

Analyse voorspelnauwkeurigheid van WAQUA modellen met Harmonie

Noordzee en IJsselmeergebied



Analyse voorspelnauwkeurigheid van WAQUA modellen met Harmonie
Noordzee en IJsselmeergebied

Analyse voorspelnauwkeurigheid van WAQUA modellen met Harmonie Noordzee en IJsselmeergebied

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer M. Scholten
Referenties	-
Trefwoorden	Noordzee, IJsselmeer, HARMONIE, HiRLAM, WAQUA, Hydrodynamica, KPP2020

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	12-02-2021
Projectnummer	11205259-011
Document ID	11205259-011-ZKS-0002
Pagina's	67
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Firmijn Zijl Stendert Laan Julien Groenenboom	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Firmijn Zijl	Tony Minns	Toon Segeren	
1.1	Firmijn Zijl <i>FZ</i>	Tony Minns <i>AM</i>	Toon Segeren <i>TS</i>	

Samenvatting

In de operationele RWSOS systemen van RWS wordt voor de meteorologische aansturing van de hydrodynamische hoogwatervoorspellingsmodellen gebruik gemaakt van de windsnelheid, de windrichting en de luchtdruk uit de operationele HiRLAM berekeningen van het KNMI. KNMI is in mei 2020 definitief gestopt met operationele HiRLAM berekeningen en deze zijn vervangen door berekeningen met HARMONIE(v40).

De gevolgen van de overstap van HiRLAM naar HARMONIE zijn in kaart gebracht door het doen van een groot aantal opeenvolgende modelvoorspellingen, op basis van beide meteorologische modellen. Voor IJsselmeer is daar ook aansturing op basis van de gedownscalede meteorologische resultaten van HiRLAM en HARMONIE aan toegevoegd. Op basis van de resultaten van de voorspelberekeningen is de modelkwaliteit bepaald voor de verschillende intervallen van de voorspelhorizon (tot aan 48 uur vooruit). De sequentie van voorspellingen is gedaan voor de periode 2015 – 2017. Dit zijn de drie volledige kalenderjaren waarbinnen de data van HARMONIEv40 beschikbaar is gemaakt door het KNMI. Een belangrijk uitgangspunt bij de opzet van deze voorspelanalyse is het zo veel mogelijk overeen komen van de simulaties met het operationele gebruik bij Water Management Centrum Nederland (WMCN) van Rijkswaterstaat. Slechts wanneer dit niet mogelijk was, is hiervan afgeweken.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de bevindingen van deze studie geen aanleiding geven om de migratie van HiRLAM naar HARMONIE in de operationele RWSOS systemen van RWS terug te draaien. Wel wordt geadviseerd om geen gebruik te maken van de hier beschouwde versie van HARMONIE-downscaling.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond/aanleiding	7
1.2	Eerdere studies	7
1.3	Doelstelling	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Aanpak	9
2.1	Algemeen	9
2.2	Hydrodynamisch modellen	9
2.2.1	Noordzee	9
2.2.2	IJsselmeer	10
2.2.3	Software	12
2.3	Meteorologische modellen	13
2.3.1	HiRLAM	13
2.3.2	HiRLAM-downscaling	14
2.3.3	HARMONIE	15
2.3.4	HARMONIE-downscaling	16
2.3.5	Ontbrekende meteorologische voorspellingen	16
2.4	Winddrag-relaties	16
2.4.1	Noordzee	16
2.4.2	IJsselmeer	17
2.5	Aanpak voorspelanalyse	19
2.5.1	Voorspelcyclus	19
2.5.2	Meteorologische invoer	20
2.5.3	Modelinstellingen en initialisatie	21
2.5.4	Modeluitvoer en verwerking	21
2.5.5	Meerpeilcorrectie	21
2.6	Validatiegegevens	22
2.6.1	Noordzee	22
2.6.2	IJsselmeer	24
2.7	Kwantitatieve maatstaven	25
3	Resultaten	27
3.1	Noordzee	27
3.1.1	Waterstanden (getij, opzet en totale waterstand)	27
3.1.1.1	Hoofdlocaties	27
3.1.1.2	Alle stations	29
3.1.2	Hoogwaters tijdens normale en extreme events	32
3.1.2.1	Hoofdlocaties	32
3.1.2.2	Alle stations	39
3.2	IJsselmeer	41

3.2.1	Waterstanden	41
3.2.2	Hoogwaters tijdens extreme condities	44
4	Conclusies en aanbevelingen	46
4.1	Conclusies	46
4.1.1	Algemeen	46
4.1.2	Noordzee	46
4.1.3	IJsselmeer	47
4.2	Aanbevelingen	47
4.2.1	Algemeen	47
4.2.2	Noordzee	48
4.2.3	IJsselmeer	48
5	Literatuur	49
A	Bijlage: Modelresultaten Noordzee	50
A.1	Noordzee	50
A.1.1	RMSE van de totale waterstand van de individuele hoofdlocaties	50
A.1.2	Bias en RMSE van de scheve opzet van de individuele hoofdlocaties	53
A.2	IJsselmeer	59
A.2.1	RMSE van de totale waterstand van de individuele stations	59
A.2.2	RMSE van de hoogwaters van de individuele stations	62

1 Inleiding

1.1 Achtergrond/aanleiding

In de operationele RWSOS systemen van RWS wordt voor de meteorologische aansturing van de hydrodynamische hoogwatervoorspellingsmodellen gebruikt gemaakt van de windsnelheid, de windrichting en de luchtdruk uit de operationele HiRLAM berekeningen van het KNMI. KNMI is in mei 2020 gestopt met operationele HiRLAM berekeningen en deze zijn vervangen door berekeningen met HARMONIE(v40). Hierbij heeft feitelijk een migratie plaatsgevonden van het huidige HiRLAM meteorologisch model naar het HARMONIE meteorologisch model.

RWS heeft behoefte aan een inschatting van de mogelijke gevolgen voor de voorspelkwaliteit als gevolg van de overgang naar dit nieuwe meteorologische model. Om hier inzicht in te krijgen is in KPP2020 voor de Noordzee en het IJsselmeer een voorspelanalyse gedaan op basis van beide meteorologische modellen. Voor het IJsselmeer is daar ook aansturing op basis van de gedownscaled meteorologische resultaten van HiRLAM en HARMONIE aan toegevoegd. Deze activiteiten worden uitgevoerd in het verlengde van eerdere door Deltares in opdracht van RWS uitgevoerde hindcast analyse uit 2019.

1.2 Eerdere studies

De eerste fase van deze vraag is in het kader van KPP2019 Hydraulica Schematisaties uitgewerkt door Deltares onder projectnummer 11203715-010. Dit heeft in het najaar van 2019 geresulteerd in twee rapportages met bevindingen:

1. Noordzee: (Zijl et al., 2019)
Validatie HARMONIE met operationele voorspellingmodellen in Noordzee, rapport 11203715-010-ZKS-0004
2. Meren: (Genseberger & Eijsberg-Bak, 2019)
Consequenties overgang HiRLAM downscale naar HARMONIE in IJsselmeergebied, specifiek voor WAQUA modellen RWSOS Meren, memo 11203715-010-ZKS-0003

In de eerste rapportage is gekeken naar de effecten op waterstanden (en golven) op de Noordzee. Er is hiervoor een validatie met waterstandmetingen uitgevoerd, op basis van een hindcast berekening voor de jaren 2015 – 2017 met het vijfde generatie WAQUA model DCsMv6-ZUNOV4. Dit is gedaan met meteorologische aansturing van drie verschillende meteorologische modellen: HiRLAM, HARMONIE en ECMWF IFS. Op basis hiervan werd geconcludeerd dat het toepassen van HARMONIE in het algemeen leidt tot een kleine verslechtering van de totale waterstanden en de (scheve) opzet (in vergelijking met HiRLAM en ECMWF aansturing). Voor de zwaardere stormen in de beschouwde periode zijn de resultaten met HARMONIE (en ECMWF) aansturing beduidend slechter dan met HiRLAM.

In de tweede rapportage is gekeken naar de effecten op waterstanden in het IJsselmeer, het Markermeer en de Veluwerandmeren. Er is hiervoor een onderlinge vergelijking uitgevoerd van de waterstanden zoals berekend met de vijfde generatie WAQUA-modellen voor deze gebieden. De hindcast berekeningen voor de periode van 2015 – 2017 zijn gedaan met aansturing van drie verschillende meteorologische modellen: HiRLAM, HiRLAM-downscaling en HARMONIE. Er is bij de berekeningen gekozen voor een vast meerpeil gedurende de gehele periode van 3 jaar. Hierdoor was een vergelijking met metingen niet mogelijk en zijn de uitkomsten van de modellen alleen onderling met elkaar vergeleken.

In het IJsselmeergebied leidt het gebruik van HARMONIE in plaats van HiRLAM-downscaling tot veel en relatief grote verschillen in berekende waterstanden. Over het algemeen werd geconcludeerd dat aansturing door HARMONIE voor structureel minder op- of afwaaiing zorgt (vergeleken met HiRLAM-downscaling). Voor de operationele voorspellingen met RWsOS Meren betekent dit dat, bij gebruik van HARMONIE, de waarschuwningsniveaus minder vaak bereikt zullen gaan worden.

Bovenstaande bevindingen waren aanleiding om in 2020 nog verschillende zaken verder uit te zoeken voor zowel de Noordzee als het IJsselmeer – ditmaal op basis van een voorspelanalyse. Het resultaat van dit onderzoekwerk wordt in dit rapport beschreven.

1.3 Doelstelling

Het overkoepelende doel van de in dit rapport beschreven werkzaamheden is het verder in kaart brengen van de consequenties van de migratie van HiRLAM naar HARMONIE voor operationele hoogwatervoorspellingsmodellen van de Noordzee en het IJsselmeer. De activiteiten staan in het verlengde van de in 2019 uitgevoerde activiteiten.

Aan het bewerkstelligen van dit doel is invulling gegeven door het analyseren van de (waterstand)voorspelkwaliteit van de hydrodynamische modellen van de operationeel gebruikte modellen voor de Noordzee en het IJsselmeer. Voor het IJsselmeer is een belangrijke aanvulling ten opzichte van de in 2019 uitgevoerde studie dat er nu ook (kwantitatief) vergeleken wordt met waterstandmetingen.

Om een oordeel te kunnen vellen over de kwaliteit van de waterstandvoorspellingen met HARMONIE aansturing, wordt de voorspelkwaliteit ook bepaald met meteorologische aansturing door HiRLAM. Voor het IJsselmeer is daar ook nog HiRLAM-downscaling en HARMONIE-downscaling aan toegevoegd. De voorspelanalyse is uitgevoerd voor dezelfde periode waarvoor in 2019 de hindcast analyse is uitgevoerd: 2015-2017.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de gevolgde aanpak toegelicht, waarna in Hoofdstuk 3 de resultaten volgen voor Noordzee (H3.1) en IJsselmeer (H3.2). Hoofdstuk 4 wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

2 Aanpak

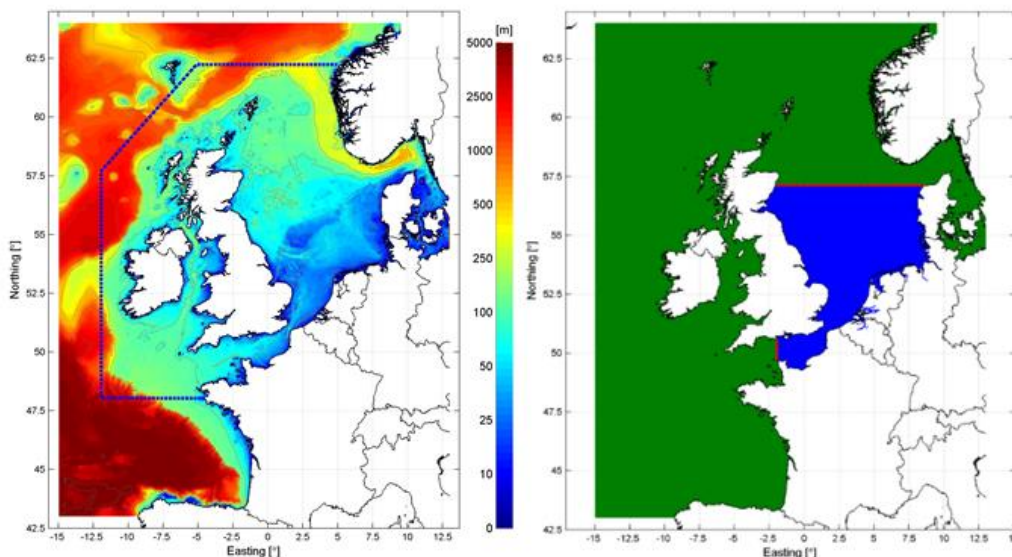
2.1 Algemeen

De gevolgen van de overstap van HiRLAM naar HARMONIE worden in kaart gebracht door het doen van een groot aantal opeenvolgende modelvoorspellingen, op basis van beide meteorologische modellen. Voor IJsselmeer wordt daar ook aansturing op basis van de gedownscalede meteorologische resultaten van HiRLAM en HARMONIE aan toegevoegd. Op basis van de resultaten van de voorspelberekeningen wordt de modelkwaliteit bepaald voor de verschillende intervallen van de voorspelhorizon (tot aan 48 uur vooruit). De sequentie van voorspellingen wordt gedaan voor de periode 2015-2017. Dit zijn de drie volledige kalenderjaren waarbinnen de data van HARMONIEv40 beschikbaar is gemaakt door het KNMI. Een belangrijk uitgangspunt bij de opzet van de voorspelanalyse is het zo veel mogelijk overeen komt met het operationele gebruik bij Rijkswaterstaat. Slechts wanneer dit niet mogelijk was, is hiervan afgeweken. In de volgende paragrafen wordt verder beschreven hoe de voorspelanalyse voor Noordzee en IJsselmeer is uitgevoerd.

2.2 Hydrodynamisch modellen

2.2.1 Noordzee

Voor deze studie is gebruik gemaakt van het getij-opzetmodel van de Noordzee, DCSMv6-ZUNOV4 (waqua-dcsmv6_zunov4_kf-j17-v1). Dit is dezelfde versie als gebruikt voor de hindcast-analyse (Zijl et al., 2019) en is ook de versie die operationeel gebruikt wordt. Dit model beslaat het Noordwest Europese Continentaal Plat, inclusief de gehele Noordzee en aangrenzende kustzeeën (Waddenzee) en estuaria (Oosterschelde, Westerschelde). Het model bestaat uit twee domeinen die met behulp van een zogenoemde domein-decompositietechniek aan elkaar gekoppeld zijn en zodoende als één model functioneren. Het buitenste DCSMv6-domein omvat de diepe oceaan, de Ierse Zee en het noordelijke deel van de Noordzee. Het binnenste ZUNOV4-domein omvat het Kanaal en de centrale en zuidelijke Noordzee. Met name langs de Nederlandse kust en in de Nederlandse estuaria en Waddenzee heeft dit domein een verhoogde roosterresolutie. Een overzicht van de bathymetrie en de twee modeldomeinen is gegeven in Figuur 2.1. De modelinstellingen zijn gelijk aan de operationele instellingen en die van het gebruikte model bij de hindcast-analyse uit 2019 (Zijl et al., 2019). Een volledige modelbeschrijving is beschikbaar in Zijl et al. (2013) en Zijl (2013).



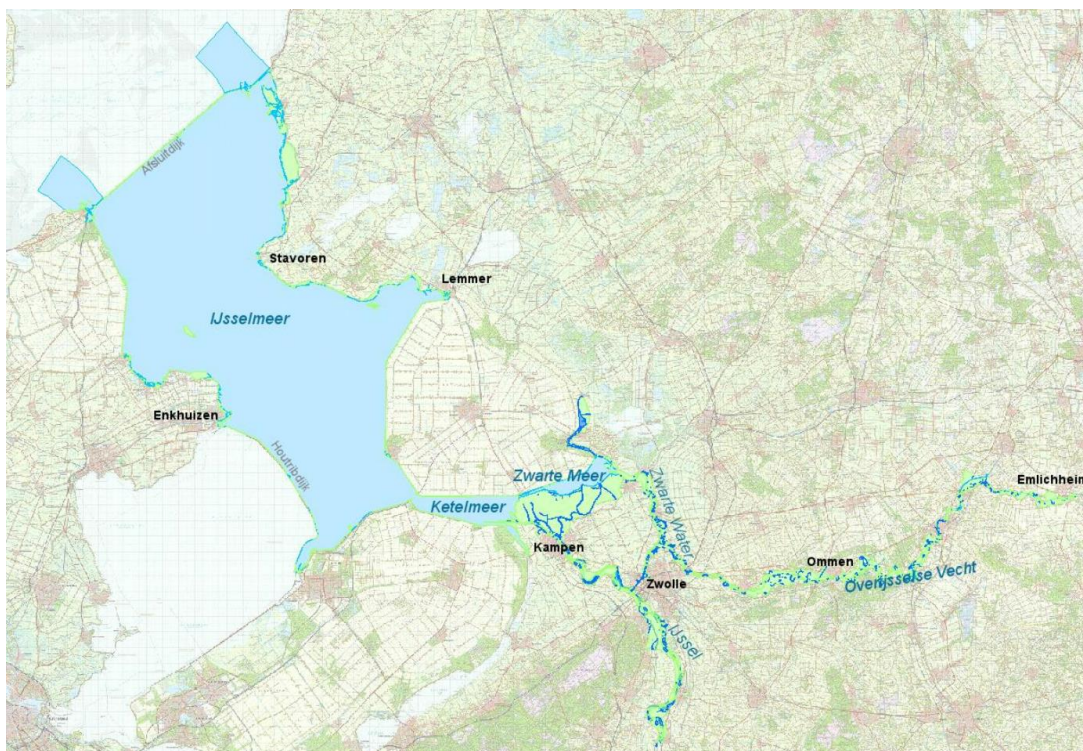
Figuur 2.1 Bathymetrie in DCSMv6-ZUNOv4 (links) en modeldomeinen (rechts) van DCSMv6 (groen) en ZUNOv4 (blauw).

Tijdsafhankelijke modelinvoer

Naast de meteorologische oppervlakteaansturing wordt het model langs de open oceaanzijden aangestuurd met een waterstandrandvoorwaarde, bestaande uit een harmonisch getij en de opzet, afgeleid uit de opgegeven atmosferische druk door middel van een Inverse Barometer Correctie. Voor een aantal Nederlandse rivieren worden debietreeksen opgegeven.

2.2.2 IJsselmeer

Voor de voorspelanalyse van het merengebied is het operationele WAQUA-model van het IJssel-Vechtdeltagebied gebruikt, IJVD (waqua-ym_ijvd_ov-j16_5-v1). Dit model omvat de Overijsselse Vecht, het Zwarte Water, het Zwarte Meer, de IJssel, het Ketelmeer en het IJsselmeer. Het modeldomein is weergegeven in Figuur 2.2. Een volledige modelbeschrijving is beschikbaar in Van der Mheen (2014).

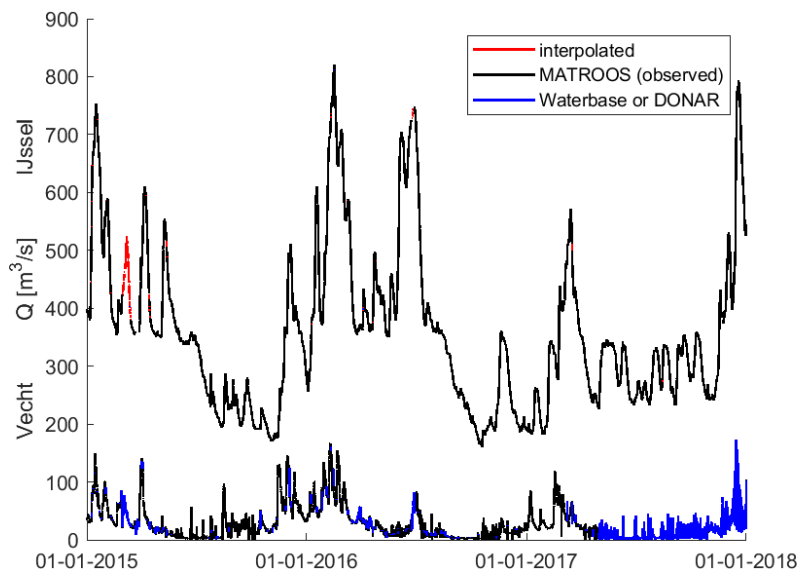


Figuur 2.2 Modeldomein van IJVD

Afvoergegevens

Operationeel worden voorspelde debieten van de IJssel te Olst en de Vecht te Ommen (Hesselmulertbrug) opgegeven als modelinvoer. Deze voorspellingen zijn voor de gemodelleerde periode niet meer beschikbaar. Als alternatief zijn de uit metingen afgeleide debieten gebruikt. Het gros van deze gegevens bestaat uit een samenvoeging van 10-minuutsdata van de MATROOS-database van Rijkswaterstaat (RWS-MATROOS) en/of de MATROOS-database kopie die bij Deltares wordt bewaard (Deltares-MATROOS). In deze tijdseries blijven nog enkele gaten over. Voor de IJssel is dit opgevuld met uurlijkse gegevens uit de Waterbase-database. Voor de Vecht zijn afvoeren uit DONAR gebruikt. De overgebleven gaten in de tijdserie worden opgevuld door middel van lineaire interpolatie. Hieruit volgt één tijdserie per rivier, die in tegenstelling tot de operationele implementatie voor alle modelberekeningen gelijk is, ongeacht de gebruikte meteorologie of voorspelhorizon. Een overzicht van de bronnen en geïnterpoleerde periodes is gegeven in Figuur 2.3.

De laterale instroom is ingesteld op 0 m³/s bij Regge en Linderbeek en op 36% van het debiet te Ommen bij Sluis Meppelerdiep. Deze laatste locatie lijkt in het operationeel gebruik te zijn verwisseld met de locatie Zwolse Stadsgrachten. In dit geval zou het debiet bij Sluis Meppelerdiep uit FEWS-Vecht overgenomen moeten worden. Voor deze analyse is de (incorrecte) operationele implementatie behouden.



Figuur 2.3 Gemeten afvoeren voor de IJssel en Vecht uit MATROOS en Waterbase

Waterstanden

Voor het bepalen van de spuidebieten door de sluisen te Den Oever en Kornwerderzand in de Afsluitdijk wordt operationeel een voorspelling gebruikt van de waterstanden in de Waddenzee van Den Oever buiten en Kornwerderzand buiten. Ook deze tijdseries zijn ingevuld met meetgegevens uit Waterbase. Hieruit volgt een tijdserie met 10-minuutsgegevens zonder missende periodes.

Voor de meerpeilcorrectie aan het begin van elke nieuwe voorspelling worden waterstanden gebruikt voor Den Oever binnen, Houtribsluisen noord, Lemmer Bumagemaal en Kornwerderzand binnen. Gebruikte metingen in deze berekening komen voor de laatste drie locaties uit een eerdere kopie van de Waterbase-database van Rijkswaterstaat. De meetgegevens voor Den Oever binnen zijn opgehaald van de MATROOS database. Hierbij zijn overgebleven missende periodes opgevuld door middel van een lineaire interpolatie.

Streefpeil

De spuidebieten naar de Waddenzee worden tijdens de berekening door het model bepaald op basis van de waterstanden aan beide zijden van de spuisluisen alsmede het streefpeil van het IJsselmeer. Hiervoor is op basis van het Peilbesluit Rijkswateren IJsselmeergebied (Van der Wildt, 1992) een tijdserie opgesteld met een winterpeil van -40 cm en een zomerpeil van -20 cm. Voor de overgangsperiodes is een lineaire interpolatie gebruikt van 20 maart tot 10 april en van 20 september tot 10 oktober.

2.2.3 Software

Voor zowel de Noordzee als het IJsselmeer zijn de hydrodynamische berekening gedraaid met SIMONA2019. Operationeel wordt voor het IJsselmeer SIMONA2016 gebruikt en voor de Noordzee SIMONA2018. Hiervan is afgeweken omdat er problemen waren met het door een python-script opstarten van de berekeningen ten behoeve van de hervoorspelling. Dit probleem is verholpen door de overstap op de meest recente versie van SIMONA. Een controleberekening voor de Noordzee liet zien dat verschillen in berekende waterstanden door het verschil in SIMONA-versies verwaarloosbaar is. Dit wordt ook bevestigd door het testverslag van de SIMONA2019 release (Plieger & De Goede (2019)).

Uiteindelijk is gebruik gemaakt van patch 4 voor SIMONA2019, waarin enkele verbeteringen zijn doorgevoerd voor het updaten van knoofactoren, het inlezen van lange tijdreeksen en het ASCII LC-formaat voor de meteorologische invoer uit HARMONIE-downscaling. Een overzicht van de softwareversies bij operationeel gebruik, de hindcast-analyse uit 2019 en deze studie staat in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Overzicht van gebruikte SIMONA-versies

Model	Operationeel gebruik	Hindcast-analyse 2019	Hervoorspellings-analyse (deze studie)
Noordzee (DCSMv6-ZUNOv4)	SIMONA2018	SIMONA2017	SIMONA2019, patch 4
IJsselmeer (IJVD)	SIMONA2016	SIMONA2017	SIMONA2019, patch 4

2.3 Meteorologische modellen

Voor de meteorologische aansturing van de hydrodynamische modellen is gebruik gemaakt van HARMONIE en HiRLAM. Voor aansturing van het IJsselmeer model is aanvullend gebruik gemaakt van de gedownscalede resultaten van HiRLAM en HARMONIE. De datasets hebben verschillende voorspelperiodes, analyse-intervallen en uitvoerintervallen. Een overzicht van de gebruikte gegevens en bijbehorende tijdsinformatie is hieronder gegeven met een overzichtstabel per model. ECMWF-voorspellingen zijn binnen deze studie buiten beschouwing gelaten. Deze zijn voor de benodigde periode niet opgeslagen in MATROOS, maar zijn nog wel beschikbaar in het MARS-archief van ECMWF. Vooral voor de Noordzee zou het interessant kunnen zijn om deze meteorologische aansturing in de toekomst aan de analyse toe te voegen.

2.3.1 HiRLAM

Op de RWS-MATROOS zijn alleen de HiRLAM-voorspellingen met een voorspelhorizon tot 6 uur (vanaf t_0 , de analyseperiode) beschikbaar voor de gevraagde periode. Voorspellingsuitvoer verder vooruit wordt na 100 dagen verwijderd. Daarom is gebruik gemaakt van de Deltares-MATROOS, waar de benodigde informatie beschikbaar is voor de gewenste voorspelhorizon (0-48 uur). Een overzicht van de gebruikte gegevens uit HiRLAM is gegeven in Tabel 2.2.

Voor enkele periodes zijn de HiRLAM-voorspellingen niet beschikbaar. In dit geval wordt een serie van de kortere datasets van de MATROOS-server van Rijkswaterstaat gedownload zodat de serie van sommen door kan lopen, zonder gebruik te maken van een koude start. Deze voorspellingen lopen slechts tot het nieuwe analysemoment waarop de volgende voorspelling begint en bevatten dus niet de volledige voorspelhorizon van 48 uur. Het gaat hier dus enkel om de hindcast. De betreffende missende voorspellingen staan in Tabel 2.3. Deze voorspelling ontbreken volledig (0-48u) in de database.

Tabel 2.2 Overzicht van eigenschappen HiRLAM

Model (MATROOS)	Gebruikte jaren	Voorspel-horizon	Analyse-interval	Uitvoer-interval	Uitvoer-variabelen	Data-formaat
HiRLAM versie 7.2 (h11_v72)	2015 - 2017	48 uur	6 uur	1 uur	luchtdruk, windsnelheid (U10)	NetCDF

Tabel 2.3 Missende voorspellingen in HiRLAM

T0 Voorspelling	T0 Voorspelling
2016-03-21 00:00 t/m 2016-03-22 00:00	2016-06-22 12:00 en 18:00
2016-05-29 12:00 en 18:00	2016-06-25 00:00 en 12:00
2016-05-30 06:00 en 18:00	2016-06-26 06:00
2016-06-04 00:00	2016-06-28 06:00
2016-06-07 12:00	2016-06-30 06:00
2016-06-11 12:00	2016-09-17 12:00
2016-06-15 12:00	2017-03-18 00:00
2016-06-16 12:00	2017-03-18 06:00
2016-06-17 06:00	2017-07-25 00:00
2016-06-21 06:00	

2.3.2 HiRLAM-downscaling

HiRLAM-downscaling bestaat voor deze analyse uit een combinatie van verschillende modelresultaten. Operationeel wordt een enkele bron gebruikt, maar deze is binnen MATROOS voor historische perioden niet beschikbaar met een voorspelhorizon van 48 uur. In de operationele IJsselmeerberekening met HiRLAM-downscaling wordt gebruik gemaakt van de meteorologische voorspelling uit de MATROOS-bron *knmi_d11_dwnc_nl*. Hierin staan uurlijkse velden voor de eerste 24 uur van de forecast. Voor de volgende 24 uur (24-48 uur) staan hier 3-uurlijkse velden. In RWsOS is dat onderscheid in tijdsresolutie niet goed te zien, omdat er een interpolatiestap plaatsvindt naar uurlijkse data. Mogelijk heeft het gebruik van 3-uurlijkse gegevens tijdens stormen invloed op de nauwkeurigheid van de resultaten. Een overzicht van de gebruikte gegevens uit HiRLAM-downscaling is gegeven in Tabel 2.4.

Ook voor HiRLAM-downscaling waren niet alle voorspellingen beschikbaar in de Deltares-MATROOS. Ontbrekende periodes zijn opgevuld met de 'hindcast' van de RWS-MATROOS. Een overzicht van de volledig ontbrekende voorspellingen staat in Tabel 2.5.

Tabel 2.4 Overzicht van eigenschappen HiRLAM-downscaling

Model (MATROOS)	Gebruikte jaren	Voorspel horizon	Analyse-interval	Uitvoer-interval	Uitvoer-variabelen	Data-formaat
HiRLAM-downscaling IJsselmeer (h11_d500_ijsm)	2015 - 2016 (voorspelling 0-24 uur)	24 uur	6 uur	1 uur	luchtdruk, windsnelheid (U10)	NetCDF
HiRLAM-downscaling IJsselmeer (d22_d500_ijsm)	2015 - 2016 (voorspelling 24- 48 uur)	48 uur	6 uur	3 uur	luchtdruk, windsnelheid (U10)	NetCDF
HiRLAM-downscaling Nederland (d11_d500_nl)	2017 (voorspelling 0-48 uur)	48 uur	6 uur	1 uur (0-24 uur) 3 uur (24-48 uur)	luchtdruk, windsnelheid (U10)	NetCDF

Tabel 2.5 Missende voorspellingen in HiRLAM-downscaling

Model	T0 Voorspelling
HiRLAM-downscaling (h11)	2015-01-01 00:00 t/m 2015-01-08 00:00
	2016-03-21 00:00 t/m 2016-03-22 06:00
	2016-09-17 12:00
HiRLAM-downscaling (d22)	2015-01-01 00:00 t/m 2015-01-08 00:00
	2015-06-04 00:00
	2015-10-12 12:00
	2015-10-13 00:00
	2015-12-14 18:00
	2016-03-21 00:00 t/m 2016-03-22 00:00
	2016-08-27 00:00
	2016-09-17 12:00 en 18:00
	2016-10-15 00:00
	2016-12-01 18:00
HiRLAM-downscaling (d11)	2017-01-11 00:00 t/m 2017-02-12 00:00
	2017-03-18 00:00 en 06:00
	2017-07-24 18:00
	2017-07-25 00:00
	2017-08-04 18:00

2.3.3 HARMONIE

Resultaten van hervoorspellingen met het nieuwe model HARMONIE zijn in GRIB-formaat aangeleverd door het KNMI. Een overzicht van de gebruikte gegevens uit HARMONIE is gegeven in Tabel 2.6. Het analyse-interval voor aangeleverde HARMONIE reforecast gegevens is 3 uur met een voorspelhorizon van om en om 3 uur en 48 uur. Dit betekent dat slechts elke 6 uur een volledige voorspelling van 48 uur berekend is. Het interval tussen de voorspellingen is daarmee gelijk aan HiRLAM. In deze studie zijn de extra analyse-periodes met een kortere voorspelhorizon meegenomen in de Noordzeeberekeningen, zoals beschreven in de paragraaf 2.5.1.

Voor enkele HARMONIE-hervoorspellingen missen de laatste uren, waarbij het hydrodynamische model verder rekent met het laatste veld. Wat betreft de 'hindcast' is de set tot het nieuwe analysemoment compleet. Een volledig overzicht van de voor deze analyse ontbrekende voorspellingen staat in Tabel 2.7. In 2019 bleek uit de analyse achteraf dat er in de vijf periodes fouten zitten in de HARMONIE-hervoorspelling. Deze periodes zijn in Tabel 2.8 opgenomen.

Tabel 2.6 Overzicht van eigenschappen van HARMONIE

Model (MATROOS)	Gebuurte jaren	Voorspel-horizon	Analyse-interval	Uitvoer-interval	Uitvoer-variabelen	Data-formaat
HARMONIE	2015 - 2017	3 uur/48 uur	3 uur	1 uur	luchtdruk, windschuifspanning	GRIB

Tabel 2.7 Missende voorspellingen in HARMONIE en HARMONIE-downscaling

T0 Voorspelling	Missende tijd(en)
2015-01-09 18:00	47-48
2017-01-04 18:00	22-48
2017-03-02 12:00	48
2017-03-03 06:00	29-48

Tabel 2.8 Periodes met incorrecte voorspellingen in HARMONIE en HARMONIE-downscaling reforecast

2015-11-18 18:00 – 2015-12-01 06:00
2016-07-15 12:00 – 2016-07-15 18:00
2016-12-15 12:00 – 2016-12-30 00:00
2017-09-03 18:00 – 2017-09-04 00:00
2017-12-31 06:00 – 2017-12-31 12:00

2.3.4 HARMONIE-downscaling

Voor het merengebied zijn ook de gedownscalede resultaten van het HARMONIE-model beschikbaar gesteld door het KNMI. HARMONIE-downscaling is speciaal voor deze studie gegenereerd door het KNMI met versie 4.0 van de downscaling-module, op basis van de hervoorspellingen met HARMONIE. Een overzicht van de gebruikte gegevens uit HARMONIE-downscaling is gegeven in Tabel 2.9. Omdat de downscaling-variant op HARMONIE gebaseerd is, komen de missende en incorrecte periodes overeen met die van HARMONIE. Het overzicht hiervan staat in Tabel 2.7.

Tabel 2.9 Overzicht van eigenschappen HARMONIE-downscaling

Model (MATROOS)	Gebruikte jaren	Voorspel-horizon	Analyse-interval	Uitvoer-interval	Uitvoer-variabelen	Data-formaat
HARMONIE-downscaling IJsselmeer	2015 - 2017	48 uur	6 uur	1 uur	luchtdruk, windsnelheid (U10)	GRIB

2.3.5 Ontbrekende meteorologische voorspellingen

Bij de analyse van de resultaten zijn eventuele missende periodes weggelaten. Voor de foutieve voorspellingen met HARMONIE zijn daarbovenop 2 dagen na deze periodes weggelaten om er zeker van te zijn dat de fouten uit het systeem zijn. Achteraf wordt voor alle missende periodes uit de verschillende meteorologische modellen gecorrigeerd, door ze in alle analyses (van alle berekeningen met verschillende meteorologische forceringen en voorspelhorizon) in zowel de metingen als berekeningsresultaten buiten beschouwing te laten.

2.4 Winddrag-relaties

De impulsoverdracht tussen atmosfeer en water wordt weergegeven als windschuifspanning. Indien de modellen aangestuurd worden met HARMONIE, is dat ook de parameter die tijds- en ruimte-afhankelijk opgegeven wordt. Consistentie tussen het meteorologisch en hydrodynamisch model is daarmee gegarandeerd. De horizontale impuls die het meteorologisch model via het lucht-waterscheidingsvlak verlaat is dus gelijk aan de impuls die het hydrodynamisch model via het oppervlak binnenkomt.

Bij gebruik van de andere meteorologische modellen wordt er een windsnelheid op 10m boven het wateroppervlak (U10) voorgeschreven. Deze windsnelheid wordt in de hydrodynamisch model-software vertaald naar een windschuifspanning. Voor deze vertaling zijn in de software verschillende formuleringen met bijbehorende coëfficiënten beschikbaar.

2.4.1 Noordzee

In het Noordzeemodel is gepoogd de vertaling van windsnelheid naar windschuifspanning zoveel mogelijk consistent te laten verlopen met wat er in het meteorologisch model gebruikt wordt. Bij gebruik van HiRLAM wordt dit bereikt door gebruik te maken van een Charnock-formulering met een constante, uniforme Charnock-parameter van 0,025. Dit is gelijk aan wat er operationeel toegepast wordt. Bij gebruik van HARMONIE wordt in deze studie de windschuifspanning direct opgelegd. Hiermee is consistentie met het meteorologisch model gegarandeerd.

In Tabel 2.10 wordt een overzicht gegeven van de voor het Noordzeemodel gebruikte winddrag-relaties. De gebruikte aanpak is gelijk aan wat er in de hindcast-studie (Zijl et al., 2019) gebruikt is.

Tabel 2.10 Relaties voor winddrag bij gebruik van Noordzeemodel (DCSMv6-ZUNOV4)

Meteorologisch model	Winddrag-relatie in meteorologisch model	Doorgegeven meteorologische parameters	Winddrag-relatie in hydrodynamisch model
HiRLAM v7.2	Charnock 0,025, Von Karman 0,40	luchtdruk (Pmsl), windsnelheid (U10)	Charnock 0,025, Von Karman 0,40
HARMONIE	ECUME met Charnock 0,015, Von Karman 0,40	luchtdruk (Pmsl), windschuifspanning	[-]

2.4.2 IJsselmeer

Voor het IJsselmeermodel is voor HiRLAM en HiRLAM-downscaling uitgegaan van de huidige operationele implementatie, waar voor de doorvertaling van U10 naar windschuifspanning gebruik gemaakt wordt van de zogenoemde RWS-trapjeslijn. Dit is gelijk aan wat er in de hindcast-studie gebruikt is (Genseberger & Eijsberg-Bak, 2019), maar wijkt af van wat er in deze meteorologische modellen gebruikt wordt.

Voor HARMONIE en HARMONIE-downscaling is de wens om zoveel mogelijk consistentie tussen het meteorologisch en hydrodynamisch model te bewerkstelligen. Bij gebruik van HARMONIE-forcering wordt dat bewerkstelligd door de aangeleverde windschuifspanning direct aan het IJsselmeer model op te leggen. Voor HARMONIE-downscaling is de windschuifspanning niet beschikbaar (zowel operationeel als voor deze studie). Een voor de hand liggend alternatief is het gebruik van dezelfde winddrag-relatie als in de downscaling-module. Hierin wordt echter een Von Karman-constante met waarde 0,41 gebruikt, wat afwijkt van de waarde die in de Charnock relatie in SIMONA gebruikt wordt (0,40). Omdat deze waarde in SIMONA niet in te stellen is, is er voor gekozen om ook voor HARMONIE-downscaling gebruik te maken van de RWS-trapjeslijn. Deze aanpak is gelijk aan de die in de HARMONIE-hindcast-analyse (Genseberger & Eijsberg-Bak, 2019).

Tabel 2.11 Relaties voor winddrag bij gebruik van IJsselmeermodel (IJVD)

Meteorologisch model	Winddrag-relatie in meteorologisch model	Doorgegeven meteorologische parameters	Winddrag-relatie in hydrodynamisch model
HiRLAM v7.2	Charnock 0,025, Von Karman 0,40	Pmsl, U10	RWS-trapjeslijn
HiRLAM downscaling	Charnock 0,017, Von Karman 0,41	Pmsl, U10	RWS-trapjeslijn
HARMONIE	Charnock 0,015, Von Karman 0,40	Pmsl, windschuifspanning	[-]
HARMONIE downscaling	Charnock 0,017, Von Karman 0,41	Pmsl, U10	RWS-trapjeslijn

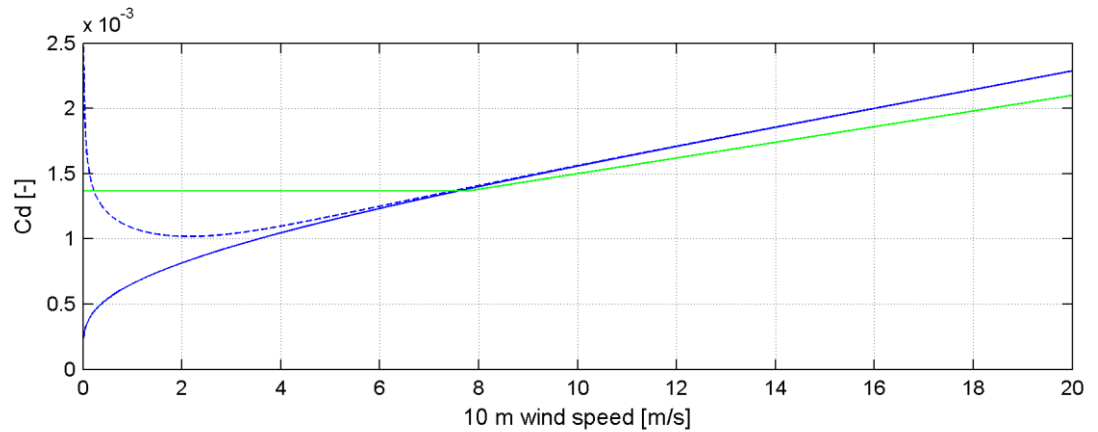
Impact van inconsistentie in winddrag-relaties

Bij de aansturing van het IJsselmeermodel is uitgegaan van de winddrag-relatie die gebruikt wordt in de operationele implementatie. Het doel is immers om te weten wat de consequenties van de HiRLAM-HARMONIE-overstap zijn in de operationele praktijk van het Water Management Centrum Nederland (WMCN) / Hydro Meteo Centrum (HMC). Hoewel drie van de vier configuraties inconsistent met het meteorologisch model zijn, is het voordeel van deze aanpak dat de uitkomsten beter te relateren zijn aan wat er operationeel verwacht kan worden. Een nadeel is echter dat verschillen in voorspelkwaliteit tussen de verschillende modellen niet alleen aan het meteorologisch model kunnen worden toegeschreven, maar deels ook veroorzaakt kunnen worden door verschillen in de mate van inconsistentie in lucht-water impulsoverdracht. Dit zou verder onderzocht kunnen worden door de hindcast-berekening een keer opnieuw te draaien, maar dan met een consistente winddrag-relatie. Dit is echter geen onderdeel van deze studie.

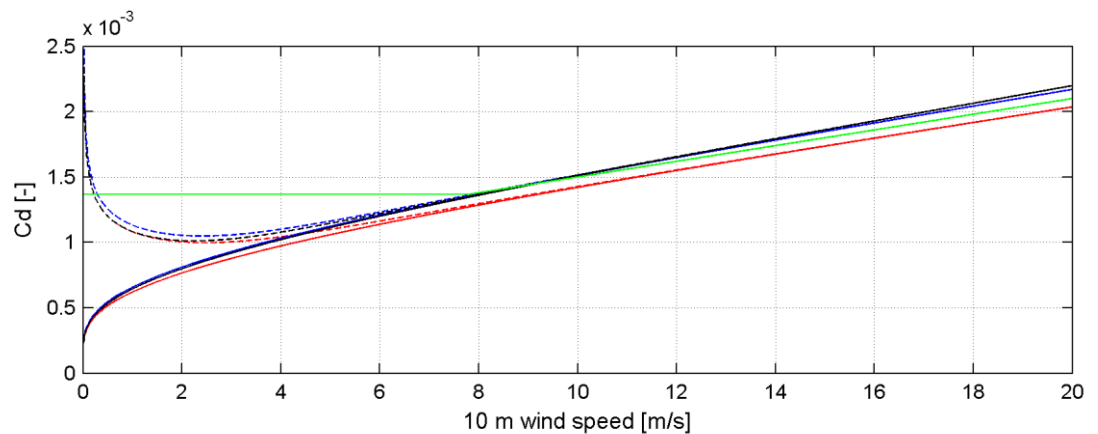
In Figuur 2.4 en Figuur 2.5 wordt de luchtweerstandscoefficiënt C_d volgend uit verschillende winddrag-relaties uitgezet tegen de windsnelheid. De gestippelde lijnen geven de Charnock-relaties weer, maar met een viskeuze term toegevoegd. In SIMONA is deze term niet geïmplementeerd. In Figuur 2.4 wordt de winddrag-relatie, gebruikt in HiRLAM (blauw; Charnock 0,025, Von Karman 0,40), vergeleken met de RWS-trapjeslijn (groen), die gebruikt wordt in het hydrodynamisch model. Hieruit blijkt dat bij gebruik van de RWS-trapjeslijn de impulsuitwisseling bij windsnelheden groter dan circa 8 m/s onderschat wordt ten opzichte van de impulsoverdracht die door het meteorologisch model wordt uitgerekend. Dit zal vermoedelijk leiden tot een onderschatting van de respons van de waterstand tijdens stormen (een lagere positieve opzet en een hogere negatieve opzet). Verder is belangrijk te vermelden dat, hoewel de verschillen in C_d bij lage windsnelheden groot lijken, de impuls overdracht bij die windsnelheden zeer klein is. De impact op waterstanden is daarom onder die omstandigheden waarschijnlijk klein.

Figuur 2.5 geeft eenzelfde weergave voor de downscaling-modellen. De blauwe lijn geeft daarin de winddrag-relatie van de downscaling-module weer (Charnock 0,017, Von Karman 0,41) en de groene lijn de RWS-trapjeslijn die gebruikt wordt in het hydrodynamisch model. Hieruit blijkt dat bij gebruik van de RWS-trapjeslijn de impulsuitwisseling bij windsnelheden groter dan circa 9 m/s onderschat wordt ten opzichte van de impulsoverdracht die door de downscaling-module wordt uitgerekend. Wel is de onderschatting kleiner dan bij gebruik van de RWS-trapjeslijn in combinatie met HiRLAM forcering.

Implementatie van de winddrag-relatie zoals gebruikt in de downscaling-module was zonder aanpassing van de code niet mogelijk in WAQUA. Dit komt omdat in WAQUA een Von Karman constante van 0,40 wordt aangenomen, terwijl in de downscaling-module een waarde van 0,41 gebruikt wordt. Het negeren van dit verschil en gebruik van eenzelfde Charnock constante zou in WAQUA een te lage windschuifspanningcoëfficiënt geven (rode lijn, Charnock 0,017, Von Karman 0,40). Hoewel het niet exact hetzelfde resultaat geeft, is dit gedeeltelijk te compenseren door de Charnock coëfficiënt te verhogen naar 0,022 (zwarte lijn). Dit resulteert in een meer consistente impulsoverdracht dan bij gebruik van de RWS-trapjeslijn. Toch is er vanwege consistentie voor gekozen om, bij gebruik van downscaling in deze studie, gebruik te maken van de RWS-trapjeslijn.



Figuur 2.4 Luchtweerstandrelaties voor HiRLAM v7.2 (blauw: Charnock 0,025, Von Karman 0,40; groen: RWS-trapjeslijn)



Figuur 2.5 Luchtweerstandrelaties voor HiRLAM-downscaling en HARMONIE-downscaling (rood: Charnock 0,017, Von Karman 0,40; blauw: Charnock 0,017, Von Karman 0,41; zwart: Charnock 0,022, Von Karman 0,40; groen: RWS-trapjeslijn).

2.5 Aanpak voorspelanalyse

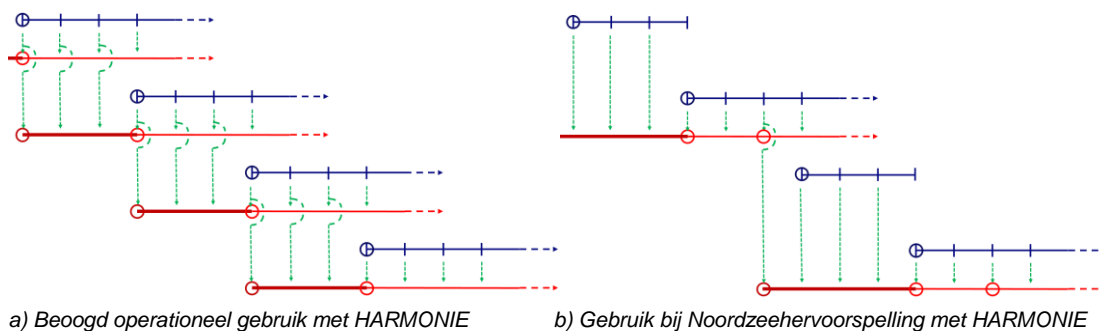
2.5.1 Voorspelcyclus

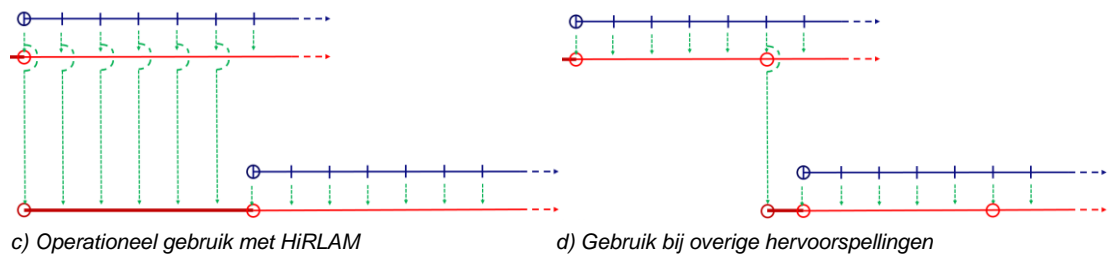
De berekeningen met de hydrodynamische modellen zijn gedraaid op het Linux-rekencluster van Deltares. In tegenstelling tot een losstaande, eenmalige som, is in dit geval een overkoepelend python3-script gebruikt om het operationeel gebruik na te bootsen. Binnen dit script wordt een serie van WAQUA-sommen voorbereid en achtereenvolgens opgestart met SIMONA2019. De opvolgende som start hierbij op basis van een herstart van de vorige som.

Aan het begin van de opvolgende som wordt een korte overlappende periode van 1 uur gedraaid om de nieuwe analyse van de meteorologische gegevens mee te nemen. Operationeel wordt de volledige periode van 6 uur gebruikt, vanaf de starttijd van de vorige som. Omwille van de totale rekestijd en omdat hierbij identieke meteorologische aansturing wordt gebruikt, is hier voor deze analyse van afgeweken. Voor de Noordzeeberekeningen heeft dit geen invloed op de modelresultaten. Voor de IJsselmeerberekeningen wordt echter gebruik gemaakt van gecorrigeerde initiële waterstandsvelden. In combinatie met een bij het herstarten versprongen schuifstand van de spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand kan deze correctie een verstoring inbrengen, zoals verderop beschreven onder *Meerpeilcorrectie*. Deze verstoring wordt binnen deze studie 5 uur naar voren gehaald door de overlappende hindcast-periode in te korten en zal dus een grotere impact op de resultaten hebben dan in het operationeel gebruik.

Voor de berekeningen voor Noordzee met HARMONIE bestrijkt de overlappende hindcast-periode 4 uur, omdat een korte tussenliggende 3-uurlijkse nieuwe meteorologische analyse is meegenomen. De korte, drie uur lopende HARMONIE-resultaten zijn bij de volgende langere hervoorspellingssom gevoegd. De reden hiervoor is de tijdswinst die dit oplevert door minder te herstarten. In de praktijk zal HARMONIE elke 3 uur volledig gedraaid worden met een grotere voorspelhorizon. Deze extra voorspelling is voor het IJsselmeer niet meegenomen om alle modelvarianten op hetzelfde tijdstip te kunnen laten starten. Dit is gedaan omwille van de vergelijkbaarheid, zodat de eventuele initiële verstoring op hetzelfde moment plaatsvindt.

Een schematisatie van het verschil tussen het operationeel gebruik en het gebruik in deze studie is gegeven in Figuur 2.6.





Figuur 2.6 Tijdschema van gebruik van voorspellingen in hydrodynamische modellen (blauw: voorspeltijdstippen met als cirkel nieuwe analysemomenten, rood: hydrodynamisch model met als cirkels rekenstarttijd, starttijd van voorspelling en uitvoertijd van herstartbestand, groen: verbinding tussen gebruikte meteorologische gegevens en hydrodynamisch model)

2.5.2 Meteorologische invoer

Een kopie van de resultaten van de HARMONIE-hervoorspellingen is lokaal bij Deltares opgeslagen. Voor de modelberekening wordt hiervoor naar de benodigde bestandslocatie verwezen. De meteorologische voorspellingen van HiRLAM en HiRLAM-downscaling worden van de MATROOS-server van Deltares gedownload zodra deze nodig zijn. Na de berekening waarin de gedownloade gegevens gebruikt worden, worden de bestanden weer verwijderd om de gegevensopslag te beperken.

Het programma waqwnd.pl (onderdeel van SIMONA) converteert de meteorologische gegevens naar een SDS-formaat dat door WAQUA gelezen kan worden. De conversie verschilt per aangeleverd dataformaat (ASCII LC, GRIB of NetCDF) en uitvoervariabelen (windsnelheden of -schuifspanningen).

2.5.3 Modelinstellingen en initialisatie

Een WAQUA berekening wordt geïnitieerd door het aanroepen van waqpre.pl. De invoerbestanden, die gebruikt worden, zijn qua instellingen grotendeels gelijk aan die van de operationeel gedraaide modellen. Bij een koude start (de eerste som in de serie) wordt TLSMOOTH op 1440 gezet om de spin-up tijd te verkorten. In de opvolgende sommen staat deze instelling op 0.

2.5.4 Modeluitvoer en verwerking

De daadwerkelijke modelberekening wordt uitgevoerd door het aanroepen van waqpro.pl. De modeluitvoer in het resulterende SDS-bestand wordt omgezet naar MATLAB-bestanden met sds2mat.pl. Verder wordt – indien nodig na een conversie – de SDS-uitvoer gebruikt om de volgende som mee te herstarten. Om opslaggebruik te beperken wordt het SDS-bestand verwijderd zodra alle benodigde gegevens uitgelezen en verwerkt zijn.

2.5.5 Meerpeilcorrectie

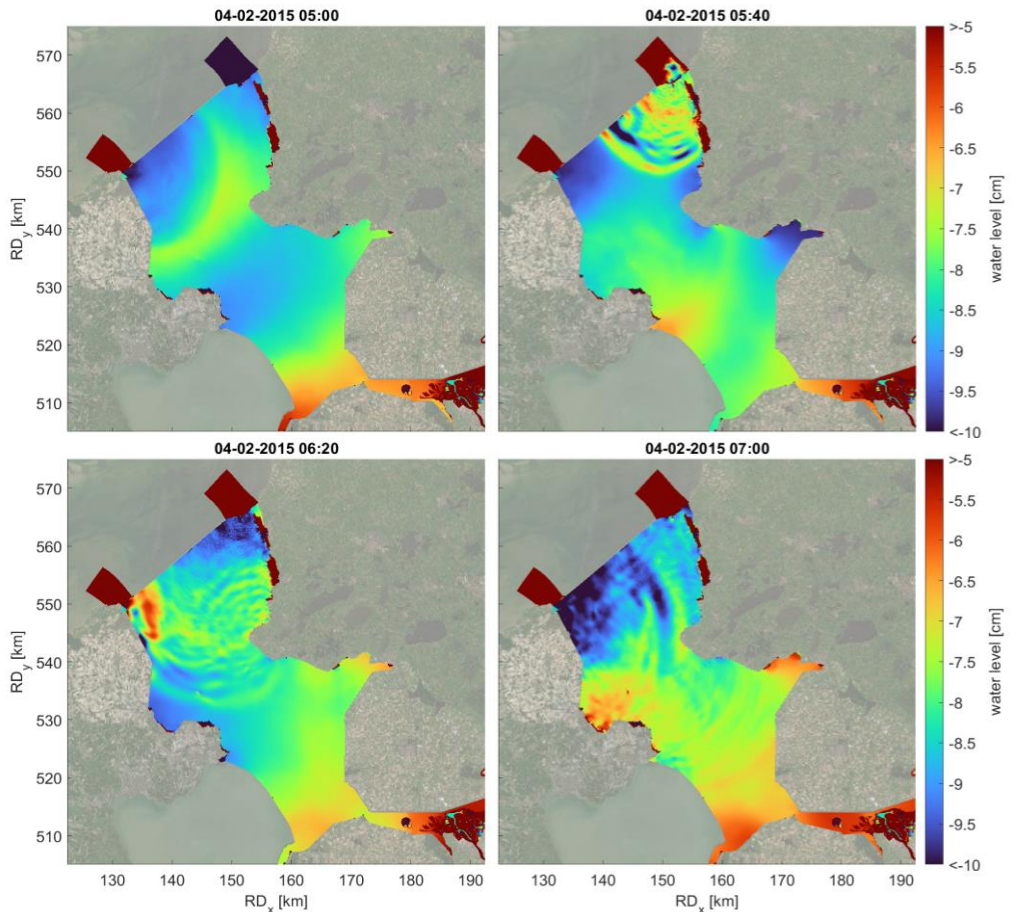
Waar de Noordzeemodellen herstarten op basis van de SDS-uitvoer van de voorgaande som, worden voor het IJsselmeer uit de SDS-uitvoer drie SIMONA-boxbestanden aangemaakt voor waterstanden, snelheden in x- en in y-richting. De bestanden met snelheden worden onaangepast gebruikt. Het bestand voor waterstanden wordt aangepast met een ruimtelijk uniforme meerpeilcorrectie. Alleen de waterstanden in droge punten worden ongewijzigd gelaten. Deze meerpeilcorrectie wordt bij de waarden in het boxbestand opgeteld en volgt uit de verhouding tussen de modelresultaten en metingen op 4 locaties volgens Formule 1.

Formule 1 Meerpeilcorrectie

$$h_{\text{meerpeilcorrectie}} = 0,22(h_{\text{meting,DenOever}} - h_{\text{model,DenOever}}) + 0,35(h_{\text{meting,Houtribsluizen}} - h_{\text{model,Houtribsluizen}}) + 0,13(h_{\text{meting,Lemmer}} - h_{\text{model,Lemmer}}) + 0,30(h_{\text{meting,Kornwerderzand}} - h_{\text{model,Kornwerderzand}})$$

Het herstarten op basis van boxbestanden, in plaats van de volledige beschikbare modeluitvoer van de vorige som uit het SDS-bestand, brengt enkele problemen met zich mee. Ten eerste is het van belang om op een correcte wijze rekening te houden met droge punten. Door het gebruik van verschillende bibliotheken binnen SIMONA worden deze niet op dezelfde manier weggeschreven in box- en NetCDF-bestanden. Dit probleem is grotendeels afgevangen door net als bij het operationeel gebruik beide resultaten te combineren. Ten tweede vervallen de op basis van het streefpeil berekende schuifstanden van de spuisluisen bij Den Oever en Kornwerderzand. Bij het herstarten komen deze niet meer overeen met de (gecorrigeerde) waterstand, waardoor een verstoring in het model kan optreden. Dit is zichtbaar als een golf in Figuur 2.7.

Operationeel wordt tweemaal een meerpeilcorrectie toegepast en herstart: aan het begin van de hindcast ($t_0 - 6$ uur) en aan het begin van de forecast (t_0). Deze laatste correctie heeft een waarde van 0, maar zorgt er wel voor dat berekende schuifstanden vervallen en een verstoring kan optreden. Voor deze studie is de meerpeilcorrectie eenmalig toegepast aan het begin van de verkorte hindcast ($t_0 - 1$ uur). Aangezien dit voor alle meteorologische modelinvoer gelijkgetrokken is, is de verwachting dat dit geen significante invloed op de onderlinge vergelijking zal hebben.



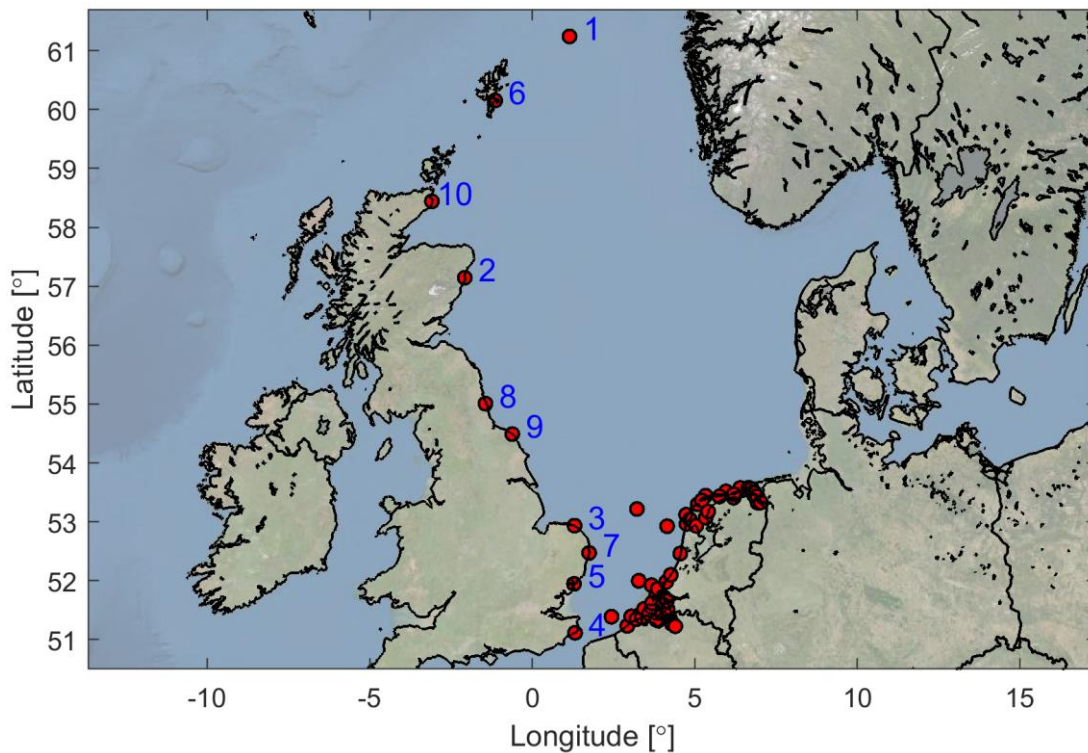
Figuur 2.7 Voorbeeld van verstoring door incorrecte combinatie van schuifstanden en initieel waterstandsveld

2.6 Validatiegegevens

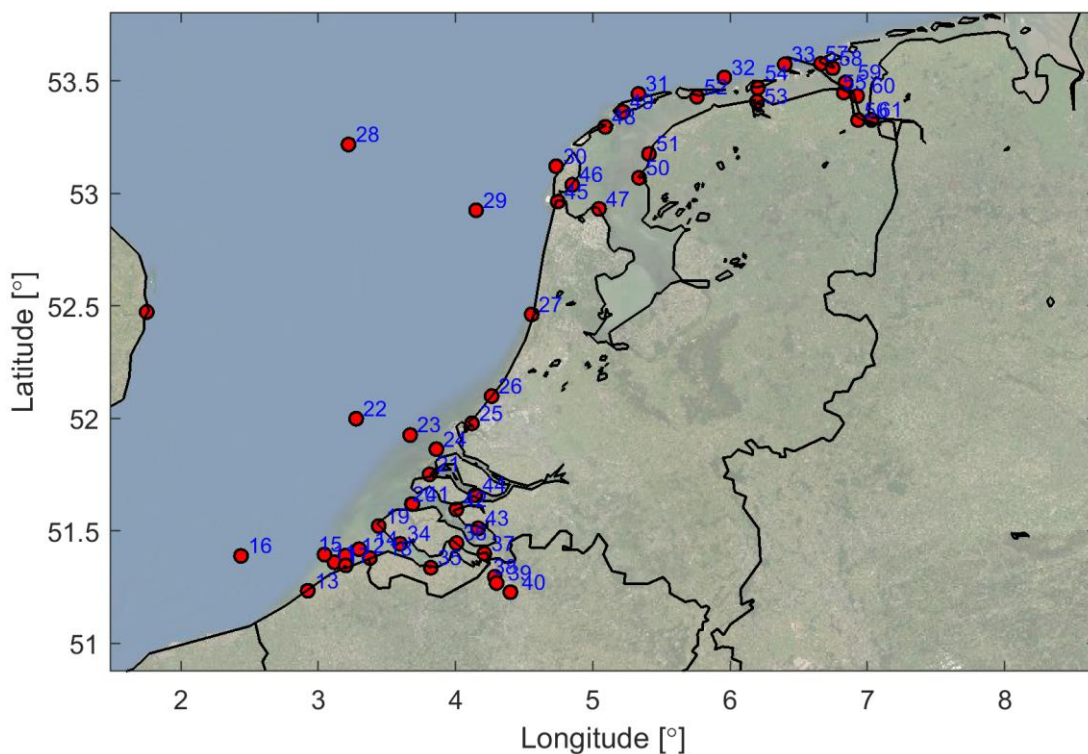
De voorspelkwaliteit van de modellen van de Noordzee en het IJsselmeer zal gekwantificeerd worden door vergelijking met waterstandmetingen. In dit hoofdstuk zullen de gebruikte metingen beschreven worden. Ook wordt de methode die gebruikt wordt voor het kwantificeren van de voorspelkwaliteit toegelicht.

2.6.1 Noordzee

Voor het bepalen van de voorspelkwaliteit van DCSMv6-ZUNOV4 worden dezelfde metingen gebruikt als bij de hindcast evaluatie (Zijl, 2013). De selectie van locaties is in overleg met Rijkswaterstaat tot stand gekomen. De geselecteerde stations zijn weergegeven in Figuur 2.8 en Figuur 2.9 (i.c.m. Tabel 2.12). Behalve de gebruikelijke Nederlandse stations zijn ook een beperkt aantal stations langs de Britse oostkust en de Belgische Noordzee kust meegenomen. De selectie omvat ook een aantal Belgische stations in de Westerschelde en Duitse stations in de Eems-Dollard.



Figur 2.8 Overzicht (uitgezoomd) van de gebruikte Noordzee-stations (zie Tabel 2.12 voor de naamgeving)



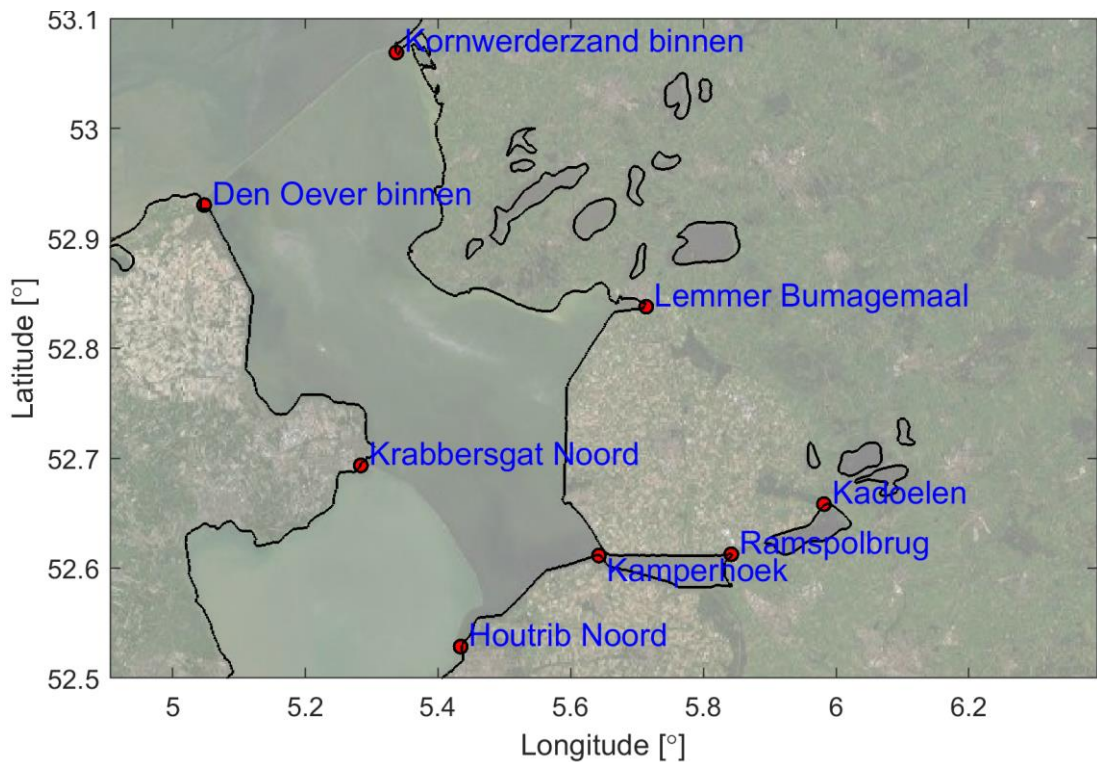
Figur 2.9 Overzicht (ingezoomd) van de gebruikte Noordzee-stations (zie Tabel 2.12 voor de naamgeving)

Tabel 2.12 Overzicht van gebruikte Noordzee-stations (zie Figuur 2.8 en Figuur 2.9 voor ligging). De hoofdlocaties zijn **dikgedrukt** weergegeven.

#	Station	#	Station	#	Station
1	NORTHCMRT	22	EURPFM	43	BERGSDSWT
2	ABDN	23	LICHTELGRE	44	KRAMMSZWT
3	CROMR	24	HARVT10	45	DENHDR
4	DOVR	25	HOEKVHLD	46	OUUSD
5	HARWH	26	SCHEVNGN	47	DENOVBTN
6	LERWK	27	IJMDBTHVN	48	VLIELHVN
7	LOWST	28	K13APFM	49	WESTTSLG
8	NORTHSS	29	Q1	50	KORNWDZBTN
9	WHITBY	30	TEXNZE	51	HARLGN
10	WICK	31	TERSLNZE	52	NES
11	A2	32	WIERMGDN	53	LAUWOG
12	BolvanHeist	33	HUIBGT	54	SCHIERMNOG
13	Oostende	34	VLISSGN	55	EEMSHVN
14	ScheurWielingen	35	TERNZN	56	DELZL
15	Wandelaar	36	HANSWT	57	BORKUM_Sudstrand
16	Westhinder	37	BATH	58	Borkum_Fischerbalje
17	Zeebrugge	38	LIEFKENSHOEK	59	EMSHORN
18	CADZD	39	KALLO	60	DUKEGAT
19	WESTKPLE	40	Antwerpen	61	KNOCK
20	ROOMPBTN	41	ROOMPBNN		
21	BROUWHVSGT08	42	STAVNSE		

2.6.2 IJsselmeer

Voor de simulaties die uitgevoerd zullen worden van de IJssel- en Vechtdelta, worden de stations gebruikt waarvan de ligging is weergegeven in Figuur 2.10. In de analyses worden de stations opgesplitst in de deelgebieden: 1) IJsselmeer en 2) Ketelmeer en Zwarte Meer, zie Tabel 2.13. Voor Kadoelen en in mindere mate Ramspolbrug geldt dat de resultaten mogelijk beïnvloed worden door initialisatie vanaf uniforme conditie, omdat 2 weken inspeeltijd op deze locaties wellicht te kort is. Omdat de inspeeltijd in alle gevallen gelijk is, speelt dit vermoedelijk bij de onderlinge vergelijking van de verschillende meteorologische modellen een geringe rol.



Figuur 2.10 Overzicht van de gebruikte IJsselmeer-, Ketelmeer- en Zwarte Meer-stations

Tabel 2.13 Overzicht van gebruikte IJsselmeer-, Ketelmeer- en Zwarte Meer-stations.

#	IJsselmeer	#	Ketelmeer en Zwarte Meer
1	Kornwerderzand-Binnen	6	Kamperhoek
2	Den Oever-Binnen	7	Ramspolbrug*
3	Lemmer Bumagemaal	8	Kadoelen*
4	Krabbersgat Noord		
5	Houtrib Noord		

* Mogelijk beïnvloed door initialisatie vanaf uniforme conditie; 2 weken inspeeltijd

2.7 Kwantitatieve maatstaven

Om de kwaliteit van de gemodelleerde waterstanden vast te stellen, worden verschillende statistische kentallen (RMSE, standaard deviatie en het gemiddeld verschil (bias)) berekend op basis van de geobserveerde en gemodelleerde waterstanden. Dit wordt gedaan voor verschillende intervallen van de voorspelhorizon, van -6-0 uur (hindcast) tot 42-48 uur.

Noordzee

Voor modellen die onderhevig zijn aan getij, is het gebruikelijk om deze totale waterstand op te splitsen in een getij- en opzetcomponent waarvan vervolgens ook los de kwaliteit bepaald kan worden. Ten behoeve van de analyse van de resultaten van het Noordzeemodel, zijn met behulp van een harmonische analyse (o.b.v. 118 getijconstanten) de gemodelleerde en gemeten waterstanden opgesplitst in een getij- en opzetcomponent. De harmonische analyse wordt per jaar afzonderlijk gedaan en dezelfde analyse wordt afzonderlijk toegepast op de meetgegevens en modelresultaten.

Verder worden de modelresultaten in de analyseperiode getoetst op de reproductie van hoge waterstanden middels bepaling van de scheve opzet. De scheve opzet is het verschil tussen het astronomisch hoogwater en de maximale totale waterstand behorende bij dat hoogwater. Het tijdstip van deze maximale totale en astronomische waterstand kan voor beide verschillend zijn, vandaar *scheve* opzet. Hier is aangenomen dat het tijdsverschil maximaal 4 uur bedraagt.

De analyse van de scheve opzet wordt gedaan voor drie verschillende categorieën:

- 99% laagst berekende scheve-opzet,
- events met scheve-opzet tussen 99,0% en 99,8% van de events,
- de 0,2% hoogst berekende scheve-opzet.

Deze laatste categorie bevat de extreme condities waarin de grootste scheve opzet aanwezig is. Het aantal events per categorie is afhankelijk van de analyseperiode en beschikbaarheid van de meetgegevens per station en dit aantal is daarom bij de beschrijving van de modelresultaten opgenomen.

IJsselmeer

Omdat er in het IJsselmeer geen getij aanwezig is, wordt daar gekeken naar statistiek van de totale waterstand. Daarnaast is het ook hier nuttig om separaat statistiek te bepalen voor hoogwaterstanden onder verschillende omstandigheden, waaronder stormen. De keuze voor de periode waarin een hoogwater bepaald wordt, is bij gebrek aan getij meer arbitrair. Na verschillende methoden uitgetest te hebben, is uiteindelijk gekozen voor de volgende aanpak, waarbij gemeten en berekende hoogwaters per station bepaald zijn:

1. Allereerst is de waterstand boven een 2-daags voortschrijdend gemiddelde bepaald. Dit voortschrijdend gemiddelde kan gezien worden als een benadering van het meerpeil. De waterstand die daar bovenop komt kan gezien worden als de 'opzet'.
2. De waterstand (en het bijbehorende tijdstip) op het tijdstip met de hoogste opzet wordt bepaald.
3. Vervolgens worden alle meetgegevens binnen een halve dag voor en na dit tijdstip gemaskeerd (er is dus max. 1 event per dag)
4. Terug naar 1), oftewel zoek op-een-na-hoogste waterstand enz. tot alle data gemaskeerd is en alle events gevonden zijn

Bij het bepalen van het verschil tussen de gemeten en berekende hoogwaters worden kleine verschillen in timing buiten beschouwing gelaten. Het tijdsverschil tussen de gemeten en berekende hoogwaters is gemaximeerd op 4 uur.

In de analyse wordt gekeken naar de statistiek van de totale hoogwaterstanden. Waarbij een onderscheid gemaakt wordt tussen drie verschillende categorieën hoogwaters, gebaseerd op de 'opzet' bovenop het meerpeil ten tijde van het hoogwater, benaderd als het 2-daags voortschrijdend gemiddelde van de waterstand in het betreffende station:

- 99% laagst berekende opzet,
- events met opzet tussen 99,0% en 99,8% van de events,
- de 0,2% hoogst berekende opzet.

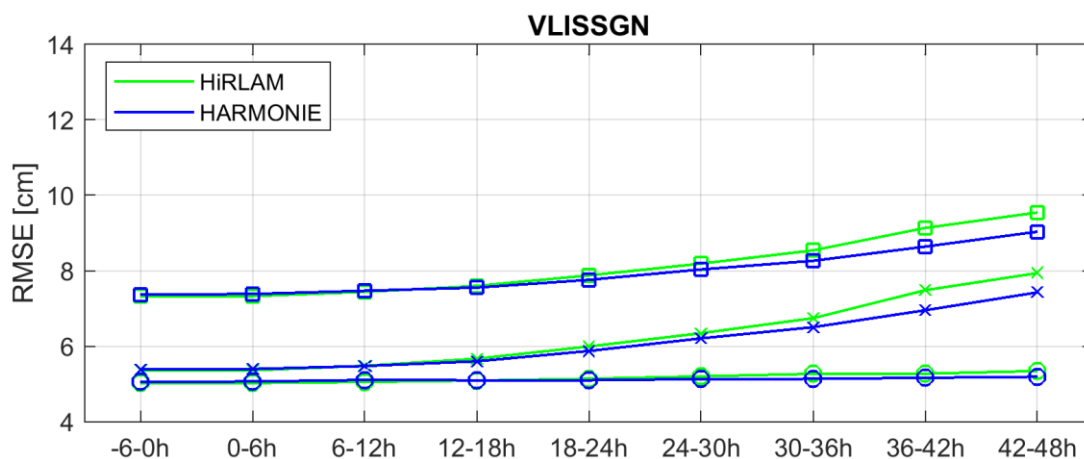
3 Resultaten

3.1 Noordzee

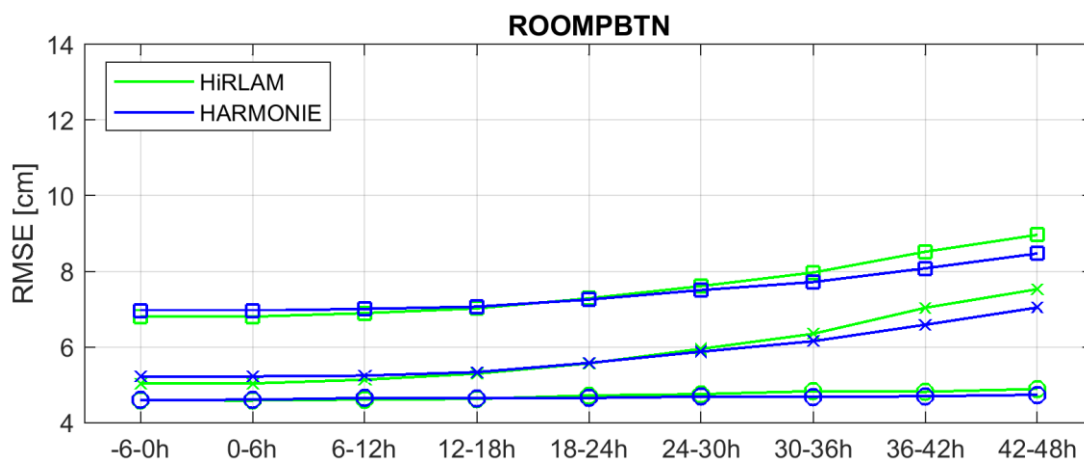
3.1.1 Waterstanden (getij, opzet en totale waterstand)

3.1.1.1 Hoofdlocaties

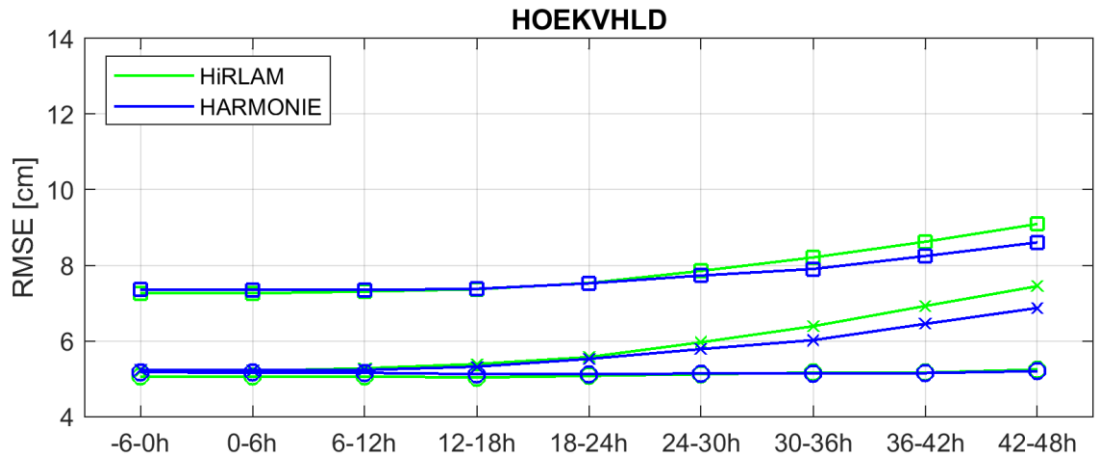
Figuur 3.1 tot en met Figuur 3.6 tonen de RMSE van het getij (symbool: rondje), de opzet (symbool: kruisje) en de totale waterstand (symbool: vierkantje) van de WMCN-kust hoofdlocaties. Dit wordt gedaan voor meteorologische aansturing met HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw), als functie van de voorspelhorizon. De station-gemiddelde waarden zijn af te lezen in Figuur 3.7.



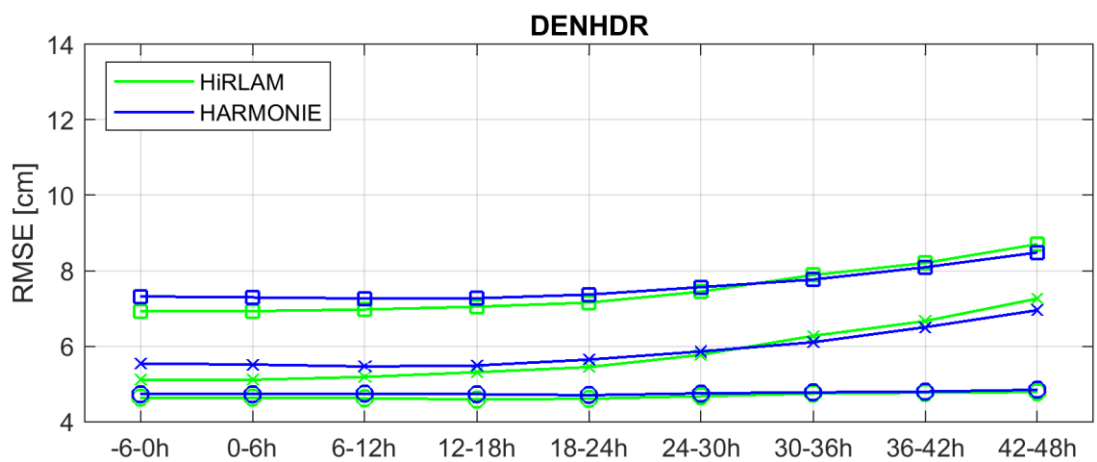
Figuur 3.1 RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) van station Vlissingen voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons.



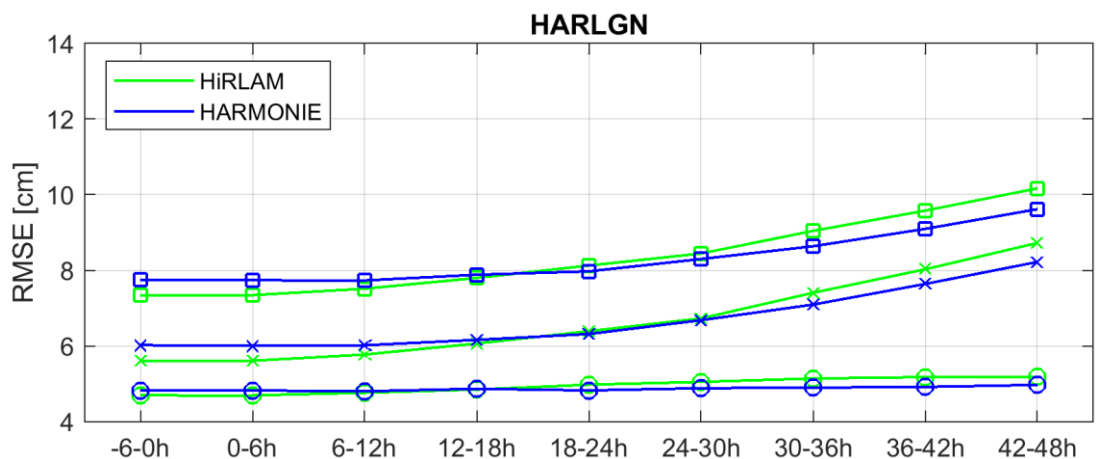
Figuur 3.2 RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) van station Roompot-Buiten voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons.



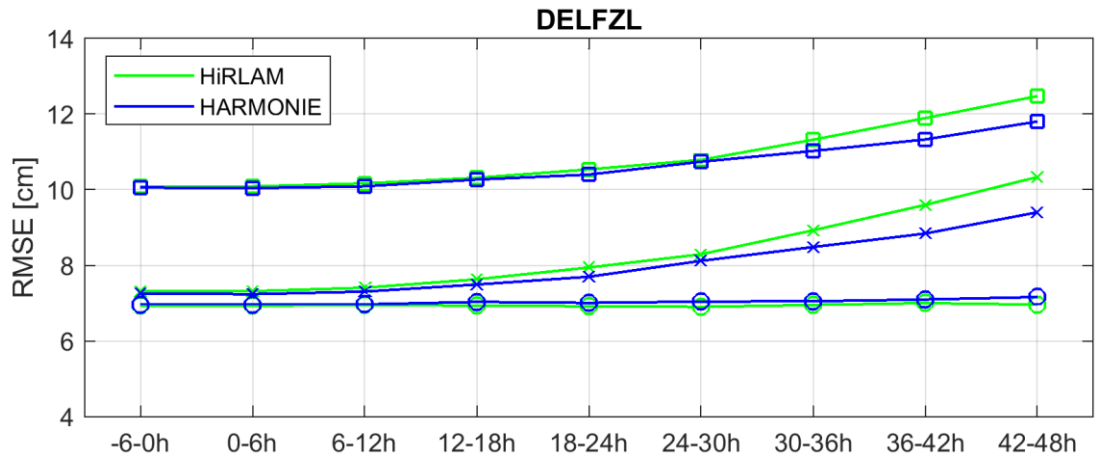
Figuur 3.3 RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) van station Hoek van Holland voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons.



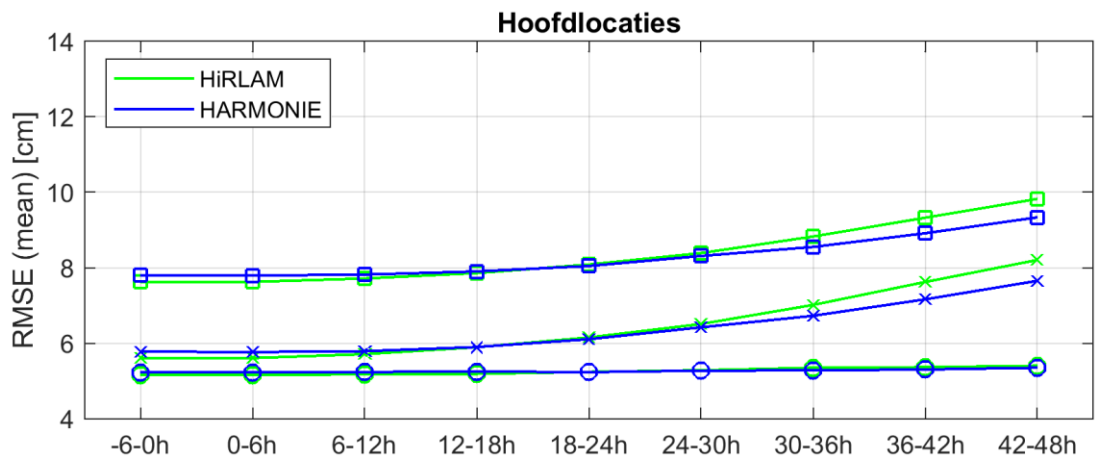
Figuur 3.4 RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) van station Den Helder voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons.



Figuur 3.5 RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) van station Harlingen voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons.



Figuur 3.6 RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) van station Delfzijl voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



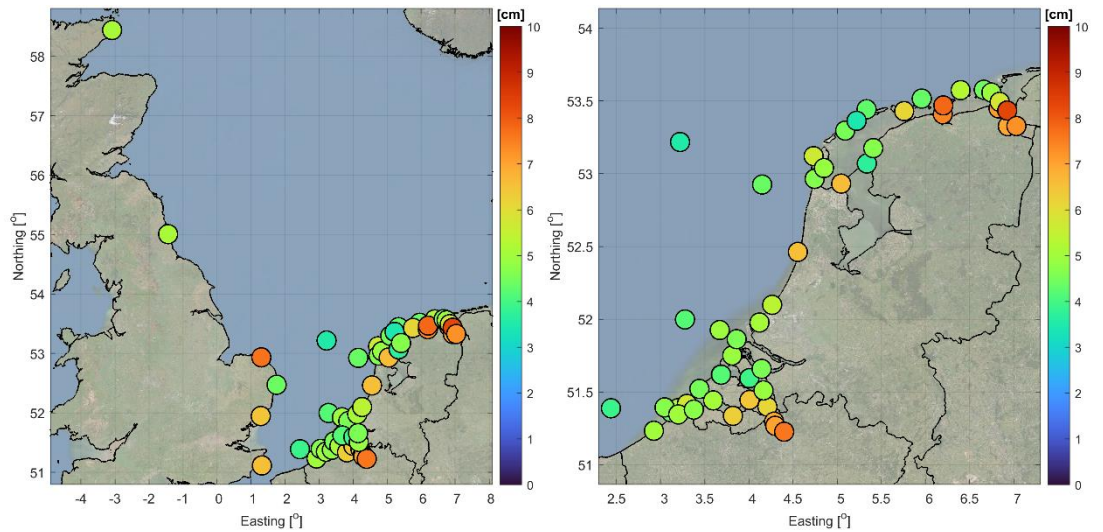
Figuur 3.7 Hoofdlocaties-gemiddelde RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

In bovenstaande figuren is te zien hoe de kwaliteit van de totale waterstand bij een toenemende voorspelhorizon afneemt. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een afname van de kwaliteit van de opzet bij toenemende voorspelhorizon. Vanwege de niet-lineaire interactie tussen getij en opzet verandert ook de voorspelkwaliteit van de getij-component over de verschillende voorspelhorizons in beperkte mate.

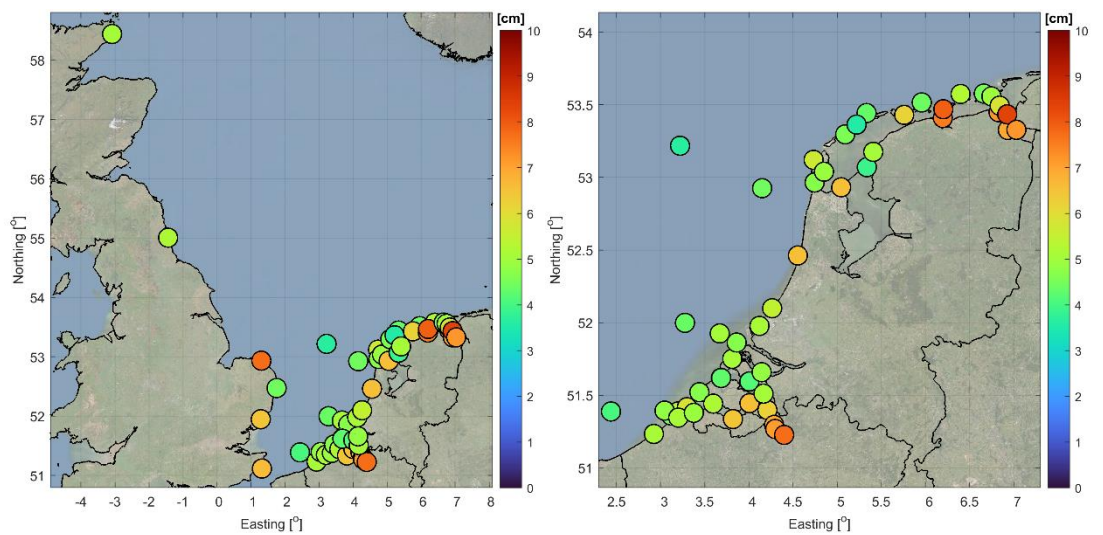
Gemiddeld genomen geldt dat in de hindcast (-6-0 uur) en bij korte voorspelhorizons (tot 12-18 uur) een betere kwaliteit bereikt wordt bij het gebruik van HiRLAM. Dit is in overeenstemming met de resultaten van de hindcast analyse (Zijl et al., 2019). Bij een grotere voorspelhorizon geeft het gebruik van HARMONIE een betere voorspelling. Hoewel enigszins afhankelijk van het beschouwde station ligt dit omslagpunt ongeveer bij een lead-time van 24 uur.

3.1.1.2 Alle stations

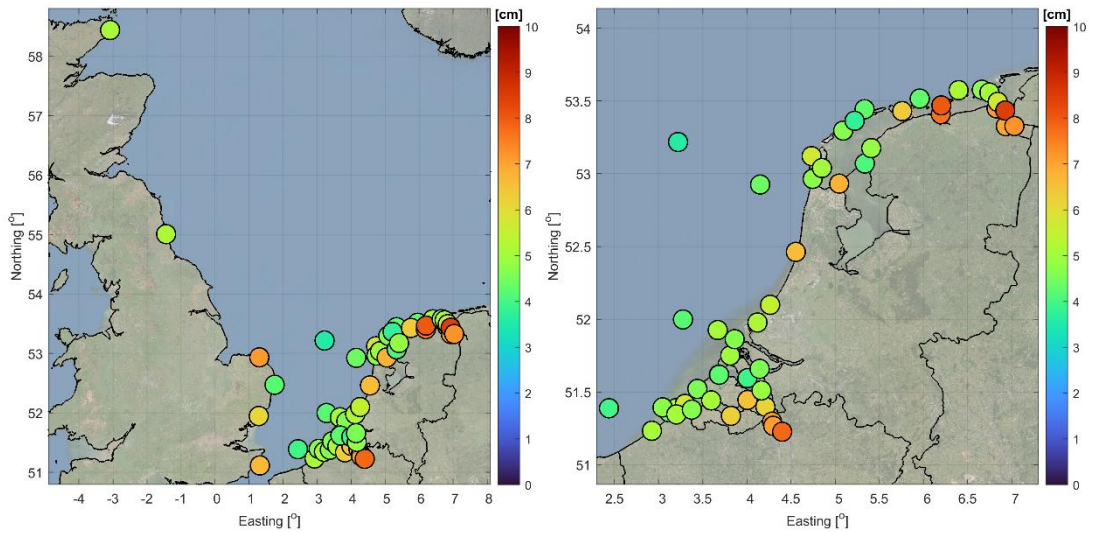
De RMSE van de opzet van alle stations, bij gebruik van HiRLAM meteo-forcering is weergegeven in Figuur 3.8 (hindcast) en Figuur 3.9 (voorspelhorizon 24-30 uur). Hierin toont het linkerpaneel alle stations en is in het rechterpaneel ingezoomd op Nederland. Dezelfde soort figuren, maar voor HARMONIE meteo-forcering, zijn te vinden in Figuur 3.10 en Figuur 3.11.



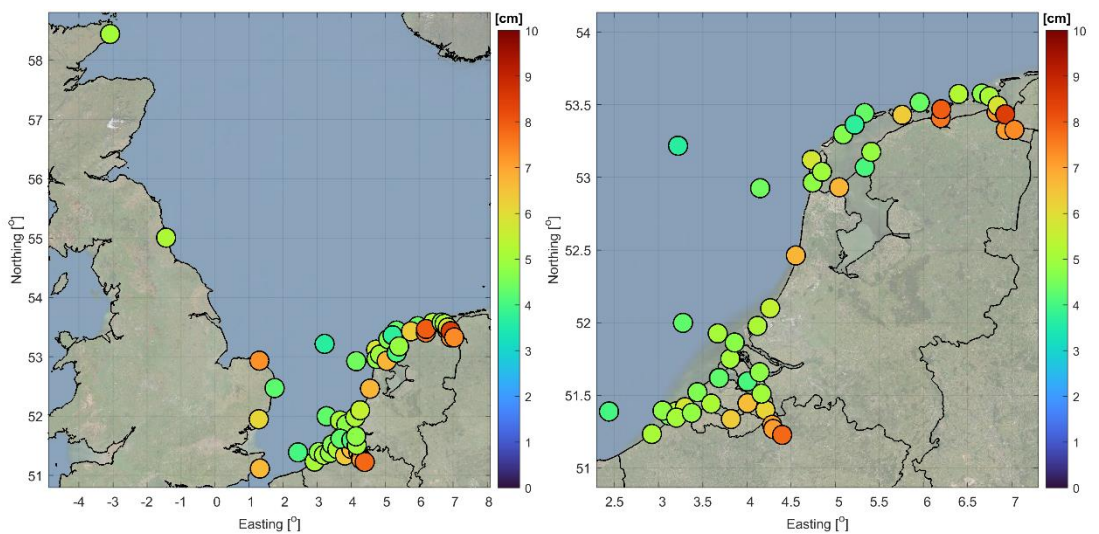
Figuur 3.8 RMSE (cm) van de opzet voor meteo-forcing HiRLAM (links: uitgezoomd, rechts: Nederland) voor de hindcast



Figuur 3.9 RMSE (cm) van de opzet voor meteo-forcing HiRLAM (links: uitgezoomd, rechts: Nederland) voor een voorspelhorizon van 24-30 uur

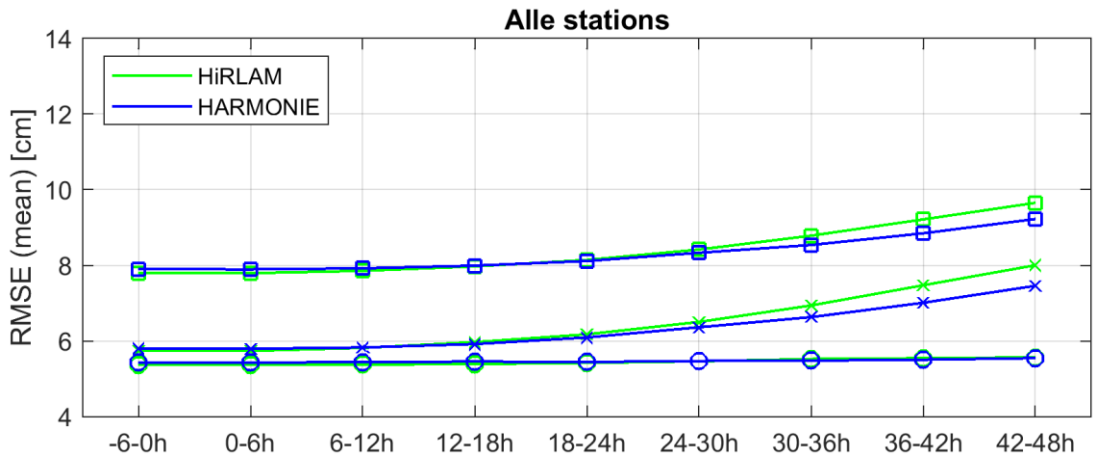


Figuur 3.10 RMSE (cm) van de opzet voor meteo-forcering HARMONIE (links: uitgezoomd, rechts: Nederland) voor de hindcast



Figuur 3.11 RMSE (cm) van de opzet voor meteo-forcering HARMONIE (links: uitgezoomd, rechts: Nederland) voor een voorspelhorizon van 24-30 uur

In Figuur 3.12 wordt de stationsgemiddelde RMSE van het getij (symbool: rondje) opzet (symbool: kruisje) en de totale waterstand (symbool: vierkantje) weergegeven voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons.



Figuur 3.12 Stationsgemiddelde RMSE (cm) van het getij (rondje), opzet (kruisje) en de totale waterstand (vierkantje) voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizonten

Bovenstaand figuur, waarin de statistiek is gebaseerd op alle stations uit de analyse, laat een vergelijkbaar resultaat zien voor de hoofdlocaties-gemiddelde resultaten (Figuur 3.7). Het gebruik van HiRLAM leidt bij kortere lead-times tot een betere voorspelling dan HARMONIE, bij langere voorspelhorizonten is dit omgekeerd.

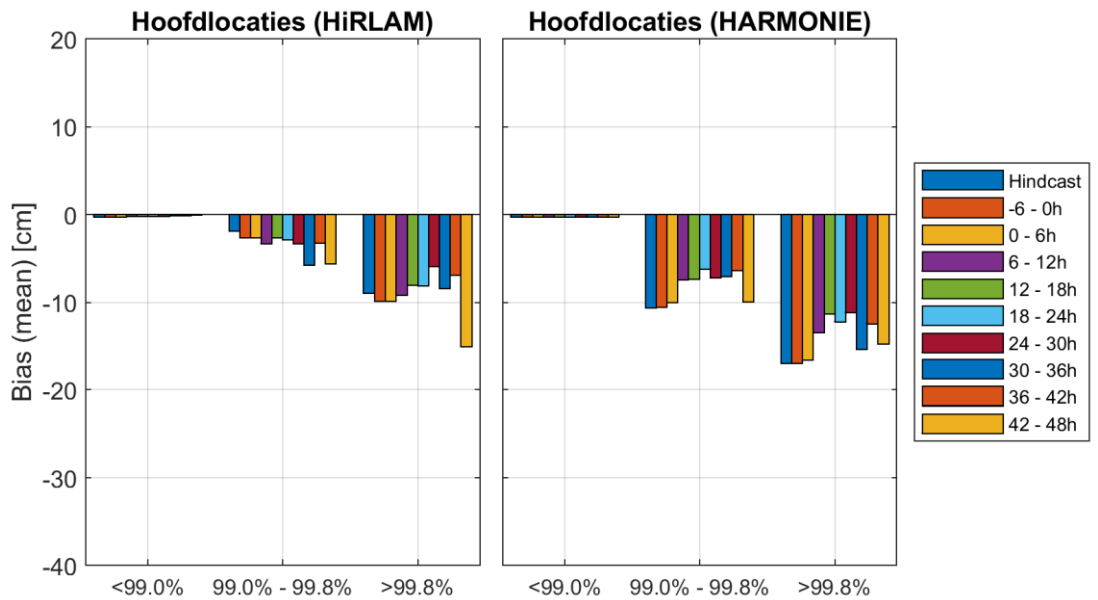
3.1.2 Hoogwaters tijdens normale en extreme events

3.1.2.1 Hoofdlocaties

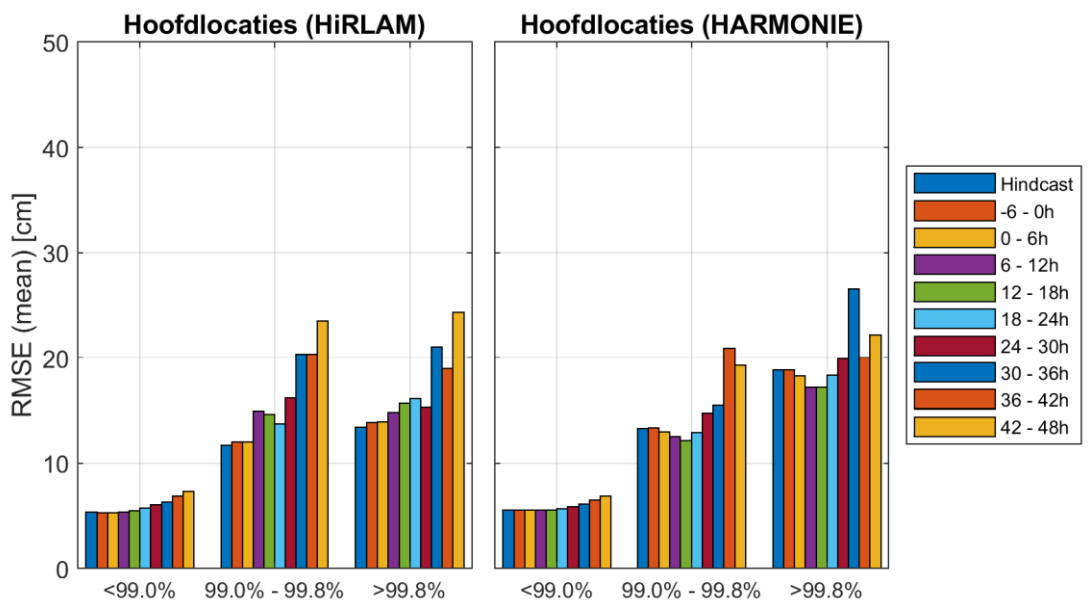
Zoals toegelicht in paragraaf 2.7, wordt de analyse van de hoogwaters/scheve opzet gedaan voor drie verschillende categorieën. Er wordt onderscheid gemaakt tussen *normale condities* waarbij de 99% laagst berekende scheve opzet wordt beschouwd. De analyse van de extreme (99,0% - 99,8%) en zeer extreme condities (> 99,8%) wordt beschreven onder het kopje *extreme events*.

Om aan te geven hoe de bias en RMSE van de scheve opzet zich in deze drie categorieën tot elkaar verhouden zijn de hoofdlocaties-gemiddelde waarden in resp. Figuur 3.13 en Figuur 3.14 weergegeven. Voor de bias en RMSE van de scheve opzet van de individuele stations, wordt verwezen naar bijlage A.1.2.

Uit deze resultaten blijkt dat, gemiddeld over de hoofdlocaties, de scheve opzet tijdens stormen onderschat wordt, met een grotere onderschatting voor de zwaarste categorie stormen. De onderschatting is bij gebruik van HARMONIE gemiddeld groter dan bij HiRLAM. Er lijkt tijdens stormen geen eenduidig verband te zijn tussen de systematische onderschatting en de voorspelhorizon. Als er naar de RMSE van de scheve opzetten gekeken wordt, dan is dat verband er (gemiddeld over de hoofdlocaties genomen) wel: de fout neemt toe bij toenemende voorspelhorizon.



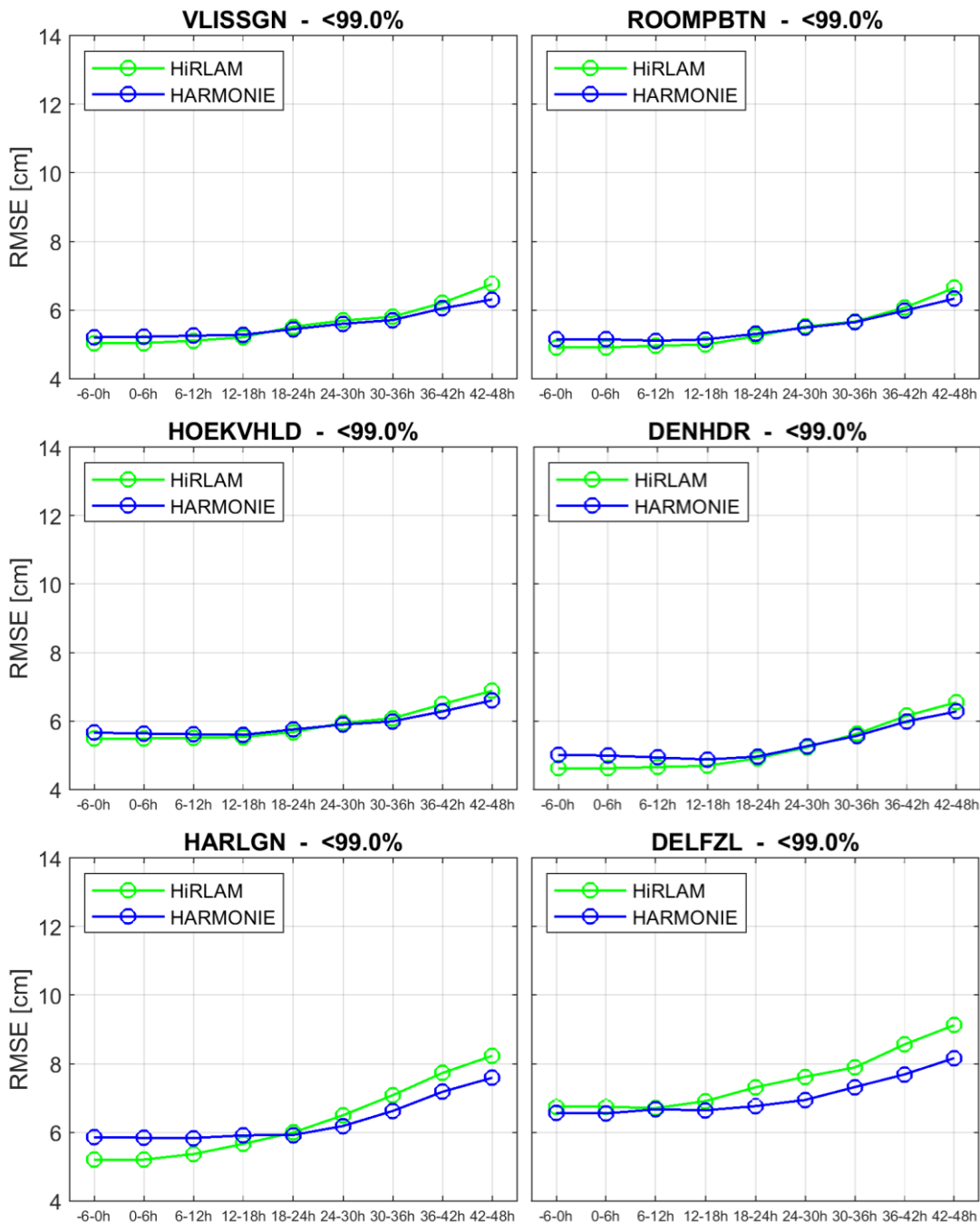
Figuur 3.13 Hoofdlocaties-gemiddelde bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events



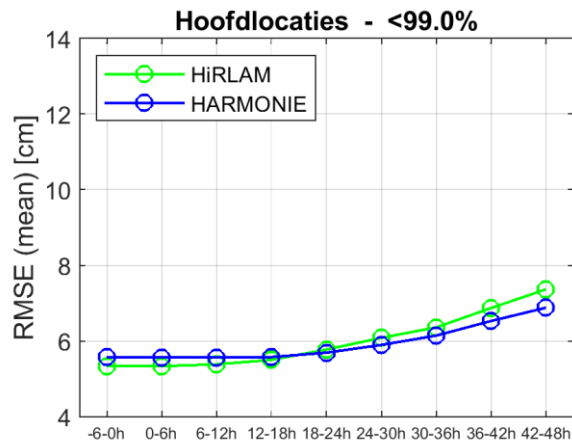
Figuur 3.14 Hoofdlocaties-gemiddelde RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events

Normale condities

Figuur 3.15 toont de RMSE van de scheve opzet van de hoofdlocaties voor normale condities (99,0% laagst berekende scheve opzet) voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons. De hoofdlocaties-gemiddelde waarden zijn afgebeeld in Figuur 3.16.



Figuur 3.15 RMSE (cm) van de scheve opzet van de hoofdlocaties voor normale condities (99,0% laagst berekende scheve opzet) voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur 3.16 Hoofdlocaties-gemiddelde RMSE (cm) van de scheve opzet voor normale condities (99,0% laagst berekende scheve opzet) voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

Gemiddeld genomen geldt dat bij korte voorspelhorizons een betere kwaliteit bereikt wordt bij het gebruik van HiRLAM, bij een langere voorspelhorizon geeft het gebruik van HARMONIE een betere voorspelling. Dit omslagpunt ligt per station verschillend, maar ligt ongeveer bij een lead-time van 24 uur. Station Delfzijl wijkt enigszins af van de andere locaties omdat daar de kwaliteit met HARMONIE aansturing beter is voor alle voorspelhorizons.

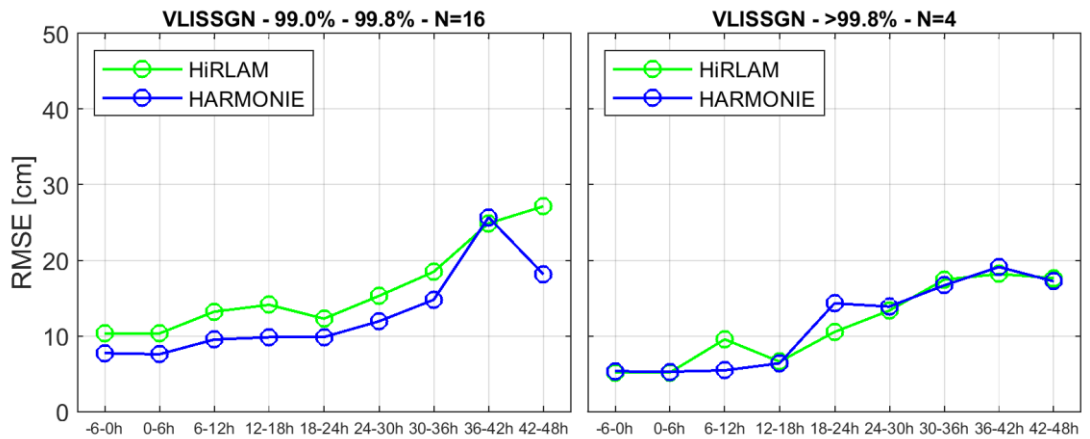
Extreme events

De RMSE van de scheve opzet tijdens extreme condities (linkerpaneel) en zeer extreme condities (rechterpaneel) bij aansturing met HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons is afgebeeld in Figuur 3.17 tot en met Figuur 3.22. In de titel van het figuur is ook het aantal events (N) weergegeven dat gebruikt is bij de bepaling van de statistiek. Figuur 3.23 toont de hoofdlocaties-gemiddelde waarden.

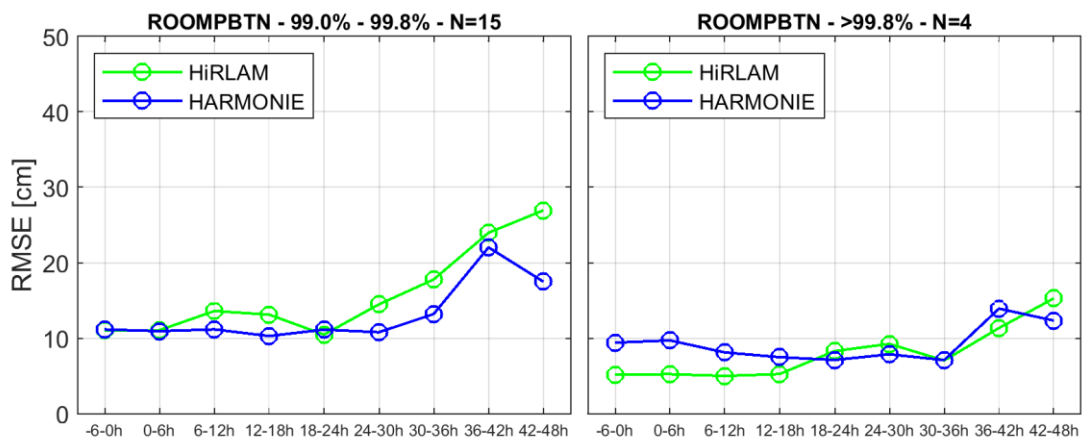
De resultaten in deze figuren laten zien dat de kwaliteit als functie van de voorspelhorizon grilliger verloopt dan bij de resultaten onder normale condities. Dit is vooral zichtbaar bij de meest extreme condities en hangt vermoedelijk samen met het geringe aantal events dat beschouwd is in deze categorieën.

Over het algemeen neemt ook hier de kwaliteit af bij toenemende voorspelhorizon, al is dat wel minder eenduidig. In Den Helder is nauwelijks sprake van een toename en Hoek van Holland (hoogste categorie) is nauwelijks sprake van een toename als de grootste horizon vergeleken wordt met de hindcast. Bij Hoek van Holland valt verder op dat de fouten bij de hoogste categorie (>99,8%) lager zijn dan tijdens de iets minder extreme omstandigheden (99-99,8%).

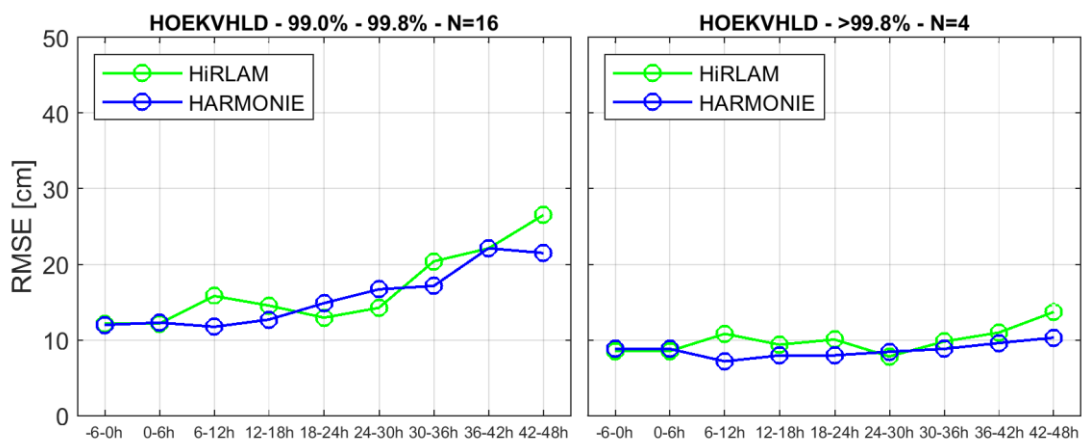
Gemiddeld over de hoofdlocaties genomen doet HARMONIE het tijdens de meest extreme scheve opzet events iets minder goed dan HiRLAM, behalve voor de 42-48 uur voorspelhorizon.



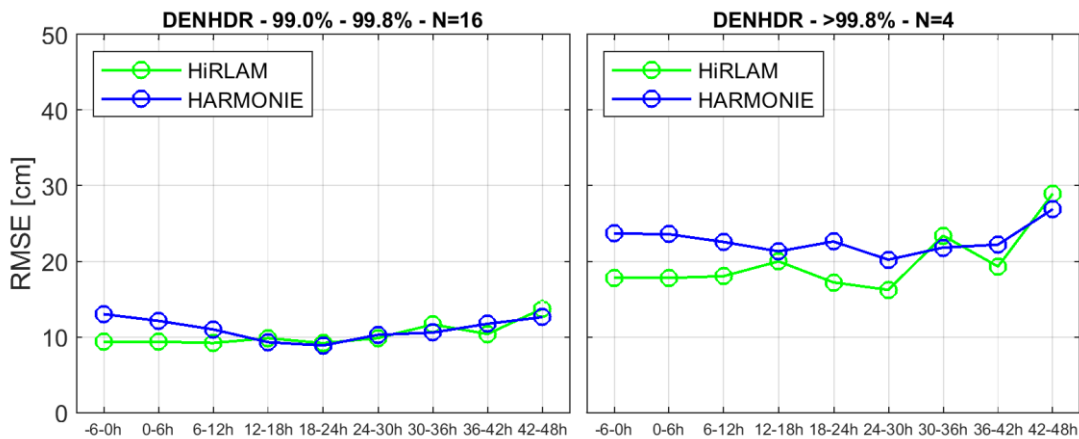
Figuur 3.17 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Vlissingen voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



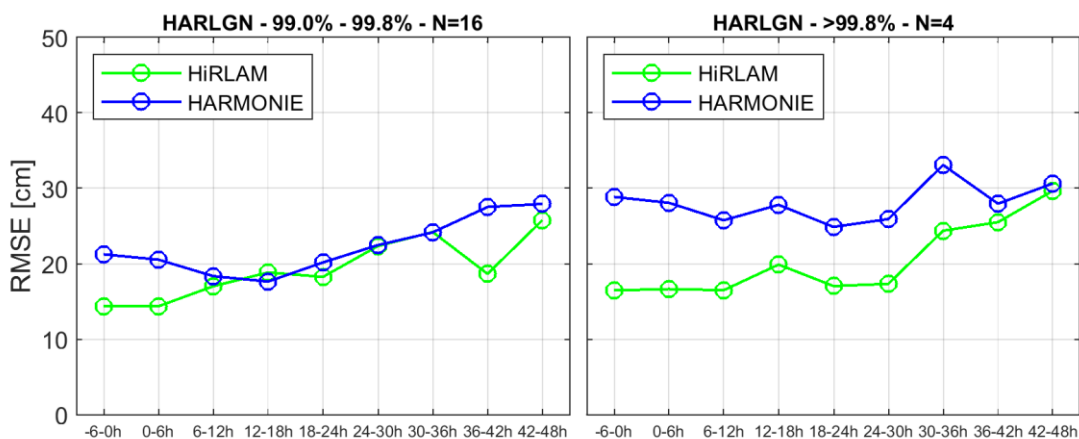
Figuur 3.18 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Roompot-Buiten voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



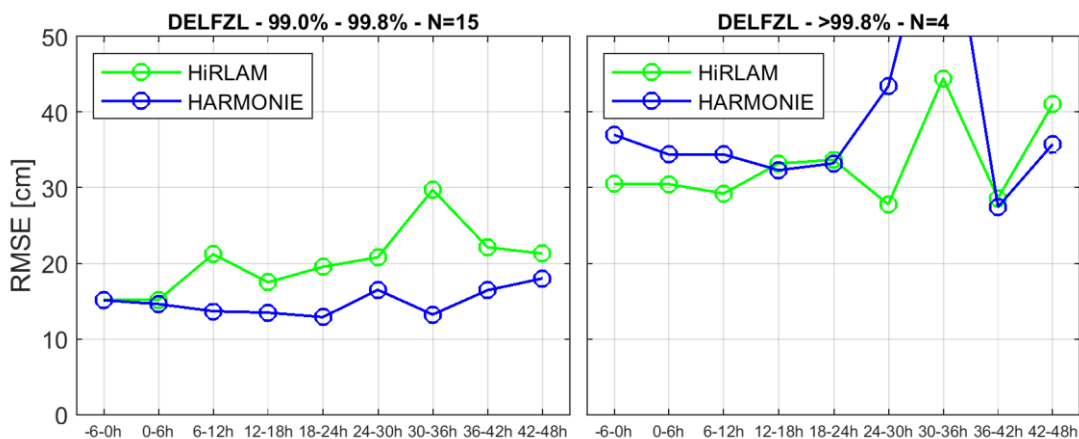
Figuur 3.19 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Hoek van Holland voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



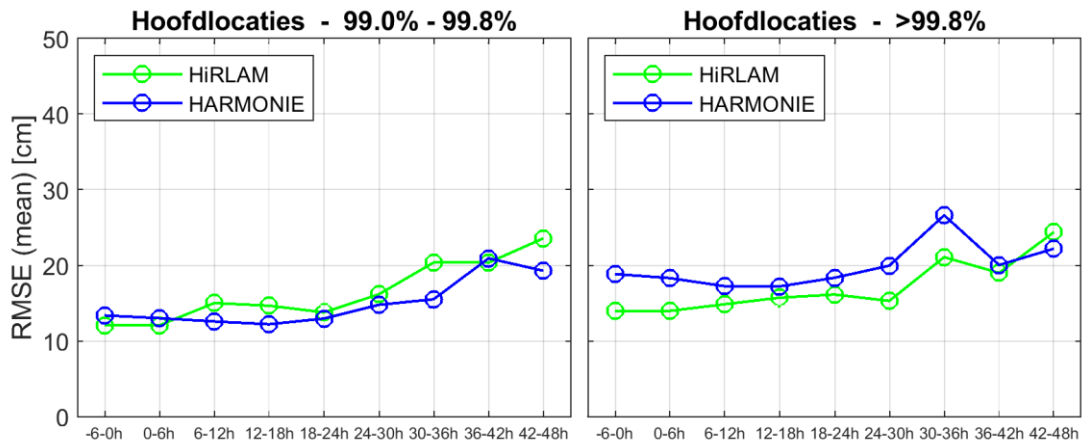
Figuur 3.20 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Den Helder voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur 3.21 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Harlingen voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur 3.22 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Delfzijl voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

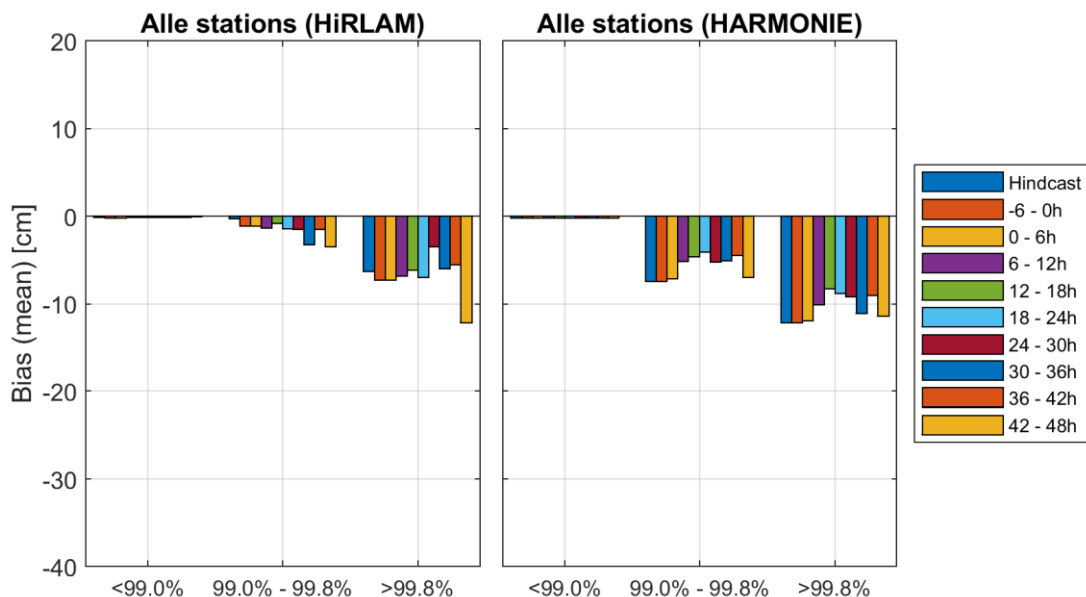


Figuur 3.23 Hoofdlocaties-gemiddelde RMSE (cm) van de scheve opzet voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw)

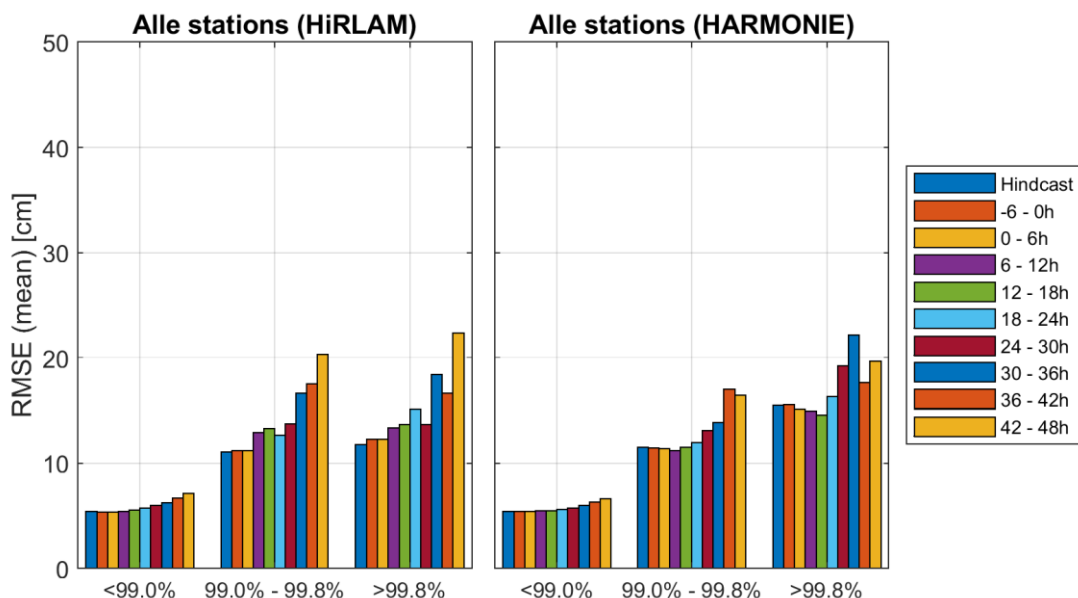
3.1.2.2 Alle stations

Figuur 3.24 en Figuur 3.25 tonen resp. de stationsgemiddelde bias en RMSE van de scheve opzet voor de drie verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (linkerpaneel) en HARMONIE (rechterpaneel) voor verschillende voorspelhorizonten.

Uit deze resultaten blijkt dat gemiddeld over alle locaties de scheve opzet tijdens stormen onderschat wordt, met een grotere onderschatting voor de zwaarste categorie stormen. De onderschatting is bij gebruik van HARMONIE gemiddeld groter dan bij HiRLAM. Er lijkt tijdens stormen geen eenduidig verband te zijn tussen de systematische onderschatting en de voorspelhorizon. Als er naar de RMSE van de scheve opzetten gekeken wordt, dan is dat verband er (gemiddeld over alle locaties) wel: de fout neemt toe bij toenemende voorspelhorizon, hoewel dat in het geval van de meest extreme stormen bij HARMONIE minder duidelijk is.



Figuur 3.24 Stationsgemiddelde bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events

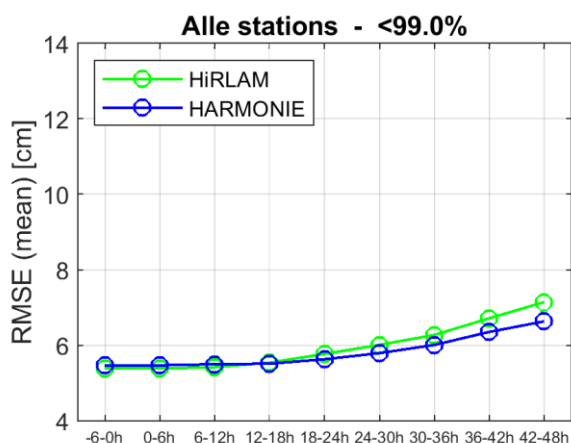


Figuur 3.25 Stationsgemiddelde RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events

Normale condities

De stationsgemiddelde RMSE van de scheve opzet onder normale condities, met HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) aansturing is in Figuur 3.26 weergegeven voor verschillende voorspelhorizons.

Gemiddeld genomen geldt dat bij korte voorspelhorizons een iets betere kwaliteit bereikt wordt bij het gebruik van HiRLAM. Omdat bij HARMONIE de fout minder snel toeneemt bij toenemende voorspelhorizon geeft het gebruik van HARMONIE een betere voorspelling bij een langere voorspelhorizon. Gemiddeld genomen ligt het omslagpunt ongeveer bij een lead-time van 12-18 uur.



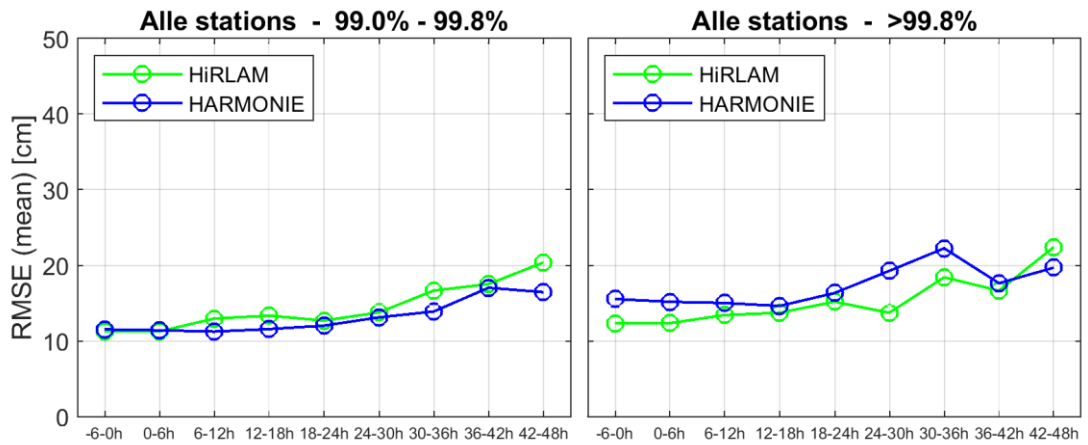
Figuur 3.26 Stationsgemiddelde RMSE (cm) van de scheve opzet voor normale condities (99,0% laagst berekende scheve opzet) voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

Extreme events

In Figuur 3.27 is de stationsgemiddelde RMSE van de scheve opzet voor extreme condities (linkerpaneel) en zeer extreme condities (rechterpaneel) voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons afgebeeld.

Over het algemeen neemt ook hier de kwaliteit af bij toenemende voorspelhorizon, al is dat wel minder eenduidig.

Gemiddeld over alle locaties doet HARMONIE het tijdens de meest extreme scheve opzet events (>99,8%) iets minder goed dan HiRLAM, behalve voor de 42-48 uur voorspelhorizon. Tijdens de iets minder extreme events (99-99,8%) doet HARMONIE het meestal beter, behalve tijdens de hindcast (-6 – 0 uur) en de 0 – 6 uur voorspelhorizon.



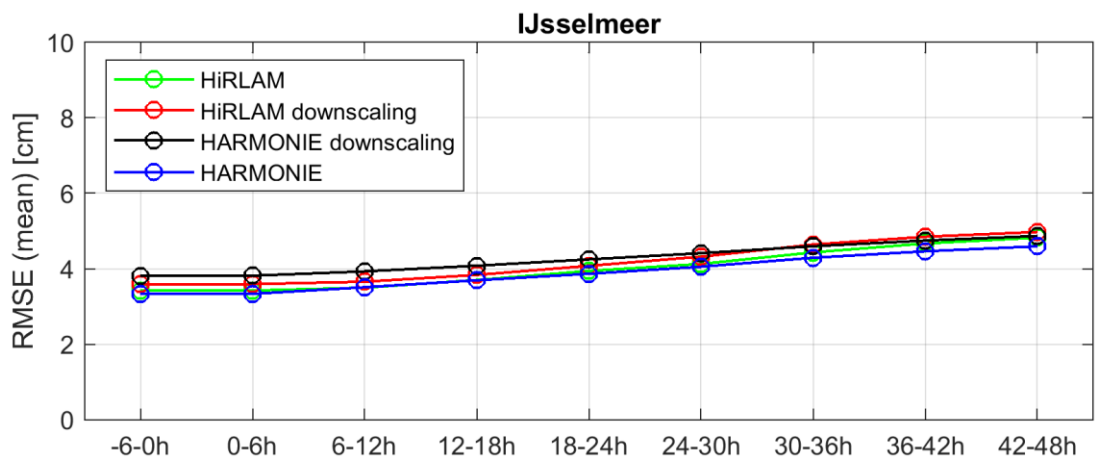
Figuur 3.27 Stationsgemiddelde RMSE (cm) van de scheve opzet voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw)

3.2 IJsselmeer

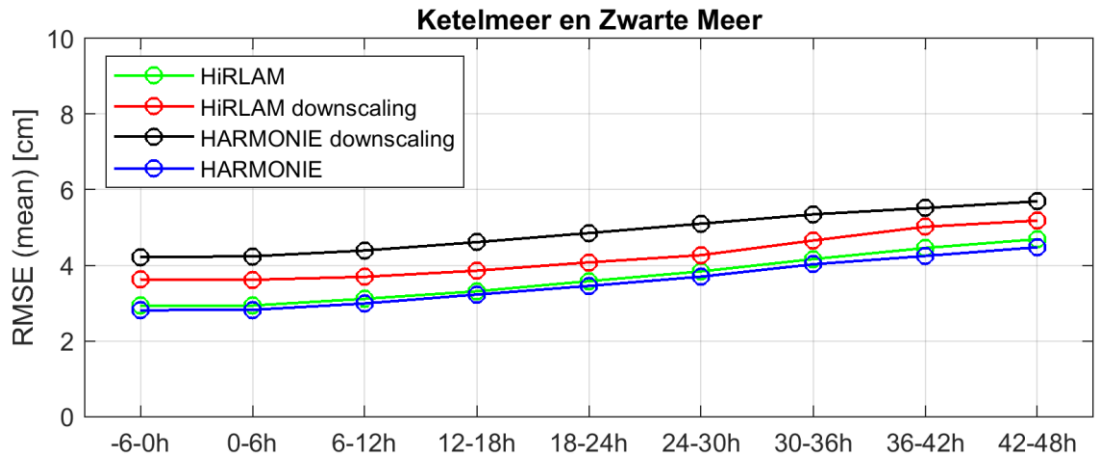
In de analyse van de modelresultaten wordt in deze paragraaf gebruikt gemaakt van een verdeling van de stations in de deelgebieden *IJsselmeer* en *Ketelmeer en Zwarte Meer*, zie Tabel 2.13 voor de lijst van stations.

3.2.1 Waterstanden

In Figuur 3.28 en Figuur 3.29 wordt de stationsgemiddelde RMSE van de totale waterstand, van resp. de gebieden *IJsselmeer* en *Ketelmeer en Zwarte Meer*, getoond. In deze figuren is de RMSE voor verschillende voorspelhorizons (hindcast, 0-6 uur, ..., 42-48 uur) en verschillende meteo-forceringen (HiRLAM, HiRLAM-downscaling, HARMONIE-downscaling en HARMONIE) weergegeven. De figuren voor de individuele stations zijn opgenomen in bijlage A.2.1.



Figuur 3.28 Stationsgemiddelde (gebied: IJsselmeer) RMSE (cm) van de totale waterstand voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

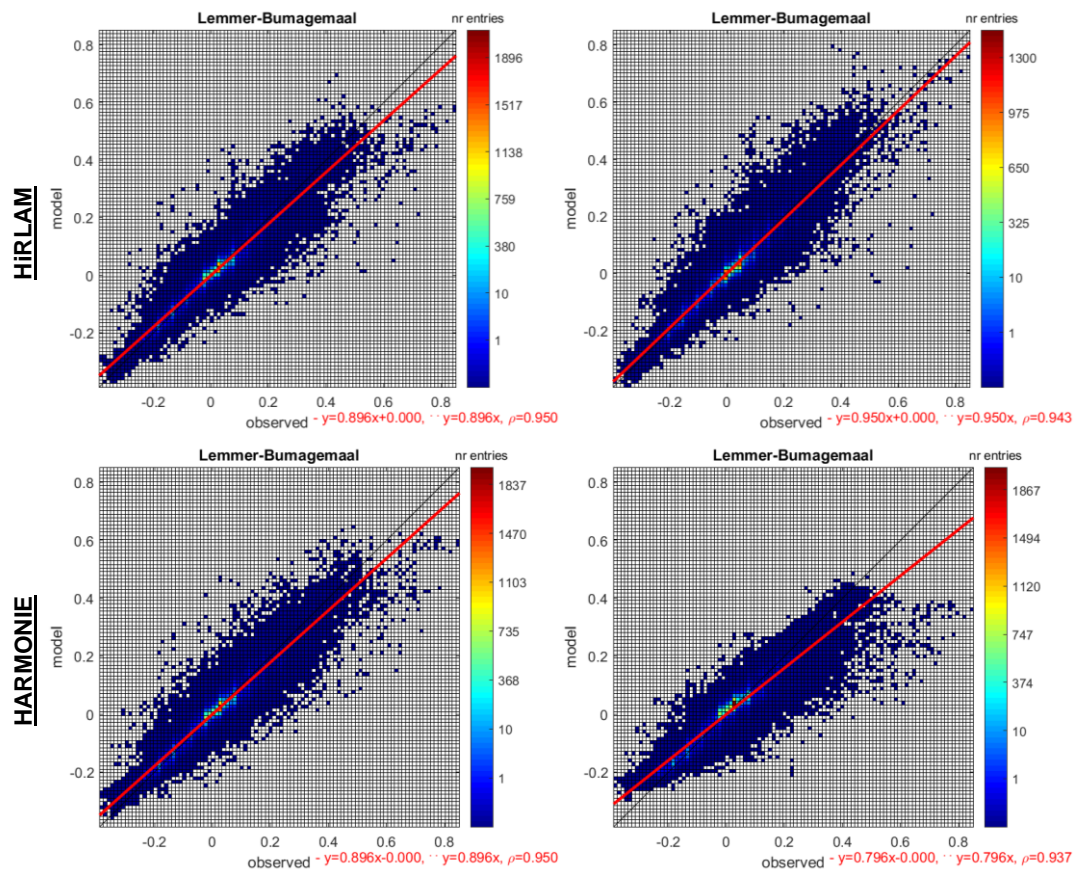


Figuur 3.29 Stationsgemiddelde (gebied: Ketelmeer en Zwarte Meer) RMSE (cm) van de totale waterstand voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

In bovenstaande figuren is te zien hoe, volgens verwachting, de kwaliteit van de modelvoorspelling afneemt bij een toenemende voorspelhorizon. De kwaliteit bij het gebruik van HARMONIE is voor alle voorspelhorizons iets beter dan bij gebruik van HiRLAM. Gebruik van downscaling vermindert de kwaliteit voor alle voorspelhorizons, ten opzichte van gebruik van het meteorologisch model zonder downscaling. Over het algemeen doet HARMONIE-downscaling het minder goed dan HiRLAM-downscaling, behalve vanaf de 30-36 uur voorspelhorizon gemiddeld over de stations in het IJsselmeer.

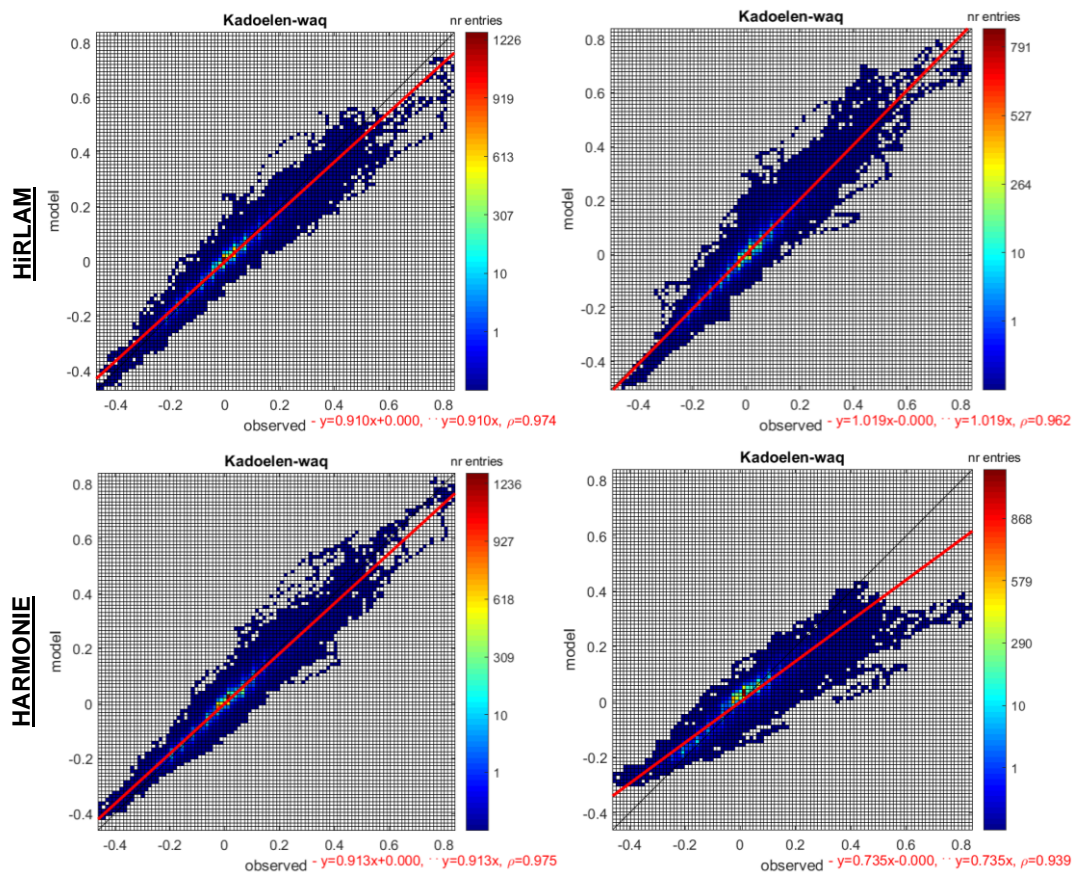
In het IJsselmeergebied is het effect van het gebruik van een andere meteo-forcering op de stationsgemiddelde RMSE kleiner dan voor het Ketelmeer en Zwarte Meer. Daarnaast geldt dat in het Ketelmeer en Zwarte Meer de RMSE sneller groeit bij een toenemende voorspelhorizon dan in het IJsselmeergebied. Verder is te zien dat, met name in het Ketelmeer en Zwarte Meer, de kwaliteit van de modelvoorspelling bij gebruik van HARMONIE-downscaling minder is dan bij het gebruik van HARMONIE.

In Figuur 3.30 en Figuur 3.31 zijn de gemeten en gemodelleerde opzet in resp. station Lemmer-Bumagemaal en Kadoelen tegen elkaar uitgezet. Hierin is te zien dat de afname in kwaliteit bij het gebruik van HARMONIE-downscaling (subplot rechtsonder) samenhangt met een systematische onderschatting van de opzet.



Downscaling

Figuur 3.30 Density scatter plot van de geobserveerde en berekende totale waterstand voor station Lemmer-Bumagemaal voor de 0-6 uur voorspelhorizon (boven: HIRLAM, onder: HARMONIE, links: geen downscaling, rechts: downscaling)



Downscaling

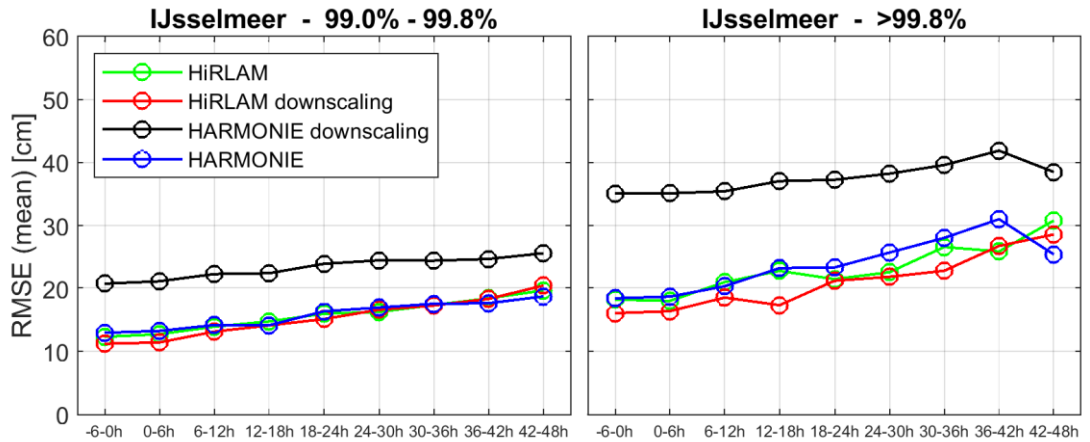
Figuur 3.31 Density scatter plot van de geobserveerde en berekende totale waterstand voor station Kadoelen voor de 0-6 uur voorspelhorizon (boven: HIRLAM, onder: HARMONIE, links: geen downscaling, rechts: downscaling)

In de figuren van de individuele stations (bijlage A.2.1) is te zien dat er een wezenlijk verschil in voorspelkwaliteit per station kan zijn. Afhankelijk van de geografische ligging van een station is deze in meer of mindere mate onderhevig aan de invloed van wind en rivierafvoer. Doordat de totale variatie in de waterstand in een station als Krabbersgat Noord kleiner is dan die van bijvoorbeeld station Houtrib Noord of station Kadoelen, is dit ook (deels) de verklaring dat de kwaliteit van de modelvoorspelling van dit station beter is.

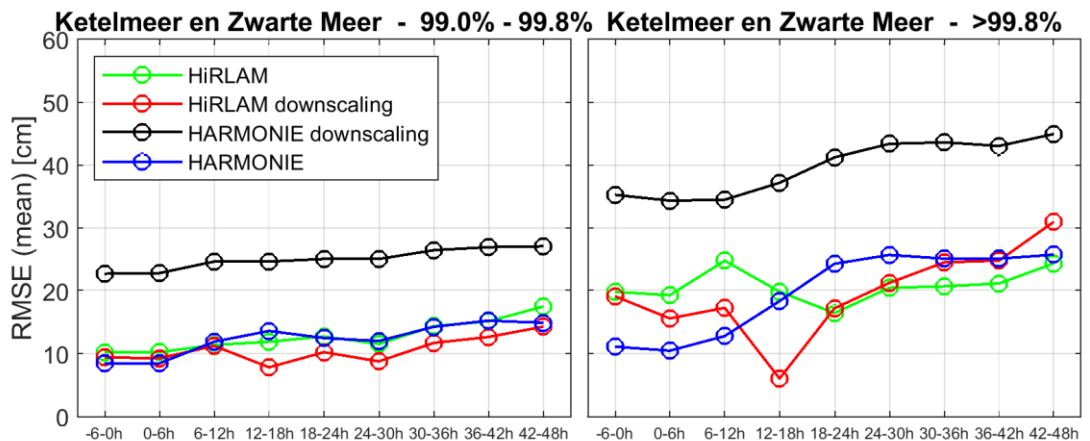
3.2.2 Hoogwaters tijdens extreme condities

In Figuur 3.32 en Figuur 3.33 wordt de stationsgemiddelde RMSE van de hoogwaters, van resp. de gebieden *IJsselmeer* en *Ketelmeer en Zwarte Meer*, getoond. In deze figuren is de RMSE voor verschillende voorspelhorizons (hindcast, 0-6 uur, ..., 42-48 uur) en verschillende meteo-forceringen (HirLAM, HiRAM-downscaling, HARMONIE-downscaling en HARMONIE) weergegeven. In het linkerpaneel is de kwaliteit tijdens extreme condities (99,0 – 99,8%) weergegeven, het rechterpaneel toont de kwaliteit tijdens zeer extreme condities (> 99,8%). De figuren voor de individuele stations zijn opgenomen in A.2.2.

Bij de interpretatie van de kwaliteit tijdens zeer extreme condities (rechterpaneel van deze figuren) is het belangrijk om ook het aantal events in acht te nemen; afhankelijk van het beschikbare aantal metingen per station kan de statistiek voor een station gebaseerd zijn op slechts een enkel event. Gemiddeld genomen geldt dat de categorie 99,0% – 99,8% gebaseerd is op 12 events en de categorie > 99,8% is op basis van ca. 3 events.



Figuur 3.32 Stationsgemiddelde (gebied: IJsselmeer) RMSE (cm) van de hoogwaters voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur 3.33 Stationsgemiddelde (gebied: Ketelmeer en Zwarte Meer) RMSE (cm) van de hoogwaters voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM-downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

In bovenstaande figuren is te zien dat de kwaliteit bij het gebruik van HARMONIE-downscaling duidelijker minder is dan bij aansturing met de andere meteorologische modellen. Zoals beschreven in paragraaf 3.2.1 hangt dit samen met een systematische onderschatting van de opzet. De kwaliteit van de voorspellingen met HiRLAM en HARMONIE laten een meer vergelijkbaar resultaat zien voor de verschillende voorspelhorizons. Tijdens de hindcast doet HiRLAM-downscaling het in de IJsselmeer stations iets beter dan HiRLAM en HARMONIE voor beide klassen van events. Tijdens de meest extreme events is dat voor bijna alle voorspelhorizons het geval. In het Ketelmeer en Zwarte Meer doet HARMONIE het voor de kortere voorspelhorizons beter dan de andere meteorologische aansturing, vooral tijdens de meest extreme events.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

4.1.1 Algemeen

De gevolgen van de overstap van HiRLAM naar HARMONIE voor de resultaten van de operationele WAQUA modellen van Rijkswaterstaat WMCN zijn in kaart gebracht door het doen van een groot aantal opeenvolgende modelvoorspellingen, een zogenaamde voorspelanalyse, op basis van beide meteorologische modellen. Voor IJsselmeer is daar de aansturing op basis van de gedownscalede meteorologische resultaten van HiRLAM en HARMONIE extra aan toegevoegd. Op basis van de resultaten van de voorspelberekeningen is de modelkwaliteit bepaald voor de verschillende intervallen van de voorspelhorizon, tot aan 42-48 uur vooruit. De sequentie van voorspellingen is gedaan voor de periode 2015 – 2017. Dit zijn de drie volledige kalenderjaren waarbinnen de data van HARMONIEv40 beschikbaar is gemaakt door het KNMI. Een belangrijk uitgangspunt bij de opzet van de voorspelanalyse is het zo veel mogelijk overeen komen van de simulaties met het operationele gebruik bij Rijkswaterstaat. Slechts wanneer dit niet mogelijk was, is hiervan afgeweken.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat deze bevindingen geen aanleiding geven om de migratie van HiRLAM naar HARMONIE in de operationele RWSOS systemen van RWS terug te draaien. Wel wordt geadviseerd om geen gebruik te maken van de hier beschouwde versie van HARMONIE-downscaling.

De belangrijkste bevindingen van deze voorspelanalyse worden in meer detail hieronder samengevat, opgesplitst voor de Noordzee (paragraaf 4.1.2) en het IJsselmeer (4.1.3).

4.1.2 Noordzee

Met betrekking tot de totale waterstand, de opzet en de scheve opzet tijdens normale omstandigheden (<99%) kan gemiddeld genomen over de WMCN-kust hoofdlocaties en alle hier beschouwde stations het volgende geconcludeerd worden:

- Tijdens de hindcast (-6-0 uur) en bij korte voorspelhorizons (tot 12-18 uur) wordt een betere kwaliteit bereikt bij het gebruik van HiRLAM (vergeleken met gebruik van HARMONIE). Dit is in overeenstemming met de resultaten van de hindcast analyse (Zijl et al., 2019).
- De kwaliteit van de modelvoorspellingen neemt af bij toenemende voorspelhorizon. Bij HARMONIE is deze afname kleiner dan bij HiRLAM. Bij een grotere voorspelhorizon geeft het gebruik van HARMONIE daarom een betere voorspelling dan bij gebruik van HiRLAM. Hoewel enigszins afhankelijk van het beschouwde station, ligt dit omslagpunt ongeveer bij een lead-time van 24 uur.

Onder extremere omstandigheden (de 99-99,8% en >99,8% hoogste scheve opzetten) geldt voor de kwaliteit van de scheve opzet het volgende:

- De kwaliteit als functie van de voorspelhorizon verloopt grilliger dan bij de resultaten onder normale condities. Dit is vooral zichtbaar bij de meest extreme condities en hangt vermoedelijk samen met het geringe aantal events dat beschouwd is in deze categorieën. Over het algemeen neemt ook hier de kwaliteit af bij toenemende voorspelhorizon, al is dat wel minder eenduidig dan tijdens normale omstandigheden.

- Gemiddeld over de hoofdlocaties en over alle stations doet HARMONIE het tijdens de meest extreme scheve opzet events (>99,8%) iets minder goed dan HiRLAM, behalve voor de 42-48 uur voorspelhorizon.
- Tijdens de iets minder extreme events (99-99,8%) doet HARMONIE het meestal beter, behalve tijdens de hindcast en de 0 – 6 uur voorspelhorizon.

4.1.3 IJsselmeer

Met betrekking tot de totale waterstanden in het IJsselmeer, het Ketelmeer en het Zwarte Meer kan het volgende worden geconcludeerd:

- De kwaliteit van de modelvoorspelling neemt, volgens verwachting, af bij een toenemende voorspelhorizon. De kwaliteit bij het gebruik van HARMONIE is voor alle voorspelhorizons iets beter dan voor HiRLAM.
- Gebruik van downscaling vermindert de kwaliteit voor alle voorspelhorizons, ten opzichte van gebruik van het meteorologisch model zonder downscaling. Over het algemeen doet HARMONIE-downscaling het aanmerkelijk minder goed dan HiRLAM-downscaling. De afname in kwaliteit bij het gebruik van HARMONIE-downscaling hangt samen met een systematische onderschatting van de opzet.
- In het IJsselmeergebied is het effect van het gebruik van een andere meteo-forcering op de stationsgemiddelde RMSE kleiner dan voor het Ketelmeer en Zwarte Meer. Daarnaast geldt dat in het Ketelmeer en Zwarte Meer de RMSE sneller groeit bij een toenemende voorspelhorizon dan in het IJsselmeergebied.

Onder extremere omstandigheden (de 99-99,8% en >99,8% hoogste hoogwaters) geldt voor de kwaliteit van de hoogwaters, gemiddeld over de beschouwde station, het volgende:

- De kwaliteit van de voorspellingen met HiRLAM en HARMONIE laten een meer vergelijkbaar resultaat zien voor de verschillende voorspelhorizons. Tijdens de hindcast doet HiRLAM-downscaling het in de IJsselmeer stations iets beter dan HiRLAM en HARMONIE voor beide klassen van events. Tijdens de meest extreme events is dat voor bijna alle voorspelhorizons het geval. In het Ketelmeer en Zwarte Meer doet HARMONIE het voor de kortere voorspelhorizons beter dan de andere meteorologische aansturing, vooral tijdens de meest extreme events.
- De kwaliteit bij het gebruik van HARMONIE-downscaling is duidelijker minder dan bij aansturing met de andere meteorologische modellen. Dit hangt samen met een systematische onderschatting van de opzet.

4.2 Aanbevelingen

4.2.1 Algemeen

- Tijdens de uitvoering van deze studie zijn een aantal onvolkomenheden in de operationele implementatie van zowel het Noordzee model als het IJsselmeer model ontdekt. Daarom wordt aanbevolen om bij implementatie van nieuwe modellen te onderzoeken of de operationele resultaten overeen komen met de kwaliteit zoals die tijdens de validatie met behulp van hindcast berekeningen tijdens de modelontwikkeling bepaald is. Eventuele onvolkomenheden ten gevolge van de implementatie komen hiermee al voor operationalisatie aan het licht.

- Bij het huidige onderzoek is gebruik gemaakt van de operationele vijfde-generatie (hydrodynamische) WAQUA modellen. Gezien de toekomstige migratie naar de zesde-generatie D-HYDRO modellen wordt aanbevolen om dit onderzoek aan te vullen met een analyse van de kwaliteit van Harmonie in combinatie met die nieuwe hydrodynamische modellen voor Noordzee en IJsselmeer.
- Voor de Noordzee geldt daarbij dat gebruik van windschuifspanning niet zonder meer mogelijk is, omdat in de aansturing gebruik gemaakt wordt van 'relatieve wind', waarbij het verschil tussen de snelheid van het wateroppervlak en de windsnelheid bepalend is voor de impulsoverdracht.
- Voor het IJsselmeer geldt dat in deze studie gebruik gemaakt is van de 'RWS-trapjeslijn' voor het bepalen van de windschuifspanning. In de operationele implementatie zal gebruik gemaakt worden van de windschuifspanning uit HARMONIE.

4.2.2 Noordzee

- Het bepalen van de voorspelkwaliteit in combinatie met ECMWF IFS aansturing was geen onderdeel van deze studie. Aangezien de aansturing met ECMWF meteorologie een belangrijke rol speelt in het maken van operationele verwachtingen bij WMCN-kust, en eerdere resultaten op basis van een hindcast analyse veelbelovend waren, wordt aanbevolen om in een vervolg ook de voorspelkwaliteit bij gebruik van ECMWF aansturing te bepalen.

4.2.3 IJsselmeer

- Operationeel wordt gedurende elke voorspelcyclus tweemaal een meerpeilcorrectie procedure doorlopen: aan het begin van de hindcast (T0 -6 uur) en aan het begin van de forecast (T0). Dit zorgt ervoor dat de laatst berekende schuifstanden van de voorgaande berekening vervallen en de berekening altijd met schuiven in open toestand begonnen wordt, waardoor er verstoringen kunnen optreden. Dit heeft een negatieve invloed op de kwaliteit van de berekende waterstanden. Het wordt daarom aanbevolen deze procedure te vervangen door een meerpeilcorrectie waarbij de schuifstanden van de voorgaande berekening naadloos overgenomen worden in de volgende berekening.
- In waterlichamen waarvan de dimensies klein zijn ten opzichte van de resolutie van het gebruikte meteorologisch model, zou het toevoegen van extra resolutie in de meteorologische forcering in theorie meerwaarde kunnen hebben. Dit kan het geval zijn als dit tot gevolg heeft dat het effect van de land/water overgangen op de ruimtelijke verdeling van de land/water impulsoverdracht beter gerepresenteerd wordt. Uit dit onderzoek is echter gebleken dat het verhogen van de meteorologische resolutie door gebruik van downscaling niet leidt tot betere waterstandverwachtingen. Er wordt aanbevolen om uit te zoeken wat de oorzaak is van de verslechtering van de resultaten. In de tussentijd wordt aanbevolen om voor het maken van operationele verwachtingen geen gebruik te maken van HARMONIE-downscaling.

- Bij de aansturing van het IJsselmeermodel is in dit onderzoek uitgegaan van de winddrag-relatie die momenteel gebruikt wordt in de operationele implementatie, zijnde de RWS-trapjeslijn. Bij drie van de vier configuraties is er daarom een inconsistentie tussen de winddragformulering in het meteorologisch model en het hydrodynamisch model. Dit betekent dat verschillen in voorspelkwaliteit tussen de verschillende modellen niet alleen aan het meteorologisch model kunnen worden toegeschreven, maar deels ook veroorzaakt kunnen worden door verschillen in de mate van inconsistentie in lucht-water impulsoverdracht. Aanbevolen wordt om dit verder te onderzoeken door de hindcast-berekening een keer opnieuw te draaien, maar dan met een consistente winddrag-relatie.

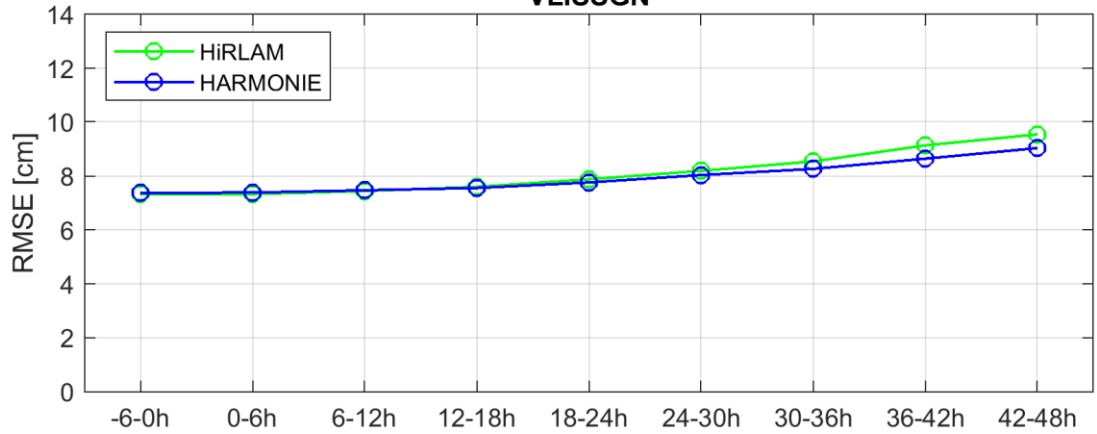
5 Literatuur

- Genseberger, M., Eijsberg-Bak, C.I. (2019). *Consequenties overgang HIRLAM downscale naar HARMONIE in IJsselmeergebied, specifiek voor WAQUA modellen RWsOS Meren*. Deltares, memo 11203715-010-ZKS-0003
- Van der Mheen, M. (2014). *5de generatie IJVD WAQUA model; Bouw, kalibratie en verificatie*. Deltares, rapport 1209449-007 -ZWS-0008.
- Plieger, R., De Goede, E. (2019). *Testverslag major release Simona2019, 19-10-0020*. Deltares
- Van der Wildt, C.D. (1992). *Peilbesluit rijkswateren IJsselmeergebied*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat
- Zijl, F. (2013). *Development of the next generation Dutch Continental Shelf Flood Forecasting models*. Deltares rapport 1205989-003-ZKS-0002.
- Zijl, F., Verlaan, M., Gerritsen, H. (2013). *Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction*. Ocean Dyn. 63 (7).
- Zijl, F., Gautier, C., Vatvani, D.K. (2019). *Validatie HARMONIE met operationele voorspellingmodellen in Noordzee*. Deltares, rapport 11203715-010-ZKS-0004

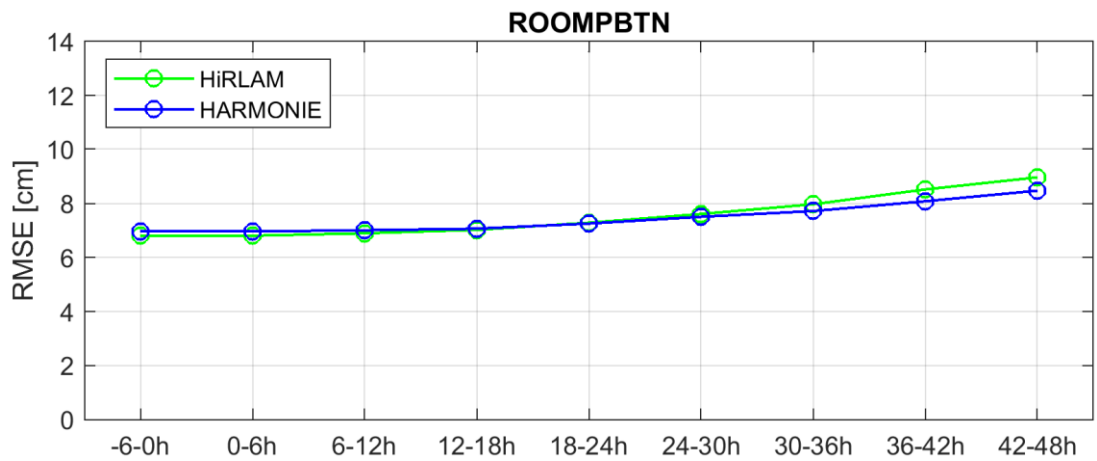
A Bijlage: Modelresultaten Noordzee

A.1 Noordzee

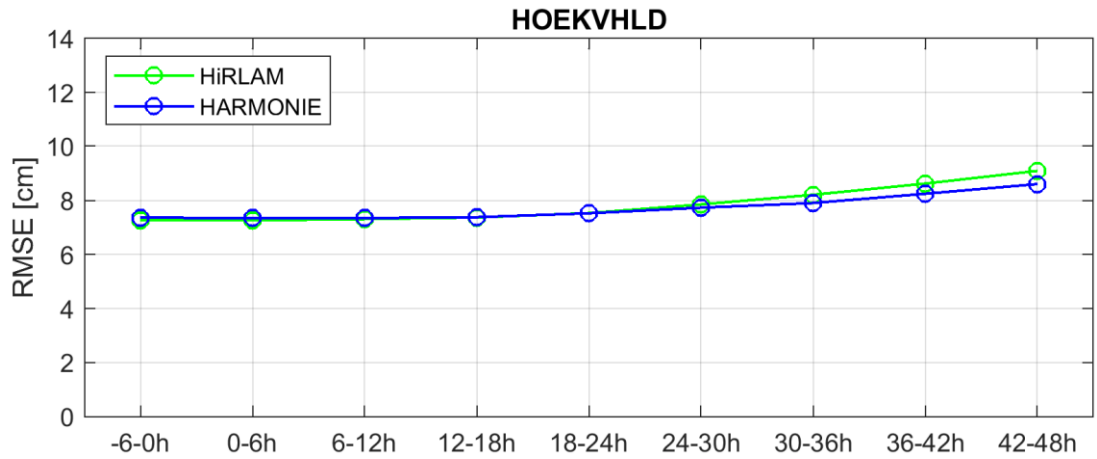
A.1.1 RMSE van de totale waterstand van de individuele hoofdlocaties VLISSGN



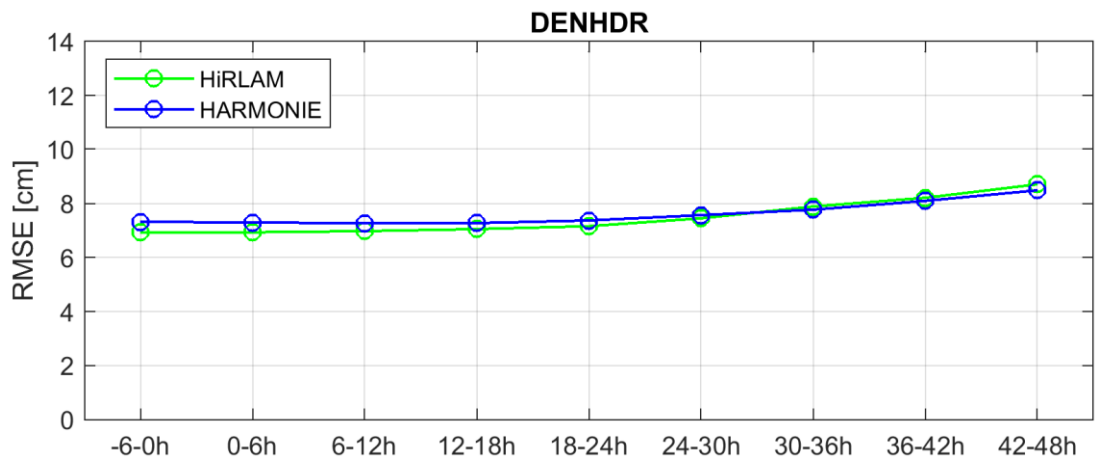
Figuur A.1 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Vlissingen voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



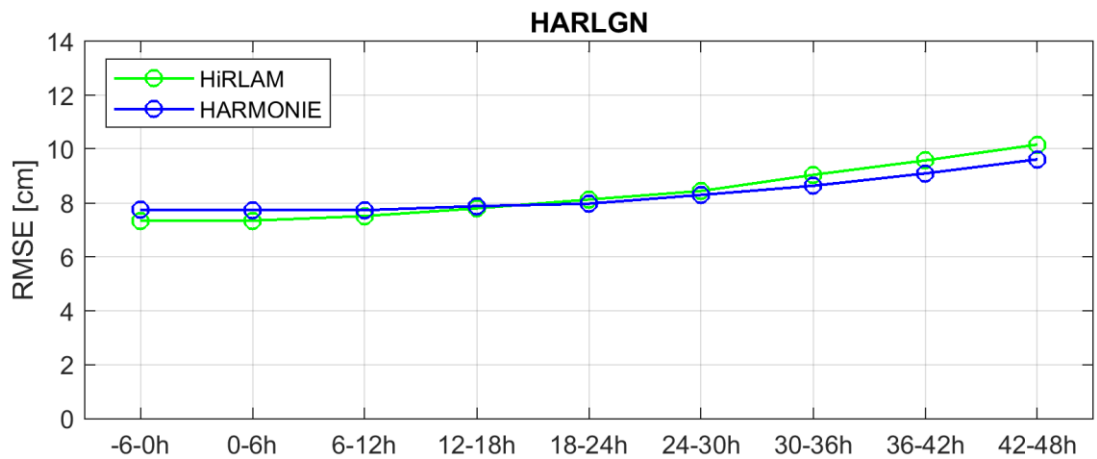
Figuur A.2 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Roompot-Buiten voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



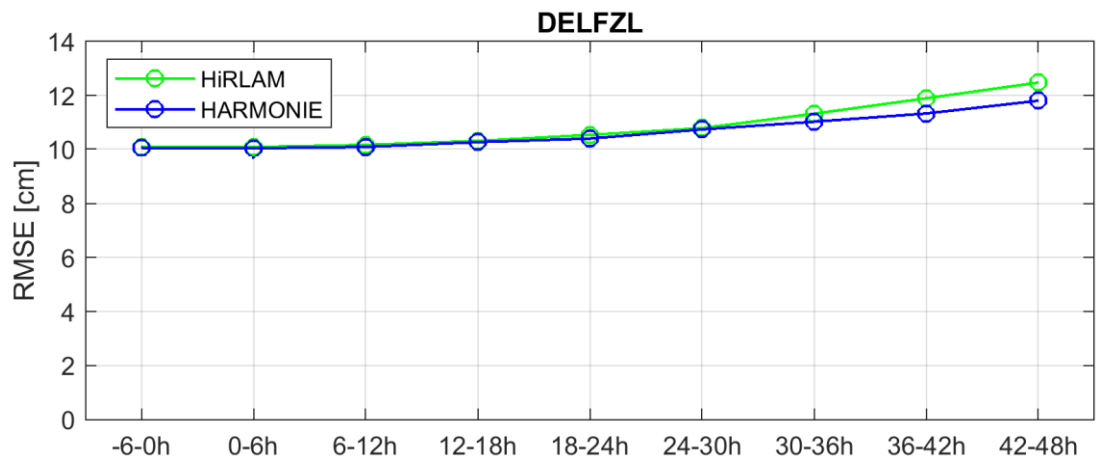
Figuur A.3 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Hoek van Holland voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur A.4 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Den Helder voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

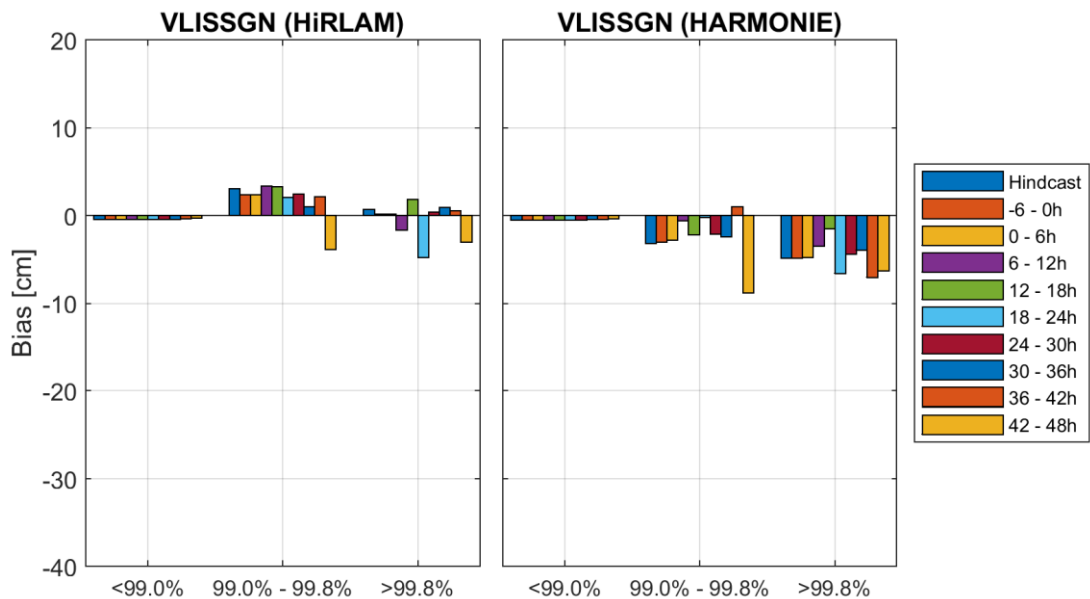


Figuur A.5 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Harlingen voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

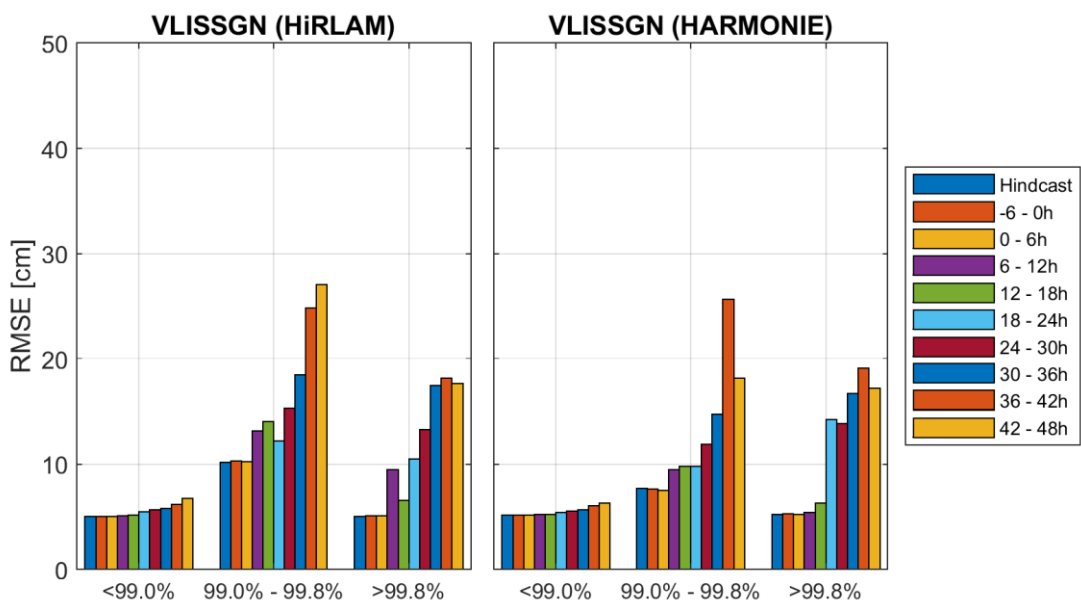


Figuur A.6 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Delfzijl voor meteo-forceringen HiRLAM (groen) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

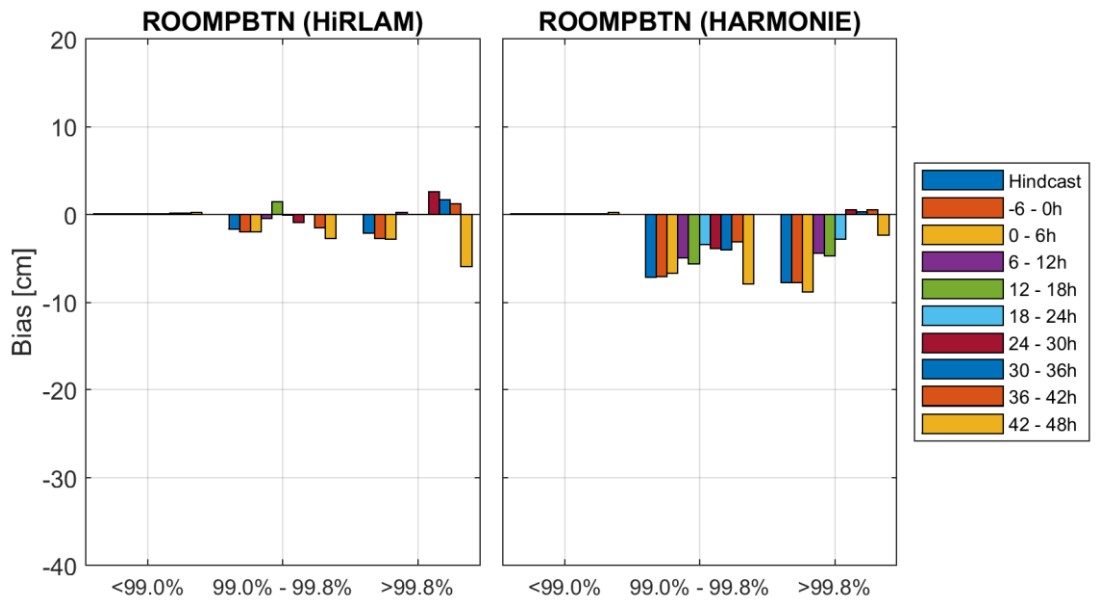
A.1.2 Bias en RMSE van de scheve opzet van de individuele hoofdlocaties



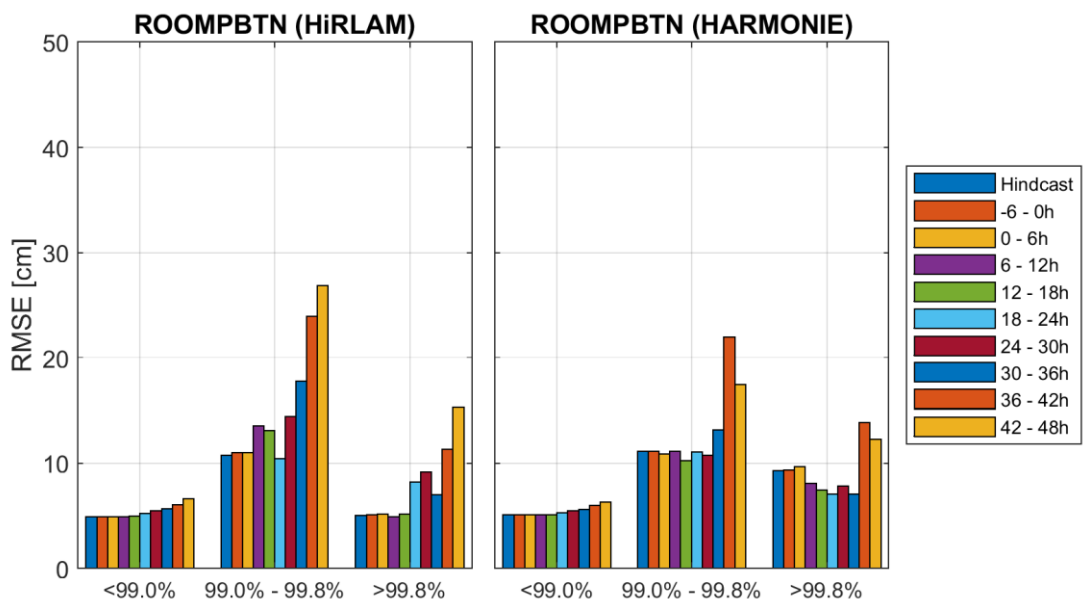
Figuur A.7 Bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Vlissingen



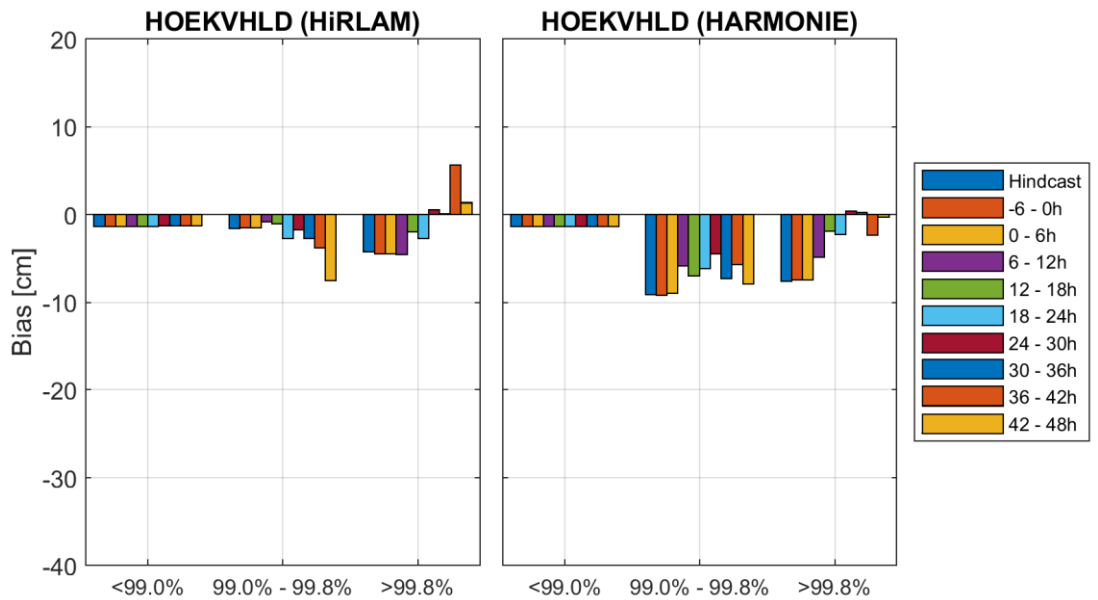
Figuur A.8 RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Vlissingen



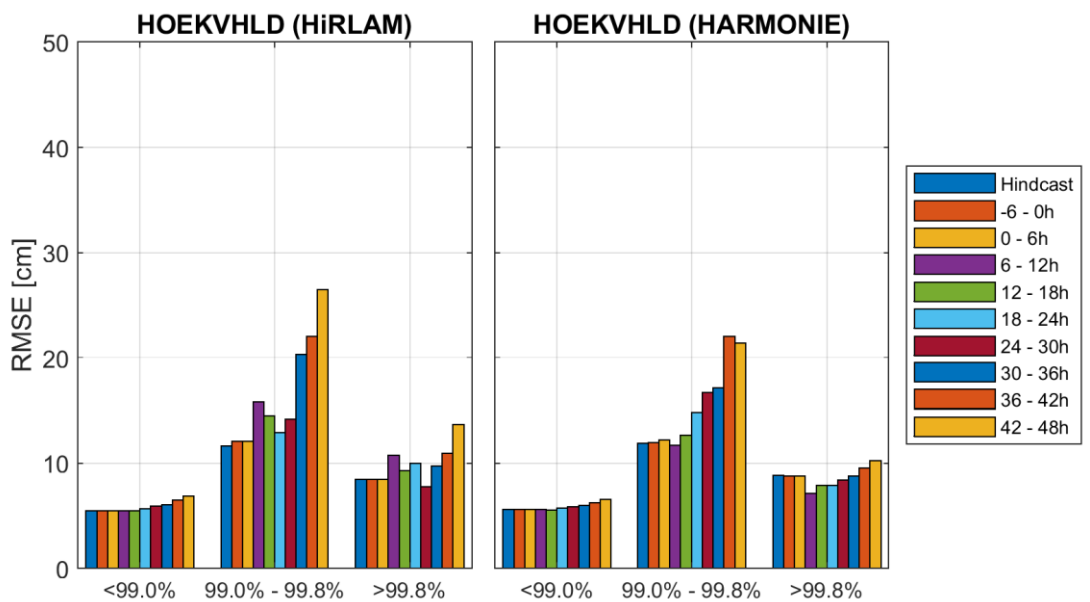
Figuur A.9 Bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Roompot-Buiten



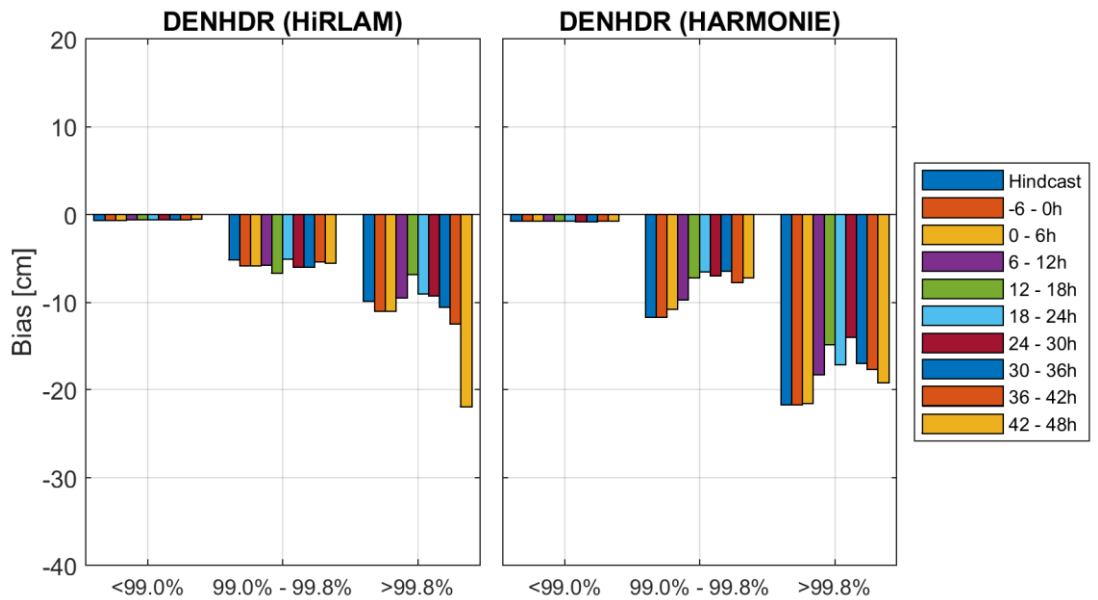
Figuur A.10 RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Roompot-Buiten



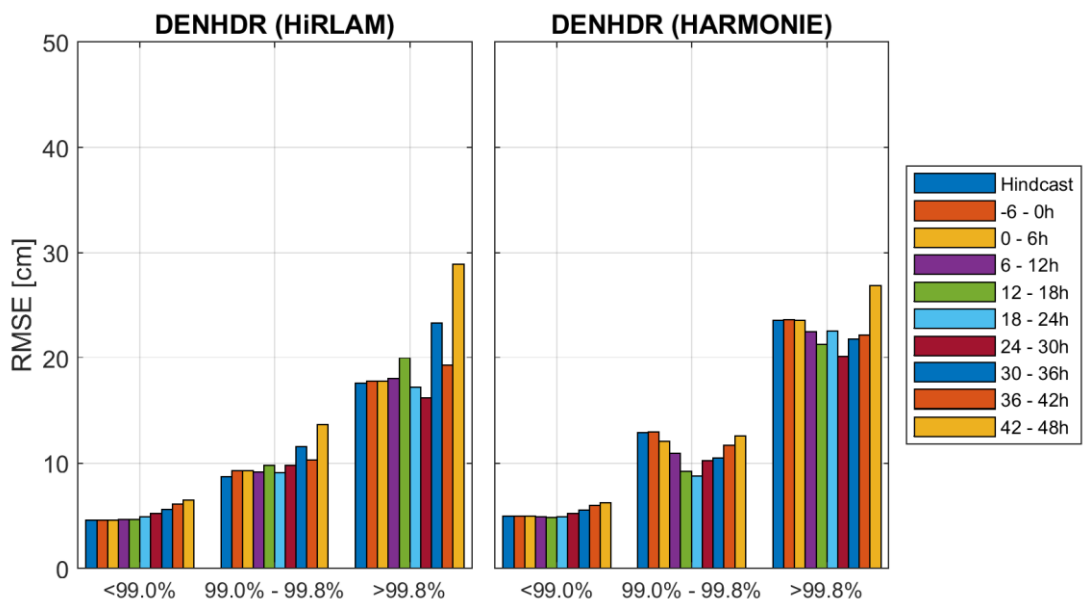
Figuur A.11 Bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Hoek van Holland



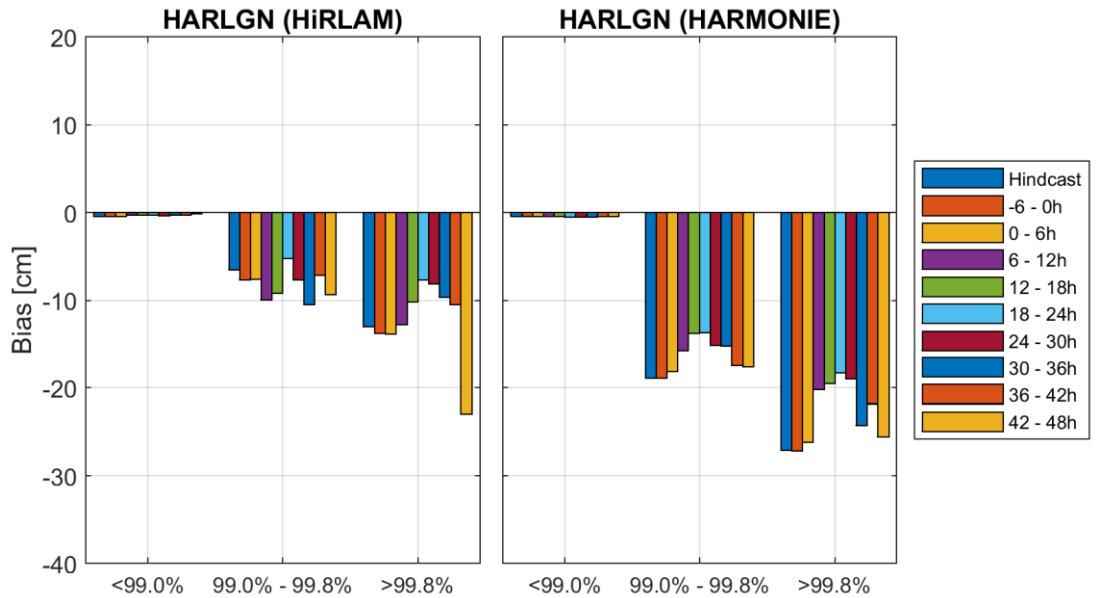
Figuur A.12 RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Hoek van Holland



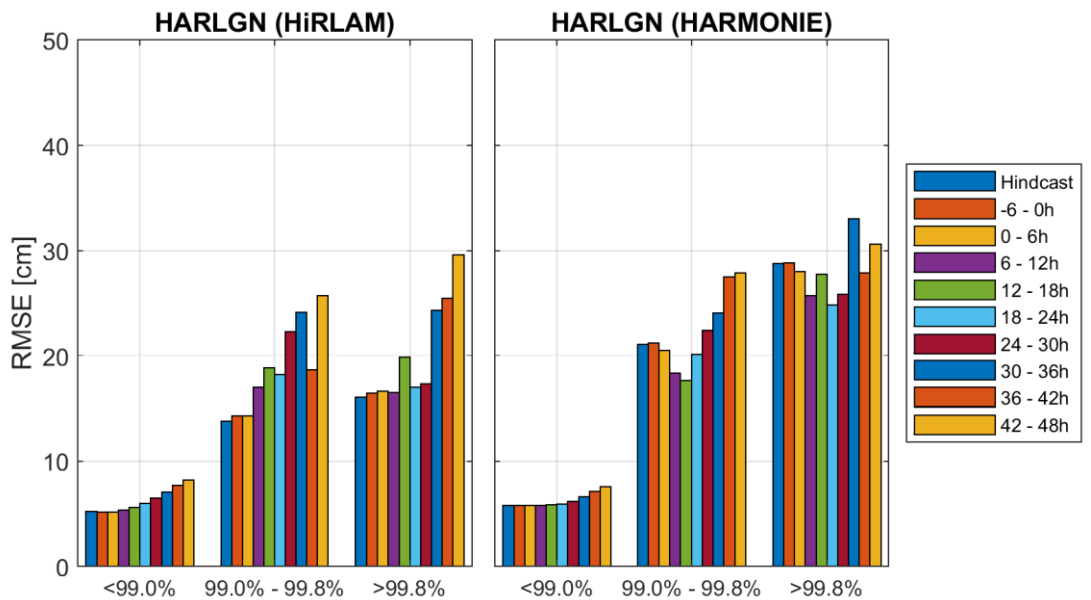
Figuur A.13 Bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Den Helder



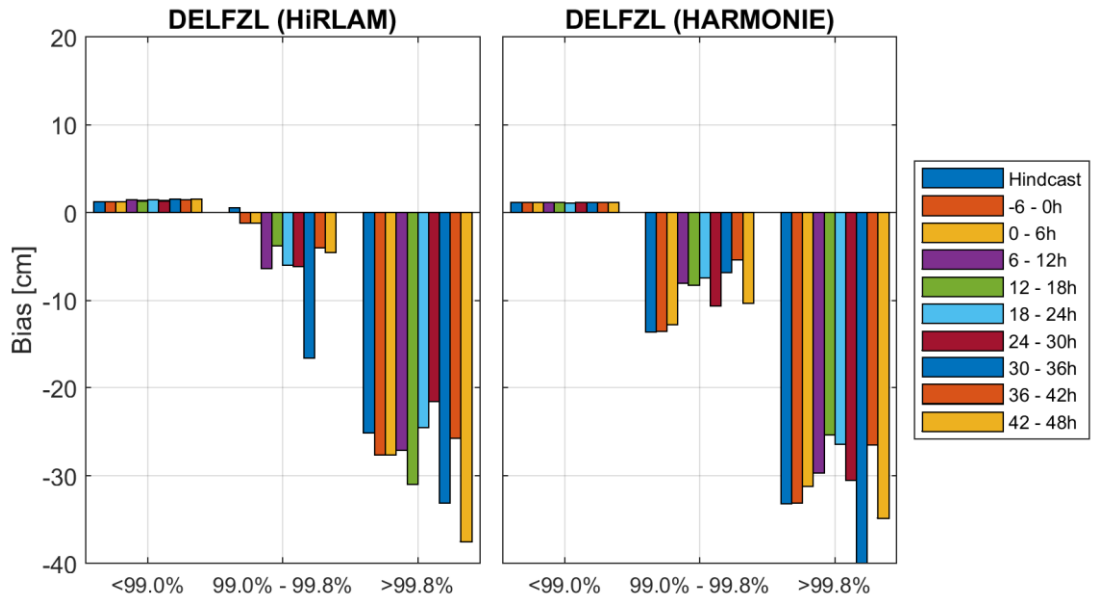
Figuur A.14 RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Den Helder



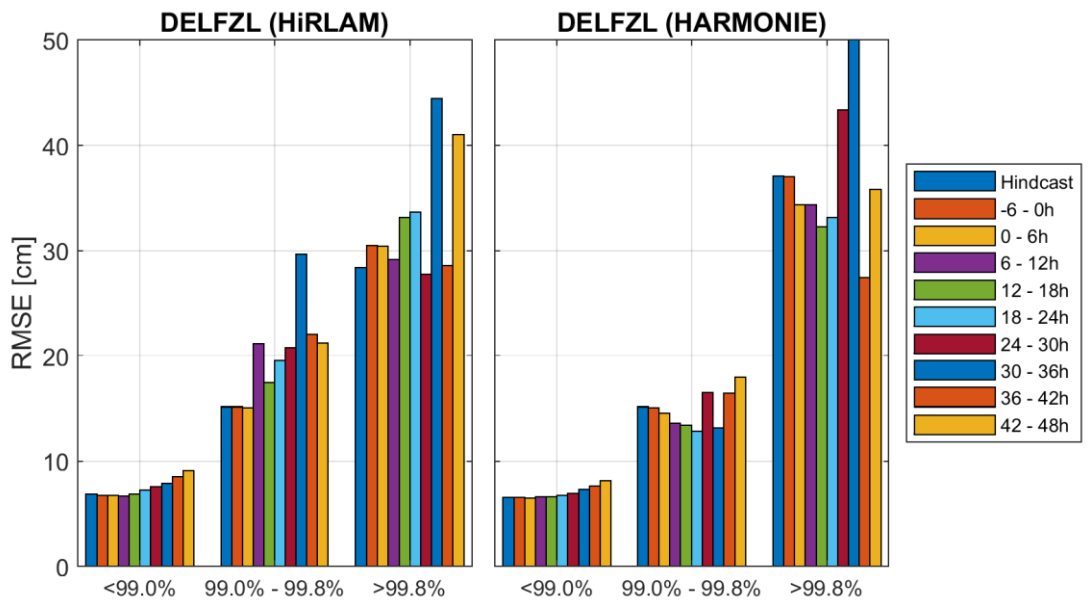
Figuur A.15 Bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Harlingen



Figuur A.16 RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Harlingen



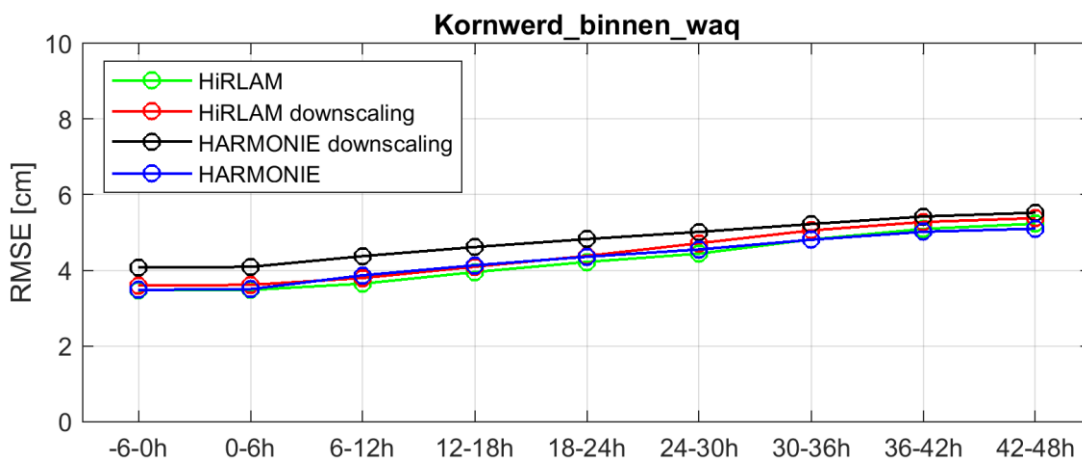
Figuur A.17 Bias (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Delfzijl



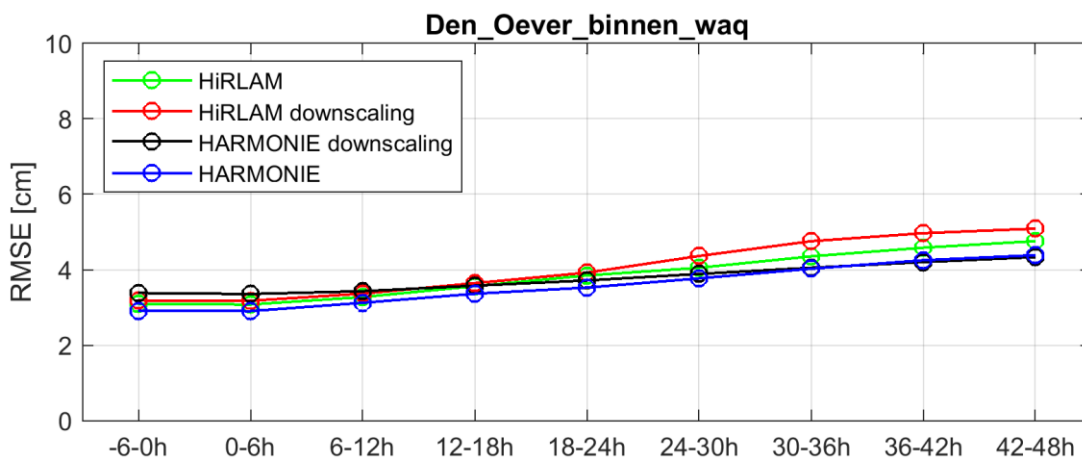
Figuur A.18 RMSE (cm) van de scheve opzet voor drie verschillende klassen van events voor station Delfzijl

A.2 IJsselmeer

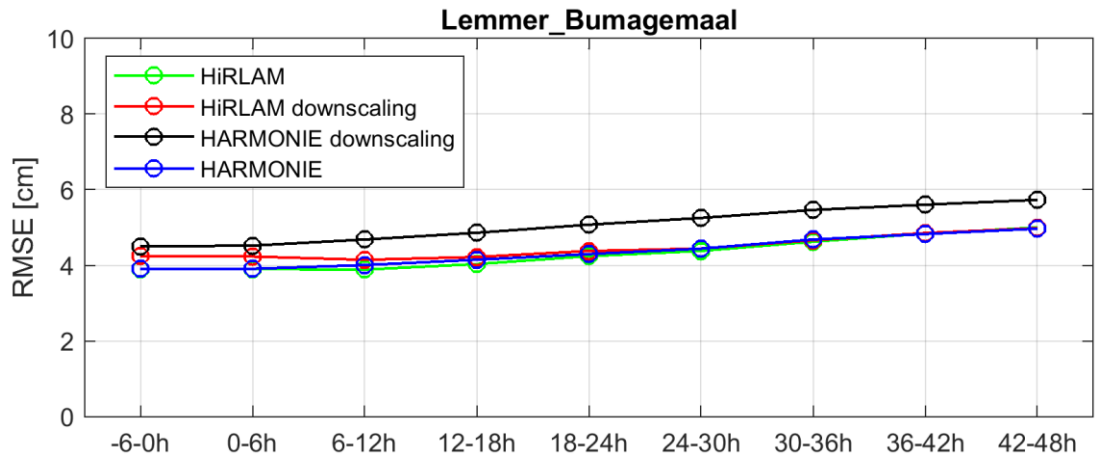
A.2.1 RMSE van de totale waterstand van de individuele stations



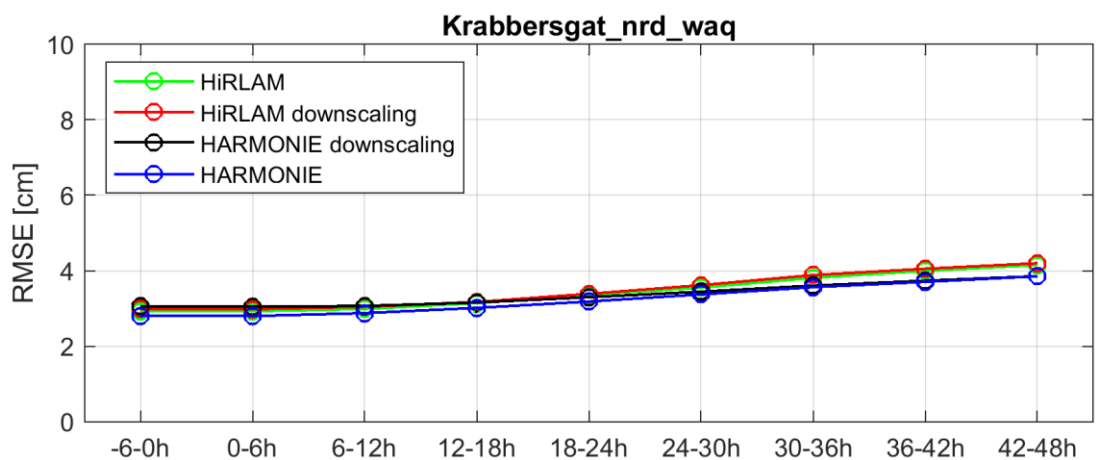
Figuur A.19 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Kornwerderzand-Binnen voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



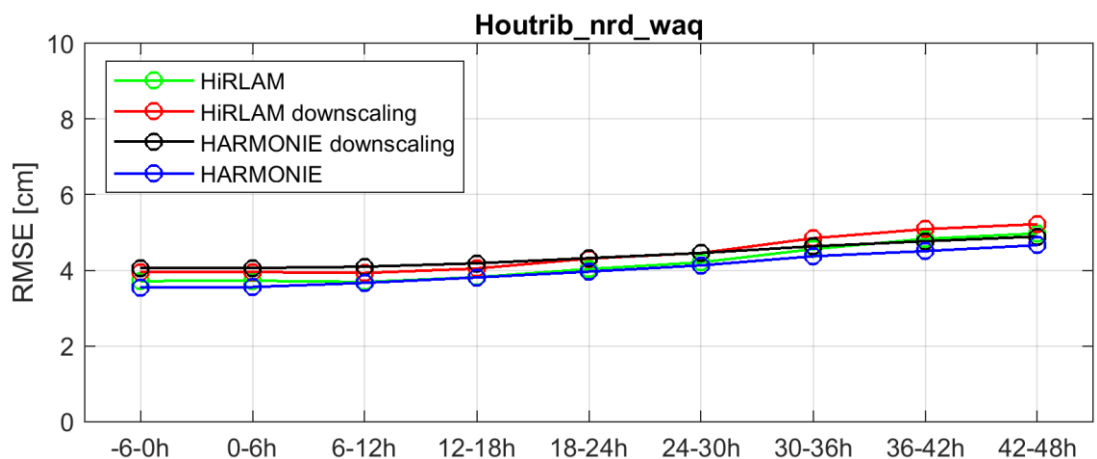
Figuur A.20 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Den Oever-Binnen voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



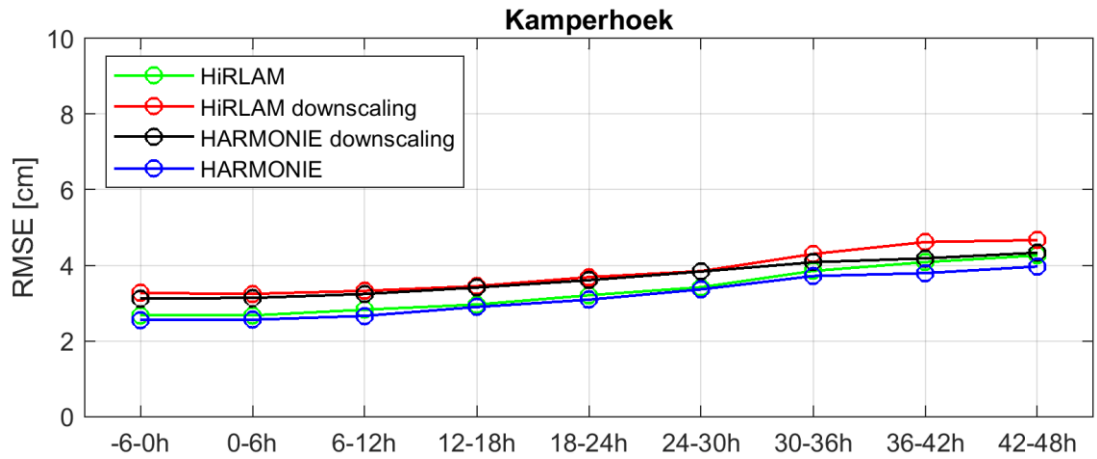
Figuur A.21 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Lemmer Bumagemaal voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



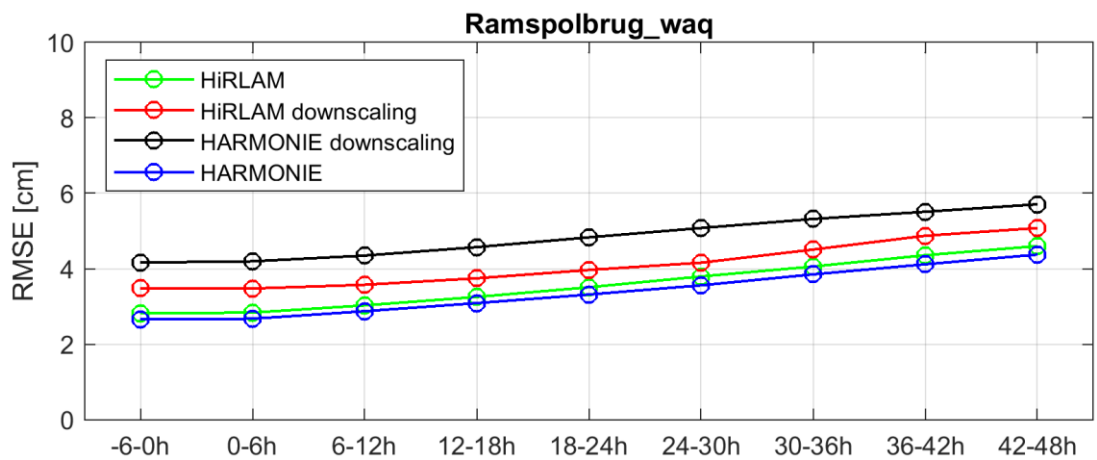
Figuur A.22 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Krabbersgat Noord voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



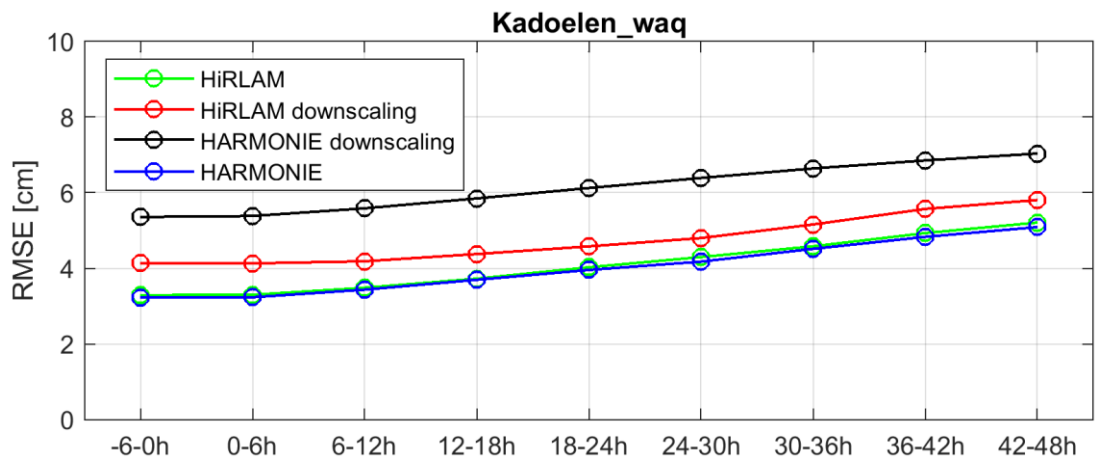
Figuur A.23 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Houtrib Noord voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur A.24 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Kamperhoek voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

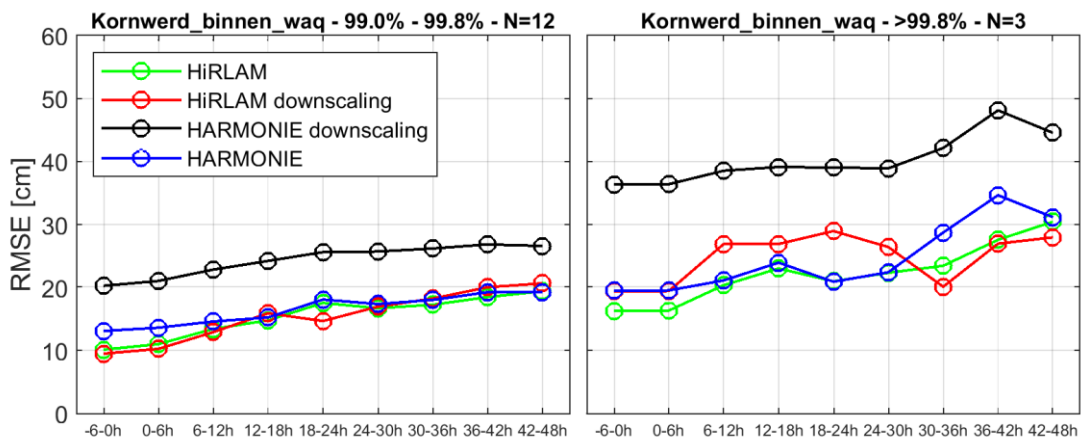


Figuur A.25 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Ramspolbrug voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

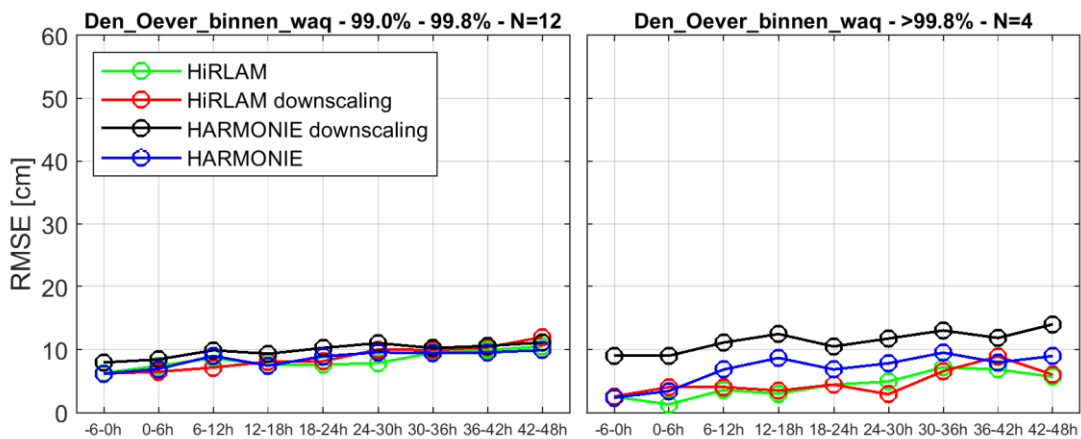


Figuur A.26 RMSE (cm) van de totale waterstand van station Kadoelen voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

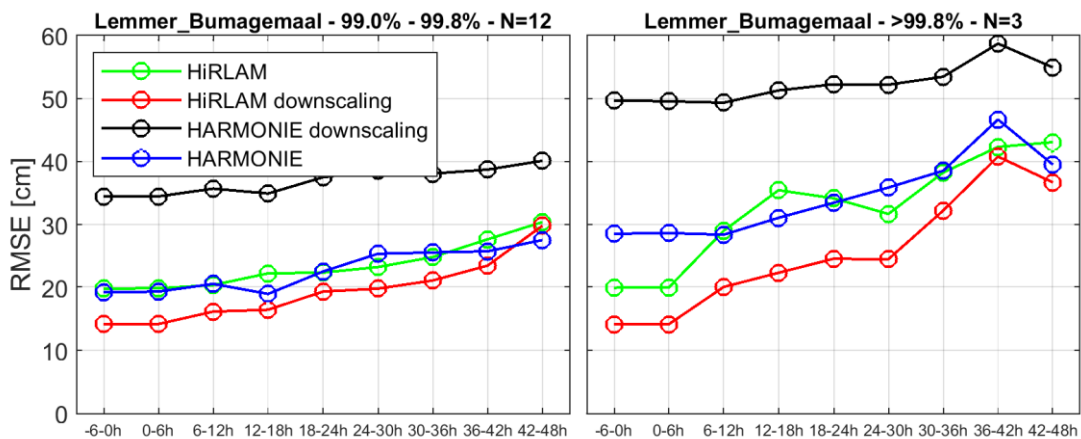
A.2.2 RMSE van de hoogwaters van de individuele stations



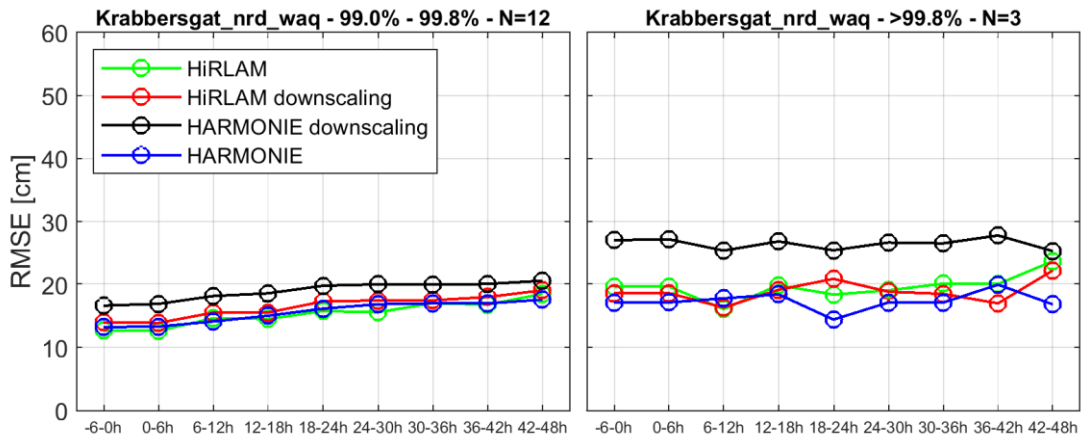
Figuur A.27 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Kornwerd-erzand-Binnen voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



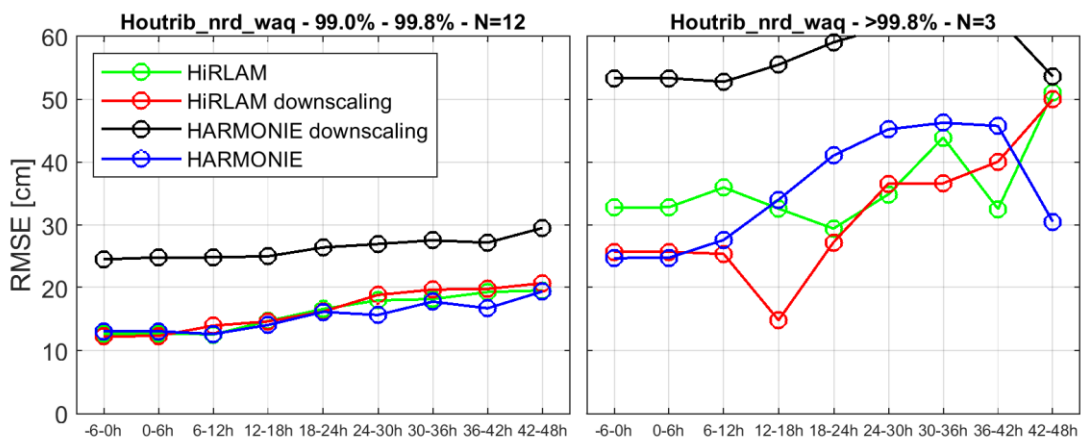
Figuur A.28 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Den Oever-Binnen voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



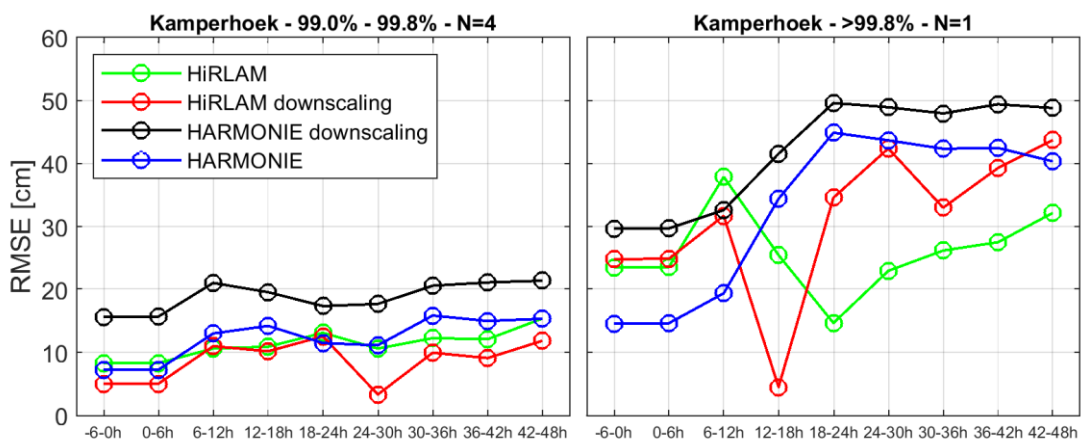
Figuur A.29 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Lemmer Bumagemaal voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



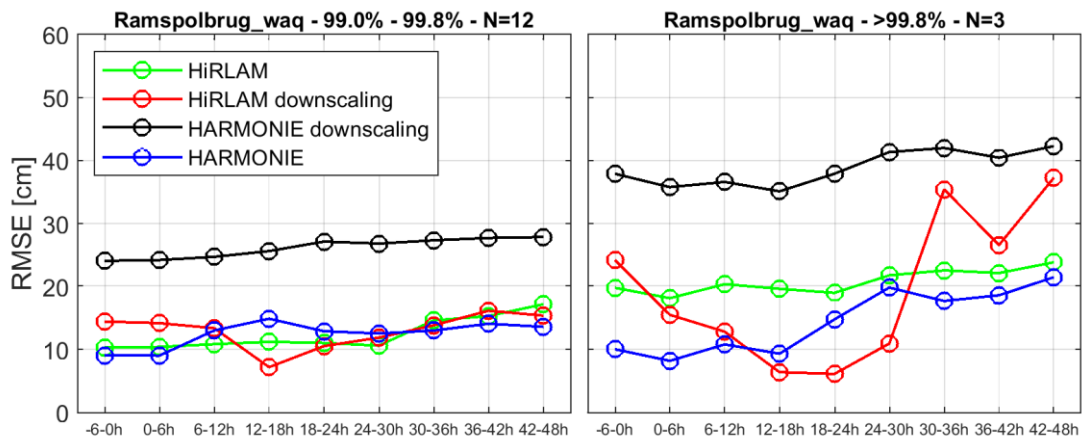
Figuur A.30 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Krabbersgat Noord voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



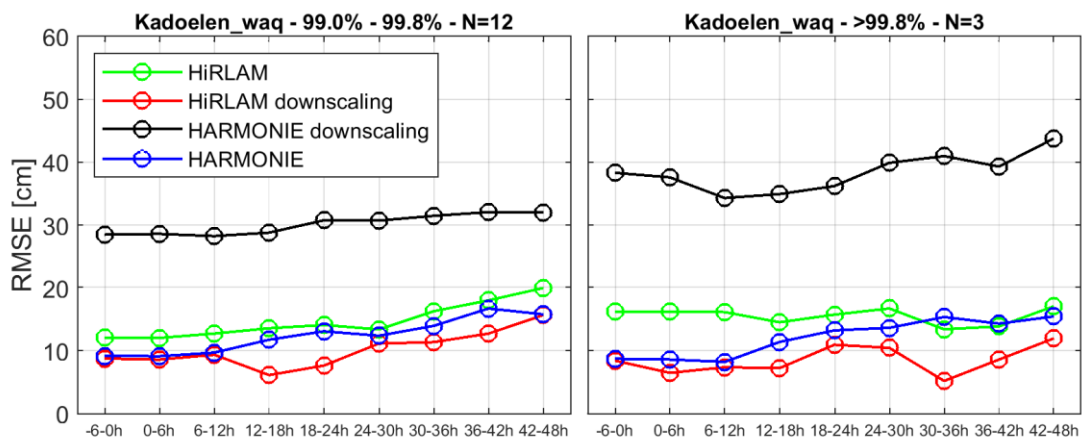
Figuur A.31 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Houtrib Noord voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur A.32 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Kamperhoek voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur A.33 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Ramspolbrug voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons



Figuur A.34 RMSE (cm) van de scheve opzet van station Kadoelen voor twee verschillende klassen van events voor meteo-forceringen HiRLAM (groen), HiRLAM downscaling (rood), HARMONIE downscaling (zwart) en HARMONIE (blauw) voor verschillende voorspelhorizons

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl