



Vlaanderen
is wetenschap

22_034_1
WL rapporten

Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren

Hindcast stormen eind januari en februari 2022

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren

Hindcast stormen eind januari en februari 2022

Coen, L.; Nossent, J.

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 2022
D/2022/3241/195

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Coen, L.; Nossent, J. (2022). Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren: Hindcast stormen eind januari en februari 2022. Versie 4.0. WL Rapporten, 22_034_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Oprachtgever:	De Vlaamse Waterweg – Regio Centraal	Ref.:	WL2022R22_034_1
Trefwoorden (3-5):	Zeeschelde, storm, GOG, GGG, hindcast		
Kennisdomeinen:	Waterbeheer > Hydraulica > Hydrodynamische modellen > Numerieke modellering		
Tekst (p.):	67	Bijlagen (p.):	68
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Coen, L.
------------	----------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Nossent, J.	Getekend door:Jiri Nossent (Signature) Getekend op:2022-11-21 10:05:04 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Jiri Nossent</i>
Projectleider:	Coen, L.	Getekend door:Leen Coen (Signature) Getekend op:2022-11-21 11:17:14 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Leen Coen</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign Getekend op:2022-11-21 10:42:02 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>
-----------------	---------------	---



Abstract

In de maanden januari en februari 2022 zijn drie stormperiodes opgetreden. Op 31 januari 2022 werd een hoogwaterpeil van 6,94 mTAW gemeten in Antwerpen. In de periode van 17 tot 21 februari 2022 werd de prewaakdrempel te Antwerpen zes keer overschreden, waarbij één keer ook de waakdrempel overschreden werd. Tijdens de periode trad het GOG KBR éénmaal in werking. Omdat tijdens de eerste stormperiode, begin januari 2022, GOG KBR niet in werking getreden is, en om de rekentijd te beperken, werd deze periode niet in beschouwing genomen voor de hindcast.

Het 1D-hydrodynamisch model van het Zeescheldebekken werd geactualiseerd en geherkalibreerd in 2019. Nadien werden de aanpassingen op het terrein in het model opgenomen, en naar aanleiding van de stormen in februari 2020 werd een eerste hindcast uitgevoerd (Coen *et al.*, 2020). In tussentijd werden echter nog aanpassingen uitgevoerd op het terrein. Deze werden in het model geïmplementeerd waar nodig geacht. De hindcast heeft tot doel de performantie van het geactualiseerde 1D-model tijdens de periodes met springtij en storm van eind januari en februari 2022 na te gaan.

De stormen eind januari 2022 en februari 2022 werden nagerekend met het geactualiseerde model van het Zeescheldebekken. Hierbij zijn enkel historische meetreeksen als randvoorwaarde gebruikt. Omdat in een eerste simulatie voor enkele stormen het maximum hoogwater onderschat werd, werd een extra simulatie uitgevoerd met een hogere topofactor voor de wind. Waterpeilen zijn geëvalueerd ter hoogte van de meetposten langs de Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren, met behulp van VIMM. Ook in de GOG's worden waterpeilen geëvalueerd op basis van meetgegevens van aanwezige waterpeilmeters. Uit vergelijking van de gemeten en gesimuleerde waterpeilen blijkt dat de hogere topofactor niet steeds voor een verbetering van de gesimuleerde waterpeilen zorgt. Voornamelijk bij grotere windsnelheden wordt het stormhoogwater veel te sterk opgestuwd met een hogere topofactor. Bij de statistische analyse van de gesimuleerde versus de gemeten waterpeilen over de volledige simulatieperiode zorgt de verhoogde topofactor voor de wind veelal voor hogere waarden van bias en RMSE, voornamelijk bij de hoogwaters. Algemeen kan gesteld worden dat langs de Westerschelde, Zeeschelde en de afwaartse gedeelten van de tijgebonden zijrivieren de gesimuleerde waterpeilen de metingen vrij goed benaderen. Een aanpassing van de schematisatie van de riviertakken in de Westerschelde wordt aanbevolen om de modelresultaten verder te verbeteren.

In een bijkomende scenarioberekening werd het effect van de GOG-werking van KBR tijdens de storm van januari 2022 bekeken.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
Lijst van de figuren in BIJLAGE A.....	X
Lijst van de figuren in BIJLAGE B.....	XII
Lijst van de figuren in BIJLAGE C.....	XIII
Lijst van de tabellen in BIJLAGE E	XIII
1 Inleiding	1
1.1 Kader.....	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Opbouw van het rapport.....	1
2 Numeriek model.....	2
2.1 Situering studiegebied.....	2
2.1.1 Waterlopen.....	2
2.1.2 Gecontroleerde overstromingsgebieden	2
2.2 Software	7
2.3 Geografische referentie en tijdszone	7
2.4 Versiebeheer	7
2.5 Referentiemodel (versie 01).....	7
2.6 Modelaanpassingen.....	7
2.6.1 Dijken rondom Antwerpen.....	7
2.6.2 Dijkwerken Wichelen.....	7
2.6.3 Aanpassing GGG-inwateringssluizen	8
2.6.4 GGG Grote Vijver noord	8
2.6.5 GOG Paardeweide	8
2.6.6 ‘Lekkende’ terugslagkleppen.....	8
2.7 Randvoorwaarden	9
2.7.1 Afwaartse rand	9
2.7.2 Opwaartse randen.....	11
2.8 Simulatieperiode	16

2.8.1	Stuw Mechelen	16
2.8.2	GGG-inwateringssluizen	16
2.8.3	Pomp Lokeren.....	16
2.9	Versie 02: Aanpassing topofactor wind.....	17
2.10	Scenario 01: zonder GOG-werking KBR	17
3	Hindcast met 1D-referentiemodel	18
3.1	Validatiegegevens.....	18
3.1.1	Rivieren.....	18
3.1.2	GOG's.....	19
3.2	Methode validatie	21
3.2.1	Maximum waterpeil waterlopen.....	21
3.2.2	VIMM.....	21
3.2.3	GOG's.....	22
3.3	Resultaten meetposten rivieren.....	22
3.3.1	Waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde.....	22
3.3.2	Waterpeilen Durme	26
3.3.3	Waterpeilen Rupel, Dijle, Benedennete en Zenne	29
3.3.4	Tabel Hmax stormen	35
3.4	Resultaten meetposten GOG's	36
3.4.1	GOG-GGG Kruibeke	36
3.4.2	GOG-GGG Bazel	39
3.4.3	GOG Tielrodebroek.....	41
3.4.4	GOG-GGG Lippenbroek.....	44
3.4.5	GOG Scheldebroek.....	46
3.4.6	GOG Paardeweide	49
3.4.7	GOG-GGG Bergenmeersen	52
3.4.8	GOG Potpolder I.....	54
3.4.9	GOG Bovenzanden.....	57
3.4.10	GOG-GGG Zennegat.....	59
3.4.11	GOG Anderstadt	61
4	Scenario: zonder GOG KBR	63
5	Conclusies en aanbevelingen	66
6	Referenties	67
BIJLAGE A	Lengteprofielen maximum waterpeilen rivieren.....	B1
BIJLAGE B	Tijdreeksen waterpeilen rivieren.....	B21
BIJLAGE C	Figuren statische analyse waterpeilen rivieren.....	B53

BIJLAGE D	Implementatie WIND in Zeescheldemodel	B64
	Mike11.....	B64
	Windrandvoorwaarde te Vlissingen	B64
BIJLAGE E	Analyse: start GOG-werking	B66

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht beschikbare gemeten debietreeksen	11
Tabel 2 – Opgelegde (gemeten) debietreeksen aan opwaartse randen van het model.....	13
Tabel 3 – Herschaalde debietreeksen opgelegd aan onbemeten opwaartse randen van het model	14
Tabel 4 – Herschaalde debietreeksen opgelegd aan onbemeten deelbekkens.....	14
Tabel 5 – Overzicht beschikbare meetreeksen waterpeilen voor validatie	18
Tabel 6 – Overzicht waterpeilmeters in GOG's	19
Tabel 7 – Kenmerken GOG-GGG Kruikeke	37
Tabel 8 – Kenmerken GOG-GGG Bazel	39
Tabel 9 – Kenmerken GOG Tielrodebroek.....	42
Tabel 10 – Kenmerken GOG-GGG Lippenbroek	44
Tabel 11 – Kenmerken GOG Scheldebroek	47
Tabel 12 – Kenmerken GOG Paardeweide	49
Tabel 13 – Kenmerken GOG-GGG Bergenmeersen	52
Tabel 14 – Kenmerken GOG Potpolder I	55
Tabel 15 – Kenmerken GOG Bovenzanden	58
Tabel 16 – Kenmerken GOG-GGG Zennegat	59
Tabel 17 – Kenmerken GOG Anderstadt opwaarts	62

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Situering Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren opgenomen in het hydrodynamisch model.....	4
Figuur 2 – Overzicht gemodelleerde waterlopen in het referentiemodel van de Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren	5
Figuur 3 – Overzicht Gecontroleerde Overstromingsgebieden in het Zeescheldebekken	6
Figuur 4 – Verloop waterpeil te Vlissingen.....	10
Figuur 5 – Verloop potentiële windsnelheid en windrichting te Vlissingen.....	10
Figuur 6 – Verloop daggemiddeld debiet te Melle.....	12
Figuur 7 – Situering meetposten Westerschelde en Beneden-Zeeschelde	24
Figuur 8 – Situering meetposten Boven-Zeeschelde.....	24
Figuur 9 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Westerschelde en Zeeschelde	25
Figuur 10 – Situering meetposten Durme	27
Figuur 11 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Durme	28
Figuur 12 – Situering meetposten Dijle, Benedennete en Zenne	31
Figuur 13 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Dijle	32
Figuur 14 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Benedennete.....	33
Figuur 15 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Zenne	34
Figuur 16 – Situering meetposten GOG-GGG Kruibeke en Bazel	37
Figuur 17 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruibeke Grote Uitlaat – jan22	38
Figuur 18 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruibeke Grote Uitlaat – feb22	38
Figuur 19 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel – jan22	40
Figuur 20 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel – feb22.....	40
Figuur 21 – Situering meetposten GOG Tielrodebroek en GOG-GGG Lippenbroek	42
Figuur 22 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Tielrodebroek – jan22.....	43
Figuur 23 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Tielrodebroek – feb22.....	43
Figuur 24 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – jan22.....	45
Figuur 25 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – feb22	45
Figuur 26 – Situering meetposten GOG Scheldebroek.....	47
Figuur 27 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – jan22.....	48
Figuur 28 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – feb22	48
Figuur 29 – Situering meetposten GOG Paardeweide en GOG-GGG Bergenmeersen.....	50
Figuur 30 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Paardeweide – jan22	51
Figuur 31 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Paardeweide – feb22	51
Figuur 32 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – jan22	53

Figuur 33 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – feb22.....	53
Figuur 34 – Situering meetposten GOG Potpolder I.....	55
Figuur 35 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Potpolder I – jan22.....	56
Figuur 36 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Potpolder I – feb22	56
Figuur 37 – Situering meetposten GOG Bovenzanden en GOG-GGG Zennegat	57
Figuur 38 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – jan22.....	58
Figuur 39 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – feb22	58
Figuur 40 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – jan22.....	60
Figuur 41 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – feb22	60
Figuur 42 – Situering meetposten GOG Anderstadt opwaarts	61
Figuur 43 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Anderstadt opwaarts – jan22	62
Figuur 44 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Anderstadt opwaarts– feb22.....	62
Figuur 45 – Gemeten en gesimuleerde waterpeil Zeeschelde te Antwerpen, met en zonder GOG-werking KBR – jan22	63
Figuur 46 – Gemeten en gesimuleerde waterpeil Zeeschelde te Antwerpen, met en zonder GOG-werking KBR – zoom stormhoogwater jan22	64
Figuur 47 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – met en zonder GOG-werking KBR - storm jan22.....	65

Lijst van de figuren in BIJLAGE A

Figuur A 1 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm jan22.....	B1
Figuur A 2 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW1.....	B2
Figuur A 3 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW2.....	B2
Figuur A 4 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW3.....	B3
Figuur A 5 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW4.....	B3
Figuur A 6 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW5.....	B4
Figuur A 7 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW6.....	B4
Figuur A 8 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm jan22....	B5
Figuur A 9 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW1.....	B5
Figuur A 10 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW2.....	B6
Figuur A 11 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW3.....	B6
Figuur A 12 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW4.....	B7
Figuur A 13 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW5.....	B7
Figuur A 14 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW6.....	B8
Figuur A 15 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm jan22.....	B9
Figuur A 16 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW1.....	B9
Figuur A 17 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW2.....	B10
Figuur A 18 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW3.....	B10
Figuur A 19 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW4.....	B11

Figuur A 20 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW5	B11
Figuur A 21 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW6	B12
Figuur A 22 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm jan22.....	B13
Figuur A 23 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW1	B13
Figuur A 24 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW2	B14
Figuur A 25 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW3	B14
Figuur A 26 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW4	B15
Figuur A 27 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW5	B15
Figuur A 28 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW6	B16
Figuur A 29 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm jan22	B17
Figuur A 30 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW1	B17
Figuur A 31 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW2	B18
Figuur A 32 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW3	B18
Figuur A 33 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW4	B19
Figuur A 34 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW5	B19
Figuur A 35 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW6	B20

Lijst van de figuren in BIJLAGE B

Figuur B 1 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Vlissingen	B22
Figuur B 2 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Terneuzen.....	B23
Figuur B 3 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Hansweert	B24
Figuur B 4 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Bath	B25
Figuur B 5 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Prosperpolder	B26
Figuur B 6 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Liefkenshoek	B27
Figuur B 7 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Kallo.....	B28
Figuur B 8 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Antwerpen	B29
Figuur B 9 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Hemiksem	B30
Figuur B 10 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Temse	B31
Figuur B 11 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Driegoten	B32
Figuur B 12 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Sint-Amands	B33
Figuur B 13 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Dendermonde	B34
Figuur B 14 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Schoonaarde	B35
Figuur B 15 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Uitbergen	B36
Figuur B 16 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Wetteren	B37
Figuur B 17 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Melle	B38
Figuur B 18 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Tielrode	B39
Figuur B 19 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Hamme	B40
Figuur B 20 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster brug.....	B41
Figuur B 21 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster manta.....	B42
Figuur B 22 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Zele.....	B43
Figuur B 23 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen Benedensluis	B44
Figuur B 24 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen opwaarts stuw.....	B45
Figuur B 25 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Rijmenam	B46
Figuur B 26 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Rumst.....	B47
Figuur B 27 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Duffel sluis	B48
Figuur B 28 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Lier Molbrug	B49
Figuur B 29 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Zemst.....	B50
Figuur B 30 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Hombeek	B51
Figuur B 31 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Epepegem.....	B52

Lijst van de figuren in BIJLAGE C

Figuur C 1 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde...	B54
Figuur C 2 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde	B55
Figuur C 3 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde	B56
Figuur C 4 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde	B57
Figuur C 5 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde	B58
Figuur C 6 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde	B59
Figuur C 7 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme.....	B60
Figuur C 8 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme.....	B61
Figuur C 9 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne	B62
Figuur C 10 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne.....	B63

Lijst van de tabellen in BIJLAGE E

Tabel D 1– Start GOG-werking tov HW Antwerpen	B67
Tabel D 2– Start GOG-werking tov 6.30 mTAW Antwerpen	B68

1 Inleiding

1.1 Kader

In de maanden januari en februari 2022 zijn drie stormperiodes opgetreden. Deze stormperiodes worden besproken in de Scheldeflitsen (<https://www.waterinfo.be/Rapporten>). In de periode van 4-5 januari 2022 werd éénmaal de prewaakdrempel van 6,30 mTAW te Antwerpen overschreden, en éénmaal de waakdrempel van 6,60 mTAW. Op 31 januari 2022 werd een hoogwaterpeil van 6,94 mTAW gemeten in Antwerpen. In de periode van 17 tot 21 februari 2022 werd de prewaakdrempel te Antwerpen zes keer overschreden, waarbij één keer ook de waakdrempel overschreden werd. Tijdens de periode trad het GOG KBR éénmaal in werking.

Omdat tijdens de eerste stormperiode, begin januari 2022, GOG KBR niet in werking getreden is, en om de rekentijd te beperken, zal deze periode niet in beschouwing genomen worden voor de hindcast.

1.2 Doelstelling

Het 1D-hydrodynamisch model van het Zeescheldebekken werd geactualiseerd en geherkalibreerd in 2019. Nadien werden de aanpassingen op het terrein in het model opgenomen, en naar aanleiding van de stormen in februari 2020 werd een eerste hindcast uitgevoerd (Coen *et al.*, 2020). In tussentijd werden echter nog aanpassingen uitgevoerd op het terrein. Deze werden in het model geïmplementeerd waar nodig geacht.

De hindcast heeft tot doel de performantie van het geactualiseerde 1D-model tijdens de periodes met springtij en storm van eind januari en februari 2022 na te gaan (= validatie). Daarbij zal gebruik gemaakt worden van historische meetreeksen als randvoorwaarden (= "hindcast"). Ook in de GOG's worden waterpeilen geëvalueerd op basis van meetgegevens van aanwezige waterpeilmeters.

Op vraag van de beheerder, De Vlaamse Waterweg, wordt bijkomend een scenario bekeken waarbij GOG KBR niet in werking gesteld wordt tijdens de stormperiode van eind januari 2022.

Tot slot wordt een analyse gemaakt van de start van de GOG-werking ten opzichte van het tijdstip van het hoogwater te Antwerpen.

1.3 Opbouw van het rapport

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het 1D-numeriek model van de Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren.

Hoofdstuk 3 bespreekt de resultaten van de hindcastberekeningen met het 1D-numeriek model.

In hoofdstuk 4 wordt de scenarioberekening zonder GOG-werking van KBR besproken.

Hoofdstuk 5 besluit met de conclusies.

BIJLAGE A, BIJLAGE B en BIJLAGE C bevatten figuren die de resultaten van de hindcast weergegeven.

BIJLAGE D beschrijft de implementatie van de WIND in het Zeescheldemodel.

BIJLAGE E geeft een analyse van de start van de GOG-werking op basis van de beschouwde hoogwaters.

2 Numeriek model

2.1 Situering studiegebied

2.1.1 Waterlopen

Het studiegebied omvat het volledige getijonderhevige Zeescheldebekken (Figuur 1). Volgende rivieren en rivierpanden zijn, met hun overstromingsgebieden, opgenomen in het hydrodynamisch model:

- Westerschelde vanaf Vlissingen tot de Belgische grens;
- Zeeschelde van Belgische grens tot Gent;
- Durme afwaarts Lokeren (=tij-Durme);
- Rupel en Benedennete;
- Kleine Nete afwaarts limnigraaf te Grobbendonk (knt03a-1066) (opwaarts duiker onder Albertkanaal);
- Grote Nete afwaarts duiker onder Albertkanaal;
- Dijle afwaarts limnigraaf te Wilsele-Wijgmaal (L08_093);
- Zenne afwaarts limnigraaf te Vilvoorde (zen04a_1066);
- Demer afwaarts limnigraaf te Aarschot (dem02a_1066).

Figuur 2 geeft een overzicht van de gemodelleerde waterlopen in het referentiemodel.

2.1.2 Gecontroleerde overstromingsgebieden

Figuur 3 geeft een overzicht van de in gebruik zijnde GOG's in het Zeescheldebekken.

De oorspronkelijke GOG's zijn aangelegd in het kader van het eerste Sigmaplan, zoals vastgelegd in de Regeringsbeslissing van oktober 1977. Tussen 1981 en 1989 werden 12 GOG's ingericht, zijnde:

1. Tielrodebroek (Boven-Zeeschelde)
2. Grote Wal (Boven-Zeeschelde)
3. Uiterdijk (Boven-Zeeschelde)
4. Scheldebroek (Boven-Zeeschelde)
5. Paardeweide (Boven-Zeeschelde)
6. Bergenmeersen (Boven-Zeeschelde)
7. Potpolder I (Durme)
8. Potpolder IV (Durme)
9. Bovenzanden (Rupel)
10. Anderstadt afwaarts (Beneden-Nete)
11. Anderstadt opwaarts (Beneden-Nete)
12. Polder van Lier (Beneden-Nete)

Daarna kwamen er nog een aantal GOG(-GGG)'s en ontpolderingen bij, deze worden hieronder chronologisch toegelicht.

In maart 2006 werd GOG-GGG Lippenbroek in werking gesteld.

In 2009 werd ontpoldering Heusden aangelegd, langs de linkeroever van de Oude Schelde net afwaarts van de brug te Heusden.

In 2012 werd ontpoldering Lillo aangelegd, langs de rechteroever, net stroomopwaarts van het fort van Lillo, in een Scheldebocht ten noorden van de stad Antwerpen.

GOG Bergenmeersen kent sinds april 2013 ook een gereduceerd getij waardoor het een GOG-GGG is geworden.

Sinds juni 2014 is GOG Paardeweide uitgerust met een innovatieve vispassage. Deze vistrap bestaat uit een inlaatklep aan de ene kant van het gebied en een buffergracht met een uitlaatsluis aan de andere. Deze constructies bieden vissen een vrije passage tussen de Schelde en het Sigmagebied.

In het najaar van 2015 zijn de ontpoldering en het GOG Wijmeers afgewerkt. Deze gebieden zijn gelegen net opwaarts van GOG Bergenmeersen.

Het GOG-GGG Kruibeke-Bazel-Rupelmonde (KBR) werd op 3 oktober 2015 in gebruik genomen. Dit gebied bestaat uit drie delen: GOG-GGG Kruibeke, GOG-GGG Bazel en GOG Rupelmonde. Sinds 24 juni 2017 kennen de Kruibeekse polder en het noordoostelijk deel van de Bazelse polder ook GGG-werking.

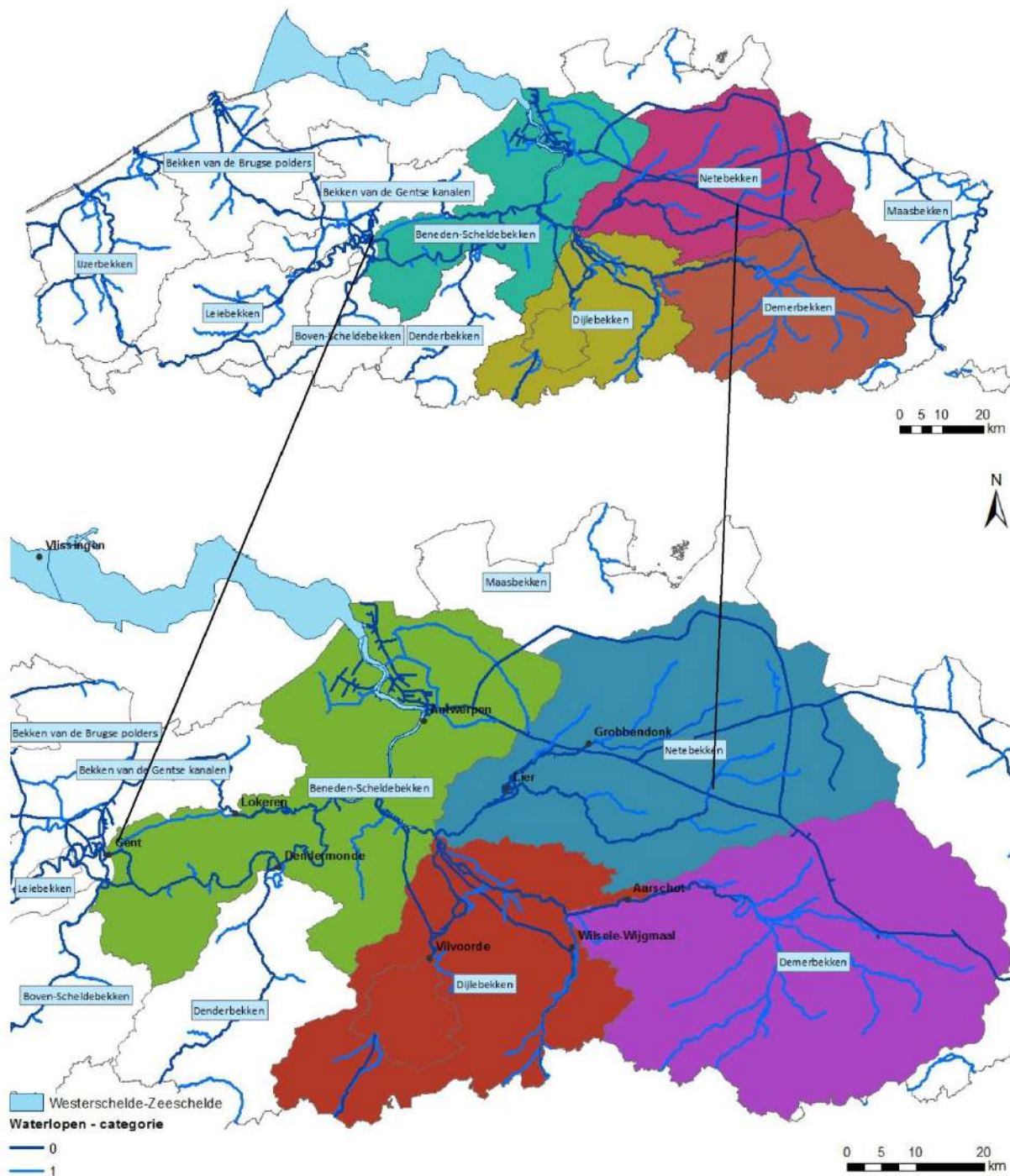
In december 2015 werd de overlooptdijk van voormalig GOG Uiterdijk afgegraven tot maaiveldhoogte. Nadien werd de overlooptdijk opnieuw opgehoogd. De juiste timing hiervan is niet gekend. De nieuwe overlooptdijkhoogte wordt geschat op 6,4 mTAW.

Sinds januari 2017 is ook GOG-GGG Zennegat, aan de Dijlemonding, in werking.

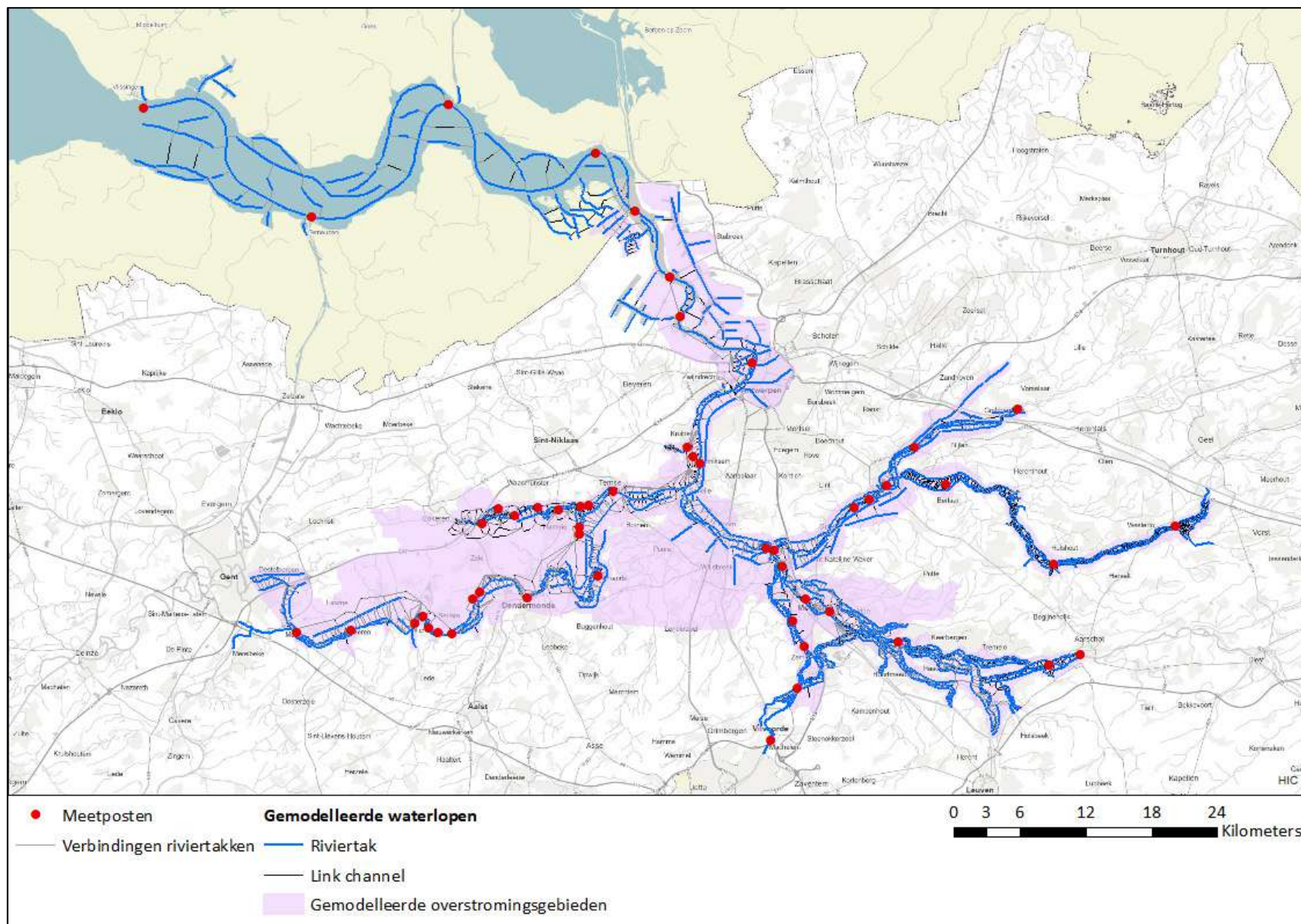
In december 2019 werden aanpassingswerken uitgevoerd aan de uitwatering van Burchtse Weel. Om slibinstroom te vermijden werd daar een 'drempel' geplaatst. De terugslagkleppen sluiten niet de volledige kokers af, waardoor het gebied in open verbinding staat met de Zeeschelde en een gecontroleerd gereduceerd getij kent.

In juli-augustus 2021 werd het GOG Groot Schoor ingericht als ontpoldering. De zomerdijk werd over de volledige lengte, uitgezonderd het zuidelijk stuk, afgegraven tot 5 mTAW. Er werden drie bressen in de dijk geslagen tot een diepte van ongeveer 2 mTAW. De akker in de polder is gemiddeld 1 m afgegraven, afwaterend naar de drie bressen (pers. comm. Sander Belmans, projectingenieur).

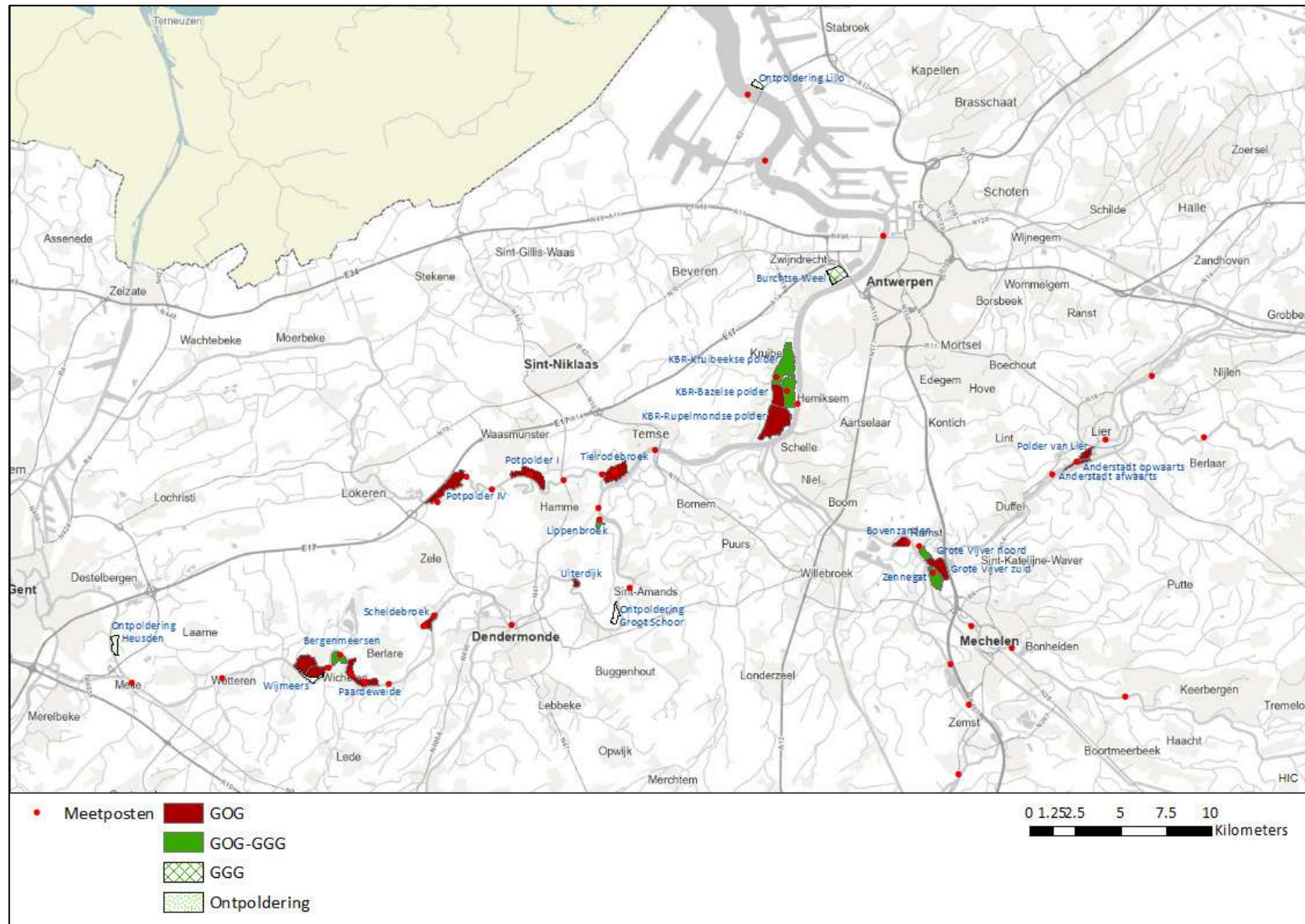
Op 16 maart 2022 werd de GGG-werking in Grote Vijver Noord opgestart. In eerste instantie werden vijf schotbalken geplaatst in de kokers, met een drempelhoogte van 4,55 mTAW. De overlooptdijk van GOG's Grote Vijver Noord en Zuid werd in het voorjaar van 2022, tijdens het schrijven van dit rapport, afgewerkt. Deze GOG's zullen bij een volgende storm in werking kunnen treden. Het drempelpeil van de overlooptdijken is respectievelijk 6,8 mTAW en 7,0 mTAW (pers. comm. Michiel Derycke, projectingenieur).



Figuur 1 – Situering Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren opgenomen in het hydrodynamisch model



Figuur 2 – Overzicht gemodelleerde waterlopen in het referentiemodel van de Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren



Figuur 3 – Overzicht Gecontroleerde Overstromingsgebieden in het Zeescheldbekken (GOG-GGG Grote Vijver noord en GOG Grote Vijver zuid waren nog niet in werking tijdens de beschouwde stormen)

2.2 Software

De software gebruikt voor de 1D-hydrodynamische berekeningen is Mike11, versie 2017 SP2 (DHI, 2017).

Voor de verwerking van de gegevens in GIS wordt gebruik gemaakt van ArcMAP 10.6.1 (ESRI, 2017).

2.3 Geografische referentie en tijdszone

Het verticaal referentievlak is TAW, en als coördinatenstelsel wordt voor het 1D-model Lambert 1972 gebruikt.

De gebruikte tijdsreferentie is GMT+1 (winteruur).

2.4 Versiebeheer

De modellen die gebruikt zijn in het kader van deze studie zijn gearchiveerd in het versiebeheer:

https://wl-subversion.vlaanderen.be/svn/repoSpNumMod/MIKE11/Sigma/SIGMA20220621_22_034

revisie 5202

2.5 Referentiemodel (versie 01)

Als referentiemodel voor de hindcast-berekening werd het model van de hindcast-berekeningen van 2020 genomen (Coen *et al.*, 2020). Dit model was gebaseerd op het geactualiseerd model van de Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren voor toestand 2019 (International Marine and Dredging Consultants & Waterbouwkundig Laboratorium, 2020).

Er werden geen aanpassingen uitgevoerd aan de bathymetrie en topografie van de waterlopen en de gebieden erlangs. Voor een overzicht van de gebruikte bathymetrische en topografische gegevens wordt verwezen naar bovenstaande rapporten.

2.6 Modelaanpassingen

2.6.1 Dijken rondom Antwerpen

In de zone rondom Fort Filip werden de dijken verhoogd tot de Sigmahoogte van 11 mTAW.

Langs de linkeroever tussen de Palingbeek en het Galgenweel werden de dijken verhoogd tot de Sigmahoogte van 9,25 mTAW.

Deze aanpassingen werden geïmplementeerd in het model door het drempelpeil van de link channels in deze zone te verhogen.

2.6.2 Dijkwerken Wichelen

De dijk langs de rechteroever van de Schelde, tegenover Paardeweide, werd verstevigd en verhoogd naar de Sigmahoogte van 8 mTAW.

Deze aanpassing werd geïmplementeerd in het model door het drempelpeil van de link channels in deze zone te verhogen.

2.6.3 Aanpassing GGG-inwateringssluizen

Omdat tijdens stormperiodes de inwateringssluizen van de bestaande GGG-gebieden vaak gesloten worden, werden in het model bijkomend 'control structures' geïmplementeerd. Deze structuren zijn ingesteld als schuiven die kunnen dalen tot op de drempelhoogte van de inwateringsconstructies, waarbij dan geen inwatering meer mogelijk is. Deze 'control structures' zijn voorzien voor alle bestaande GGG-gebieden.

2.6.4 GGG Grote Vijver noord

GGG Grote Vijver noord is in werking gesteld op 16 maart 2022. Tijdens de doorgerkende periodes voor de hindcast kende dit gebied nog geen GGG-werking. De inwateringsconstructie werd echter wel reeds geïmplementeerd in het model en de schuiven voor de inwatering werden volledig gesloten.

2.6.5 GOG Paardeweide

De vispassage ter hoogte van de meest afwaartse uitwatering van GOG Paardeweide was nog niet opgenomen in het Zeescheldemodel. De inlaat van de vispassage bestaat uit een klepje in de terugslagklep, met een diameter van 30 cm. In de uitwateringskoker werden eveneens schotbalken geplaatst tot een drempelpeil van 2,5 mTAW. De uitwateringskoker in het model werd aangepast en er werd bijkomend een kleine koker geïmplementeerd voor de kleine inlaat in de terugslagklep.

2.6.6 'Lekkende' terugslagkleppen

Bij meerdere GOG's langs de Zeeschelde wordt een beperkte schommeling van het waterpeil waargenomen in perioden zonder GOG-werking, ook wanneer er geen bovenafvoer is. Het waterpeil stijgt mee met het rivierpeil vanaf de drempelhoogte van de uitwatering van de gebieden. Dit doet vermoeden dat één of meerdere terugslagkleppen niet volledig gesloten zijn. Dit kan veroorzaakt worden door vuil of takken, of door schade.

Om de gemeten schommeling van het waterpeil te kunnen simuleren, werd waar nodig een kleine koker toegevoegd ter hoogte van de uitwateringskoker, zonder terugslagklep. Bij de bespreking van de resultaten ter hoogte van de GOG's wordt aangegeven wanneer dit toegepast werd.

2.7 Randvoorwaarden

Voor het doorrekenen van de stormen van eind januari en februari 2022 wordt gebruik gemaakt van historische randvoorwaarden. Indien beschikbaar worden hiervoor metingen gebruikt. Deze randvoorwaarden werden zodanig opgelegd aan het model dat zowel voor historische simulaties als voor simulaties met composietstormen eenzelfde netwerk- en randvoorwaardenbestand kan gebruikt worden.

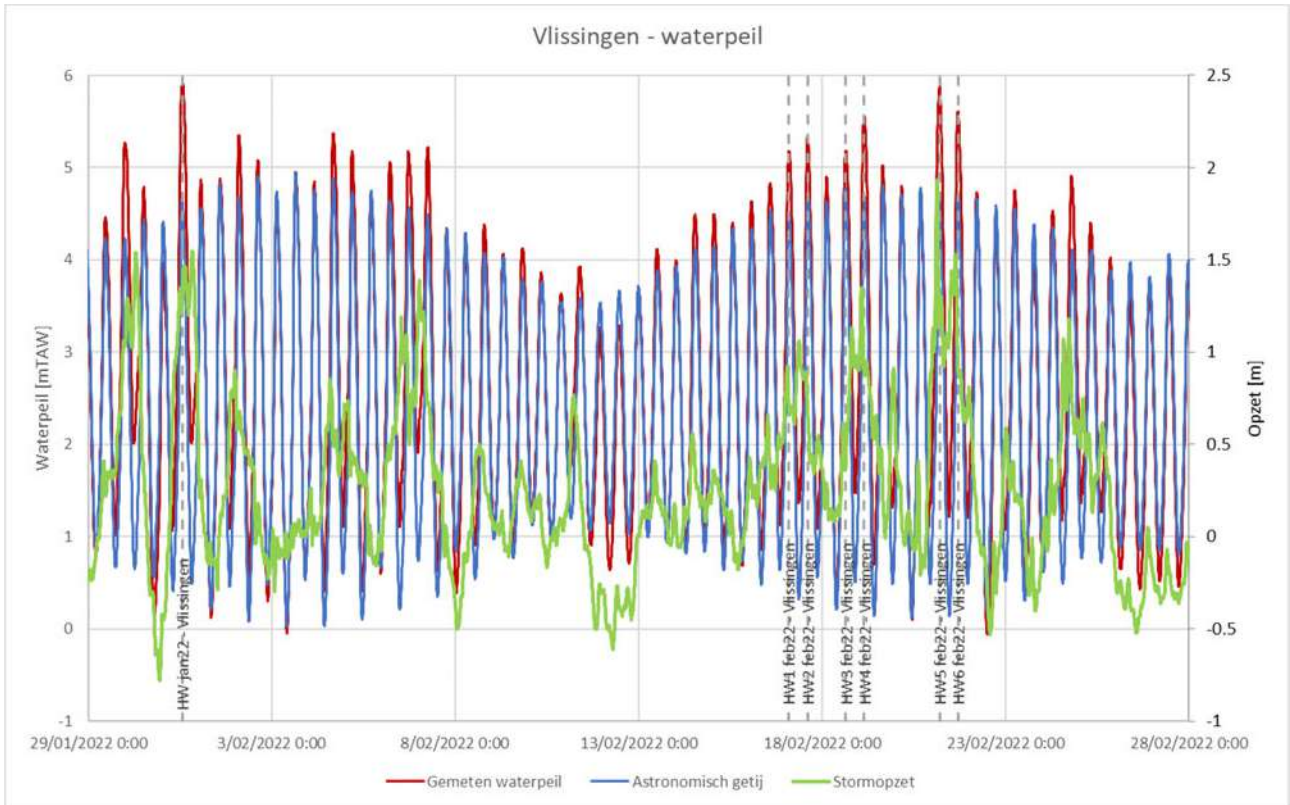
2.7.1 Afwaartse rand

Waterpeilen

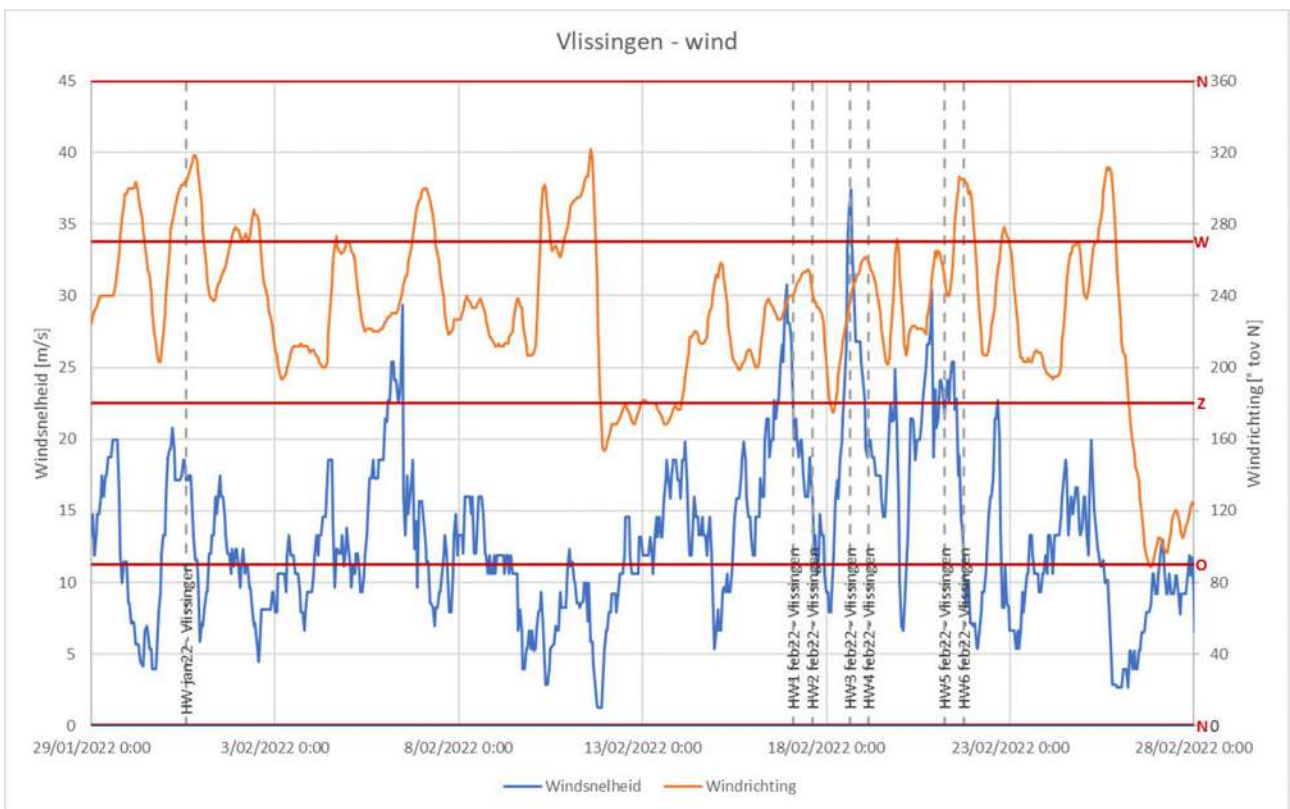
Aan de afwaartse rand te Vlissingen wordt het gemeten waterpeil te Vlissingen opgelegd. Deze metingen zijn beschikbaar via de website van Rijkswaterstaat. De waterpeilen zijn gerefereerd aan het Nederlandse referentievlak (NAP) en worden omgerekend naar equivalente waarden ten opzichte van het Belgische referentievlak (TAW) door toevoeging van 2,35 m. Figuur 4 toont het verloop van het waterpeil te Vlissingen. Uit een vergelijking met het astronomisch getij blijkt dat de stormopzet op het hoogste hoogwater in februari 2022 ongeveer 1,9 m bedroeg. Tijdens het stormhoogwater eind januari 2022 bedroeg de stormopzet circa 1,5 m.

Wind

Voor de windrandvoorwaarde op de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van de omgerekende gemeten windsnelheid en windrichting te Vlissingen. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van het KNMI. Het betreft uurlijkse gegevens van gemiddelde potentiële windsnelheden, over land en op 10 m hoogte, en van windrichtingen te Vlissingen. Deze worden omgezet naar de potentiële windsnelheid boven het wateroppervlak. De gegevens worden getoond in Figuur 5. Een beschrijving van de implementatie van de wind in het Mike11-model van de Zeeschelde wordt gegeven in BIJLAGE D.



Figuur 4 – Verloop waterpeil te Vlissingen



Figuur 5 – Verloop potentiële windsnelheid en windrichting te Vlissingen

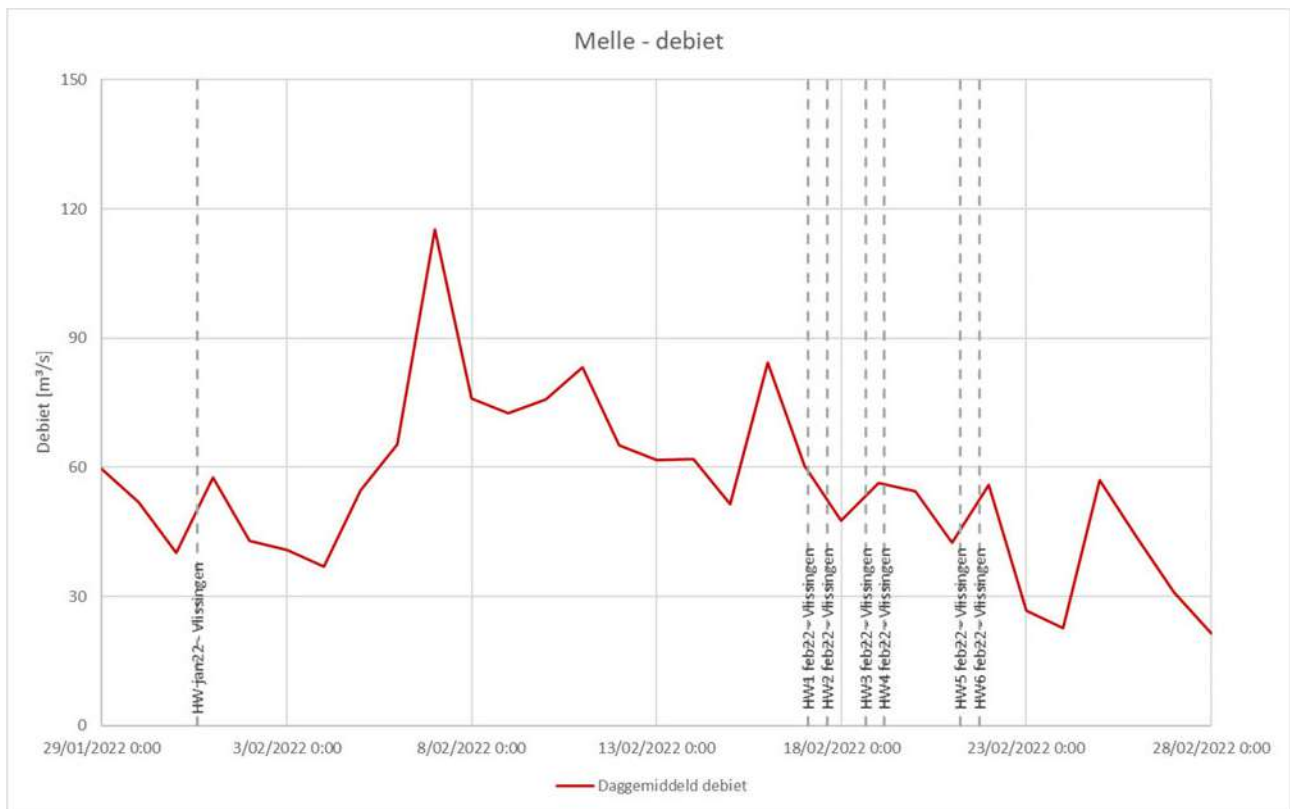
2.7.2 Opwaartse randen

Beschikbare data

Aan de opwaartse rand van het model worden debieten opgelegd. Indien beschikbaar, wordt gebruik gemaakt van gemeten debietreeksen. Deze zijn beschikbaar via waterinfo.be. Zowel de debietreeksen van het HIC als deze van VMM bevatten ongevalideerde waarden voor 2022. Tabel 1 geeft een overzicht van de beschikbare debietreeksen. Figuur 6 toont het verloop van het daggemiddeld debiet te Melle. In de periode waarin de stormen opgetreden zijn, bedroeg het daggemiddeld debiet te Melle minder dan 60 m³/s.

Tabel 1 – Overzicht beschikbare gemeten debietreeksen

Waterloop	Locatie	Nr meetpost	Bron
Barbierbeek	Bazel	008	Waterinfo, VMM
Kleine Molenbeek	Liezele	036	Waterinfo, VMM
Grote Molenbeek	Malderen	037	Waterinfo, VMM
Kleine Nete	Grobbendonk	knt03a	Waterinfo, HIC
Grote Nete	Geel-Zammel	gnt07	Waterinfo, HIC
Grote Laak	Tessengerlo	087	Waterinfo, VMM
Dijle	Wilsele	093	Waterinfo, VMM
Weesbeek	Boortmeerbeek	110	Waterinfo, VMM
Demer	Aarschot	dem02a	Waterinfo, HIC
Winge	Rotselaar	141	Waterinfo, VMM
Grote Losting	Wezemaal	143	Waterinfo, VMM
Zenne	Vilvoorde	zen04a	Waterinfo, HIC
Dender	Dendermonde	zes47a	Waterinfo, HIC
Zeeschelde	Melle	zes57a	Waterinfo, HIC



Figuur 6 – Verloop daggemiddeld debiet te Melle

Bemeten bekkens

Aan de opwaartse randen van de bemeten bekkens wordt een gemeten debietreeks opgelegd. In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de opwaartse randen waarvoor een gemeten debietreeks beschikbaar is.

Tabel 2 – Opgelegde (gemeten) debietreeksen aan opwaartse randen van het model

Opwaartse rand	Meetpost gemeten debietreeks
Barbierbeek, Bazel	008 – Bazel/Barbierbeek
Demer, Aarschot	dem02a – Aarschot/Demer
Dijle, Wilsele	093 – Wilsele/Dijle
Durme, Lokeren	*
Grote Molenbeek, Malderen	037 – Malderen/Grote Molenbeek
Kleine Molenbeek, Liezele	036 – Liezele/Kleine Molenbeek
Kleine Nete, Grobbendonk	knt03a – Grobbendonk/Kleine Nete
Losting, Wezemaal	143 – Wezemaal/Losting
Tijarm Zwijnaarde, Zwijnaarde	***
Weesbeek, Boortmeerbeek	110 – Boortmeerbeek/Weesbeek
Winge, Rotselaar	141 – Rotselaar/Winge
Zenne, Vilvoorde	zen04a – Vilvoorde/Zenne
Zeeschelde, Dendermonde	zes47a – Dendermonde/Dender**
Zeeschelde, Merelbeke	zes57a – Zeeschelde/Melle***

*Aan de opwaartse rand van de Durme wordt een constant debiet van $0,78 \text{ m}^3/\text{s}$ opgelegd, als zijnde afkomstig van de RWZI Lokeren. Bijkomend wordt een geschat debiet opgelegd afkomstig van het vijzelgemaal te Lokeren (zie §2.8.3).

** De Dender wordt niet als een aparte waterloop meegenomen in het model. Het daggemiddelde debiet van de Dender wordt wel als een randvoorwaarde opgelegd aan de Schelde in Dendermonde.

*** Aan de opwaartse rand van de Zeeschelde dienen debieten opgelegd te worden aan de stuwen te Merelbeke en Zwijnaarde. Aan de stuw te Merelbeke wordt het daggemiddelde debiet gemeten te Melle opgelegd. Aan de opwaartse randen te Zwijnaarde en Gentbrugge wordt een constant laag debiet van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ opgelegd.

Onbemeten (deel)bekkens

Voor de opwaartse randen van het model waarvoor geen gemeten debietreeksen beschikbaar zijn, wordt gebruik gemaakt van herschaalde debietreeksen van naburige bekkens. De herschaling wordt uitgevoerd op basis van de relatieve oppervlakte van de betrokken deelbekkens. Tabel 3 geeft een overzicht van de opwaartse randen van het model waar herschaalde debietreeksen opgelegd worden.

Tabel 3 – Herschaalde debietreeksen opgelegd aan onbemeten opwaartse randen van het model

Opwaartse rand	Meetpost herschaalde debietreeks
Barebeek, Elewijt	093 – Dijle/Wilsele of 110 – Boortmeerbeek/Weesbeek
Bollaak, Pulle	087 – Grote Laak/Tessenderlo
Grote Laak, Vorst	087 – Grote Laak/Tessenderlo
Grote Nete, Albertkanaal	gnt07 – Grote Nete/Geel-Zammel
Vunt, Wilsele	093 – Dijle/Wilsele
Wimp, Wiekevorst	087 – Grote Laak/Tessenderlo

Voor de onbemeten (deel)bekkens wordt gebruik gemaakt van debietreeksen herschaald op basis van de oppervlakte van het (deel)bekken. Tabel 4 geeft een overzicht van de onbemeten (deel)bekkens die opgenomen zijn in het model en de meetpost waarvan de debietreeks herschaald werd.

Tabel 4 – Herschaalde debietreeksen opgelegd aan onbemeten deelbekkens

Onbemeten (deel)bekken	ID deelbekken	Meetpost herschaalde debietreeks
Durme-Zuid	V04DUR000080	008
Durme-Noord	V04DUR000090	008
Ledebeek (Durme)	V04LED000220	008
Lokerenbeek (Durme)	V04LOK000060	008
Rupel-RO (Rupel)	V04RUP000150	036
Molenbeek-Vliet (Rupel)	V04VLI000140	036
Zebeek (Durme)	V04ZEL000050	008
Zielbeek (Durme)	V04ZIE000120	008
Zwartebeek (Rupel)	V04ZWA000130	036
Barebeek (Dijle)	V08BAR000375	110 / 093*
Dijle	V08DIJ000390	110 / 093*
Dijle	V08DIJ000440	110 / 093*
Dijle	V08DIJ000455	110 / 093*
Vunt	V08DIJ000425	093

Onbemeten (deel)bekken	ID deelbekken	Meetpost herschaalde debietreeks
Grote Laakbeek (Dijle)	V08GLA000450	122
Leibeek (Dijle)	V08LEI000420	110 / 093*
Lier (Benedennete)	V08LIE000510	052
Vrouwvliet (Dijle)	V08VRO000460	110 / 093*
Weesbeek (Dijle)	V08WEE000410	110 / 093*
Zenne-onbemeten	V08ZEN000480	175
Heilaakbeek (Demer)	V09HEI000290	122
Moutlaak (Demer)	V09MOU000280	122
Winge (Demer)	V09WIN000320	141
Bergebeek (Grote Nete)	V10BER000100	087
Bevelsebeek (Grote Nete)	V10BEV000120	087
Gestelbeek (Grote Nete)	V10GES000130	087
Goorloop (Grote Nete)	V10GOO000080	087
Kleine Laak (Grote Nete)	V10KLA076030	087
Krekelbeek (Kleine Nete)	V10KRE000110	052 / 076*
Molenbeek (Grote Nete)	V10MOL000060	087
Molenbeek/Bollaak (Kleine Nete)	V10MOP000150	087
Benedennete-LO	V10NET000170	052 / 076*
Benedennete-RO	V10NET000180	052 / 076*
Rode Laak (Grote Nete)	V10ROL000040	087
Stenkensbeek (Grote Nete)	V10STE000070	087
Tappelbeek (Kleine Nete)	V10TAP000160	087
Wimp (Grote Nete)	V10WIM000090	087

*In sommige gevallen is de meetreeks van een meetpost niet volledig over de beschouwde periode. De gaten in deze meetreeks worden opgevuld door herschaling van het debiet van een andere nabijge meetpost.

2.8 Simulatieperiode

Op 31 januari 2022 om 15u03 werd een waterpeil gemeten van 6,94 mTAW in Antwerpen. De simulatieperiode wordt gestart enkele getijden voor dit stormtij. De stormperiode van februari 2022 eindigde met een hoogwater van 6,54 mTAW op 21 februari 2022 om 18u39.

Op basis van beschikbare data, en rekening houdend met de duur van de stormen, en initiële condities werd volgende simulatieperiode gekozen:

28 januari 04:00 tot 26 februari 2022 00:00

Deze periode begint met een laagwater te Vlissingen, en omvat twee doortij-springtij cycli.

Bij de bespreking van de resultaten zal deze periode opgesplitst worden in twee delen:

- Storm eind januari 2022 (storm jan22): 28/01/2022 16:00 – 03/02/2022
- Stormen februari 2022 (storm feb22): 16/02/2022 00:00 – 26/02/2022 00:00

De verschillende stormhoogwaters tijdens de stormperiode van februari 2022 worden aangeduid in Figuur 4.

2.8.1 Stuw Mechelen

De stuw te Mechelen werd opgetrokken van 7 tot 9 februari 2022. Op 10 februari 2022 werd de stuw opnieuw opgetrokken, zodat het water aan de Barebeek kon dalen en de bever die in de uitwateringsconstructie gevangen zat, kon bevrijd worden (pers. Comm. Geert Roggeman, districtshoofd).

Op 14 februari 2022 werd de stuw opnieuw in werking gesteld, met een handmatige regeling, tot een stuwpeil van circa 5 mTAW.

Er werd een tijdreeks met stuwstanden opgelegd aan de 'Control Structures' die de boven- en benedenschuif van de stuw voorstellen in het model.

2.8.2 GGG-inwateringssluizen

Tijdens stormperiodes worden, na verwittiging door de permanentiedienst van het HIC, de inwateringssluizen van de GGG-gebieden gesloten. Door de implementatie van de extra structuren in het model kan deze sluiting en heropening automatisch geïmplementeerd worden door het opleggen van een tijdreeks met de hoogte van de schuif boven de drempel van de inwateringsconstructie.

Voor enkele GGG's bestaan logboeken waarin het sluiten en openen van de inwateringssluizen geregistreerd wordt. Deze werden gebruikt als bron voor de opmaak van bovengenoemde tijdreeksen. Dit betreft GGG Kruikeke en Bazil, en GGG Bergenmeersen. Voor GGG Lippenbroek werd het openen en sluiten van de inwateringssluizen geregistreerd door de sectorverantwoordelijke.

Voor GGG Zennegat werd de tijdreeks opgemaakt op basis van de gemeten waterpeilen in de GGG-gebieden.

2.8.3 Pomp Lokeren

Wanneer de Moervaart een waterpeil bereikt van +5,0 mTAW treedt het pompemaal in Lokeren in werking en wordt water vanuit de Moervaart of gekanaliseerde Durme overgepompt naar de (tij-)Durme. Theoretisch kan er maximum 7,5 m³/s (vijzel 1: 2,5 m³/s; vijzel 2: 5 m³/s) overgepompt worden. Beide pompen staan echter zo ingesteld dat ze beide een capaciteit van 2,5 m³/s kunnen verpompen. Dit zijn echter theoretische waarden, het effectief verpompt debiet ligt vermoedelijk lager (pers. comm. Bart Antheunis, districtshoofd).

Het debiet van de pomp in Lokeren werd berekend op basis van de gemeten waterpeilen op- en afwaarts van het pompstation in Lokeren. Hierbij werd geen rekening gehouden met het waterpeil ter hoogte van

Waasmunster brug. Er werd een aanslagpeil op de gekanaliseerde Durme te Lokeren aangenomen op +4,95 mTAW en een afslagpeil op +4,9 mTAW. Wanneer de duur tussen twee pompperiodes kleiner was dan enkele uren, werd deze periode ook opgevuld alsof er gepompt werd. De tijdreeks met het gepompte debiet werd bijkomend opgelegd aan de opwaartse rand van de (tij-)Durme te Lokeren.

2.9 Versie 02: Aanpassing topofactor wind

In BIJLAGE D wordt een beschrijving gegeven van de implementatie van de wind in Mike11.

Bij de kalibratie van het model in 2019 werd de topofactor voor de wind aangepast naar 1,0. Na de hindcast van het model voor de stormen van februari en maart 2020 werd de topofactor opnieuw verlaagd naar de oorspronkelijke waarde van 0,6.

Bij het uitvoeren van de simulaties voor deze hindcast werd voor enkele stormen het peil van het stormhoogwater onderschat. Er werd daarom een extra simulatie uitgevoerd met een verhoogde topofactor voor de wind van 1,0. De resultaten van beide simulaties worden besproken.

2.10 Scenario 01: zonder GOG-werking KBR

Om het effect van de GOG-werking in KBR in te schatten op het stormhoogwater werden bijkomend simulaties uitgevoerd, waarbij de link channels die de overloofdijk van GOG KBR voorstellen, verhoogd werden tot 8 mTAW. Hierdoor trad geen GOG-werking op in deze gebieden. Ook de 'lekkende terugslagkleppen' werden volledig gesloten. Deze scenarioberekening wordt enkel besproken voor de storm jan22.

3 Hindcast met 1D-referentiemodel

3.1 Validatiegegevens

3.1.1 Rivieren

Voor de evaluatie van de simulatieresultaten wordt gebruik gemaakt van gemeten waterpeilen langs de Zeeschelde en zijrivieren. Deze zijn beschikbaar via waterinfo.be Deze gegevens zijn nog niet gevalideerd.

De waterpeilen van de meetposten langs de Westerschelde zijn beschikbaar in de waterbase van Rijkswaterstaat.

Tabel 5 geeft een overzicht van de beschikbare meetreeksen van waterpeilen voor de validatie.

Tabel 5 – Overzicht beschikbare meetreeksen waterpeilen voor validatie

Waterloop	Locatie	Nr meetpost	Bron
Westerschelde	Terneuzen	TERN-H10	RWS
	Hansweert	HANS-H10	RWS
	Bath	BATH-H10	RWS
Zeeschelde	Prosperpolder	zes01a	Waterinfo, HIC
	Liefkenshoek	zes10a	Waterinfo, HIC
	Kallo	zes14a	Waterinfo, HIC
	Antwerpen	zes21a	Waterinfo, HIC
	Hemiksem	zes28a	Waterinfo, HIC
	Temse	zes36a	Waterinfo, HIC
	Driegoten	zes39a	Waterinfo, HIC
	Sint-Amands	zes42a	Waterinfo, HIC
	Dendermonde	zes47a	Waterinfo, HIC
	Schoonaarde	zes49a	Waterinfo, HIC
	Uitbergen	zes52a	Waterinfo, HIC
	Wetteren	zes55c	Waterinfo, HIC
	Melle	zes57a	Waterinfo, HIC
Durme	Tielrode	dur01a	Waterinfo, HIC
	Hamme	dur01x	Waterinfo, HIC
	Waasmunster brug	dur04a	Waterinfo, HIC
	Waasmunster manta	dur05a	Waterinfo, HIC
	Zeke	dur07a	Waterinfo, HIC

Waterloop	Locatie	Nr meetpost	Bron
Benedennete	Rumst	bnt01c	Waterinfo, HIC
	Duffel	bnt03	Waterinfo, HIC
	Lier Molbrug	bnt07a	Waterinfo, HIC
Dijle	Mechelen-benedensluis	dij06a	Waterinfo, HIC
	Mechelen opwaarts stuw	dij07a	Waterinfo, HIC
	Rijmenam	dij10a	Waterinfo, HIC
Zenne	Hombeek	zen01a	Waterinfo, HIC
	Zemst	zen02a	Waterinfo, HIC
	Epegem	zen03a	Waterinfo, HIC

3.1.2 GOG's

Ook in enkele GOG's wordt het waterpeil continu gemeten. Deze gegevens worden eveneens gebruikt voor de evaluatie van het waterpeil in de GOG's. De waterpeilmeters zijn vaak geplaatst nabij uitwateringsconstructies. Tabel 6 geeft een overzicht van de waterpeilmeters in de GOG's.

Tabel 6 – Overzicht waterpeilmeters in GOG's

Waterloop	GOG/Naam meetlocatie	Locatie	Bron
Zeeschelde	Kruibeke Grote Uitlaat (zes25a)	ter hoogte van de grote uitlaat naar de Zeeschelde	Waterinfo, HIC
	Bazel Kleine Uitwatering (zes25j)	ter hoogte van de kleine uitlaat naar de Zeeschelde, meest afwaartse	Waterinfo, HIC
	Bazel Grote Uitwatering (zes25l)	ter hoogte van de grote uitlaat naar de Zeeschelde, meest opwaartse	Waterinfo, HIC
	Tielrodebroek2 (zes37m)	ter hoogte van opwaartse uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC
	Lippenbroek (zes040b)	centrale gracht	Waterinfo, HIC
	Scheldebroek1 (zes48f)	ter hoogte van afwaartse uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC
	Scheldebroek2 (zes48r)	ter hoogte van opwaartse uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC
	Paardeweide afwaarts (zes50i)	ter hoogte van afwaartse uitwateringsconstructie, met vistrap	Waterinfo, HIC
	Paardeweide afwaarts (zes50r)	ter hoogte van centrale uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC
	Bergenmeersen ggg 1 (zes51n)	ter hoogte van gecombineerde in- en uitwateringsconstructie, GGG-zijde	Waterinfo, HIC

Durme	Potpolder I 2 (dur06l)	ter hoogte van centrale uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC
Rupel	Bovenzanden (rup02l)	ter hoogte van uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC
Dijle	Zennegat (dij05a)	nabij gecombineerde in- en uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC
Benedennete	Anderstadt I (bnt05f)	Anderstadt opwaarts ter hoogte van uitwateringsconstructie	Waterinfo, HIC

3.2 Methode validatie

3.2.1 Maximum waterpeil waterlopen

Voor de validatie van de gesimuleerde waterpeilen in de waterlopen zullen lengteprofielen opgemaakt worden met de maximum waterpeilen tijdens de verschillende stormhoogwaters in de simulaties met topofactoren voor wind 0,6 en 1,0. Op deze lengteprofielen worden ook de gemeten maximum waterpeilen ter hoogte van de meetposten getoond per storm. De stormperiode van februari 2022 werd opgesplitst in zes stormen per opgetreden hoogwater waarbij het prewaakpeil te Antwerpen (6,30 mTAW) overschreden werd. Het tijdstip van de verschillende hoogwaters te Vlissingen wordt weergegeven in Figuur 4. De gemeten en gesimuleerde waarden van de maximum waterpeilen per meetpost en per storm worden tevens in een tabel weergegeven in §3.3.4.

3.2.2 VIMM

Als tweede stap wordt gebruik gemaakt van VIMM. VIMM staat voor Visualisatie Model en Metingen, en is een Matlab Toolbox ontwikkeld door het WL om op een gestandaardiseerde manier een hydraulisch model (waterbeweging) te vergelijken met een set meetgegevens.

De VIMM functionaliteiten met betrekking tot waterstand zijn:

- Plots van tijdreeksen
- Rechte analyse: statistiek op volledige tijdreeksen
- Scheve analyse: statistiek op HW/LW
- Harmonische analyse
- Vectorieel verschil
- Omgaan met modellen en metingen in TAW en NAP

Voor deze studie zal gebruik gemaakt worden van de plots van de tijdreeksen, de statistische analyse van de tijdreeksen, en HW en LW, en van de harmonische analyse.

De plots met de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen worden voor de verschillende meetposten langs de rivieren weergegeven in BIJLAGE B.

Statistische analyse

Bij de statistische analyse van de tijdreeksen worden de bias en RMSE berekend. Deze parameters worden als volgt gedefinieerd:

- Laat x de referentiereeks zijn, met waardes x_i en y de te testen reeks met waardes y_i .
- De *bias* is het verschil tussen de gemiddelden van de beschouwde tijdreeksen. Hoe kleiner de bias, hoe groter de overeenkomst tussen de beschouwde tijdreeksen.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$bias = \bar{y} - \bar{x}$ met $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ waarbij N de lengte van de tijdreeksen is.

- De RMSE wordt als volgt gedefinieerd: $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}}$

Tijdreeksen die sterk overeenkomen, zullen resulteren in kleine RMSE-waarden.

Harmonische analyse

Met behulp van T-TIDE worden de harmonische componenten van het getij in de beschouwde tijdreeksen berekend. T-TIDE is een functie die de harmonische analyse van een tijdreeks berekent. Een beschrijving van de theoretische achtergrond van de analyse en enkele details van de implementatie kunnen teruggevonden worden in (Pawlowicz *et al.*, 2002).

Voor deze studie wordt enkel de harmonische component M2 beschouwd. Bij de harmonische component M2 wordt naast de waarden van de amplitude steeds een waarde voor de fout op de berekende amplitude weergegeven. Deze wordt gedefinieerd als het 95%-betrouwbaarheidsinterval. De M2-amplitude komt overeen met de amplitude van het dubbeldaags maansgetij.

3.2.3 GOG's

De waterpeilen in de GOG's zullen visueel vergeleken worden aan de hand van grafieken met de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen.

3.3 Resultaten meetposten rivieren

Bij de bespreking van de resultaten zullen volgende benamingen gebruikt worden voor de modelsimulaties:

- REF21_w06: met topofactor 0.6
- REF21_w10: met topofactor 1.0
- Storm jan22 = stormperiode van januari 2022
- Storm feb22-HWx = hoogwater in de stormperiode van februari 2022

3.3.1 Waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde

Figuur 7 en Figuur 8 geven een overzicht van de meetposten langs de Westerschelde en de Zeeschelde.

De lengteprofielen in Figuur A 1 tot en met Figuur A 7 tonen het verschil in maximum waterpeil tussen de gemodelleerde waterpeilen met verschillende topofactoren voor de wind, en ten opzichte van de metingen.

Westerschelde

Figuur B1 tot en met Figuur B4 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Westerschelde. Figuur C1 en Figuur C2 tonen respectievelijk de bias en RMSE voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeks voor de meetposten langs de Westerschelde.

Over de volledige simulatieperiode worden de hoogwaterpeilen ter hoogte van Terneuzen gemiddeld onderschat met enkele centimeters en deze ter hoogte van Hansweert en Bath overschat met 1 tot 6 cm. Voor REF21_w06 is de onderschatting te Terneuzen het grootst, en de overschatting te Hansweert en Bath het kleinst.

Wanneer de volledige simulatieperiode beschouwd wordt, is de absolute waarde van de bias voor de meetposten langs de Westerschelde steeds kleiner dan 7 cm, en deze van de RMSE steeds kleiner dan 10 cm voor REF21_w06 en kleiner dan 13 cm voor REF21_w10.

De lengteprofielen met maximum hoogwaterpeilen tijdens de stormen tonen dat bij de stormen van jan22, feb22-HW2 en feb22-HW5 de stormhoogwaters langs de Westerschelde onderschat worden voor REF21_w06. Het verhogen van de topofactor voor de wind naar 1.0 in REF21_w10 geeft een betere benadering van de stormhoogwaters voor deze stormen. Voor de storm van feb22-HW3 geeft deze verhoging van de topofactor echter een sterke overschatting van de hoogwaters langs de Westerschelde en verder opwaarts.

Bij alle stormen vertoont het lengteprofiel met de maximum waterpeil langs de Westerschelde een korte verhoging rond 10000 m of 10 km van de afwaartse rand. Het afwaartse gedeelte van de Westerschelde bestaat uit drie riviertakken die gescheiden zijn door ruggen of platen (zie Figuur 2). In het lengteprofiel worden de waterpeilen in de riviertak 'Westerschelde' weergegeven, die de ebgeul is. Na circa 11,5 km splitst de geul Everingen zich af van de Westerschelde, en rond 12,5 km komt de afwaartse geul Schaar-Spijkerplaat bij de Westerschelde. Rond deze locatie eindigt de korte verhoging in het lengteprofiel. Een vergelijking van de waterpeilen in de drie afwaartse geulen toont dat de gesimuleerde hoogwaterpeilen in de geulen verschillend zijn, in tegenstelling tot wat verwacht zou worden. Dit geeft aan dat de stroming over de platen of ruggen niet goed gesimuleerd wordt door het model.

Zeeschelde

Figuur B5 tot en met Figuur B9 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Beneden-Zeeschelde. Figuur B10 tot en met Figuur B17 tonen deze voor de meetposten langs de Boven-Zeeschelde.

Figuur C3 tot en met Figuur C6 tonen de bias en RMSE voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeksen voor de meetposten langs de Beneden- en de Boven-Zeeschelde.

Over de volledige simulatieperiode worden de hoogwaterpeilen zowel langs de Beneden-Zeeschelde als langs de Boven-Zeeschelde gemiddeld meer overschat in REF21_w10 ten opzichte van REF21_w06. Langs de Beneden-Zeeschelde te Antwerpen is de bias-waarde voor de hoogwaters voor REF21_w06 gelijk aan 5 cm en voor REF21_w10 gelijk aan 9,5 cm.

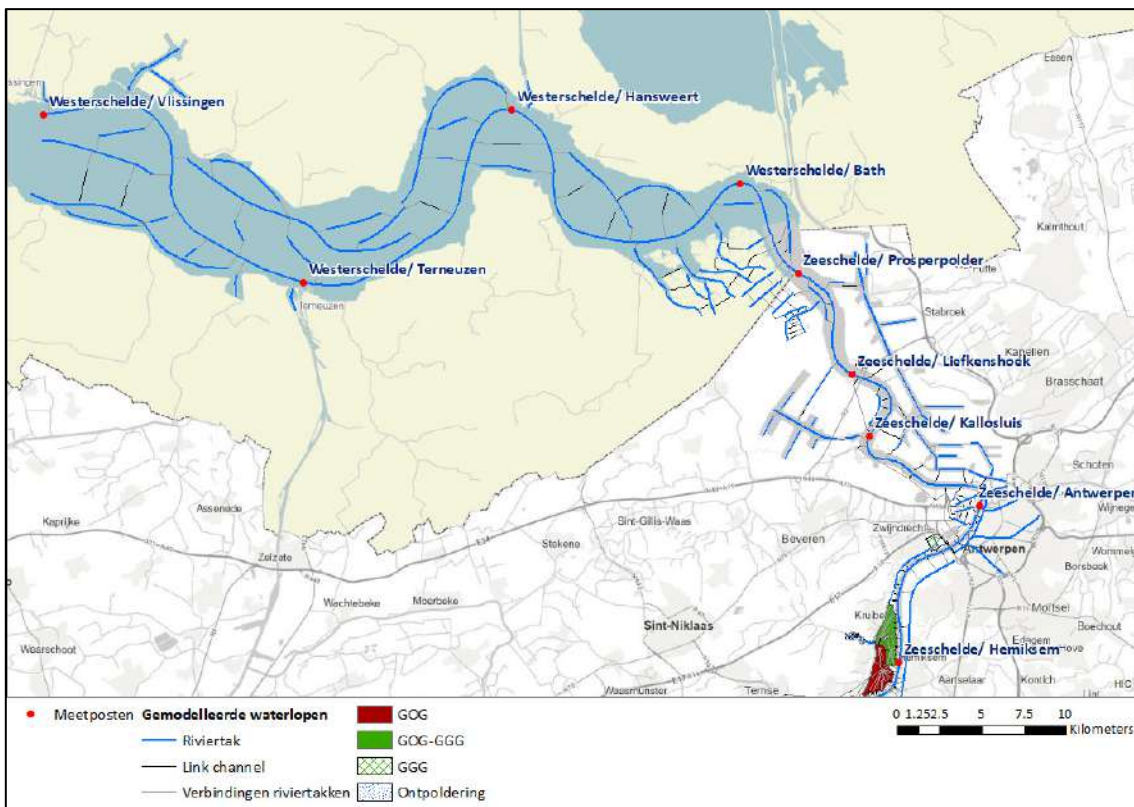
De absolute waarde voor de bias voor de hoog- en laagwaters over de volledige simulatieperiode, voor alle meetposten langs de Beneden-Zeeschelde is voor REF21_w06 respectievelijk kleiner dan 7 cm en 5 cm; en voor REF21_w10 kleiner dan 11 cm en 12 cm.

Het maximum hoogwaterpeil in Antwerpen wordt voor REF21_w06 tijdens de stormen van jan22, feb22-HW1, feb22-HW3 en feb22-HW5 onderschat. De grootste onderschatting ten opzichte van het gemeten stormhoogwater bedraagt 6 cm voor de storm van feb22-HW5. Voor de storm van feb22-HW4 is de overschatting van REF21_w06 het grootst, met 9 cm. Het maximum hoogwaterpeil in Antwerpen wordt voor REF21_w10 wordt voor alle gesimuleerde stormen overschat. Deze overschatting is het grootst bij storm feb22-HW3 met 29 cm. De gewijzigde windfactor zorgt hier voor een te grote opstuwing van het stormhoogwater over het gehele lengteprofiel van de Westerschelde en de Zeeschelde.

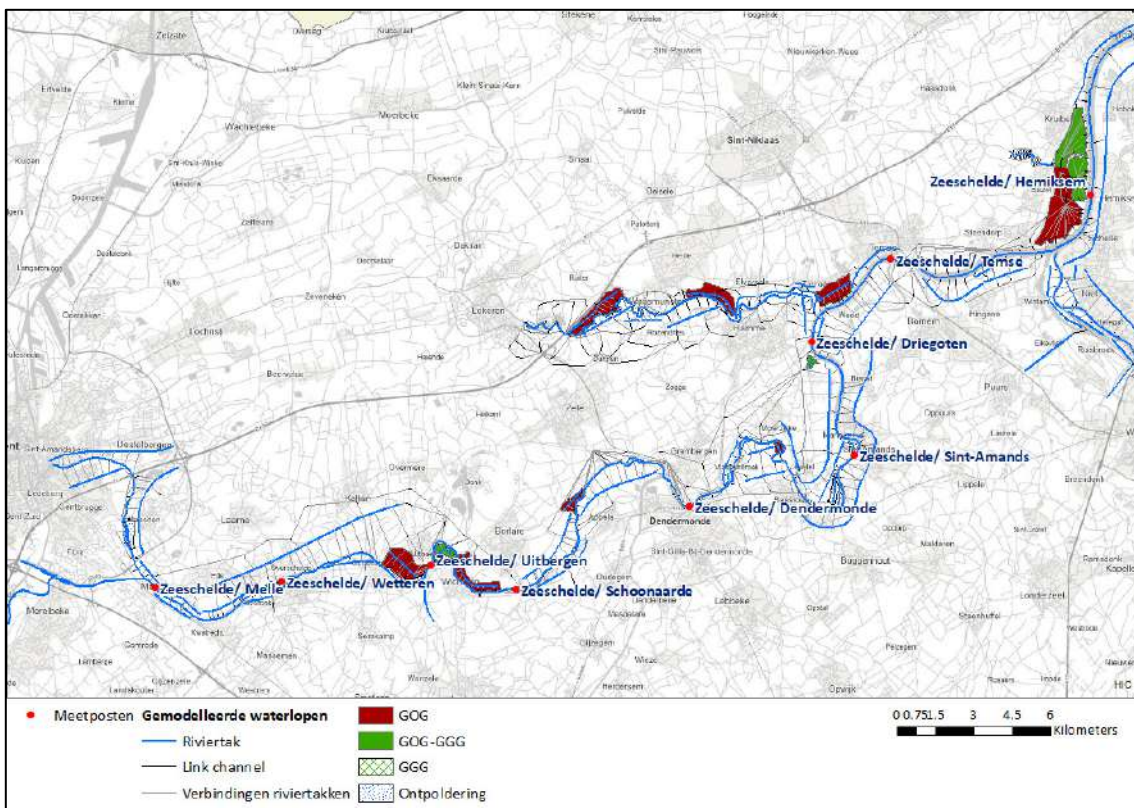
De absolute waarde voor de bias voor de hoog- en laagwaters over de volledige simulatieperiode, voor alle meetposten langs de Boven-Zeeschelde, uitgezonderd Wetteren en Melle, is voor REF21_w06 respectievelijk kleiner dan 8 cm en 15 cm; en voor REF21_w10 kleiner dan 13 cm en 10 cm. De laagwaters te Wetteren en Melle worden gemiddeld sterk onderschat in de modelsimulaties, terwijl de hoogwaters gemiddeld overschat worden.

M2

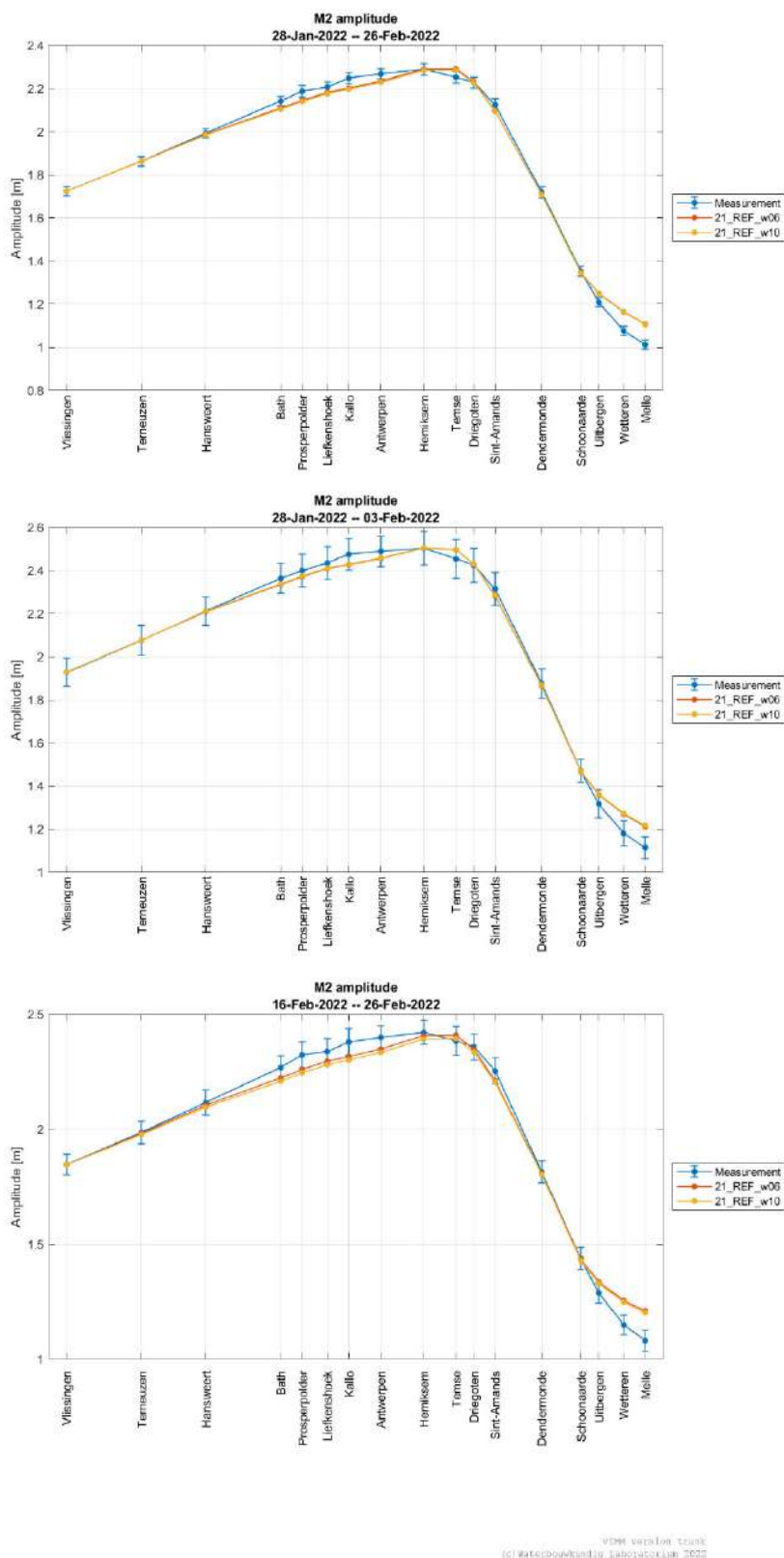
Figuur 9 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Westerschelde en de Zeeschelde voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm jan22 en de periode van de stormen feb22. Het verschil in M2-amplitude tussen REF21_w06 en REF21_w10 is klein. Langs de Beneden-Zeeschelde wordt de gemeten M2-amplitude steeds onderschat door de gesimuleerde M2-amplitude met een maximum ter hoogte van Kallo met 5 cm voor de volledige simulatieperiode en storm jan22, en met 8 cm voor stormen feb22. Ter hoogte van Temse treedt een overschatting op, evenals opwaarts Schoonaarde. Het verschil te Temse bedraagt echter maximaal 4 cm voor de volledige simulatieperiode, 4 cm voor de storm jan22, en 7 cm voor de stormen feb22. Het verschil te Melle bedraagt voor de volledige simulatieperiode en voor storm jan 22, en 13 cm voor stormen feb22.



Figuur 7 – Situering meetposten Westerschelde en Beneden-Zeeschelde



Figuur 8 – Situering meetposten Boven-Zeeschelde



Figuur 9 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Westerschelde en Zeeschelde

3.3.2 Waterpeilen Durme

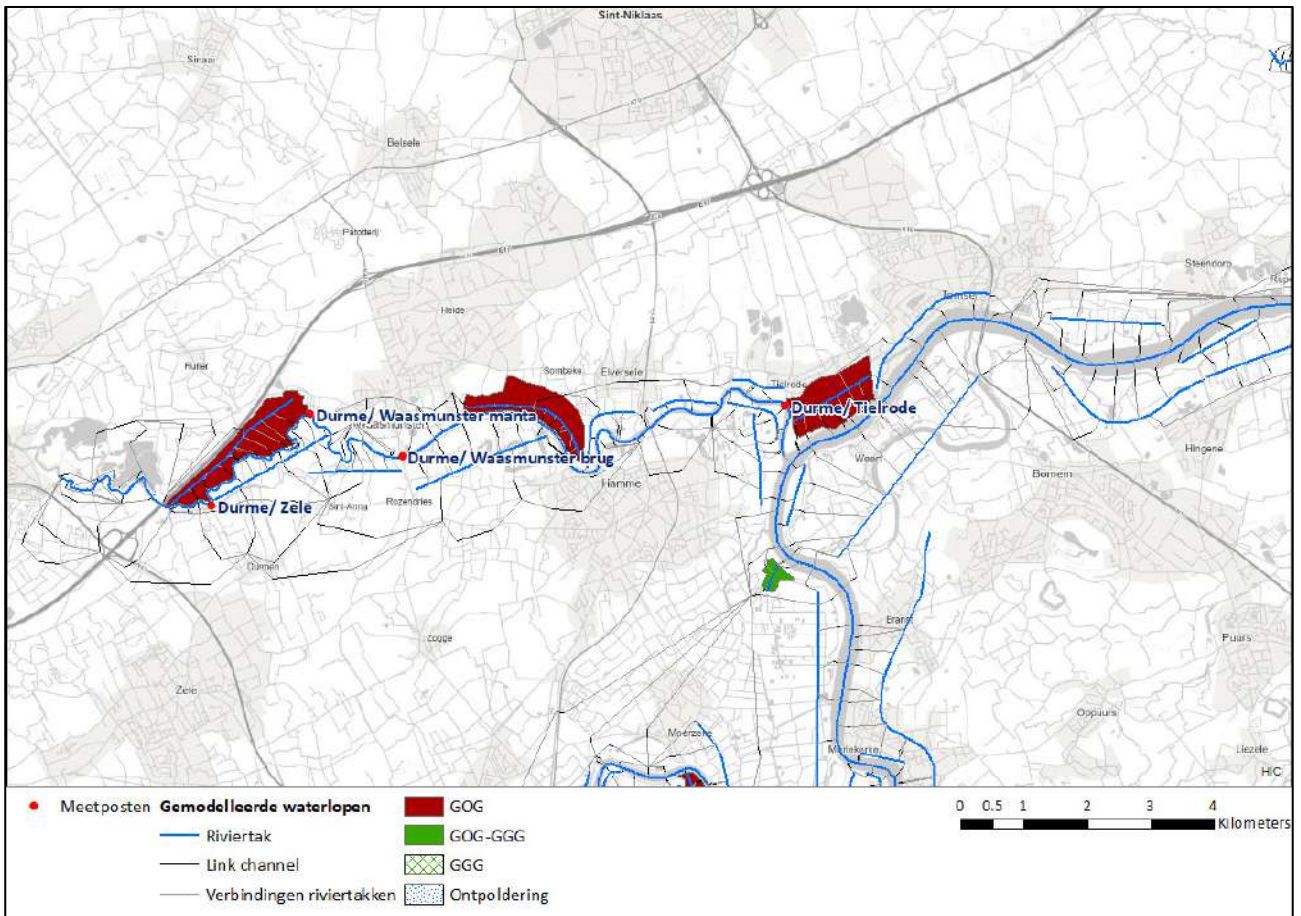
Figuur 10 geeft een overzicht van de meetposten langs de Durme.

De lengteprofielen in Figuur A8 tot en met Figuur A14 tonen het verschil in maximum waterpeil tussen de gemodelleerde waterpeilen met verschillende topofactoren voor de wind, en ten opzichte van de metingen. Het verschil tussen de maximum waterpeilen bij de verschillende topofactoren neemt over het lengteprofiel van de Durme slechts enkele centimeters af, uitgezonderd voor storm feb22-HW3 en feb-HW4, waar opwaarts het verschil terug toeneemt.

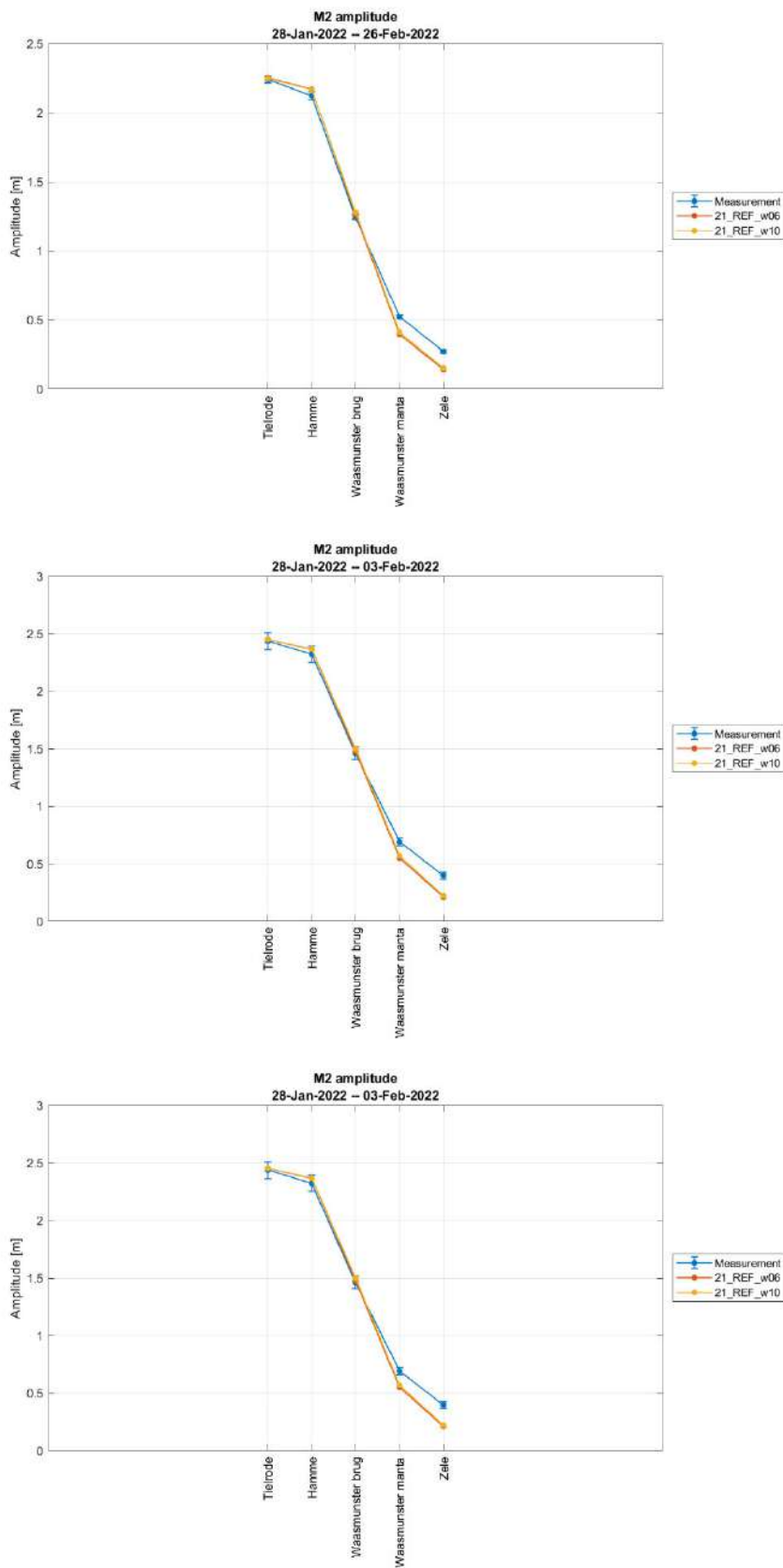
Figuur B18 tot en met Figuur B22 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Durme. Figuur C7 en Figuur C8 tonen de bias- en RMSE-waarden voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeksen voor de meetposten langs de Durme.

Over de volledige simulatieperiode worden de hoogwaters ter hoogte van de meetposten langs de Durme gemiddeld overschat, waarbij de bias voor REF21_w06 het grootst is ter hoogte van Waasmunster manta met 9 cm, voor voor REF21_w10 met 12 cm. De laagwaters ter hoogte van de meetposten langs de Durme worden gemiddeld onderschat te Tielrode, Hamme en Waasmunster brug, en overschat te Waasmunster manta en Zele. Ter hoogte van Hamme is de onderschatting het grootst, met een bias van -30 cm voor REF21_w06 en -25 cm voor REF21_w10. De overschatting is het grootst ter hoogte van Zele met een bias van 50 cm voor beide simulaties. De laagwaterpeilen in de Durme worden sterk beïnvloed door de bathymetrie en de ruwheid van de rivierbedding. Onder invloed van de bovenafvoer langs de pomp te Lokeren kunnen deze gewijzigd zijn sinds de vorige modelkalibratie.

Figuur 11 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Durme voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm jan22 en de periode van stormen feb22. Ter hoogte van Tielrode, Hamme en Waasmunster brug wordt de M2-amplitude overschat. Het verschil is echter steeds kleiner dan 5 cm. Ter hoogte van Waasmunster manta en Zele wordt de M2-amplitude onderschat met een verschil van circa 12 cm over de volledige simulatieperiode.



Figuur 10 – Situering meetposten Durme



V204 versie 04 track
 (c) Waterschap Rijnland, Laboratorium ZH2

Figuur 11 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Durme

3.3.3 Waterpeilen Rupel, Dijle, Benedennete en Zenne

Figuur 12 geeft een overzicht van de meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne.

Figuur C9 en Figuur C10 tonen de bias- en RMSE-waarden voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeksen voor de meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne.

Dijle

De lengteprofielen in Figuur A15 tot en met Figuur A21 tonen het verschil in maximum waterpeil tussen de gemodelleerde waterpeilen met verschillende topofactoren voor de wind, en ten opzichte van de metingen voor de Rupel en de Dijle.

Figuur B23 tot en met Figuur B25 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Dijle. De metingen ter hoogte van Rijmenam werden niet volledig opgenomen in het VIMM-datablok.

Voor storm jan22 wordt het maximum waterpeil ter hoogte van Mechelen Benedensluis en Mechelen opwaarts stuw onderschat in REF21_w06 en overschat in REF21_w10. Deze overschatting zorgt voor een grotere stijging opwaarts van GOG Zennegat omwille van een volledige vulling van het GOG. Voor storm feb22-HW5 wordt het maximum waterpeil ter hoogte van de meetposten langs de Dijle overschat in zowel REF21_w06 als REF21_w10. Ook hier zorgt een grotere (over)vulling van GOG Zennegat en GOG Bovenzanden voor een toename van het maximum waterpeil in REF21_w10 ten opzichte van REF21_w06. Bij de andere stormen neemt het verschil in maximum waterpeil langs het lengteprofiel Rupel-Dijle, tussen REF21_w10 en REF21_w06 naar opwaarts af.

Ter hoogte van de meetposten te Mechelen worden over de volledige simulatieperiode de hoogwaters gemiddeld overschat en de laagwaters gemiddeld onderschat. De overschatting van de hoogwaters is het grootst ter hoogte van Mechelen Benedensluis, met een bias van 11 cm voor REF21_w06 en 15 cm voor REF21_w10. Ook de onderschatting van de laagwaters is het grootst ter hoogte van deze meetposten, met een bias van respectievelijk -33 cm en -31 cm.

Figuur 13 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Dijle voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm jan22 en de periode van stormen feb22. Het verschil tussen gemeten en gesimuleerde M2-amplitude ter hoogte van Mechelen opwaarts stuw bedraagt minder dan 2 cm voor de volledige simulatieperiode. Ter hoogte van Mechelen Benedensluis bedraagt dit verschil echter bijna 15 cm. Dit is te wijten aan de sterke onderschatting van de laagwaters ter hoogte van deze meetpost.

Benedennete

De lengteprofielen in Figuur A22 tot en met Figuur A28 tonen het verschil in maximum waterpeil tussen de gemodelleerde waterpeilen met verschillende topofactoren voor de wind, en ten opzichte van de metingen voor de Rupel en de Benedennete.

Figuur B26 tot en met Figuur B28 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Benedennete.

Langs het lengteprofiel van de Benedennete varieert het verschil in maximum waterpeilen tussen REF21_w06 en REF21_w10 beperkt naar opwaarts. Ter hoogte van GOG Anderstadt afwaarts wordt het verschil bij storm feb22-HW1, feb22-HW2 en feb22-HW5 iets groter. Voor stormen jan22 en feb22-HW2 worden de gemeten maximum waterpeilen ter hoogte van meetposten langs de Nete zowel voor REF21_w06 als voor REF21_w10 onderschat, en voor stormen feb22-HW1, feb22-HW3, feb22-HW4, feb22-HW6, uitgezonderd ter hoogte van Lier Molbrug, overschat. Voor storm feb22-HW5 worden de maximum waterpeilen ter hoogte van de meetposten onderschat bij REF21_w06, met maximum 6 cm en overschat bij REF21_w10 met 1 cm.

Over de volledige simulatieperiode worden de hoogwaters gemiddeld overschat, met een bias van maximum 6 cm voor REF21_w06 en maximum 11 cm voor REF21_w10. Ter hoogte van de meetpost te Rumst worden

de laagwaters gemiddeld onderschat, met een bias van 18 cm voor REF21_w06 en 13 cm voor REF21_w10. Ter hoogte van de meetposten te Duffel sluis en Lier molbrug worden de laagwaters gemiddeld overschat met een bias van 9 cm voor REF21_w06 en 10 tot 12 cm voor REF21_w10.

Figuur 14 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Benedennete voor de volledige simulatieperiode, de periode van de storm jan22 en de periode van de stormen feb22. Ter hoogte van de meetpost te Rumst wordt de M2-amplitude overschat met circa 5 cm in REF21_w06 en 4 cm in REF21_w10. Ter hoogte van de meetposten te Duffel sluis en Lier molbrug wordt de M2-amplitude onderschat met respectievelijk circa 8 cm en circa 9 cm voor beide simulaties.

Zenne

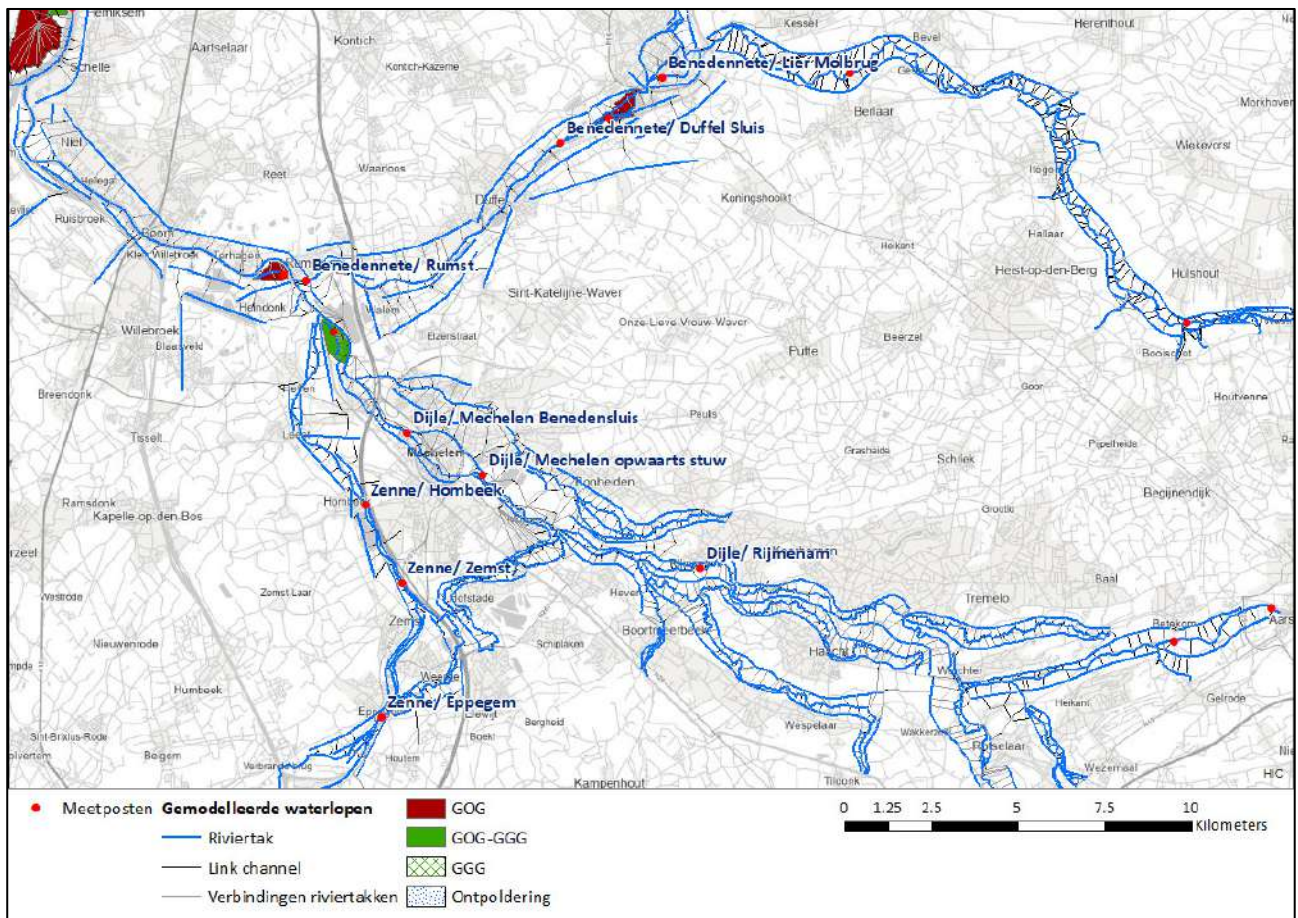
De lengteprofielen in Figuur A29 tot en met Figuur A35 tonen het verschil in maximum waterpeil tussen de gemodelleerde waterpeilen met verschillende topofactoren voor de wind, en ten opzichte van de metingen voor de Rupel en de Zenne.

Figuur B29 tot en met Figuur B31 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Zenne. Omdat het getij niet steeds doordringt tot de meetpost te Epegem is de bepaling van de hoog- en laagwaters ter hoogte van deze meetpost minder nauwkeurig.

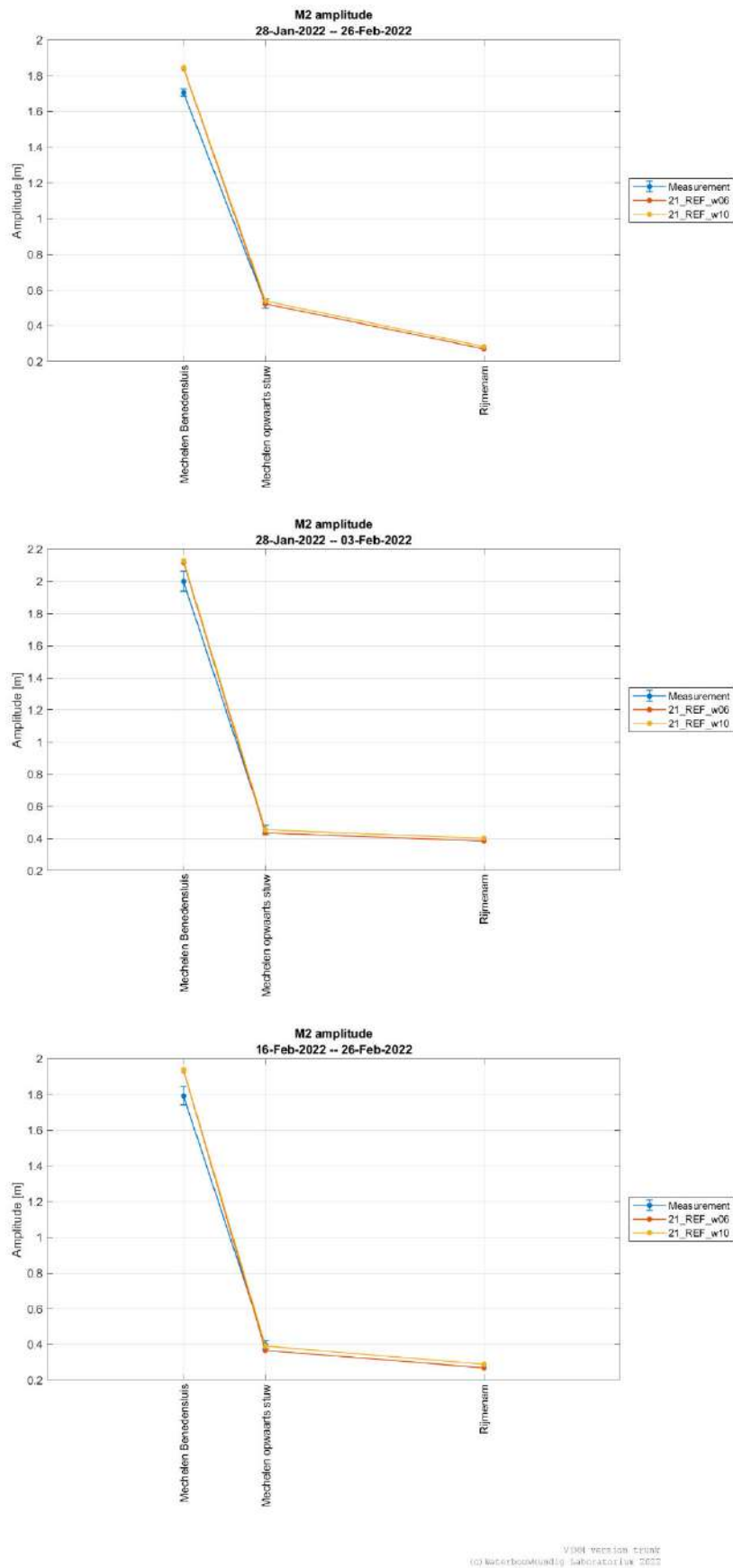
De maximum hoogwaterpeilen ter hoogte van de meetposten te Hombeek en Zemst worden voor alle stormen, bij zowel REF21_w06 en REF21_w10 overschat, uitgezonderd voor de meetpost te Zemst voor storm jan22 bij REF21_w06. Ter hoogte van Hombeek bedraagt het verschil tussen het gesimuleerde en gemeten stormhoogwater maximum 10 cm voor storm feb22-HW4, bij REF21_w06, en 23 cm voor storm feb22-HW3 bij REF21_w10. Ter hoogte van Zemst bedraagt dit verschil maximum 6 cm voor stormen feb22-HW3 en -HW4 bij REF21_w06, en 20 cm voor storm feb22-HW3 bij REF21_w10.

Over de volledige tijdreeks worden de hoogwaters ter hoogte van Zemst en Hombeek gemiddeld overschat met een bias van respectievelijk 9 en 12 cm voor REF21_w06, en 13 en 16 cm voor REF21_w10. De laagwaters ter hoogte van Zemst worden onderschat met een bias van -17 cm voor REF21_w06 en REF21_w10. Ter hoogte van de meetpost te Hombeek worden de laagwaters overschat met een bias van 13 cm.

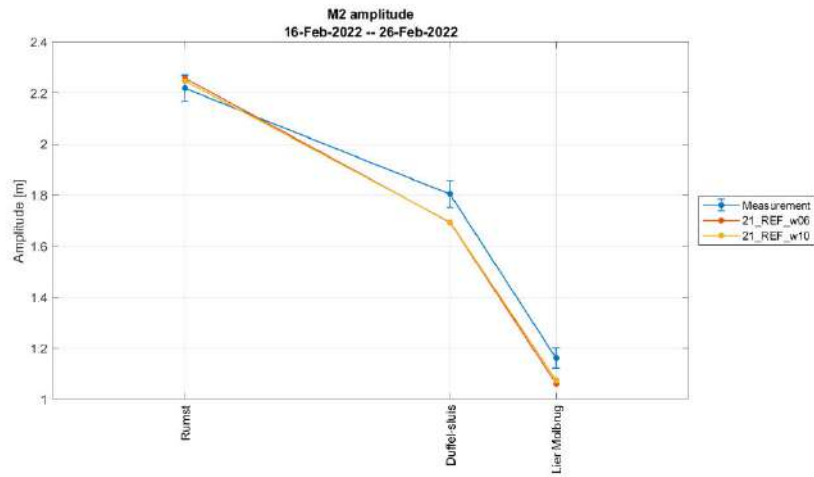
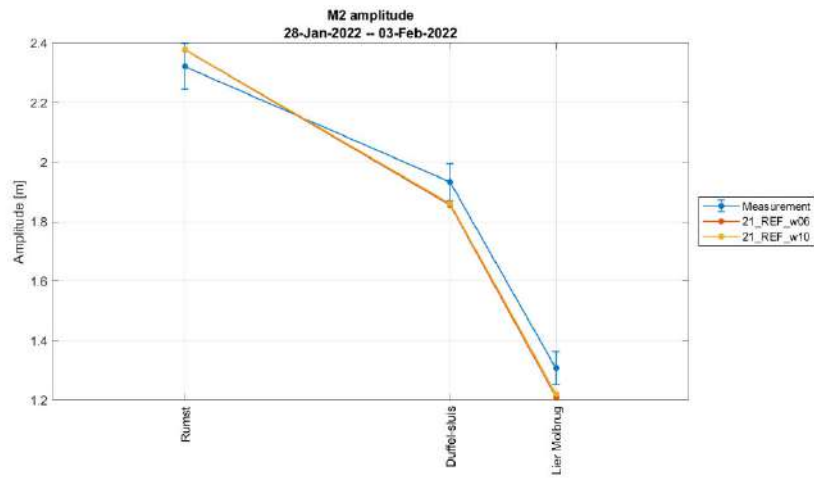
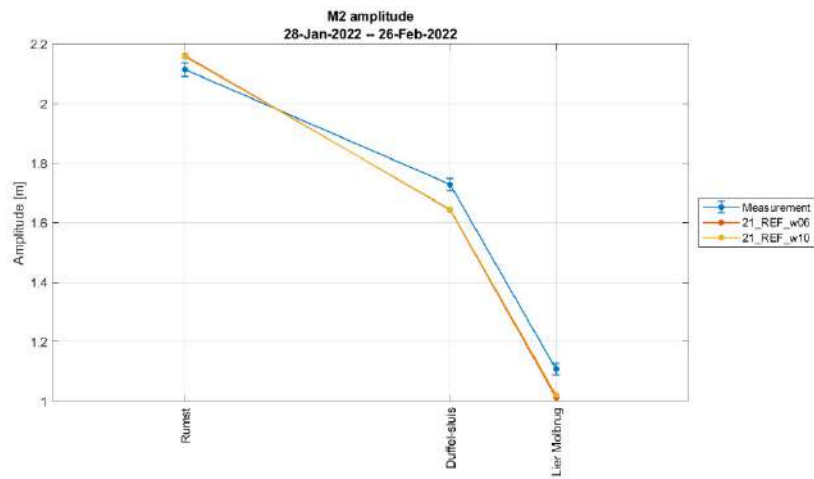
Figuur 15 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Zenne voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm jan22 en de periode van stormen feb22. Ter hoogte van de meetpost te Zemst wordt de M2-amplitude overschat met circa 9 cm in REF21_w06 en 11 cm in REF21_w10. Ter hoogte van de meetpost te Hombeek wordt de M2-amplitude onderschat met respectievelijk circa 4 cm en circa 3 cm.



Figuur 12 – Situering meetposten Dijle, Benedennete en Zenne

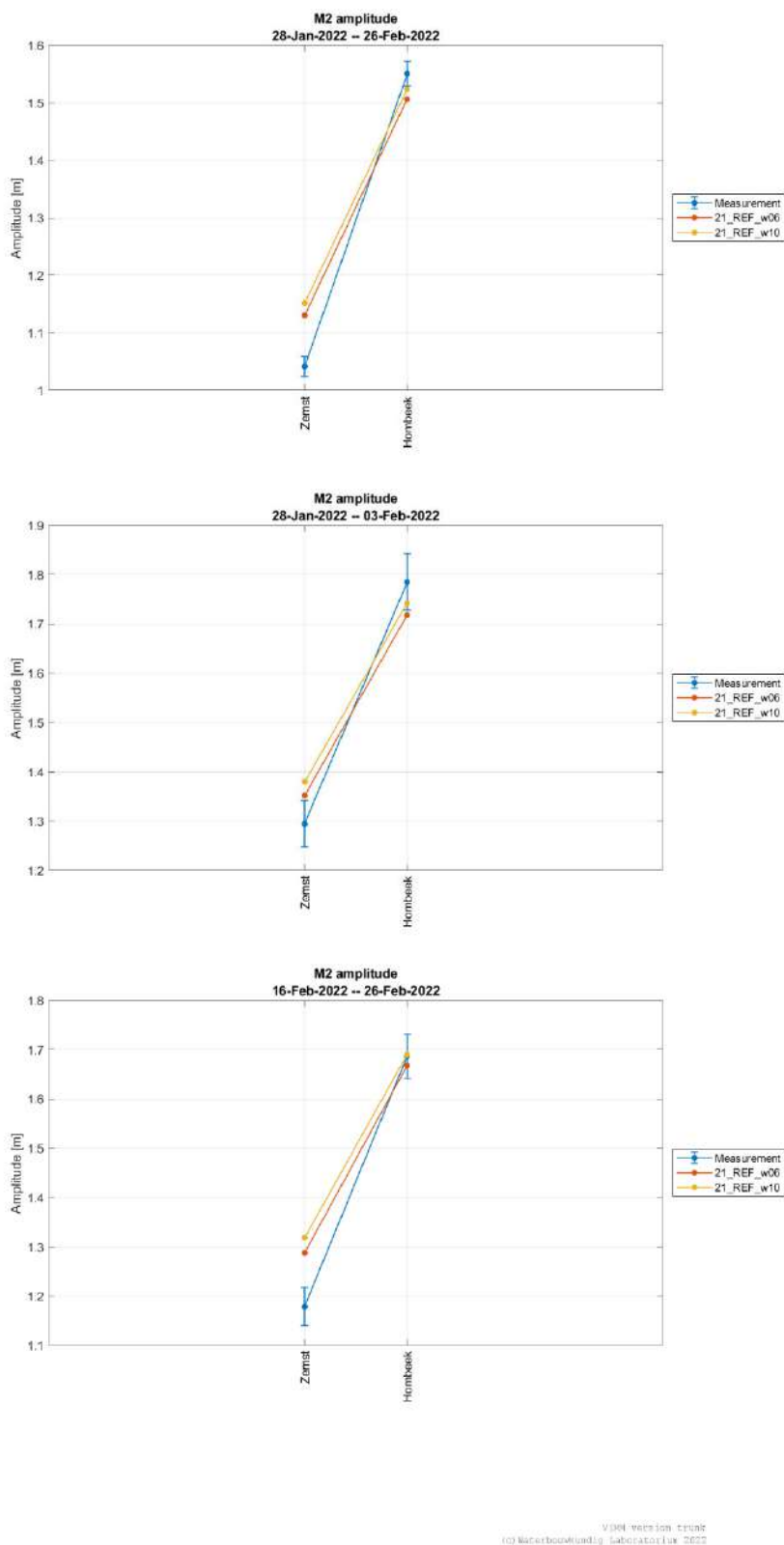


Figuur 13 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Dijle



V304 version 03/06
© Waterbouwkundig Laboratorium 2022

Figuur 14 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Benedennete



Figuur 15 – M2 amplitude REF21_w06 en REF21_w10 versus metingen – Zenne

3.3.4 Tabel Hmax stormen

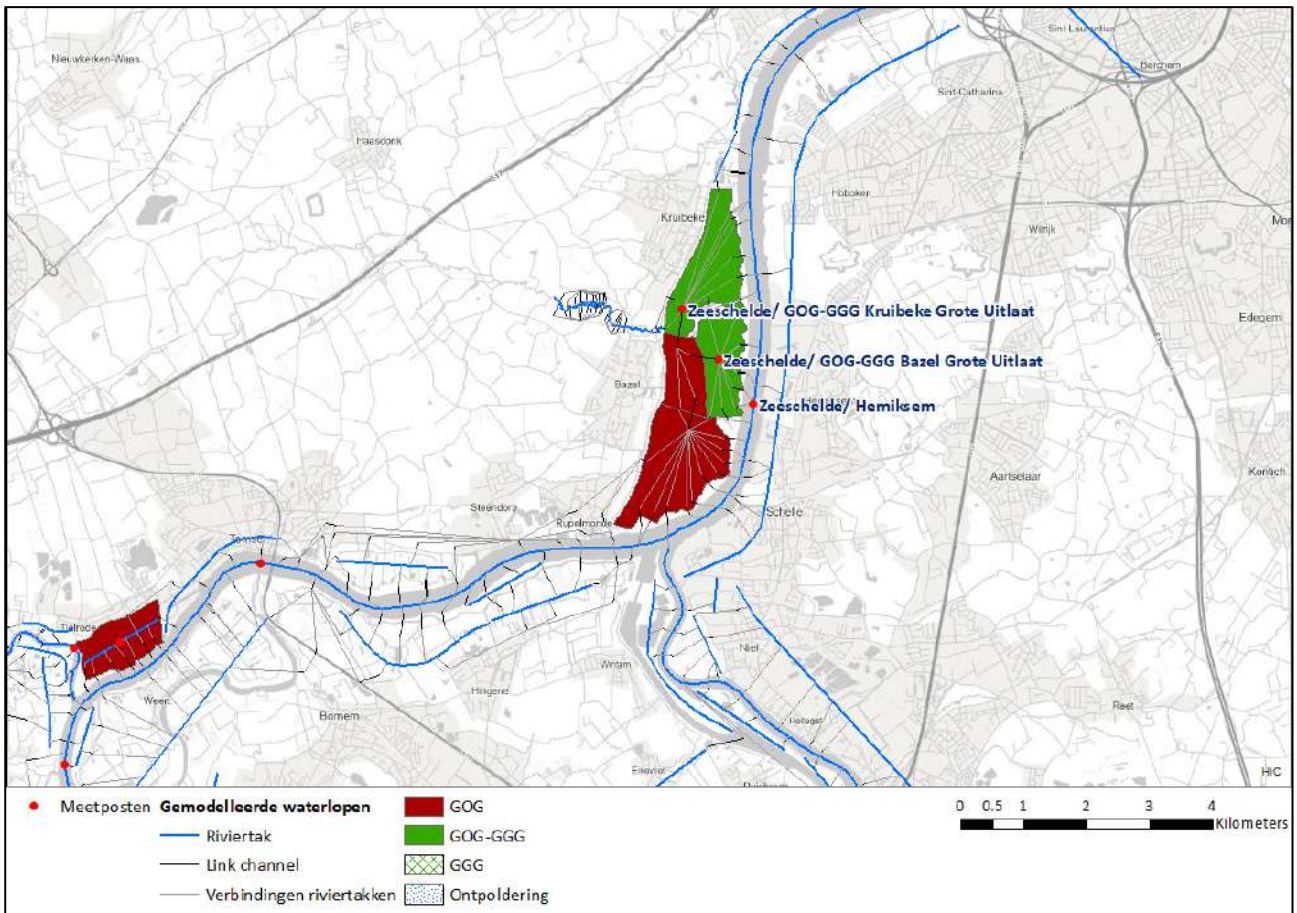
		jan22					feb22-HW1					feb22-HW2					feb22-HW3					feb22-HW4					feb22-HW5					feb22-HW6				
		Hmax gemeten [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w06 [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w10 [mTAW]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w06 [cm]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w10 [cm]	Hmax gemeten [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w06 [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w10 [mTAW]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w06 [cm]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w10 [cm]	Hmax gemeten [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w06 [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w10 [mTAW]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w06 [cm]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w10 [cm]	Hmax gemeten [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w06 [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w10 [mTAW]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w06 [cm]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w10 [cm]	Hmax gemeten [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w06 [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w10 [mTAW]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w06 [cm]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w10 [cm]	Hmax gemeten [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w06 [mTAW]	Hmax gesimuleerd REF21_w10 [mTAW]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w06 [cm]	Vershil gesimuleerd - gemeten REF21_w10 [cm]					
Wester- schelde	Vlissingen	5.92	5.92	5.92	0	0	5.18	5.18	5.18	0	0	5.35	5.35	5.35	0	0	5.18	5.18	5.18	0	0	5.56	5.56	5.56	0	0	5.89	5.89	5.89	0	0	5.61	5.61	5.61	0	0
	Terneuzen	6.26	6.19	6.24	-7	-2	5.49	5.49	5.53	0	4	5.68	5.63	5.66	-5	-2	5.49	5.55	5.65	6	16	5.86	5.85	5.89	-1	3	6.23	6.15	6.19	-8	-4	5.91	5.87	5.89	-4	-2
	Hansweert	6.50	6.37	6.43	-13	-7	5.74	5.76	5.86	2	12	5.86	5.87	5.92	1	6	5.96	5.98	6.20	2	24	6.11	6.09	6.16	-2	5	6.53	6.42	6.51	-11	-2	6.09	6.07	6.09	-2	0
	Bath	6.81	6.71	6.80	-10	-1	6.12	6.10	6.22	-2	10	6.21	6.17	6.24	-4	3	6.40	6.41	6.73	1	33	6.39	6.43	6.54	4	15	6.77	6.72	6.86	-5	9	6.38	6.37	6.42	-1	4
Zeeschelde	Prosperpolder	6.85	6.78	6.87	-7	2	6.19	6.17	6.30	-2	11	6.28	6.25	6.32	-3	4	6.43	6.46	6.78	3	35	6.42	6.50	6.61	8	19	6.79	6.74	6.88	-5	9	6.42	6.45	6.50	3	8
	Liefkenshoek	6.95	6.86	6.95	-9	0	6.28	6.24	6.36	-4	8	6.34	6.32	6.39	-2	5	6.45	6.50	6.81	5	36	6.48	6.55	6.66	7	18	6.83	6.77	6.91	-6	8	6.50	6.52	6.57	2	7
	Kallo	7	6.89	6.98	-11	-2	6.31	6.28	6.40	-3	9	6.36	6.35	6.42	-1	6	6.46	6.52	6.84	6	38	6.49	6.59	6.70	10	21	6.85	6.79	6.94	-6	9	6.52	6.57	6.62	5	10
	Antwerpen	6.93	6.88	6.98	-5	5	6.31	6.29	6.41	-2	10	6.34	6.36	6.43	2	9	6.56	6.54	6.85	-2	29	6.52	6.61	6.73	9	21	6.91	6.85	6.96	-6	5	6.54	6.59	6.63	5	9
	Hemiksem	7.01	6.96	7.02	-5	1	6.37	6.40	6.52	3	15	6.46	6.47	6.54	1	8	6.63	6.66	6.94	3	31	6.62	6.73	6.84	11	22	7.00	6.94	7.03	-6	3	6.63	6.70	6.74	7	11
	Temse	7.07	7.02	7.07	-5	0	6.47	6.51	6.63	4	16	6.58	6.57	6.64	-1	6	6.64	6.75	7.00	11	36	6.73	6.82	6.92	9	19	7.04	6.99	7.07	-5	3	6.75	6.79	6.83	4	8
	Driegoten	7.08	7.01	7.05	-7	-3	6.49	6.52	6.64	3	15	6.59	6.58	6.65	-1	6	6.62	6.76	6.99	14	37	6.73	6.84	6.93	11	20	7.00	6.99	7.05	-1	5	6.77	6.81	6.85	4	8
	Sint-Amands	7.13	6.99	7.03	-14	-10	6.55	6.53	6.65	-2	10	6.65	6.58	6.65	-7	0	6.69	6.75	6.97	6	28	6.80	6.84	6.93	4	13	7.05	6.99	7.05	-6	0	6.85	6.82	6.86	-3	1
	Dendermonde	6.81	6.81	6.86	0	5	6.32	6.40	6.54	8	22	6.37	6.44	6.51	7	14	6.35	6.57	6.78	22	43	6.55	6.72	6.80	17	25	6.84	6.84	6.89	0	5	6.64	6.71	6.76	7	12
	Schoonaarde	6.47	6.44	6.46	-3	-1	6.18	6.25	6.35	7	17	6.19	6.23	6.30	4	11	6.09	6.30	6.40	21	31	6.38	6.42	6.45	4	7	6.49	6.46	6.50	-3	1	6.43	6.42	6.43	-1	0
	Uitbergen	6.38	6.38	6.39	0	1	6.14	6.20	6.33	6	19	6.14	6.17	6.22	3	8	6.05	6.22	6.35	17	30	6.33	6.37	6.40	4	7	6.42	6.40	6.42	-2	0	6.37	6.37	6.39	0	2
	Wetteren	6.35	6.36	6.38	1	3	6.14	6.17	6.26	3	12	6.10	6.14	6.19	4	9	6.02	6.18	6.29	16	27	6.27	6.33	6.37	6	10	6.37	6.39	6.42	2	5	6.33	6.31	6.34	-2	1
Melle	6.28	6.38	6.41	10	13	6.07	6.15	6.26	8	19	6.02	6.08	6.15	6	13	6.01	6.13	6.27	12	26	6.20	6.34	6.39	14	19	6.34	6.41	6.45	7	11	6.28	6.33	6.36	5	8	
Durme	Tielrode	7.16	7.00	7.05	-16	-11	6.55	6.53	6.66	-2	11	6.66	6.60	6.66	-6	0	6.68	6.77	6.99	9	31	6.79	6.84	6.93	5	14	7.05	6.98	7.05	-7	0	6.82	6.82	6.85	0	3
	Hamme	7.08	6.99	7.03	-9	-5	6.59	6.58	6.70	-1	11	6.68	6.65	6.71	-3	3	6.68	6.80	6.97	12	29	6.81	6.86	6.92	5	11	7.03	6.97	7.03	-6	0	6.84	6.84	6.88	0	4
	Waasmunster brug	6.90	6.89	6.90	-1	0	6.59	6.64	6.74	5	15	6.69	6.71	6.76	2	7	6.65	6.80	6.88	15	23	6.75	6.84	6.86	9	11	7.07	6.88	6.90	-19	-17	6.79	6.84	6.85	5	6
	Waasmunster manta	6.79	6.83	6.84	4	5	6.50	6.59	6.69	9	19	6.61	6.65	6.70	4	9	6.60	6.74	6.82	14	22	6.69	6.78	6.80	9	11	6.81	6.86	6.87	5	6	6.73	6.81	6.82	8	9
	Zelee	6.67	6.67	6.70	0	3	6.39	6.36	6.45	-3	6	6.46	6.39	6.44	-7	-2	6.42	6.50	6.64	8	22	6.54	6.56	6.63	2	9	6.77	6.84	6.85	7	8	6.71	6.77	6.78	6	7
Dijle	Mechelen benedensluis	6.90	6.87	7.06	-3	16	6.62	6.68	6.73	6	11	6.69	6.71	6.74	2	5	6.75	6.78	6.87	3	12	6.75	6.80	6.83	5	8	6.89	7.11	7.24	22	35	6.81	6.82	6.83	1	2
	Mechelen opwaarts stuw	7.00	6.89	7.05	-11	5	6.75	6.72	6.79	-3	4	6.81	6.74	6.78	-7	-3	6.87	6.83	6.95	-4	8	6.87	6.86	6.91	-1	4	6.98	7.13	7.21	15	23	6.94	6.91	6.92	-3	-2
	Rijmenam	7.15	6.99	7.11	-16	-4	7.02	6.92	6.98	-10	-4	7.05	6.95	6.97	-10	-8	7.07	6.97	7.06	-10	-1	7.06	6.99	7.02	-7	-4	7.18	7.24	7.34	6	16	7.27	7.12	7.13	-15	-14
Benedenete	Rumst	7.00	6.93	6.96	-7	-4	6.51	6.58	6.67	7	16	6.61	6.62	6.68	1	7	6.72	6.76	6.92	4	20	6.73	6.80	6.86	7	13	6.99	6.93	7.00	-6	1	6.77	6.80	6.83	3	6
	Duffel sluis	6.98	6.87	6.90	-11	-8	6.48	6.56	6.66	8	18	6.56	6.63	6.66	7	10	6.69	6.72	6.88	3	19	6.70	6.79	6.85	9	15	6.92	6.90	6.93	-2	1	6.78	6.83	6.86	5	8
	Lier molbrug	6.80	6.64	6.66	-16	-14	6.38	6.38	6.52	0	14	6.46	6.42	6.50	-4	4	6.51	6.51	6.66	0	15	6.60	6.61	6.67	1	7	6.81	6.76	6.82	-5	1	6.75	6.72	6.74	-3	-1
Zenne	Hombeek	7.02	7.06	7.09	4	7	6.67	6.75	6.84	8	17	6.76	6.80	6.84	4	8	6.83	6.92	7.06	9	23	6.83	6.93	6.98	10	15	6.99	7.05	7.10	6	11	6.91	6.96	6.98	5	7
	Zemst	7.12	7.10	7.13	-2	1	6.76	6.81	6.89	5	13	6.81	6.85	6.90	4	9	6.91	6.97	7.11	6	20	6.91	6.97	7.02	6	11	7.07	7.10	7.15	3	8	7.00	7.01	7.03	1	3
	Epegem	7.76	7.69	7.70	-7	-6	7.76	7.80	7.80	4	4	7.80	7.79	7.79	-1	-1	7.78	7.74	7.77	-4	-1	7.58	7.63	7.64	5	6	8.52	8.12	8.12	-40	-40	8.19	7.99	8.00	-20	-19

3.4 Resultaten meetposten GOG's

3.4.1 GOG-GGG Kruibeke

Het GOG-GGG Kruibeke-Bazel-Rupelmonde werd op 3 oktober 2015 in gebruik genomen. Tijdens de storm van januari 2018 kende dit gebied voor het eerst GOG-werking. Het GOG-GGG Kruibeke kent tevens GGG-werking sinds juni 2017. Dit gebied omvat een overlooppdijk en een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie met 15 sluizen. Figuur 16 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Zeeschelde te Hemiksem. Tabel 7 geeft een overzicht van enkele kenmerken van het gebied.

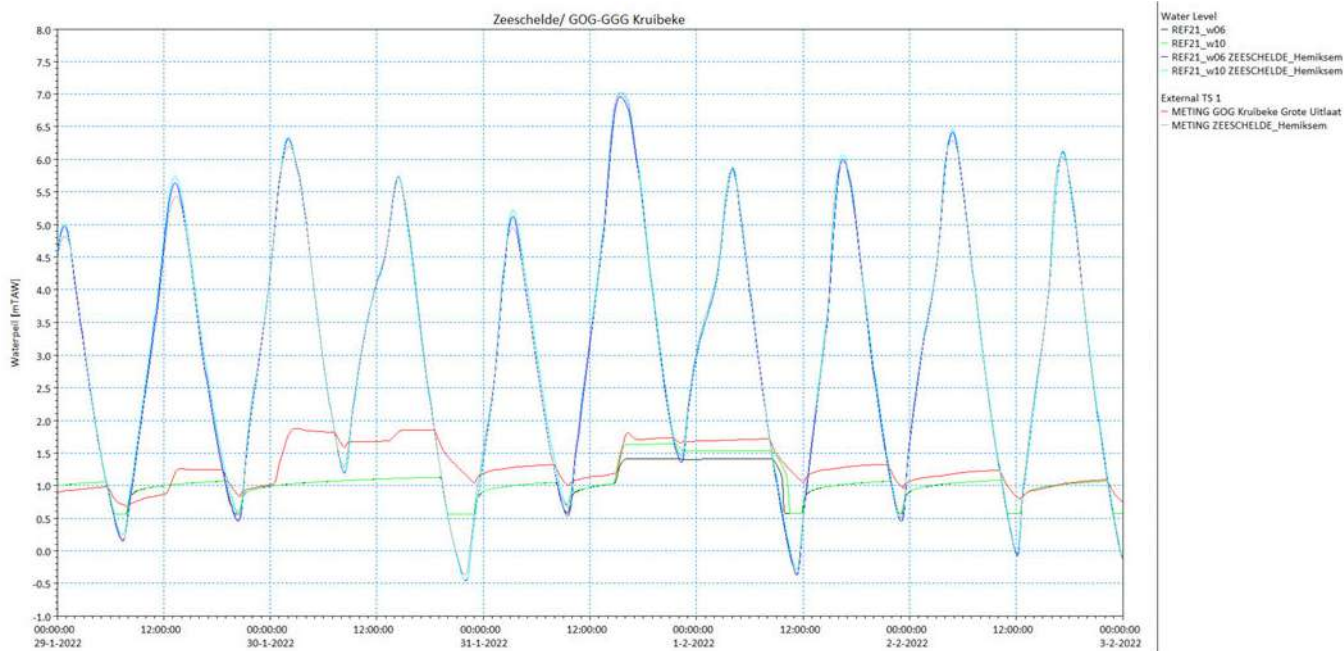
Figuur 17 en Figuur 18 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG-GGG Kruibeke ter hoogte van de grote uitlaat, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde te Hemiksem, voor stormen jan22 en feb22. De inwateringssluizen van het GGG werden gesloten tijdens de volledige simulatieperiode. Het GOG trad in werking tijdens stormen jan22 en feb22-HW5. Tijdens storm jan22 wordt het maximum waterpeil in het GOG onderschat in beide simulaties, ondanks een beperkt verschil in gemeten en gesimuleerd hoogwaterpeil te Hemiksem. Bij storm feb22-HW5 wordt het maximum gemeten waterpeil in het GOG onderschat met 15 cm door REF21_w06 en overschat met 20 cm door REF21_w10. Voor en na de stormperioden wordt het gemeten waterpeil in het GOG redelijk goed benaderd door het gesimuleerd waterpeil, met uitzondering van stormen feb22-HW3 en -HW4, waar een overschatting optreedt door REF21_w10. De schommeling van het waterpeil in het GOG tussen de stormen is toe te schrijven aan de afvoer van de Barbierbeek die door het gebied stroomt.



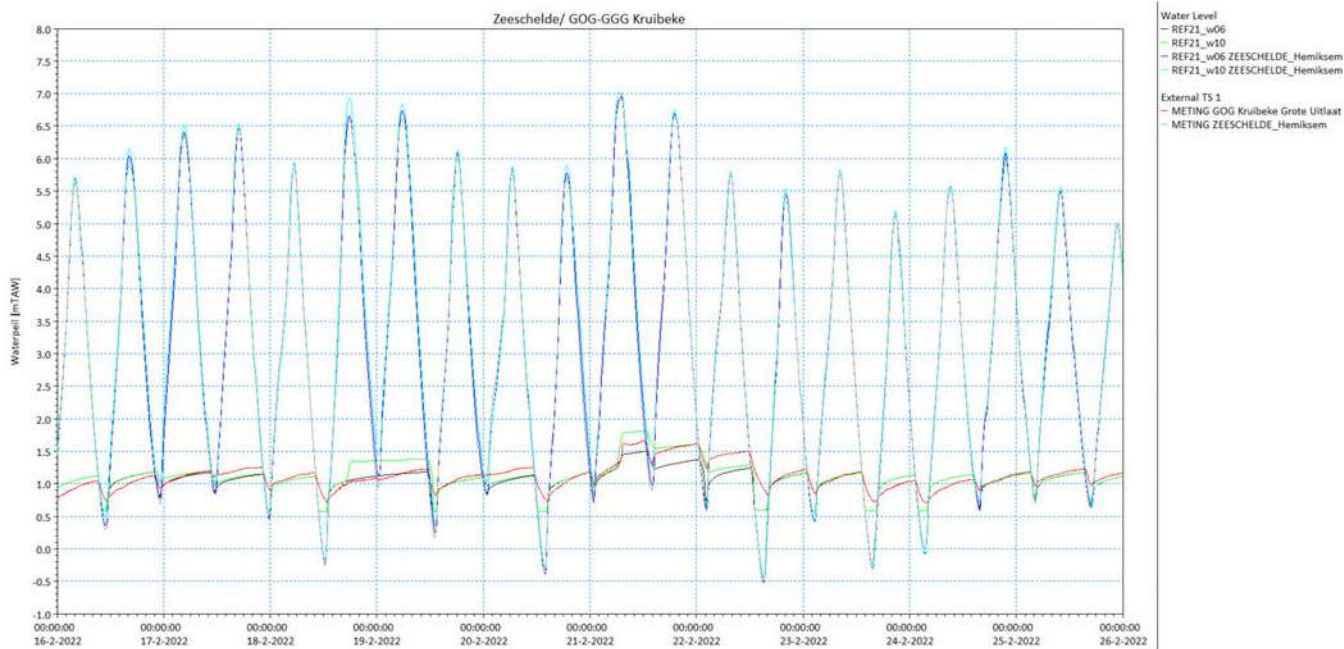
Figuur 16 – Situering meetposten GOG-GGG Kruikeke en Bazel

Tabel 7 – Kenmerken GOG-GGG Kruikeke

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overlooptdijk	+6.8	Opmeting
Inwatering GGG (15 kokers)	+4.5	Ontwerp
Uitwatering GOG (15 kokers)	+0.5	Ontwerp



Figuur 17 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruibeke Grote Uitlaat – jan22



Figuur 18 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruibeke Grote Uitlaat – feb22

3.4.2 GOG-GGG Bazel

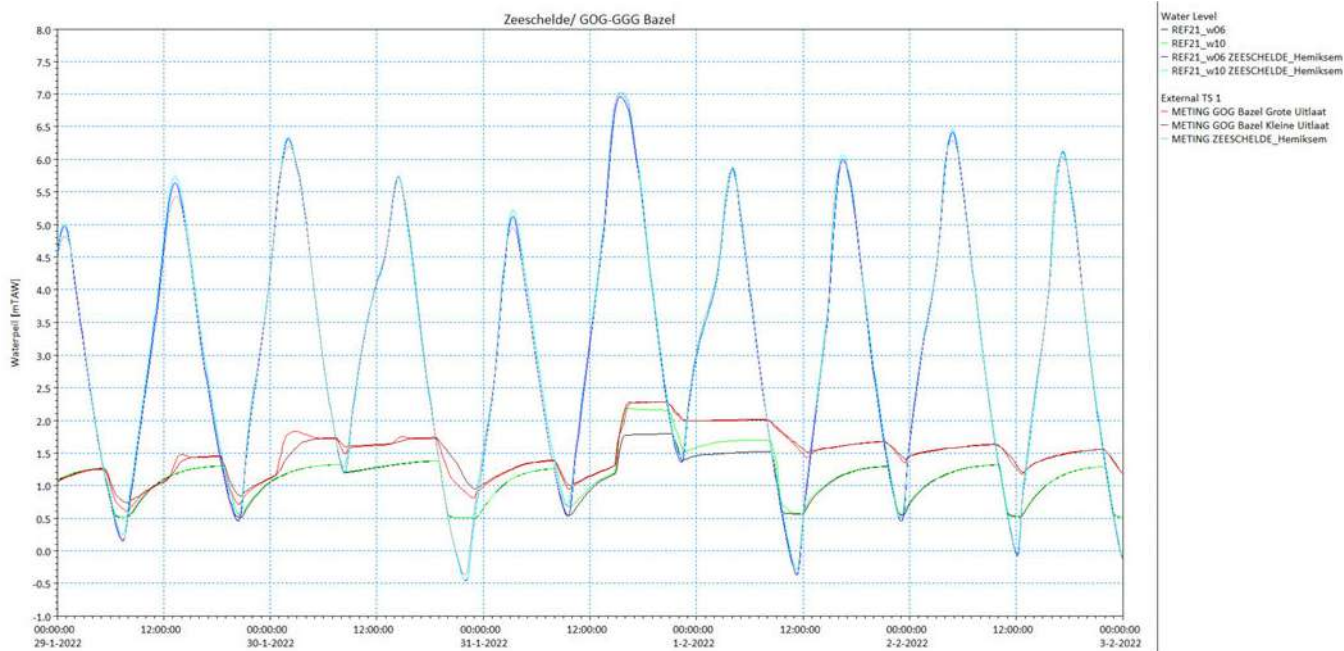
Het GOG Bazel omvat een overlooptdijk, twee inwateringsstructuren en drie uitwateringsstructuren. Het gebied wordt in twee gedeeld door een lage dijk in het midden. Hierdoor kent enkel het oostelijke deel GGG-werking. Figuur 16 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Zeeschelde te Hemiksem. Tabel 8 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 19 en Figuur 20 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG-GGG Bazel ter hoogte van de grote (noord) en kleine (zuid) uitlaat, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde te Hemiksem, voor stormen jan22 en feb22. De inwateringssluizen van het GGG werden gesloten tijdens de volledige simulatieperiode. Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van de noordelijke uitlaat.

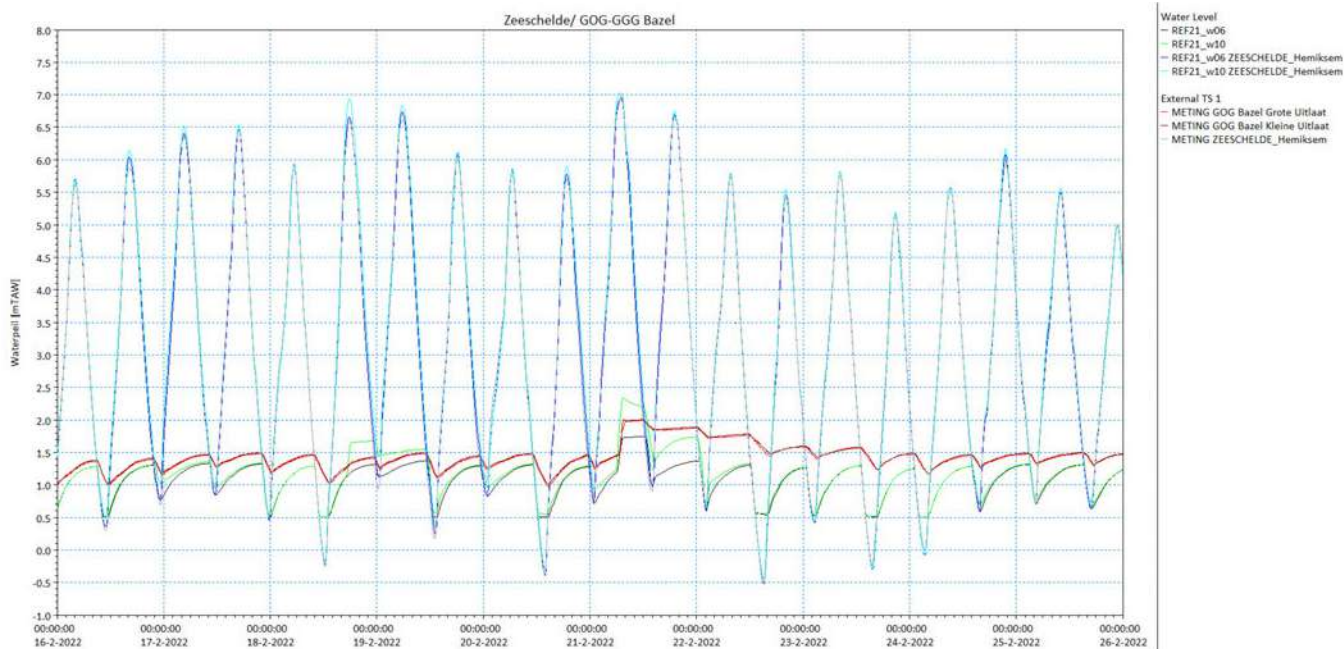
Het GOG trad in werking tijdens de stormen jan22 en feb22-HW5. Tijdens storm jan22 wordt het maximum waterpeil in het GOG onderschat in beide simulaties, ondanks een beperkt verschil in gemeten en gesimuleerd hoogwaterpeil te Hemiksem. Bij storm feb22-HW5 wordt het maximum gemeten waterpeil in het GOG onderschat met 25 cm door REF21_w06 en overschat met 35 cm door REF21_w10. Voor en na de stormperiodes daalt het gesimuleerde waterpeil, met de extra kleine koker, sneller en lager dan het gemeten waterpeil in het gebied. Enerzijds kan de gesimuleerde daling versneld worden door de extra kleine koker, of anderszijds kan dit wijzen op een mogelijke verstopping of opstuwung in de uitwateringskokers op het terrein.

Tabel 8 – Kenmerken GOG-GGG Bazel

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overlooptdijk	+6.8	Opmeting
Inwatering noord	+5.0	Terrein
Uitwatering 1 noord	+0.5	Terrein
Inwatering zuid	+5.1	Terrein
Uitwatering 2 zuid	+0.5	Terrein
Uitwatering 3	+0.5	Terrein



Figuur 19 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel – jan22



Figuur 20 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel – feb22

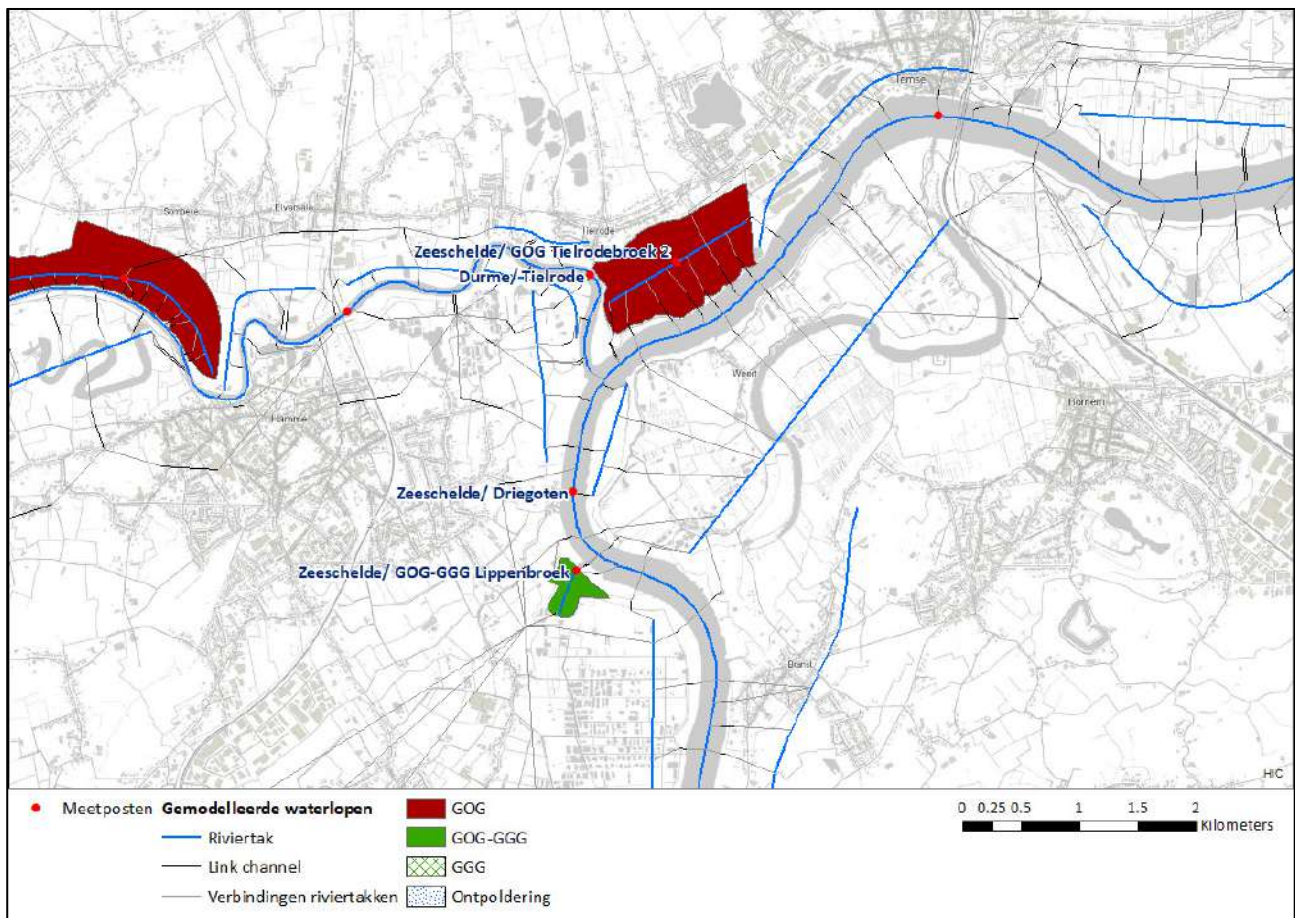
3.4.3 GOG Tielrodebroek

GOG Tielrodebroek werd in werking gesteld in november 1982. Dit gebied heeft een overlooppdijk en twee uitwateringsstructuren. Figuur 21 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en de Durme te Tielrode. Tabel 9 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 22 en Figuur 23 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Tielrodebroek ter hoogte van de westelijke uitlaat, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Durme te Tielrode, voor stormen jan22 en feb22. Op basis van de metingen werd het drempelpeil van Sluis Veyt verhoogd in het model. Aan deze uitwateringsconstructie werden recent werken uitgevoerd. Nieuwe plannen waren nog niet beschikbaar tijdens de studie. Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van de oostelijke uitlaat, Sluis Veyt.

Tijdens storm jan22 wordt het gemeten waterpeil in het GOG vrij goed benaderd door REF21_w06. Het gebied lijkt echter sneller uit te wateren dan gesimuleerd wordt, ondanks een hoger gemeten laagwaterpeil.

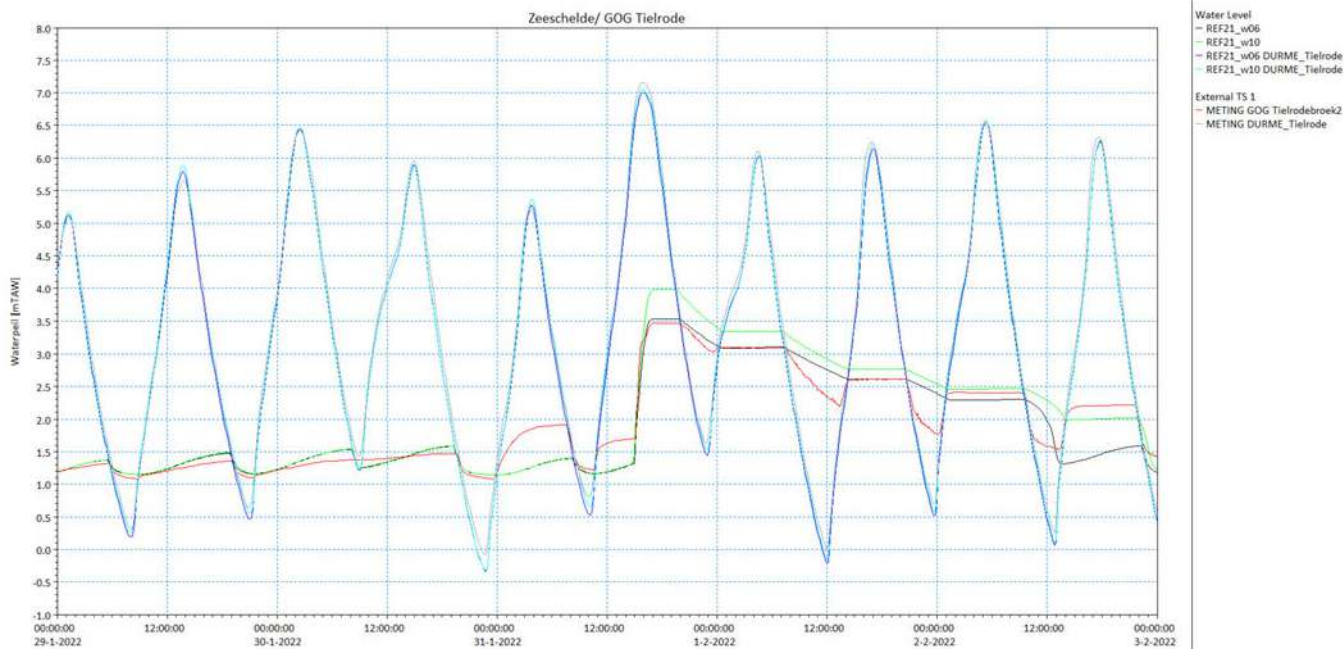
Tijdens de stormen van feb22 wordt het waterpeil in het GOG overschat. Tijdens feb22-HW1 en -HW2 treedt in REF21_w10 GOG-werking op, terwijl dit in werkelijkheid niet zo was. Dit is ook zo voor feb22-HW3, bij zowel REF21_w06 en REF21_w10. Dit is te wijten aan een overschatting van het waterpeil in de Zeeschelde en Durme ter hoogte van het GOG. Ondanks een onderschatting van het waterpeil in de Zeeschelde en Durme wordt het maximum waterpeil in het GOG tijdens stormen feb22-HW5 en -HW6 overschat. Een correcte weergave van het volume of de bergingscapaciteit is sterk afhankelijk van de topografische opmetingen in het gebied. Mogelijk zijn deze niet meer actueel in het model.



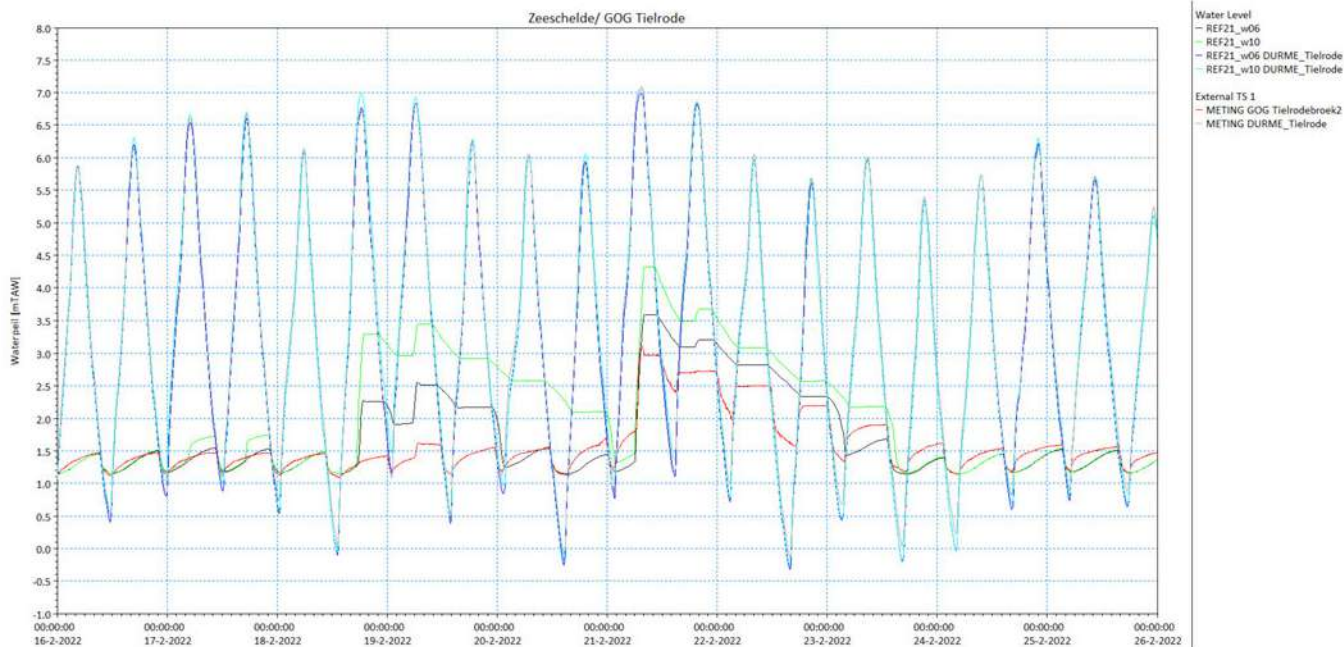
Figuur 21 – Situering meetposten GOG Tielrodebroek en GOG-GGG Lipperbroek

Tabel 9 – Kenmerken GOG Tielrodebroek

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overloopdijk	+6.65	Opmeting
Uitwatering 1 oost 'Sluis Veyt'	+1.1	Inschatting
Uitwatering 2 west	+2.78	Opmeting



Figuur 22 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Tielrodebroek – jan22



Figuur 23 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Tielrodebroek – feb22

3.4.4 GOG-GGG Lippenbroek

Het GOG-GGG Lippenbroek werd in maart 2016 in werking gesteld. Dit gebied omvat een korte overloopdijk, een inwateringsstructuur en een uitwateringsstructuur. Figuur 21 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Zeeschelde te Driegoten. Tabel 10 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 24 en Figuur 25 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG-GGG Lippenbroek ter hoogte van de uitwatering, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde te Driegoten, voor stormen jan22 en feb22.

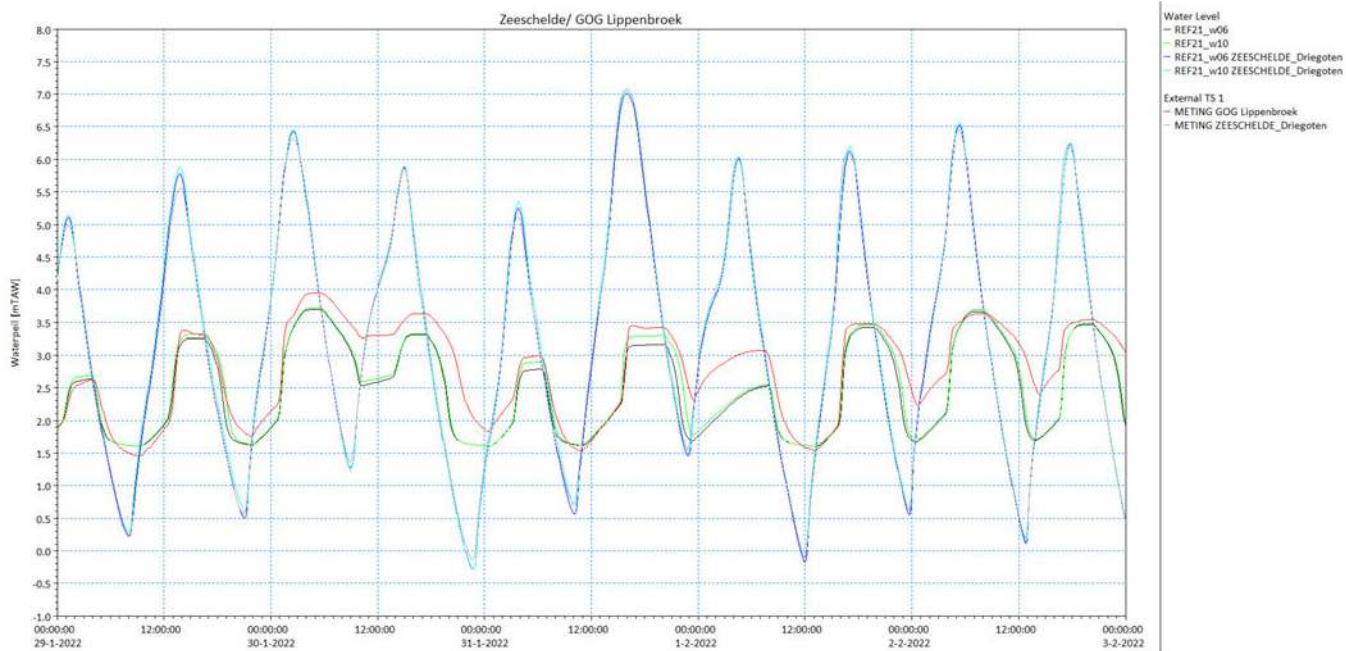
De inwateringssluizen van GGG Lippenbroek werden gesloten van 31/01/2022 10u tot 01/02/2022 14u, en van 17/02/2022 (namiddag) tot 22/02/2022 (namiddag). Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van de uitwatering.

De gemeten schommeling van het waterpeil in het gebied wordt redelijk goed gevolgd door de gesimuleerde schommeling. Het gemeten waterpeil daalt tijdens laagwater soms minder laag dan het gesimuleerde peil. Dit kan wijzen op een verstopping of opstuwung in de uitwateringskoker(s). Tijdens storm jan22 wordt het gemeten maximum waterpeil in het gebied onderschat, mogelijk als gevolg van een onderschatting van het waterpeil in de Zeeschelde.

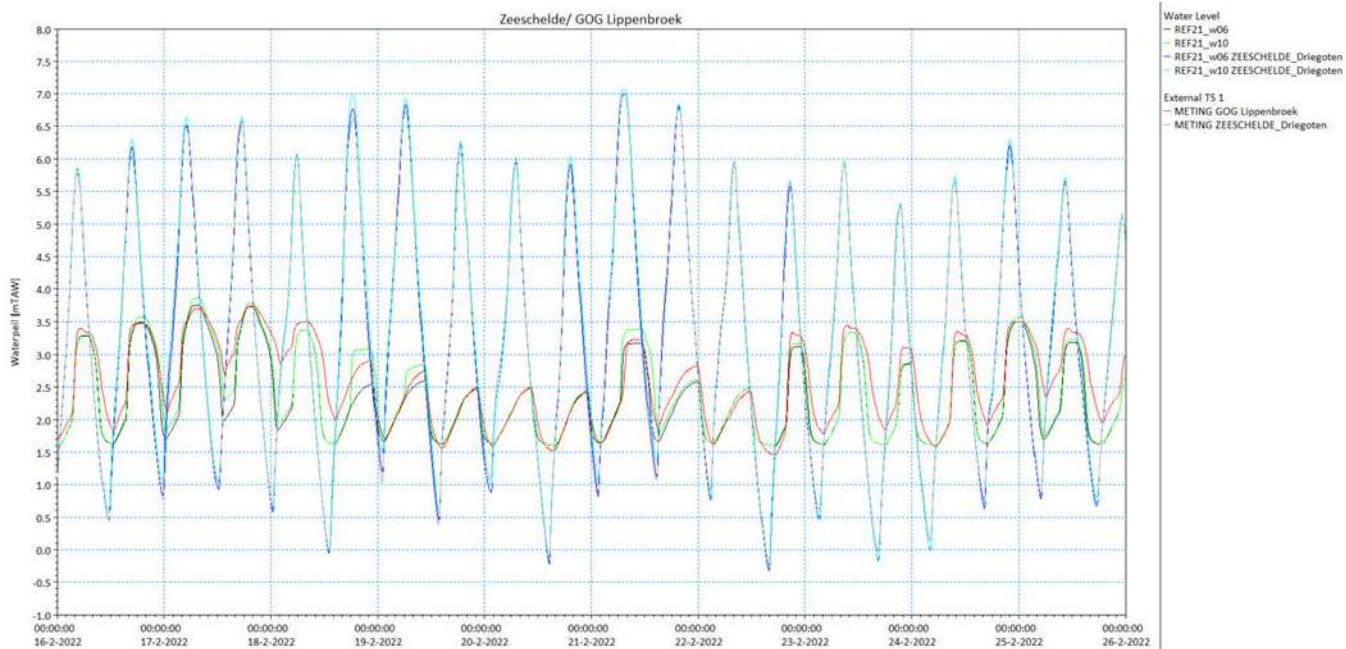
Bij REF21_w10 wordt het waterpeil in de Zeeschelde voor stormen feb22-HW1 tot en met -HW5 telkens overschat. Dit geeft ook een overschatting van het gemeten stormhoogwater in het GOG tijdens de stormen. Tijdens de stormen feb22-HW1, -HW2 en -HW5 wordt het stormhoogwater in het GOG redelijk goed benaderd door REF21_w06. Bij de overige stormen is een onderschatting te zien.

Tabel 10 – Kenmerken GOG-GGG Lippenbroek

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overloopdijk	+6.8	Opmeting
Inwatering	+4.7/+5.0/+5.3	Opmeting
Uitwatering	+1.61	Opmeting



Figuur 24 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – jan22



Figuur 25 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – feb22

3.4.5 GOG Scheldebroek

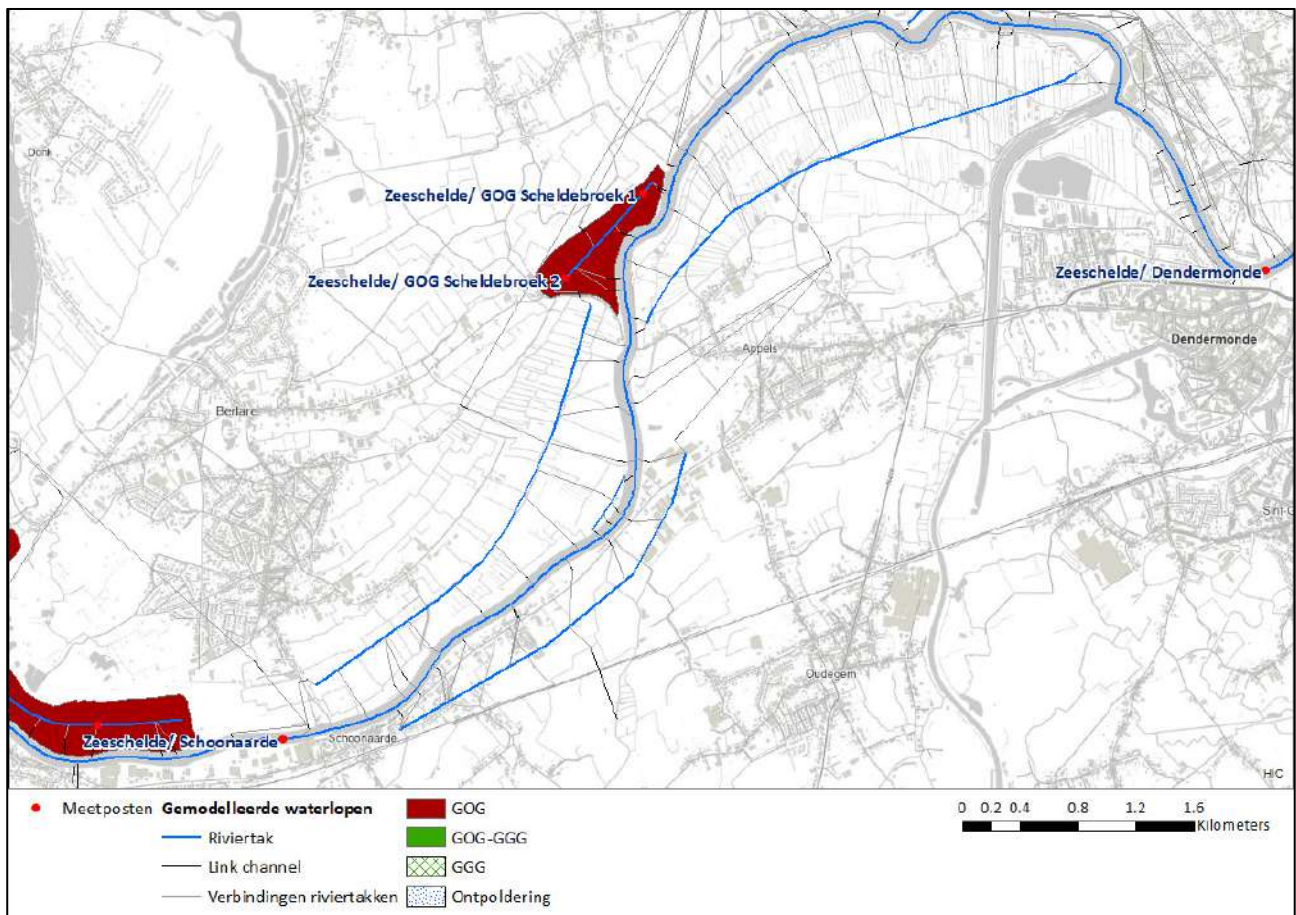
GOG Scheldebroek werd reeds voor 1981 ingericht als GOG. Dit gebied omvat een overlooppdijk en twee uitwateringsstructuren. Figuur 26 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Zeeschelde te Dendermonde. Tabel 11 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 27 en Figuur 28 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Scheldebroek ter hoogte van de uitwateringsstructuren, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde te Dendermonde, voor stormen jan22 en feb22.

Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van de noordelijke uitwatering (1).

Het verloop van de gemeten waterpeilen ter hoogte van de twee meetposten kent in werkelijkheid een groter onderling verschil dan gesimuleerd wordt. De gemodelleerde waterpeilen ter hoogte van de meetposten verschillen quasi niet. Dit wijst op een tragere stroming doorheen het gebied, die niet optimaal gesimuleerd wordt.

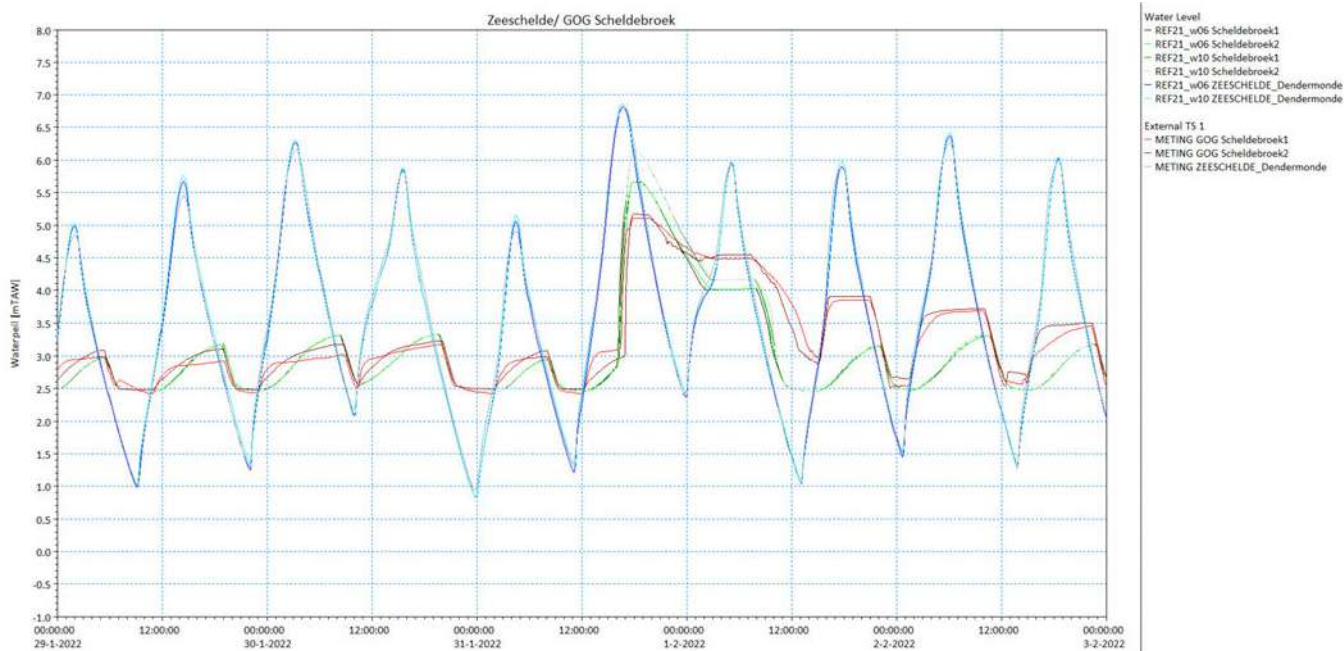
Tijdens storm jan22 wordt het gemeten stormhoogwater in het gebied sterk overschat. Volgens de metingen lijkt de inwatering iets later te beginnen dan gesimuleerd wordt. Na de storm loopt het gebied ook minder snel leeg dan in de simulaties. Tijdens stormen feb22-HW1, -HW2 en HW3 lijkt het GOG volgens de metingen niet gevuld te worden, waar dit in de simulaties, minstens bij 21REF_w10, wel zo is. Bij stormen feb22-HW4 en -HW5 wordt het stormhoogwaterpeil in het GOG weerom overschat. Bij de hoogwaters tussen deze stormen stijgt echter het gemeten waterpeil in het gebied hoger dan de gesimuleerde peilen. Ook dit kan wijzen op het 'lekker' van één of meerdere terugslagkleppen van de uitwateringsconstructie.



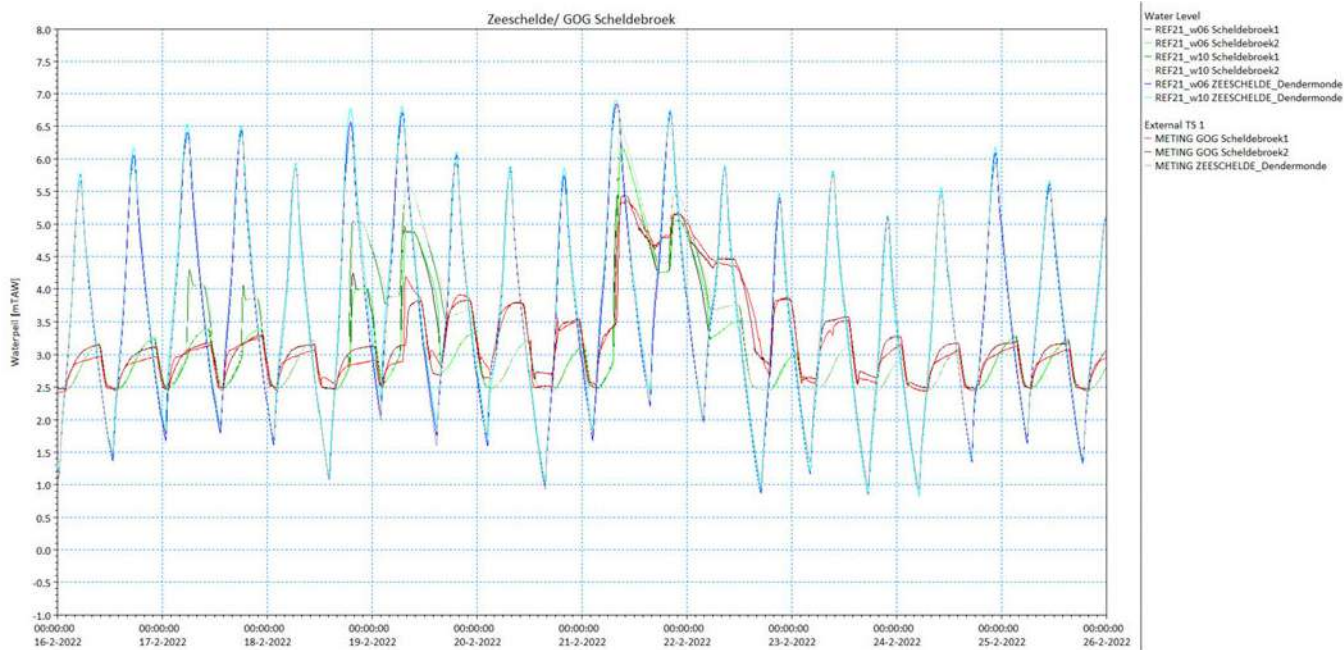
Figuur 26 – Situering meetposten GOG Scheldebroek

Tabel 11 – Kenmerken GOG Scheldebroek

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overloopdijk	+6.30	Opmeting
Uitwatering 1 (afwaarts)	+2.42	Opmeting
Uitwatering 2 (opwaarts)	+2.45	Opmeting



Figuur 27 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – jan22



Figuur 28 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – feb22

3.4.6 GOG Paardeweide

GOG Paardeweide werd in juli 1986 in werking gesteld als GOG. Het gebied omvat een overloopdijk en zes uitwateringsconstructies. Sinds juni 2014 is GOG Paardeweide uitgerust met een innovatieve vispassage. Deze vistrap bestaat uit een inlaatklep aan de ene kant van het gebied en een buffergracht met een uitlaatsluis aan de andere. Voor deze constructie werd de meest afwaartse uitwateringsconstructie aangepast. In de terugslagklep werd een klepje voorzien waarlangs continue doorstroom mogelijk is. In de koker zelf werden schotbalken geplaatst. Deze aanpassingen werden in het model geïmplementeerd volgens de aangeleverde informatie van de beheerder bij ANB (pers. Comm. Dominiek Decleyre, projectleider ANB).

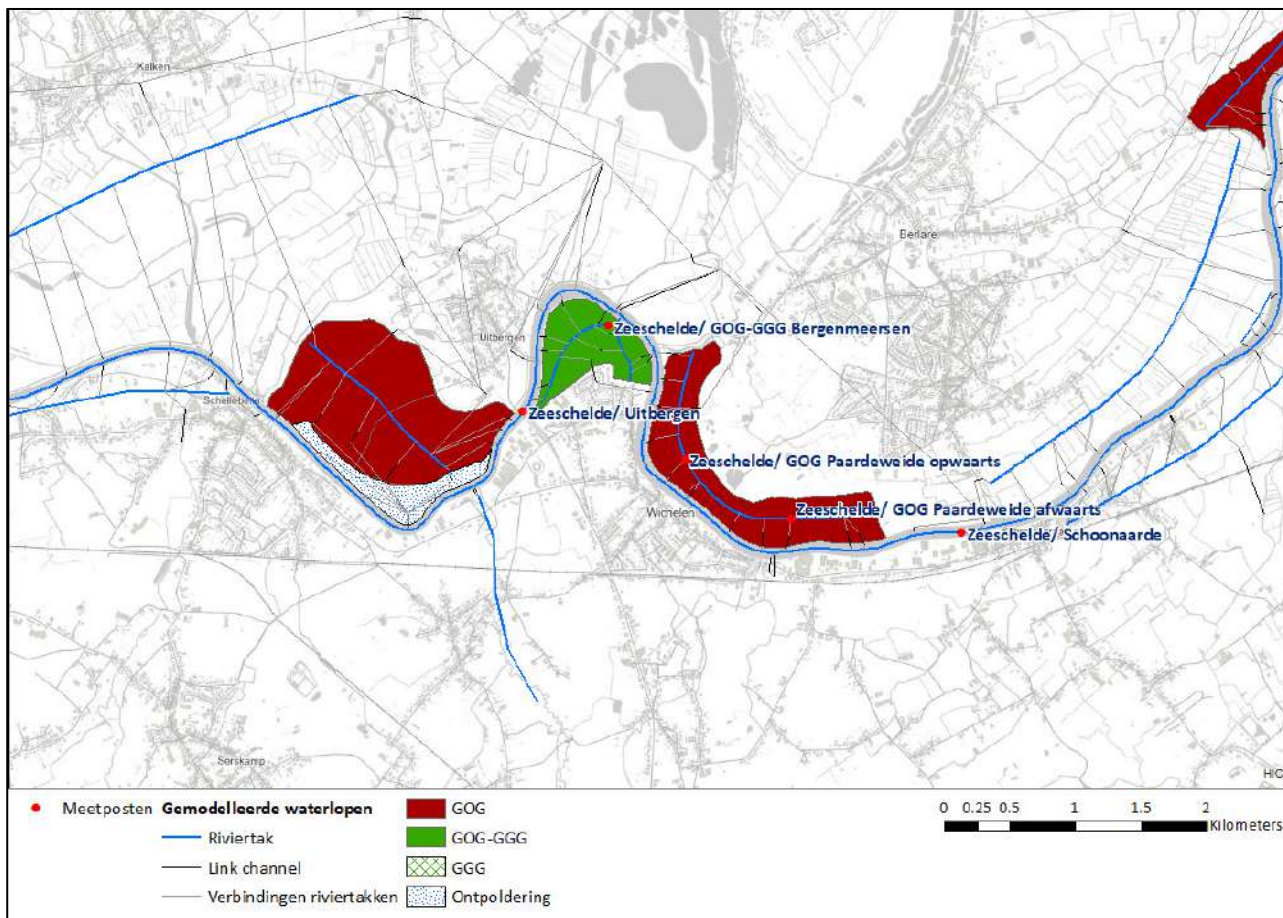
Figuur 29 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Zeeschelde te Schoonaarde. Tabel 12 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 30 en Figuur 31 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Paardeweide ter hoogte van de uitwateringsstructuren, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde te Schoonaarde, voor stormen jan22 en feb22. De afwaartse meetpost bevindt zich ter hoogte van de meeste afwaartse uitwatering (1), in de vistrap. De opwaartse meetpost bevindt zich ter hoogte van uitwatering 4.

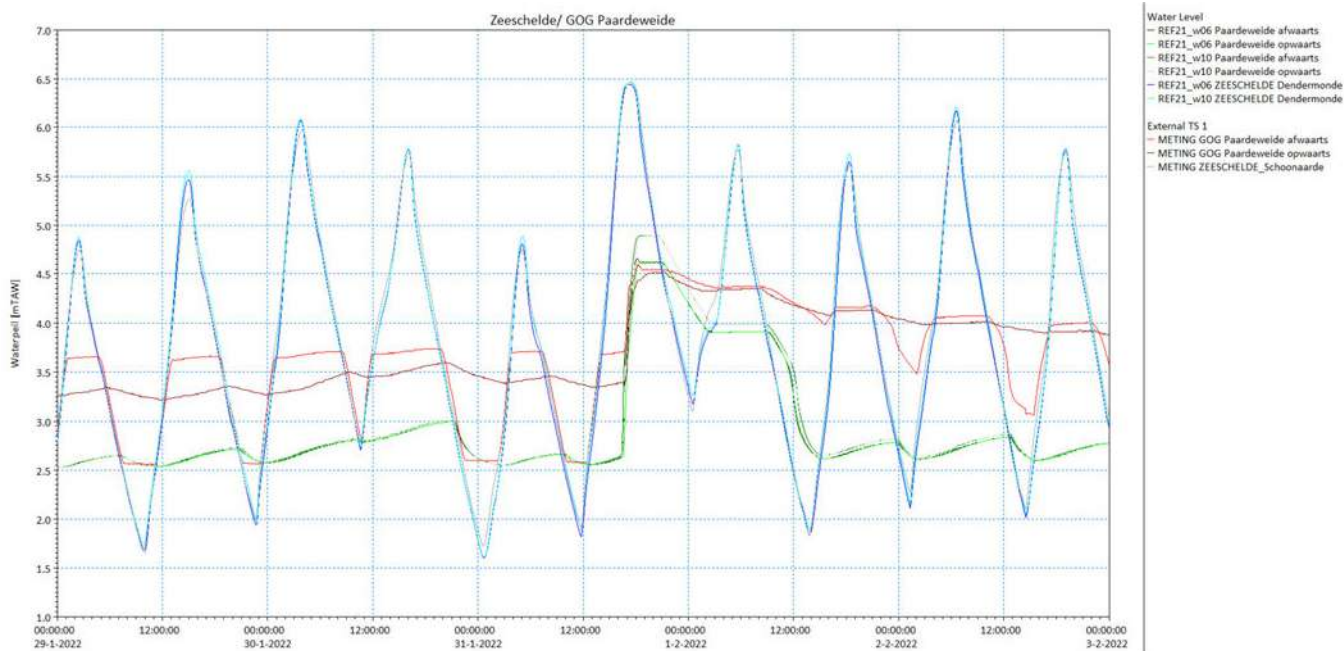
De afwaartse meetpost meet het waterpeil in de vistrap van GOG Paardeweide. Bijgevolg toont het verloop van het waterpeil een sterke schommeling. Het verloop van het waterpeil in het afwaartse gedeelte, ter hoogte van de uitwatering met vistrap, zal een kleinere schommeling kennen (pers. Comm. Dominiek Decleyre, projectleider ANB). De metingen hiervan waren niet beschikbaar bij de opmaak van dit rapport. Ter hoogte van de opwaartse meetpost is het gemeten waterpeil voor en na de stormperiodes circa 65 cm hoger dan het gesimuleerde waterpeil. Ondanks het te lage gesimuleerde waterpeil voor de storm, wordt het stormhoogwater bij storm jan22 in beide simulaties overschat ten opzichte van de metingen. De uitwatering van het gebied verloopt in de gesimuleerde tijdreeks ook veel sneller. Gelijkaardige fenomenen treden op in de stormperiode van feb22. Dit wijst erop dat niet alle kenmerken van de in- en uitwateringsstructuren, evenals van de topografie van het gebied gekend zijn.

Tabel 12 – Kenmerken GOG Paardeweide

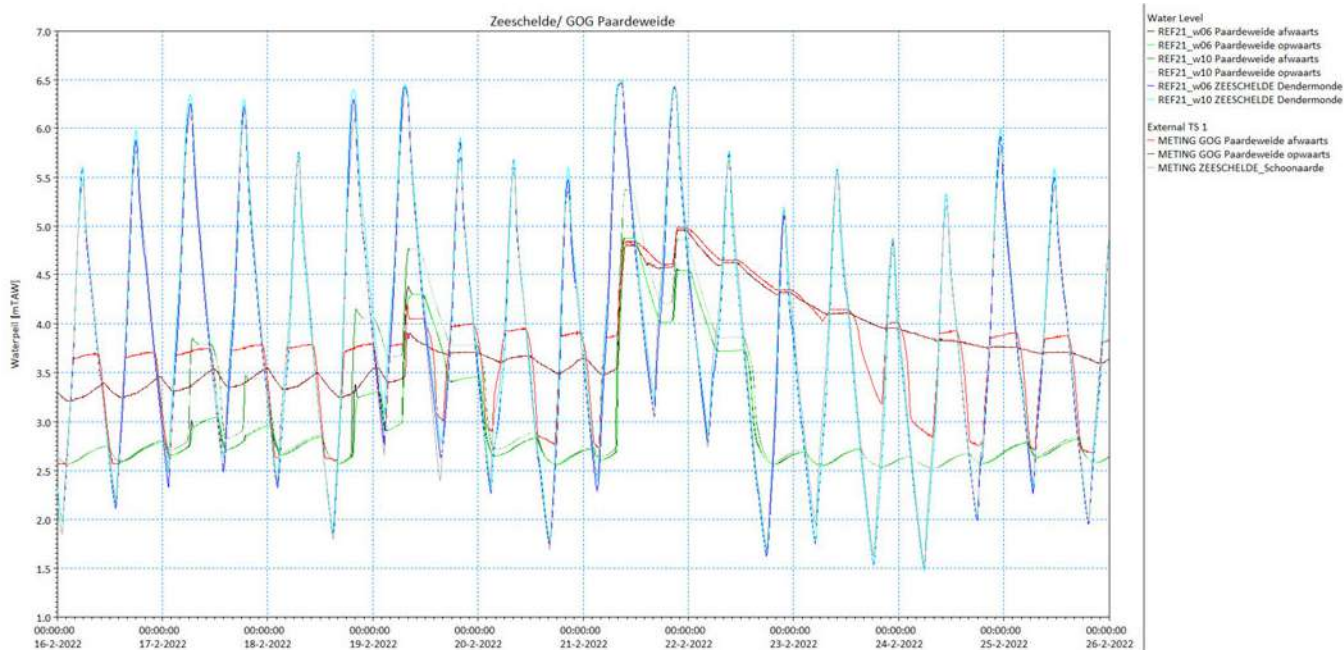
Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overloopdijk	+6.2	Opmeting
Uitwatering 1 (afwaarts)	+2.5	Opmeting
Inlaat via terugslagklep uitwatering 1	+2.55 (d=30 cm)	mond. comm.
Uitwatering 2	+2.5	Opmeting
Uitwatering 3	+2.9	Opmeting
Uitwatering 4	+2.38	Opmeting
Uitwatering 5	+2.81	Opmeting
Uitwatering 6	+2.78	Opmeting



Figuur 29 – Situering meetposten GOG Paardeweide en GOG-GGG Bergenmeersen



Figuur 30 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Paardeweide – jan22



Figuur 31 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Paardeweide – feb22

3.4.7 GOG-GGG Bergenmeersen

GOG Bergenmeersen werd in oktober 1989 in werking gesteld als GOG. Dit gebied omvat een overloopdijk, een (oude) uitwateringsconstructie en een (nieuwe) gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Dit gebied kent sinds april 2013 GGG-werking. Figuur 29 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Zeeschelde te Uitbergen. Tabel 13 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

De GGG-inwateringssluizen van Bergenmeersen werden gesloten op 31 januari 2022 en bleven gesloten gedurende de volledige simulatieperiode. Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van de grote uitwatering.

Figuur 32 en Figuur 33 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Bergenmeersen ter hoogte van de uitwateringsstructuren, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde te Uitbergen, voor stormen jan22 en feb22.

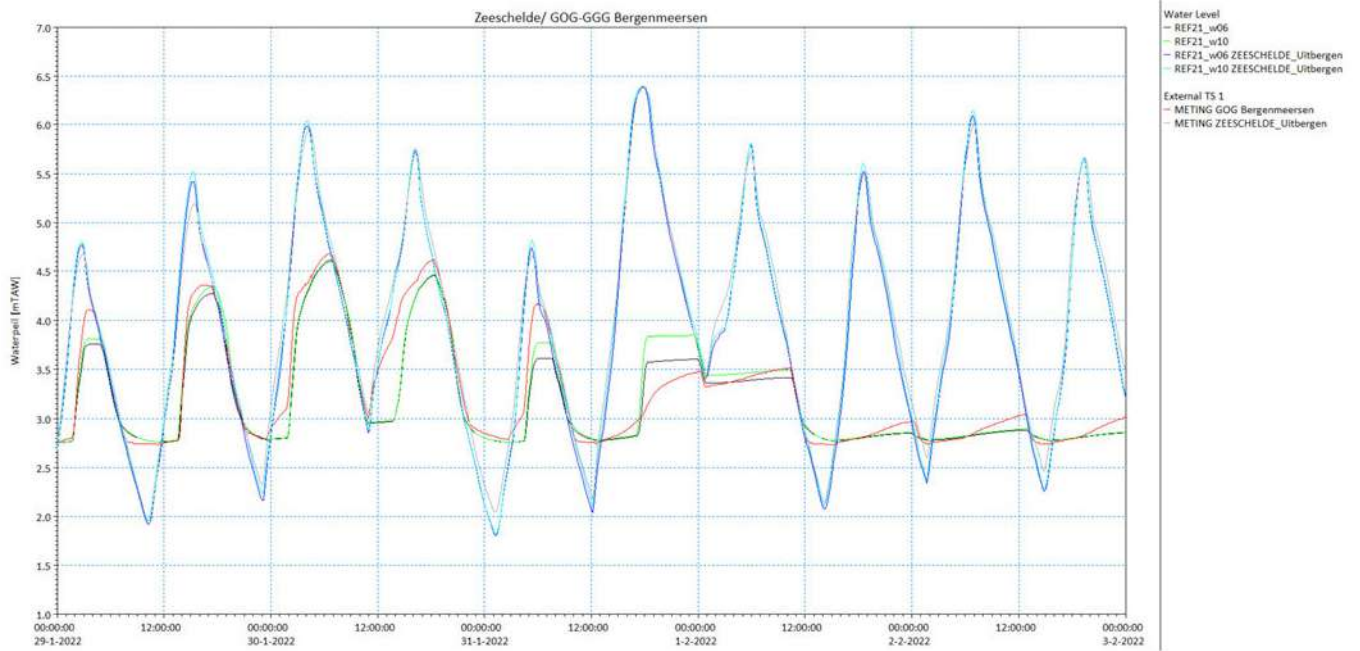
Tijdens storm jan22 wordt het gemeten stormhoogwater overschat door de gesimuleerde waterpeilen. GOG-werking in Bergenmeersen is in werkelijkheid sterk afhankelijk van de GOG-werking in GOG Paardeweide. De GOG-werking in Paardeweide vertraagt het stormhoogwater. Dit lijkt echter niet goed meegenomen te worden in het model. Eenzelfde fenomeen is te zien voor storm feb22-HW4.

Tijdens storm feb22-HW5 is GOG Bergenmeersen wel in werking getreden. Het gemeten stormhoogwater wordt echter weerom overschat in de simulaties. Het verloop van de inwatering in de gemeten tijdreeks lijkt trager dan in de gesimuleerde tijdreeks.

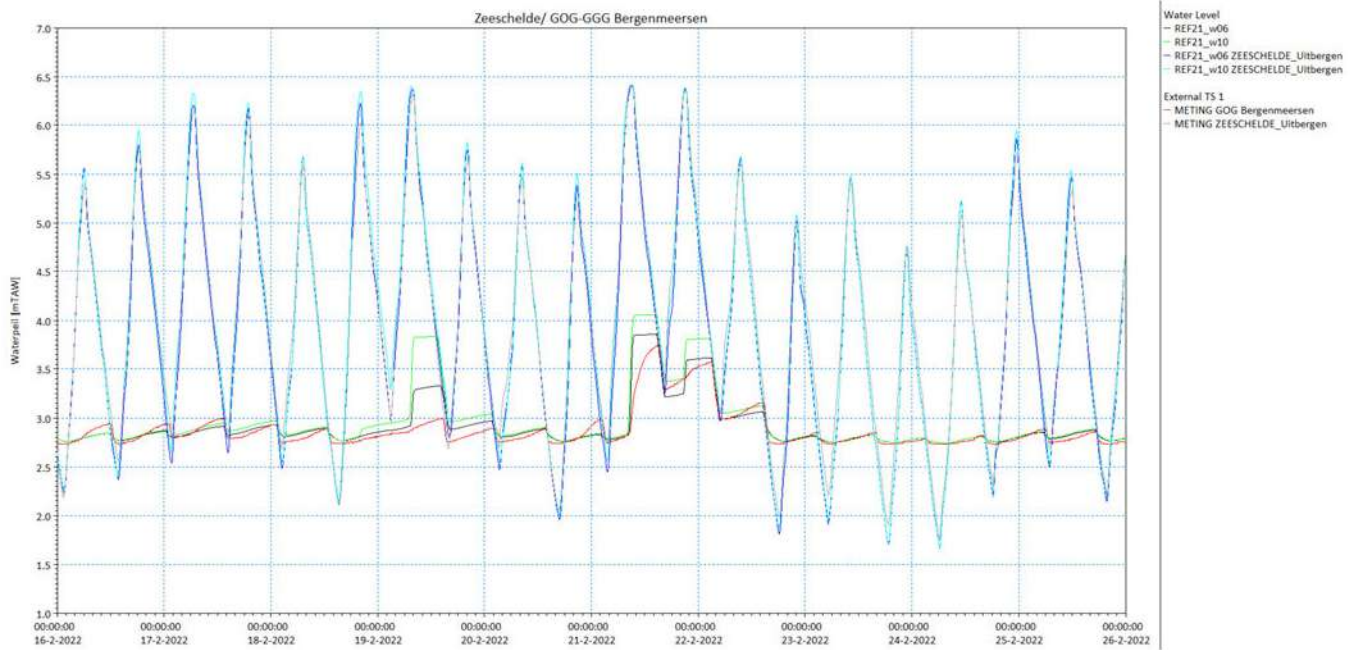
Voor en na de stormen wordt het gemeten waterpeil wel redelijk goed benaderd door het gesimuleerde waterpeil.

Tabel 13 – Kenmerken GOG-GGG Bergenmeersen

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overloopdijk	+6.35	Opmeting
Inwatering 1 (GGG)	+4.2, +4.39, +4.53, +4.54	Opmeting
Uitwatering 1 (GGG)	+2.7	Opmeting
Uitwatering 2 (oost)	+2.92	Opmeting



Figuur 32 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – jan22



Figuur 33 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – feb22

3.4.8 GOG Potpolder I

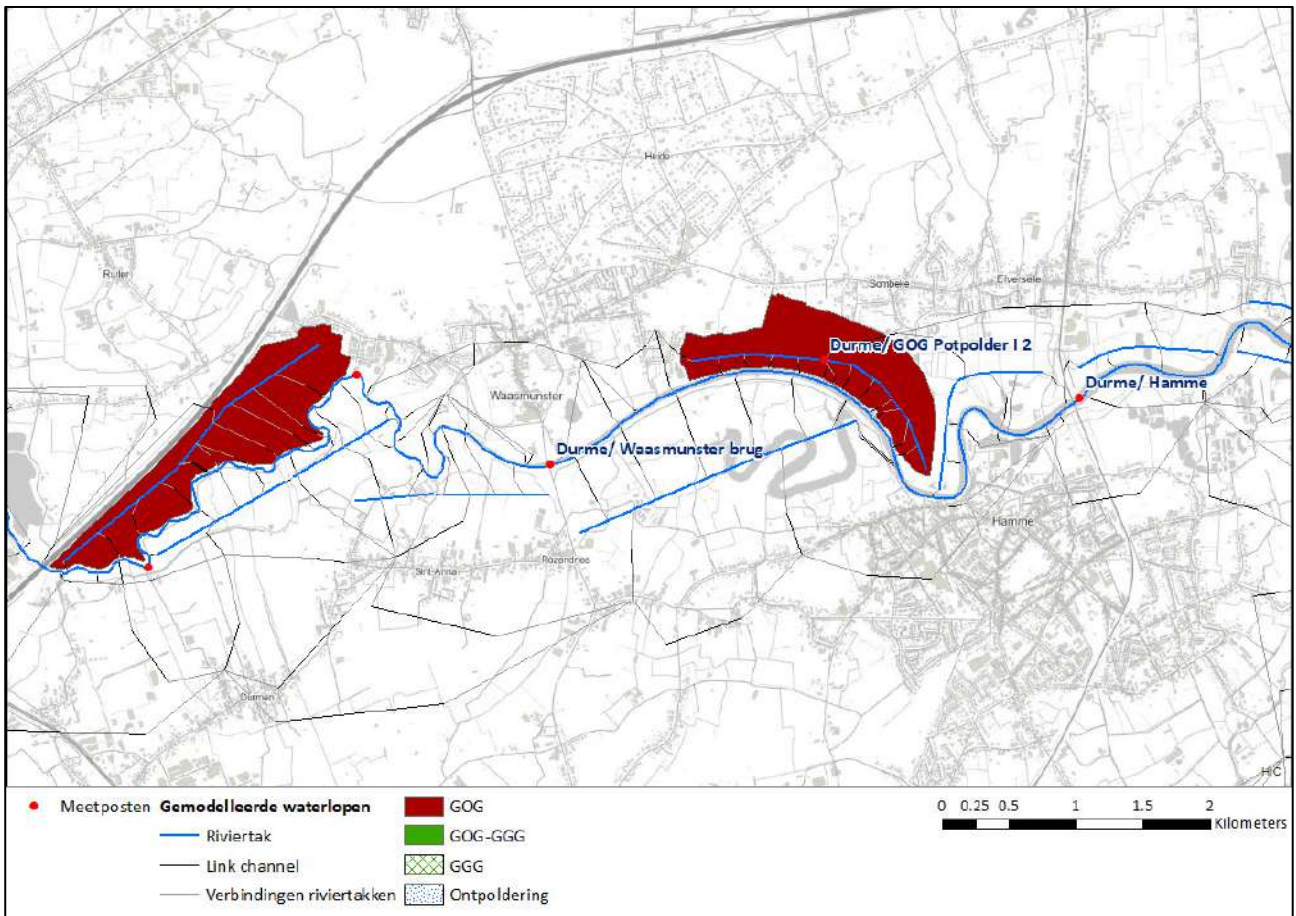
GOG Potpolder I was reeds voor 1981 in werking als GOG. Dit gebied omvat een overloopdijk en vijf uitwateringsstructuren. Figuur 34 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en langs de Durme te Waasmunster brug. Tabel 14 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken.

Figuur 35 en Figuur 36 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Potpolder I ter hoogte van de uitwateringsstructuur 4, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Durme te Waasmunster brug, voor stormen jan22 en feb22. De meting ter hoogte van Waasmunster brug was enkele getijden onderbroken in de stormperiode van feb22.

Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van uitwatering 4.

Het verloop van het gemodelleerde waterpeil in het GOG heeft een kleinere getijamplitude en lagere laagwaters ten opzichte van het gemeten waterpeil. Dit wijst erop dat de configuratie van de uitwateringsconstructies niet meer juist gekend is.

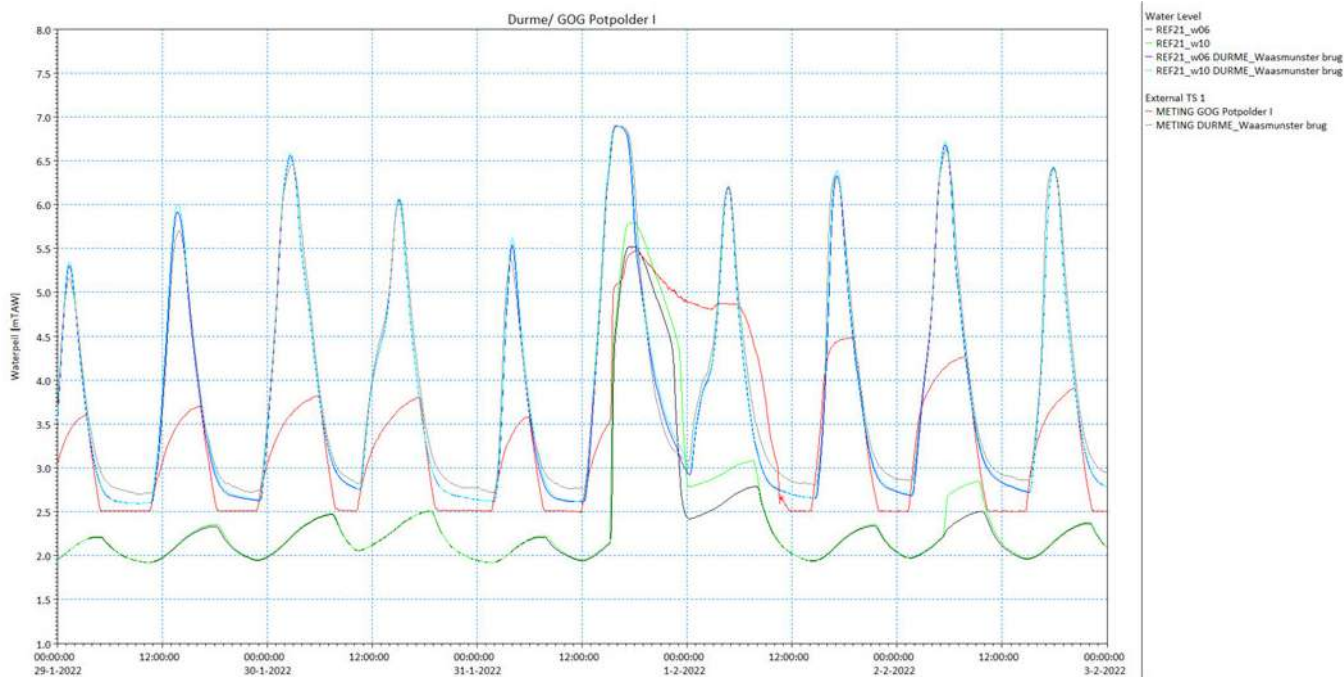
Bij de GOG-werking bij storm jan22 begint de GOG-inwatering wel op ongeveer hetzelfde ogenblik bij quasi gelijk gemodelleerde en gemeten waterpeilen in de Durme. De uitwatering van het gebied na de storm loopt in werkelijkheid veel trager dan in het model. Dit is ook te zien bij stormen feb22.



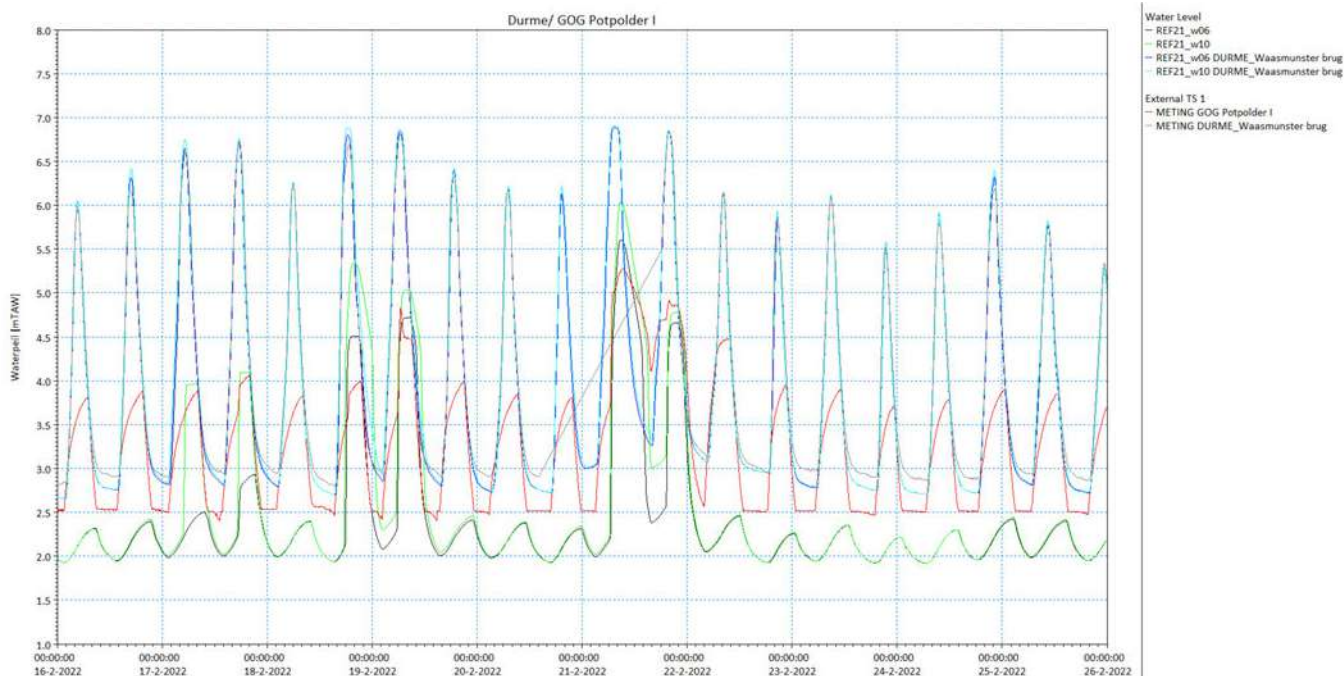
Figuur 34 – Situering meetposten GOG Potpolder I

Tabel 14 – Kenmerken GOG Potpolder I

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overlooptdijk	+6.70	Opmeting
Uitwatering 1 (afwaarts)	+1.88	Opmeting
Uitwatering 2	+1.96	Opmeting
Uitwatering 3	+2.5	Meting waterpeil
Uitwatering 4	+2.5	Meting waterpeil
Uitwatering 5 (opwaarts)	+2.51	Opmeting



Figuur 35 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Potpolder I – jan22



Figuur 36 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Potpolder I – feb22

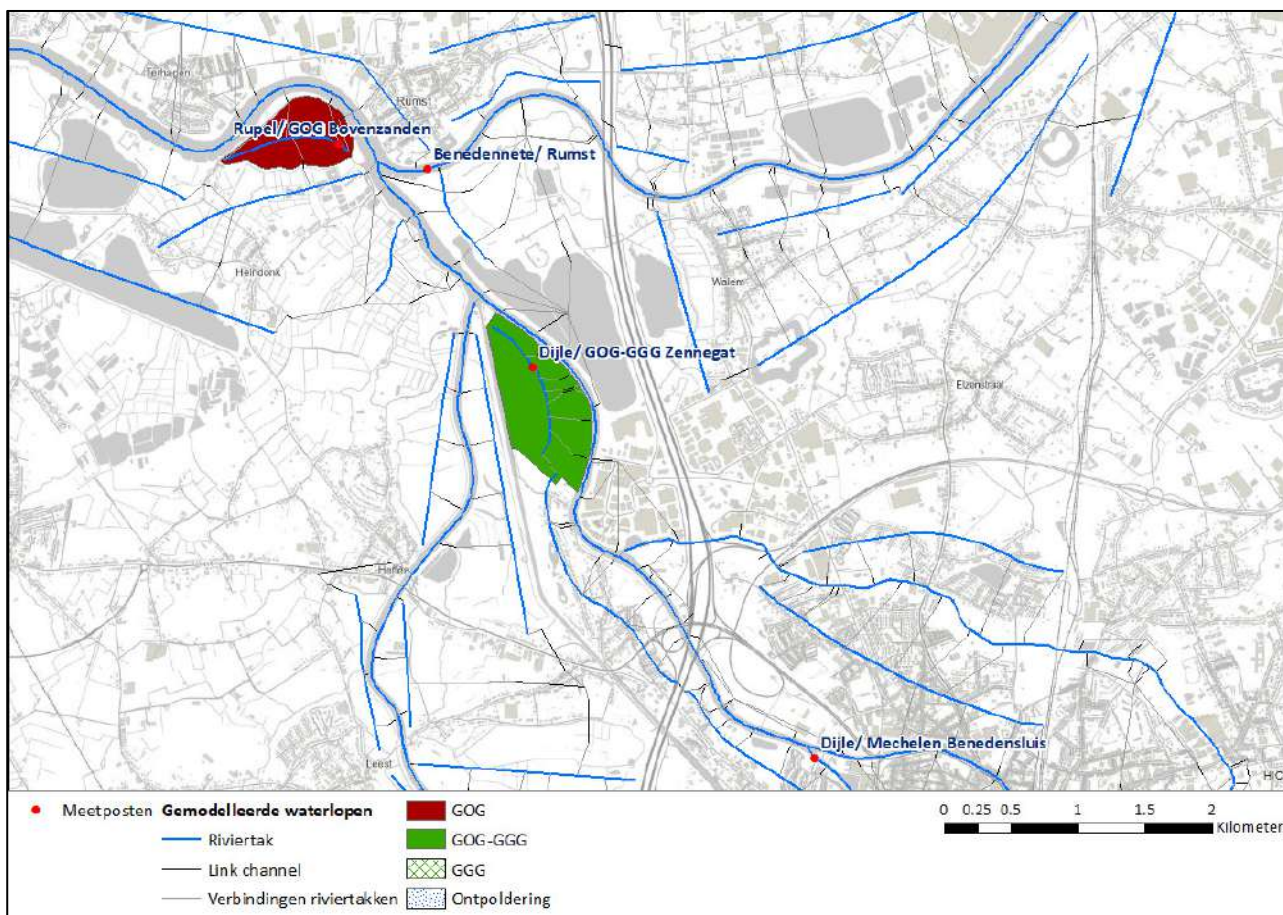
3.4.9 GOG Bovenzanden

GOG Bovenzanden werd in september 1983 in werking gesteld als GOG. Dit gebied omvat een overlooptdijk en één uitwateringsstructuur. Figuur 37 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Benedennete te Rumst. Tabel 15 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken.

Figuur 38 en Figuur 39 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Bovenzanden ter hoogte van de uitwateringsstructuur, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Benedennete te Rumst, voor stormen jan22 en feb22.

Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van de uitwatering.

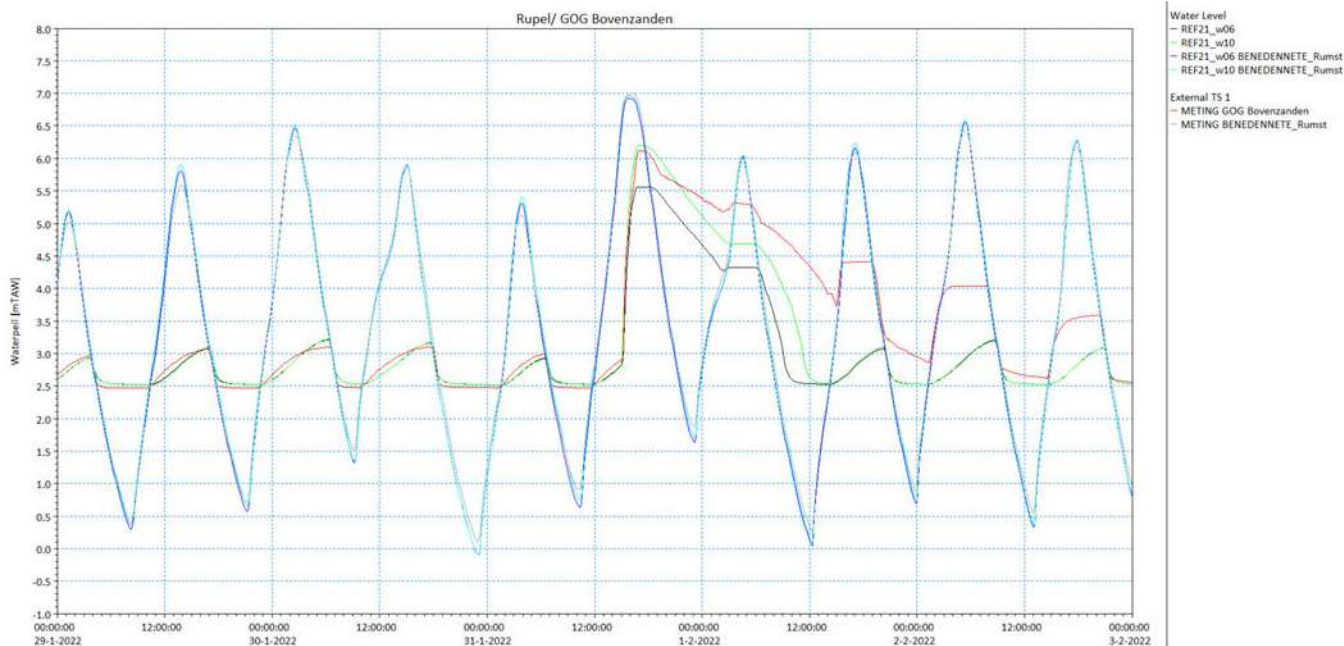
Tijdens storm jan22 wordt het stormhoogwater in het GOG vrij goed benaderd door REF21_w10. Het gemeten verloop van het waterpeil vertoont echter een tragere daling na de storm dan het gesimuleerde verloop. De schommeling van het waterpeil in het gebied voor de storm wordt echter wel goed benaderd door de simulaties. De overschatting van het hoogwater te Rumst bij stormen feb22-HW3 en -HW4 zorgt voor een GOG-werking in de simulaties, die in werkelijkheid slechts zeer beperkt opgetreden is. Bij de stormen feb22-HW5 en -HW6 wordt het stormhoogwaterpeil sterk overschat door REF21_w10. Het stormhoogwaterpeil wordt bij deze stormen beter benaderd door REF21_w06.



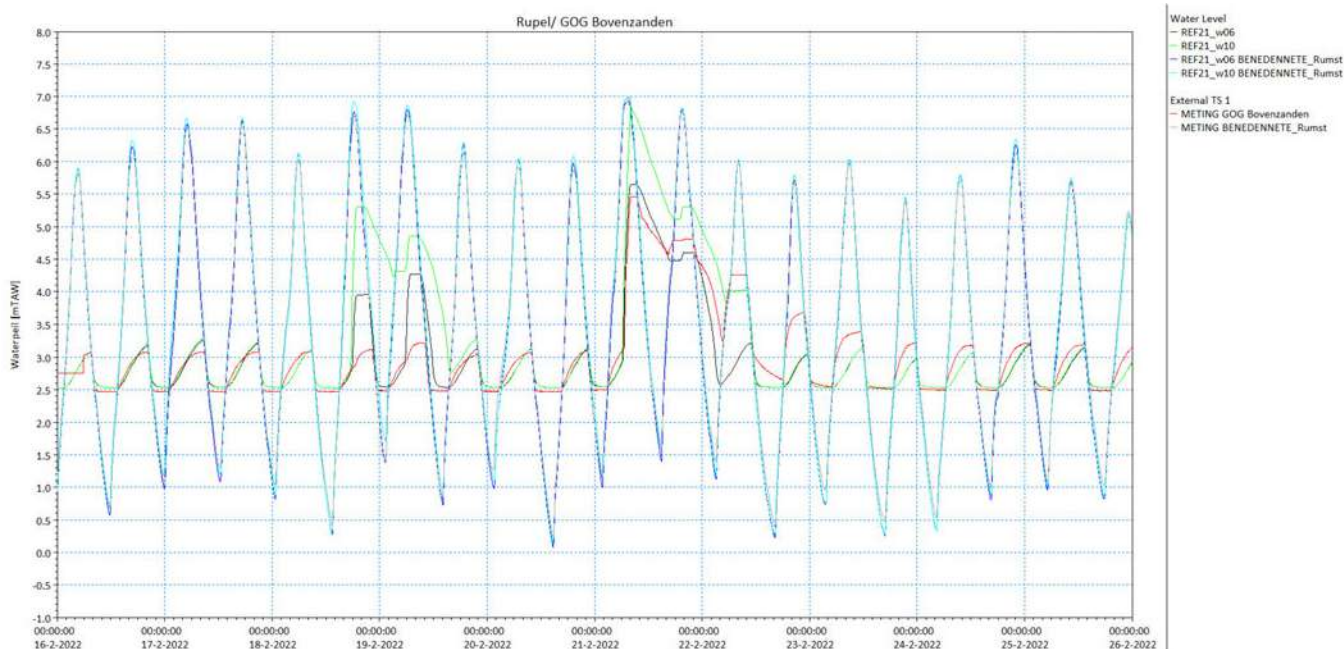
Figuur 37 – Situering meetposten GOG Bovenzanden en GOG-GGG Zennegat

Tabel 15 – Kenmerken GOG Bovenzanden

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overlooppdijk	+6.75	Opmeting
Uitwatering	+2.5	Meting waterpeil



Figuur 38 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – jan22



Figuur 39 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – feb22

3.4.10 GOG-GGG Zennegat

GOG-GGG Zennegat is sinds januari 2017 in werking gesteld. Dit gebied omvat een overlooptdijk en een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Figuur 37 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Dijle te Mechelen benedensluis. Tabel 16 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 40 en Figuur 41 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Zennegat ter hoogte van de uitwateringsstructuur, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Dijle te Mechelen benedensluis, voor stormen jan22 en feb22.

Het sluiten van de GGG-inwateringssluizen tijdens de stormen werd in het model geïmplementeerd op basis van de gemeten waterpeilen in het gebied. Het waterpeil in het GOG kent een schommeling bij elk getij. Dit lijkt veroorzaakt te worden door een lekkende terugslagklep. In het model werd een extra kleine koker zonder terugslagklep geïmplementeerd ter hoogte van de uitwatering.

Tijdens storm jan22 wordt het gemeten stormhoogwater in het GOG overschat door de gemodelleerde peilen, ondanks een gelijkaardig verloop van het gemeten en gesimuleerde waterpeil te Mechelen benedensluis. Op basis van het gemeten waterpeil lijkt de GOG-inwatering iets later te beginnen en trager te verlopen. Het verloop van het waterpeil tijdens de GGG-werking voor en na de storm wordt wel redelijk goed benaderd door de simulatie.

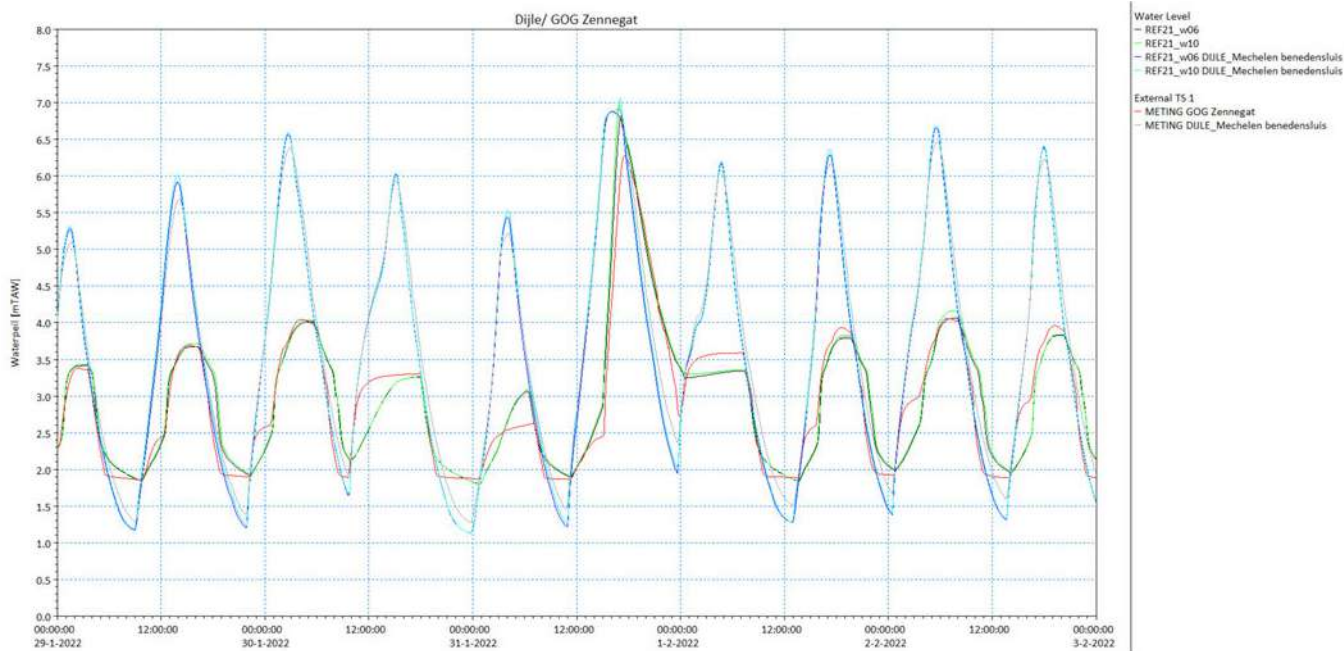
De weergegeven gemeten en gesimuleerde hoogwaterpeilen in Figuur 40 stijgen op 30/01/22 en 02/02/22 net boven 6,5 mTAW, waarbij GOG-werking te verwachten valt. Dit zijn echter waterpeilen ter hoogte van Mechelen benedensluis, net opwaarts van GOG Zennegat, die iets hoger zijn dan deze ter hoogte van het GOG zelf.

Ook bij de stormen van feb22 wordt het gemeten stormhoogwater overschat in de simulaties. Bij storm feb22-HW5 wordt het GOG quasi volledig gevuld. Ter hoogte van Mechelen benedensluis treedt in werkelijkheid geen opstuwing op van het hoogwater in de Dijle, waar dit in de simulaties wel voorkomt.

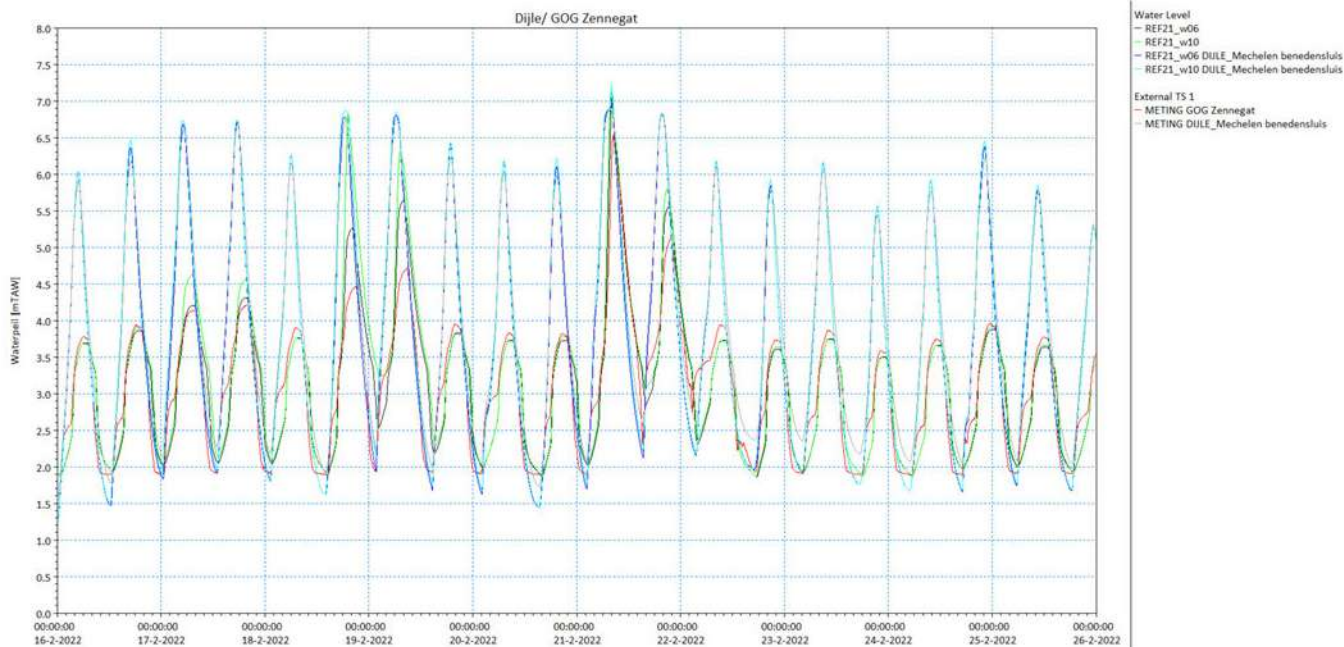
De overschatting van het stormhoogwater kan enerzijds samenhangen met een overschatting van het hoogwater in de waterloop, maar anderzijds ook met een minder nauwkeurige implementatie van het volume of de bergingscapaciteit in het GOG.

Tabel 16 – Kenmerken GOG-GGG Zennegat

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overlooptdijk	+6.5	Ontwerp
Inwatering (GGG)	+4.3	Ontwerp
Uitwatering	+0.8	Ontwerp



Figuur 40 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – jan22



Figuur 41 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – feb22

3.4.11 GOG Anderstadt

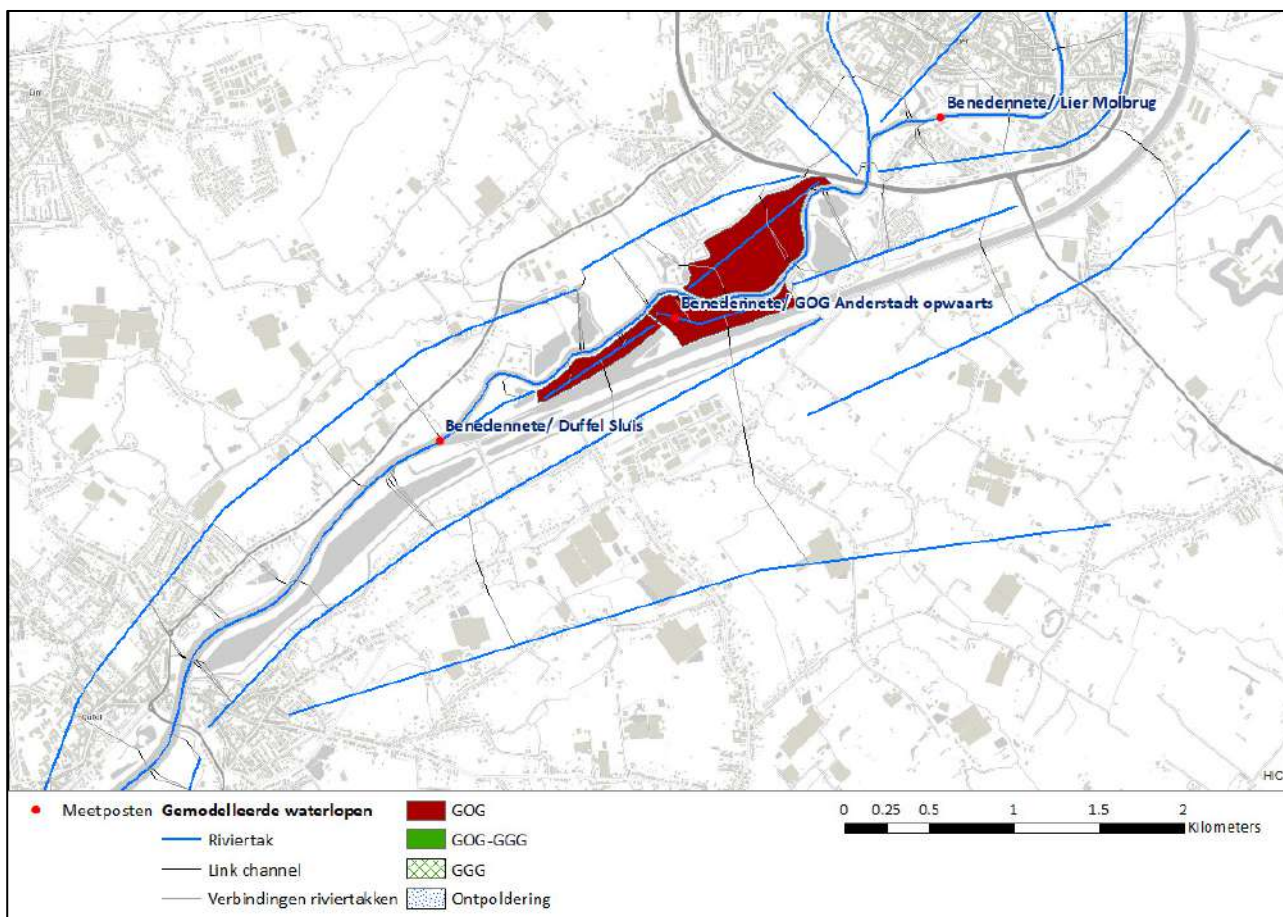
GOG Anderstadt werd reeds voor 1981 ingericht als GOG. Dit gebied omvat een overlooptdijk en twee uitwateringskokers. Figuur 42 toont de outputlocatie van de meetposten in het GOG en in de Benedennete te Duffel sluis. Tabel 17 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied. De drempelpeilen van de uitwateringskokers werden geschat op basis van het gemeten waterpeil in het gebied.

Figuur 43 en Figuur 44 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Anderstadt opwaarts ter hoogte van de afwaartse uitwateringsstructuur, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Benedennete te Duffel sluis, voor stormen jan22 en feb22.

Ondanks een onderschatting van het stormhoogwater in de Benedennete bij storm jan22, wordt het stormhoogwater in het GOG, voornamelijk bij REF21_w10 overschat. In de meting is een korte opstuwung van het hoogwaterpeil te zien bij het begin van de GOG-inwatering. Deze komt niet voor in de gesimuleerde waterpeilreeksen.

Ook voor stormen feb22 worden de stormhoogwaters in het GOG overschat. Bij storm feb22-HW3 en -HW4 zorgt een overschatting van het waterpeil in de Benedennete voor een foutieve GOG-werking in het model.

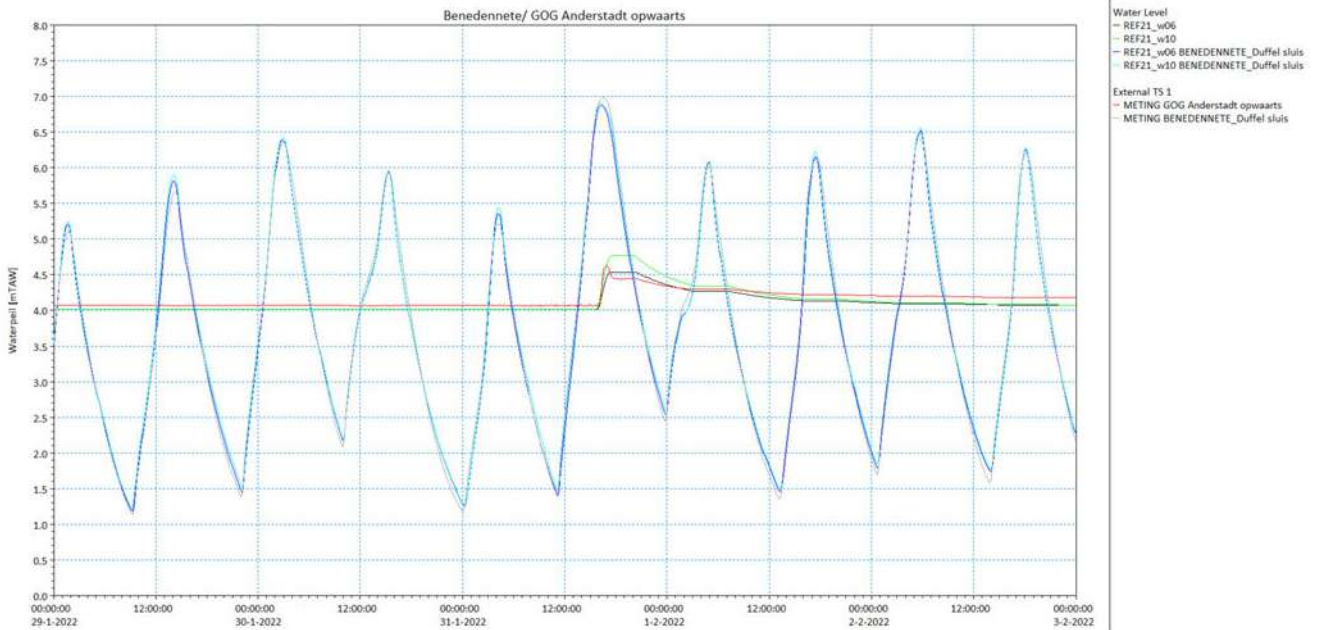
Bij storm feb22-HW5 treedt net zoals bij storm jan22, ondanks een onderschatting van het stormhoogwater in de Benedennete, een overschatting van het stormhoogwater in het GOG op. Dit wijst op een minder nauwkeurige implementatie van het volume of de bergingscapaciteit in het GOG.



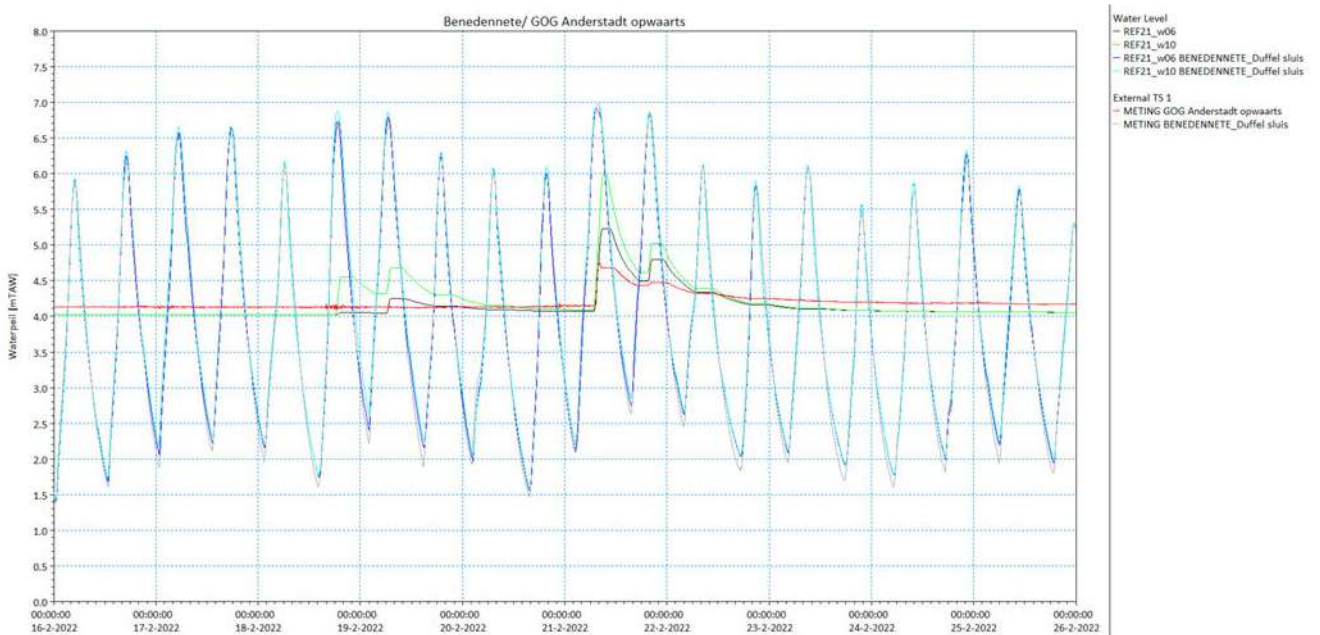
Figuur 42 – Situering meetposten GOG Anderstadt opwaarts

Tabel 17 – Kenmerken GOG Anderstadt opwaarts

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overlooppdijk	+6.7	Ontwerp
Uitwatering opwaarts	+4	obv meting waterpeil
Uitwatering afwaarts	+4	obv meting waterpeil



Figuur 43 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Anderstadt opwaarts – jan22



Figuur 44 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Anderstadt opwaarts – feb22

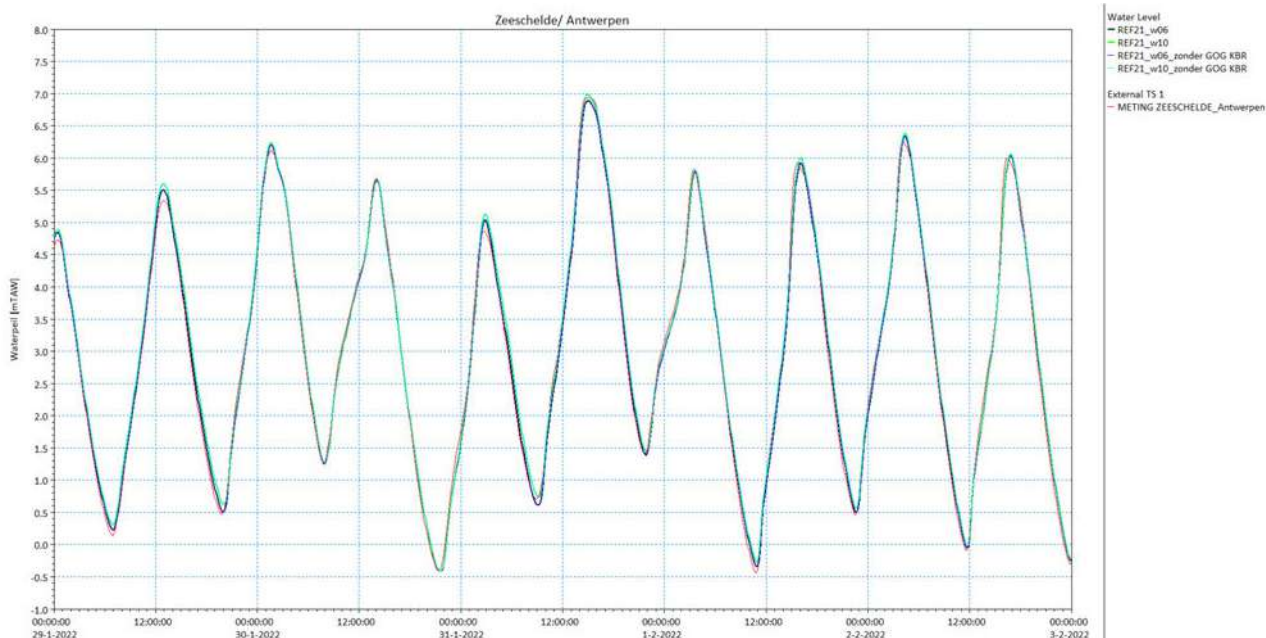
4 Scenario: zonder GOG KBR

Tijdens de storm van jan22 trad een uitzonderlijk lang hoogwater op in de Zeeschelde te Antwerpen. Gedurende circa één uur bleef de meting van het waterpeil te Antwerpen schommelen rond 6,94 à 6,95 mTAW. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen is een aftopping van het hoogwater door de GOG-vulling in KBR. Om het effect van GOG KBR op het hoogwater te Antwerpen in te schatten, werd een extra simulatie uitgevoerd waarbij GOG KBR buiten werking gesteld werd. In het model werden hiertoe de link channels die de overloopdijken voorstellen verhoogd naar 8 mTAW. Tevens werden de extra kleine kokers die de lekkende terugslagkleppen voorstellen, opnieuw verwijderd.

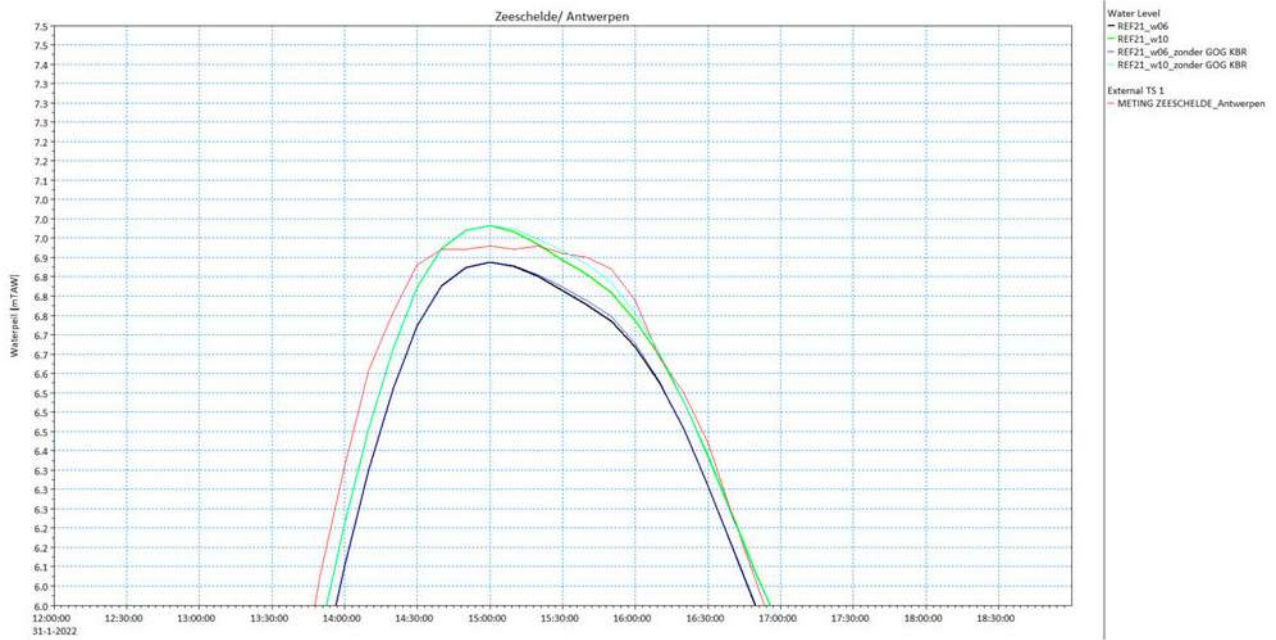
Figuur 45 toont de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde te Antwerpen, met en zonder GOG-werking van KBR voor de storm jan22. Figuur 46 zoomt in op het stormhoogwater. Figuur 47 toont het lengteprofiel langs de Westerschelde en Zeeschelde met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen, met en zonder GOG-werking van KBR voor de storm jan22.

Ter hoogte van Antwerpen wordt in REF21_w06 het maximum waterpeil onderschat met 5 cm. In REF21_w10 wordt het maximum waterpeil overschat met 5 cm. In beide simulaties vertoont het waterpeil rondom het hoogwater een verschillend verloop ten opzichte van de metingen.

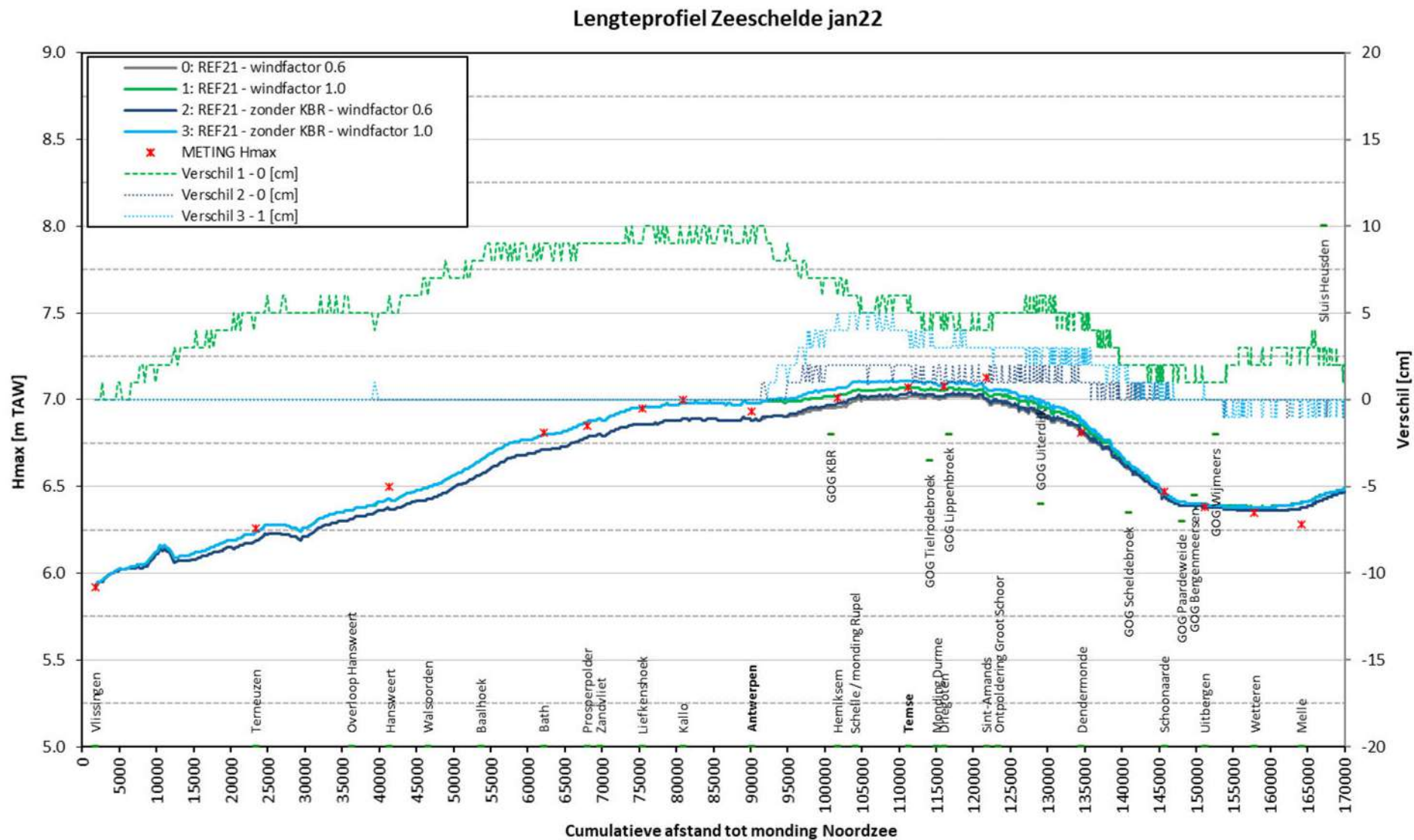
Het buiten werking stellen van GOG KBR heeft in beide simulaties geen effect op het maximum hoogwaterpeil te Antwerpen. De verschillijnen in het lengteprofiel tonen ook dat het effect op het maximum waterpeil net tot Antwerpen reikt. De daling van het waterpeil na het stormhoogwater wordt echter in beide simulaties wel beïnvloed door het buiten werking stellen van GOG KBR. Het waterpeil daalt dan iets trager na het hoogwater. Dit wijst erop dat in de simulaties het stormhoogwater zelf, op dit waterpeil, niet afgetopt wordt, maar dat er mogelijk wel een effect is op het waterpeil na het eigenlijke hoogwater.



Figuur 45 – Gemeten en gesimuleerde waterpeil Zeeschelde te Antwerpen, met en zonder GOG-werking KBR – jan22



Figuur 46 – Gemeten en gesimuleerde waterpeil Zeeschelde te Antwerpen, met en zonder GOG-werking KBR – zoom stormhoogwater jan22



Figuur 47 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – met en zonder GOG-werking KBR - storm jan22

5 Conclusies en aanbevelingen

In de maanden januari en februari 2022 zijn drie stormperiodes opgetreden. Tijdens elk van deze drie stormperiodes werd éénmaal de waakdrempel van 6,60 mTAW te Antwerpen overschreden. Omdat tijdens de eerste stormperiode, begin januari 2022, GOG KBR niet in werking getreden is, en om de rekentijd te beperken, werd deze periode niet in beschouwing genomen voor de hindcast.

Met het geactualiseerde 1D-referentiemodel van de Zeeschelde werden de stormen van eind januari 2022 en februari 2022 nagerekend. De resultaten van deze berekening werden gebruikt voor een evaluatie van de performantie van het model. Omdat in een eerste simulatie voor enkele stormen het maximum hoogwater onderschat werd, werd een extra simulatie uitgevoerd met een hogere topofactor voor de wind. Uit vergelijking van de gemeten en gesimuleerde waterpeilen blijkt dat deze hogere topofactor niet steeds voor een verbetering van de gesimuleerde waterpeilen zorgt. Voornamelijk bij grotere windsnelheden wordt het stormhoogwater veel te sterk opgestuwd met een hogere topofactor.

Bij de statistische analyse van de gesimuleerde versus de gemeten waterpeilen over de volledige simulatieperiode zorgt de verhoogde topofactor voor de wind veelal voor hogere waarden van bias en RMSE, voornamelijk bij de hoogwaters.

Algemeen kan gesteld worden dat langs de Westerschelde, Zeeschelde en de afwaartse gedeelten van de tijgebonden zijrivieren de gesimuleerde waterpeilen de metingen vrij goed benaderen.

In de schematisatie van de Westerschelde zijn weinig of geen verbindingen opgenomen tussen de riviertakken die de verschillende geulen voorstellen. Deze geulen zijn van elkaar gescheiden door platen. Bij hoge(re) waterpeilen, zoals tijdens de stormen, zal er echter wel stroming over deze platen plaatsvinden. Met de 2D-modellen op het WL wordt dwarsstroming, over onder andere de Platen van Ossensisse wel gesimuleerd (Stark *et al.*, 2020). Een vergelijkende simulatie tussen het 1D- en 2D-model kan tonen waar het noodzakelijk is om toch een verbinding te voorzien over de platen, door middel van bijvoorbeeld link channels. Om voornamelijk bij stormen de simulatie van de hoogwaterpeilen te verbeteren, volgt hieruit de aanbeveling om de bathymetrie van de Westerschelde te actualiseren en de riviertakken van de Westerschelde te herschematiseren, waarbij rekening gehouden wordt met mogelijke dwarsstromingen bij hogere waterpeilen.

Langs de tijgebonden zijrivieren is het effect van de topofactoren, zoals te verwachten, kleiner. Enkel ter hoogte van GOG-GGG Zennegat zorgen de te hoge waterpeilen ervoor dat ook de waterpeilen in het GOG te hoog zijn, en het gebied volledig gevuld wordt. Dit heeft een effect op het maximum waterpeil meer opwaarts langs de Dijle.

Ook de waterpeilen in de GOG's waar meetgegevens beschikbaar zijn, werden geëvalueerd. In de GOG's treedt vaak voor en na de storm(en) een schommeling op van het waterpeil, of verloopt de uitwatering te traag of te snel. Dit gedrag zou veroorzaakt kunnen worden door de aanwezigheid van slib in de uitwateringsstructuur, lekkende terugslagkleppen of afvoer van water uit het achterland via het GOG. Om het effect van lekkende terugslagkleppen te simuleren werd bij enkele GOG's een extra kleine koker geïmplementeerd met een diameter van 20 tot 40 cm, zonder terugslagklep. Bij de meeste GOG's kon hierdoor de schommeling van het waterpeil vrij goed benaderd worden. Het gemodelleerde waterpeil in het GOG tijdens de stormen is enerzijds afhankelijk van het gemodelleerde waterpeil in de waterloop, en anderzijds van de schematisatie van de overlooptijk en van de topografie van het gebied. Bij enkele GOG's kunnen hiervoor nog verbeteringen aangebracht worden.

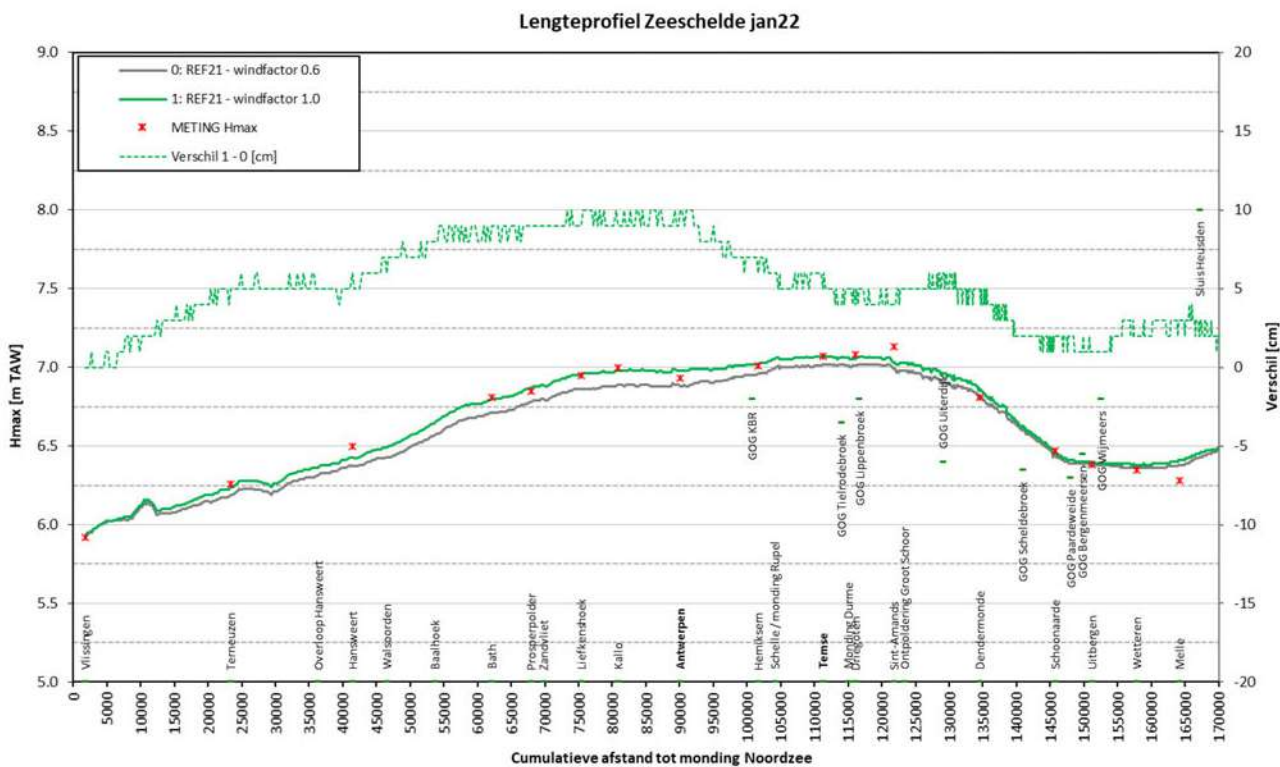
Op vraag van de beheerder werd bijkomend een scenario doorgerekend waarbij GOG KBR uitgeschakeld werd. Hieruit blijkt dat de invloed van GOG KBR op het maximum waterpeil tijdens de storm van jan22 net tot Antwerpen reikt. Het maximum waterpeil of stormhoogwater te Antwerpen lijkt volgens de modelsimulatie niet beïnvloed te worden door de werking van GOG KBR. In het verloop van het waterpeil net na dit stormhoogwater lijkt de daling van het waterpeil wel beïnvloed, hetzij versneld, te worden.

6 Referenties

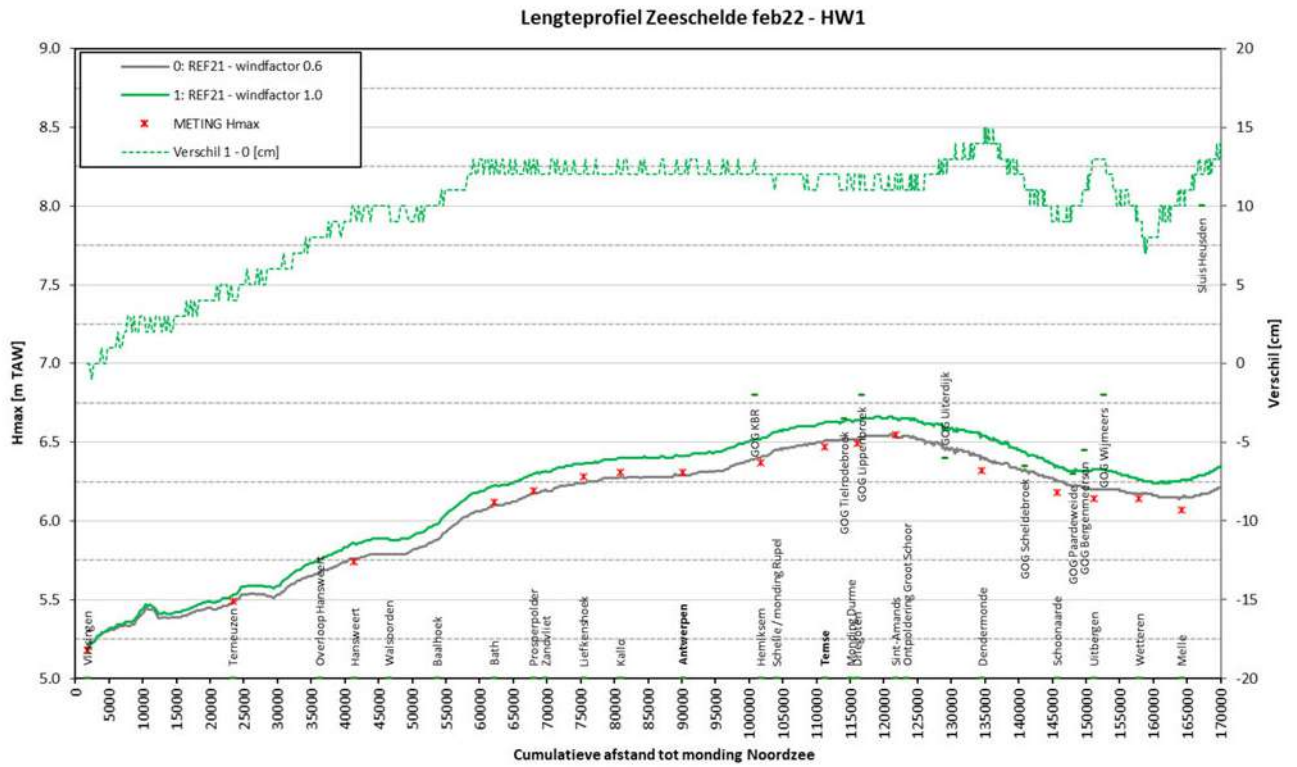
- Coen, L.; Vanderkimpen, P.; Mostaert, F.** (2020). Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren: hindcast storm en was februari-maart 2020. Versie 3.0. *WL Rapporten*, PA015_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at:
<http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=334117>
- DHI.** (2017). MIKE11. A modelling system for rivers and channels. Reference manuel. MIKE by DHI
- Hydrologisch Informatiecentrum.** (2022a). Hoogwater 31 januari 2022. *Scheldeflits*, 02. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at:
<http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=349992>
- Hydrologisch Informatiecentrum.** (2022b). Hoogwaters 17 - 21 februari 2022. *Scheldeflits*, 03. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at:
<http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=349993>
- International Marine and Dredging Consultants; Belgroma; Soresma; HAECON; Analysis, R.; Technum.** (2003). Actualisatie van het Sigmaplan. Integrale verkenning Scheldebekken. Integrale verkenning Rupelbekken. Planstudie rivierherstelproject Durme: deelopdracht 3. Hydrologische en hydraulische modellen: volume 1a. Statistiek Scheldebekken. Versie 2.0. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. Afdeling Zeeschelde: Antwerpen. VIII, 110 + cd-rom pp.
- International Marine and Dredging Consultants; Waterbouwkundig Laboratorium.** (2020). Actualisatie en verbetering van de hydrodynamische modellen van het beheersgebied van De Vlaamse Waterweg, afdeling Zeeschelde-Zeekanaal Rapport 2: hydrodynamisch model Zeeschelde, Actualisatie 2019. Versie 2.0. De Vlaamse Waterweg, Afdeling Zeeschelde-Zeekanaal: [S.l.]
- Pawlowicz, R.; Beardsley, B.; Lentz, S.** (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput. Geosci.* 28(8): 929–937
- Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2020). Dwarsstroming Platen van Ossensisse: Validatie Delft3D-NeVla model voor meetcampagne 12/03/2020. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 20_036_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at:
<http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=327364>
- Verkaik, J.W.** (2001). A method for geographical interpolation of wind speed over heterogeneous terrain. KNMI
- Wever, N.; Groen, G.** (2009). Improving potential wind for extreme wind statistics. *KNMI Scientific Report*, WR 2009-02. KNMI: De Bilt, Nederland

BIJLAGE A Lengteprofielen maximum waterpeilen rivieren

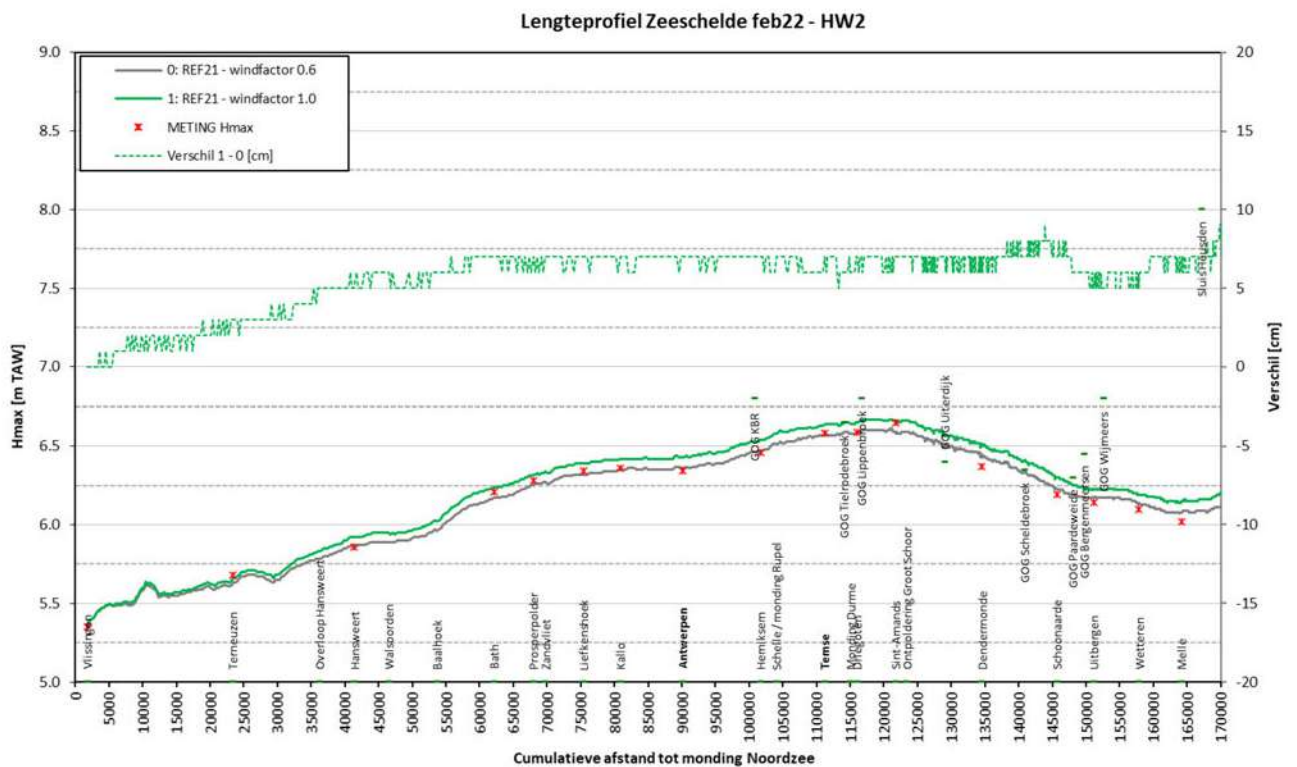
Westerschelde – Zeeschelde



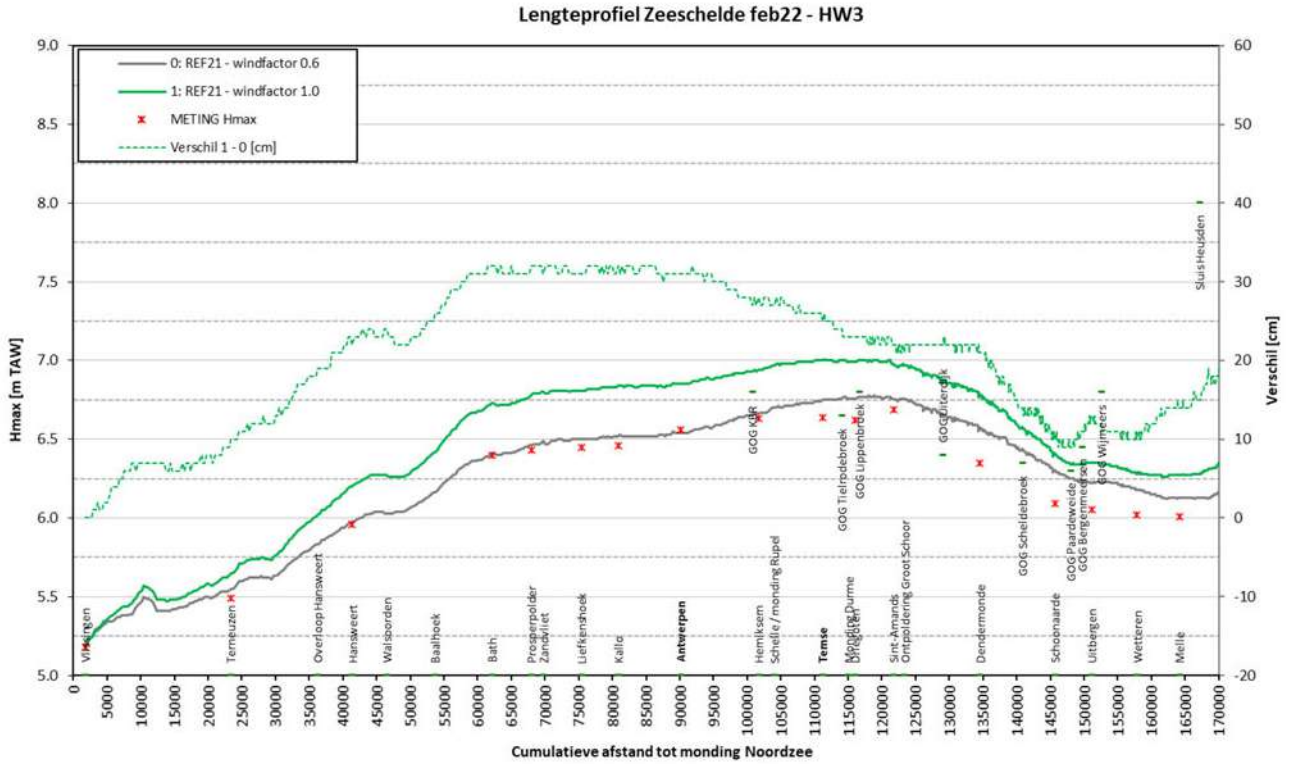
Figuur A 1 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm jan22



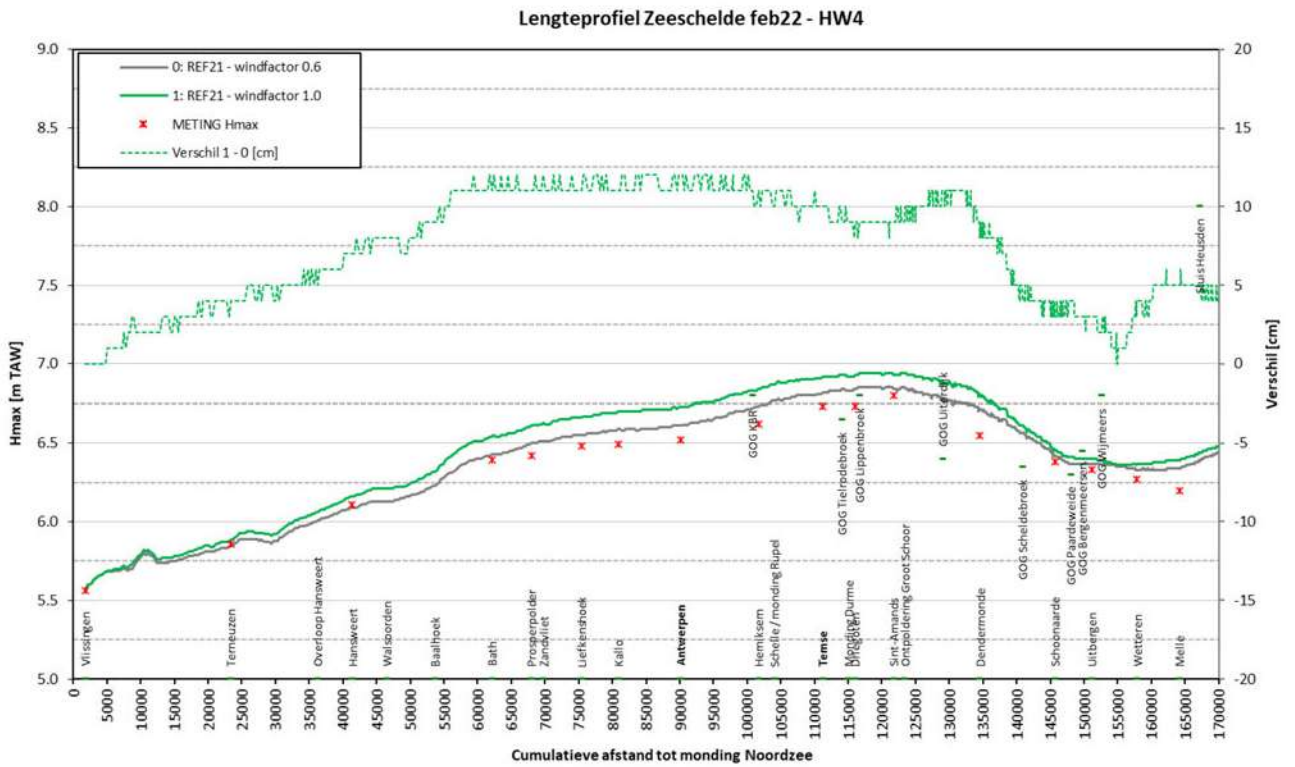
Figuur A 2 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW1



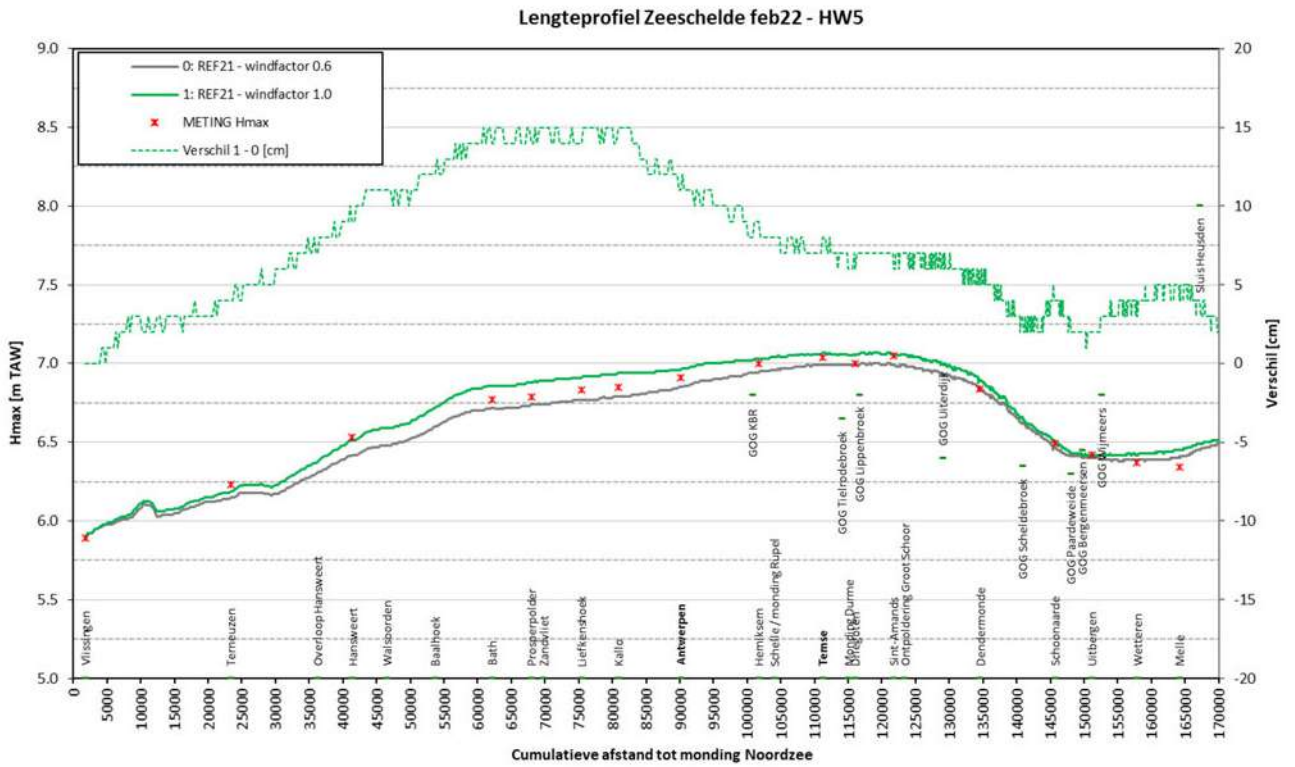
Figuur A 3 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW2



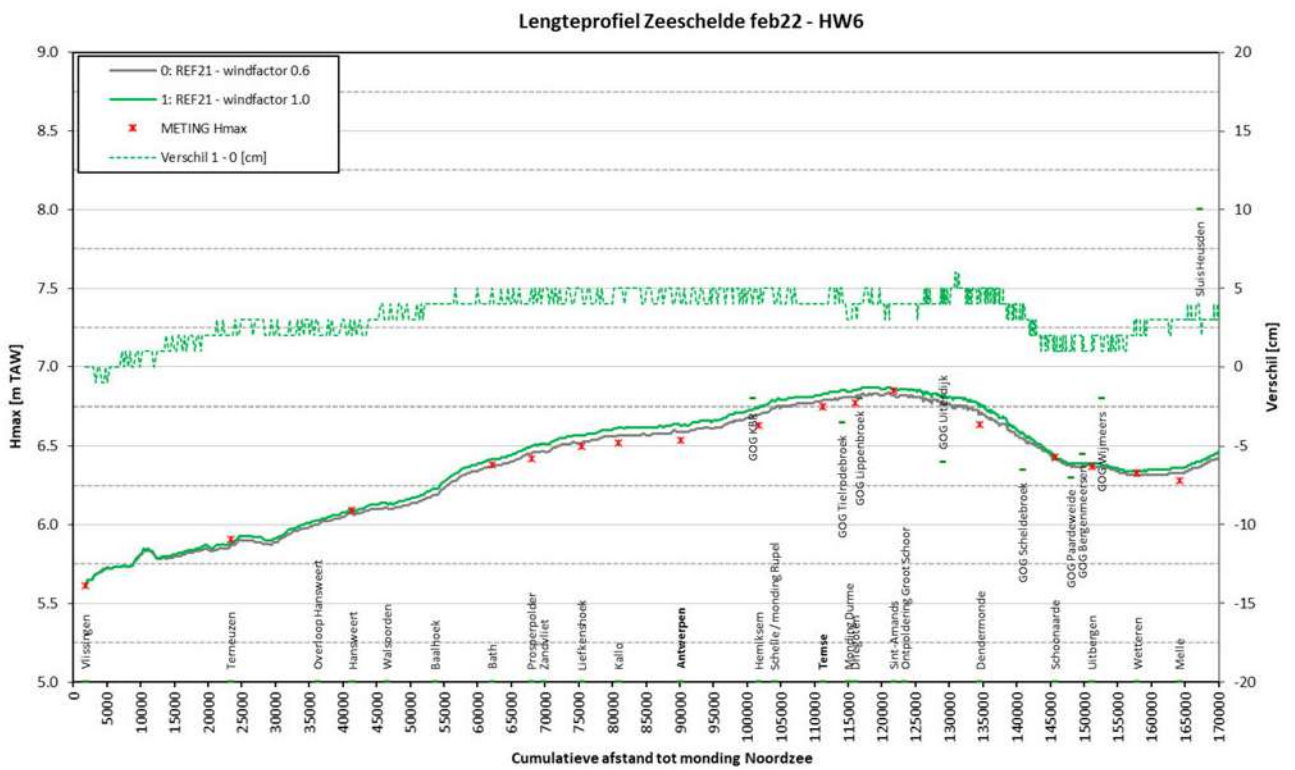
Figuur A 4 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW3



Figuur A 5 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW4

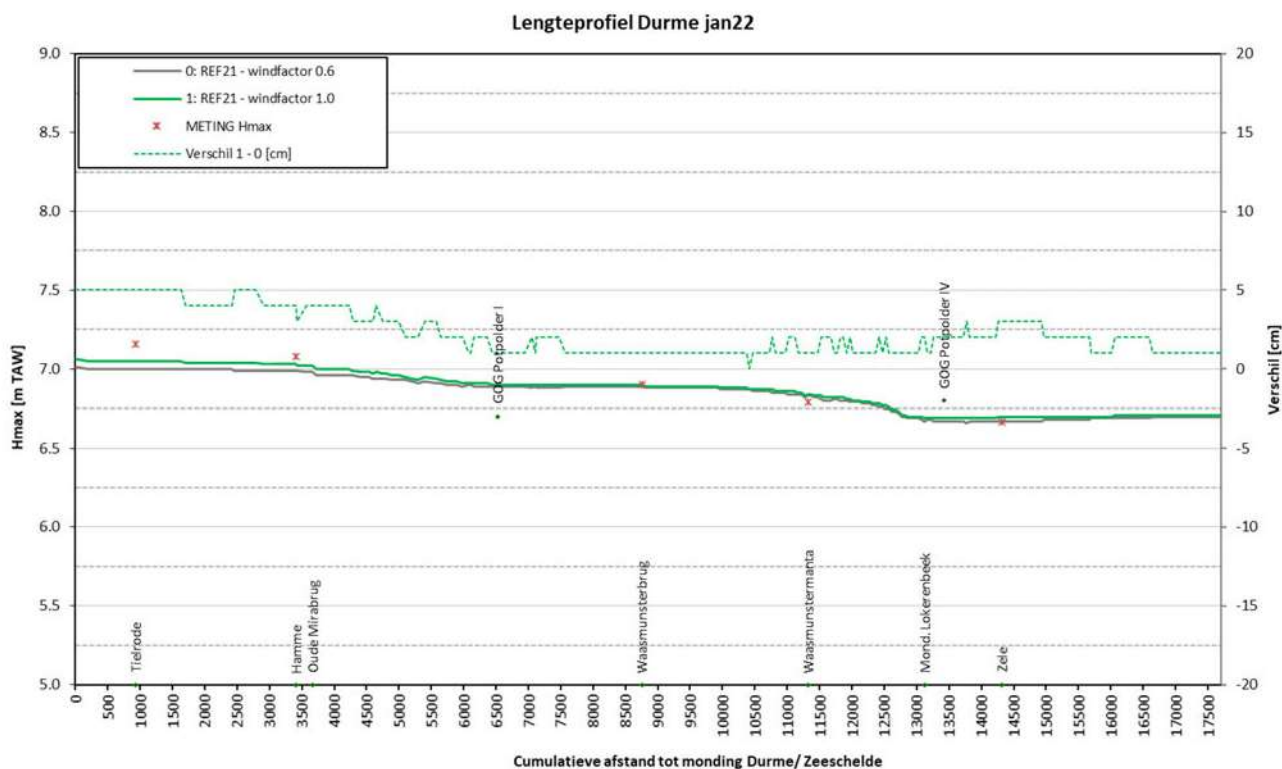


Figuur A 6 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW5

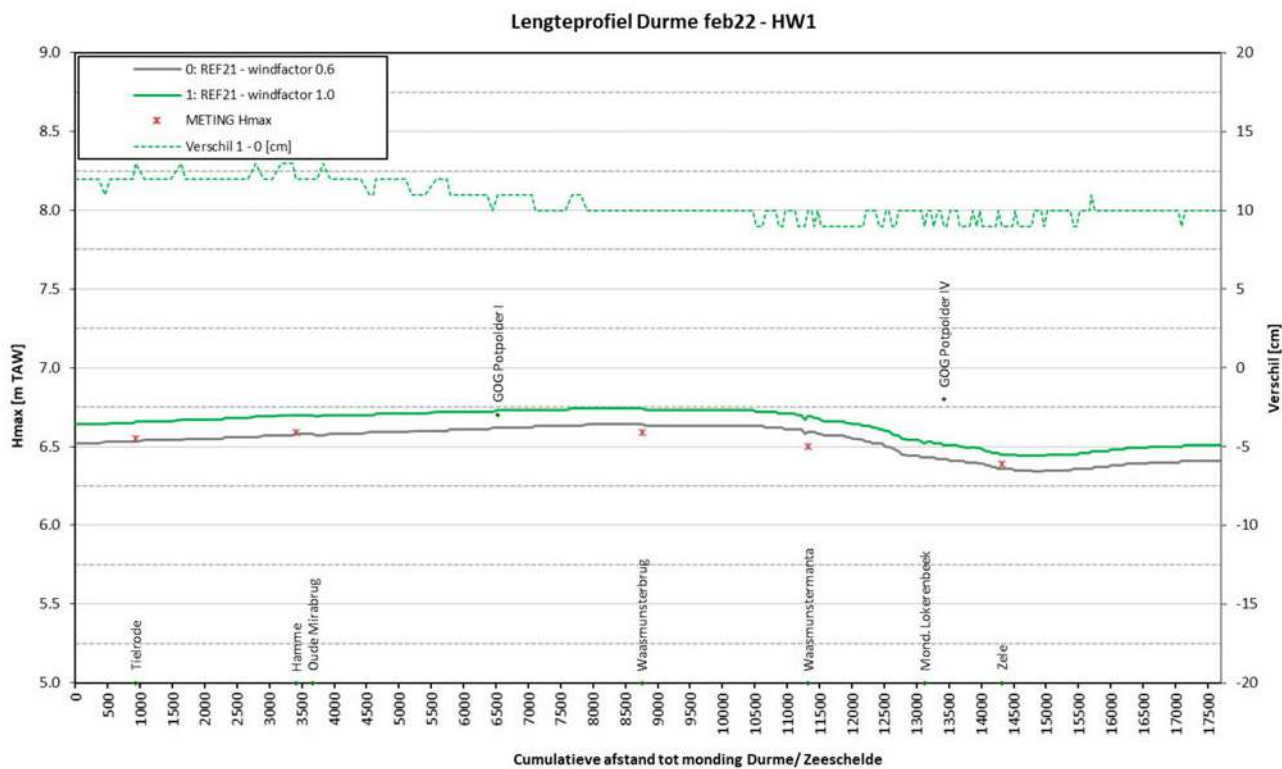


Figuur A 7 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – storm feb22-HW6

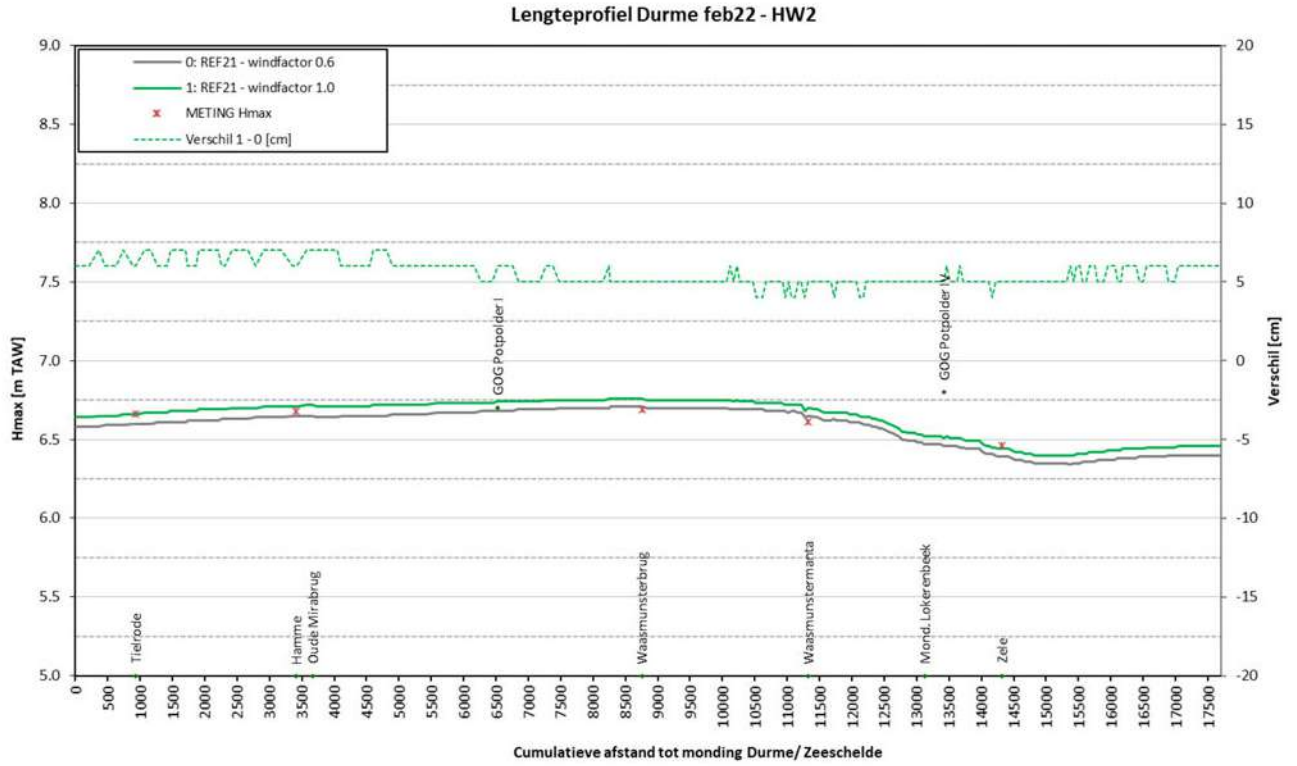
Durme



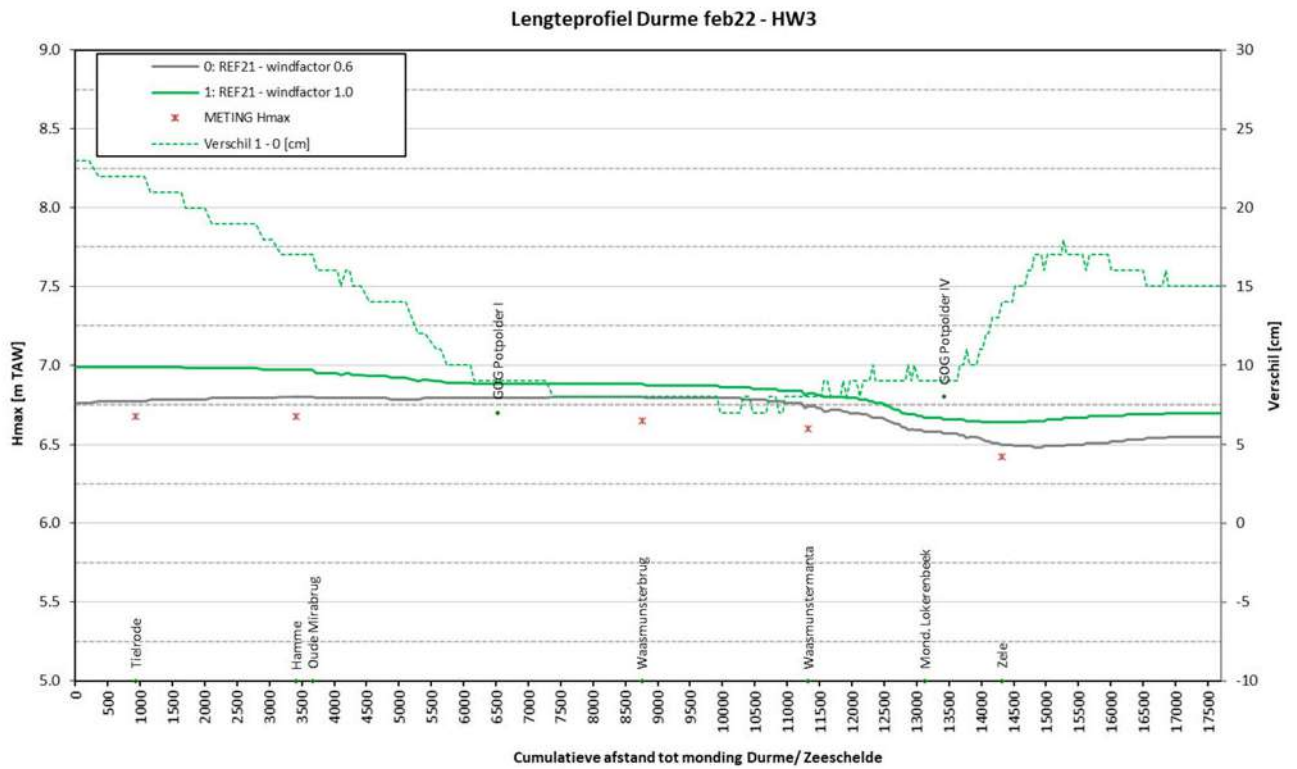
Figuur A 8 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm jan22



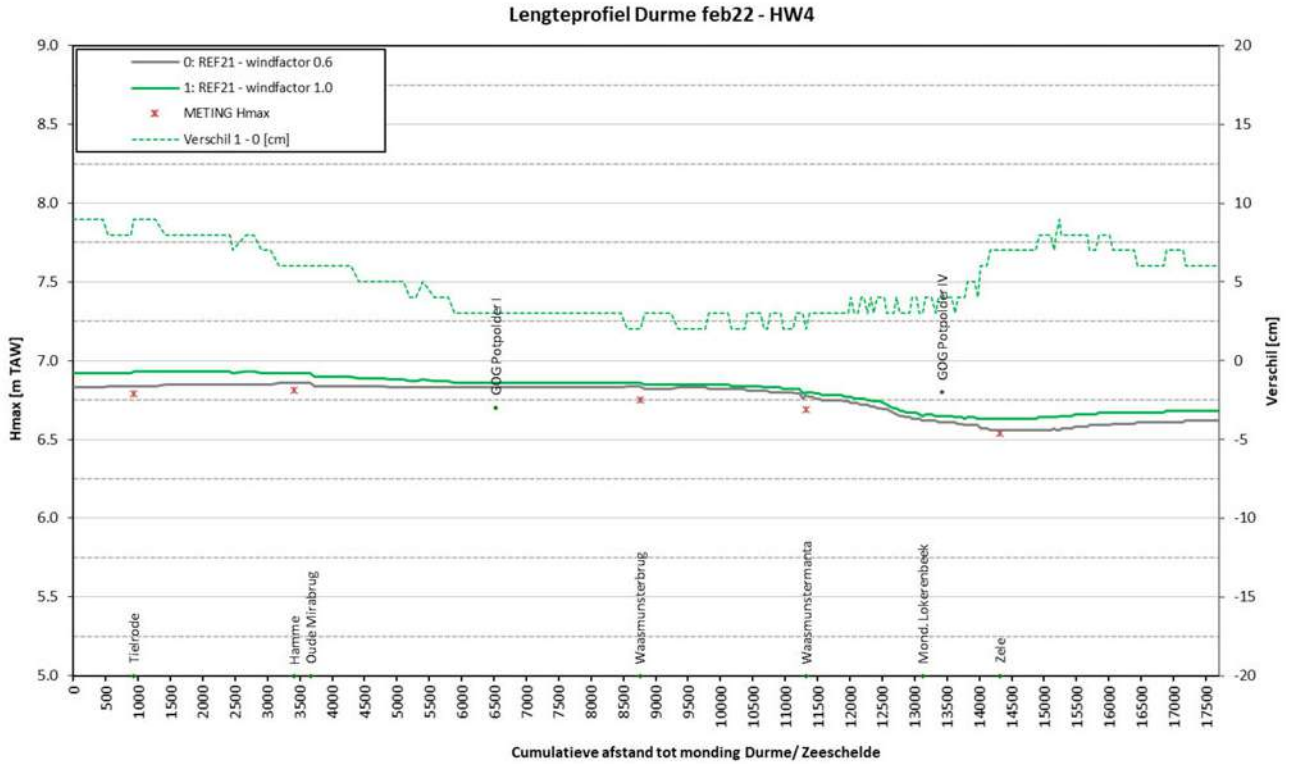
Figuur A 9 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW1



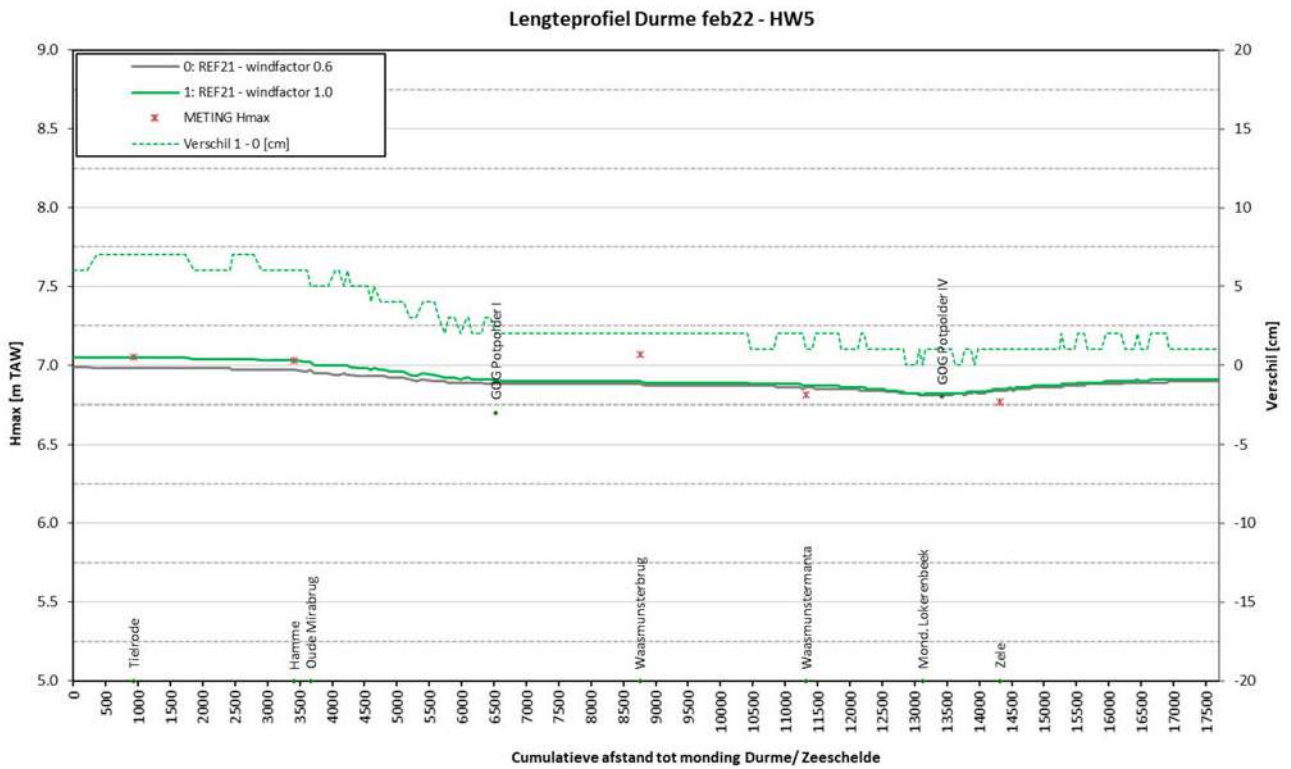
Figuur A 10 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW2



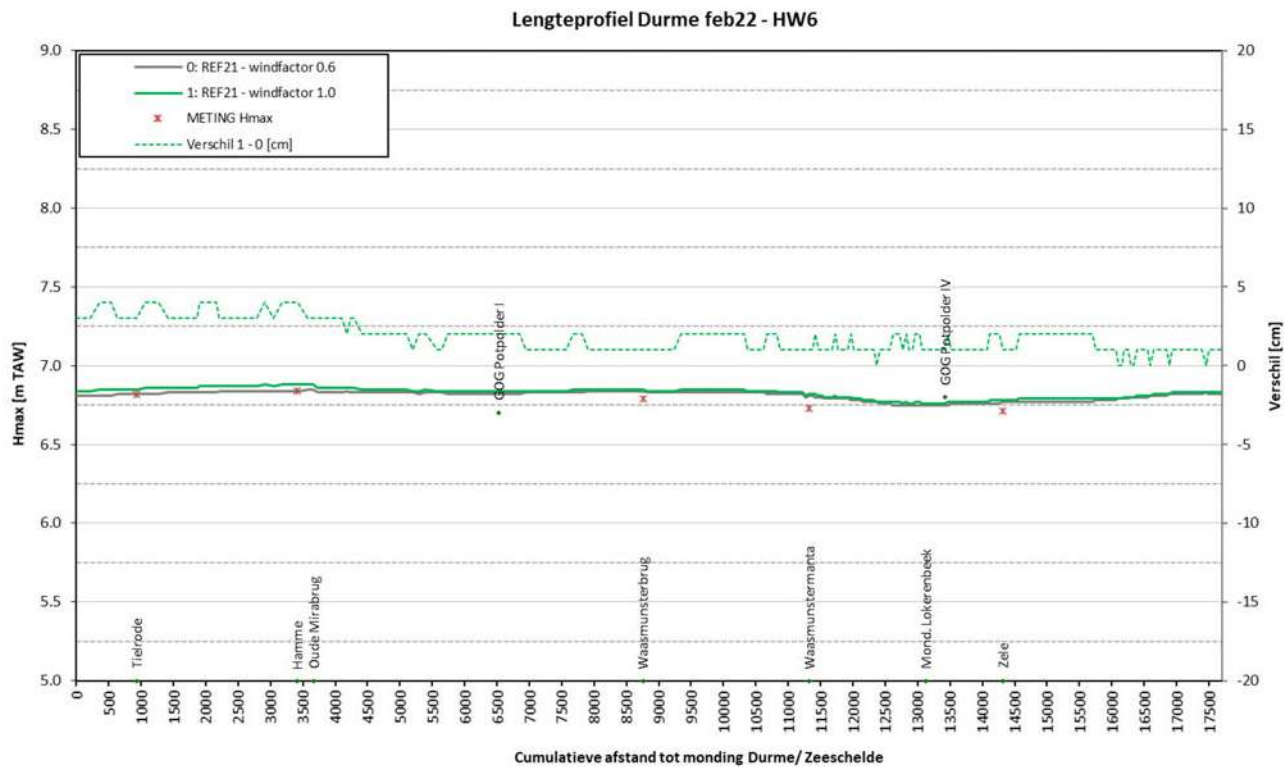
Figuur A 11 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW3



Figuur A 12 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW4

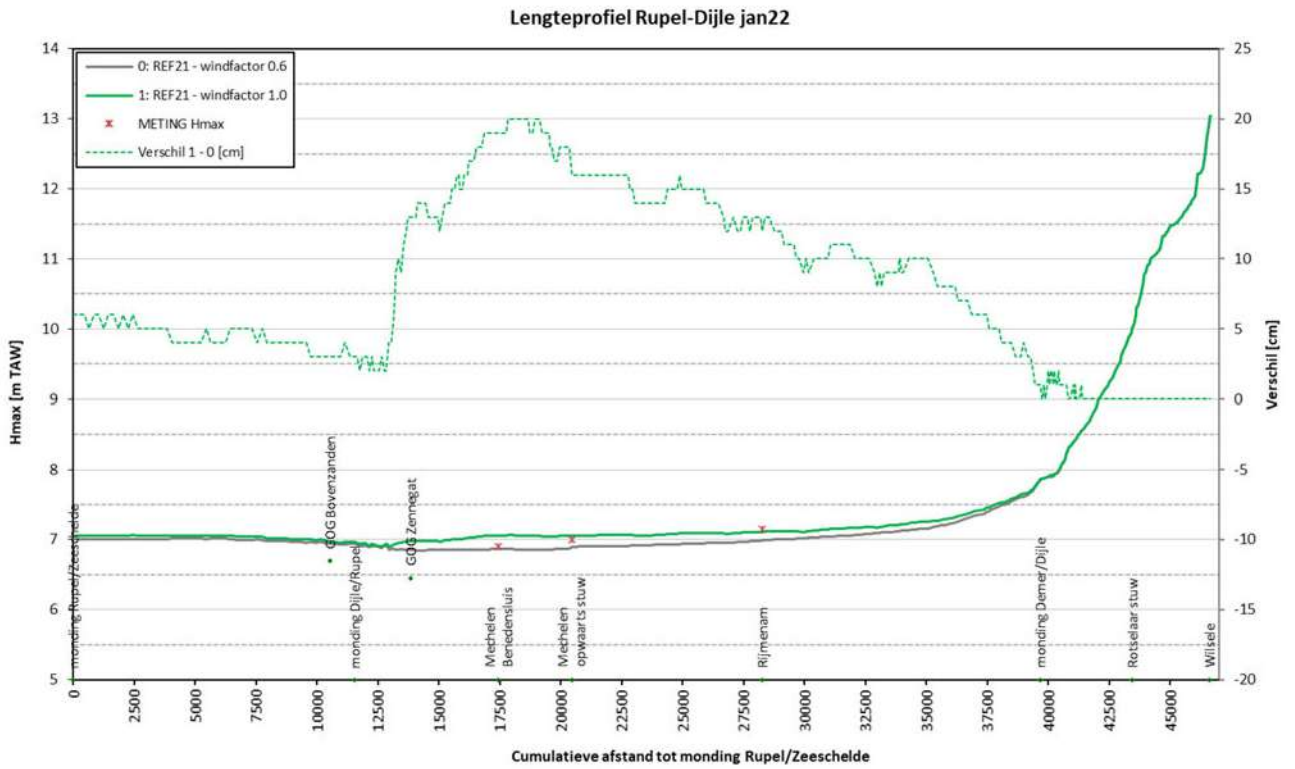


Figuur A 13 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW5

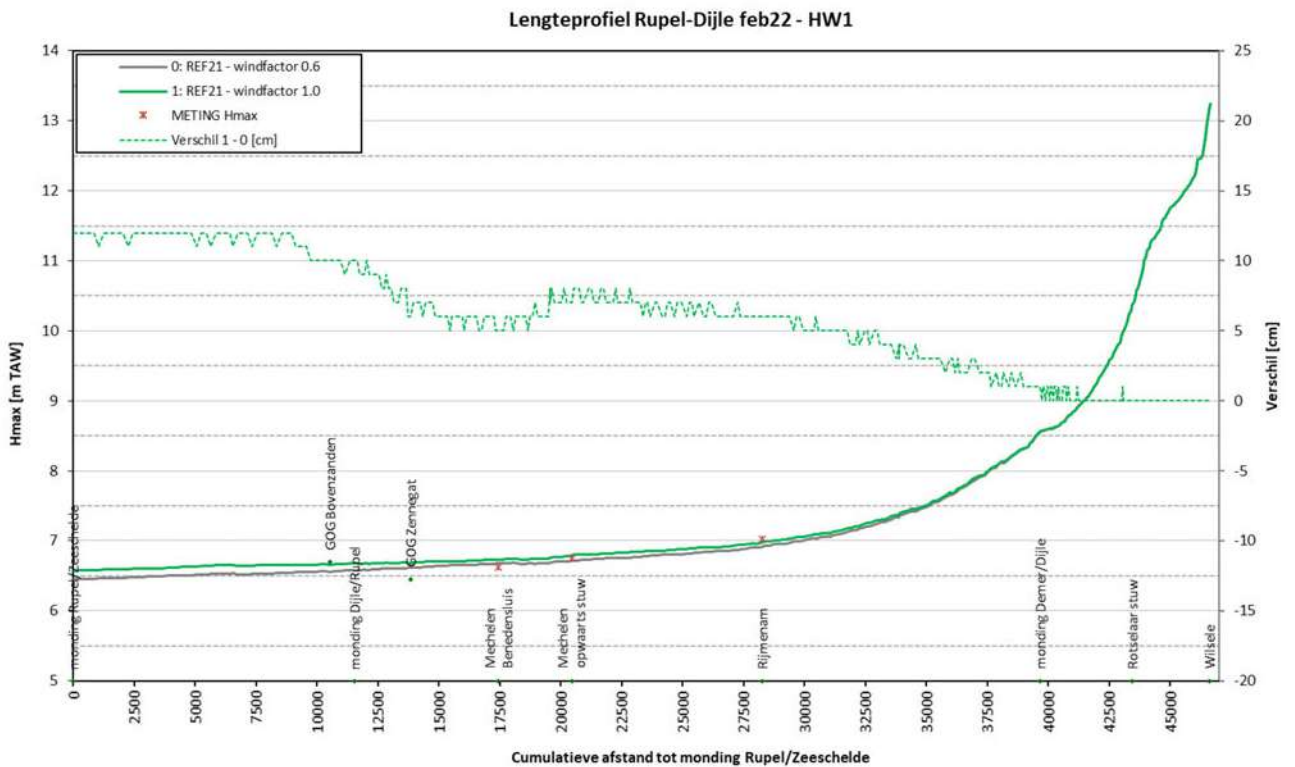


Figuur A 14 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme – storm feb22-HW6

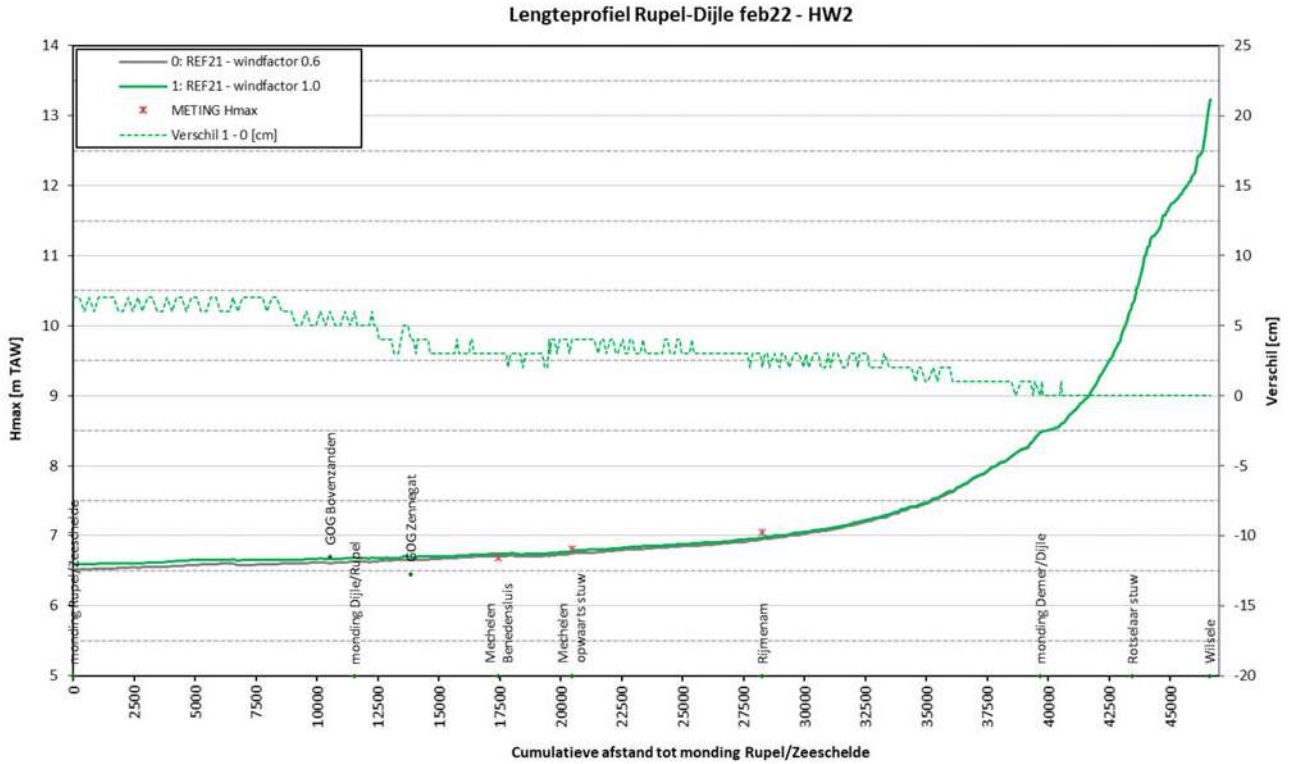
Rupel – Dijle



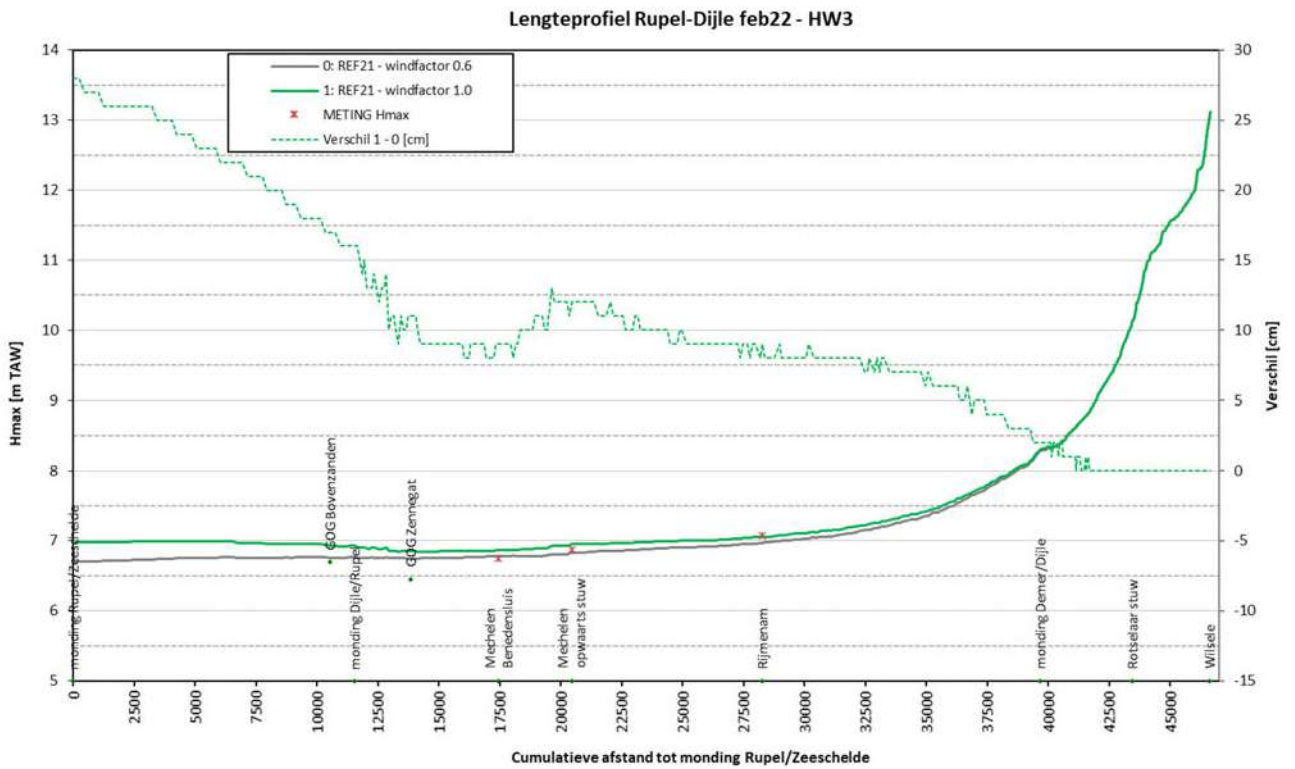
Figuur A 15 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm jan22



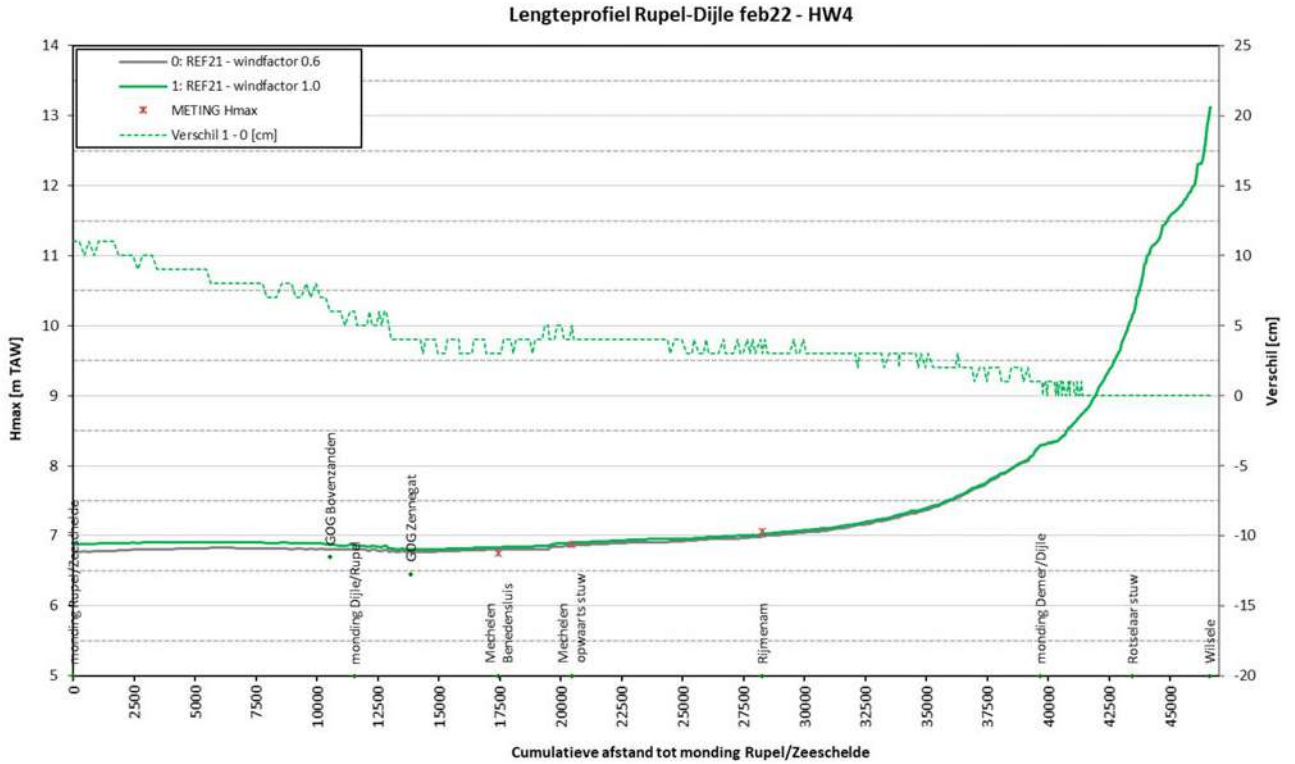
Figuur A 16 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW1



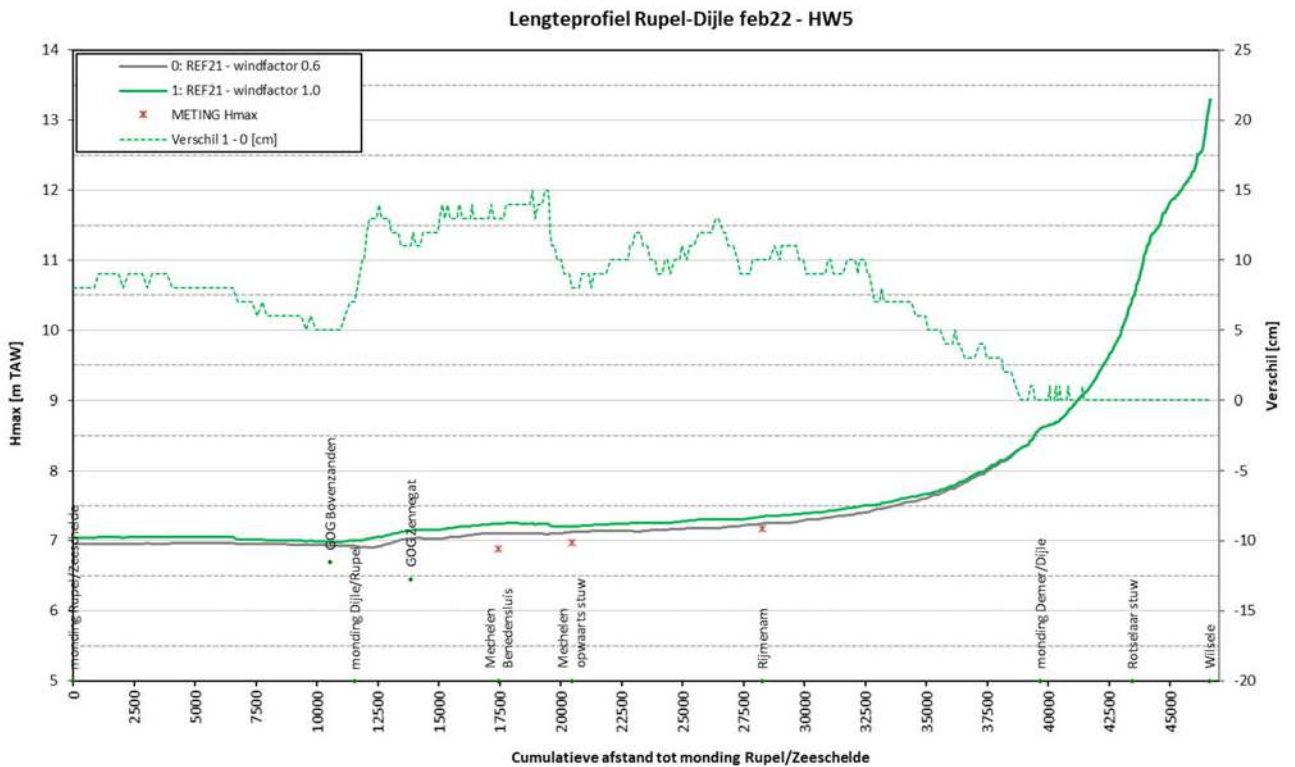
Figuur A 17 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW2



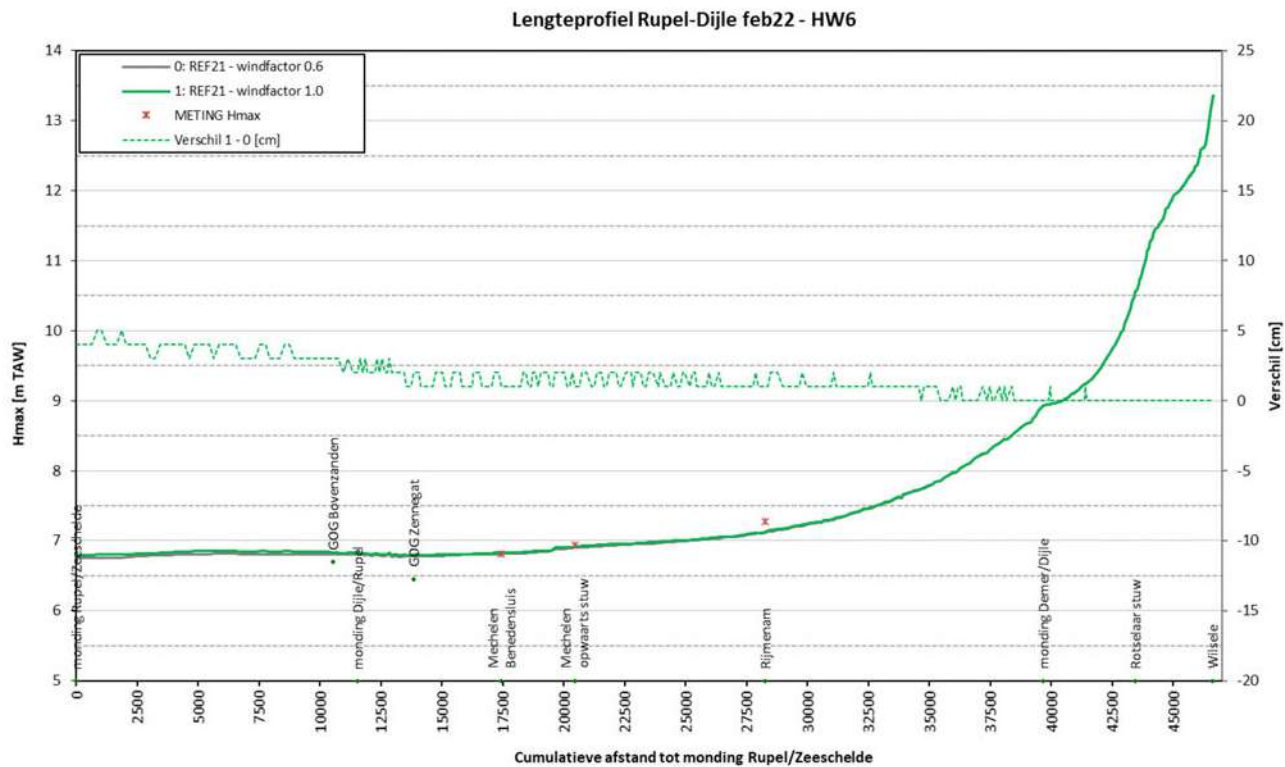
Figuur A 18 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW3



Figuur A 19 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW4

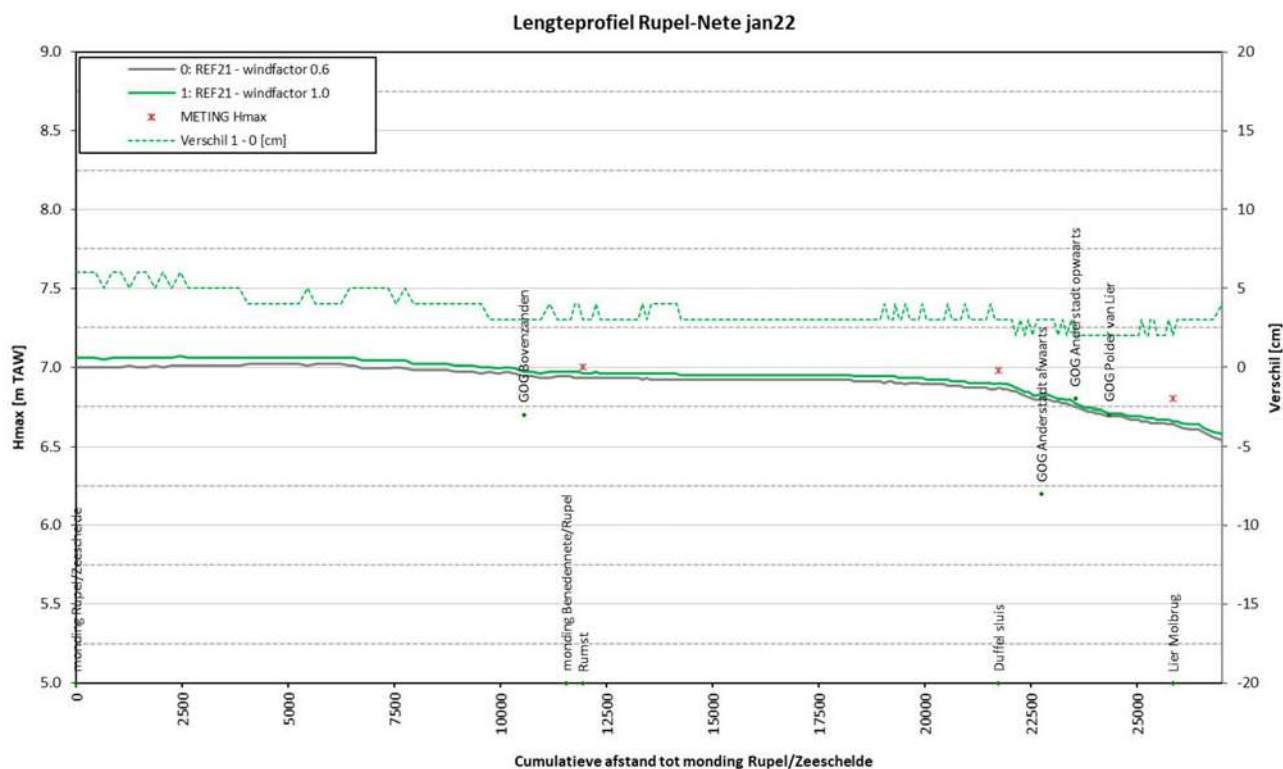


Figuur A 20 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW5

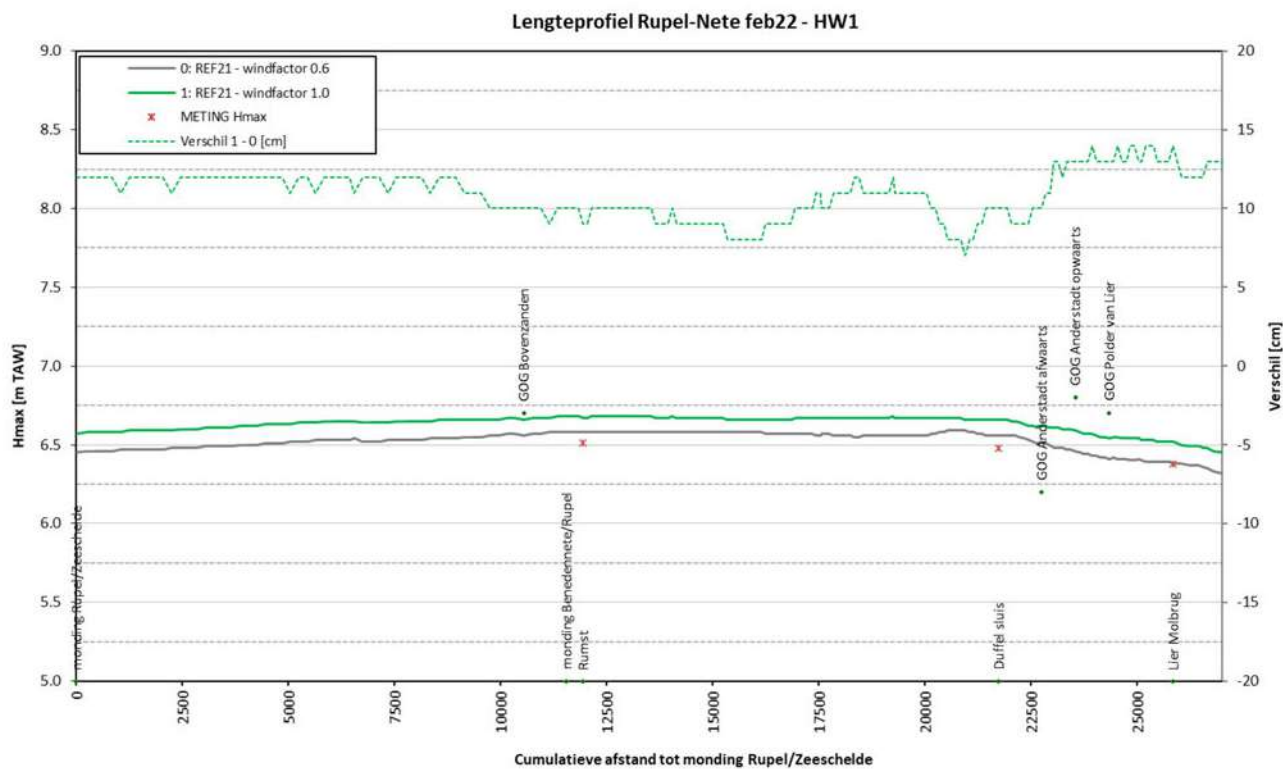


Figuur A 21 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle – storm feb22-HW6

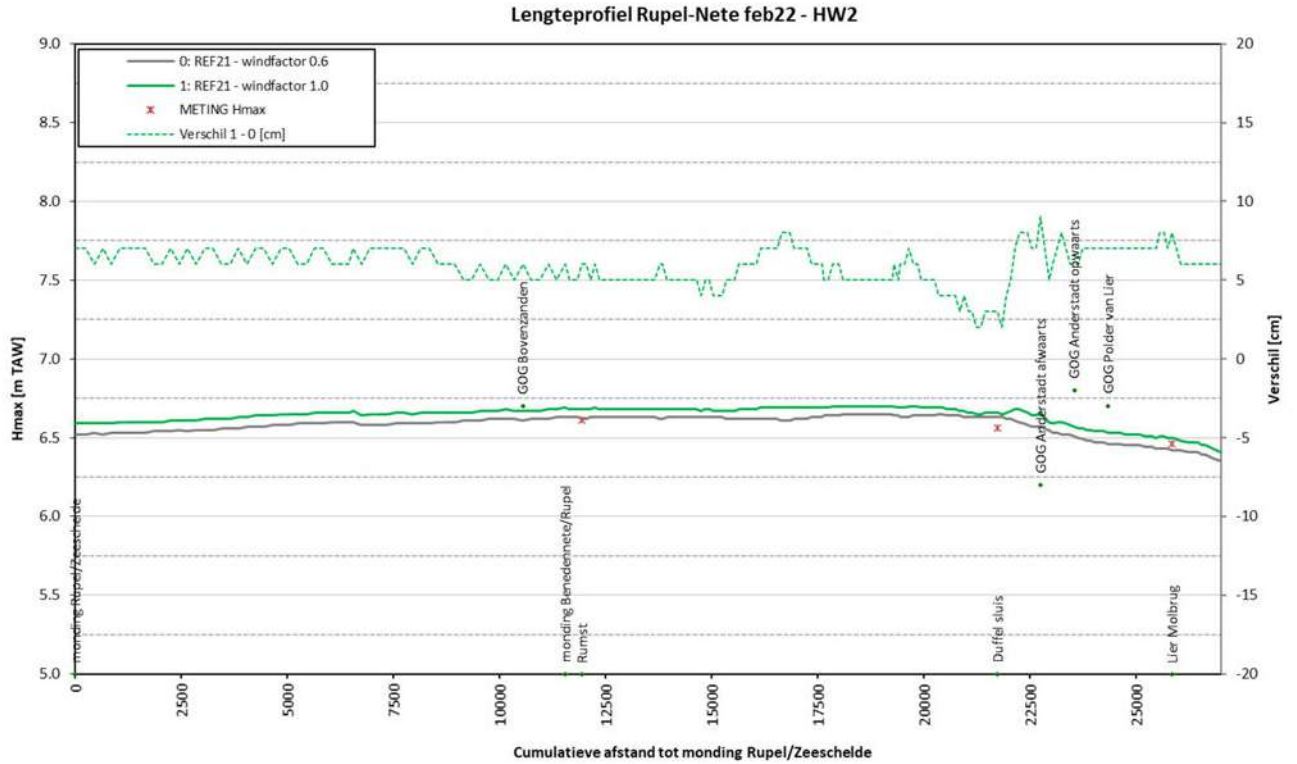
Rupel – Benedennete



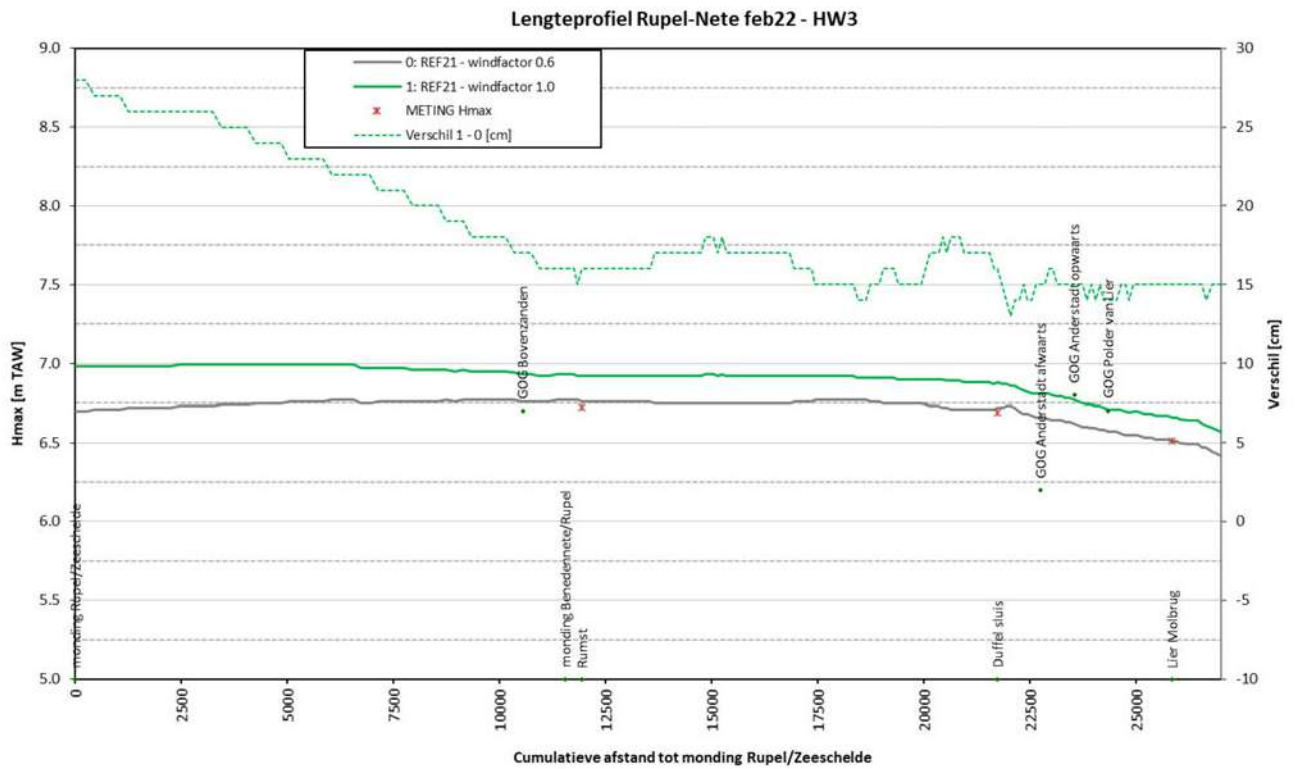
Figuur A 22 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm jan22



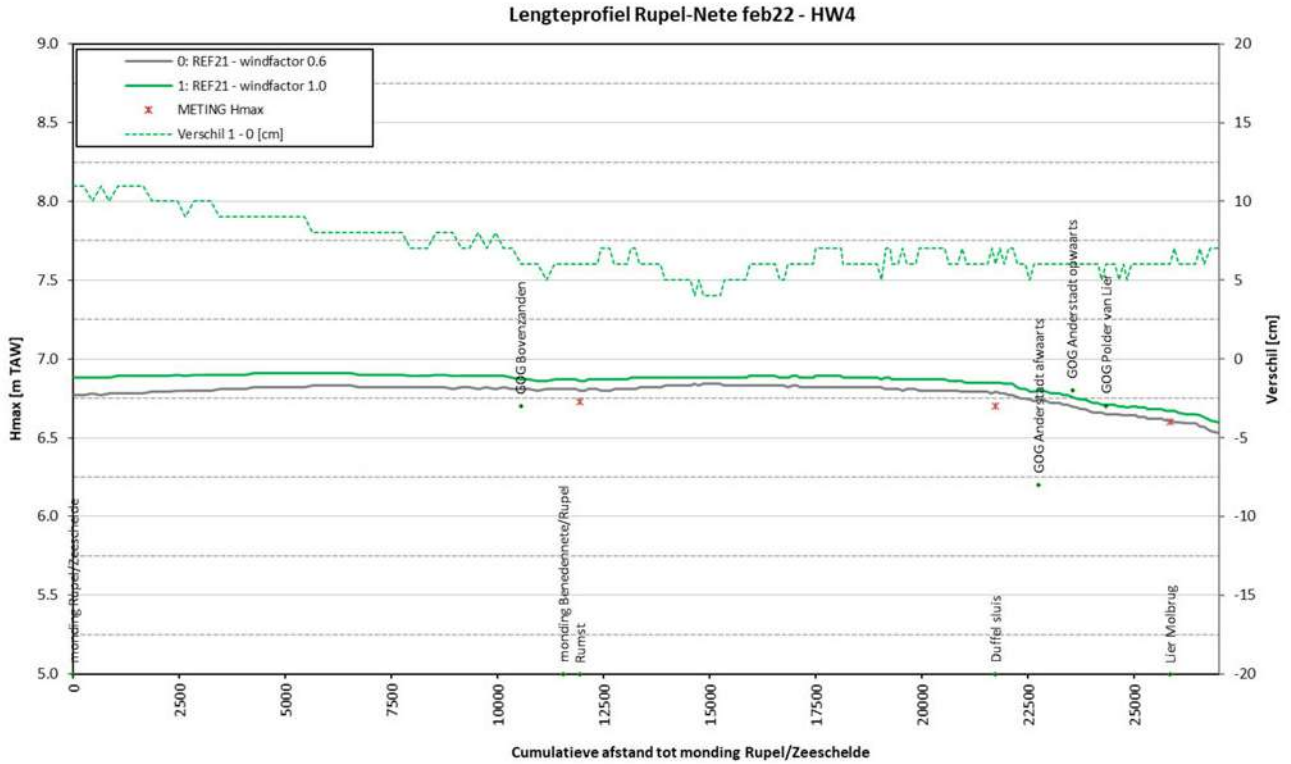
Figuur A 23 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW1



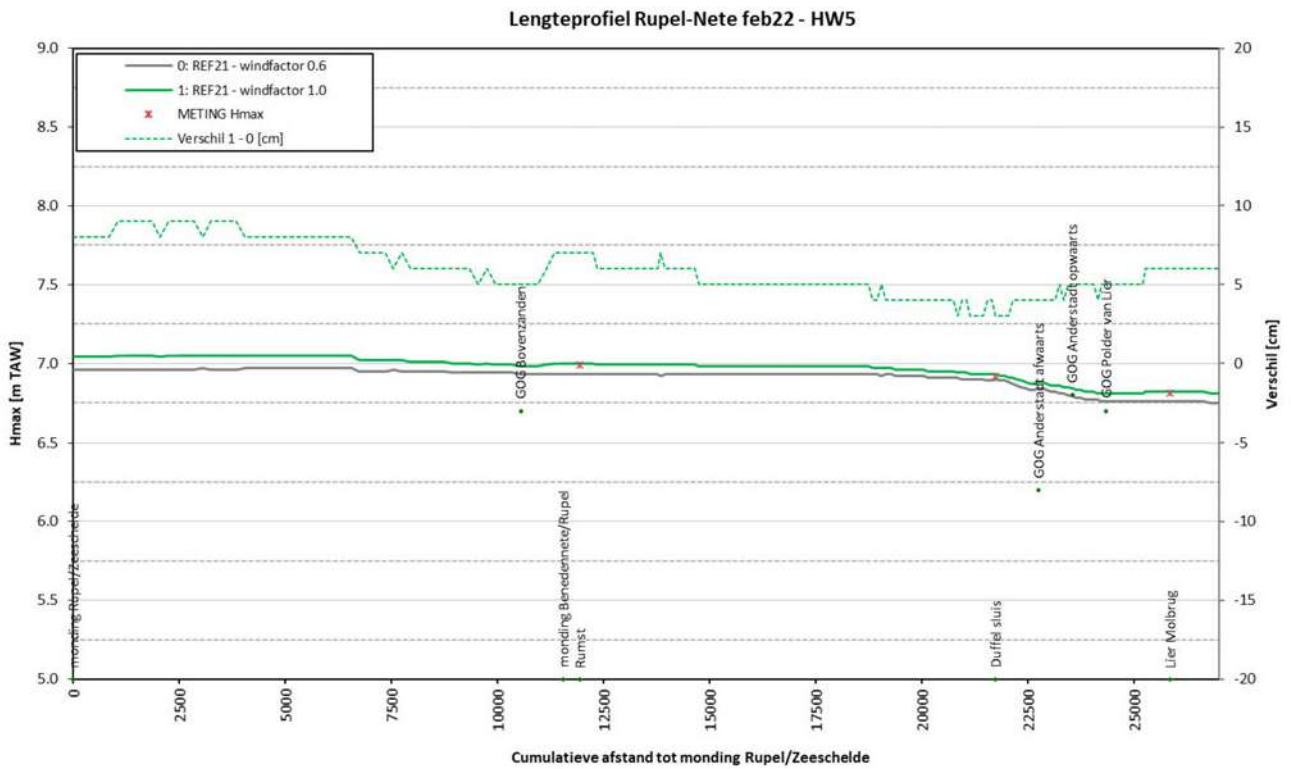
Figuur A 24 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW2



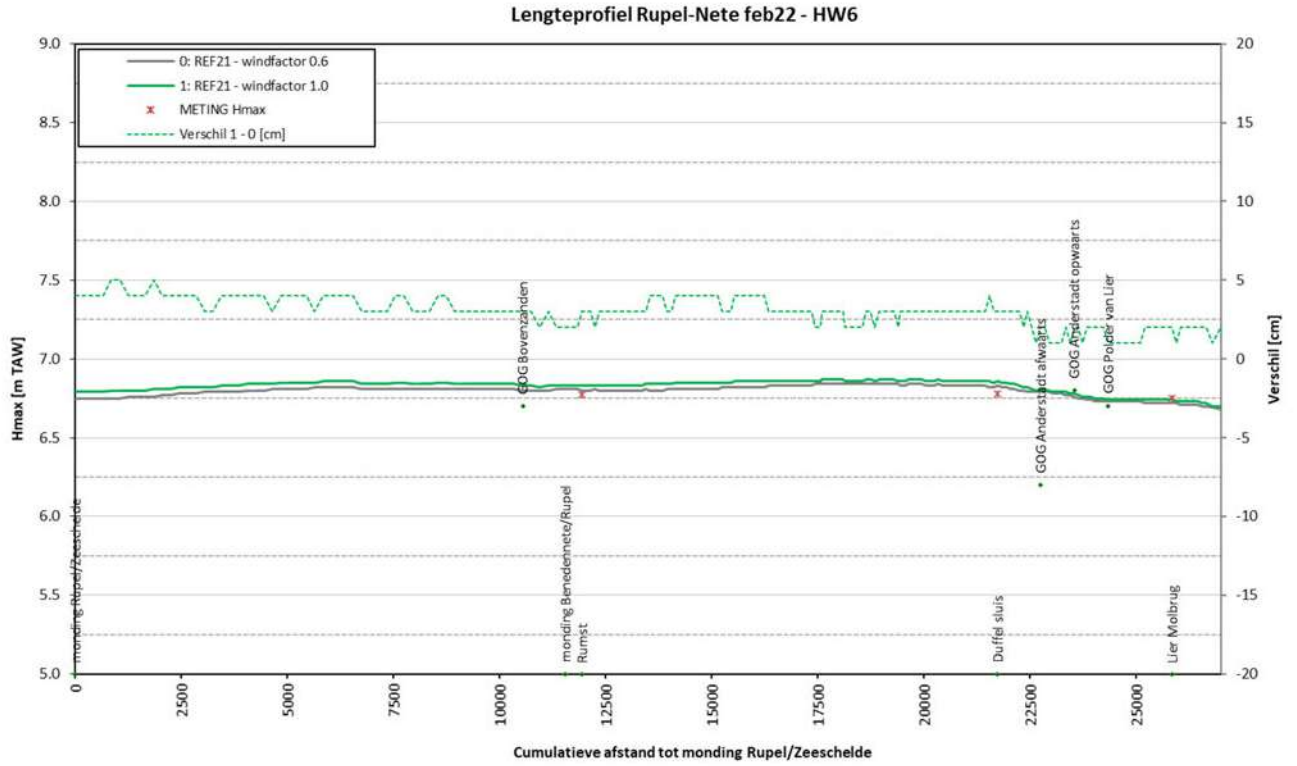
Figuur A 25 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW3



Figuur A 26 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW4

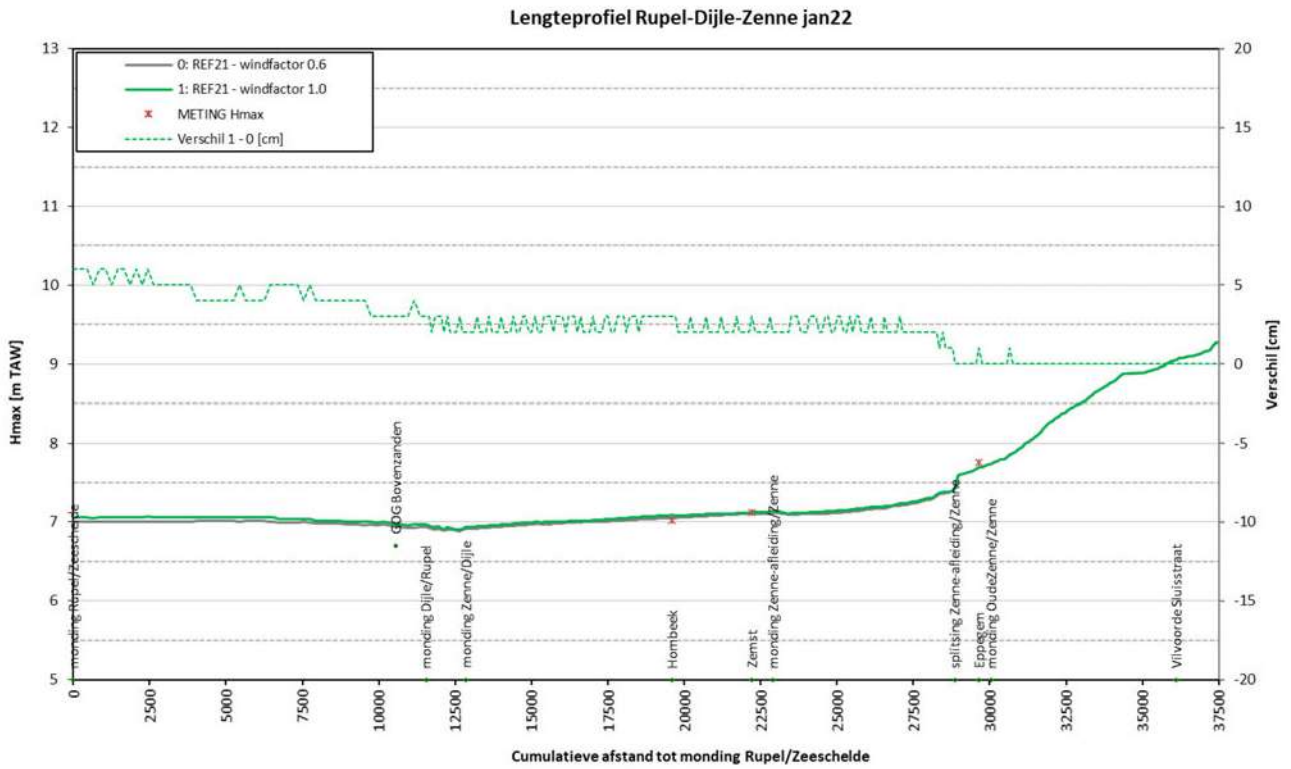


Figuur A 27 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW5

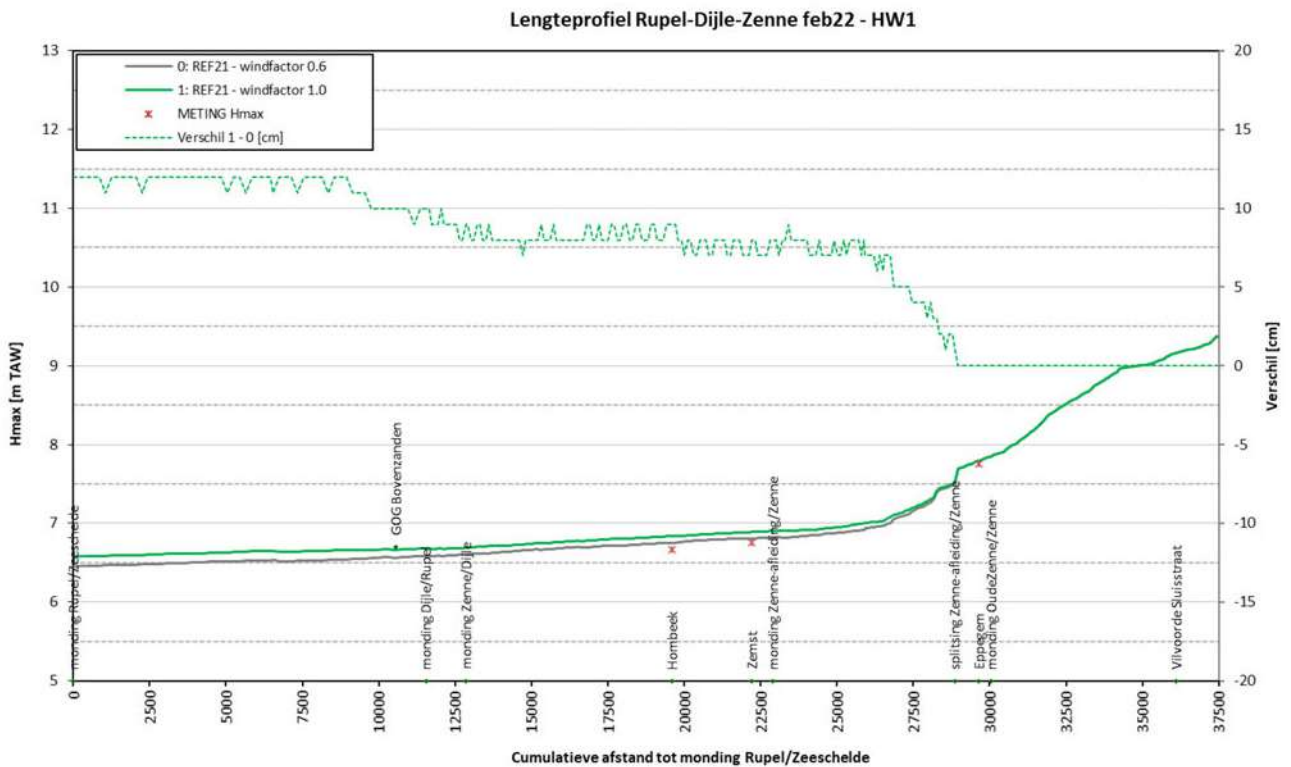


Figuur A 28 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete – storm feb22-HW6

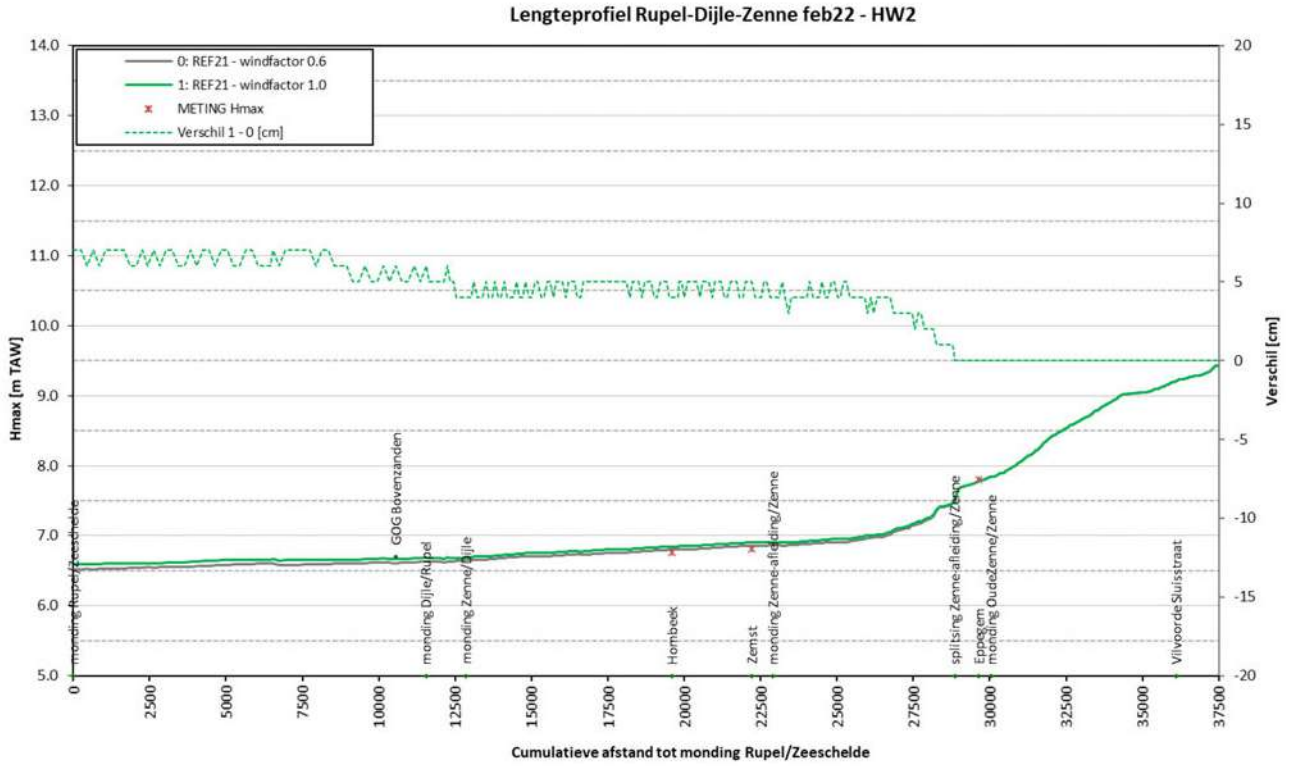
Rupel – Zenne



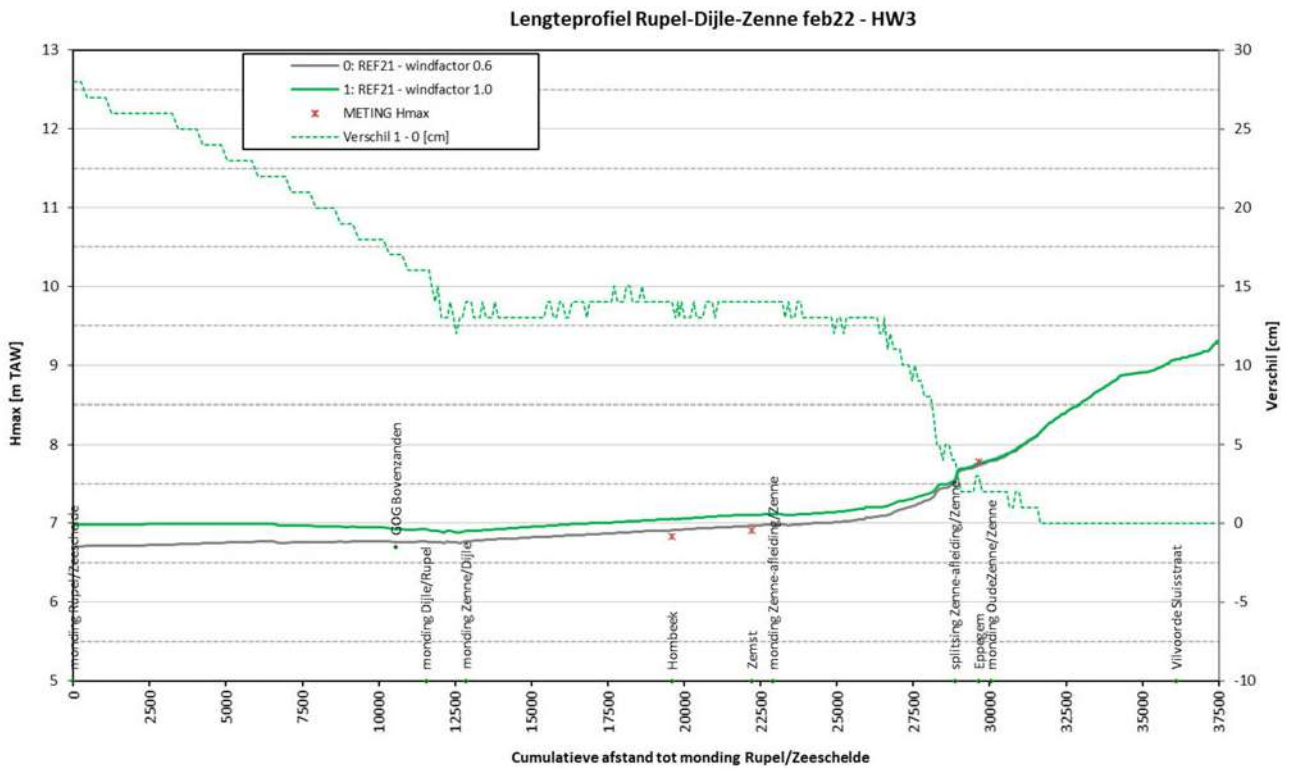
Figuur A 29 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm jan22



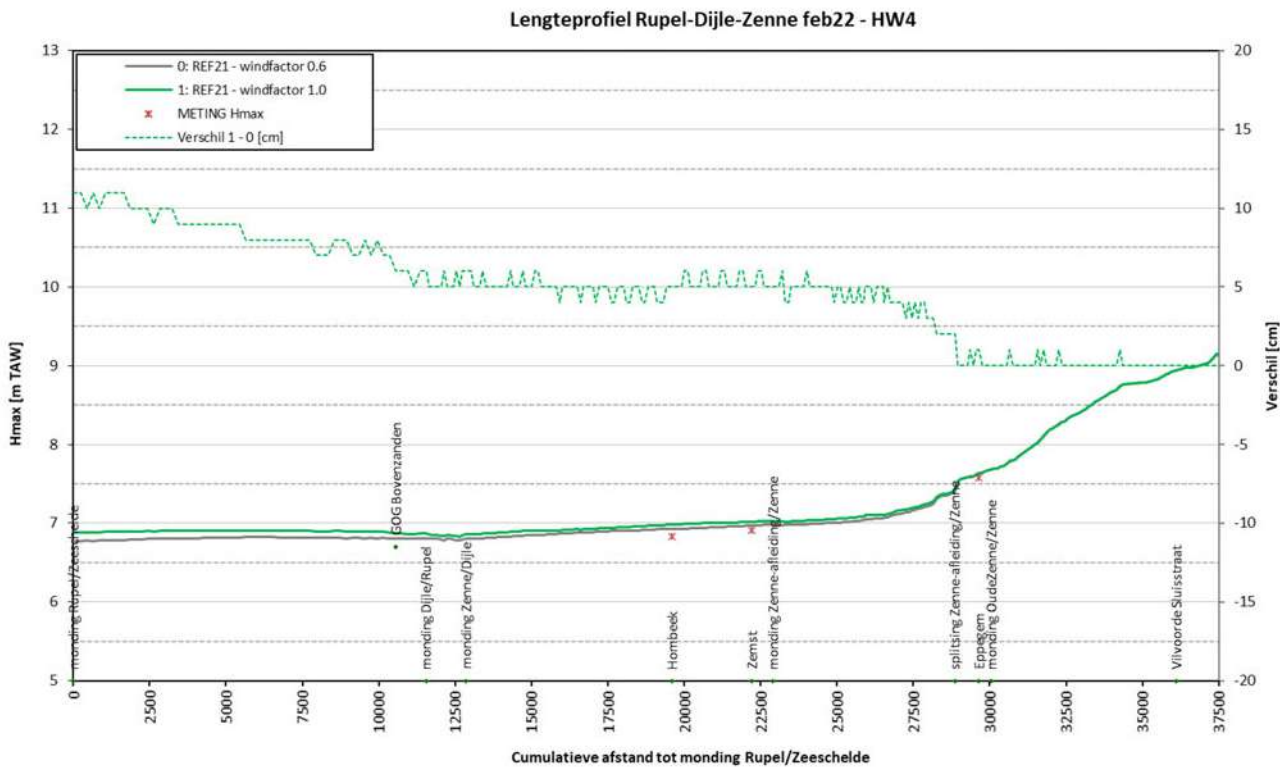
Figuur A 30 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW1



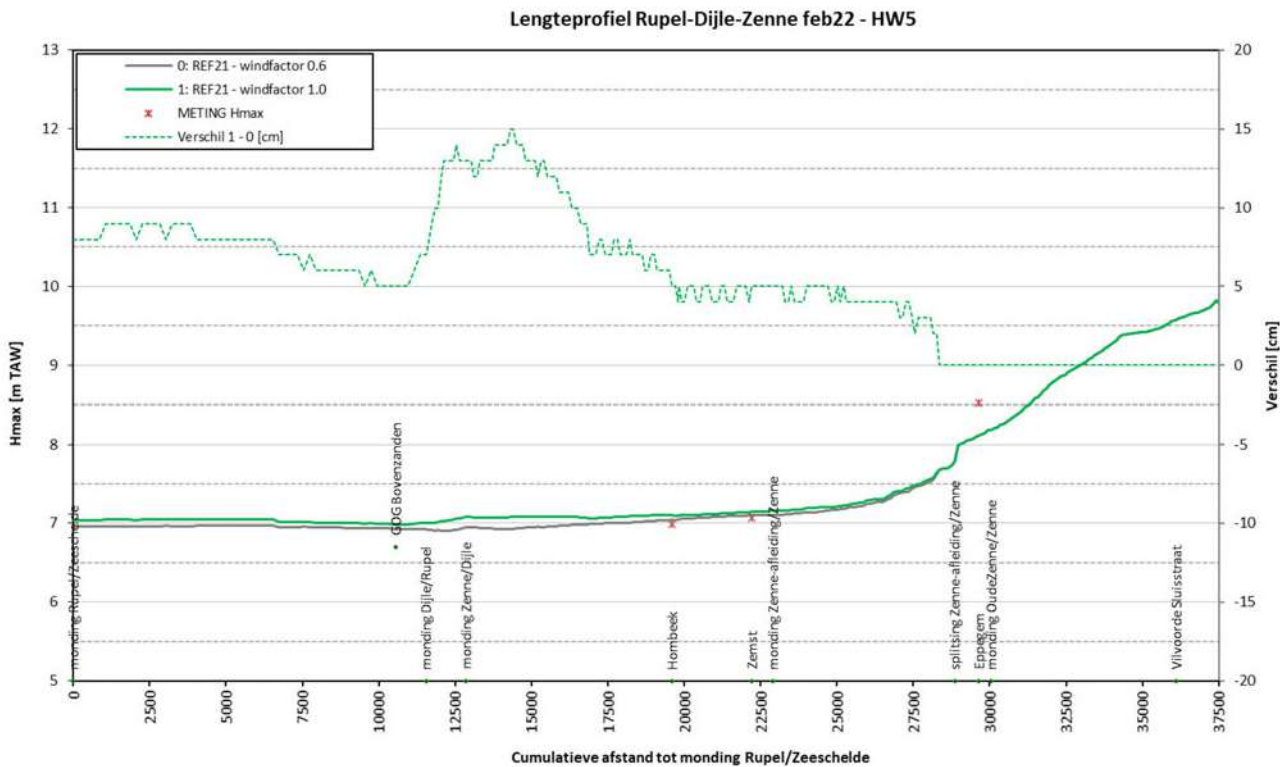
Figuur A 31 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW2



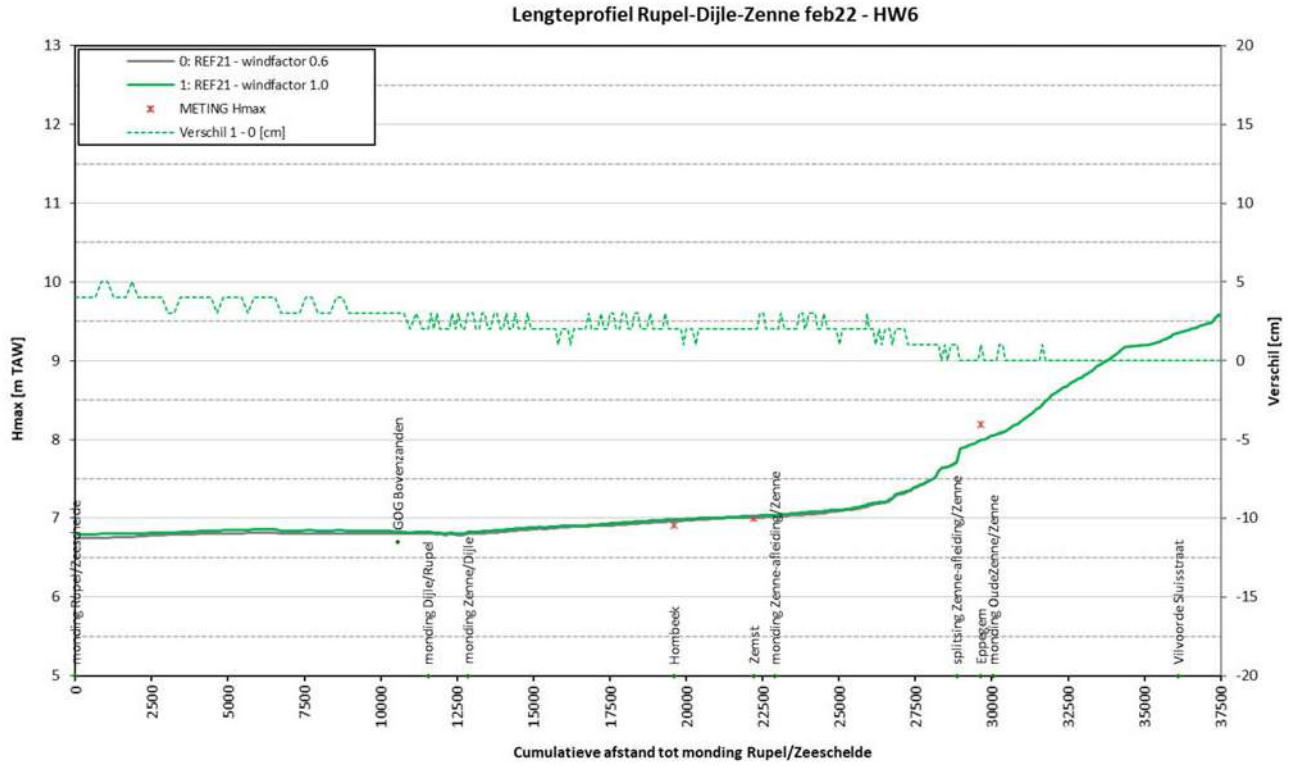
Figuur A 32 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW3



Figuur A 33 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW4



Figuur A 34 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW5



Figuur A 35 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Zenne – storm feb22-HW6

BIJLAGE B Tijdreeksen waterpeilen rivieren

Legende

Blauw = 21_REF_zeeschelde_w06 (topofactor 0.6)

Rood = 21_REF_zeeschelde_w10 (topofactor 1.0)

Geel = meting

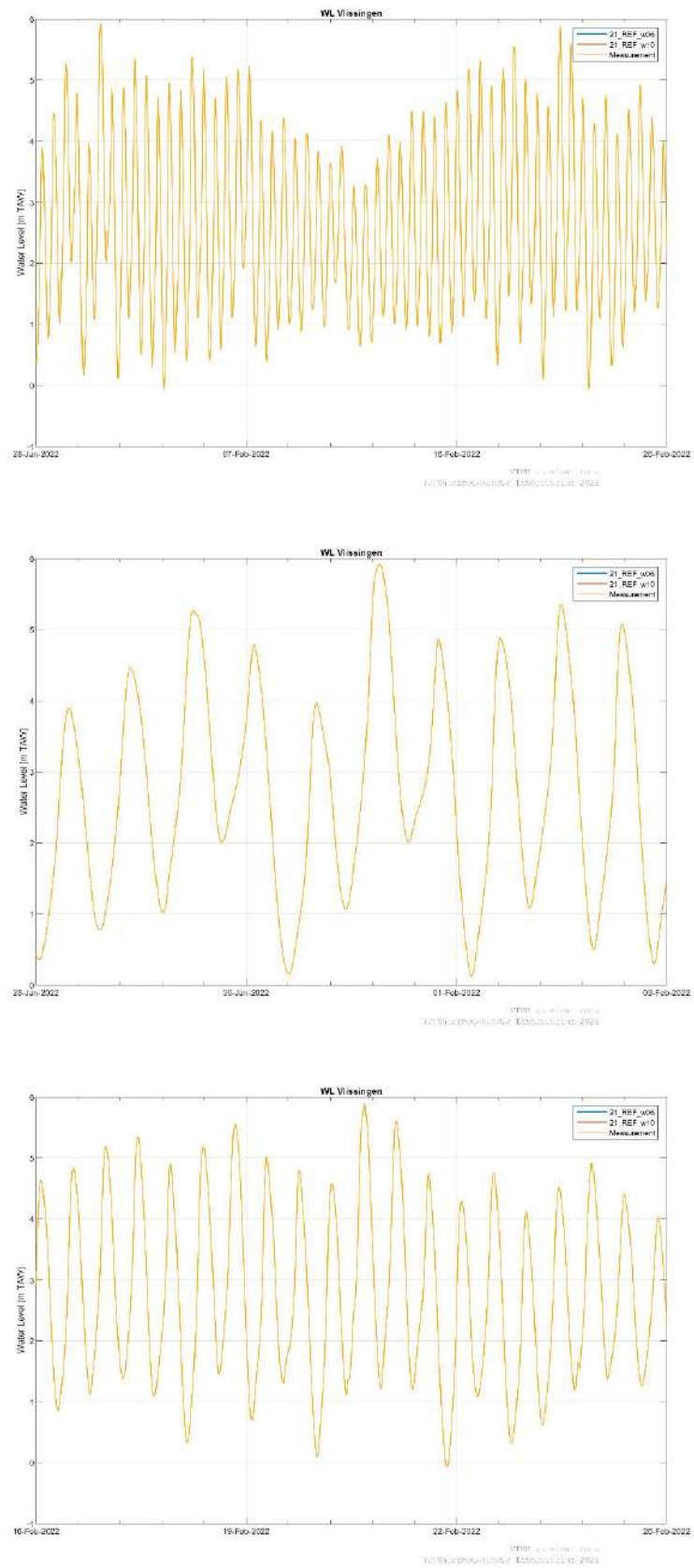
Per meetpost

Boven: volledige simulatieperiode

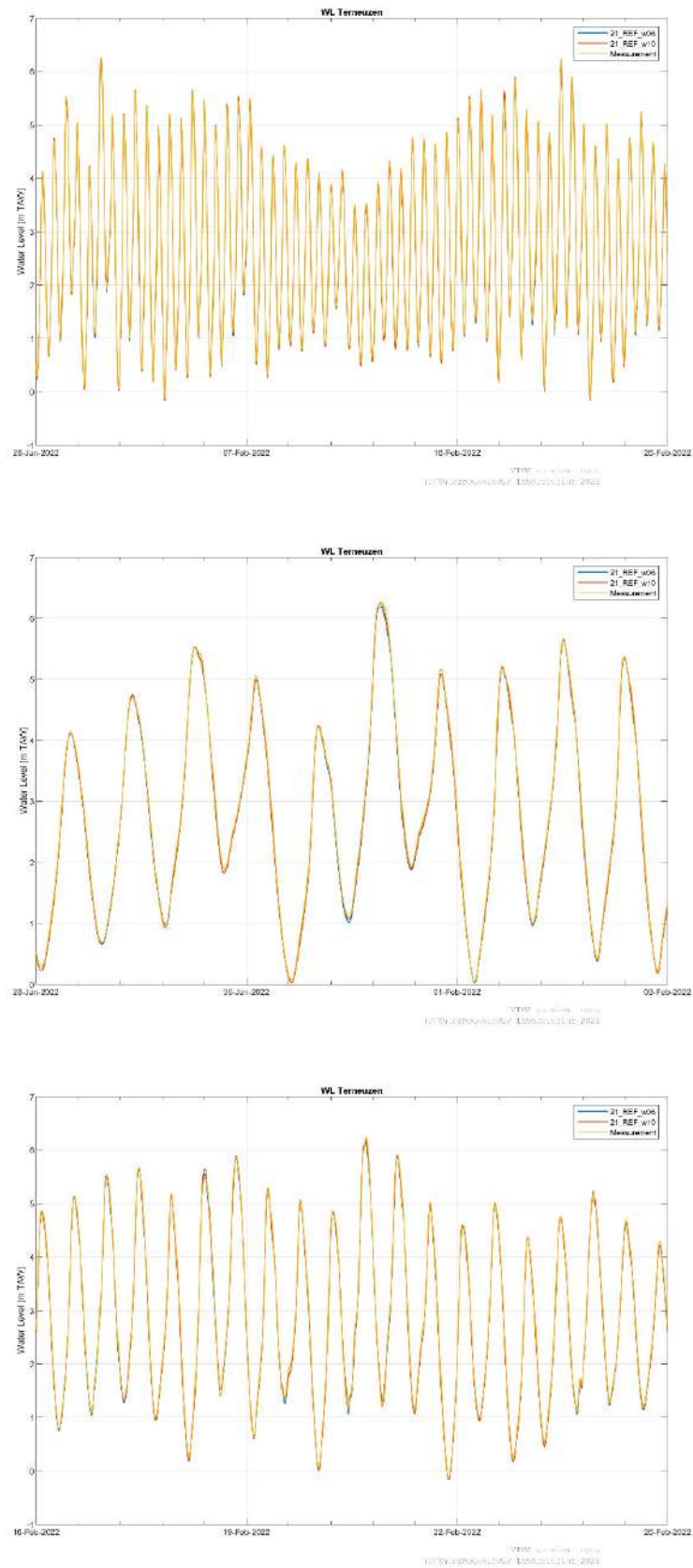
Midden: deelperiode storm jan22

Onder: deelperiode storm feb22

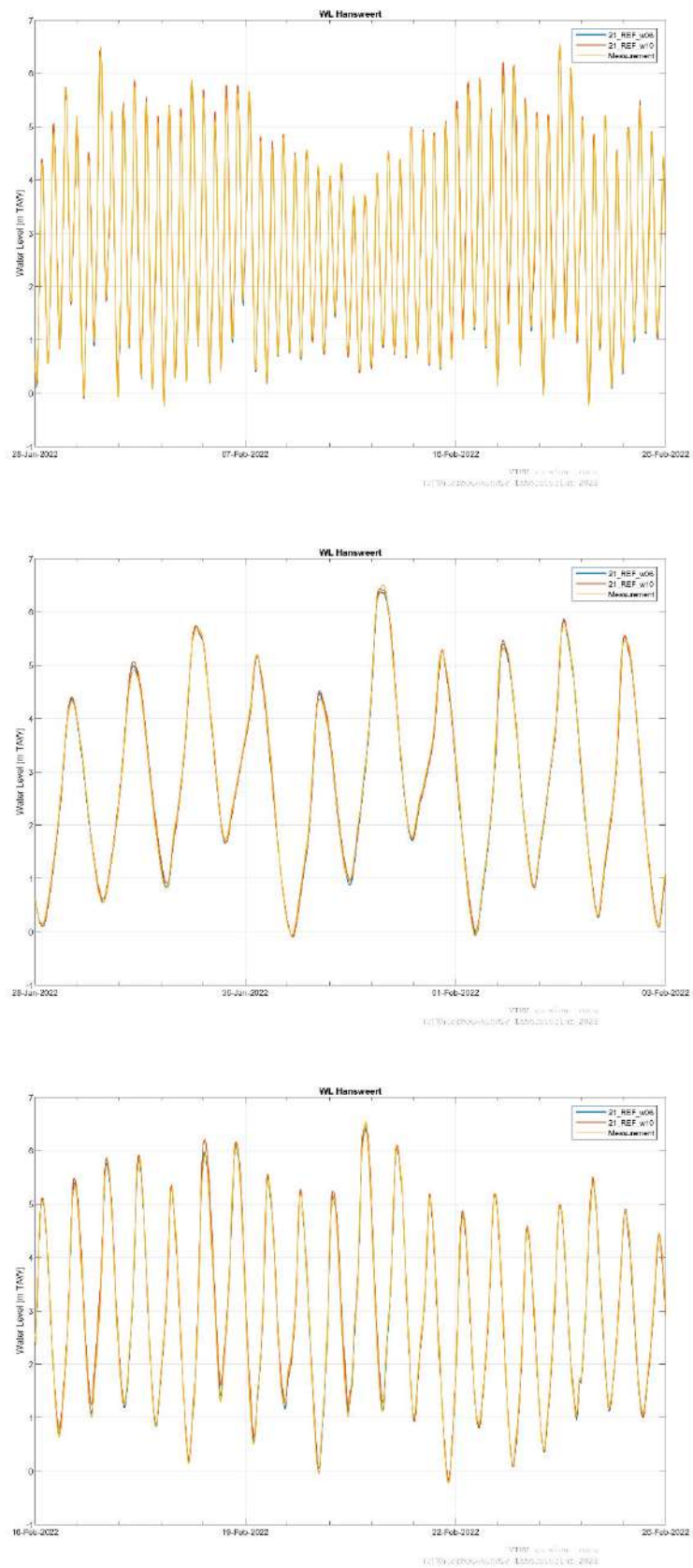
Westerschelde



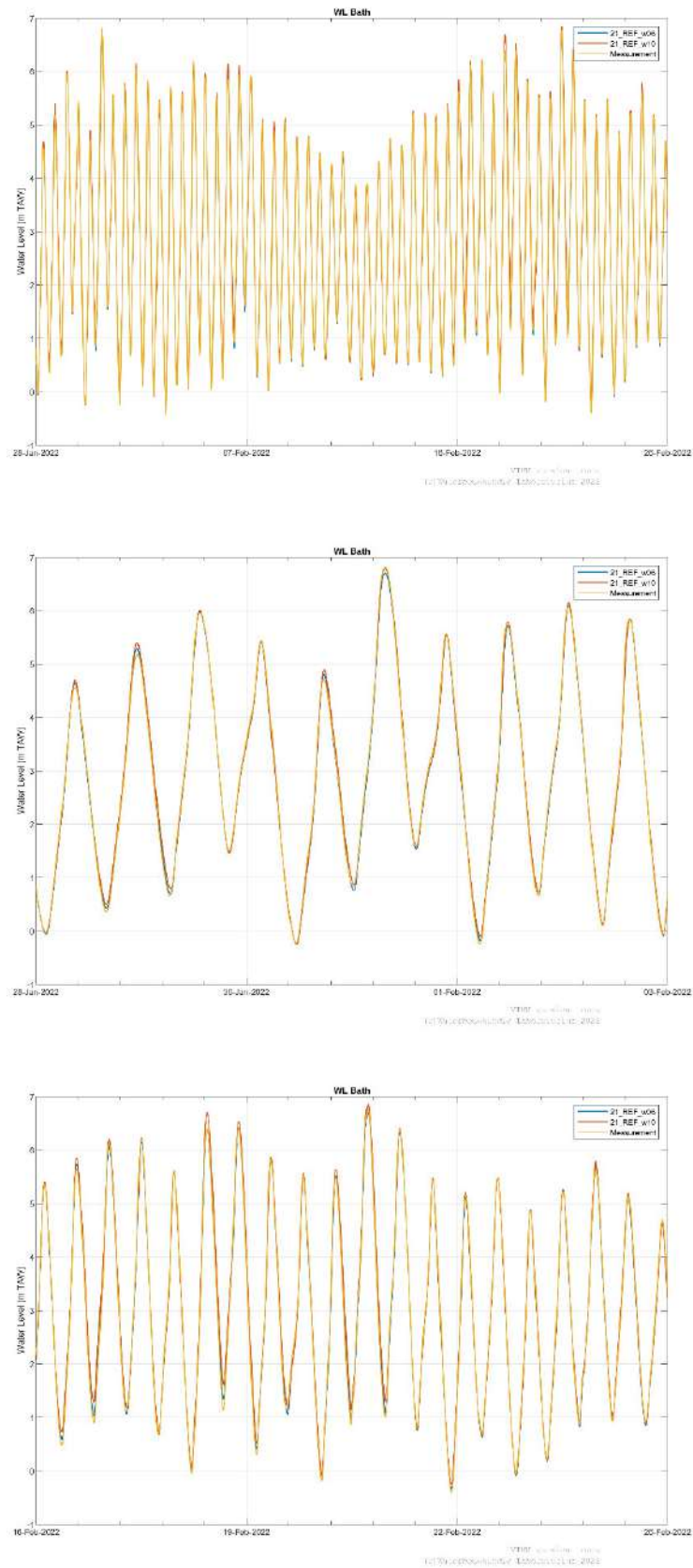
Figuur B 1 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Vlissingen



Figuur B 2 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Terneuzen

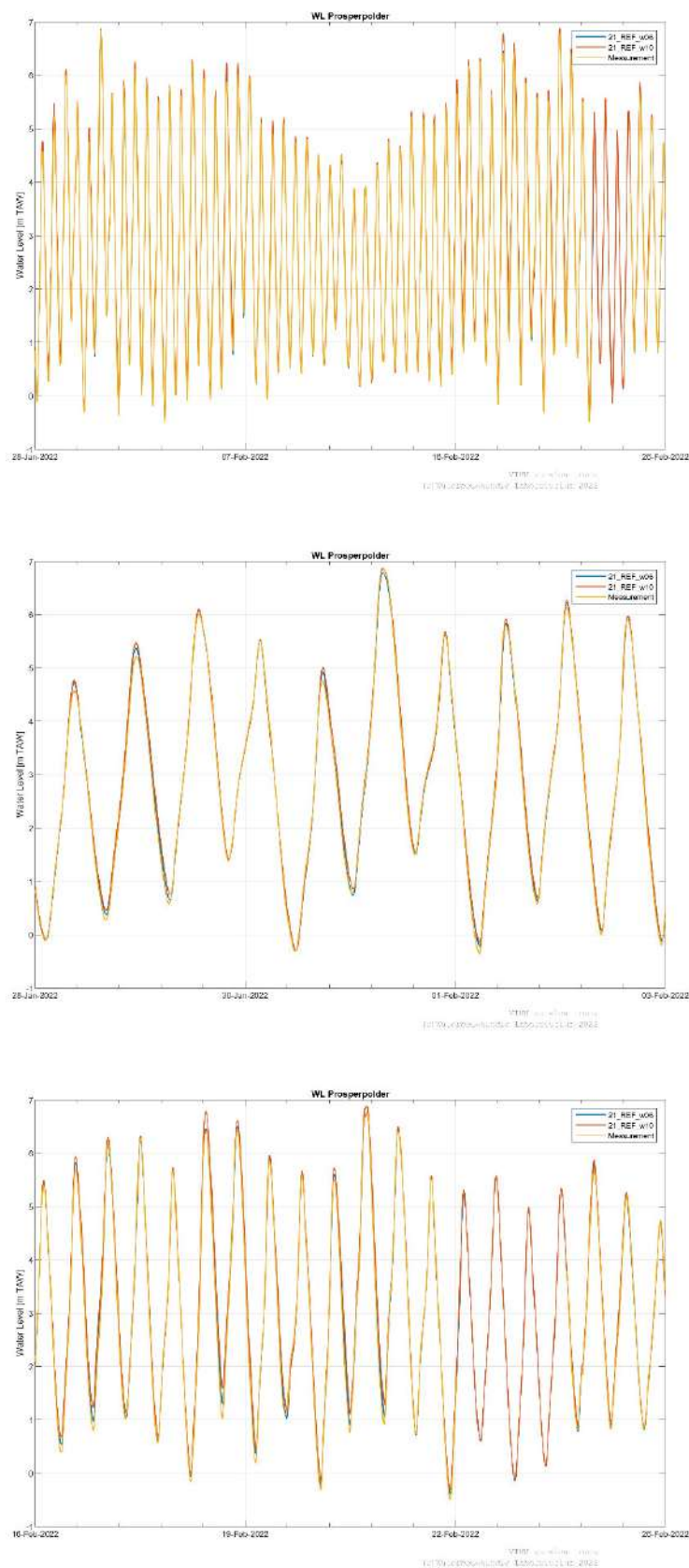


Figuur B 3 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Hansweert

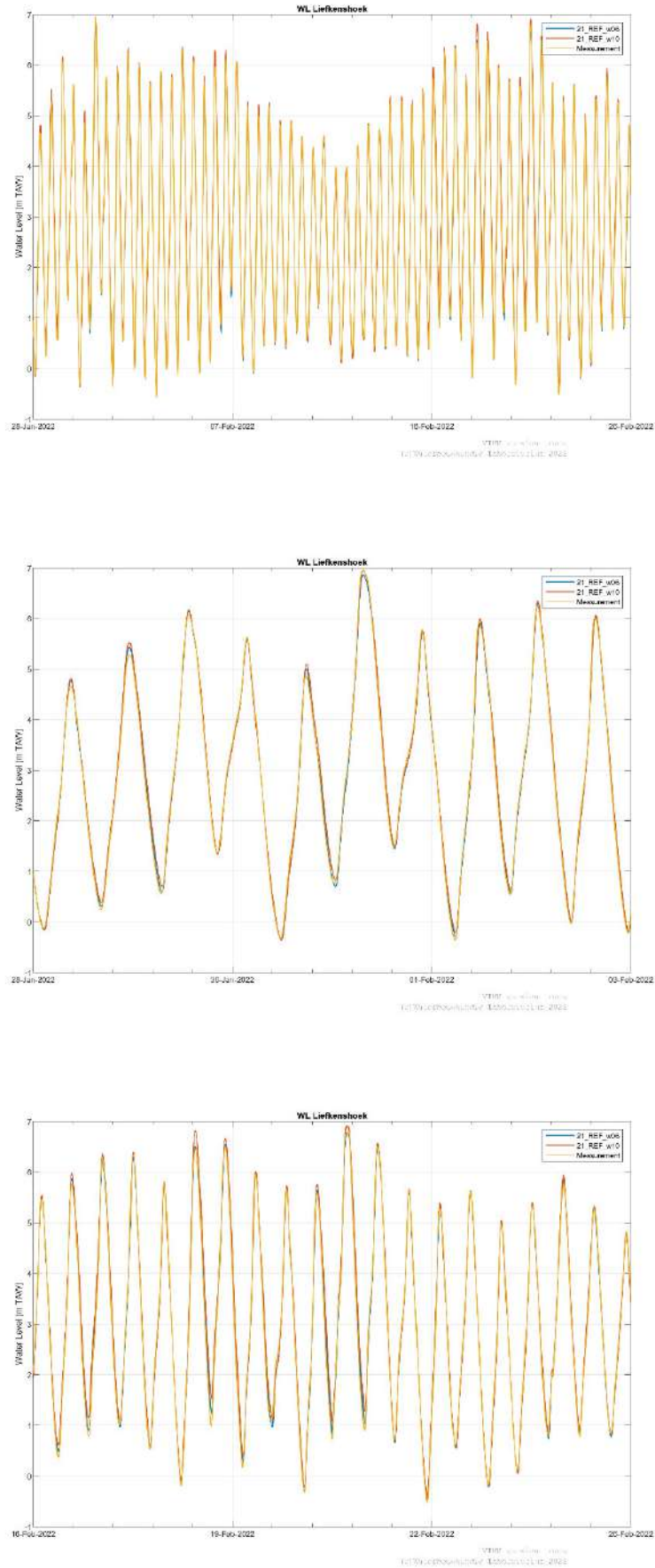


Figuur B 4 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Bath

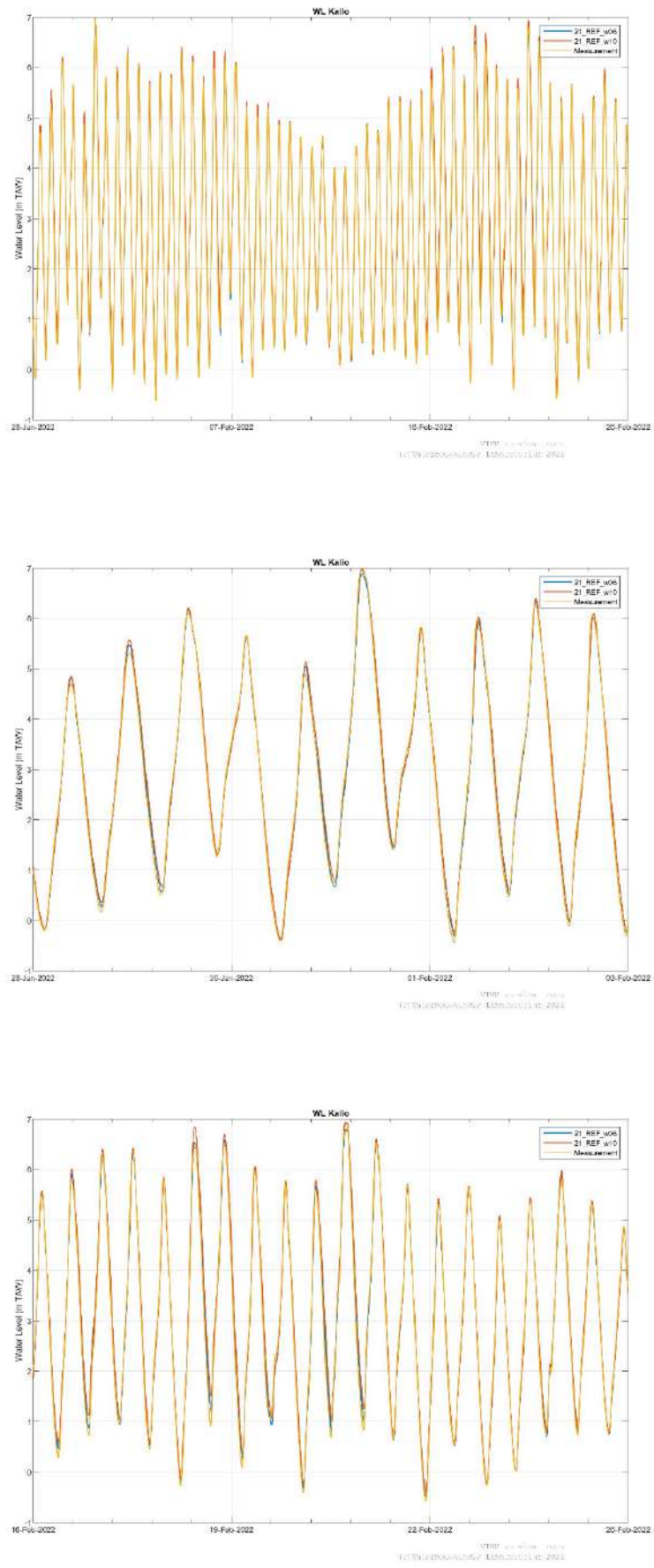
Zeeschelde



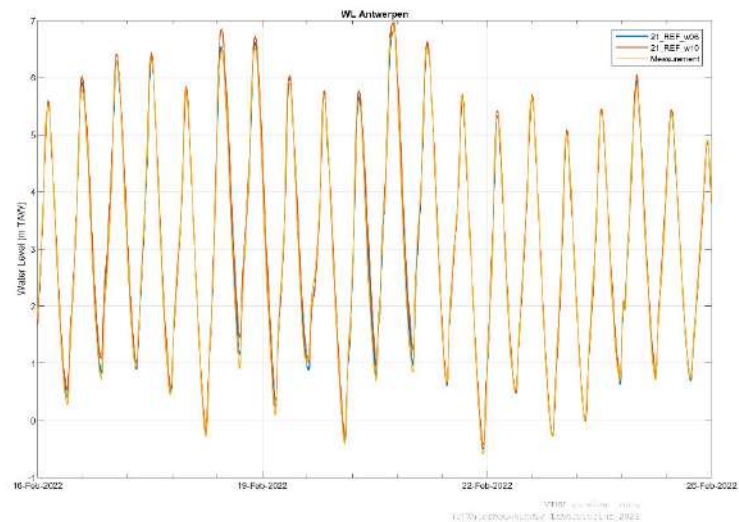
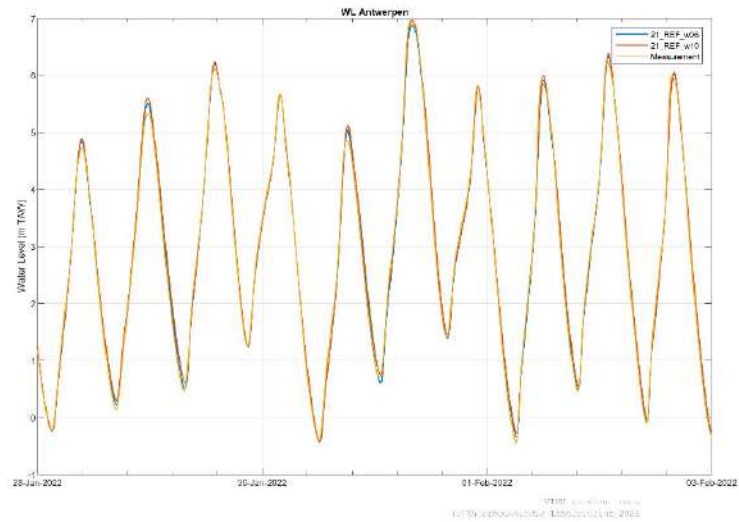
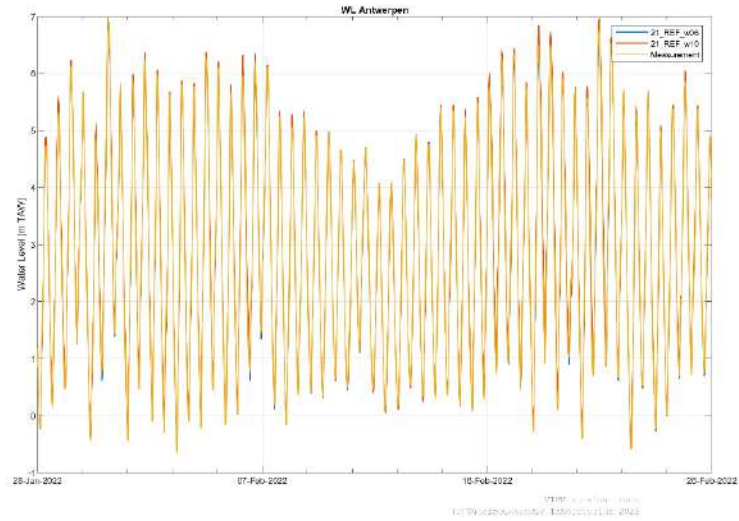
Figuur B 5 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Prosperpolder



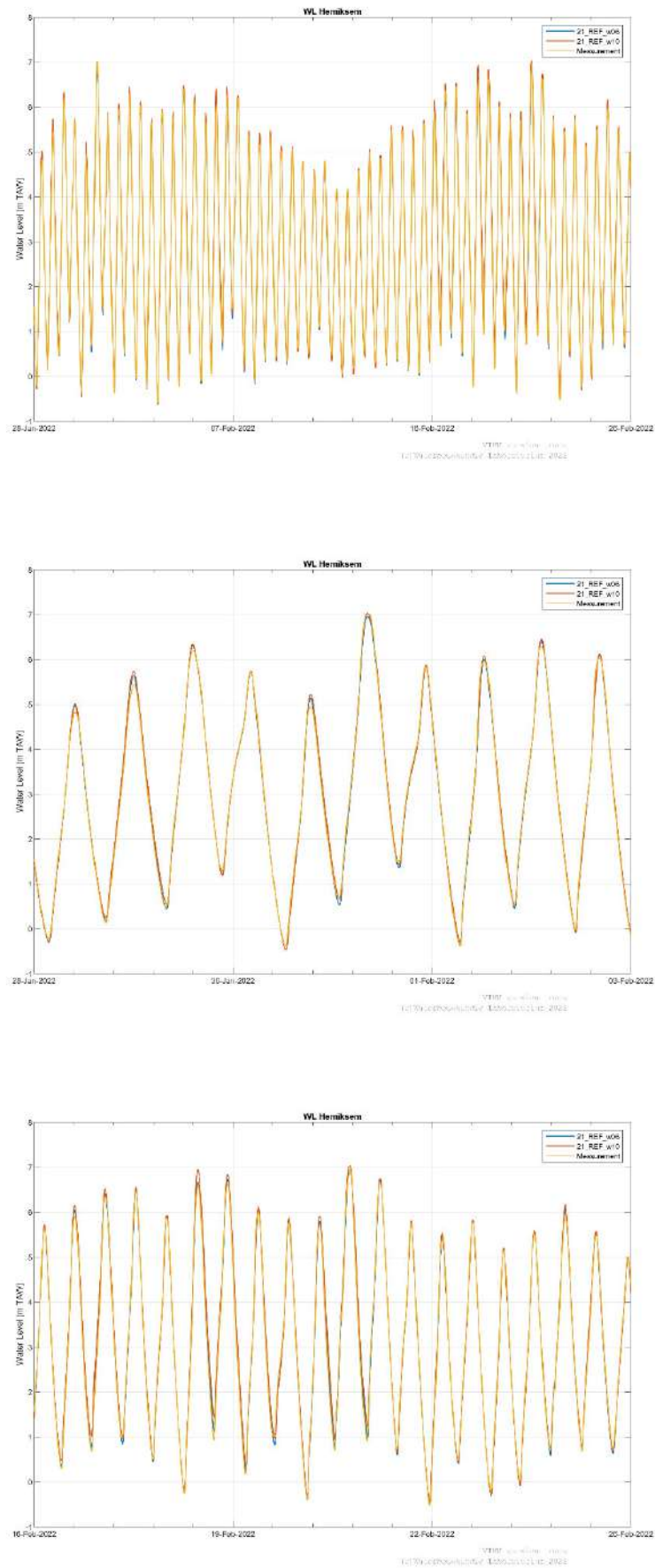
Figuur B 6 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Liefkenshoek



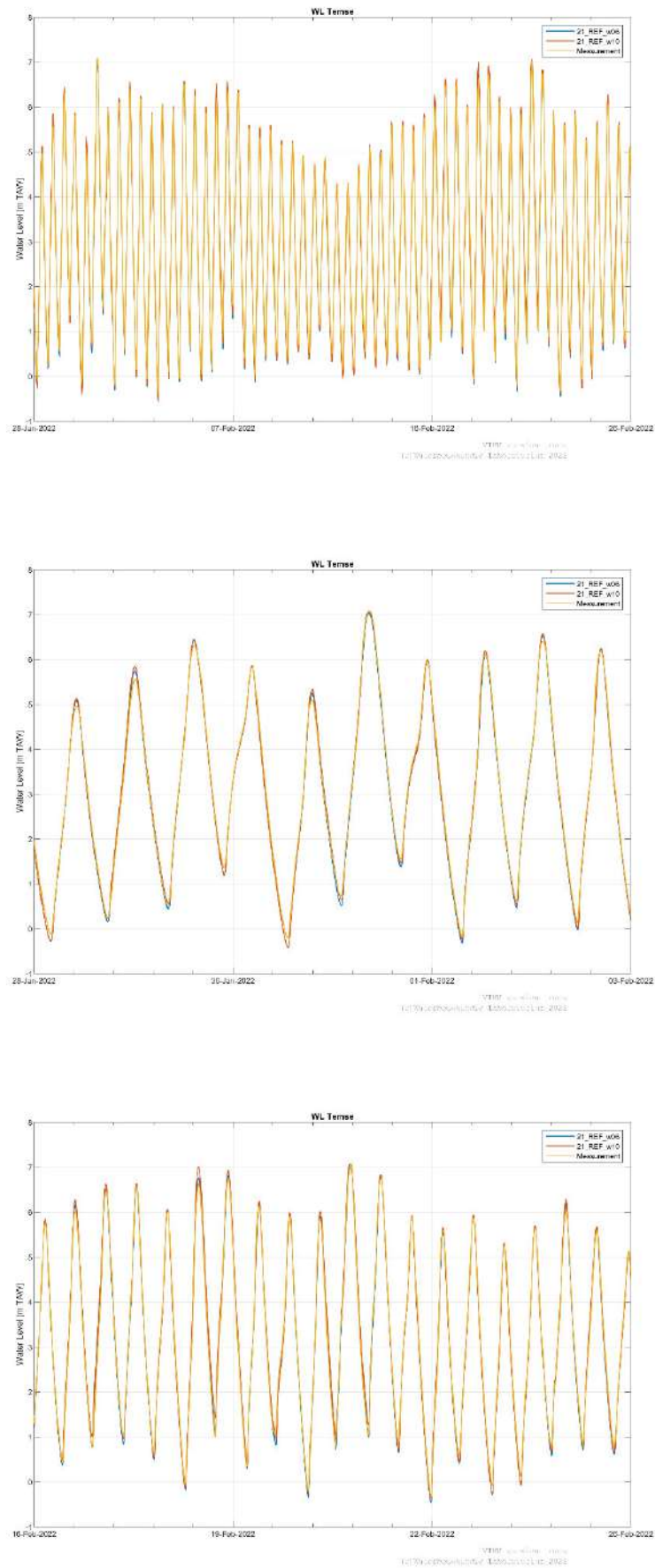
Figuur B 7 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Kello



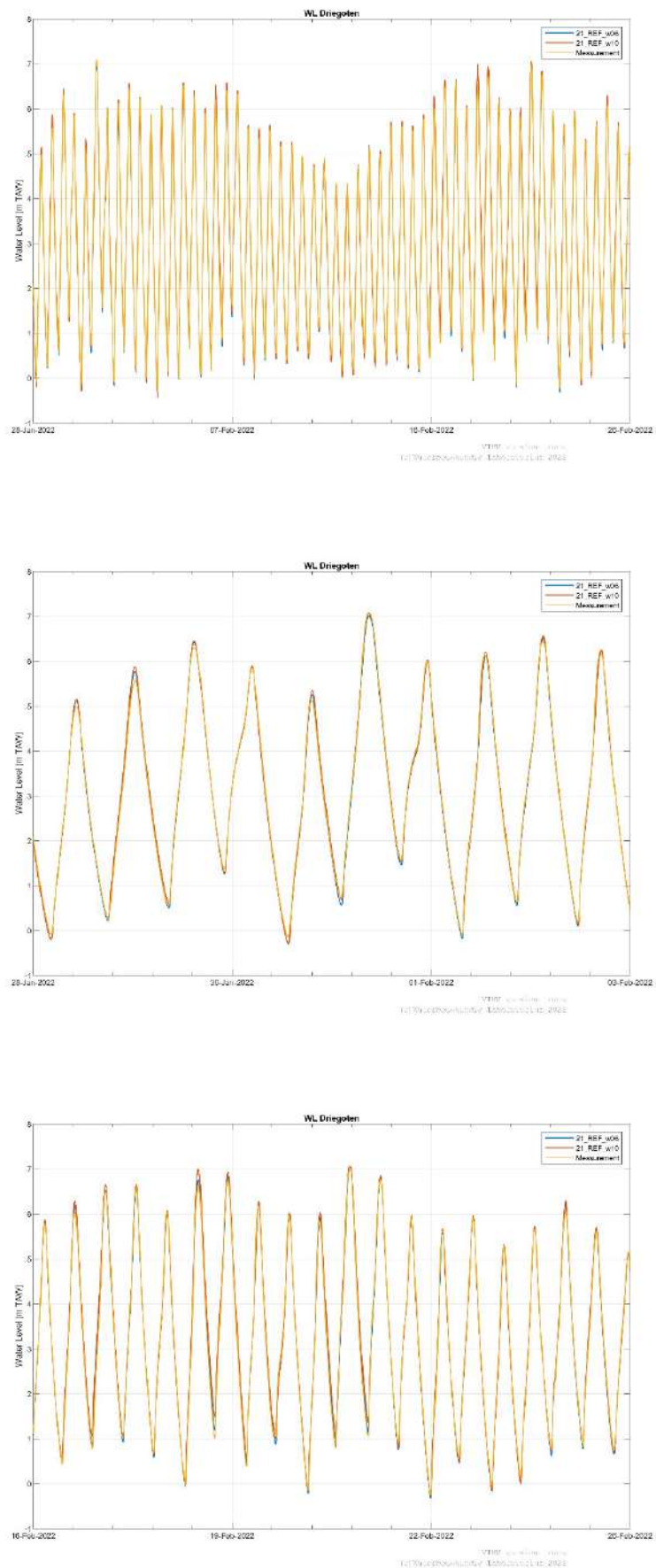
Figuur B 8 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Antwerpen



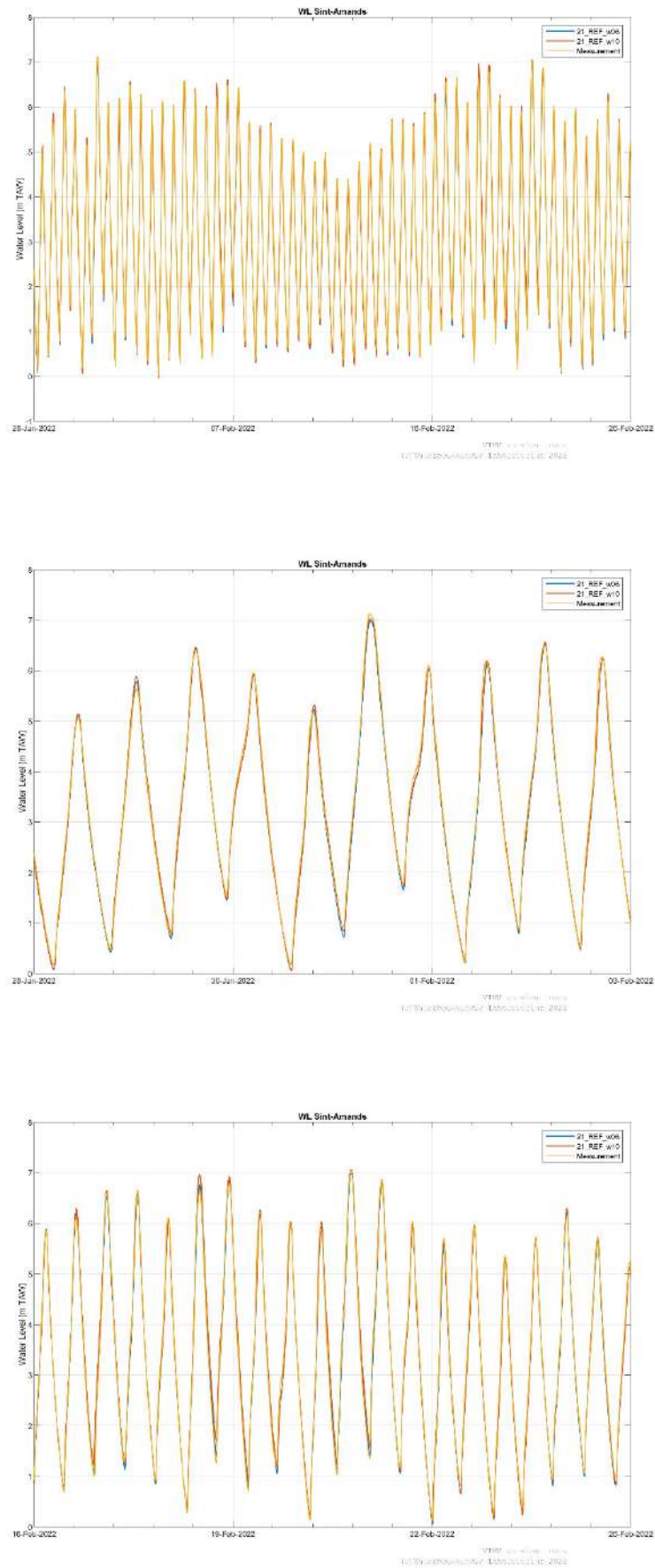
Figuur B 9 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Hemiksem



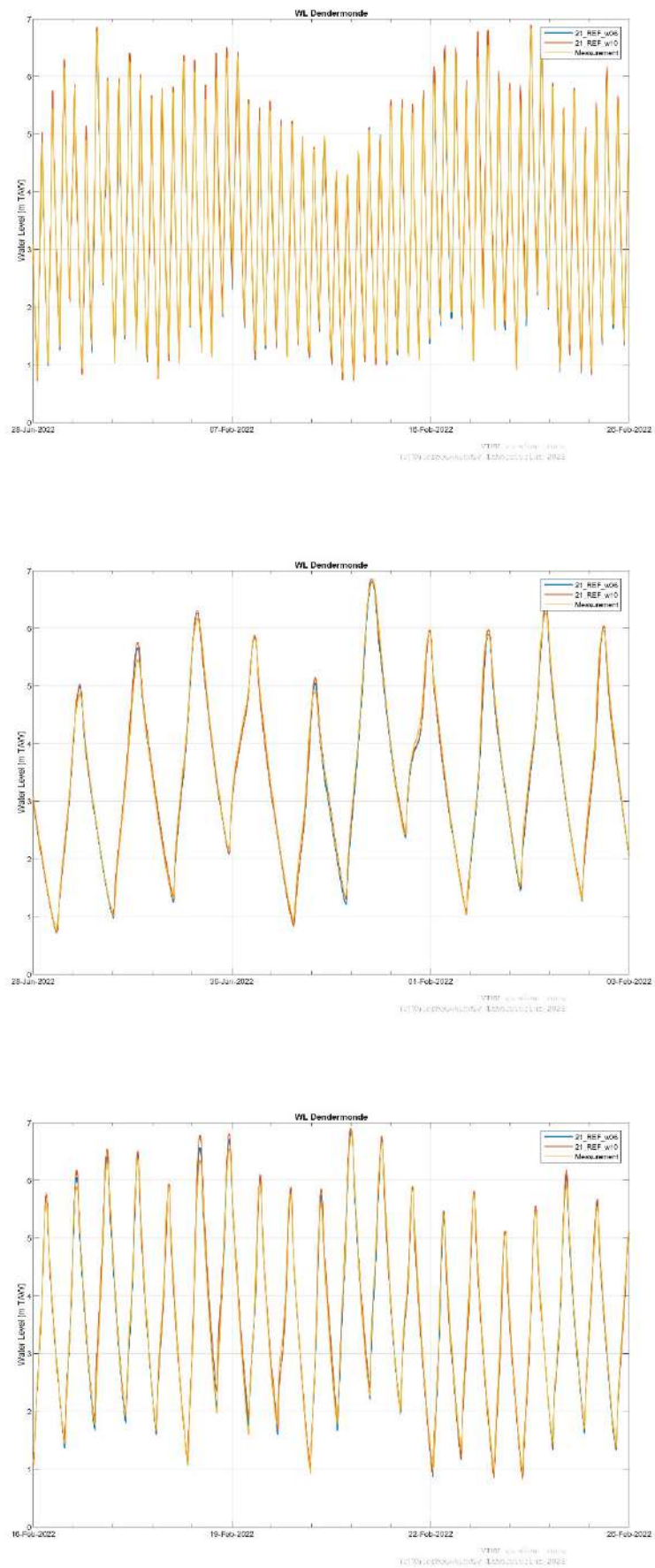
Figuur B 10 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Temse



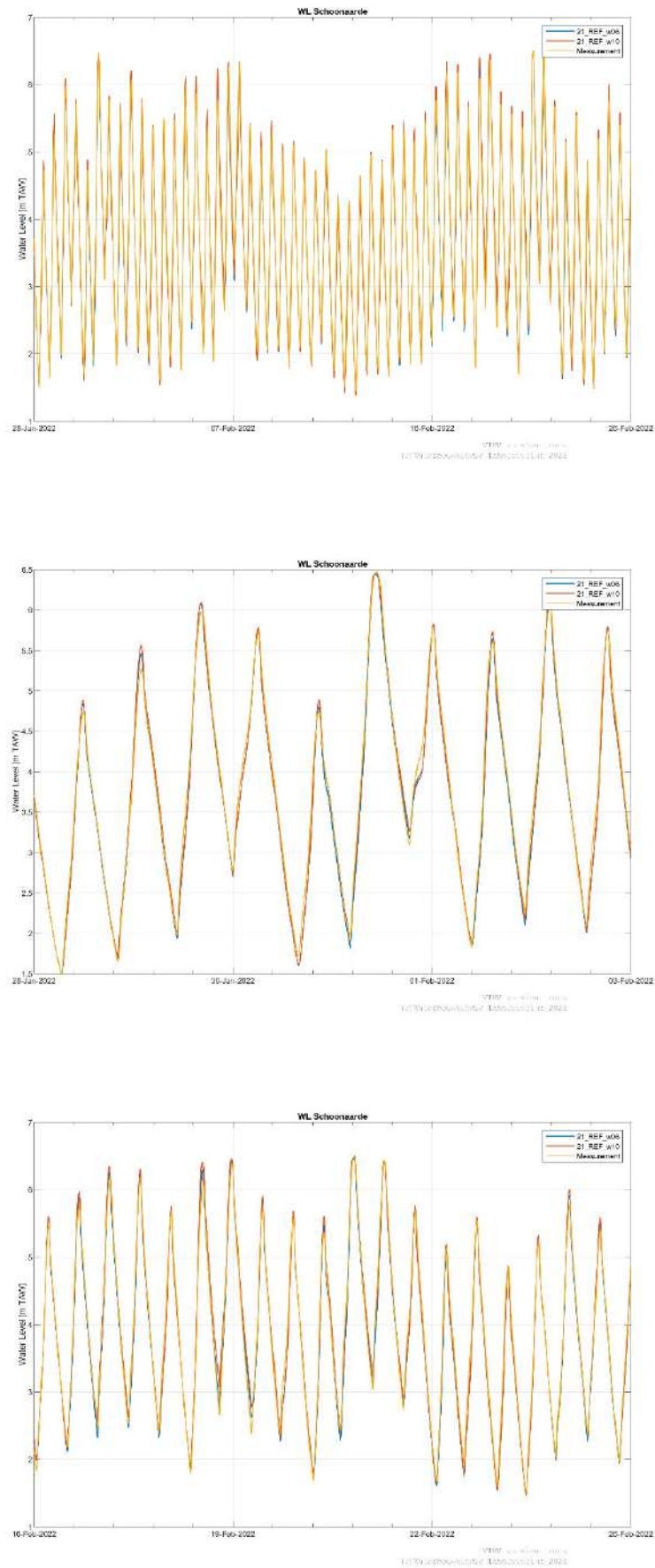
Figuur B 11 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Driegoten



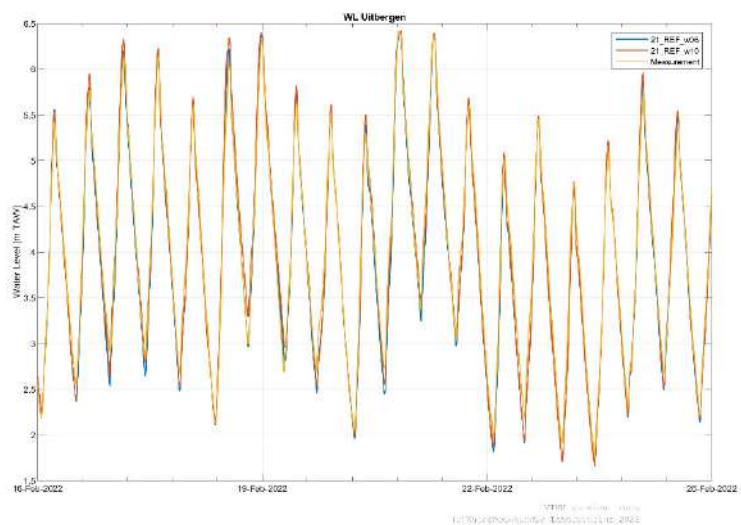
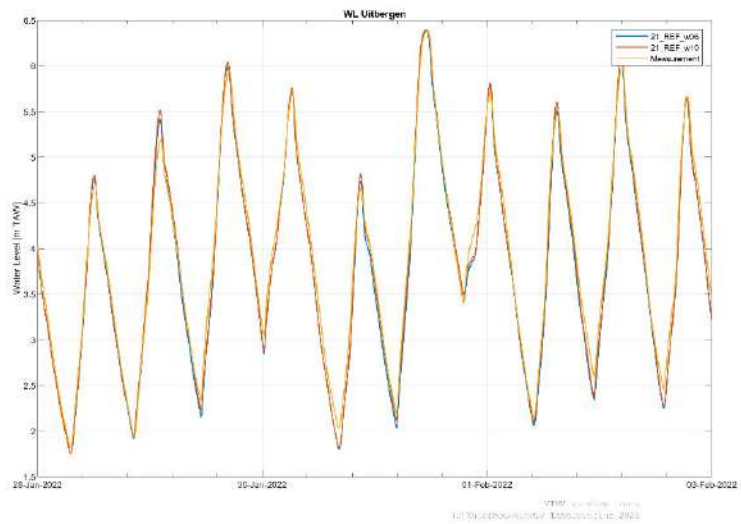
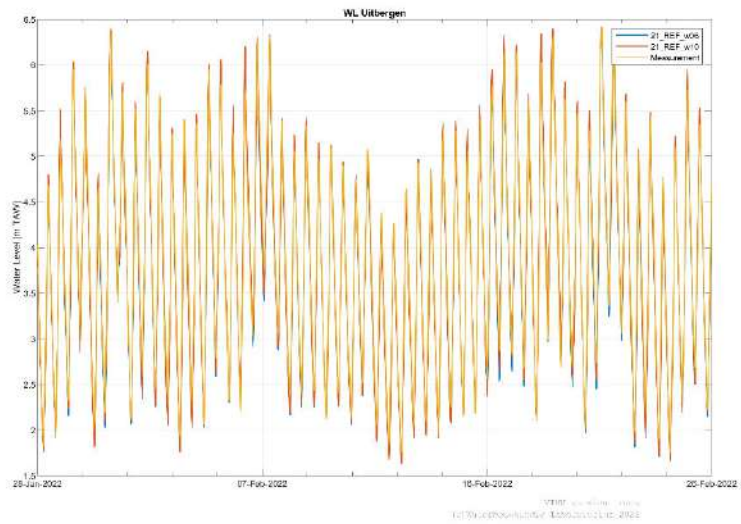
Figuur B 12 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Sint-Amands



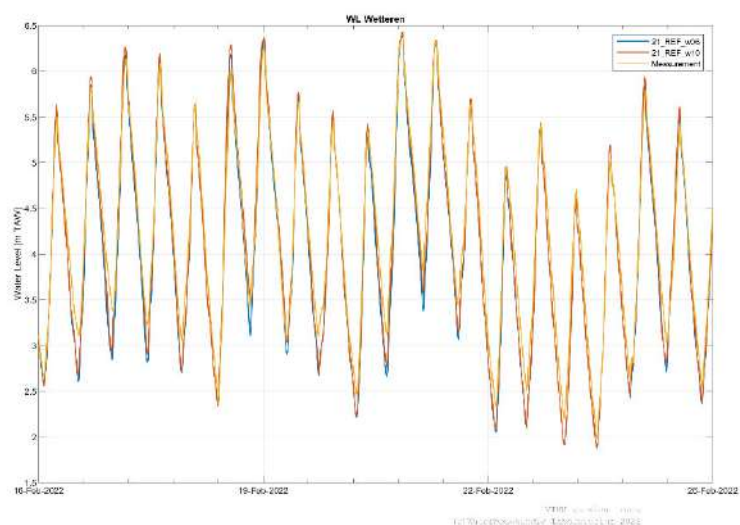
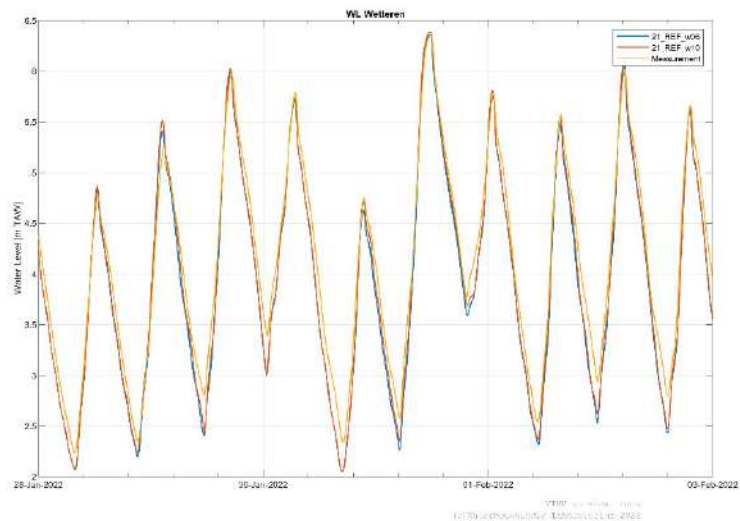
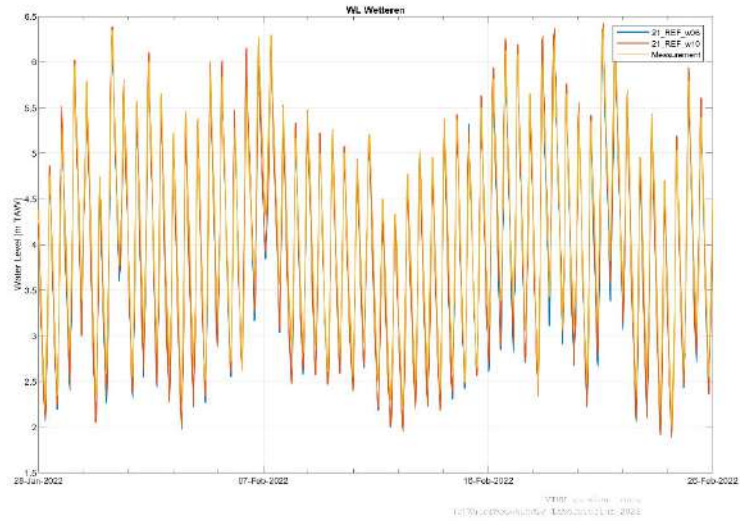
Figuur B 13 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Dendermonde



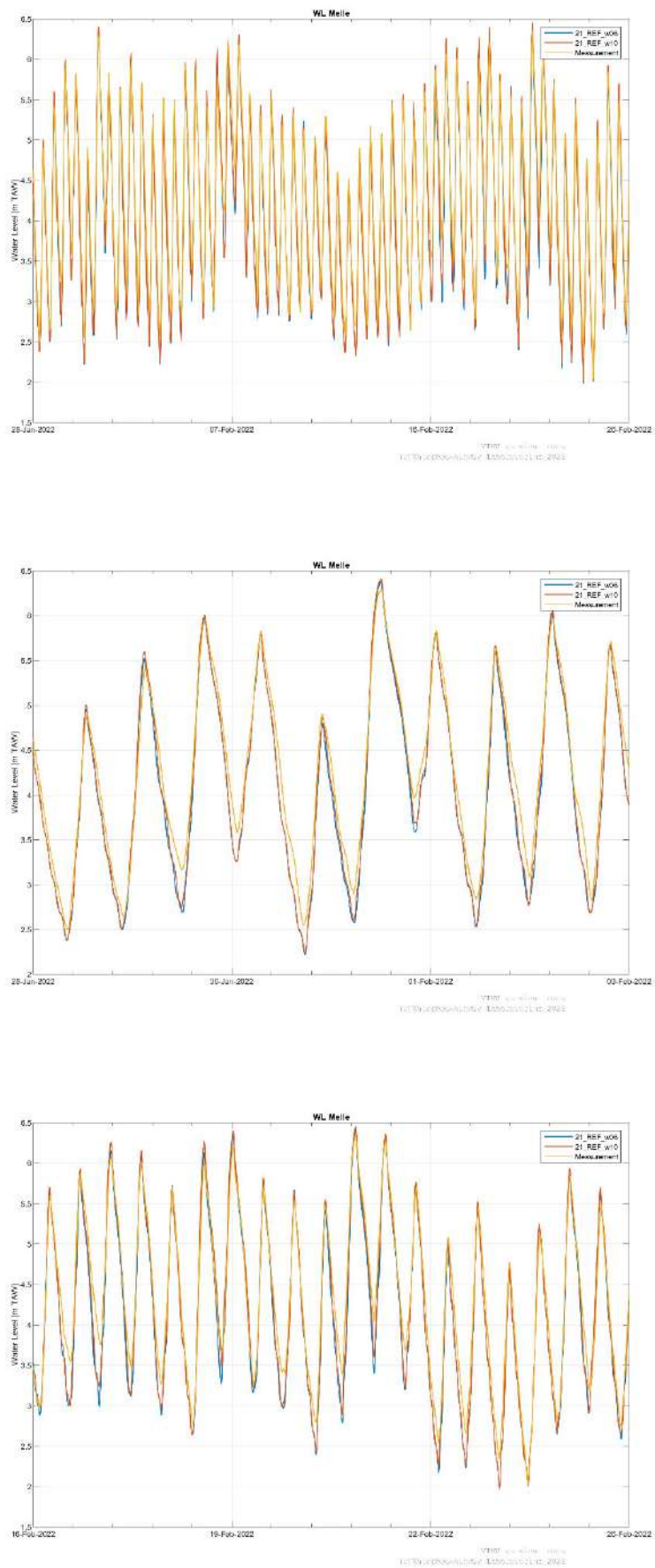
Figuur B 14 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Schoonaarde



Figuur B 15 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Uitbergen

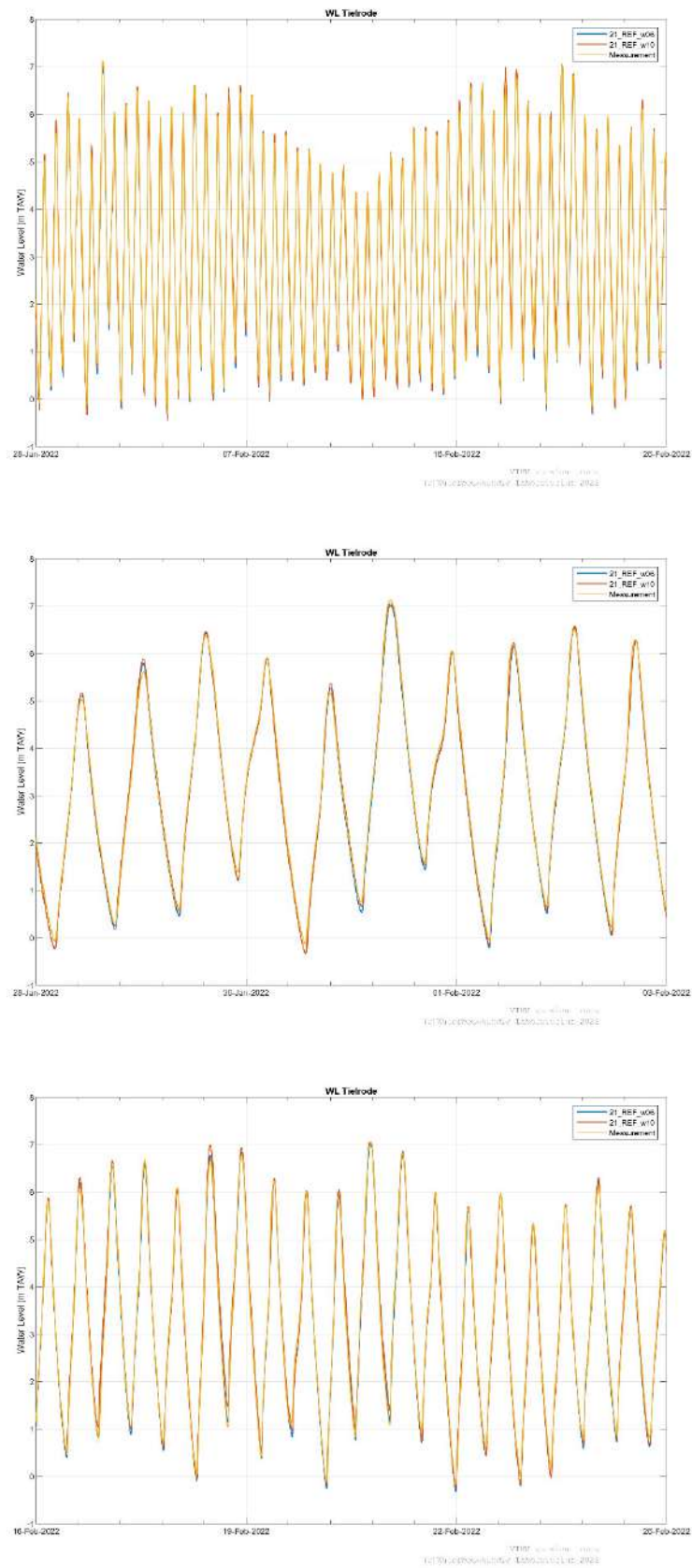


Figuur B 16 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Weteren

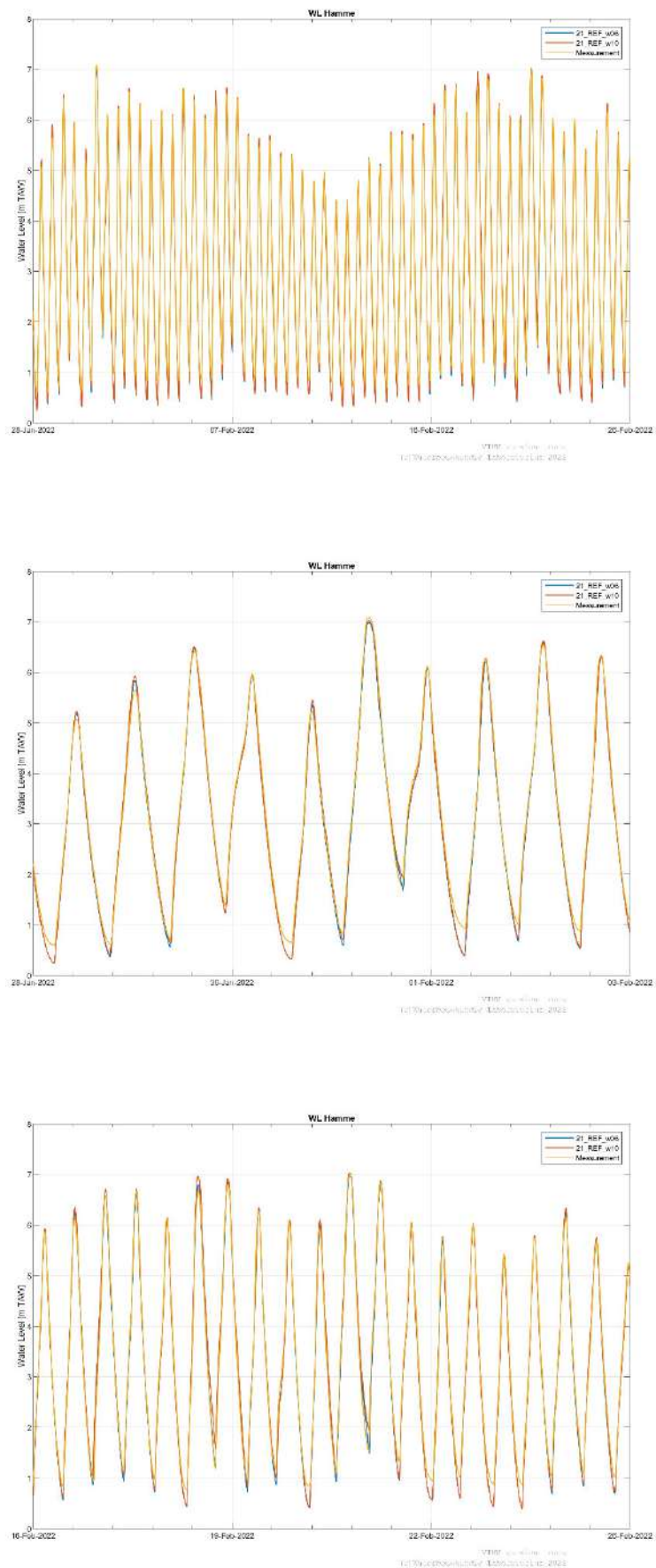


Figuur B 17 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Melle

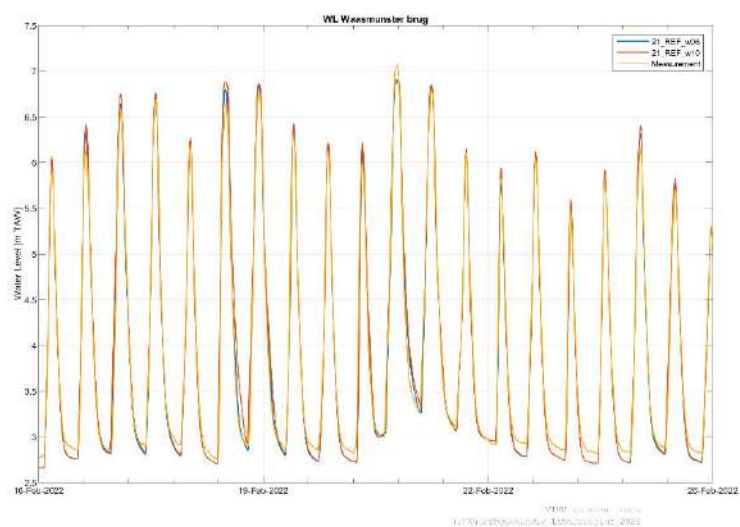
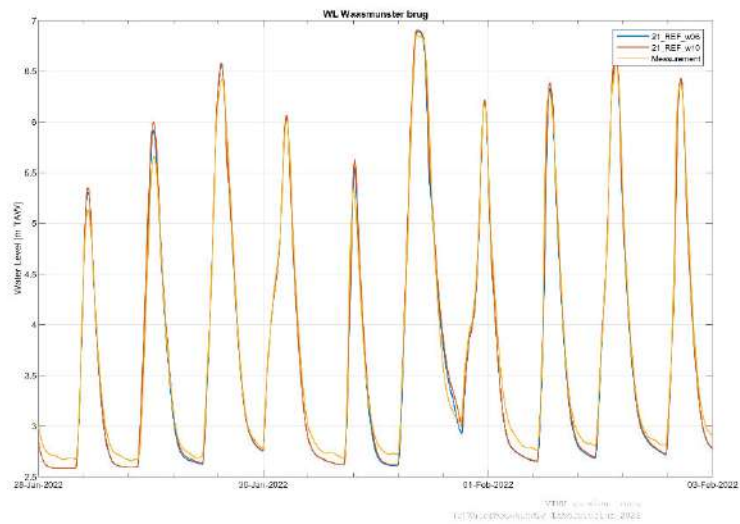
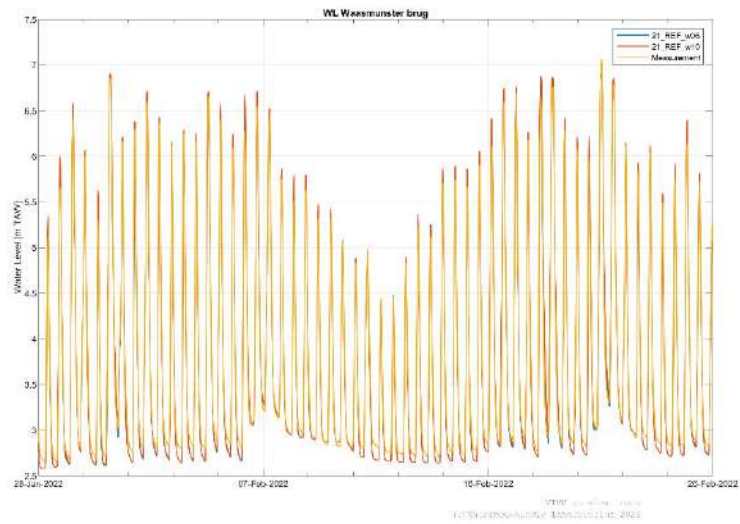
Durme



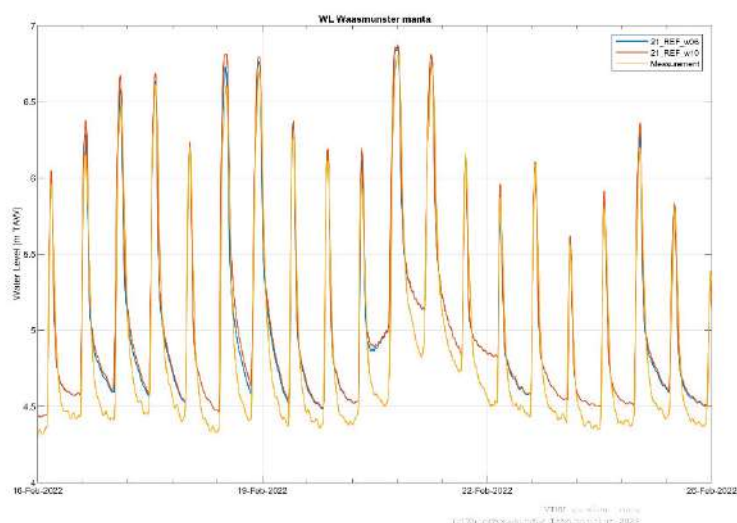
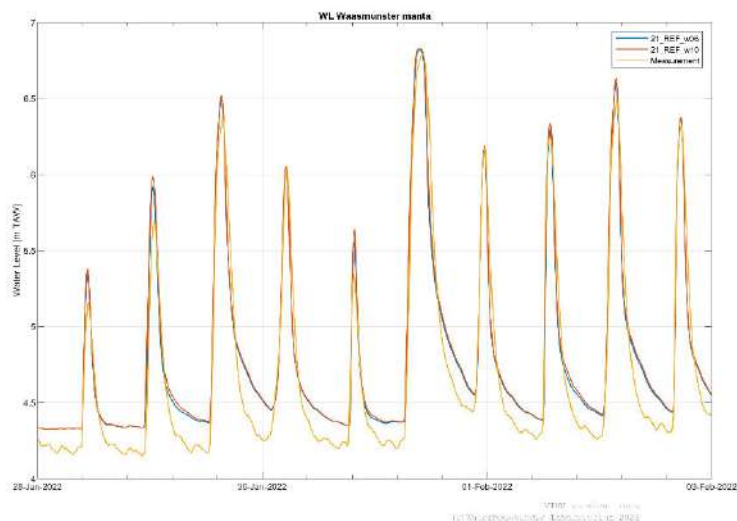
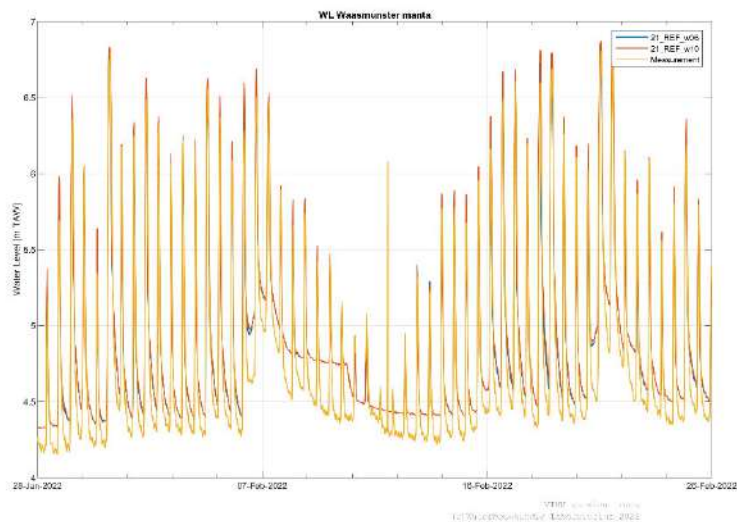
Figuur B 18 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Tielrode



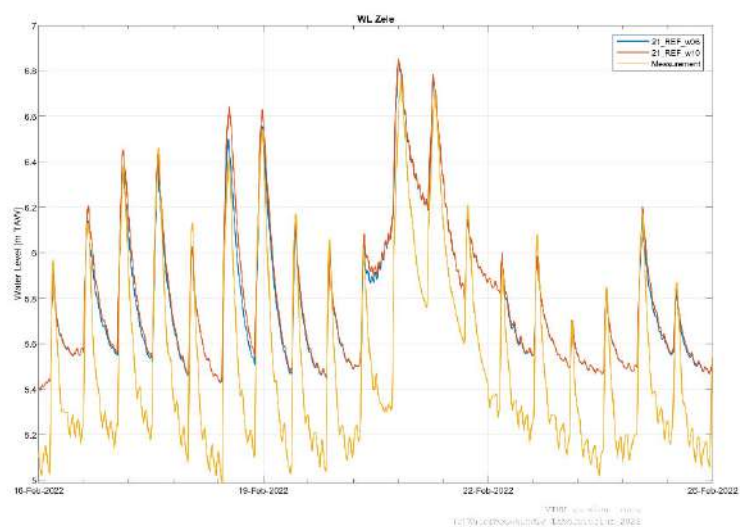
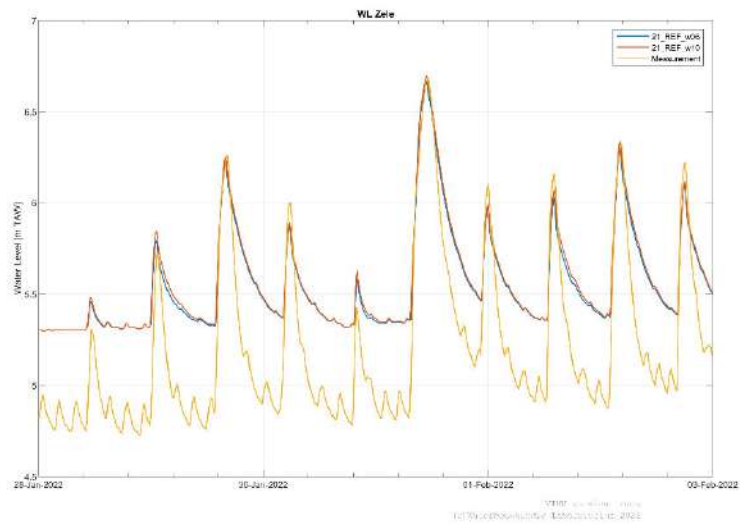
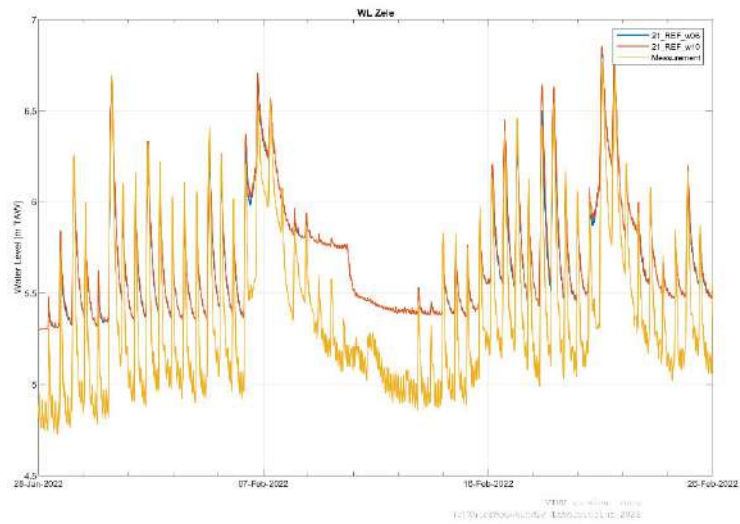
Figuur B 19 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Hamme



Figuur B 20 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster brug

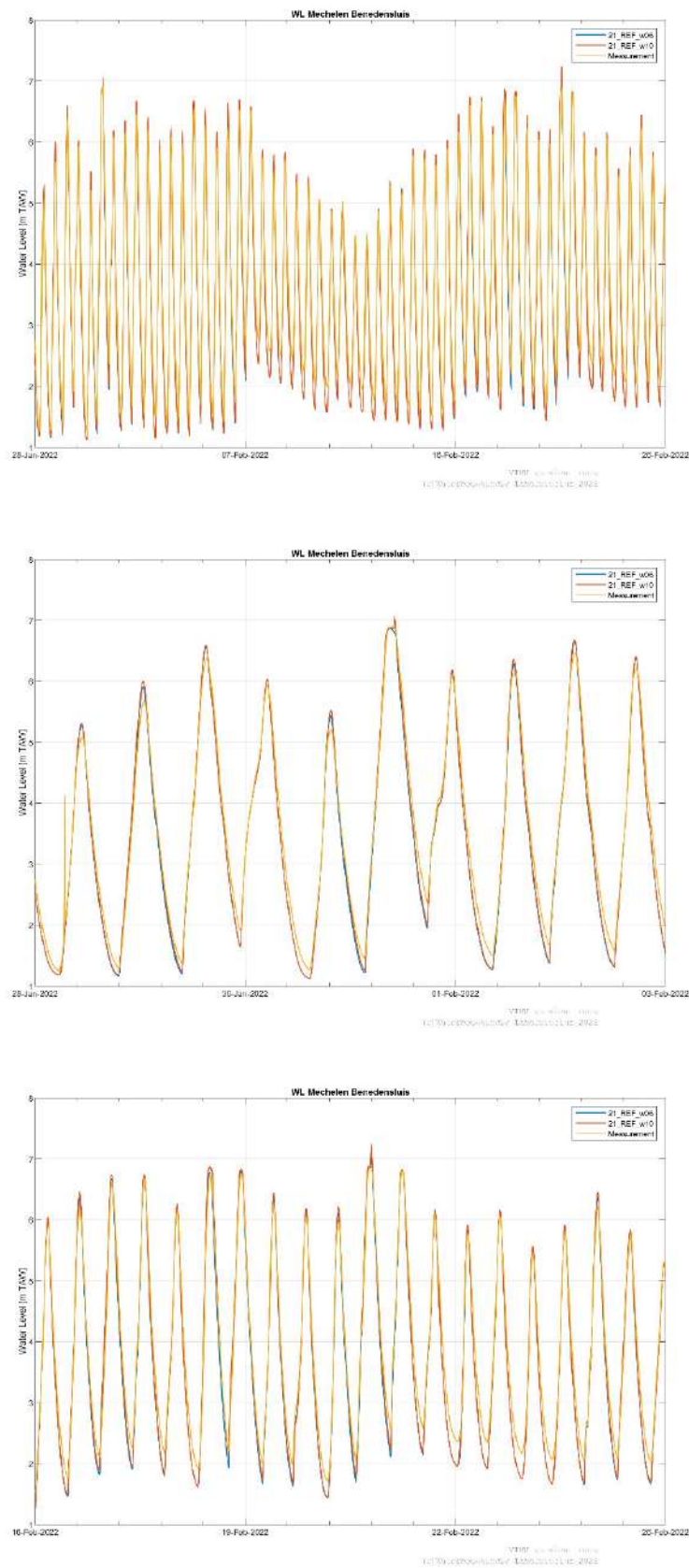


Figuur B 21 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster manta

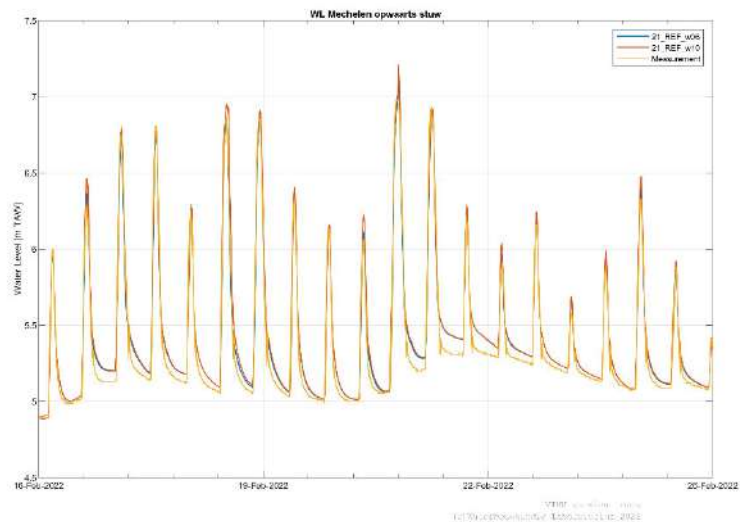
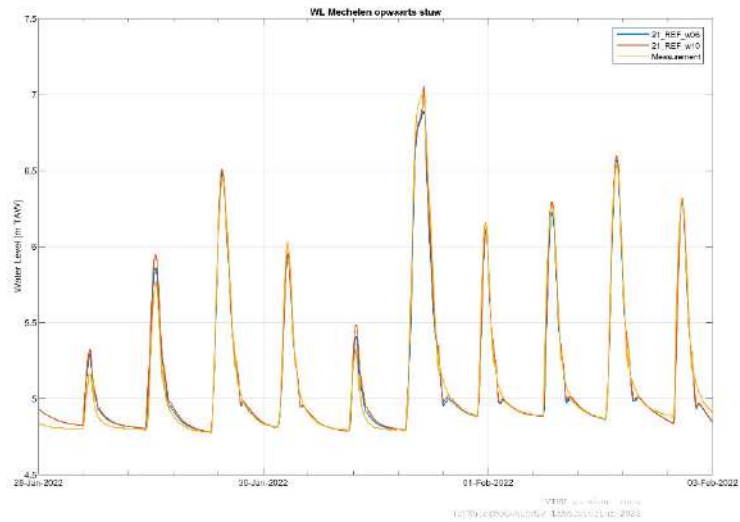
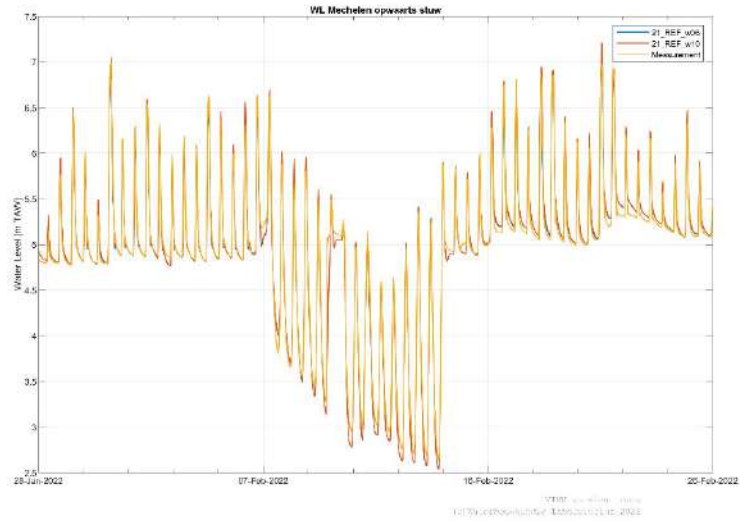


Figuur B 22 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Zele

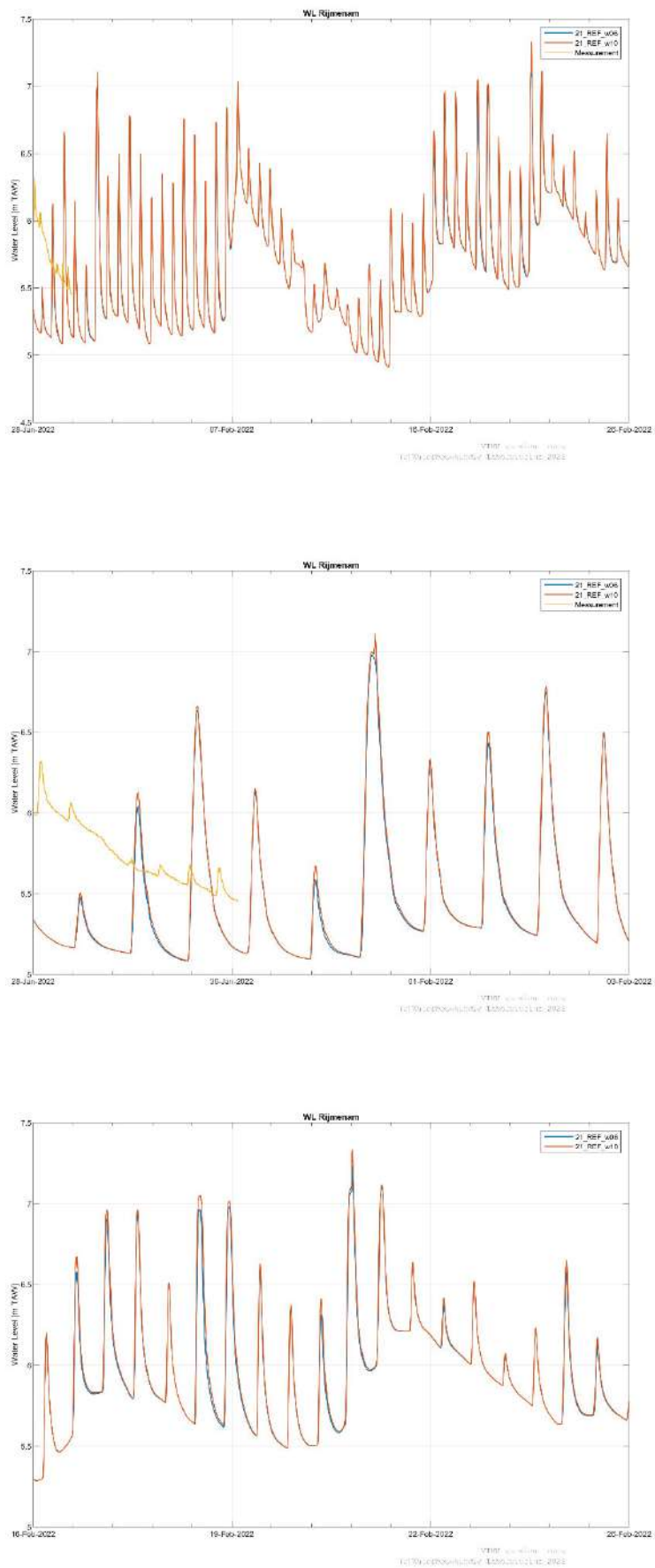
Dijle



Figuur B 23 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen Benedensluis

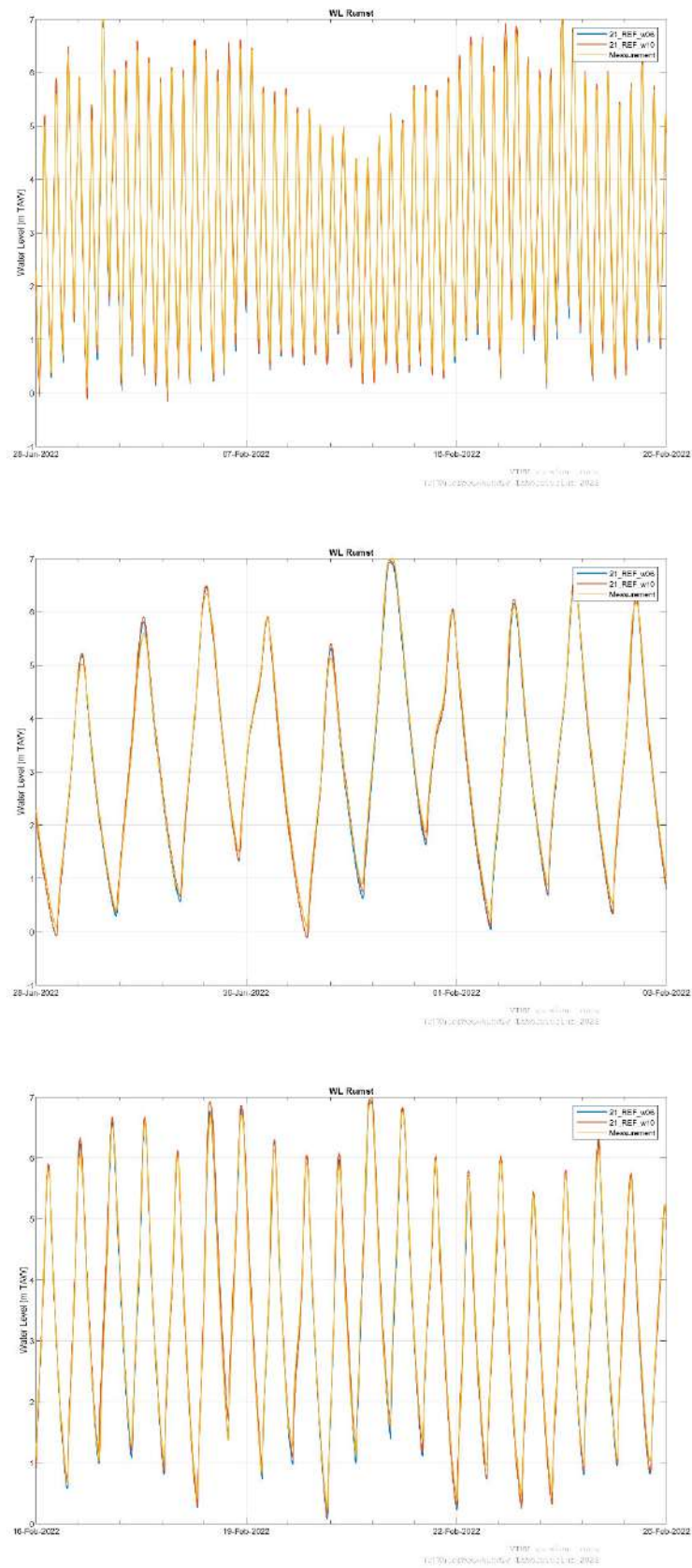


Figuur B 24 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen opwaarts stuw

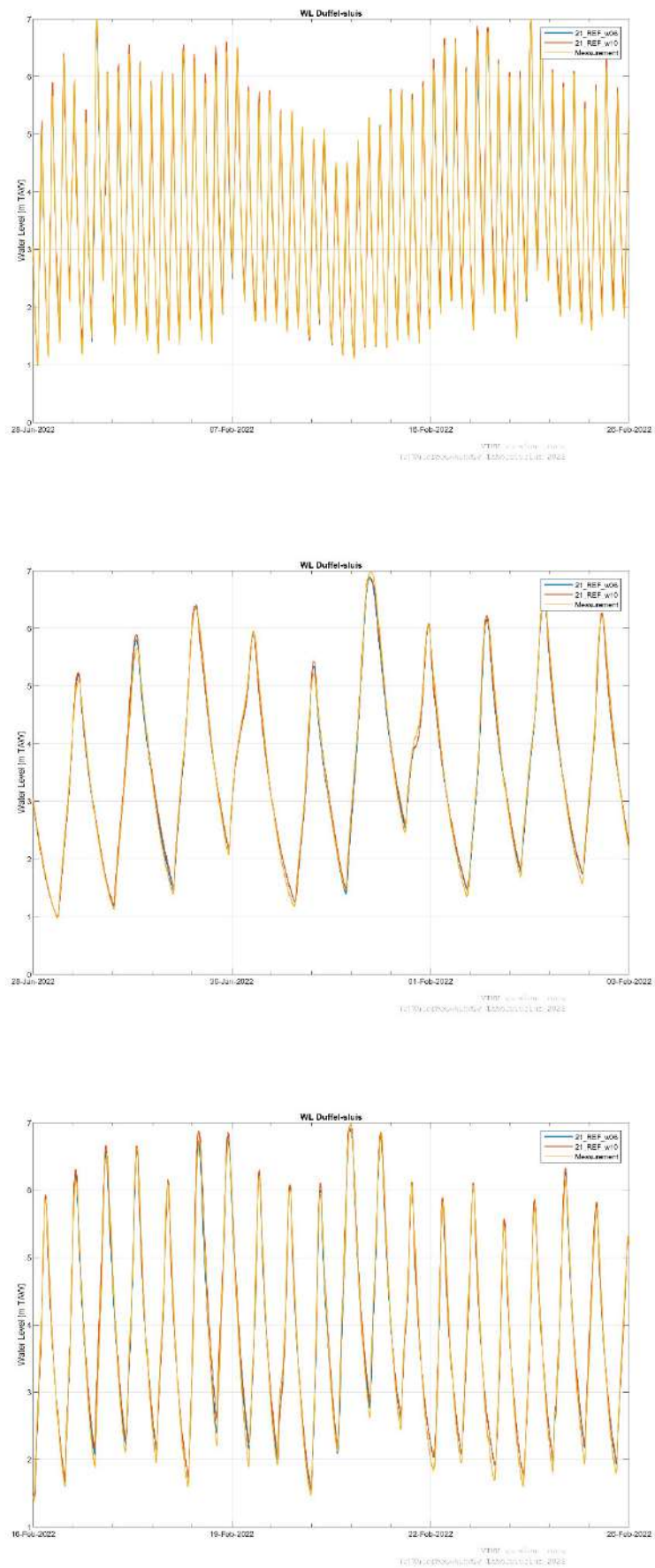


Figuur B 25 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Rijnensdam

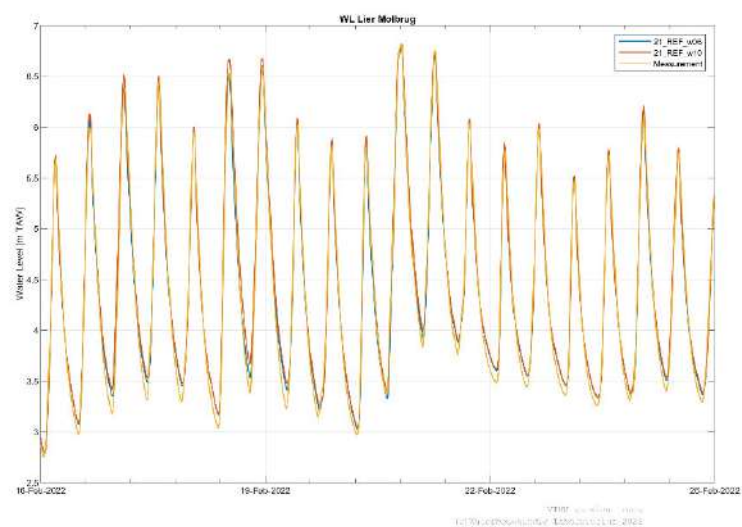
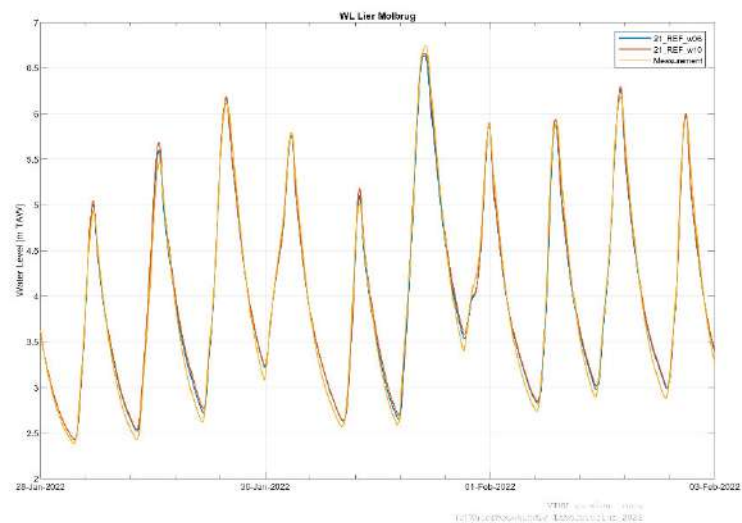
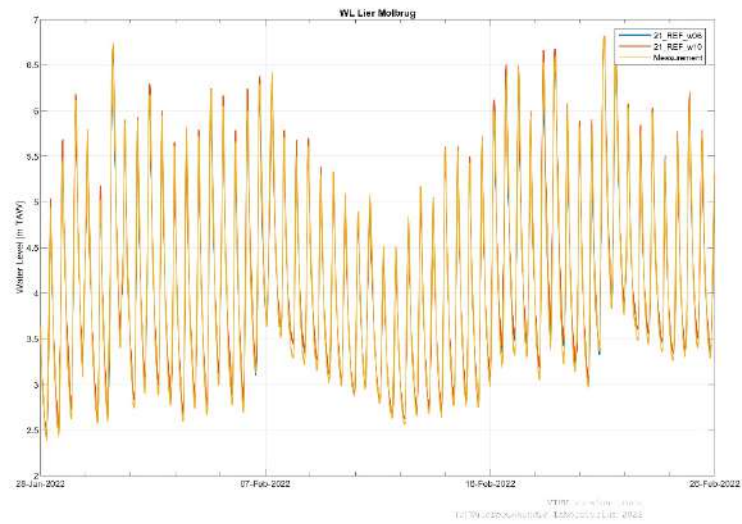
Benedennete



Figuur B 26 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Rumst

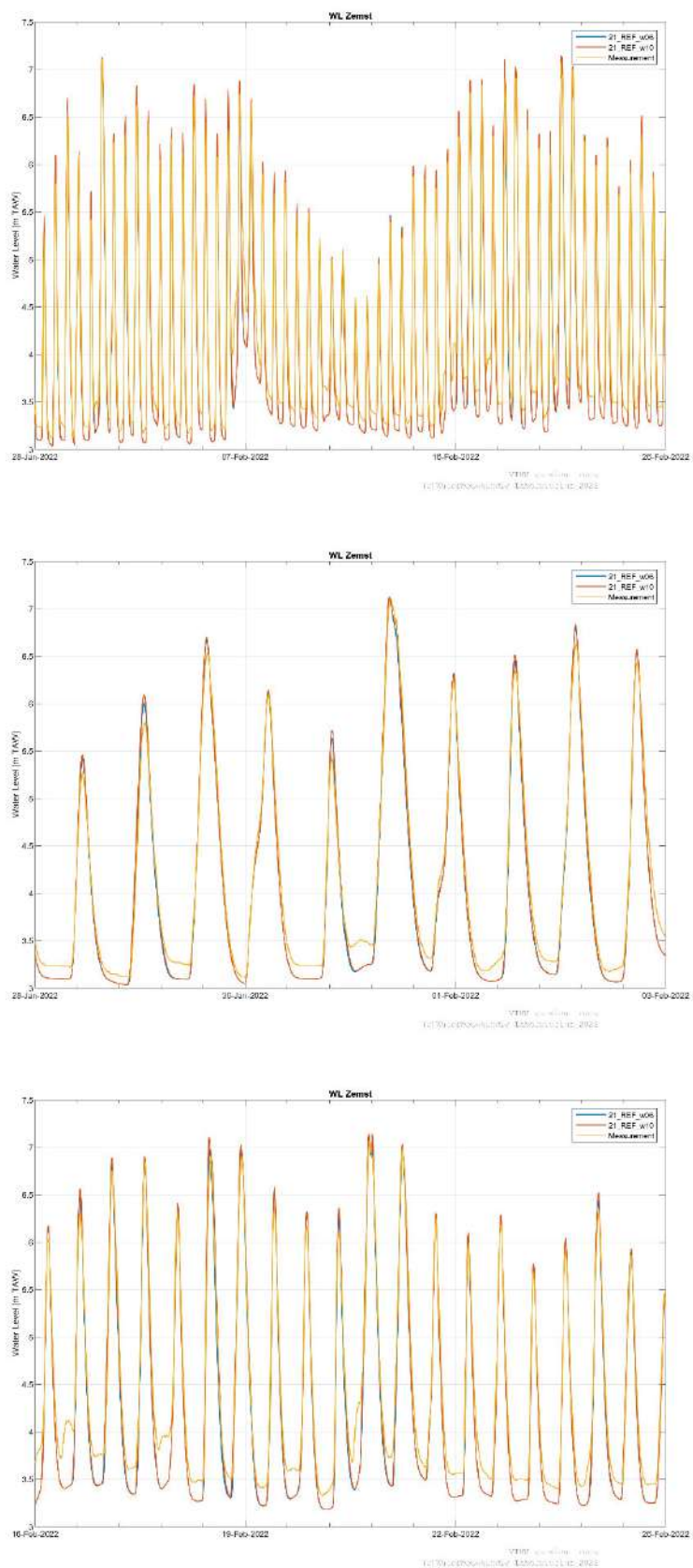


Figuur B 27 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Duffel sluis

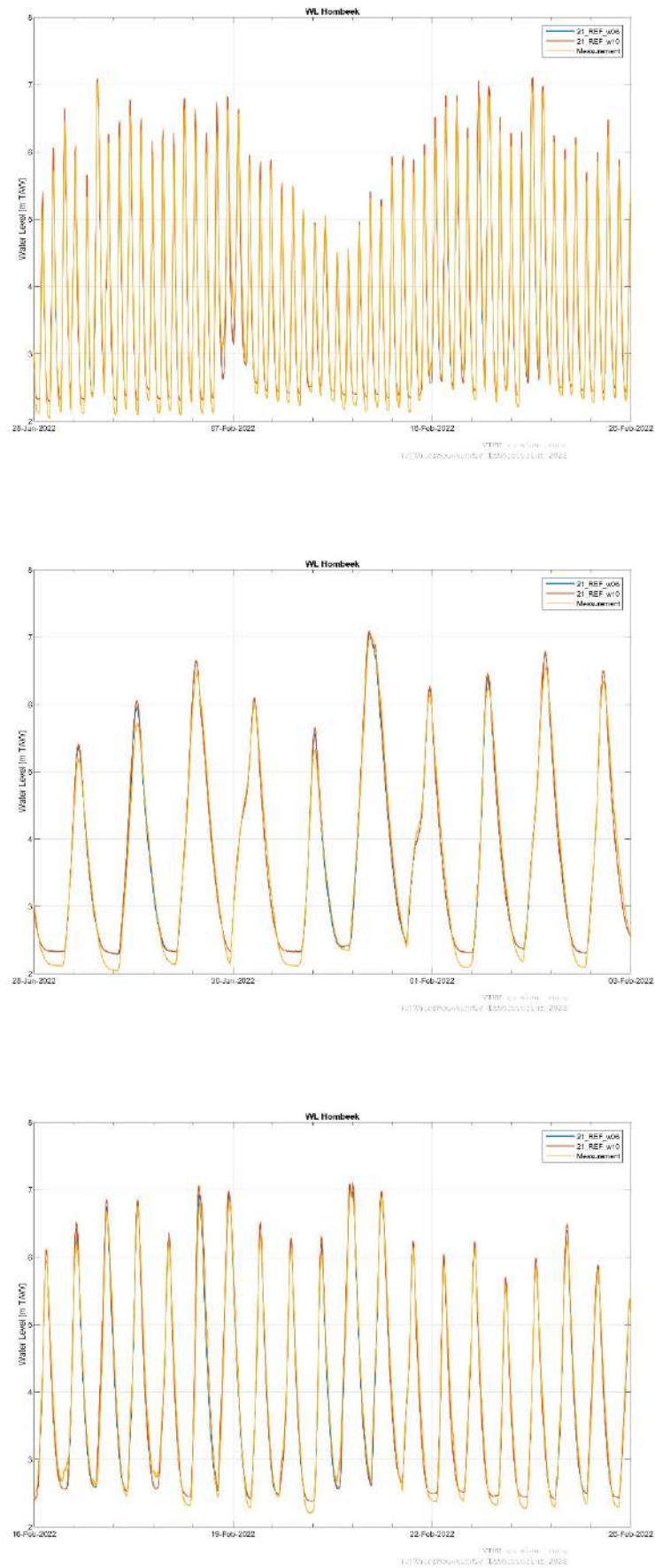


Figuur B 28 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Lier Molbrug

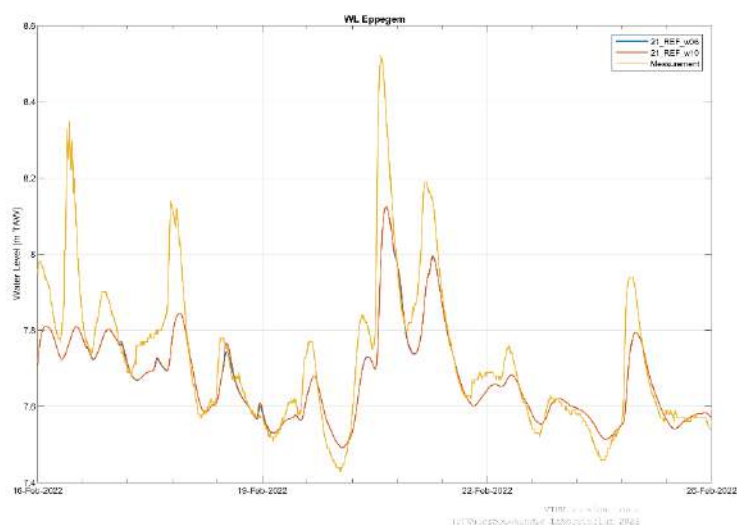
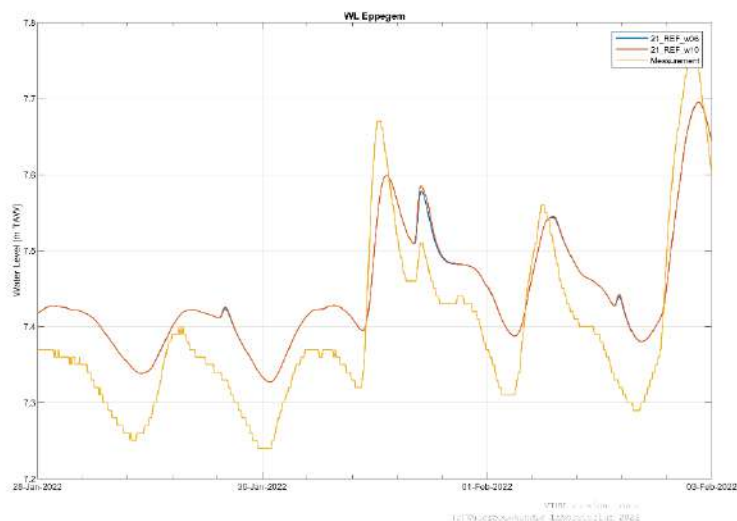
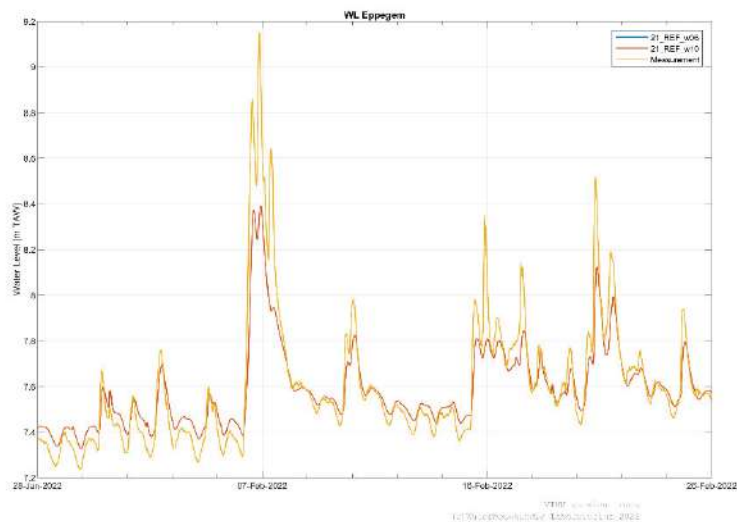
Zenne



Figuur B 29 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Zennet



Figuur B 30 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Hombeek



Figuur B 31 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Eppegem

BIJLAGE C Figuren statische analyse waterpeilen rivieren

Per (deel)waterloop worden volgende figuren weergegeven:

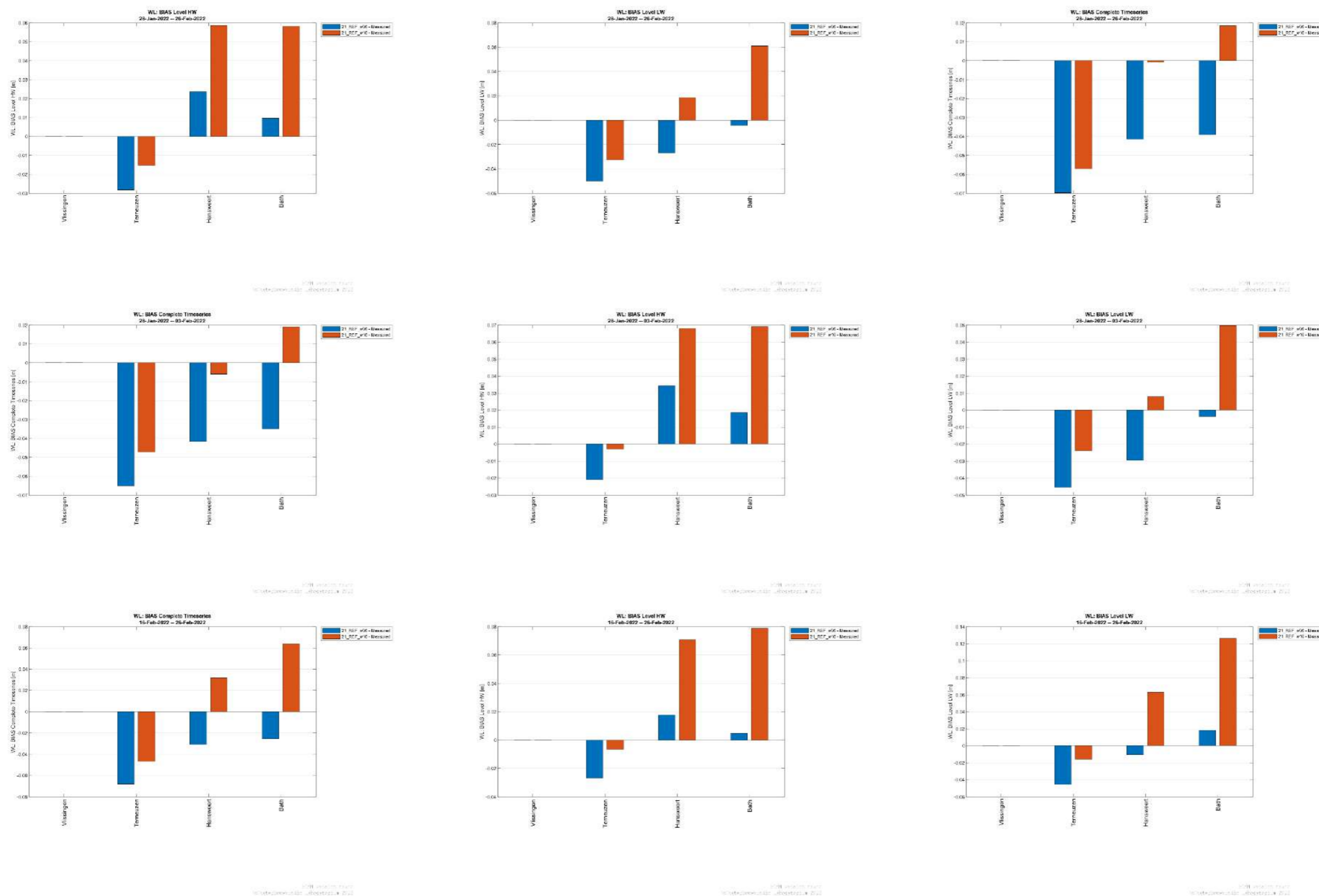
bias peil HW volledige periode	bias peil LW volledige periode	bias waterpeilen volledige tijdreeks volledige periode
bias peil HW deelperiode storm jan22	bias peil LW deelperiode storm jan22	bias waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm jan22
bias peil HW deelperiode storm feb22	bias peil LW deelperiode storm feb22	bias waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm feb22

RMSE peil HW volledige periode	RMSE peil LW volledige periode	RMSE waterpeilen volledige tijdreeks volledige periode
RMSE peil HW deelperiode storm jan22	RMSE peil LW deelperiode storm jan22	RMSE waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm jan22
RMSE peil HW deelperiode storm feb22	RMSE peil LW deelperiode storm feb22	RMSE waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm feb22

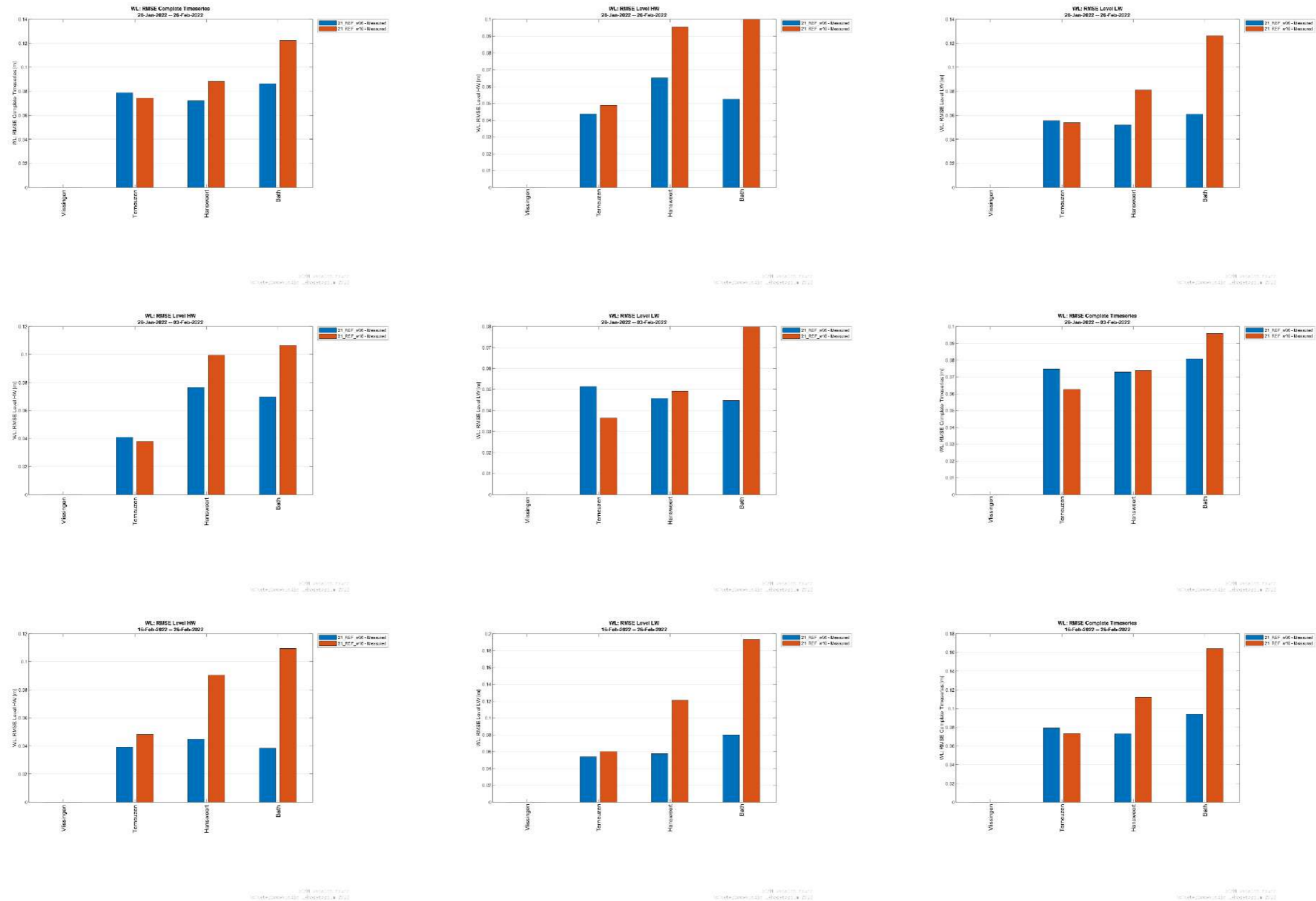
Blauw = 21_REF_zeeschelde_w06 vs metingen

Rood = 21_REF_zeeschelde_w10 vs metingen

Westerschelde

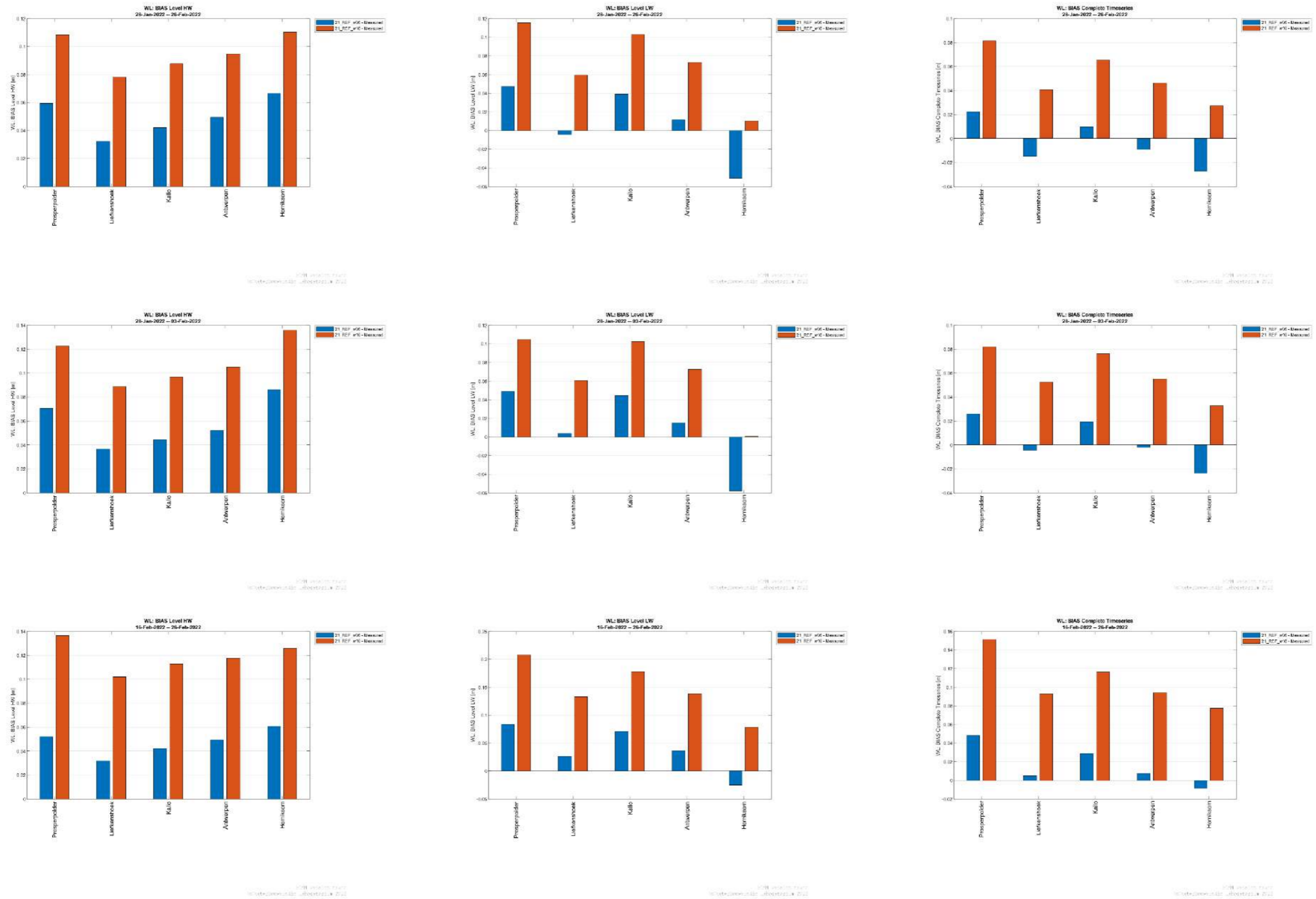


Figuur C 1 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde

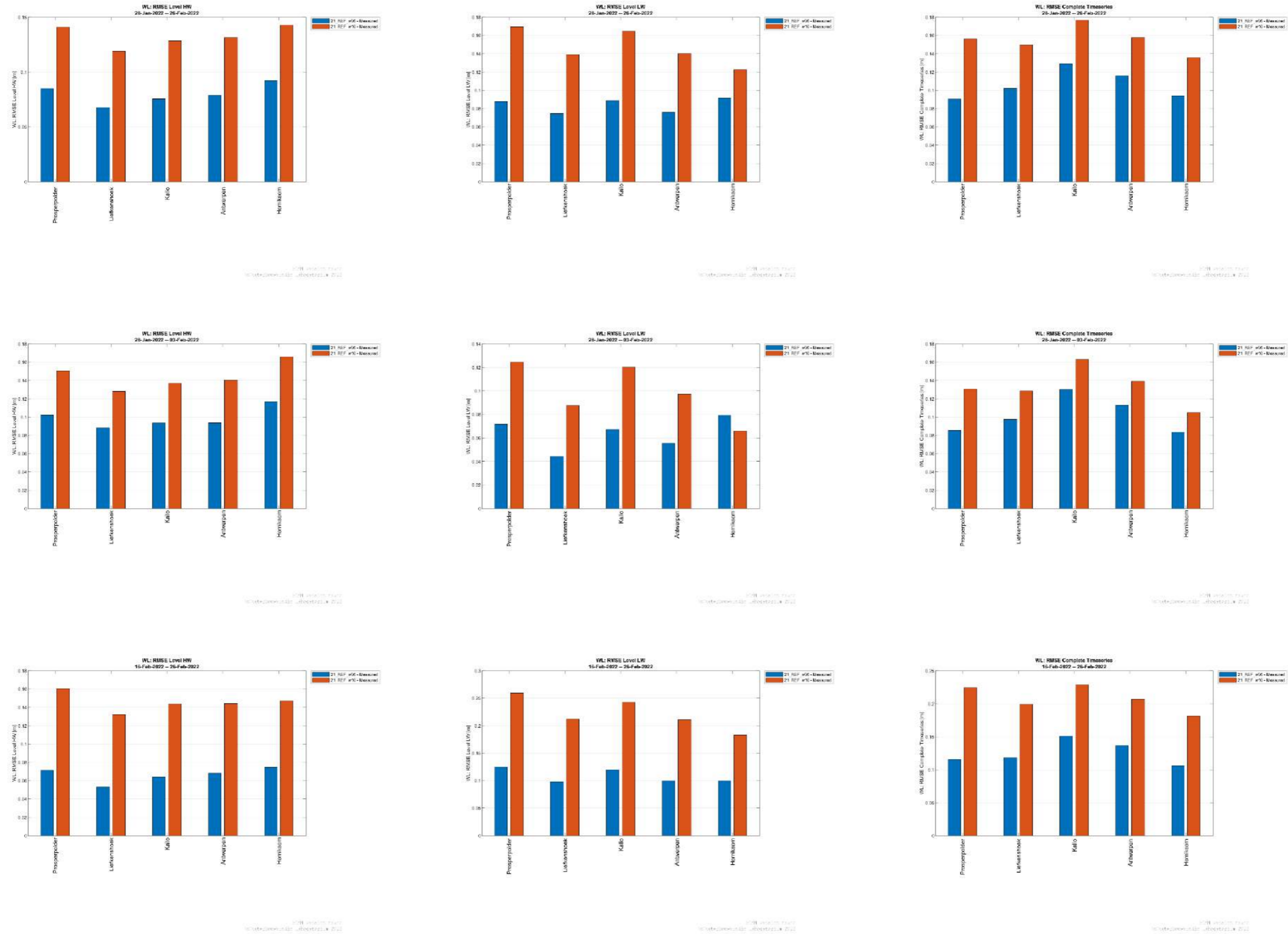


Figuur C 2 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde

Beneden-Zeeschelde

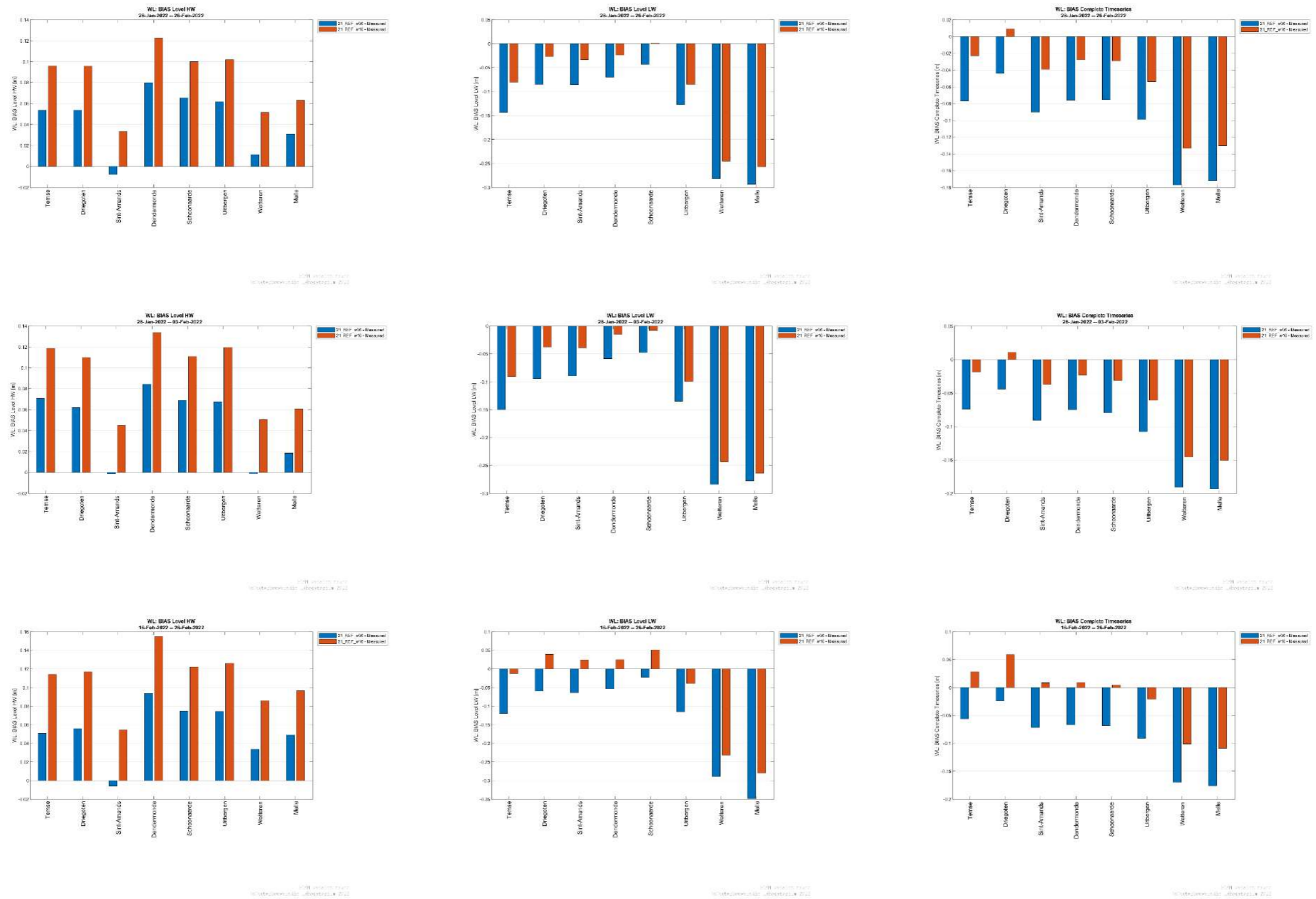


Figuur C 3 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde

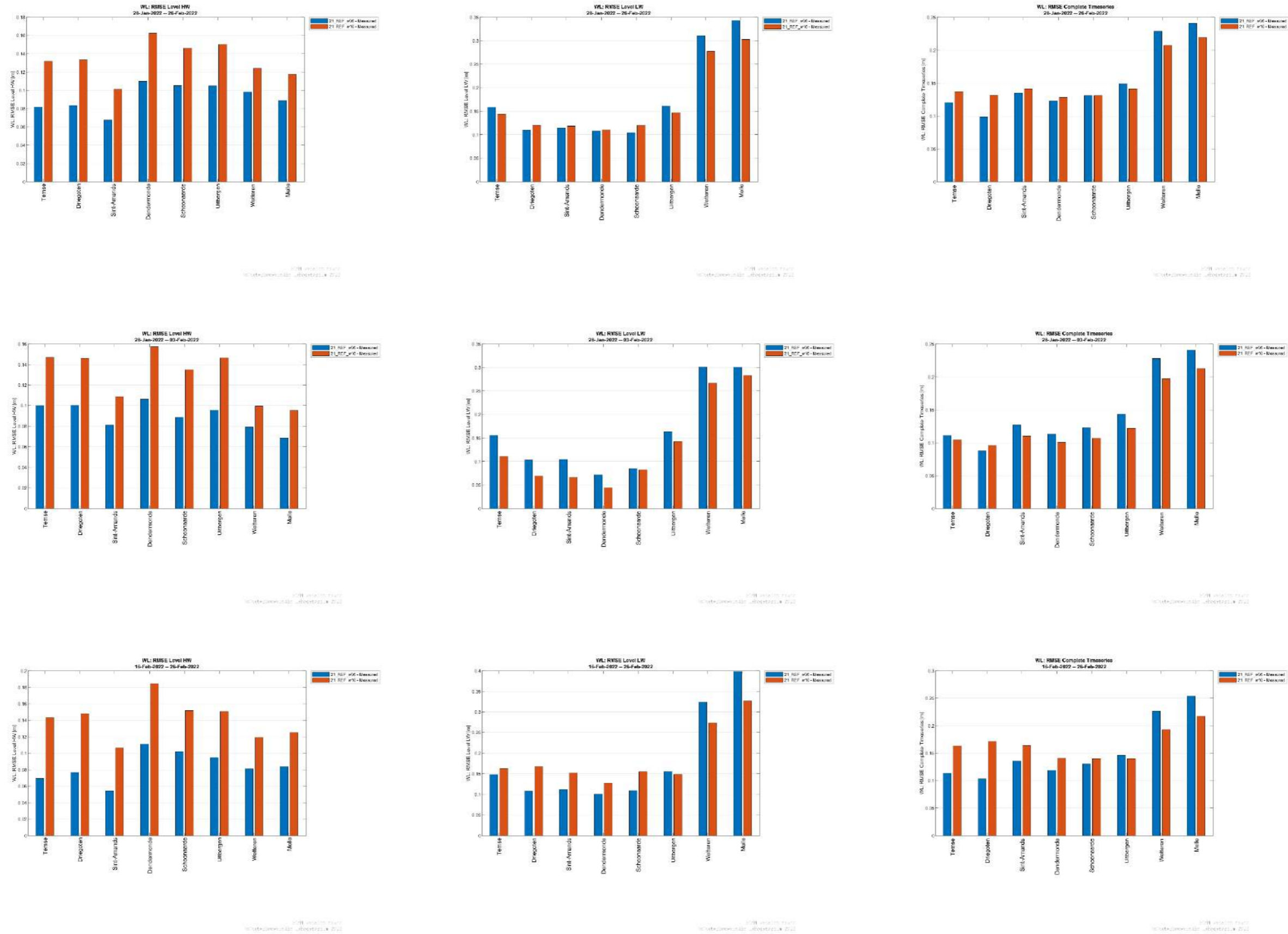


Figuur C 4 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde

Boven-Zeeschelde

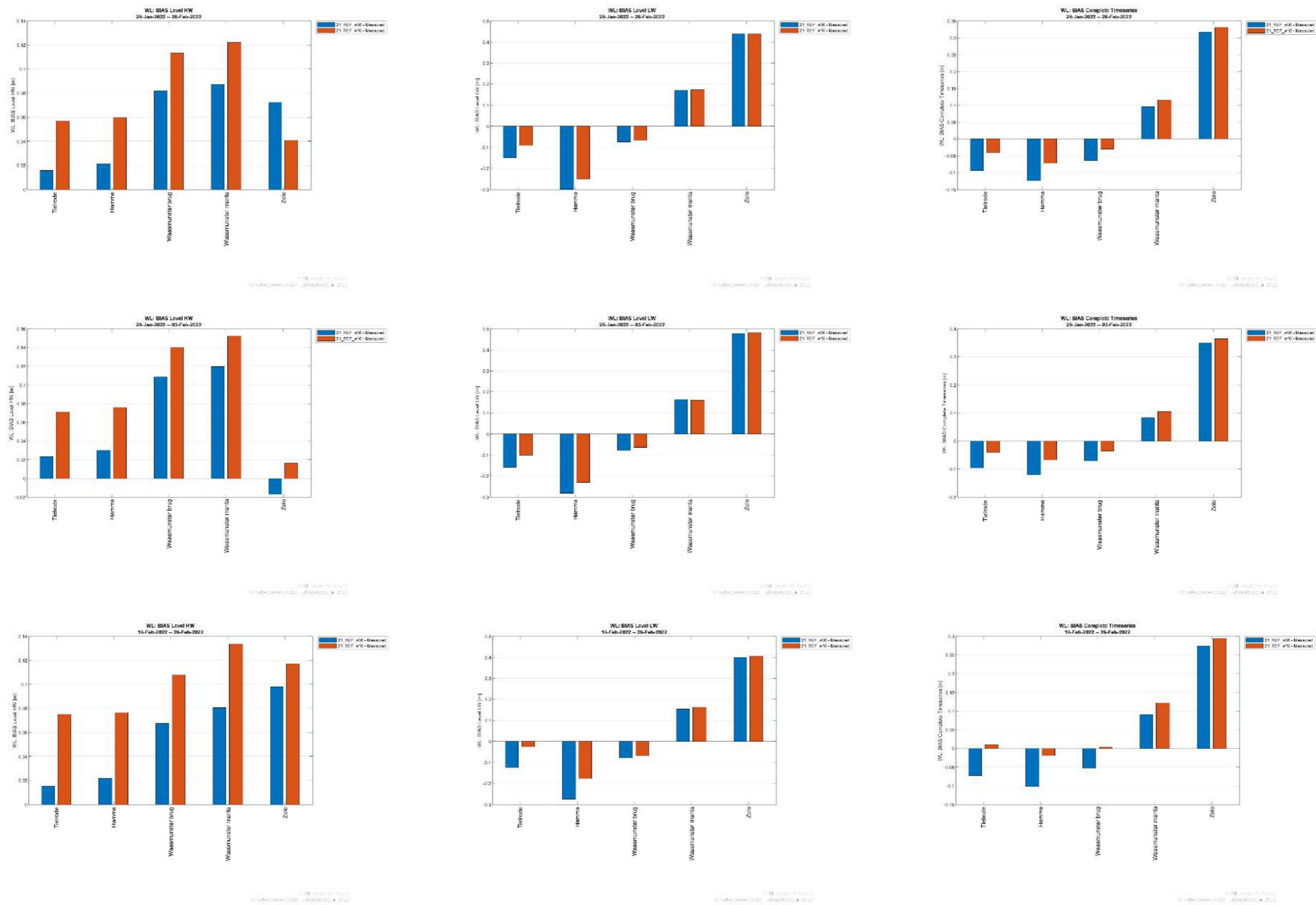


Figuur C 5 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde

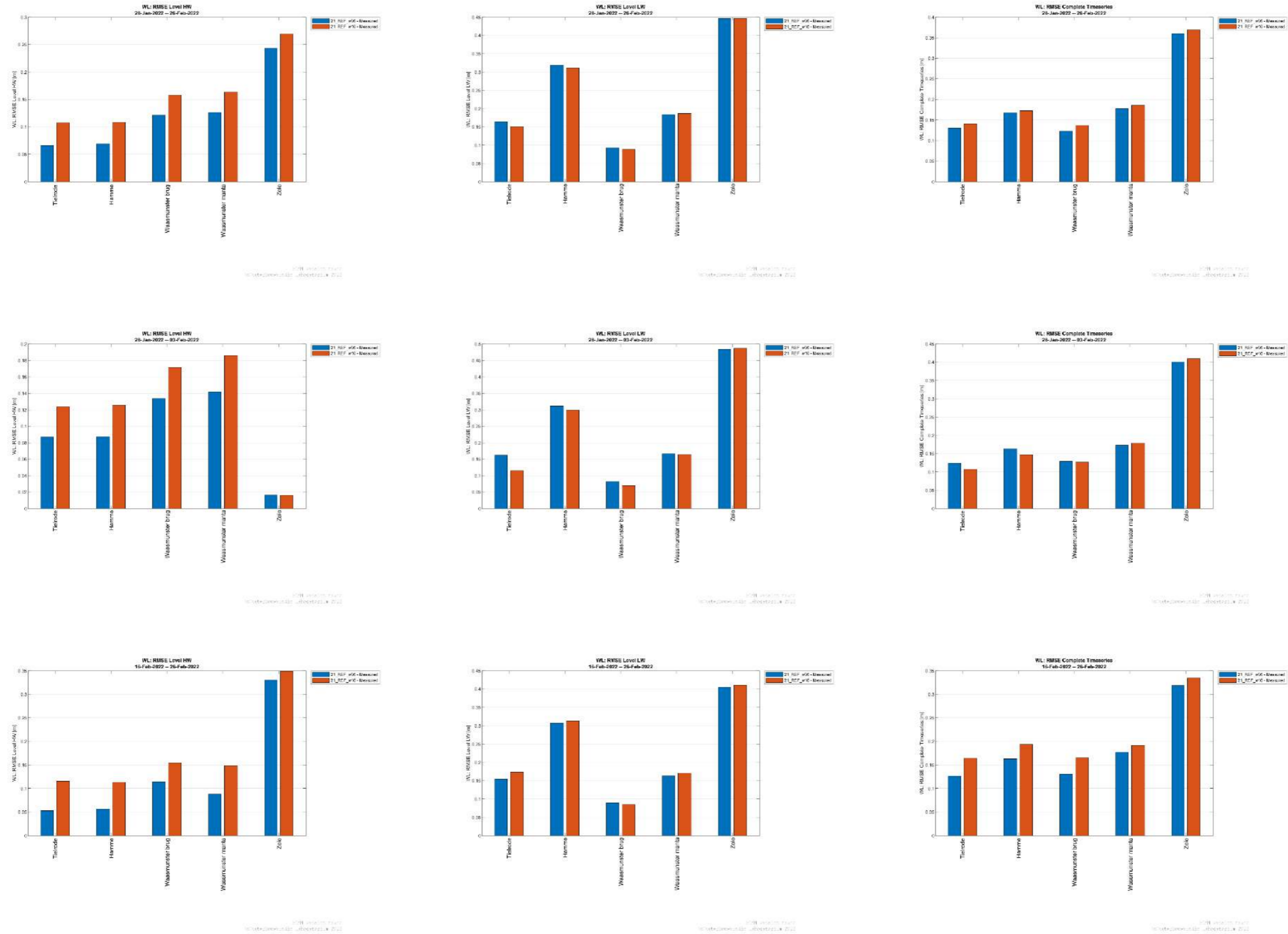


Figuur C 6 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde

Durme



Figuur C 7 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme

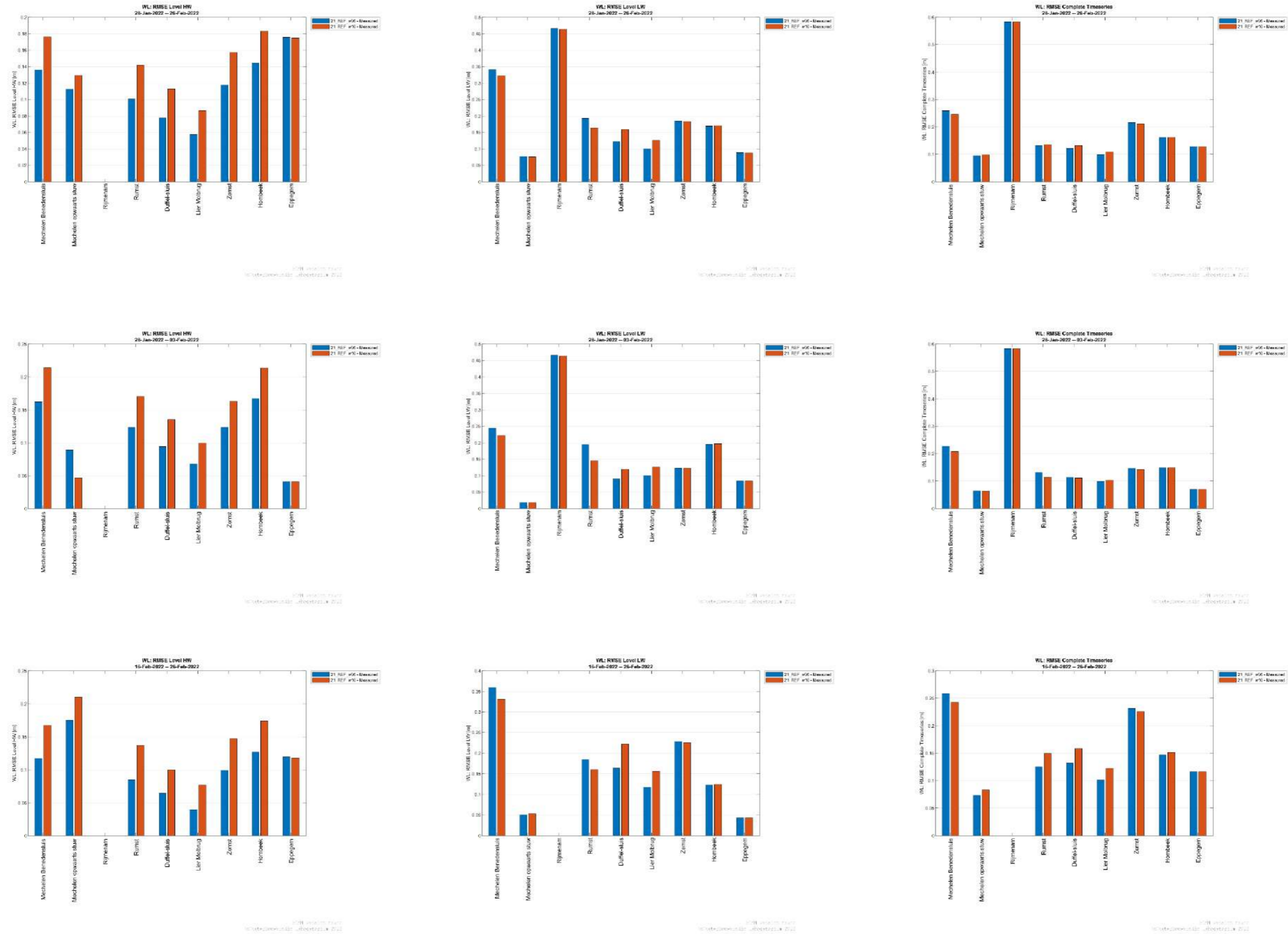


Figuur C 8 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme

Dijle, Benedennete en Zenne



Figuur C 9 – Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne



Figuur C 10 – RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne

BIJLAGE D Implementatie WIND in Zeescheldemodel

Mike11

Beschrijving overgenomen en vertaald uit Mike 11 reference manual (DHI, 2017)

De windmodule van MIKE11 maakt gebruik van werkelijke windsnelheden op 10 m boven een wateroppervlak. De wrijving van de wind op een wateroppervlak wordt in MIKE11 in rekening gebracht door aan de bewegingsvergelijking een windterm toe te voegen gebaseerd op de sleepspanning van de wind.

De windsleepspanning wordt als volgt uitgedrukt:

$$\tau_w = t_{fac} \cdot C_w \cdot \rho_a \cdot V_{10}^2$$

Met C_w : de windwrijvingscoëfficiënt ($3,24 \cdot 10^{-6}$)

t_{fac} : de topografische factor (met een maximale waarde van 1 voor een perfect vlak terrein, en met sterk verminderde waarden voor lokaties die beschut zijn tegen wind)

ρ_a : de luchtdichtheid

V_{10} : de windsnelheid 10 meter boven wateroppervlak

Om de wrijvingskracht van de wind te kennen wordt deze sleepspanning vermenigvuldigd met de wateroppervlakte waarover ze werkt. Voor elk Q-punt is deze gelijk aan de afstand tussen de twee h-punten aan beide zijden van het Q-punt, vermenigvuldigd met de ogenblikkelijke kombergingsbreedte van de sectie.

$$F_w = \tau_w \cdot A$$

Deze kracht wordt geprojecteerd op de raaklijn aan de tak ter hoogte van het Q-punt. Het is deze geprojecteerde wrijvingskracht die mee opgenomen wordt in de bewegingsvergelijking.

Windrandvoorwaarde te Vlissingen

Voor de windrandvoorwaarde op de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van de gemeten windsnelheid en windrichting te Vlissingen. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van het KNMI. Het betreft uurlijkse gegevens van gemiddelde potentiële windsnelheden (over land en op 10 m hoogte) en van windrichtingen te Vlissingen.

De potentiële windsnelheid is een referentiewindsnelheid die geen invloed kent van lokale effecten. Volgens WMO standaarden moeten windmetingen uitgevoerd worden op 10 m boven het grondoppervlak, boven een vrij landschap met een typische ruwheidslengte van 3 cm over land. Dit is echter praktisch vaak niet mogelijk. Daarom wordt gewerkt met potentiële wind om te corrigeren voor het verschil in meethoogte en lokale ruwheden in de opwaartse sector (Wever & Groen, 2009).

De parameters voor de windmodule werden afgeijkt bij de opzet van het oorspronkelijke model van de Zeeschelde. Onderstaande beschrijving is overgenomen uit het rapport betreffende de statistiek van het Scheldebekken, opgemaakt in het kader van de actualisatie van het Sigmaplan (International Marine and Dredging Consultants *et al.*, 2003).

De windmodule in Mike11 vereist als invoer de werkelijke wind op 10 m hoogte. De gegevens van het KNMI betreffen de wind -op 10 m hoogte- boven land. Deze waarden moeten dus nog omgezet worden naar de windsnelheid boven het wateroppervlak (eveneens op 10 m hoogte). Voor deze omzetting werd gebruik

gemaakt van het 2-lagen model van Monin-Obukhov (Verkaik, 2001), waarbij de volgende formule mag gebruikt worden :

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

waarin U de windsnelheid is, u de wrijvingsnelheid voor de onderste laag, κ de Von Karman-constante, z de hoogte en z₀ de wrijvingsfactor voor het terrein. u* mag constant verondersteld worden over de hoogte en de wrijvingsfactor z₀ bedraagt 0,001 boven water, en 0,03 boven land (Verkaik, 2001). Zodoende bekomt men de volgende transformatieformule voor de gemeten KNMI-windsnelheid boven land naar de Mike11-windsnelheid boven water (beiden op 10 m hoogte) :*

$$U_{water}^{10m} = U_{land}^{10m} \frac{\ln\left(\frac{10}{z_0^{water}}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0^{land}}\right)} = 1.58549 U_{land}^{10m}$$

De factor 1,58549, die de omzetting van windsnelheid boven land naar windsnelheid boven water vertolkt, is vrij hoog als men bedenkt dat het wind-meetstation te Vlissingen vlakbij de Westerschelde gelegen is. Dit heeft tot gevolg dat men in Vlissingen eigenlijk niet volledig te maken heeft met wind boven land. Anderzijds blijkt de gekalibreerde topografische factor een vrij lage waarde te hebben, met name 0,60. Aangezien beide factoren worden vermenigvuldigd, heeft de waarde van de individuele factoren echter geen invloed op de resultaten.*

**De waarde van de topofactor werd aangepast tijdens de meest recente modelactualisatie.*

BIJLAGE E Analyse: start GOG-werking

Op basis van de gemeten waterpeilen in de GOG's en de meetposten nabij de GOG's werd een inschatting gemaakt van de start van de GOG-werking in de GOG's die in werking getreden zijn. Het tijdstip van de start van de GOG-werking werd visueel ingeschat, rekening houdend met het drempelpeil voor GOG-werking in de nabije meetposten en met de start van de stijging van het waterpeil in het gebied zelf.

In eerste instantie wordt dit tijdstip vergeleken ten opzichte van het tijdstip van het hoogwater in Antwerpen. Voor de beschouwde hoogwaters te Antwerpen werden deze tijdstippen overgenomen uit de Scheldeflitsen (Hydrologisch Informatiecentrum, 2022a; b).

Tabel D 1 geeft een overzicht van de bekomen tijden voor de verschillende GOG's. Hierbij kunnen volgende vaststellingen gedaan worden op basis van de beschouwde hoogwaters:

- De tijden voor storm jan22 zijn wat afwijkend ten opzichte van de andere stormen. Deze storm kende een lang hoogwater in Antwerpen. Het gekozen tijdstip bevindt zich ongeveer in het midden van dit hoogwater. Dit had echter ook vroeger kunnen gekozen worden.
- Bij storm feb22-HW5 start de GOG-werking het vroegst, en bij meerdere GOG's zelfs voor het tijdstip van het hoogwater te Antwerpen. Dit is het hoogste hoogwater uit deze stormperiode.
- De GOG-werking in KBR is bij deze stormperiodes twee maal reeds voor het stormhoogwater te Antwerpen gestart.
- GOG Zennegat heeft GOG-werking gekend bij alle beschouwde stormhoogwaters. De start van de GOG-werking ten opzichte van het tijdstip van hoogwater te Antwerpen varieert tussen 40 min voor het hoogwater, en 55 min na het hoogwater. Hoe hoger het hoogwater te Antwerpen, des te sneller het GOG zal beginnen werken.
- Bij de beschouwde stormen was er weinig of geen invloed van bovenafvoer. Dit kan de tijdstippen van start van GOG-werking voor de opwaarts gelegen GOG's met lagere overloopp dijken nog beïnvloeden.

In een tweede vergelijking wordt het tijdstip van de start van de GOG-werking vergeleken met het tijdstip waarop het waterpeil in Antwerpen 6,30 mTAW overschrijdt, voor het stormhoogwater. Tabel D 2 geeft een overzicht van de bekomen tijden voor de verschillende GOG's. Hierbij kunnen volgende vaststellingen gedaan worden op basis van de beschouwde hoogwaters:

- In GOG Tielrodebroek en GOG Zennegat start de GOG-werking circa 1 uur (+/- 10 min) nadat het waterpeil in Antwerpen 6,30 mTAW overschreden heeft.
- Het tijdstip van de start van de GOG-werking in Lippenbroek, Potpolder I en Bovenzanden varieert tussen 1u 10 min en 1u 40 min nadat het waterpeil in Antwerpen 6,30 mTAW overschreden heeft.
- De GOG-werking in Scheldebreek, Paardeweide en Anderstadt start pas 2 uur (+/- 25 min) nadat het waterpeil in Antwerpen 6,30 mTAW overschreden heeft. De GOG-werking in deze gebieden kan echter nog beïnvloed worden door bovenafvoer, die bij de beschouwde stormen beperkt was.

Tabel D 1– Start GOG-werking tov HW Antwerpen

			jan22	feb22-HW1	feb22-HW2	feb22-HW3	feb22-HW4	feb22-HW5	feb22-HW6
Antwerpen	Tijdstip HW		31/01/2022 15:00	17/02/2022 3:50	17/02/2022 16:13	18/02/2022 17:44	19/02/2022 5:28	21/02/2022 6:50	21/02/2022 18:39
	HW [mTAW])		6.94	6.31	6.34	6.56	6.52	6.91	6.54
GOG	Nabije meetpost	Drempelpeil GOG-werking	Start GOG-werking tov HW Antwerpen						
Kruikeke & Bazel	Hemiksem	6.8 mTAW	-15 min					-20 min	
Tielrodebroek	Tielrode	6.65 mTAW	0 min		+57 min	+16 min	+7 min	-40 min	+11 min
Lippenbroek	Driegoten	6.8 mTAW	+10 min					-20 min	
Scheldebroek	Dendermonde-Schoonaarde	6.3 mTAW	+1u 10 min				+1u 17 min	+40 min	+1u21 min
Paardeweide	Schoonaarde	6.2 mTAW	+1u 25 min				+1u 32 min	+40 min	+1u31 min
Bergenmeersen	Uitbergen	6.4 mTAW						+1u50 min	
GOG Potpolder I	Hamme-Waasmunster brug	6.7 mTAW	+15 min			+46 min	+22 min	-25 min	+31 min
Bovenzanden	Rumst	6.75 mTAW	+5 min			+46 min	+42 min	-25 min	+51 min
Zennegat	Rumst-Mechelen Benedensluis	6.45 mTAW	0 min	+55 min	+47 min	+6 min	+2 min	-40 min	+11 min
GOG Anderstadt	Duffel-sluis-Lier Molbrug	6.7 mTAW	+1u 10 min					+20 min	+1u06 min

Tabel D 2– Start GOG-werking tov 6.30 mTAW Antwerpen

			jan22	feb22-HW1	feb22-HW2	feb22-HW3	feb22-HW4	feb22-HW5	feb22-HW6
Antwerpen	Tijdstip 6.30 mTAW		31/01/2022 14:00	17/02/2022 3:45	17/02/2022 15:15	18/02/2022 16:50	19/02/2022 4:35	21/02/2022 5:10	21/02/2022 18:00
GOG	Nabije meetpost	Drempelpeil GOG-werking	Start GOG-werking tov 6.30 mTAW Antwerpen						
Kruike & Bazel	Hemiksem	6.8 mTAW	30 min					1u 20 min	
Tielrodebroek	Tielrode	6.65 mTAW	1 u		1u 10 min	1u 10 min	1 u	1 u	50 min
Lippenbroek	Driegoten	6.8 mTAW	1u 10 min					1u 20 min	
Scheldebreek	Dendermonde- Schoonaarde	6.3 mTAW	2u 10 min				2u 10 min	2u 20 min	2u
Paardeweide	Schoonaarde	6.2 mTAW	2u 25 min				2u 25 min	2u 20 min	2u 10 min
Bergenmeersen	Uitbergen	6.4 mTAW						3u 30 min	
GOG Potpolder I	Hamme-Waasmunster brug	6.7 mTAW	1u 15 min			1u 40 min	1u 15 min	1u 15 min	1u 10 min
Bovenzanden	Rumst	6.75 mTAW	1u 15 min			1u 40 min	1u 35 min	1u 15 min	1u 30 min
Zennegat	Rumst-Mechelen Benedensluis	6.45 mTAW	1 u	1 u	1 u	1 u	55 min	1 u	55 min
GOG Anderstadt	Duffel-sluis-Lier Molbrug	6.7 mTAW	2u 10 min					2u	1u 45 min

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