



Vlaanderen
is wetenschap

PA015_1
WL rapporten

Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren

Hindcast storm en was februari-maart 2020

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren

Hindcast storm en was februari-maart 2020

Coen, L.; Vanderkimpen, P.; Mostaert, F.

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 2020
D/2020/3241/305

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Coen, L.; Vanderkimpfen, 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

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	DMOW-Waterbouwkundig Laboratorium	Ref.:	WL2020RPA015_1
Trefwoorden (3-5):	DMOW-Waterbouwkundig Laboratorium		
Kennisdomeinen:	Waterbeheer > 2. Hydraulica > 2.2 Hydrodynamische modellen > 2.2.c. Numerieke modellering		
Tekst (p.):	67	Bijlagen (p.):	44
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanderkimpfen, P.	
Projectleider:	Coen, L.	

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	
-----------------	--------------	--



Abstract

In de springtijperiode van 10-12 februari 2020 werd tijdens drie opeenvolgende hoogwaters de drempel voor Stormtij Zeescheldebekken overschreden. In de eerste helft van maart 2020 werd een periode met grote neerslaghoeveelheden gevolgd door een springtijperiode van 10-13 maart 2020. In deze periode werd de prewaakdrempel te Antwerpen 7 keer overschreden, met één overschrijding van de drempel voor Stormtij Zeescheldebekken op 12 maart 2020.

Het 1D-hydrodynamisch model van het Zeescheldebekken werd recent geactualiseerd (International Marine and Dredging Consultants & Waterbouwkundig Laboratorium, 2020). De hindcast heeft tot doel de performantie van het geactualiseerde 1D-model tijdens de periode met springtij en verhoogde bovenafvoer van februari – maart 2020 na te gaan.

De stormen van februari 2020 en maart 2020 werden nagerekend met het geactualiseerde model van het Zeescheldebekken. Hierbij zijn enkel historische meetreeksen als randvoorwaarde gebruikt. In een tweede simulatie werd de topofactor voor de wind aangepast. Waterpeilen zijn geëvalueerd ter hoogte van de meetposten langs de Zeeschelde en getijgebonden zijrivieren, met behulp van VIMM. Ook in de GOG's zijn waterpeilen geëvalueerd op basis van meetgegevens van waterpeilmeters. De resultaten van de berekeningen met verschillende windfactoren zijn ook onderling vergeleken. De aanpassing van de topofactor voor de wind van 1.0 naar 0.6 zorgt voor een daling van de maximum waterpeilen langsheen de Zeeschelde en zijrivieren, tijdens de stormen. Een verdere validatie van het Zeescheldemodel voor de topofactor voor de wind wordt aanbevolen.

In een bijkomende scenarioberekening werd tevens nog het effect van het sluiten van de GGG-inwateringssluizen tijdens de storm 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.....	XI
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
2.5.1 Bathymetrie-topografie.....	7
2.5.2 Stuw in Merelbeke.....	8
2.5.3 Actualisatie vallei.....	8
2.5.4 Dijkhoogtes.....	8
2.5.5 Dokken Antwerpen.....	9
2.5.6 Actualisatie vallei van de Demer	9
2.5.7 Optimalisatie Dijlegebied	9
2.5.8 Wind langs de Westerschelde	9
2.5.9 Kalibratie.....	9
2.6 Modelaanpassingen.....	11
2.6.1 Kaaien Antwerpen	11
2.6.2 Burchtse Weel	11
2.6.3 Groot Schoor.....	11
2.6.4 Pomp Lokeren.....	11

2.7	Randvoorwaarden	12
2.7.1	Afwaartse rand	12
2.7.2	Opwaartse randen	14
2.8	Simulatieperiode	19
2.8.1	Stuw Mechelen	19
2.8.2	GGG-inwateringssluizen	19
2.9	Versie 02: aanpassing topofactor wind	19
2.10	Scenario 01: GGG-inwateringssluizen niet gesloten	19
3	Hindcast met 1D-referentiemodel	20
3.1	Validatiegegevens.....	20
3.1.1	Rivieren.....	20
3.1.2	GOG's.....	21
3.2	Methode validatie	22
3.2.1	Maximum waterpeil waterlopen.....	22
3.2.2	VIMM.....	22
3.2.3	GOG's.....	23
3.3	Resultaten meetposten rivieren.....	23
3.3.1	Waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde	23
3.3.2	Waterpeilen Durme	28
3.3.3	Waterpeilen Dijle, Benedennete en Zenne	31
3.3.4	Tabel Hmax stormen	38
3.4	Resultaten meetposten GOG's	42
3.4.1	GOG-GGG Kruikeke	42
3.4.2	GOG-GGG Bazel	45
3.4.3	GOG-GGG Lippenbroek.....	47
3.4.4	GOG Scheldebroek.....	50
3.4.5	GOG-GGG Bergenmeersen	52
3.4.6	GOG Bovenzanden.....	55
3.4.7	GOG-GGG Zennegat.....	57
4	Scenario: GGG-inwateringssluizen	60
5	Conclusies en aanbevelingen	66
6	Referenties	67
BIJLAGE A	Tijdreeksen waterpeilen rivieren.....	B1
BIJLAGE B	Figuren statistische analyse waterpeilen rivieren	B32

BIJLAGE C Implementatie WIND in Zeescheldemodel	B43
Mike11.....	B43
Windrandvoorwaarde te Vlissingen	B43

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht jaartallen geactualiseerde bathymetrie hoofdwaterlopen in Zeescheldemodel	8
Tabel 2 – Gemiddelde globale statistiek per station voor de zes events en de droge periode voor het startmodel (A0) en het geactualiseerde model (A2) (International Marine and Dredging Consultants & Waterbouwkundig Laboratorium, 2020).....	10
Tabel 3 – Overzicht beschikbare gemeten debietreeksen	14
Tabel 4 - Opgelegde (gemeten) debietreeksen aan opwaartse randen van het model	16
Tabel 5 – Herschaalde debietreeksen opgelegd aan opwaartse randen van het model.....	17
Tabel 6 - Herschaalde debietreeksen opgelegd aan onbemeten deelbekkens	17
Tabel 7 – Overzicht beschikbare meetreeksen waterpeilen voor validatie	20
Tabel 8 – Overzicht waterpeilmeters in GOG's	21
Tabel 9 – Hmax stormen ter hoogte van meetlocaties	39
Tabel 10 – Kenmerken GOG-GGG Kruibeke	43
Tabel 11 - Kenmerken GOG-GGG Bazel.....	45
Tabel 12 - Kenmerken GOG-GGG Lippenbroek.....	48
Tabel 13 - Kenmerken GOG Scheldebroek	50
Tabel 14 - Kenmerken GOG-GGG Bergenmeersen.....	53
Tabel 15 - Kenmerken GOG Bovenzanden	55
Tabel 16 - Kenmerken GOG-GGG Zennegat	58

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.....	13
Figuur 5 – Verloop gemiddelde potentiële windsnelheid en windrichting te Vlissingen.....	13
Figuur 6 – Verloop daggemiddeld debiet te Melle.....	15
Figuur 7 – Situering meetposten Westerschelde en Beneden-Zeeschelde	25
Figuur 8 – Situering meetposten Boven-Zeeschelde.....	25
Figuur 9 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde bij storm feb2020	26
Figuur 10 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde bij storm maart2020.....	26
Figuur 11 – M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Westerschelde en Zeeschelde.....	27
Figuur 12 – Situering meetposten Durme	28
Figuur 13 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme bij storm feb2020	29
Figuur 14 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme bij storm maart2020	29
Figuur 15 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Durme.....	30
Figuur 16 – Situering meetposten Dijle, Benedennete en Zenne	32
Figuur 17 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle bij storm feb2020	33
Figuur 18 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle bij storm maart2020	33
Figuur 19 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Dijle.....	34
Figuur 20 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete bij storm feb2020.....	35
Figuur 21 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete bij storm maart2020	35
Figuur 22 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Benedennete	36
Figuur 23 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle-Zenne bij storm feb2020.....	37
Figuur 24 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle-Zenne bij storm maart2020	37
Figuur 25 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen storm maart2020 – Zenne.....	38
Figuur 26 – Situering meetposten GOG-GGG Kruibeke en Bazel	42

Figuur 27 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruike Grote Uitlaat – feb2020	44
Figuur 28 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruike Grote Uitlaat – maart2020.....	44
Figuur 29 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel Grote&Kleine Uitlaat – feb2020	46
Figuur 30 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel Grote&Kleine Uitlaat – maart2020	46
Figuur 31 - Situering meetposten GOG-GGG Lippenbroek	47
Figuur 32 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – feb2020	49
Figuur 33 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – maart2020	49
Figuur 34 - Situering meetpost GOG Scheldebroek	50
Figuur 35 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – feb2020	51
Figuur 36 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – maart2020.....	51
Figuur 37 - Situering meetposten GOG-GGG Bergenmeersen	52
Figuur 38 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – feb2020	54
Figuur 39 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – maart2020	54
Figuur 40 - Situering meetposten GOG Bovenzanden	55
Figuur 41 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – feb2020	56
Figuur 42 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – maart2020.....	56
Figuur 43 - Situering meetposten GOG-GGG Zennegat	57
Figuur 44 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – feb2020	59
Figuur 45 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – maart2020.....	59
Figuur 46 - Lengteprofiel met gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – REF02 en SC01 - storm feb2020	61
Figuur 47 - Lengteprofiel met gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel en Dijle – REF02 en SC01 - storm feb2020.....	61
Figuur 48 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruike Grote Uitlaat- REF02 en SC01 – feb2020	62
Figuur 49 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel Grote Uitlaat- REF02 en SC01 – feb2020	62
Figuur 50 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek - REF02 en SC01 – feb2020	63
Figuur 51 - Gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek - REF02 en SC01 – feb2020	63
Figuur 52 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen - REF02 en SC01 – feb2020	64
Figuur 53 - Gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden - REF02 en SC01 – feb2020	64
Figuur 54 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat - REF02 en SC01 – feb2020	65

Lijst van de figuren in BIJLAGE A

Figuur A 1 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Vlissingen	B2
Figuur A 2 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Terneuzen	B3
Figuur A 3 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Hansweert	B4
Figuur A 4 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Bath	B5
Figuur A 5 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Prosperpolder	B6
Figuur A 6 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Liefkenshoek	B7
Figuur A 7 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Kallo.....	B8
Figuur A 8 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Antwerpen	B9
Figuur A 9 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Hemiksem	B10
Figuur A 10 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Temse.....	B11
Figuur A 11 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Driegoten	B12
Figuur A 12 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Sint-Amands	B13
Figuur A 13 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Dendermonde	B14
Figuur A 14 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Schoonaarde	B15
Figuur A 15 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Uitbergen	B16
Figuur A 16 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Wetteren.....	B17
Figuur A 17 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Melle	B18
Figuur A 18 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Tielrode	B19
Figuur A 19 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster brug	B20
Figuur A 20 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster manta	B21
Figuur A 21 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Zele.....	B22
Figuur A 22 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen benedensluis.....	B23
Figuur A 23 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen opwaarts stuw	B24
Figuur A 24 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Rijmenam.....	B25
Figuur A 25 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Rumst	B26
Figuur A 26 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Duffel sluis.....	B27
Figuur A 27 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Lier Molbrug.....	B28
Figuur A 28 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Zemst	B29
Figuur A 29 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Hombeek.....	B30
Figuur A 30 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Epepegem	B31

Lijst van de figuren in BIJLAGE B

Figuur B 1 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde ...	B33
Figuur B 2 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde.	B34
Figuur B 3 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde	B35
Figuur B 4 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde	B36
Figuur B 5 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde	B37
Figuur B 6 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde	B38
Figuur B 7 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme	B39
Figuur B 8 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme.....	B40
Figuur B 9 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne	B41
Figuur B 10 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne	B42

1 Inleiding

1.1 Kader

In de springtijperiode van 10-12 februari 2020 werd tijdens drie opeenvolgende hoogwaters te Antwerpen de drempel voor Stormtij Zeescheldebekken¹ overschreden. In de eerste helft van maart 2020 werd een periode met grote neerslaghoeveelheden gevolgd door een springtijperiode van 10-13 maart 2020. In deze periode werd de prewaakdrempel te Antwerpen 7 keer overschreden, met één overschrijding van de drempel voor Stormtij Zeescheldebekken op 12 maart 2020.

De gebeurtenissen van beide stormperiodes worden beschreven in een Scheldeflits (Hydrologisch Informatiecentrum, 2019)(Hydrologisch Informatiecentrum, 2020).

1.2 Doelstelling

Het 1D-hydrodynamisch model van het Zeescheldebekken werd recent geactualiseerd.

De hindcast heeft tot doel de performantie van het geactualiseerde 1D-model tijdens de periode met springtij en verhoogde bovenafvoer van februari – maart 2020 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 waterpeilmeters.

Op vraag van de beheerder wordt bijkomend een scenario bekeken waarbij de GGG-inwateringssluizen niet gesloten worden tijdens de storm.

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 betreffende de GGG-inwateringssluizen besproken.

Hoofdstuk 5 besluit met de conclusies.

¹ Drempel voor Stormtij Zeescheldebekken te Antwerpen = 6,7 mTAW; prewaakpeil te Antwerpen = 6,3 mTAW

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 werking 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 bij, deze worden hieronder chronologisch toegelicht.

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

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

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.

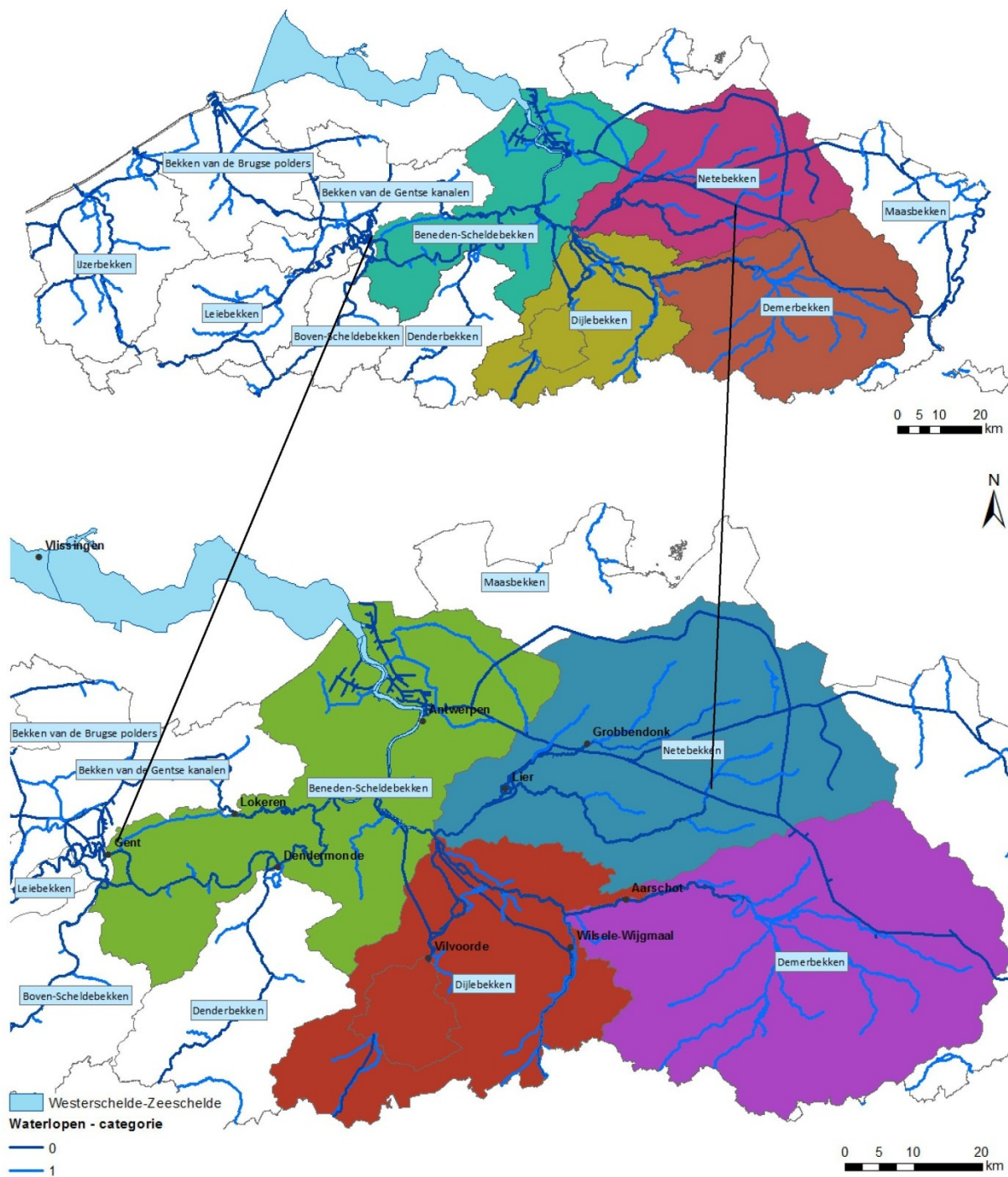
In het najaar van 2015 zijn de ontpoldering en het GOG Wijmeers afgewerkt. Deze gebieden zijn gelegen net opwaarts van GOG Bergenmeersen.

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

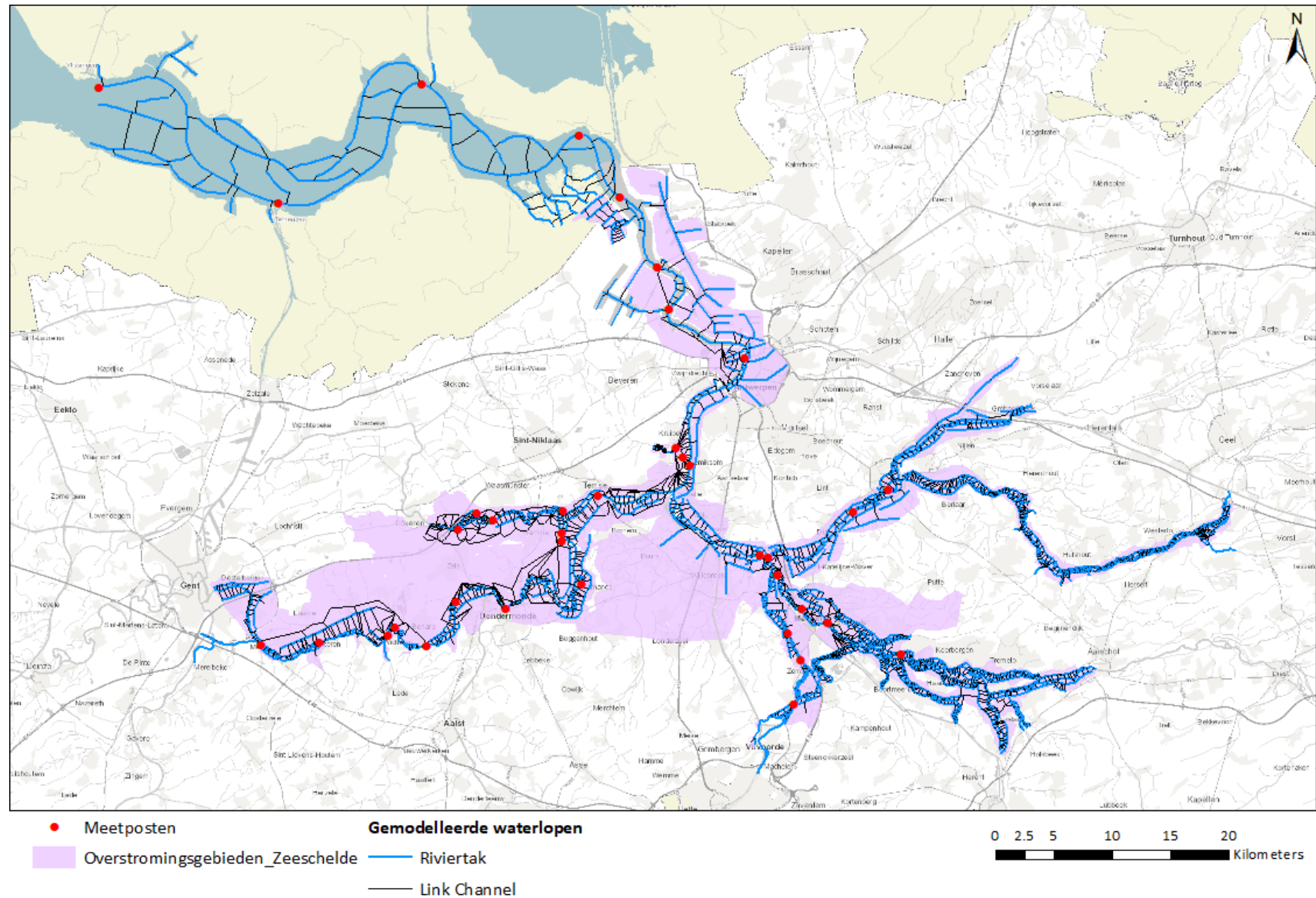
Sinds januari 2017 is ook GOG-GGG Zennegat, aan de Dijlemonding, in werking.

De zomerdijk of overloopdijk van het GOG Grote Wal, ook wel Groot Schoor genoemd, werd eind september 2019 grotendeel weggespoeld. De nieuwe hoogte wordt geschat op 6,4-6,5 mTAW (pers. Comm. Sander Belmans, projectingenieur).

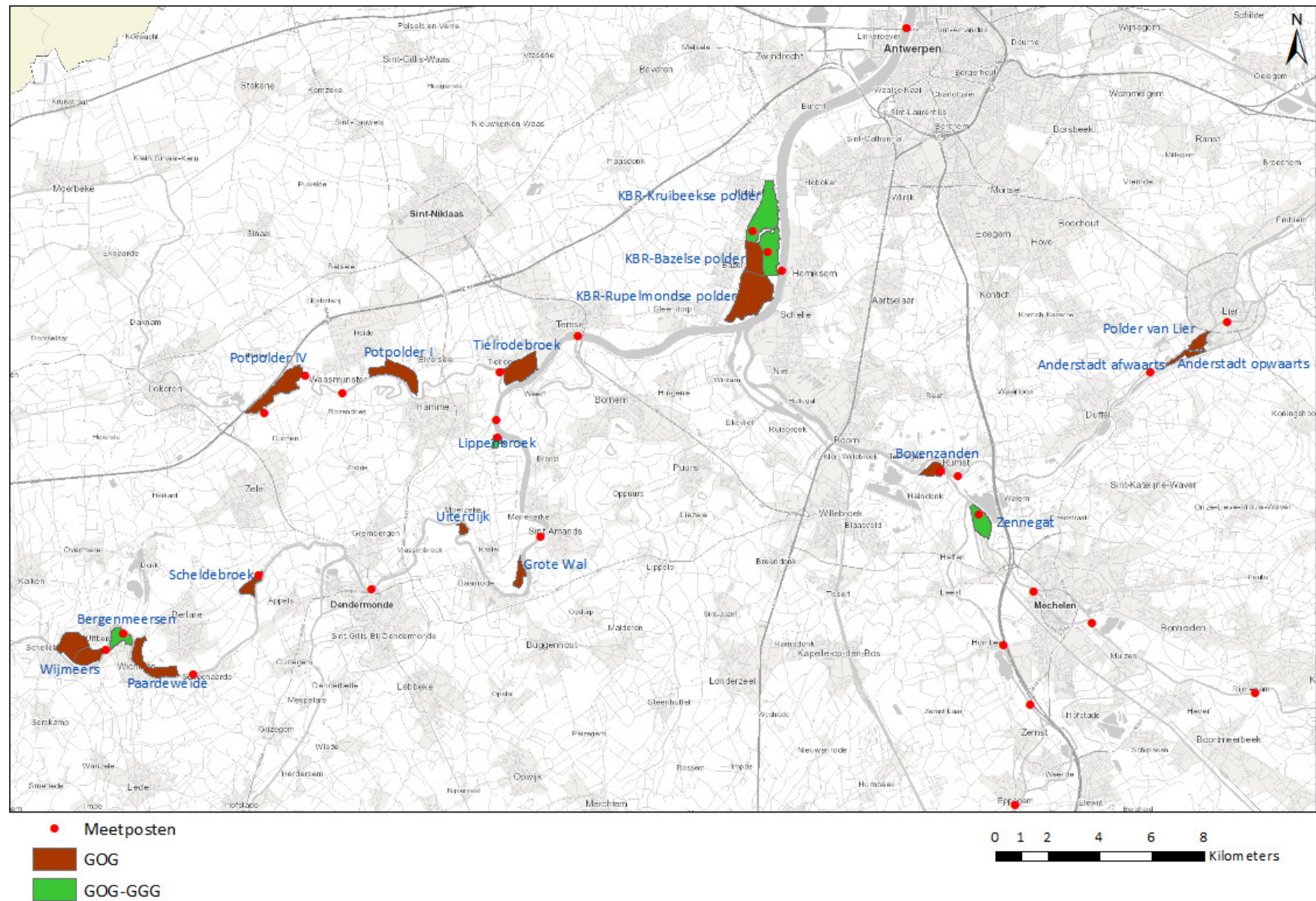
Figuur 1 - Situering Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren opgenomen in het hydrodynamisch model



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



Figuur 3 - Overzicht Gecontroleerde Overstromingsgebieden in het Zeescheldebekken



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 10.4.1 (ESRI, 2015).

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/SIGMA20201217_PA015
revisie 4663

2.5 Referentiemodel (versie 01)

Het 1D-model van de Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren werd geactualiseerd naar toestand 2019 door IMDC, in opdracht van de beheerder De Vlaamse Waterweg Afdeling Regio Centraal, en het Waterbouwkundig Laboratorium. In volgende paragrafen wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste aanpassingen in het model. Voor een uitgebreide beschrijving van de actualisatie wordt verwezen naar het rapport van IMDC (International Marine and Dredging Consultants & Waterbouwkundig Laboratorium, 2020).

2.5.1 Bathymetrie-topografie

Tabel 1 geeft een overzicht van de jaartallen van de oude en nieuwe bathymetrie in de hoofdwaterlopen in het geactualiseerde model. Enkel de waterlopen waarvan de bathymetrie en/of topografie werd aangepast, worden weergegeven.

Bij de actualisatie werd de schematisatie van de Westerschelde aangepast op basis van de bathymetrische en topografische opmetingen van 2018. Hierbij werden ook de dwarsdoorsneden op de riviertakken van de Westerschelde aangepast.

Ook voor de Zeeschelde zijn de dwarsdoorsneden geactualiseerd op basis van bathymetrische en topografische opmetingen van 2018.

Voor de Rupel waren er nieuwe bathymetrische opmetingen beschikbaar van 2016. Deze werden gebruikt om de dwarsdoorsneden van deze riviertak te actualiseren.

Langs de Dijle waren enkel nieuwe bathymetrische opmetingen beschikbaar van het meest afwaartse gedeelte, tussen Mechelen en de monding in de Rupel. Deze dateren van 2018 en werden gebruikt om de dwarsdoorsneden in het betreffende deel te actualiseren.

Ook langs de Nete waren er nieuwe bathymetrische opmetingen beschikbaar van het meest afwaartse gedeelte, tussen Lier en de monding in de Rupel. Deze dateren van 2018 en werden gebruikt om de dwarsdoorsneden in het betreffende deel te actualiseren. Voor de Grote Nete en de Kleine Nete waren er geen nieuwe opmetingen beschikbaar.

Langs de Zenne waren er nieuwe bathymetrische opmetingen beschikbaar van het meest afwaartse gedeelte, tussen Zemst en de monding in de Dijle. Deze daten van 2016 en werden gebruikt om de dwarsdoorsneden in het betreffende deel te actualiseren.

De bathymetrie van de Durme werd geactualiseerd in een eerder project met opmetingen gedaan in 2017-2018 (Coen *et al.*, 2018).

Tabel 1 – Overzicht jaartallen geactualiseerde bathymetrie hoofdwaterlopen in Zeescheldemodel

Waterloop	Oud	Nieuw
Westerschelde	2013	2018
Zeeschelde	2014	2018
Rupel	2014	2016
Dijle: Rupel-Mechelen	2010-2013	2018
Benedennete: Rupel-Lier	2010	2018
Zenne: Dijle-Zemst	2013	2016
Durme	2017-2018	2017-2018

2.5.2 Stuw in Merelbeke

Aan de opwaartse rand van de Ringvaart werd de structuur in Merelbeke toegevoegd aan het model. De verschillende takken en structuren werden uit het model van Leie-Bovenschelde en Gentse Kanalen gekopieerd (International Marine and Dredging Consultants, 2018). De regeling van de structuur wordt aangepast zodat deze alleen rekening houdt met de waterpeilen opwaarts en afwaarts. De gemiddelde dagdebieten worden dan opwaarts aan de structuur van Merelbeke opgelegd. Op deze manier zal de structuur in Merelbeke samen met het afwaarts waterpeil bepalen hoeveel debiet er naar de Ringvaart stroomt. Door deze aanpassingen worden de hogere en lagere debieten in Melle beter gesimuleerd.

2.5.3 Actualisatie vallei

De overstromingsgebieden in de vallei van de Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren werden geactualiseerd op basis van het DHM Vlaanderen 2.

2.5.4 Dijkhoogtes

Langs waterlopen waarvoor nieuwe bathymetrie beschikbaar was, werd de dijkhoogte gecontroleerd. De dijkhoogtes langs de waterlopen worden gemodelleerd met 'link channels'. Op basis van de markers 1 (linkeroever) en marker 3 (rechteroever) in de dwarsprofielen werden de dijkhoogtes gecontroleerd. Waar nodig werd de hoogte van het 'link channel' aangepast, rekening houdend met de hoogte van de oever op en afwaarts van het 'link channel'. Er werd tevens rekening gehouden met kaaimuren langs de Zeeschelde. Deze kaaimuren zijn smaller dan 1 m en zijn daarom niet zichtbaar in de opmetingen.

2.5.5 Dokken Antwerpen

De dokken in de regio van de Haven van Antwerpen die nog niet in het model opgenomen waren, werden toegevoegd.

Volgende riviertakken werden toegevoegd: Waaslandkanaal, Vrasenedok, Verrebroekdok, Noordelijke insteeddok, Zuidelijke insteeddok, Kallosluis_Zeeschelde

Deze dokken staan in verbinding met de Zeeschelde via twee sluisen: Kieldrechtsluis en Kallosluis.

De dwarsprofielen werden gedefinieerd als rechthoekige typesecties. De hoogtes en breedtes van de dokken en de hoogtes van de sluisen werden bepaald op basis van DHM Vlaanderen 2.

2.5.6 Actualisatie vallei van de Demer

De Demer wordt gemodelleerd in zowel het Zeescheldemodel als in het Demermodel. Het Zeescheldemodel bevat enkel het gedeelte van de Demer afwaarts Aarschot. De dijken en de vallei van het model van de Demer werden in 2014 geactualiseerd (Bogman *et al.*, 2014). Deze actualisatie werd overgenomen in het Zeescheldemodel.

2.5.7 Optimalisatie Dijlegebied

In het valleigebied van de Dijle werd het aantal dwarsdoorsneden op de zijwaterlopen verminderd van één om de 25 m naar circa één om de 100 m. Dit is gebeurd voor volgende waterlopen: Winge, Barebeek, Leibeeek, Weesbeek, Molenbeek, Grotelaakbeek, Tangebeek en Binnenbeek.

2.5.8 Wind langs de Westerschelde

Uit een gevoeligheidsanalyse van verschillende factoren die te maken hebben met de wind in het Zeescheldemodel werden volgende besluiten getrokken:

- De correctiefactor voor het omzetten van de potentiële wind in Vlissingen over land, naar potentiële wind over water wordt behouden op 1,58.
- De topografische factor voor de wind wordt verhoogd naar 1,0 van Vlissingen tot en met Bath.
- Een aggregatie van de wind over 3 of 6 uur werd niet weerhouden. Er kan gewerkt worden met de uurlijkse gegevens van de wind.

Een beschrijving van de implementatie van de wind in het MIKE11-model wordt gegeven in BIJLAGE C.

2.5.9 Kalibratie

Het model werd gekalibreerd op basis van twee droge periodes (juni-juli 2017 en 2018). Hierbij werd de ruwheid van de rivierbedding in de verschillende riviertakken gewijzigd.

In een tweede stap werd het model verder gekalibreerd op basis van geselecteerde stormen. Voor deze periodes heeft de wind invloed op de waterpeilen. De uurlijkse potentiële windover water in Vlissingen werd gebruikt als randvoorwaarde. De kalibratie gebeurde door de wijziging van de topografische factor, zoals afgeleid in de gevoeligheidsanalyse (zie §2.5.8).

De resultaten van de kalibratie worden uitgebreid besproken in het rapport van IMDC (International Marine and Dredging Consultants & Waterbouwkundig Laboratorium, 2020).

Tabel 2 geeft de tabel met de globale statistieken weer voor de Westerschelde en Zeeschelde. *Na de kalibratie zijn de statistieken terug in de buurt van het oorspronkelijk model maar niet overal verbeterd. Voornamelijk de storm van jan18 zorgt voor slechtere statistieken. Het hoogwater bij de piek wordt correct gesimuleerd maar de laagwaters voor en na de piek zijn te hoog. Voor de storm van jan16 zijn zowel de hoogwaters als de laagwaters beter. In het algemeen zijn de waterpeilen van de hoogwaters en laagwaters enkele centimeters gestegen afwaarts Hemiksem. De resultaten aan de opwaartse rand zijn verbeterd door*

de aanpassing van de structuur te Merelbeke. De statistieken voor de stations te Wetteren, Melle, Merelbeke en Destelbergen zijn verbeterd (International Marine and Dredging Consultants & Waterbouwkundig Laboratorium, 2020).

Tabel 2 – Gemiddelde globale statistiek per station voor de zes events en de droge periode voor het startmodel (A0) en het geactualiseerde model (A2) (International Marine and Dredging Consultants & Waterbouwkundig Laboratorium, 2020)

	A0	A2
Westerschelde	0.65	0.71
Vlissingen_Westerschelde_Htij	0.1	0.1
Borssele_Westerschelde_Htij	0.76	0.8
Terneuzen_Westerschelde_Htij	0.6	0.53
Hansweert_Westerschelde_Htij	0.81	1.1
Baalhoek_Westerschelde_Htij	1.01	1.03
Bath_Westerschelde_Htij	0.63	0.71
Zeeschelde	1.38	1.37
Prosperpolder tij_Zeeschelde_Htij	0.68	0.91
Liefkenshoek tij_Zeeschelde_Htij	0.75	0.88
Kallosluis tij_Zeeschelde_Htij	0.83	0.98
Antwerpen tij_Zeeschelde_Htij	0.98	0.98
Kruibeke GOG-GGG Grote Uitlaat_Zeescheld_H	2.42	1.83
Bazel_Barbierbeek_Q	0.14	0.13
Hemiksem tij_Zeeschelde_Htij	0.75	0.86
Temse tij_Zeeschelde_Htij	0.86	0.92
Sint-Amands tij_Zeeschelde_Htij	0.87	0.89
Dendermonde tij_Zeeschelde_Htij	0.87	0.99
Schoonaarde tij_Zeeschelde_Htij	1.04	1.14
Wetteren tij_Zeeschelde_Htij	1.37	1.37
Melle tij_Htij	1.86	1.81
Melle_Zeeschelde-H_H	1.97	1.86
Melle_Zeeschelde-Q_Q	2.92	2.78
Merelbeke EMT_Bovenschelde - AF_H	1.96	1.92
Destelbergen_Zeeschelde_H	2.45	2.18
Gentbrugge tij_Zeeschelde_Htij	2.2	2.28

2.6 Modelaanpassingen

Onderstaande paragrafen beschrijven de aanpassingen die nog in het referentiemodel aangebracht werden op basis van extra informatie van de beheerder.

2.6.1 Kaaien Antwerpen

Ter hoogte van de wijken Sint-Andries, Zuid en het Droogdokkenpark werd de vernieuwing van de kaaimuren langs de Schelde gefinaliseerd. In het model van de Zeeschelde werden enkele profielen ter hoogte van deze zones aangepast. Tevens werd het drempelpeil van de 'link channels' die de kaaien voorstellen, aangepast. De hoogte varieert tussen 9,25 en 9,30 mTAW.

2.6.2 Burchtse Weel

Recent werd de in- en uitwateringsstructuur van de Burchtse Weel aangepast. In de 2^{de} en 3^{de} week van december 2019 werden kleppen en schotten geplaatst op de uitwateringsconstructie langs de Scheldekant. De drempelhoogte en afmetingen hiervan werden aangeleverd door de beheerder en geïmplementeerd in het model.

2.6.3 Groot Schoor

De zomerdijk of overloopdijk van het GOG Grote Wal werd eind september 2019 grotendeel weggespoeld. De nieuwe hoogte wordt geschat op 6,4-6,5 mTAW (pers. Comm. Sander Belmans, projectingenieur). Het drempelpeil van de 'link channels' die deze overloopdijk voorstellen, werd verlaagd tot 6,5 mTAW.

2.6.4 Pomp Lokeren

Wanneer de Moervaart een waterpeil bereikt van TAW +5,0 m treedt het pompgemaal 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 TAW +4,95 m en een afslagpeil op TAW +4,9 m. 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.

2.7 Randvoorwaarden

Voor het doorrekenen van de stormen en wasperiode van februari en maart 2020 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. Enkel de verwijzingen naar de bestanden met de tijdreeksen dienen aangepast te worden.

2.7.1 Afwaartse rand

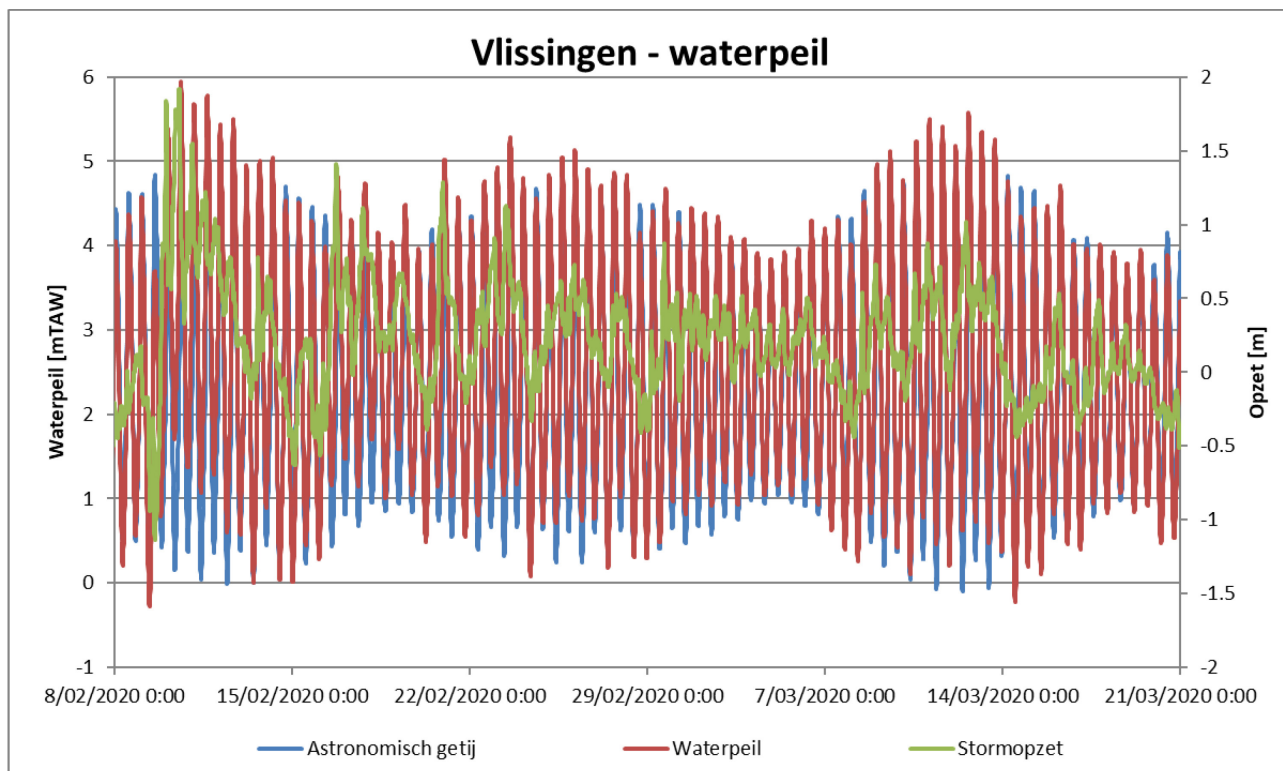
Waterpeilen

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 ongeveer 1,9 m bedroeg. Tijdens het hoogste hoogwater in maart bedroeg de stormopzet circa 1 m.

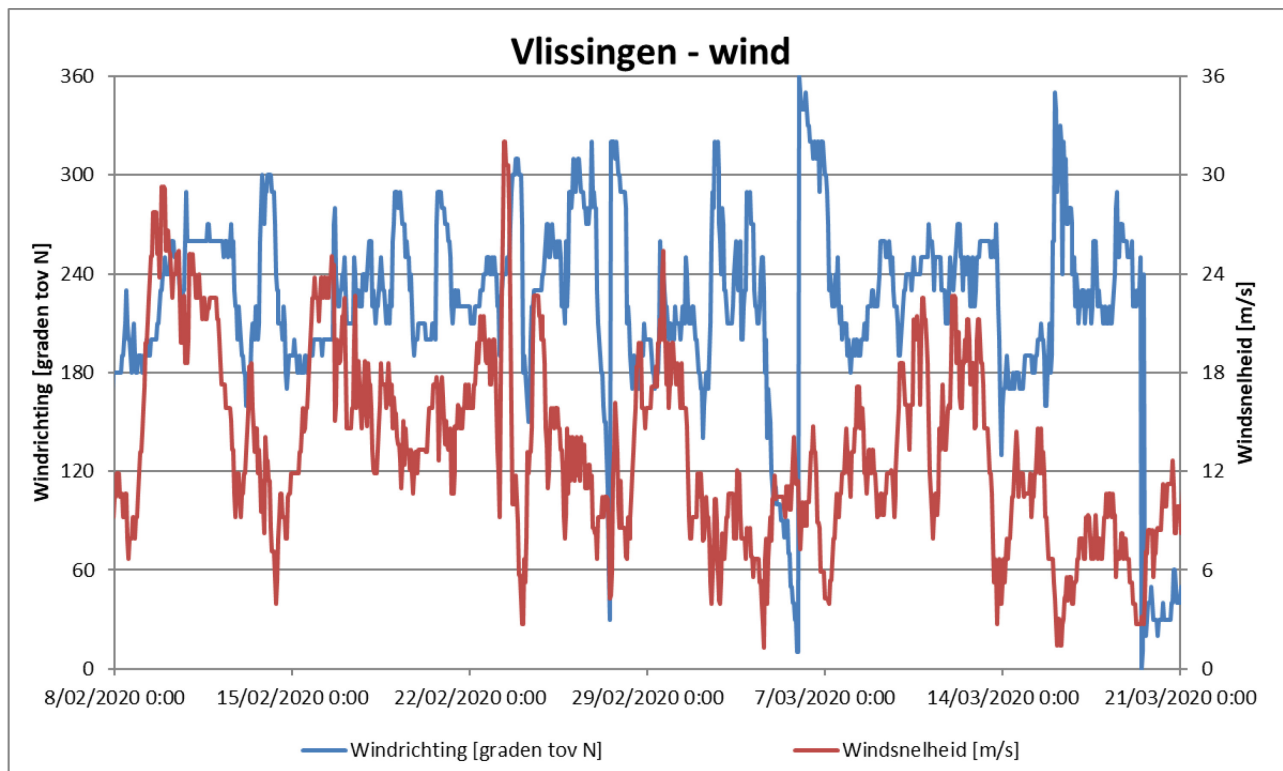
Wind

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 opgezet 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 C.

Figuur 4 – Verloop waterpeil te Vlissingen



Figuur 5 – Verloop gemiddelde potentiële windsnelheid en windrichting te Vlissingen



2.7.2 Opwaartse randen

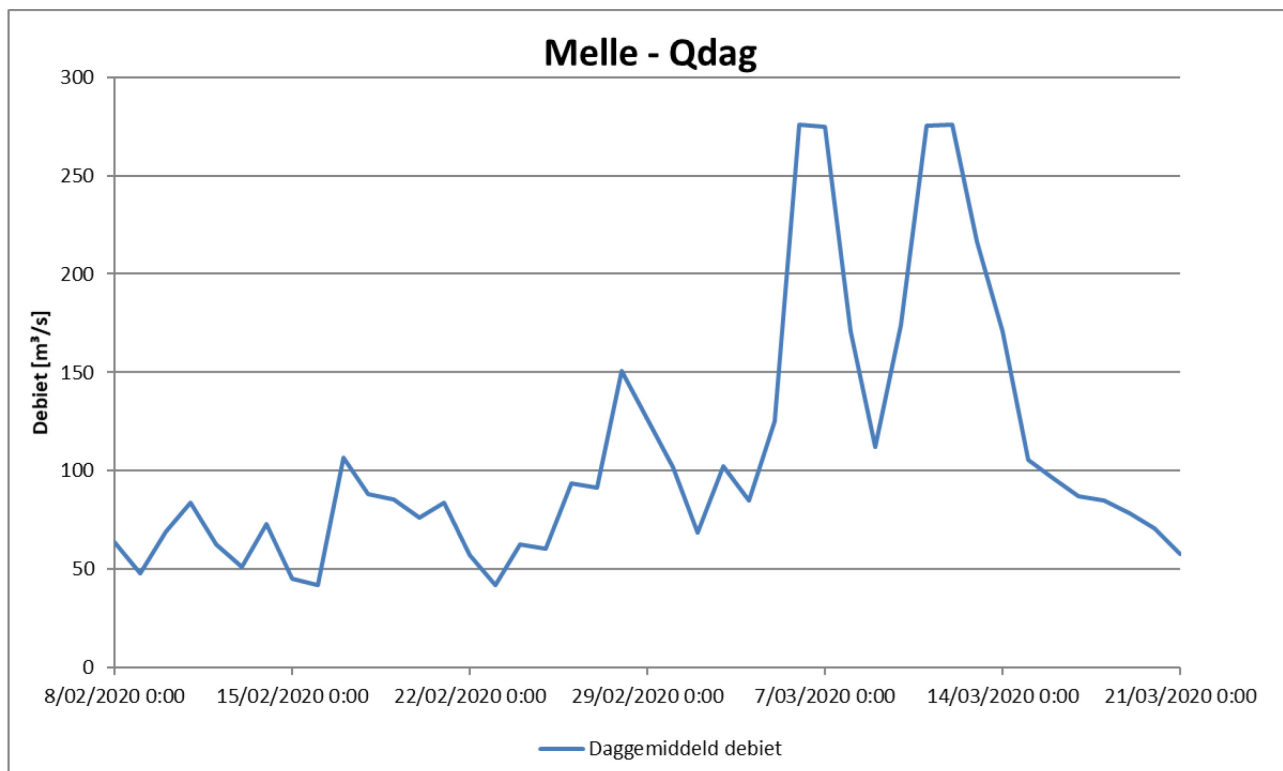
Beschikbare data

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 2020. Tabel 3 geeft een overzicht van de beschikbare debietreeksen. Figuur 6 toont het verloop van het daggemiddeld debiet te Melle. In de periode van 5 tot 15 maart 2020 bedroeg het daggemiddeld debiet meer dan 100 m³/s.

Tabel 3 – 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 bekken

Aan de opwaartse randen van de bemeten bekken wordt een gemeten debietreeks opgelegd. In Tabel 4 wordt een overzicht gegeven van de opwaartse randen waarvoor een gemeten debietreeks beschikbaar is.

Tabel 4 - 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 m³/s opgelegd, als zijnde afkomstig van de RWZI Lokeren. Bijkomend wordt een geschat debiet opgelegd afkomstig van het vizzelgemaal te Lokeren (zie §2.8.4).

** 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 m³/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 bekken. De herschaling wordt uitgevoerd op basis van de relatieve oppervlakte van de betrokken deelbekkens.

Tabel 5 – Herschaalde debietreeksen opgelegd aan 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 6 geeft een overzicht van de onbemeten (deel)bekkens die opgenomen zijn in het model en de meetpost waarvan de debietreeks herschaald werd.

Tabel 6 - 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
Grote Laakbeek (Dijle)	V08GLA000450	122
Leibeek (Dijle)	V08LEI000420	110 / 093*

Onbemeten (deel)bekken	ID deelbekken	Meetpost herschaalde debietreeks
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 nabije meetpost.

2.8 Simulatieperiode

Het prewaakpeil te Antwerpen werd voor de eerste maal overschreden bij het hoogwater van 10 februari 2020 rond 3u50. Tijdens de volgende drie hoogwaters werd de drempel voor Stormtij Zeescheldebekken overschreden. Ook tijdens het hoogwater van 12 maart rond 17u15 werd de drempel voor Stormtij Zeescheldebekken overschreden. Op 11 maart viel nog een betekenisvolle hoeveelheid neerslag. In de bovenstroomse gebieden die afwateren naar de Schelde viel in totaal 45-55 mm neerslag.

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

08/02/2020 7:30 – 20/03/2020 14:30

De periode loopt van laagwater tot laagwater en omvat 80 getijcycli.

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

- Storm februari 2020: 09/02/2020 7:30 – 18/02/2020
- Storm maart 2020: 05/03/2020 00:00 – 19/03/2020

2.8.1 Stuw Mechelen

De stuw op de Dijleafleiding te Mechelen werd opgetrokken van 10 februari 2020 tot 20 maart 2020. 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 de storm van februari 2020 werden de inwateringssluizen van de GGG's langs de Zeeschelde gesloten. Het sluiten van de inwateringssluizen gebeurde voor alle gebieden rond hetzelfde tijdstip, tijdens het laagwater van 10 februari 2020 voor de storm. De inwateringssluizen van Lippenbroek en Bergenmeersen werden op 12 februari 2020 geopend. Deze van KBR en Zennegat op 14 februari 2020.

Om het sluiten en openen van de kokers net voor en na de storm te simuleren is de simulatie in vier delen opgesplitst:

1. 08/02/2020 7:30 – 09/02/2020 10u: alle GGG-inwateringssluizen open
2. 09/02/2020 10u – 12/02/2020 10u30: GGG-inwateringssluizen gesloten
3. 12/02/2020 10u30 – 14/02/2020 12u: GGG-inwateringssluizen Lippenbroek en Bergenmeersen geopend
4. 14/02/2020 12u - 20/03/2020 14:30: alle GGG-inwateringssluizen open

2.9 Versie 02: aanpassing topofactor wind

Zoals beschreven in §2.5.8 werden de topofactoren voor de wind langs de Westerschelde aangepast. Dit gebeurde echter slechts op basis van de resultaten van één simulatie. Om deze aanpassing te valideren, zal het model ook doorgerekend worden met topofactoren uit de vorige versie van het model van de Zeeschelde. Hierbij is de topofactor op bijna alle riviertakken van de Westerschelde gelijk aan 0,6.

2.10 Scenario 01: GGG-inwateringssluizen niet gesloten

Op vraag van de beheerder wordt één scenario doorgerekend waarbij de GGG-inwateringssluizen niet gesloten worden tijdens de storm van februari 2020. De resultaten van deze berekening worden besproken in hoofdstuk 4.

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 7 geeft een overzicht van de beschikbare meetreeksen van waterpeilen voor de validatie.

Tabel 7 – 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
	Waasmunster brug	dur04a	Waterinfo, HIC
	Waasmunster manta	dur05a	Waterinfo, HIC
	Zelee	dur07a	Waterinfo, HIC
Benedennete	Rumst	bnt01c	Waterinfo, HIC
	Duffel	bnt03	Waterinfo, HIC

Waterloop	Locatie	Nr meetpost	Bron
	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
	Eppegem	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 8 geeft een overzicht van de waterpeilmeters in de GOG's.

Tabel 8 – Overzicht waterpeilmeters in GOG's

Waterloop	GOG/Naam meetlocatie	Locatie	Bron
Zeeschelde	Kruikeke Grote Uitlaat (zes25a)	ter hoogte van de grote uitlaat naar de Zeeschelde	WL
	Bazel Kleine Uitwatering (zes25j)	ter hoogte van de kleine uitlaat naar de Zeeschelde, meest afwaartse	WL
	Bazel Grote Uitwatering (zes25l)	ter hoogte van de grote uitlaat naar de Zeeschelde, meest opwaartse	WL
	Lippenbroek (zes040b)	centrale gracht	WL
	Scheldebroek1 (zes48f)	ter hoogte van afwaartse uitwateringsconstructie	WL
	Bergenmeersen ggg 1 (zes51n)	ter hoogte van gecombineerde in- en uitwateringsconstructie, GGG-zijde	WL
Rupel	Bovenzanden (rup02l)	ter hoogte van uitwateringsconstructie	WL
Dijle	Zennegat (dij05a)	nabij gecombineerde in- en uitwateringsconstructie	WL

3.2 Methode validatie

3.2.1 Maximum waterpeil waterlopen

Voor de validatie van de gesimuleerde waterpeilen in de waterlopen zullen eerst lengteprofielen met de maximum waterpeilen tijdens de twee deelperioden van de simulatie opgemaakt worden. Op deze lengteprofielen worden ook de gemeten maximum waterpeilen ter hoogte van de meetposten getoond. De gemeten en gesimuleerde waarden van de maximum waterpeilen 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 A.

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 enkel 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:

- REF01: met topofactor 1.0
- REF02: met topofactor 0.6

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 9 en Figuur 10 tonen reeds een verschil in maximum waterpeil tussen de gemodelleerde waterpeilen met verschillende topofactoren voor de wind. Een topofactor van 1.0 zorgt over bijna het volledige lengteprofiel voor beide stormen voor een hoger maximum waterpeil. Het verschil is steeds kleiner dan 15 cm.

Westerschelde

Figuur A 1 tot en met Figuur A 4 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Westerschelde. Figuur B 1 en Figuur B 2 tonen respectievelijk de bias en RMSE voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeksen voor de meetposten langs de Westerschelde.

Ter hoogte van Terneuzen is het verschil in bias en RMSE voor de berekeningen met verschillende topofactoren het kleinst. Ter hoogte van Hansweert en Bath zijn zowel de bias als RMSE voor de simulatie met een topofactor van 1.0 groter, met uitzondering voor de periode van storm maart2020 te Bath. Wanneer de volledige simulatieperiode beschouwd wordt, is de waarde van de bias voor de meetposten langs de Westerschelde steeds kleiner dan 10 cm, en deze van de RMSE steeds kleiner dan 15 cm voor REF01 en kleiner dan 10 cm voor REF02.

Zeeschelde

Figuur A 5 tot en met Figuur A 9 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Beneden-Zeeschelde. Figuur A 10 tot en met Figuur A 17 tonen deze voor de meetposten langs de Boven-Zeeschelde. Voor de meetposten langs de Beneden-Zeeschelde, en de Boven-Zeeschelde tot Driegoten vallen de te hoge waterpeilen tijdens de stormperiodes op.

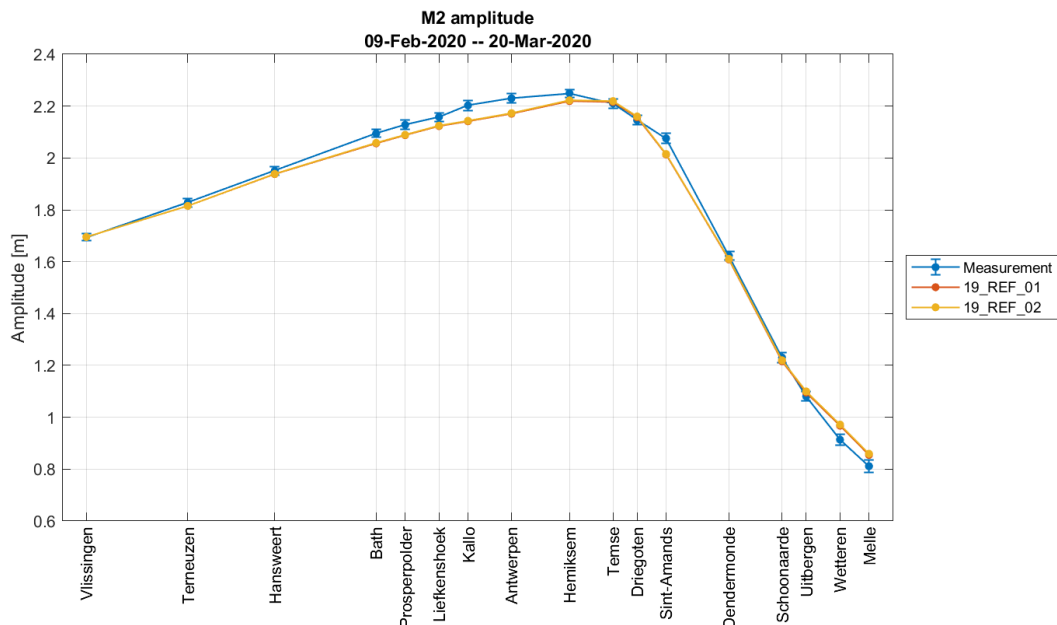
Figuur B 3 tot en met Figuur B 6 tonen de bias- en RMSE-waarden voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeksen voor de meetposten langs de Beneden- en Boven-Zeeschelde.

Langs de Beneden-Zeeschelde zijn de waarden van de RMSE en bias van REF01 bijna steeds groter dan deze voor REF02. Voor Antwerpen is de bias-waarde voor de hoogwaters en de volledige tijdreeks voor de storm van maart2020 kleiner voor REF01 ten opzichte van REF02. De absolute waarde van de bias voor REF02 is voor de hoog- en laagwaters voor alle meetposten langs de Beneden-Zeeschelde steeds kleiner of gelijk aan 7 cm, en voor de volledige tijdreeks zelfs kleiner of gelijk aan 3 cm. De RMSE-waarde voor REF02 voor de volledige tijdreeks voor de meetposten langs de Beneden-Zeeschelde is, met uitzondering van Antwerpen en Temse steeds 5 cm of meer kleiner dan deze voor REF01. Langs de Beneden-Zeeschelde over de hele simulatieperiode variëren de waarden van de RMSE voor de hoogwaters tussen 11 en 14 cm voor REF01 en tussen 6 en 8 cm voor REF02; voor de laagwaters tussen 14 en 18 cm voor REF01 en 7 en 10 cm voor REF02; en voor de volledige tijdreeks tussen 16 en 20 cm voor REF01 en tussen 10 en 15 cm voor REF02.

Langs de Boven-Zeeschelde opwaarts van Temse is de absolute waarde van de bias van REF02 groter dan deze van REF01. Ter hoogte van Uitbergen, Wetteren en Melle is de waarde van de RMSE voor de volledige tijdreeks groter van REF02 dan deze van REF01. Voornamelijk bij de bias van de laagwaters is er een groot verschil tussen de stormen van feb2020 en maart2020. Voor de storm van feb2020 is de absolute waarde van bias enkel voor de meetposten te Uitbergen, Wetteren en Melle voor REF02 groter dan deze voor REF01. Voor de storm van maart2020 is dit zo voor alle meetposten langs de Boven-Zeeschelde. Dit kan verklaard worden door de hogere bovenafvoer tijdens de stormperiode van maart2020. Langs de Boven-Zeeschelde over de hele simulatieperiode variëren de waarden van de RMSE voor de hoogwaters tussen 8 en 15 cm voor REF01 en tussen 7 en 11 cm voor REF02; voor de laagwaters tussen 13 en 31 cm voor REF01 en 9 en 35 cm voor REF02; en voor de volledige tijdreeks tussen 15 en 23 cm voor REF01 en tussen 11 en 24 cm voor REF02.

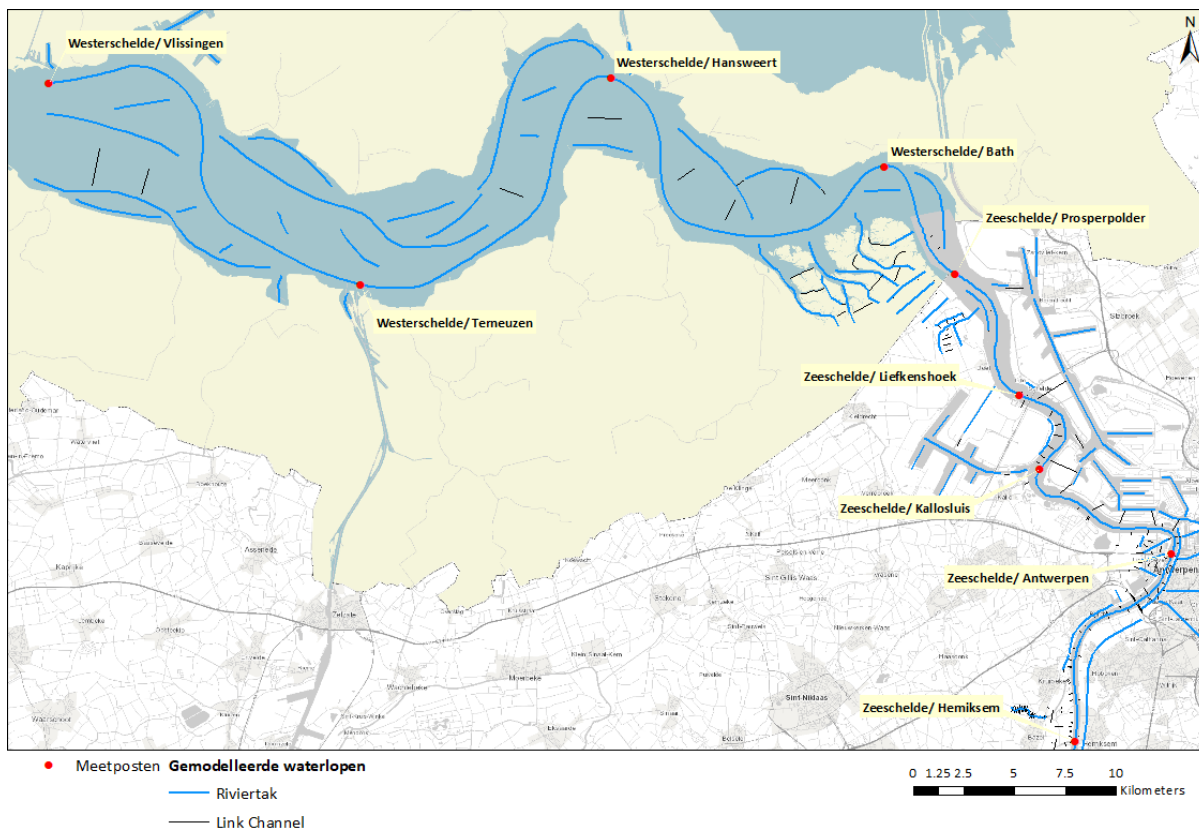
M2

Figuur 11 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengtes van de Westerschelde en de Zeeschelde voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm feb2020 en de periode van storm maart2020. Het verschil in M2-amplitude tussen REF01 en REF02 is klein. Tussen Hansweert en Uitbergen is de gesimuleerde M2-amplitude steeds kleiner dan de gemeten M2-amplitude. Het verschil bedraagt echter maximaal 6 cm.

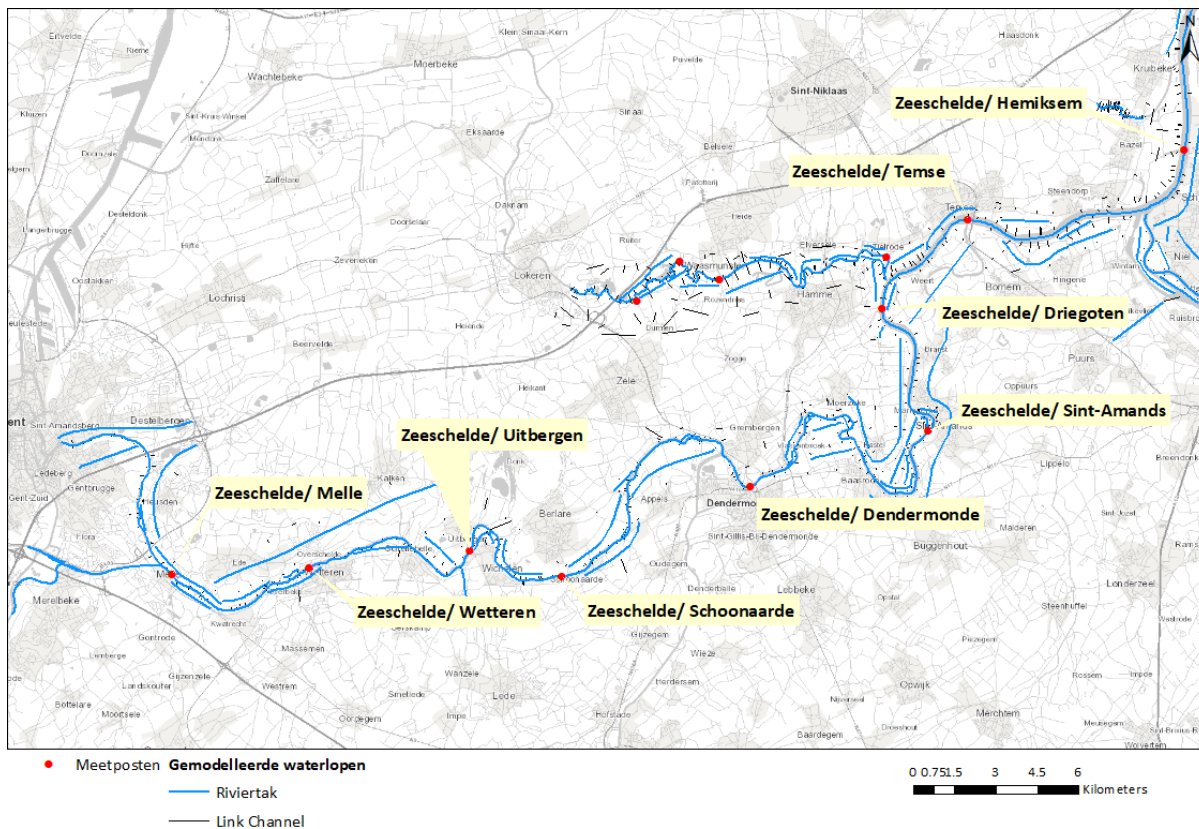


VIM version trunk
(c) Waterbouwkundig Laboratorium 2020

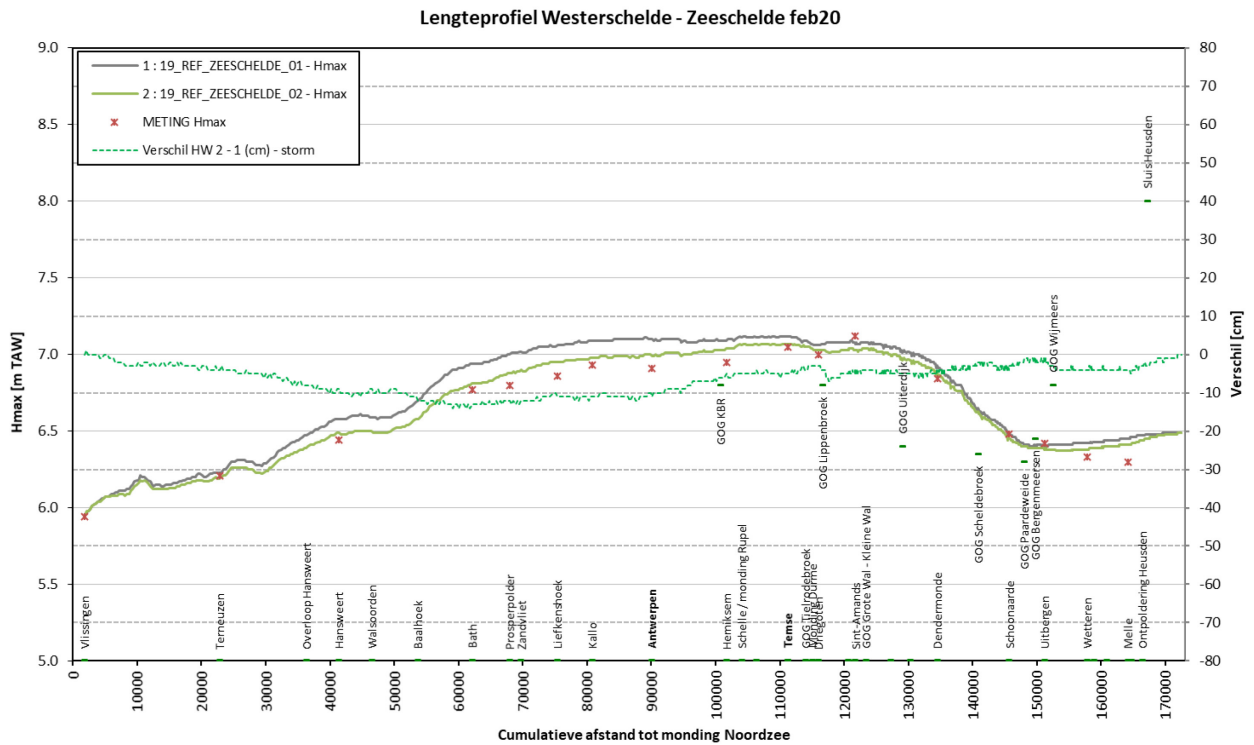
Figuur 7 – Situering meetposten Westerschelde en Beneden-Zeeschelde



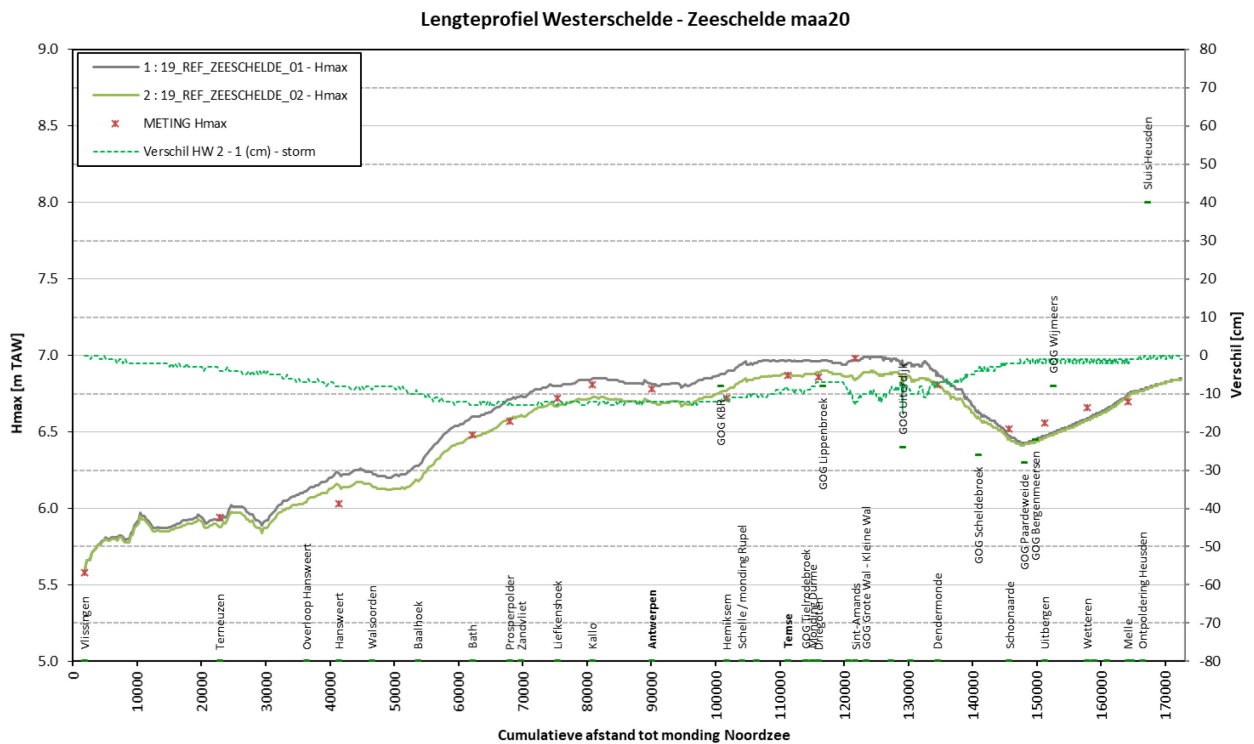
Figuur 8 – Situering meetposten Boven-Zeeschelde



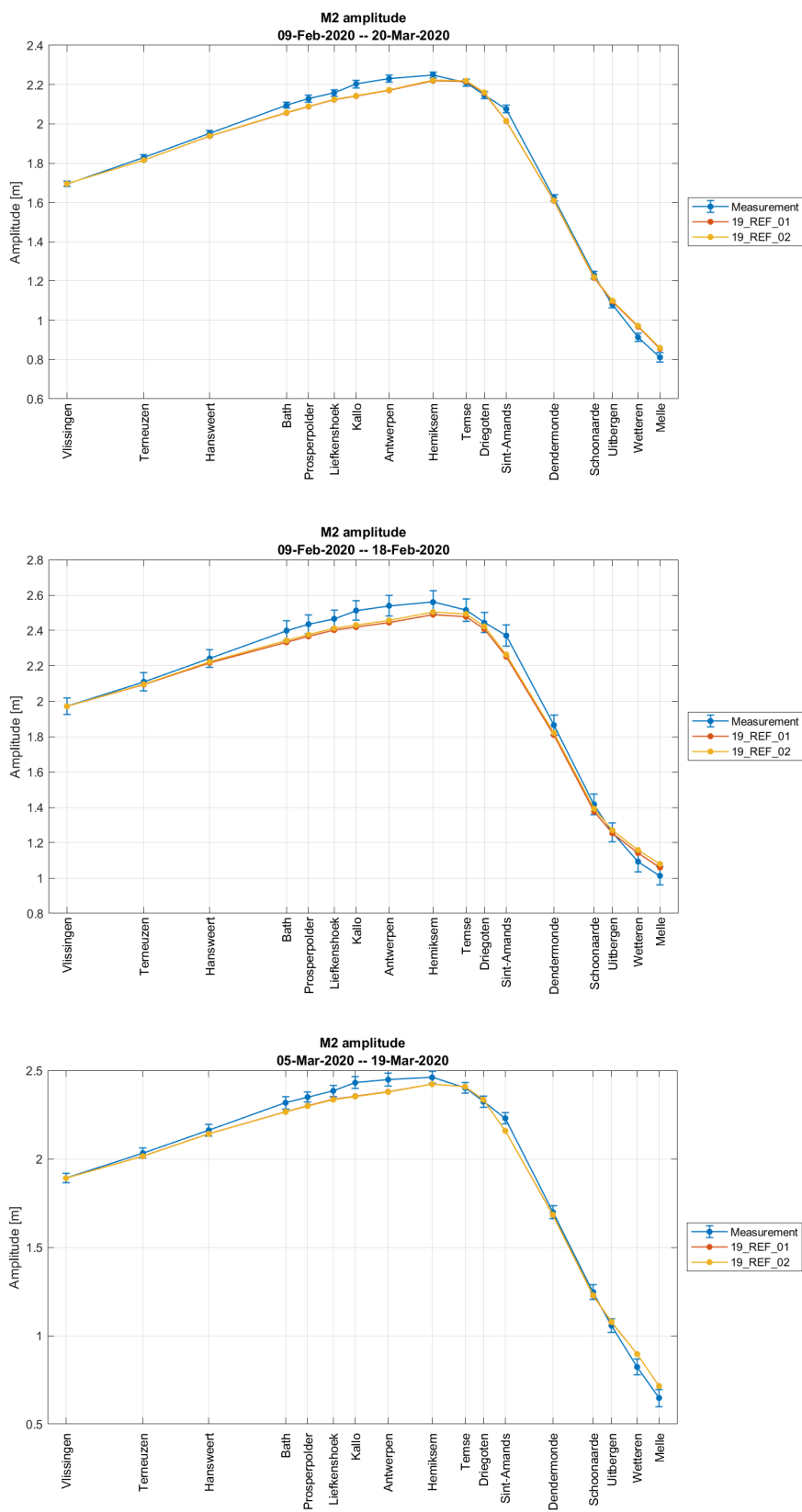
Figuur 9 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde bij storm feb2020



Figuur 10 – Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde bij storm maart2020



Figuur 11 – M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Westerschelde en Zeeschelde



VIMM version trunk
 (c) Waterbouwkundig Laboratorium 2020

3.3.2 Waterpeilen Durme

Figuur 12 geeft een overzicht van de meetposten langs de Durme.

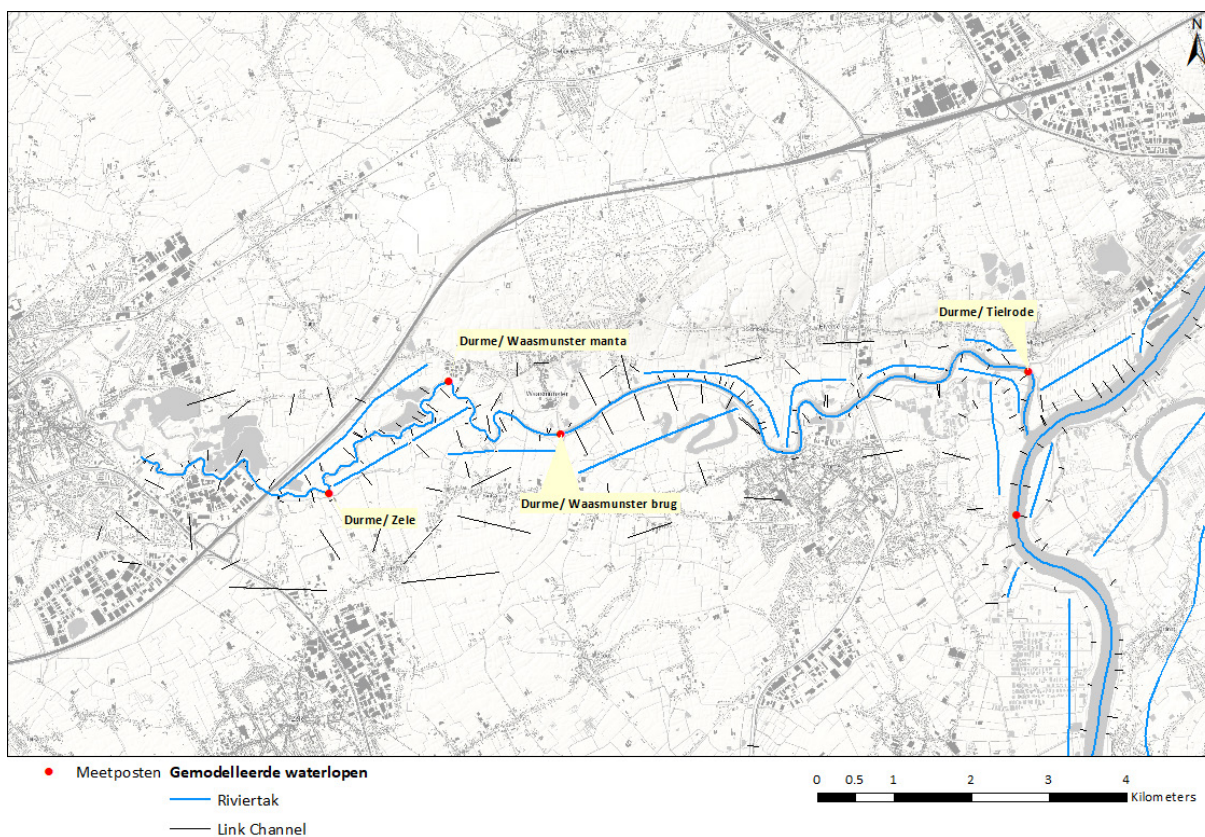
De lengteprofielen Figuur 13 en Figuur 14 tonen een beperkt verschil tussen de maximum waterpeilen voor REF01 en REF02. De topofactor voor de wind heeft, zoals te verwachten, nog weinig effect op de maximum waterpeilen langs de Durme.

Figuur A 18 tot en met Figuur A 21 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Durme. Ter hoogte van Waasmunster brug zijn de gesimuleerde laagwaters steeds lager dan de gemeten waarden. Ter hoogte van Waasmunster manta en Zele worden de lage laagwaters overschat in de simulaties en de hoge laagwaters onderschat. In de periode van begin maart2020 lijkt de afvoer op de Durme onderschat, met een onderschatting van de waterpeilen tot gevolg.

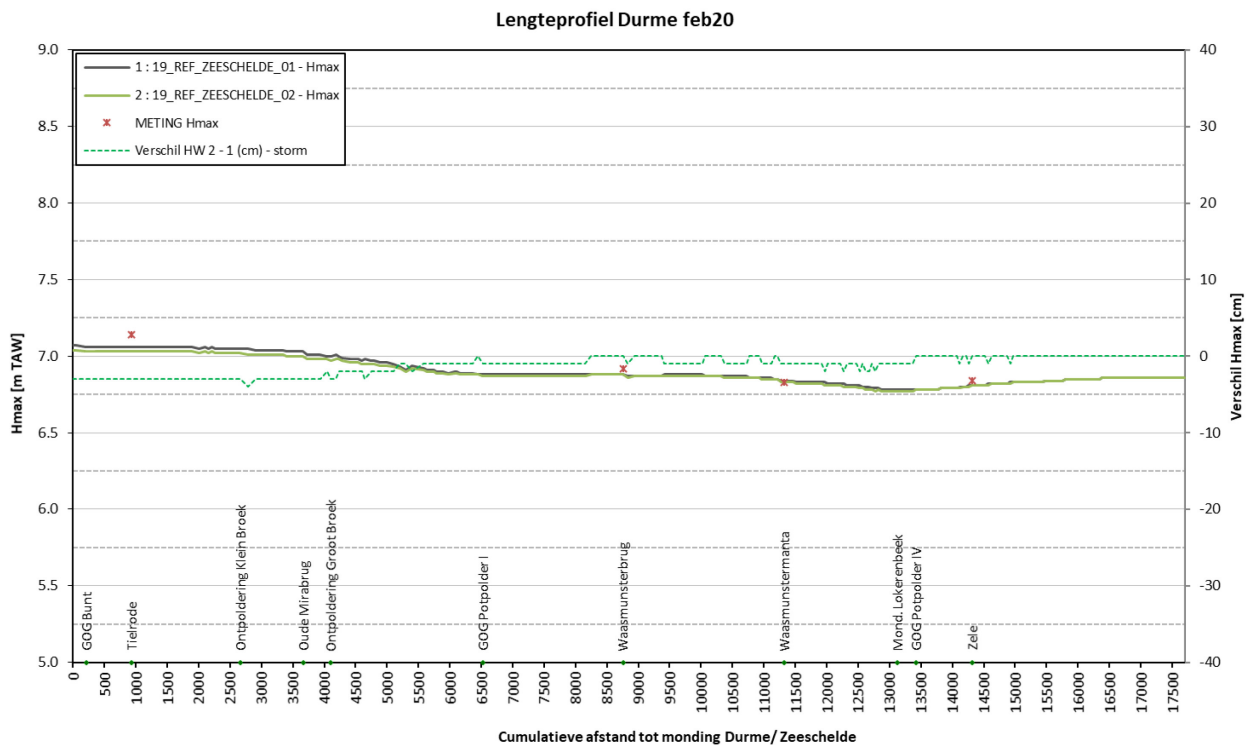
Figuur B 7 en Figuur B 8 tonen de bias- en RMSE-waarden voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeksen voor de meetposten langs de Durme. Voor de hoogwaters is de RMSE-waarde voor REF01 steeds groter dan deze voor REF02. Langs de Durme over de hele simulatieperiode variëren de waarden van de RMSE voor de hoogwaters tussen 10 en 26 cm voor REF01 en tussen 6 en 18 cm voor REF02; voor de laagwaters tussen 12 en 26 cm voor REF01 en 12 en 25 cm voor REF02; en voor de volledige tijdreeks tussen 14 en 23 cm voor REF01 en tussen 12 en 23 cm voor REF02.

Figuur 15 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Durme voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm feb2020 en de periode van storm maart2020. Het verschil in M2-amplitude tussen REF01 en REF02 is klein. Ter hoogte van Waasmunster brug wordt de gemeten getijamplitude overschat door de gemodelleerde waarde. Ter hoogte van Waasmunster manta is dit net omgekeerd. Bij de storm van feb2020 zijn de verschillen ten opzichte van de gemeten waarden groter dan bij de storm van maart2020.

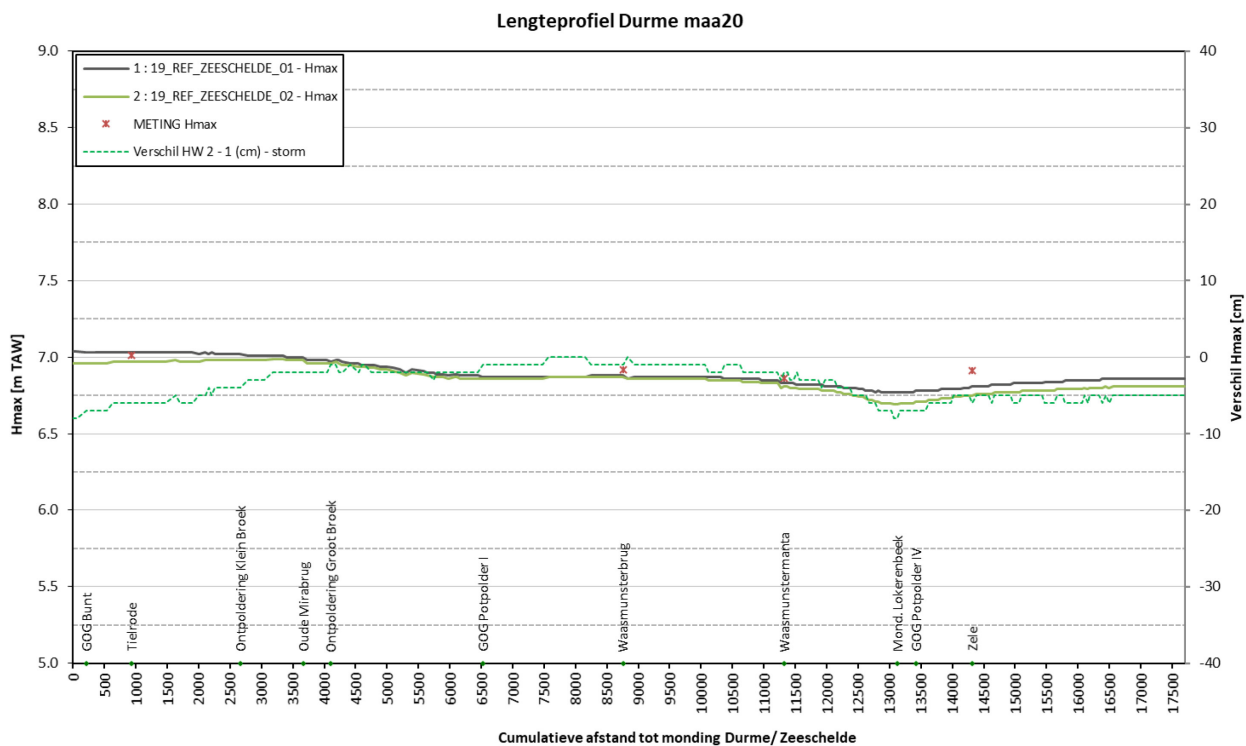
Figuur 12 – Situering meetposten Durme



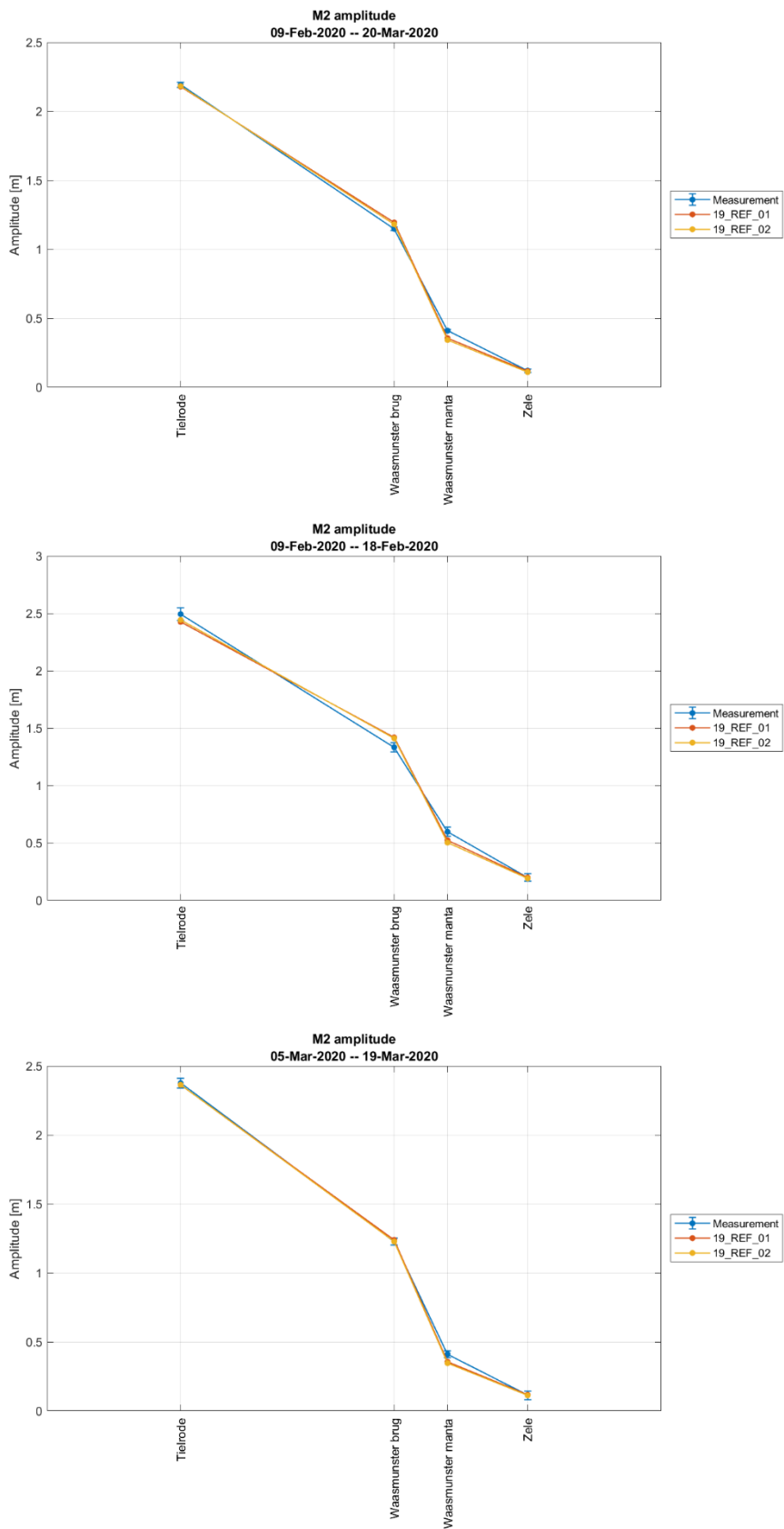
Figuur 13 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme bij storm feb2020



Figuur 14 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Durme bij storm maart2020



Figuur 15 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Durme



VIM version trunk
 (c) Waterbouwkundig Laboratorium 2020

3.3.3 Waterpeilen Dijle, Benedennete en Zenne

Figuur 16 geeft een overzicht van de meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne.

Figuur B 9 en Figuur B 10 tonen de bias- en RMSE-waarden voor de hoogwaters, laagwaters en volledige tijdreeksen voor de meetposten langs de Dijle, Benedennete en Zenne.

De lengteprofielen in Figuur 17 en Figuur 18 tonen een verschillende afwijking langs de Dijle bij de stormen van feb2020 en maart2020. Figuur A 22 tot en met Figuur A 24 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Dijle. Tijdens de storm van feb2020 worden in REF01 de hoogwaters sterk overschat. Dit heeft te maken met de GOG-vulling van GOG Zennegat in deze simulatie. Het gemodelleerde waterpeil in het GOG stijgt tot gelijke hoogte met het waterpeil in de Dijle, waardoor geen bergingscapaciteit meer beschikbaar is. Dit leidt tot een hoger hoogwater in de rivier. Bij REF02 wordt dit GOG niet volledig gevuld, al is het gemodelleerde waterpeil in de rivier nog steeds te hoog. Tijdens de storm van maart2020 wordt het GOG zowel in REF01 als in REF02 niet volledig gevuld (zie §3.4.7). Ter hoogte van de meetpost te Rijmenam worden voornamelijk de laagwaters onderschat. Tijdens de periode met verhoogde bovenafvoer worden ook de hoogwaters onderschat.

Langs de Dijle over de hele simulatieperiode variëren de waarden van de RMSE voor de hoogwaters tussen 7 en 13 cm voor REF01 en tussen 6 en 11 cm voor REF02; voor de laagwaters tussen 11 en 18 cm voor REF01 en 9 en 18 cm voor REF02; en voor de volledige tijdreeks tussen 12 en 24 cm voor REF01 en tussen 11 en 23 cm voor REF02.

Figuur 19 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Dijle voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm feb2020 en de periode van storm maart2020. Het verschil in M2-amplitude tussen REF01 en REF02 is klein. Ter hoogte van Mechelen benedensluis is de gesimuleerde getijamplitude bijna 20 cm te groot. Ter hoogte van Mechelen opwaarts stuw is de gesimuleerde getijamplitude echter bijna 20 cm te klein. Dit kan mogelijk te wijten zijn aan de opgelegde stuwstanden aan de stuw te Mechelen, waardoor de gesimuleerde laagwaters onvoldoende kunnen dalen.

De lengteprofielen in Figuur 20 en Figuur 21 tonen een verschil van minder dan 10 cm tussen de maximum waterpeilen van REF01 en REF02 langs de Benedennete. Figuur A 25 tot en met Figuur A 27 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Benedennete. Ter hoogte van de meetposten te Rumst en Duffel-sluis worden de gemeten hoogwaters weerom overschat, waarbij de gesimuleerde hoogwaters in REF02 lager zijn dan deze in REF01. Ook ter hoogte van Lier Molbrug is dit nog zichtbaar. Hier valt echter ook de overschatting van de laagwaters op.

Figuur 22 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Benedennete voor de volledige simulatieperiode, de periode van storm feb2020 en de periode van storm maart2020. Het verschil in M2-amplitude tussen REF01 en REF02 is klein. Ter hoogte van Rumst wordt de gemeten getijamplitude overschat, en ter hoogte van Duffel sluis en Lier Molbrug wordt deze onderschat. Het grootste verschil treedt op ter hoogte van Duffel-sluis bij de storm van feb2020, doch bedraagt slechts 6 cm.

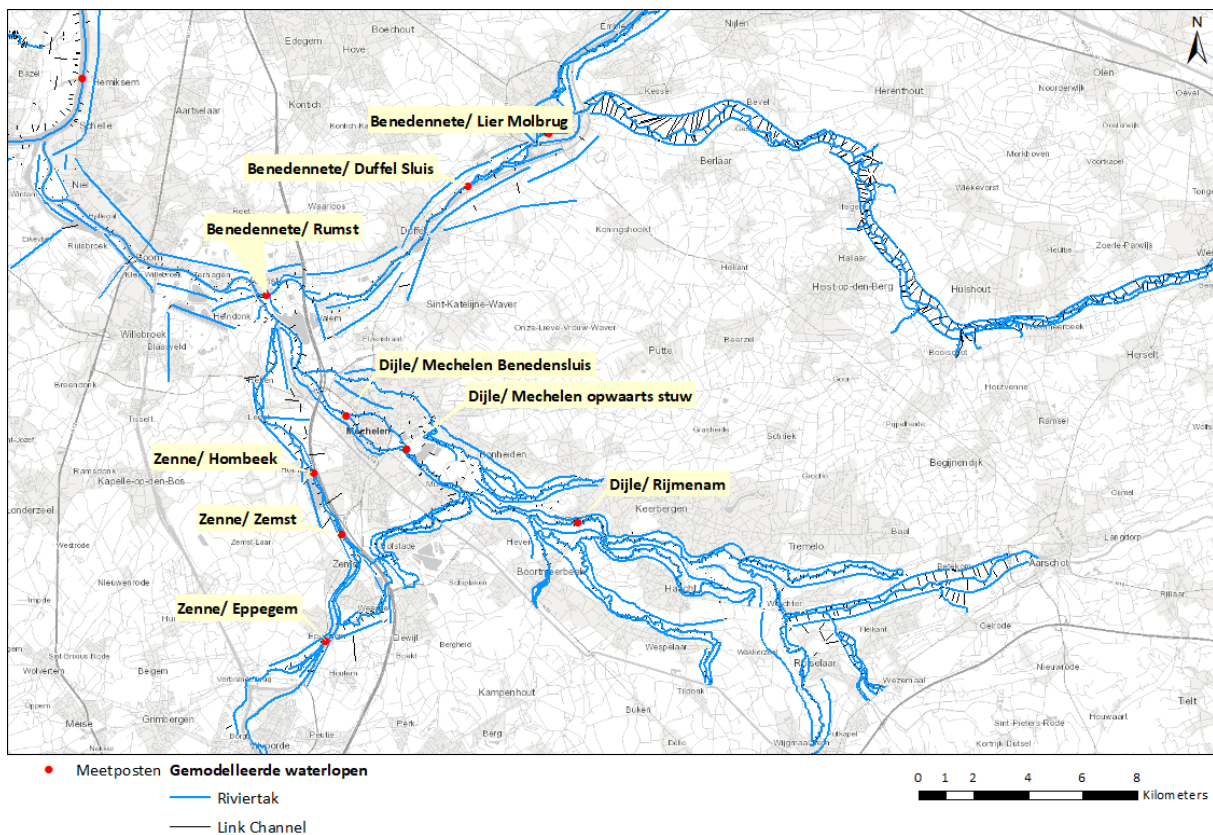
Langs de Benedennete over de hele simulatieperiode variëren de waarden van de RMSE voor de hoogwaters tussen 8 en 9 cm voor REF01 en tussen 6 en 7 cm voor REF02; voor de laagwaters tussen 9 en 12 cm voor REF01 en 8 en 11 cm voor REF02; en voor de volledige tijdreeks tussen 12 en 14 cm voor REF01 en tussen 10 en 11 cm voor REF02.

De lengteprofielen in Figuur 23 en Figuur 24 tonen een verschil van maximaal 10 cm tussen de maximum waterpeilen van REF01 en REF02 langs de Zenne. Figuur A 28 tot en met Figuur A 30 tonen de gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de waterpeilen voor de meetposten langs de Zenne. Ter hoogte van de meetpost te Zemst worden de hoogwaters weerom overschat. De onderschatting van de laagwaters is echter meer opvallend, voornamelijk bij de hogere laagwaters in de periode met verhoogde bovenafvoer. Ter hoogte van de meetpost te Hombeek worden enkel de hoge laagwaters onderschat, en zijn de lage laagwaters onderschat door de simulaties. Ter hoogte van de meetpost te Epegem is er quasi geen verschil in gemodelleerde waterpeilen tussen REF01 en REF02. De hogere waterpeilen worden in de simulatie onderschat terwijl de lagere waterpeilen overschat worden. Het bereik van de gemodelleerde waterpeilen is kleiner dan dit van de gemeten waterpeilen.

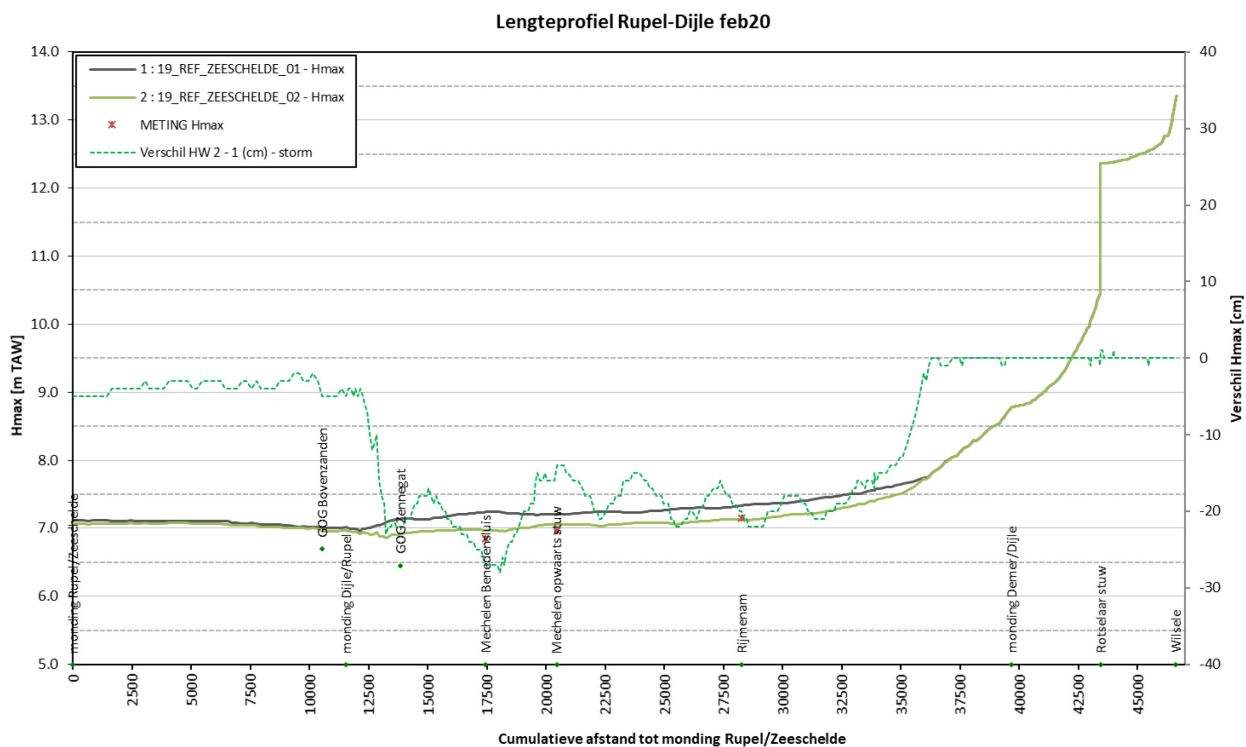
Langs de Zenne over de hele simulatieperiode variëren de waarden van de RMSE voor de hoogwaters tussen 8 en 22 cm voor REF01 en tussen 6 en 22 cm voor REF02; voor de laagwaters tussen 12 en 15 cm voor REF01 en REF02; en voor de volledige tijdreeks tussen 17 en 18 cm voor REF01 en tussen 16 en 17 cm voor REF02.

Figuur 25 toont het verloop van de M2-amplitude langsheen de lengteas van de Zenne voor de periode van storm maart2020. Omwille van een groot aantal ontbrekende waarden in de tijdreeks van de waterpeilen te Zemst kan de waarde van de M2-amplitude voor de volledige periode en voor de storm van feb2020 niet berekend worden. Aangezien er geen getij meer voorkomt in Epegem wordt ook voor deze locatie de M2-amplitude niet berekend. Ter hoogte van Zemst en Hombeek is de M2-amplitude voor REF01 iets groter dan deze voor REF02. Het verschil is echter klein. Ter hoogte van Zemst wordt de gemeten amplitude overschat met meer dan 20 cm. Ter hoogte van Hombeek wordt de gemeten amplitude onderschat met slechts 3 tot 5 cm.

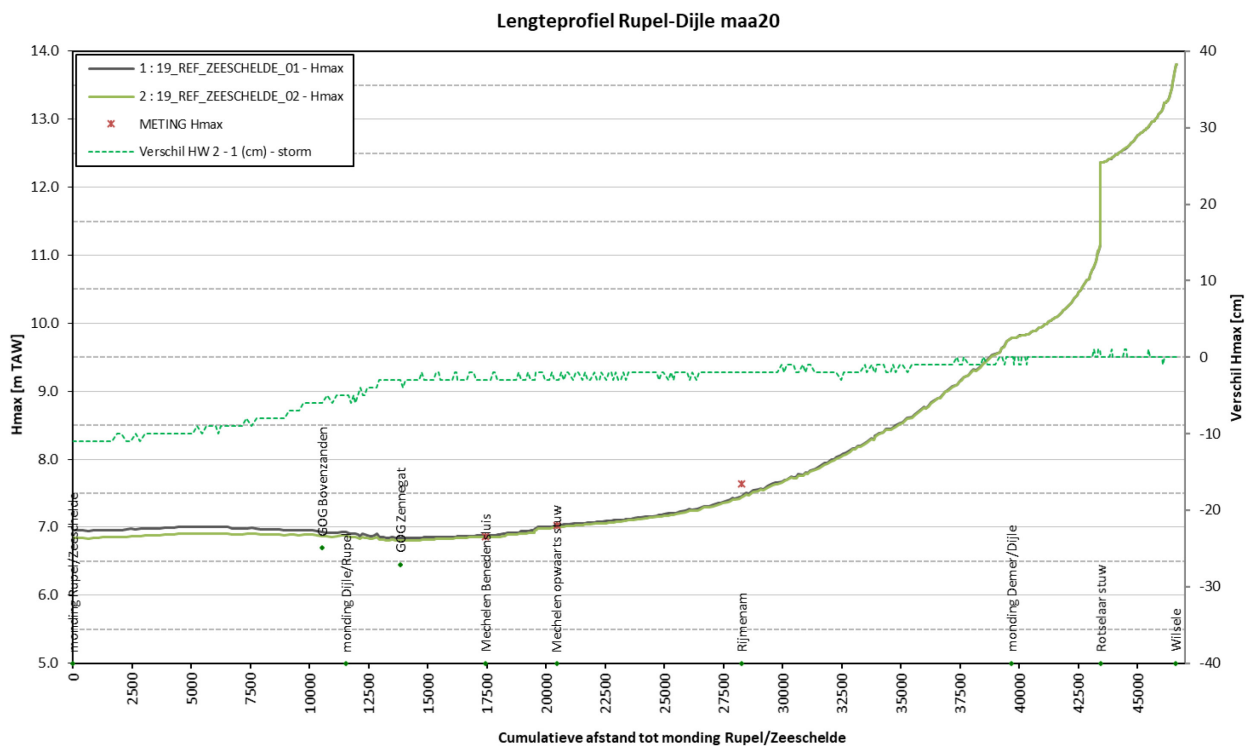
Figuur 16 – Situering meetposten Dijle, Benedennete en Zenne



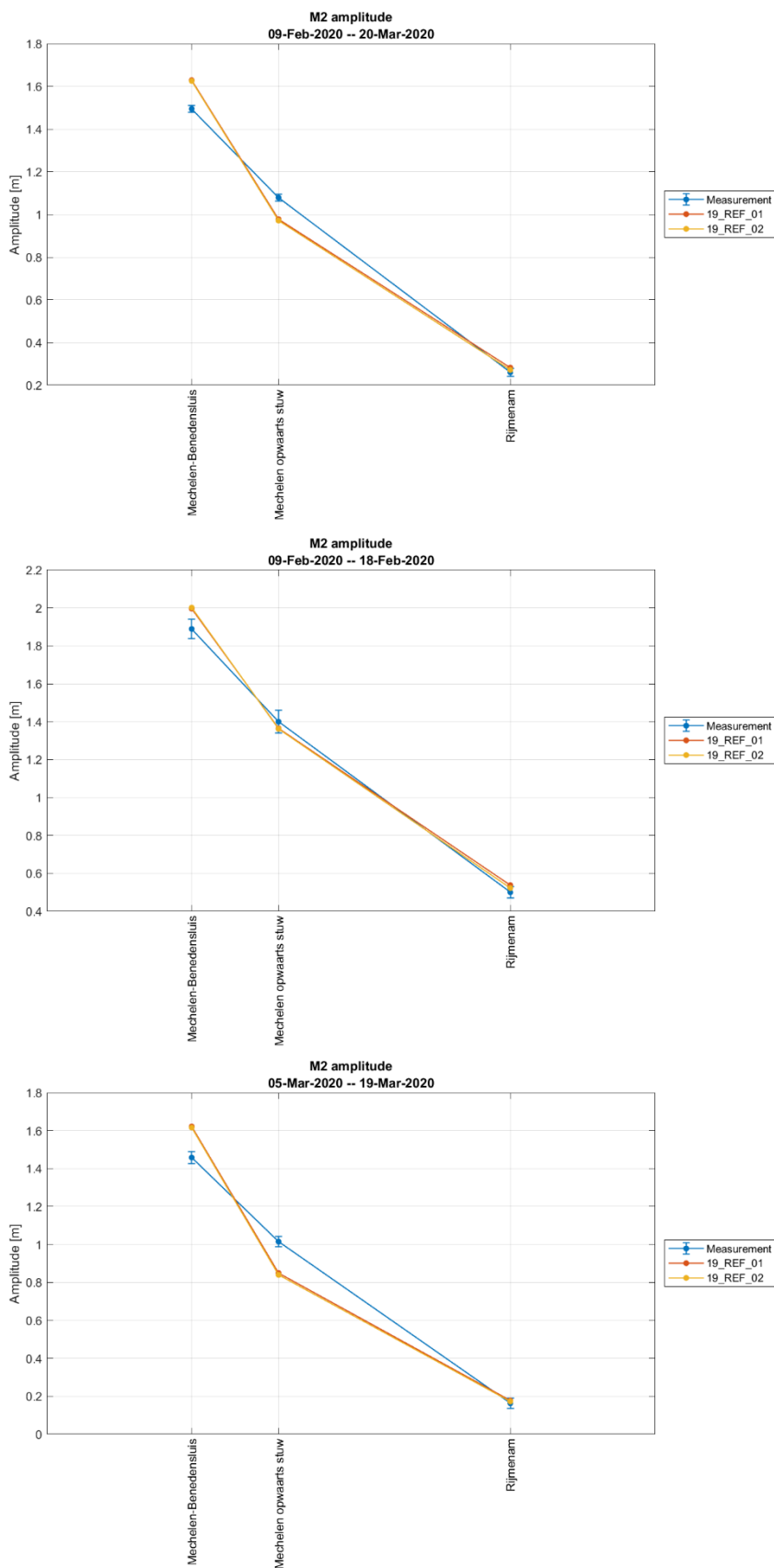
Figuur 17 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle bij storm feb2020



Figuur 18 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle bij storm maart2020

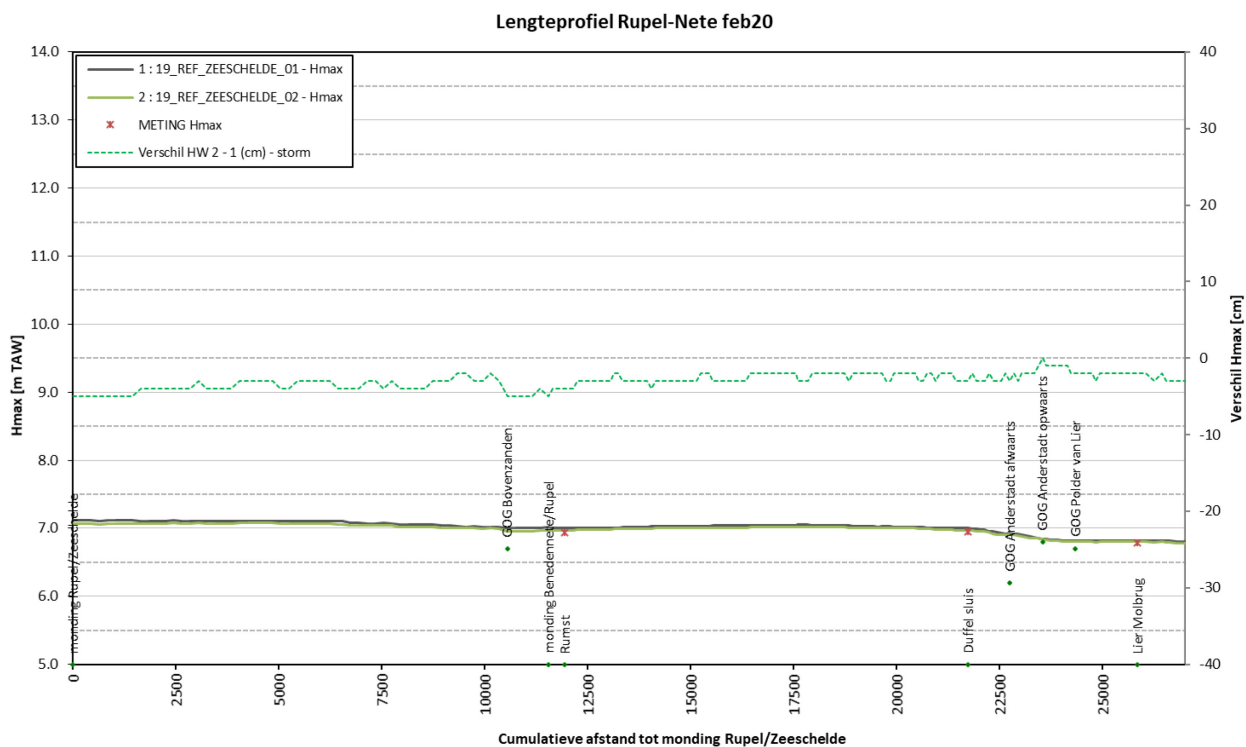


Figuur 19 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Dijle

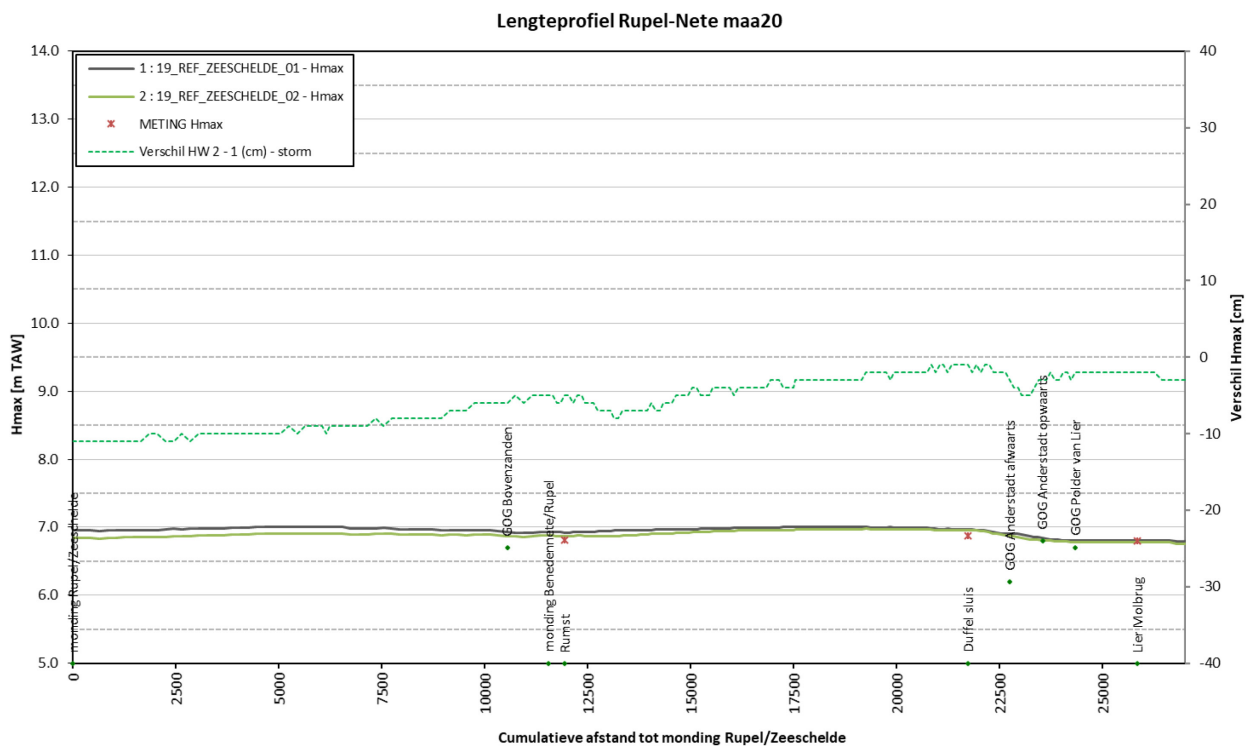


VDM version trunk
 (c) Waterbouwkundig Laboratorium 2020

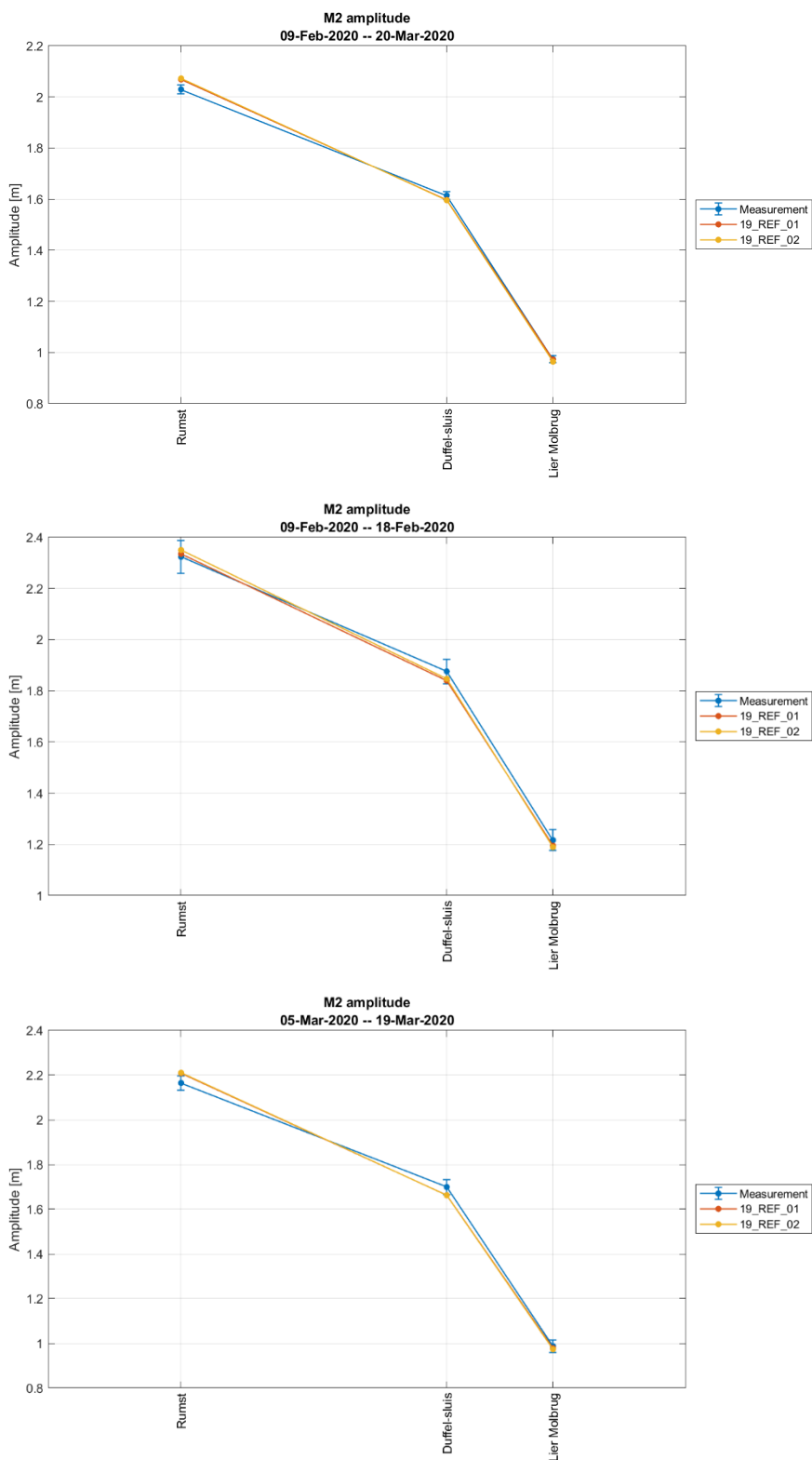
Figuur 20 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete bij storm feb2020



Figuur 21 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Benedennete bij storm maart2020

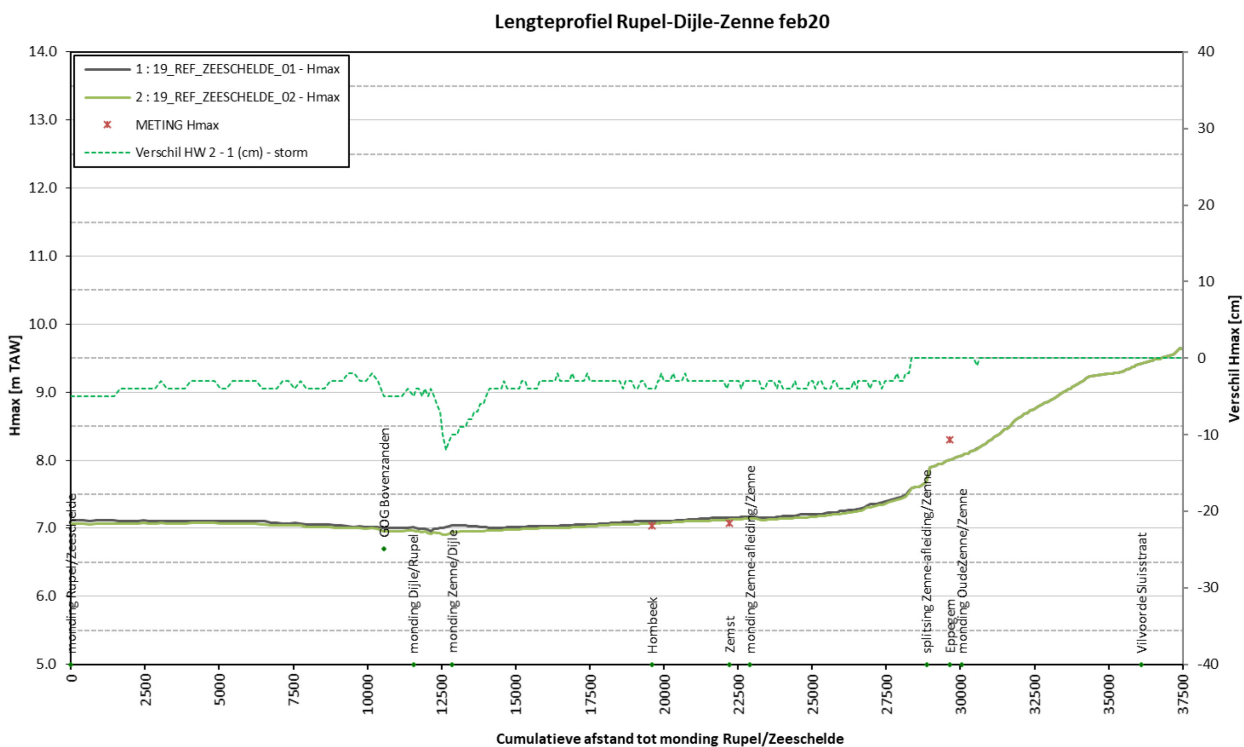


Figuur 22 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen – Benedennete

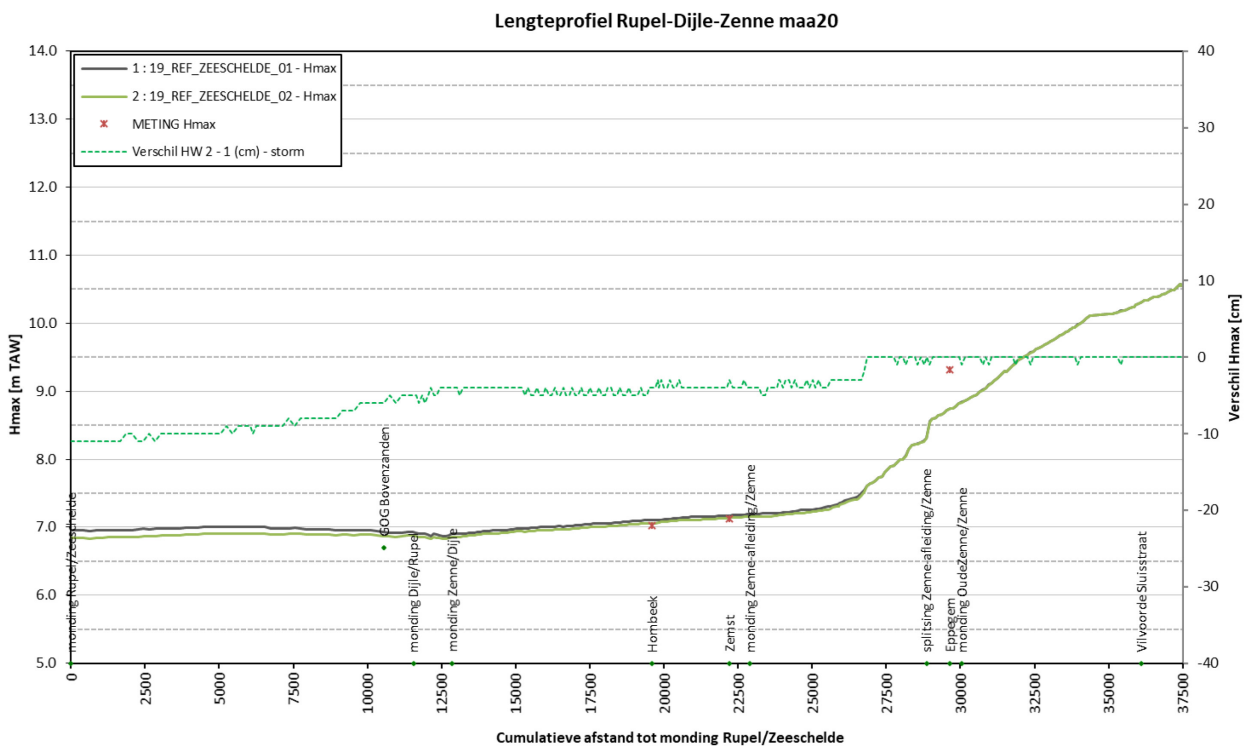


VIMM version trunk
 (c) Waterbouwkundig Laboratorium 2020

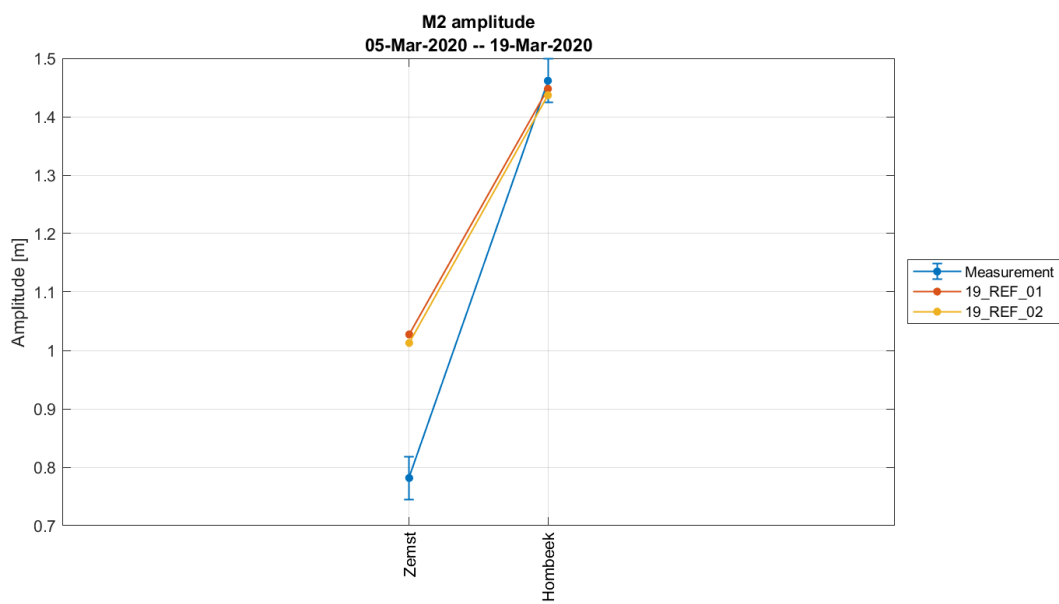
Figuur 23 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle-Zenne bij storm feb2020



Figuur 24 - Lengteprofiel met gemeten en gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel-Dijle-Zenne bij storm maart2020



Figuur 25 - M2 amplitude REF01 en REF02 versus metingen storm maart2020 – Zenne



VIMM version trunk
(c) Waterbouwkundig Laboratorium 2020

3.3.4 Tabel Hmax stormen

Tabel 9 – Hmax stormen ter hoogte van meetlocaties

Numeriek model Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren - Hindcast storm en was februari-maart 2020

Rivier	Meetpost	Feb2020					Maart2020				
		H _{max} gemeten feb2020 [mTAW]	H _{max} gesimuleerd REF01 [mTAW]	H _{max} gesimuleerd REF02 [mTAW]	Vershil gesimuleerd – gemeten REF01[cm]	Vershil gesimuleerd – gemeten REF02 [cm]	H _{max} gemeten maart2020 [mTAW]	H _{max} gesimuleerd REF01 [mTAW]	H _{max} gesimuleerd REF02 [mTAW]	Vershil gesimuleerd – gemeten REF01 [cm]	Vershil gesimuleerd – gemeten REF02 [cm]
Wester- schelde	Terneuzen	6.21	6.23	6.19	2	-2	5.94	5.92	5.88	-2	-6
	Hansweert	6.44	6.58	6.49	14	5	6.03	6.23	6.15	20	12
	Bath	6.77	6.94	6.81	17	4	6.48	6.60	6.47	12	-1
Zeeschelde	Prosperpolder	6.80	7.01	6.88	21	8	6.57	6.71	6.59	14	2
	Liefkenshoek	6.86	7.06	6.95	20	9	6.72	6.80	6.67	8	-5
	Kallo	6.93	7.09	6.98	16	5	6.81	6.85	6.73	4	-8
	Antwerpen	6.91	7.10	6.99	19	8	6.78	6.81	6.69	3	-9
	Hemiksem	6.95	7.09	7.03	14	8	6.72	6.89	6.77	17	5
	Temse	7.05	7.12	7.07	7	2	6.87	6.97	6.88	10	1
	Driegoten	7.00	7.06	7.03	6	3	6.86	6.96	6.89	10	3
	Sint-Amands	7.12	7.07	7.03	-5	-9	6.98	6.97	6.84	-1	-14
	Dendermode	6.84	6.92	6.87	8	3	6.81	6.88	6.81	7	0
	Schoonaarde	6.48	6.48	6.45	0	-3	6.52	6.47	6.45	-5	-7
	Uitbergen	6.42	6.40	6.38	-2	-4	6.56	6.47	6.46	-9	-10
	Wetteren	6.33	6.42	6.38	9	5	6.66	6.59	6.58	-7	-8
Melle	6.30	6.45	6.41	15	11	6.70	6.75	6.73	5	3	

Durme	Tielrode	7.14	7.06	7.03	-8	-11	7.01	7.03	6.97	2	-4
	Waasmunster brug	6.92	6.88	6.88	-4	-4	6.92	6.88	6.87	-4	-5
	Waasmunster manta	6.83	6.84	6.83	1	0	6.86	6.83	6.81	-3	-5
	Zele	6.84	6.81	6.81	-3	-3	6.91	6.81	6.75	-10	-16
Dijle	Mechelen benedensluis	6.85	7.24	6.95	39	10	6.86	6.88	6.85	2	-1
	Mechelen opwaarts stuw	6.96	7.20	7.05	24	9	7.02	7.04	7.01	2	-1
	Rijmenam	7.15	7.33	7.10	18	-5	7.64	7.46	7.44	-18	-20
Benedennete	Rumst	6.93	7.01	6.97	8	4	6.81	6.92	6.87	11	6
	Duffel sluis	6.95	7	6.97	5	2	6.87	6.97	6.96	10	9
	Lier Molbrug	6.78	6.82	6.8	4	2	6.80	6.8	6.78	0	-2
Zenne	Hombeek	7.04	7.11	7.07	7	3	7.02	7.1	7.06	8	4
	Zemst	7.07	7.16	7.13	9	6	7.12	7.17	7.14	5	2
	Epegem	8.30	8.01	8.01	-29	-29	9.32	8.74	8.74	-58	-58

3.4 Resultaten meetposten GOG's

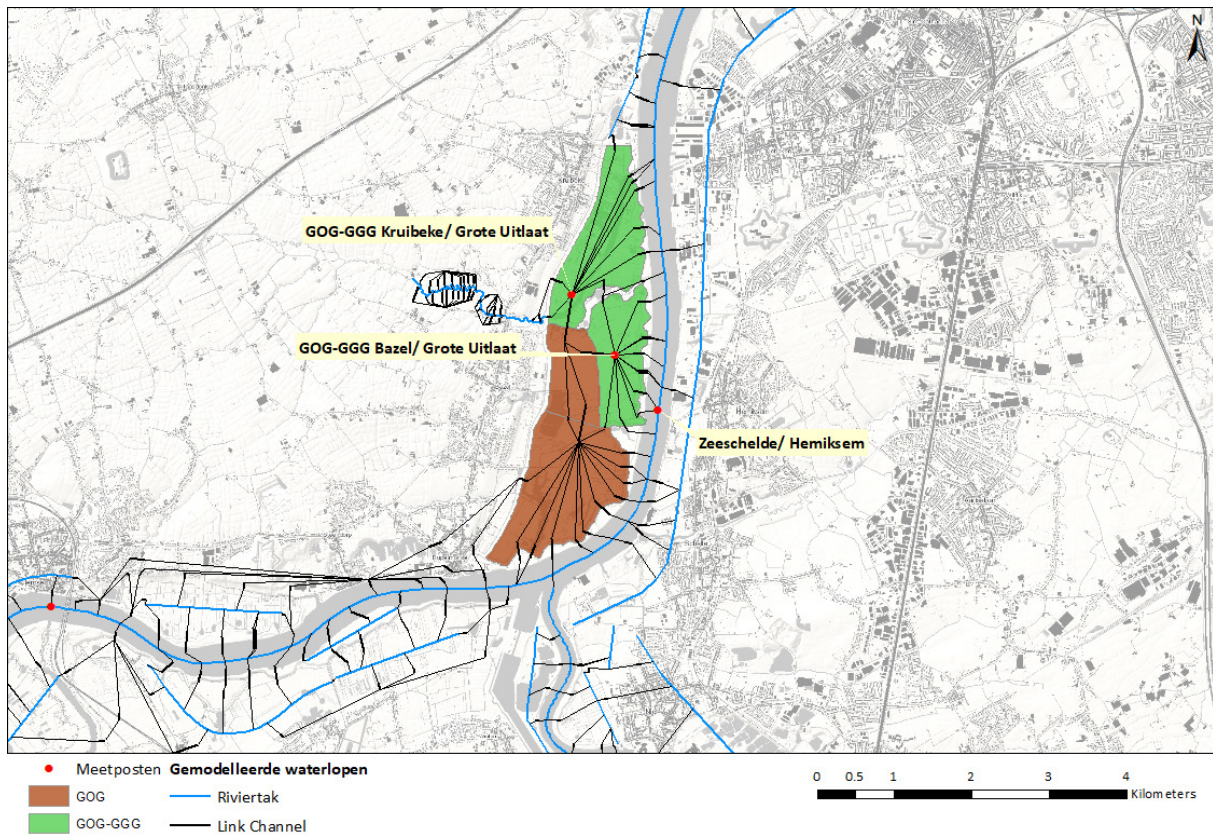
3.4.1 GOG-GGG Kruikeke

Het GOG-GGG Kruikeke-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 Kruikeke kent tevens GGG-werking sinds juni 2017. Figuur 26 toont de outputlocatie van de meetpost in het GOG. Tabel 9 geeft een overzicht van enkele kenmerken van het gebied.

Figuur 27 en Figuur 28 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG-GGG Kruikeke ter hoogte van de grote uitlaat, samen met de gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde ter hoogte van het GOG, voor de stormen van feb2020 en maart2020. In het model werden de inwateringssluizen van het GGG gesloten van 9 tot 14 februari 2020, op basis van informatie verkregen van de beheerder. Echter op basis van de metingen lijken de inwateringssluizen langer gesloten geweest te zijn. Het hoogwaterpeil in het gebied tijdens GOG-werking tijdens de stormhoogwaters van 10 en 11 februari wordt in REF01 overschat en in REF02 eerder onderschat. Al is bij deze laatste het verschil kleiner.

Tijdens de was- en stormperiode van maart2020 werden de GGG-inwateringssluizen niet gesloten in het model. Zowel in REF01 als in REF02 worden de hoogwaterpeilen in het gebied overschat. De stijging van het waterpeil verloopt tijdens de GGG-vulling wel circa gelijk met de gemeten waarden. Op basis van de metingen lijken de GGG-inwateringssluizen opnieuw gesloten geweest te zijn vanaf 13 maart 2020.

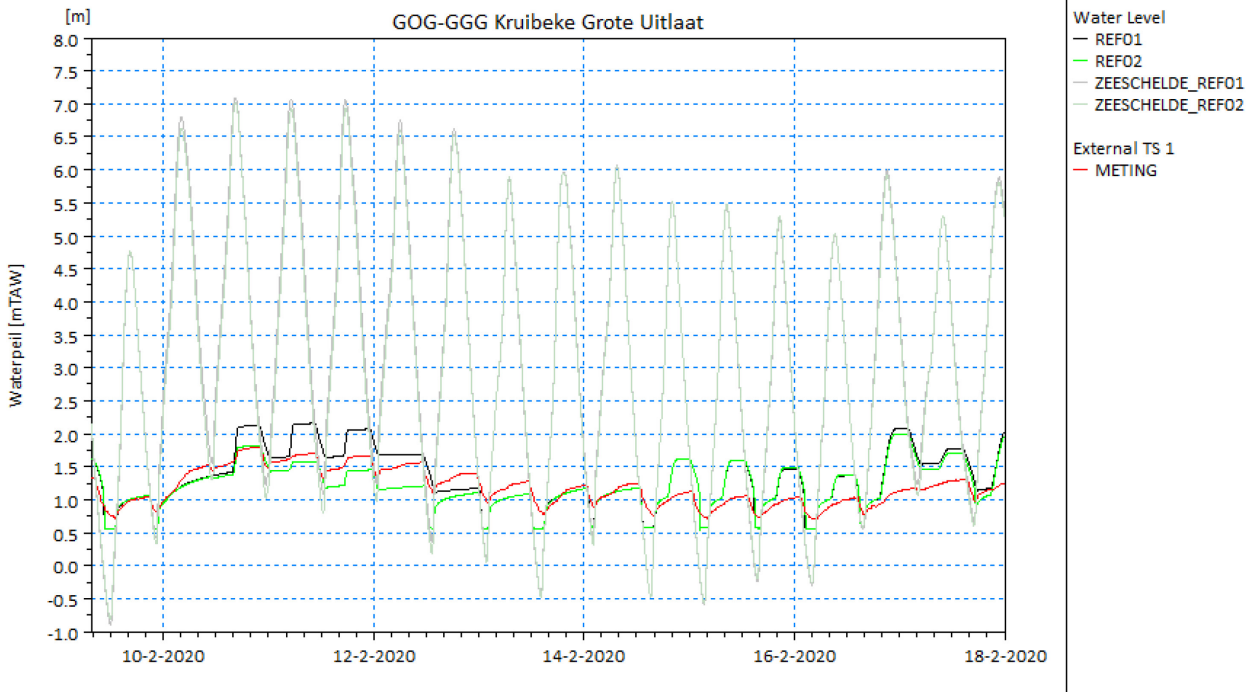
Figuur 26 – Situering meetposten GOG-GGG Kruikeke en Bazel



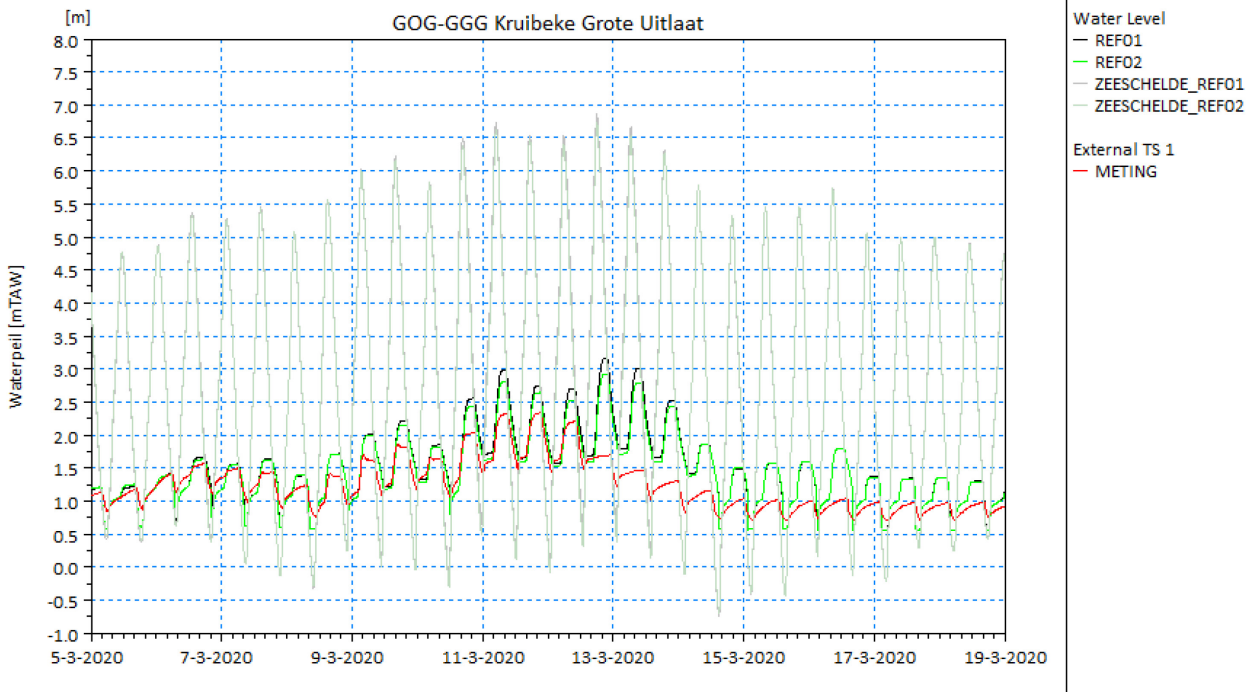
Tabel 10 – Kenmerken GOG-GGG Kruibeke

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

Figuur 27 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruibeke Grote Uitlaat – feb2020



Figuur 28 – Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruibeke Grote Uitlaat – maart2020



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 26 toont de outputlocatie van de meetpost in het GOG. Tabel 10 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

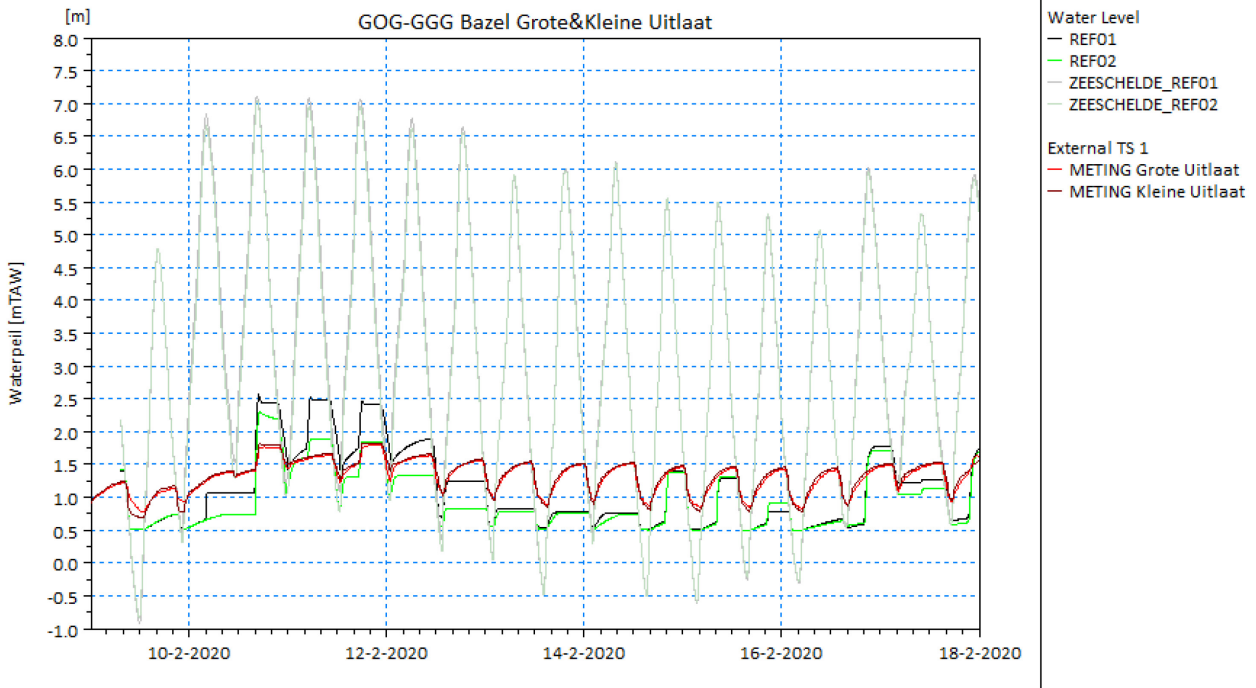
Figuur 29 en Figuur 30 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen en GOG-GGG Bazel ter hoogte van de grote en kleine uitlaat, samen met de gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde ter hoogte van het GOG, voor de stormen van feb2020 en maart2020. Aangezien dit gebied in het model geïmplementeerd werd als reservoir, wordt er slechts één waterpeil voor het gebied gemodelleerd. Ook de stuwen die aanwezig zijn in het GOG zijn niet opgenomen in het model. Het verschil tussen de gemeten waterpeilen aan de grote en de kleine uitlaat is echter ook beperkt.

Opvallend is de schommeling van het waterpeil in het gebied wanneer de inwateringssluizen gesloten zijn, of wanneer het waterpeil op de Zeeschelde beneden het drempelpeil van 5,2 mTAW blijft. Deze is vermoedelijk afkomstig van afstroom uit het achterland, en wordt onderschat in het model. Tijdens de GOG-werking van feb2020 wordt zowel in REF01 als in REF02 het hoogwaterpeil in het GOG overschat, al is het verschil bij REF02 kleiner ten opzichte van de metingen. Tijdens de stormperiode van maart2020 werden de GGG-inwateringssluizen niet gesloten. Enkel tijdens het hoogwater van 12 maart rond 18u werd de overlooptdijk net overtopt. Tijdens de hoogwaters ervoor kende het gebied sterkere vulling via de GGG-sluizen. De hoogwaters worden hierbij echter overschat in de simulaties.

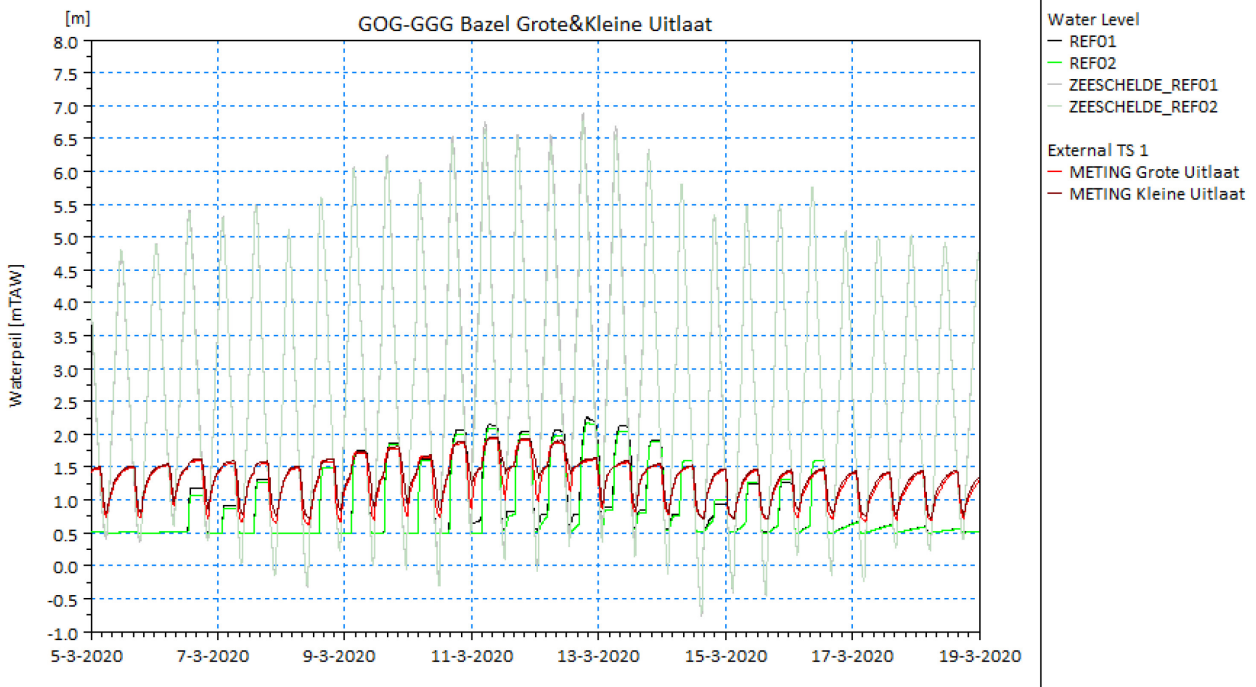
Tabel 11 - Kenmerken GOG-GGG Bazel

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overlooptdijk	+6.8	Opmeting
Inwatering noord	+5.2	Ontwerp
Uitwatering 1 noord	+0.5	Ontwerp
Inwatering zuid	+5.1 / +5.3	Ontwerp
Uitwatering 2 zuid	+0.5	Ontwerp
Uitwatering 3	+0.5	Ontwerp

Figuur 29 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel Grote&Kleine Uitlaat – feb2020



Figuur 30 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel Grote&Kleine Uitlaat – maart2020



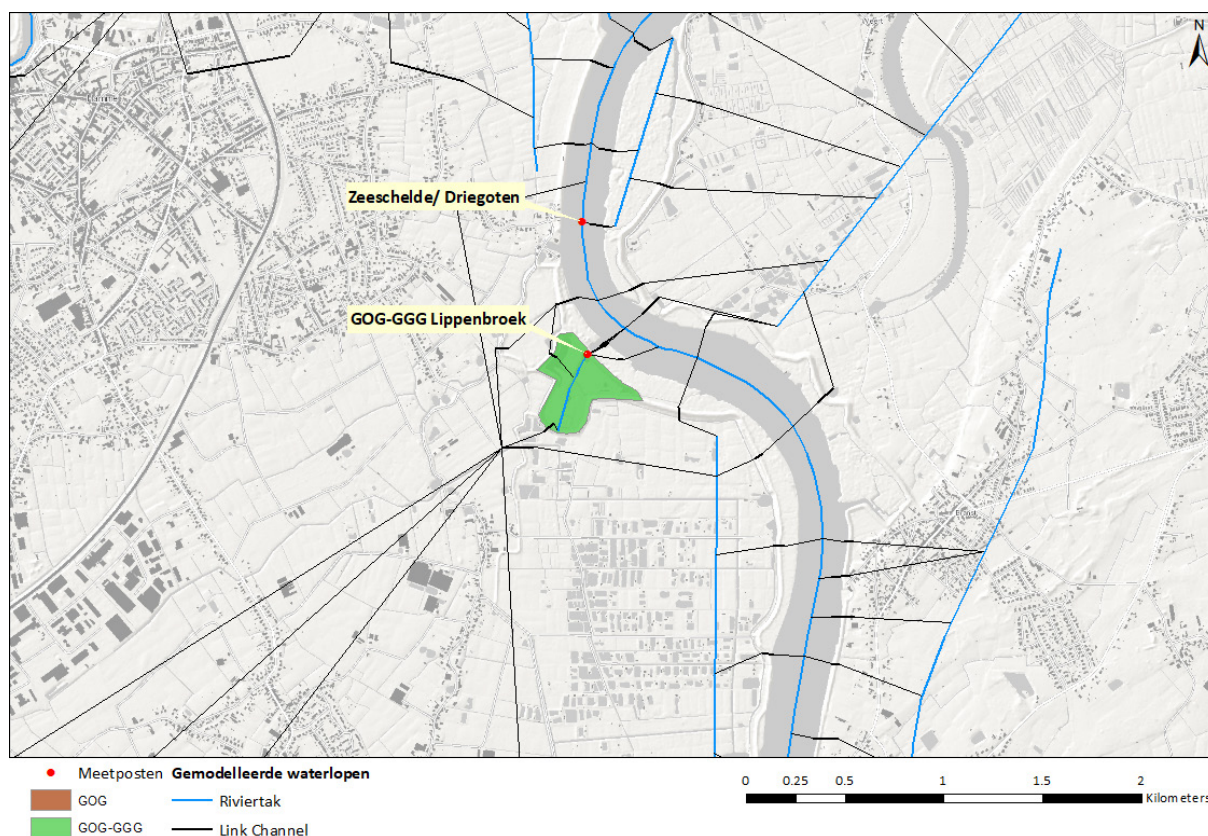
3.4.3 GOG-GGG Lippenbroek

Het GOG Lippenbroek omvat een korte overlooptdijk, een inwateringsstructuur en een uitwateringsstructuur. Figuur 31 toont de outputlocatie van de meetpost in het GOG. Tabel 11 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 32 en Figuur 33 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG-GGG Lippenbroek, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde ter hoogte van Driegoten, voor de stormen van feb2020 en maart2020. Tijdens de storm van feb2020 werden de GGG-inwateringssluizen gesloten, van 10/02/20 om 14u tot 12/02/20 om 12u. In de simulaties worden de GGG-sluizen echter al op 9/02/20 gesloten, en op 12/02/20 om 10u30 geopend. Ook bij dit gebied is er een schommeling van het waterpeil in het gebied, die niet gesimuleerd wordt in het model. Deze kan afkomstig zijn van afstroom van achterliggende gebieden of een 'lekkende terugslagklep'. Dit is te zien aan het verloop van het waterpeil in het gebied tijdens laagwater in de Zeeschelde. De hoogwaters na de storm worden overschat zowel in REF01 als in REF02.

Tijdens de storm van maart2020 werden de GGG-inwateringssluizen niet gesloten. Enkel tijdens het stormhoogwater van 12 maart rond 18u werd de overlooptdijk net overtopt. Tijdens deze simulatieperiode worden de hoogwaters in het gebied onderschat. Het verschil bedraagt 15 tot 30 cm. Voornamelijk tijdens de periode met hogere hoogwaters dalen de gesimuleerde laagwaters veel lager dan de gemeten waarden.

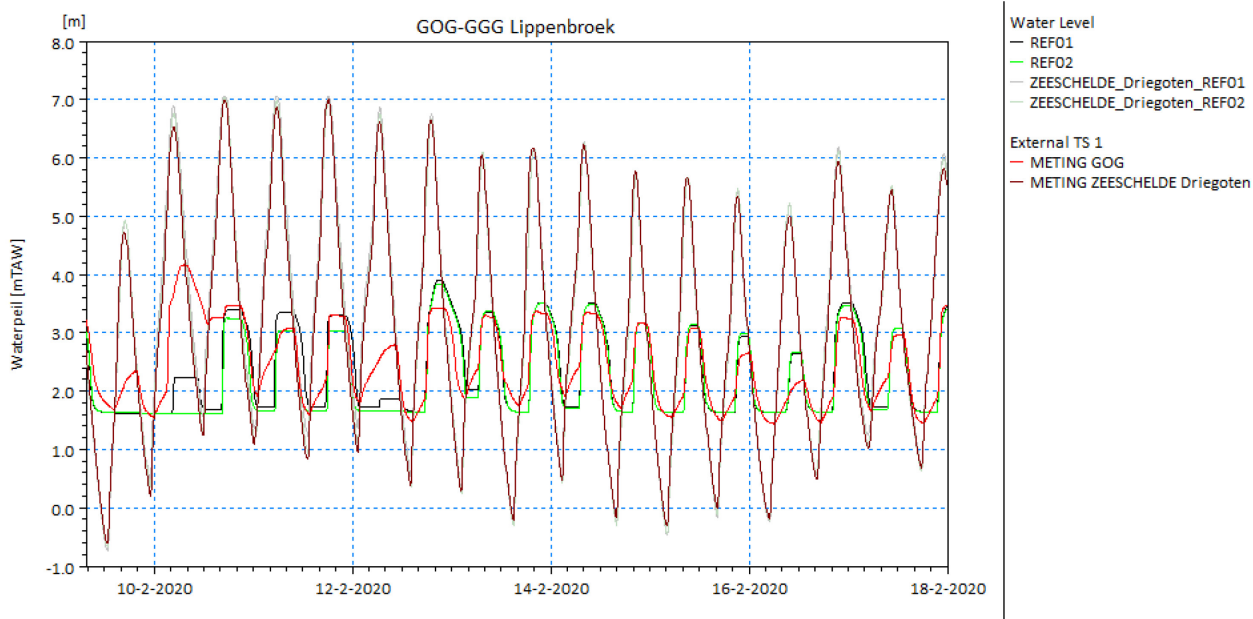
Figuur 31 - Situering meetposten GOG-GGG Lippenbroek



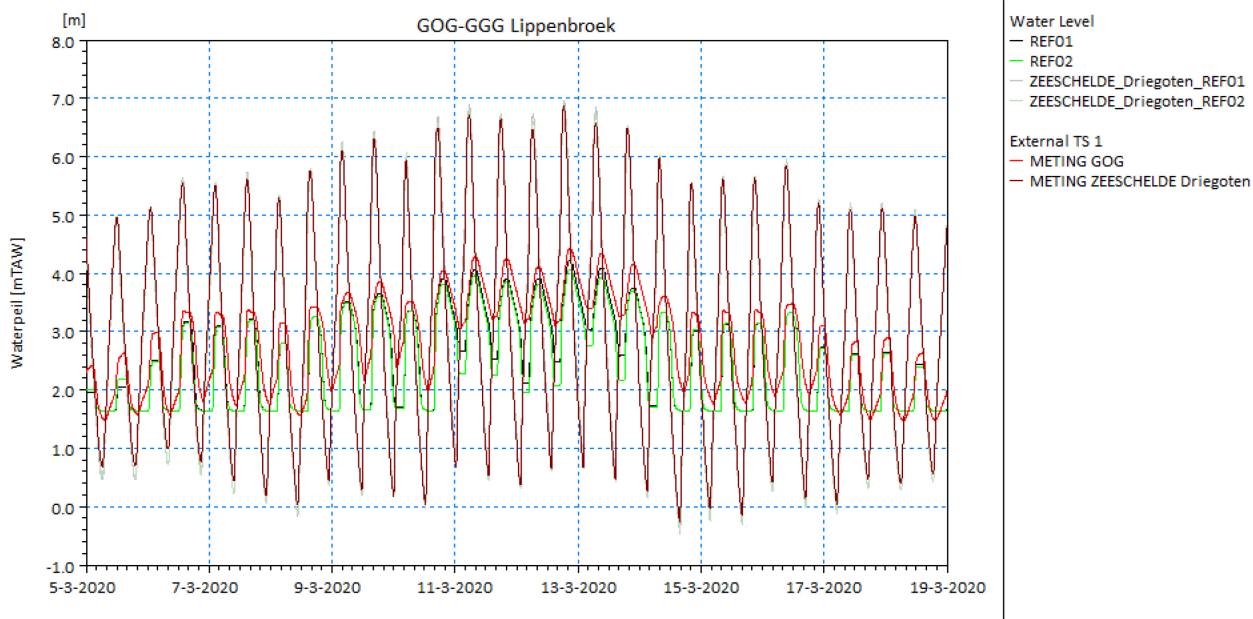
Tabel 12 - Kenmerken GOG-GGG Lippenbroek

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

Figuur 32 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – feb2020



Figuur 33 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek – maart2020

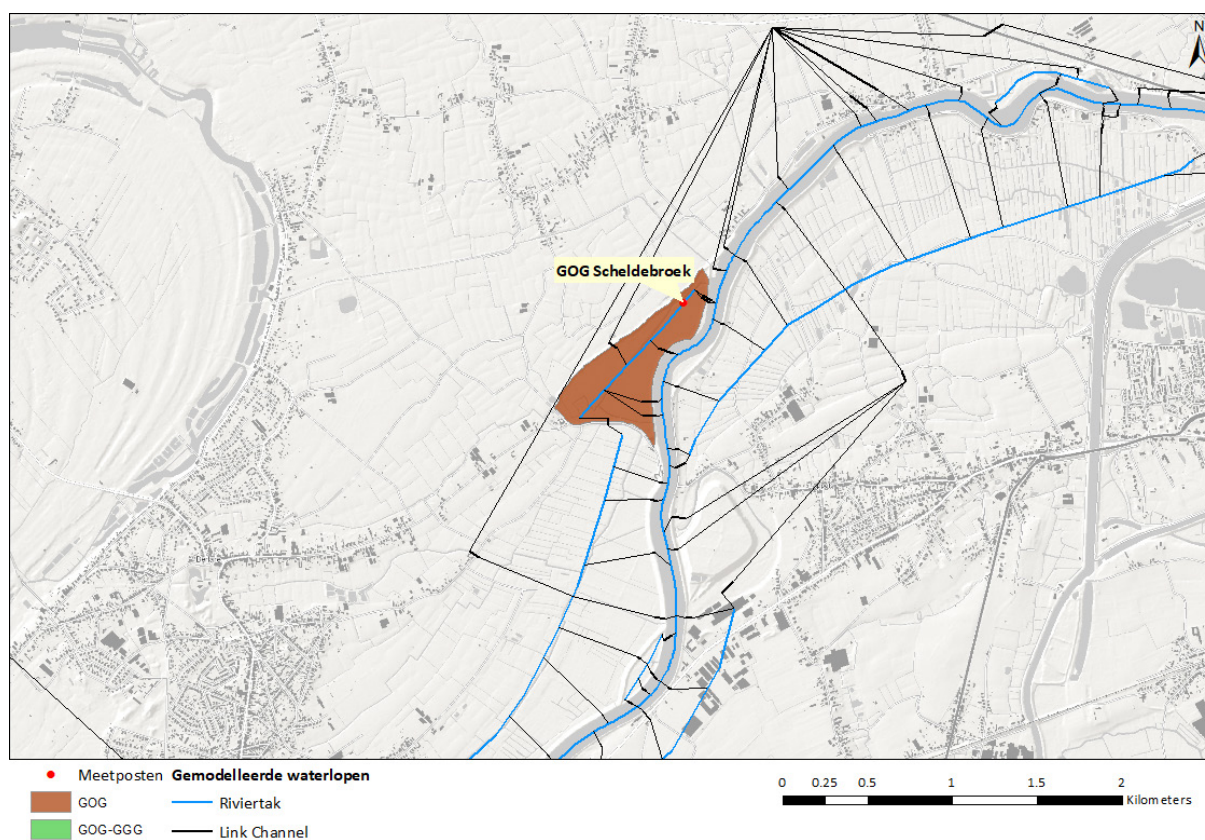


3.4.4 GOG Scheldebroek

Het GOG Scheldebroek omvat een overlooptdijk en twee uitwateringsstructuren. Tabel 12 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied. Figuur 34 toont de outputlocatie van de meetpost in het GOG.

Figuur 35 en Figuur 36 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Scheldebroek, samen met de gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde ter hoogte van het GOG, voor de stormen van feb2020 en maart2020. Ook in dit gebied is een schommeling van het waterpeil bij laagwater aanwezig, die niet gesimuleerd wordt. Tijdens de beide stormperiodes worden de hoogwaters overschat in de simulaties. De snelheid van stijgen van de waterpeilen tijdens het stormhoogwater is wel ongeveer gelijk aan de metingen.

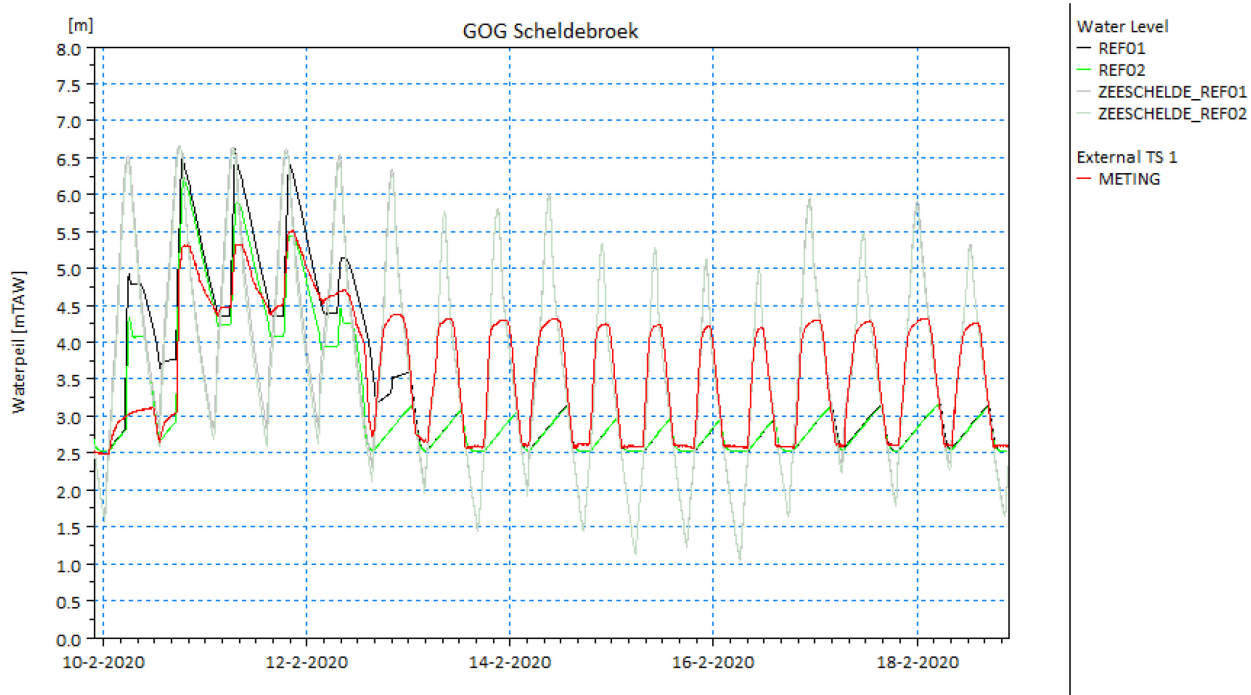
Figuur 34 - Situering meetpost GOG Scheldebroek



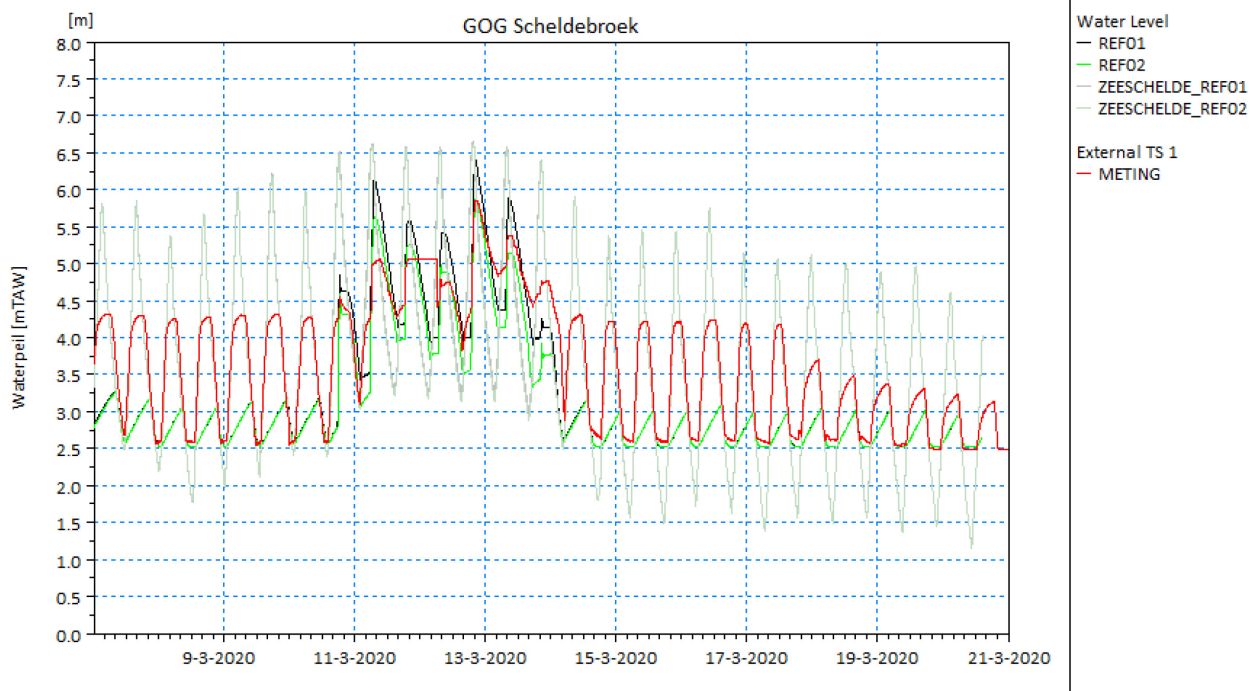
Tabel 13 - Kenmerken GOG Scheldebroek

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

Figuur 35 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – feb2020



Figuur 36 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek – maart2020



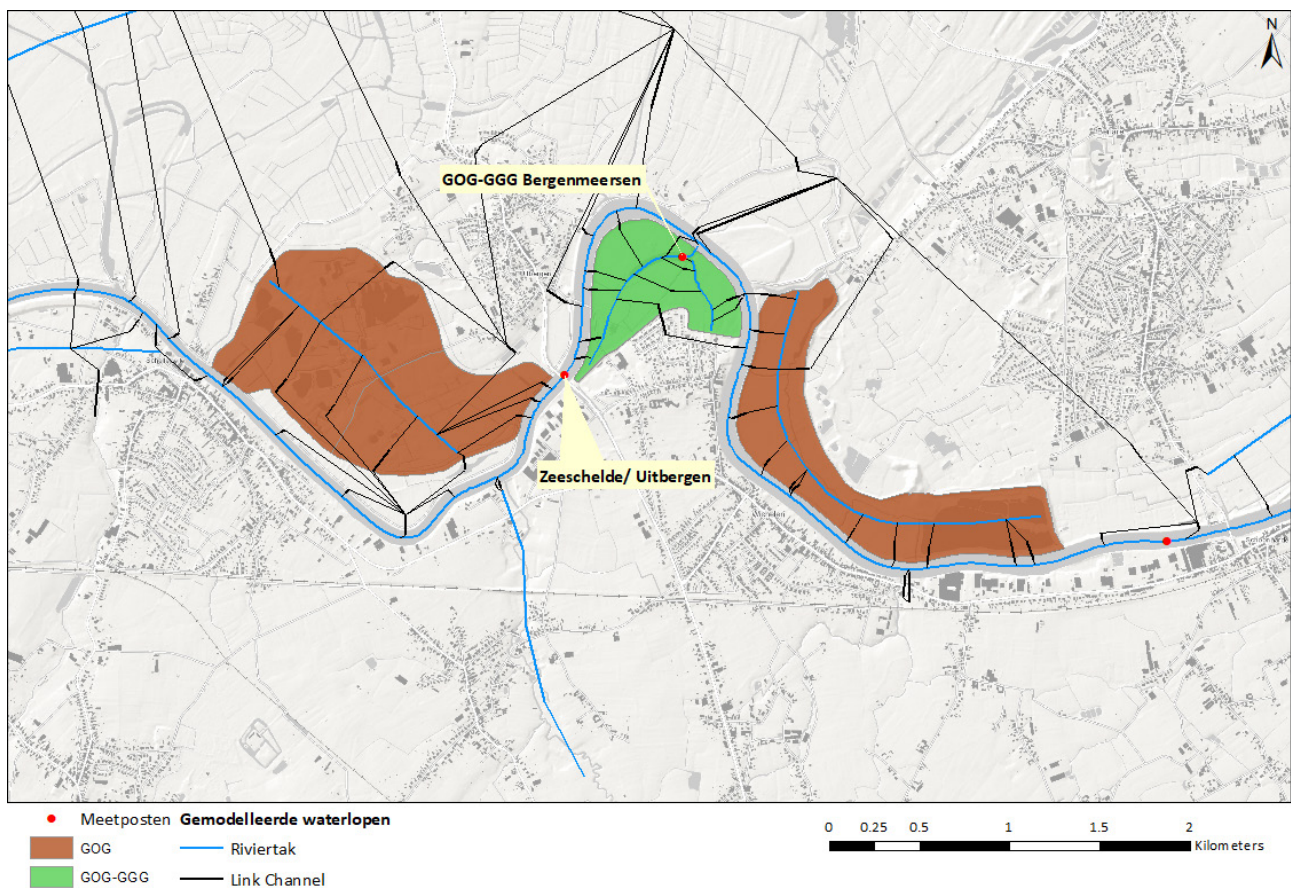
3.4.5 GOG-GGG Bergenmeersen

Het GOG Bergenmeersen omvat een overlooptdijk, een (oude) uitwateringsconstructie en een (nieuwe) gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Dit gebied kent sinds april 2013 GGG-werking. Figuur 37 toont de outputlocatie van de meetpost in het GOG. Tabel 13 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 38 en Figuur 39 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG-GGG Bergenmeersen, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Zeeschelde ter hoogte van Uitbergen, voor de stormen van feb2020 en maart2020. Tijdens de storm van feb2020 werden de GGG-inwateringssluizen gesloten, van 10/02/20 om 14u tot 12/02/20 om 12u. In de simulaties worden de GGG-sluizen echter al op 9/02/20 gesloten, en op 12/02/20 om 10u30 geopend. De overlooptdijk van GOG-GGG Bergenmeersen heeft een gemiddelde hoogte van 6,4 mTAW. De hoogwaters te Uitbergen tijdens de storm van feb2020 zijn slechts enkele centimeters hoger. In het model lijkt GOG-werking gesimuleerd te worden. In de metingen is echter geen duidelijke stijging van de hoogwaters door GOG-werking te zien. In de periode na de storm van feb2020 lijken de gesimuleerde hoogwaterpeilen bij GGG-werking overschat te worden in de simulatie.

Ook tijdens de stormperiode van maart2020 stijgen de hoogwaterpeilen ter hoogte van Uitbergen net boven 6,4 mTAW. Deze hoogwaterpeilen worden in de simulaties echter onderschat, waardoor geen GOG-werking optreedt in het model. Tijdens de periode met verhoogde bovenafvoer, voor 15 maart 2020, worden de hoogwaterpeilen ten gevolge van GGG-werking overschat in de simulatie. In de periode na 15 maart 2020 is het verschil tussen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in het GOG-GGG kleiner.

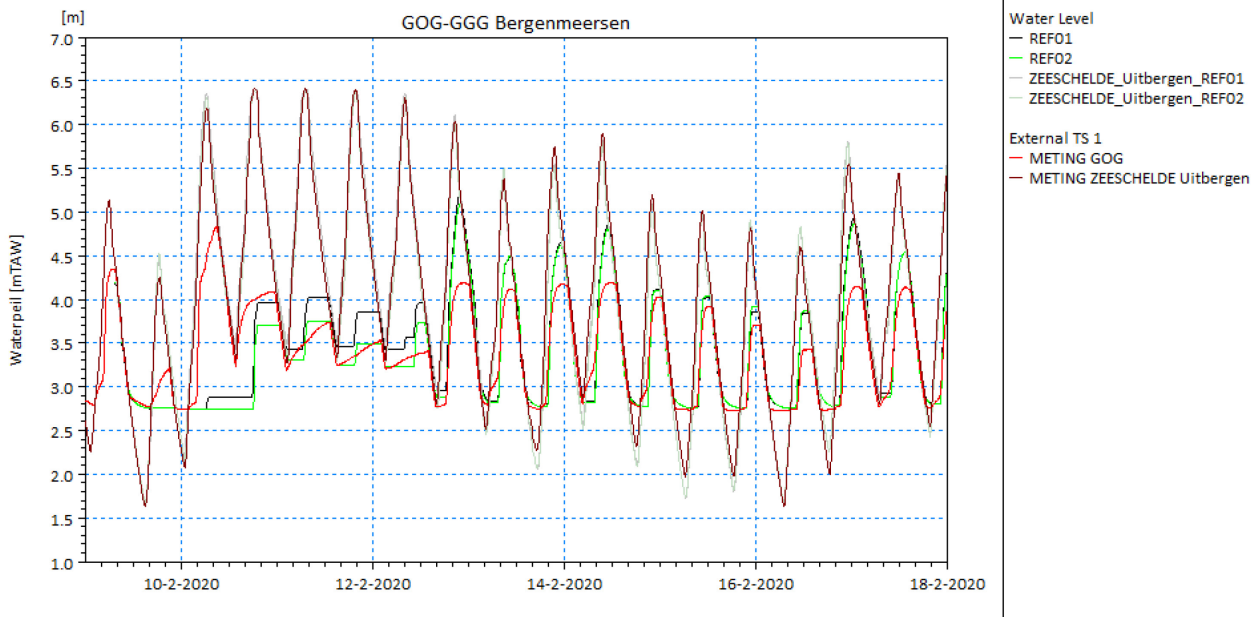
Figuur 37 - Situering meetposten GOG-GGG Bergenmeersen



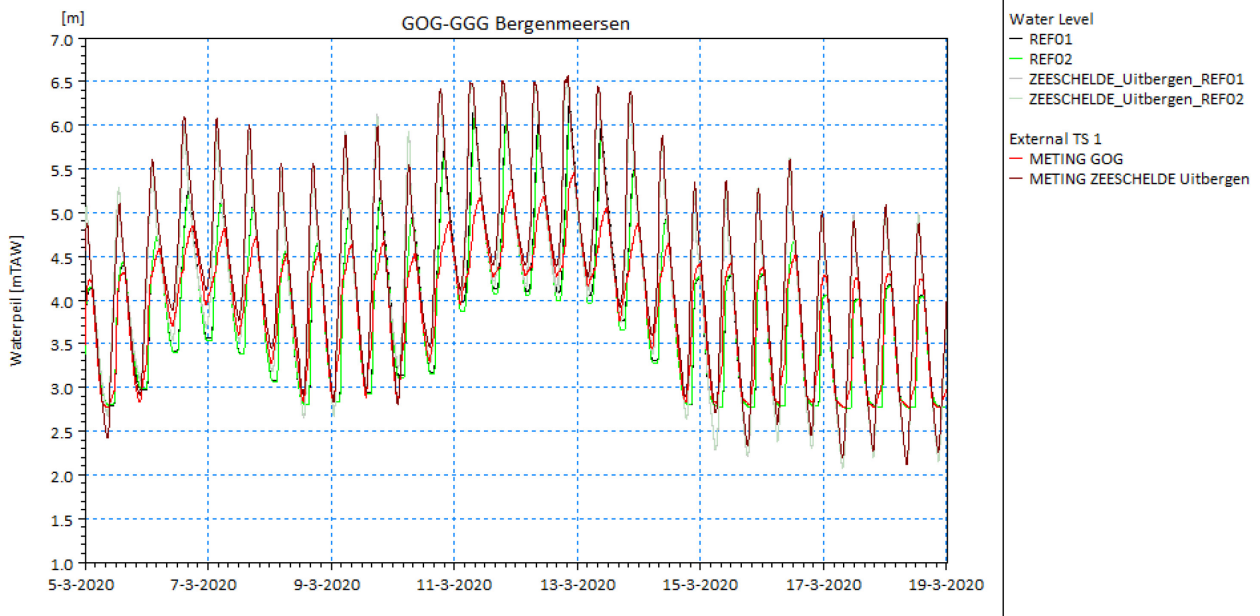
Tabel 14 - Kenmerken GOG-GGG Bergenmeersen

Structuur	Peil [mTAW]	Herkomst gegevens
Overloopdijk	+6.35	Opmeting
Inwatering 1 (GGG)	+4.2, +4.35, +4.5	Opmeting
Uitwatering 1 (GGG)	+2.7	Opmeting
Uitwatering 2 (oost)	+2.92	Opmeting

Figuur 38 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – feb2020



Figuur 39 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen – maart2020



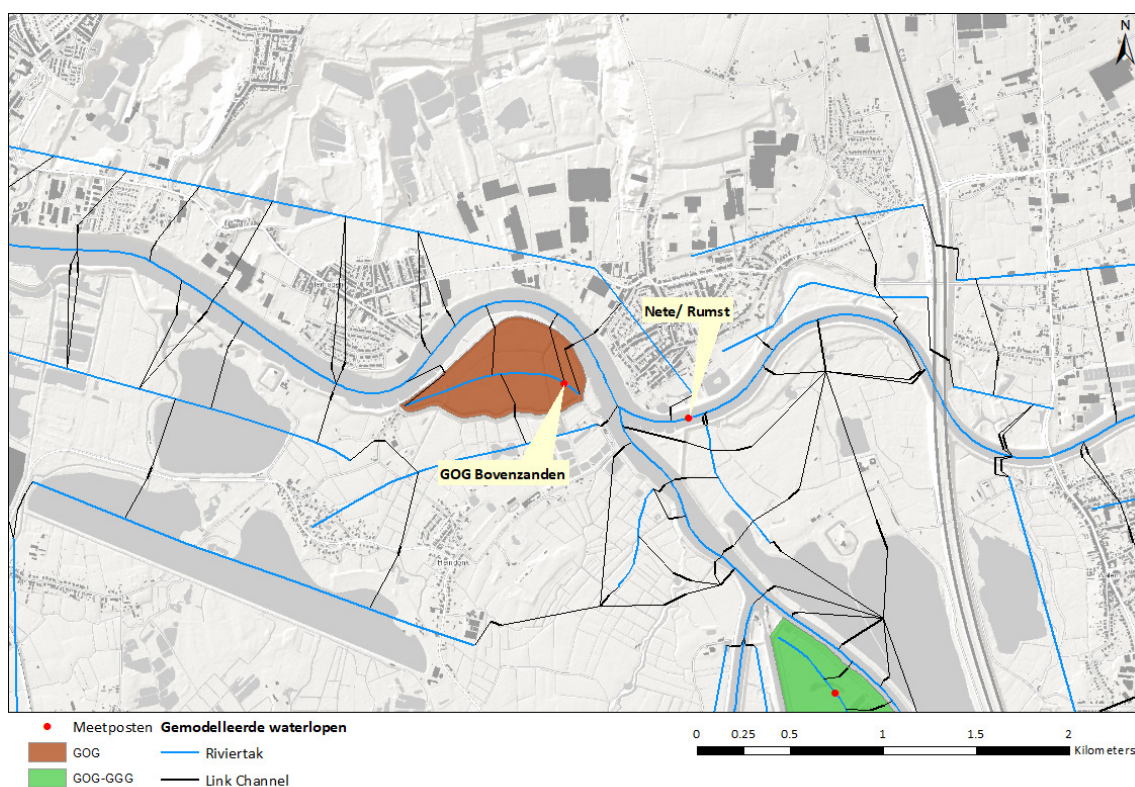
3.4.6 GOG Bovenzanden

Het GOG Bovenzanden omvat een overlooptdijk en één uitwateringsstructuur. Figuur 40 toont de outputlocatie van de meetpost in het GOG. Tabel 14 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken.

Figuur 41 en Figuur 42 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG Bovenzanden, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Benedennete ter hoogte van Rumst, voor de stormen van feb2020 en maart2020. Voor de storm van maart2020 zijn er geen metingen van de waterpeilen in GOG Bovenzanden.

De stormhoogwaters in de Benedennete tijdens de storm van feb2020 worden overschat in de simulaties. Hierdoor worden ook de waterpeilen in het GOG overschat. De daling van het waterpeil in het GOG, tijdens het laagwater na de storm, lijkt in de simulaties wel ongeveer even snel te lopen als in de metingen. De schommelingen van het waterpeil voor en na de storm zijn vermoedelijk te verklaren door afstroom van achterliggende gebieden.

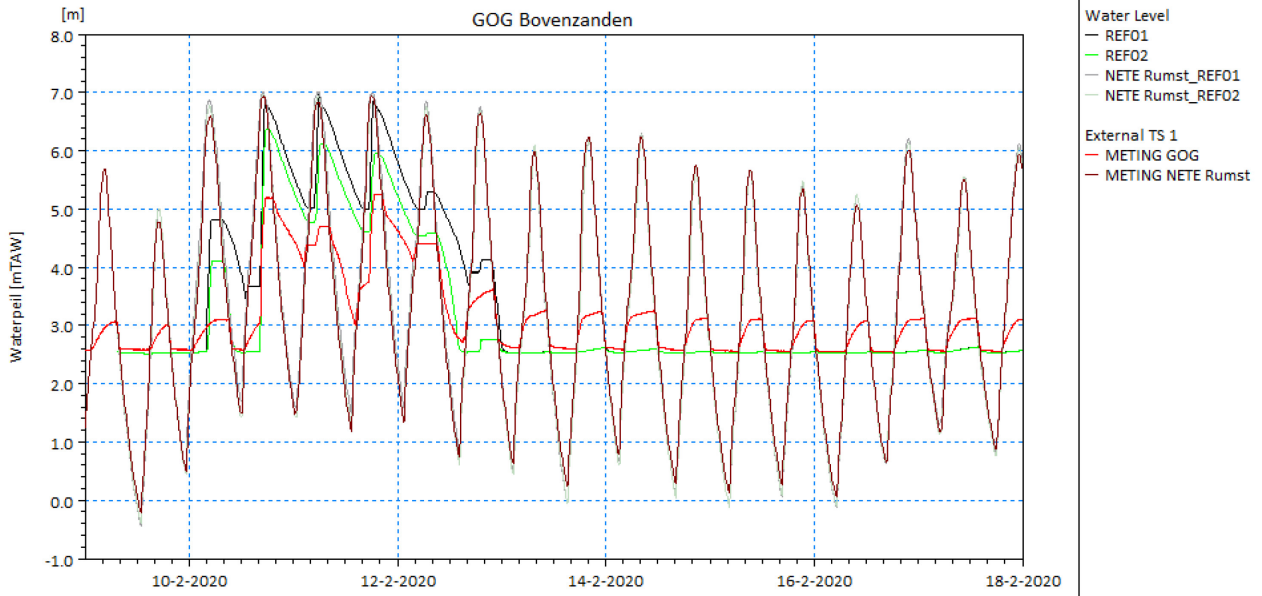
Figuur 40 - Situering meetposten GOG Bovenzanden



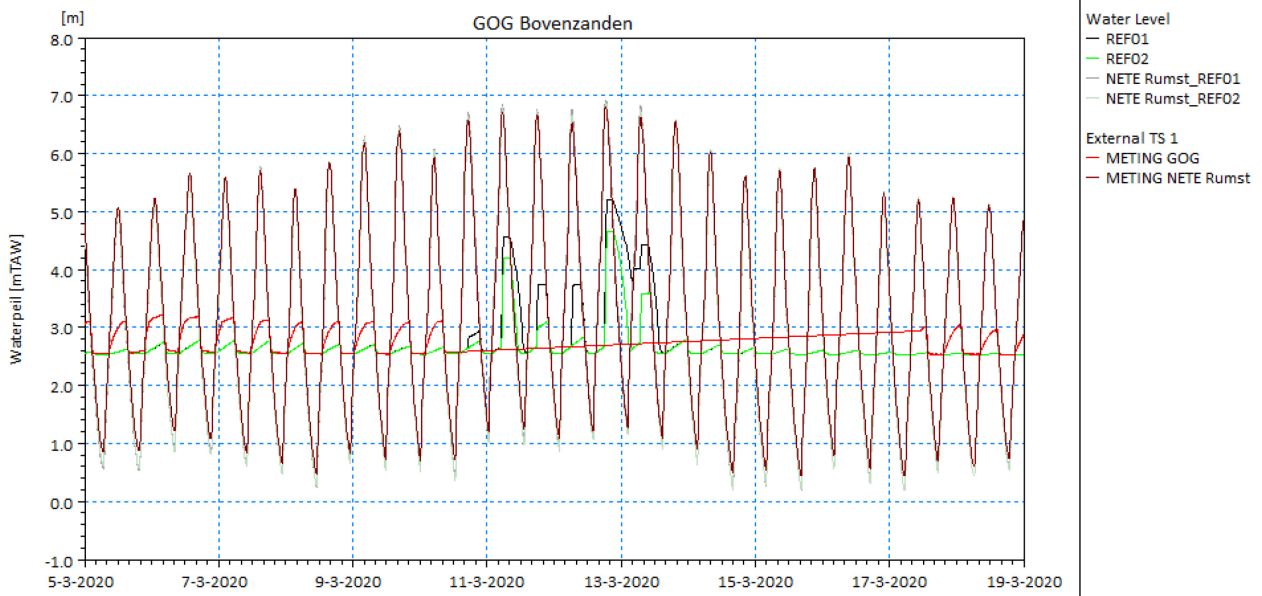
Tabel 15 - Kenmerken GOG Bovenzanden

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

Figuur 41 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – feb2020



Figuur 42 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden – maart2020



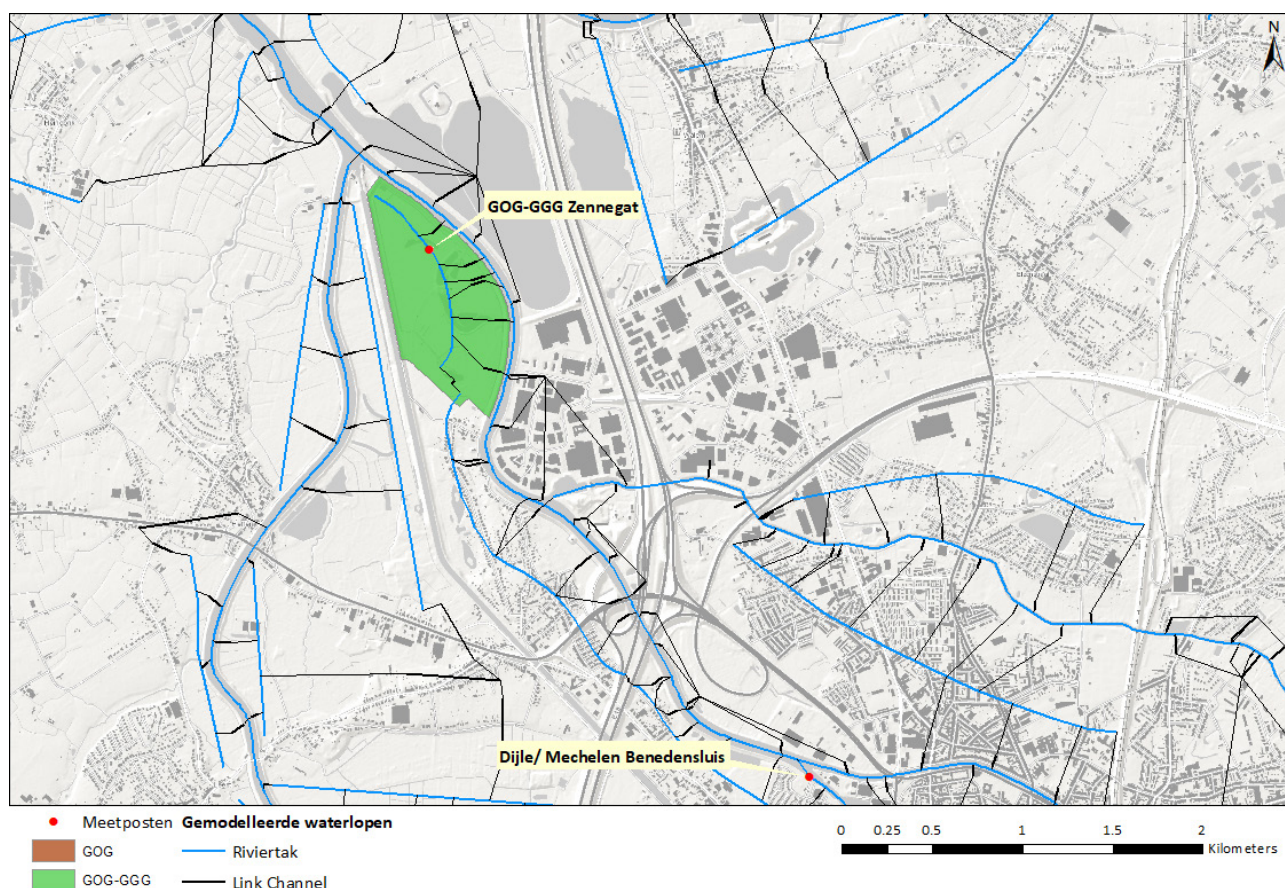
3.4.7 GOG-GGG Zennegat

Het GOG Zennegat omvat een overlooptdijk en een gecombineerde in- en uitwateringsconstructie. Figuur 43 toont de outputlocatie van de meetpost in het GOG. Tabel 15 geeft een overzicht van de belangrijkste kenmerken van het gebied.

Figuur 44 en Figuur 45 tonen de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in GOG-GGG Zennegat, samen met de gemeten en gesimuleerde waterpeilen in de Dijle ter hoogte van Mechelen benedensluis, voor de stormen van feb2020 en maart2020. Tijdens de storm van feb2020 werden de GGG-inwateringssluizen gesloten. Dit werd niet gedaan tijdens de storm van maart2020.

Zowel tijdens de storm van feb2020 als tijdens de storm van maart2020 worden de stormhoogwaters in de Dijle en Zenne overschat in de simulaties. In REF01 leidt dit tot gesimuleerde hoogwaterpeilen in GOG Zennegat die even hoog stijgen als het waterpeil in de rivier. Ook tijdens de storm van maart2020 worden de hoogwaterpeilen in het GOG-GGG overschat in de simulaties. In de periodes met enkel GGG-werking wordt het gemeten waterpeil in het gebied redelijk goed benaderd door de gesimuleerde waterpeilen.

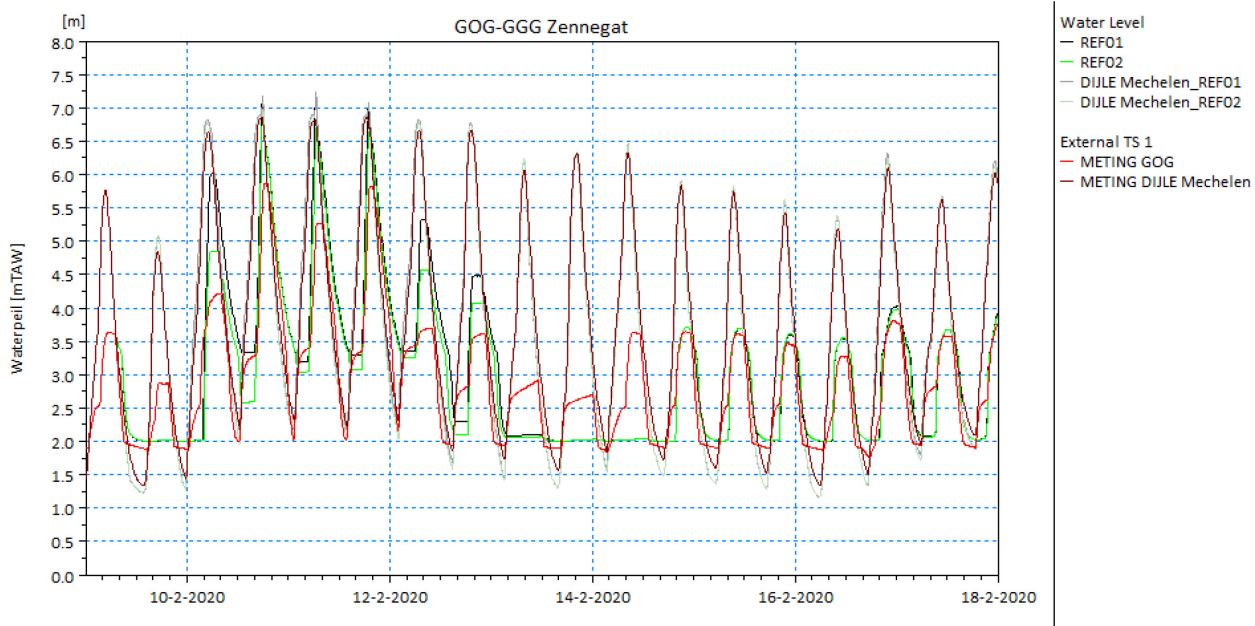
Figuur 43 - Situering meetposten GOG-GGG Zennegat



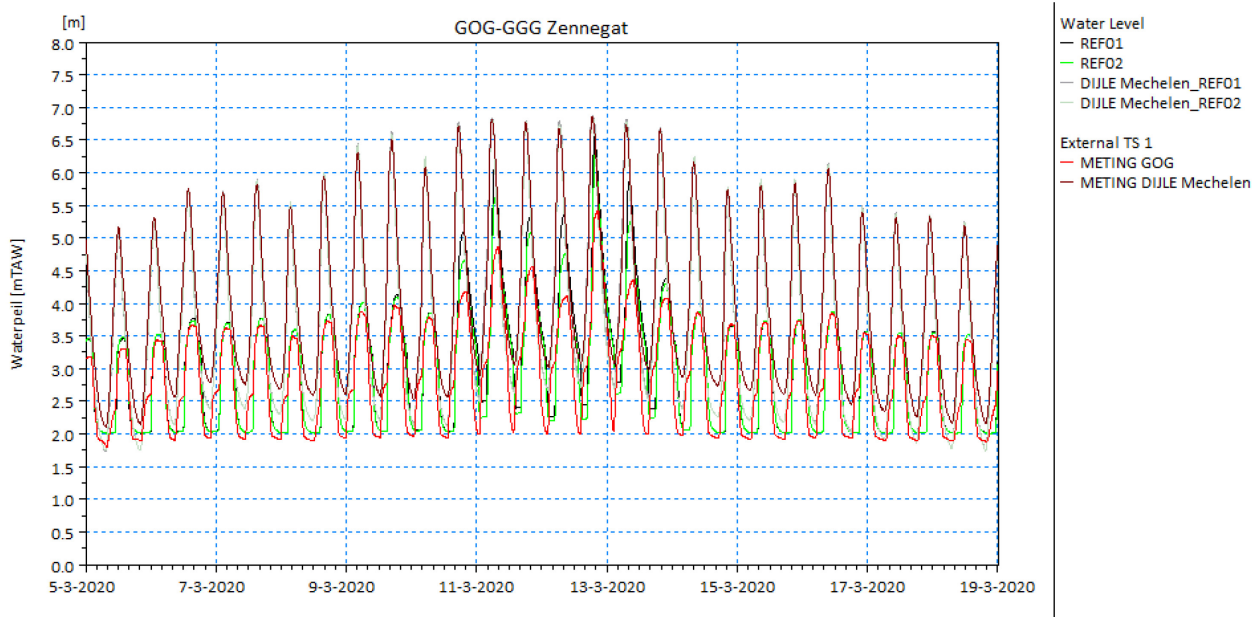
Tabel 16 - Kenmerken GOG-GGG Zennegat

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

Figuur 44 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – feb2020



Figuur 45 - Gemeten en gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat – maart2020



4 Scenario: GGG-inwateringssluizen

Op vraag van de beheerder wordt één scenario (SC01) doorgerekend waarbij de GGG-inwateringssluizen niet gesloten worden tijdens de storm van feb2020. Dit scenario wordt doorgerekend vertrekkende van REF02, met topofactoren voor de wind op 0,6. Gedurende de volledige simulatieperiode blijven de inwateringsluizen van alle GGG's geopend.

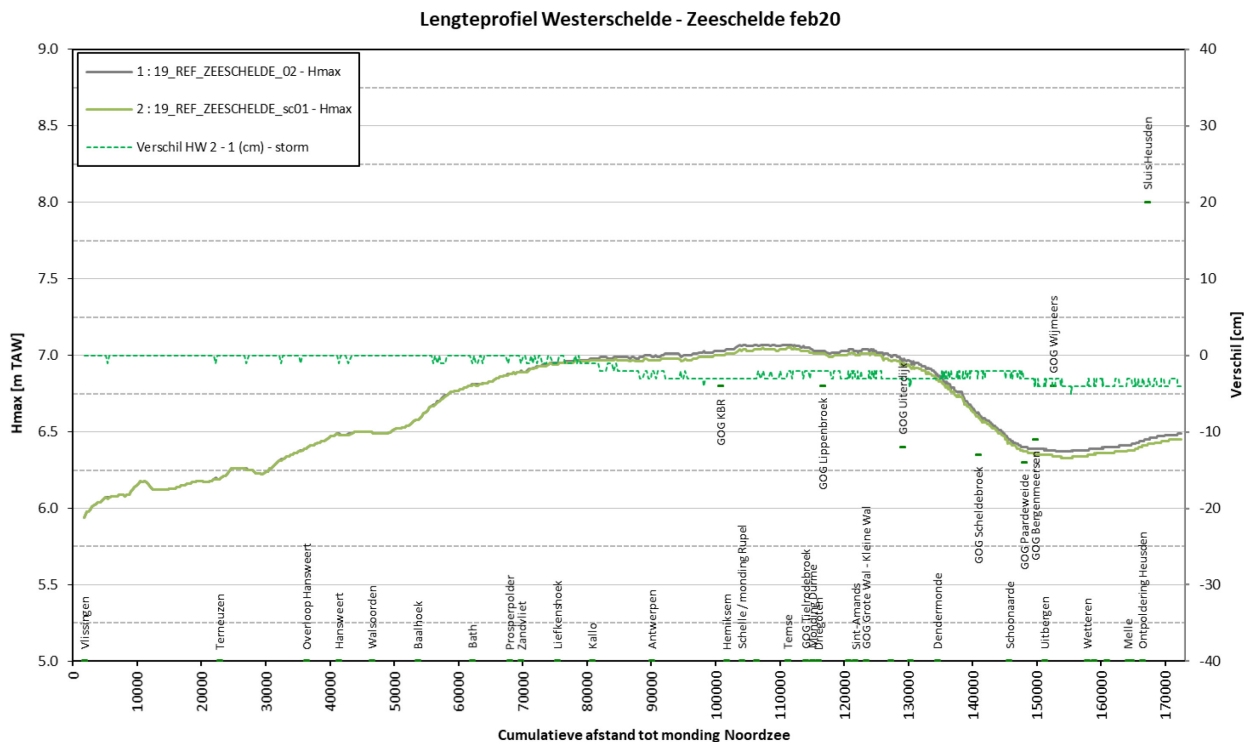
De lengteprofielen in Figuur 40 en Figuur 41 tonen een verschillend effect langs de Zeeschelde en de Dijle. Langs de Zeeschelde treedt een daling van de maximum waterpeilen op met minder dan 5 cm. Deze daling zet zich voort vanaf Liefkenshoek tot Merelbeke. Ook langs de Rupel is deze daling nog zichtbaar. Net opwaarts van de monding van de Dijle in de Rupel treedt echter een stijging van de maximum waterpeilen op. De grootste stijging bedraagt circa 13 cm, ter hoogte van Mechelen benedensluis.

Figuur 42 tot en met Figuur 48 tonen de gesimuleerde waterpeilen in de overstromingsgebieden die ook besproken zijn in §3.4. In de gebieden met GGG langs de Zeeschelde -Kruibeke, Bazel, Lippenbroek en Bergenmeersen- zorgt het geopend blijven van de inwateringsluizen voor hogere waterpeilen in het GOG-GGG. Hierbij blijven de hoogwaters echter nog lager dan de overlooptdijkhoogte van het GOG. Het maximum waterpeil in de Zeeschelde ter hoogte van deze gebieden daalt telkens met enkele centimeters. In GOG Scheldebreek zijn de gesimuleerde waterpeilen voor SC01 lager dan deze voor REF02 tijdens de stormperiode (zie Figuur 45). Bij het hoogste hoogwater bedraagt het verschil meer dan 30 cm. Er blijft dus meer bergingscapaciteit in het GOG over.

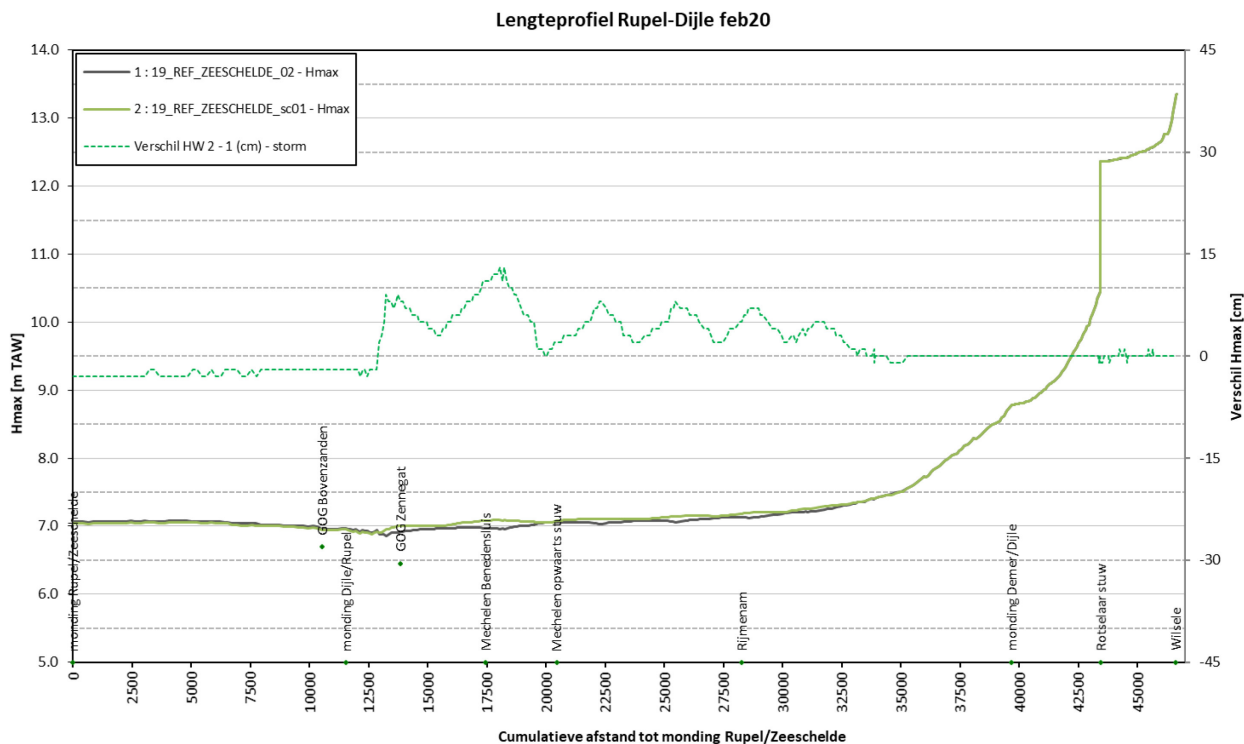
Ook in GOG Bovenzanden zijn de waterpeilen tijdens de stormperiode lager voor SC01 ten opzichte van REF02 (zie Figuur 47). Bij het hoogste hoogwater bedraagt het verschil circa 30 cm.

In GOG-GGG Zennegat zorgt het geopend laten van de GGG-inwateringsluizen voor een stijging van de waterpeilen tijdens de stormperiode waardoor de drie hoogste hoogwaters boven de overlooptdijkhoogte komen, en gelijk met het waterpeil in de Dijle. Er is dus geen resterende bergingscapaciteit meer in het GOG. Hierdoor stijgt ook het maximum waterpeil op- en afwaarts van het gebied in de Dijle.

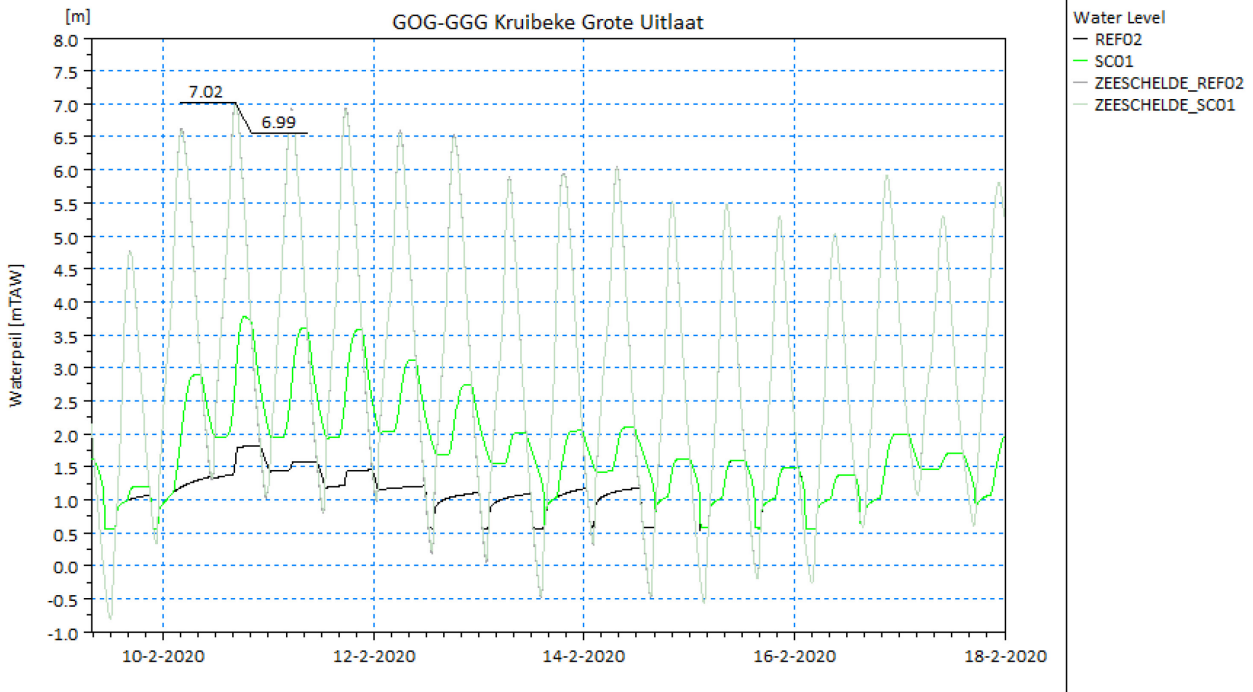
Figuur 46 - Lengteprofiel met gesimuleerde maximum waterpeilen Westerschelde en Zeeschelde – REF02 en SC01 - storm feb2020



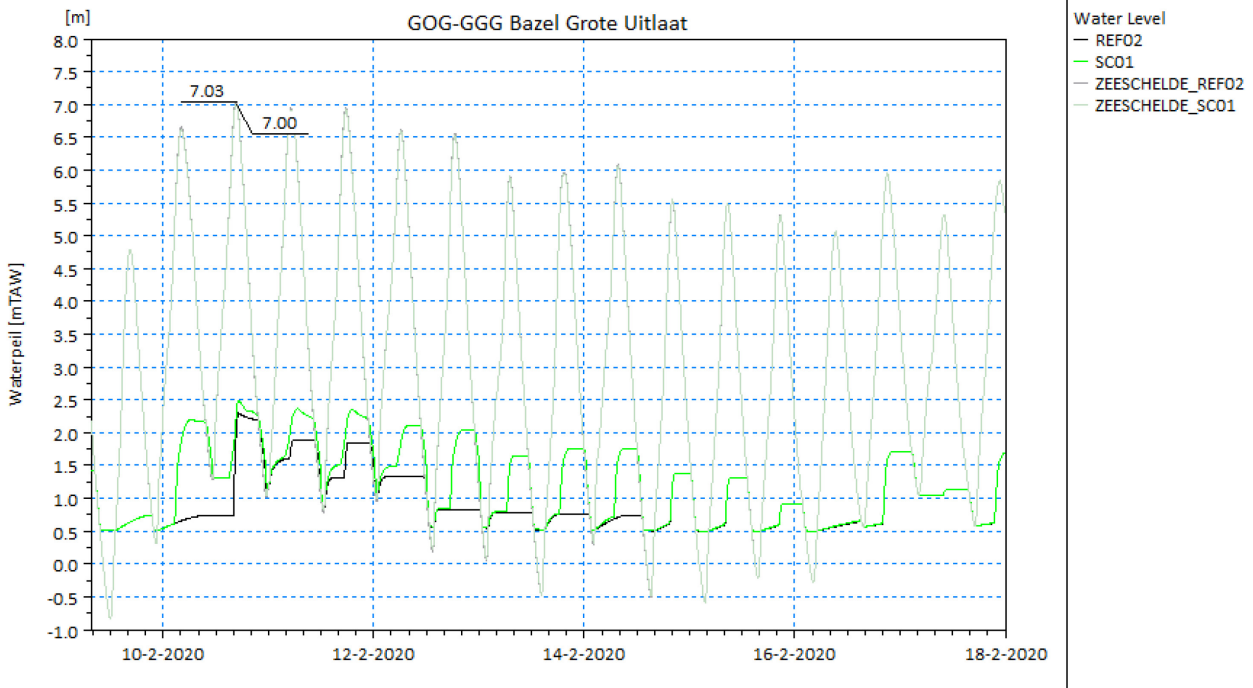
Figuur 47 - Lengteprofiel met gesimuleerde maximum waterpeilen Rupel en Dijle – REF02 en SC01 - storm feb2020



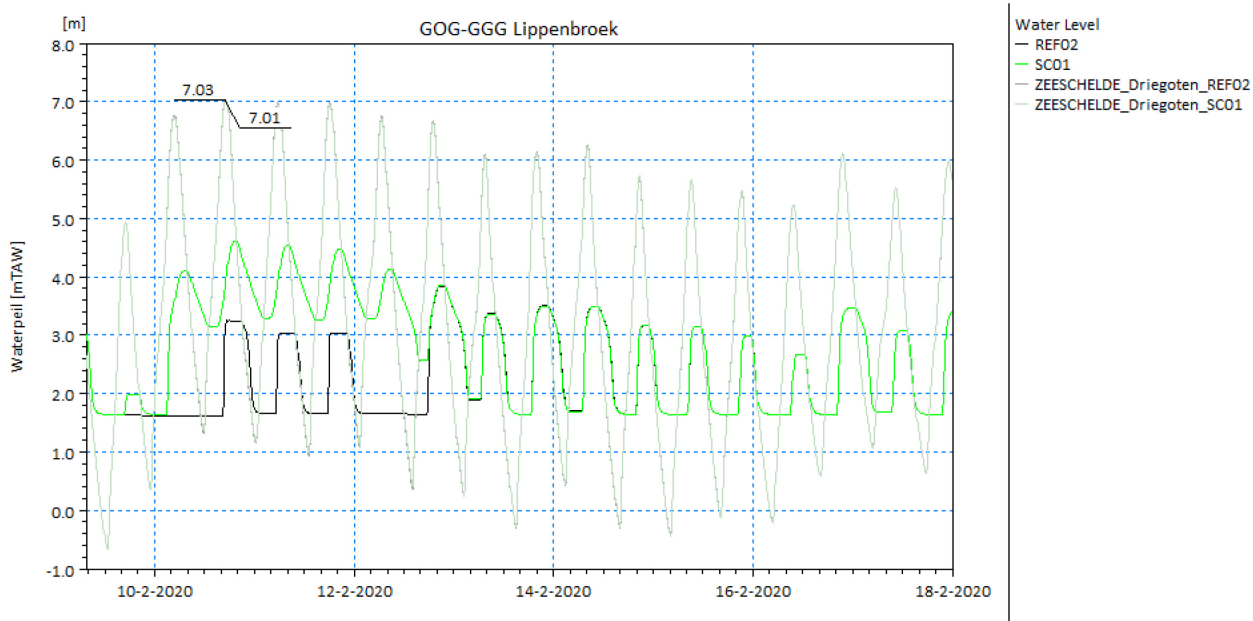
Figuur 48 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Kruibeke Grote Uitlaat- REF02 en SC01 – feb2020



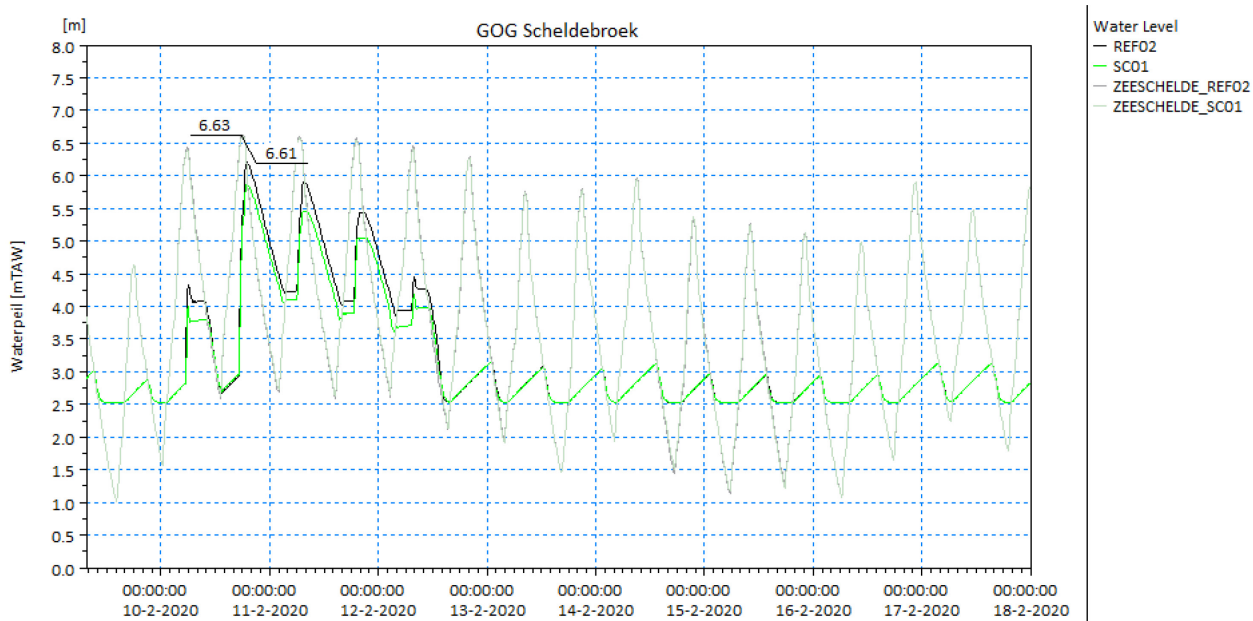
Figuur 49 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bazel Grote Uitlaat- REF02 en SC01 – feb2020



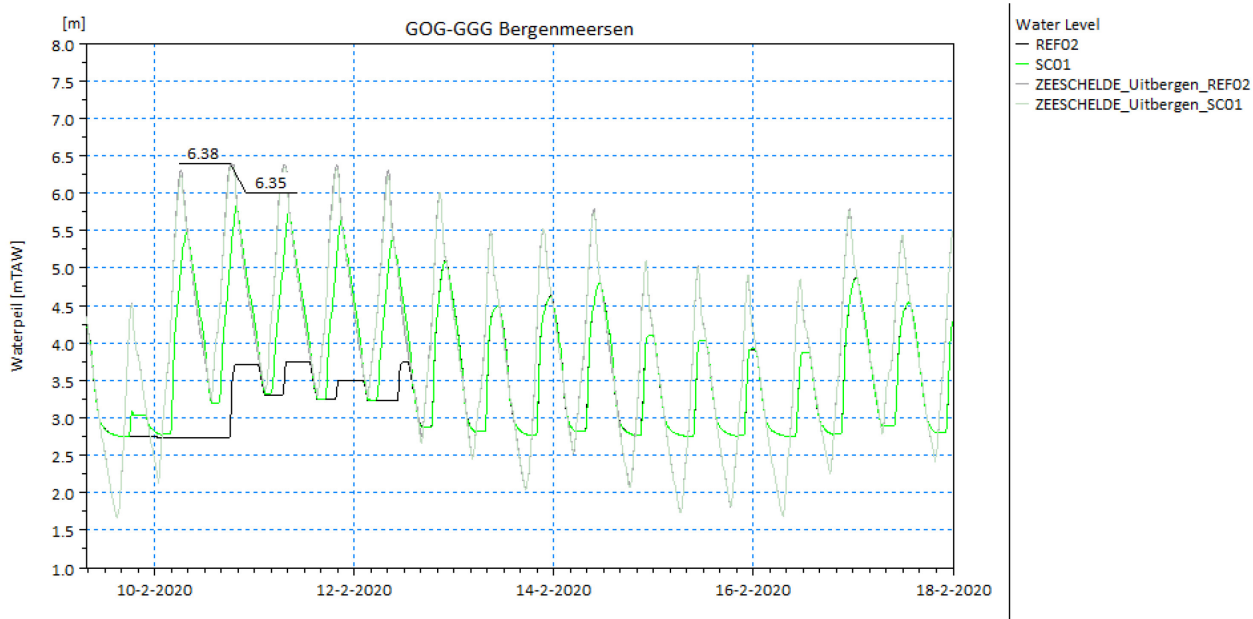
Figuur 50 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Lippenbroek - REF02 en SC01 – feb2020



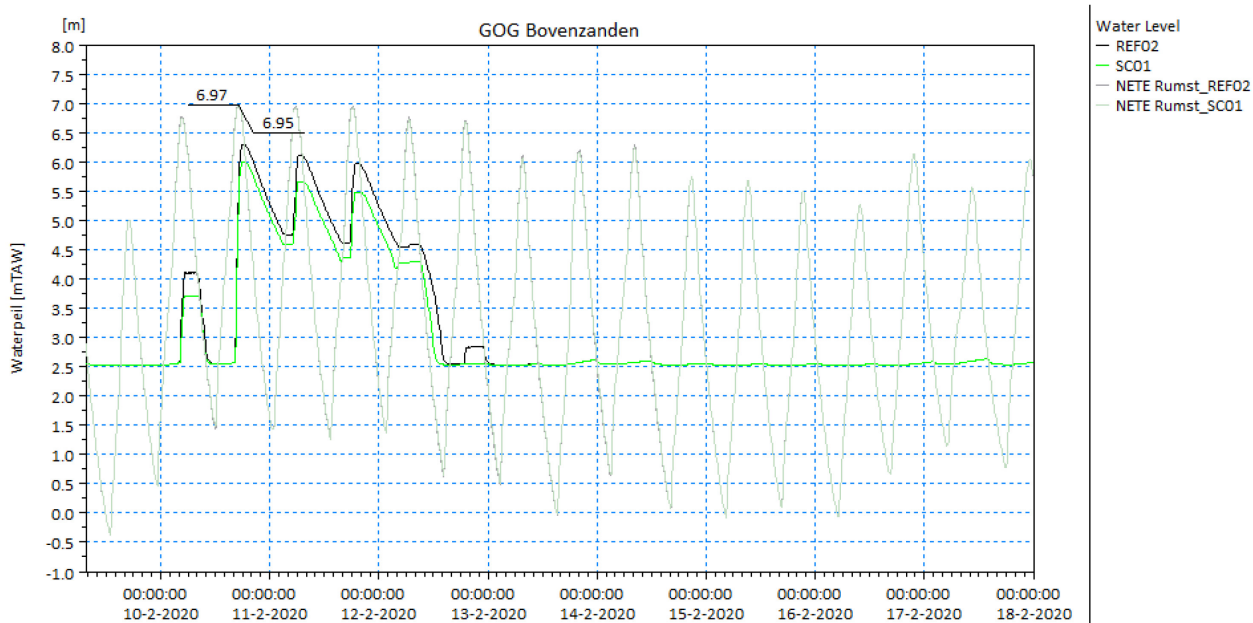
Figuur 51 - Gesimuleerde waterpeilen GOG Scheldebroek - REF02 en SC01 – feb2020



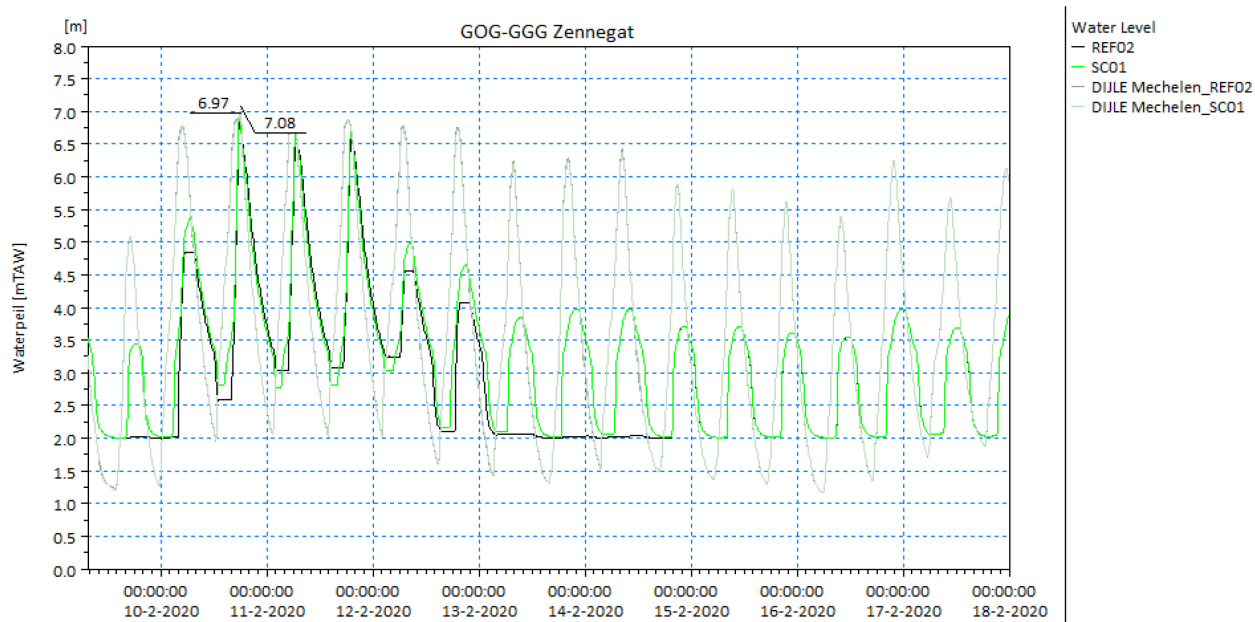
Figuur 52 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Bergenmeersen - REF02 en SC01 – feb2020



Figuur 53 - Gesimuleerde waterpeilen GOG Bovenzanden - REF02 en SC01 – feb2020



Figuur 54 - Gesimuleerde waterpeilen GOG-GGG Zennegat - REF02 en SC01 – feb2020



5 Conclusies en aanbevelingen

De stormen van 10-11 februari 2020 en 12 maart 2020 zorgden voor een verhoging van het hoogwater in het Zeescheldebekken, met als gevolg een overschrijding van de drempel voor Stormtij Zeescheldebekken. De storm van 12 maart 2020 werd voorafgegaan door een periode met verhoogde bovenafvoer door grote neerslaghoeveelheden in de eerste helft van maart.

Met het recent geactualiseerde 1D-referentiemodel van de Zeeschelde werden deze stormen nagerekend. Bij de actualisatie van het Zeescheldemodel werden de topofactoren voor de wind gewijzigd. Om het effect hiervan na te gaan, werden de stormen eveneens doorgerekend met de topofactoren uit de vorige modelversie. De resultaten van deze berekening werden gebruikt voor een evaluatie van de performantie van het model. Hieruit blijkt dat de hoogwaters tijdens de stormen veelal overschat worden. Deze overschatting is groter bij gebruik van de nieuwe topofactoren. De aangepaste topofactoren leiden tot een verhoging van de waterpeilen tijdens de stormperiode, die zich doorzet tot Sint-Amands. Opwaarts Sint-Amands, en naarmate de invloed van de bovenafvoer groter wordt, wordt dit effect kleiner.

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 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. Dit zou op het terrein moeten gecontroleerd worden. Het gemodelleerde waterpeil in het GOG is echter ook afhankelijk van het gemodelleerde waterpeil in de waterloop.

Deze vaststellingen leiden tot de aanbeveling om de aanpassing van de topofactoren te valideren, en eventueel een herkalibratie uit te voeren. Hiervoor dienen meerdere stormen uit de laatste 5 jaar doorgerekend te worden.

Op vraag van de beheerder werd bijkomend een scenario doorgerekend waarbij de inwateringssluizen van de GOG-GGG's niet gesloten werden tijdens de storm van februari 2020. Dit leidde tot een verschillend effect langs de Zeeschelde, Rupel en de Dijle. Langs de Zeeschelde en Rupel treedt een beperkte daling op van het maximum waterpeil tijdens de storm. Dit is ook zo in het GOG Scheldebreek. In de GOG's met GGG langs de Zeeschelde treedt een stijging op van het maximum waterpeil, maar blijft het hoogwater onder de overlooptijlhoogte. In GOG-GGG Zennegat echter stijgt het maximum waterpeil boven de hoogte van de overlooptijl. Door de GGG-vulling voor de storm is de resterende bergingscapaciteit in het gebied niet meer voldoende, met een stijging van het maximum waterpeil zowel in het GOG als opwaarts langs de Dijle tot gevolg.

6 Referenties

Bogman, P.; Vanderkimpfen, P.; Boey, I.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2014). Optimalisatie Sigmaplan Demer: deelrapport 1. Impact instrumentarium. *WL Rapporten*, 14_105. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen

Coen, L.; Deschamps, M.; Vanderkimpfen, P.; Mostaert, F. (2018). Hindcast storm 3 januari 2018 met 1D-modellen: 30/12/2017 - 09/01/2018: Antwerpen

DHI. (2012). MIKE11. A modelling system for rivers and channels. Reference manuel. MIKE by DHI

Hydrologisch Informatiecentrum. (2019). Scheldeflits 2019 - 01: hoogwater 30 september 2019. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=321676>

Hydrologisch Informatiecentrum. (2020). Scheldeflits 2020 - 01: hoogwaters 10-12 februari 2020. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=321665>

International Marine and Dredging Consultants. (2018). Actualisatie en verbetering van de hydrodynamische modellen van het beheersgebied van De Vlaamse Waterweg, afdeling Bovenschelde: deelrapport 2. Hydrodynamisch model LBSGK, actualisatie 2017. versie 2.0. De Vlaamse Waterweg, Afdeling Bovenschelde: Merelbeke. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=328358>

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

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 Tijdreeksen waterpeilen rivieren

Legende

Blauw = 19_REF_zeeschelde_01 (topofactor 1.0)

Rood = 19_REF_zeeschelde_02 (topofactor 0.6)

Geel = meting

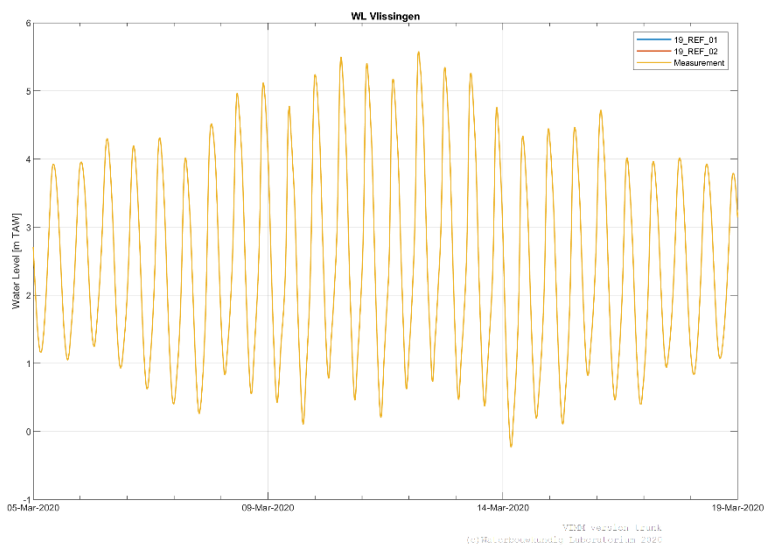
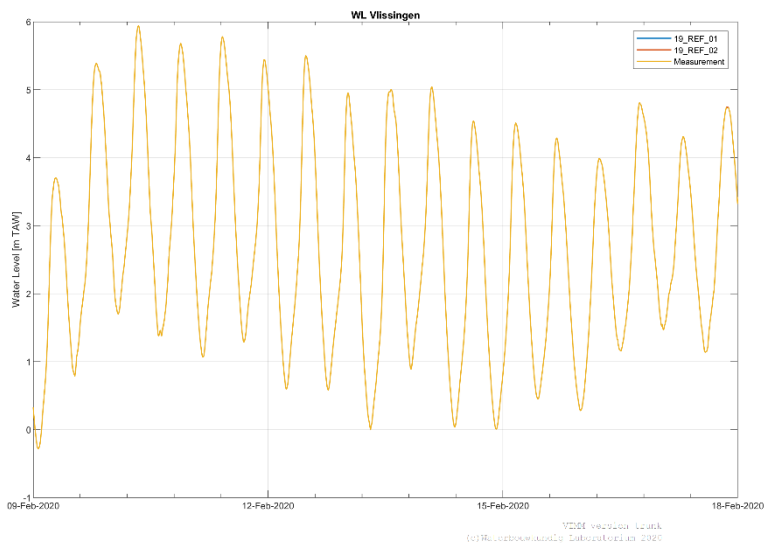
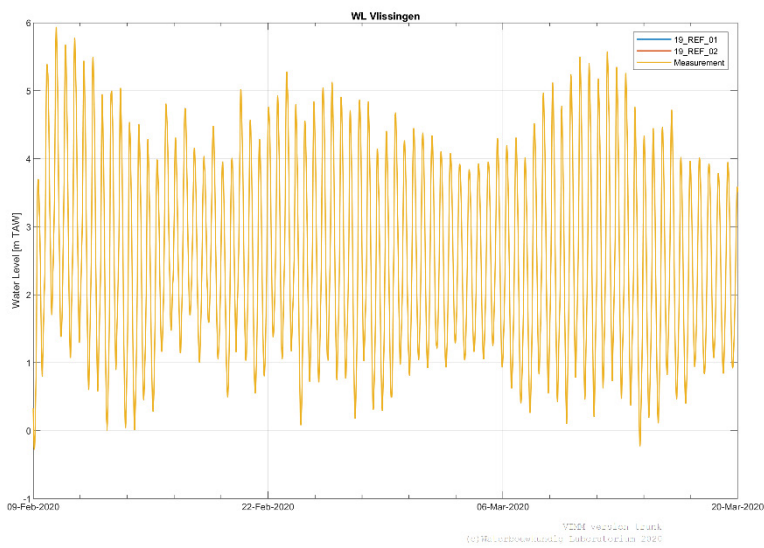
Per meetpost

Boven: volledige simulatieperiode

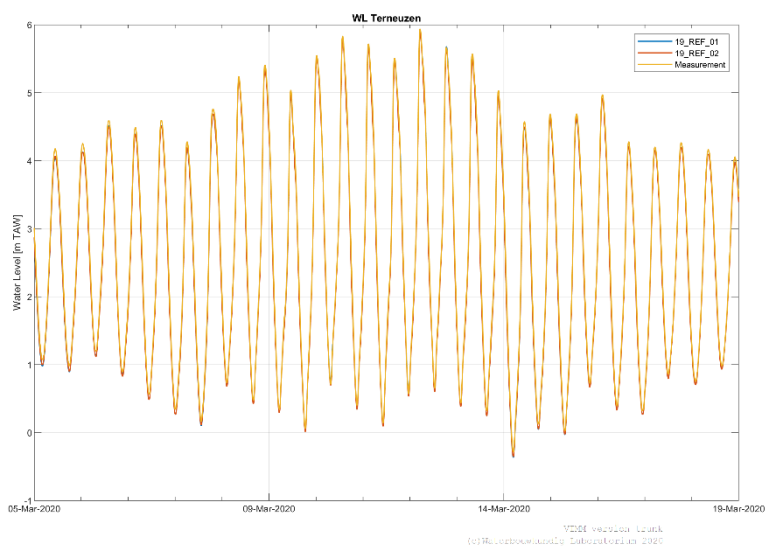
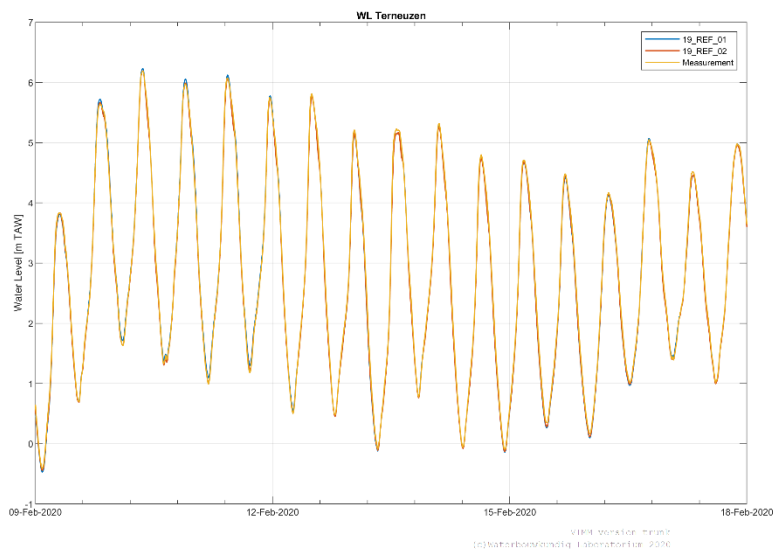
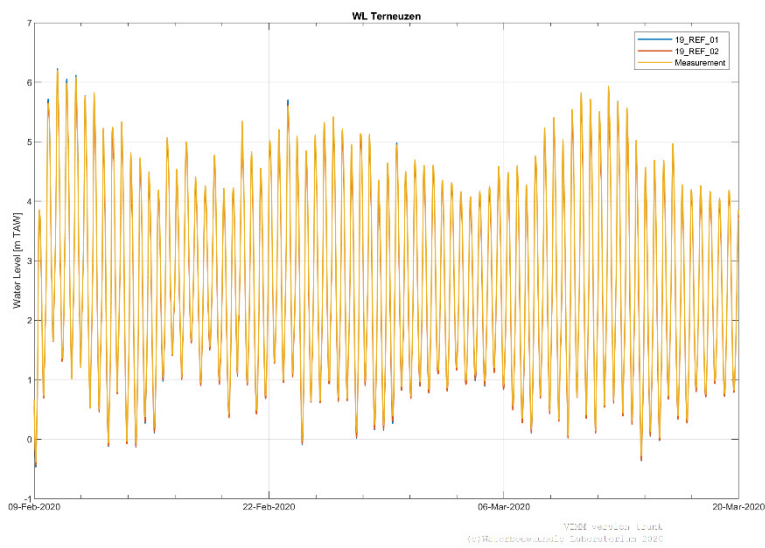
Midden: deelperiode storm feb2020

Onder: deelperiode storm maart2020

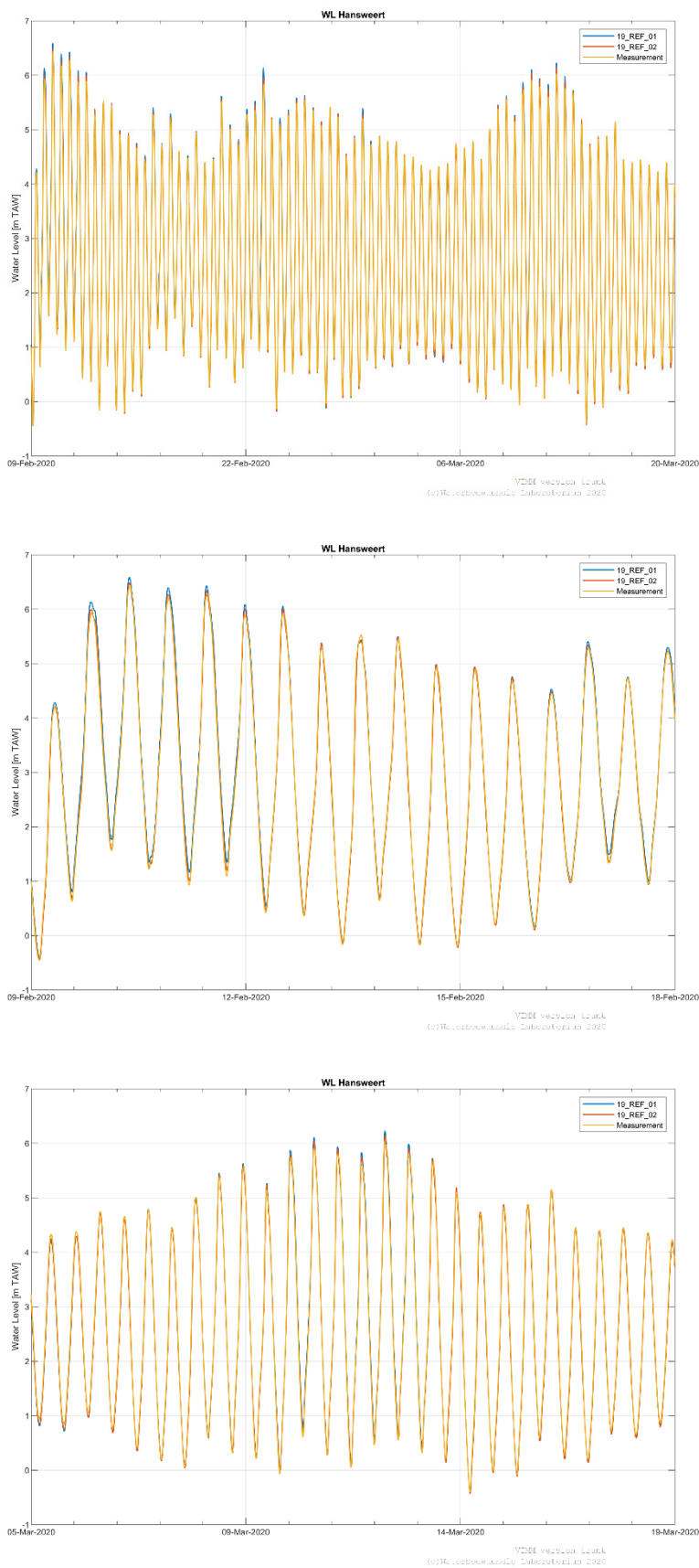
Figuur A 1 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Vlissingen



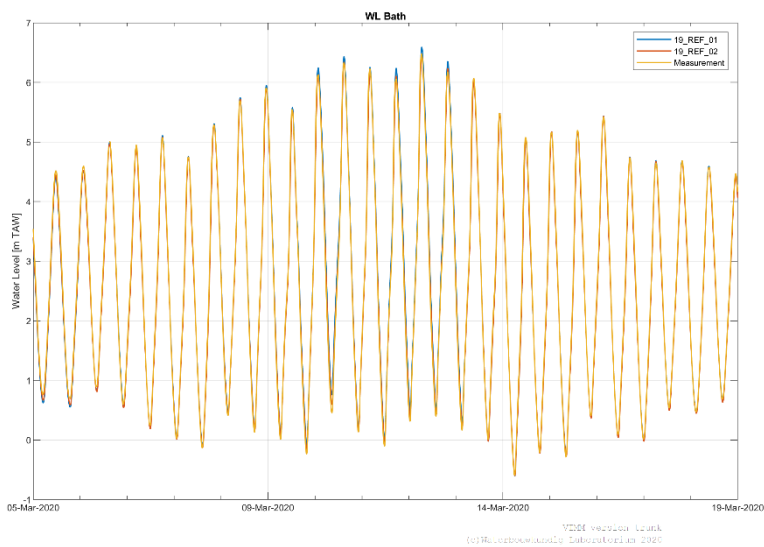
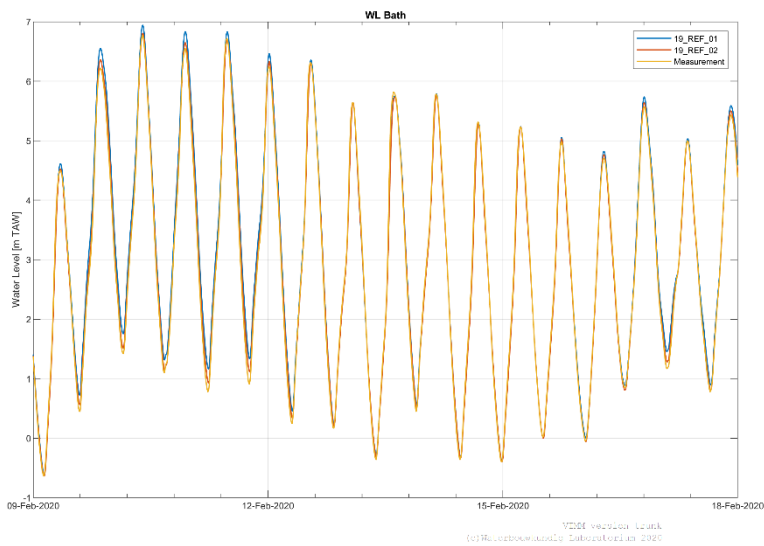
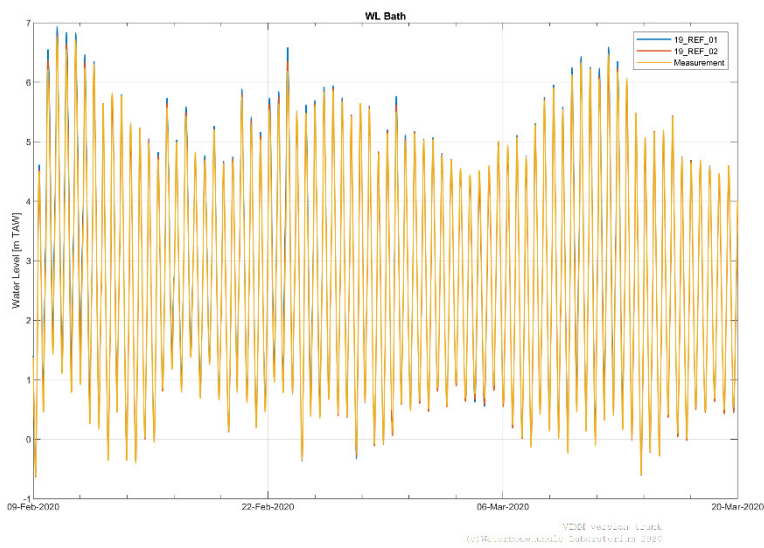
Figuur A 2 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Terneuzen



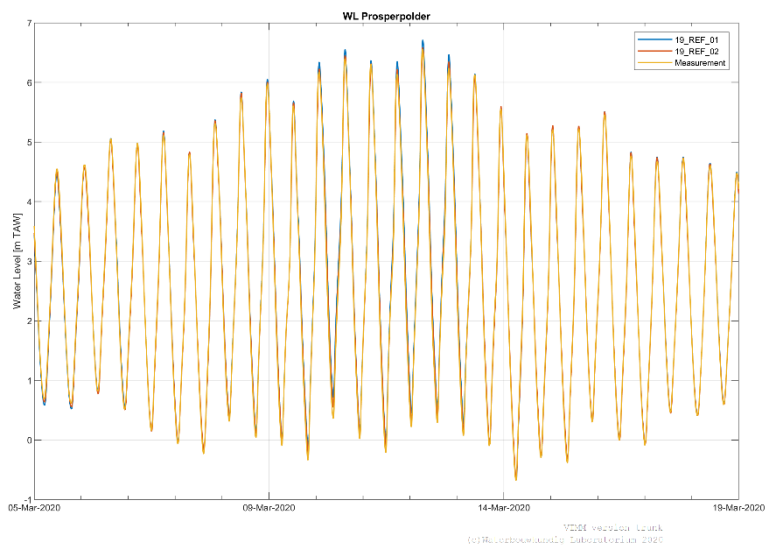
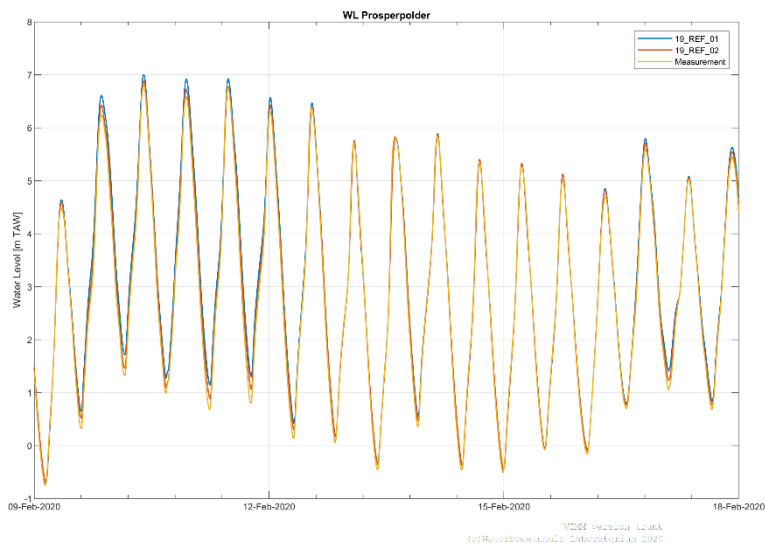
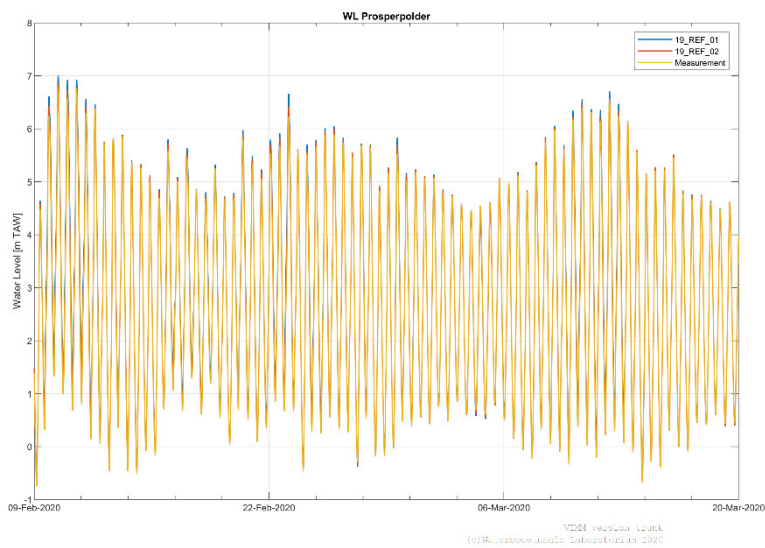
Figuur A 3 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Hansweert



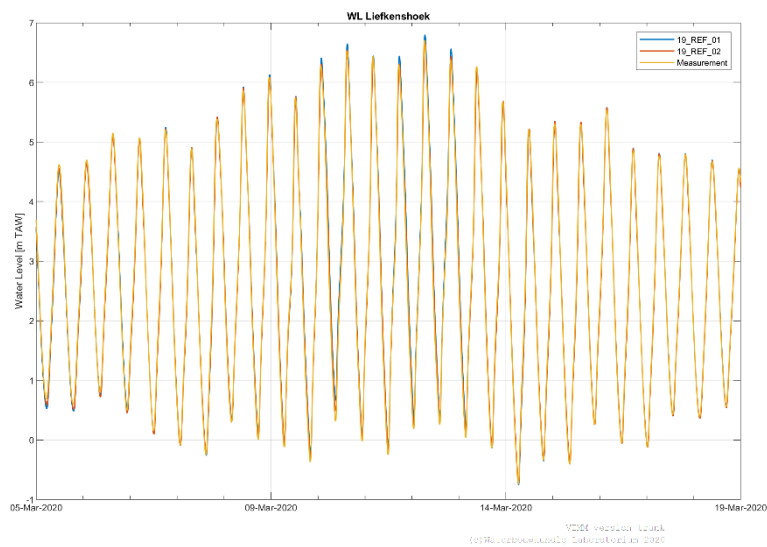
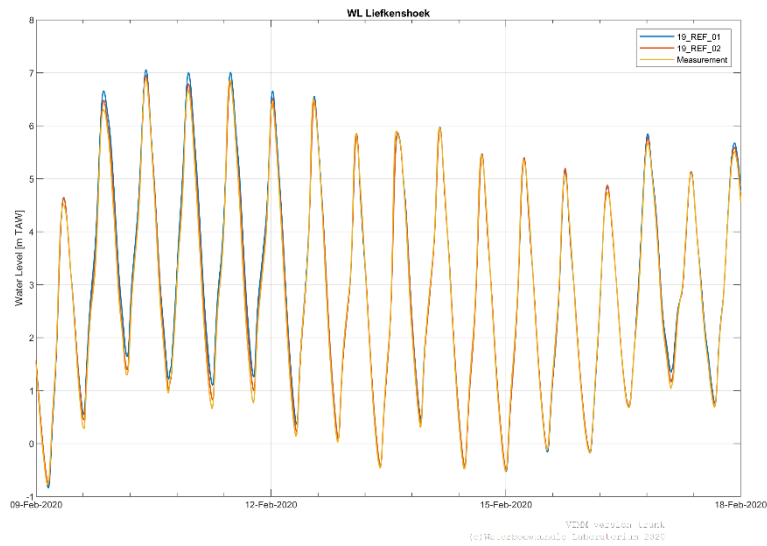
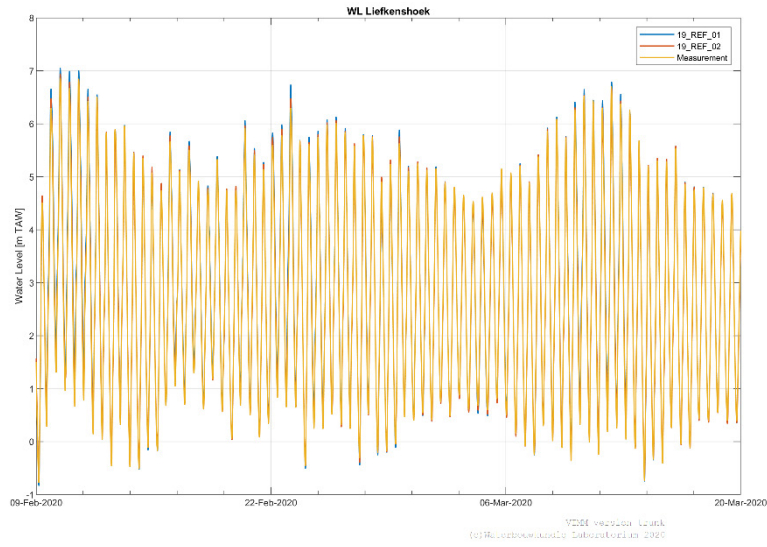
Figuur A 4 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Westerschelde te Bath



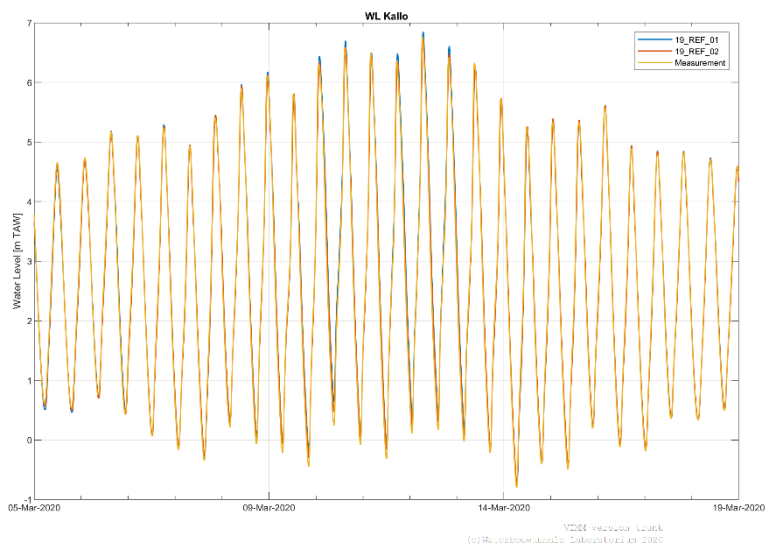
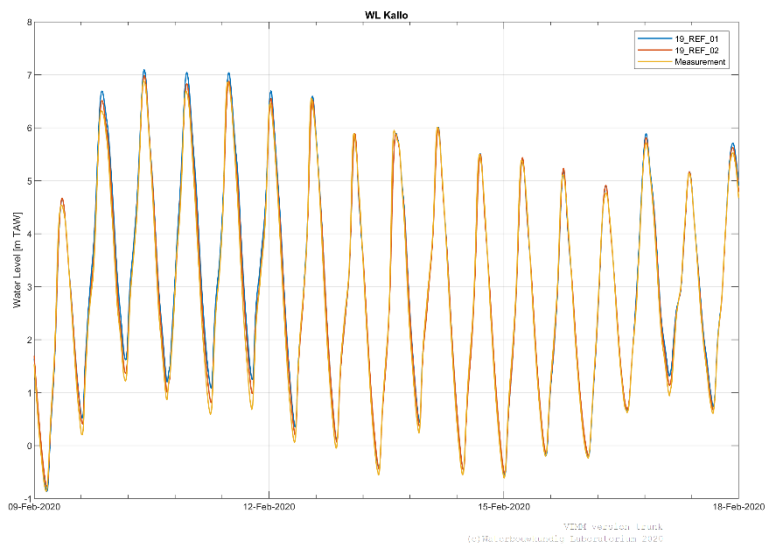
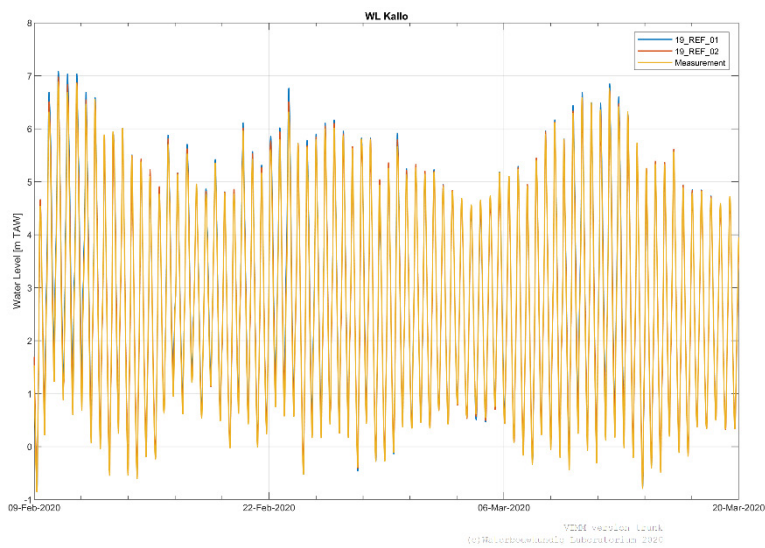
Figuur A 5 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Prosperpolder



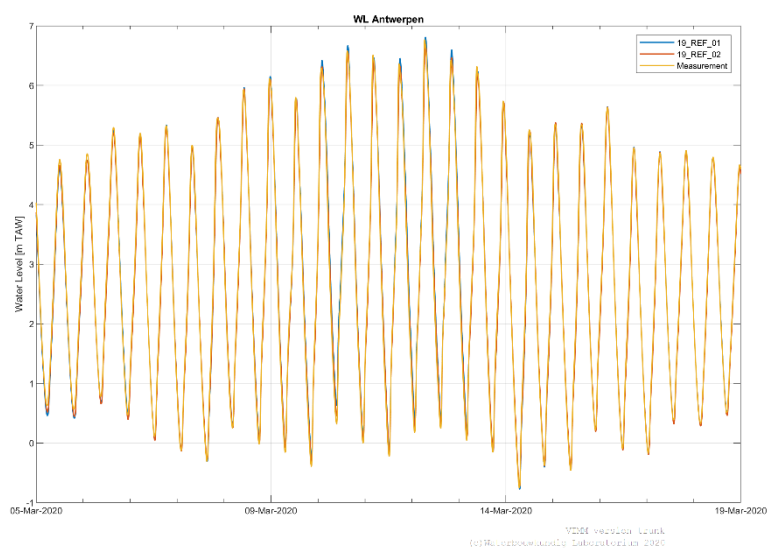
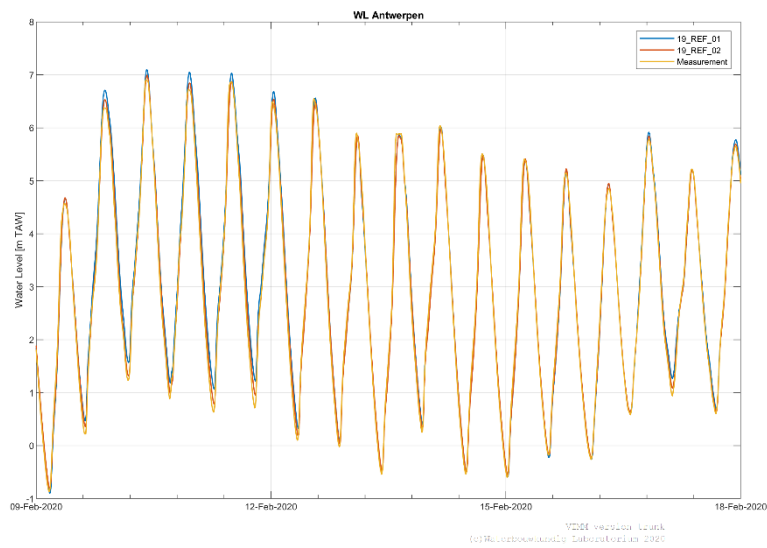
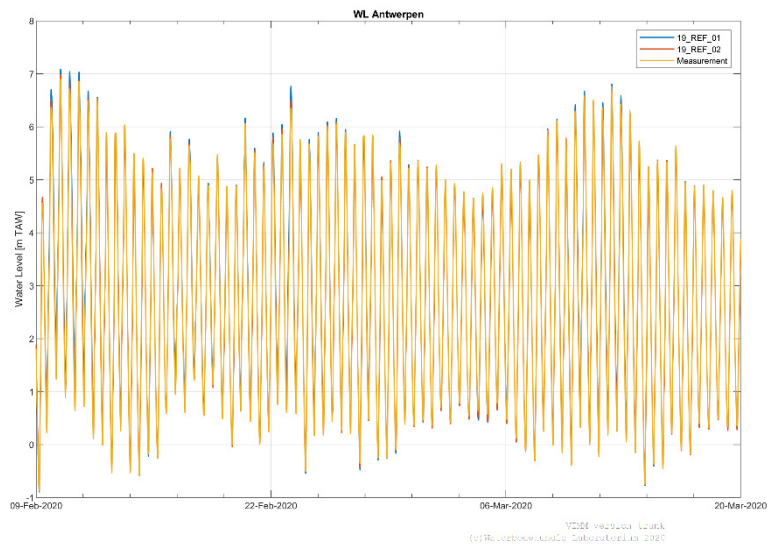
Figuur A 6 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Liefkenshoek



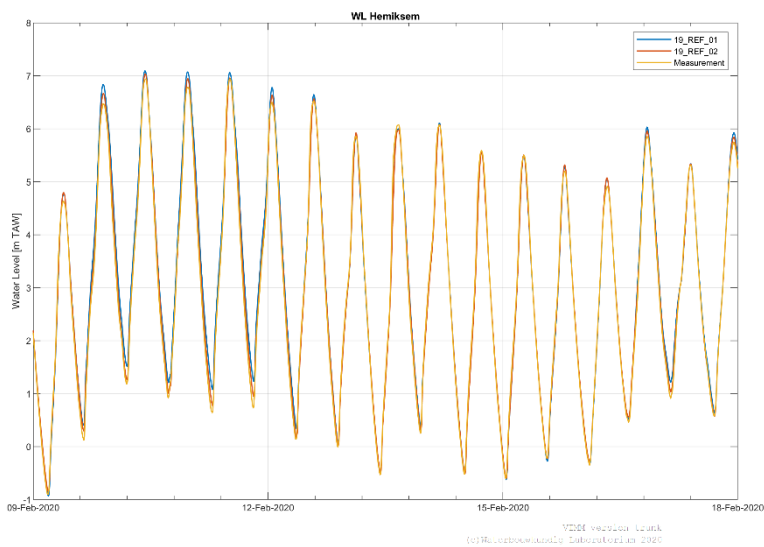
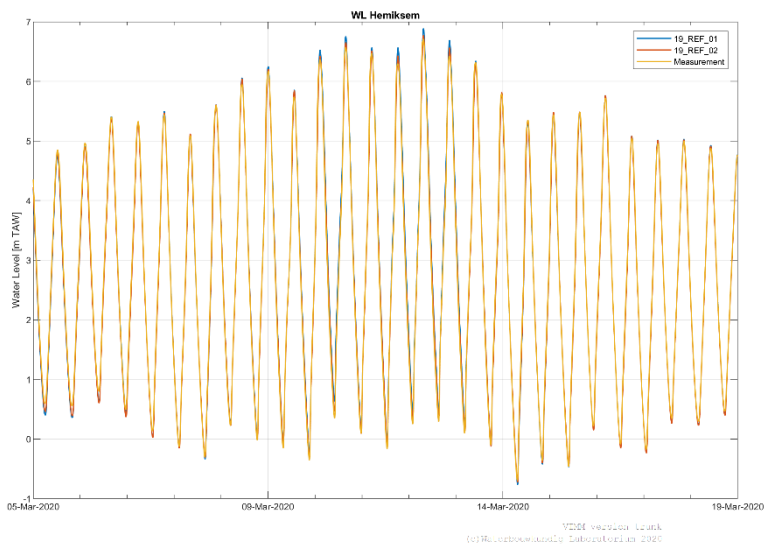
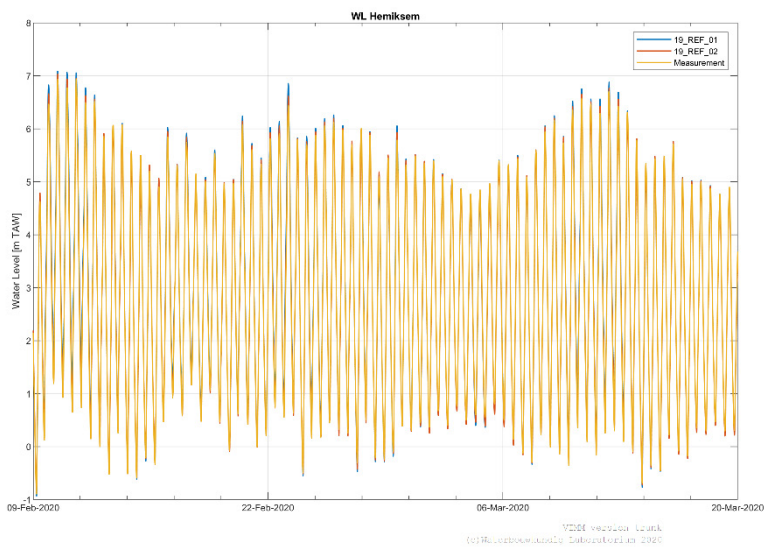
Figuur A 7 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Kallo



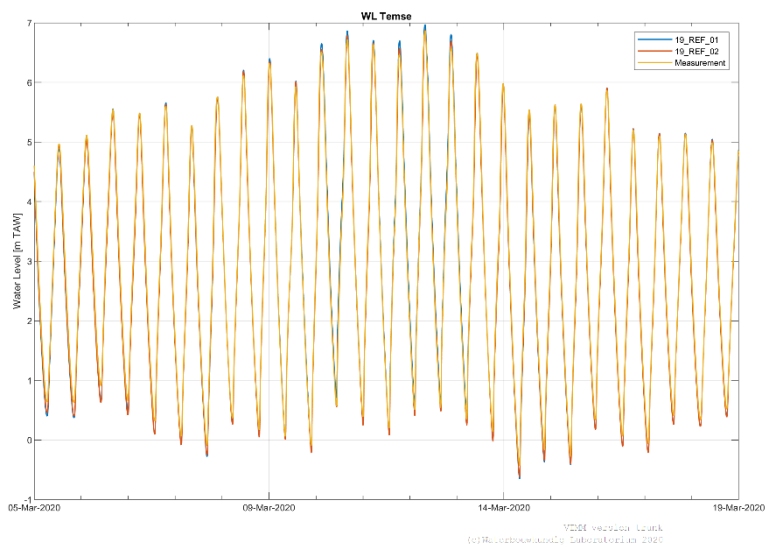
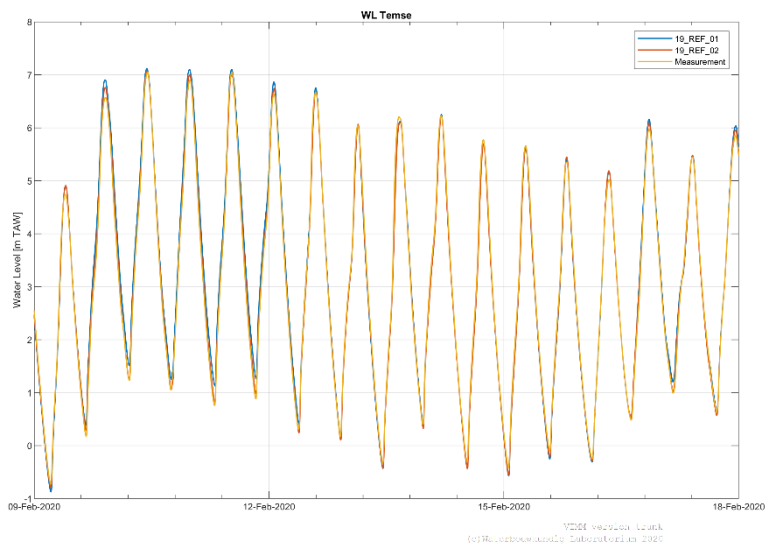
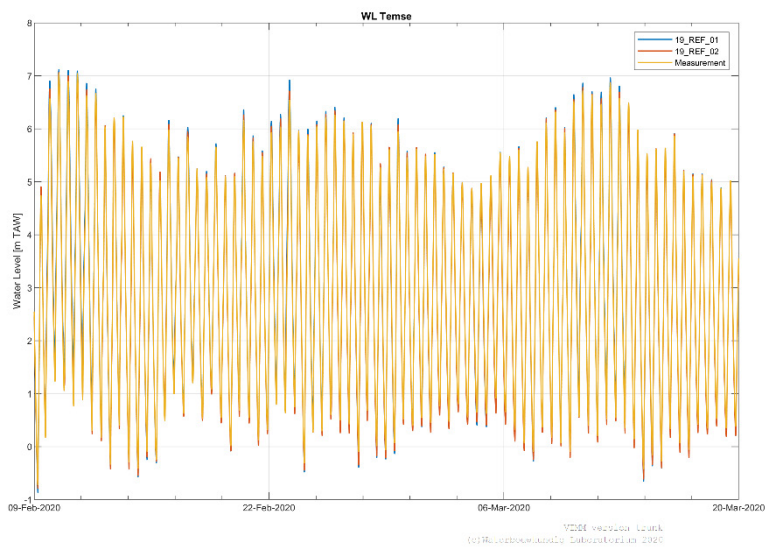
Figuur A 8 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Antwerpen



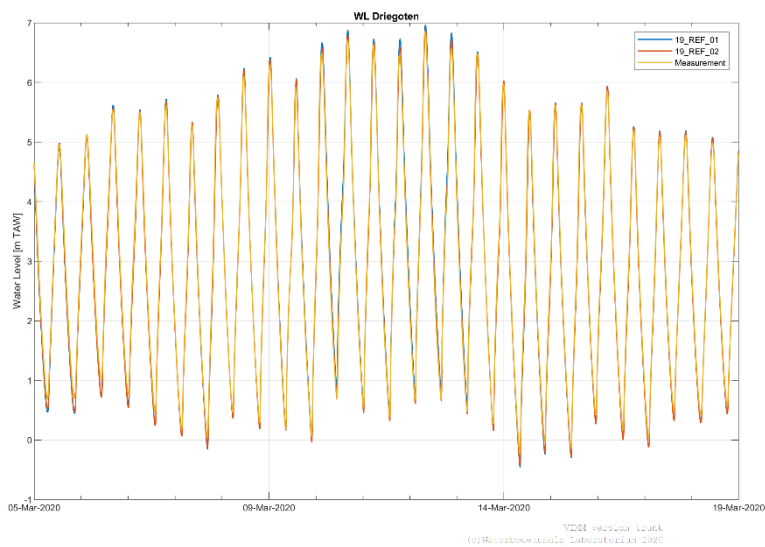
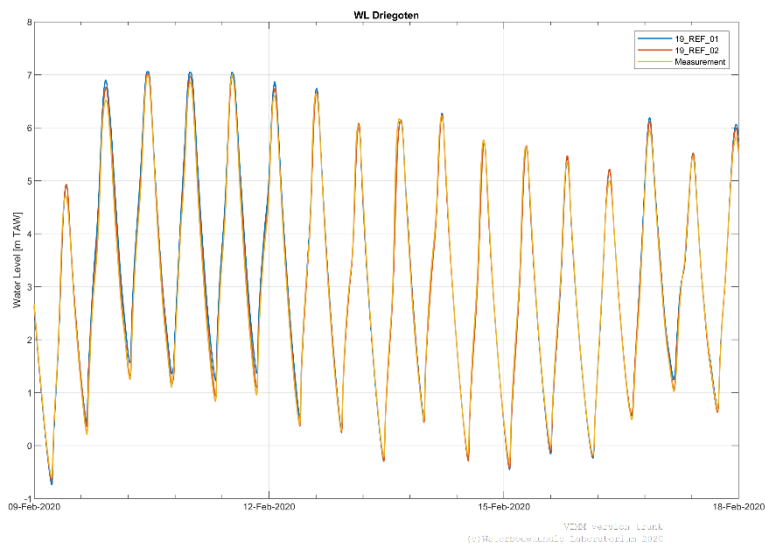
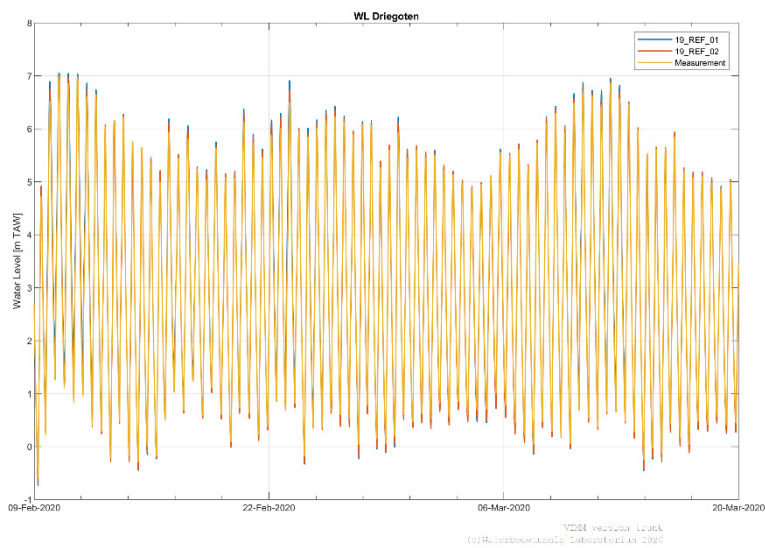
Figuur A 9 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Hemiksem



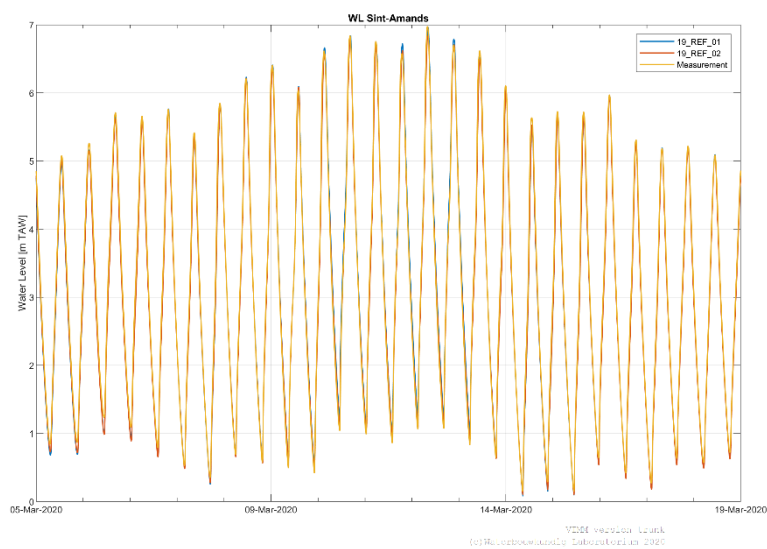
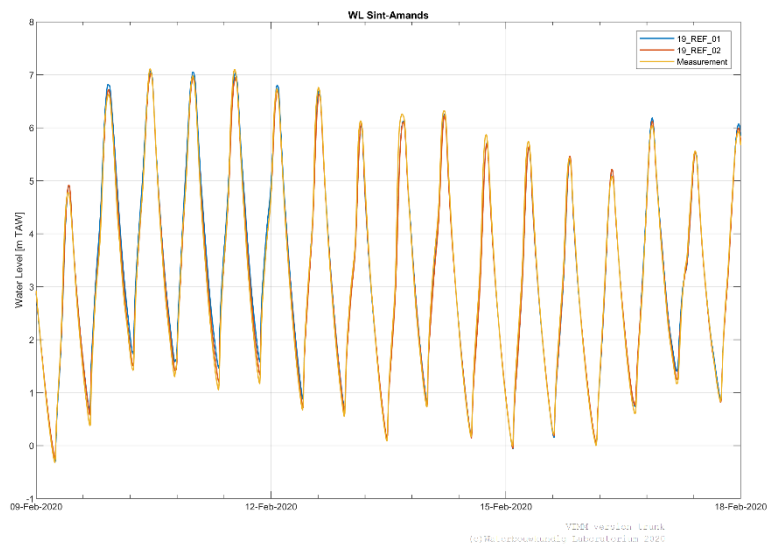
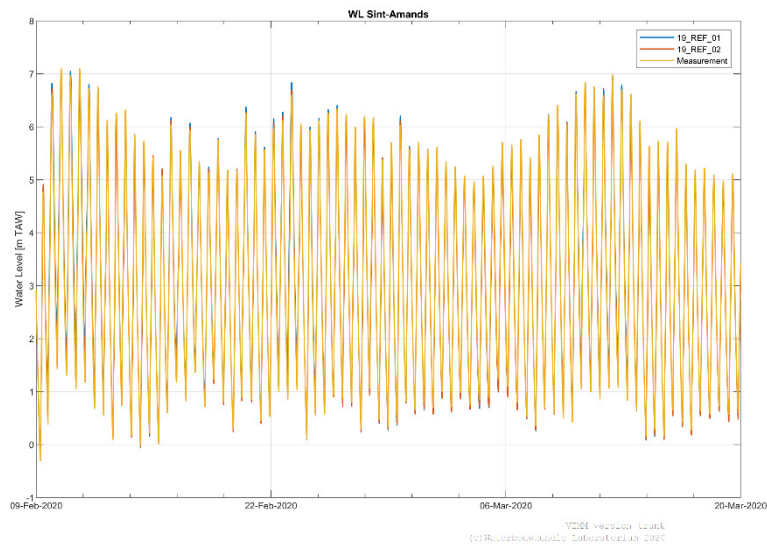
Figuur A 10 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Temse



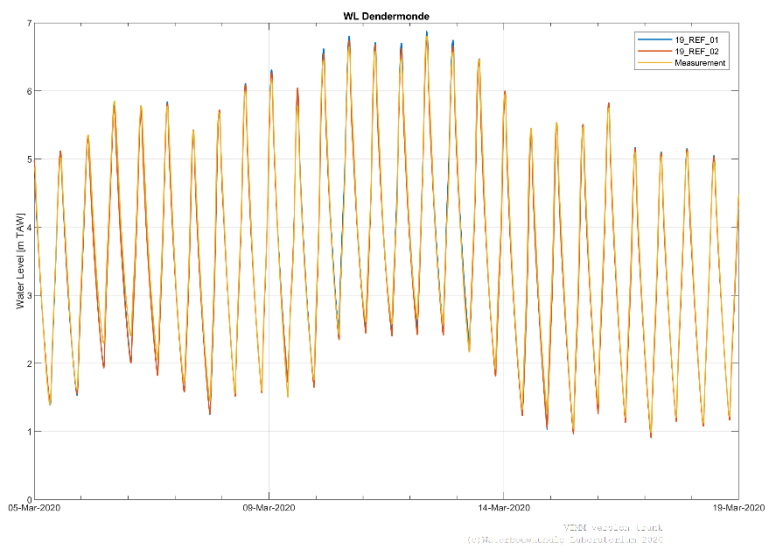
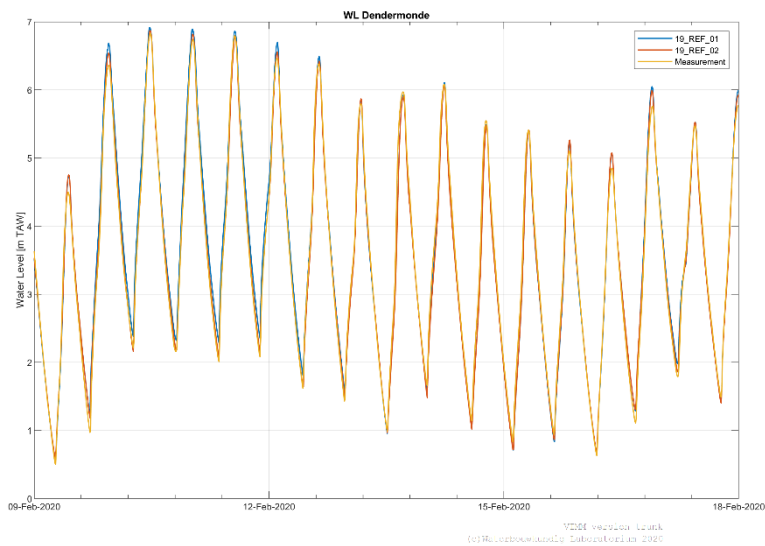
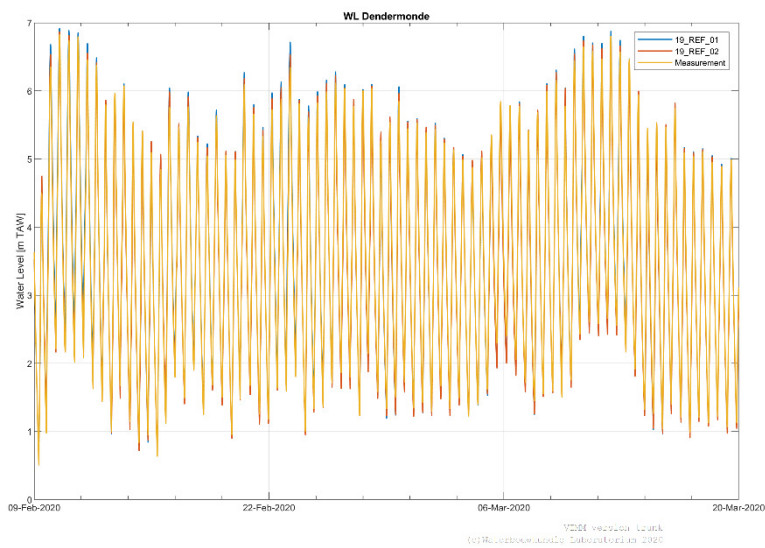
Figuur A 11 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Driegoten



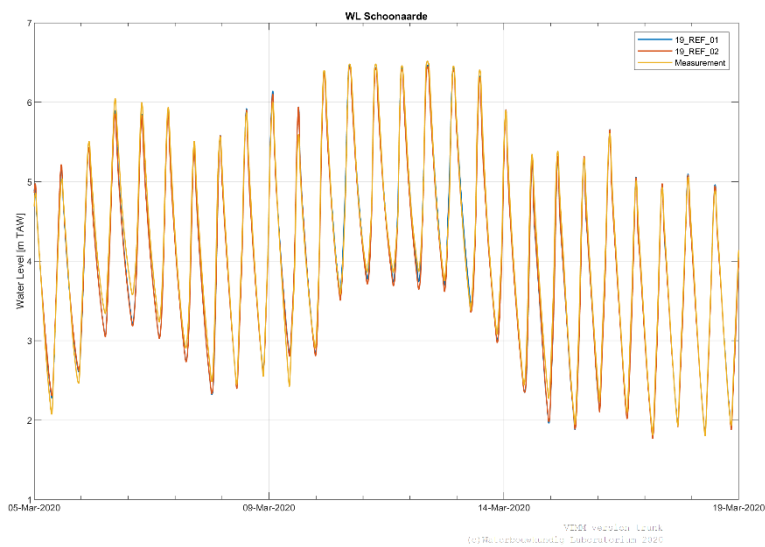
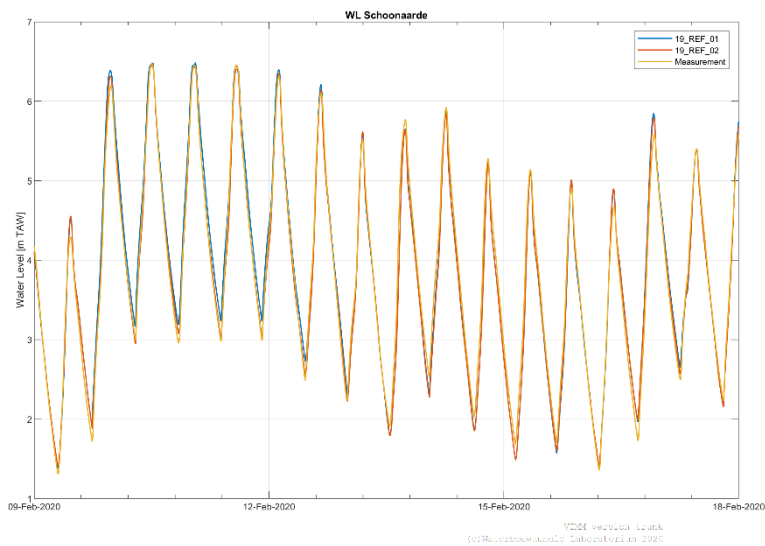
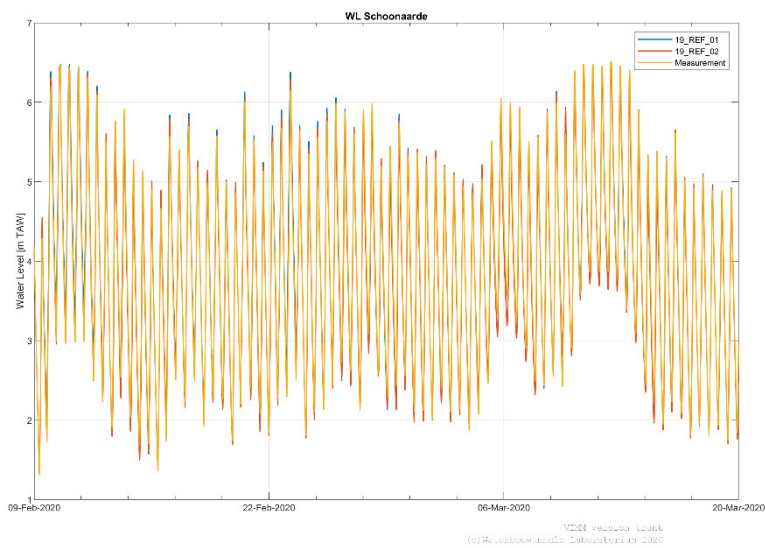
Figuur A 12 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Sint-Amands



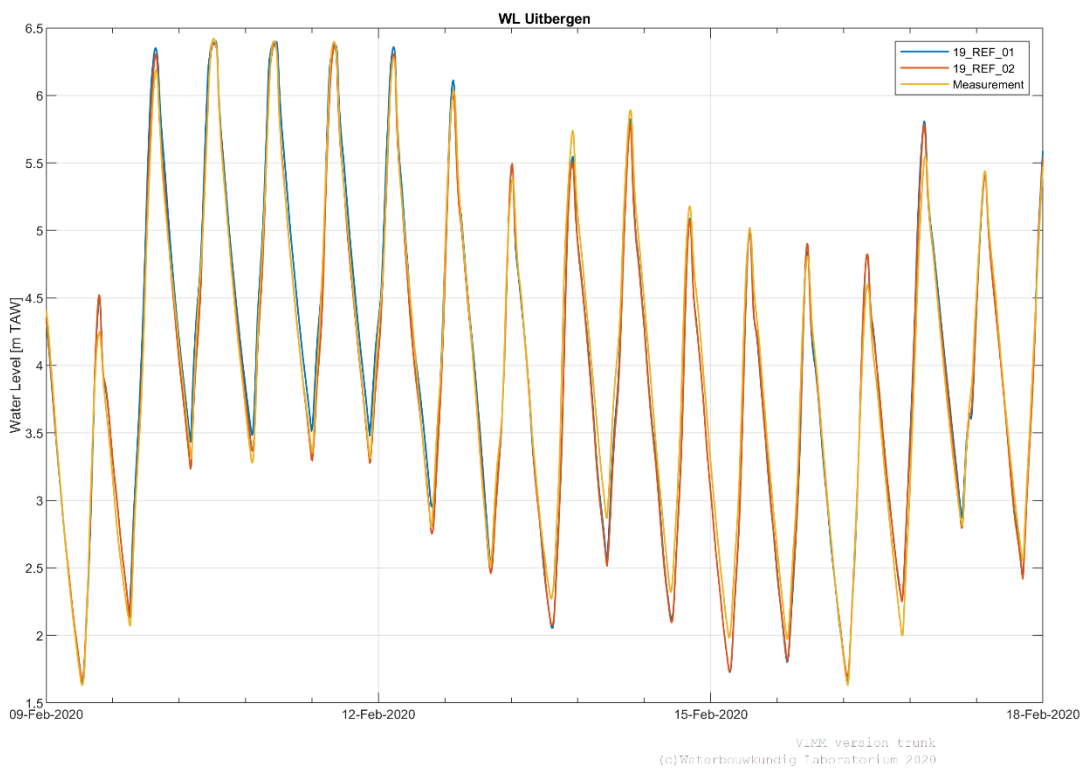
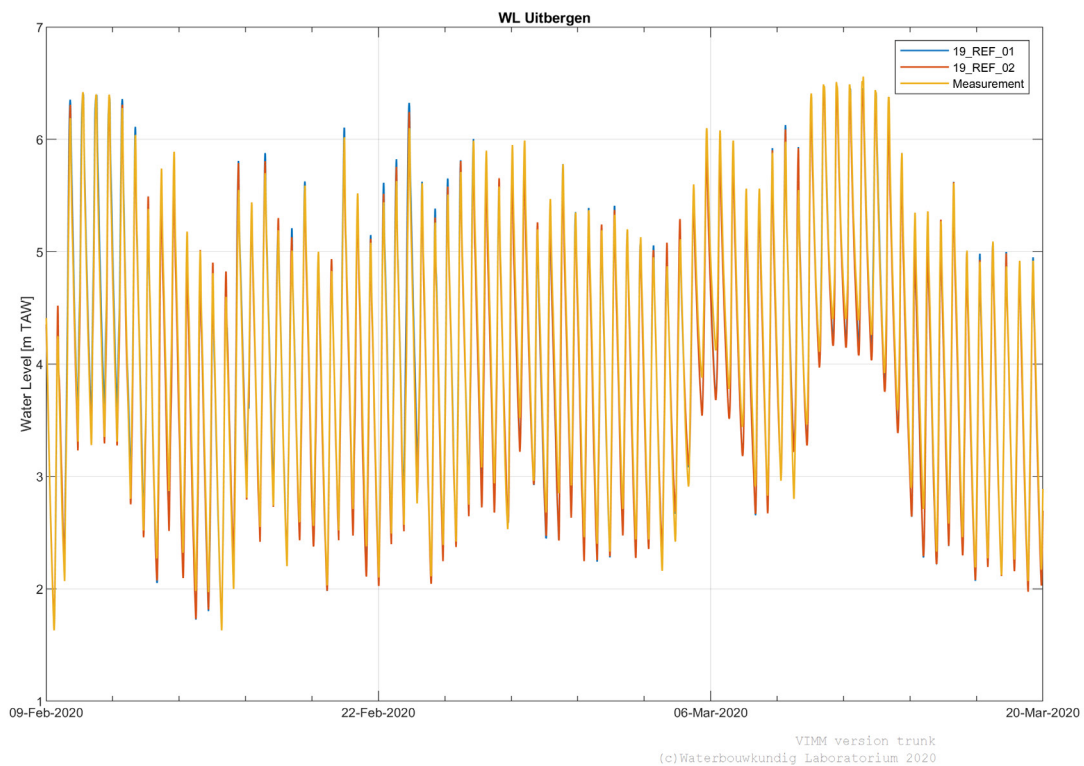
Figuur A 13 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Dendermonde



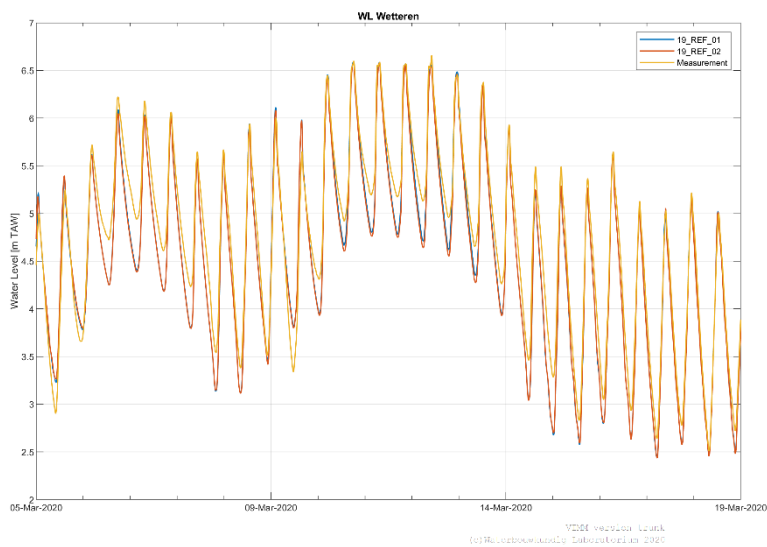
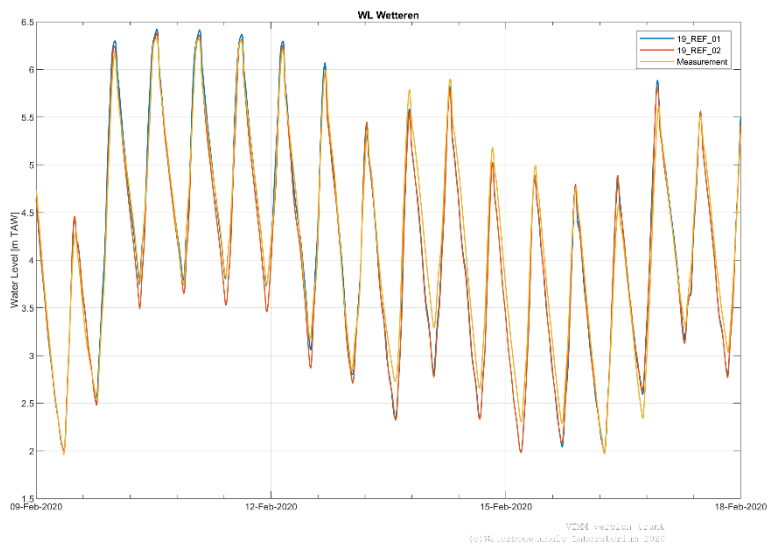
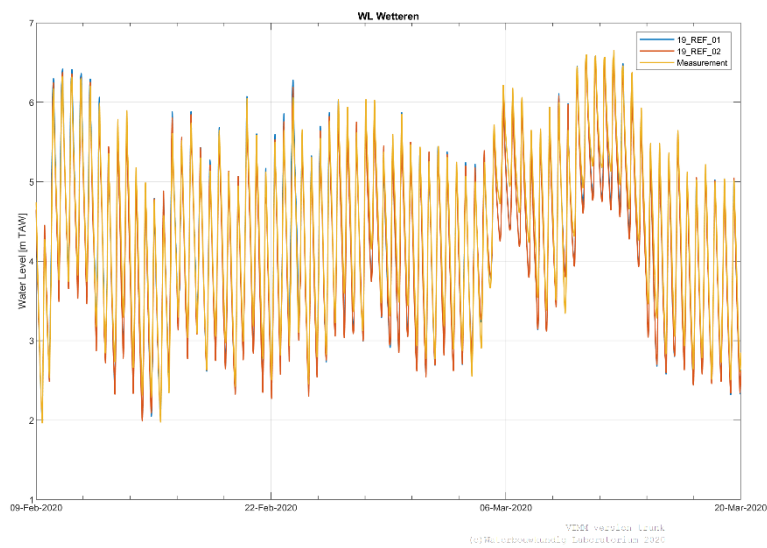
Figuur A 14 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Schoonaarde



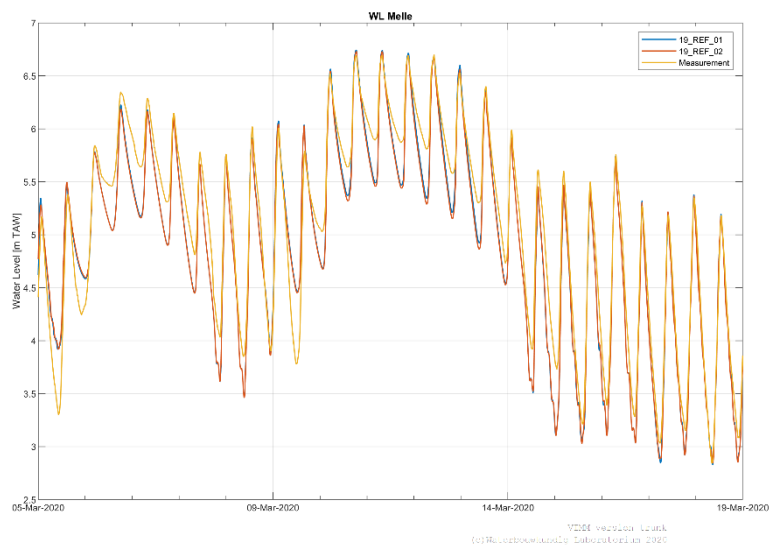
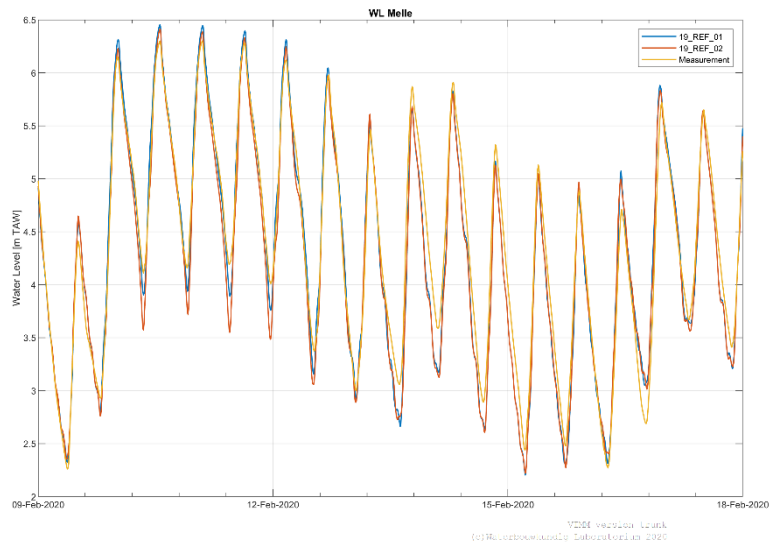
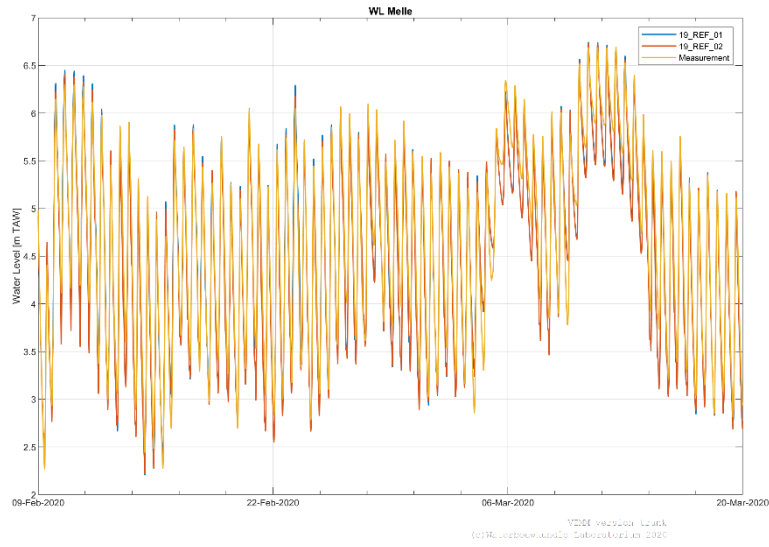
Figuur A 15 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Uitbergen



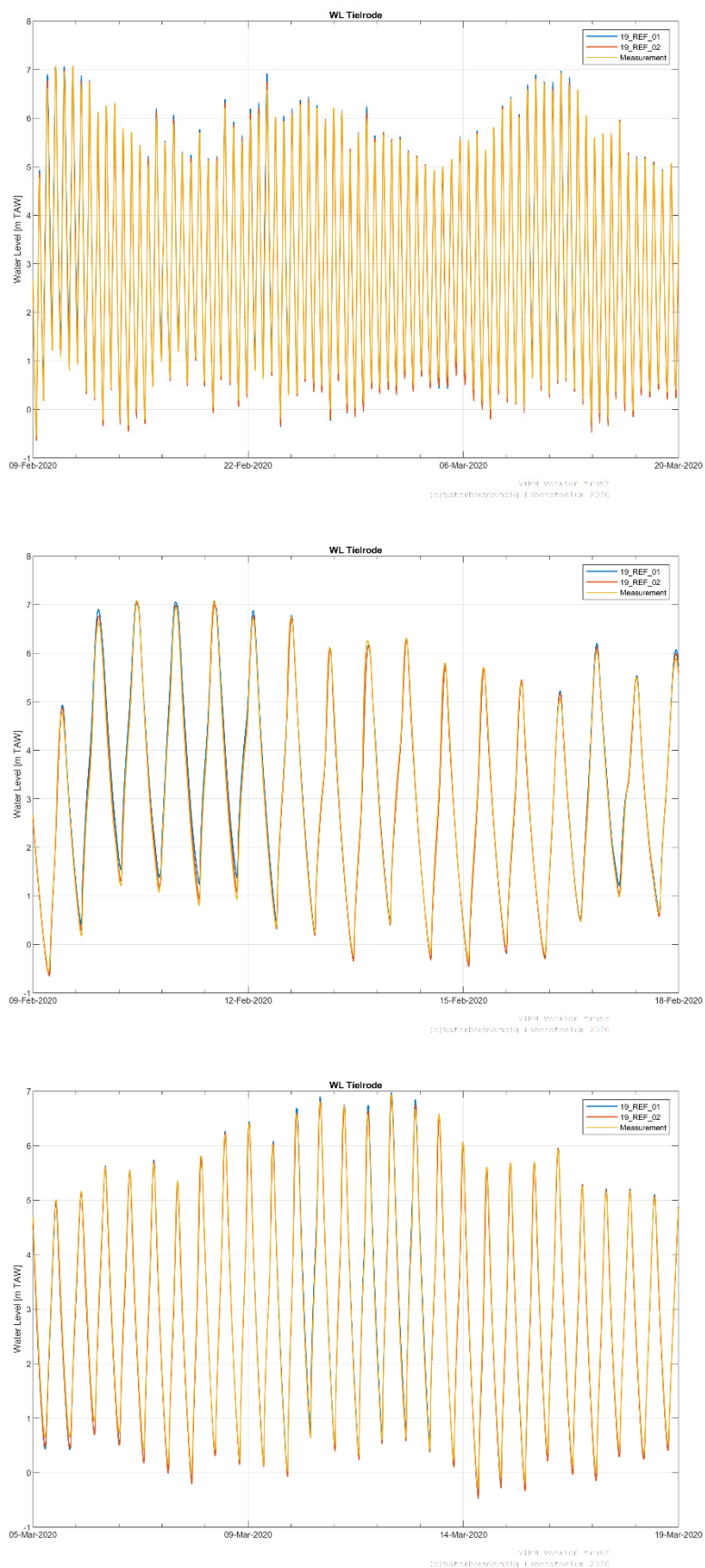
Figuur A 16 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Wetteren



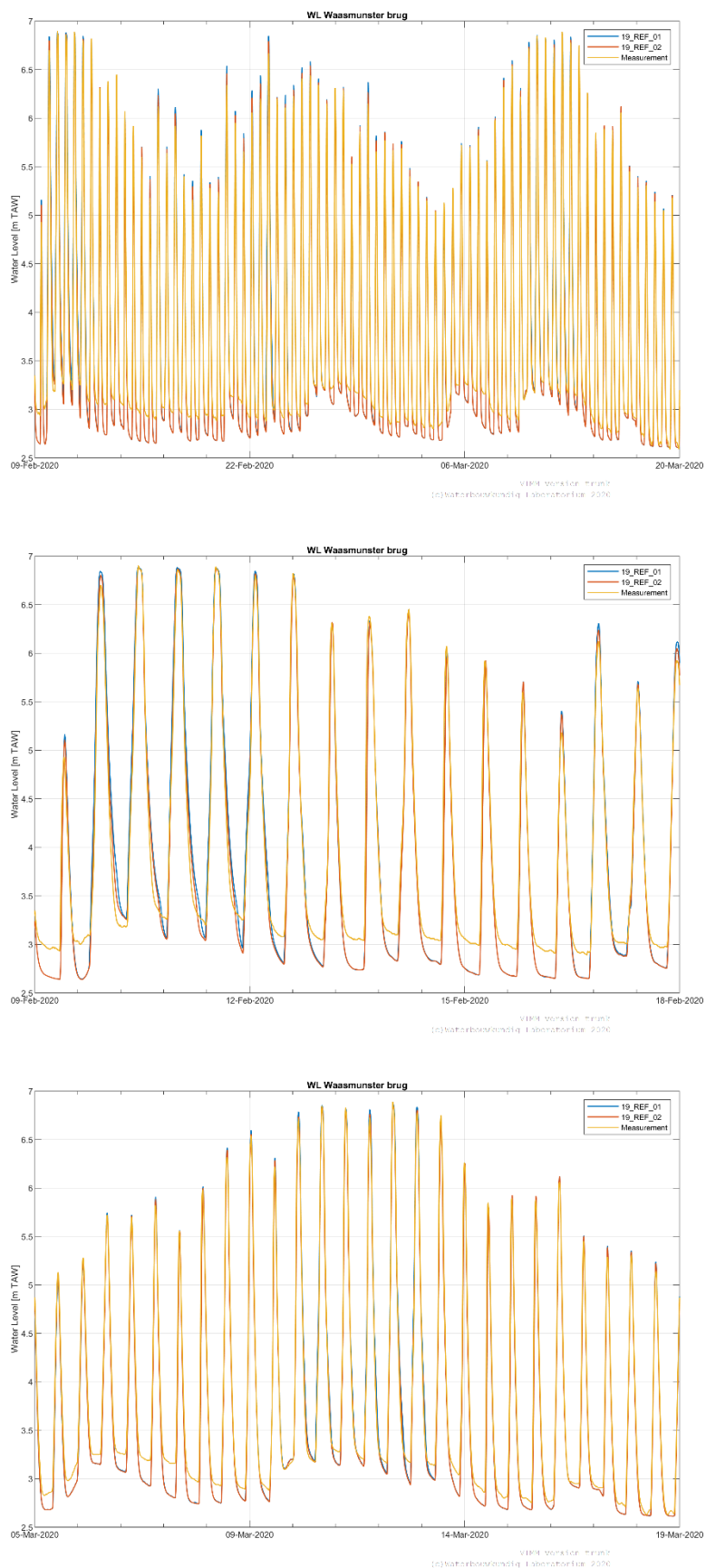
Figuur A 17 – Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zeeschelde te Melle



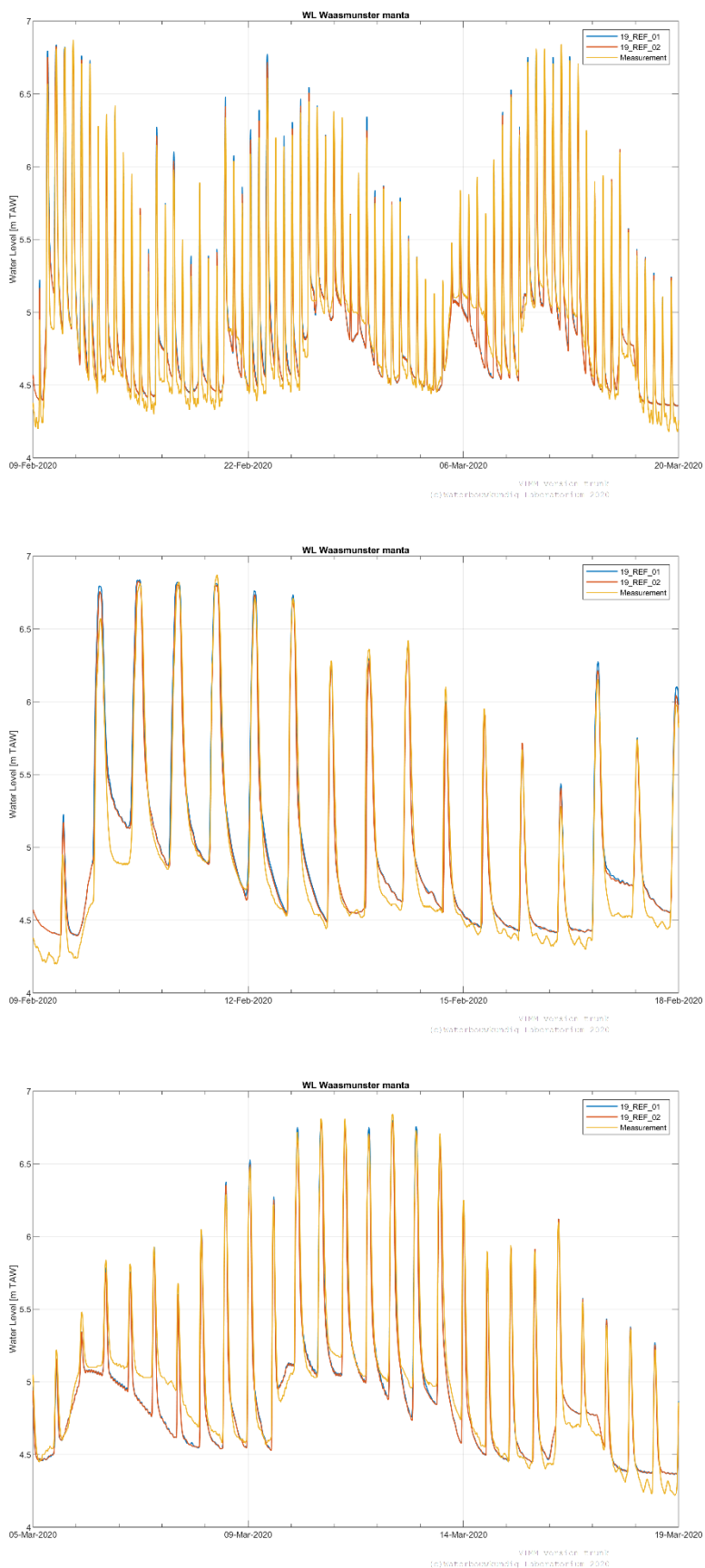
Figuur A 18 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Tielrode



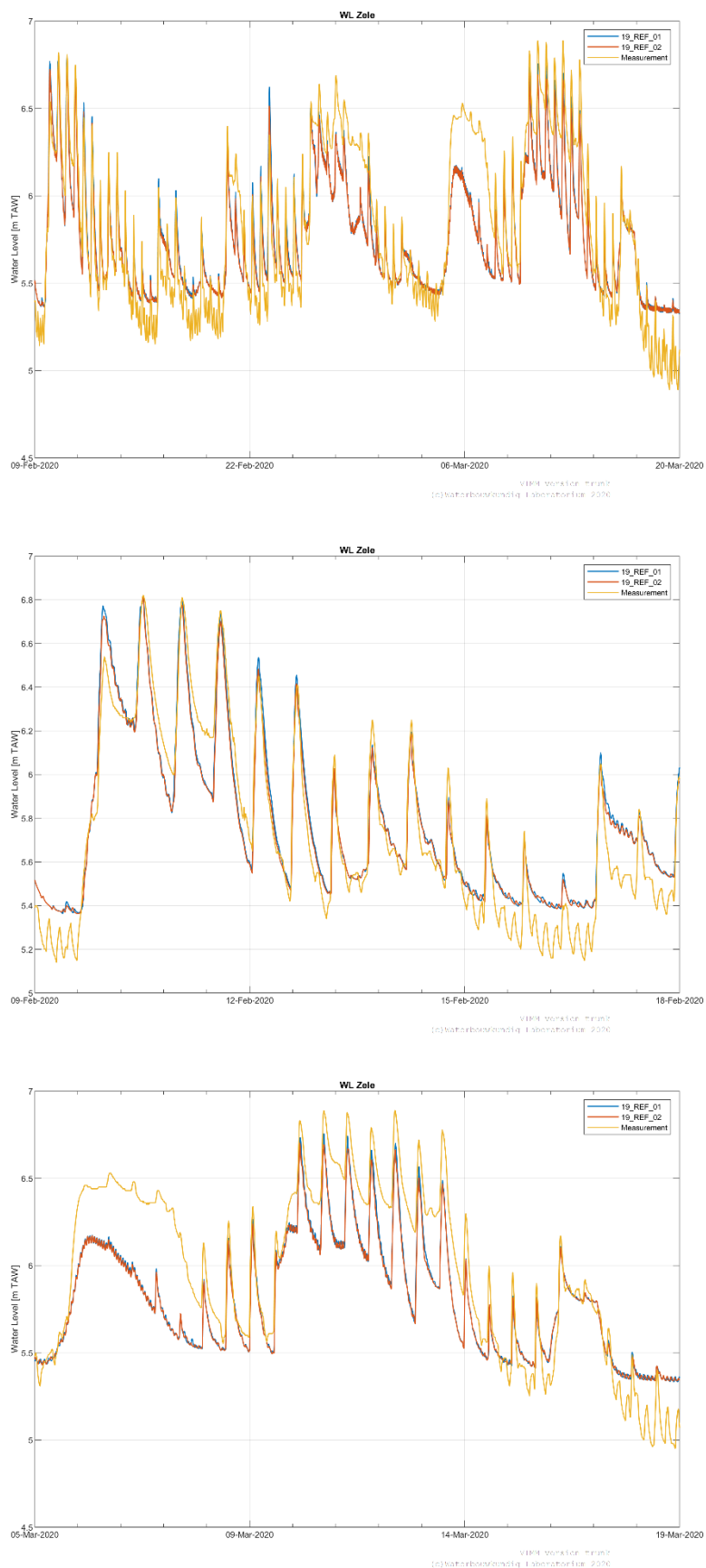
Figuur A 19 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster brug



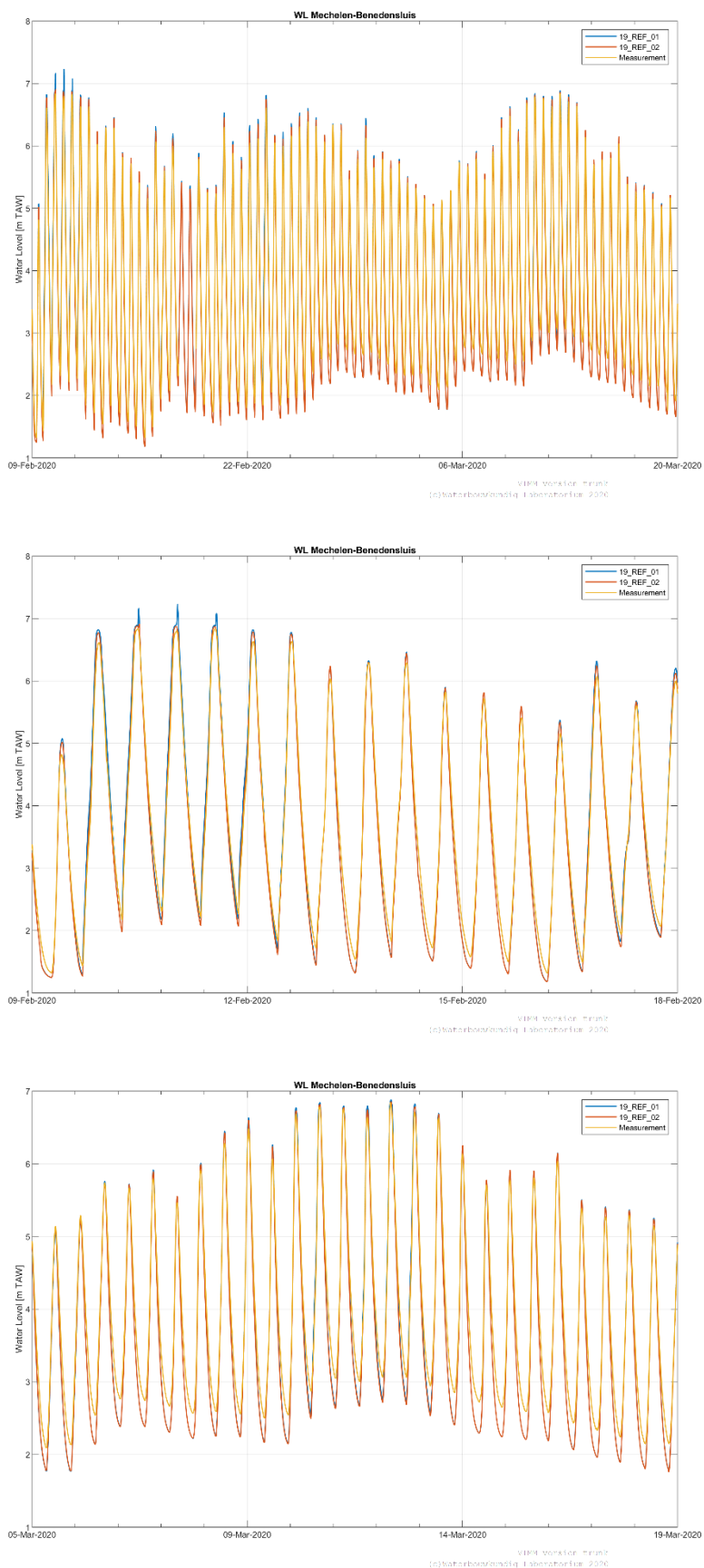
Figuur A 20 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Waasmunster manta



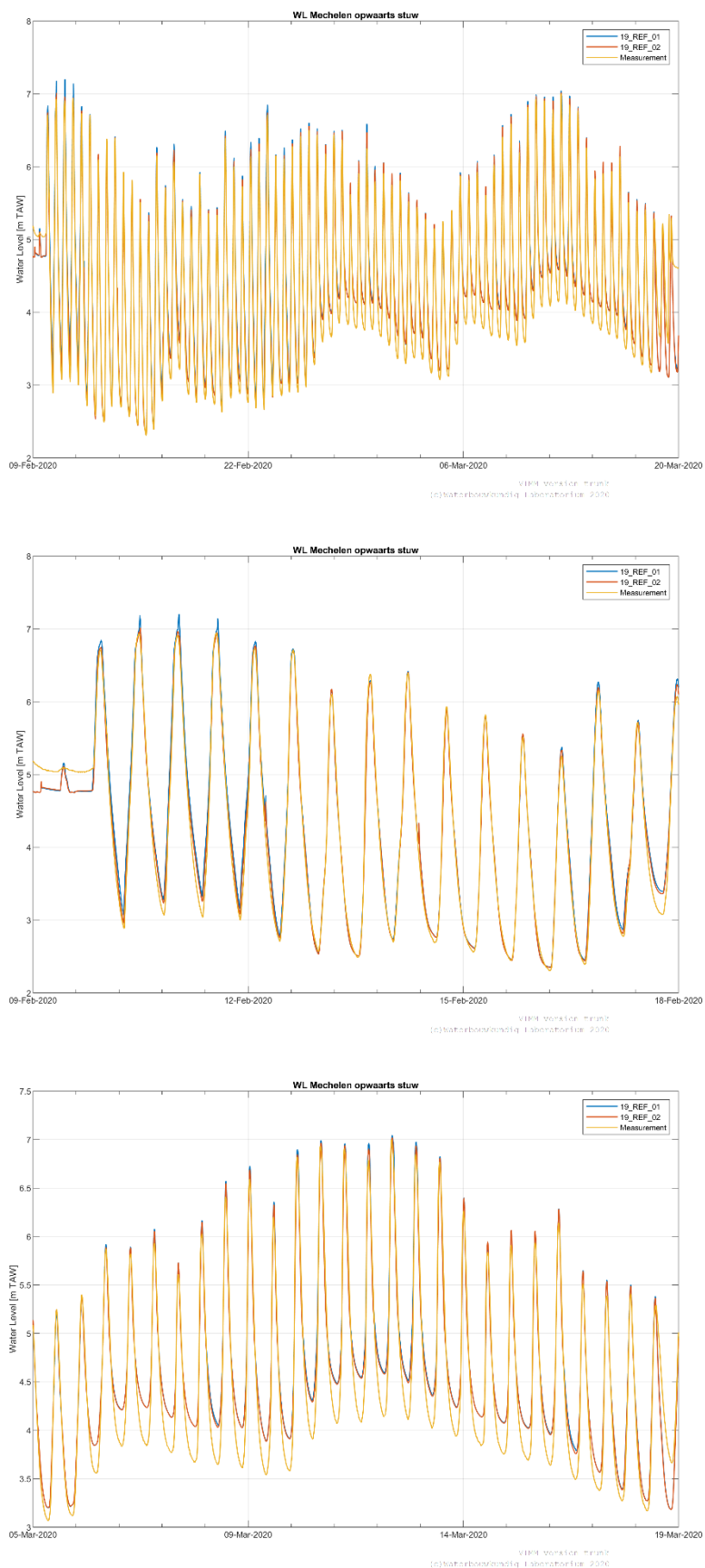
Figuur A 21 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Durme te Zele



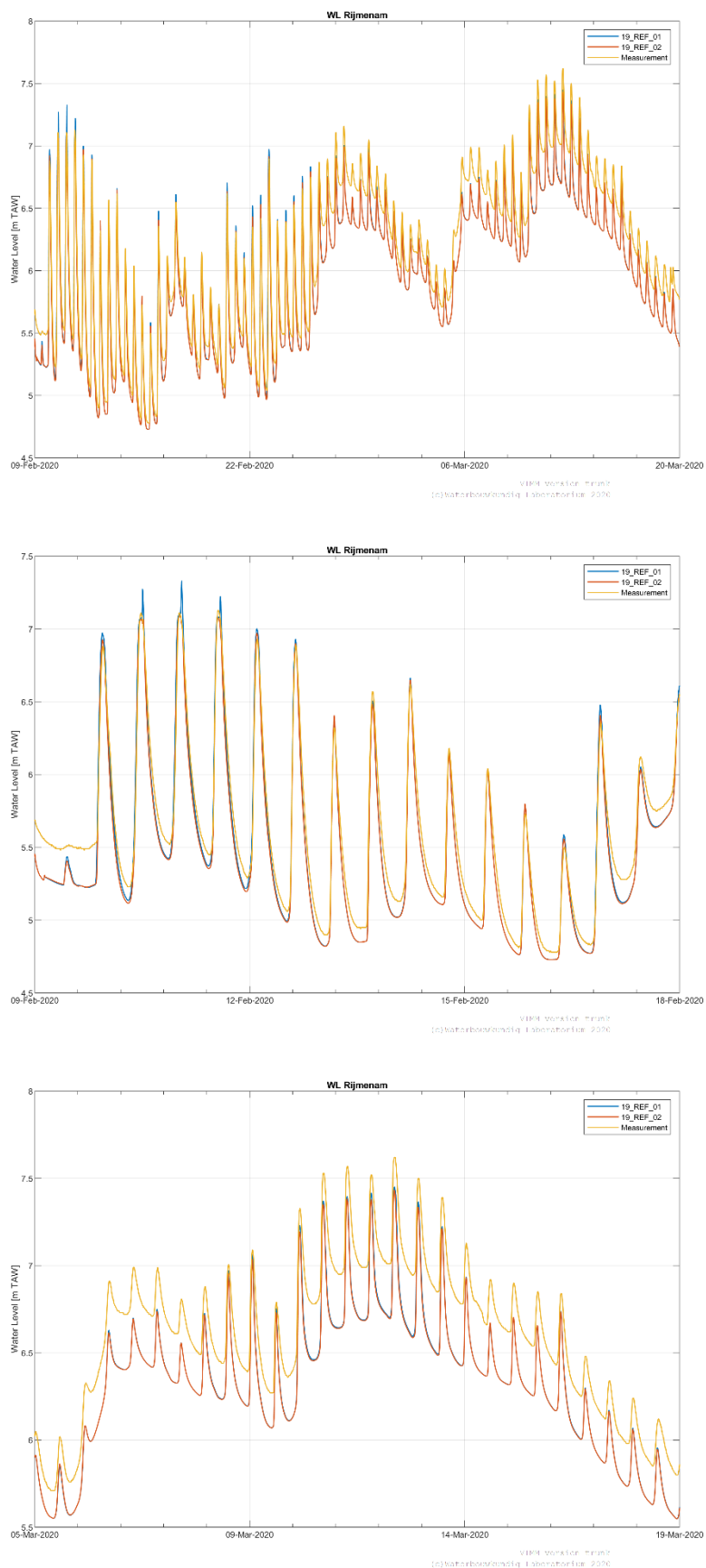
Figuur A 22 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen benedensluis



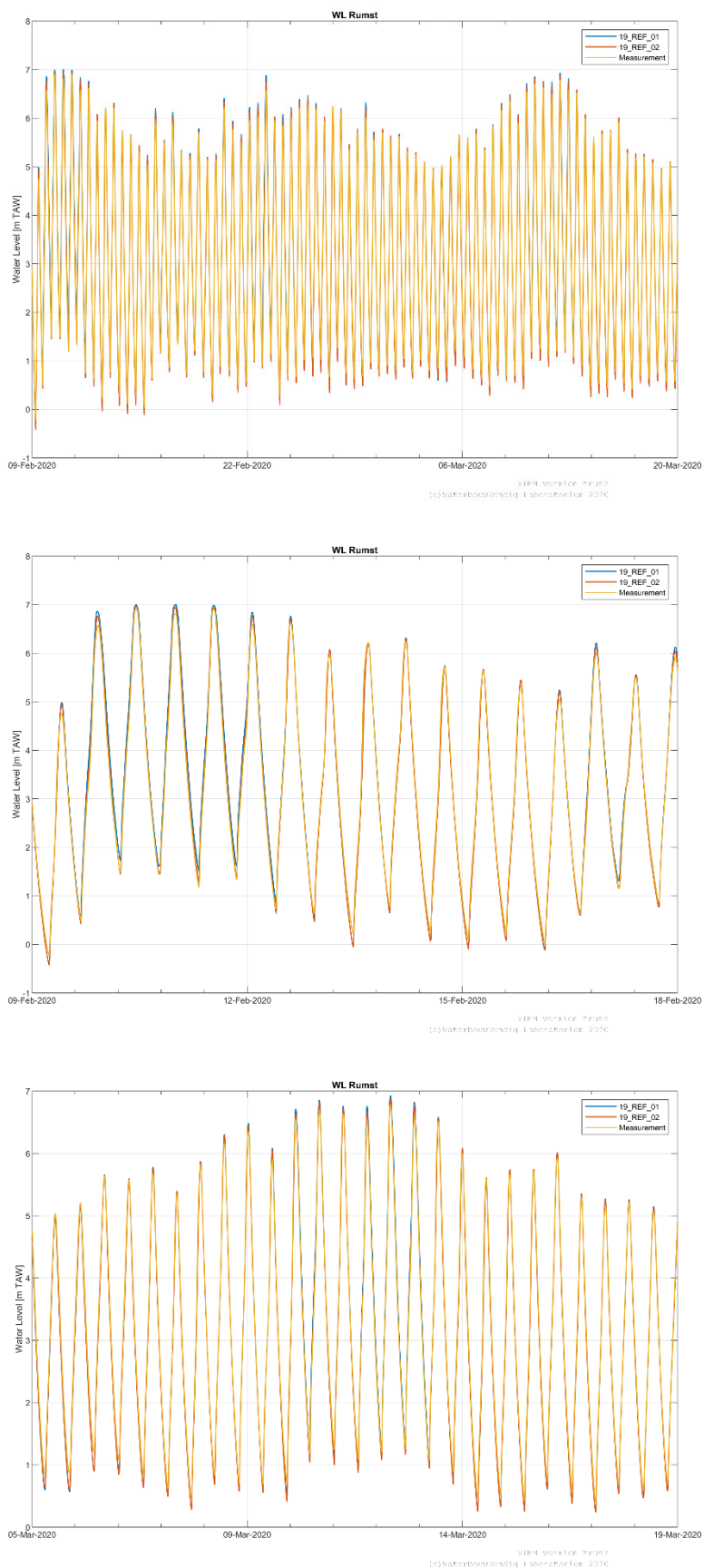
Figuur A 23 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Mechelen opwaarts stuw



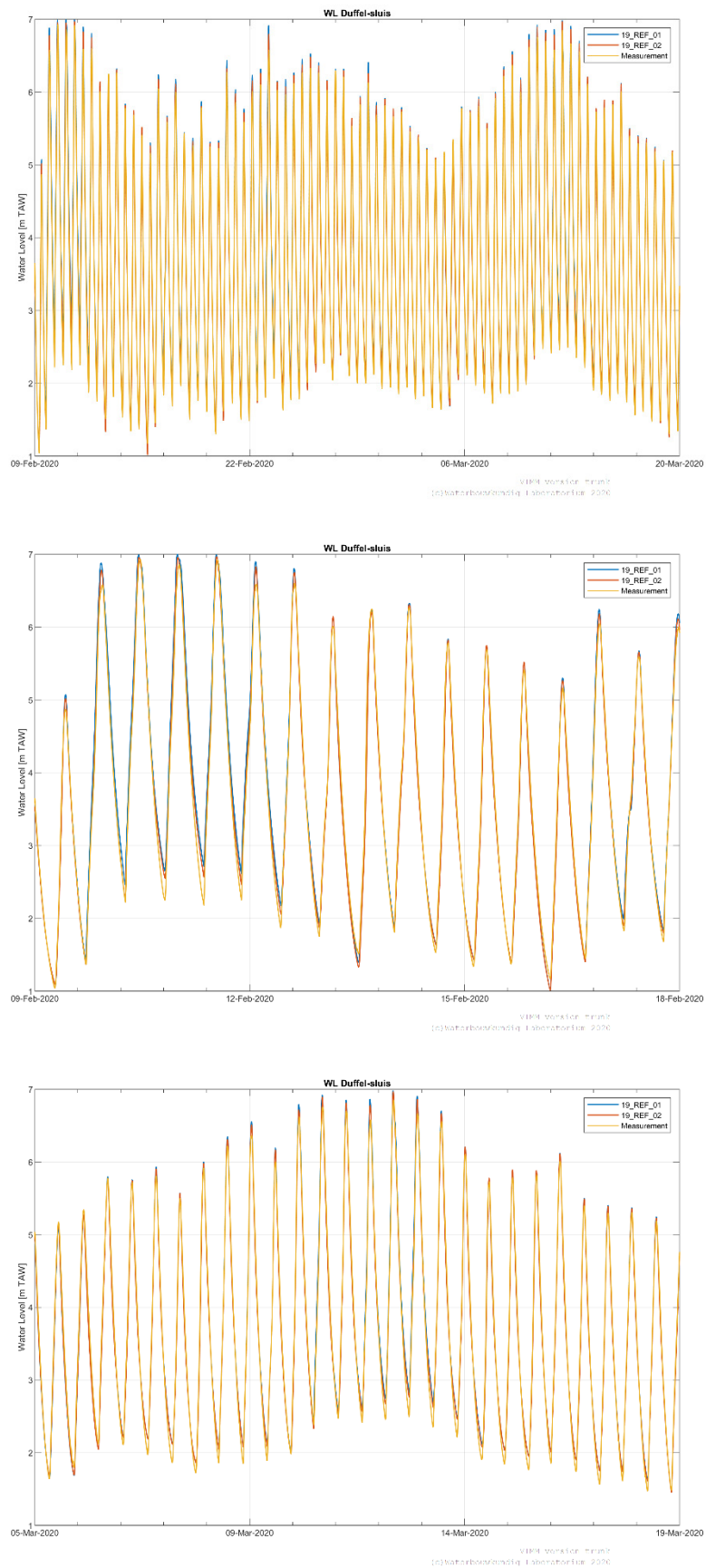
Figuur A 24 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Dijle te Rijmenam



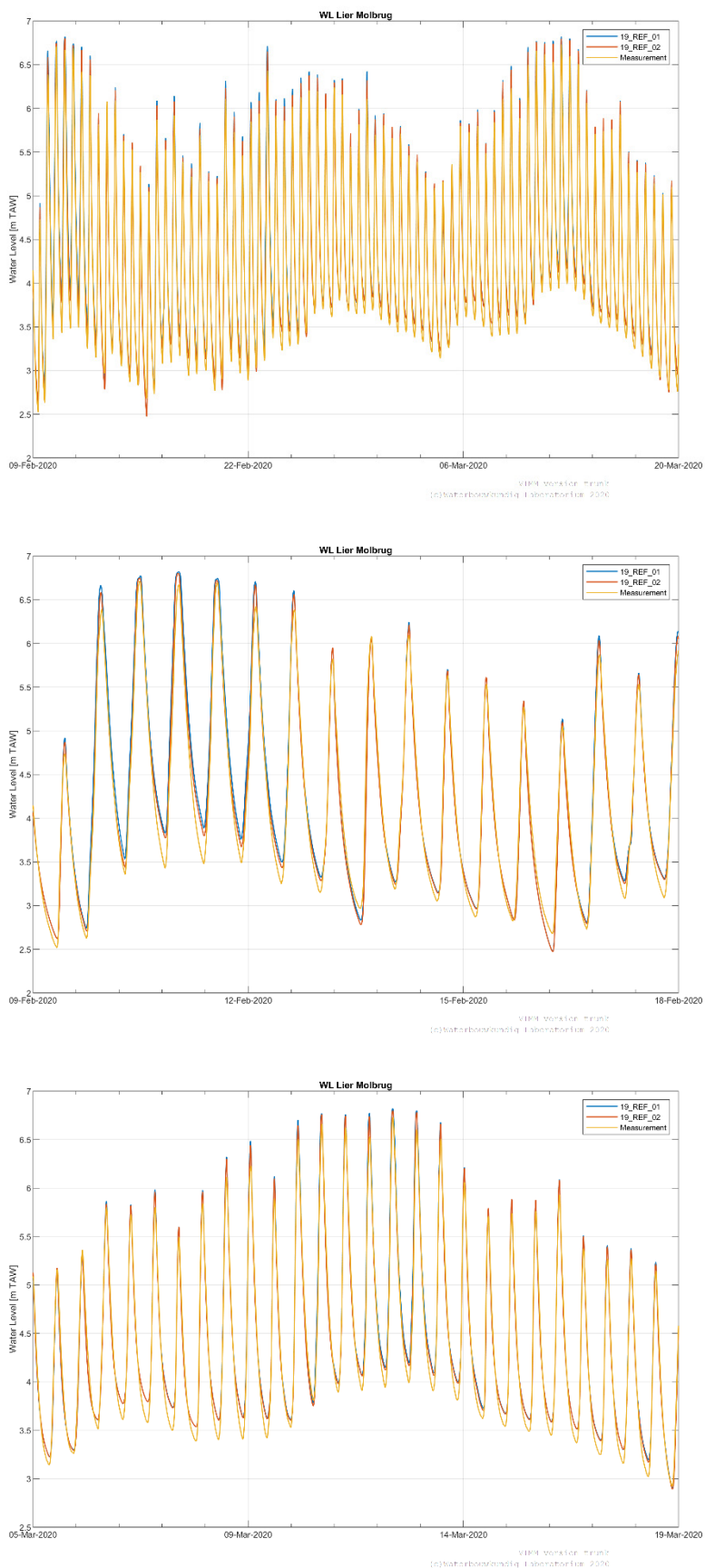
Figuur A 25 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Rumst



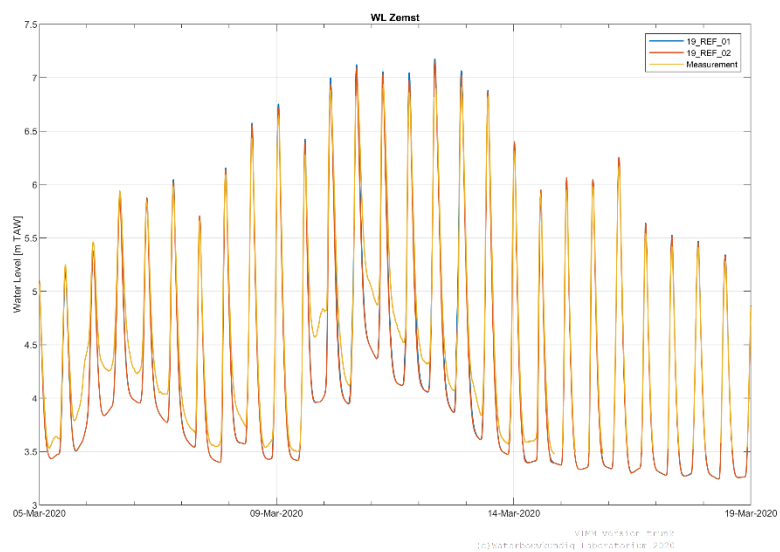
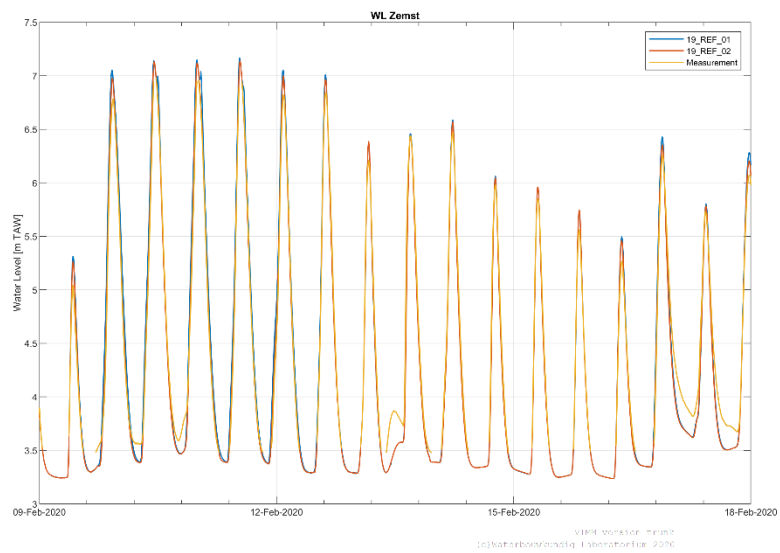
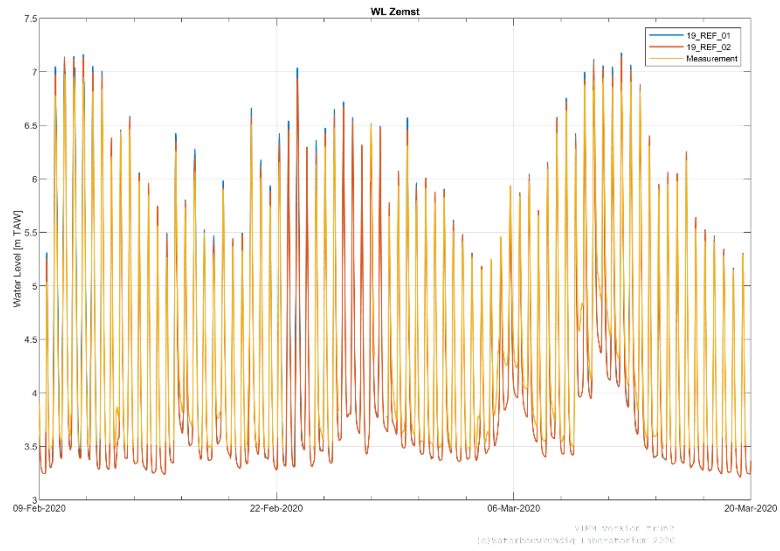
Figuur A 26 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Duffel sluis



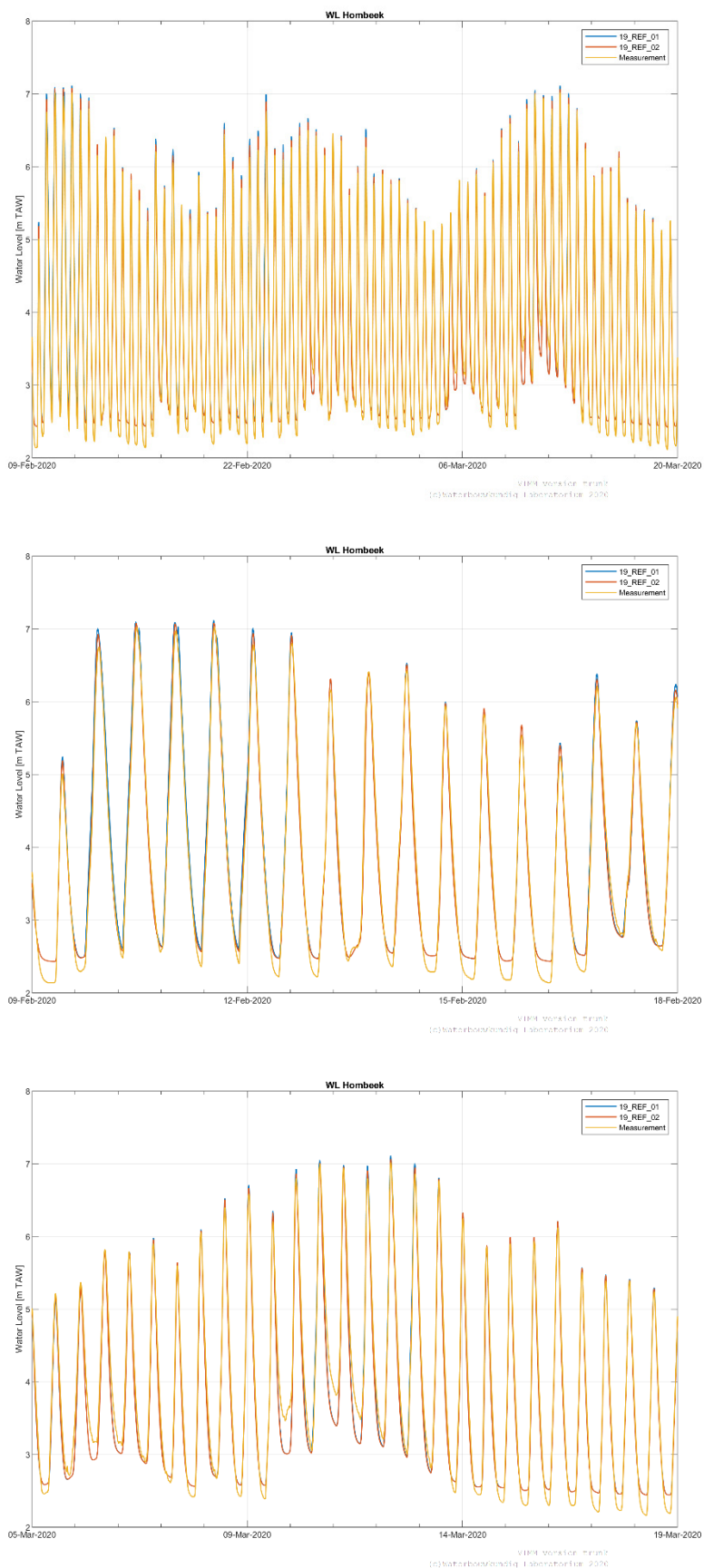
Figuur A 27 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Benedennete te Lier Molbrug



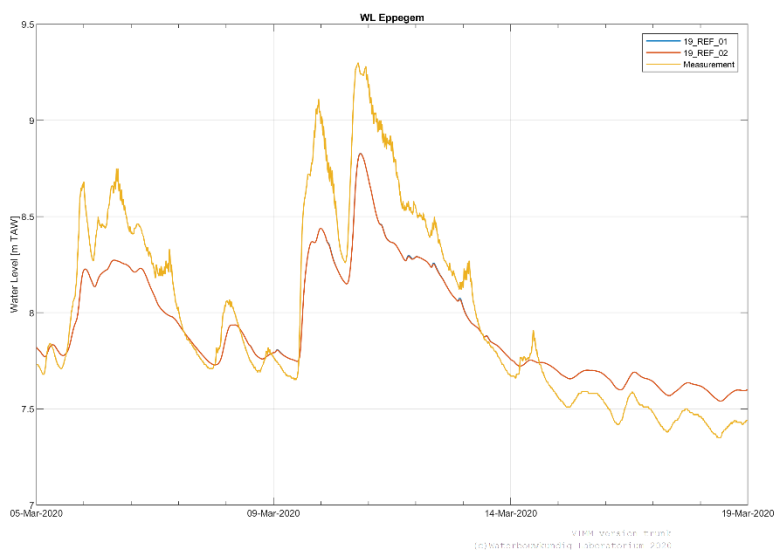
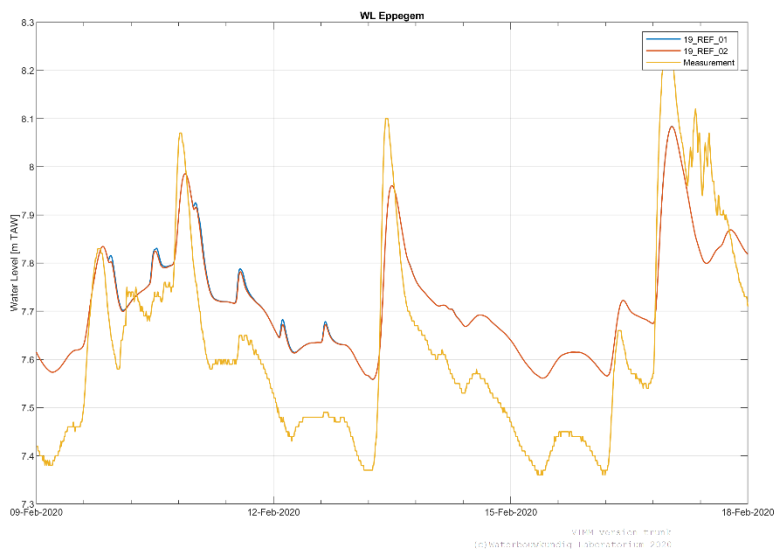
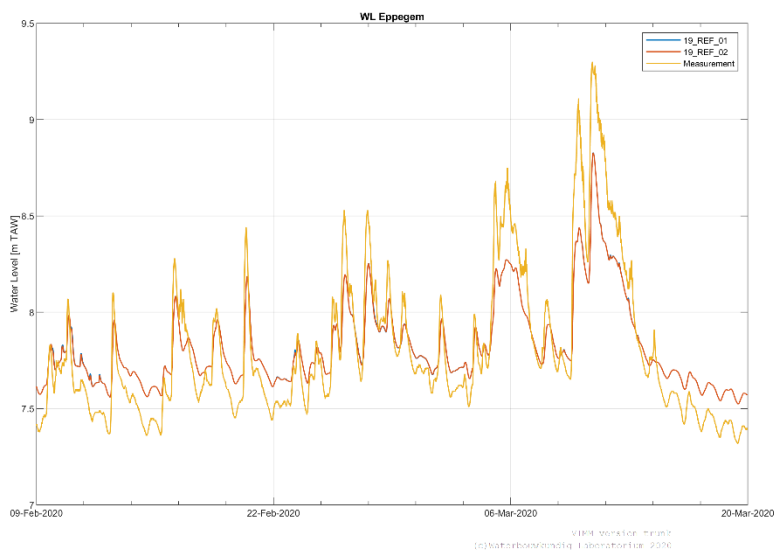
Figuur A 28 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Zemst



Figuur A 29 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Hombeek



Figuur A 30 - Tijdreeksen gemeten en gesimuleerde waterpeilen Zenne te Epegem



BIJLAGE B Figuren statistische analyse waterpeilen rivieren

De figuren zijn digitaal terug te vinden op:

P:\PA015-Ondrhd1D-model\3_Uitvoering\06_Zeeschelde_2019\03_Modelresultaten\VIMM

Per (deel)waterloop worden volgende figuren weergegeven:

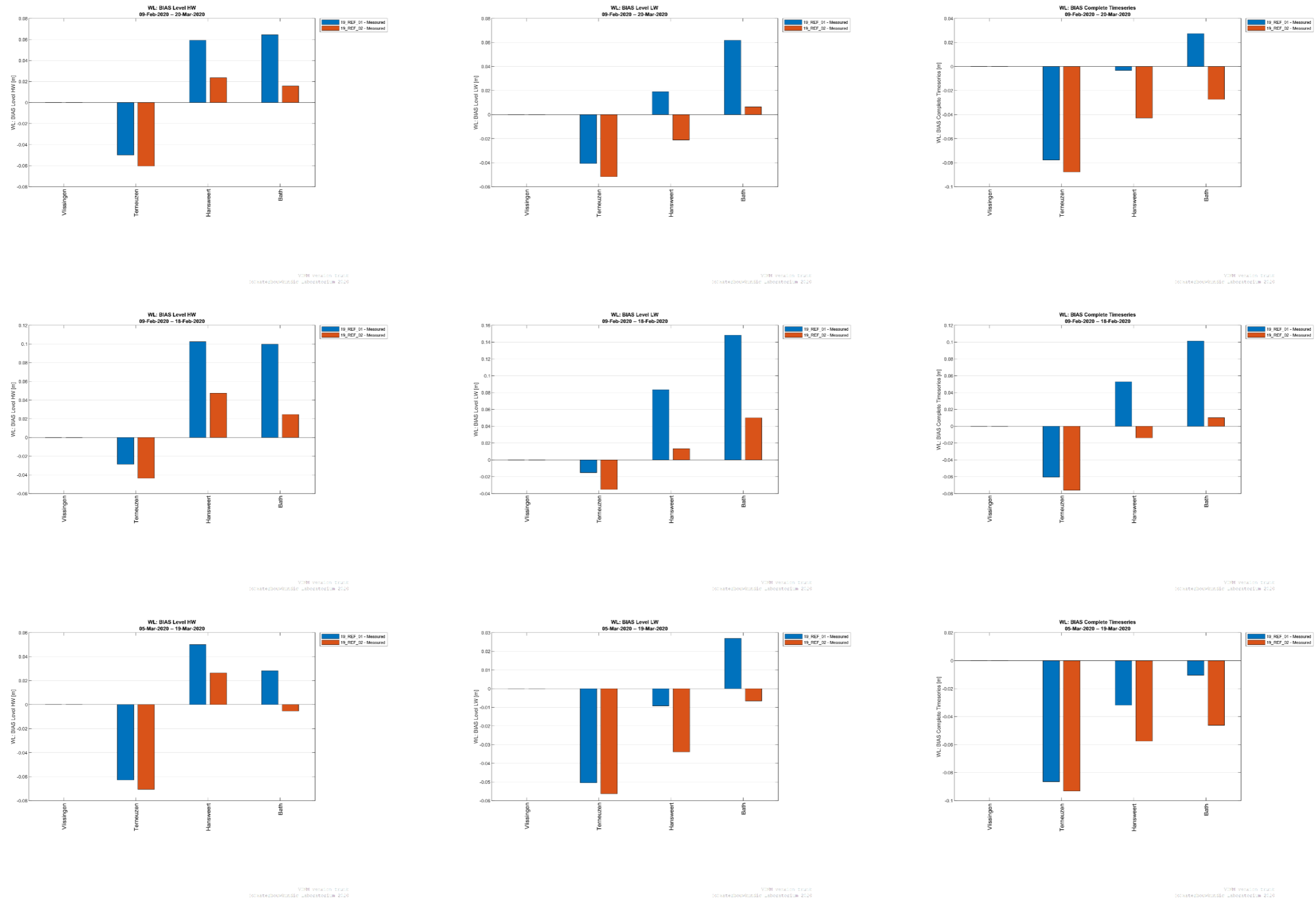
bias peil HW volledige periode	bias peil LW volledige periode	bias waterpeilen volledige tijdreeks volledige periode
bias peil HW deelperiode storm feb2020	bias peil LW deelperiode storm feb2020	bias waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm feb2020
bias peil HW deelperiode storm maart2020	bias peil LW deelperiode storm maart2020	bias waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm maart2020

RMSE peil HW volledige periode	RMSE peil LW volledige periode	RMSE waterpeilen volledige tijdreeks volledige periode
RMSE peil HW deelperiode storm feb2020	RMSE peil LW deelperiode storm feb2020	RMSE waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm feb2020
RMSE peil HW deelperiode storm maart2020	RMSE peil LW deelperiode storm maart2020	RMSE waterpeilen volledige tijdreeks deelperiode storm maart2020

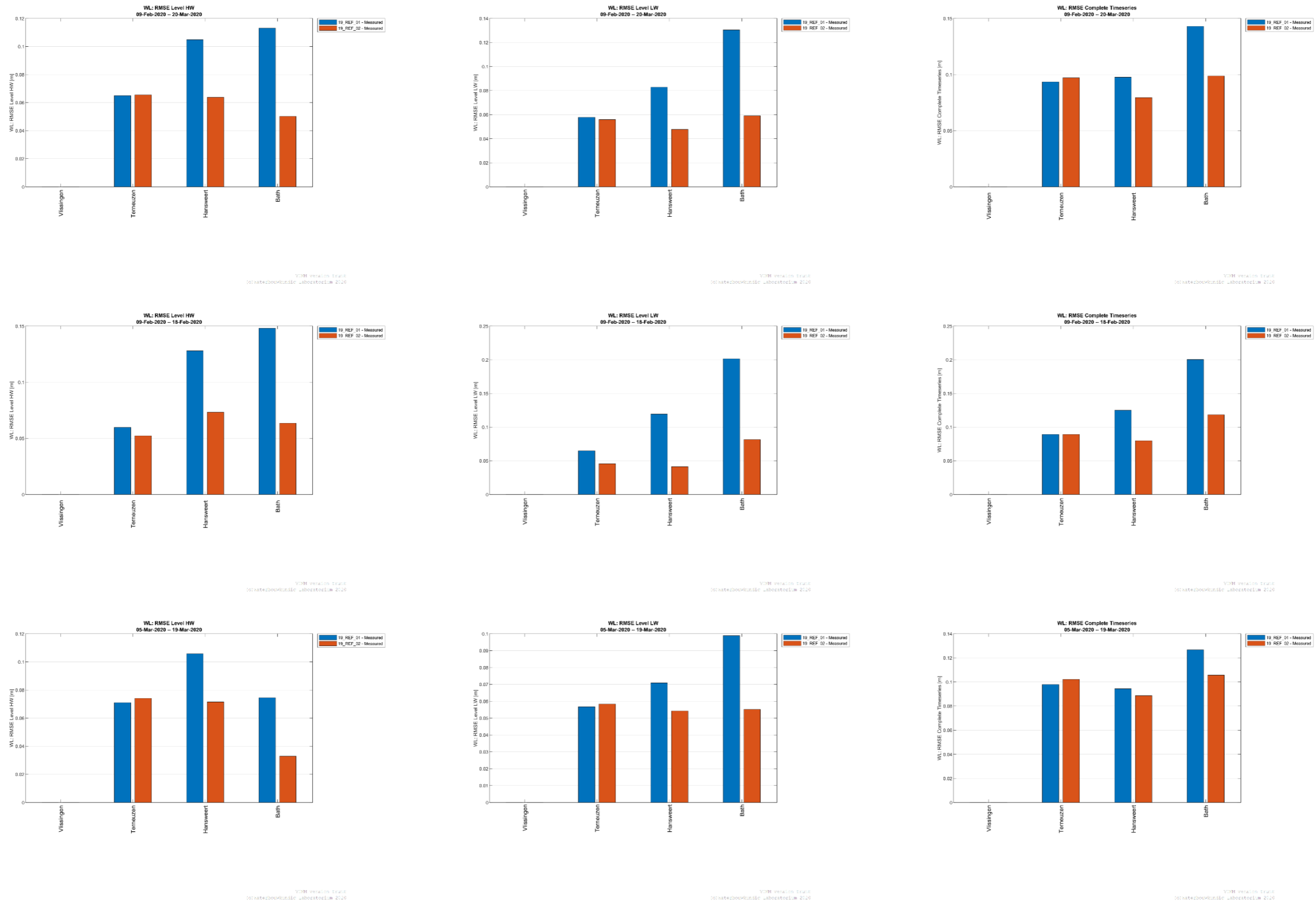
Blauw = REF01 vs metingen

Rood = REF02 vs metingen

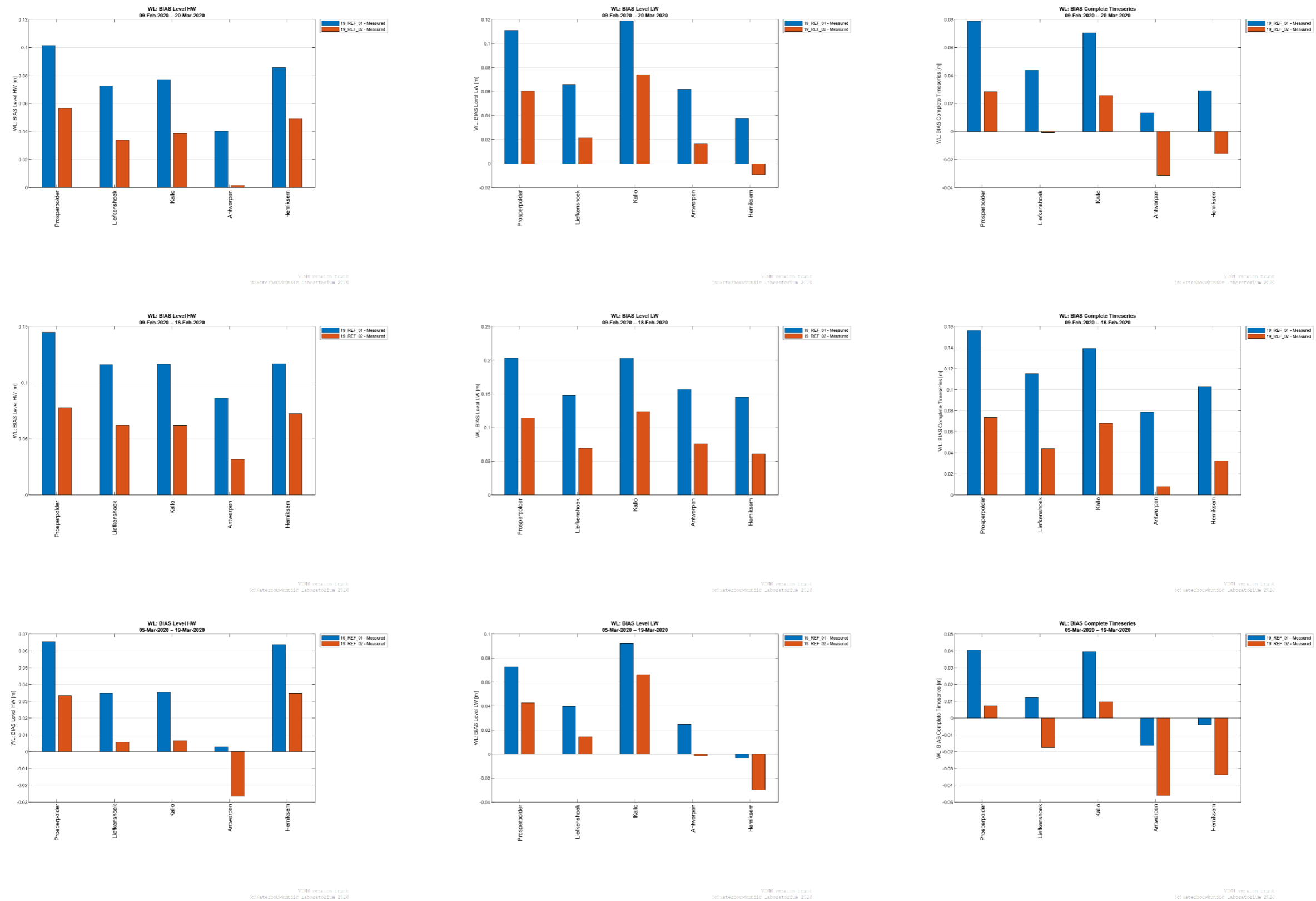
Figuur B 1 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde



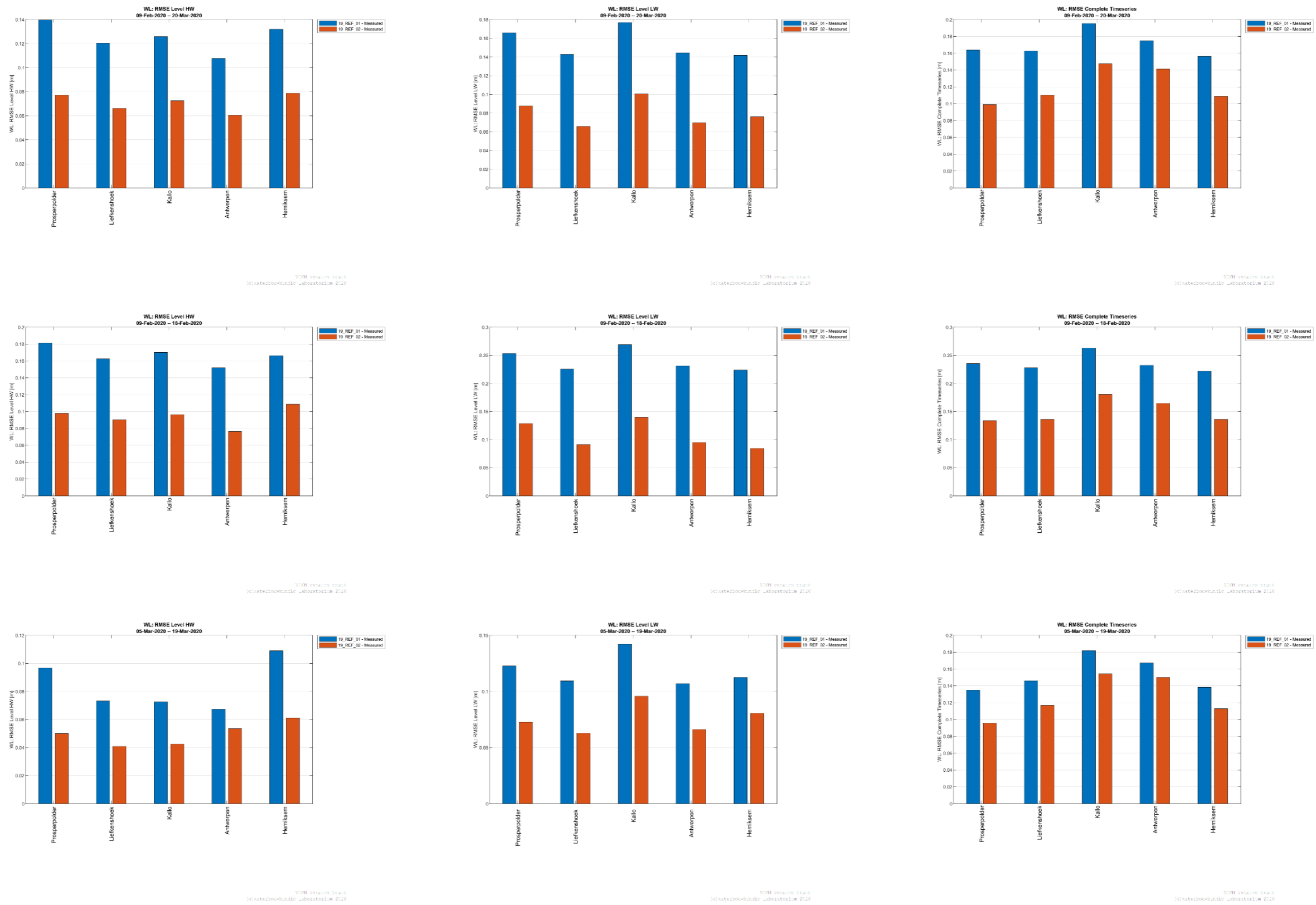
Figuur B 2 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Westerschelde



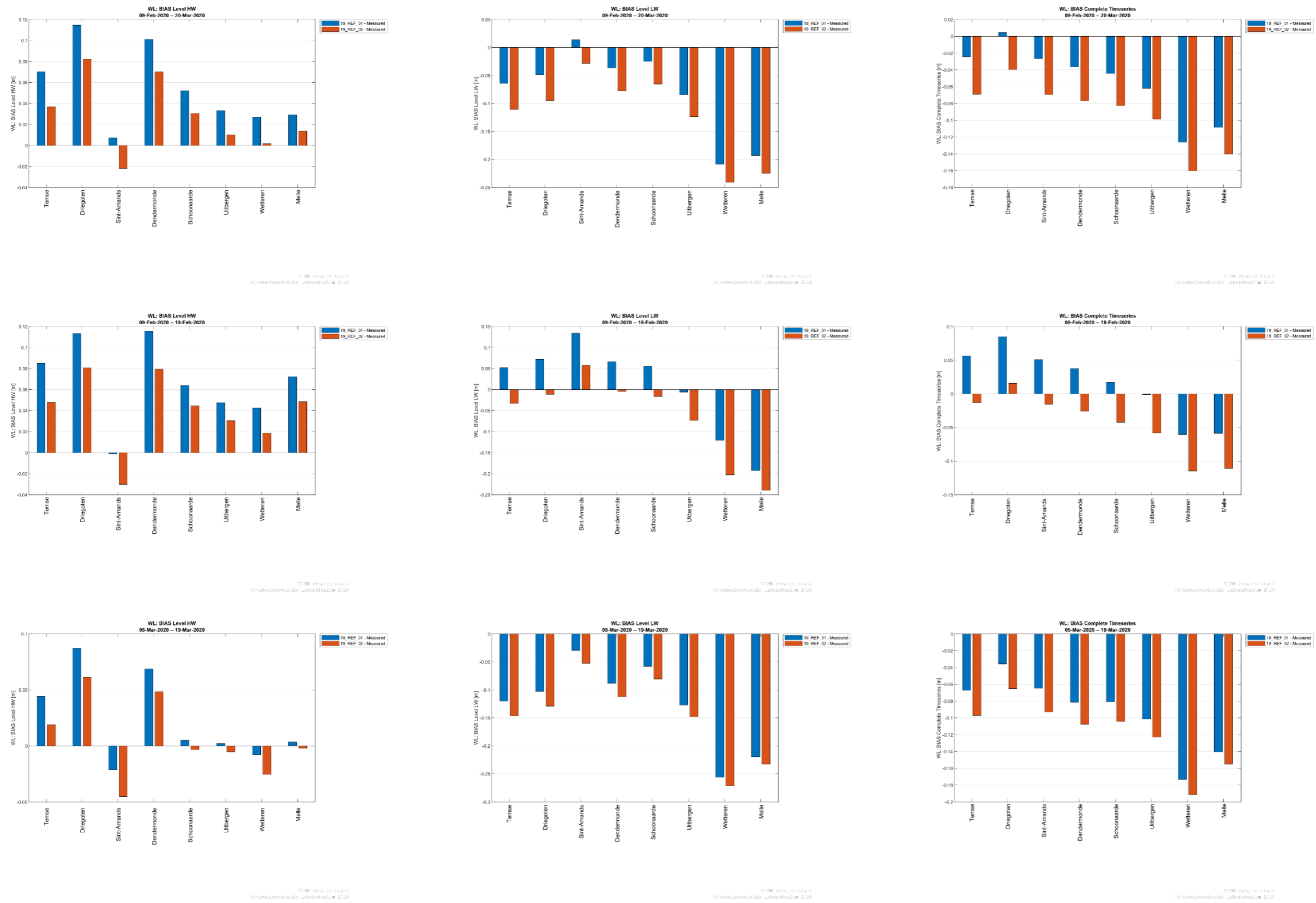
Figuur B 3 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde



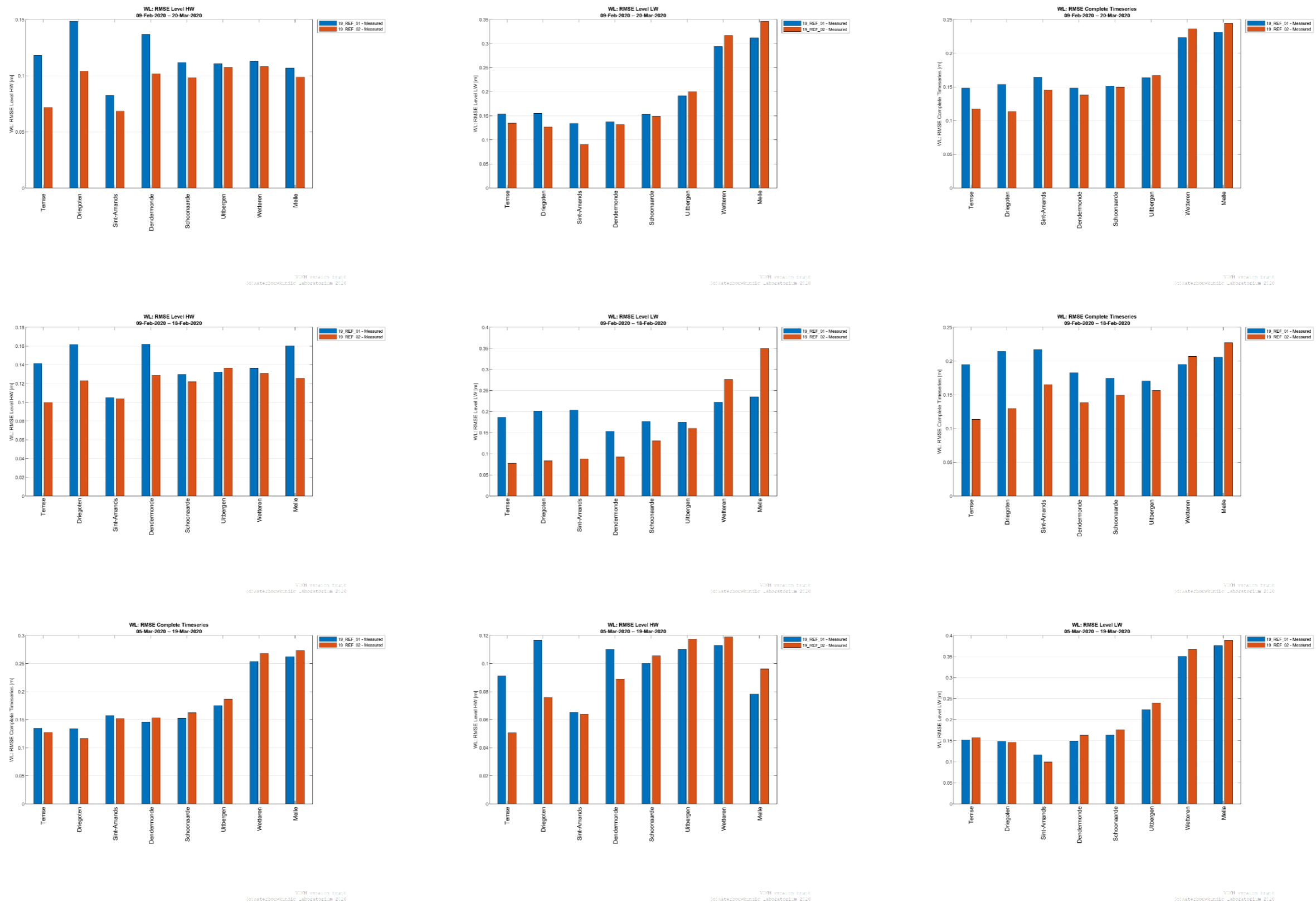
Figuur B 4 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Beneden-Zeeschelde



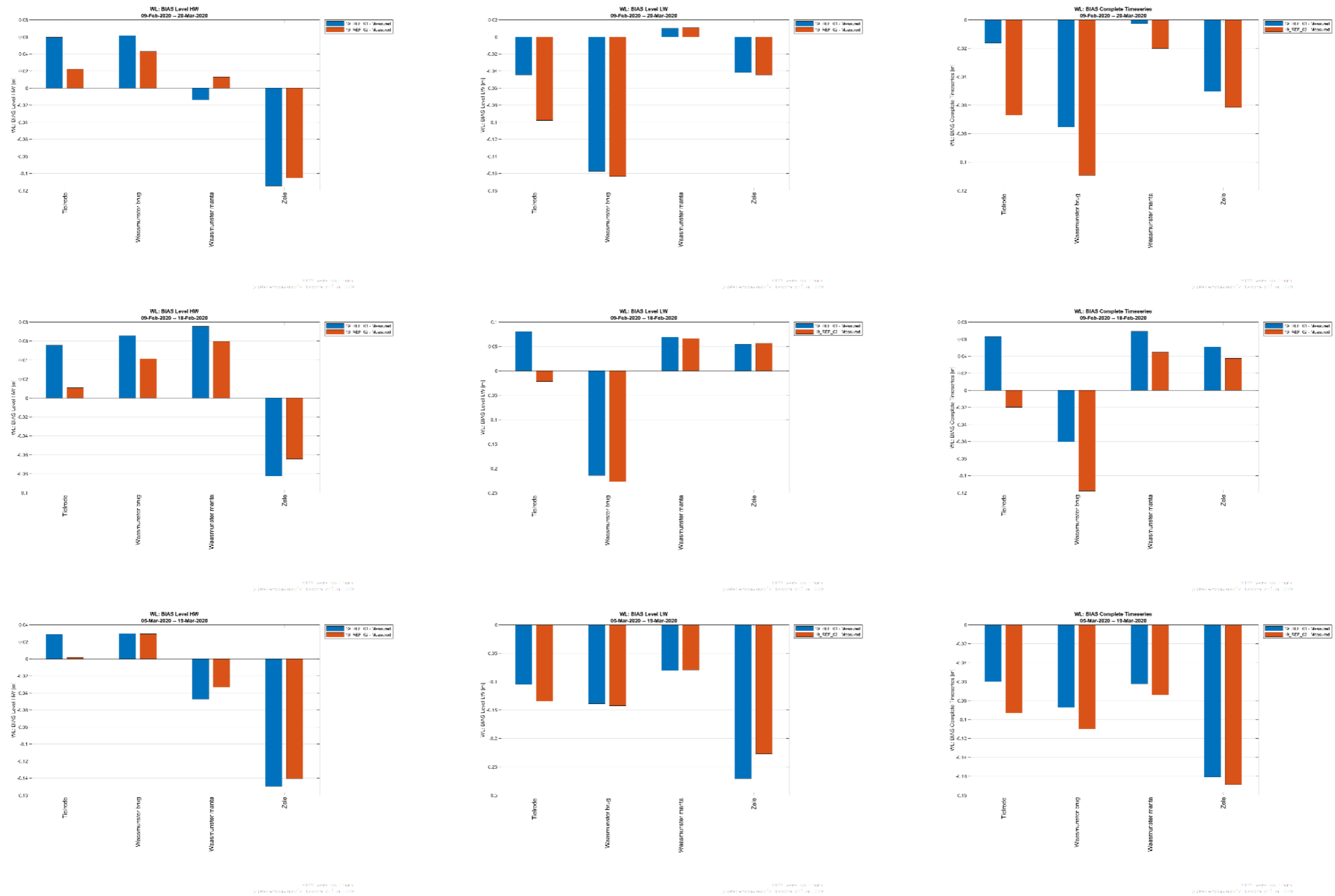
Figuur B 5 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde



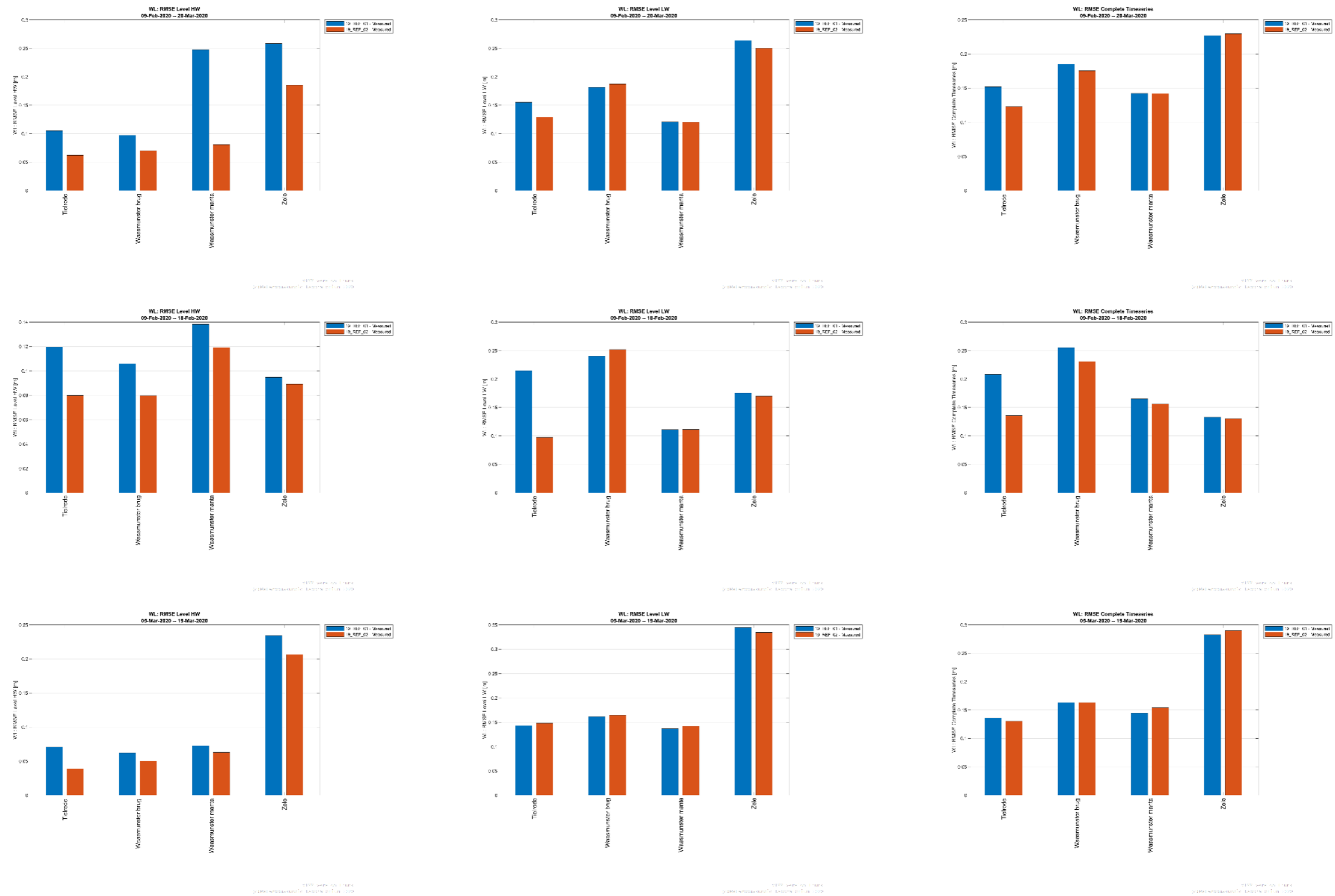
Figuur B 6 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Boven-Zeeschelde



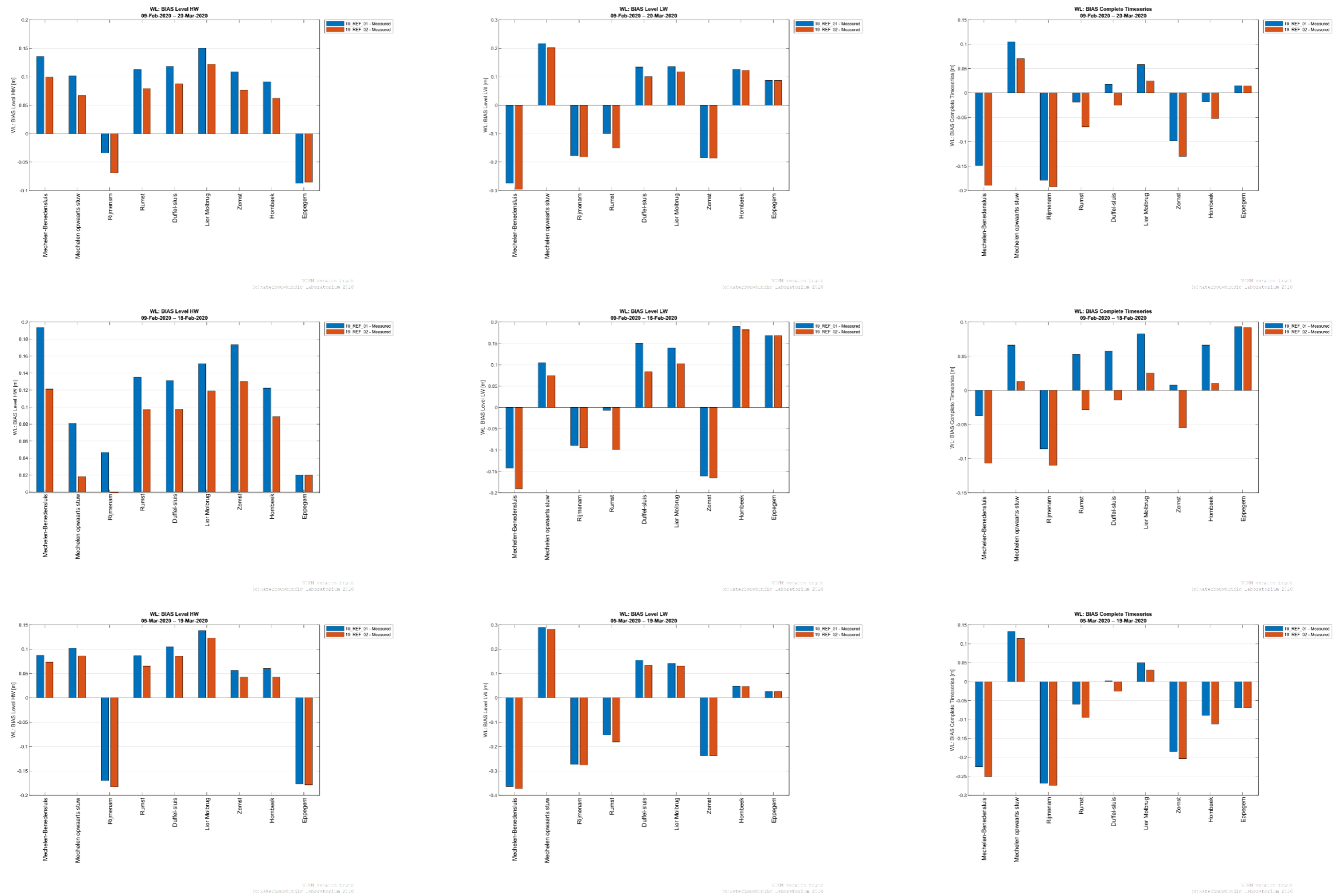
Figuur B 7 - Bias HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme



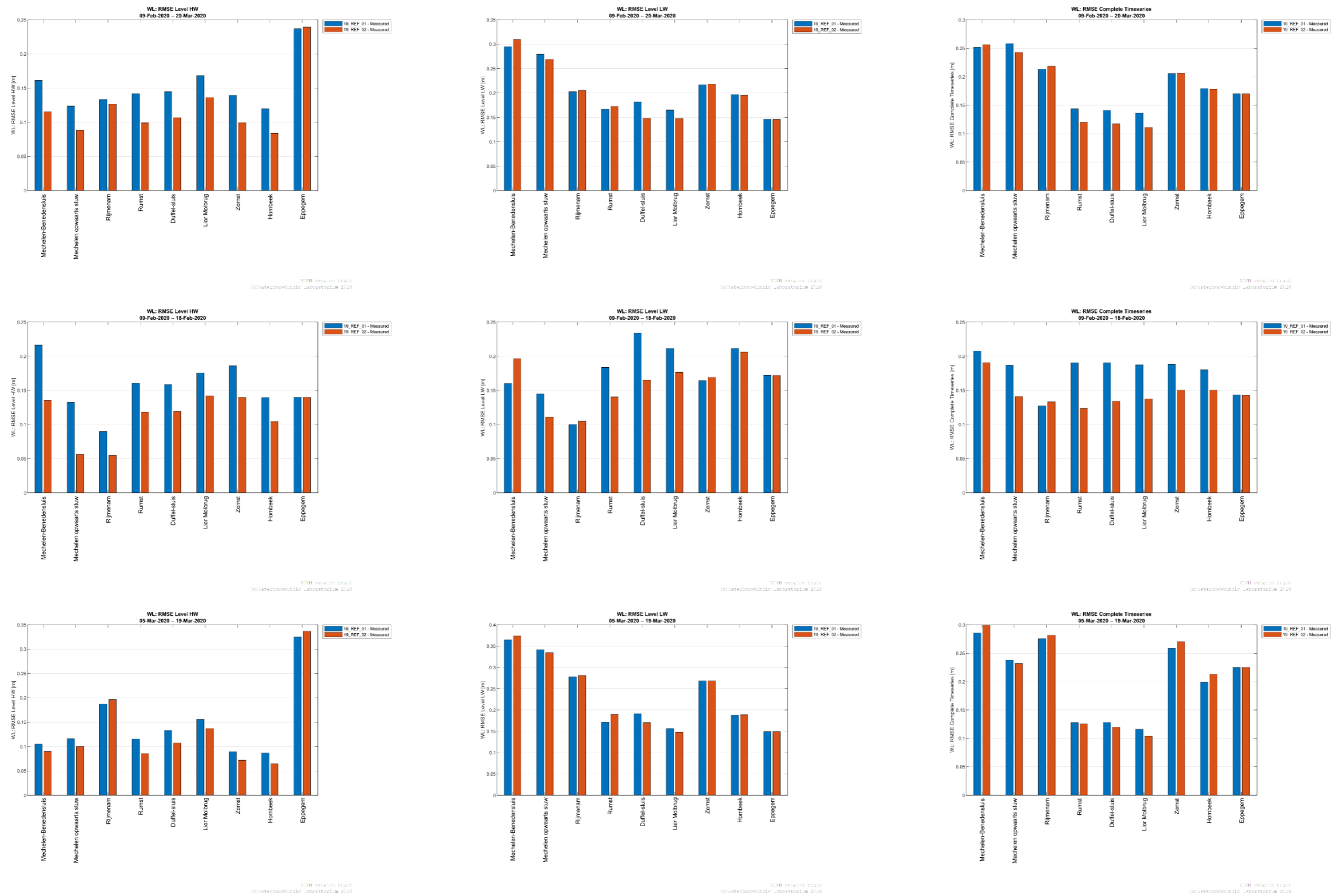
Figuur B 8 - RMSE HW, LW en volledige tijdreeks waterpeilen voor meetposten langs de Durme



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



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



BIJLAGE C 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 z_0 de wrijvingsfactor voor het terrein. u_* mag constant verondersteld worden over de hoogte en de wrijvingsfactor z_0 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.

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