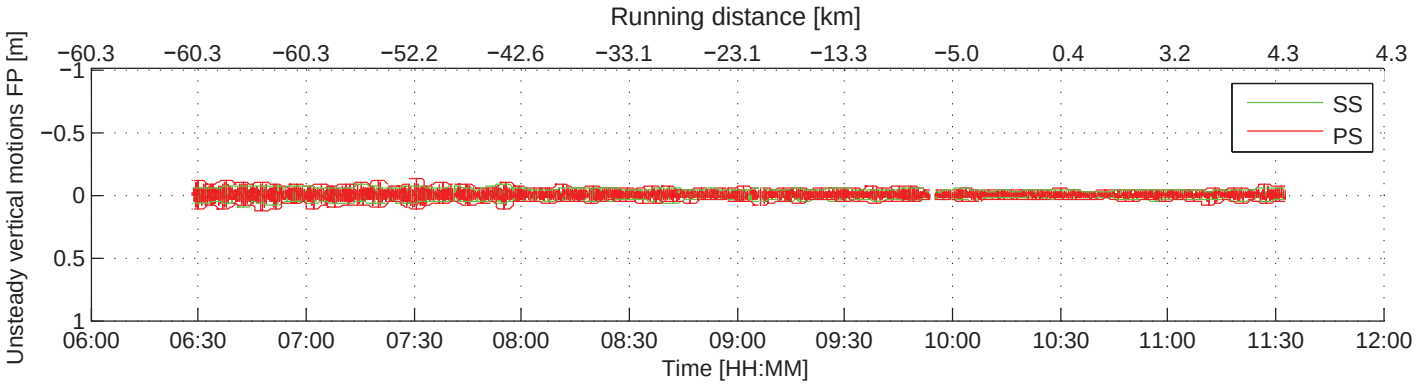


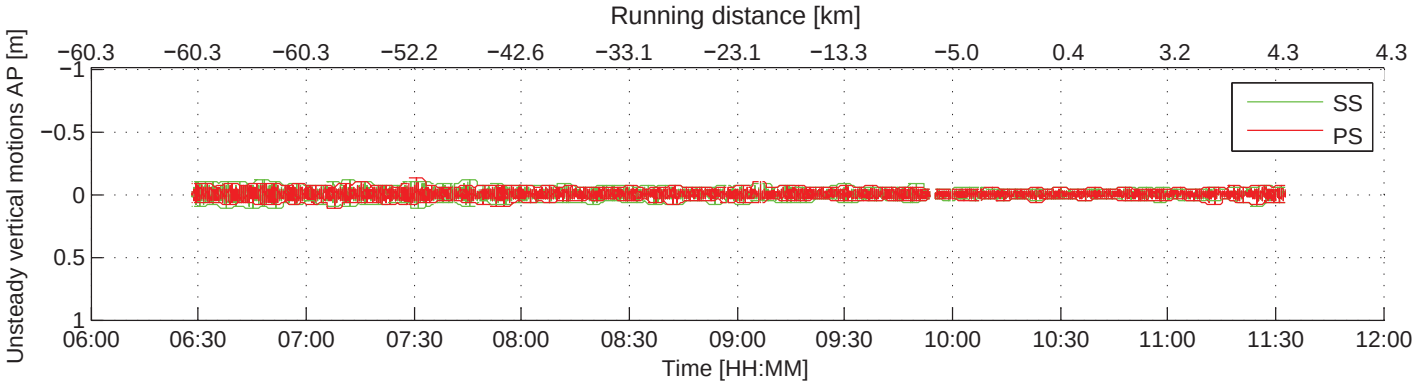


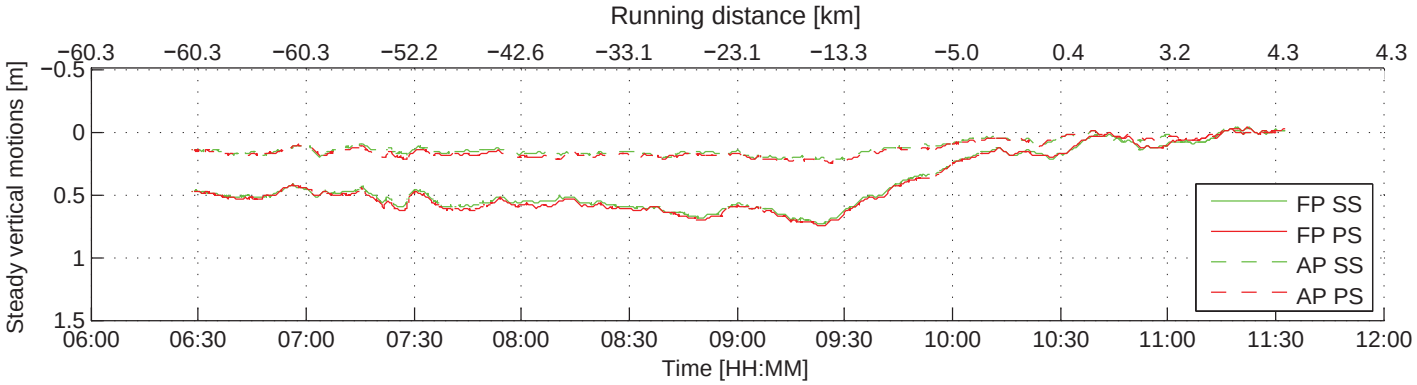
Wisdom of the Sea
T= 16.3625 m

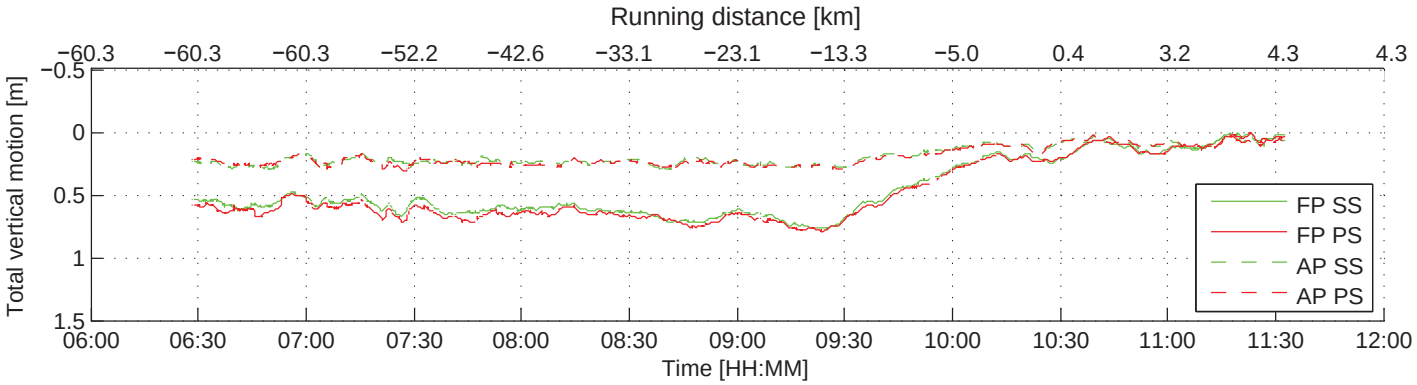
Maximum vertical motions

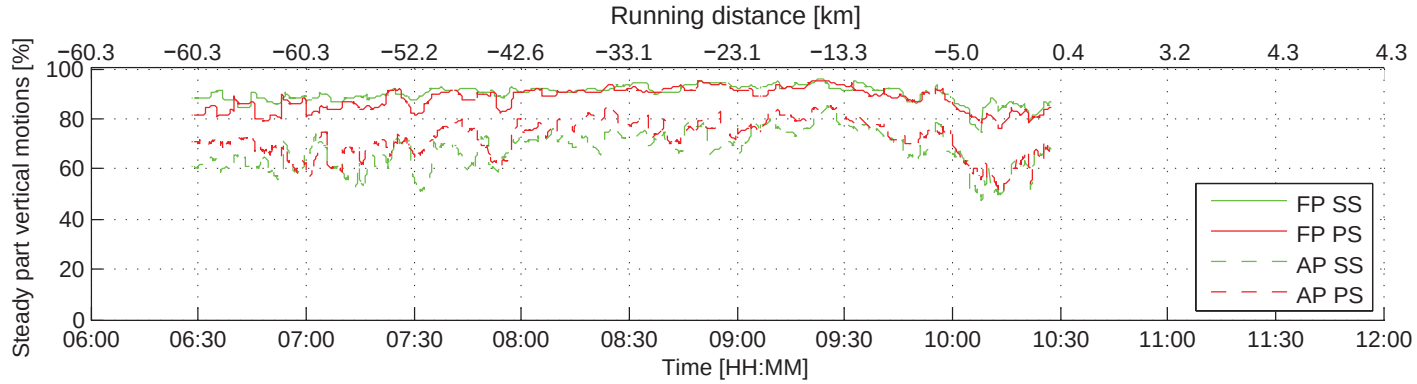
Kaloothaven







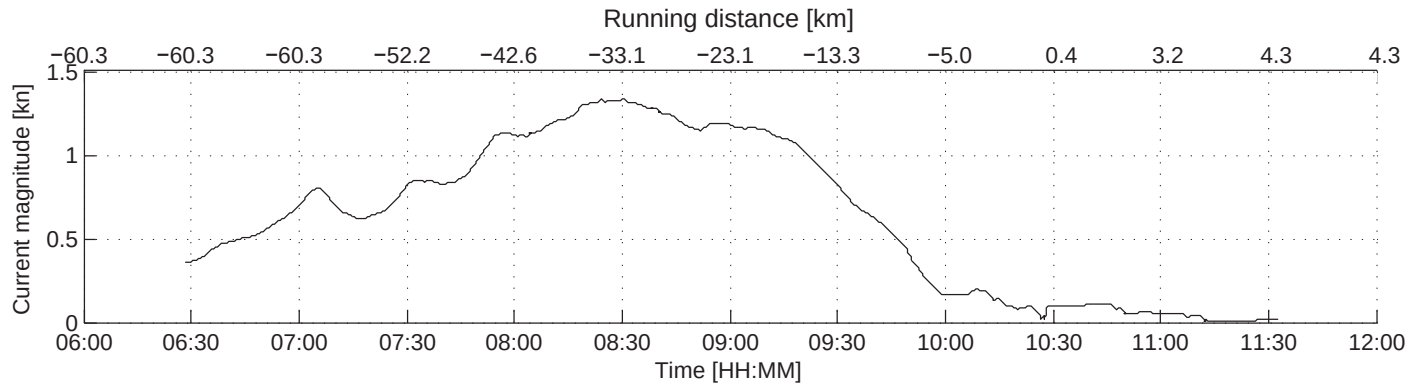


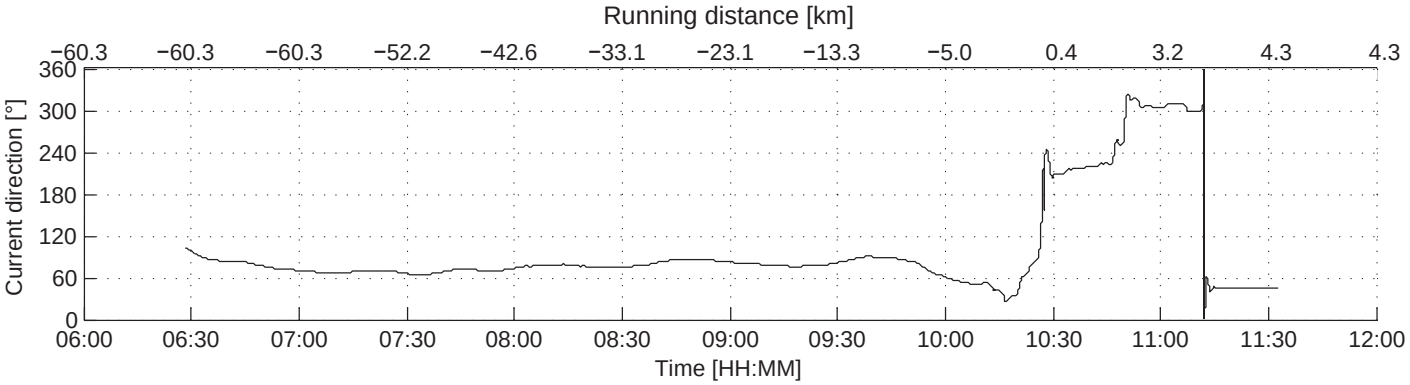


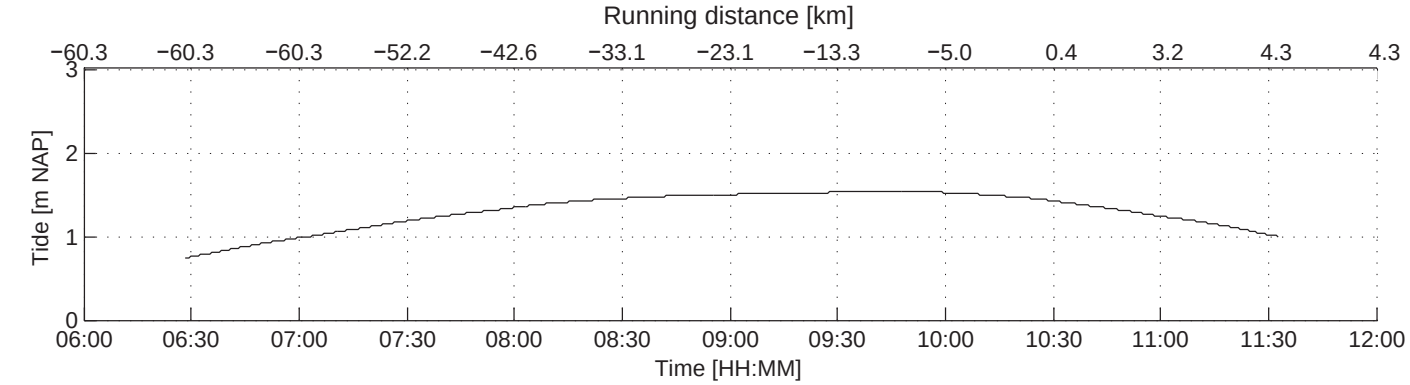
Wisdom of the Sea
T= 16.3625 m

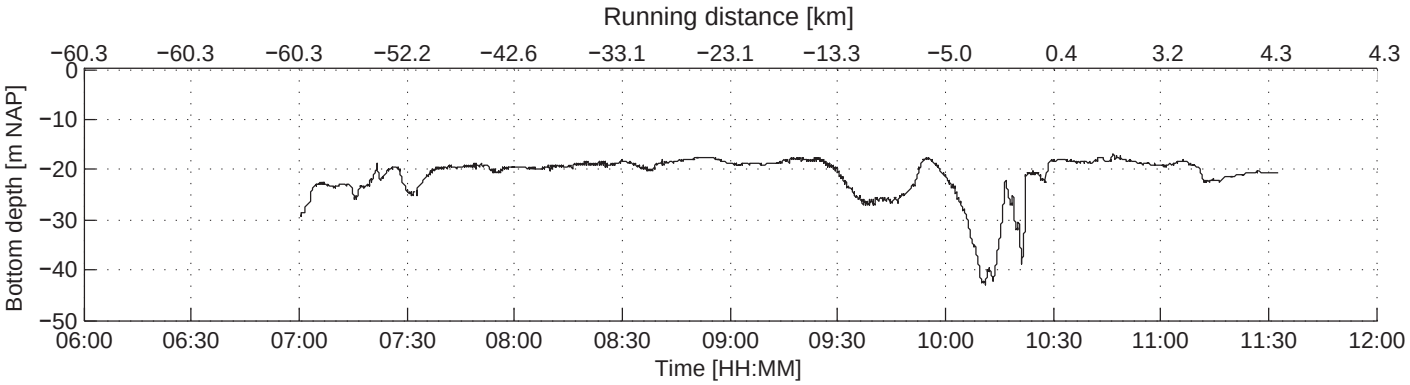
Environment

Kaloothaven





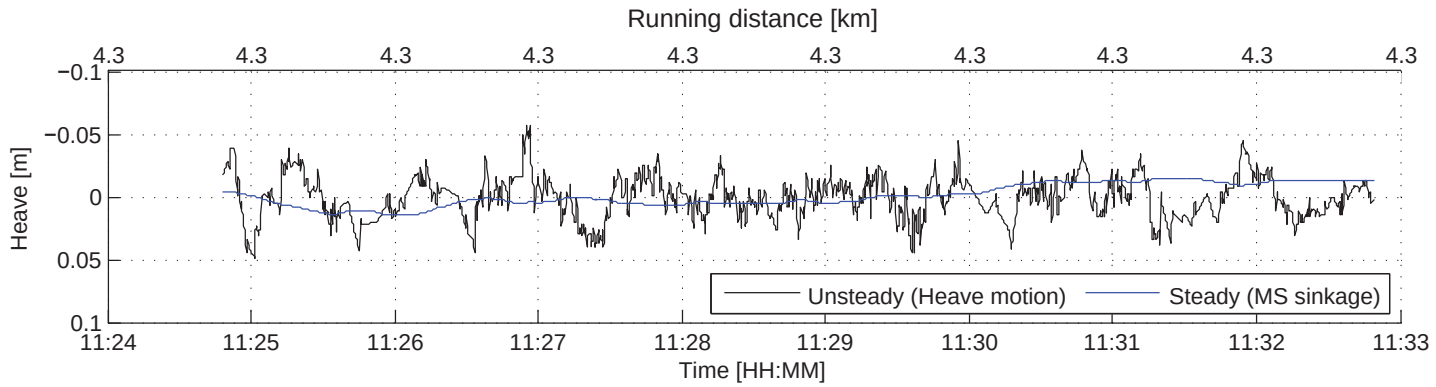


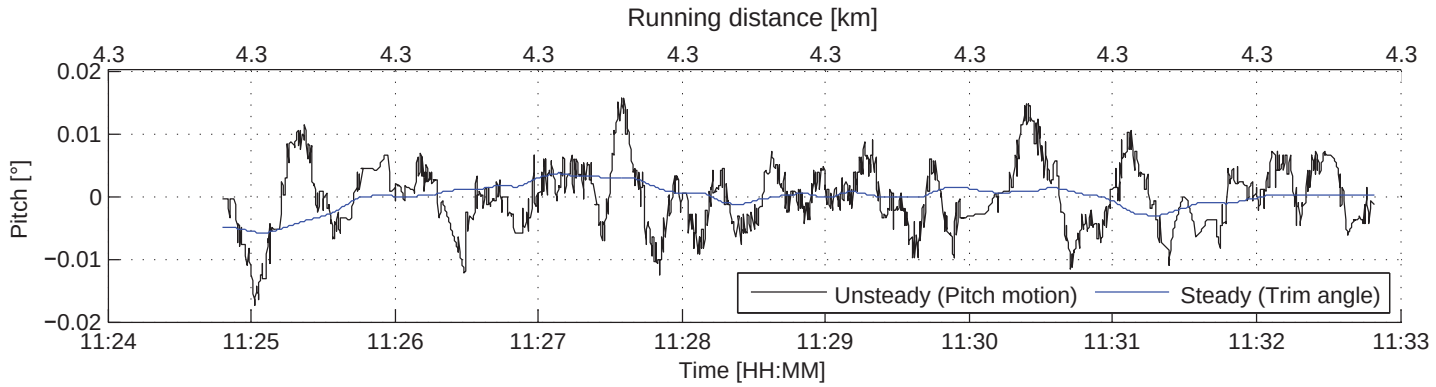


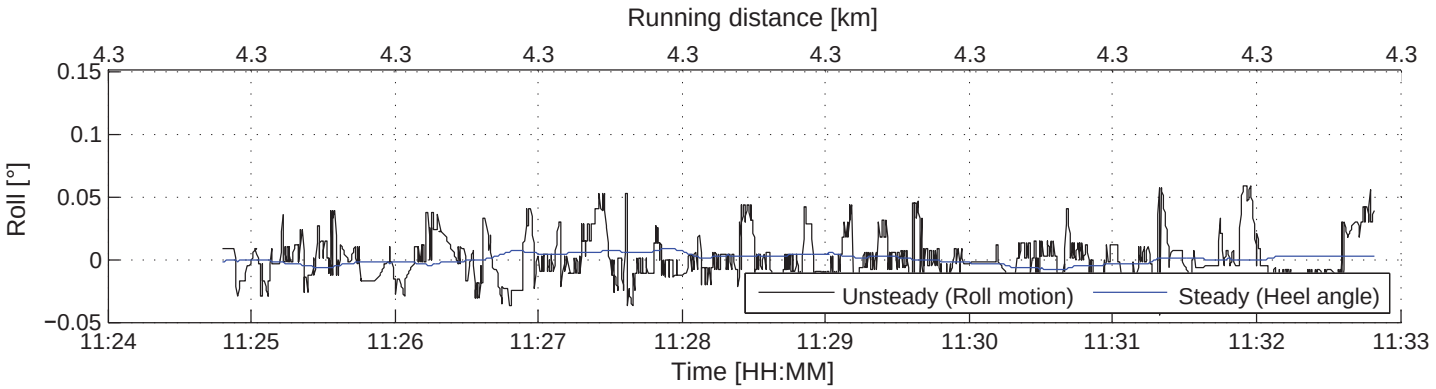
Wisdom of the Sea
T= 16.3625 m

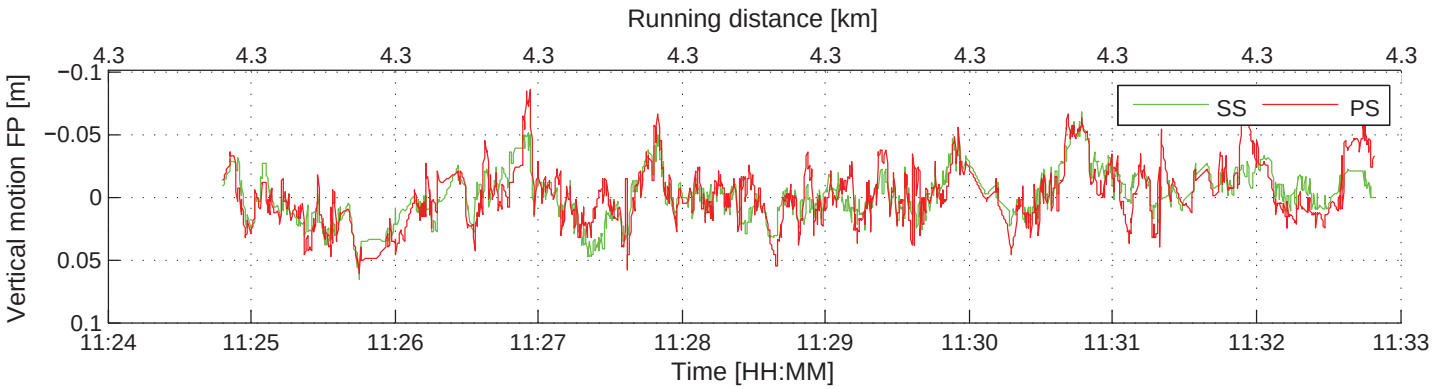
Initial static position

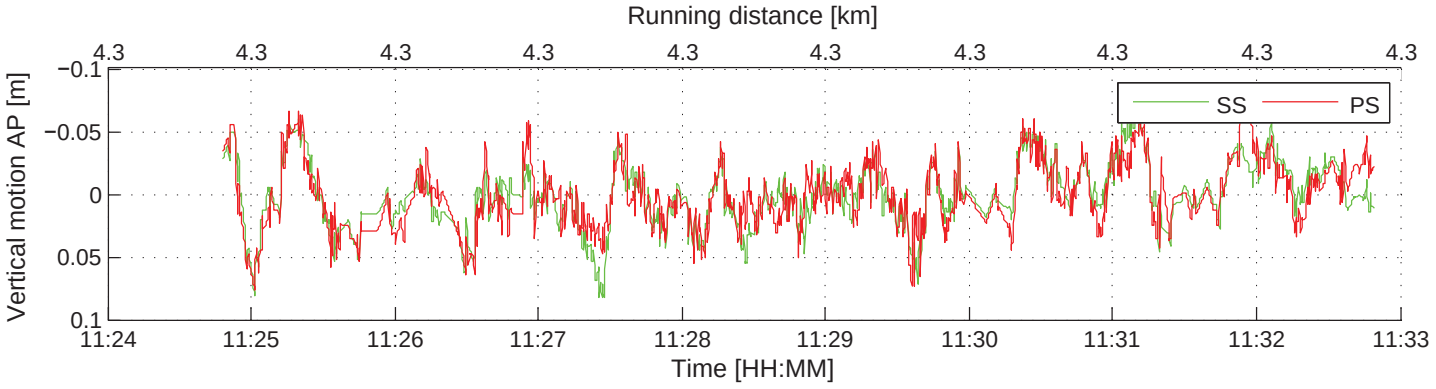
Kaloothaven







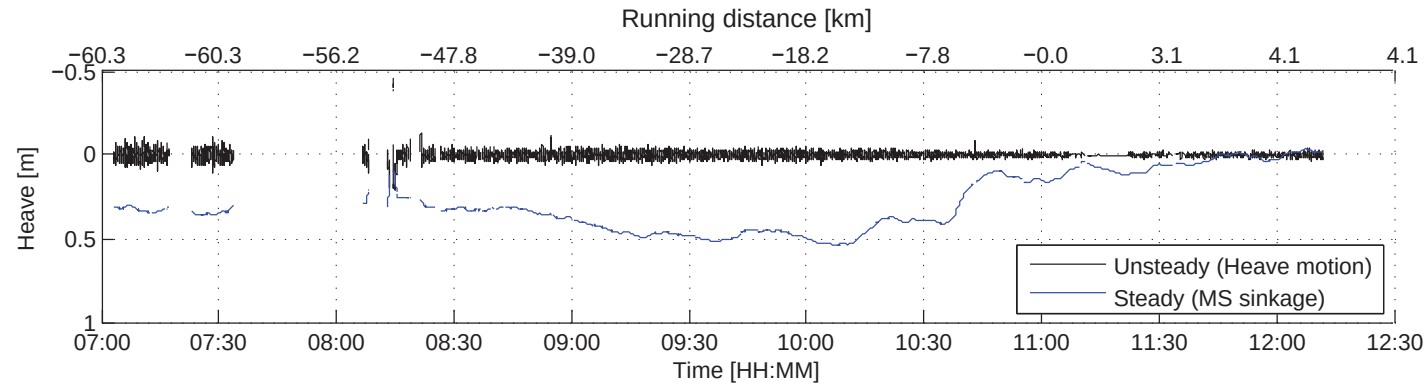


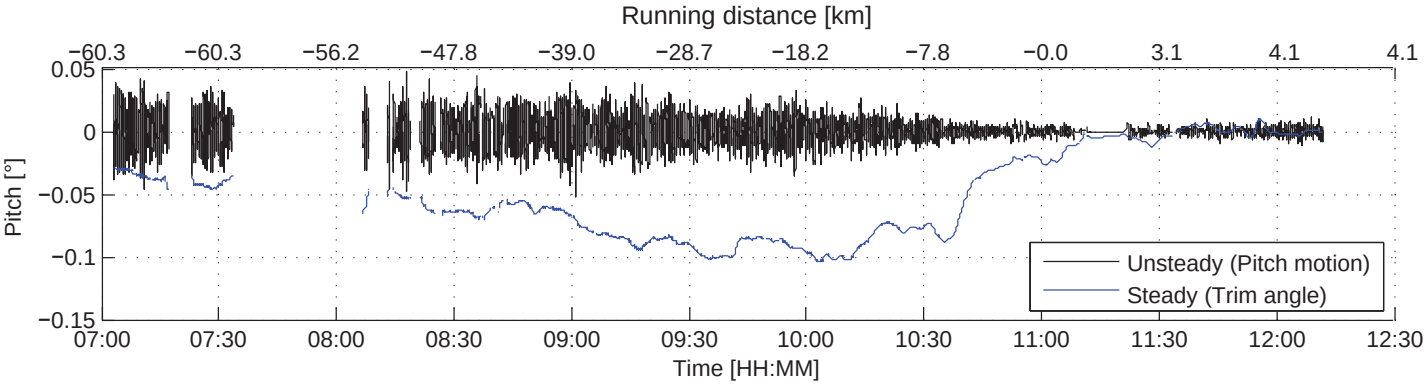


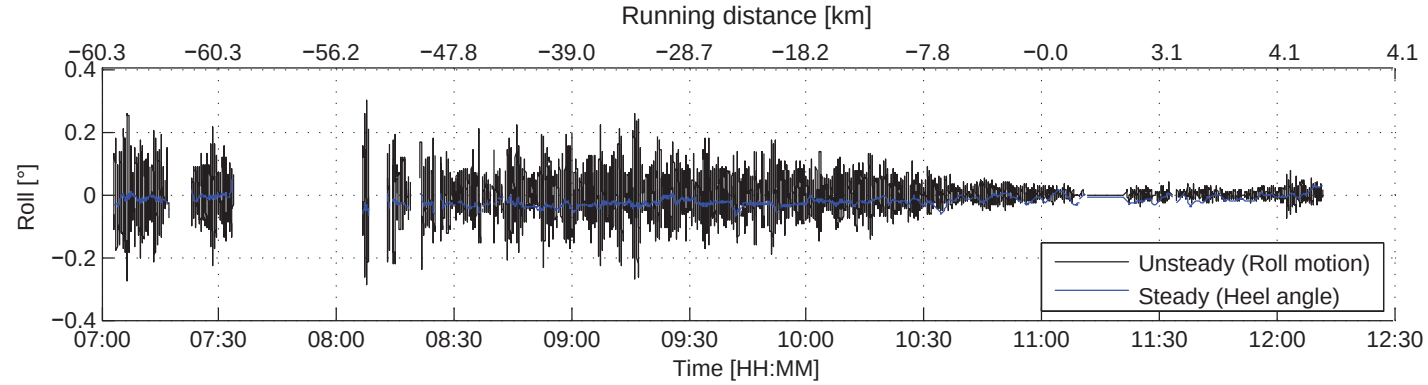
Lancelot
T= 16.455 m

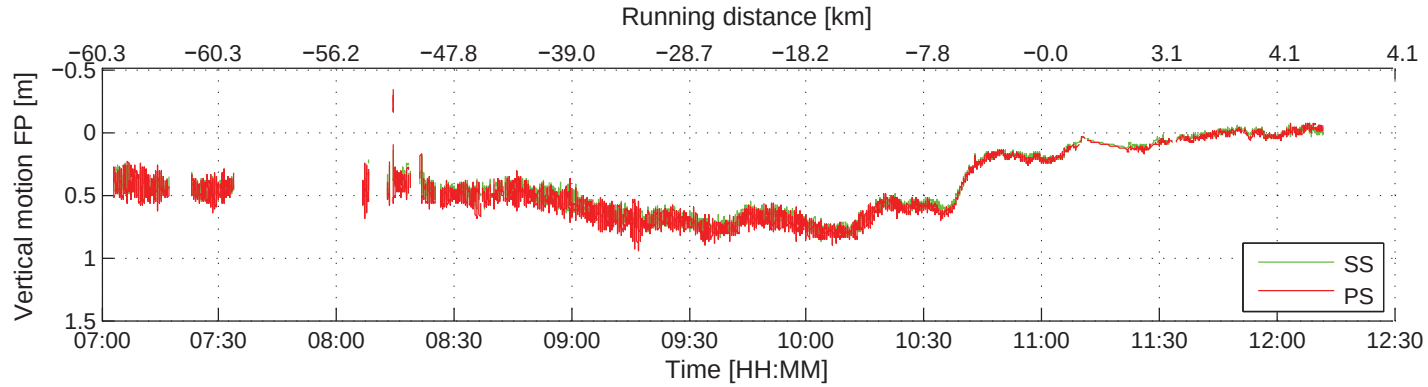
Vertical motions: unsteady and steady (running average)

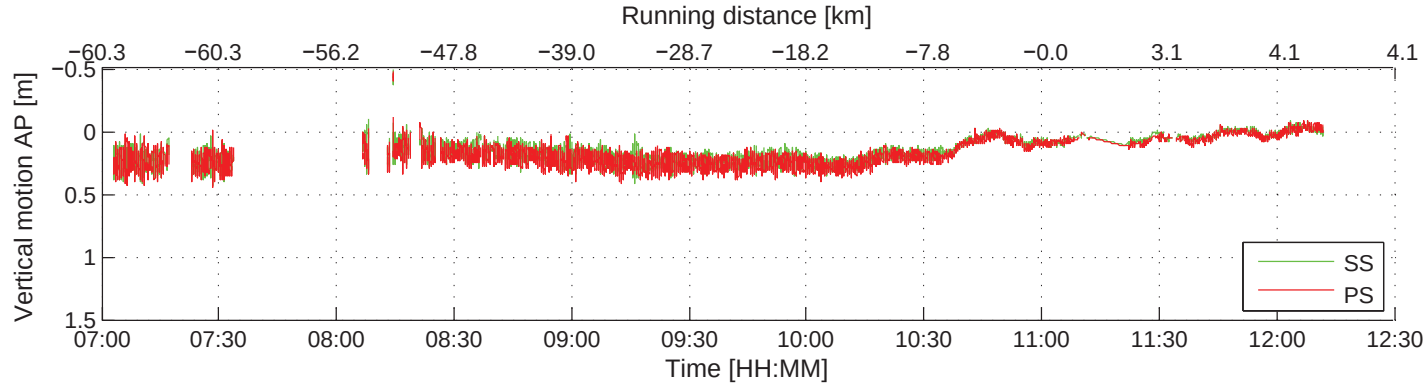
Kaloothaven







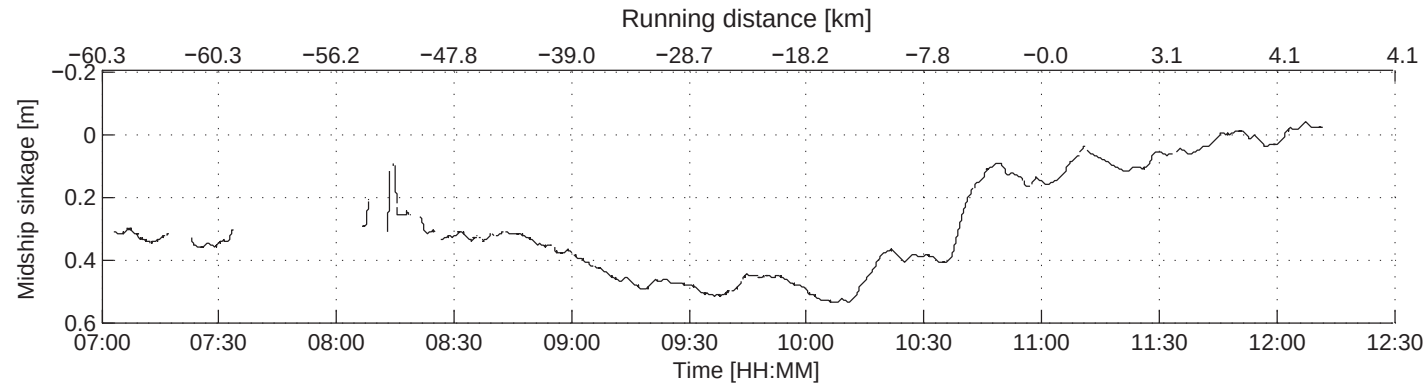


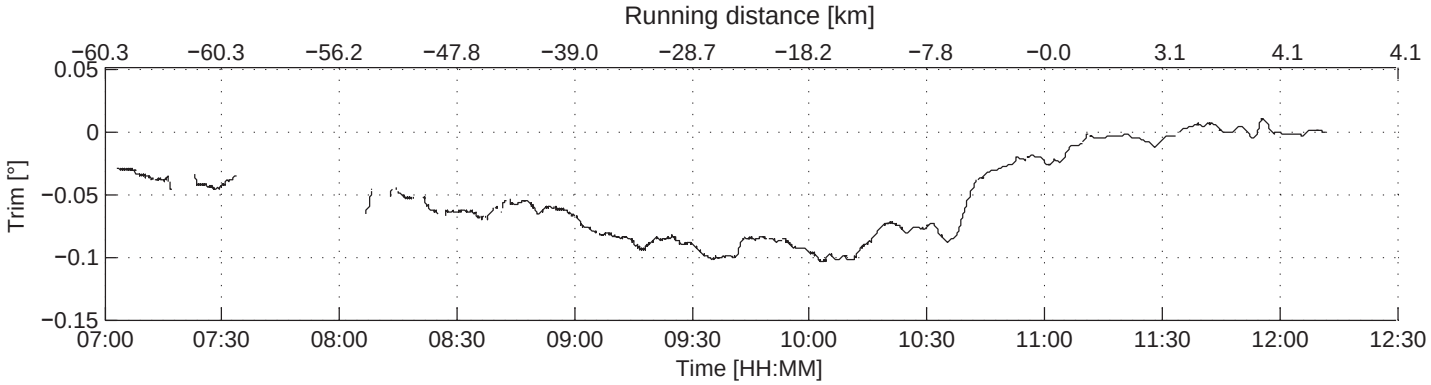


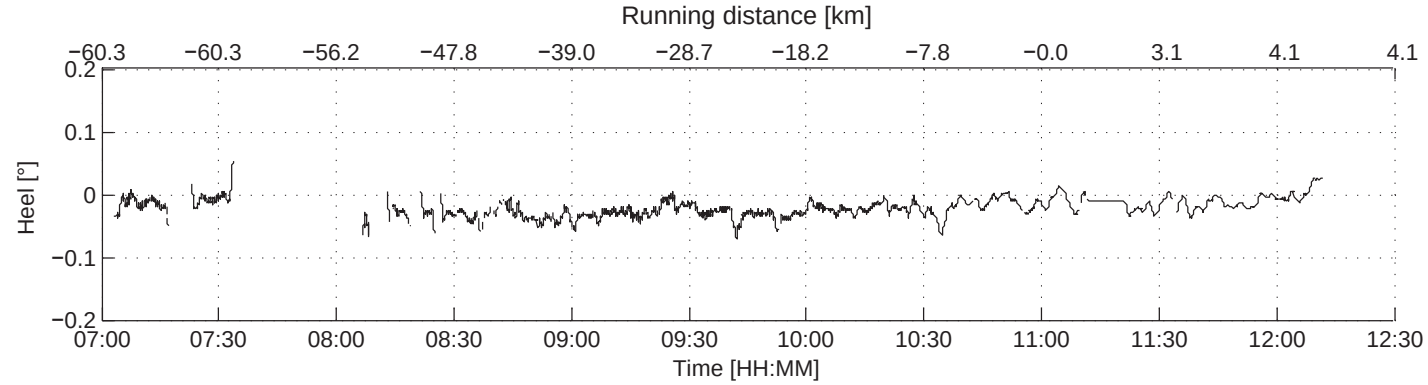
Lancelot
T= 16.455 m

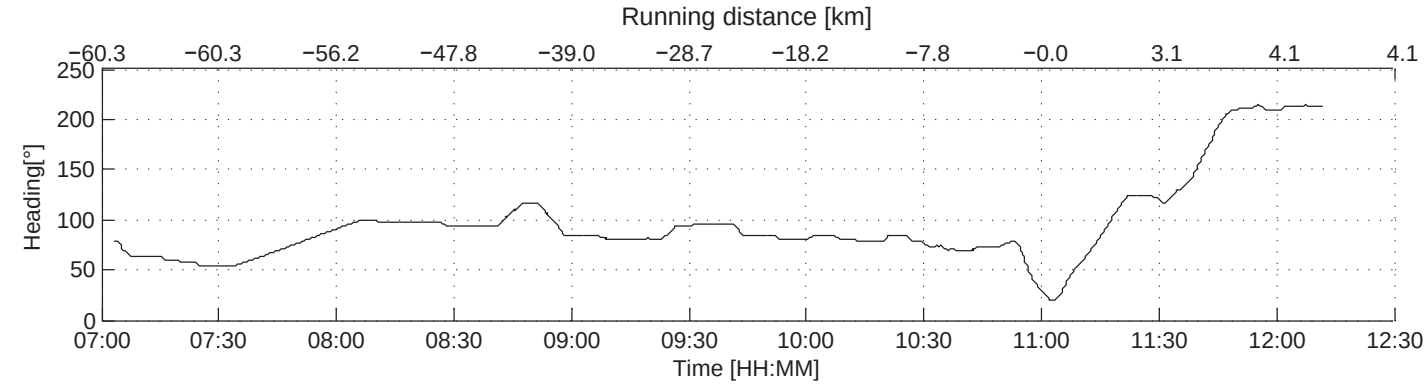
Steady motions and vessel's course

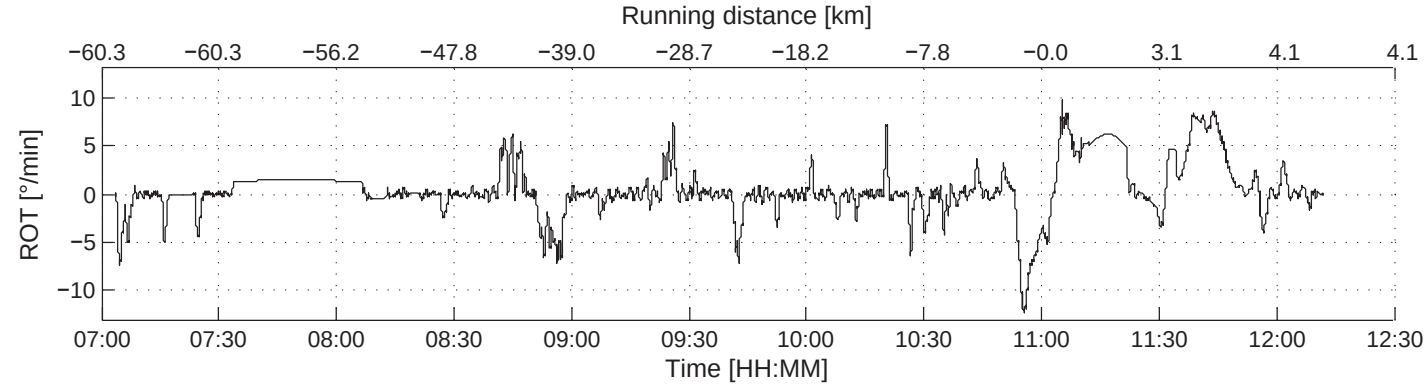
Kaloothaven







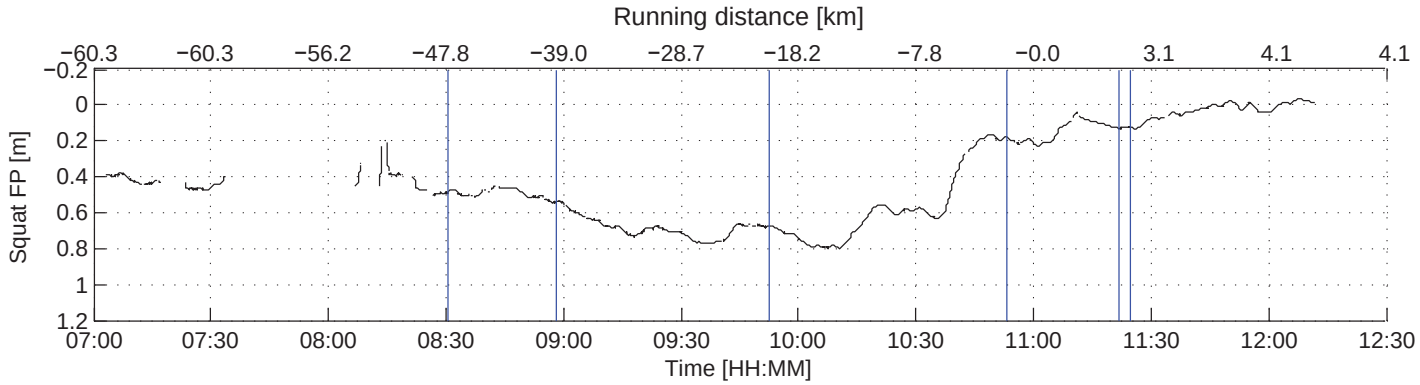


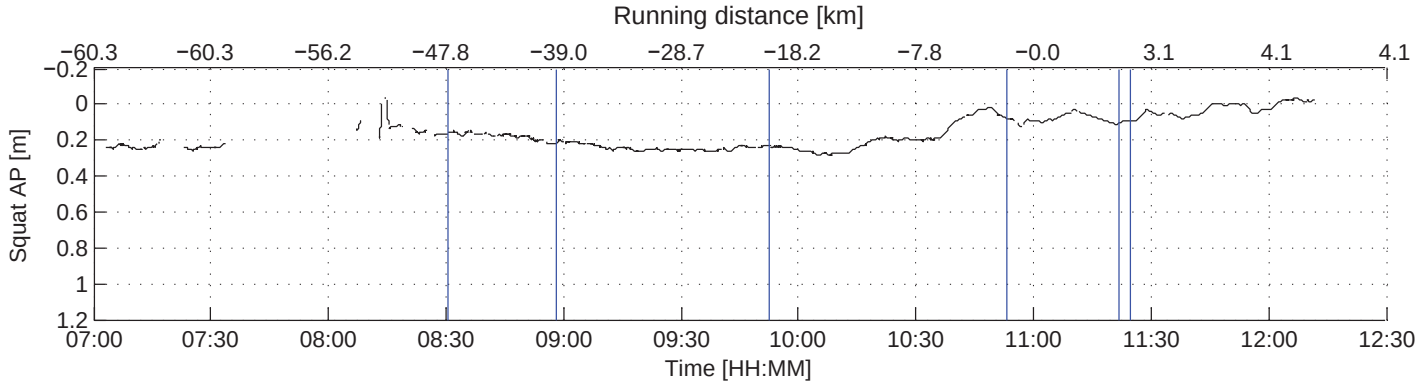


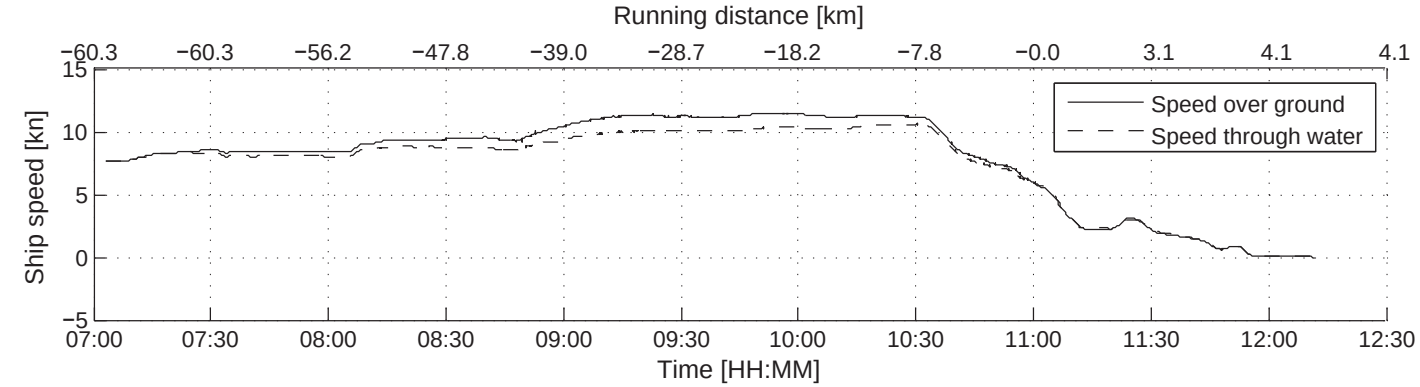
Lancelot
T= 16.455 m

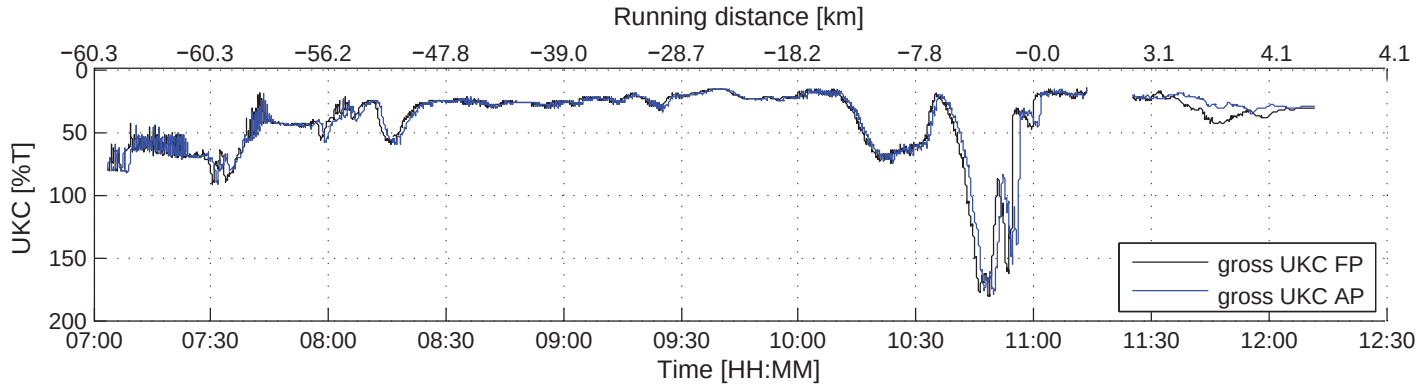
SQUAT analysis

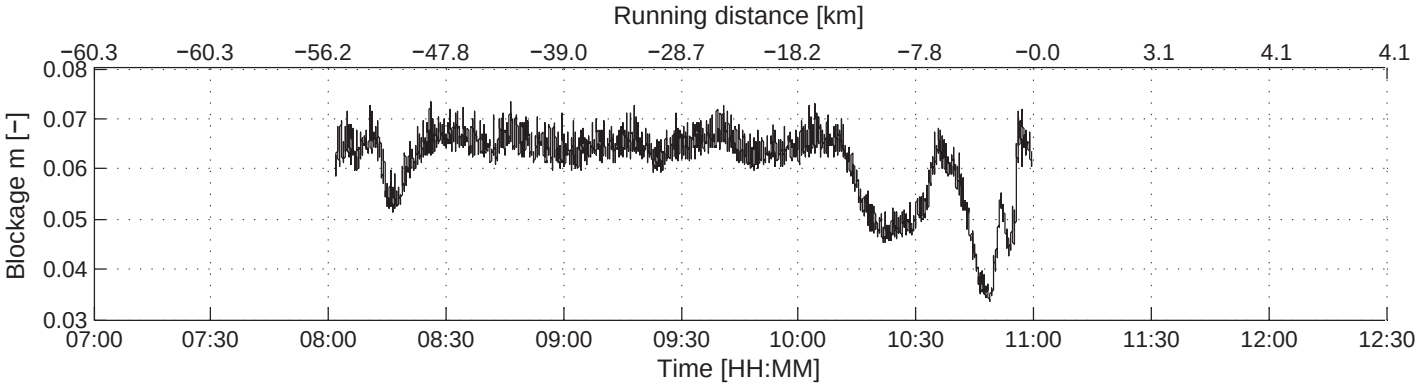
Kaloothaven







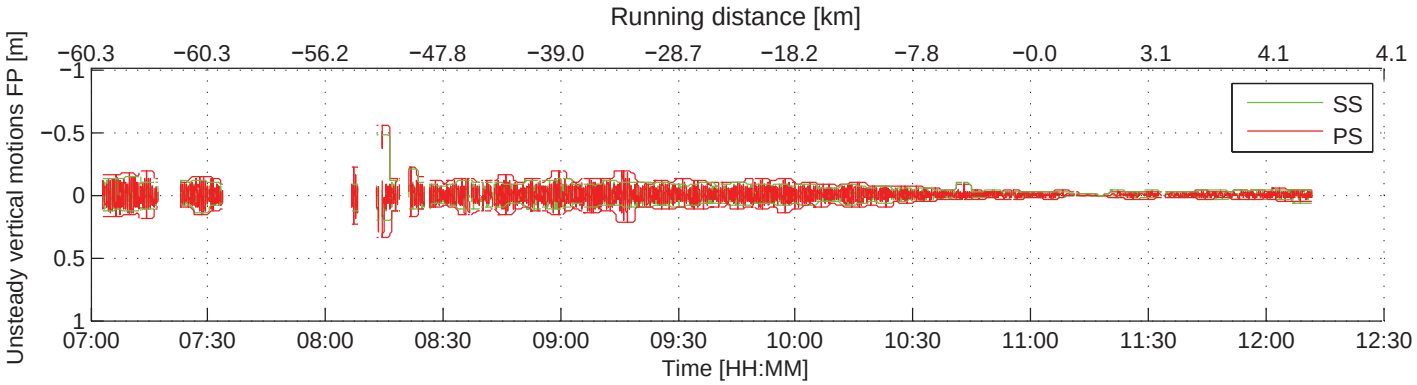


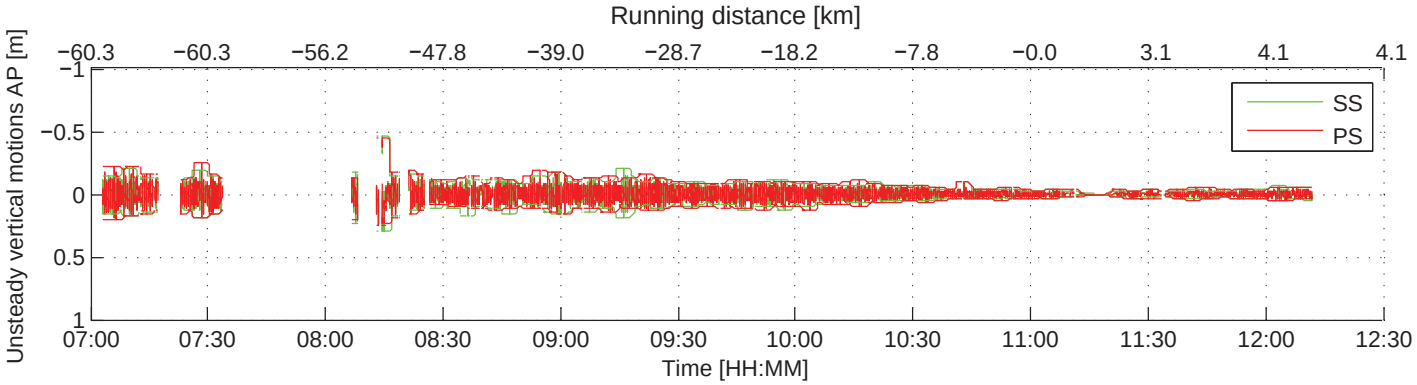


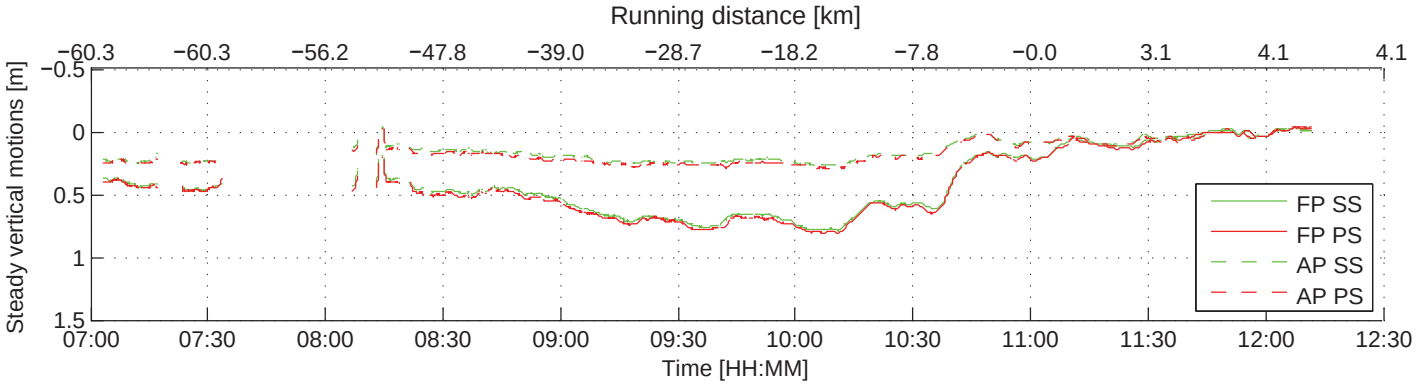
Lancelot
T= 16.455 m

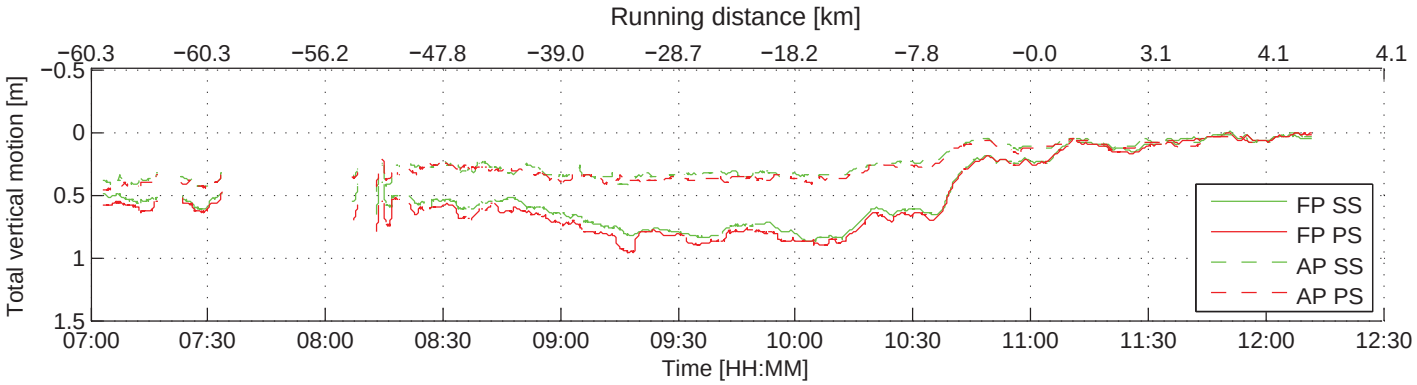
Maximum vertical motions

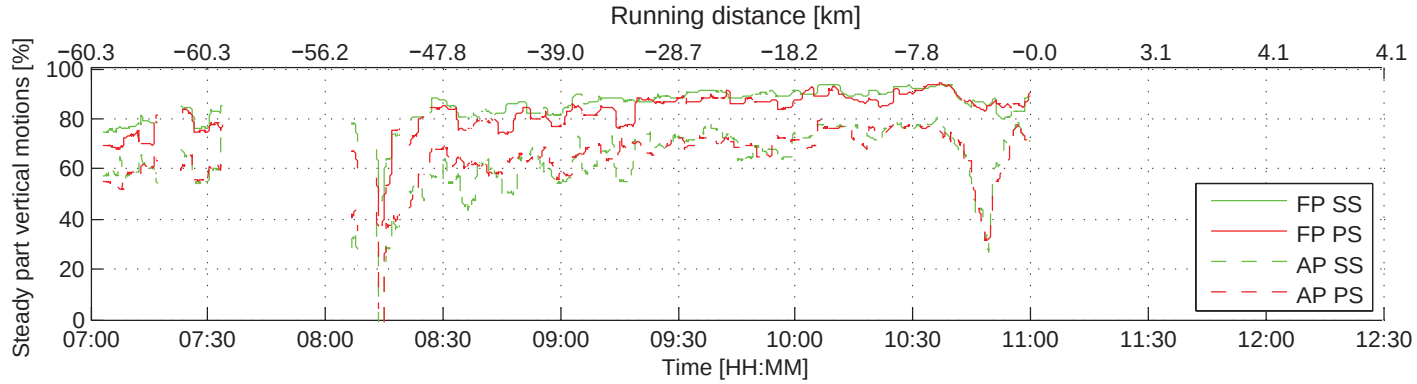
Kaloothaven







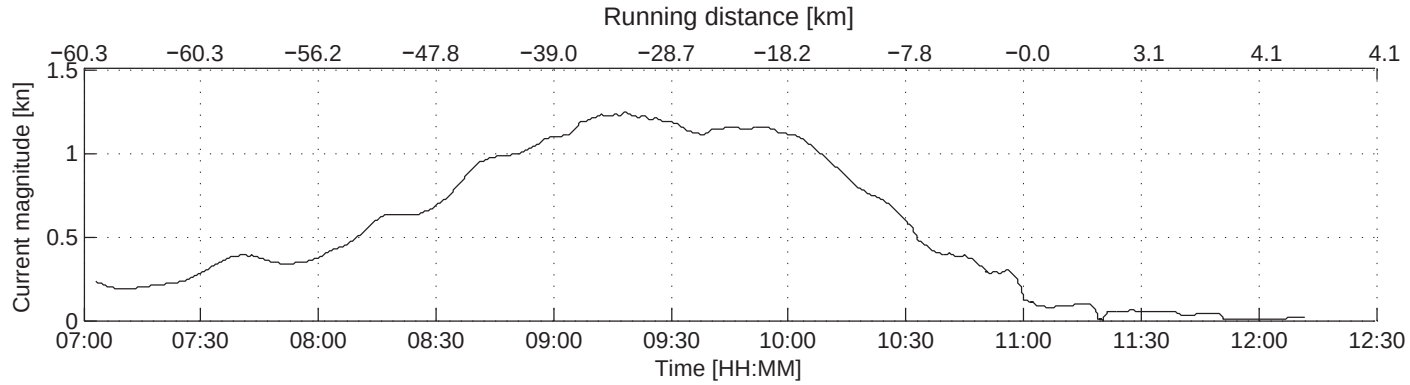


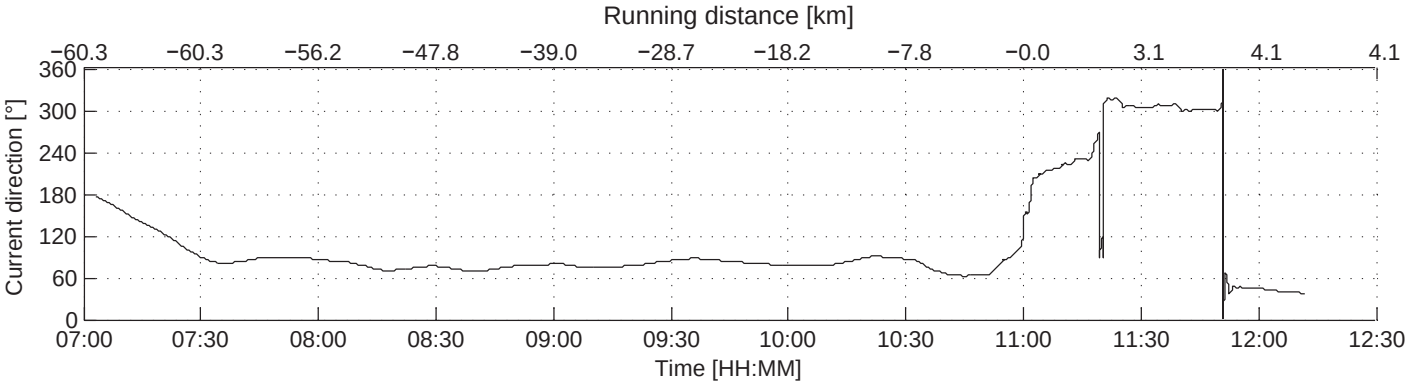


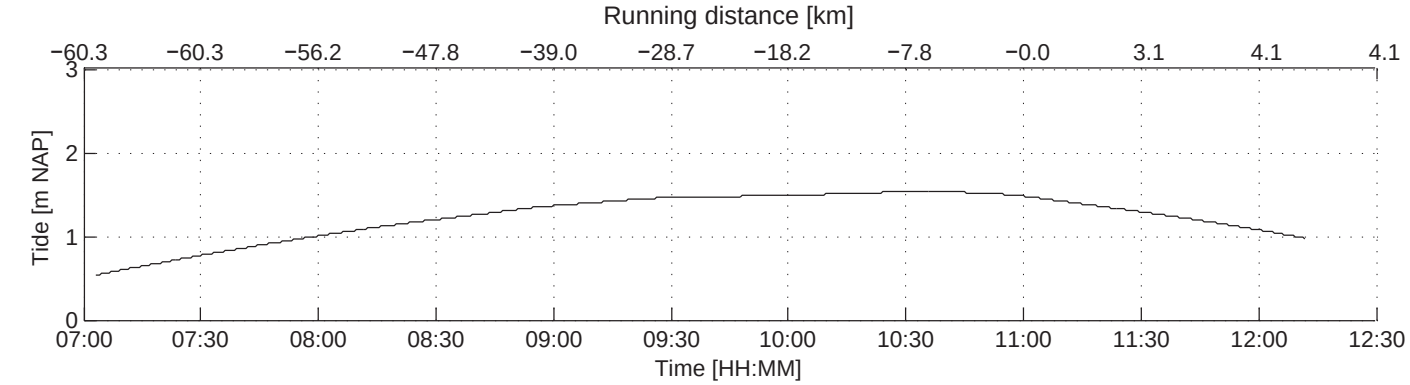
Lancelot
T= 16.455 m

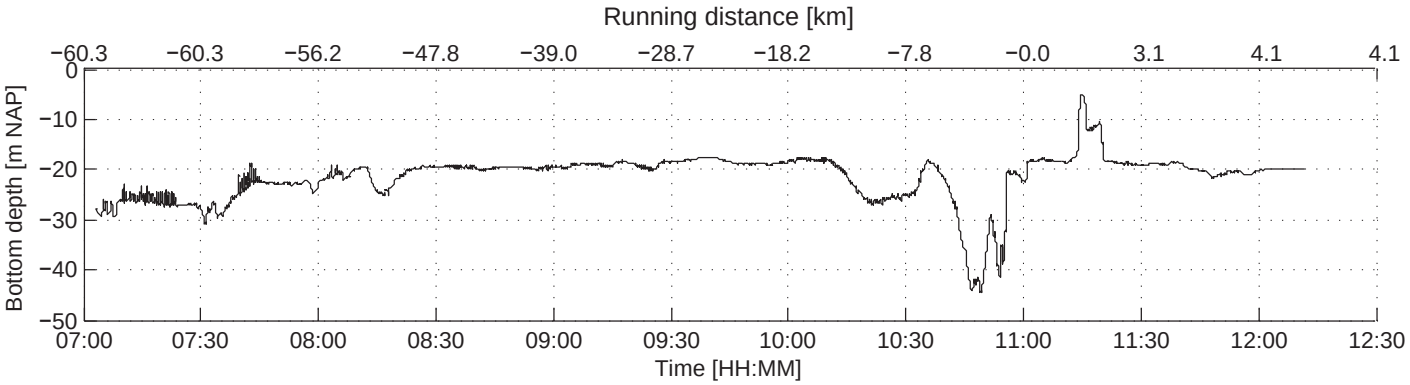
Environment

Kaloothaven





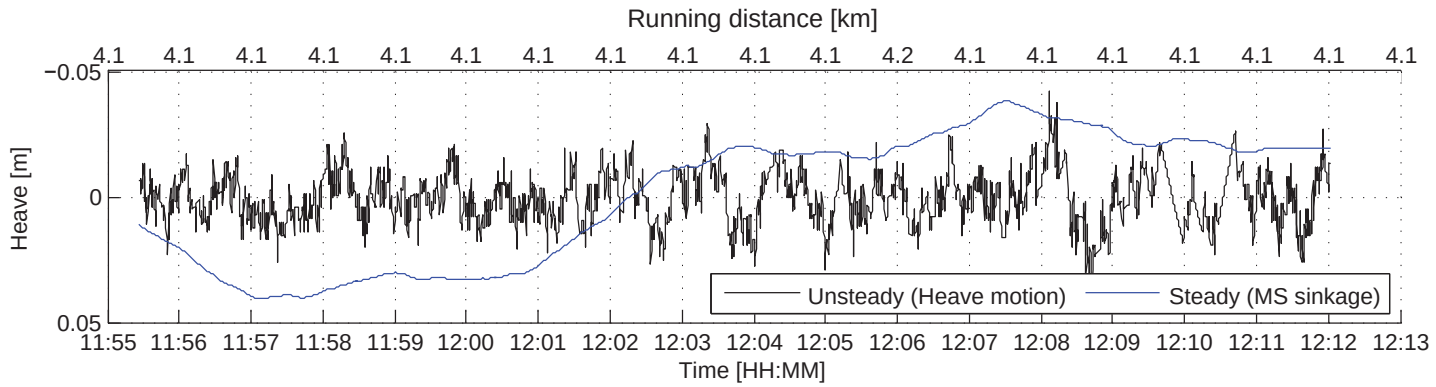


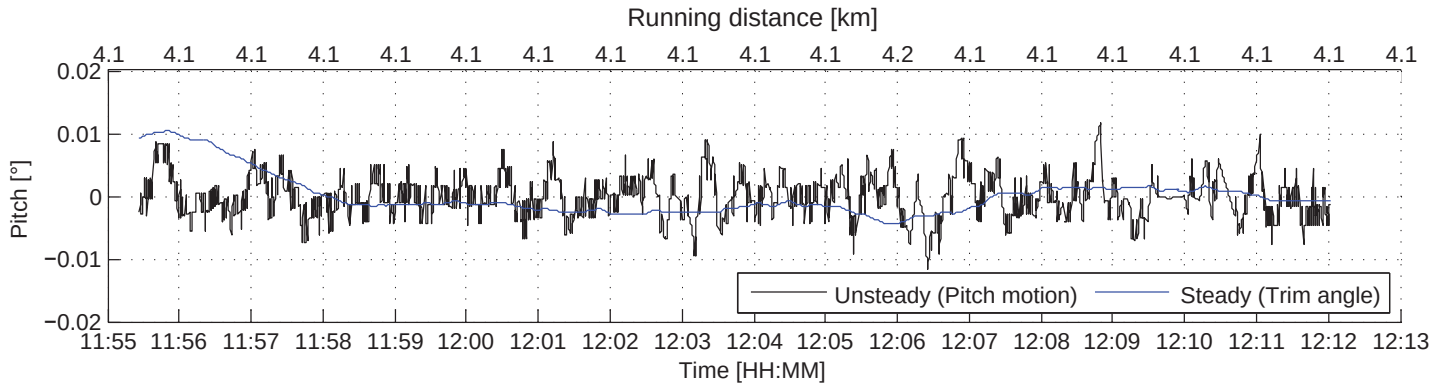


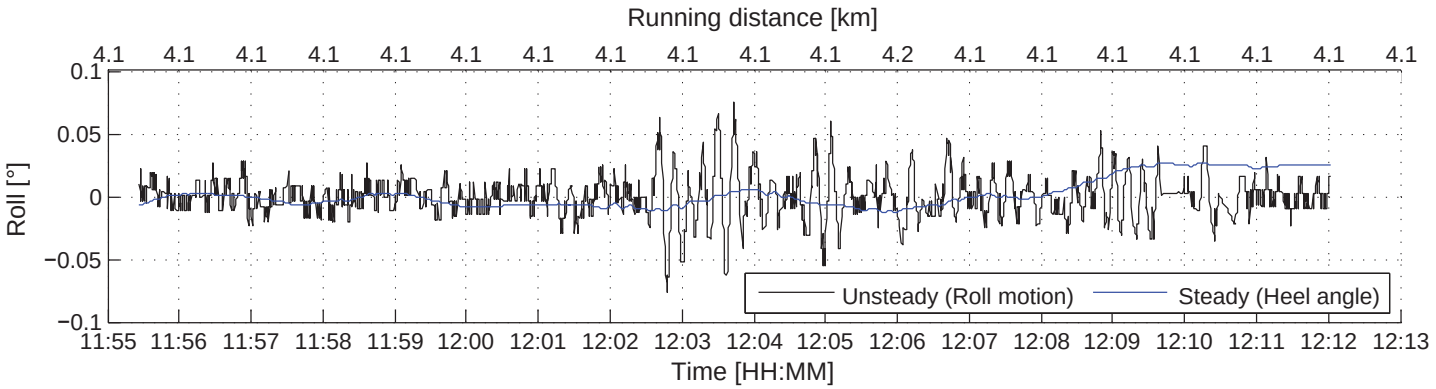
Lancelot
T= 16.455 m

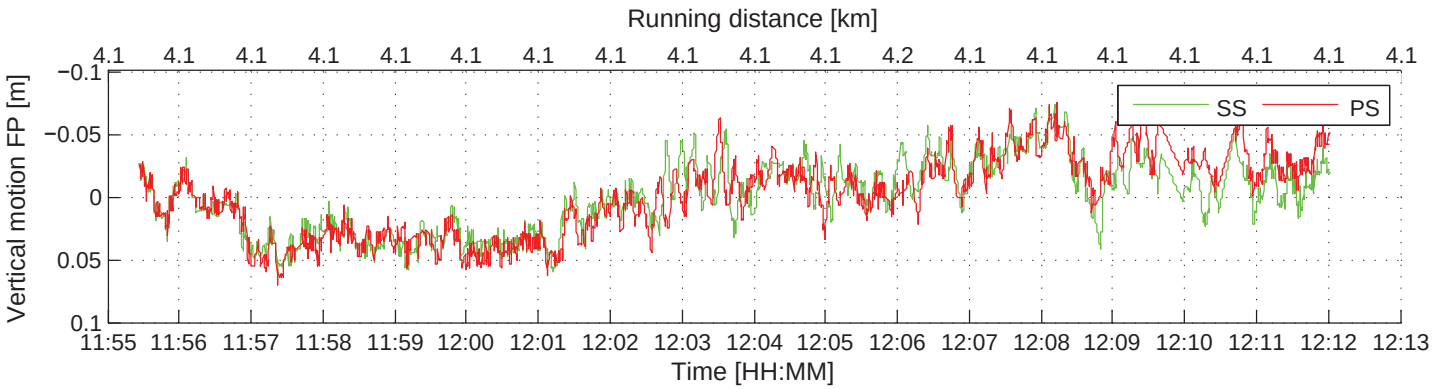
Initial static position

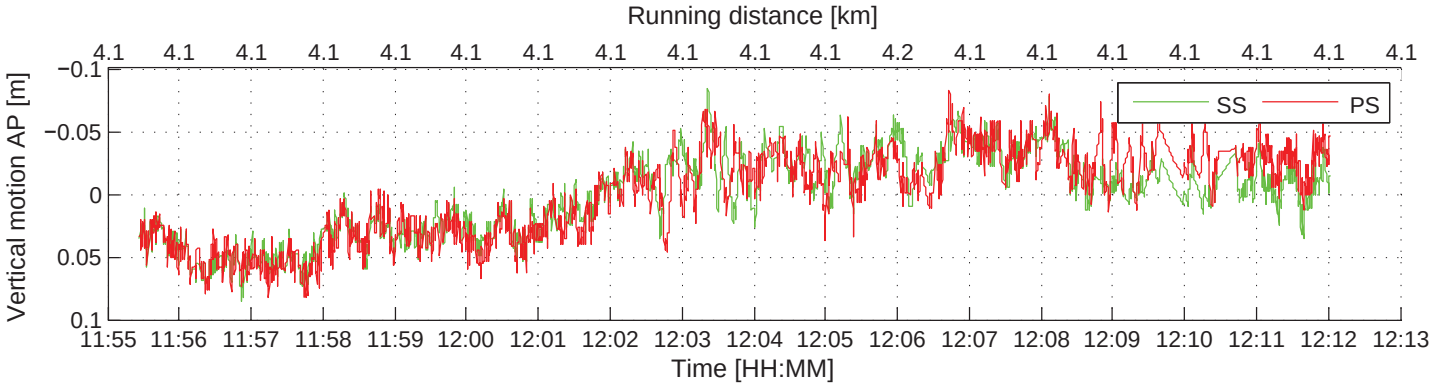
Kaloothaven







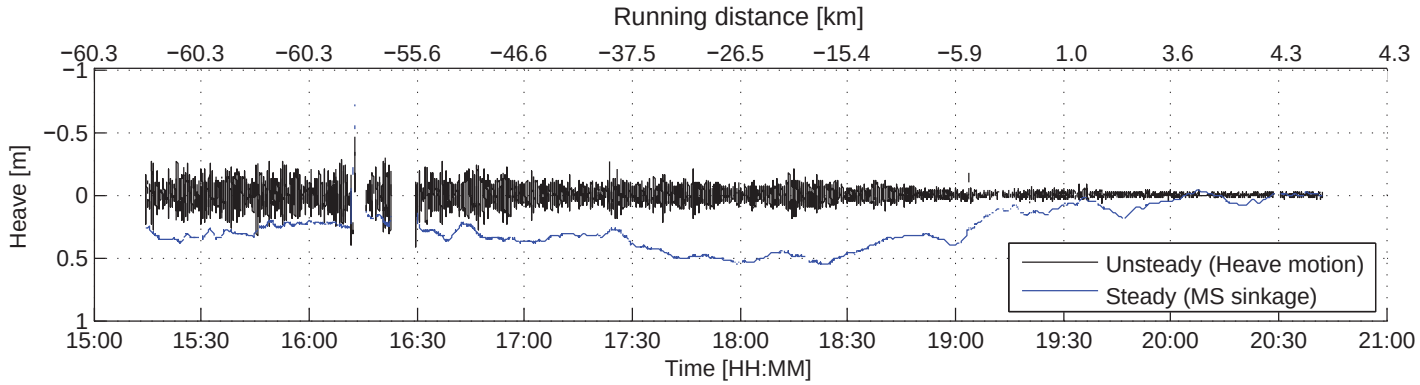


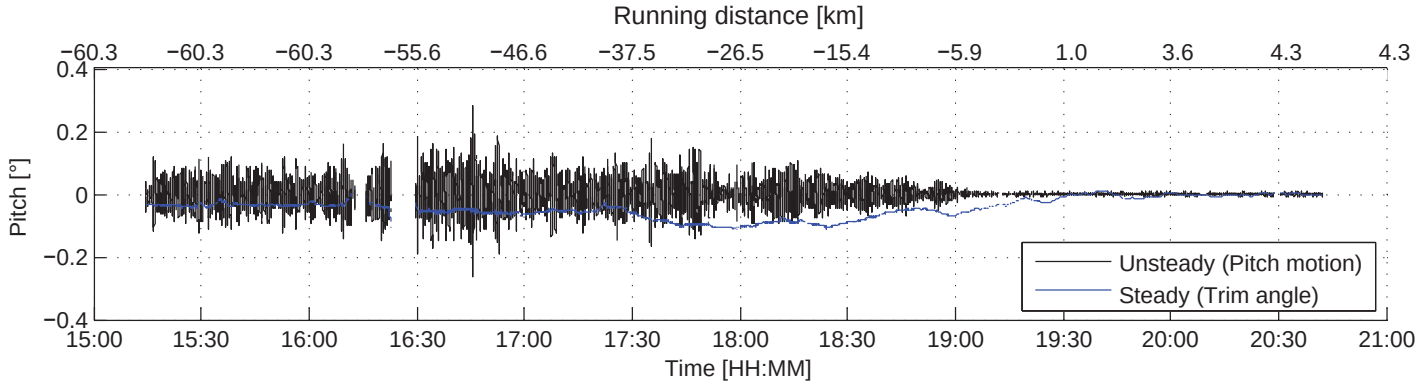


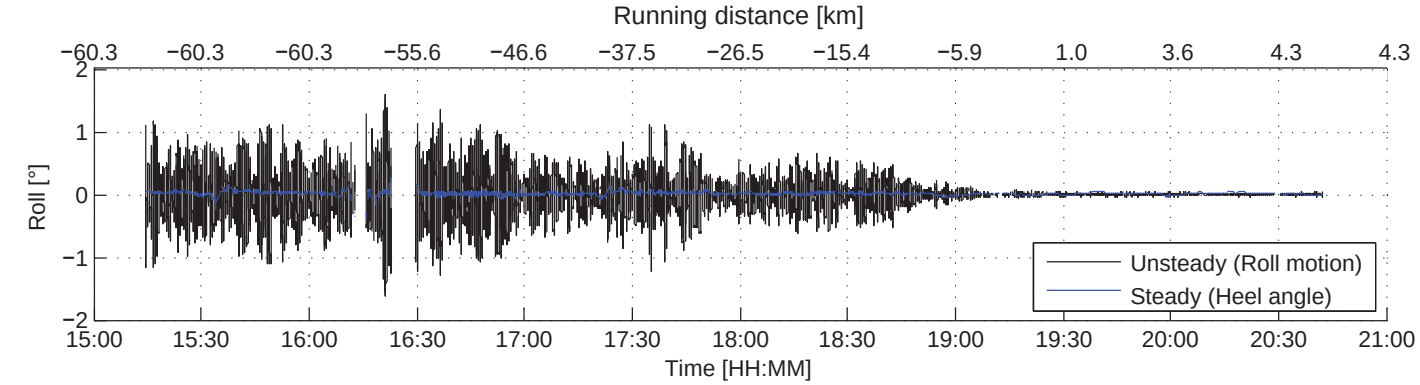
Bulk Mexico
T= 16.5 m

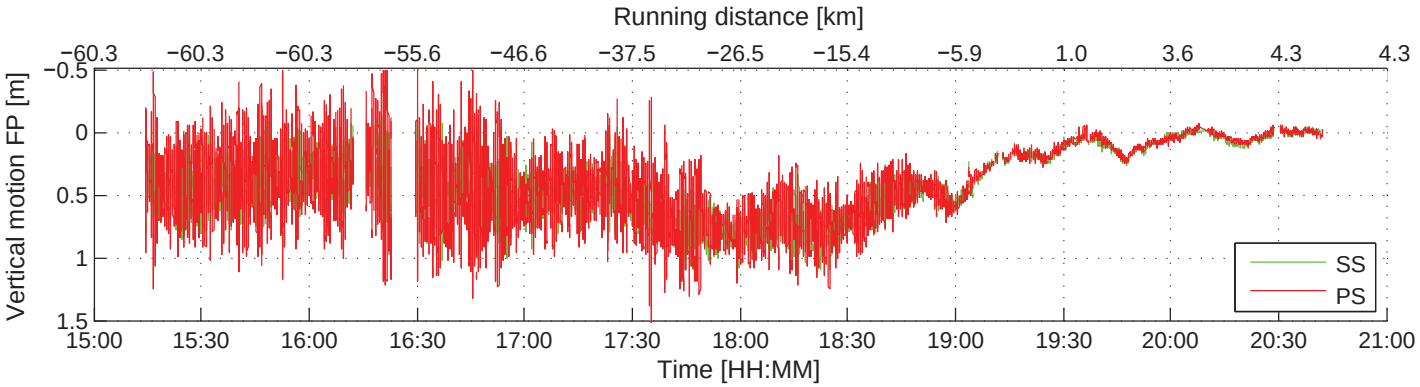
Vertical motions: unsteady and steady (running average)

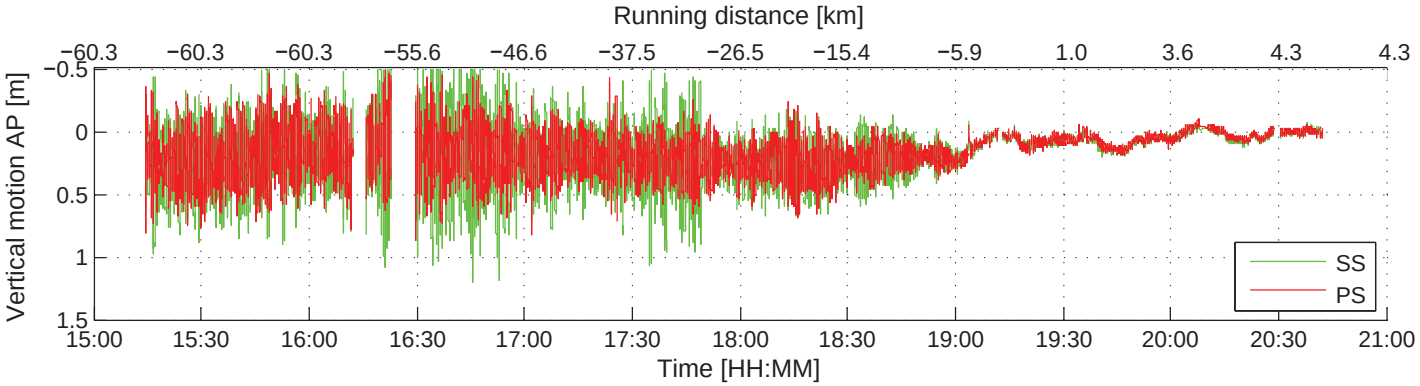
Kaloothaven







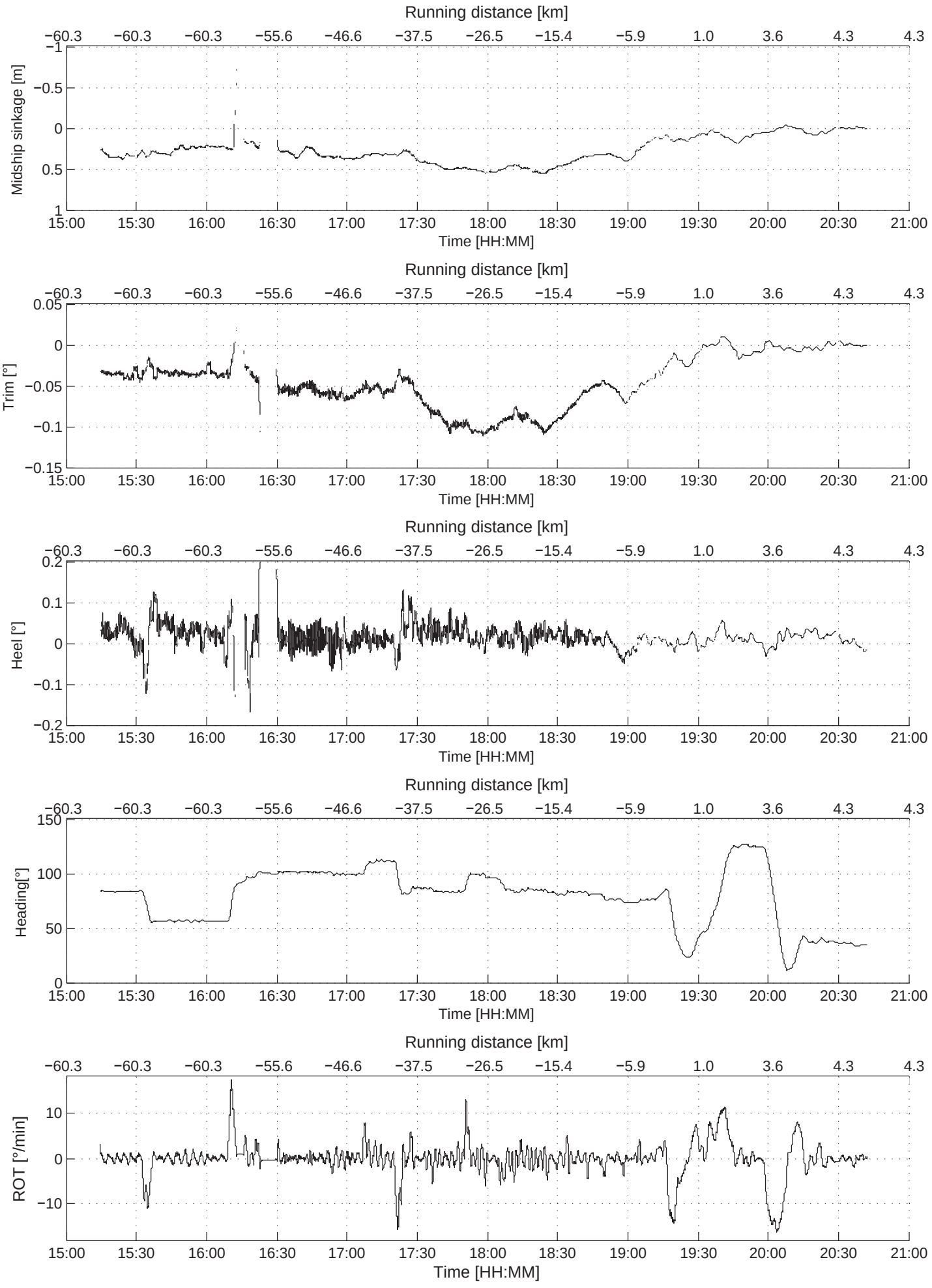




Bulk Mexico
T= 16.5 m

Steady motions and vessel's course

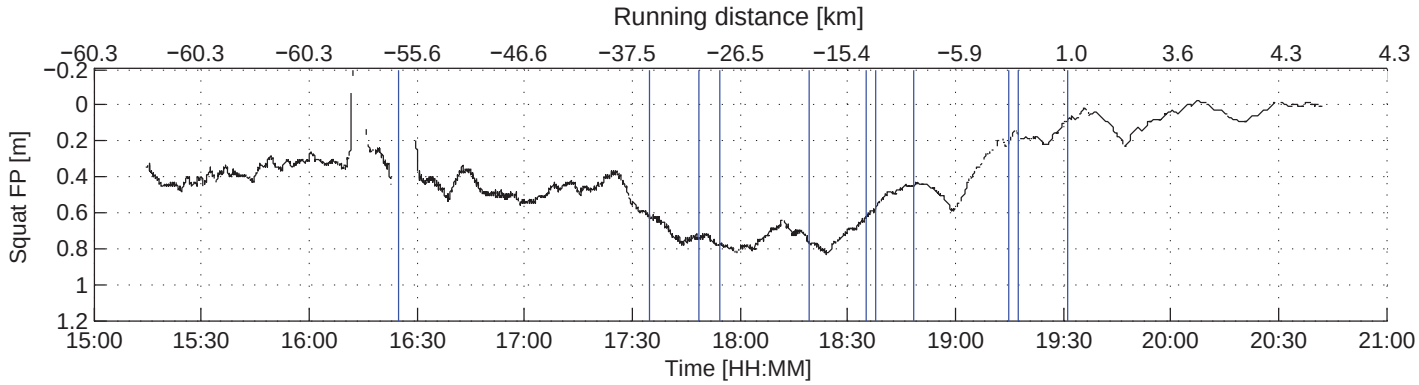
Kaloothaven

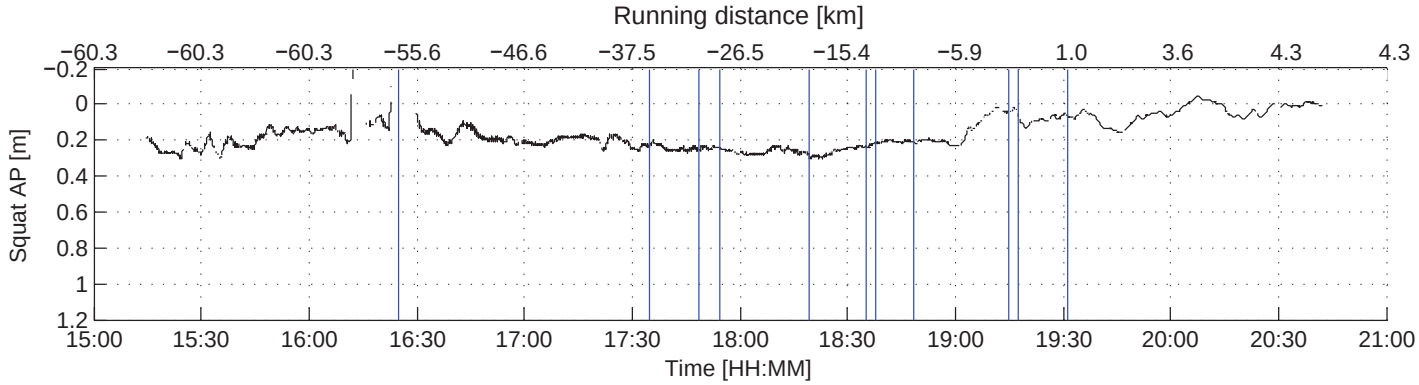


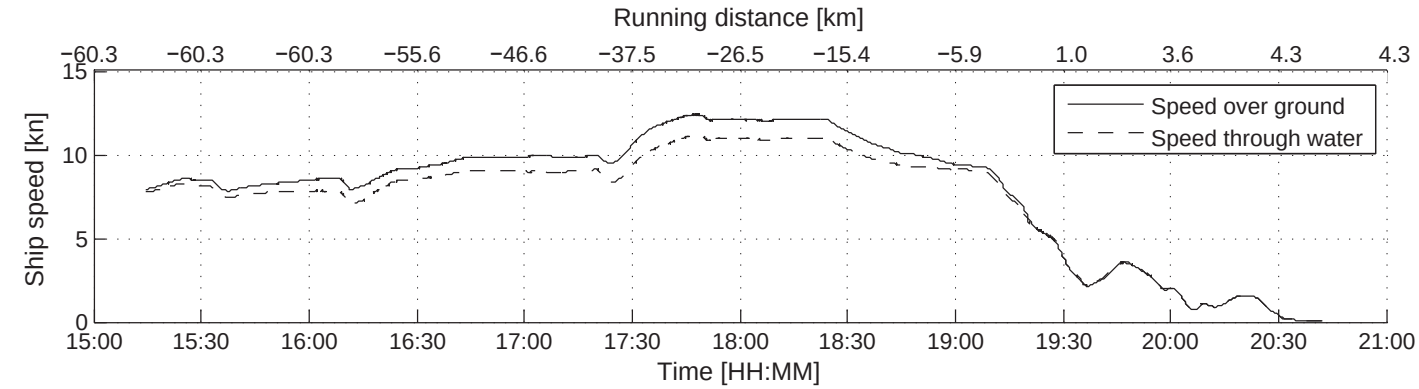
Bulk Mexico
T= 16.5 m

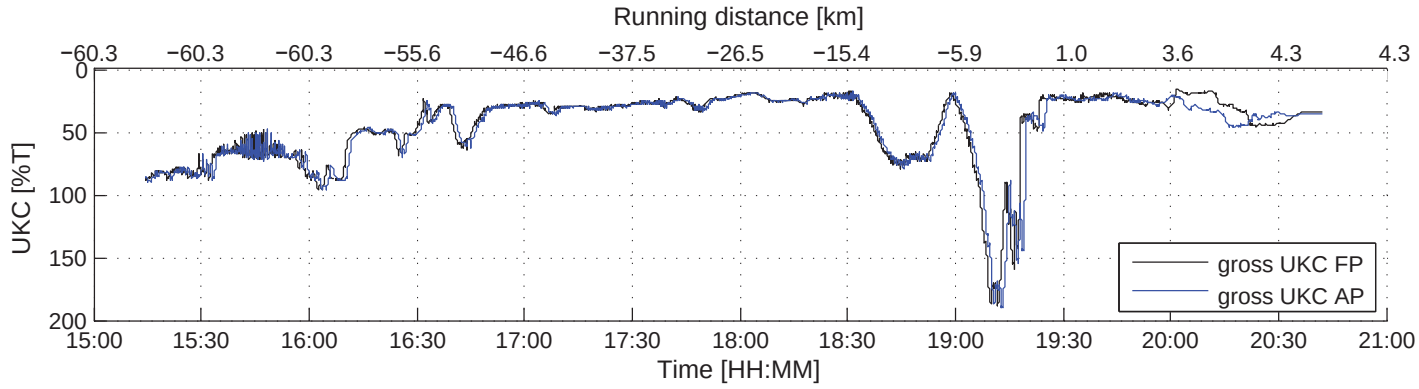
SQUAT analysis

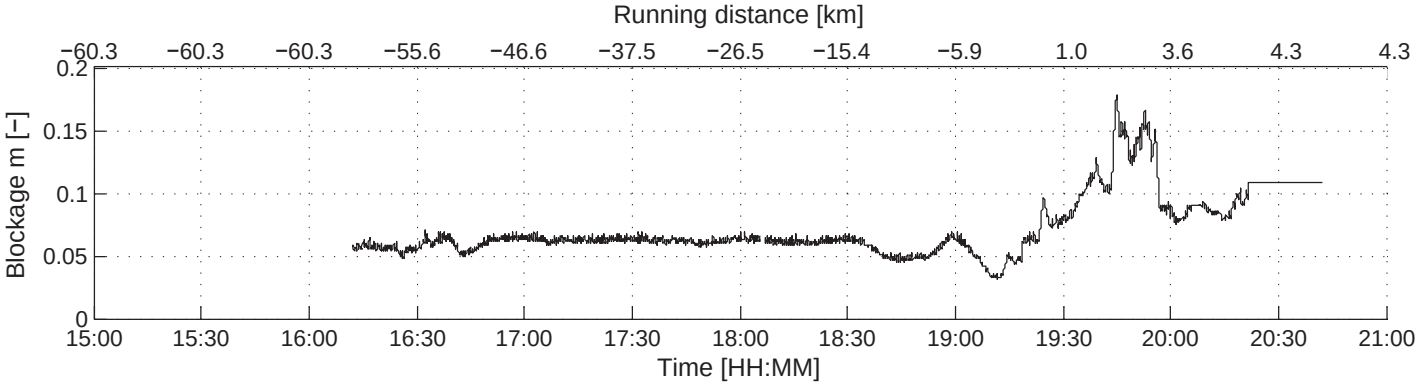
Kaloothaven







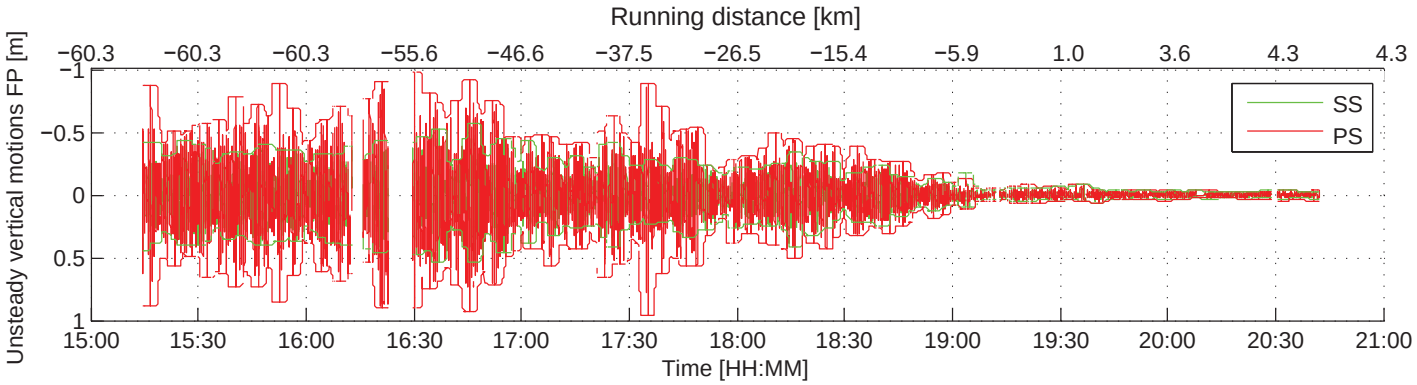


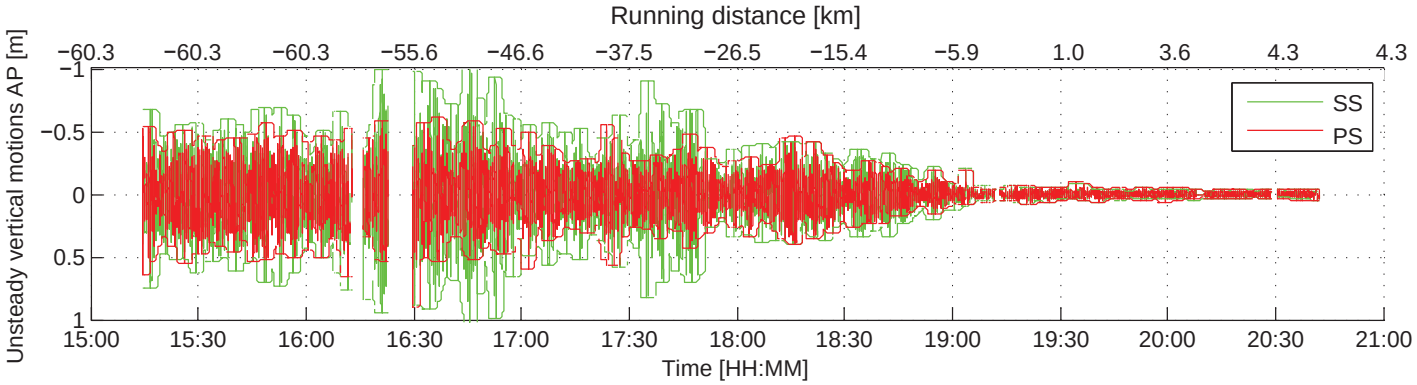


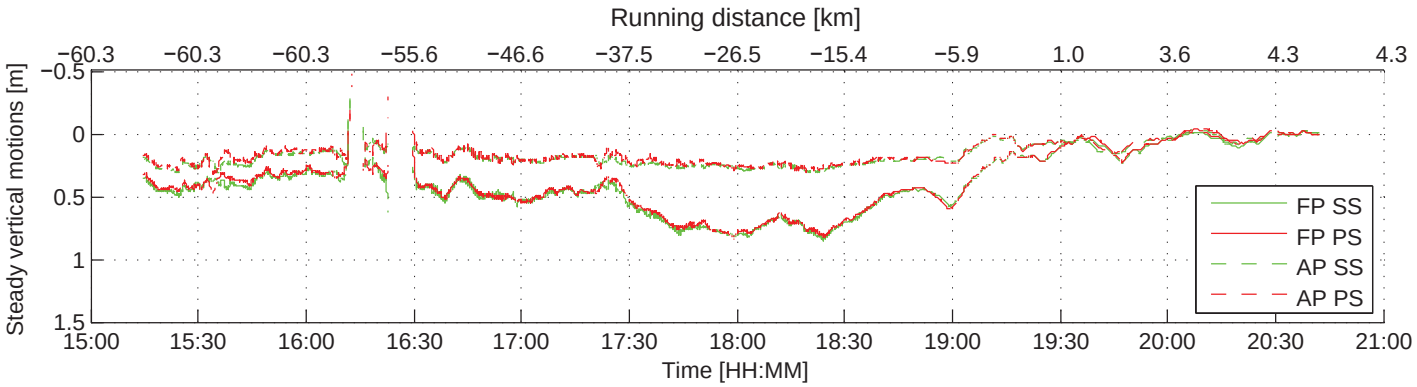
Bulk Mexico
T= 16.5 m

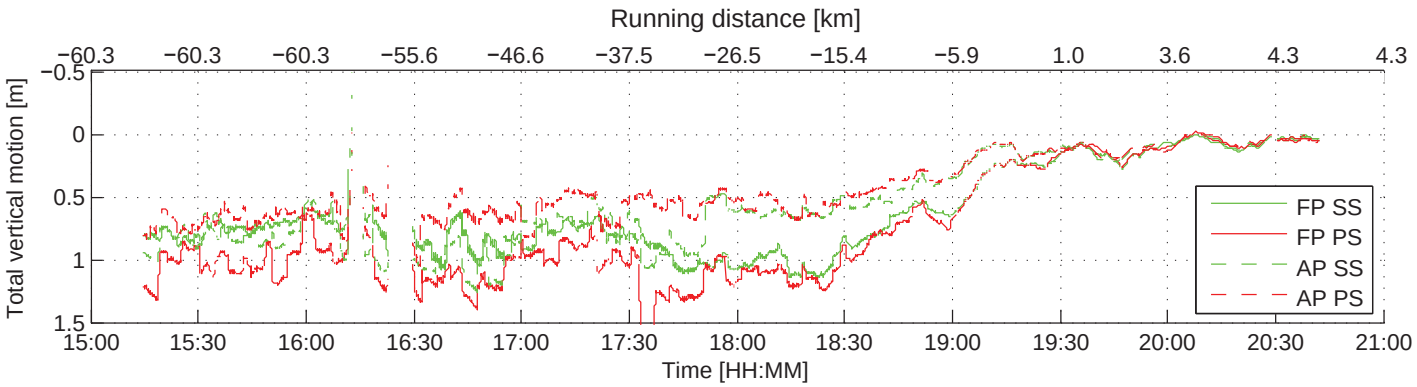
Maximum vertical motions

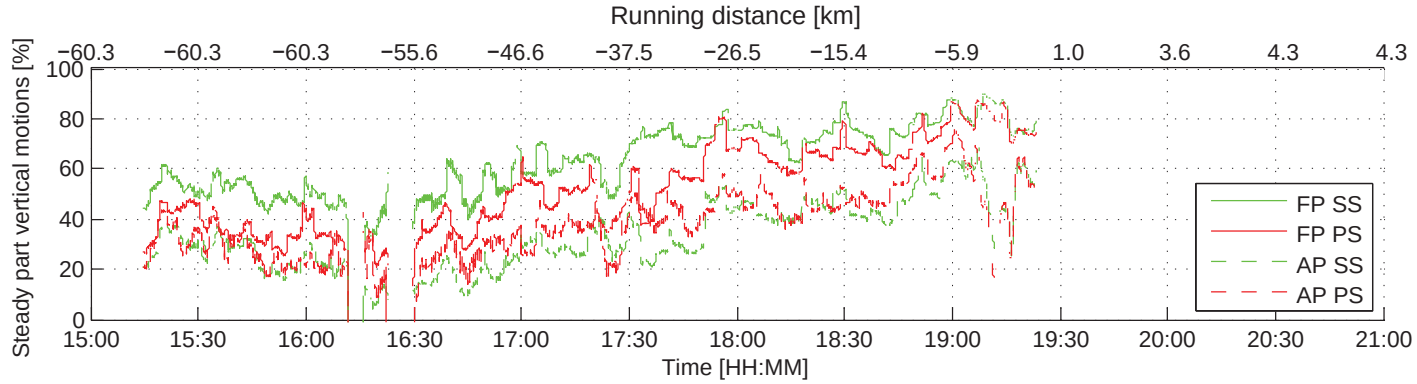
Kaloothaven







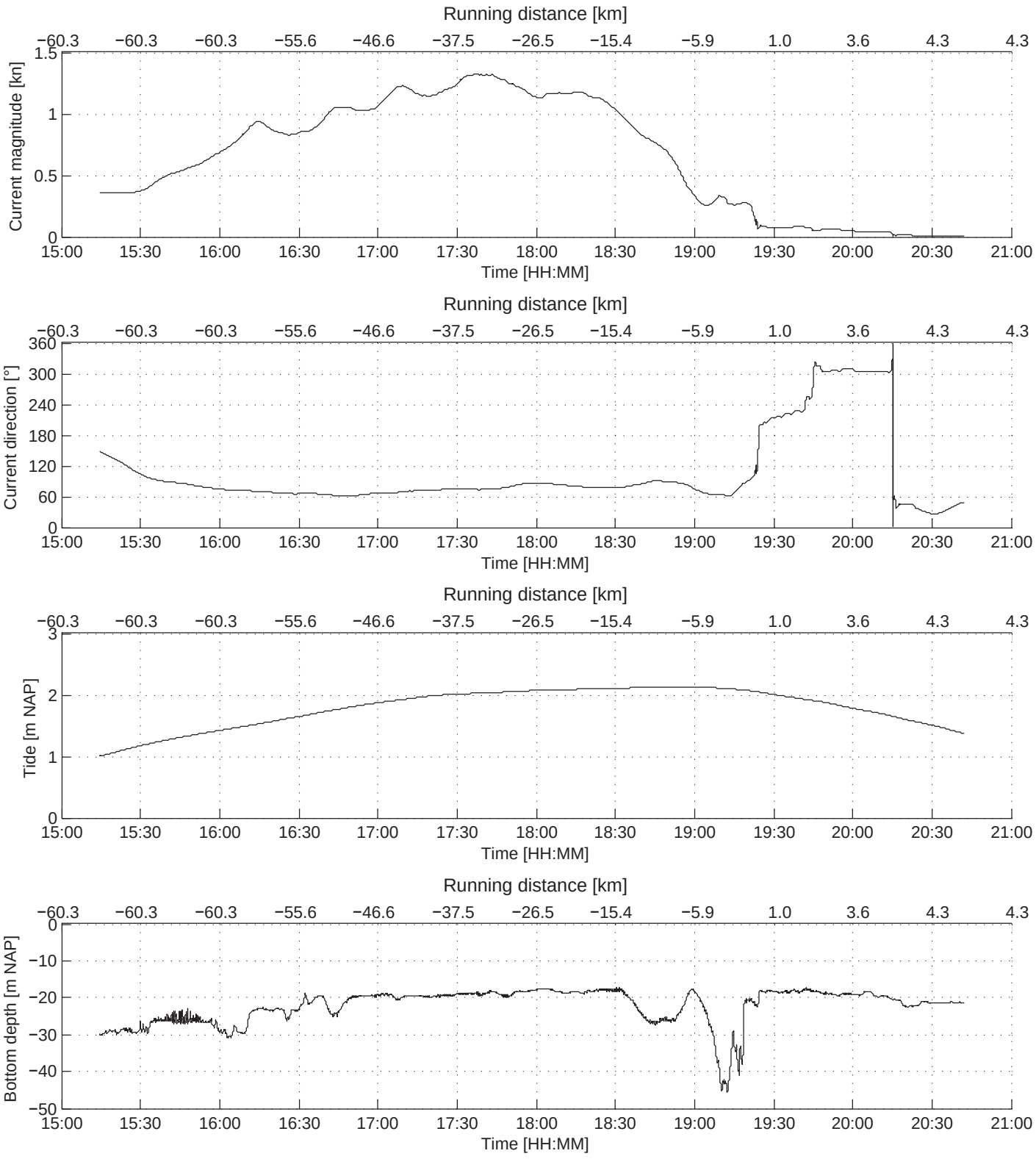




Bulk Mexico
T= 16.5 m

Environment

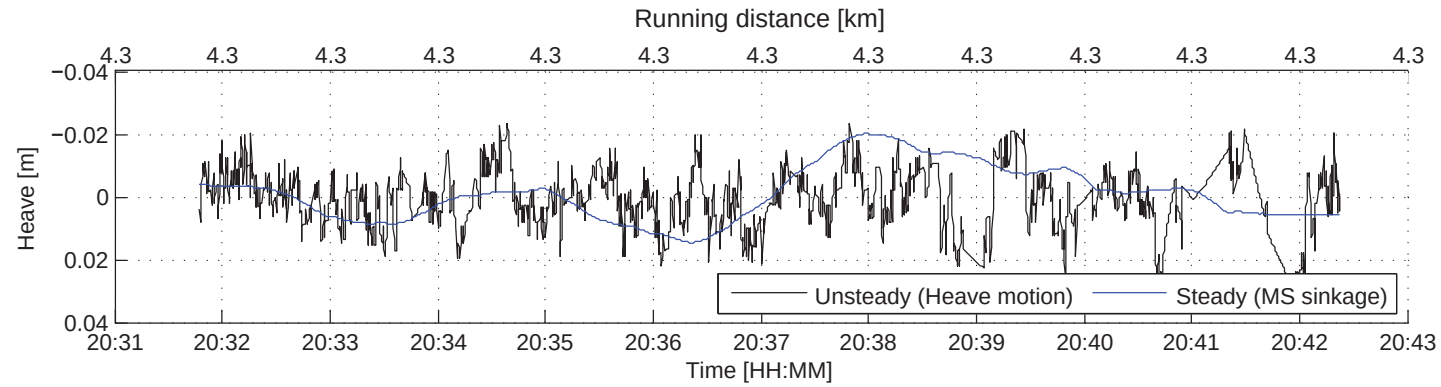
Kaloothaven

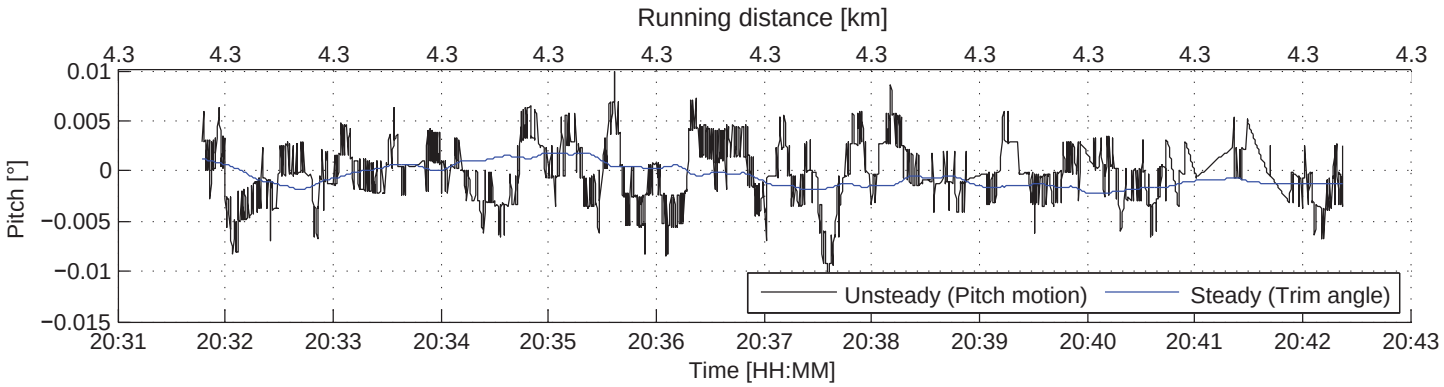


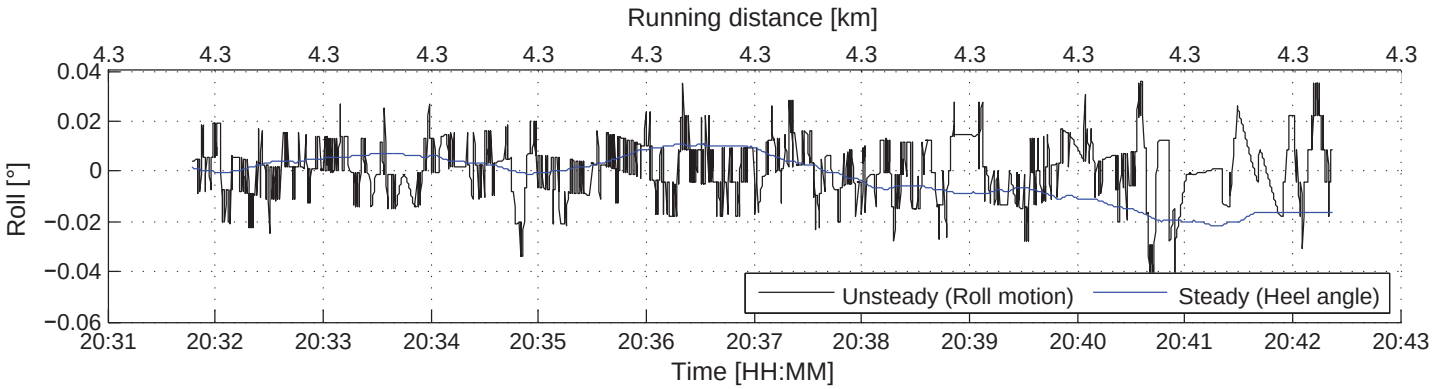
Bulk Mexico
T= 16.5 m

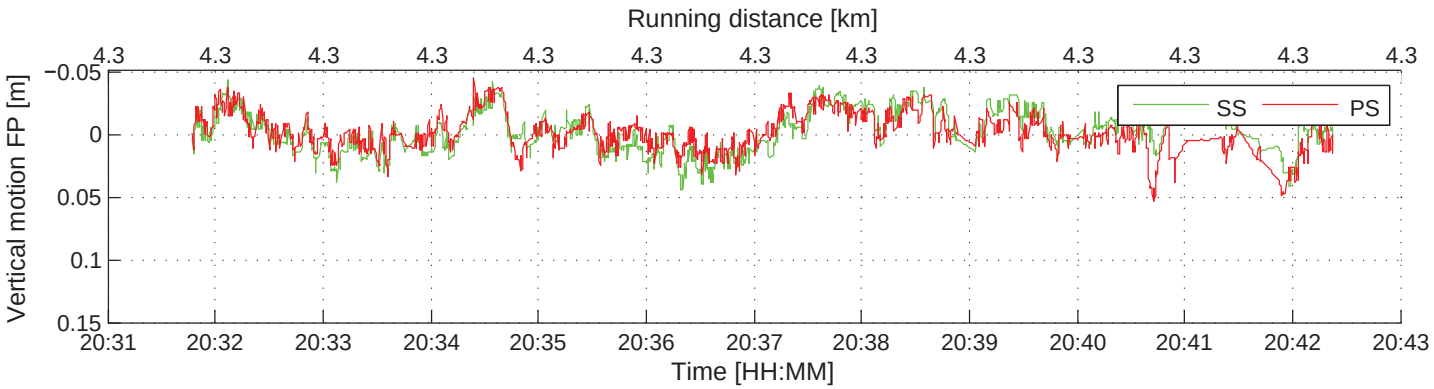
Initial static position

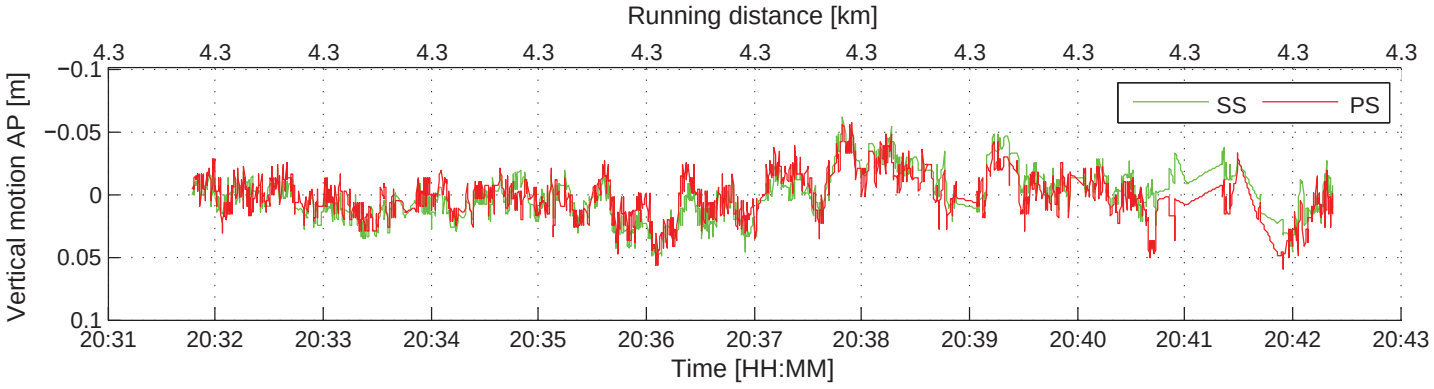
Kaloothaven







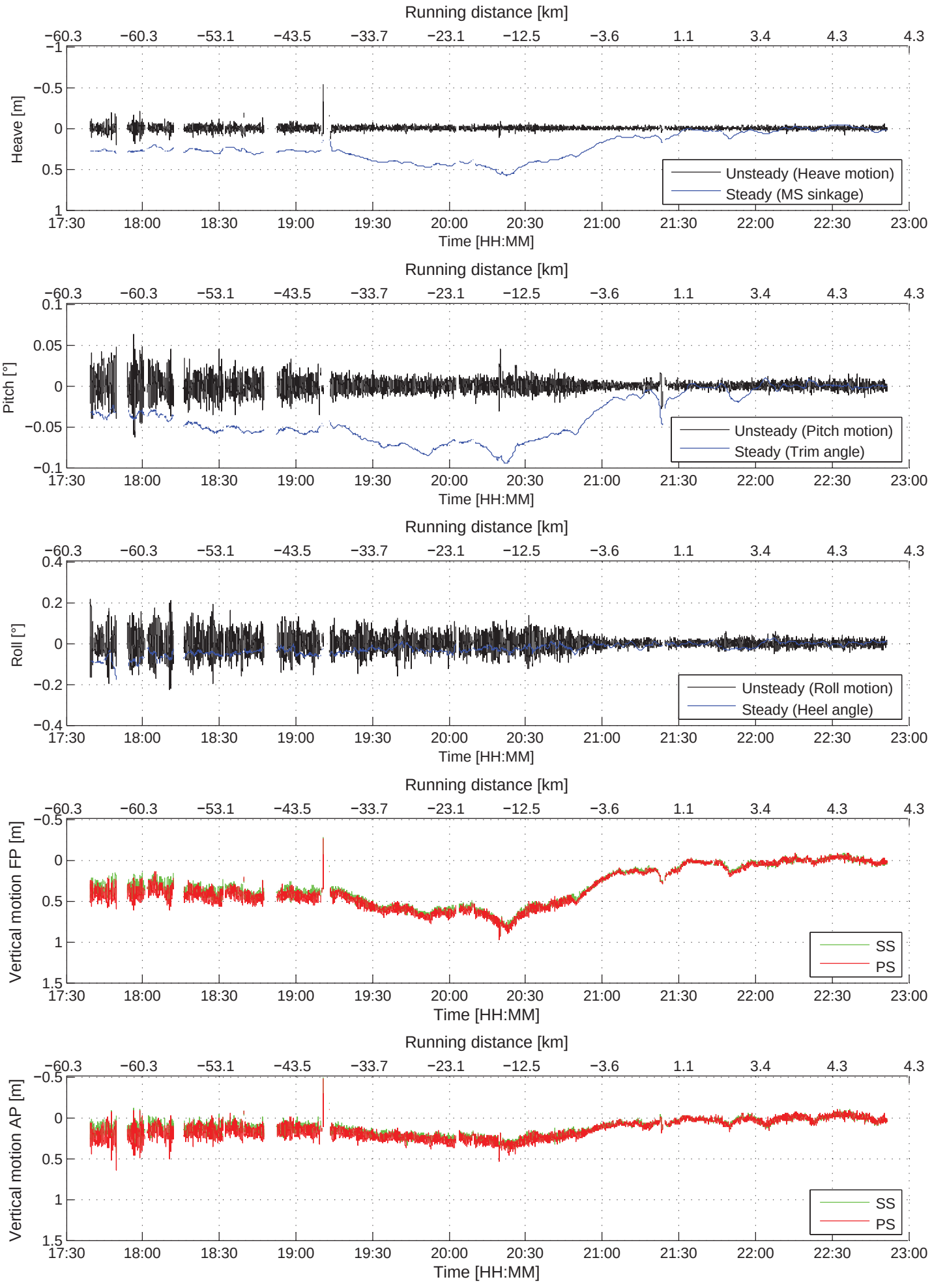




Cape Harmony
T= 16.5 m

Vertical motions: unsteady and steady (running average)

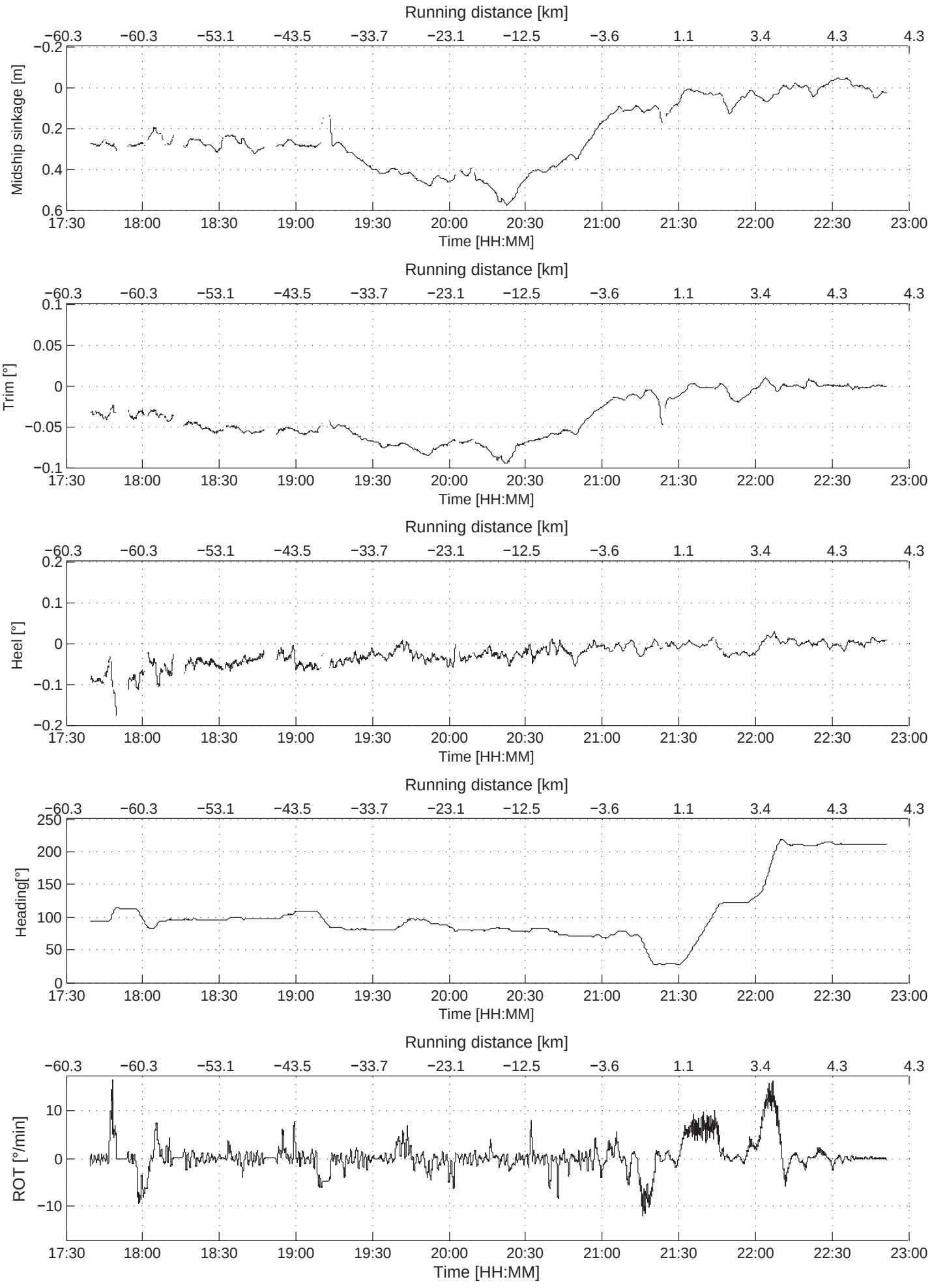
Kaloothaven



Cape Harmony
T= 16.5 m

Steady motions and vessel's course

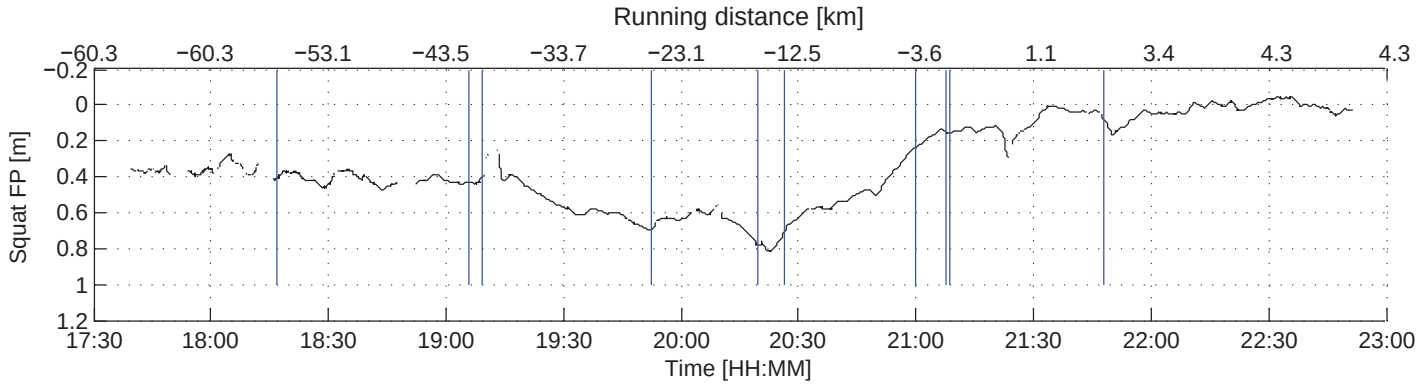
Kaloothaven

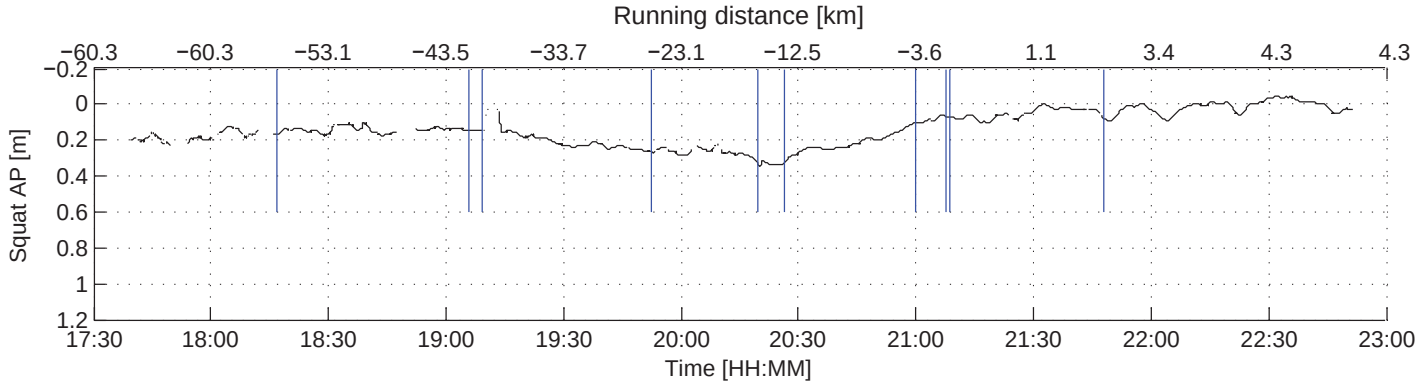


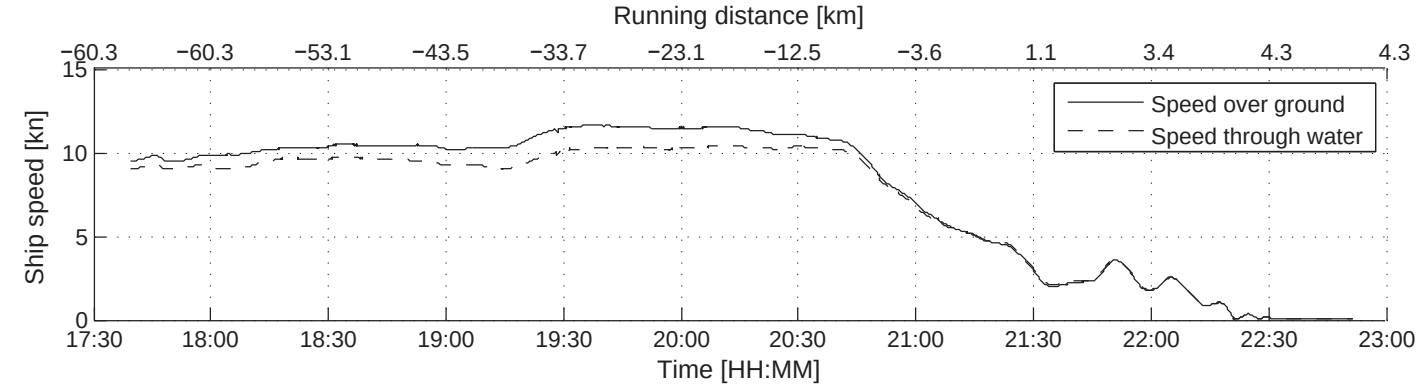
Cape Harmony
T= 16.5 m

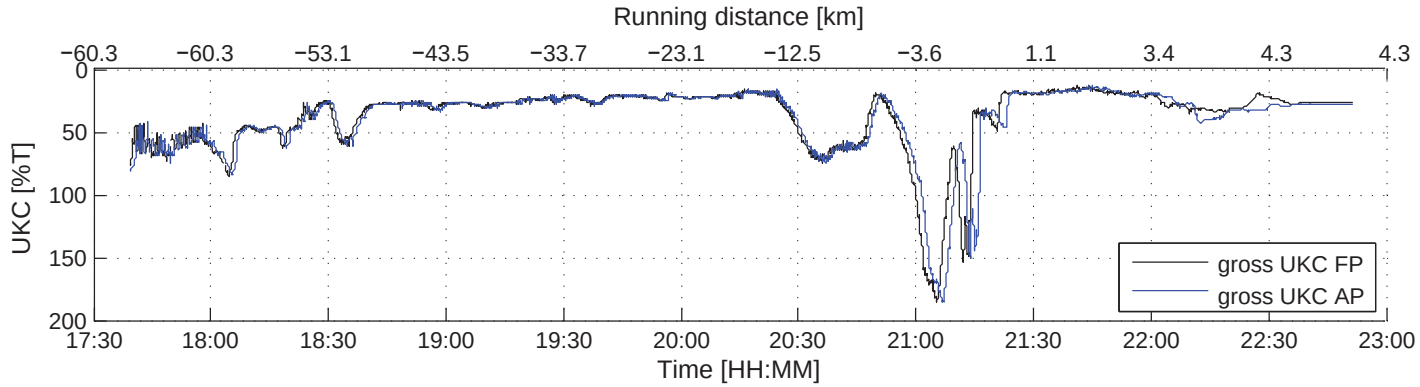
SQUAT analysis

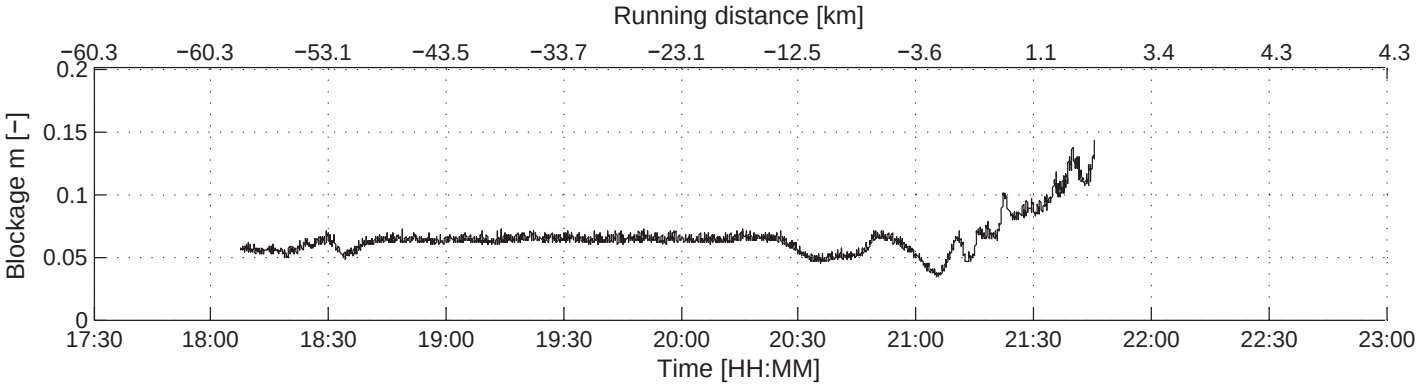
Kaloothaven







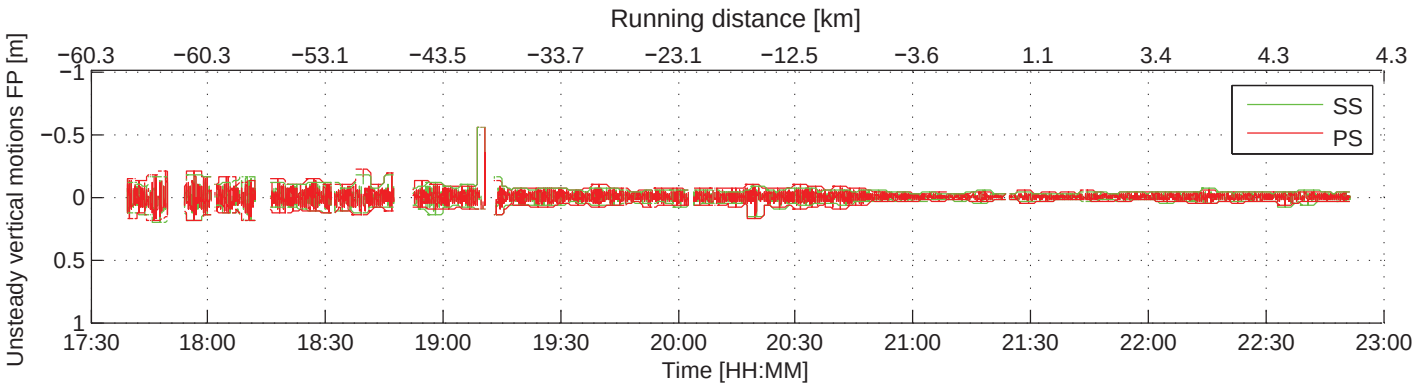


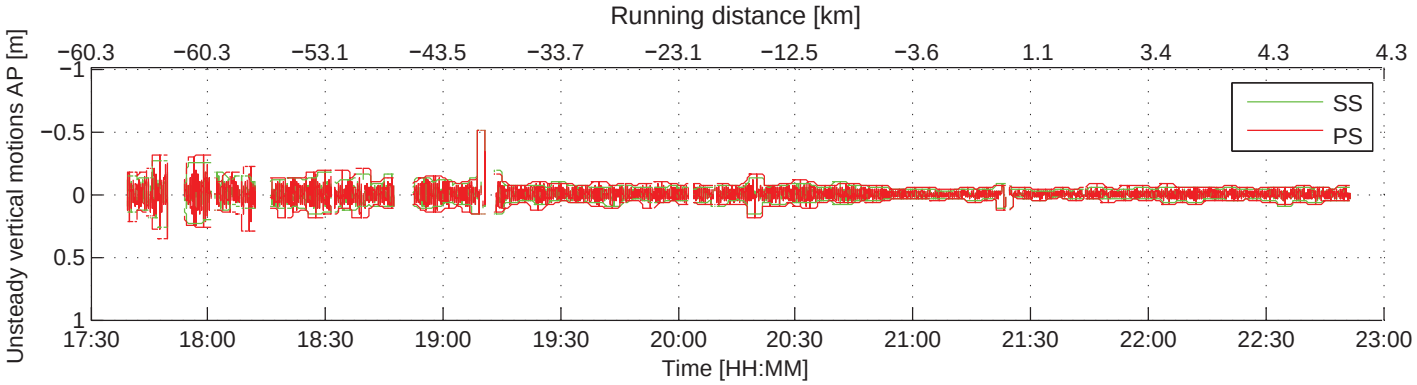


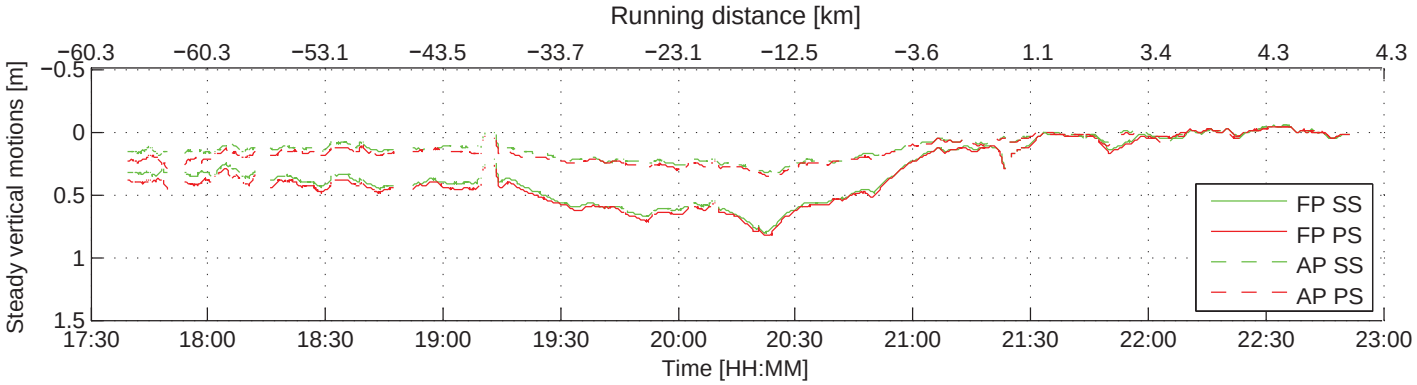
Cape Harmony
T= 16.5 m

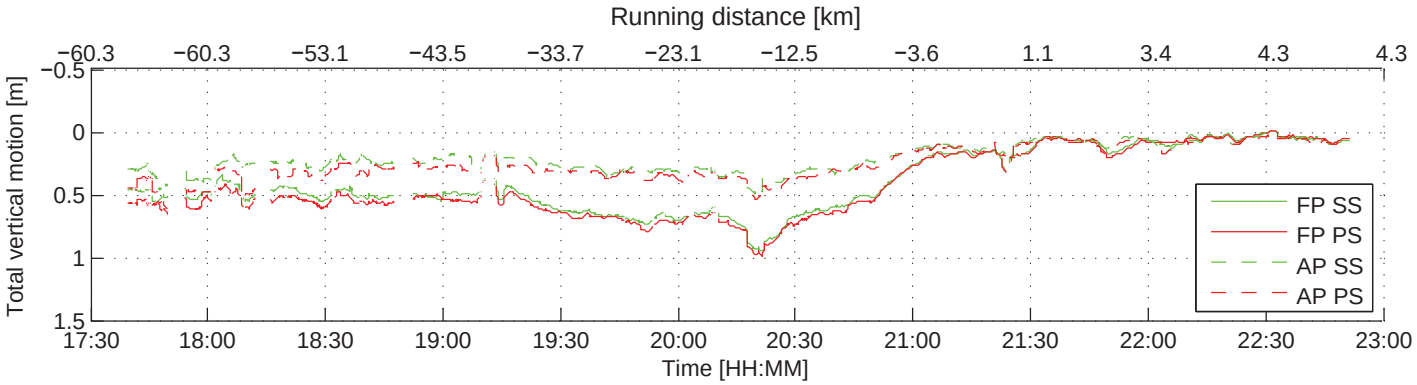
Maximum vertical motions

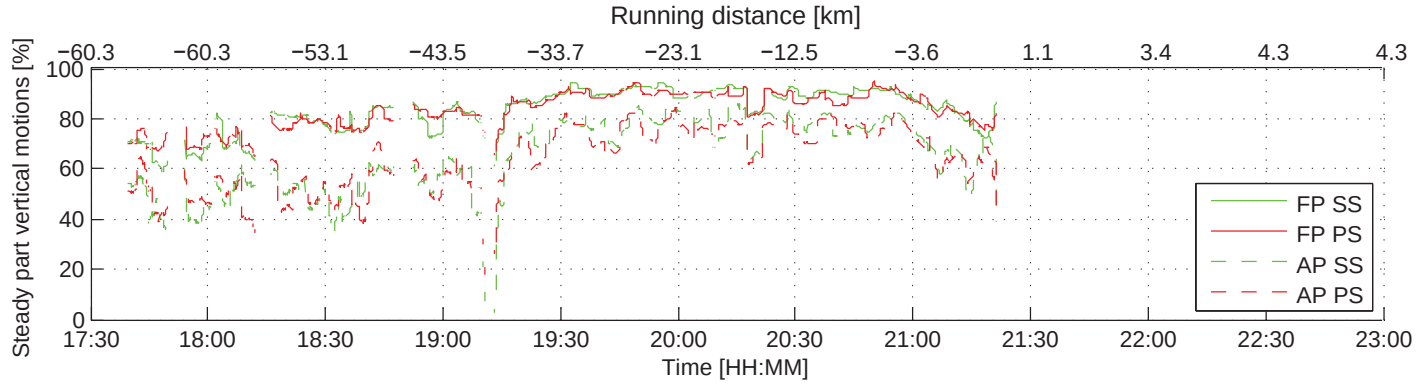
Kaloothaven







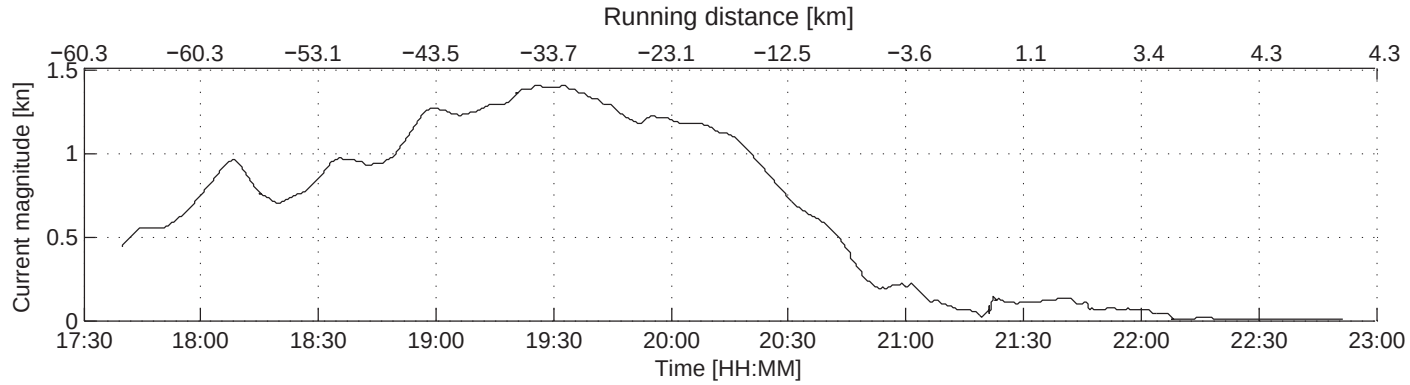


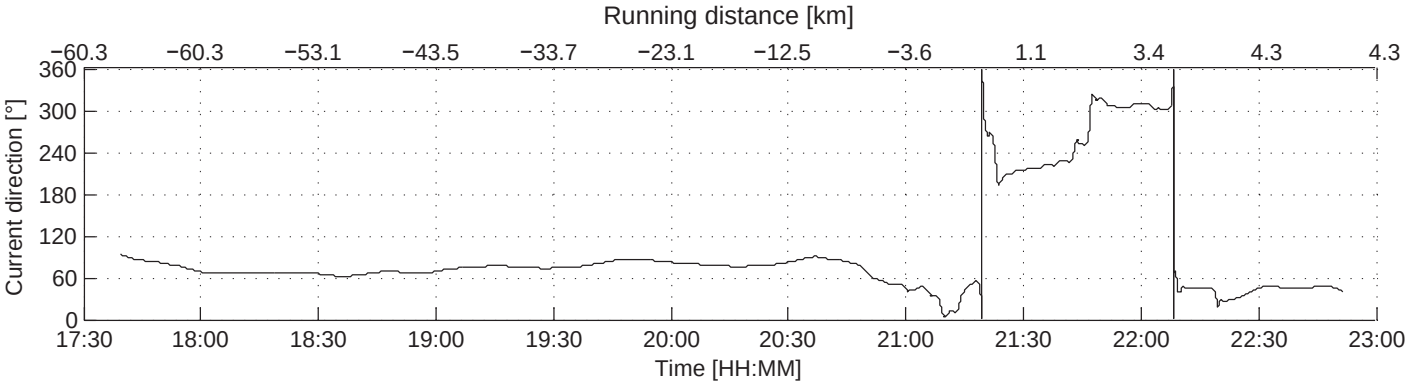


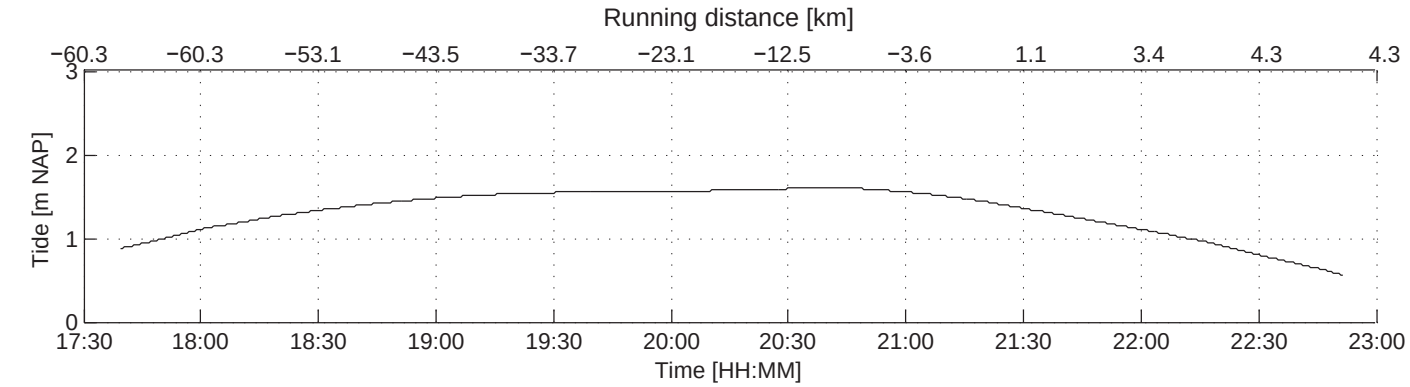
Cape Harmony
T= 16.5 m

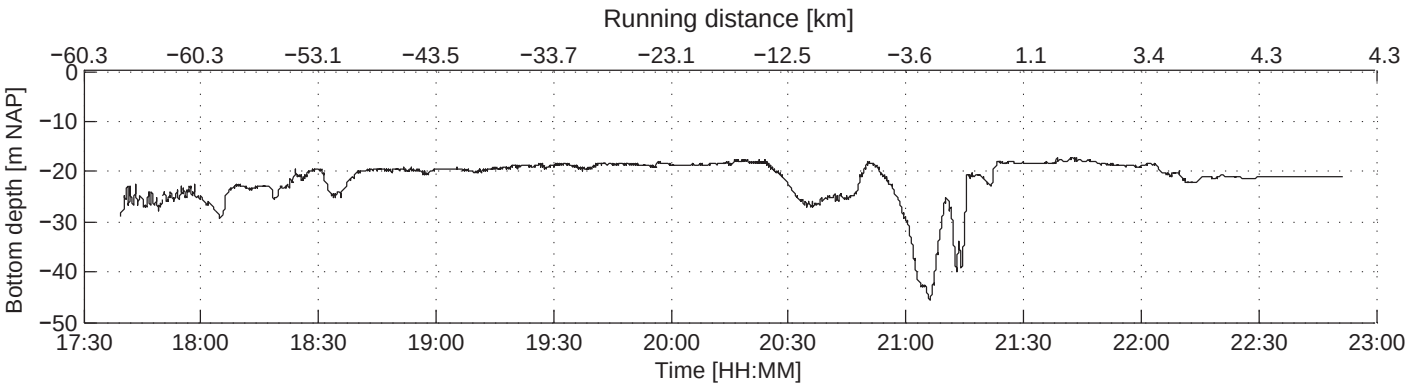
Environment

Kaloothaven





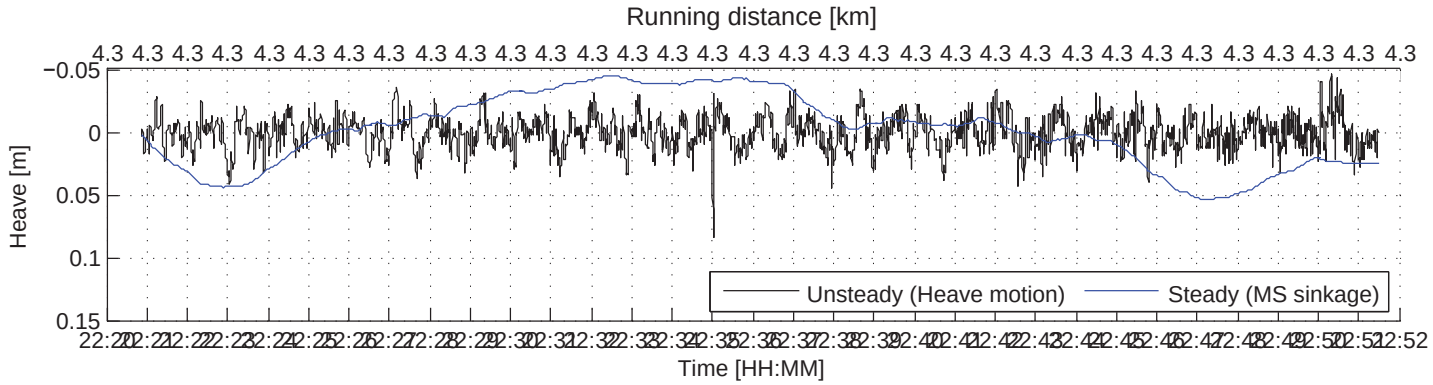


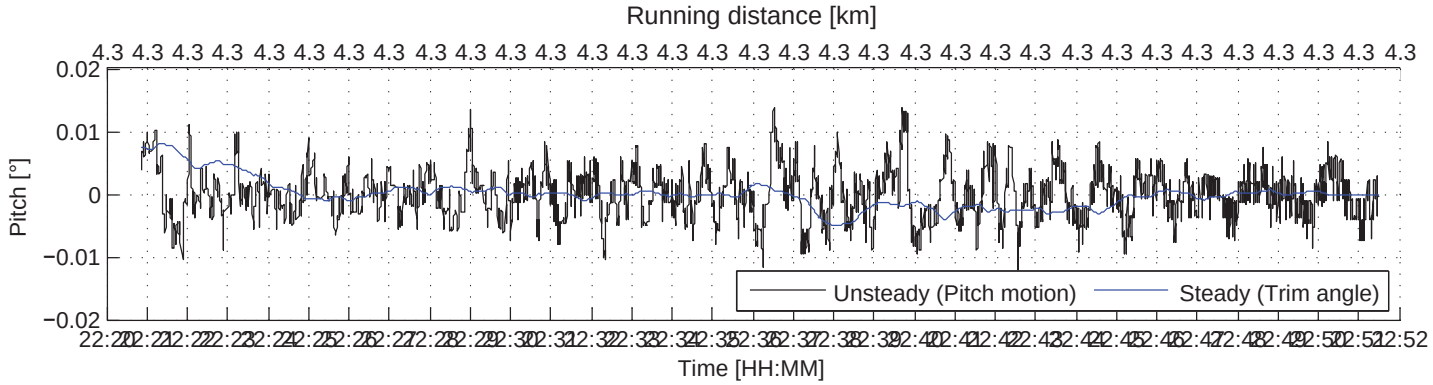


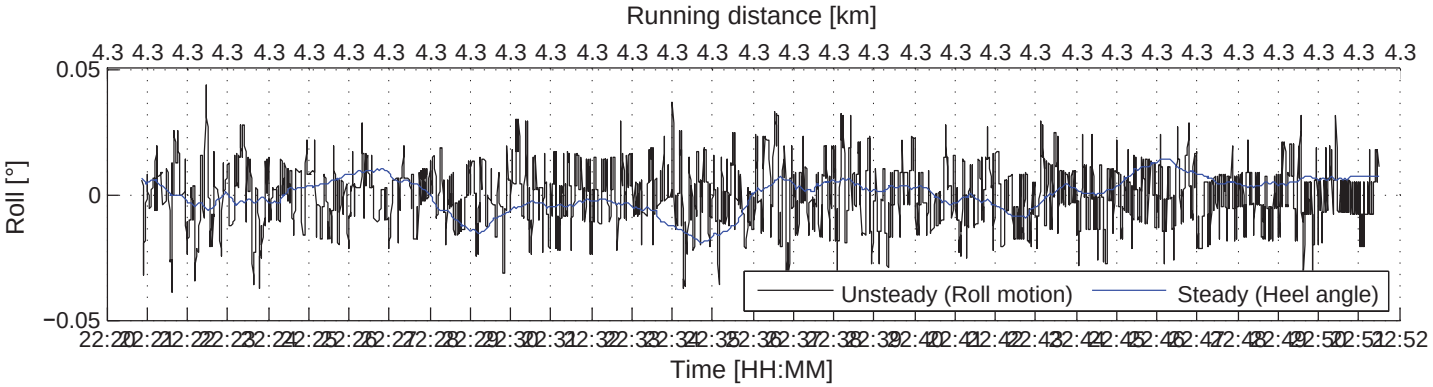
Cape Harmony
T= 16.5 m

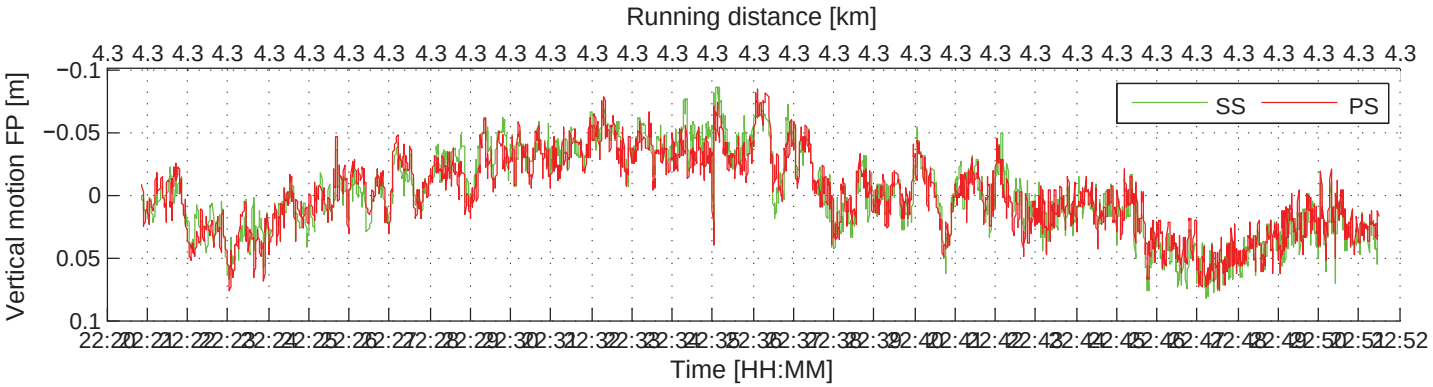
Initial static position

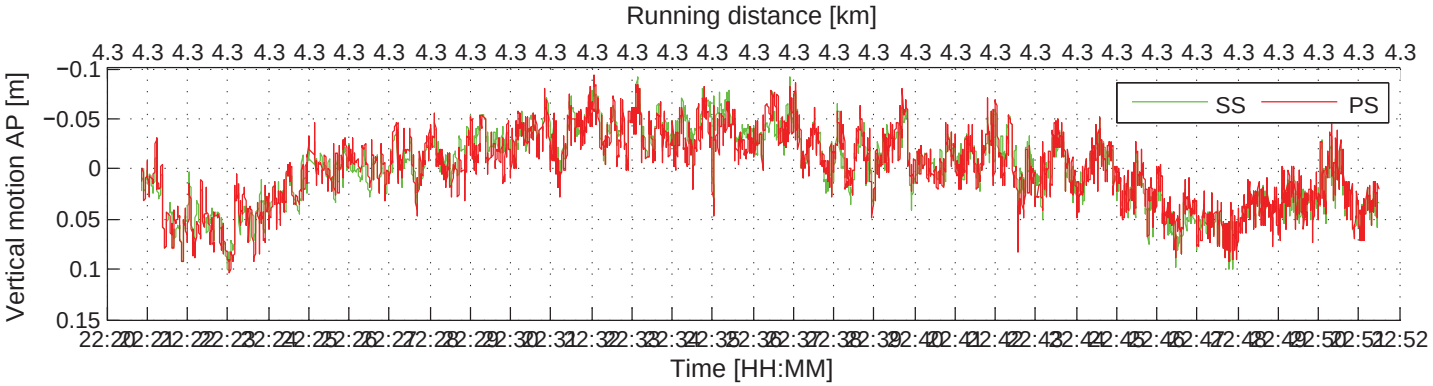
Kaloothaven







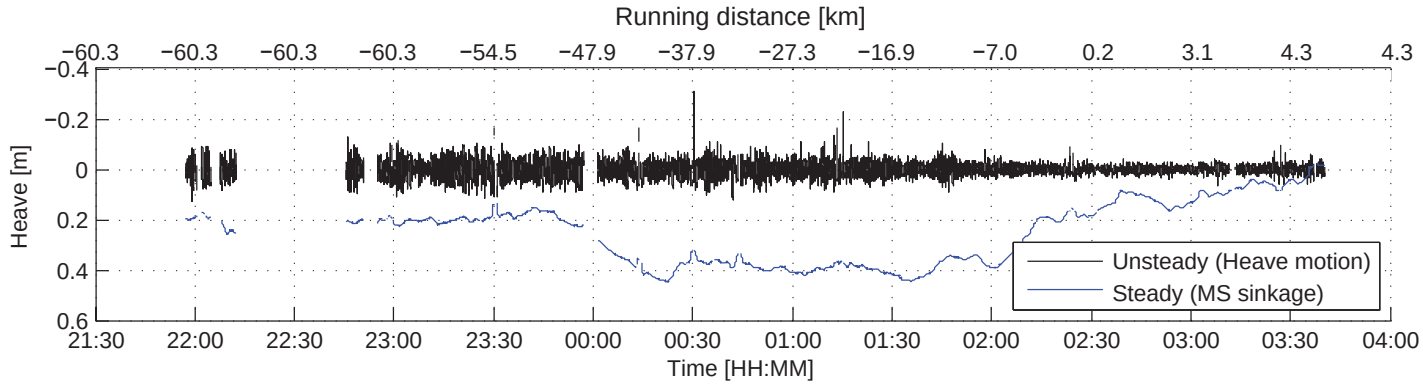


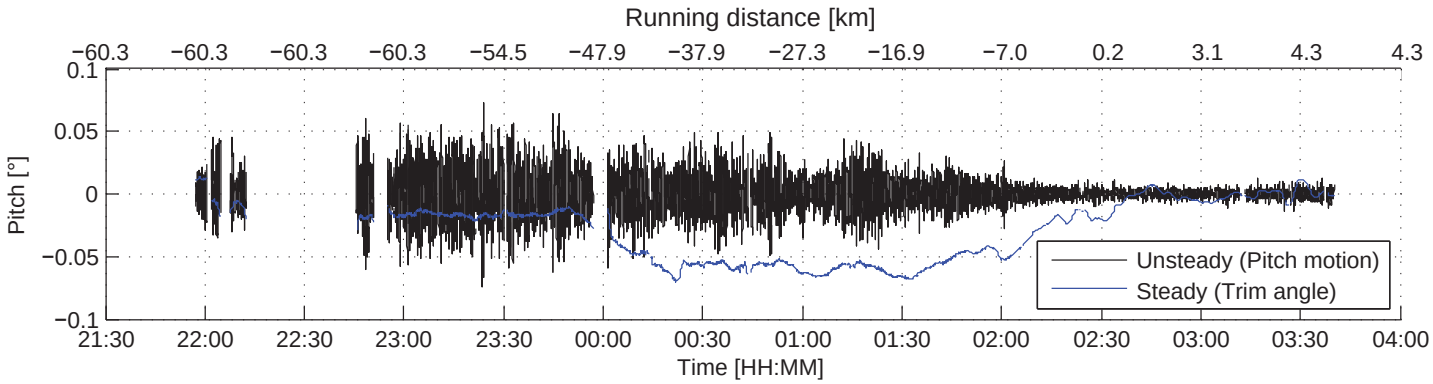


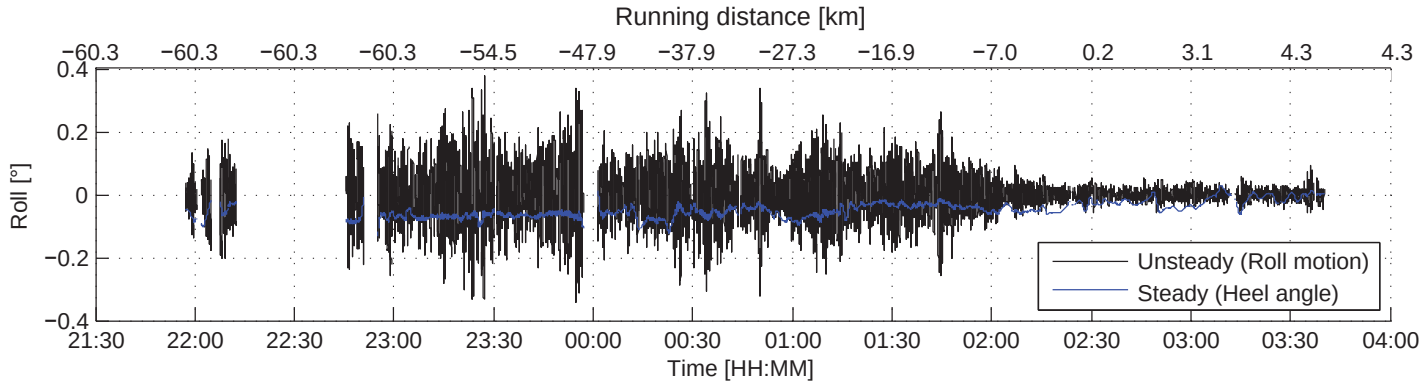
Panormos
T= 15.925 m

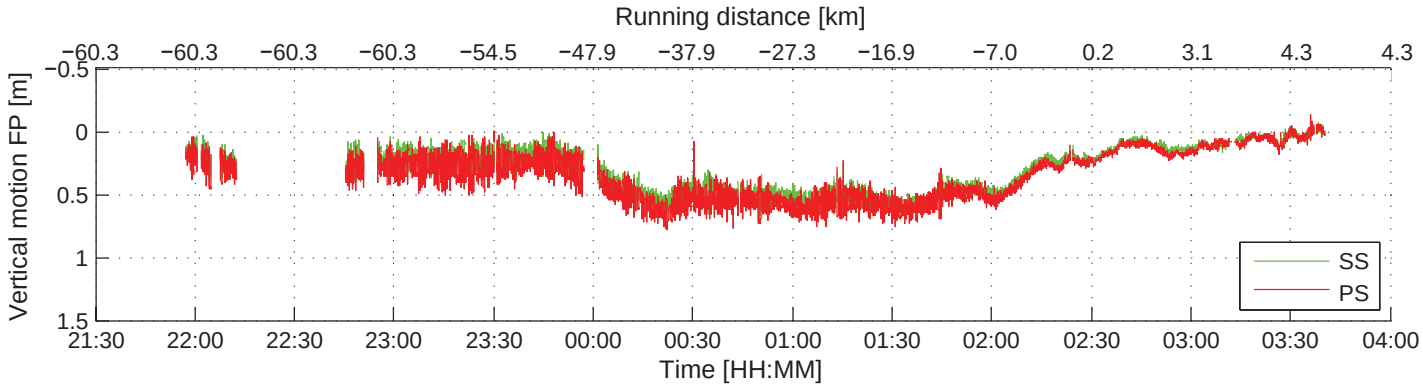
Vertical motions: unsteady and steady (running average)

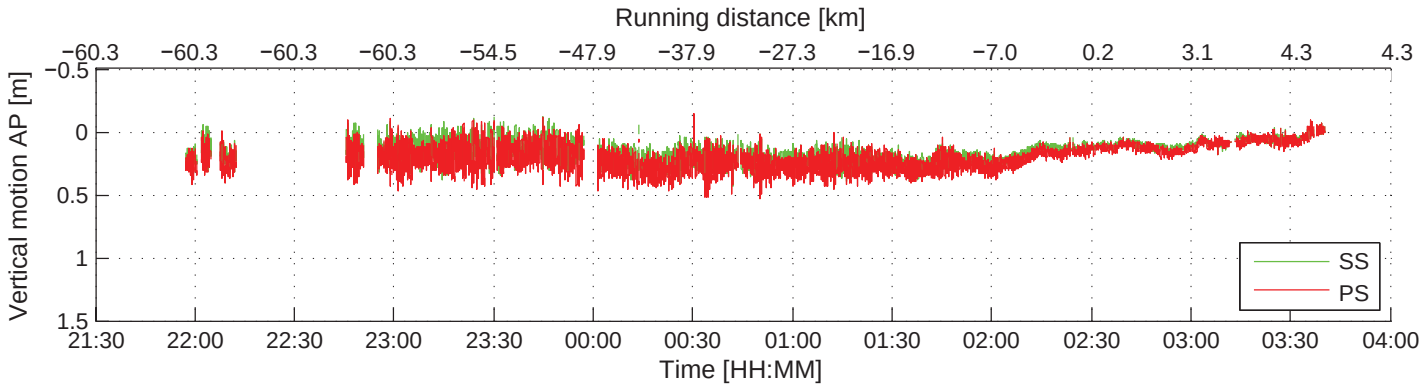
Kaloothaven







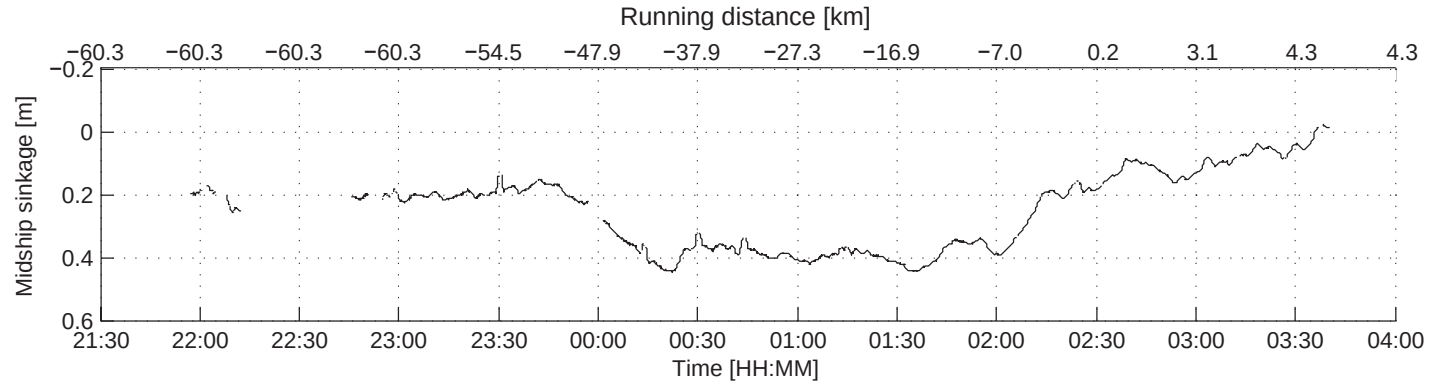


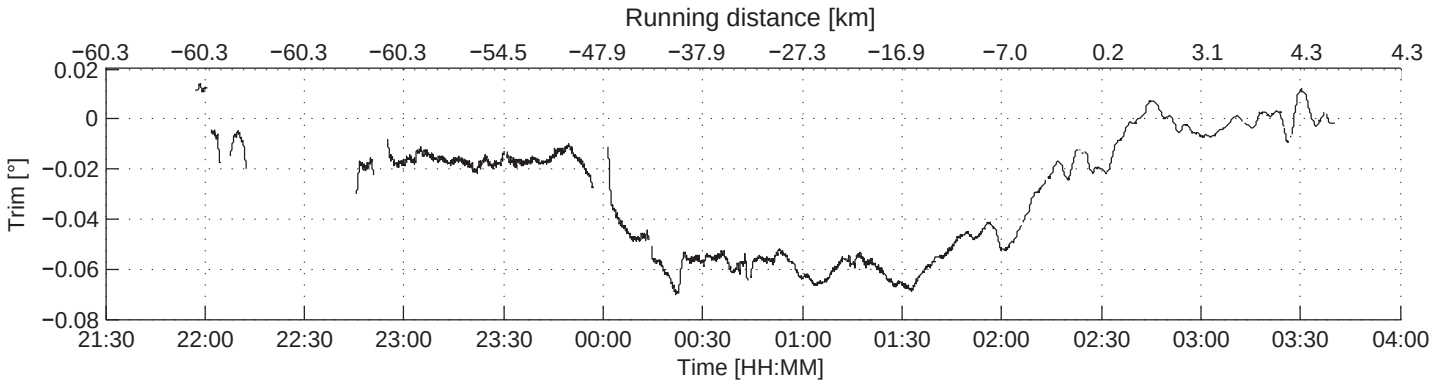


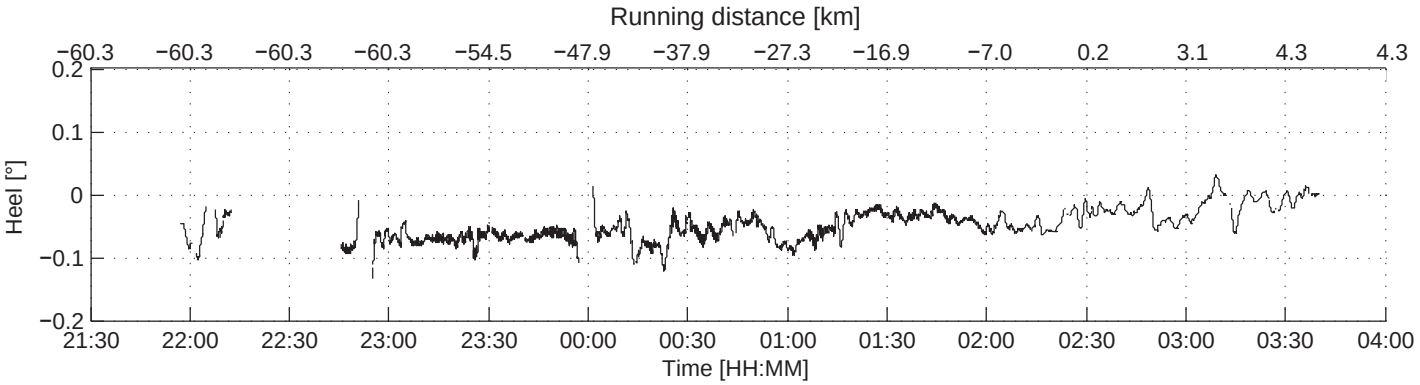
Panormos
T= 15.925 m

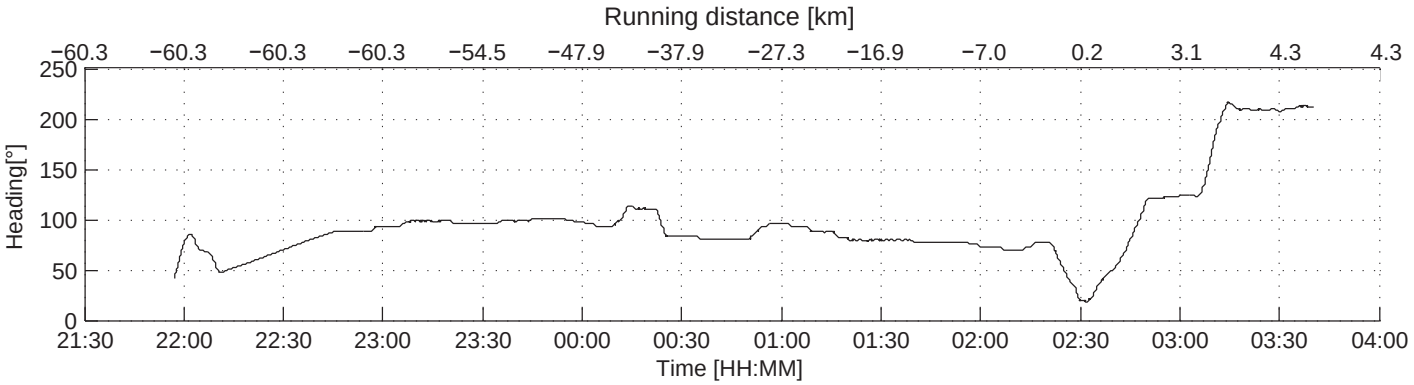
Steady motions and vessel's course

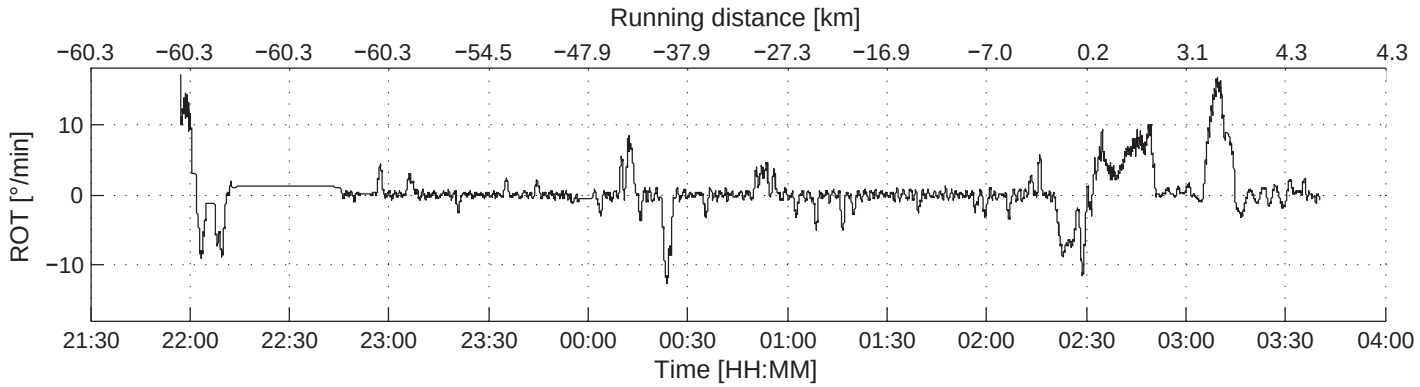
Kaloothaven







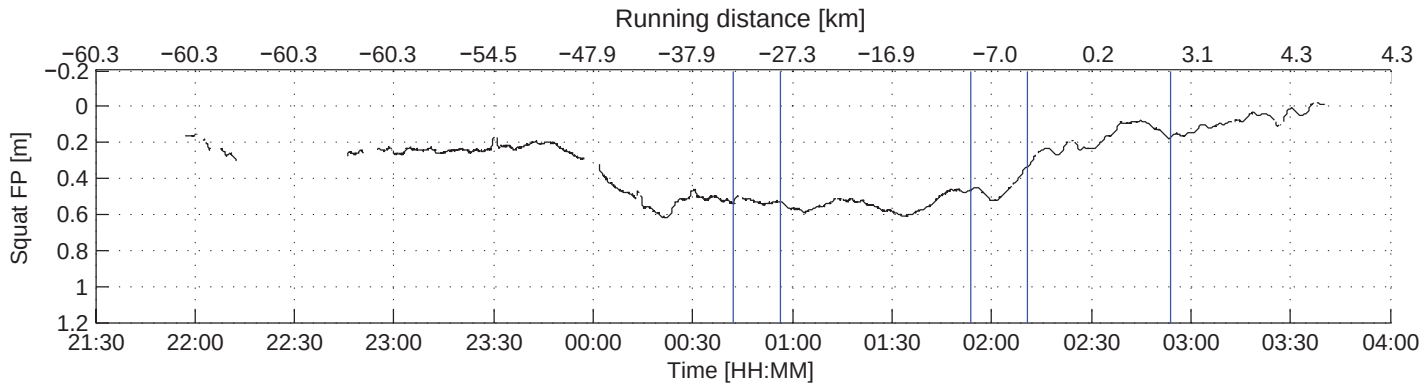


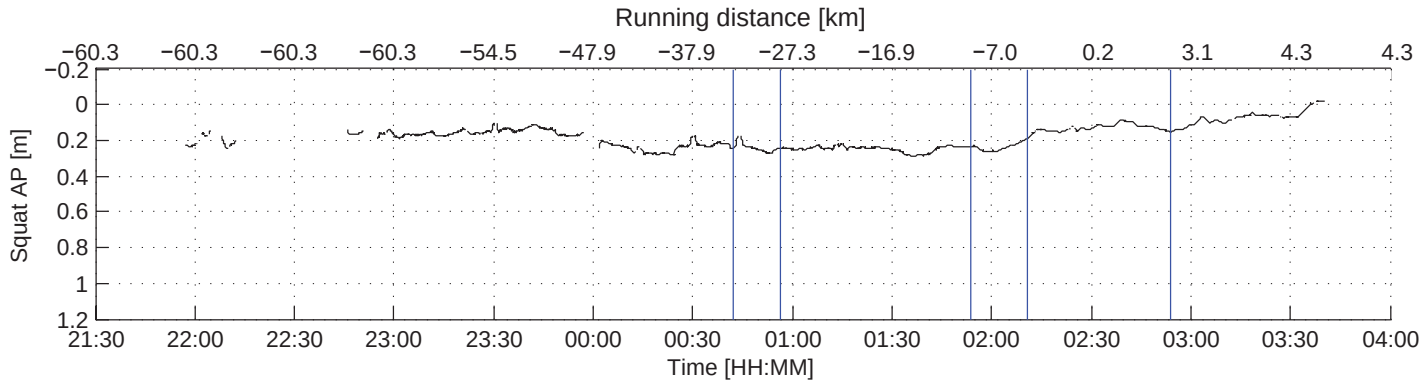


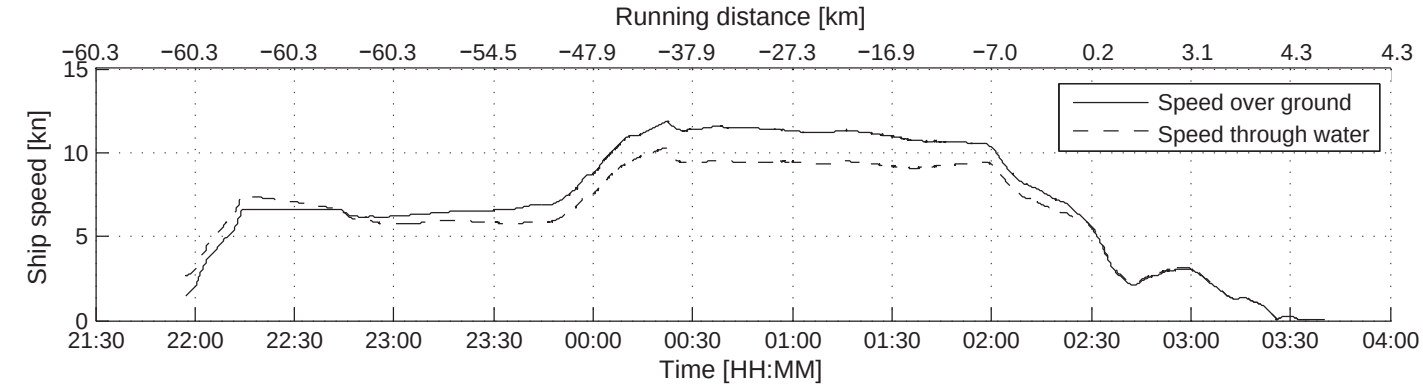
Panormos
T= 15.925 m

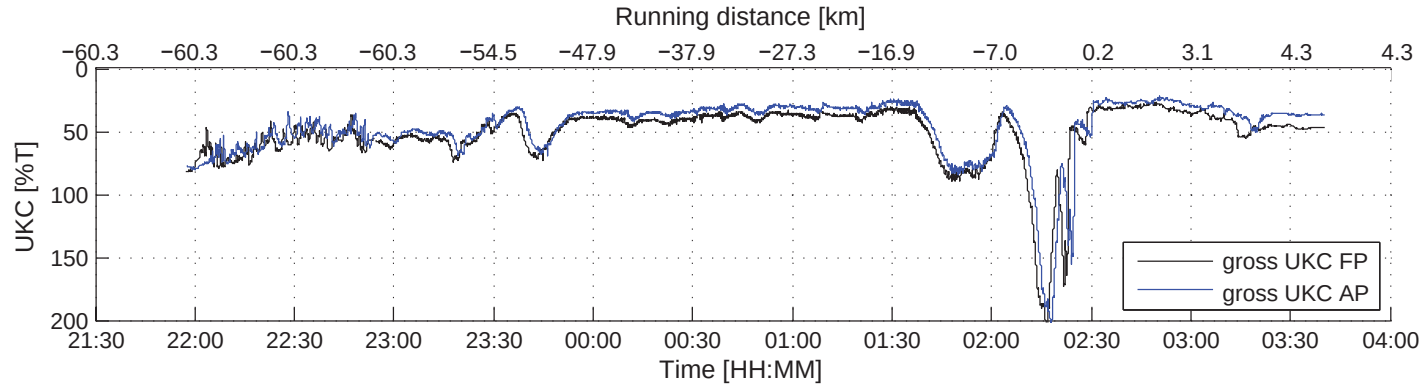
SQUAT analysis

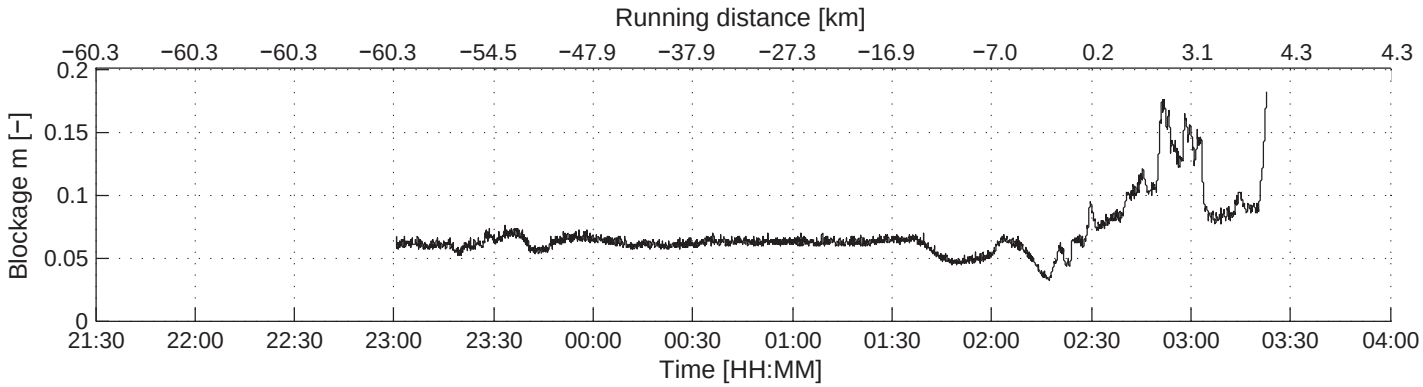
Kaloothaven







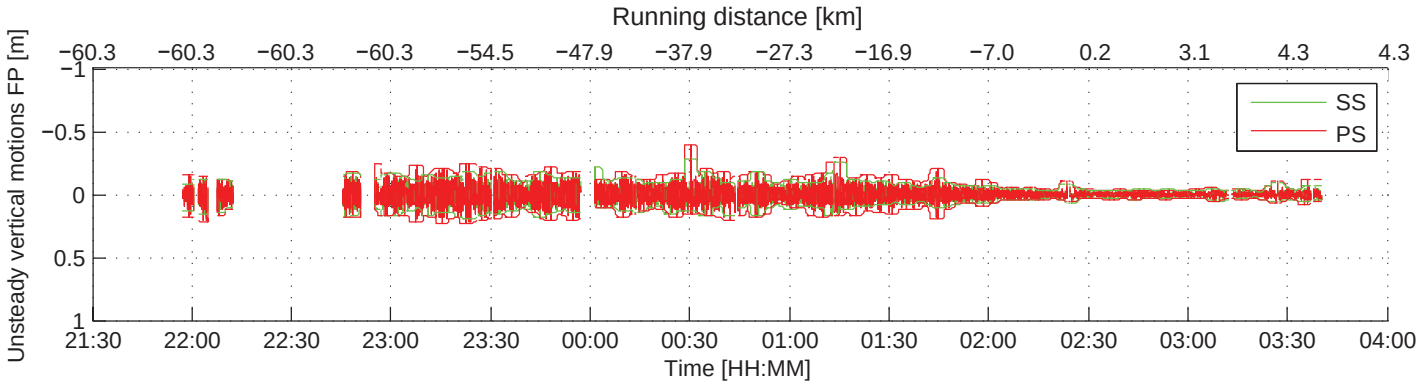


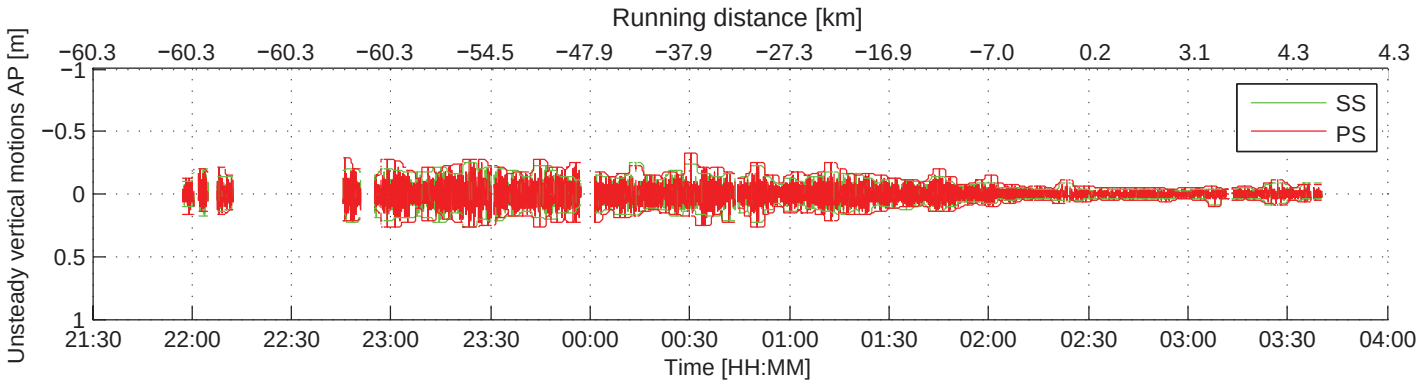


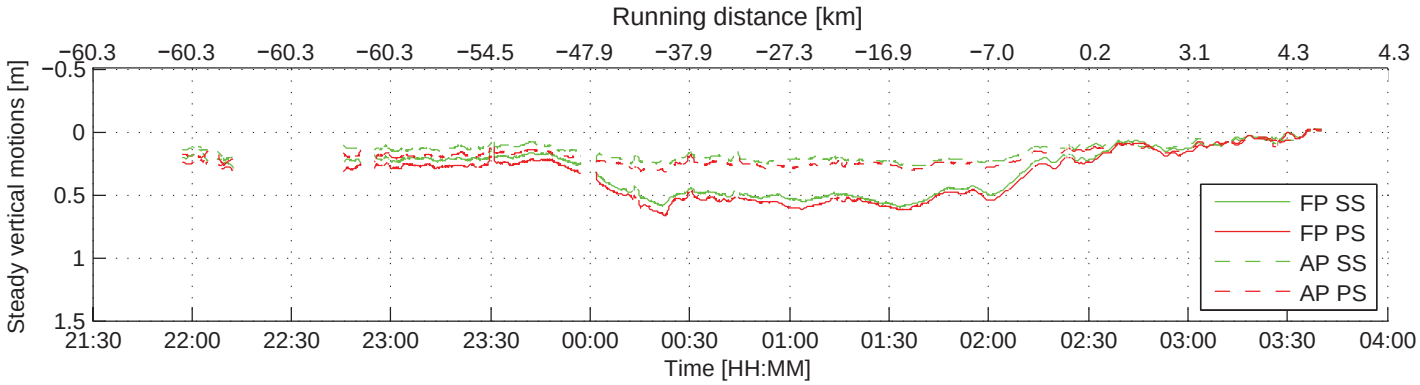
Panormos
T= 15.925 m

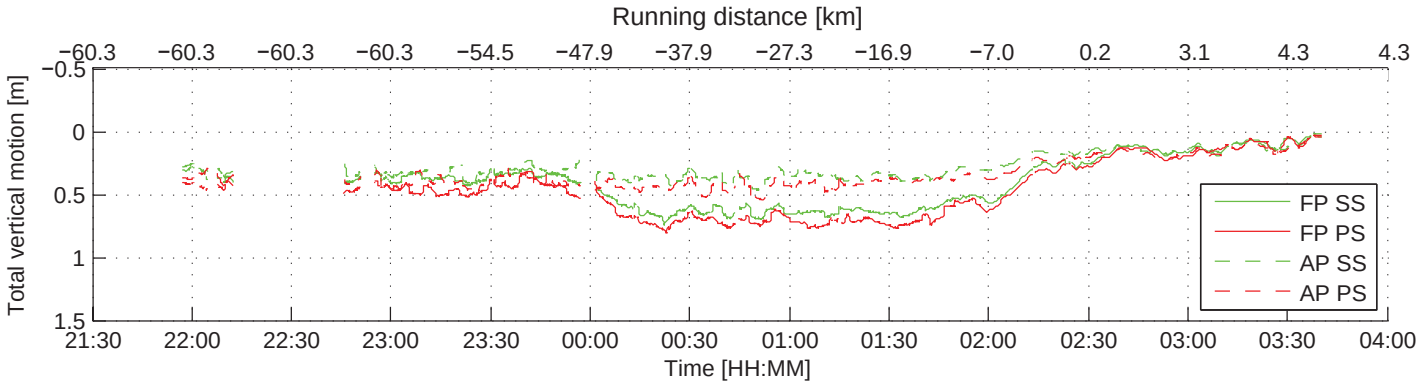
Maximum vertical motions

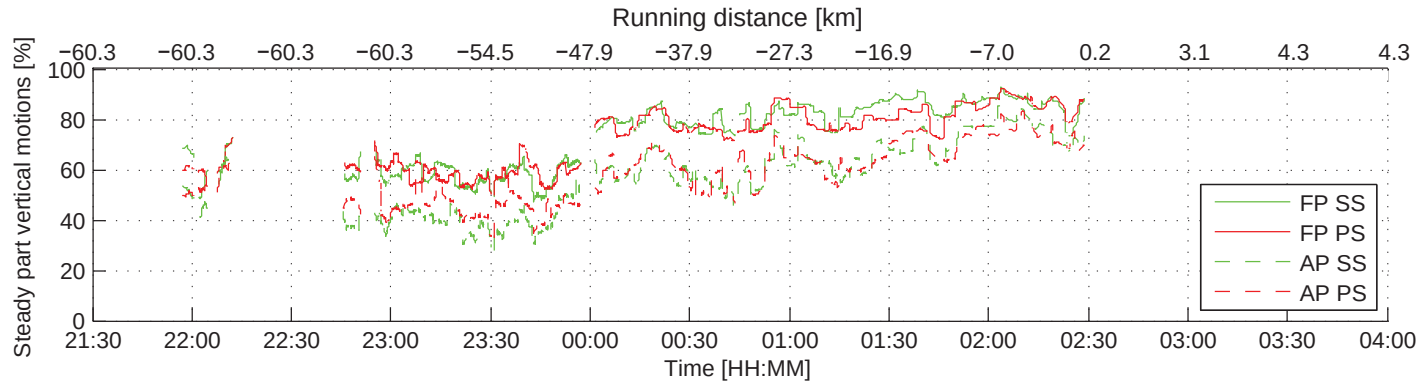
Kaloothaven







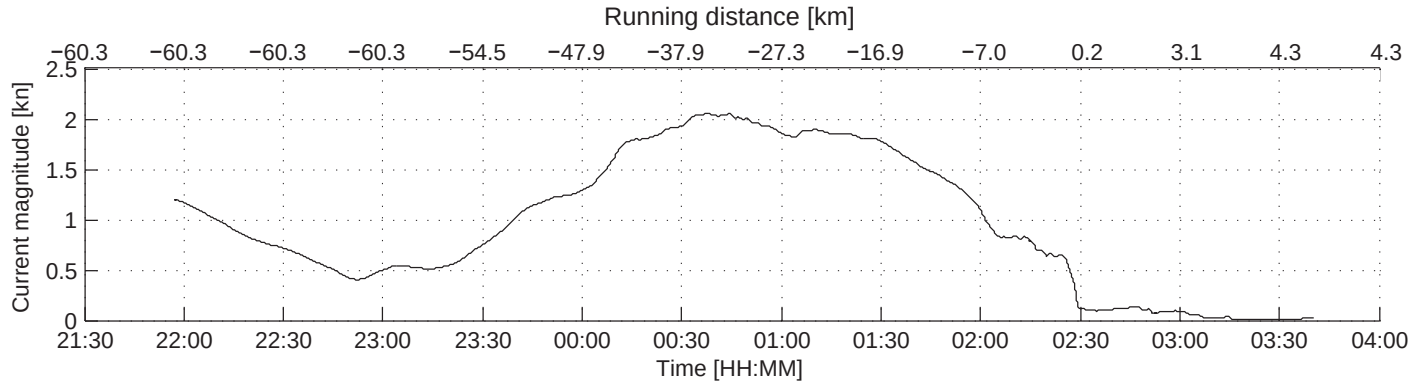


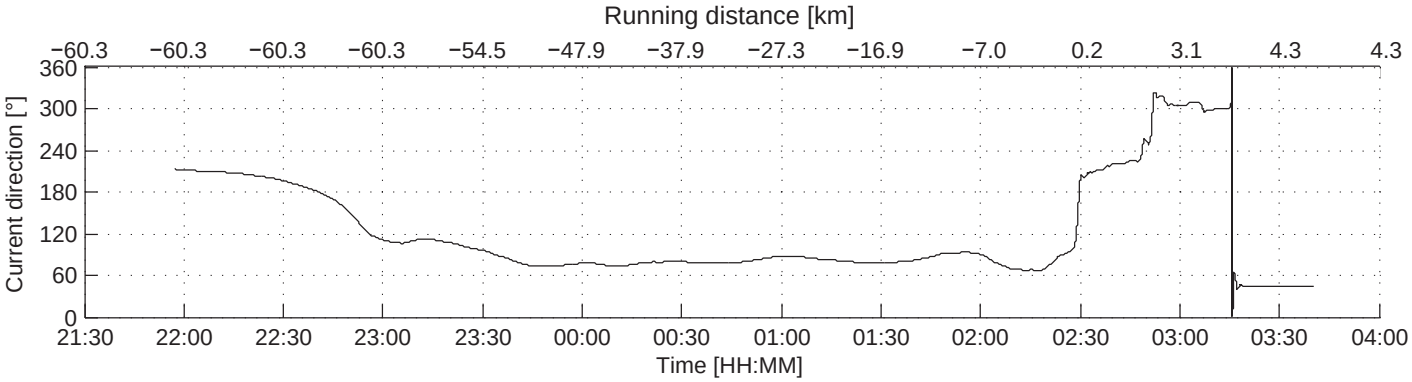


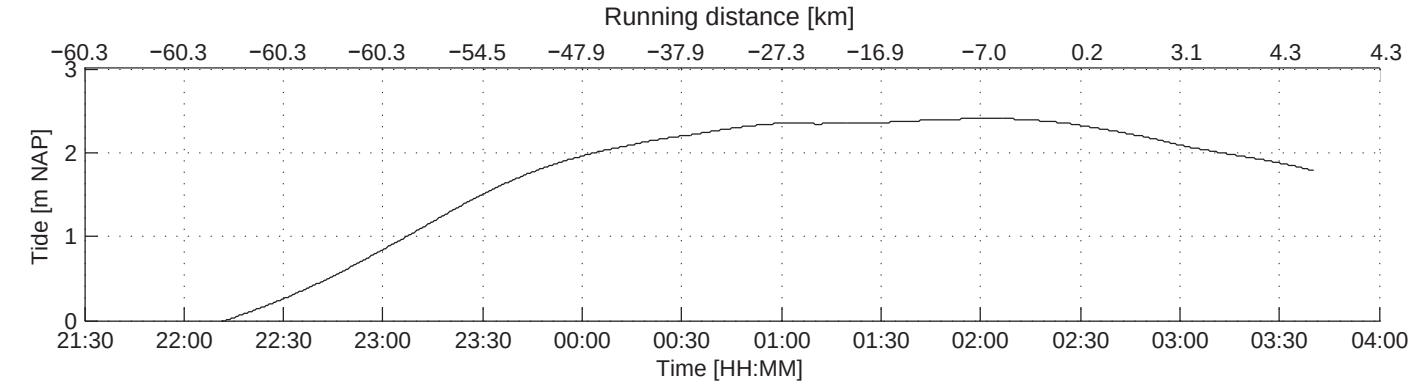
Panormos
T= 15.925 m

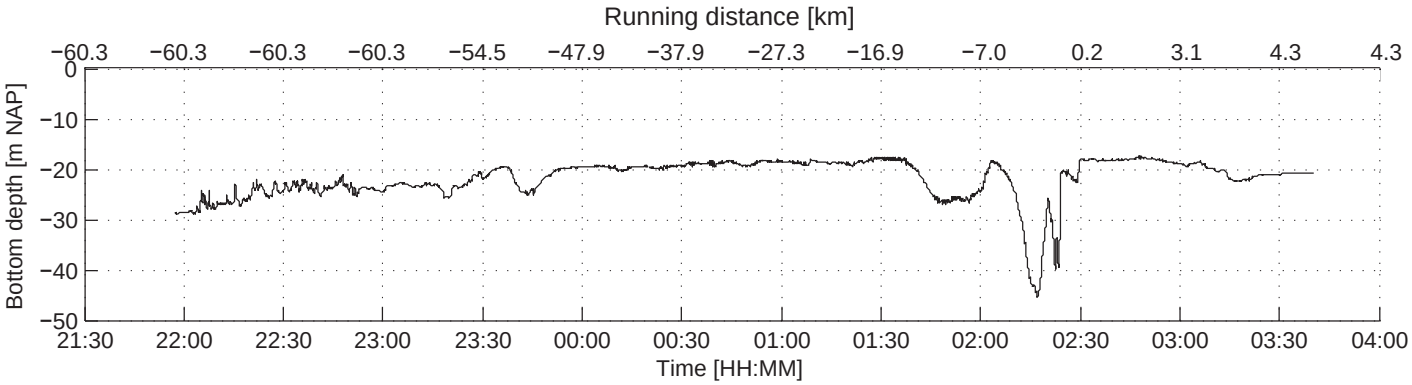
Environment

Kaloothaven





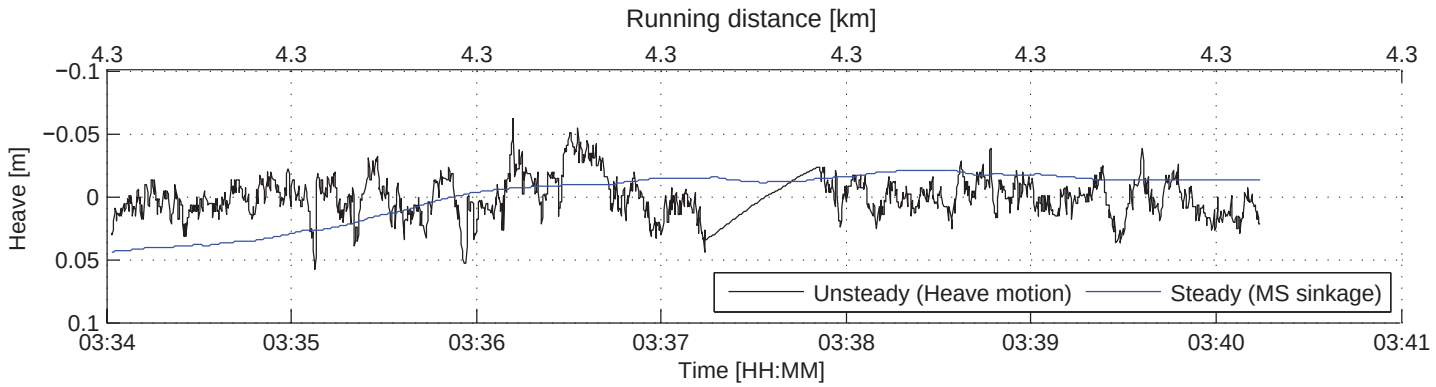


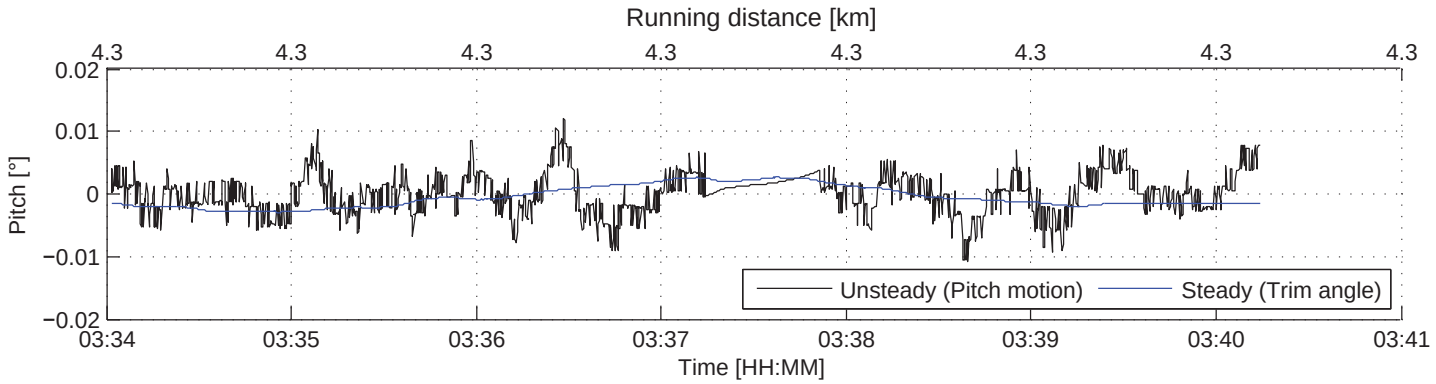


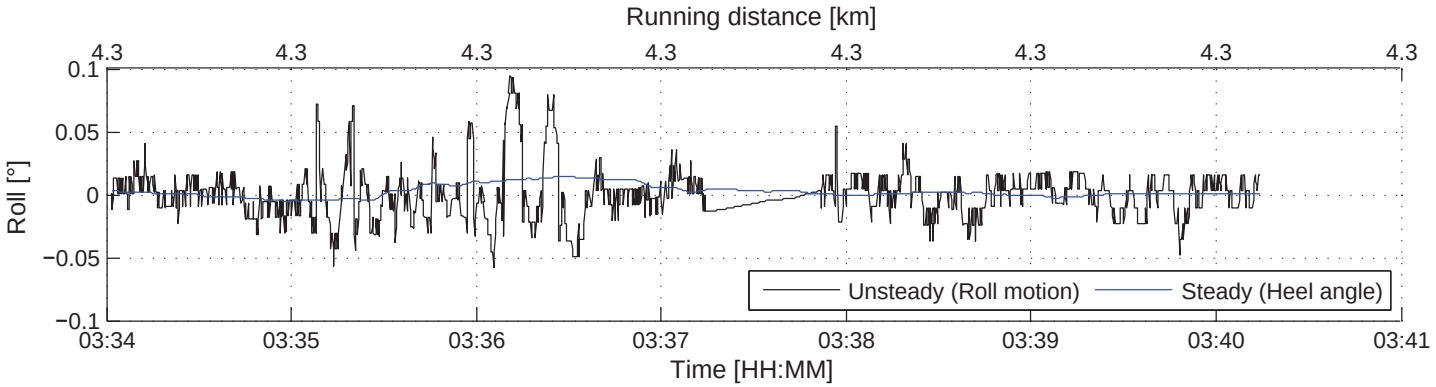
Panormos
T= 15.925 m

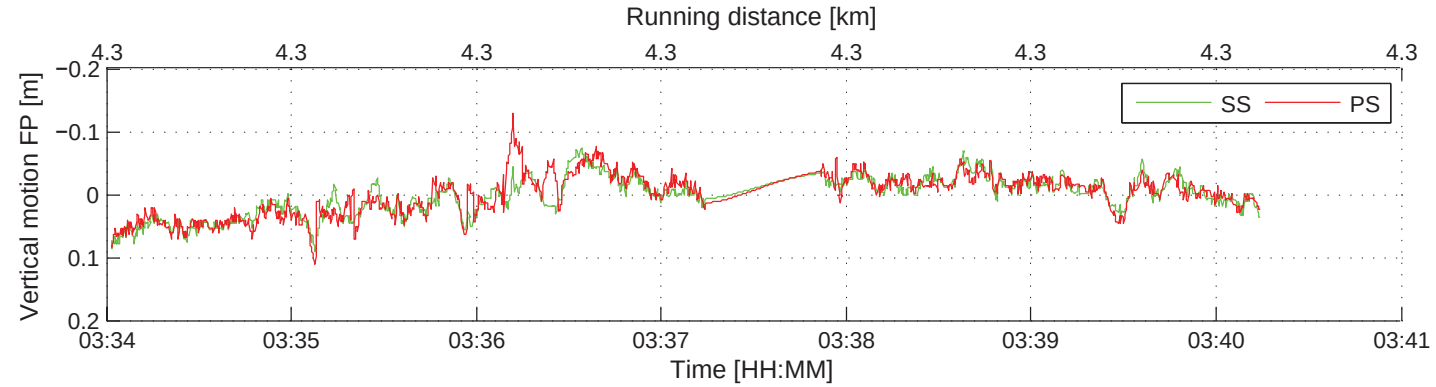
Initial static position

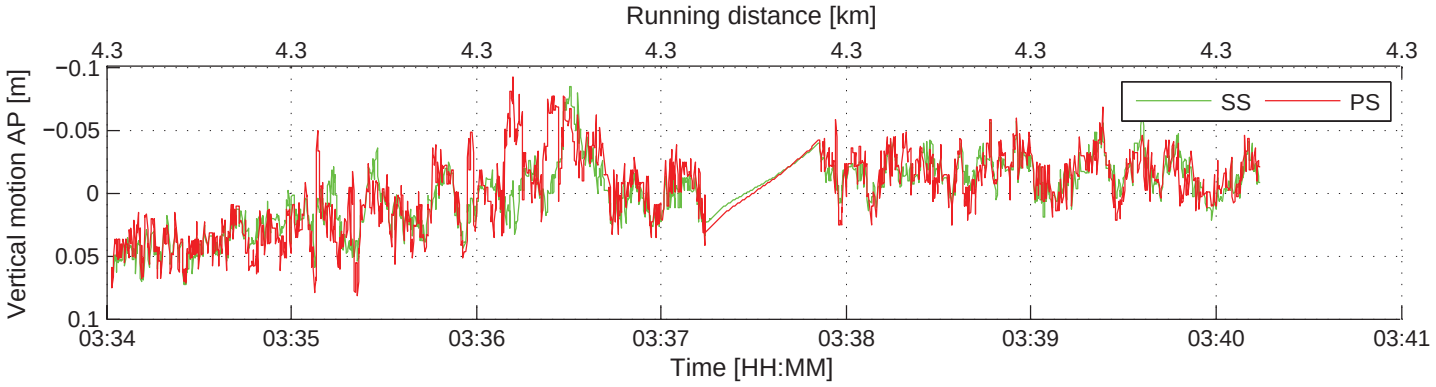
Kaloothaven











Bijlage 2: Ontmoetingstabellen

Tabel 25 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Asian Blossom

Time	Own Ship		Meeting Ship					Passing distance
	Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
dd/mm/yyyy HH:MM:SS.FFF	[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
27/07/2015 9:11	ASIAN BLOSSOM	10.7	ARA ATLANTIS	134	23	7.3	19.7	235
27/07/2015 9:32	ASIAN BLOSSOM	9.4	PUCON	304	40	11.8	15.7	345
27/07/2015 9:57	ASIAN BLOSSOM	9.8	MSC ROSSELLA	243	32	9.5	14.2	325
27/07/2015 10:04	ASIAN BLOSSOM	8.7	RHOGAS	113	19	7.5	12.4	374
27/07/2015 10:31	ASIAN BLOSSOM	3.6	MACOMA	102	12	2	7.9	86

Tabel 26 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Cape Canary

Time	Own Ship		Meeting Ship					Passing distance
	Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
dd/mm/yyyy HH:MM:SS.FFF	[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
29/07/2015 9:57	CAPE CANARY	11.0	TERRY	146	23	8.4	10.2	402
29/07/2015 10:07	CAPE CANARY	10.8	DOROTHEA SCHULTE	113	19	6	10.2	321
29/07/2015 11:22	CAPE CANARY	11.4	NOCC OCEANIC	199	32	9.6	16.1	260
29/07/2015 11:48	CAPE CANARY	7.9	ITEA	258	32	9.4	2.6	373
29/07/2015 12:22	CAPE CANARY	4.1	KVB-NOMADISCH1/2	172	11	0.1	7.7	109
29/07/2015 12:22	CAPE CANARY	4.0	KARBOUW	110	11	1.5	10.3	75

Tabel 27 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Wisdom of the Sea

Time	Own Ship		Meeting Ship					Passing distance
	Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
dd/mm/yyyy HH:MM:SS.FFF	[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
24/09/2015 8:12	WISDOM OF THE SEA 1	9.9	ELBFEEDER	139	22	7.4	14.2	326
24/09/2015 9:40	WISDOM OF THE SEA 1	10.1	RHOGAS	113	19	6.3	12.5	489
24/09/2015 9:45	WISDOM OF THE SEA 1	8.3	DC VLAANDEREN 3000	90	14	6.5	11.4	484
24/09/2015 9:50	WISDOM OF THE SEA 1	8.4	BW BOSS	230	36	7.7	10.3	407
24/09/2015 10:50	WISDOM OF THE SEA 1	3.0	MARTENS 4	80	9	0	5.6	66
24/09/2015 11:03	WISDOM OF THE SEA 1	2.1	CHRIS	67	8	2.6	7.4	27

Tabel 28 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Lancelot

Time	Own Ship		Meeting Ship					Passing distance
	Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
dd/mm/yyyy HH:MM:SS.FFF	[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
8/10/2015 8:30	LANCELOT	9.6	STEFAN SIBUM	151	23	8.2	13.4	304
8/10/2015 8:58	LANCELOT	9.6	CELANDINE	162	25	6.2	14.2	273
8/10/2015 9:52	LANCELOT	12.2	IVER BRIGHT	111	18	7.3	10.0	304
8/10/2015 10:53	LANCELOT	7.3	TERNVIND	130	20	8.1	12.1	129
8/10/2015 11:21	LANCELOT	2.9	MY WAY	135	15	2	8.0	61
8/10/2015 11:24	LANCELOT	3.1	BIVIO	80	9	2.5	6.9	52

Tabel 29 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Bulk Mexico

Time	Own Ship		Meeting Ship					Passing distance
	Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
dd/mm/yyyy HH:MM:SS.FFF	[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
19/11/2015 16:24	BULK MEXICO	9.2	SPICA LEADER	190	28	7.8	15.0	374
19/11/2015 17:34	BULK MEXICO	11.4	IMPERATOR	139	25	5.5	9.4	262
19/11/2015 17:48	BULK MEXICO	12.8	MELUSINE	162	25	5.7	15.9	408
19/11/2015 17:54	BULK MEXICO	12.5	CORAL IVORY	116	16	6.9	14.1	327
19/11/2015 18:19	BULK MEXICO	11.4	TRANSPULP	190	26	7.6	14.5	393
19/11/2015 18:35	BULK MEXICO	11.1	SARAH WONSILD	90	14	5.4	10.7	463
19/11/2015 18:37	BULK MEXICO	10.3	MSC SUEZ	237	32	10	15.1	320
19/11/2015 18:48	BULK MEXICO	10.4	MV DIMITRIS Y	278	40	12.6	15.4	464
19/11/2015 19:14	BULK MEXICO	7.7	FLEVOGRACHT	136	20	5.6	16.7	87
19/11/2015 19:17	BULK MEXICO	7.5	DN VATAN	196	32	7.2	9.1	296
19/11/2015 19:31	BULK MEXICO	3.1	JUMBO VISION	110	21	5.4	3.3	247

Tabel 30 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Cape Harmony

Time	Own Ship		Meeting Ship					Passing distance
	Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
dd/mm/yyyy HH:MM:SS.FFF	[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
29/06/2016 18:17	CAPE HARMONY	10.6	AIDAPRIMA	300	48	8.3	15.4	452
29/06/2016 19:06	CAPE HARMONY	10.0	MELUSINE	162	25	6	15.6	441
29/06/2016 19:09	CAPE HARMONY	10.2	YASMINE	202	30	7.2	16.6	362
29/06/2016 19:52	CAPE HARMONY	11.1	ZETAGAS	113	20	7.4	13.6	188
29/06/2016 20:19	CAPE HARMONY	11.1	GLASGOW EXPRESS	280	32	12.3	11.8	251
29/06/2016 20:26	CAPE HARMONY	9.9	MSC ANISHA R.	280	32	9.5	16.9	355
29/06/2016 20:59	CAPE HARMONY	6.9	BALTIC CARRIER	82	13	4.2	10.1	471
29/06/2016 21:07	CAPE HARMONY	5.6	POLARLIGHT	154	24	7.7	9.6	197
29/06/2016 21:08	CAPE HARMONY	5.1	OTAGO HARBOUR	175	28	7.4	9.4	204
29/06/2016 21:48	CAPE HARMONY	2.9	WILLEM-LOURENS	195	12	3	7.1	58

Tabel 31 – Relevante scheepsontmoetingen tijdens meetvaart Panormos

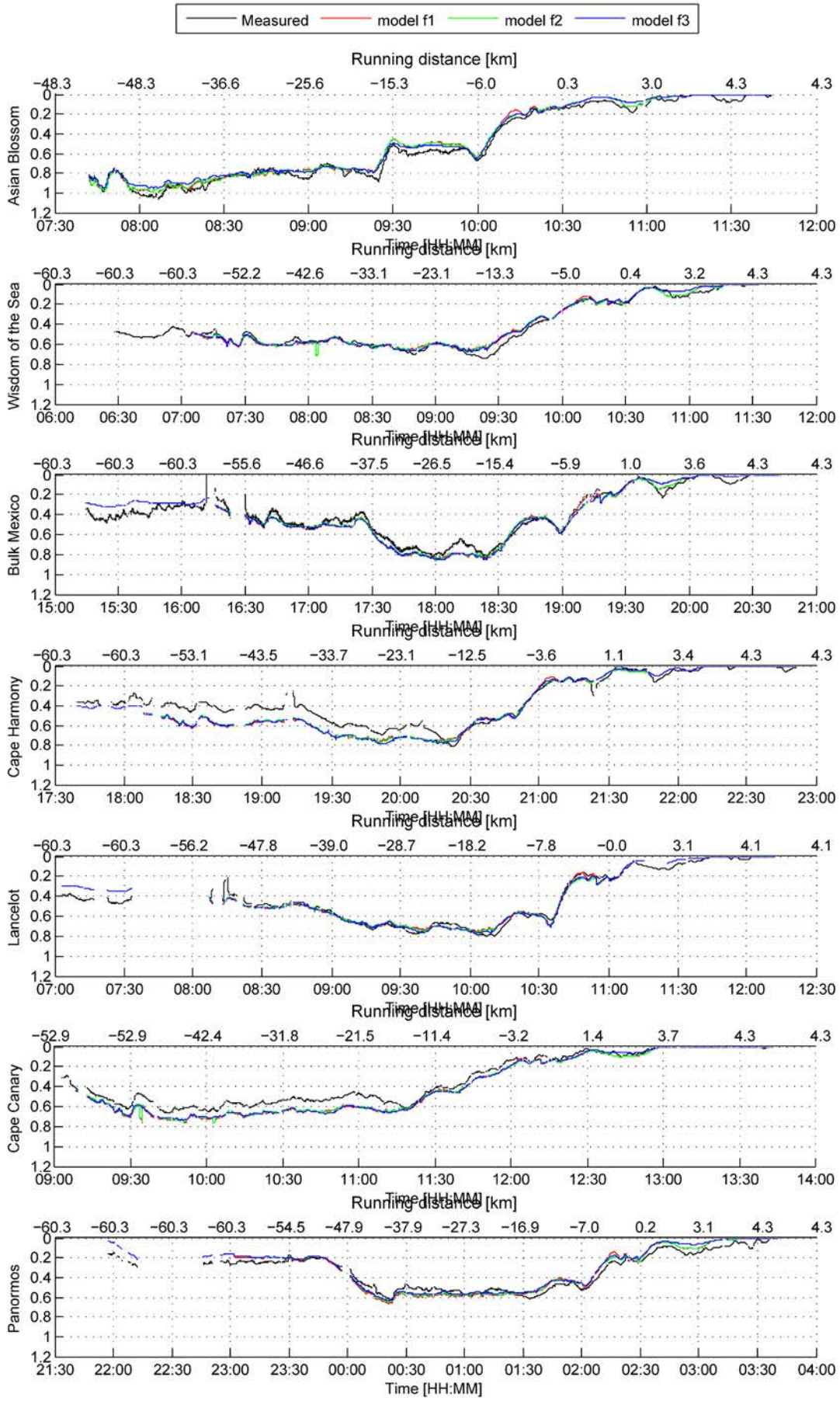
Time	Own Ship		Meeting Ship					Passing distance
	Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
dd/mm/yyyy HH:MM:SS.FFF	[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
2/10/2016 0:42	PANORMOS	11.8	MSC MATILDE	294	32	10.6	15.1	211
2/10/2016 0:56	PANORMOS	11.7	SONGA RUBY	144	22	6.2	10.1	297
2/10/2016 1:53	PANORMOS	10.5	HOEGH XIAMEN	183	32	8.5	13.5	286
2/10/2016 2:10	PANORMOS	7.9	LIV KNUTSEN	144	23	7.2	7.3	335
2/10/2016 2:54	PANORMOS	2.8	HYDROPHILIDA	80	8	1.5	6.3	0

Bijlage 3: Overeenstemming squatformules met waregroottemetingen

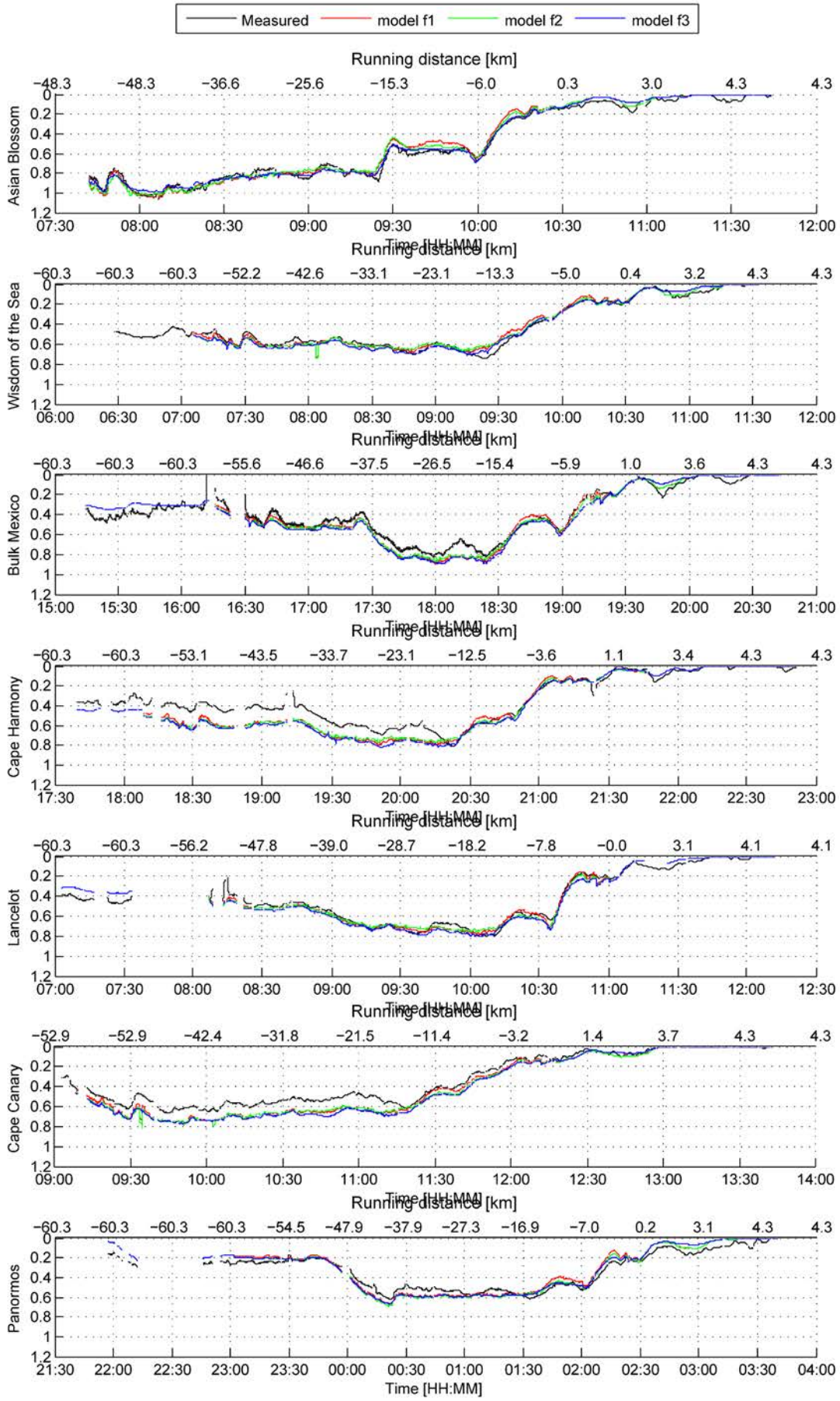
Bijlage 3 bevat de vergelijking tussen de gemeten squat ter hoogte van de boeg met de resultaten van de drie onderzochte regressieformules waarbij de er zes verschillende datasets toegepast werden als input voor de regressie.

- Regressiemodellen op basis van sleeptankresultaten: B50
- Regressiemodellen op basis van meetvaart Asian Blossom: B51
- Regressiemodellen op basis van meetvaart Wisdom of the Sea: B52
- Regressiemodellen op basis van meetvaart Lancelot: B53
- Regressiemodellen op basis van meetvaart Bulk Mexico: B54
- Regressiemodellen op basis van vier meetvaarten: B55

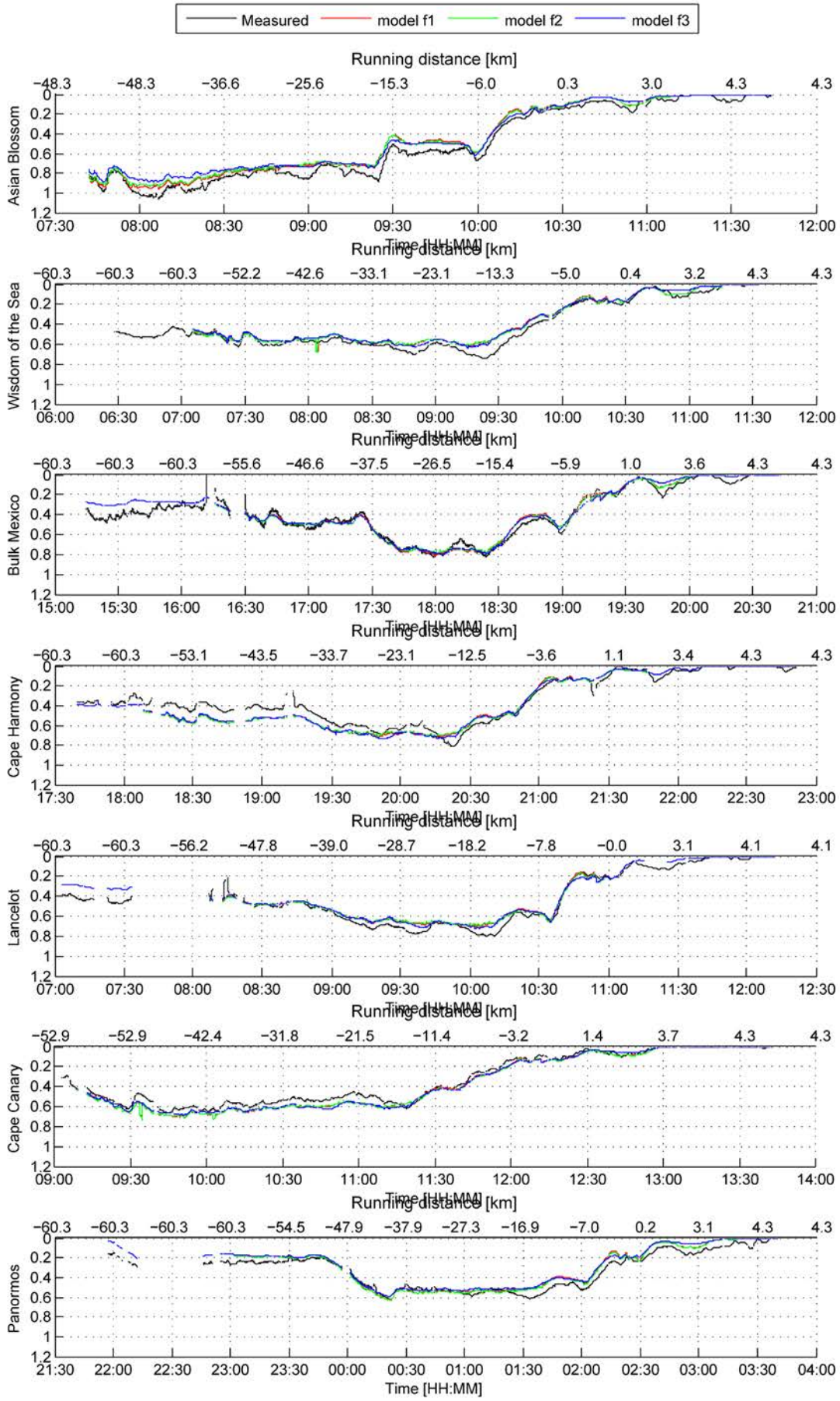
Regressiemodellen op basis van sleeptankresultaten



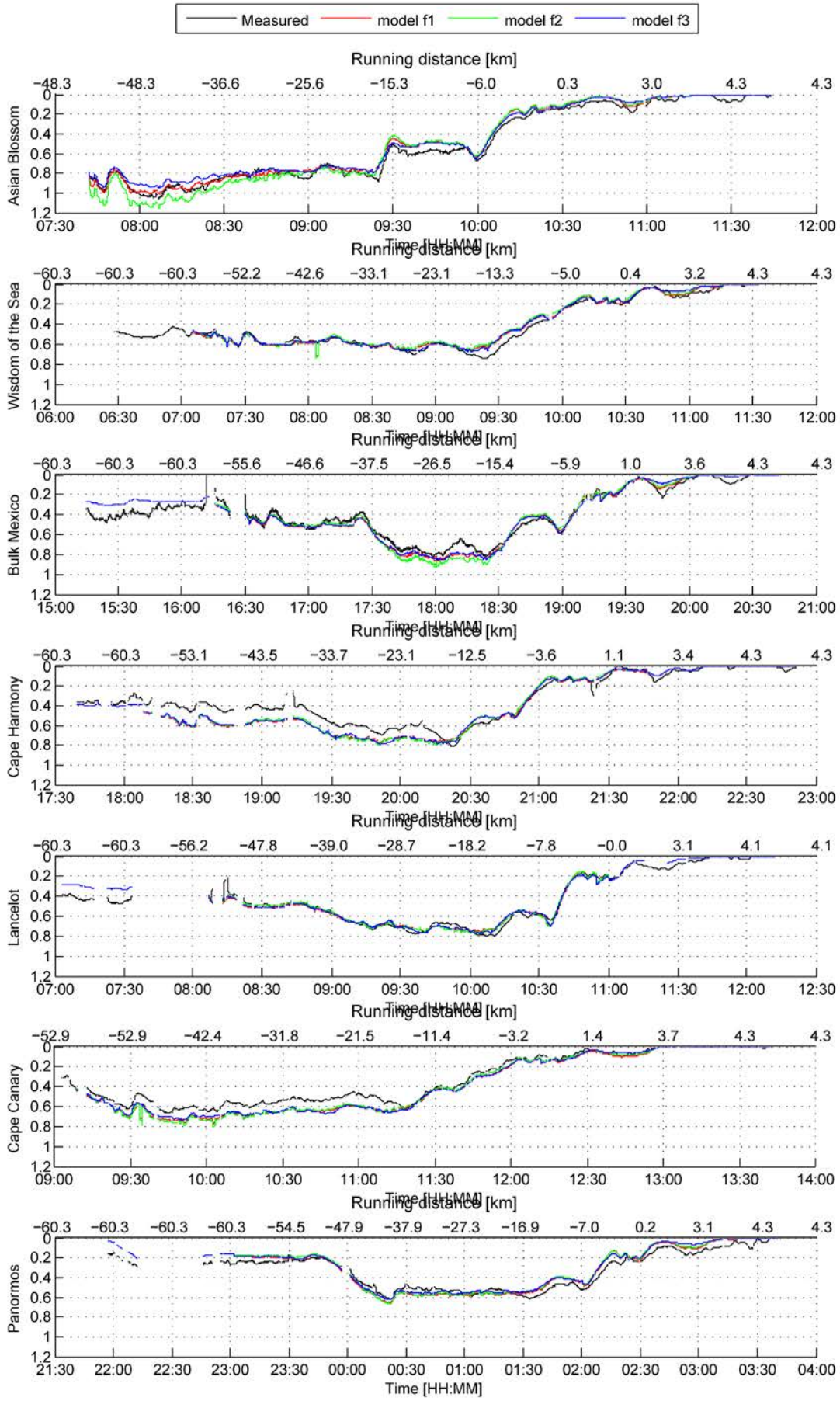
Regressiemodellen op basis van meetvaart Asian Blossom



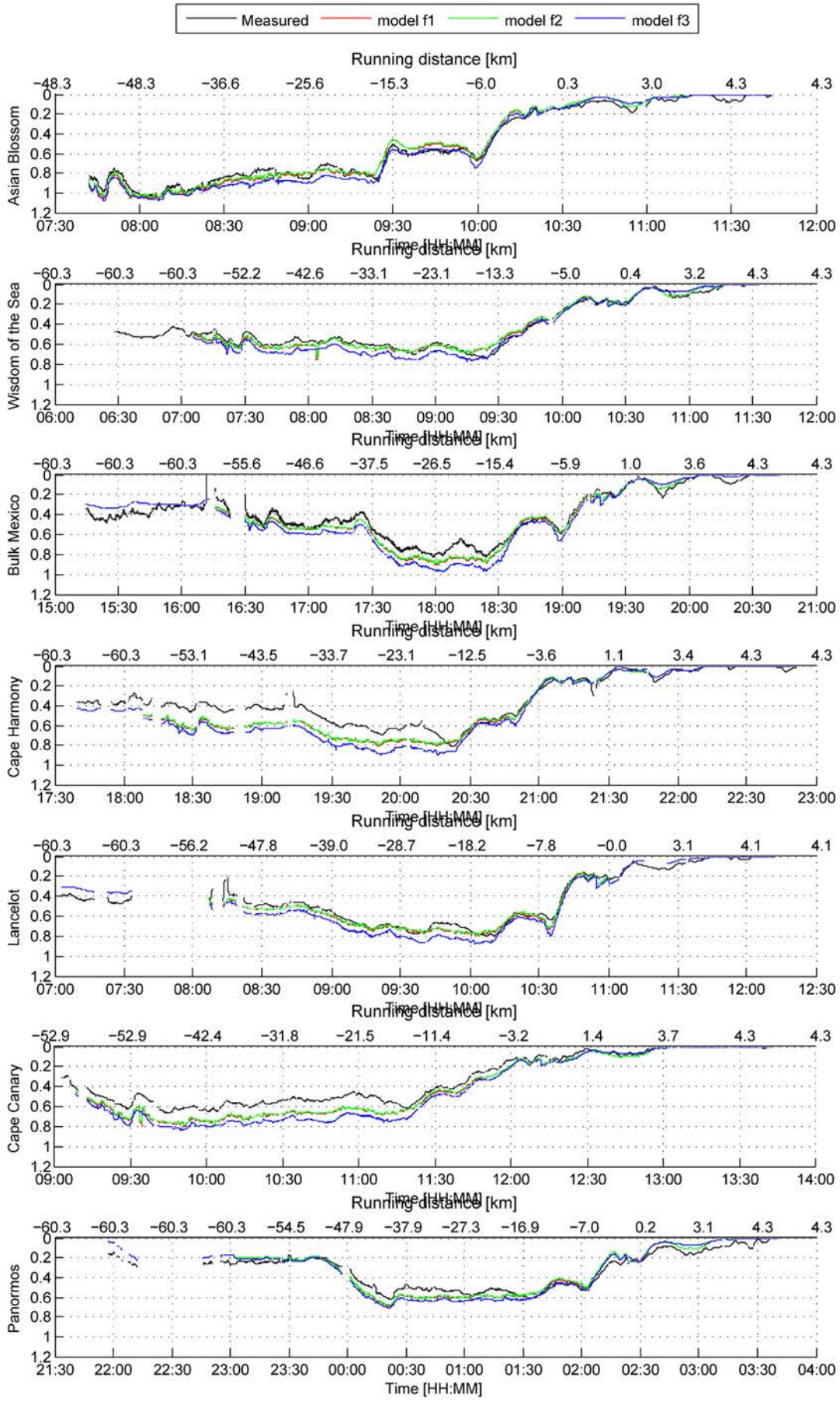
Regressiemodellen op basis van meetvaart Wisdom of the Sea



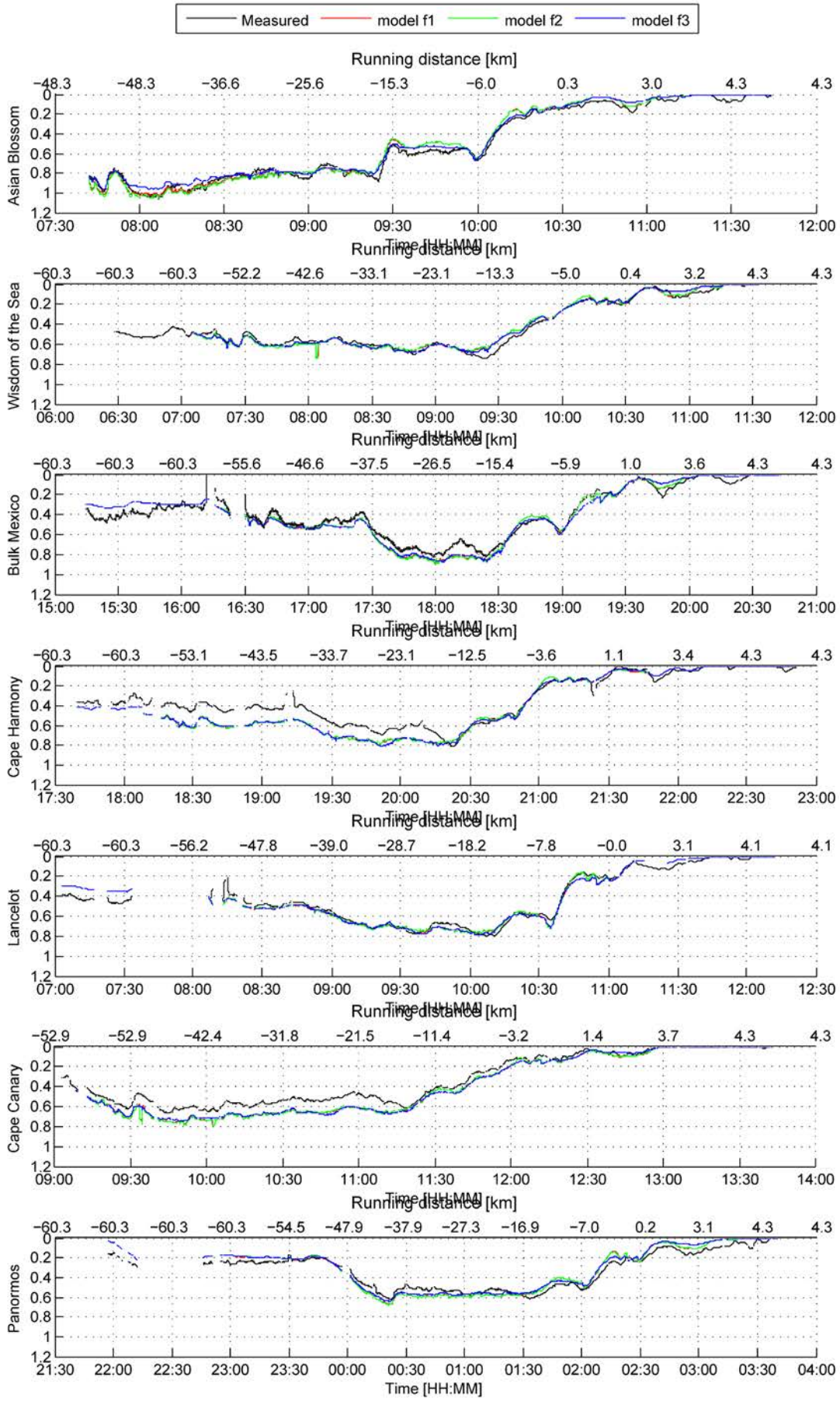
Regressiemodellen op basis van meetvaart Lancelot



Regressiemodellen op basis van meetvaart Bulk Mexico



Regressiemodellen op basis van vier meetvaarten



Bijlage 4: KMZ-bestanden

Onderstaande KMZ-bestanden worden digitaal toegevoegd aan het rapport:

- Meetvaart Asian Blossom:
  - Traject schip op basis van meetvaart: 01_Asian_Blossom.kmz
  - Inclusief AIS-schepen: 01_Asian_Blossom_with_AIS.kmz
- Meetvaart Cape Canary:
  - Traject schip op basis van meetvaart: 02_Cape_Canary.kmz
  - Inclusief AIS-schepen: 02_Cape_Canary _with_AIS.kmz
- Meetvaart Wisdom of the Sea:
  - Traject schip op basis van meetvaart: 03_Wisdom_Of_The_Sea.kmz
  - Inclusief AIS-schepen: 03_Wisdom_Of_The_Sea.kmz
- Meetvaart Lancelot:
  - Traject schip op basis van meetvaart: 04_Lancelot.kmz
  - Inclusief AIS-schepen: 04_Lancelot_with_AIS.kmz
- Meetvaart Bulk Mexico:
  - Traject schip op basis van meetvaart: 05_Bulk_Mexico.kmz
  - Inclusief AIS-schepen: 05_Bulk_Mexico _with_AIS.kmz
- Meetvaart Cape Harmony:
  - Traject schip op basis van meetvaart: 06_Cape_Harmony.kmz
  - Inclusief AIS-schepen: 06_Cape_Harmony_with_AIS.kmz
- Meetvaart Panormos:
  - Traject schip op basis van meetvaart: 07_Panormos.kmz
  - Inclusief AIS-schepen: 07_Panormos_with_AIS.kmz

Bijlage 5: Eindpresentatie

Onderstaande slides vormden de leidraad tijdens de eindpresentatie van de studie op 22 februari 2017 te SCC Vlissingen.




Vlaanderen
is mobiliteit &
openbare werken
Inhoud
• Uitgevoerde verwerking
• Squat ware grootte
• Squat modellering
• Meetreizen Antwerpen
2


Vlaanderen
is mobiliteit &
openbare werken
Inhoud
• Uitgevoerde verwerking
• Squat ware grootte
• Squat modellering
• Meetreizen Antwerpen
3

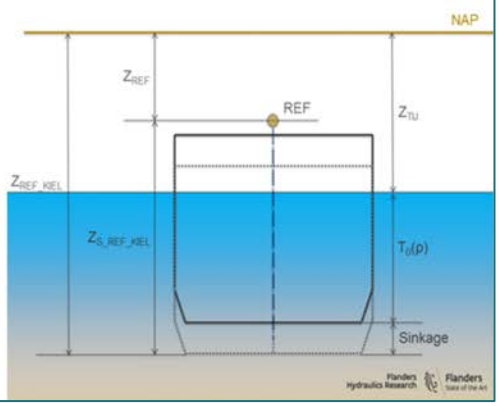
Meetvaarten
Schepen en Trajecten

Vessel	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Sea	Lancelot	Bulk Mexico	Cape Harmony	Panormos
Date	27/07/'15	29/07/'15	24/09/'15	8/10/'15	19/11/'15	29/06/'16	1/10/'16
L_{OA} (m)	291.98	292	292	291.8	292	292	292
L_{pp} (m)	283.8	288	283	282.2	278	282	282
B (m)	45	45	45	45	45	45	45
T_F (m) at 1025 kg/m³	16.43	16.5	16.4	16.44	16.5	16.5	**15.55**
T_A (m) at 1025 kg/m³	16.43	16.5	16.4	16.47	16.5	16.5	**16.25**
GM (m)	5.59	4.86	5.76	5.36	-	6	5.38



Verwerking Meetvaarten
Scheepsmeting

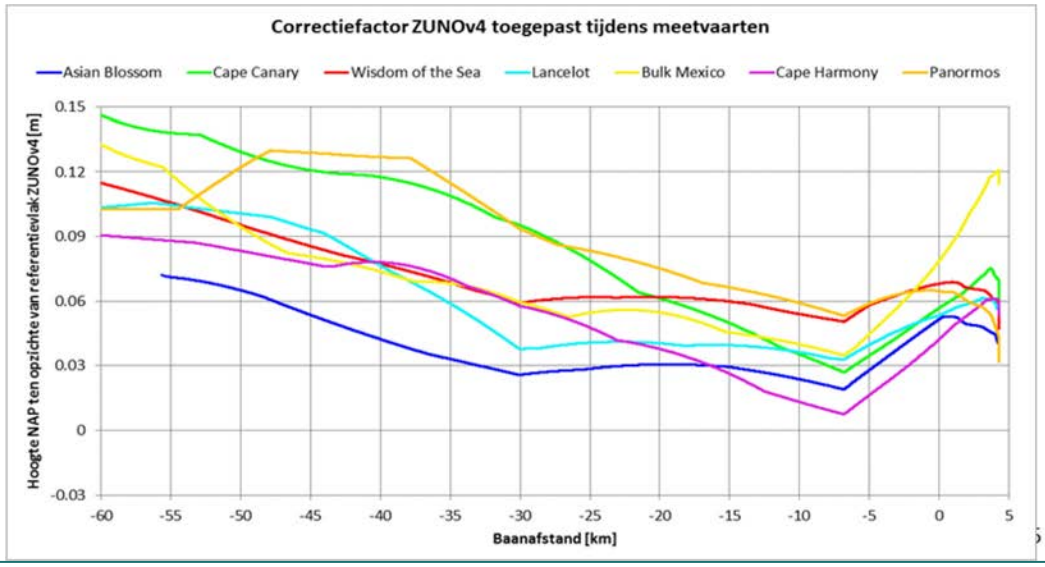
- **Input: Nederlands Loodswezen**
- **Verwerking:**
  - Bepaling aardvaste scheepspositie
  - Verticale bewegingen (dompen, stampen en slingeren) gerefereerd ten opzichte van statische meting
    - Squat
    - Dynamische bewegingen



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

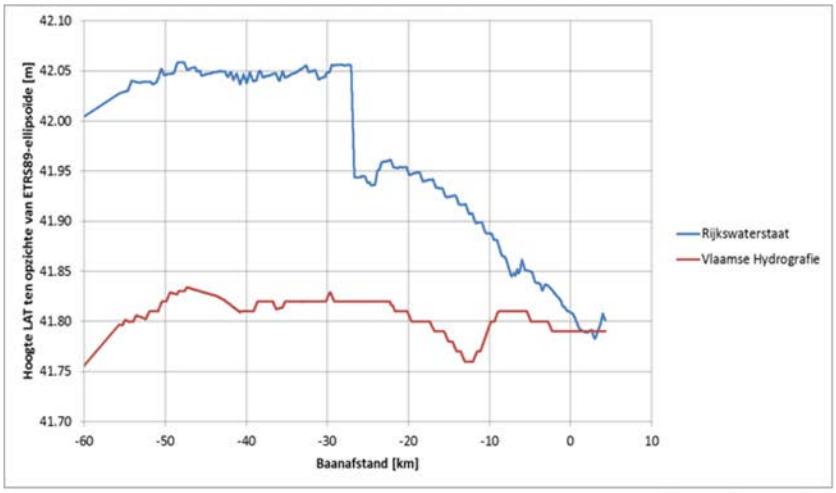
Verwerking Meetvaarten Omgeving (Getij en Stroom)

- Hindcastberekening met plaats en tijdsafhankelijke correcties op basis van metingen (NAP).



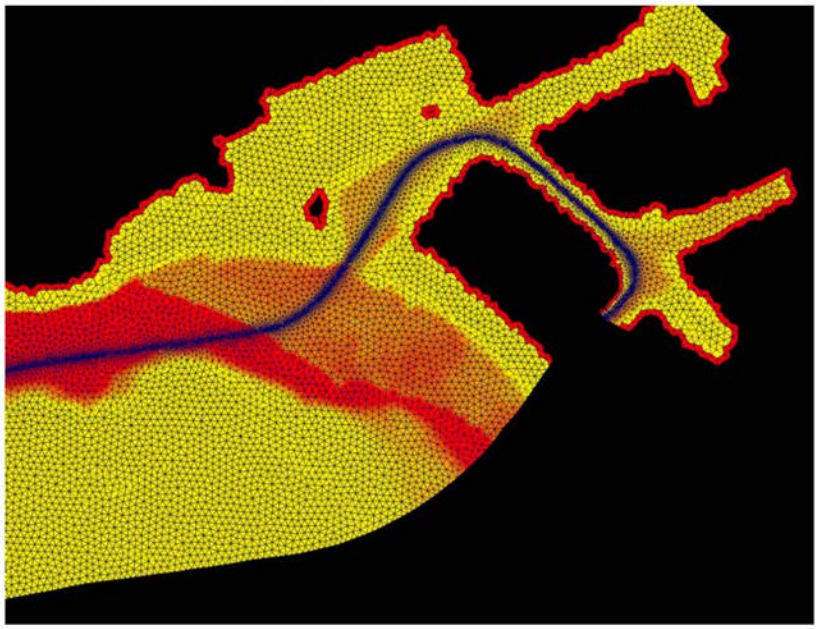
Verwerking Meetvaarten Omgeving (Bathymetrie)

- Schelde ECS status op tijdstip meetvaart
- Conversie LAT naar ETRS89
- Conversie ETRS89 naar NAP



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Verwerking Meetvaarten Omgeving (Bathymetrie)



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

8

Verwerking Meetvaarten Omgeving (Golven)

- **Volledig golfspectrum**

	Significante **Golfhoogte** [m]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Seas	Bulk Mexico	Lancelot	Cape Harmony	Panor-mos
Kwintebank	**2.26**	1.36	1.29	1.18	0.86	1.36	0.86
Westhinder	**2.59**	1.40	1.61	1.34	0.98	1.96	1.22
Bol van Heist	**1.87**	1.16	0.99	0.90	0.75	no data	0.76

- **Laag frequente golven (≤0.1 Hz)**

	Significante **Deiningshoogte** [m]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Seas	Bulk Mexico	Lancelot	Cape Harmony	Panor-mos
Kwintebank	0.11	0.07	0.06	**0.27**	0.06	0.07	0.07
Westhinder	0.15	0.08	0.08	**0.28**	0.07	0.12	0.10
Bol van Heist	0.10	0.07	0.04	**0.26**	0.07	no data	0.09



Verwerking Meetvaarten Omgeving (Scheepvaart)

- AIS van SRK verwerkt tot ontmoetingen



Own Ship		Meeting Ship					Dist-ance
Name	SOG	Name	L	B	T	SOG	
[-]	[kn]	[-]	[m]	[m]	[m]	[kn]	[m]
ASIAN BLOSSOM	10.7	ARA ATLANTIS	134	23	7.3	19.7	235
ASIAN BLOSSOM	**9.4**	**PUCON**	**304**	**40**	**11.8**	**15.7**	**345**
ASIAN BLOSSOM	9.8	MSC ROSSELLA	243	32	9.5	14.2	325
CAPE CANARY	10.8	DOROTHEA SCHULTE	113	19	6	10.2	321
CAPE CANARY	11.4	NOCC OCEANIC	199	32	9.6	16.1	260
WISDOM OF THE SEA 1	9.9	ELBFEEDER	139	22	7.4	14.2	326
LANCELOT	9.6	STEFAN SIBUM	151	23	8.2	13.4	304
LANCELOT	9.6	CELANDINE	162	25	6.2	14.2	273
LANCELOT	12.2	IVER BRIGHT	111	18	7.3	10.0	304
LANCELOT	7.3	TERNVIND	130	20	8.1	12.1	129
BULK MEXICO	11.4	IMPERATOR	139	25	5.5	9.4	262
BULK MEXICO	12.5	CORAL IVORY	116	16	6.9	14.1	327
BULK MEXICO	10.3	MSC SUEZ	237	32	10	15.1	320
BULK MEXICO	**7.7**	**FLEVOGRACHT**	**136**	**20**	**5.6**	**16.7**	**87**
BULK MEXICO	7.5	DN VATAN	196	32	7.2	9.1	296
CAPE HARMONY	11.1	ZETAGAS	113	20	7.4	13.6	188
CAPE HARMONY	**11.1**	**GLASGOW EXPRESS**	**280**	**32**	**12.3**	**11.8**	**251**
CAPE HARMONY	5.6	POLARLIGHT	154	24	7.7	9.6	197
CAPE HARMONY	5.1	OTAGO HARBOUR	175	28	7.4	9.4	204
PANORMOS	**11.8**	**MSC MATILDE**	**294**	**32**	**10.6**	**15.1**	**211**
PANORMOS	11.7	SONGA RUBY	144	22	6.2	10.1	297
PANORMOS	10.5	HOEGH XIAMEN	183	32	8.5	13.5	286

Verwerking Meetvaarten Output

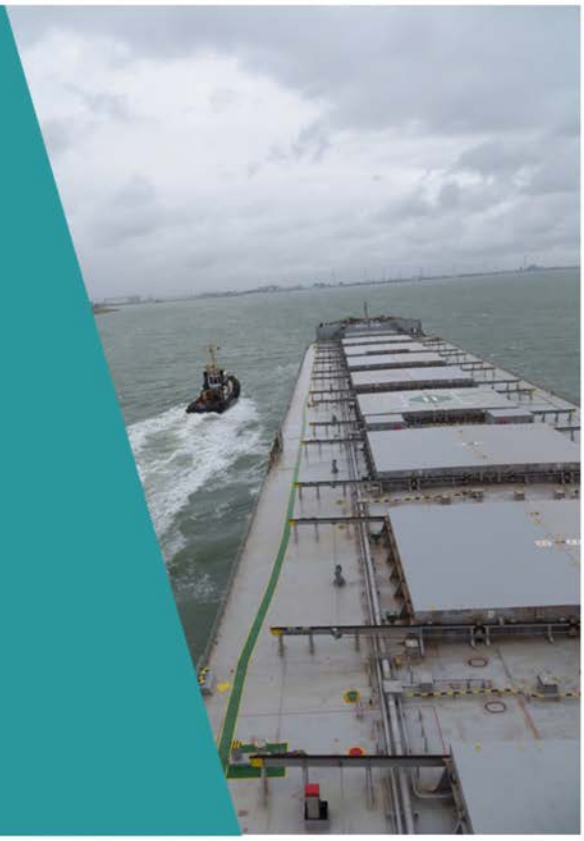
- 6 Bladzijden pdf-document met belangrijkste resultaten
- KMZ-representatie vaartrajecten
- KMZ-representatie vaartrajecten en AIS-trajecten nabije scheepvaart



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Inhoud

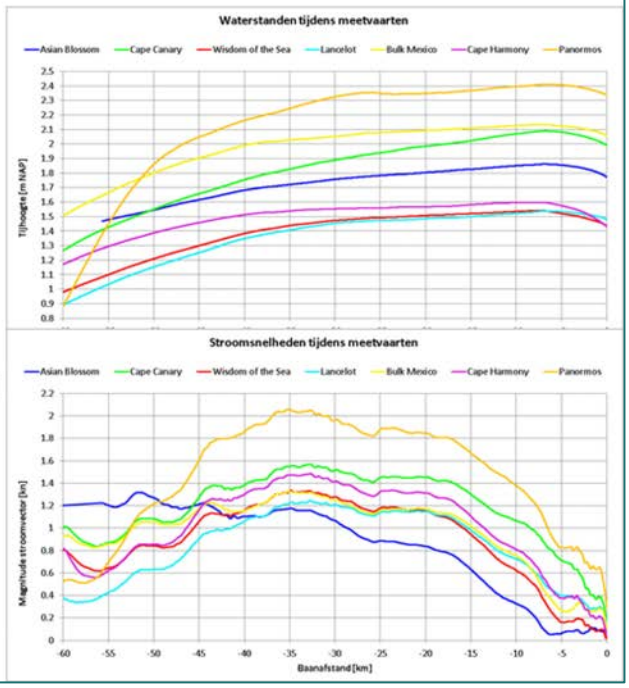
- Uitgevoerde verwerking
- **Squat ware grootte**
- Squat modellering
- Meetreizen Antwerpen



12

Resultaten Hydro-meteo Waterstand en stroom

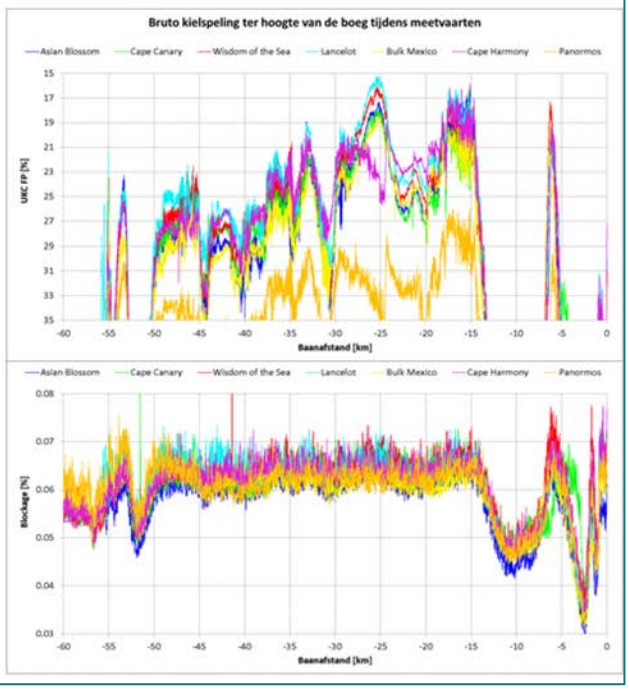
- HW t.h.v. Vlissingen
- Grote variatie in waterstand (ca. 1m)
- Maximale vloedstroom t.h.v. Scheur (Oost)
- Wielingen tot Sloehaven belangrijke afname stroomsnelheid



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Resultaten Bathymetrie Kielspeling en Blockage

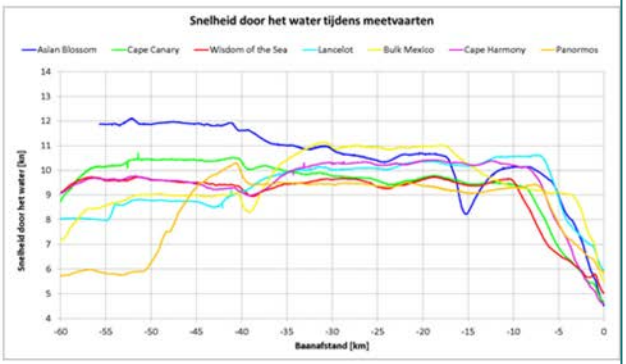
- Evolutie bodemdiepte langsheen traject duidelijk waarneembaar
- Minimale UKC 15.5% te SW (Scheur/Wielingen)
- Blockage vertoont minder uitgesproken variatie
- 0.08 is een conservatieve waarde



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Resultaten Vaarsnelheid Door het water

- Vaarten onderling vertonen grote variatie aan vaarsnelheid
- Grootste STW: Asian Blossom
- Grootste STW Scheur West en Wielingen: Bulk Mexico
- Grootste STW drempel Vlissingen: Lancelot

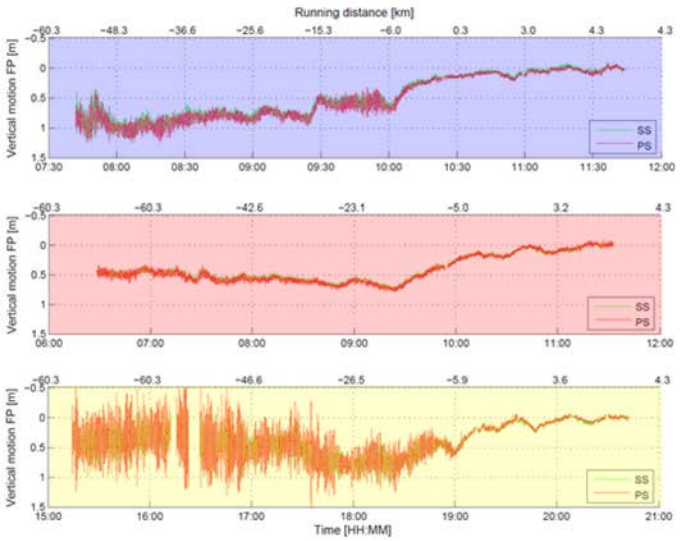


Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

15

Resultaten
Totale Bewegingen boeg

- Squatbeweging duidelijk merkbaar
- Dynamische bewegingen vertoont belangrijke variatie

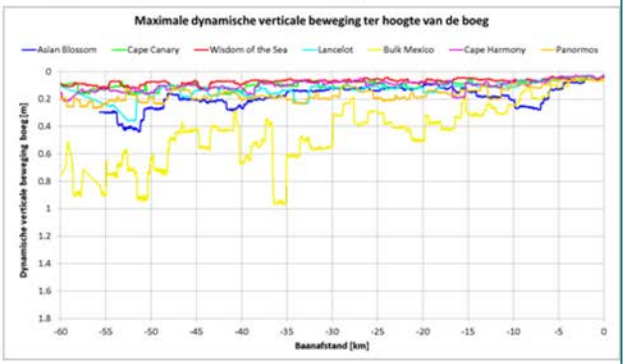


Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

16

Resultaten
Dynamische bewegingen boeg

- Waarde tot 1.0 m voor schip Bulk Mexico
- Andere schepen beperkt tot < 0.4 m
- Vergelijking met golfkarakteristieken illustreert invloed deining



	Significante **Deiningshoogte** [m]						
	Asian Blossom	Cape Canary	Wisdom of the Seas	Bulk Mexico	Lancelot	Cape Harmony	Panor-mos
Kwintebank	0.11	0.07	0.06	**0.27**	0.06	0.07	0.07
Westhinder	0.15	0.08	0.08	**0.28**	0.07	0.12	0.10
Bol van Heist	0.10	0.07	0.04	**0.26**	0.07	no data	0.09

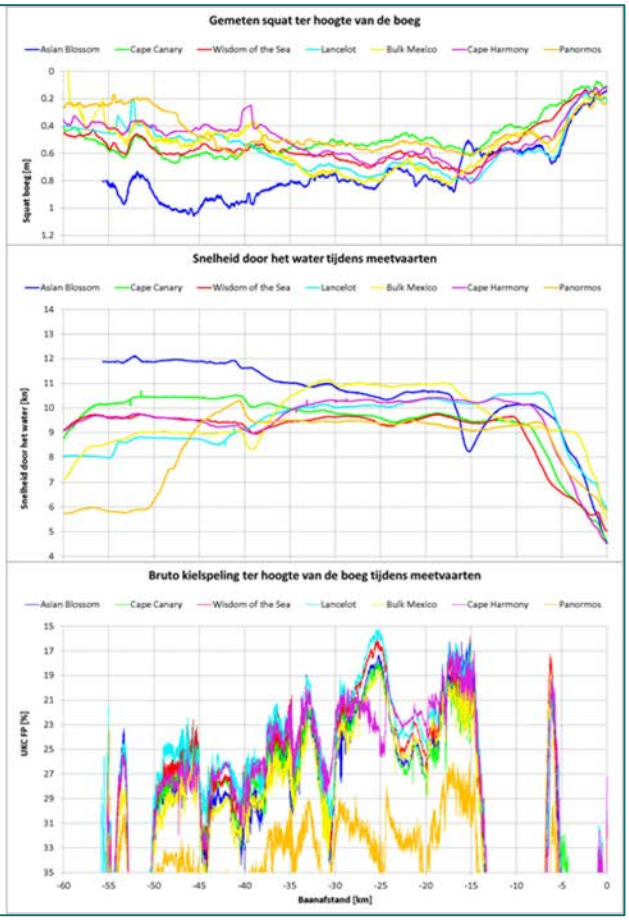
Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

17

Resultaten Squat boeg

- Hoogste Squat bij hoogste vaarsnelheid
- Invloed kielspeling SW (-26 km)
- Invloed kielspeling W7 (-15 km)
- Invloed kielspeling drempel Vlissingen (-6 km)
- Verwaarloosbare invloed ontmoetingen

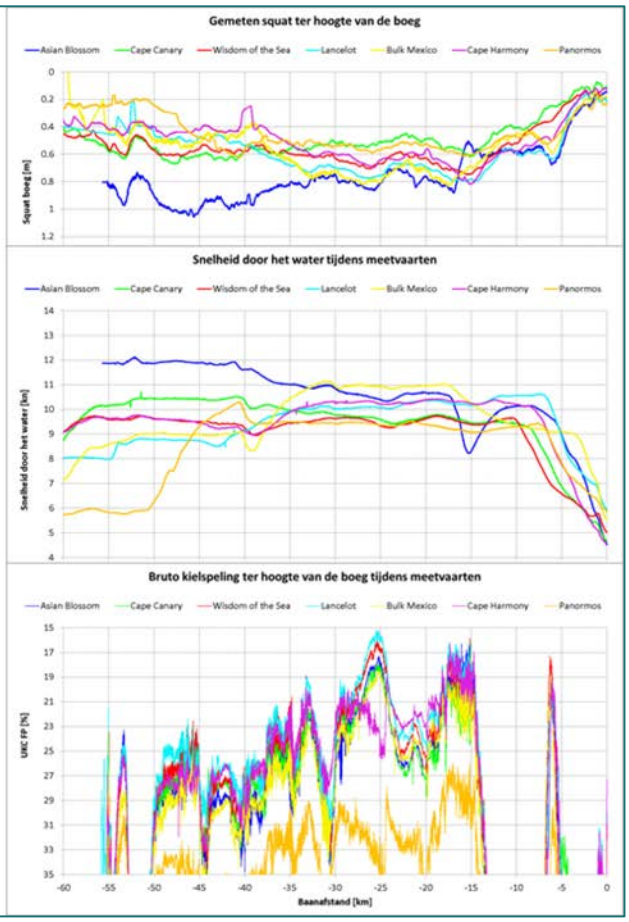
Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken



Resultaten Squat boeg

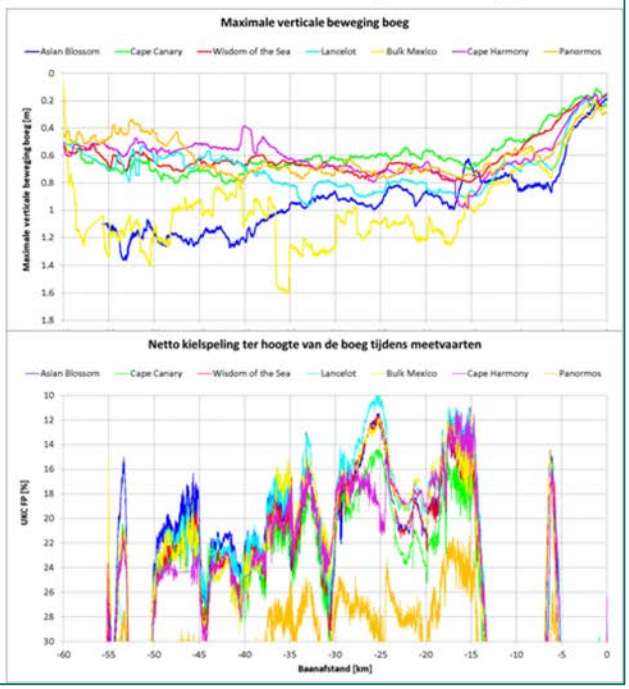
- Significant lagere squat voor schepen
  - Cape Canary
  - Capy Harmony
- Invloed boegvorm (bulb)
- Twee meetvaarten worden geweerd uit regressieformule

Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken



Resultaten Verticale Beweging
Totale beweging en netto kielspeling

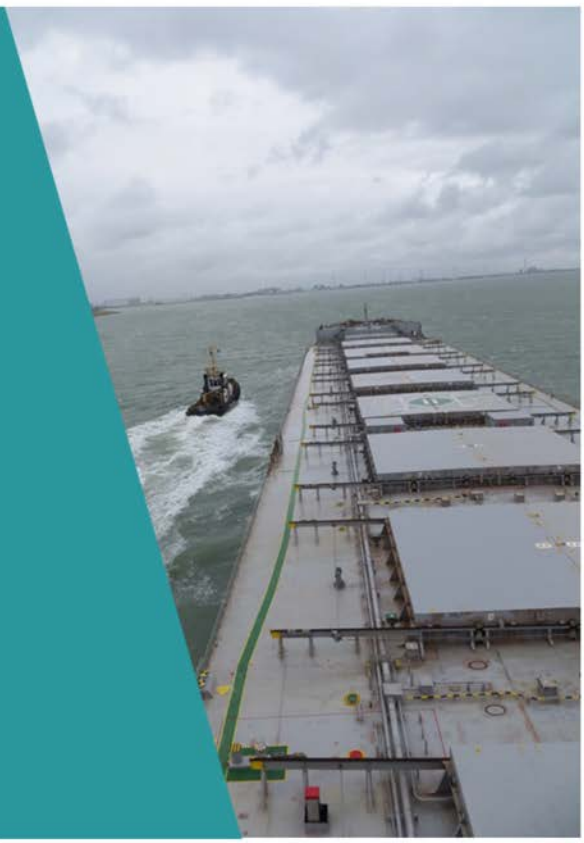
- **Maximale verticale beweging:**
  - Squat (1.03m)
  - Dyn (1.0 m)
  - Totaal (1.6 m = 10%T)
- **Minimale netto kielspeling**
  - 10%



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Inhoud

- Uitgevoerde verwerking
- Squat ware grootte
- **Squat modellering**
- Meetreizen Antwerpen



21

Squat Modellering Formules

- **Formule 1** (Verwilligen et al. (2007))

$$z = \left[C_{S1} \cdot \frac{T}{h} + C_{S2} \right] \cdot \frac{\left(\frac{u}{\sqrt{k_m \cdot C_{S3} \cdot g \cdot h}} \right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{\sqrt{k_m \cdot C_{S3} \cdot g \cdot h}} \right)^2}} \quad \text{met} \quad k_m = \left[2 \cdot \sin\left(\frac{\text{Arcsin}(1-m)}{3} \right) \right]^3$$

- **Formule 2** (Optimalisatie kielspeling)

$$z = \left[C_{S1} + C_{S2} \cdot \left(\frac{T}{h - T} \right)^{C_{S3}} \right] \cdot \frac{\frac{Fr_m^2}{C_{S4}}}{\sqrt{1 - \frac{Fr_m^2}{C_{S4}}}}$$

- **Formule 3** (vereenvoudigde formule)

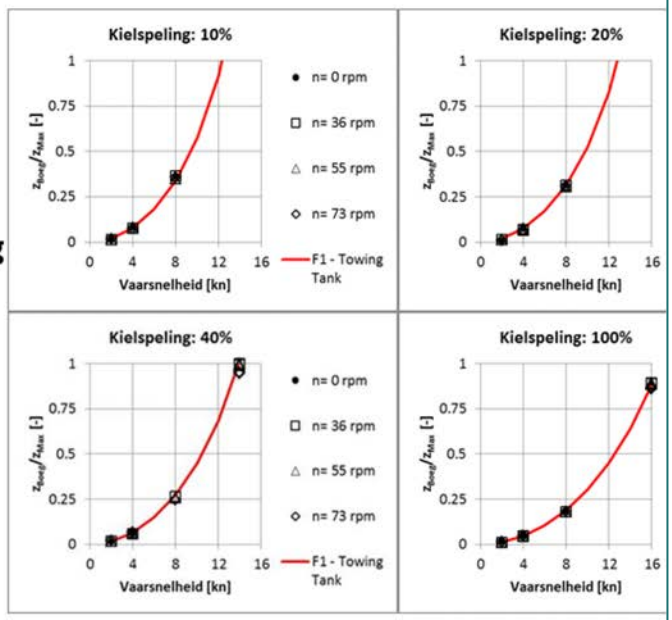
$$z = \left[C_{S0} + C_{S1} \cdot \left(\frac{T}{h - T} \right)^{C_{S2}} \right] \cdot V^2$$

Vlaanderen is mobiliteit & openbare werken

22

Squat Modellering Sleeptankresultaten

- 290 x 45 x 16.5 m
- Schaal 1/70
- UKC 10-100%
- Geen invloed van schroef op squat boeg
- Goede overeenstemming met Formule 1

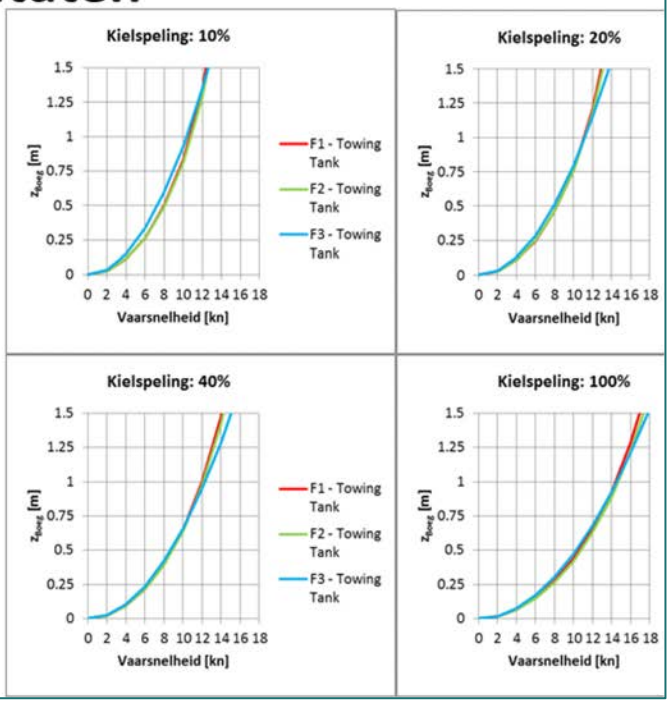


Vlaanderen is mobiliteit & openbare werken

23

Squat Modellering Sleeptankresultaten

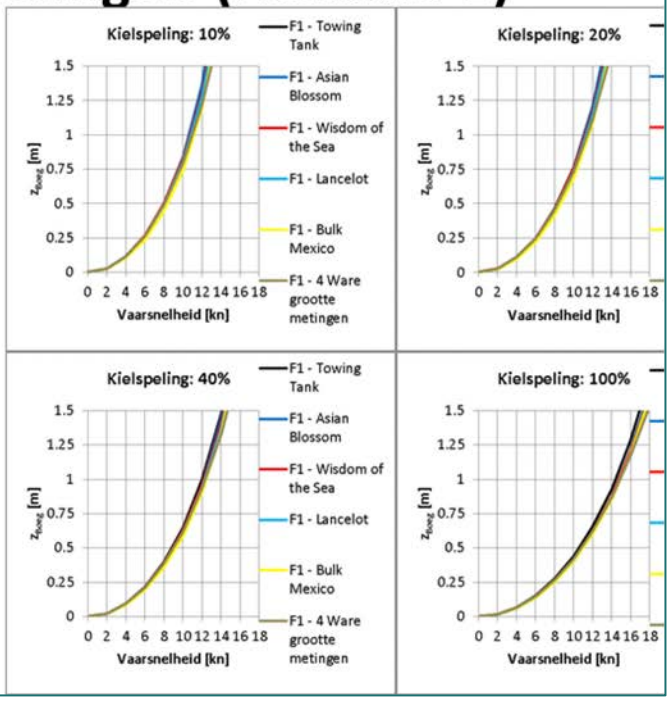
- Sterke overeenstemming Formule 1 en 2
- Formule 3 (~ V^2) minder geschikt



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Squat Modellering Waregroottemetingen (Formule 1)

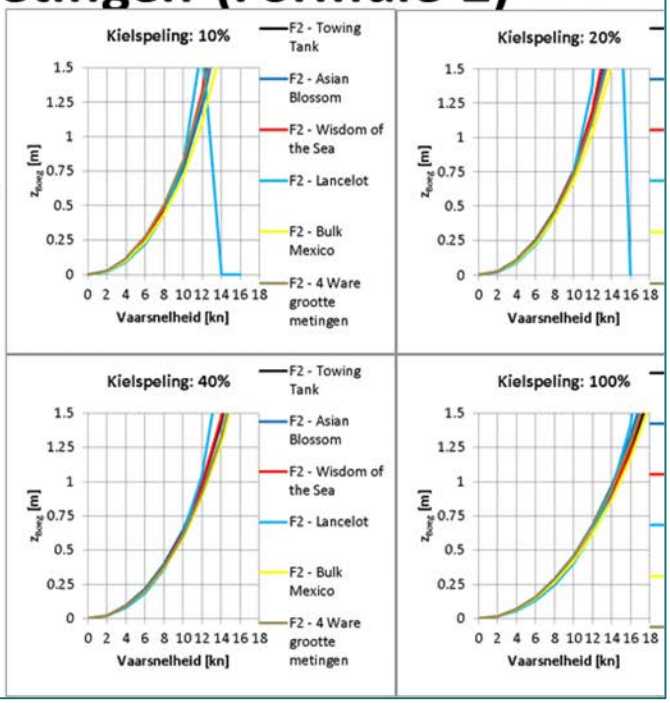
- Drie meetvaarten uitgesloten:
  - → Cape Canary
  - → Cape Harmony
  - → Panormos
- Formule 1
  - → Gelijkaardige resultaten voor verschillende inputs
  - → Sleeptank hoogste squat



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Squat Modellering Waregroottemetingen (Formule 2)

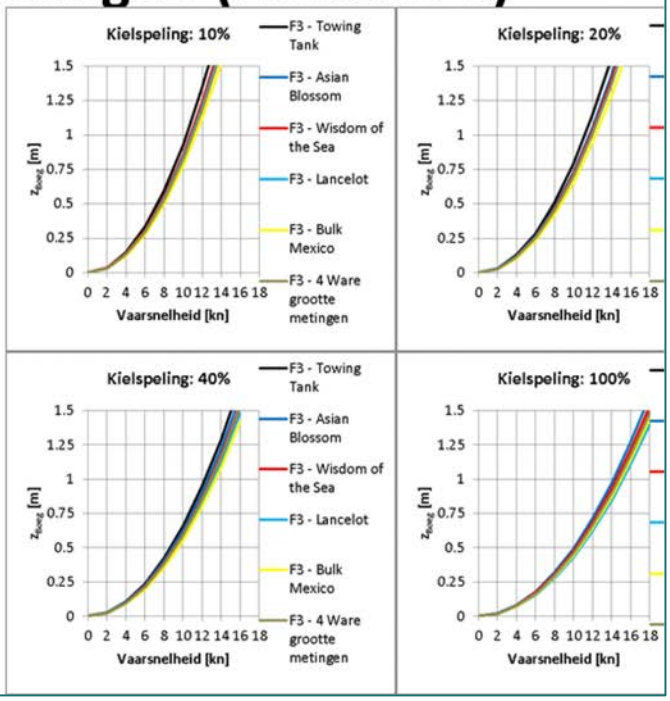
- **Formule 2**
  - → Bijkomende term voor UKC geeft soms onrealistische waarde bij hogere snelheden



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Squat Modellering Waregroottemetingen (Formule 3)

- **Formule 3**
  - → Grotere spreiding tussen verschillende inputs



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Squat Modellering
Overeenstemming met WG-metingen

Input gegevens voor regressie	Regressie Formule	R^2	a	Maximale onderschatting		
				waarde [m]	s [km]	meetvaart
Sleeptank	Formule 1	0.9486	**1.0383**	0.15	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9476	**1.0263**	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9531	**1.1191**	0.06	-3.0	Asian Blossom
Asian Blossom	Formule 1	0.9487	1.0137	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9445	1.0169	0.18	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9570	1.0437	0.11	-16.9	Asian Blossom
Wisdom of the Sea	Formule 1	0.9490	1.0147	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9475	1.0180	0.16	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9570	1.0108	0.13	-16.9	Asian Blossom
Lancelot	Formule 1	0.9490	0.9937	0.17	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9388	1.0135	0.17	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9546	0.9845	0.14	-16.9	Asian Blossom
Bulk Mexico	Formule 1	0.9479	**0.9368**	**0.22**	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9463	**0.9333**	**0.23**	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9573	**0.9311**	**0.19**	-16.9	Asian Blossom
4 metingen	Formule 1	0.9488	0.9946	0.18	-16.9	Asian Blossom
	Formule 2	0.9526	0.9923	0.17	-16.9	Asian Blossom
	Formule 3	0.9566	0.9954	0.15	-16.9	Asian Blossom

Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

28

Squat Modellering
Selectie Squatmodel

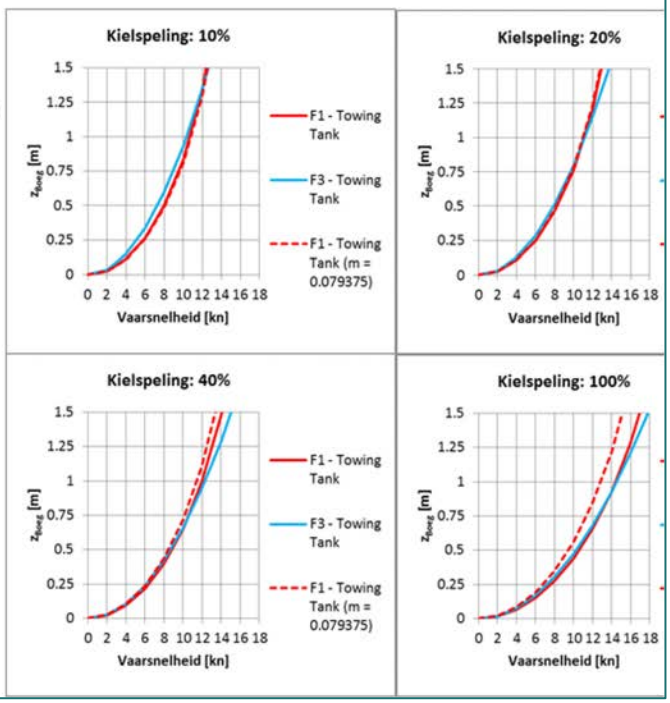
- ***Sleeptanktesten*** **worden verkozen boven meetvaarten wegens:**
  - → Gecontroleerde laboratoriumcondities (onzekerheid stroom)
  - → Conservatief model ten opzichte van metingen
- ***Formule 1*** **wordt verkozen wegens:**
  - → Goede modellering van snelheidsafhankelijkheid door Tuck-term
  - → Gelijkaardige resultaten voor sleeptank en WG-metingen
  - → Robuuste formule (3 coëff.) verzekert consequente resultaten ook buiten realistisch snelheidsgebied
  - → Verwaarloosbaar verschil met Formule 2 ingeval van sleeptankresultaten

Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

29

Squat Modellering

- **Formule 1**
  - → Afhankelijkheid van blockage kan vermeden worden door een conservatieve waarde te veronderstellen
  - → Goede overeenstemming bij UKC 10-20%



Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Squat Modellering
Sensitiviteit stroom/vaarsnelheid

- **Formule 1 op basis van sleeptanktesten:**
  - → Onderschatting squat ter hoogte van -15 km
  - → Onzekerheid stroomsnelheid
    - × Berekening met 0.5 kn hogere stroom (tot +0.09 m)
    - × Berekening met 0.5 kn lagere stroom (tot -0.06 m)

	STW	m	UKC	Gemeten squat (FP)	Formule1_TT	Formule1_TT (STW +0.5kn)	Formule1_TT (STW -0.5kn)
	[kn]	[-]	[%]	[m]	[m]	[m]	[m]
Asian Blossom	8.34	0.065	16.6	0.53	0.47	0.53	0.42
Wisdom of the Sea	9.47	0.071	15.9	**0.74**	**0.66**	0.74	0.60
Bulk Mexico	10.44	0.063	17.5	**0.69**	**0.77**	0.86	0.71
Lancelot	10.22	0.068	16.2	0.78	0.76	0.85	0.70

Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

31

Conclusies

- **Nauwkeurige verwerkingsmethode voor squat op basis van waregroottemetingen werd ontwikkeld**
- **Squatformule voorgesteld voor cape size bulkcarriers met diepgang 16.5 m in Scheur-Wielingen**

$$z = \left[-2.082 \cdot \frac{T}{h} + 4.173 \right] \cdot \frac{\left(\frac{u}{\sqrt{0,5 \cdot g \cdot h}} \right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{\sqrt{0,5 \cdot g \cdot h}} \right)^2}}$$

- **Belangrijke invloed van vaarsnelheid door het water (aanname SOG en stroomsnelheid)**
- **Aandachtspunten**
  - → Validatie DKS
  - → Definitie vaarsnelheden in DKS
  - → Nauwkeurigheid stroomvoorspelling ZUNOv4

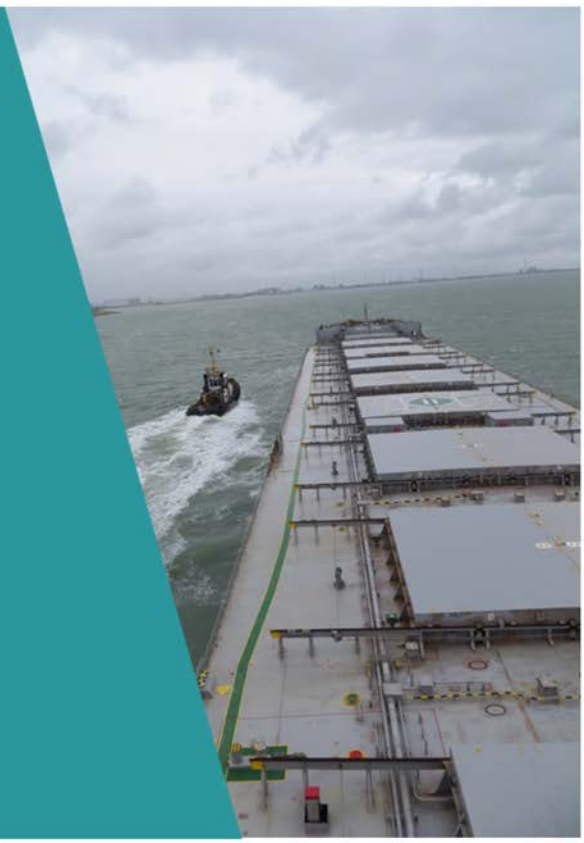
Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

32

Vlaanderen
is mobiliteit & openbare werken

Inhoud

- Uitgevoerde verwerking
- Squat ware grootte
- Squat modellering
- **Meetreizen Antwerpen**



33

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