

## Blending van radar nowcast en Harmonie: implementatie en analyse



## Blending van radar nowcast en Harmonie: implementatie en analyse

### Auteur(s)

Ruben Imhoff

## Blending van radar nowcast en Harmonie: implementatie en analyse

<b>Opdrachtgever</b>	Hoogheemraadschap Rijnland, Waterschap Noorderzijlvest en Rijkswaterstaat
<b>Contactpersoon</b>	J.W. van Kempen, J. Schenkel
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Neerslag, weersverwachting, buienradar, radar, nowcasting, blending, Harmonie

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.1
<b>Datum</b>	18-12-2023
<b>Projectnummer</b>	11209610-000
<b>Document ID</b>	11209610-000-ZWS-0006
<b>Pagina's</b>	31
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

<b>Ruben Imhoff</b>		

# Samenvatting

Een alternatief om tot betere neerslagverwachtingen voor de eerste uren in de toekomst te komen is wenselijk voor het Nederlandse waterbeheer. In dit onderzoek hebben we de STEPS blendingmethode toegepast om radarnowcasts van de KNMI weerradars te combineren met Harmonie (het numerieke weermodel van KNMI). De blendingmethode is onderdeel van het open-source nowcastingplatform pysteps. Na een aantal aanpassingen, waaronder het mogelijk maken van een dynamische disaggregatie van de tijdstap van de Harmonie-verwachting van één uur naar  $t$  minuten (hetgeen een prettige bijvangst van het onderzoek was) en het versnellen en verbeteren van de pysteps software in samenwerking met het Belgische KMI, hebben we de code geoperationaliseerd in Delft-FEWS en getest voor een volledige, regenachtige zomermaand (15 juli tot en met 15 augustus 2023).

Gegeven een looptijd van de geblende verwachting van 12 uur en een 10-min tijdstap, waren de rekentijden gemiddeld 3,4 minuten voor een deterministische run en 12,3 minuten voor een ensembleverwachting met 10 members. De pre-processing duurde circa 10 minuten en hoeft enkel plaats te vinden wanneer een nieuwe Harmonie-verwachting beschikbaar is. Bij een langere (kortere) looptijd van de verwachting zullen de genoemde rekentijden toenemen (afnemen).

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat de STEPS blendingmethode een goede combinatie weet te maken tussen de radarnowcast en Harmonie. Afhankelijk van de statistische score waar naar gekeken wordt (RMSE en de critical success index zijn gebruikt), is de blending beter of vrijwel even goed als het best presenterende product (de radarnowcast of Harmonie) voor de geteste looptijden. Een consistent resultaat is dat de STEPS blending de nowcastkwaliteit goed weet te volgen gedurende de eerste 1 à 2 uur van de verwachting (de nowcast had een lagere fout dan Harmonie gedurende de eerste 2 – 2,5 uur in dit onderzoek), waarna het langzaam overgaat in de Harmonieverwachting, terwijl het middels de informatie van de radarnowcast en de stochastische perturbaties in STEPS wel de lokale buienstructuren en extremen weet te behouden. Een belangrijke reden om voor een dynamische blendingmethode zoals STEPS te gaan, is dat het rekening houdt met de huidige kwaliteit van beide producten (de radarnowcast en Harmonie) om de blendinggewichten te berekenen. Daarnaast houdt het ook rekening met de kwaliteit van de producten in de ruimte, aangezien neerslagvelden op verschillende plaatsen kunnen liggen en het numerieke weermodel vaak het beste presteert op een grotere ruimtelijke schaal, terwijl de lokale buien veelal gemist worden. Op basis hiervan, alsmede een vergelijking met een eenvoudige, lineaire combinatie tussen de radarnowcast en Harmonie, is het gebruik van de STEPS blendingmethode aan te raden als alternatieve neerslagverwachtingsmethode voor korte looptijden.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Doel van dit onderzoek en de blendingimplementatie</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Blending van radar nowcast en weermodelverwachtingen</b>	<b>8</b>
2.1	De STEPS blendingmethode	8
2.2	Toepassing van de methode voor Nederland	10
2.2.1	Disaggregatie Harmonie naar fijnere tijdstap	10
2.2.2	Samenwerking met Belgisch KMI voor versnelling code	11
2.3	Implementatie in Delft-FEWS	12
2.4	Aanpak validatie van de implementatie	13
<b>3</b>	<b>Validatie van de resultaten over een zomermaand</b>	<b>14</b>
3.1	Validatie voor het gehele radardomein	15
3.2	Validatie op de lokale schaal	17
3.2.1	Validatie voor de Gouwepolder	17
3.2.2	Validatie voor een gridcel boven de locatie Winsum	18
<b>4</b>	<b>Conclusie en aanbevelingen</b>	<b>19</b>
4.1	Antwoorden op de onderzoeksvragen	19
4.2	Toekomstige verbeteringen aan het blendingalgoritme	20
4.3	Aanbevelingen	20
	<b>Referenties</b>	<b>22</b>
	<b>Appendix</b>	<b>23</b>
<b>A</b>	<b>Resultaten op een 15-min tijdstap</b>	<b>24</b>
<b>B</b>	<b>Vergelijking met het real-time radarproduct</b>	<b>26</b>
<b>C</b>	<b>Vergelijking met lineaire blending aanpak voor 4 events</b>	<b>30</b>

# 1 Doel van dit onderzoek en de blendingimplementatie

Betere regenvalverwachtingen op de korte termijn (tot enkele uren vooruit) kunnen een verschil maken in het tijdig en accuraat verwachten van verhoogde afvoeren en waterstanden in snel reagerende gebieden, zoals polders, heuvelachtige gebieden en steden (Lin et al., 2005). De neerslagverwachtingen in numerieke weermodellen, zoals KNMI's Harmonie voor Nederland, zijn niet afdoende op deze korte termijn om een aantal redenen:

- de tijds- en ruimtelijke resolutie zijn te grof om lokale buien goed te simuleren,
- de update-frequentie van de verwachtingen zijn te laag (iedere zes uur voor Harmonie) waardoor buien soms gemist worden
- en de initialisatie van de modellen zijn nog niet optimaal, waardoor typisch de eerste zes uur van de verwachting als niet bruikbaar gezien kan worden ((Lin et al., 2005; Roberts and Lean, 2008; Berenguer et al., 2012; Pierce et al., 2012).

Dit geeft reden om op zoek te gaan naar een alternatief om voor de snel reagerende en kleinere watersystemen tot beter bruikbare neerslagverwachtingen voor de eerste uren in de toekomst te komen.

Regenvalnowcasting (vanaf hier in het kort nowcasting) is een methode die de meest recente neerslagobservaties, vaak van de weerradar, gebruikt om tot een statistische extrapolatie van deze beelden naar de toekomst te komen. Dit gebeurt over het algemeen in drie stappen:

- 1 het bepalen van de beweegrichting van de geobserveerde neerslagvelden (de zogenaamde advection),
- 2 het schatten van de ontwikkeling (groei/uitdoving) van de neerslag over tijd, vaak door middel van stochastische perturbaties met een ensembleverwachting als resultaat
- 3 de extrapolatie van de informatie in stappen 1 en 2 naar de toekomst.

Het voordeel van deze methode is dat het snel rekent, in tegenstelling tot de numerieke weermodellen, en altijd met de meest recente observaties begint en daarmee dus al dichter bij de werkelijkheid zit dan het numerieke weermodel voor de eerste tijdstappen.

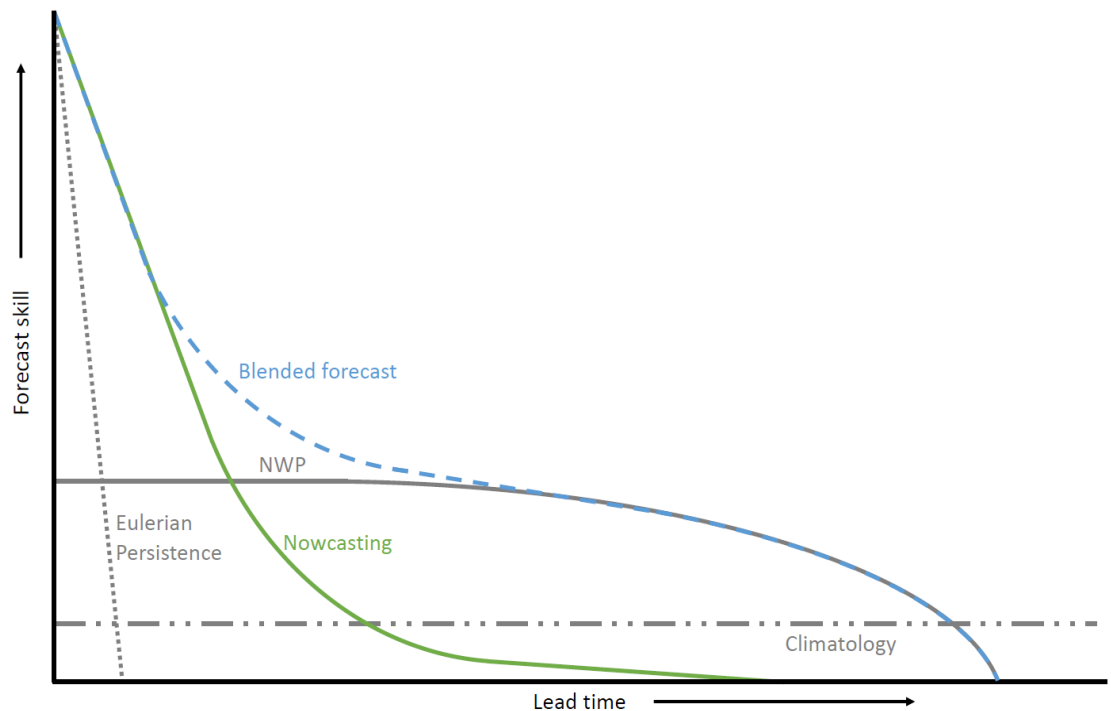
Omdat nowcasting geen fysica van het weersysteem meeneemt, in tegenstelling tot de numerieke weermodellen, is een nowcast vaak maar bruikbaar tot enkele uren vooruit. Dit punt ligt gemiddeld voor Nederland op zo'n twee à drie uur in de toekomst en is afhankelijk van omgevingsfactoren, zoals het type neerslag, de grootte van het gebied waar de verwachting voor gemaakt wordt en de locatie van het gebied binnen het radardomein (Imhoff et al., 2020, 2022). Ondanks dat een betere verwachting voor die eerste uren al nuttig is, is het van belang voor het (Nederlandse) waterbeheer om de neerslagverwachtingen voor de korte termijn te verbeteren tot nog verder in de toekomst, idealiter zo'n zes à twaalf uur vooruit. Dit wordt ook onderschreven door de betrokken partijen in dit onderzoek: Hoogheemraadschap Rijnland, Waterschap Noorderzijlvest en Rijkswaterstaat, welke allen al een operationele nowcastingtoepassing gebruiken of testen.

Een mogelijkheid om de neerslagverwachtingen voor de eerste uren vooruit verder te verbeteren, is een zogenaamde blending. Dit is een optimale combinatie tussen het nowcastingproduct en het numerieke weermodel. Door zo'n blending toe te passen wordt optimaal gebruik gemaakt van de hoge updatefrequentie en kwaliteit van de nowcasting voor

de eerste uren in de toekomst, terwijl de voorspellingskracht van het numerieke weermodel op de langere termijn gebruikt wordt voor de latere uren (zie Figuur 1-1 voor een schematische weergave van de verwachtingskwaliteit over tijd). Zo'n blending zou een beter eindproduct moeten geven (Imhoff et al., 2023) en heeft als bijkomend voordeel dat maar één product gebruikt hoeft te worden in de verwachtingsketen in plaats van zowel de nowcasting voor de korte termijn als het numerieke weermodel voor de langere termijn.

In dit onderzoek hebben we de zogenaamde STEPS blendingmethode (Bowler et al., 2006; Seed et al., 2013) gebruikt om radarnowcasts van de KNMI weerradars te combineren met Harmonie (het numerieke weermodel van KNMI). In Imhoff et al. (2023) is de STEPS blendingmethode al geïmplementeerd binnen het open-source nowcastingplatform pysteps (Pulkkinen et al., 2019) en dus is deze implementatie gebruikt als startpunt voor de operationele implementatie en het testen daarvan binnen dit onderzoek. Vier onderzoeksvragen stonden centraal binnen dit onderzoek:

- Hoe ver in de toekomst kunnen we vooruit rekenen met de blendingmethode, gegeven een gewenste rekestijd van 5 minuten?
- Hoe is de performance/skill ten opzichte van het Harmonie- en nowcastingproduct?
- In hoeverre is de STEPS blendingmethode betere dan een simpele lineaire blending, zowel in rekestijd als resultaat?
- Welke omvang van een ensemble is haalbaar, en hoe verhoudt die zich tot een deterministische berekening?



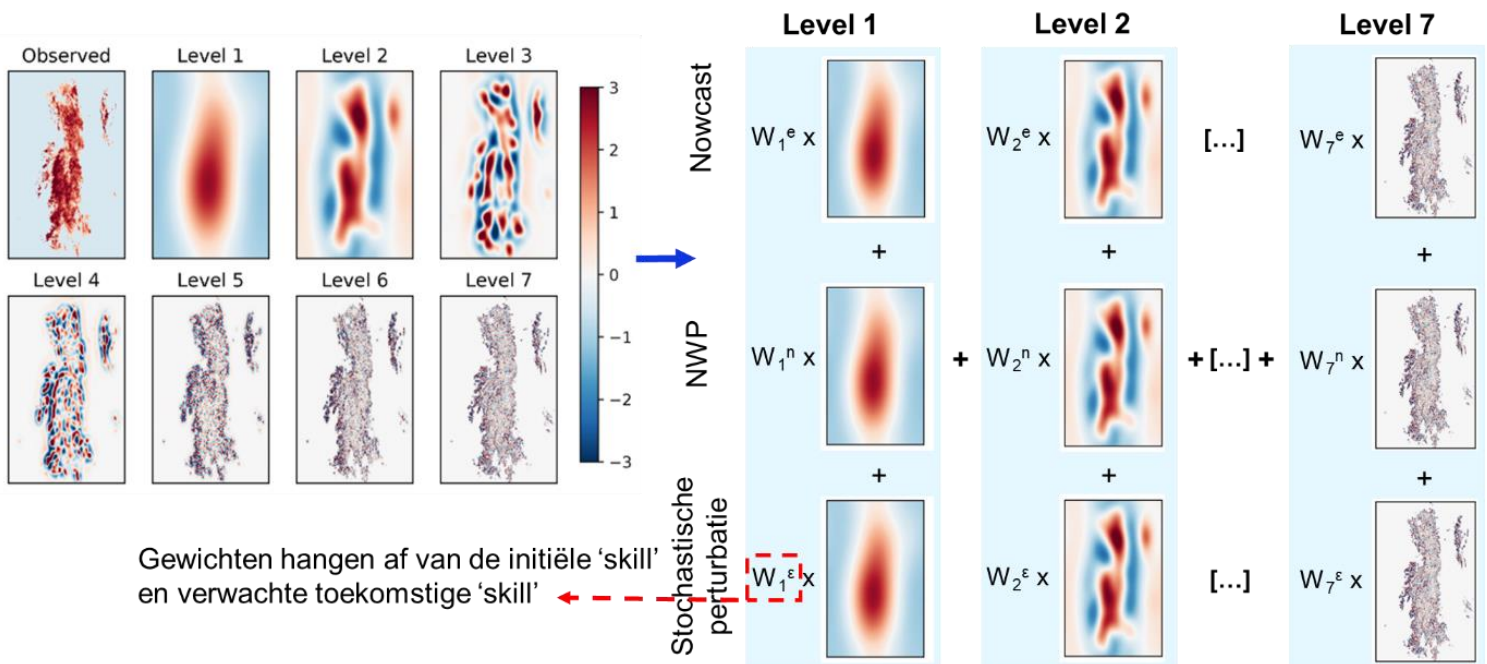
Figuur 1-1: Schematische weergave van de verwachtingskwaliteit per product, uit Imhoff et al., 2023. NWP is het numerieke weermodel en in het blauw is de verwachtingskwaliteit van de geblende verwachting gevisualiseerd.

## 2 Blending van radar nowcast en weermodelverwachtingen

### 2.1 De STEPS blendingmethode

De blending van de radarnowcast met Harmonie kan op verschillende manieren worden gedaan. De meest eenvoudige aanpak is een zogenaamde lineaire blending, waarbij de radarnowcast een gewicht van 1 heeft en Harmonie 0 bij de start van de verwachting. Na enkele uren wordt de kwaliteit van de nowcast minder en gaat de blending in, typisch vindt dit plaats na zo'n 2 uur. Vanaf dat moment zal het gewicht van de radarnowcast lineair afnemen van 1 naar 0, terwijl het tegenovergestelde plaatsvindt voor de Harmonie-verwachting. Na een vastgezette tijd, typisch zo'n 4 uur in de toekomst, is de blending voltooid en bestaat de verwachting volledig uit het Harmonie-product.

Zo'n lineaire blendingaanpak is een vrij simpele en snel rekenende methode, maar het houdt geen rekening met verschillen tussen de producten in de ruimte, bijvoorbeeld neerslag dat op een andere plaats ligt in beide producten, en in de tijd, bijvoorbeeld het feit dat de radarnowcast en Harmonie de ene dag beter zijn dan de andere. Idealiter gebruikt een blendingmethode dan dus ook de verschillen in kwaliteit van de producten in de ruimte en past het de blendinggewichten ook in de tijd aan, aan de hand van de kwaliteit van beide producten op het moment dat de verwachting wordt gemaakt. De STEPS blendingmethode is een manier om dit te doen. In de rest van deze paragraaf lichten we de STEPS blendingmethode kort toe. Voor een uitgebreidere beschrijving van de methode en implementatie in pysteps verwijzen we naar de wetenschappelijk artikelen van Bowler et al. (2006), Seed et al. (2013) en Imhoff et al. (2023).



Figuur 2-1: Een schematische weergave van de STEPS blendingmethode, waarin de blendinggewichten zowel in de tijd als in de ruimte worden berekend.



In de STEPS blendingmethode vindt de blending in de ruimte plaats door de radarnowcast en de verwachting van het numerieke weermodel op te splitsen in verschillende ruimtelijke schalen door middel van een Fast Fourier Transform (FFT). Uit onderzoek naar neerslag is de afgelopen decennia gebleken dat de levensduur van regenvalvelden in relatie staat tot de grootte van het veld, zie bijvoorbeeld Lovejoy en Schertzer (1995). Dit betekent dat grote frontale neerslagvelden, typisch voor de Nederlandse winter, een langere levensduur hebben dan kleine, lokaal onweersbuien, welke meer typisch zijn voor de Nederlandse zomer. Deze levensduur staat ook in verbinding met de voorspelbaarheid (*predictability* in het Engels) van dit soort systemen. Over het algemeen geldt dat de grotere systemen met een langere levensduur makkelijker te voorspellen zijn dan de kleinere, lokale buien met een korte levensduur. Dit geldt ook voor de radarnowcast en het numerieke weermodel, waarbij we vooral van de numerieke weermodellen weten dat ze vrij goede verwachtingen geven op de grotere, grovere schaal, maar juist minder sterk zijn op de kleine, lokale schaal. De radarnowcast start met hoge resolutie radardata, welke ook op de kleine schaal informatie kunnen geven. Dit verschil tussen de twee producten kan dus mee worden genomen in de blending.

Na de FFT-decompositie in meerdere ruimtelijke schalen kan de blending plaatsvinden per ruimtelijke schaal (zie ook Figuur 2-1) om op die manier de kwaliteit van de producten per ruimtelijke schaal optimaal te benutten. Per ruimtelijke schaal worden vervolgens de radarnowcast, het numerieke weermodel en een stochastische perturbatie (welke gebruikt wordt om de ensembleverwachting mee te creëren) gecombineerd aan de hand van blendinggewichten. Deze gewichten verschillen per tijdstap en afgiftemoment van de verwachting, wat het mogelijk maakt om ook de tijdsafhankelijk van de kwaliteit van de producten mee te nemen. De kwaliteit van Harmonie is bijvoorbeeld vandaag niet hetzelfde als voor de verwachtingen van gisteren. In STEPS wordt dit in twee stappen meegenomen:

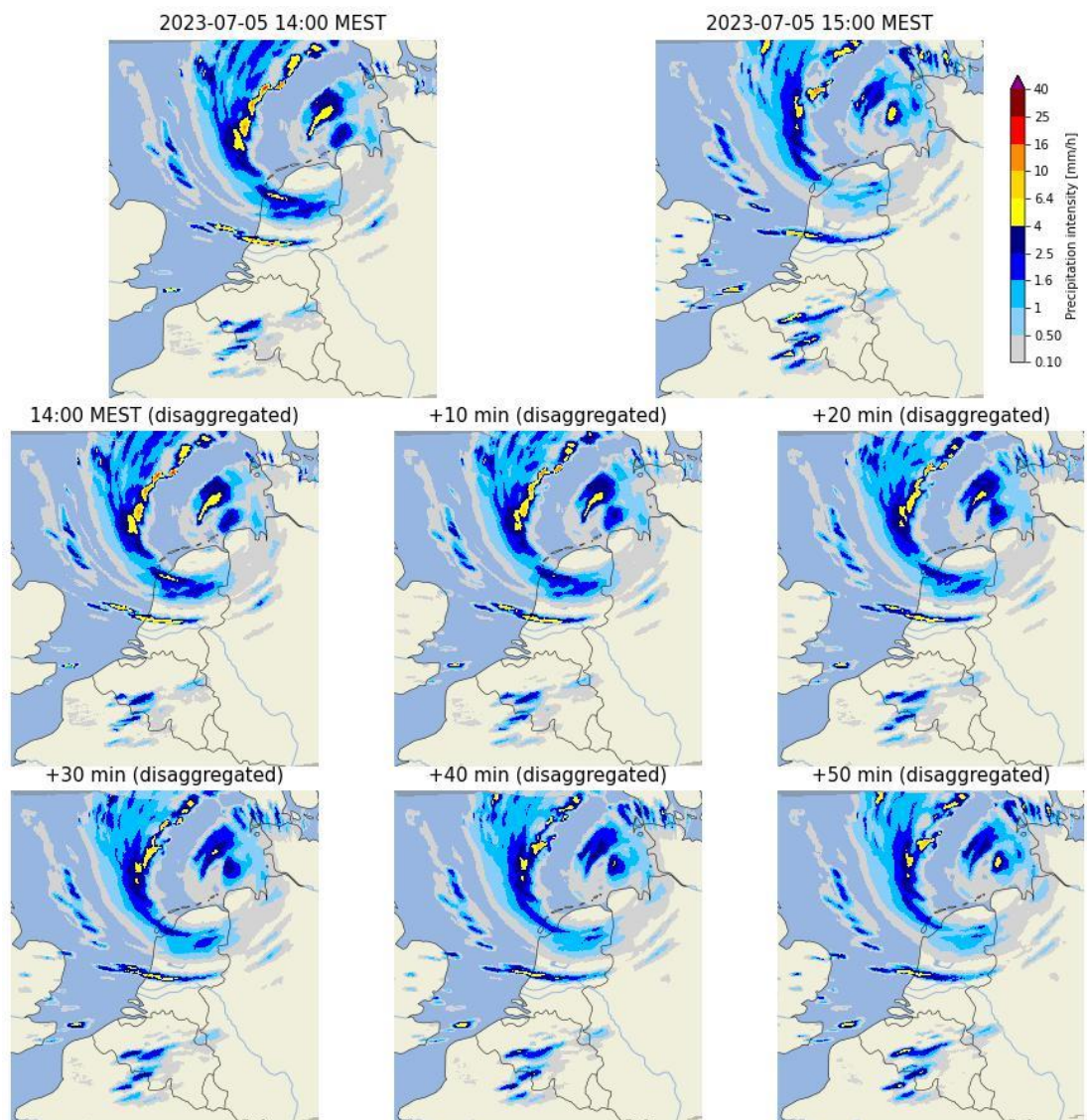
- De gewichten van de drie componenten (radarnowcast, NWP en de stochastische perturbatie) voor de  $t_0$  van de verwachting wordt gebaseerd op de huidige kwaliteit (gemeten als Pearson correlatie) van de verwachtingen ten opzichte van de meest recente radarobservaties. Aangezien de radarnowcast al met de meest recente radarobservaties wordt gemaakt, wordt een radarnowcast gecreëerd over de afgelopen tijdstappen (meestal de afgelopen 3 radarbeelden, exclusief de meest recente) met de oudste tijdstap als startpunt. Hoe dichter die radarnowcast bij de laatste radarobservatie zit (dus voor de meeste recente tijdstap die geen onderdeel uitmaakte van de radarnowcast), hoe hoger de correlatie en dus hoe hoger het gewicht. De startgewichten voor de drie componenten worden vervolgens uit deze correlaties berekend met vergelijking 10 – 12 in Imhoff et al. (2023), waarbij het gewicht van de stochastische perturbatie het residu is van de radarnowcast en NWP-gewichten.
- Ook gedurende de verwachting veranderen de gewichten met toenemende looptijd (*lead time* in het Engels). Waar dit bij een lineaire blending met een lineaire toe- of afname op vooraf vastgezette tijden plaatsvindt, gebeurt dit in de STEPS blendingprocedure a.d.h.v. de ‘klimatologie’ van de NWP. Deze klimatologie is de gemiddelde kwaliteit, dat wil zeggen de Pearson correlatie, van het NWP-product over de afgelopen  $t$  dagen. Aan de hand van het onderzoek in Imhoff et al. (2023) hebben we dit venster op drie dagen gezet. Kortom, hoe hoog of laag de kwaliteit van het NWP-product over de afgelopen drie dagen was, bepaalt hoe hoog/laag de gewichten voor de drie componenten uiteindelijk worden gedurende de verwachting. De looptijd waarop deze transitie plaatsvindt, is ook flexibel en is gebaseerd op het verschil in kwaliteit tussen de radarnowcast en NWP op  $t_0$ . Als dit verschil groot is, dat wil zeggen dat de radarnowcast een veel hogere correlatie heeft dan de NWP, dan zal de overgang later plaatsvinden en het tegenovergestelde bij een klein verschil.

Nadat de gewichten bepaald zijn voor alle drie componenten, kunnen ze gecombineerd worden voor de ruimtelijke schaal. Zodra dit voor alle ruimtelijke schalen (zeven in de huidige implementatie) heeft plaatsgevonden, kunnen de ruimtelijke schalen weer samengevoegd worden tot één verwachting. Vervolgens vindt er een advection plaats van de neerslagvelden (de beweegrichting van de neerslag over tijd), door een geblende versie van de advectionvelden van de radarnowcast en NWP te gebruiken (met dezelfde gewichten als hierboven beschreven). Dit is in het kort hoe de STEPS blendingmethode de producten zowel in de ruimte als de tijd combineert.

## 2.2 Toepassing van de methode voor Nederland

De implementatie van de STEPS blendingmethode, zoals beschikbaar in pysteps, voor Nederland vraagt om een aantal extra stappen om ervoor te zorgen dat de methode toepasbaar is voor het beschikbare NWP-product en berekend kan worden binnen Delft-FEWS in zo'n vijf tot tien minuten rekentijd. Deze stappen zijn hieronder beschreven.

### 2.2.1 Disaggregatie Harmonie naar fijnere tijdstap



Figuur 2-2: Een voorbeeld van de disaggregatie van de Harmonie-verwachting voor 5 juli 2023 (14:00 uur MEST) van een uurlijkse naar een 10-min tijdstap.

Het Nederlandse NWP-product (Harmonie) wordt door het KNMI op een uurlijkse tijdstap uitgegeven. Om een blending op 10- of 15-min tijdstap mogelijk te maken, moet een disaggregatie plaatsvinden naar een fijnere tijdstap. Deze disaggregatie moet ook de beweegrichting van de neerslag meenemen, om de blending over de tijd zo optimaal mogelijk te laten plaatsvinden. Voor de disaggregatie is een zogenaamde advectioncorrectie binnen pysteps gebruikt welke de beweegrichting van de neerslag meeneemt in de disaggregatie en het neerslagvolume verder evenredig verdeelt over de fijnere tijdstappen. Zie Figuur 2-2 voor een voorbeeld hiervan voor storm Poly op 5 juli 2023.

### 2.2.2 Samenwerking met Belgisch KMI voor versnelling code

Samen met het Belgische KMI, die gelijktijdig bezig zijn geweest om de blending voor België operationeel te maken, is gewerkt aan verbeteringen en versnelling van de blendingcode binnen pysteps. De volgende aanpassingen zijn doorgevoerd om de blending verder te verbeteren en te versnellen:

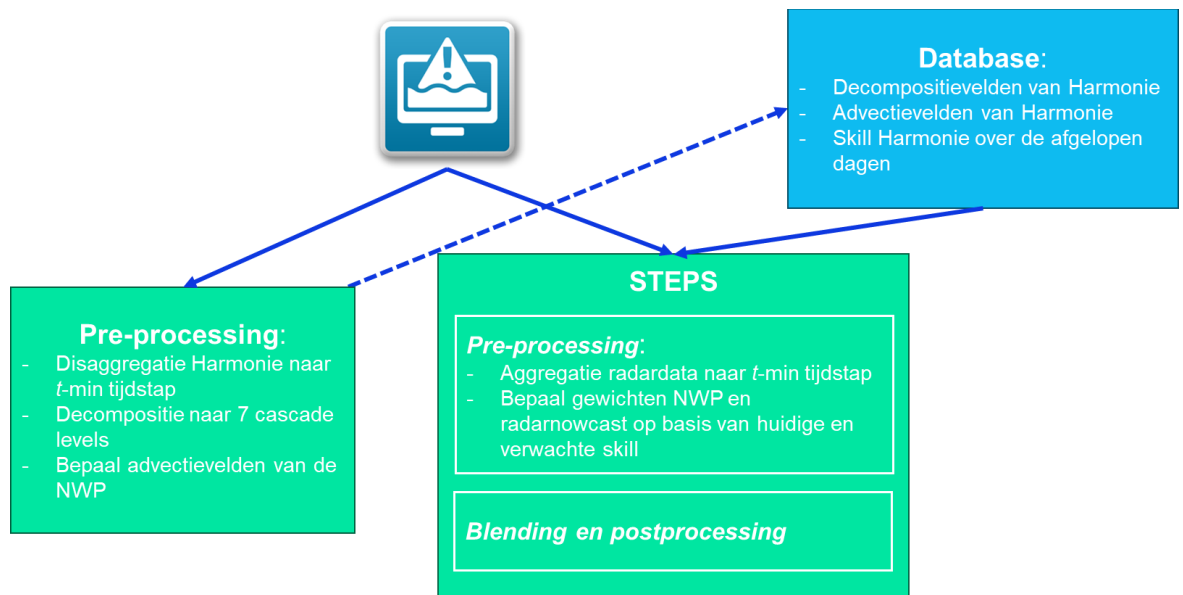
- De blendingcode werkt nu ook wanneer het in één of beide producten niet regent.
- De ruimtelijke schalen (de zogenaamde cascades) worden nu opnieuw genormaliseerd na iedere tijdstap, wat voor verbeteren in de ruis (de stochastische perturbaties) zorgt.
- De Python-bibliotheek xarray is toegepast om de preprocessing van de NWP-verwachtingen (enorm) te versnellen.
- De advection van de neerslagvelden van tijdstap naar de volgende tijdstap is versneld door deze efficiënter over alle ruimtelijke schalen te berekenen.
- Het aantal ruimtelijke schalen is gereduceerd van acht naar zeven. Dit scheelt opslag en rekentijd. De initiële acht ruimtelijke schalen waren gebaseerd op onderzoek in het Verenigd Koninkrijk en Australië, maar op de schaalgrootte van Nederland en België bleek de achtste schaal niets meer toe te voegen.

De toepassing van al deze verbeteringen had een redelijke versnelling van de code als gevolg, zoals getoond in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Draaitijden van de STEPS blendingprocedure binnen pysteps op 2 computercores, en met een 10-min tijdstap en een looptijd van 12 uur.

	Harmonie preprocessing (eens per 6 uur)	STEPS blending deterministisch	STEPS blending 10 ensemble members
	(minuten)		
<b>Origineel uit Imhoff et al. (2023)</b>	31,0	10,3	34,2
<b>Na implementatie xarray voor de preprocessing</b>	7,2	8,0	28,5
<b>Na versnelling advection</b>	7,2	3,6	13,9
<b>Na reductie tot 7 ruimtelijke schalen</b>	7,0	3,4	12,2

## 2.3 Implementatie in Delft-FEWS



Figuur 2-3: Schematisch overzicht van de blendingimplementatie als module in Delft-FEWS.

De STEPS-implementatie in pysteps, inclusief eerder genoemde verbeteringen, is als externe module toegevoegd aan Delft-FEWS. Delft-FEWS berekent de blending vervolgens in een aantal stappen (zie ook Figuur 2-3):

- 1 Telkens als er een nieuwe Harmonie-verwachting binnenkomt, over het algemeen is dat eens per zes uur, vindt er een disaggregatie van de Harmonie-verwachting naar de  $t$ -min tijdstap (10- en 15-min in dit onderzoek) plaats. Vervolgens wordt uit het resulterende product de advectionvelden van de verwachting per tijdstap berekend en opgeslagen en vindt er een decompositie plaats van de Harmonie-verwachting naar zeven ruimtelijke schalen.
- 2 De resultaten uit stap 1) worden opgeslagen in een aparte folder (de “database”) en kunnen worden hergebruikt voor iedere nieuwe geblende verwachting, totdat er weer een nieuwe Harmonie-verwachting beschikbaar is. Daarnaast worden in deze database de correlatie (de kwaliteit / skill) van de Harmonie-verwachting opgeslagen voor de huidige tijdstap en voor de afgelopen drie dagen. Deze informatie wordt daarna in stap 3) gebruikt voor het bepalen van de blendinggewichten over tijd.
- 3 De STEPS blendingprocedure, zoals beschreven in paragraaf 2.1, vindt plaats en de resultaten kunnen direct door FEWS geïmporteerd worden.

Aanvullend op deze procedure zijn de reeds bestaand radar nowcast implementaties geactualiseerd naar de laatste pysteps implementatie. Op deze manier is er één versie van pysteps (als library in python) in gebruik.

## 2.4 Aanpak validatie van de implementatie

Om de bovenstaande aanpak te testen, hebben we de blendingaanpak voor de periode 15 juli tot en met 15 augustus eens per uur gedraaid met een looptijd van 18 uur en vergeleken met de observaties, radarnowcast en Harmonie. Twee verificatiestatistieken zijn hiervoor gebruikt; de root mean square error (RMSE) en de critical success index (CSI). De RMSE wordt berekend als:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2}{N}},$$

waarin  $N$  is het aantal gridcellen in het domein,  $f_i$  de verwachting voor gridcel  $i$  en  $o_i$  de observatie voor gridcel  $i$ . De CSI-score wordt berekend voor een gegeven drempelwaarde (bijvoorbeeld de neerslag wordt meer dan  $5.0 \text{ mm h}^{-1}$ ) als:

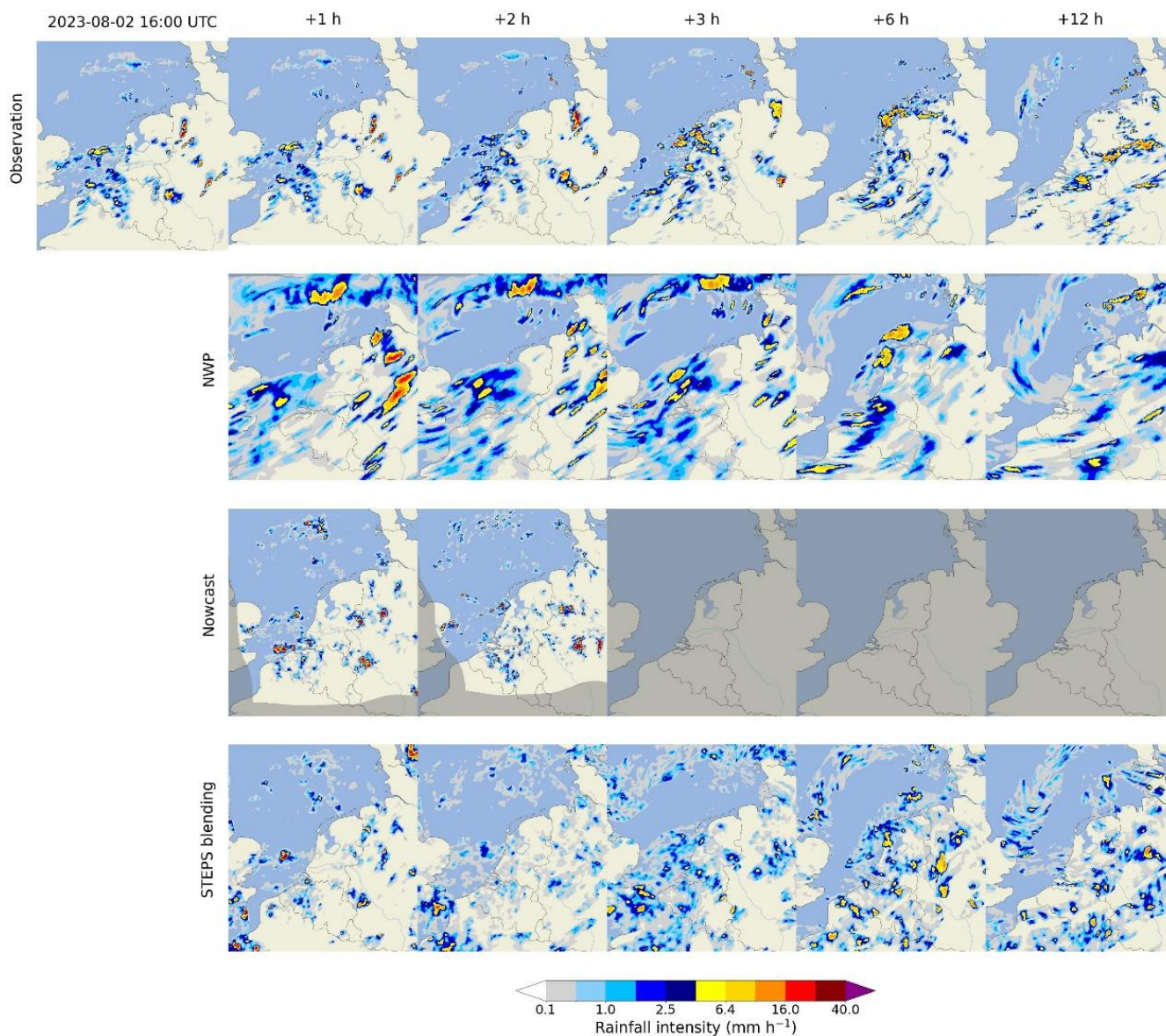
$$CSI = \frac{H}{H+M+FP},$$

waarin  $H$  de hits zijn (de verwachting en de observatie zijn boven de drempelwaarde),  $M$  de misses (de verwachting is onder de drempelwaarde, maar de observatie erboven) en  $FP$  de false positives (de verwachting is boven de drempelwaarde, maar de observatie niet).

### 3 Validatie van de resultaten over een zomermaand

Ter illustratie toont Figuur 3-1 een verwachting voor één tijdsopname, namelijk de verwachting die gemaakt is op 2 augustus 2023 om 18:00 lokale tijd. Dit was een dag met veel lokale buien, welke vaak lastig goed te verwachten zijn.

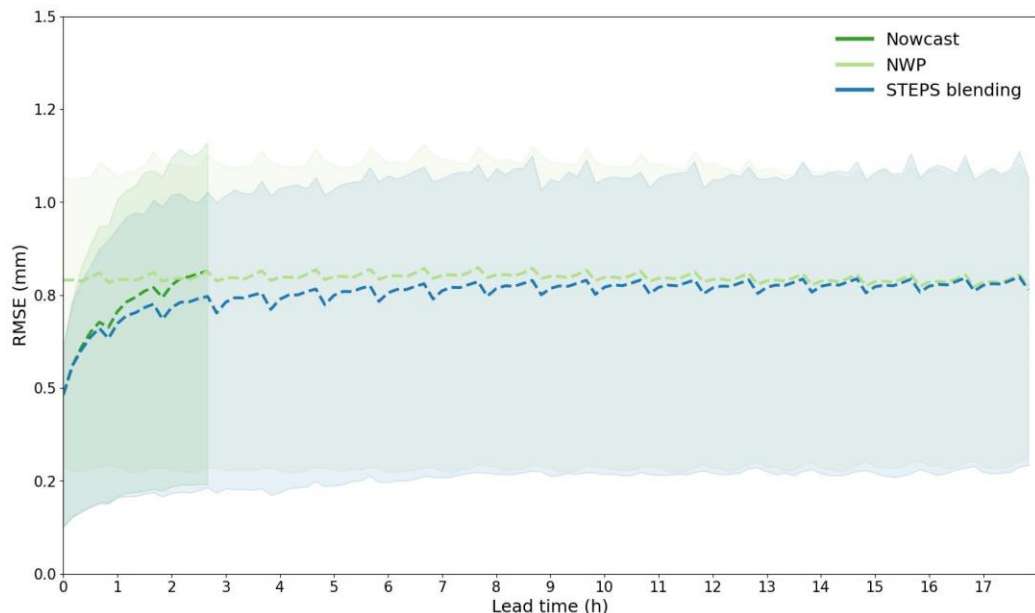
Merk op dat in de gehele analyse is gebruik gemaakt van de gedisaggregeerde Harmonieverwachting. Er is dus geen vergelijking met het uurlijkse Harmonie product dat momenteel operationeel wordt gebruikt waardoor in de analyse de verbetering door deze stap niet expliciet wordt gemaakt.



*Figuur 3-1: Voorbeeld van een verwachting voor één tijdsopname (2 augustus 2023 om 18:00 MEST). Getoond zijn de radarobservaties, de Harmonie-verwachting (NWP), de radarnowcast (welke maar tot 3 uur vooruit berekend wordt) en de geblende verwachting.*

Voor het eerste uur is de Harmonie-verwachting duidelijk minder accuraat dan de radarobservatie-gebaseerde nowcasts en STEPS blending methode. Met toenemende tijd verliest de radarnowcast kwaliteit (de verwachting stopt ook na drie uur), terwijl Harmonie op grotere schaal vrij dicht bij de observaties ligt, maar de fijne structuur en exacte locatie van lokale buien mist. De STEPS blending methode neemt deze grootschalige locaties over van de Harmonie-verwachting met toenemende looptijd, dit is bijvoorbeeld duidelijk te zien voor +3h en verder, maar behoudt wel de lokale structuur van de buien zoals dit in de radardata en -nowcast beschikbaar is. In de volgende paragrafen zullen we dieper ingaan op de statistiek van de verschillende verwachtingen voor de volledige zomermaand die getest is.

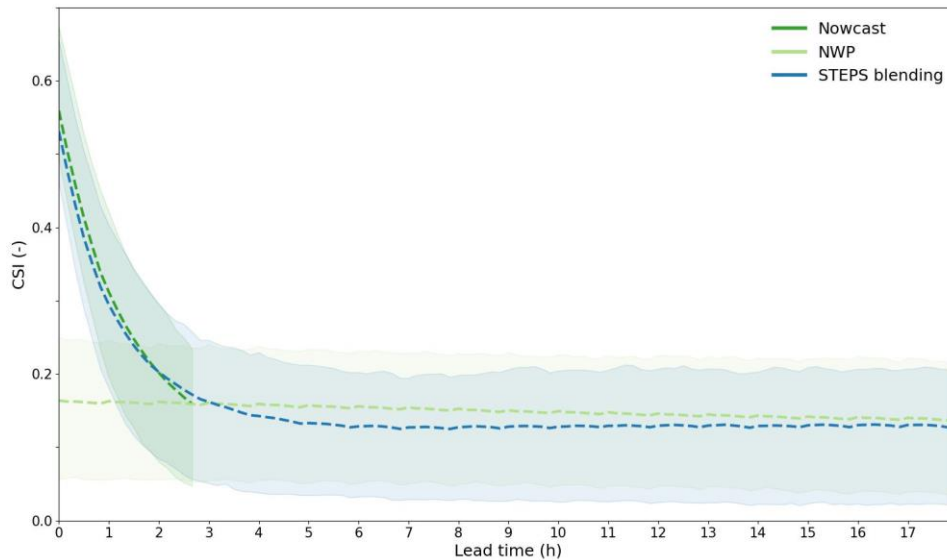
### 3.1 Validatie voor het gehele radardomein



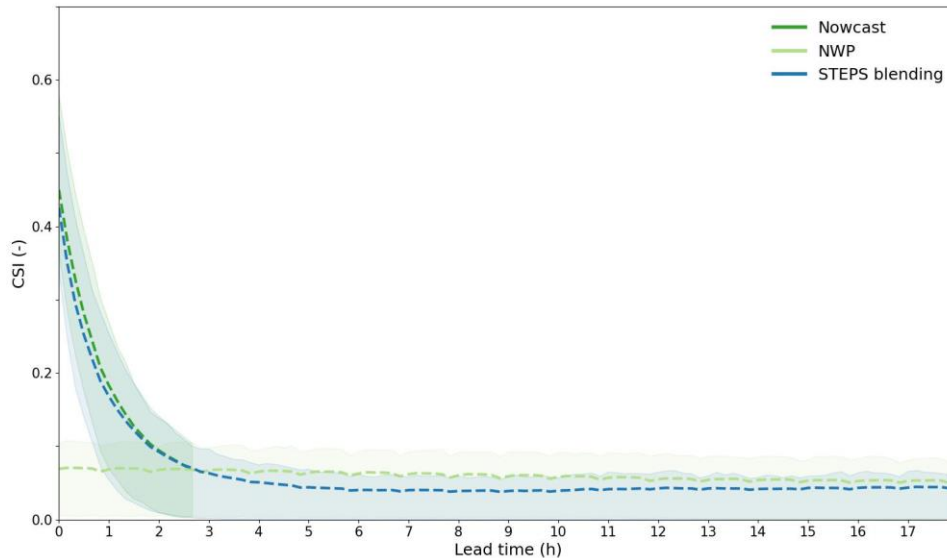
Figuur 3-2: Root-mean square error op een 10-min tijdstap voor de geteste methoden. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde RMSE per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de RMSE-scores per verwachting. Figuur A-1 in de appendix toont de analyse op een 15-min tijdstap.

Figuur 3-2 toont de gemiddelde RMSE voor de drie geteste methoden ten opzichte van het KNMI rfcor-product (de final reanalysis van het radarproduct). De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand (0-25, 25-5-, 50-75 en 75-100%) van de RMSE-scores per verwachting. In appendix B worden dezelfde analyses met het rtor (het operationele radarproduct, *realtime corrected*) getoond, waarbij de relatieve verschillen tussen de producten nagenoeg gelijk blijft. Omdat de radarnowcast en de geblende nowcast met het rtor product zijn gemaakt, geeft dit een goede indicatie van de fout die ontstaat door het radarproduct en de fout in de verwachting. In Figuur 3-2 is duidelijk te zien dat Harmonie (“NWP” in de figuren) met een hogere fout start dan de radarnowcast en de geblende verwachting. Dit heeft te maken met de betere initialisatie van de radarnowcast en blending, omdat de meest recente observaties hierin worden meegenomen. De Harmonie-verwachting behoudt een vrijwel constante fout, wat typisch is voor een NWP-verwachting. De radarnowcast daarentegen heeft een toenemende fout voor langere looptijden en heeft gemiddeld na een ruime twee uur geen kleinere fout meer in de verwachting dan Harmonie. De STEPS blendingmethode laat zien dat het optimaal gebruik maakt van de radarnowcast voor de eerste uren van de verwachtingen en behoudt daarna een lagere fout dan de andere methoden door een optimale combinatie van de informatie in Harmonie en de radarnowcast.

We zien een vergelijkbaar beeld in Figuren 3-3 en 3-4 waar de CSI is getoond voor een drempelwaarde van  $0.1 \text{ mm h}^{-1}$  (de zogenaamde regen – geen regen drempelwaarde) en een drempelwaarde van  $5.0 \text{ mm h}^{-1}$ , welke hogere neerslagintensiteiten representeert. Echter, de CSI geeft niet het beeld dat de STEPS blending continu beter is dan de andere methoden, maar de methode volgt in ieder geval de best presterende methode (radar nowcast voor de eerste uren en daarna Harmonie) gedurende de verwachtingen. Tussen de drempelwaardes van  $0.1$  en  $5.0 \text{ mm h}^{-1}$  zit vooral het verschil dat de CSI voor alle methoden lager is voor de hogere drempelwaarde van  $5.0 \text{ mm h}^{-1}$ . Dit wordt veroorzaakt door de lagere voorspelbaarheid van neerslag met hoge intensiteit (vaak lokale buien), wat geldt voor alle geteste methoden. De relatieve verschillen tussen de methoden blijven echter hetzelfde voor de geteste drempelwaardes.



*Figuur 3-3: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van  $0.1 \text{ mm h}^{-1}$  voor de geteste methoden. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde CSI per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de CSI-scores per verwachting. Figuur A-2 in de appendix toont de analyse op een 15-min tijdstap.*



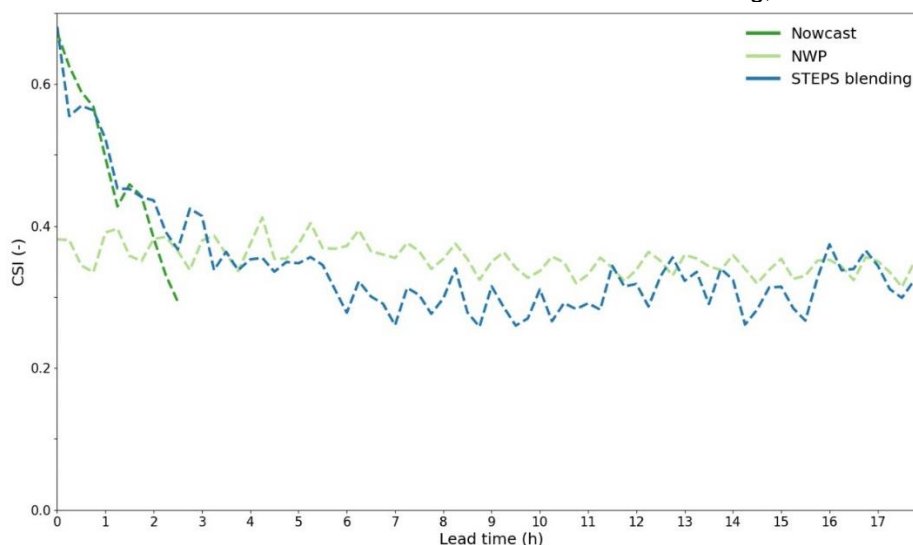
*Figuur 3-4: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van  $5.0 \text{ mm h}^{-1}$  voor de geteste methoden. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde CSI per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de CSI-scores per verwachting. Figuur A-3 in de appendix toont de analyse op een 15-min tijdstap.*



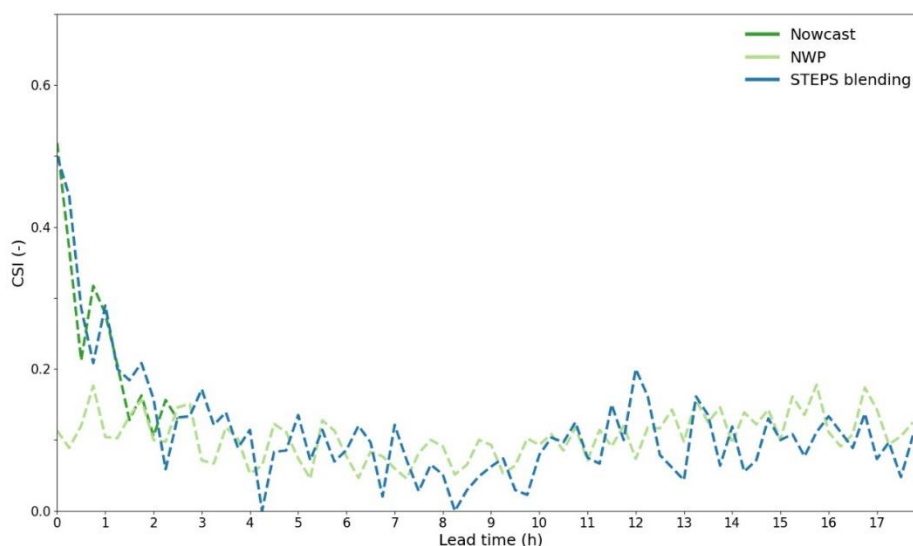
## 3.2 Validatie op de lokale schaal

### 3.2.1 Validatie voor de Gouwepolder

De CSI-scores blijven voor de Gouwepolder vergelijkbaar met de scores die we voor het volledige domein vinden (Figuren 3-5 en 3-6). De lijnen in beide grafieken zijn minder vloeiend, omdat op deze kleine schaal na een maand nog niet genoeg datapunten met neerslag boven de drempelwaarde zijn om tot goede statistiek te komen. Een verschil ten opzichte van de analyse voor het volledige domein is dat de radarnowcast zijn kwaliteit snel verliest met toenemende looptijd voor hogere neerslagintensiteiten en vaak al na 1,5 tot 2 uur een lagere CSI heeft dan Harmonie en STEPS blending, terwijl dit voor het volledige domein pas na 2 tot 2,5 uur plaatsvindt. Een reden hiervoor is dat de Gouwepolder in het westen van Nederland ligt. Met de heersende windrichting in Nederland en ten tijde van deze analyse, namelijk zuidwest, komt de bovenwindse informatie in de nowcast vanaf zee. De radarbedekking en -kwaliteit boven zee zijn een stuk minder dan boven land en dit kan de mindere kwaliteit van de radarnowcast dus verklaren. Een mindere kwaliteit van de radarnowcast uit zich ook in de kwaliteit van de STEPS blending, alhoewel in minder mate.



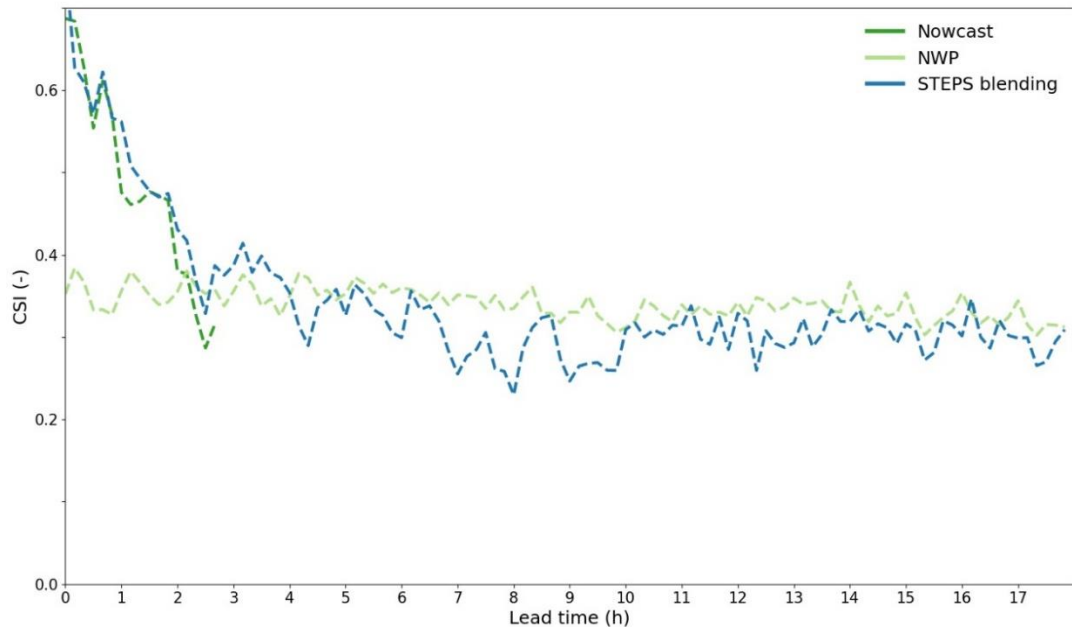
Figuur 3-5: Critical succes index op een 15-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 0.1 mm h-1 voor de geteste methoden voor de gridcellen binnen het gebied van de Gouwepolder.



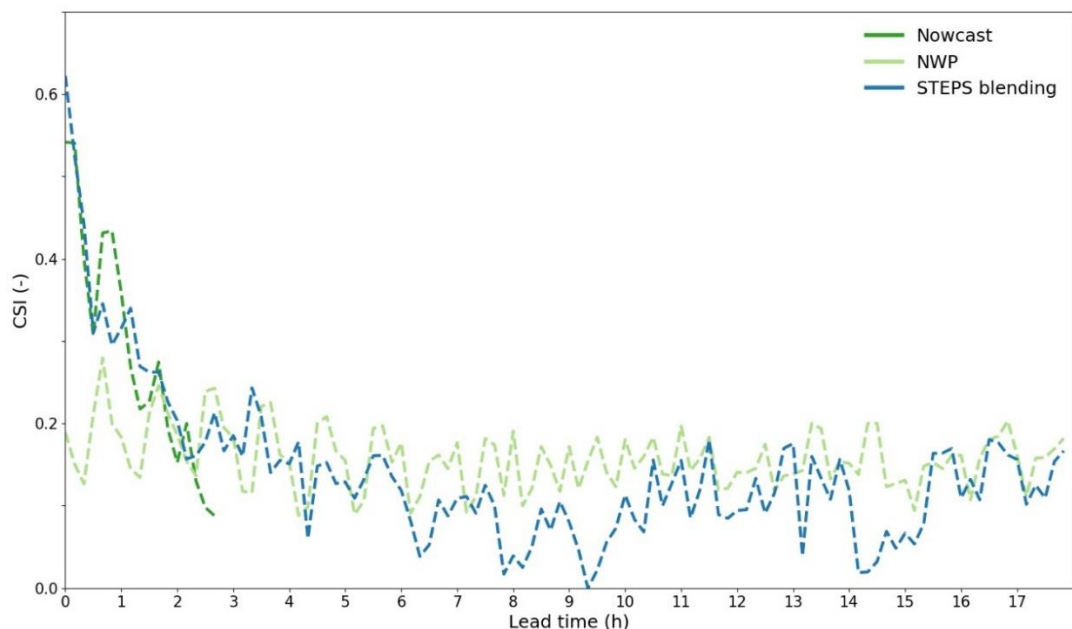
Figuur 3-6: Critical succes index op een 15-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 5.0 mm h-1 voor de geteste methoden voor de gridcellen binnen het gebied van de Gouwepolder.

### 3.2.2 Validatie voor een gridcel boven de locatie Winsum

Voor de locatie Winsum zien we eenzelfde effect als voor de Gouwepolder, maar hier is het locatie-effect op de radarnowcast en daarmee in minder mate op de blending juist andersom. Winsum ligt vrij ver benedenwinds voor de heersende windrichting wat extra bovenwindse informatie oplevert. Dit kan voordelig zijn en dat is ook te zien in zowel de hogere startwaarden van de CSI-score voor de radarnowcast en de blending, en het kruispunt waar de CSI van de nowcast lager wordt dan die van Harmonie ligt op een latere looptijd (gemiddeld tussen de 2 en 2,5 uur).



Figuur 3-7: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 0.1 mm h-1 voor de geteste methoden voor een gridcel boven de locatie Winsum.



Figuur 3-8: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 5.0 mm h-1 voor de geteste methoden voor een gridcel boven de locatie Winsum.

## 4 Conclusie en aanbevelingen

### 4.1 Antwoorden op de onderzoeksvragen

In dit onderzoek hebben we de STEPS blendingmethode toegepast om radarnowcasts van de KNMI weerradars te combineren met Harmonie (het numerieke weermodel van KNMI). De blendingmethode is onderdeel van het open-source nowcastingplatform pysteps. Na een aantal aanpassingen, waaronder het mogelijk maken van een dynamische disaggregatie van de tijdstap van de Harmonie-verwachting van één uur naar  $t$  minuten (hetgeen in feite een prettige bijvangst was) en het versnellen en verbeteren van de pysteps software in samenwerking met het Belgische KMI, hebben we de code geoperationaliseerd in Delft-FEWS en getest voor een volledige, regenachtige zomermaand (15 juli tot en met 15 augustus 2023). Vier onderzoeksvragen stonden centraal binnen dit onderzoek:

- Hoe ver in de toekomst kunnen we vooruit rekenen met de blendingmethode, gegeven een gewenste rekentijd van 5 minuten?
- Hoe is de performance/skill ten opzichte van het Harmonie- en nowcastingproduct?
- In hoeverre is de STEPS blendingmethode betere dan een simpele lineaire blending, zowel in rekentijd als resultaat?
- Welke omvang van een ensemble is haalbaar, en hoe verhoudt die zich tot een deterministische berekening?

Gegeven een looptijd van de geblende verwachting van 12 uur en een 10-min tijdstap, zijn de rekentijden gemiddeld 3,4 minuten voor een deterministische run en 12,3 minuten voor een ensembleverwachting met 10 members. De pre-processing duurt circa 10 minuten en gebeurt enkel wanneer een nieuwe Harmonie-verwachting beschikbaar is (typisch eens per zes uur via WIWB en eens per drie uur in het systeem van Rijkswaterstaat). In de testfase hebben we de STEPS blending in Delft-FEWS deterministisch gedraaid met een looptijd van 18 uur, wat een draaitijd van rond de 5 minuten opleverde (iets minder voor een 15-min tijdstap en iets meer voor een 10-min tijdstap). Dit betekent dat afhankelijk van het aantal beschikbare computercores een looptijd van 12 uur zeker en 18 uur meestal haalbaar is voor een deterministische geblende verwachting. Voor een ensemble blending is meer computerkracht nodig en is een looptijd van maximaal 12 uur met 10 ensemble members haalbaar wanneer de blending bijvoorbeeld iedere 15 minuten moet worden gecreëerd. Dit betekent dat een groter ensemble of een langere looptijd nog niet haalbaar zijn voor de meeste (standaard) computersystemen met de huidige draaitijden, maar een kleine ensemblegrootte met een looptijd van 12 uur of minder is mogelijk.

De resultaten van dit onderzoek laten zien dat de STEPS blendingmethode een goede combinatie weet te maken tussen de radarnowcast en Harmonie. Afhankelijk van de statistische score waar naar gekeken wordt, is de blending beter of vrijwel even goed als het best presenterende product (de radarnowcast of Harmonie) voor de geteste looptijden. Een consistent resultaat is dat de STEPS blending de nowcastkwaliteit goed weet te volgen gedurende de eerste 1 à 2 uur van de verwachting (de nowcast had een lagere fout dan Harmonie gedurende de eerste 2 – 2,5 uur in dit onderzoek), waarna het langzaam overgaat in de Harmonieverwachting, terwijl het middels de informatie van de radarnowcast en de stochastische perturbaties in STEPS wel de lokale buienstructuren en extremen weet te behouden. Hierbij moet nog vermeld worden dat de analyse in dit rapport is gedaan over het volledige IRC radardomein van het KNMI, waarbij dus ook data van mindere kwaliteit boven zee is meegenomen. We verwachten dat de werkelijke kwaliteit boven enkel het landoppervlak van Nederland gemiddeld beter is dan over het hele domein, wat ten gunste zou komen aan de kwaliteit van het radarnowcast en de STEPS blending.

Een belangrijke reden om voor een dynamische blendingmethode zoals STEPS te gaan, is dat het rekening houdt met de huidige kwaliteit van beide producten (de radarnowcast en Harmonie) om de blendinggewichten te berekenen. Daarnaast houdt het ook rekening met de kwaliteit van de producten in de ruimte, aangezien neerslagvelden op verschillende plaatsen kunnen liggen en het numerieke weermodel vaak het beste presteert op een grotere schaal, terwijl de lokale buien veelal gemist worden. Een vergelijking tussen de STEPS blending en een eenvoudige, lineaire blending voor 4 neerslaggebeurtenissen is beschikbaar in Figuur C-1 in Appendix C en laat zien dat de STEPS blending consistent een lagere fout geeft in de neerslagverwachtingen.

## 4.2 Toekomstige verbeteringen aan het blendingalgoritme

Het feit dat de STEPS blendingmethode sinds 2022 onderdeel is van het open-source nowcastingplatform pysteps zorgt ervoor dat het steeds verder ontwikkeld wordt en dus ook continu zou moeten verbeteren. Een aantal verbeteringen staan nog op de agenda en zullen waarschijnlijk dus in het komende jaar of de komende jaren beschikbaar moeten worden. Het gaat hierbij om:

- Het verbeteren van de blendinggewichten. Deze kunnen nu op twee manieren berekend worden, namelijk met de methode in Bowler et al. (2006) en de methode in Seed et al. (2013), waarbij de Bowler et al. (2006) methode wordt gebruikt in de hier beschreven implementatie. Deze analyse en ook het onderzoek in Imhoff et al. (2023) laten zien dat de blending soms nog iets te veel gewicht geeft aan ofwel de radarnowcast of de stochastische perturbatiecomponenten, en dus iets te weinig aan het numerieke weermodel voor langere looptijden. Een verbetering zou zijn om de gewichten ruimtelijke toe te passen, in plaats van uniform per ruimtelijke schaal. Dit zou een nog betere ruimtelijke blending moeten opleveren, maar gaat wel ten koste van de rekentijd. Een interessante optie hiervoor is de zogenaamde *reduced-space ensemble Kalman filter* aanpak in de publicatie bij Nerini et al. (2019), waarin deze ruimtelijke component beter wordt meegenomen en de ensemble Kalman filteraanpak uit de data-assimilatiewereld wordt toegepast. Gezien het feit dat blending uit de Bayesiaanse leer komt (een optimale combinatie van twee of meer niet perfecte producten zorgt voor een beter eindproduct), is een Kalman-filter aanpak, welke hier ook uit voortkomt, een goede optie.
- De postprocessing van de geblende verwachting, waarin ervoor wordt gezorgd dat perturbaties enkel in de buurt van bestaande neerslagvelden kunnen plaatsvinden en waarin de cumulatieve distributie van de neerslag wordt gekoppeld aan de meest recente observaties (dit zorgt ervoor dat er niet enorm veel neerslag bijkomt of verdwijnt), heeft nog als verbeterpunt dat het aan de randen van de neerslaggebieden wat harde grenzen kan geven voor langere looptijden. Statistisch is dit niet een probleem, maar visueel ziet het er niet altijd realistisch uit.

## 4.3 Aanbevelingen

In dit onderzoek is een volledige zomermaand aan verwachtingen geanalyseerd en vergeleken met de radarnowcast en Harmonie-verwachtingen. Gezien de hoeveelheid neerslag die is gevallen in de zomer van 2023 en het feit dat de meeste neerslag typische zomerse buien waren, is dit een goede stresstest geweest voor de geteste methoden, aangezien dit over het algemeen de moeilijkste omstandigheden zijn voor goede neerslagverwachtingen. Het is echter aan te raden om in een later stadium ook nog een wintermaand te testen. De typische winterse stratiforme neerslag heeft een hogere voorspelbaarheid en wordt beter opgepakt door zowel de radarnowcast als Harmonie. Het is goed om ook in deze situatie na te gaan wat de relatieve verschillen tussen de radarnowcast en Harmonie zijn en in welke mate de blending hier tot betere verwachtingen kan leiden.

De vergelijking met de Harmonieverwachtingen is uitgevoerd op basis van het gedisaggregeerde product en niet op de oorspronkelijke uurwaarden. Het zou nog wel interessant zijn om die naast elkaar te leggen en te expliciet kwantificeren wat deze stap al aan verbetering biedt.

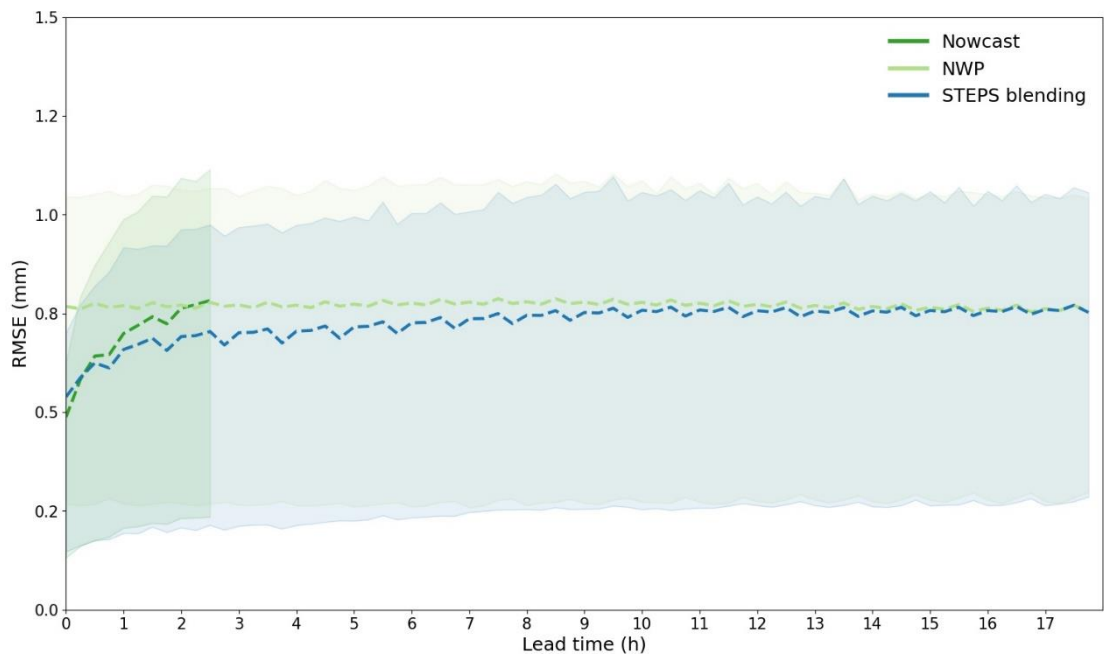
Als laatste zijn de meeste analyses in dit onderzoek gedaan met de deterministische verwachtingen van zowel de radarnowcast als de geblende nowcast. Dit maakt een vergelijking met Harmonie, dat ook deterministisch is, eerlijk en daarnaast heeft het de rekentijden en hoeveelheid rekenwerk ook flink gereduceerd. Het STEPS-principe is er echter op gebaseerd dat met een nowcast en blending ook onzekerheid gepaard gaat. In STEPS wordt deze onzekerheid deels meegenomen door de creatie van een ensemble met stochastische perturbaties van de verwachting. Deze onzekerheid kan enkel goed worden meegenomen en gevisualiseerd wanneer een ensembleverwachting wordt gebruikt. Ondanks de langere draaitijden van het model en het feit dat een volledige ensemble vaak operationeel nog niet hydrologisch wordt meegenomen in Nederland, is het toch aan te raden om de ensemble uit STEPS te gebruiken.

# Referenties

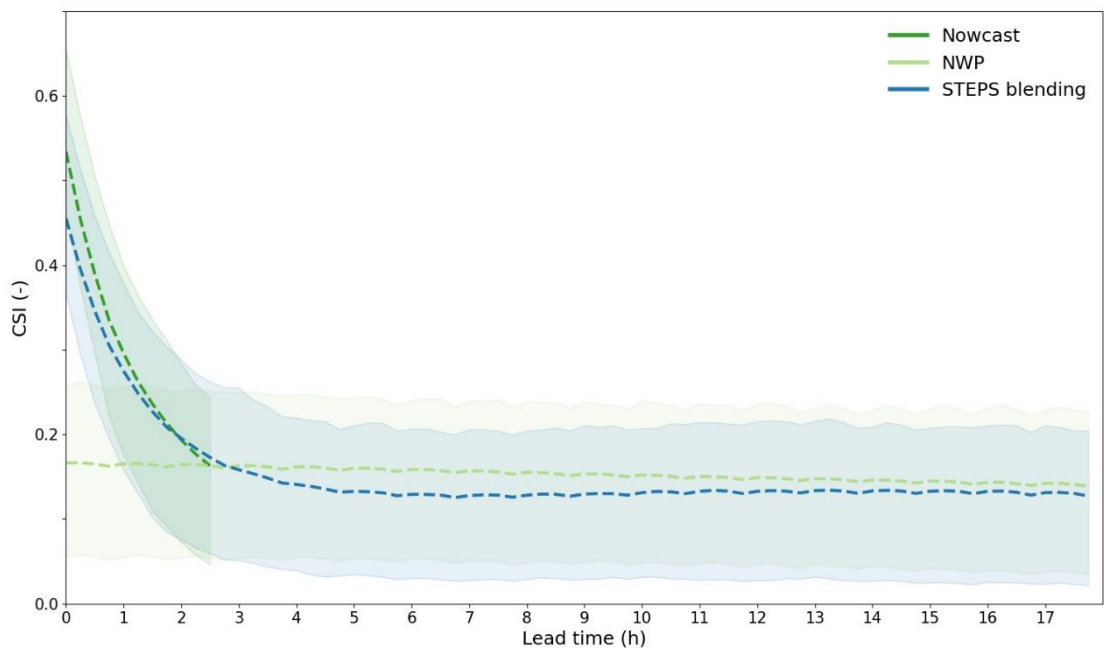
- Berenguer, M.**, Surcel, M., Zawadzki, I., Xue, M., and Kong, F. (2012). The diurnal cycle of precipitation from continental radar mosaics and numerical weather prediction models. Part II: Intercomparison among numerical models and with nowcasting. *Monthly Weather Review*, 140, 2689–2705. doi: /10.1175/MWR-D-11-00181.1
- Bowler, N. E.**, Pierce, C. E., and Seed, A. W. (2006). STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(620), 2127–2155. Doi: 10.1256/qj.04.100
- Imhoff, R. O.**, C. C. Brauer, A. Overeem, A. H. Weerts & R. Uijlenhoet (2020). Spatial and temporal evaluation of radar rainfall nowcasting techniques on 1,533 events. *Water Resources Research*, 56(8), e2019WR026723. doi: 10.1029/2019WR026723
- Imhoff, R. O.**, Brauer, C. C., Van Heeringen, K. J., Uijlenhoet, R., and Weerts, A. H. (2022). Large sample evaluation of radar rainfall nowcasting for flood early warning. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR031591. doi: 10.1029/2021WR031591.
- Imhoff, R. O.**, De Cruz, L., Dewettinck, W., Brauer, C. C., Uijlenhoet, R., van Heeringen, K.-J., Velasco-Forero, C., Nerini, D., Van Ginderachter, M., and Weerts, A. H. (2023). Scale-dependent blending of ensemble rainfall nowcasts and numerical weather prediction in the open-source pysteps library. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1 – 30. doi: 10.1002/qj.4461.
- Lin, C.**, Vasić, S., Kilambi, A., Turner, B., and Zawadzki, I. (2005). Precipitation forecast skill of numerical weather prediction models and radar nowcasts. *Geophysical Research Letters*, 32, L14801. doi: 10.1029/2005GL023451
- Lovejoy, S., and Schertzer, D.** (1995) Multifractals and rain, ed. A. W. Kundzewicz, 62-103. In: *New uncertainty concepts in hydrology and hydrological modelling*, Vol. 61. New York, NY: Cambridge University Press.
- Pierce, C.**, Seed, A., Ballard, S., Simonin, D., and Li, Z. (2012). Nowcasting. In: Bech, J. (Ed.) *Doppler radar observations—Weather radar, wind profiler, ionospheric radar, and other advanced applications*. London, United Kingdom: InTech. URL: <http://www.intechopen.com/books/doppler-radar-observations-weather-radar-wind-profiler-ionospheric-radar-and-other-advanced-applications/nowcasting>.
- Pulkkinen, S.**, Nerini, D., Pérez Hortal, A. A., Velasco-Forero, C., Seed, A., Germann, U., & Foresti, L. (2019). Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12(10), 4185–4219. doi: 10.5194/gmd-12-4185-2019
- Roberts, N. M., and Lean, H. W.** (2008). Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Monthly Weather Review*, 136, 78–97. doi: 10.1175/2007MWR2123.1
- Seed, A. W.**, Pierce, C. E., and Norman, K. (2013). Formulation and evaluation of a scale decomposition-based stochastic precipitation nowcast scheme. *Water Resources Research*, 49, 6624–6641. doi: 10.1002/wrcr.20536

# Appendix

# A Resultaten op een 15-min tijdstap

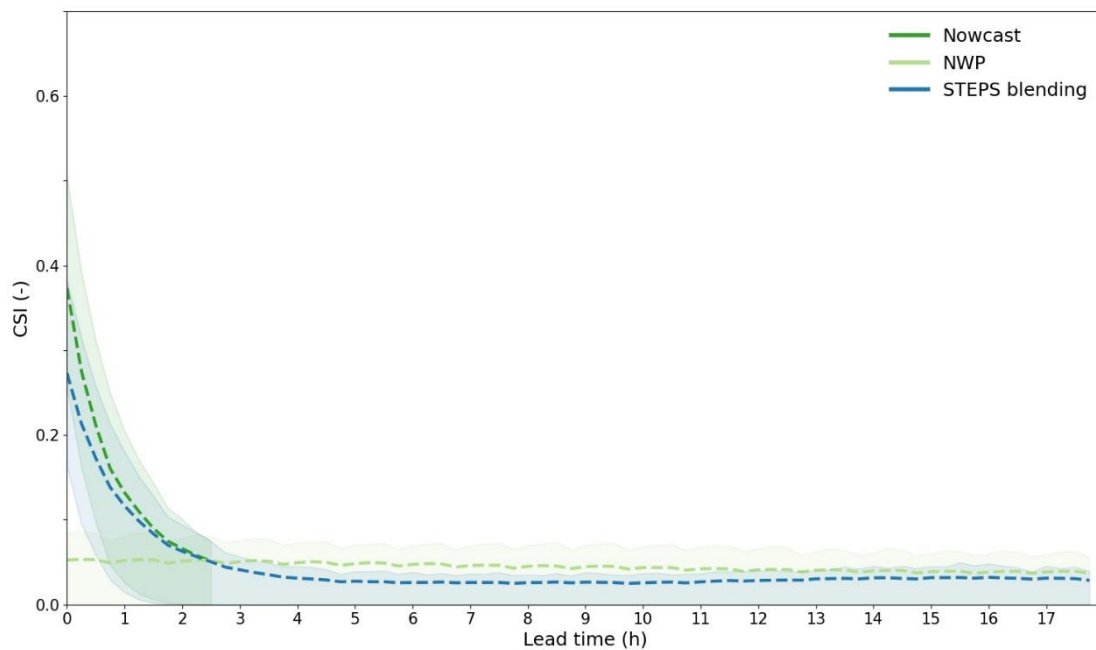


Figuur A-1: Root-mean square error op een 15-min tijdstap voor de geteste methoden. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde RMSE per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de RMSE-scores per verwachting.



Figuur A-2: Critical succes index op een 15-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 0.1 mm h-1 voor de geteste methoden. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde CSI per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de CSI-scores per verwachting.

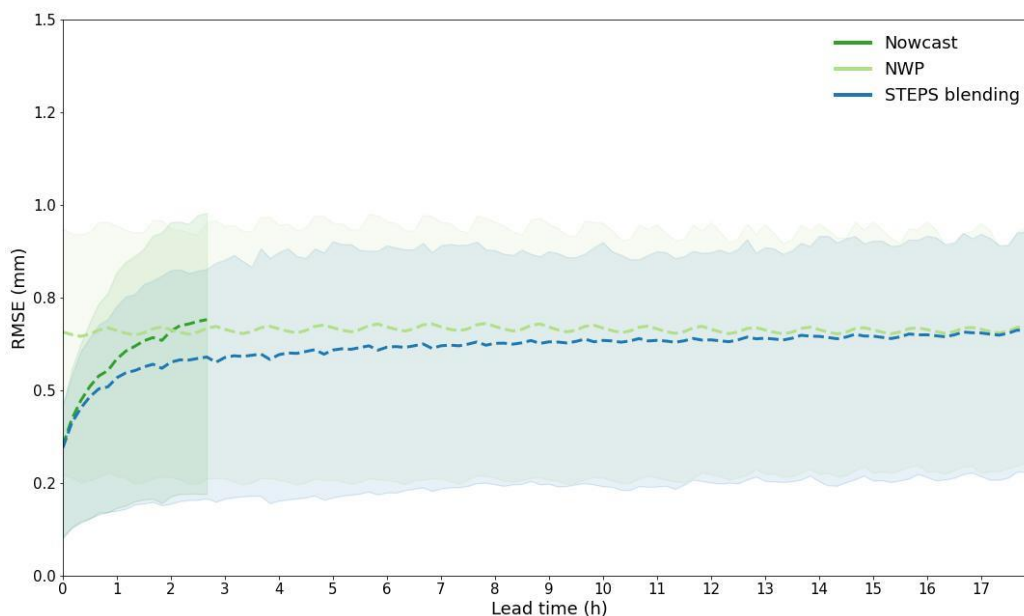




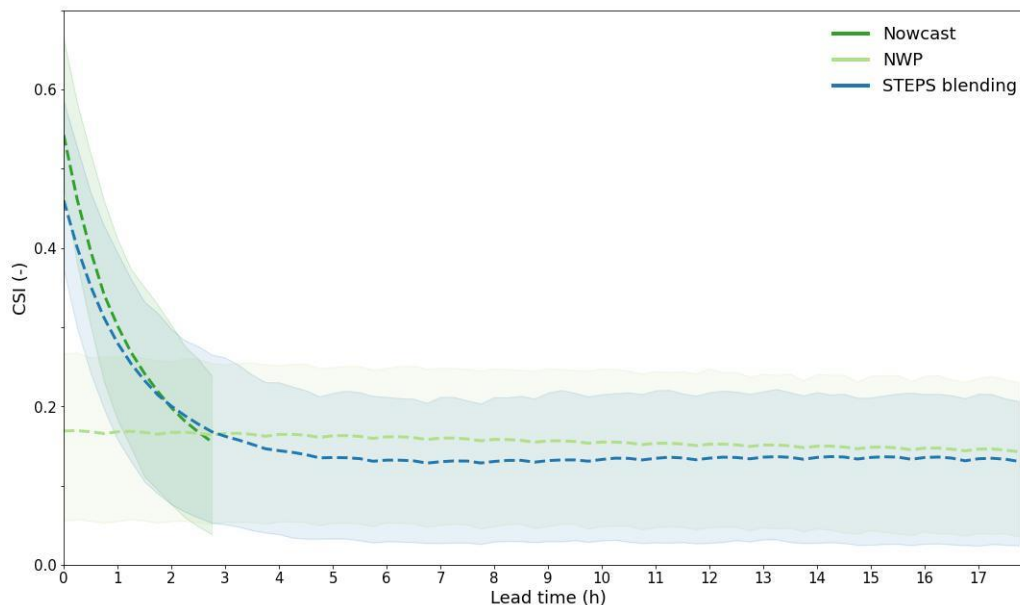
Figuur A-3: Critical succes index op een 15-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 5.0 mm h-1 voor de geteste methoden. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde CSI per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de CSI-scores per verwachting.

## B Vergelijking met het real-time radarproduct

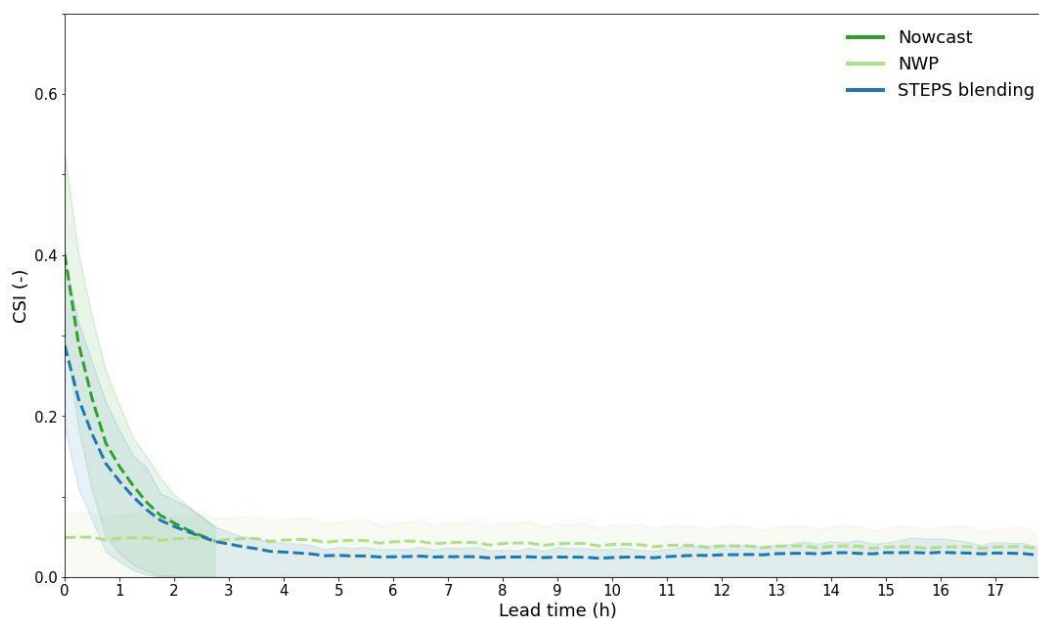
De resultaten in hoofdstuk 3 zijn het resultaat van een vergelijking met het final reanalysis radarproduct van het KNMI. Dit geeft de best mogelijke vergelijking, maar het is ook goed om de vergelijking met het real-time radarproduct (rtcor) ernaast te houden omdat dit het product is waarmee de radarnowcasts en de blending zijn gecreëerd. De figuren hieronder tonen deze vergelijking voor enkel de 10-min tijdstap. In het kort kunnen we concluderen dat de relatieve fout tussen de producten vrijwel identiek is bij de vergelijking met het rfcor- en rcor-producten. Enkel de absolute fout neemt iets toe voor de RMSE en juist iets af voor de CSI bij de vergelijking met het rfcor-product (zie hoofdstuk 3), maar dit geldt voor alle geteste methoden (Harmonie, radarnowcast en de blending).



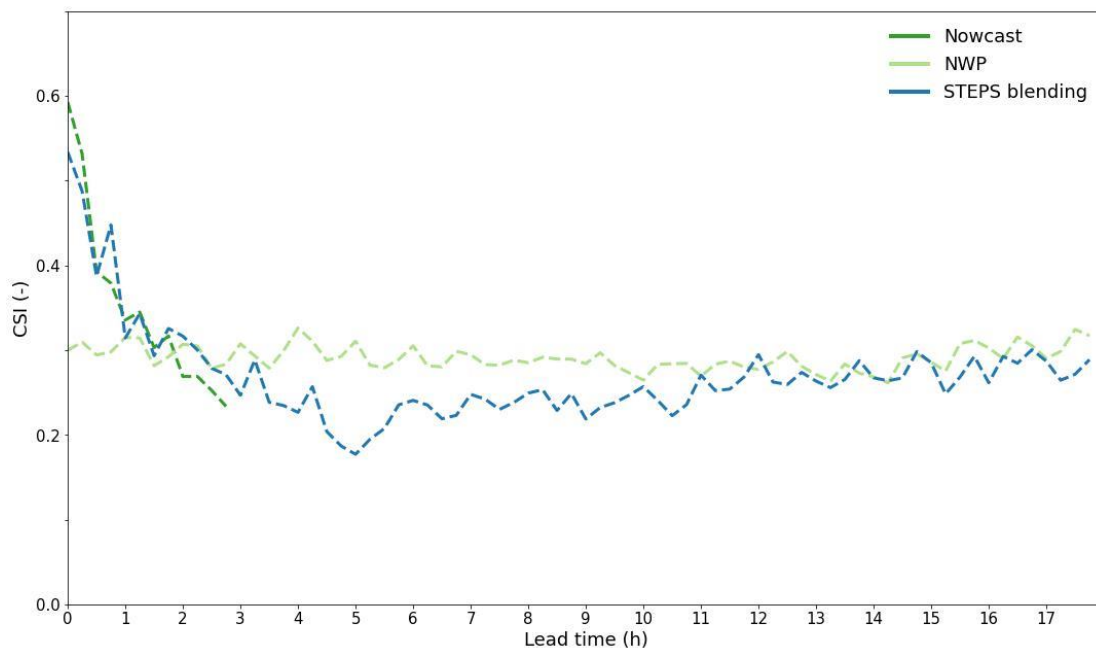
Figuur B-1: Root-mean square error op een 10-min tijdstap voor de geteste methoden, vergeleken met het rcor-product van KNMI. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde RMSE per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de RMSE-scores per verwachting. *Figuur 5-1 in de appendix toont de analyse op een 15-min tijdstap.*



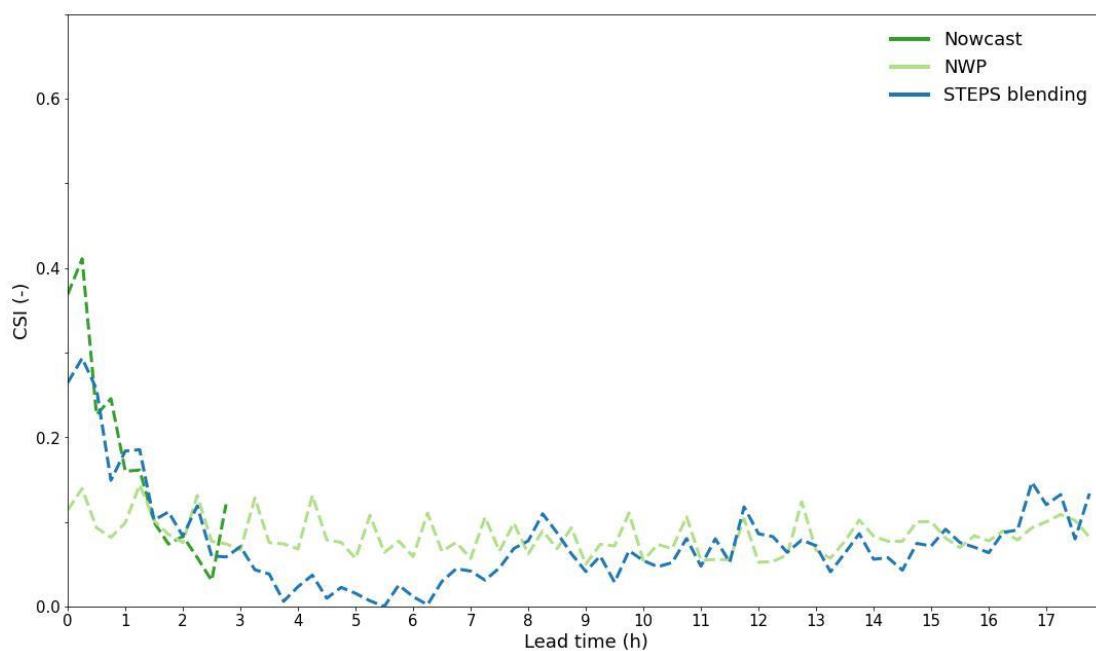
*Figuur B-2: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van  $0.1 \text{ mm h}^{-1}$  voor de geteste methoden, vergeleken met het rcor-product van KNMI. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde CSI per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de CSI-scores per verwachting. Figuur 5-2 in de appendix toont de analyse op een 15-min tijdstap.*



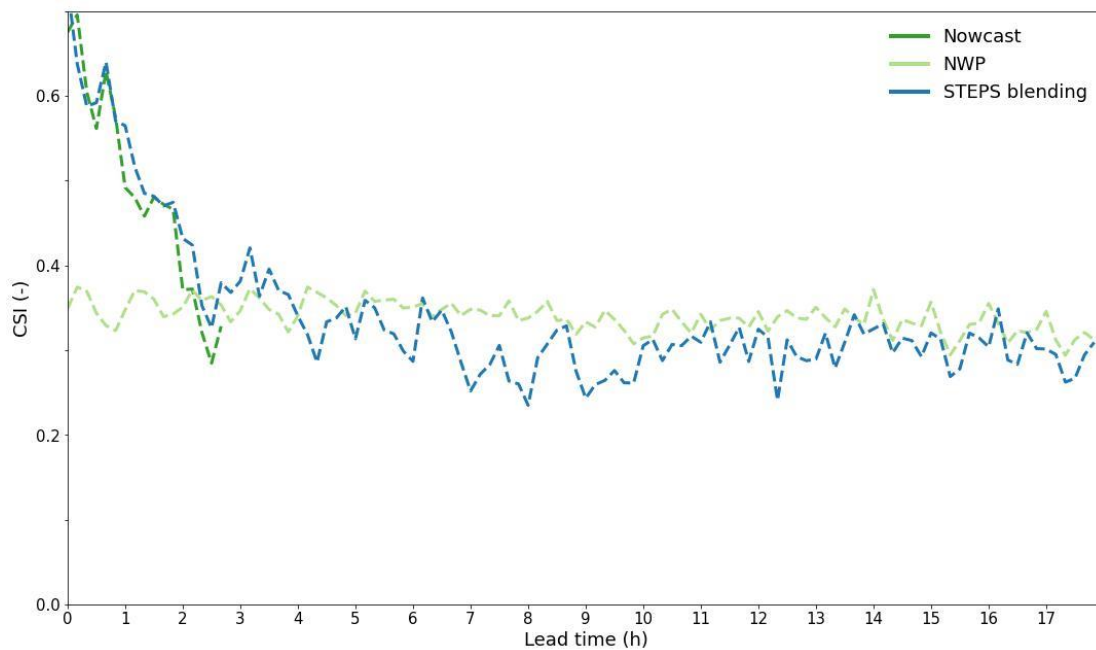
*Figuur B-3: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van  $5.0 \text{ mm h}^{-1}$  voor de geteste methoden, vergeleken met het rcor-product van KNMI. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde CSI per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de CSI-scores per verwachting. Figuur 5-3 in de appendix toont de analyse op een 15-min tijdstap.*



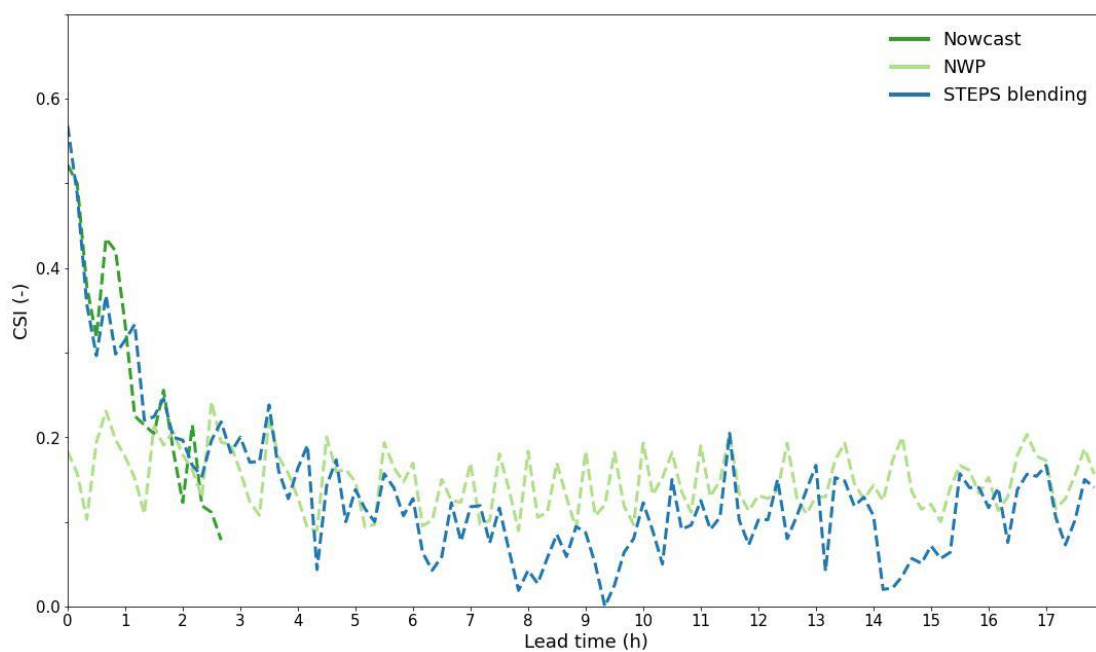
Figuur B-4: Critical succes index op een 15-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 0.1 mm h-1 voor de geteste methoden voor de gridcellen binnen het gebied van de Gouwepolder, vergeleken met het rcor-product van KNMI.



Figuur B-5: Critical succes index op een 15-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 5.0 mm h-1 voor de geteste methoden voor de gridcellen binnen het gebied van de Gouwepolder, vergeleken met het rcor-product van KNMI.

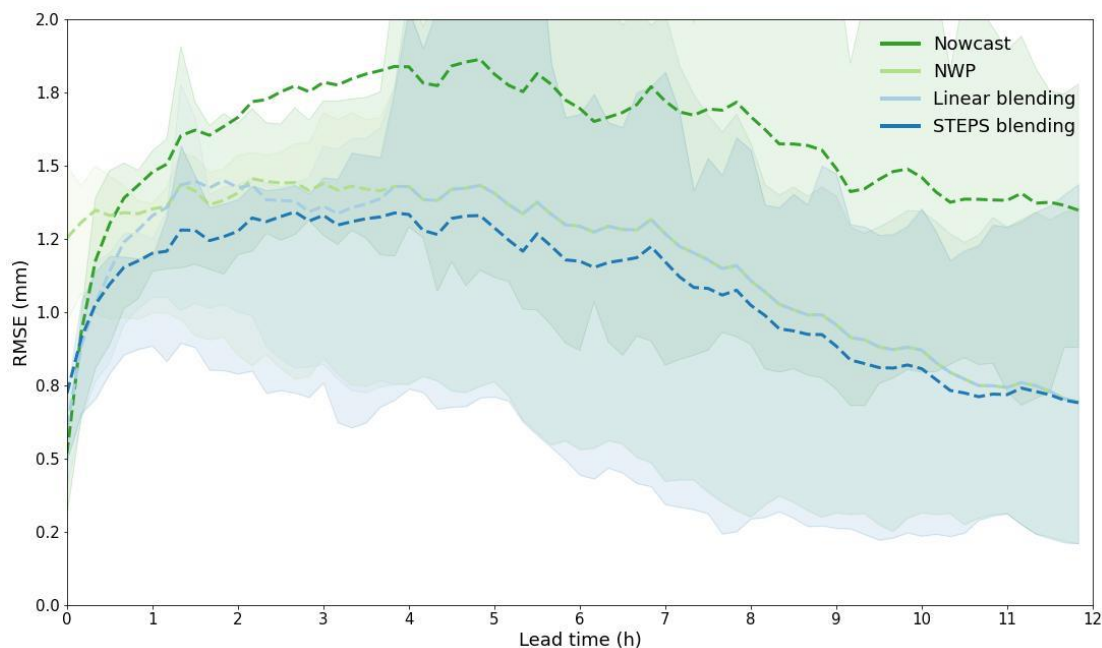


Figuur B-6: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 0.1 mm h-1 voor de geteste methoden voor een gridcel boven de locatie Winsum, vergeleken met het rcor-product van KNMI.



Figuur B-7: Critical succes index op een 10-min tijdstap en voor een drempelwaarde van 5.0 mm h-1 voor de geteste methoden voor een gridcel boven de locatie Winsum, vergeleken met het rcor-product van KNMI.

## C Vergelijking met lineaire blending aanpak voor 4 events



*Figuur C-1: Root-mean square error op een 10-min tijdstap voor de geteste methoden, plus een simpele, lineaire blending waarbij de blending start na 2 uur en eindigt na 4 uur looptijd. De vergelijking is gemaakt voor 4 events in de geteste zomermaand. De gekleurde lijnen tonen de gemiddelde RMSE per methode over de volledige maand. De gekleurde gebieden eromheen tonen de interkwartielafstand van de RMSE-scores per verwachting.*

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](http://www.deltares.nl)