

# Droogtemonitoring

Vergelijking metingen bodemvochtgehaltes met SWAP-WOFOST simulaties

Marius Heinen, Wageningen Environmental Research

m.m.v. Jos van Dam (WU), Ruud Bartholomeus (KWR), Janine de Wit (KWR), Gé van den Eertwegh (KnowH2O), Mirjam Hackten Broeke (WENR)



Wageningen University & Research



## Contents

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Werkwijze – narekenen op basis van WWL-maatwerk.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Resultaten – narekenen op basis van WWL-maatwerk .....</b>	<b>7</b>
3.1	<i>Wijhe.....</i>	9
3.2	<i>Harreveld .....</i>	10
3.3	<i>Hupsel.....</i>	11
3.4	<i>Voorst .....</i>	12
3.5	<i>Barneveld.....</i>	13
3.6	<i>Ulestraten .....</i>	14
<b>4</b>	<b>Kalibratie – Wijhe en Barneveld.....</b>	<b>16</b>
4.1	<i>Wijhe.....</i>	16
4.2	<i>Barneveld.....</i>	20
<b>5</b>	<b>Algemene discussie, bevindingen en aanbevelingen.....</b>	<b>25</b>
5.1	<i>Algemene discussie .....</i>	25
5.2	<i>Bevindingen .....</i>	25
5.3	<i>Aanbevelingen .....</i>	26
<b>6</b>	<b>Literatuur .....</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Bijlage A Overzicht basisgegevens .....</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Bijlage B Gekozen WWL-maatwerk simulaties per locatie.....</b>	<b>34</b>
<b>9</b>	<b>Bijlage C Overzicht onder- en zijrandvoorwaarden.....</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>Bijlage D Bodemprofielopbouw in Staringreeks bouwstenen.....</b>	<b>37</b>
<b>11</b>	<b>Bijlage E Getransformeerde tijdreeksen.....</b>	<b>38</b>
<b>12</b>	<b>Bijlage F Kalibratie met behulp van PEST .....</b>	<b>44</b>

## Colofon

Deze studie is uitgevoerd in het onderzoeksprogramma KLIMAP ([www.KLIMAP.nl](http://www.KLIMAP.nl)). Klimaatverandering zorgt op de Nederlandse zandgronden voor verandering in het bodem- en watersysteem en daarmee ook in de mogelijkheden voor landbouw en natuur in deze gebieden. 24 Partijen, waaronder regionale overheden, kennisinstellingen en bedrijven, hebben de handen ineen geslagen. Zij onderzoeken samen hoe het water- en bodemsysteem op deze zandgronden klimaatadaptief kan worden ingericht voor landbouw en natuur. In het project KLIMAP ('Klimaatadaptatie in de Praktijk'), dat mede gefinancierd wordt door de Topsectoren Agri & Food en Water & Maritiem, gaan zij aan de slag met handvatten die nodig zijn voor het klimaatbestendig inrichten van de Nederlandse zandgebieden.

In de periode 2018-2020 zijn in het onderzoeksproject 'Droogte Zandgronden Nederland' op diverse locaties in Nederland bodemvochtsensoren geïnstalleerd. Dit rapport beschrijft een vergelijking van de gemeten bodemvochtgehalten met bodemvochtgehalten zoals gesimuleerd met SWAP-WOFOST.

# 1 Inleiding

In 2018 is een onderzoeksproject ‘Droogte Zandgronden Nederland’ opgestart met als centrale vraag het duiden van de droogte in 2018 en 2019 in het zandgebied. Eén van de elementen van de duiding is het verkrijgen van uniform inzicht in en begrip van de relatie tussen de verschillende droogtecomponenten (meteorologisch, bodemvocht en hydrologische droogte) (zie o.m. Van den Eertwegh et al., 2019, 2020, 2021; Projectteam Beleidstafel Droogte, 2019). Een onderdeel hierin was het opzetten van een bodemvocht-monitoringnetwerk, ter demonstratie van de meerwaarde van het zicht hebben op de bodemvochtvoorraad in de wortelzone van landbouwgewassen en natuurlijke vegetatie. In totaal worden op elf locaties in het zandgebied van Nederland op twee dieptes (15 en 30 cm-mv; in duplo) bodemvochtgehalten gemeten en continu gemonitord (zie <https://droogteportaal.nl/> en Van Dam en Gooren, 2021; Tabel 1)<sup>1</sup>. Vanuit KLIMAP is een financiële bijdrage geleverd voor onderhoud en continuering van de bodemvochtmetingen in 2021 en 2022. Bij deze meetlocaties liggen grondwaterstand peilbuizen in de buurt, waarin reeds langjarig de freatische grondwaterstand wordt gemeten (Tabel 1).

Tabel 1. Basisgegevens van de meetlocaties voor bodemvocht.

Locatie	Latitude	Longitude	Grondw. buis	Waterschap / provincie
<b>1 Wijhe</b>	52.4024216	6.2175619	27FC109A	Waterschap Drents Overijsselse Delta
<b>2 Lettele</b>	52.2778391	6.2871590	27HG610B	Waterschap Drents Overijsselse Delta
<b>3 Harreveld</b>	51.9839323	6.5345051	B41B0559	Waterschap Rijn en IJssel
<b>4 Eibergen</b>	52.0676518	6.6568326	B34G1425	Waterschap Rijn en IJssel
<b>5 Voorst</b>	52.1548559	6.0652730	B33E1260	Waterschap Vallei en Veluwe
<b>6 Lunteren</b>	52.1268408	5.6216584	B32H1219	Waterschap Vallei en Veluwe
<b>7 Rijsbergen</b>	51.5199970	4.6552666	B50A0149	Waterschap Brabantse Delta
<b>8 Bavel</b>	51.5740137	4.8191565	B50B0582	Waterschap Brabantse Delta
<b>9 Ulestraten</b>	50.9055906	5.7897753	B62A0448	Provincie Limburg
<b>10 Heerlen</b>	50.8864524	5.9540229	B62B4300	Provincie Limburg
<b>11 Meeuwenkamp</b>	52.0480550	5.5473437	B32G1155	Provincie Utrecht

De elf meetlocaties zijn gericht uitgezocht (Van Dam en Gooren, 2021). Uiteraard is hiermee niet elke mogelijke bodemgewas-grondwaterklasse combinatie vertegenwoordigd. Simulatiemodellen kunnen hierbij een brugfunctie vervullen: op basis van modellen kan dan de interactie tussen grondwater en bodemvochtgehalte bestudeerd worden en kunnen realistische berekeningen gedaan worden om de effecten van hydrologische veranderingen of droogte te bestuderen. Daarvoor is het wel noodzakelijk dat de validiteit van de modellen aangetoond wordt. Naast de bodemvochtgehalten zijn ook grondwaterstanden in de nabijheid gemeten. Op basis van deze grondwaterstanden zijn verkennende kalibraties uitgevoerd (J. de Wit (KWR), niet gepubliceerd; toepassing is online beschikbaar op <http://server.droogteportaal.nl/Droogte/>). In het kader van KLIMAP zijn voor enkele van deze locaties aanvullende modelsimulaties en kalibraties uitgevoerd welke in dit rapport worden beschreven. Hierbij is gebruik gemaakt van het model SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017) en zijn basis invoergegevens (bodem, gewas, meteorologie) gebruikt uit Waterwijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018; <https://waterwijzerlandbouw.wur.nl>).

Het kalibreren, oftewel het optimaliseren van modelparameters, kan op verschillende manieren, variërend van zogenaamde *eyeball-fitting* (of *trial-and-error fitting*) tot en met zeer geavanceerde Monte Carlo of Bayesiaanse methoden (zie bijv. Vrugt et al., 2011). Dergelijke geavanceerde methoden lijken aantrekkelijk, maar betekenen vaak ook een lange leercurve voor juist gebruik, en ook moeten we ons realiseren dat er veel meer onzekerheden in de overige model parameterisatie aanwezig zijn zodat we niet moeten verwachten dat we toewerken naar een unieke eindoplossing. Omdat de auteurs in het verleden<sup>2</sup> ervaring hebben opgedaan met het optimalisatieprogramma PEST (Doherty, 2018/2021), is dit nu ook gebruikt in de huidige studie.

<sup>1</sup> Inmiddels is het aantal locaties uitgebreid.

<sup>2</sup> Zie genoemde referenties aan het eind van de literatuurlijst.

## 2 Werkwijze – narekenen op basis van WWL-maatwerk

Voor de droogtmonitoringslocaties zijn geen uitgebreide aanvullende metingen uitgevoerd welke als invoer of randvoorwaarden voor de respectievelijke locaties gehanteerd kunnen worden. Van Dam en Gooren (2021) geven per locatie de laagopbouw weer en hebben daaraan Staringreeks bouwsteencodes toegekend. In de huidige analyse is gekozen om voor de betreffende locaties volledige sets invoerbestanden uit Waterwijzer Landbouw (WWL) te gebruiken. Op basis van de GLG en GHG zoals afgeleid uit de beschikbare grondwater peilbuizen en de BOFEK2020-kaart zijn WWL runs geselecteerd.

Er zijn twee sets grondwaterstanden + maaiveldhoogtes gebruikt bij twee eerdere analyses van de elf droogte monitoringslocaties:

- A: deelrapport bodemvochtmetingen (Van Dam & Gooren, 2021)
- B: analyse grondwaterstanden (KWR; Janine de Wit, pers. comm.; toepassingen en resultaten van SWAP kolommen staan online: <http://server.droogteportaal.nl/Droogte/> en een selectie is gepubliceerd in van den Eertwegh et al., 2021).

Afgezien dat soms andere grondwaterstandbuizen zijn gekozen, valt op dat bij aanpak A vaak een ander maaiveldhoogte (m+NAP) is gerapporteerd. Dat is zeer waarschijnlijk de maaiveldhoogte ter plaatse van de bodemvochtsensoren<sup>3</sup>. Wanneer de verschillen in maaiveldhoogte enkele cm tot dm bedraagt, dan heeft dat impact op de GxG (en soms zelfs de resulterende Gt-klasse) van het grondwaterverloop dat hieruit berekend wordt (Bijlage A). Aanpak B is juist indien de grondwaterstanden en bodemvochtgehalten ter plaatse van de meetbuis worden geanalyseerd. Aanpak A veronderstelt impliciet dat het grondwater niveau in m+NAP gelijk is ter plaatse van de grondwaterstandbuis en de plaats van de bodemvochtsensoren.

Omdat beide methoden soms tot verschillende GxG waarden komen, betekent dit ook dat bij het opzoeken van een WWL-maatwerk simulatie uit de database verschillende SWAP-WOFOST databestanden verkregen worden. Uiteraard zijn die verschillen dan volledig te wijten aan verschillende onder- en zijrandvoorwaarden. In Bijlage B zijn de gekozen WWL maatwerk simulaties (2.0.4; database 3.0.0) uit de database grafisch weergegeven. Bijlage C geeft een overzicht van de gebruikte onder- en zijrandvoorwaarden.

Voor zes van de elf locaties zijn de WWL-maatwerk berekeningen uitgevoerd (Tabel 2). Dit betreffen allemaal locaties waar het landgebruik grasland is. Behalve locatie Voorst, werden in de eerdere analyse van KWR deze zes locaties benoemd als landbouwpercelen; Voorst is aangeduid als natuur met grasland. Voor de WWL-maatwerk berekeningen is gemaaid-grasland verondersteld. In de gebruikte WWL versie is gebruik gemaakt van een relatieve wortelverdeling die lineair afneemt met de diepte. In Tabel 2 is vermeld welke KNMI weerstations zijn gebruikt voor de meteorologische invoergegevens. Tevens zijn ook aanvullende simulaties uitgevoerd waarbij de neerslag is vervangen door neerslag verkregen vanuit radargegevens. Deze op radar gebaseerde uurlijkse neerslaggegevens zijn beschikbaar gesteld door KnowH2O (Gé van den Eertwegh & Dion van Deijl, pers. comm.)

Tabel 2. SWAP-WOFOST run nummers verkregen op basis van gewenste BOFEK2020, gewas en meteo input en GxG volgens methoden A en B.

Locatie	BOFEK2020	Gewas	Meteo	Run A	B
1_Wijhe	3007	gemaaid-grasland	Eelde (280)	211327	211325
3_Harreveld	3005	gemaaid-grasland	De Bilt (260)	120759	120774
4_Hupsel	3004	gemaaid-grasland	De Bilt (260)	119635	119653
5_Voorst	3016	gemaaid-grasland	De Bilt (260)	133051	133079
6_Barneveld	3004	gemaaid-grasland	De Bilt (260)	119651	119635
9_Ulestraten	5007	gemaaid-grasland	Maastricht (380)	440535	440535

<sup>3</sup> De grondwaterstandsbuizen staan vaak buiten de percelen in een berm of in stukje bos. De sensoren staan wel in de percelen. De afstand tussen grondwaterstandsbuizen en sensoren varieert van 2 tot circa 30 m. Over die afstand was er soms een duidelijk verschil in maaiveldhoogte. De maaiveldhoogten bij aanpak A zijn afgeleid uit de meetlocatie voor bodemvocht en AHN3.

In Figuur 1 zijn de BOFEK2020 profielschetsen gegeven. Merk op dat voor Hupsel en Barneveld vrijwel identieke maatwerk runs worden gebruikt. Uitgezonderd voor locatie Voorst zijn de WWL BOFEK2020 profielen identiek aan de profielen die in van Dam en Gooren (2021) zijn vermeld (Bijlage D); het bodem profiel voor Voorst volgens de BOFEK2020 kaart is iets lemiger dan volgens de veldwaarneming in van Dam en Gooren (2021).

Voor locatie Ulestraten zullen de resultaten voor runs A en B identiek zijn omdat deze dezelfde WWL run betreffen. Daarnaast worden resultaten gepresenteerd voor Ulestraten waarbij in de simulatie de onderrandvoorwaarde is gewijzigd in vrije drainage (run C). Omdat de grondwaterstand in Ulestraten extreem diep zit worden geen resultaten m.b.t. grondwaterstand getoond.



Figuur 1. Schematische weergave van de BOFEK profielen zoals gebruikt in deze studie.

## 3 Resultaten – narekenen op basis van WWL-maatwerk

In de volgende secties worden per locatie drie figuren getoond voor de periode 01-01-2020 t/m 12-09-2022:

- de bovenste figuur toont het bodemvochtgehalte op 15 cm diepte
- de tweede figuur toont het bodemvochtgehalte op 30 cm diepte
- de derde figuur toont de grondwaterstand

Toelichting legenda:

- meting: meetwaarden (voor bodemvochtgehalten zijn steeds 2 series geplot)
- sim\_A\_KNMI: simulatie op basis van locatie grondwaterpeilbuis A en KNMI neerslaggegevens
- sim\_A\_radar: simulatie op basis van locatie grondwaterpeilbuis A en radar neerslaggegevens
- sim\_B\_KNMI: simulatie op basis van locatie grondwaterpeilbuis B en KNMI neerslaggegevens
- sim\_B\_radar: simulatie op basis van locatie grondwaterpeilbuis B en radar neerslaggegevens
- sim\_C\_KNMI: simulatie op basis van locatie grondwaterpeilbuis A met vrije drainage aan de onderrand en KNMI neerslaggegevens (alleen voor Ulestraten)
- sim\_C\_radar: simulatie op basis van locatie grondwaterpeilbuis A met vrije drainage aan de onderrand en radar neerslaggegevens (alleen voor Ulestraten)

Merk op dat de simulaties met radar neerslag tot en met 12-12-2021 lopen.

In Tabel 3 zijn per locatie per run voor de bodemvochtgehalte op beide diepten en de grondwaterstand (alleen jaar 2020) enkele *goodness-of-fit* variabelen gegeven:

- ME: *mean error*
- RMSE: *root mean squared error*
- NSE: *Nash-Sutcliffe modelling efficiency*
- IoA: *index of agreement*
- r: *Pearson correlation coefficient*

De ME en RMSE hebben dezelfde eenheid als de variabele waarop ze betrekking hebben; dus voor bodemvochtgehalte is dat  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  en voor grondwaterstand is dat cm.

### Enkele bevindingen van de WWL simulaties per locatie

#### 1\_Wijhe (Figuur 2)

- bodemvochtgehalten op beide dieptes worden overschat (ME > 0.1; NSE < 0)
- grondwaterstand wordt vrij goed door A gesimuleerd; minder goed door B
- gebruik van radar neerslag levert geen substantiële verbetering op

#### 3\_Harreveld (Figuur 3)

- bodemvochtgehalten worden redelijk goed gesimuleerd; in de winter worden hogere  $w_c$ 's gesimuleerd
- bodemvochtgehalten worden iets beter gesimuleerd wanneer neerslag op basis van radar wordt gebruikt
- redelijke overeenkomst in grondwaterstand wanneer KNMI neerslag wordt gebruikt, maar grondwaterstand wordt onderschat wanneer neerslag op basis van radar wordt gebruikt

#### 4\_Hupsel (Figuur 4)

- over het algemeen leveren de simulaties voor runs B drogere situaties op dan die voor runs A; iets minder nat indien radar neerslag wordt gebruikt
- bodemvochtgehalten op beide dieptes worden overschat; voor diepte 30 cm geldt dat niet voor run B
- grondwaterstanden worden minder diep gesimuleerd (met name voor runs A)

#### 5\_Voorst (Figuur 5)

- bodemvochtgehalte op 15 cm dezelfde orde van grote, behalve aan het eind van de zomer 2020; echter de ns waarden zijn negatief hetgeen er op duidt dat het gemiddelde van de metingen een betere voorspeller is dan de simulaties
- bodemvochtgehalte op 30 cm wordt sterk overschat
- grondwaterstand wordt redelijk door A gesimuleerd; minder goed door B
- voor grote delen van de simulatieperiode zijn de verschillen tussen simulaties met KNMI neerslag en radar neerslag niet groot

#### 6\_Barneveld (Figuur 6)

- bodemvochtgehalten op beide dieptes worden redelijk benaderd door run A en licht overschat door run B; voor diepte 15 cm zijn de ns waarden echter negatief
- grondwaterstand wordt redelijk benaderd door run A en licht overschat door run B
- voor grote delen van de simulatieperiode zijn de verschillen tussen simulaties met KNMI neerslag en radar neerslag niet groot
- extra: er is zo goed als nooit sprake van reductie in wateropname (*data not shown*)

#### 9\_Ulestraten (Figuur 7)

- bodemvochtgehalten op beiden dieptes worden iets overschat, maar dynamiek is vergelijkbaar
- voor run C geldt:
  - bodemvochtgehalten op beide dieptes worden licht overschat
  - er wordt geen grondwaterstand gesimuleerd
- voor grote delen van de simulatieperiode zijn de verschillen tussen simulaties met KNMI neerslag en radar neerslag niet groot

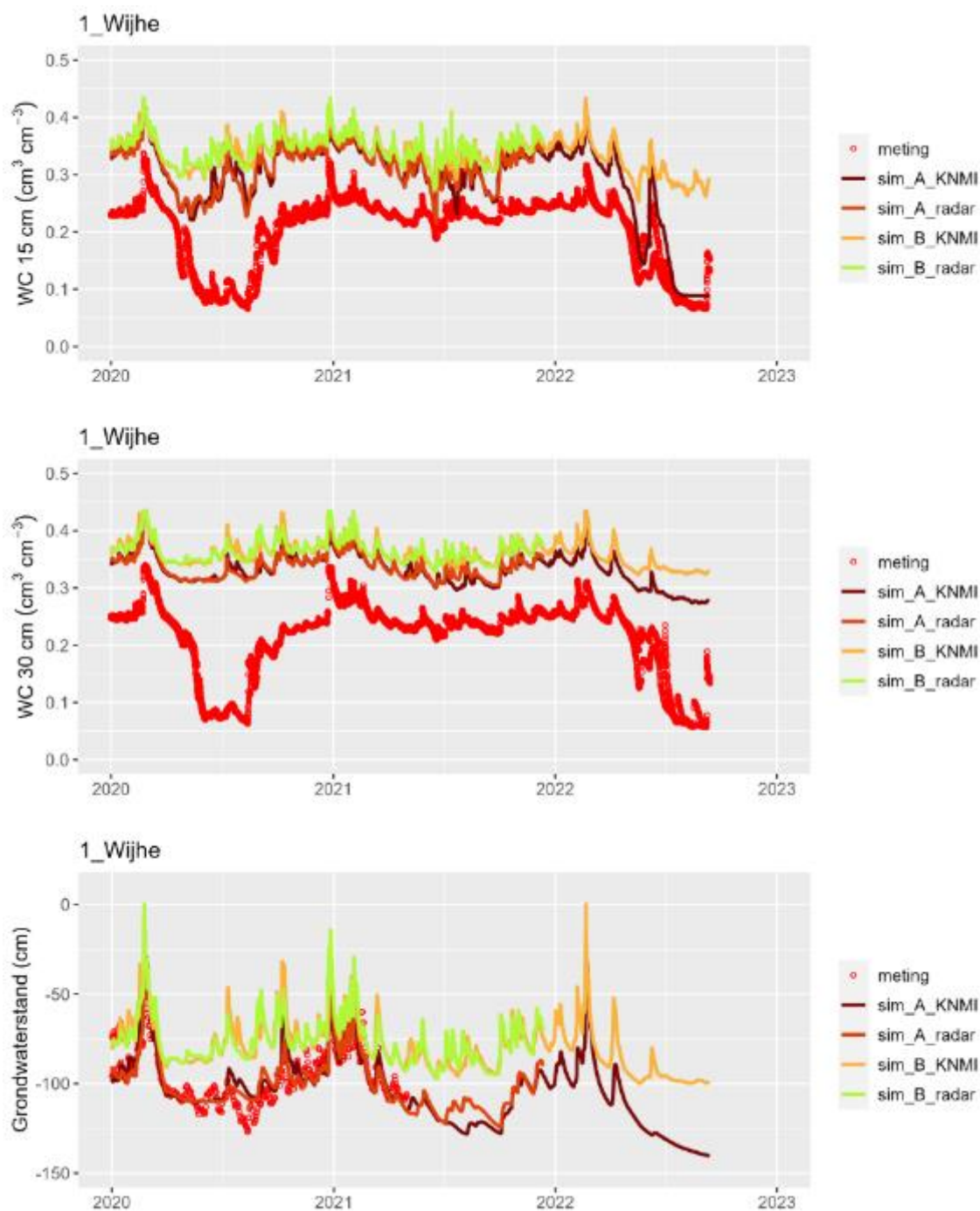
Per type meting gemiddeld over de zes locaties is het niet zo dat simulaties op basis van radarneerslag voor alle *goodness-of-fit* variabelen betere resultaten opleveren: soms wel, soms niet, maar de verschillen zijn minimaal. Op detailniveau kunnen wel momenten aangewezen worden waar lokale radarneerslag en stijging in gemeten bodemvochtgehalte samenvallen welke bijvoorbeeld niet wordt waargenomen indien neerslaggegevens van een verder weg gelegen KNMI weerstation zijn gebruikt.

Opmerking: simulaties zijn ook uitgevoerd met een uniforme relatieve wortelverdeling (blok-verdeling): de simulatie-resultaten wijken nauwelijks af de hier getoonde resultaten.

Zoals hierboven geconstateerd zijn in sommige situaties min-of-meer vergelijkbare gesimuleerde en gemeten bodemvochtgehalten en in andere situaties bleek dat de gesimuleerde bodemvochtgehalten hoger waren dan gemeten. Om na te gaan of de gesimuleerde dynamiek in bodemvochtgehalten overeenkomen tussen gemeten en gesimuleerd kunnen beide tijdreeksen getransformeerd worden door van de waarden het gemiddelde af te trekken. De bijbehorende grafieken voor de zes locaties staan in Bijlage E. De simulaties en metingen komen dan (uiteraard) dichter bij elkaar te liggen, immers hun gemiddelde afwijking is nul. Maar ook dan blijven we soms verschillen zien tussen gemeten en gesimuleerde waarden.

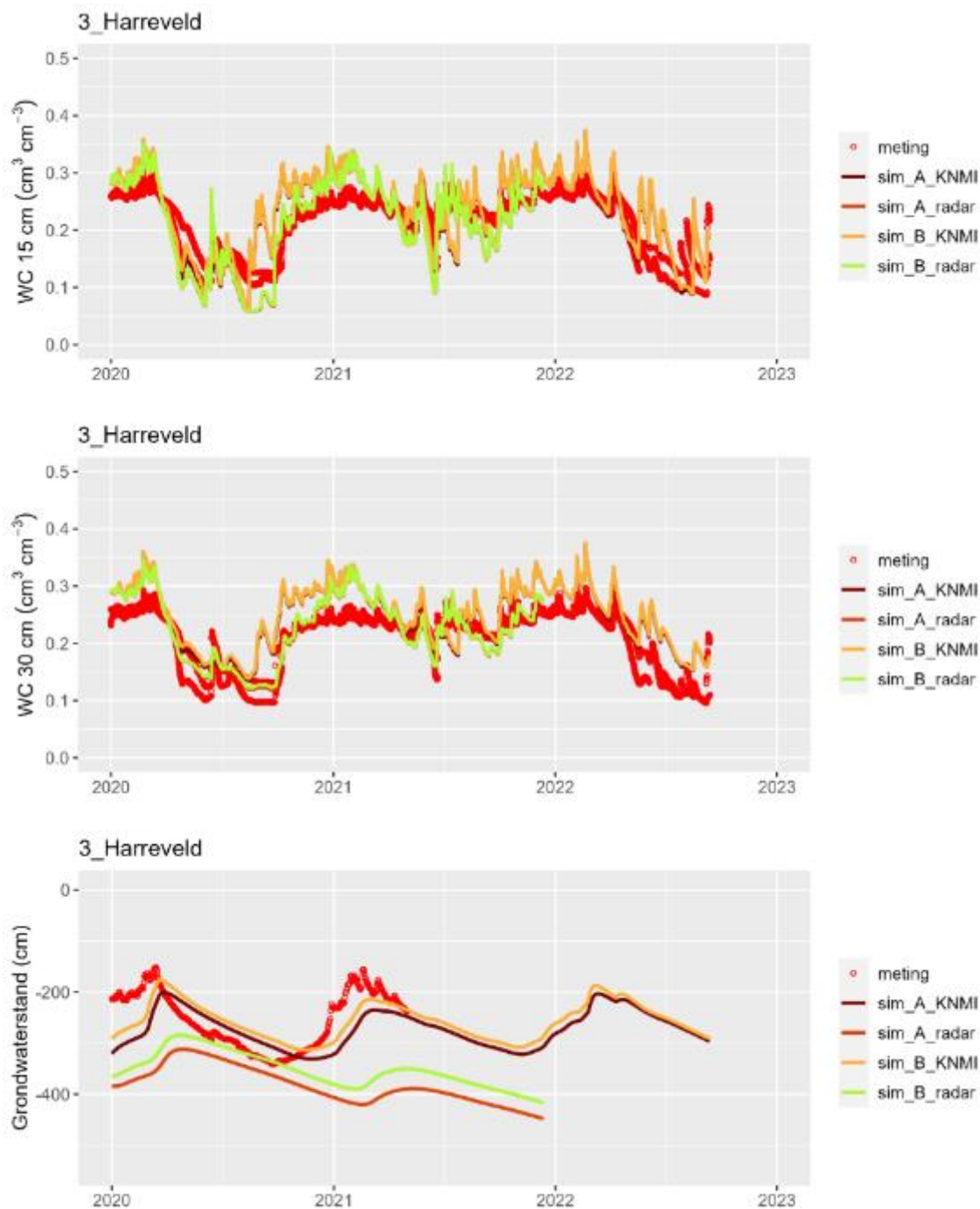


### 3.1 Wijhe



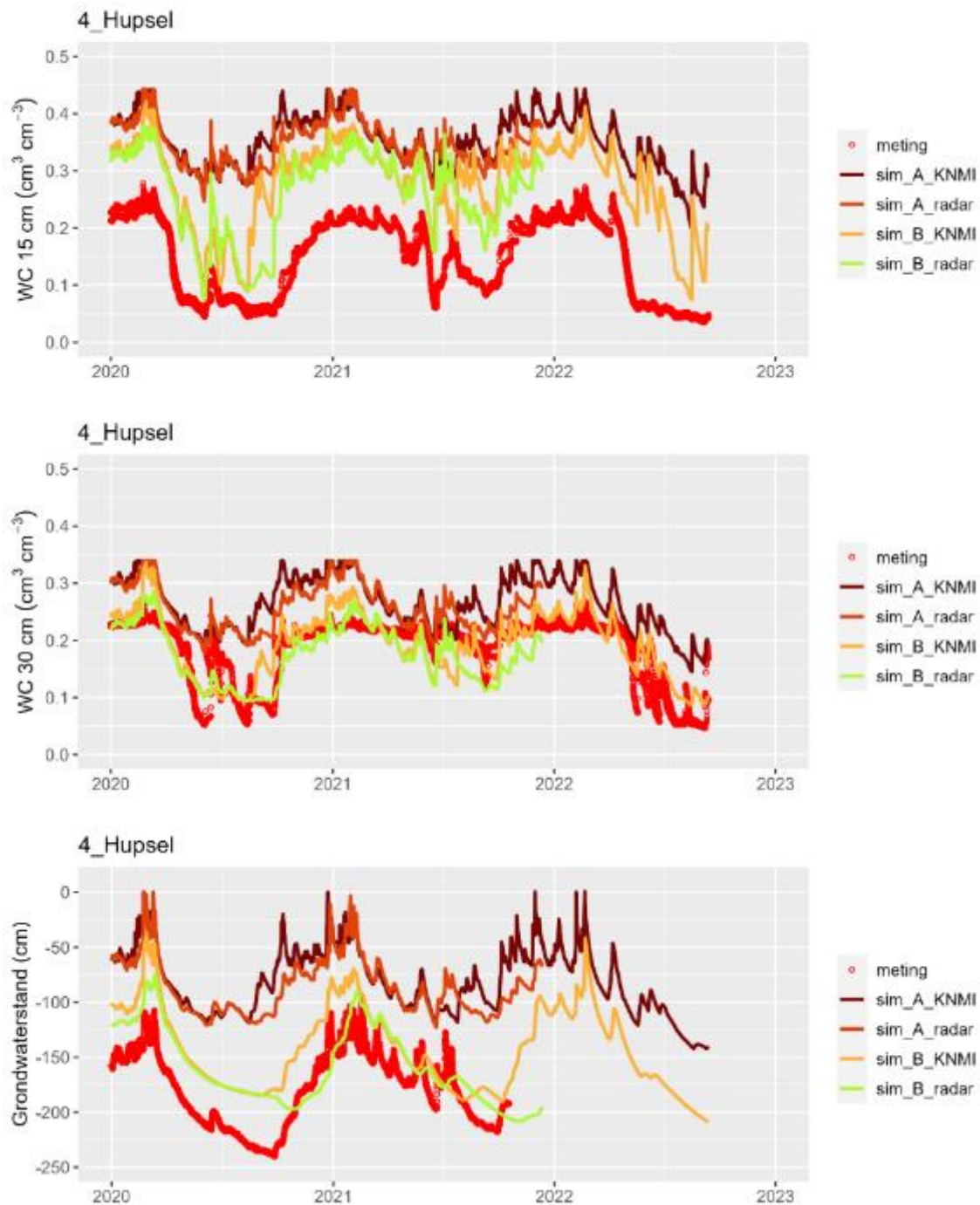
Figuur 2. Gemeten en gesimuleerde tijdreeksen voor bodemvochtgehalte op 15 cm diepte (boven), 30 cm diepte (midden) en grondwaterstand (onder) voor WWL-maatwerk simulaties voor locaties met grondwaterpeilbuizen A of B en voor neerslaggegevens van KNMI weerstation of verkregen uit radarbeelden.

## 3.2 Harreveld



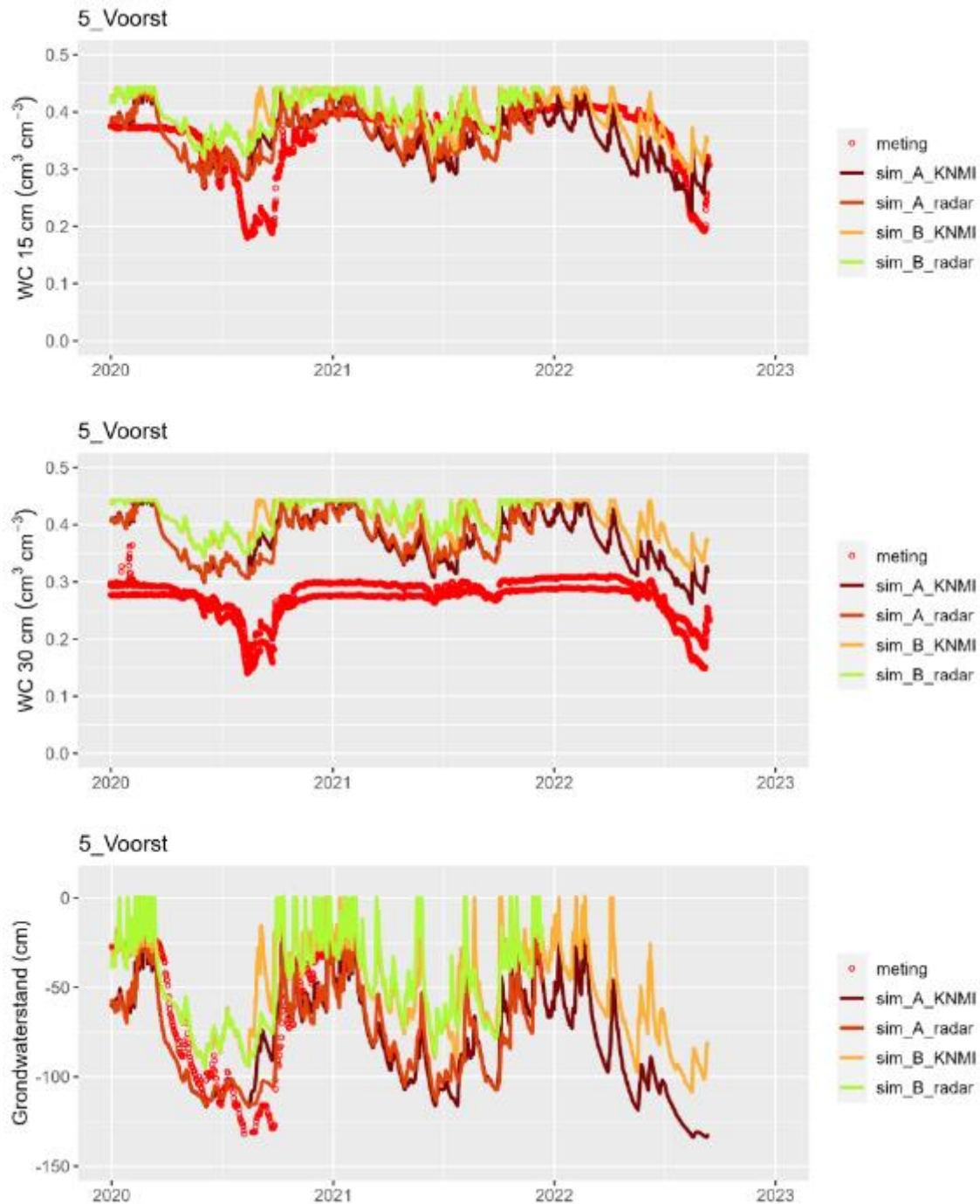
Figuur 3. Gemeten en gesimuleerde tijdreeksen voor bodemvochtgehalte op 15 cm diepte (boven), 30 cm diepte (midden) en grondwaterstand (onder) voor WWL-maatwerk simulaties voor locaties met grondwaterpeilbuizen A of B en voor neerslaggegevens van KNMI weerstation of verkregen uit radarbeelden.

### 3.3 Hupsel



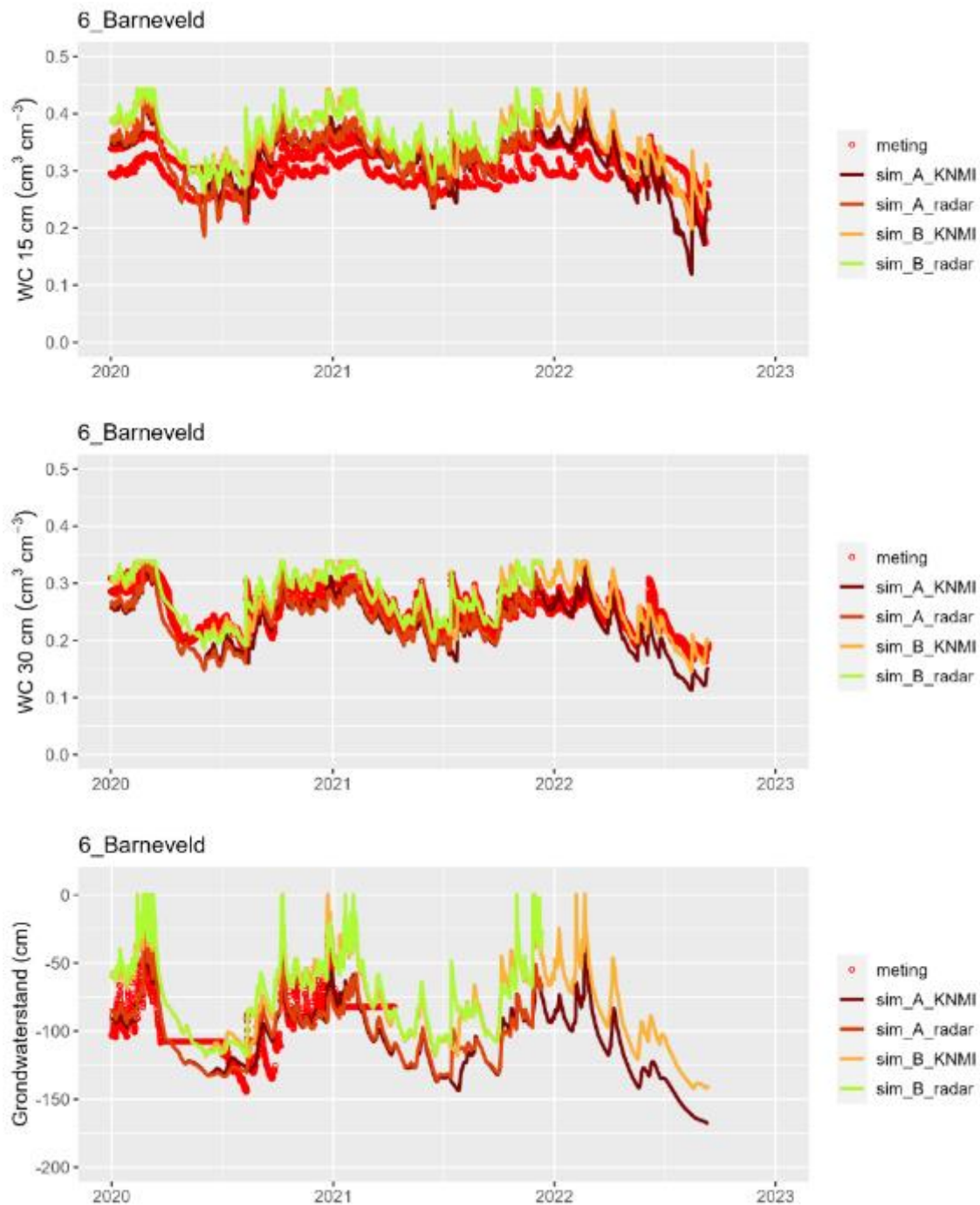
Figuur 4. Gemeten en gesimuleerde tijdreeksen voor bodemvochtgehalte op 15 cm diepte (boven), 30 cm diepte (midden) en grondwaterstand (onder) voor WWL-maatwerk simulaties voor locaties met grondwaterpeilbuizen A of B en voor neerslaggegevens van KNMI weerstation of verkregen uit radarbeelden.

### 3.4 Voorst



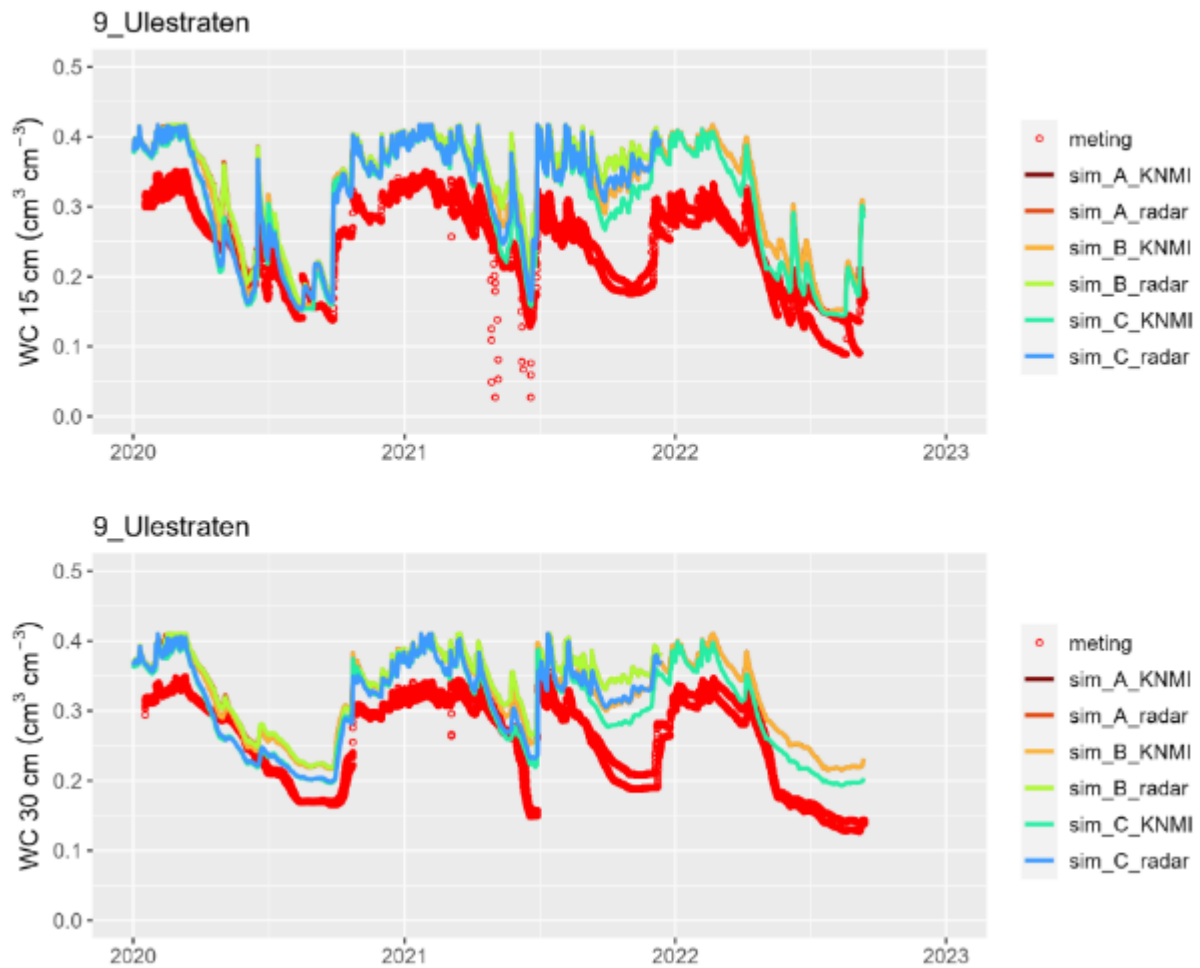
Figuur 5. Gemeten en gesimuleerde tijdreeksen voor bodemvochtgehalte op 15 cm diepte (boven), 30 cm diepte (midden) en grondwaterstand (onder) voor WWL-maatwerk simulaties voor locaties met grondwaterpeilbuizen A of B en voor neerslaggegevens van KNMI weerstation of verkregen uit radarbeelden.

### 3.5 Barneveld



Figuur 6. Gemeten en gesimuleerde tijdreeksen voor bodemvochtgehalte op 15 cm diepte (boven), 30 cm diepte (midden) en grondwaterstand (onder) voor WWL-maatwerk simulaties voor locaties met grondwaterpeilbuizen A of B en voor neerslaggegevens van KNMI weerstation of verkregen uit radarbeelden.

### 3.6 Ulestraten



Figuur 7. Gemeten en gesimuleerde tijdreeksen voor bodemvochtgehalte op 15 cm diepte (boven) en 30 cm diepte (midden) voor WWL-maatwerk simulaties voor locaties met grondwaterpeilbuizen A of B en voor neerslaggegevens van KNMI weerstation of verkregen uit radarbeelden.

Tabel 3. Overzicht goodness-of-fit parameters per locatie per run voor de bodemvochtgehalte op beide diepten en de grondwaterstand (alleen jaar 2020).

Locatie	Variabele	Run	Neerslag	ME	RMSE	NSE	loA	r	r2	
1_Wijhe	wc_15	A	KNMI	0.09	0.1	-0.82	0.42	0.57	0.47	
		B	KNMI	0.13	0.14	-1.61	0.28	0.41	0.09	
		A	radar	0.11	0.11	-1.5	0.29	0.48	0.34	
		B	radar	0.13	0.14	-2.18	0.24	0.22	0	
	wc_30	A	KNMI	0.12	0.13	-1.31	0.3	0.44	0.15	
		B	KNMI	0.15	0.16	-1.87	0.26	0.27	-0.06	
		A	radar	0.12	0.13	-1.8	0.26	0.36	0.11	
		B	radar	0.14	0.15	-2.45	0.22	0.18	-0.09	
	gwl	A	KNMI	2.18	9	0.46	0.73	0.71	0.84	
		A	radar	1.59	8.33	0.49	0.74	0.76	0.84	
		<b>3_Harreveld</b>								
		wc_15	A	KNMI	0.02	0.05	0.14	0.64	0.61	0.6
B	KNMI		0.02	0.05	0.16	0.64	0.61	0.63		
A	radar		-0.01	0.04	0.19	0.69	0.83	0.41		
B	radar		0	0.04	0.2	0.69	0.83	0.42		
wc_30	A	KNMI	0.04	0.05	0.06	0.59	0.71	0.75		
	B	KNMI	0.04	0.05	0	0.57	0.72	0.75		
	A	radar	0.01	0.03	0.46	0.77	0.85	0.73		
	B	radar	0.01	0.03	0.44	0.76	0.85	0.75		
gwl	A	KNMI	-21.47	53.48	0.13	0.5	0.26	0.41		
	A	radar	-114.74	136.28	-1.28	0.31	0.11	-0.46		
	<b>4_Hupsel</b>									
	wc_15	A	KNMI	0.2	0.21	-2.22	0.24	0.58	-0.42	
B		KNMI	0.13	0.14	-1.04	0.35	0.65	0.11		
A		radar	0.19	0.2	-2.43	0.23	0.69	-0.33		
B		radar	0.11	0.11	-0.89	0.38	0.81	0.27		
wc_30	A	KNMI	0.08	0.09	-0.73	0.37	0.53	0.46		
	B	KNMI	0.01	0.04	0.37	0.7	0.65	0.8		
	A	radar	0.07	0.07	-0.75	0.36	0.54	0.54		
	B	radar	-0.02	0.03	0.28	0.67	0.69	0.81		
gwl	A	KNMI	100.01	103.85	-2.44	0.23	0.36	0.29		
	A	radar	92.96	94.73	-2.2	0.24	0.71	0.42		
	<b>5_Voorst</b>									
	wc_15	A	KNMI	-0.01	0.05	-0.06	0.46	0.23	0.44	
B		KNMI	0.03	0.06	-0.07	0.49	0.21	0.36		
A		radar	0	0.05	-0.01	0.48	0.27	0.48		
B		radar	0.04	0.06	-0.2	0.46	0.31	0.43		
wc_30	A	KNMI	0.1	0.11	-3.55	0.18	0.3	0.28		
	B	KNMI	0.14	0.14	-5.25	0.14	0.31	0.32		
	A	radar	0.11	0.11	-4.73	0.15	0.32	0.26		
	B	radar	0.14	0.14	-6.69	0.12	0.39	0.35		
gwl	A	KNMI	-5.55	22.56	0.45	0.68	0.66	0.68		
	A	radar	-7.55	19.82	0.51	0.73	0.76	0.75		
	<b>6_Barneveld</b>									
	wc_15	A	KNMI	0.01	0.04	-0.57	0.53	0.7	-0.22	
B		KNMI	0.05	0.06	-1.61	0.34	0.74	-0.06		
A		radar	0.02	0.04	-0.68	0.5	0.7	-0.08		
B		radar	0.06	0.06	-2.2	0.27	0.78	-0.02		
wc_30	A	KNMI	-0.03	0.03	0.07	0.61	0.75	0.65		
	B	KNMI	0.01	0.03	0.3	0.71	0.76	0.62		
	A	radar	-0.02	0.03	0.13	0.61	0.75	0.74		
	B	radar	0.02	0.03	0.29	0.7	0.79	0.7		
gwl	A	KNMI	-3.6	15.12	0.3	0.66	0.61	0.76		
	A	radar	-2.62	16.45	0.23	0.62	0.54	0.72		
	<b>9_Ulestraten</b>									
	wc_15	A	KNMI	0.08	0.08	-0.38	0.5	0.81	0.59	
C		KNMI	0.06	0.07	-0.12	0.58	0.82	0.59		
A		radar	0.09	0.1	-0.74	0.43	0.63	0.55		
C		radar	0.07	0.08	-0.41	0.51	0.65	0.53		
wc_30	A	KNMI	0.06	0.07	-0.06	0.53	0.81	0.73		
	C	KNMI	0.04	0.05	0.22	0.64	0.8	0.81		
	A	radar	0.07	0.08	-0.35	0.47	0.64	0.68		
	C	radar	0.05	0.06	0.01	0.58	0.63	0.72		

## 4 Kalibratie – Wijhe en Barneveld

In het vorige hoofdstuk is getoond dat de WWL maatwerk simulaties in sommige gevallen niet goed overeenkomen met de metingen. Dat kan deels komen doordat de lokale eigenschappen afwijken van de standaard situaties die in WWL beschikbaar zijn. De metingen kunnen in dat geval gebruikt worden om enkele invoergegevens (eigenschappen) te kalibreren.

De metingen van bodemvochtgehalten op dieptes 15 en 30 cm geven de mogelijkheid om de Mualem – Van Genuchten parameters van de bijbehorende bodemlagen te kalibreren, en de gemeten grondwaterstand geeft de mogelijkheid om enkele drainageparameters – in dit geval van drainageniveau 2 – te kalibreren. Uiteraard veronderstelt dit wel dat de meetwaarden correct zijn. We merken op dat de bodemvochtgehaltemeters niet zijn gekalibreerd voor de lokale bodems; er is gebruik gemaakt van door de fabrikant aangeleverde standaard ijklijnen.

Kalibraties zijn uitgevoerd voor het jaar 2020 voor zowel neerslaggegevens volgens KNMI weerstation als voor de beschikbare uurlijkse radargegevens. Dit is gedaan voor twee locaties: Wijhe en Barneveld. SWAP kalibraties zijn uitgevoerd met behulp van PEST 7 (Doherty, 2018/2021). PEST is gebruikt in de zogenaamde *estimation* mode<sup>4</sup>; Bijlage F geeft voorbeeld van een gebruikte invoerfile voor PEST.

Naast de gemeten tijdreeksen van bodemvochtgehalte en grondwaterstanden zijn ook gemeten bodemvochtgehalte bij drukhoogte -100 en -16000 cm gebruikt als observaties (zie van Dam en Gooren, 2021, tabel 13). Deze zijn toegevoegd om de ligging van de waterretentiekarakteristiek te 'forceren' door deze gemeten waarden; deze meetwaarden kregen een 10x zo grote weegfactor mee dan de tijdreeksobservaties.

Kalibraties zijn uitgevoerd voor twee geselecteerde locaties: voor locatie Wijhe was een vrij slechte overeenkomst tussen simulaties en metingen verkregen in hoofdstuk 3 en voor locatie Barneveld was de overeenkomst veel groter. Door voor beide locaties een kalibratie uit te voeren wordt inzicht verkregen in de eventuele kracht van de kalibratie: wordt de overeenkomst voor Wijhe dan veel beter, en treedt er nog een verbetering op voor Barneveld?

### 4.1 Wijhe

Na kalibratie worden de patronen in bodemvochtgehalten beter benaderd wanneer de neerslag volgens de KNMI gegevens worden beschouwd (Figuur 8; Tabel 4). De grondwaterstand in de zomer wordt gemiddeld vrij goed benaderd, alleen ontbreken in de simulaties de gemeten fluctuaties<sup>5</sup>.

Wanneer de neerslag via radar waarnemingen worden beschouwd is het resultaat van de kalibratie minder goed dan wanneer de neerslag via KNMI gegevens is gebruikt (Figuur 9; Tabel 4).

Bij de kalibratie eindigen een aantal parameters bij een vooraf opgegeven ondergrens- of bovengrenswaarde (Tabel 5, Tabel 6). De verandering van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek is te zien in Figuur 10.

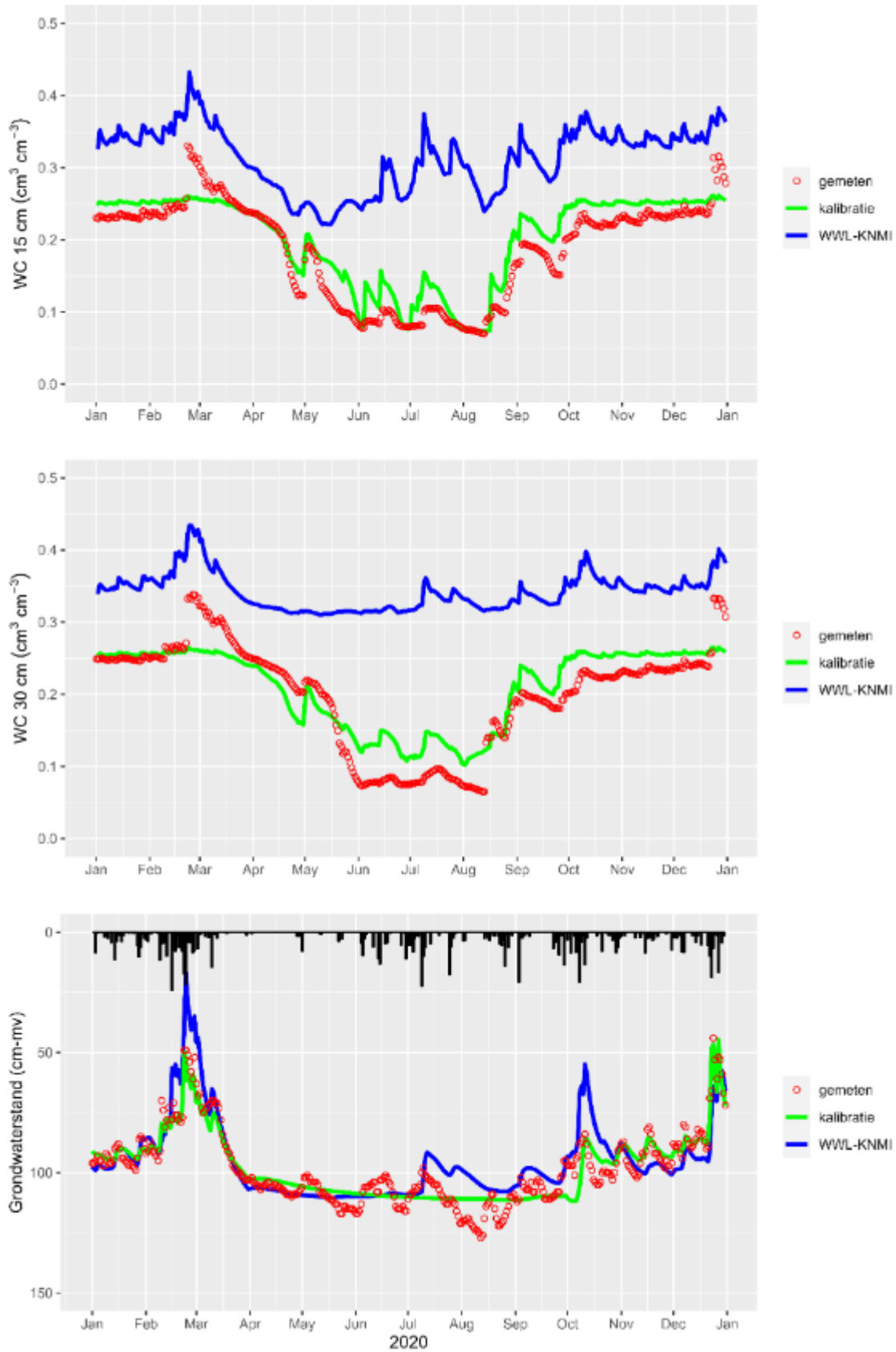
Een praktische bevinding is dat voor laag 1 het bodemvochtgehalte bij verzadiging geoptimaliseerd wordt op de waarde  $0.3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Bij een dichtheid van de vaste fase van  $2650 \text{ kg m}^{-3}$  zou dat betekenen dat de droge bulkdichtheid van die laag gelijk is aan  $1855 \text{ kg m}^{-3}$ . Dat zou betekenen dat die bovenlaag extreem verdicht is. Hierbij vermelden we de volgende kanttekeningen:

- de bodemvochtgehaltemeters zijn niet gekalibreerd voor de lokale grond;
- er zijn diverse andere processen met bijbehorende invoergegevens in het model aanwezig: wanneer hierin conceptuele fouten zitten of wanneer deze foutief zijn geparameteriseerd, dan kan dat van invloed zijn op de huidige kalibratieresultaten.

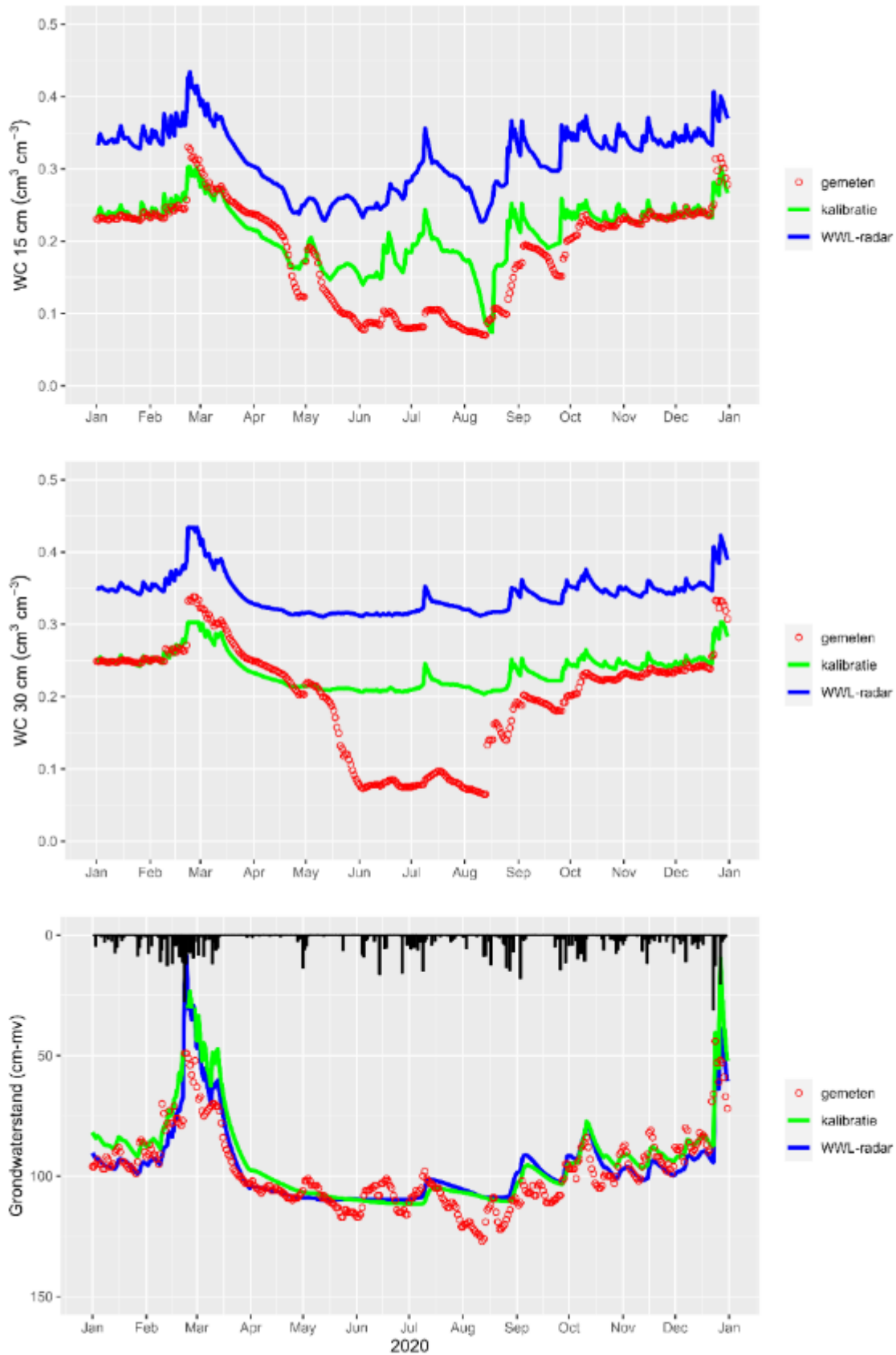
<sup>4</sup> Standaard wordt de Gauss-Marquardt-Levenberg method toegepast, zo ook hier. Voor 1 situatie is ook een kalibratie uitgevoerd op basis van de SCEUA-methode (een globale methode). Die kalibratie duurde extreem lang (> 7 d) en leverde een minder goed resultaat op.

<sup>5</sup> Een aparte kalibratie alleen op grondwaterstand waarbij allerlei drainage en onderrandvoorwaarde parameters werden gefit leverde ook geen fluctuaties in de zomer op





Figuur 8. Vergelijking tussen metingen en simulaties voor (blauw; WWL-KNMI) en na (groen) kalibratie voor locatie Wijhe: bodemvochtgehaltes op 15 en 30 cm, grondwaterstand (locatie Wijhe).



Figuur 9. Vergelijking tussen metingen en simulaties voor (blauw; WWL-radar) en na (groen) kalibratie voor locatie Wijhe: bodemvochtgehalten op 15 en 30 cm, grondwaterstand (locatie Wijhe).

Tabel 4. Overzicht goodness-of-fit parameters per locatie per run voor de bodemvochtgehalte op beide diepten en de grondwaterstand voor de basis run en de run na kalibratie (alleen jaar 2020, locatie Wijhe).

Variabele	Run	Neerslag	ME	RMSE	NSME	IoA	r
<b>WC 15 cm</b>	basis	KNMI	0.127	0.136	-1.073	0.325	0.537
		radar	0.128	0.135	-1.079	0.325	0.651
	kalibratie	KNMI	0.021	0.029	0.583	0.807	0.929
		radar	0.027	0.049	0.449	0.672	0.724
<b>WC 30 cm</b>	basis	KNMI	0.142	0.155	-1.342	0.299	0.443
		radar	0.142	0.153	-1.328	0.300	0.558
	kalibratie	KNMI	0.020	0.034	0.495	0.756	0.859
		radar	0.037	0.067	0.252	0.536	0.685
<b>GWL</b>	basis	KNMI	-0.032	0.096	0.404	0.691	0.700
		radar	-0.023	0.086	0.461	0.716	0.756
	kalibratie	KNMI	-0.001	0.08	0.534	0.772	0.788
		radar	-0.057	0.107	0.349	0.699	0.811

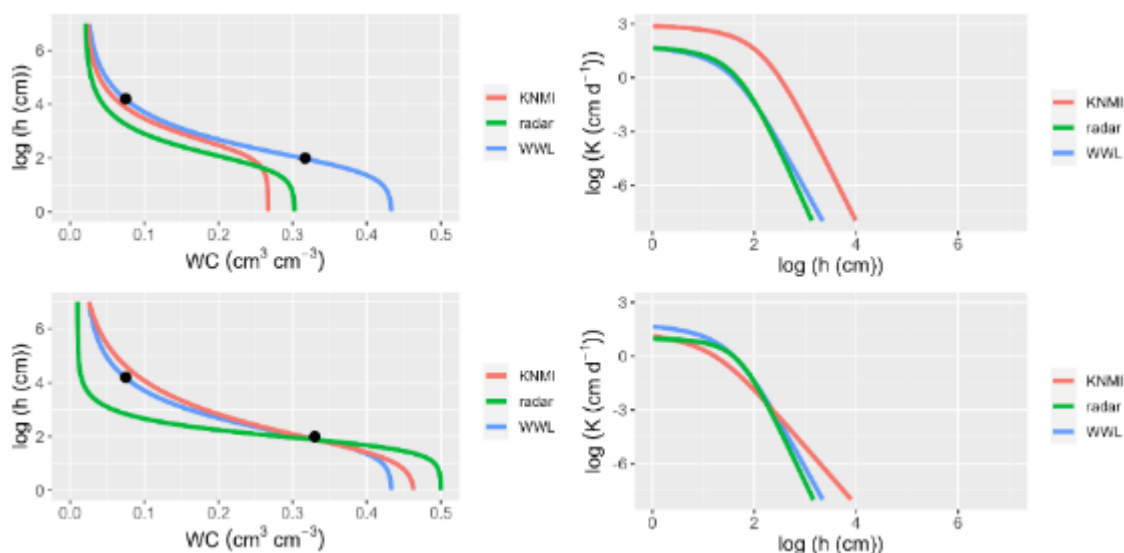
Tabel 5. Gekalibreerde Mualem – van Genuchten parameters (in rood) voor de simulaties met neerslag volgens KNMI en neerslag volgens radar (locatie Wijhe).

Casus	Laag	WCr	WCs	Alpha	N	Ks	Lab
<b>WWL</b>	1	0.02	0.433878	0.021645	1.34877	83.24164	7.202077
	2	0.02	0.433878	0.021645	1.34877	83.24164	7.202077
<b>KNMI</b>	1	0.02	0.3 <sup>#</sup>	0.008558	1.44197	702.76768	7.202077
	2	0.01	0.472555	0.029618	1.32109	13.04995	2.867967
<b>Radar</b>	1	0.02	0.302742	0.017965	1.47106	64.66764	7.202077
	2	0.01	0.5 <sup>§</sup>	0.016822	1.82000	10 <sup>#</sup>	2.867967

#: ondergrens; §: bovengrens

Tabel 6. Gekalibreerde drainage parameters (in rood) voor de simulaties met neerslag volgens KNMI en neerslag volgens radar (locatie Wijhe).

Casus	drares2	zbotdr2	level2a (WP)	level2b (ZP)
<b>WWL</b>	175	-115	-110	-90
<b>KNMI</b>	200	-128.335	-107.560	-97.171
<b>Radar</b>	205.699	-107.127	-120.692	-88.807



Figuur 10. Vergelijking van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken voor (blauw, WWL) en na kalibratie (rood: met KNMI neerslag; groen: met radar neerslag) voor bovenlaag (bovenste rij) en onderlaag (onderste rij) (locatie Wijhe). De twee zwarte symbolen geven de bodemvochtgehalten bij veldcapaciteit en verwelkingspunt zoals gegeven door van Dam en Gooren (2021, tabel13).

De gemeten bodemvochtgehalten bij veldcapaciteit en verwelkingspunt (van Dam en Gooren, 2021; Figuur 10) liggen op de curves volgens de BOFEK2020-Staringreeks bouwsteen. Na optimalisatie, waarbij deze twee meetpunten zijn meegenomen als observaties met een hogere weegfactor, blijken deze meetpunten geen dominante invloed te hebben op de gekalibreerde waterretentiekarakteristiek.

## 4.2 Barneveld

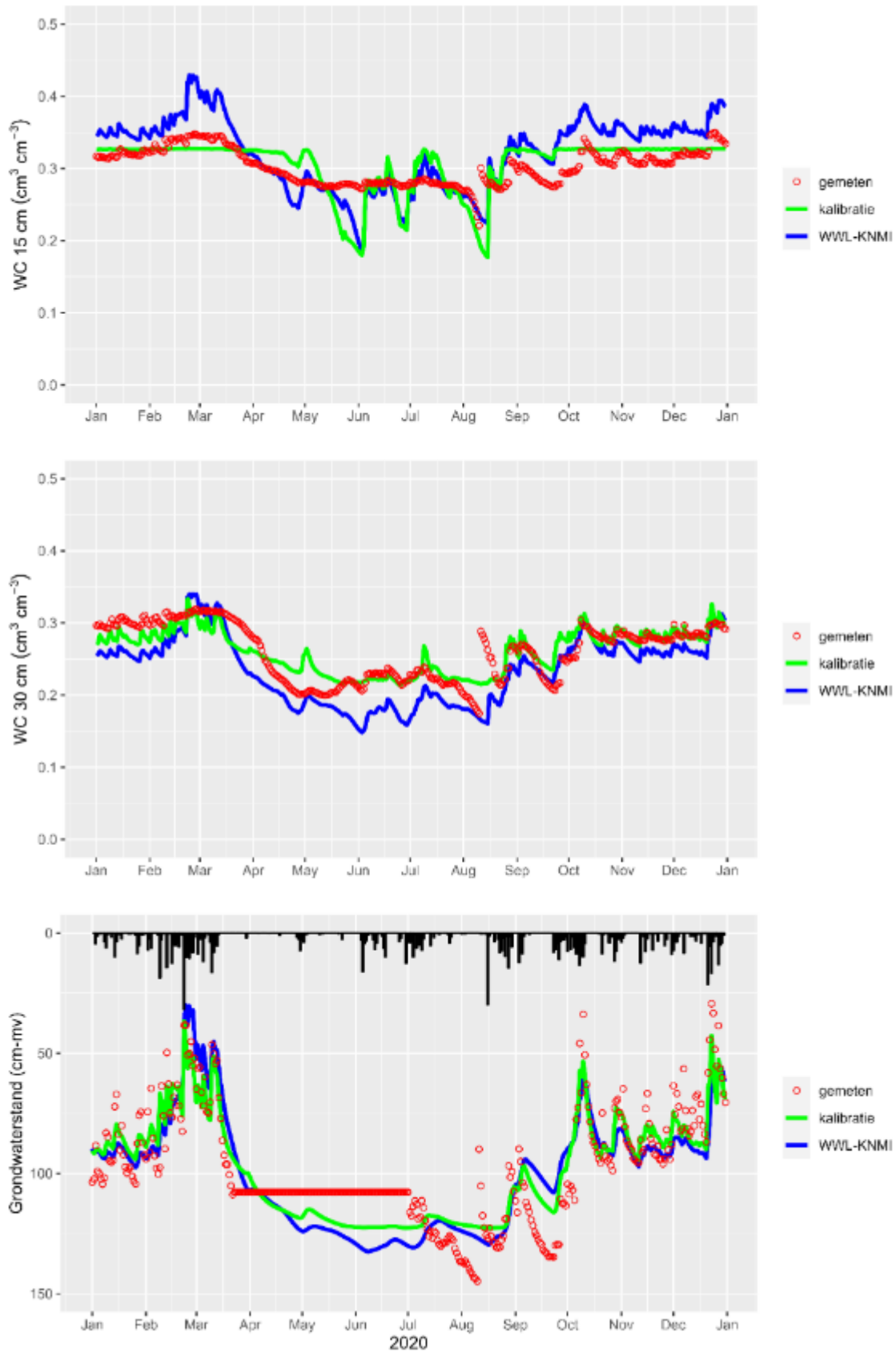
Behalve voor de Pearson r-coëfficiënt voor de bodemvochtgehalten op beide dieptes nemen alle *goodness-of-fit* maten toe na kalibratie (Figuur 11, Figuur 12, Tabel 7). Echter, voor bodemvochtgehalte op 15 cm blijft  $NSE < 0$ , hetgeen er op wijst dat het gemiddelde van de metingen een betere voorspeller is dan de gekalibreerde simulatieresultaten.

Natuurlijk zijn er momenten aan te wijzen waarop radar neerslag beter past bij de waargenomen stijging in bodemvochtgehalten, zoals bijvoorbeeld op 11 augustus 2020 bij locatie Barneveld. Op die dag werd nauwelijks neerslag gemeten bij het gebruikte KNMI weerstation.

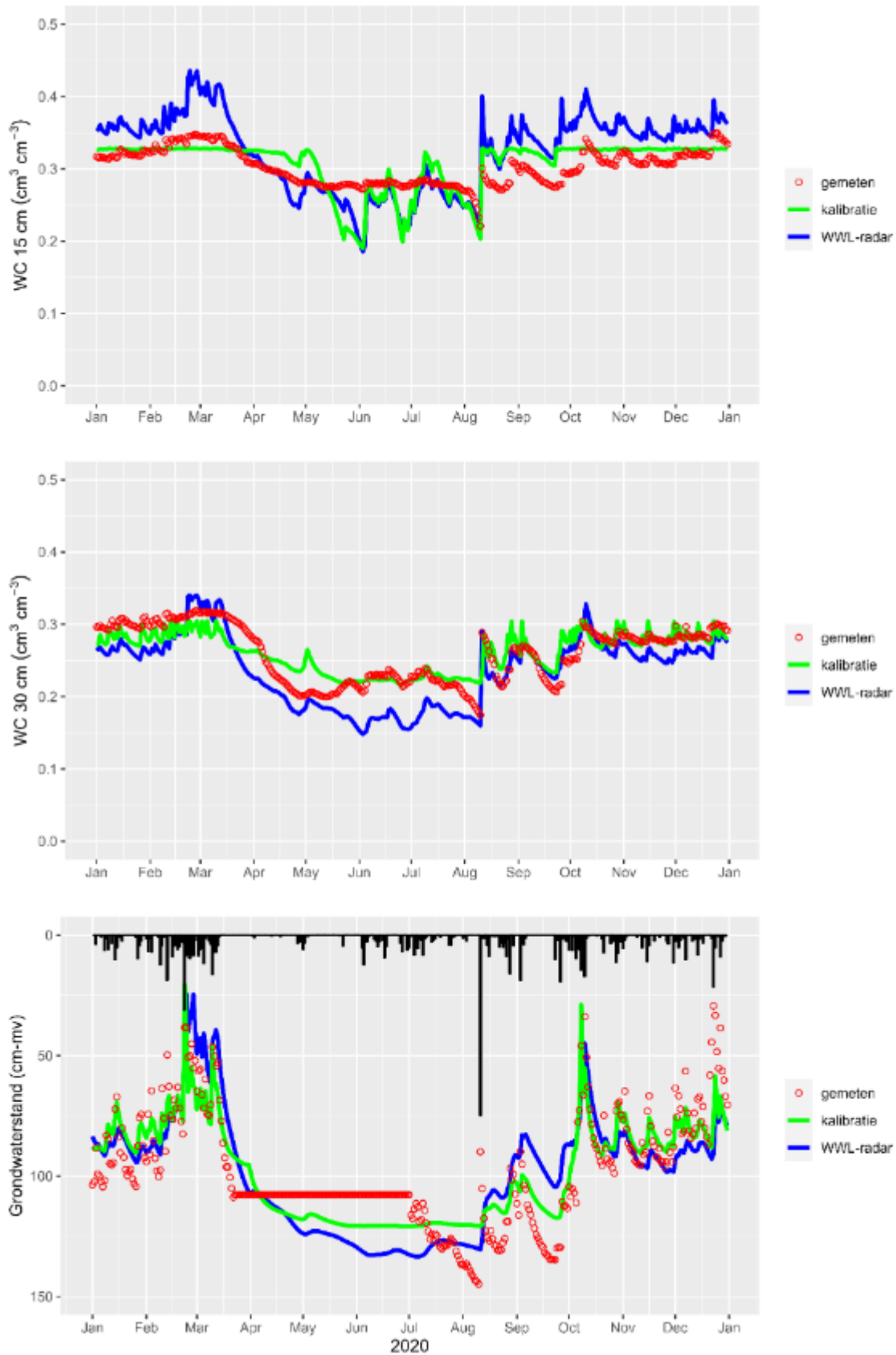
Ook voor deze locatie zien we dat enkele parameters geschat worden op de opgegeven ondergrens- of bovengrenswaarden (Tabel 8, Tabel 9). De verandering van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek is te zien in Figuur 13.

Ook hier zien we dat de waarden voor bodemvochtgehalte bij verzadiging vrij laag worden gekalibreerd, in de range 0.30 tot 0.34 (Tabel 8). Dat zou neerkomen op een droge bulkdichtheid van de orde 1749 – 1855 kg m<sup>-3</sup>.

Anders dan bij locatie Wijhe, liggen de gemeten bodemvochtgehalten bij veldcapaciteit en verwelkingspunt (van Dam en Gooren, 2021; Figuur 13) niet op de curves volgens de BOFEK2020-Staringreeks bouwsteen. Na optimalisatie, waarbij deze twee meetpunten zijn meegenomen als observaties met een hogere weegfactor, blijken deze meetpunten dicht in de buurt te liggen bij de gekalibreerde waterretentiekarakteristiek.



Figuur 11. Vergelijking tussen metingen en simulaties voor (blauw; WWL-KNMI) en na (groen) kalibratie voor locatie Wijhe: bodemvochtgehalten op 15 en 30 cm, grondwaterstand (locatie Barneveld).



Figuur 12. Vergelijking tussen metingen en simulaties voor (blauw; WWL-radar) en na (groen) kalibratie voor locatie Wijhe: bodemvochtgehalten op 15 en 30 cm, grondwaterstand (locatie Barneveld).

Tabel 7. Overzicht goodness-of-fit parameters per locatie per run voor de bodemvochtgehalte op beide diepten en de grondwaterstand voor de basis run en de run na kalibratie (alleen jaar 2020, locatie Barneveld).

Variabele	Run	Neerslag	ME	RMSE	NSME	IoA	r
<b>WC 15 cm</b>	basis	KNMI	0.018	0.036	-0.447	0.548	0.771
		radar	0.021	0.041	-0.669	0.512	0.733
	kalibratie	KNMI	0.003	0.029	-0.027	0.576	0.409
		radar	0.004	0.027	-0.005	0.581	0.447
<b>WC 30 cm</b>	basis	KNMI	-0.026	0.034	0.192	0.625	0.76
		radar	-0.024	0.033	0.212	0.633	0.791
	kalibratie	KNMI	0.001	0.021	0.552	0.744	0.725
		radar	0.001	0.021	0.538	0.725	0.747
<b>GWL</b>	basis	KNMI	0.023	0.145	0.358	0.687	0.66
		radar	0.012	0.169	0.254	0.64	0.562
	kalibratie	KNMI	0.004	0.108	0.507	0.753	0.784
		radar	-0.001	0.114	0.488	0.741	0.759

Tabel 8. Gekalibreerde Mualem – van Genuchten parameters (in rood) voor de simulaties met neerslag volgens KNMI en neerslag volgens radar (locatie Barneveld).

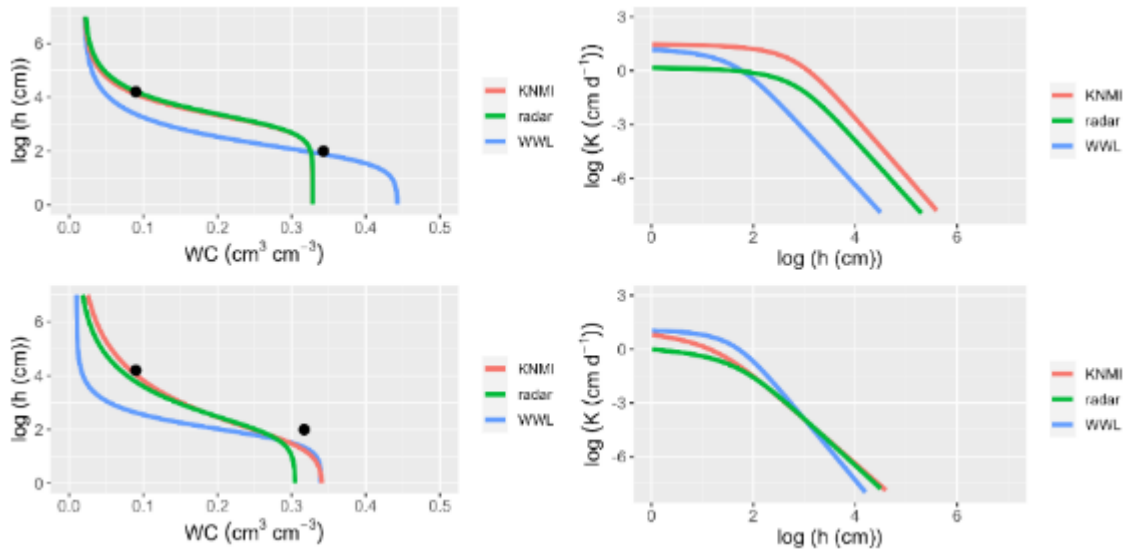
Casus	Laag	WCr	WCs	Alpha	N	Ks	Lambda
<b>WWL</b>	1	0.02	0.44279	0.014993	1.50488	19.07724	0.139209
	2	0.01	0.33981	0.017243	1.703395	12.36681	0.0001
<b>KNMI</b>	1	0.02	0.32827	0.001 <sup>#</sup>	1.576188	30 <sup>§</sup>	0.139209
	2	0.01	0.34181	0.033160	1.241948	20.15662	0.0001
<b>Radar</b>	1	0.02	0.32863	0.001 <sup>#</sup>	1.529149	1.512460	0.139209
	2	0.01	0.30474	0.012415	1.302948	1.781224	0.0001

#: ondergrens; §: bovengrens

Tabel 9. Gekalibreerde drainage parameters (in rood) voor de simulaties met neerslag volgens KNMI en neerslag volgens radar (locatie Barneveld).

Casus	drares2	zbotdr2	level2a (WP)	level2b (ZP)
<b>WWL</b>	175	-115	-110	-90
<b>KNMI</b>	88.991	-127.152	-95.505	-111.152
<b>Radar</b>	64.385	-200 <sup>#</sup>	-89.763	-112.067

#: ondergrens



Figuur 13. Vergelijking van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken voor (blauw, WWL) en na kalibratie (rood: met KNMI neerslag; groen: met radar neerslag) voor bovenlaag (bovenste rij) en onderlaag (onderste rij) (locatie Barneveld). De twee zwarte symbolen geven de bodemvochtgehalten bij veldcapaciteit en verwelkingspunt zoals gegeven door van Dam en Gooren (2021, tabel13).



## 5 Algemene discussie, bevindingen en aanbevelingen

### 5.1 Algemene discussie

In het kader van landelijke droogtemonitoring op zandgronden worden sinds begin 2020 op elf locaties bodemvochtgehalten op twee dieptes gemonitord, en in de nabijheid zijn ook grondwaterspiegeldieptes gemeten. De meetgegevens zijn digitaal te volgen op <https://droogteportaal.nl/droogteportaal/web/>. Inmiddels zijn op dat portaal voor meerdere locaties actuele metingen van bodemvochtgehalten metingen beschikbaar. Ook in lopend onderzoek in het kader van KLIMAP zijn en/of worden bodemvochtgehalten en drukhoogtes gemeten in diverse proeven op locaties De Moer, Moergestel, De Glind, Helvoirt, Reusel (allen Noord-Brabant) en Hengelo (Gelderland). Het hoofddoel van dergelijke monitoringsactiviteiten is het inzicht geven in de actuele toestand en het gedrag van het bodemvocht (in termen van bodemvochtgehalte en/of van drukhoogte/zuigspanning) onder invloed van verdroging en vernatting zoals bepaald door het weer en/of hydrologische maatregelen. Naast dat dergelijke meetreeksen op zichzelf al goede informatie geven, kunnen dergelijke meetreeksen ook gebruikt worden om simulatiemodellen te toetsen (valideren). In deze studie hebben we uit deze elf locaties zes graslandlocaties gekozen waarvoor SWAP-WOFOST simulaties zijn uitgevoerd. Als basisvoer zijn hiervoor SWAP-WOFOST invoerbestanden verkregen uit de Waterwijzer Landbouw maatwerk database. In eerste instantie zijn voor deze locaties de SWAP-WOFOST simulaties rechtstreeks vergeleken met de gemeten bodemvochtgehalten en gemeten grondwaterspiegeldieptes. Voor twee locaties zijn ook parameterkalibraties uitgevoerd.

### 5.2 Bevindingen

Een 'perfecte' overeenkomst tussen gemeten en gesimuleerde (al dan niet na kalibratie) bodemvochtgehalten op twee dieptes en grondwaterstand is niet verkregen. Voor sommige locaties werd het bodemvochtgehalte (zonder kalibratie) overschat, en voor enkele andere locaties was de orde grootte in overeenstemming. Veranderingen op korte termijn kwamen redelijk overeen, hoewel er soms ook momenten waren dat dit niet het geval was. Er is een aantal redenen te noemen waarom verschillen tussen metingen en simulaties kunnen optreden:

- De bodemvochtgehalte-sensoren zijn niet geijkt voor de lokale bodems. Dat betekent dat de absolute waarden van de gemeten bodemvochtgehalten niet exact zijn. Zeker wanneer modellen worden gekalibreerd op niet-gekalibreerde en niet-gevalideerd metingen, kan dit leiden tot extreme waarden van de te kalibreren parameters.
- Er zijn veel standaard invoergegevens gebruikt zoals gehanteerd in Waterwijzer Landbouw. Die instellingen gaan ervan uit dat het standaard landbouwkundige of graslandsituaties betreft. De meetlocaties van de droogtemonitoring liggen alle in niet-productie-grasland situaties; het is dus aannemelijk dat het gras ter plaatse onderhevig is aan afwijkend management (maaien, beweiden, bemesten, overig beheer). Dat kan mede de oorzaak zijn dat op WWL gebaseerde simulaties afwijken van de lokale werkelijkheid.
- Wanneer dat laatste het geval is, of wanneer andere invoergegevens/procesbeschrijvingen incorrect zijn geweest, kan dit leiden tot foutieve inschatting van de parameter-kalibratie. Dit ligt dan niet aan de veldmetingen zelf.

Een belangrijke randvoorwaarde is de (lokale) neerslag. In deze studie zijn simulaties uitgevoerd met zowel neerslag zoals gemeten in een nabijgelegen KNMI weerstation als met neerslag afgeleid uit dubbel-gevalideerde radarmetingen. Het is niet gebleken dat per definitie de lokale radarneerslag betere overeenkomsten geeft met de gemeten bodemvochtgehalten en grondwaterstanden. Omdat de verschillen tussen gegevens van een KNMI weerstation inzake neerslag en lokale 'radar-neerslag' niet erg groot waren, is het dus aannemelijk dat overige factoren bepalend zijn geweest in waargenomen verschillen tussen metingen en simulaties.

Goede kennis van lokale condities is belangrijk om goede modellen te maken. Die kennis is niet specifiek verzameld voor deze studie, maar er is getoetst of ook met relatief grove kennis van de randvoorwaarden, toch een goede overeenkomst tussen model en meting kon worden behaald. Soms gaat dat goed, soms ook niet.

Er was een vrij goede overeenkomst te zien tussen de gemeten en gesimuleerde dynamiek van het bodemvochtgehalte (zeker na transformatie). Dat betekent dat het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST geschikt is voor het doorrekenen van

scenario's betreffende de interactie tussen grondwater en bodemvochtgehalte en betreffende de effecten van hydrologische veranderingen of droogte op het systeemgedrag, inclusief gewasopbrengsten.

## 5.3 Aanbevelingen

Indien in de toekomst bodemvocht-monitoringslocaties worden gekozen waarmee ook simulatiemodellen gekalibreerd kunnen worden, dan wordt aanbevolen om de bodemvochtgehaltesensoren voor de lokale bodem te kalibreren; eventueel af en toe in het veld ringmonsters te steken en daarin het bodemvochtgehalte te meten zodat de meetwaarden hierop gecorrigeerd kunnen worden. Tevens wordt aanbevolen bij aanvang in een ringmonster de lokale droge bulkdichtheid te meten.

Naast een profielbeschrijving van de lokale bodem is het goed om overige eenvoudige veldwaarnemingen uit te voeren, zoals de aanwezigheid van buisdrainage (inclusief installatiediepte en afstand tussen de buizen), idem voor sloten en eventueel greppels, bepaling maaiveldhoogte (m+NAP) ter hoogte van de sensoren en ter hoogte van de dichtstbijzijnde grondwater peilbuis. Als deze peilbuis niet in de buurt staat (bijv. > 100 m verwijderd), dan wordt aanbevolen een nieuwe peilbuis te plaatsen ter meting van de freatische grondwaterstand.

De SWAP-WOFOST simulaties zijn uitgevoerd met versie 4.2.36 (september, 2022). Hierbij is gebruik gemaakt van het macroscopische droogtestress concept van Feddes en het zuurstofstress concept van Bartholomeus, inclusief Jarvis compensatie. In de toekomst zal in SWAP-WOFOST ook de combinatie van droogtestress via microscopische wateropname en zuurstofstress mogelijk zijn en zal het mogelijk zijn om rekening te houden met adaptieve wortelverdeling. Dan zou kunnen worden nagegaan of hiermee andere en betere overeenkomsten tussen metingen en simulaties verkregen kunnen worden.

In het kader van in het onderzoeksproject 'Droogte Zandgronden Nederland' is eerder gekeken naar hoe meteorologische droogte doorwerkt in droogte van bodemvocht en grondwater (zie <http://server.droogteportaal.nl/Droogte/> en van den Eertwegh et al., 2021). Dat was met metingen voor de periode van één jaar. Nu we inmiddels metingen hebben voor drie verschillende weerjaren, kan de interactie tussen deze droogtecomponenten verdiept worden.

In dit onderzoek zijn gegevens van het bodemvochtmeetnet <https://droogteportaal.nl/droogteportaal/web/> gebruikt om na te gaan hoe die meetreeksen zich verhouden tot SWAP-WOFOST simulaties. Uiteraard hebben de meetreeksen ook hun intrinsieke meerwaarde doordat ze inzicht verschaffen in het tijdverloop van het bodemvocht op een bepaalde diepte. Daarmee dragen ze bij aan het 'early warning' systeem voor droogtemonitoring in de wortelzone. Wel is het goed te bedenken dat het gedrag van de bodemvochtgehalte-sensoren mede bepaald wordt door de bodemeigenschappen en de bewortelingsdiepte. De bewortelingsdiepte verdient ook extra onderzoeks-aandacht. Op basis van simulaties zou inzicht verkregen kunnen worden op welke dieptes per bodemprofiel het beste gemeten kan worden om een goede dynamiek te registreren. Hetzelfde geldt voor de invloed van de gehanteerde bewortelingsdiepte en van het effect van hysteresis in de waterretentiecurve.

In het KLIMAP project worden op meerdere proeflocaties naast bodemvochtgehaltes op diverse dieptes ook drukhoogtes op diverse dieptes gemeten. Deze kunnen dan in onderlinge samenhang bekeken worden, maar ook de absolute waarden van de gemeten drukhoogtes kunnen inzicht verschaffen in de energiestatus van bodemvocht. In veel gevallen is die bepalend of plantenwortels gemakkelijk of moeilijk water kunnen opnemen. Eerste metingen met eenvoudige sensoren voor het meten van drukhoogte in veldproeven met subirrigatie in Horst-America en Proefboerderij Rusthoeve indiceren dat deze belangrijke aanvullende informatie opleveren ten opzichte van bodemvochtgehaltes (mondelijke mededeling Ruud Bartholomeus, KWR).

## 6 Literatuur

- Doherty, J. 2018/2021. PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual, 7th Edition. Part I: PEST, SENSAN and Global Optimisers / Part II: PEST Utility Support Software. Watermark Numerical Computing (available at: <https://pesthompage.org/>)
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, & P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands.
- Projectteam Beleidstafel Droogte. 2019. Nederland beter weerbaar tegen droogte Eindrapportage Beleidstafel Droogte. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Van Dam, J.C., en H.P.A. Gooren, 2021. Bodemvochtmetingen in zandgebieden van Hoog Nederland. Deelrapport van het project 'Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland'. WUR-SLM, Wageningen.
- Van den Eertwegh, G.A.P.H., R. Bartholomeus, P. de Louw, J. P. M. Witte, J.C. van Dam, D. van Deijl, P. Hoefsloot, C. Clevers, D. Hendriks, M. van Huijgevoort, J. Hunink, N. Mulder, J. Pouwels en J. de Wit, 2019. Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Rapportage Fase 1: ontwikkeling van uniforme werkwijze voor analyse van droogte en tussentijdse bevindingen. KnowH2O, KWR, WUR, HSS, FWE.
- Van den Eertwegh, G.A.P.H., R. Bartholomeus, P. de Louw, J. P. M. Witte, J.C. van Dam, D. van Deijl, P. Hoefsloot, M. van Huijgevoort, J. Hunink, I. America, J. Pouwels en J. de Wit, 2020. Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland. Het verhaal: analyse van droogte 2018 en 2019 en tussentijdse bevindingen. KnowH2O, KWR, WUR, HSS, FWE.
- Van den Eertwegh, G., P. de Louw, J.-Ph. Witte, M. van Huijgevoort, R. Bartholomeus, D. van Deijl, J. van Dam, J. Hunink, I. America, J. Pouwels, P. Hoefsloot en J. de Wit. 2021. Eindrapport project 'Droogte Zandgronden Nederland' (Fase 3): Droogte in zandgebieden van Zuid-, Midden- en Oost-Nederland: het verhaal - analyse van droogte 2018 en 2019 en bevindingen. KnowH2O, KWR, WUR, HSS, FWE.
- Vrugt, J. A., ter Braak, C. J. F., Gupta, H. V., Robinson, B. A., 2009. Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling? Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 23 (7), 1011–1026. DOI: 10.1007/s00477-008-0274-y (zie ook: <https://dream.r-forge.r-project.org/>)
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw (M. Mulder, M. Hack-ten Broeke, R. Bartholomeus, J. van Dam, M. Heinen et al.). 2018. Waterwijzer Landbouw: Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. Rapport 2018-48. STOWA, Amersfoort. <http://www.waterwijzer.nl/Upload/waterwijzer/Publicaties/STOWA%202018-48%20WWL%20defversie.pdf>

### **Voorbeelden toepassingen SWAP-PEST:**

- De Wit, J., M. van Huijgevoort, G. van den Eertwegh, D. van Deijl, R. Bartholomeus. 2021. Technische rapportage veldproeven met watermaatregelen Stegeren. Ontwerp en monitoring van vijf veldproeven met (automatisch gestuurde) regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuw in Stegeren (2017-2020). KWR-rapport 2021.029, KWR, Nieuwegein.
- Faúndez Urbina, C.A., J.C. van Dam, R.F.A. Hendriks, F. van den Berg, H.P.A. Gooren and C.J. Ritsema. 2019. Water Flow in Soils with Heterogeneous Macropore Geometries. Vadose Zone J. 18:190015. doi:10.2136/vzj2019.02.0015
- Groenendijk, P., M. Heinen, G. Klammler, J. Fank, H. Kupfersberger, V. Pisinaras, A. Gemitzi, S. Peña-Haro, A. García-Prats, M. Pulido-Velazquez, A. Perego, and M. Acutis. 2014. Performance assessment of nitrate leaching models for highly vulnerable soils used in low input farming based on lysimeter data. Science of the Total Environment, 499: 463–480.
- Van Bakel, P.J.T. 2002. Bepaling van de lekweerstanden met SWAP-PEST. In: Moderne modelkalibratie in de praktijk; het automatisch ijken van grondwatermodellen; bundel van lezingen die op 7 maart 2001 zijn gehouden tijdens een bijeenkomst van de Nederlandse Hydrologische Vereniging / Boukes, H., Utrecht : NHV - ISBN 9789080356559 - p. 99 - 107.

## 7 Bijlage A      Overzicht basisgegevens

In Tabel A1 zijn de GxG gegevens voor de negen locaties gegeven zoals afgeleid uit de gegevens verkregen van:

- A: Wageningen University (WU; Van Dam & Gooren, 2021)
- B: KWR (Janine de Wit, pers. comm.)

Hier valt op dat:

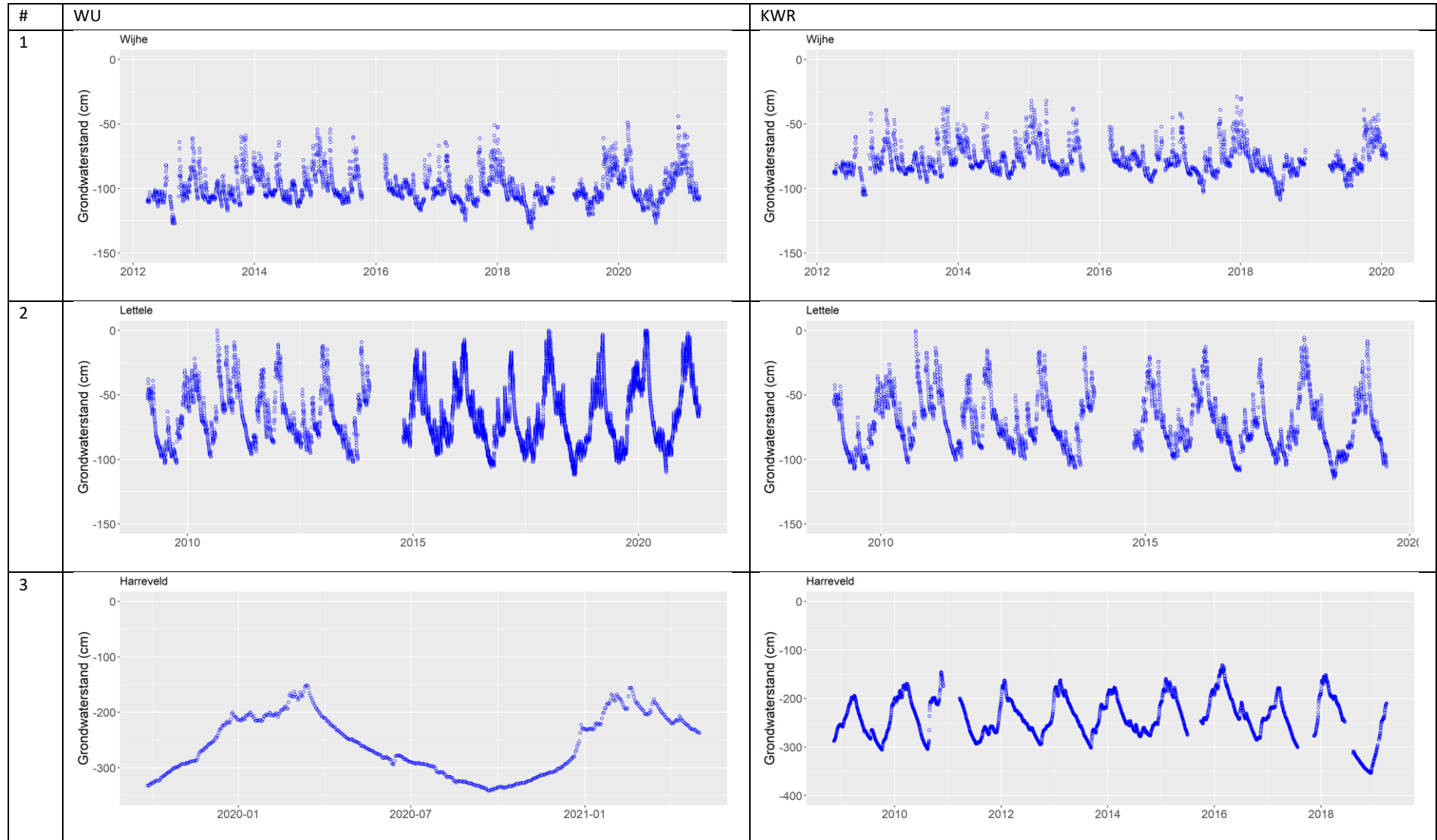
- voor 3 locaties verschillende buizen zijn gehanteerd
- WU en KWR verschillende maaiveldhoogtes hanteren: KWR gebruikt maaiveldhoogte ter plaatste van de buis, en WU mogelijk de maaiveldhoogte ter plaatste van de bodemvochtgehaltesensoren? De grondwaterstandsbuizen staan vaak buiten de percelen in een berm of in stukje bos. De sensoren staan wel in de percelen. De afstand tussen grondwaterstandsbuizen en sensoren varieert van 2 tot circa 30 m. Over die afstand was er soms een duidelijk verschil in maaiveldhoogte. De maaiveldhoogten bij aanpak A zijn afgeleid uit de meetlocatie voor bodemvocht en AHN3.
- deze afwijkingen variëren van enkel cm's tot enkele dm's in GxG
- deze afwijkingen leiden soms tot verschillende Gt klassen
- deze afwijkingen leiden tot verschillende posities in de WWL maatwerk-database
- voor locatie Rijsbergen de GWL verlopen verschillend zijn terwijl naar dezelfde meetbuis wordt verwezen

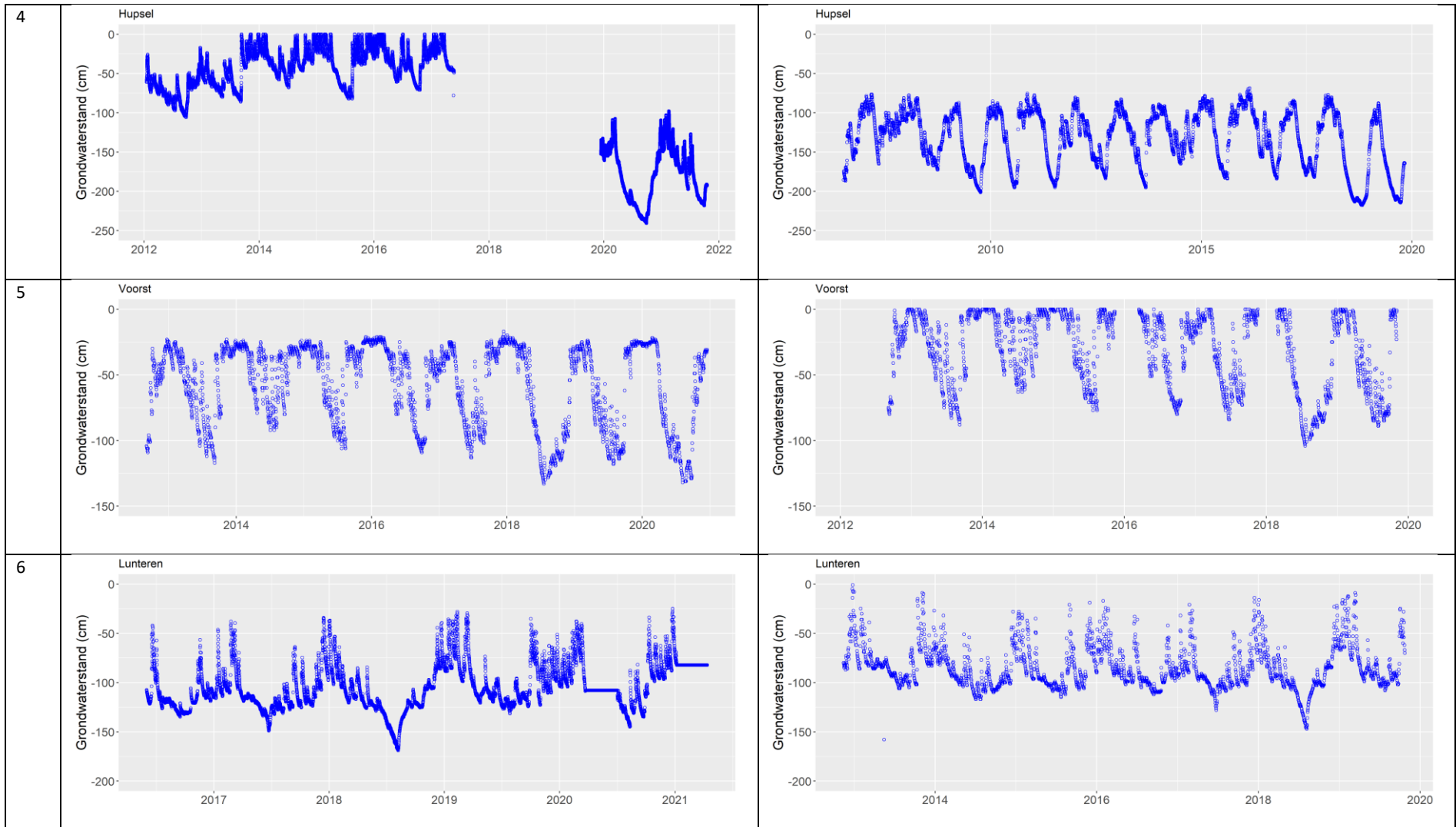
Tabel A1: geschatte GHG, GLG en Gt voor de 11 locaties. Omdat vaak per locatie de meetreeks te kort is voor een formele GxG bepaling zijn deze berekende waarden een schatting gebaseerd op een te korte meetreeks. Op dagen met uurlijkse waarnemingen zijn hierbij de daggemiddelden gebruikt.

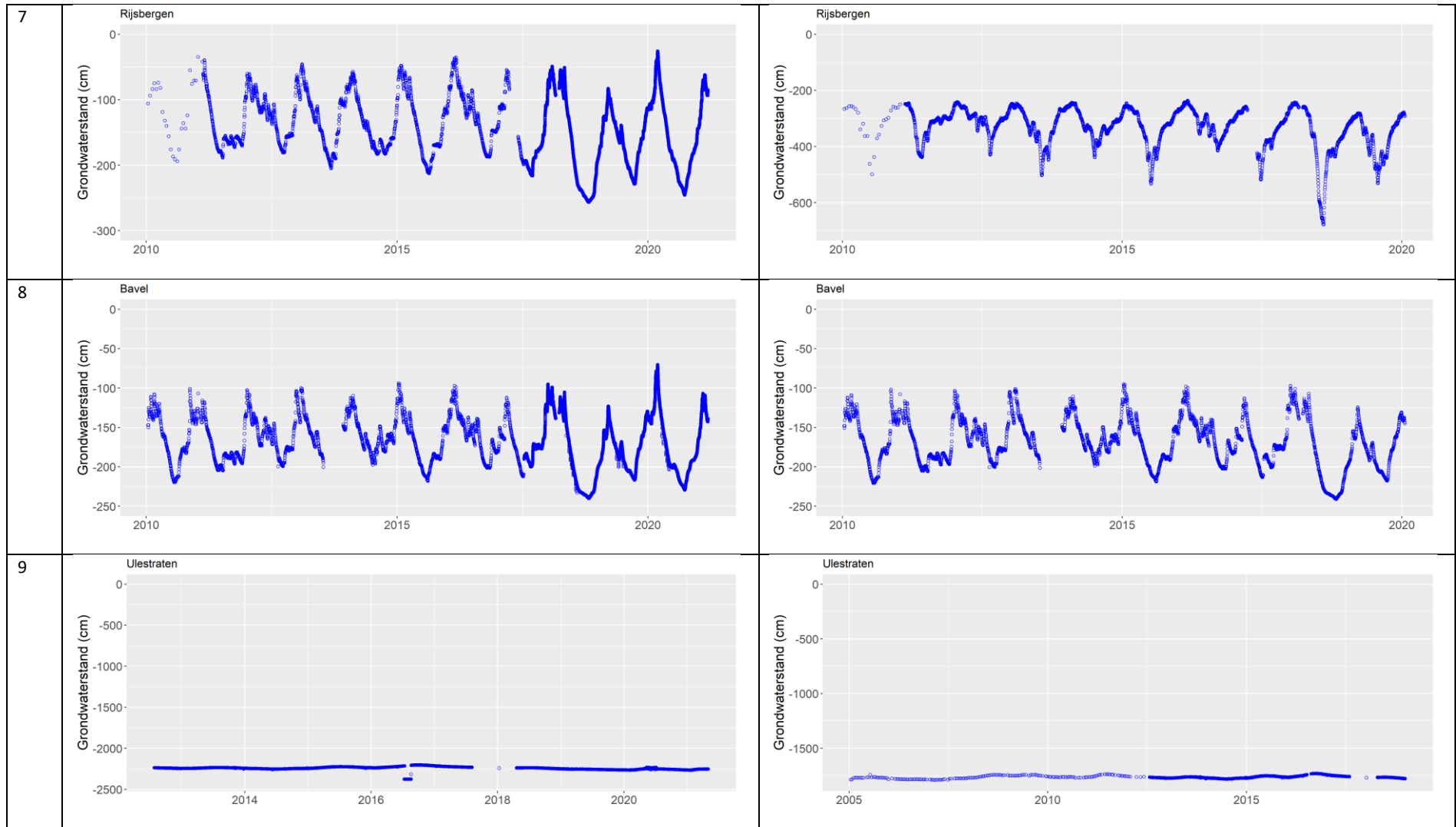
#	Locatie	A						B					
		GHG	cm-mv	GLG	Gt	m+NAP	Buis	Opmerking	GHG	cm-mv	GLG	Gt	m+NAP
1	Wijhe/ Raalte	-71	-114	IVu	2.57	27FC109A	mv bij sensoren en niet bij buis?	-51	-91	IVu	2.35	27FC109A	
2	Lettele	-25	-94	IIIa	7.80	27HG610B	mv bij sensoren en niet bij buis?	-32	-99	IIIb	7.845	27HG610B	
3	Harreveld	-183	-336	VIII	19.82	B41B0559	locatie buis?	-184	-295	VIII	20.84	B41B0446	Andere buis
4	Hupsel (meteoveld)	-29	-101	IIIb	29.20	B34G1425	trendbreuk tussen medio 2017 en eind 2019	-89	-179	VII	29.26	B34G0363	Andere buis; volgens DINO: mv = 29.18
5	Voorst/ Klarenbeek	-25	-103	IIIb	8.64	B33E1260	mv bij sensoren en niet bij buis?	4	-72	IIa	8.35	B33E1260	
6	Lunteren/ Barneveld	-58	-132	VI	11.90	B32H1219	mv bij sensoren en niet bij buis?	-39	-111	IIIb	11.69	B32H1219	
7	Rijsbergen	-66	-202	VI	8.57	B50A0149	idem	-256	-445	VIII	8.51	B50A0149	
8	Bavel	-120	-209	VII	4.37	B50B0582	idem	-122	-207	VII	4.38	B50B0582	
9	Ulestraten	-2234	-2272	VIII	119.53	B62A0448	idem	-1756	-1773	VIII	114.8	B62A0448	
10	Heerlen/ Terworm	-157	-539	VIII	91.59	B62B4300		-157	-539	VIII	91.59	B62B4300	
11	Meeuwenkamp	-27	-108	IIIb	6.60	B32G1155	trendbreuk: medio 2015 en medio 2016; maaiveldhoogte niet in DINO	4	-36	Ia	5.76	B32G0415	Andere buis

Wijhe/Raalte	verschuiving a.g.v. verschil in maaiveldhoogte
Lettele	miniem verschil a.g.v. verschil in maaiveldhoogte
Harreveld	
Hupsel	
Voorst/Larenbeek	verschuiving a.g.v. verschil in maaiveldhoogte
Lunteren/Barneveld	verschuiving a.g.v. verschil in maaiveldhoogte
Rijsbergen	dezelfde buis, maar verschil in patronen ??? Gegevens opnieuw opgevraagd vanuit DINOloket: uit figuur hieronder blijkt dat de data in bestand "B50A0149.txt" niet correct zijn.
Bavel	identiek; merk op dat verloop vrij synchroon loopt met linker grafiek van Rijsbergen
Ulestraten	diep = diep: verschuiving a.g.v. verschil in maaiveldhoogte
Heerlen/Terworm	
Meeuwenkamp	enorm verschil in gedrag grondwaterstandsverloop op relatief korte afstand

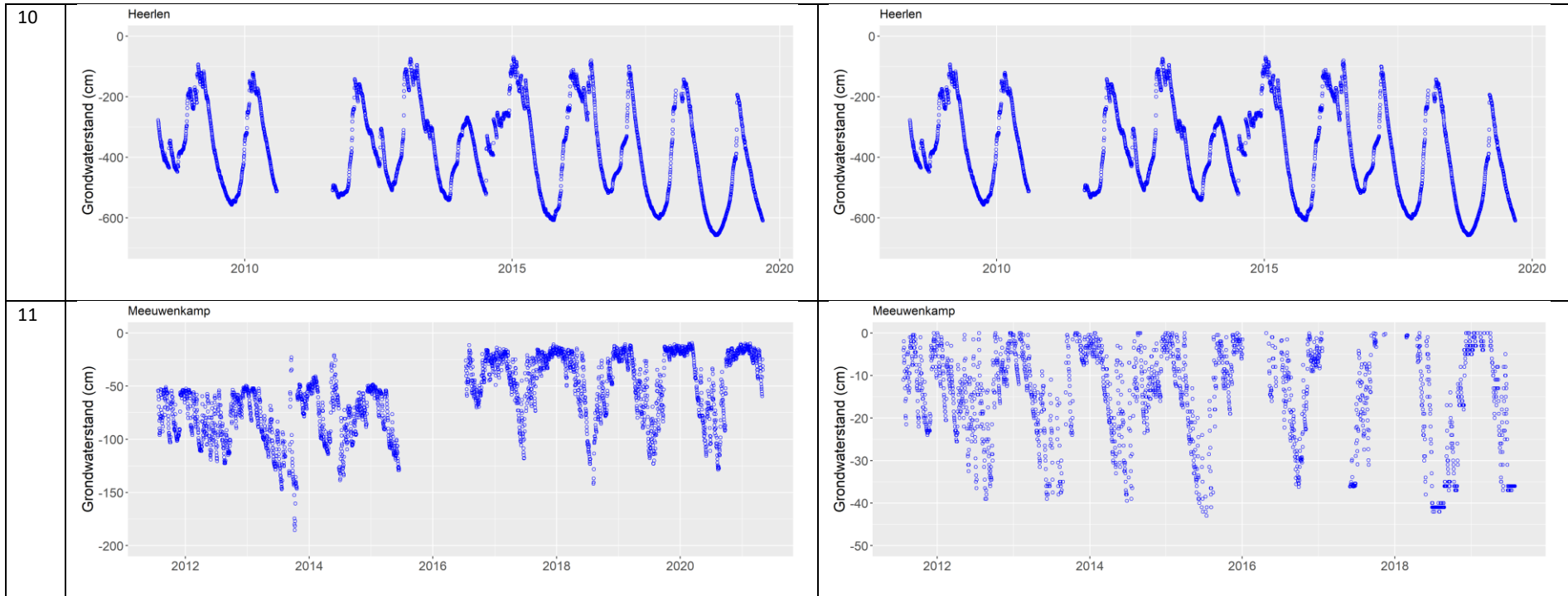
In onderstaande figuren zijn de gemeten grondwaterstanden (na)bij voor de 11 locaties geplot.





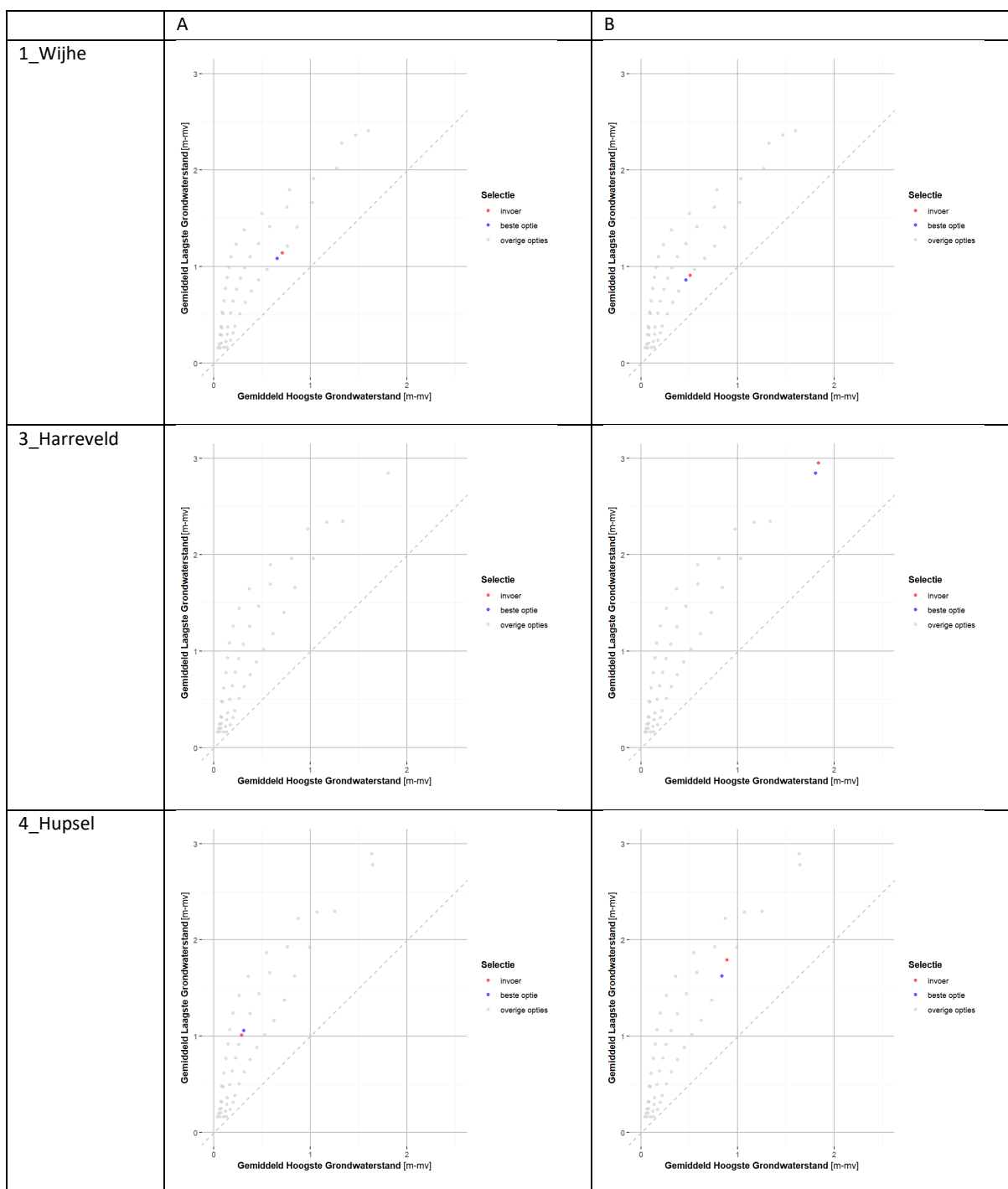


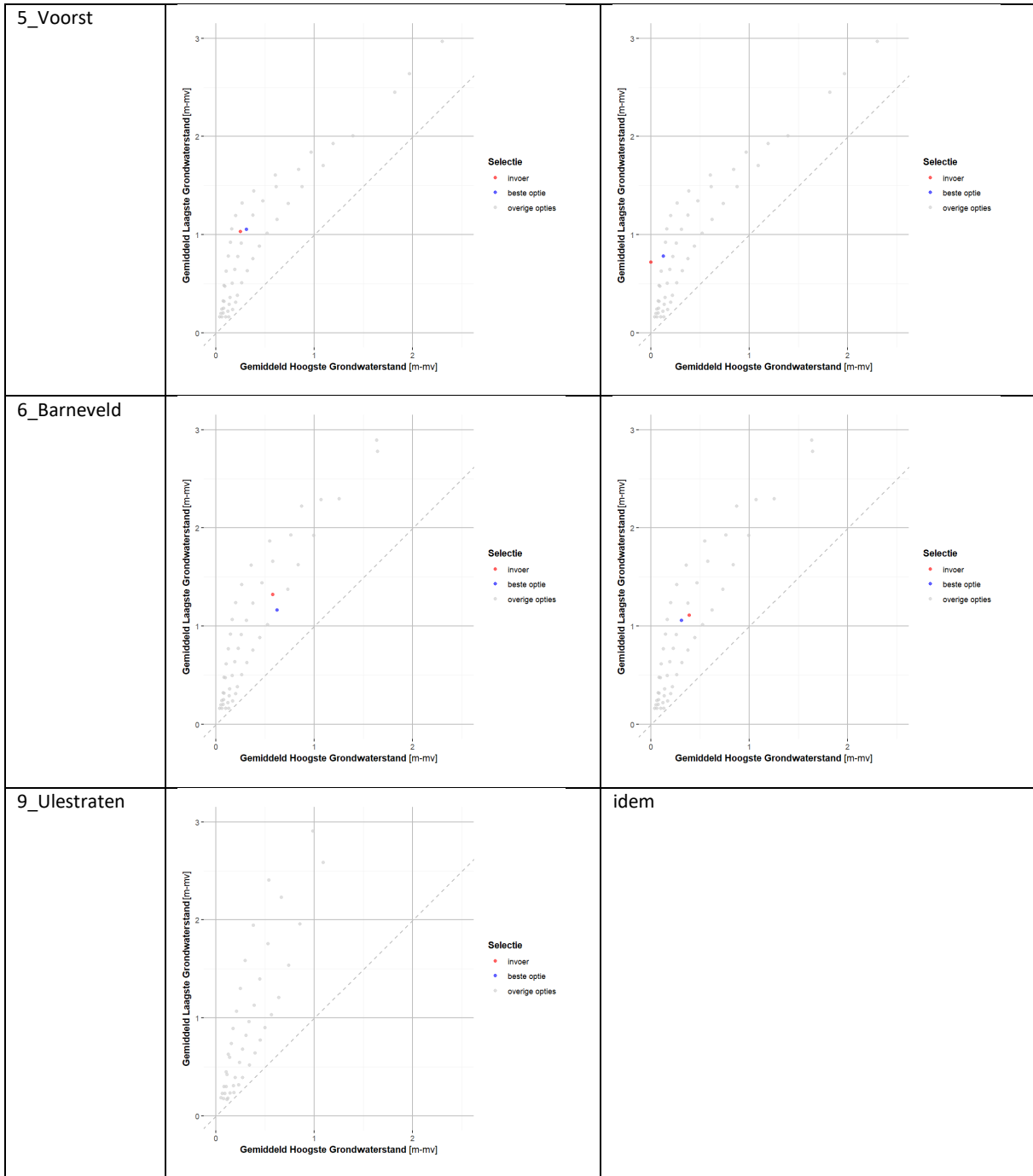




## 8 Bijlage B Gekozen WWL-maatwerk simulaties per locatie

Voor Harreveld (A) en Ulestraten vallen de gekozen maatwerk runs buiten het bereik van de getoonde figuren. Voor Ulestraten is de gemeten grondwaterstand veel dieper dan de dikte van de SWAP bodemkolom die in WWL wordt gehanteerd. Hierdoor is het beter om voor Ulestraten de onderrandvoorwaarde te wijzigen in vrije drainage.





## 9 Bijlage C Overzicht onder- en zijrandvoorwaarden

SINAVE: positief = kwel; negatief = wegzijging

DRARES./INFRES.: indien 1 waarde gegeven dan DRARES. = INFRES.

LEVEL.: zomerpeil/winterpeil; zomerperiode: 1 april – 30 september; winterperiode: 1 oktober – 31 maart

	1_Wijhe A	B	3_Harreveld A	B	4_Hupsel A	B	5_Voorst A	B	6_Barneveld A	B
<b>Onder RV</b>										
SINAVE	0.02	0.06	-0.08	-0.08	0.04	-0.02	0.04	0.08	0.02	0.04
SINAMP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SINMAX	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
<b>Zij/drain RV</b>										
DRARES1/INFRES1	980	674.67	4266.67	2133.33	1642.67	1317.33	1642.67	2176	980	1642.67
L1	1960	1349.33	4266.67	4266.67	1642.67	2634.67	1642.67	1088	1960	1642.67
ZBOTDR1	-165	-131	-250	-250	-148	-199	-148	-114	-165	-148
LEVEL1	-140/-160	-110/-126	-215/-245	-215/-245	-125/-143	-170/-194	-125/-143	-95/-109	-140/-160	-125/-143
DRARES2/INFRES2	175	110	1000	500	280	360	280	340	175	280
L2	350	220	1000	1000	280	520	280	170	350	280
ZBOTDR2	-115	-105	-145	-145	-110	-125	-110	-100	-115	-110
LEVEL2	-90/-110	-70/-86	-140/-170	-140/-170	-80/-98	-110/-134	-80/-98	-60/-74	-90/-110	-80/-98
DRARES3/INFRES3	30/10000	30/10000	30/10000	30/10000	30/10000	30/10000	30/10000	30/10000	30/10000	30/10000
L3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ZBOTDR3	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15
LEVEL3	-90/-110	-70/-86	-140/-170	-140/-170	-80/-98	-110/-134	-80/-98	-60/-74	-90/-110	-80/-98

NB: voor 9\_Ulestraten dient vrije drainage onderrandvoorwaarde gebruikt te worden.

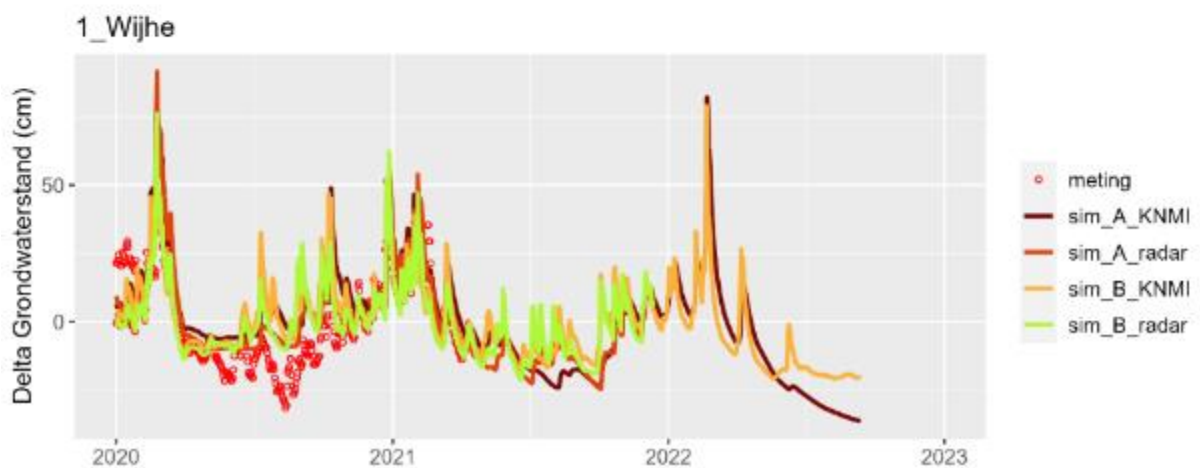
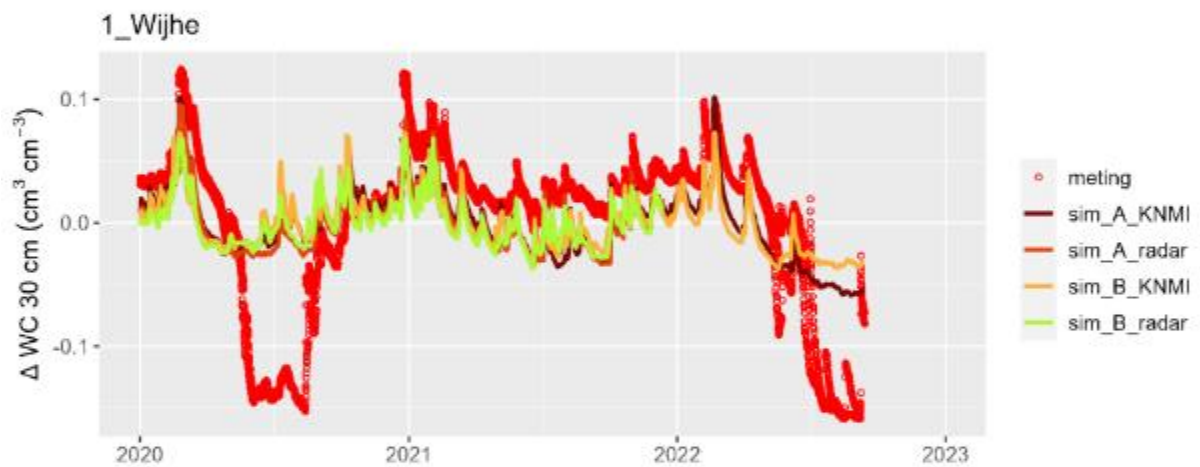
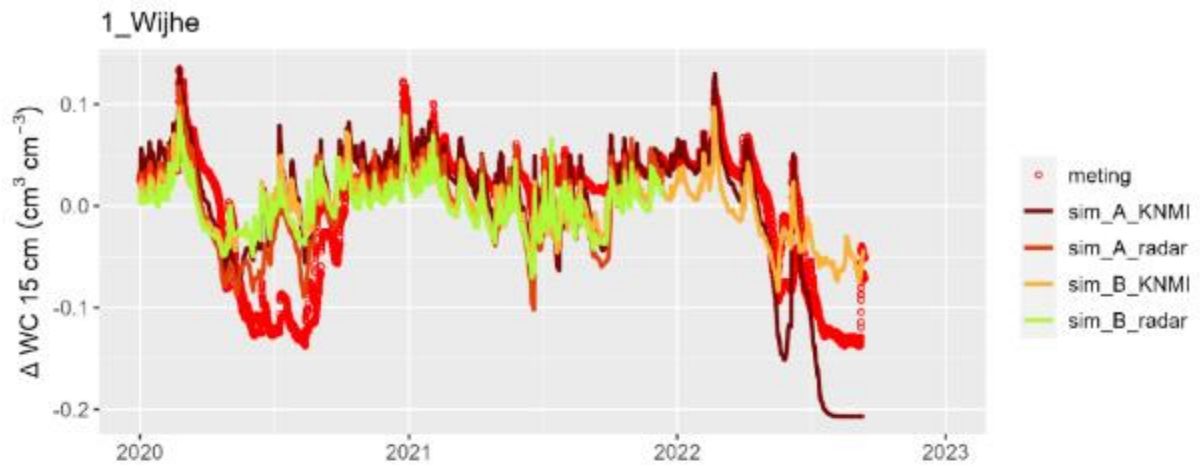
## 10Bijlage D Bodemprofielopbouw in Staringreeks bouwstenen

Vergelijking profielbeschrijving zoals gerapporteerd in van Dam en Gooren 92021) en de profielen volgens de BOEFK2020-kaart zoals gebruikt in de WWL maatwerkberekeningen.

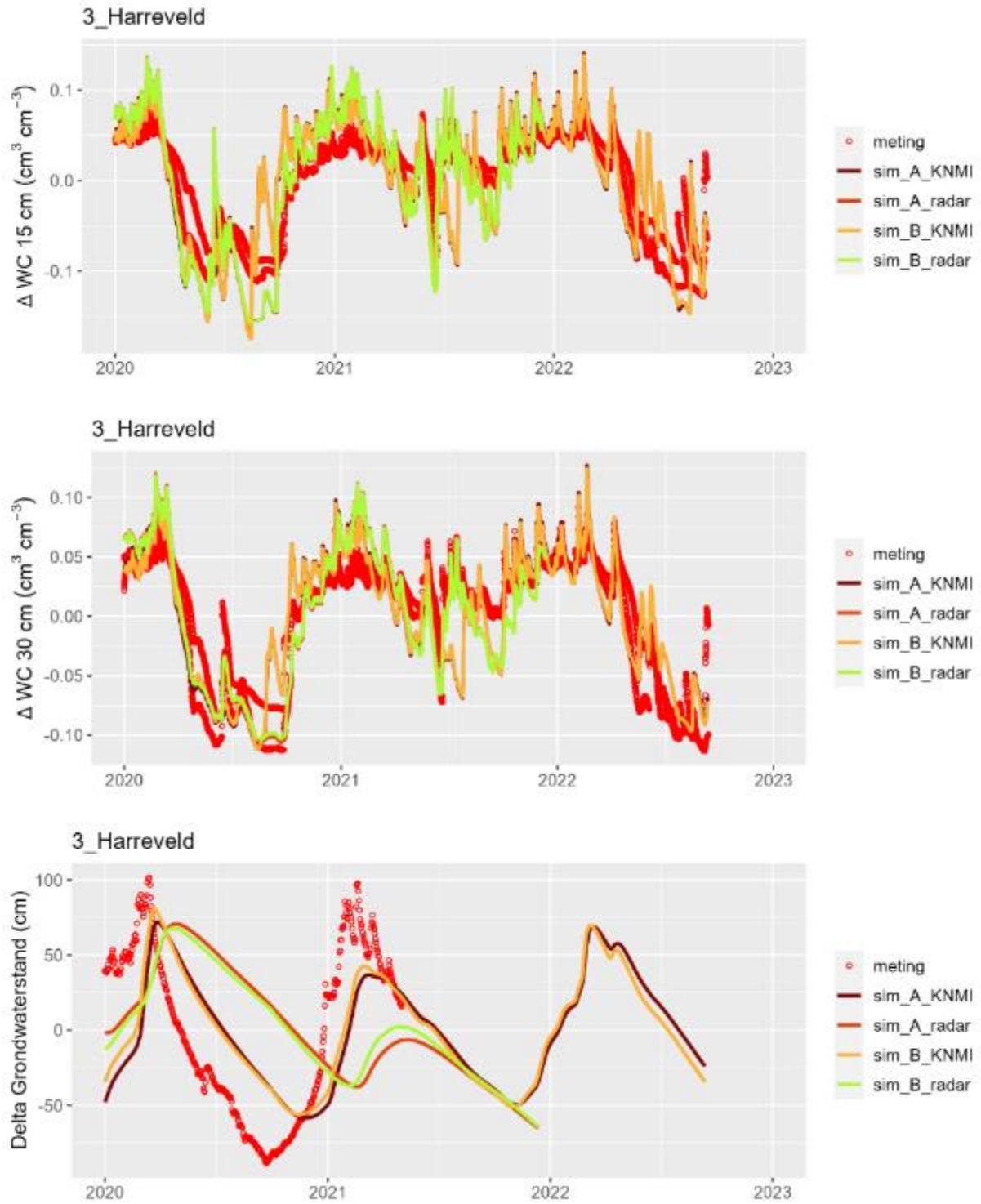
	Wijhe		Harreveld		Eibergen		Voorst		Lunteren		Ulestraten	
van Dam & Gooren	0-40	B02	0-70	B03	0-20	B03	0-30	B02	0-30	B03	0-25	B14
	40-120	O01	70-120	O03	20-55	O03	30-60	O02	30-60	O03	25-120	O15
					55-120	O02	60-120	O01	60-120	O02		
WWL, BOFEK2020	0-40	B02	0-90	B03	0-20	B03	0-30	B02	0-20	B03	0-25	B14
	40-120	O01	90-120	O03	20-54	O03	30-60	O03	20-54	O03	25-120	O015
					54-120	O02	60-90	O02	54-120	O02		
							90-120	O05				

# 11 Bijlage E      Getransformeerde tijdreeksen

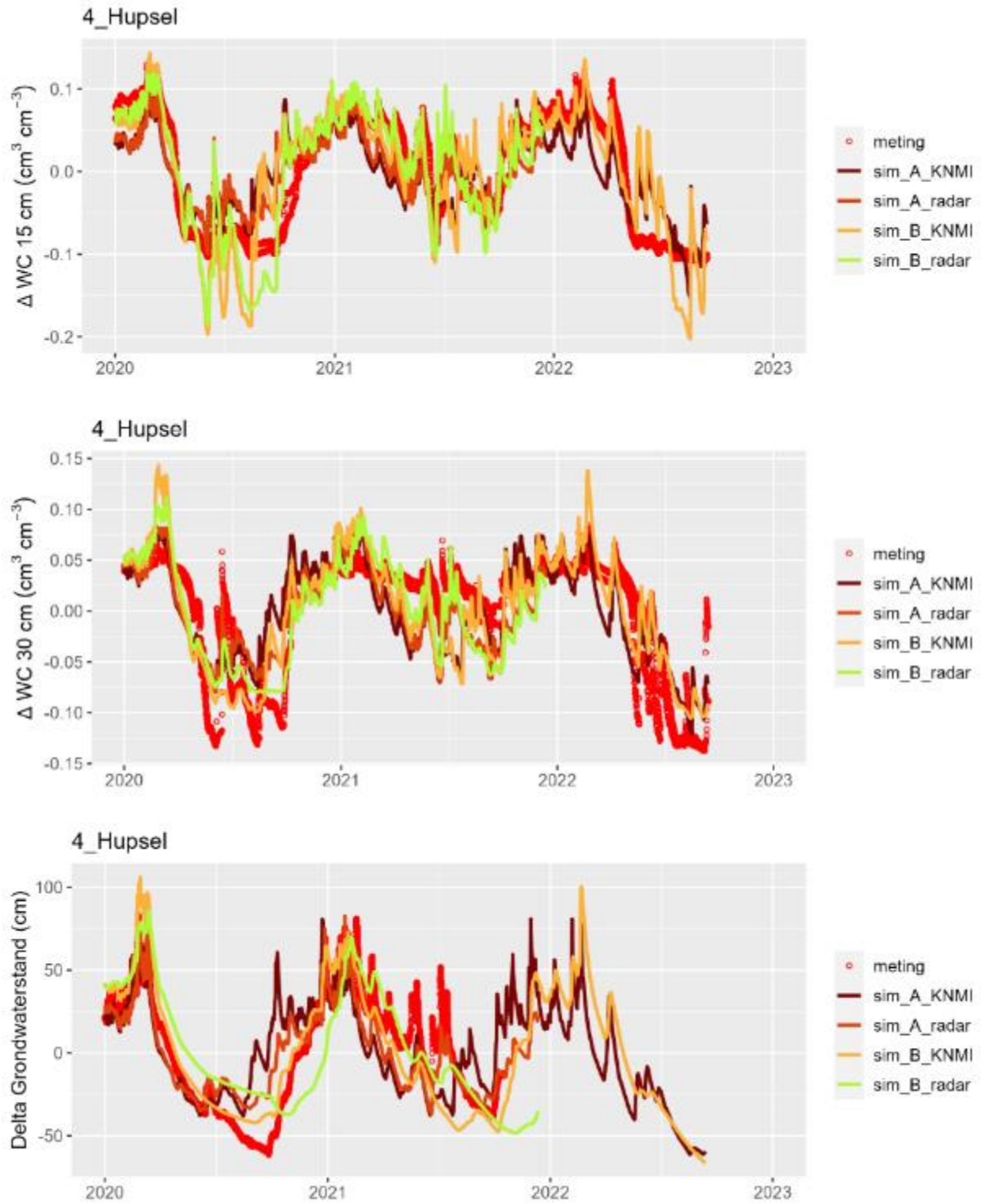
Wijhe



Harreveld

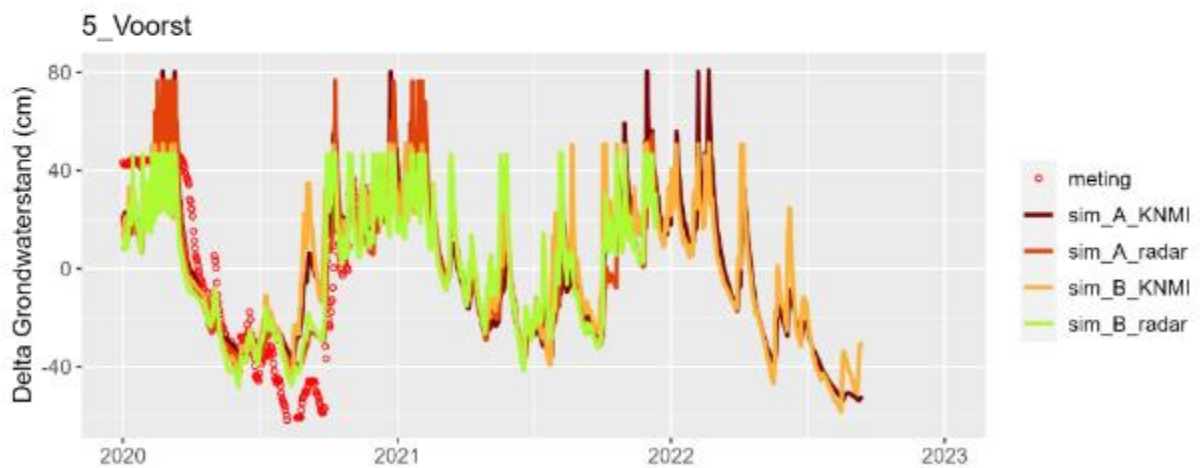
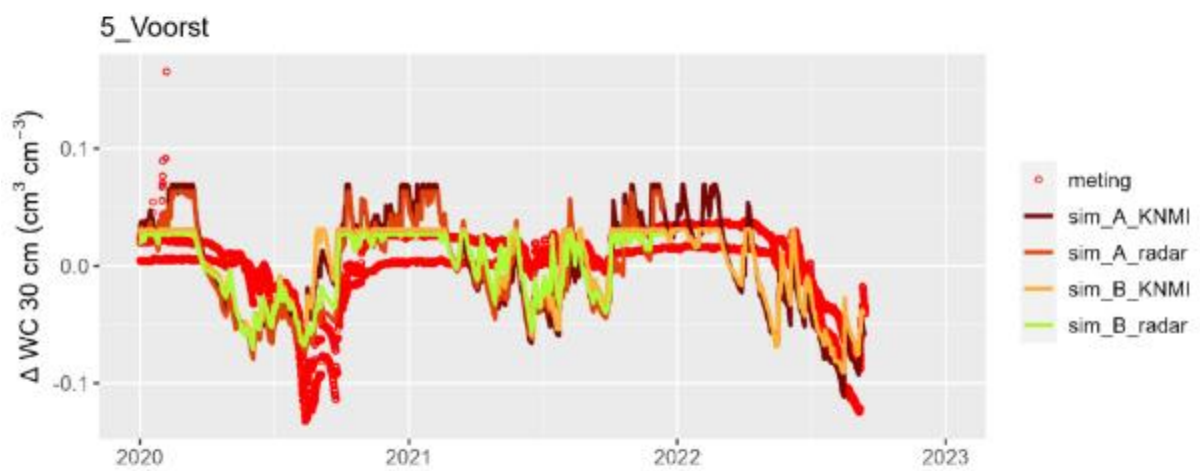
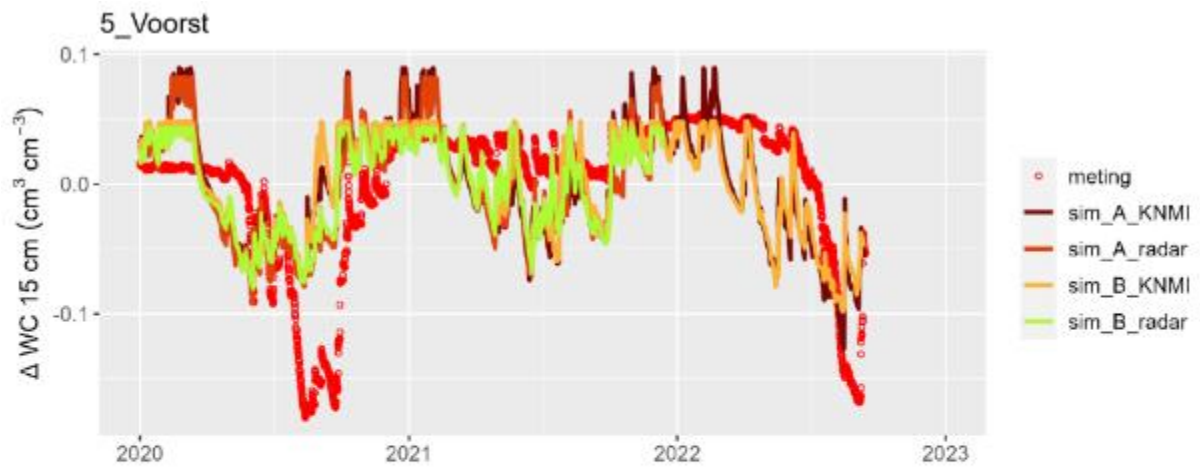


Hupsel

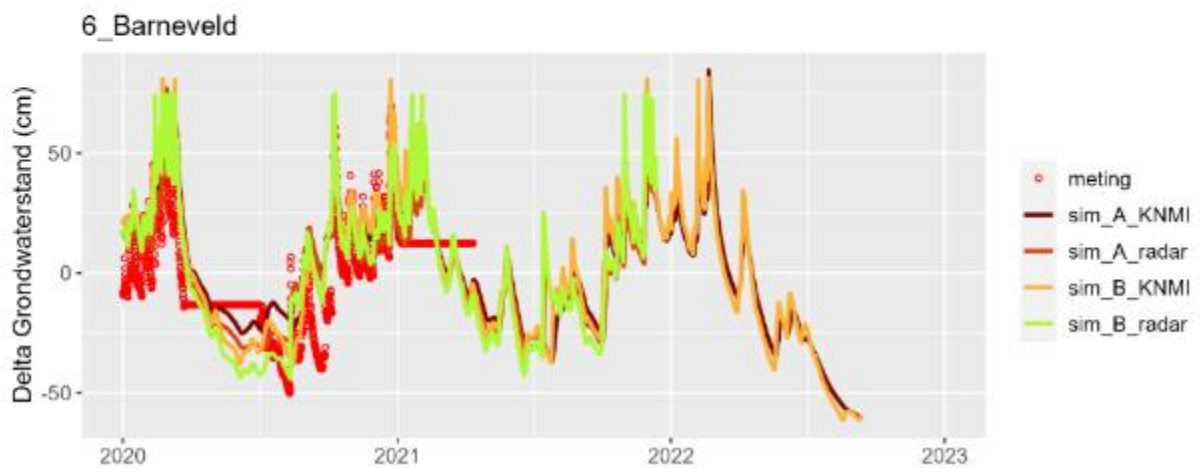
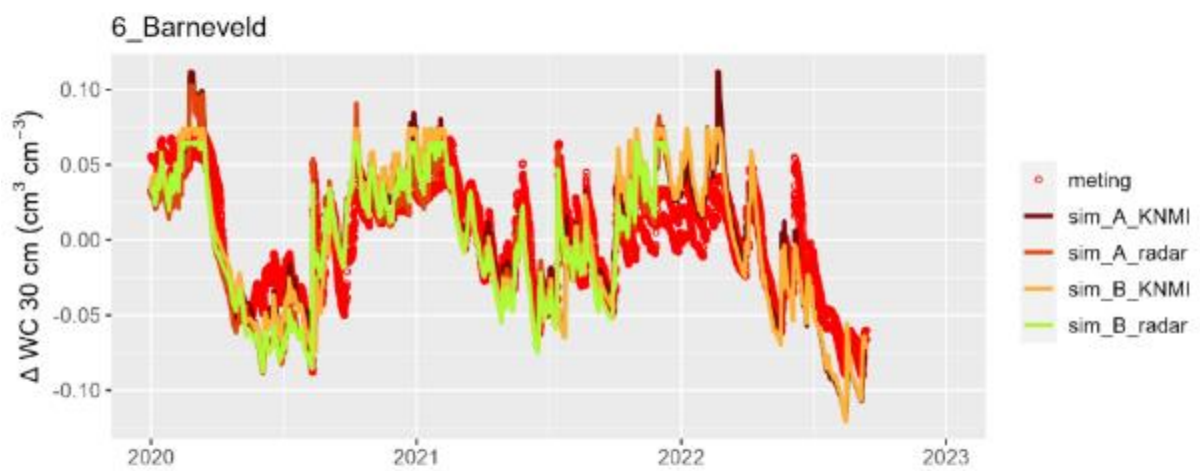
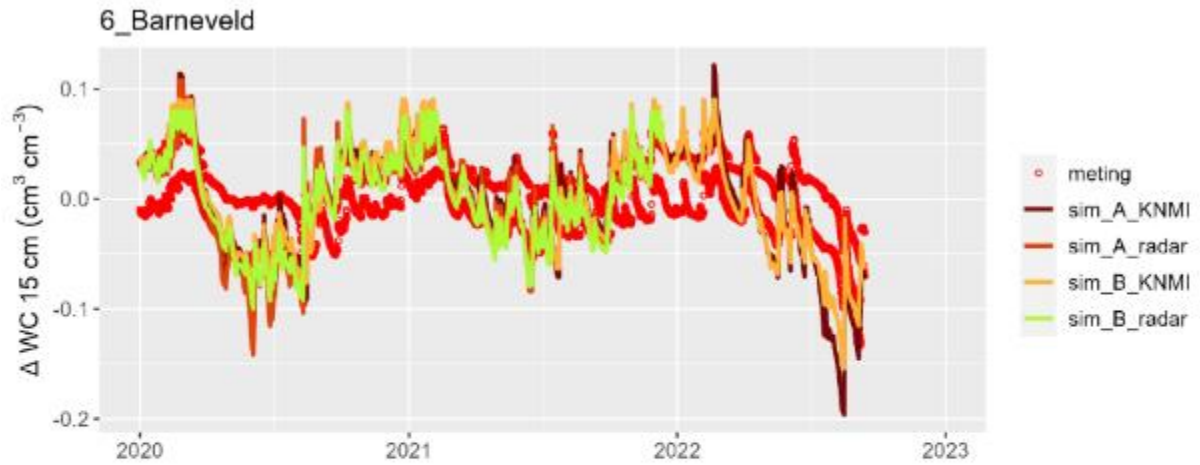




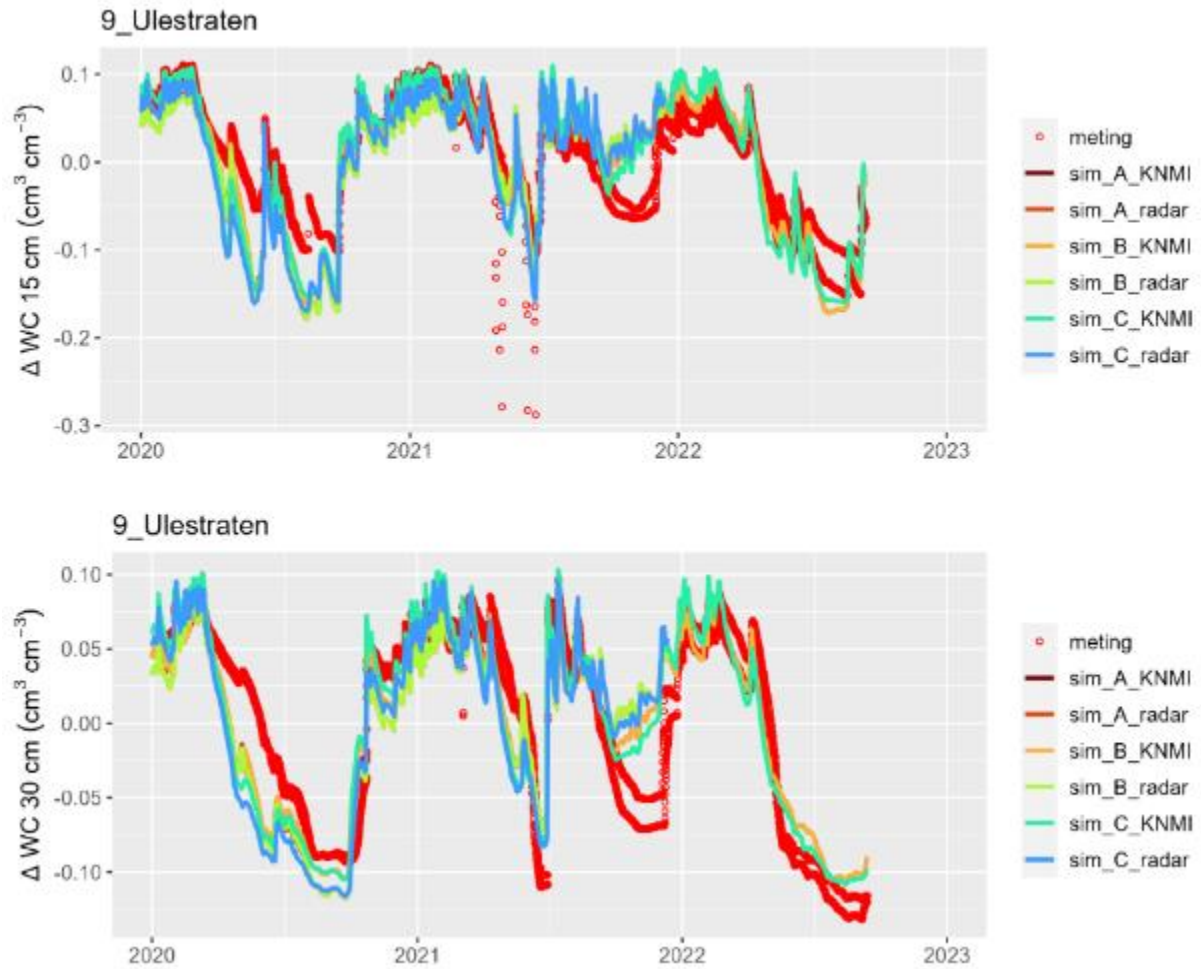
Voorst



Barneveld



Ulestraten



## 12 Bijlage F Kalibratie met behulp van PEST

SWAP kalibraties zijn uitgevoerd met behulp van PEST 7 (Doherty, 2018/2021). PEST is gebruikt in de zogenaamde *estimation* mode, en er is gebruik gemaakt van de optie BEOPEST, een geavanceerde versie van parallel PEST. Het is niet de bedoeling om hier alle opties die PEST kent te evalueren en te beargumenteren waarom welke opties zijn gekozen. In onderstaand voorbeeld is de controlfile voor PEST zoals gebruikt voor een van de uitgevoerde kalibraties weergegeven; voor het overzicht zijn alleen de eerste drie en laatste drie observaties per observatiegroep geprint.

Vooraf zijn alle PEST invoerfiles gecontroleerd met behulp van pre-processing software zoals beschikbaar gesteld in de PEST-suite. Na afloop zijn geen aanvullende post-processing scripts van PEST gebruikt, en zijn alleen de relevante uitvoergegevens verzameld.

```
pcf
* control data
restart estimation
  12      1102      3      0      7
  2      1 double point  1  0  0
  5.0    2.0    0.3  0.01   -15  999
  3.0    3.0  0.001
  0.1
  30 0.005  4      3  0.01      3
  1      1      1
* singular value decomposition
0
8 1.0e-6
1
* parameter groups
vgen01      relative 0.01  0.0  switch  2.0 parabolic
vgen02      relative 0.01  0.0  switch  2.0 parabolic
draR2       relative 0.01  0.0  switch  2.0 parabolic
* parameter data
WCs_1      none  relative  0.442790      0.2      0.6  vgen01  1.0000  0.0000  1
Alpha_1    none  relative  0.014993      0.0001    0.5  vgen01  1.0000  0.0000  1
Npar_1     none  relative  1.504880      1.05     4.5  vgen01  1.0000  0.0000  1
Ksfit_1    log   factor   19.07724      1.0     1000.0 vgen01  1.0000  0.0000  1
WCS_2     none  relative  0.339810      0.2      0.6  vgen02  1.0000  0.0000  1
Alpha_2    none  relative  0.017243      0.0001    0.5  vgen02  1.0000  0.0000  1
Npar_2     none  relative  1.703395      1.05     4.5  vgen02  1.0000  0.0000  1
Ksfit_2    log   factor   12.36681      1.0     1000.0 vgen02  1.0000  0.0000  1
drares2    log   factor   175.0         10.0    1000.0 draR2   1.0000  0.0000  1
zbotdr2    none  relative -115.0        -300.0   -10.0 draR2   1.0000  0.0000  1
level2a    none  relative -110.0        -300.0   -10.0 draR2   1.0000  0.0000  1
level2b    none  relative -90.0         -300.0   -10.0 draR2   1.0000  0.0000  1
* observation groups
wc15
wc30
gw1
wc15_fc
wc30_fc
wc15_wp
wc30_wp
* observation data
O1      0.317  1  wc15
O2      0.3155 1  wc15
O3      0.317  1  wc15
...
O364    0.339  1  wc15
O365    0.337  1  wc15
O366    0.3345 1  wc15
O367    0.2965 1  wc30
O368    0.2955 1  wc30
O369    0.298  1  wc30
```

```

...
0730    0.2975    1    wc30
0731    0.2925    1    wc30
0732    0.2915    1    wc30
0733    1.036     1    gw1
0734    1.023     1    gw1
0735    0.884     1    gw1
...
01096   0.602     1    gw1
01097   0.669     1    gw1
01098   0.704     1    gw1
01099   0.343    10.0  wc15_fc
01100   0.317    10.0  wc30_fc
01101   0.090    10.0  wc15_wp
01102   0.090    10.0  wc30_wp
* model command line
run_SWAP
* model input/output
Barneveld.tpl Barneveld.swp
swap.tpl swap.dra
Barneveld.ins Obs_Fit.dat
* prior information

```