

De invloed van bodemverdichting op de waterretentiecurve in zandgronden

Veldproeven Hengelo – Helvoirt - Reusel

Erik van den Elsen en Pim Dik, Wageningen Environmental Research



Foto: Erik van den Elsen



Inhoud

<i>Veldproeven Hengelo – Helvoirt - Reusel</i>	1
1. Inleiding	3
1.1. <i>Doel van dit onderzoek</i>	3
1.2. <i>Uitvoering en proefopzet</i>	3
1.3. <i>Specificatie van de drie meetlocaties</i>	4
1.3.1. <i>De Marke</i>	4
1.3.2. <i>Helvoirt</i>	4
1.3.3. <i>Reusel</i>	6
2. Opzet en installatie van de meetopstellingen	7
3. De meetreeksen	10
3.1. <i>Voorbeeld meetreeksen van locatie De Marke 2021</i>	10
3.2. <i>De meetreeksen van locatie De Marke, Hengelo</i>	14
3.3. <i>De meetreeksen van locatie Helvoirt</i>	16
3.5. <i>De meetreeksen van locatie Reusel</i>	18
4. Resultaten en selectie van gegevens	21
4.1. <i>De Marke, Hengelo</i>	21
4.2. <i>Reusel</i>	23
4.3. <i>Helvoirt</i>	26
5. Constructie van waterretentie- en hysteresis- karakteristieken	29
6. Analyse met SWAP	34
<i>Referenties</i>	38

1. Inleiding

Hoog Nederland heeft in toenemende mate te kampen met droogte. Een van de methoden om dit te bestrijden is het verbeteren van het waterbergend vermogen. Verbeteren van waterberging kan zowel aan het oppervlak (oppervlaktewater) als ook in de bodem (waterbergend vermogen van de bodem is de capaciteit om water in zijn matrix op te slaan.). Om water te kunnen bergen in de bodem is het belangrijk dat regenwater goed kan infiltreren, en dat de ruimte tussen de vaste bodemdelen (de *porositeit*) voldoende groot is. Zowel het infiltrerend vermogen als het waterbergend vermogen kunnen worden belemmerd door verslumping van de bovengrond maar ook door bodemverdichting ten gevolge van o.a. het berijden van het land met zware machines. Hoe verdicht de bodem is en welke gevolgen dit heeft voor het waterbergend vermogen is nog vrijwel onbekend. Wel duidelijk is dat zandgronden door hun structuur erg gevoelig zijn voor verdichting en dat deze niet door natuurlijke processen (zoals bij klei) worden opgeheven.

1.1. Doel van dit onderzoek

Het doel van dit onderzoek is het bepalen van het waterbergend vermogen van de onverzadigde bodem (boven de grondwaterspiegel) van verdichte en minder verdichte bodems. Met deze gegevens kunnen nauwkeuriger berekeningen gemaakt worden van de waterhuishouding waardoor de effecten van verdichte bodems op wateroverlast en verdroging zichtbaar worden. Ook moet duidelijk worden welke invloed een mogelijk steeds verder verdichtende bodem op de waterhuishouding heeft. Met deze gegevens kan getoetst worden hoe effectief lokale bergingsoplossingen zijn en of het wenselijk is bodemverdichting in de toekomst verder te voorkomen.

1.2. Uitvoering en proefopzet

Er is een drietal testsites (percelen) ingericht waar de waterretentie karakteristieken van de onverzadigde bodem op elk drie locaties in-situ wordt gemeten. Bij de selectie van de sites is gekeken worden naar diverse landgebruiken (gras, akkerbouw) of bodem opbouw. De volgende drie test sites zijn geselecteerd:

1. **Hengelo**, proefboerderij De Marke - permanent grasland, beweid.
2. **Helvoirt** - permanent grasland, beweid. Op dit in het verleden verdichte perceel zijn stroken aangelegd waar met woelen op verschillende diepten is geprobeerd de ondergrondverdichting op te heffen.
3. **Reusel**, akkerperceel op zandgrond, geïrrigeerd.

Waterretentiecurve

De waterretentiekarakteristiek werd bepaald door de drukhoogte uit te zetten tegen het vochtgehalte; het geeft de relatie weer van de mate waarin de bodem water kan opslaan en kan vasthouden. Onder andere grondsoort, textuur en verdichting hebben een grote invloed op de vorm van de waterretentiekarakteristiek. Per testsite werden op een drietal locaties en een drietal dieptes polymeer tensiometers (drukhoogte meten over een groot zuigspanningsbereik) en TDR-sensoren (vochtgehalte) geïnstalleerd. De drie locatie variëren in de mate waarin bodemverdichting is aangetoond of waarin een vermoeden bestaat van verhoogde verdichting (bv op de kopakker). De diepten van de metingen liggen globaal op 20, 40 en 60 cm-mv, waarbij met name gelet werd op de mate van verdichting in het profiel. Het algemene streven is om per laag te gaan meten; boven de verdichte laag, in de verdichte laag en onder de verdichte laag. Dit op zo duidelijk mogelijk de effecten van bodemverdichting op waterretentiekarakteristieken in zandgronden te kunnen aantonen. Om de verdichte lagen te kunnen lokaliseren, zijn de indringingsweerstand (penetrologger) gemeten. In de drie proeflocaties zijn respectievelijk ruim twee, anderhalf en ruim een jaar continu en automatisch metingen gedaan met tensiometers en vochtsensoren. Metingen van de indringingsweerstand zijn aan begin en eind van de proef gedaan.

Hysteresecurve

Omdat de in-situ metingen van de waterretentiecurve onder wisselende uitdrogende en vernattende omstandigheden plaatsvond kregen we ook informatie over het zogenaamde hysteresedomein van de curve. Daarmee kunnen de hoofd-uitdrogingscurves (en evt., de hoofd-vernattingscurve) worden afleiden (parameteriseren). Deze werden vervolgens voor de verschillende locaties (mate van verdichting) en dieptes onderling vergeleken. Verder werd zo goed mogelijk een relatie gelegd tussen de mate van verdichting en de vorm van de waterretentiecurves. Deze waterretentiecurves zijn inputparameters voor het SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) model. Het SWAP model beschrijft de waterbalans in de onverzadigde zone en deels in het bovenste grondwater (Soil-Water) in relatie tot meteorologische (klimaat) gegevens

(Atmosphere) en gewasopname en gewasgroei (Plant). Met het model kan vervolgens worden berekend wat de invloed is van (ver)dichte lagen op het waterbergend vermogen tijdens natte periodes en het water leverend vermogen tijdens droge periodes. Dit kan zowel op perceel niveau als ook op gebiedsniveau plaatsvinden met deze gegevens.

Vernieuwend

Dit onderzoek richtte zich op het direct in het veld meten van de gevolgen van verdichting op de waterkarakteristiek van de bodem in plaats van het alleen vaststellen van de mate van verdichting. Verder zijn er in dit onderzoek vernieuwende in-situ technieken, zoals de polymeer-tensiometers gebruikt. Tenslotte is specifiek de focus op zandgronden die een heel ander verdichtingsproces (minder samendrukken, meer vervorming) hebben dan gronden met hoge kleigehaltes.

Per meetplek werden per diepte meetreeksen verkregen van volumetrisch watergehalte en drukhoogte. Deze metingen zijn grafisch tegen elkaar uitgezet, hetgeen een in-situ waterretentiekarakteristiek oplevert voor de betreffende diepte/laag. Voor vergelijkbare diepte van de andere meetplekken met verschillende mate van dichtheid ondergrond konden deze relaties onderling vergeleken worden. Dit is in beperkte mate gelukt; e.e.a. wordt in de rest van deze rapportage verder uitgelegd.

1.3. Specificatie van de drie meetlocaties

1.3.1. De Marke

Met meetlocatie 'De Marke' wordt bedoeld Agro-innovatiecentrum De Marke in Hengelo (GLD - 52.03936125835095, 6.3484789232695125). De Marke is een melkveeprroefbedrijf voor wetenschappelijk landbouwkundig onderzoek. Samen met boeren en andere partners wordt gewerkt aan kringlooplandbouw, natuur inclusieve landbouw, klimaat robuuste landbouw en precisielandbouw. De Marke is onderdeel van Wageningen University & Research. Het bedrijf kenmerkt zich door permanent grasland van verschillende leeftijd op een veldpodzol profiel Hn51; Leemgehalte: leem arm en zwak lemig en M50: fijn. De grondwatertrap op het bedrijf valt in klasse VIId (GHG 40-80 cm-mv, GLG >180 cm-mv) en VIId (GHG 80-140 cm-mv, GLG >180 cm-mv). Op alle drie de meetplekken is bodemverdichting geconstateerd op verschillende diepten. De drie meetplekken zijn geselecteerd op mate van verdichting en diepte van de verdichte laag.



Figuur 1 Google Maps foto van de drie meetplekken op boerderij De Marke in Hengelo.

1.3.2. Helvoirt

Meetlocatie Helvoirt (51.640886, 5.2005052) is opnieuw een grasland perceel dat wordt gekenmerkt door een hoge zwarte enkeerd grond zEZ21; Leemgehalte: leem arm en zwak lemig, (M50): fijn. De grondwatertrap valt in klasse VIId (GHG 80-140 cm-mv, GLG >180 cm-mv). Op het perceel is door het Louis Bolkinstituut een proef gedaan met diepwoelen op drie diepten om de bestaande ondergrondverdichting op te heffen ([link](#)) (Struyk et al., 2021). In elk van de drie stroken zijn sensoren

geplaatst om de mate en effecten van de verdichting te kunnen meten (zie Figuur 8).



*Figuur 2 Schematische weergave van de opstelling in Helvoirt.
De getallen in de stroken stellen de diepwoel-diepten voor.
De donkerblauwe strepen is de tracering van de kabels en de rode stip
is de locatie van de dataloggers.*



Figuur 3 Google Maps foto's van het perceel in Helvoirt. Op de foto's zijn de drie meetkasten en de regenmeter te zien.

1.3.3. Reusel

Meetlocatie Reusel (51.3315790580256, 5.17638599097267) is een landbouw perceel dat wordt gekenmerkt door een veldpodzol profiel Hn21; Leemgehalte: leem arm en zwak lemig fijn zand, M50: fijn. De grondwatertrap op het perceel valt in klasse Vlo (GHG 40-80 cm-mv, GLG 120-180 cm-mv). Op dit perceel zijn de sensoren op drie verschillende plekken geïnstalleerd: a) onder het rijpad over het perceel, b) onder de kopakker aan de noordkant van het perceel, en c) in het open veld onder het gewas. Op het hele perceel is bodemverdichting geconstateerd, ook in het open perceel (niet alleen onder de rijpaden of onder de kopakker) zie Figuur 9. In het meetjaar werd op het perceel pastinaak geteeld.



Figuur 4 Google Maps foto van het perceel met daarin gemarkeerd de drie plekken waar de sensoren zijn geïnstalleerd in Reusel.

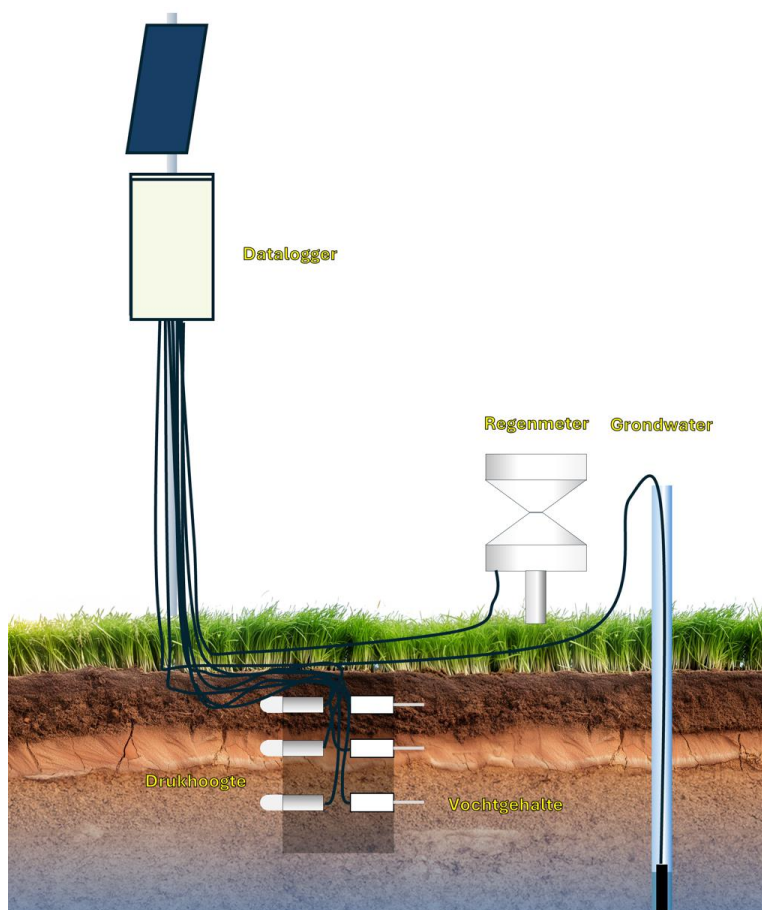
2. Opzet en installatie van de meetopstellingen

De meetopstellingen zijn per locatie in drievoud uitgevoerd. Per meetplek is er een dataloggerkast met daarop aangesloten drie tensiometers en drie vochtsensoren in het bodemprofiel en één sensor voor het meten van de grondwaterstand. Per meetlocatie (De Marke (Hengelo), Helvoirt, Reusel) werd één regenmeter geplaatst voor het meten van de neerslag. (zie Figuur 5)

De dataloggers waren van het merk Campbell, type CR300-CELL215. Deze dataloggers kunnen stand-alone opereren en communiceren met een ingebouwd GSM modem waarmee de meetgegevens periodiek kunnen worden opgehaald. De datalogger werkt met een 12V batterij die wordt bijgeladen met een zonnepaneel.

De gebruikte vochtsensoren waren van merk METER (METER GROUP, Pullman, USA), type GS3. Deze sensoren meten bodemvochtgehalte, temperatuur en geleidbaarheid (EC). Afhankelijk van de gebruikte bodemsoort kunnen de sensoren gekalibreerd worden. In het geval van de toepassing in het KLIMAP project werd er voor gekozen dit niet te doen, omdat de kalibratie in de fabriek al is gedaan voor zandgronden.

De gebruikte tensiometers waren van het merk UGT (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg, Duitsland), Full Range Tensiometer, type FRT 15D. Het meetbereik van deze tensiometers loopt, ten gevolge van het gebruik van een alternatieve constructie en materialen, van 0 tot -15.000 cm waterkolom (0 tot -1500 kPa). Het meetbereik van een 'klassieke' watergevulde tensiometer is van 0 tot -900 cm waterkolom. Dit maakt de tensiometer geschikt om van verzadiging tot bijna het verwelkingspunt van -16.000 cm waterkolom te meten, typisch het bereik waarbinnen planten water kunnen opnemen. Het nadeel van deze tensiometers is dat ze gevoelig zijn voor temperatuurvariaties (daarvoor zijn ze gecompenseerd) en dat het nulpunt (grote) variaties kunnen vertonen, hier hebben we in de praktijk behoorlijk last gehad.



Figuur 5. Schematische weergave van de gebruikte meetopstellingen met: dataloggerkast en zonnepaneel, drie tensiometers en drie vochtsensoren in het bodemprofiel en één sensor voor het meten van de grondwaterstand. Van deze opstelling werden per meetlocatie drie stuks geïnstalleerd, elk op een andere meetplek. Per meetlocatie werd één regenmeter geïnstalleerd om de neerslag te meten.

Hieronder een aantal foto's van de installatiewerkzaamheden in 2022 op de drie locaties;



Figuur 6 a) en b) Installatiewerkzaamheden in Hengelo.



Figuur 7 a) Installatiewerkzaamheden in Hengelo, b) tensiometer en bodemvochtsensor in profielkuil, c) meetkast met datalogger.



Figuur 8 a) Penetrologger metingen in Helvoirt, b) Meetopstelling in Helvoirt.



Figuur 9 Installatiewerkzaamheden in het pastinaak perceel in Reusel.

In onderstaande Tabel 1 zijn de installatiediepten van diverse sensoren in de verschillende locaties weergegeven.

Tabel 1. Installatiegegevens van alle sensoren in de proef.

Installatiegegevens watergehaltesensoren KLIMAP [cm -mv]			
	De Marke	Helvoirt	Reusel
KAST 1	MAR_01 [cm -mv]	HEL_01 [cm -mv]	REU_01 [cm -mv]
WG sensor 1	15	25	40
WG sensor 2	25	45	60
WG sensor 3	60	65	80
KAST 2	MAR_02 [cm -mv]	HEL_02 [cm -mv]	REU_02 [cm -mv]
WG sensor 1	15	25	40
WG sensor 2	25	45	60
WG sensor 3	60	65	80
KAST 3	MAR_03 [cm -mv]	HEL_03 [cm -mv]	REU_03 [cm -mv]
WG sensor 1	15	25	40
WG sensor 2	25	45	60
WG sensor 3	60	65	80

Installatiegegevens tensiometers KLIMAP			
	De Marke	Helvoirt	Reusel
KAST 1	MAR_01 [cm -mv]	HEL_01 [cm -mv]	REU_01 [cm -mv]
Tensiometer 1	15	25	40
Tensiometer 2	25	45	60
Tensiometer 3	60	65	80
KAST 2	MAR_02 [cm -mv]	HEL_02 [cm -mv]	REU_02 [cm -mv]
Tensiometer 1	15	25	40
Tensiometer 2	25	45	60
Tensiometer 3	60	65	80
KAST 3	MAR_03 [cm -mv]	HEL_03 [cm -mv]	REU_03 [cm -mv]
Tensiometer 1	15	25	40
Tensiometer 2	25	45	60
Tensiometer 3	60	65	80

Installatiegegevens grondwaterstandbuizen KLIMAP			
De Marke	Helvoirt	Reusel	
MAR_01	[mm] HEL_01	[mm] REU_01	[mm]
Bovenkant buis - bodem = 335cm	3350 Bovenkant buis - bodem	2370 Bovenkant buis - bodem	2400
Bovenkant buis - maaiveld = 45cm	450 Bovenkant buis - maaiveld	440 Bovenkant buis - maaiveld	300
Bovenkant buis - onderkant sensor = 335cm	3335 Bovenkant buis - onderkant sensor	2355 Bovenkant buis - onderkant sensor	2380
Maaiveld - onderkant sensor (A)	2885 Maaiveld - onderkant sensor	1915 Maaiveld - onderkant sensor	2080
MAR_02	[mm] HEL_02	[mm] REU_02	
Bovenkant buis - bodem = 337cm	3370 niet geïnstalleerd (staan naast elkaar)	niet geïnstalleerd (staan naast elkaar)	
Bovenkant buis - maaiveld = 45cm	450		
Bovenkant buis - onderkant sensor = 337cm	3355		
Maaiveld - onderkant sensor (A)	2905 Maaiveld - onderkant sensor		
MAR_03	[mm] HEL_03	[mm] REU_03	[mm]
Bovenkant buis - bodem = 389cm	3890 niet geïnstalleerd (staan naast elkaar)	Bovenkant buis - bodem	2570
Bovenkant buis - maaiveld = 45cm	450	Bovenkant buis - maaiveld	300
Bovenkant buis - onderkant sensor = 389cm	3875	Bovenkant buis - onderkant sensor	2550
Maaiveld - onderkant sensor (A)	3425 Maaiveld - onderkant sensor	Maaiveld - onderkant sensor	2250

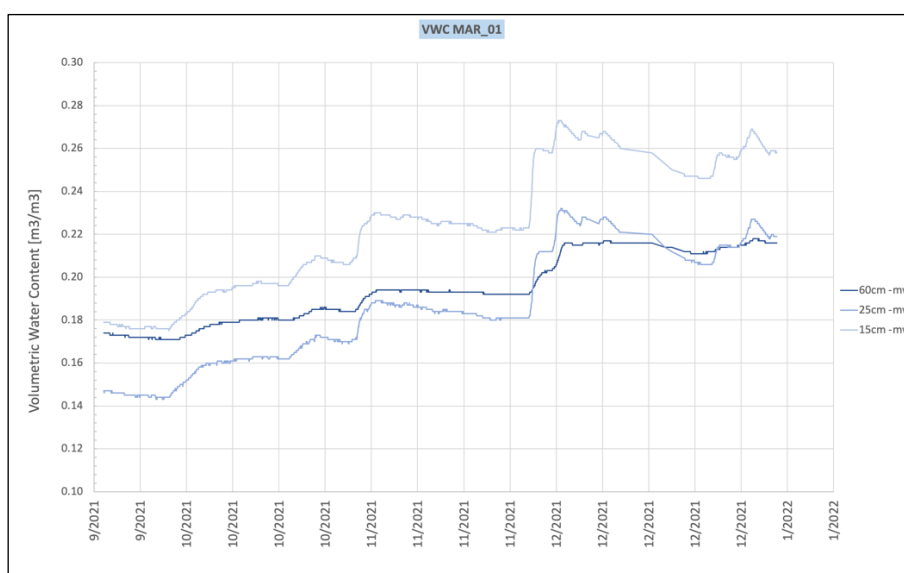
Berekening grondwaterstand (gws, cm -mv): GWS [cm] = (mw - A)/10			
mw = meetwaarde sensor			

3. De meetreeksen

In dit hoofdstuk worden de meetreeksen van de drie locaties getoond, maar eerst kort een overzicht van wat de meetreeksen weergegeven. In de volgende paragrafen staat een chronologisch overzicht van hoe de drie opstellingen per locatie hebben gepresteerd, in het hoofdstuk hierna volgt dan een verdere analyse van deze meetgegevens. In de inleiding werd al gezegd dat het doel van dit onderzoek was om *in situ* de waterretentiekarakteristiek van de bodems te meten en om tegelijkertijd te proberen de verschillen in waterretentiekarakteristiek en waterberging ten gevolge van verdichting aan te tonen en te kwantificeren. Om deze reden is het uitvoerig analyseren en bespreken van de ruwe, afzonderlijke meetreeksen (bodemvocht, drukhoogte, grondwaterstand en neerslag) wellicht minder interessant. Toch is het goed om eerst in detail naar de veldgegevens te kijken voordat verder wordt gegaan met de constructie van waterretentiekarakteristieken en hysteresis verschijnselen. Dit omdat we in de complete looptijd veel meetgegevens hebben verzameld en het zinvol is om alleen de veelbelovende gegevens verder te analyseren.

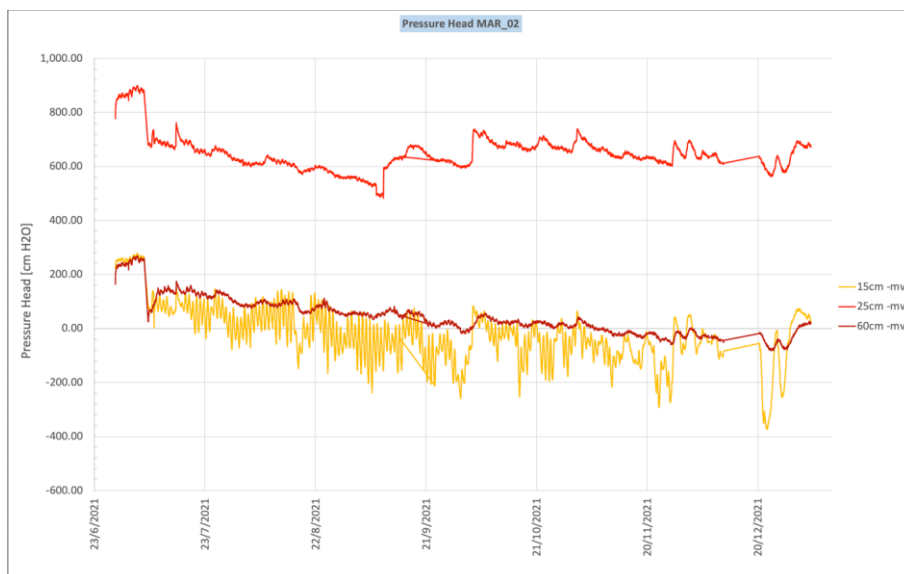
De *in situ* constructie van waterretentiecurven en het detecteren van hysteresis is een ambitieuze onderneming gebleken, zeker omdat dit met een nieuw type tensiometers is gedaan waar nog geen ervaring mee was opgedaan. Voordat we verder gaan met de analyse van de metingen en de constructie van waterretentiekarakteristieken en hysteresis curven uit de basismetingen, wordt in de rest van dit hoofdstuk eerst een overzicht gegeven van de afzonderlijke meetresultaten per locatie.

3.1. Voorbeeld meetreeksen van locatie De Marke 2021



Figuur 10. Een typische meetreeks voor vochtgehalte op drie diepten. Beschrijving: zie tekst.

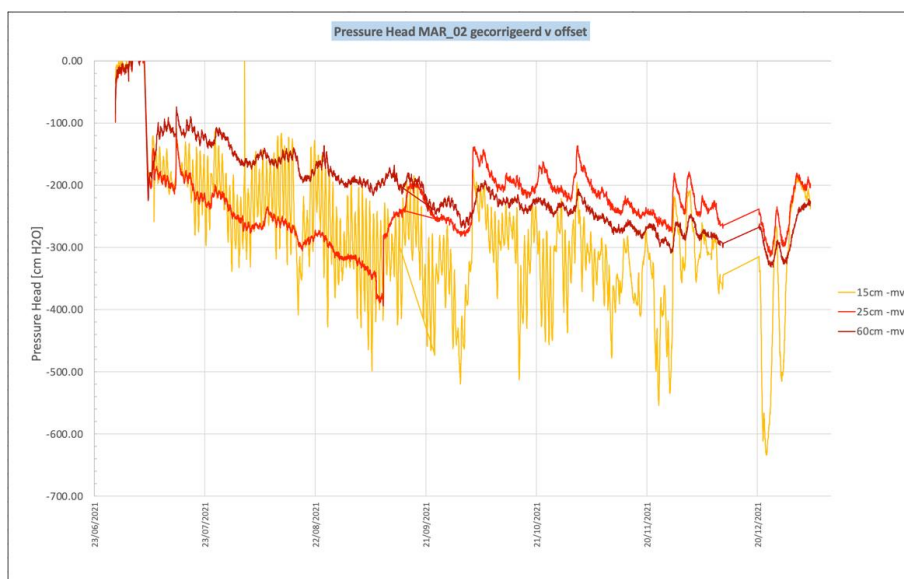
Als voorbeeld van de gegevens die op de locaties zijn verzameld zien we in Figuur 10 een typische meetreeks met vochtgehalten in de tijd voor het eerste meetjaar voor deze locatie: 2021. Typisch is het feit dat de bovenste vochtsensor vaak de hoogste meetwaarde weergeeft; die zit het dichtst bij het oppervlak en wordt het meest beïnvloed door de neerslag. Ook zal deze sensor vaak het snelst reageren op neerslag en verdamping aangezien in deze laag vaak de meeste wortels zitten, omdat deze het dichtst aan het oppervlak zit. Dit kan het best worden geobserveerd midden november 2021, wanneer de sensor op 15 cm -mv het snelst reageert en ook de hoogste meetwaarde toont. De sensoren op 25 en 60 cm -mv reageren met vertraging (infiltratie) en de toename van het vochtgehalte is minder: het meeste water blijft hangen in de bodemlaag erboven. Typisch is ook dat de diepste sensor (60 cm -mv) het meest constant is, maar niet perse de hoogste of de laagste meetwaarde hoeft te geven zoals alle metingen van september tot halverwege november 2021 laten zien. Het verloop van het vochtgehalte met de diepte hangt samen met de balans van water wat van boven komt (neerslag) en het water wat van onder komt (grondwater en capillaire opstijging). Dit laatste is sterk afhankelijk van de textuur van het bodemmateriaal.



Figuur 11 Drukhoogte metingen van station De Marke 2. Opvallend zijn de niveaus van de metingen en de grilligheid van de sensor op 15 cm -mv. Voor analyse en verklaring, zie tekst.

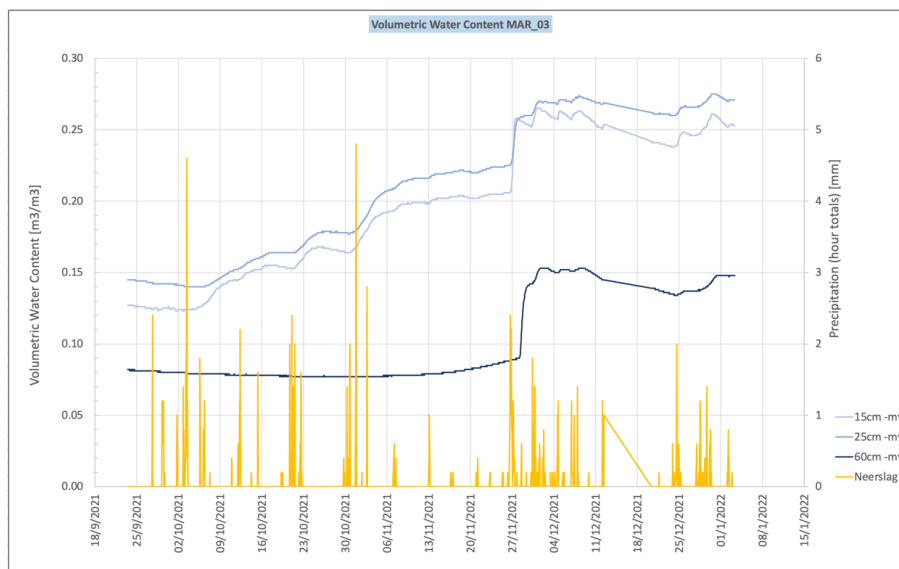
In Figuur 11 is een meetreeks van drukhoogte metingen te zien van locatie De Marke station 2. Een aantal zaken vallen op: de niveaus van de metingen en de grilligheid van de sensor op 15 cm diepte. De niveaus van de tensiometer laten vanaf het begin van de metingen allemaal waarden boven nul zien, terwijl we negatieve waarden verwachtten (zuigspanning van de bodem is per definitie negatief). Na november 2021 zakten de waarden van de bovenste sensor (15 cm -mv) wel onder nul, maar vanwege de droogte verwachtten we veel negatievere waarden.

We hebben contact met de fabrikant gehad en kwamen er achter dat de 'nulpunten' van de tensiometers niet exact op '0' zijn gekalibreerd. Hoewel de tensiometers binnen de technische specificaties vielen waren de 'nulwaarden' niet voldoende gekalibreerd op 0 cm waterkolom / 0 hPa. De specificaties geven aan dat het meetbereik van de tensiometers loopt van +100 ... -1.500 kPa (= +1.000 ... -15.000 hPa of +1.000 ... -15.000 cm waterkolom). De opgegeven nauwkeurigheid is ± 35 kPa ofwel ± 350 cm waterkolom. Dit betekent dat het nulpunt van de tensiometer ook ± 350 cm waterkolom kan afwijken. Dit is wat we waarschijnlijk in Figuur 11 zien – slecht, of niet gekalibreerde nulpunt waarden (offset). Gelukkig kon het nulpunt van alle tensiometers van De Marke worden gecorrigeerd, omdat dit met de test van het systeem (toevallig) was gemeten. De gecorrigeerde tensiometer metingen zien te zien in . Helaas was correctie van tensiometer nulpunten alleen voor locatie De Marke mogelijk. Dit heeft beperkt invloed gehad op verdere analyse van de overige locaties.



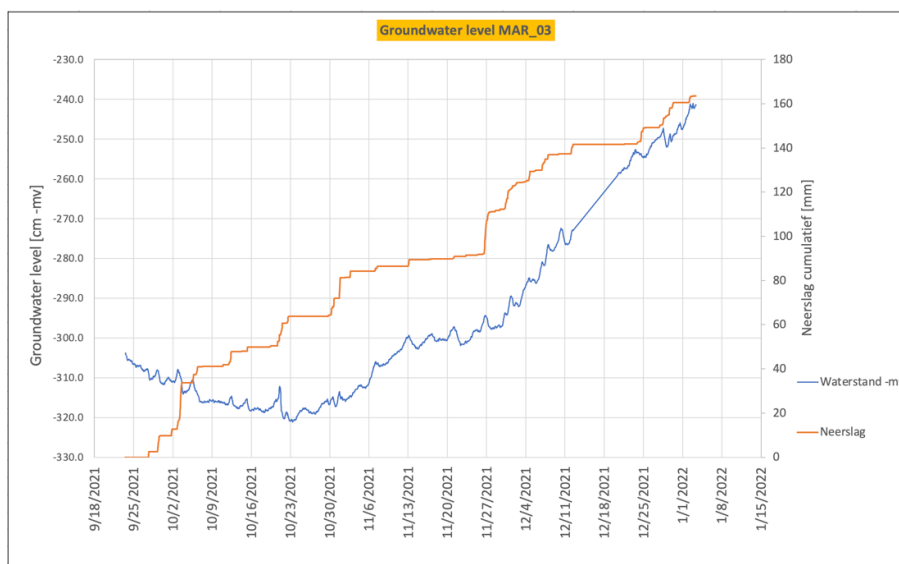
Figuur 12. Gecorrigeerde drukhoogte metingen van station De Marke 2. Analyse: zie tekst.

In Figuur 12 staan de nulpunt-gecorrigeerde tensiometer metingen van Station de Marke 2 afgebeeld. Vergeleken met Figuur 11, zijn alle waarden nu voor de hele periode negatief (zoals verwacht). Opvallend is nog steeds de grote fluctuatie in de ondiepste tensiometer (15 cm -mv). Deze fluctuatie is niet te verklaren, zeker omdat de twee diepere tensiometers wel een kleine (dagelijkse) variatie laten zien, maar niet zo extreem als de bovenste tensiometer. Hoewel de absolute meest negatieve meetwaarde van de bovenste tensiometer in deze periode zeer goed mogelijk is (zuigspanning is ongeveer -630 cm waterkolom), is de extreme variatie niet te verklaren.



Figuur 13. Watergehalte metingen voor meetlocatie De Marke, meetplek 3. Deze grafiek bevat ook neerslag gegevens.

In Figuur 13 wordt de meetreeks van de bodemvocht gehalten van meetplek 3 getoond. In deze grafiek is ook de neerslag getoond (de regenmeter is aangesloten op meetstation 3 in dit geval). Duidelijk kan de reactie van het bodemvochtgehalte op de neerslag worden gezien, rond eind oktober en eind november is dit het duidelijkst te zien. Halverwege december is het station een tijd uitgevallen omdat door de donkere periode het zonnepaneel te weinig energie leverde om het systeem van stroom te voorzien.



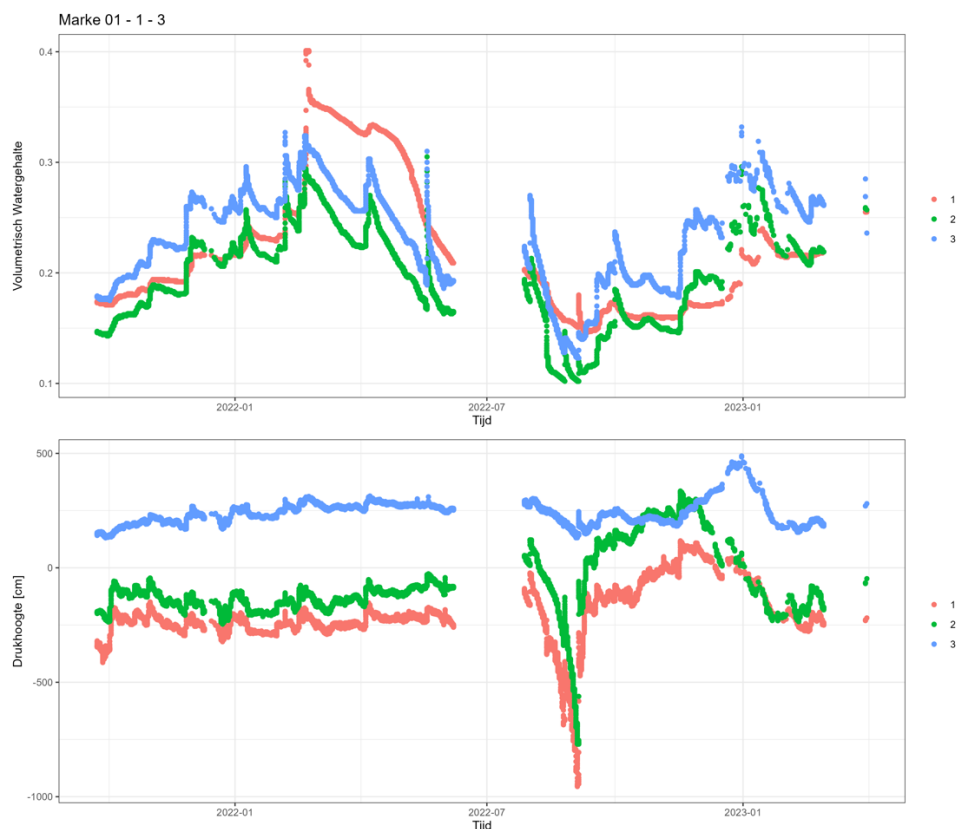
Figuur 14 De grondwaterstand op locatie De Marke, meetplek 3 en de cumulatieve neerslag voor periode september 2021 tot januari 2022. Analyse: zie tekst.

In Figuur 14 is het verloop van de grondwaterstand in de tijd te zien. De grondwaterstand zakt in de loop van het najaar 2021 tot ongeveer 30 oktober en begint dan weer langzaam op te lopen. Het laagste punt is 320 cm -mv. Het hoogste punt van deze meetreeks wordt begin januari bereikt en bedraagt ongeveer 240 cm -mv. Opvallend is dat de grondwaterstand weinig tot niet reageert op de neerslag; begin oktober, eind oktober en eind november zijn er perioden met veel neerslag, maar de

grondwaterstand lijkt hier geen correlatie mee te hebben. Natuurlijk zit het grondwater op deze plek behoorlijk diep en is er ook nog invloed van het peilbeheer op de grondwaterstand.

In de volgende paragrafen zijn de meetreeksen van de volledige tijdsperiode vanaf installatie tot einde van de proef weergegeven. Als er bijzonderheden zijn worden deze in de betreffende paragraaf besproken.

3.2. De meetreeksen van locatie De Marke, Hengelo



Figuur 15. Vochtgehalte en drukhoogte meetreeksen van station De Marke 01.



Figuur 16. Drukhoogte en drukhoogte meetreeksen van station De Marke 02.



Figuur 17. Vochtgehalte en drukhoogte meetreeksen van station De Marke 03.

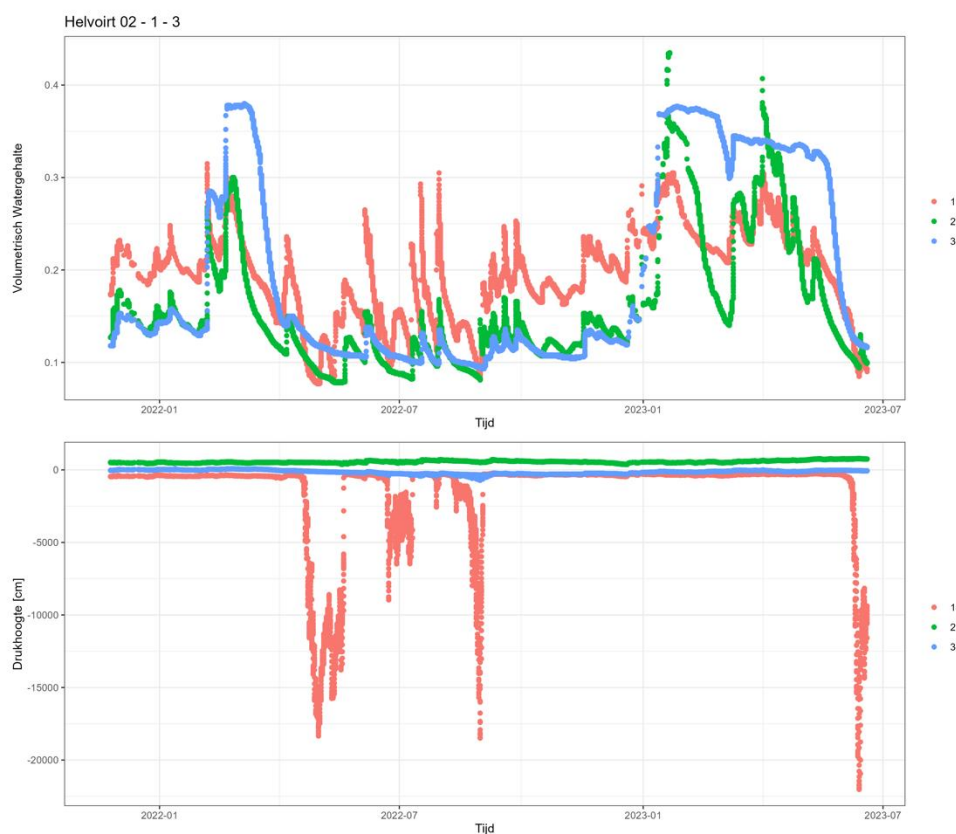
Opvallende zaken:

- Marke 01
 - het gat in de data rond juli 2022, vanwege een storing in een van de sensoren die het hele systeem lam legde (vanwege vakantieperiode werd dit pas laat ontdekt)
 - hoge vochtgehalten (> 0.4 !) gemeten in het voorjaar van 2022
 - lage vochtgehalten (< 0.1) gemeten in de zomer van 2022
- Marke 02
 - het gat in de data rond juli 2022, vanwege een storing in een van de sensoren die het hele systeem lam legde (vanwege vakantieperiode werd dit pas laat ontdekt)
 - veel ruis op het tensiometer signaal van tensiometer 1, waarschijnlijk defect
- Marke 03
 - Zeer hoge zuigspanningen gemeten door de bovenste tensiometer (15cm -mv), van < -20.000 hPa. Dit is uitzonderlijk hoog.

3.3. De meetreeksen van locatie Helvoirt



Figuur 18. Vochtgehalte en drukhoogte meetreeksen van station Helvoirt 01.



Figuur 19. Drukhoogte en drukhoogte meetreeksen van station Helvoirt 02.

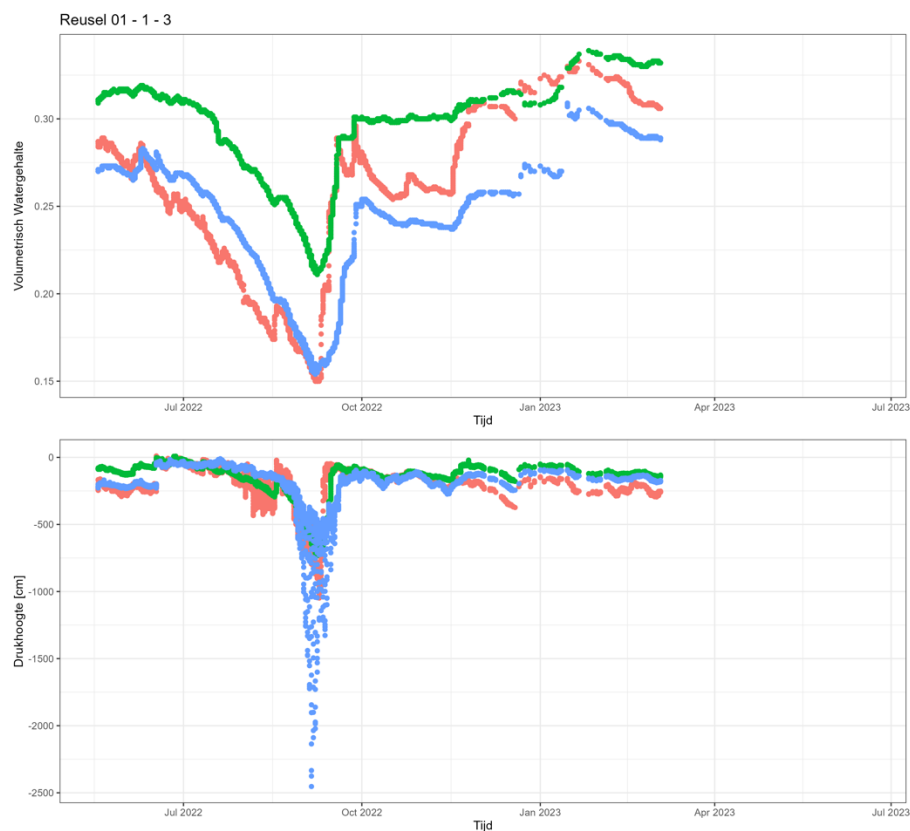


Figuur 20. Vochtgehalte en drukhoogte meetreeksen van station Helvoirt 03.

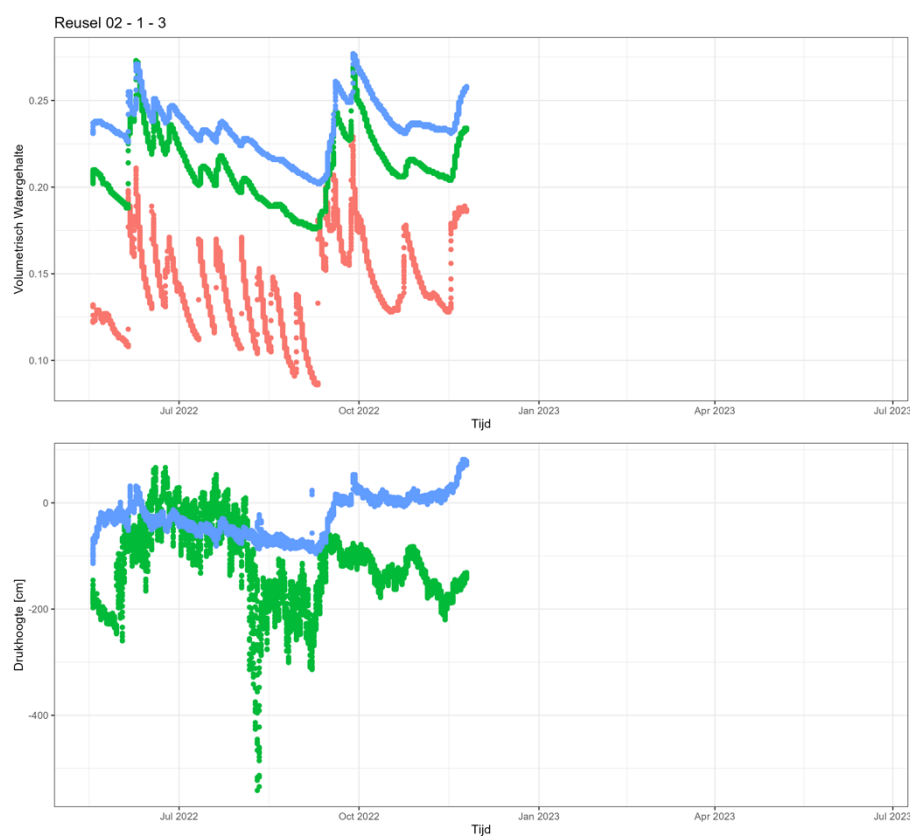
Opvallende zaken:

- Helvoirt 01
 - hoge vochtgehalten (> 0.4 !) gemeten in het voorjaar van 2022 en 2023
 - lage vochtgehalten (< 0.1) gemeten in het voorjaar en de zomer van 2022
 - hoge zuigspanningen gemeten door de middelste tensiometer (45cm -mv), van < -5.500 hPa.
- Helvoirt 02
 - hoge vochtgehalten (> 0.4 !) gemeten in het voorjaar van 2023
 - lage vochtgehalten (< 0.1) gemeten in het voorjaar en de zomer van 2022 door tensiometer 1 en 2
 - Zeer hoge zuigspanningen gemeten door de bovenste tensiometer (15cm -mv), van bijna -25.000 hPa. Dit is extreem hoog.
- Helvoirt 03
 - Alleen metingen van tensiometer 3, waarschijnlijk zijn tensiometer 1 en 2 defect.

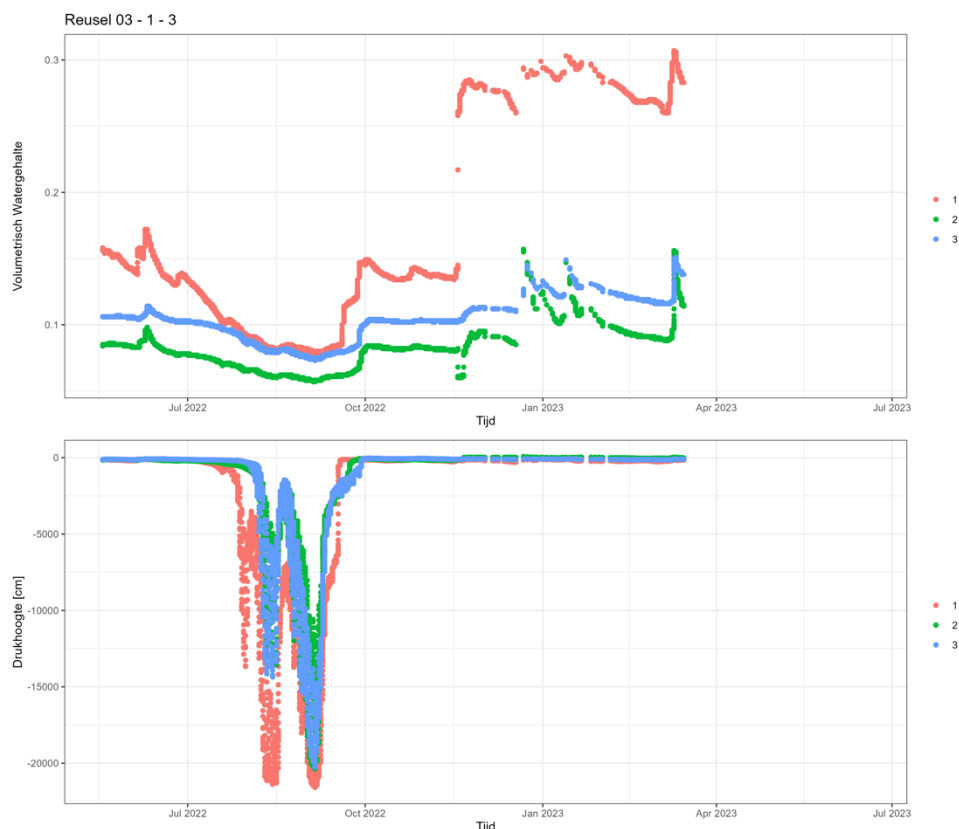
3.5. De meetreeksen van locatie Reusel



Figuur 21. Vochtgehalte en drukhoogte meetreeksen van station Reusel 01.



Figuur 22. Drukhoogte en drukhoogte meetreeksen van station Reusel 02.



Figuur 23. Vochtgehalte en drukhoogte meetreeksen van station Reusel 03.

Opvallende zaken:

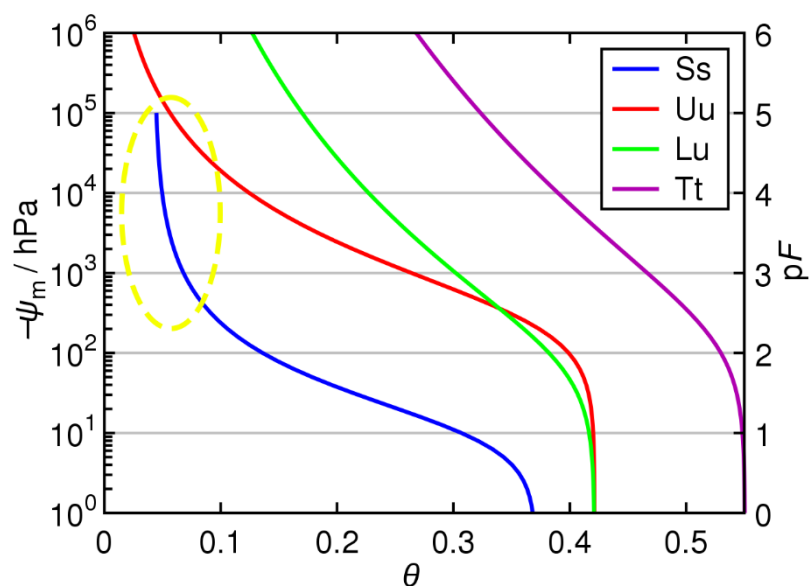
- Reusel 01
 - Gestage afname van het vochtgehalte in voorjaar / zomer 2022
 - Toename van vochtgehalte na het laagste punt eind van de zomer 2022
- Reusel 02
 - De irrigatie van het pastinaak perceel is duidelijk zichtbaar in de meting van vochtsensor 1
 - Vochtsensoren 2 en 3 reageren niet tot nauwelijks op deze irrigatie; wellicht is dit het effect van de verdichte, storende laag.
- Reusel 03
 - Lage vochtgehalten gedurende de gehele zomer van 2022, het vochtgehalte loopt pas weer (sterk) op in de winter van 2022 / voorjaar 2023. Vochtgehalten dalen tot minder dan 6 a 7% [m^3/m^3].
 - Zeer hoge zuigspanningen gemeten door alle drie de tensiometers op 40, 60 en 80 cm diepte. De waarden passeren de -20.000 hPa. Tot op 80 cm diepte is dit een extreem hoge en droge waarde. Bijbehorende vochtgehalten zijn ver beneden de 10% (rond de 6 a 7%). Het hele bodemprofiel is kurkdroog.
 - Het uitdrogen van het profiel gaat langzaam, zeker als het profiel al droog is. Tussen juli en oktober 2022 zakken de vochtgehalten ver onder de 10% [m^3/m^3]. De drukhoogten die corresponderen met de vochtgehalten in deze periode zakken naar hoge negatieve waarden (< -20.000 hPa). We bevinden ons hier in het steile gedeelte van de waterretentie karakteristiek; een kleine toe- of afname van het vochtgehalte zorgt voor een grote toe- of afname van de drukhoogte. Dit is o.a. te zien in waar de blauwe lijn een typische waterretentiekarakteristiek is van een zandgrond. Het gele deel omcirkelt het steile gedeelte wat hier wordt bedoeld.

Wat opvalt zijn twee dingen:

a) een slechts kleine verandering in vochtgehalte zorgt in toenemende mate voor een verandering in drukhoogte: we bevinden ons hier in het 'steile' gedeelte van de waterretentie curve. Dit geldt voor alle tensiometers.

b) het vochtgehalte waarbij de drukhoogte tot grote waarden afneemt is verschillend per diepte: voor tensiometer 1 (ondiep), zakt het vochtgehalte tot ongeveer 8%, terwijl de drukhoogte tot ver onder -20.000 hPa zakt. Voor tensiometer 2 zakt het vochtgehalte tot ongeveer 6% terwijl de drukhoogten

zakken tot ongeveer -20.000 hPa, maar niet verder. Het gedrag van de diepste tensiometer (3), zit daar een beetje tussenin. Dit afwijkende gedrag betekent dat de vorm van de waterretentiecurve wezenlijk anders is voor deze bodemlagen. Dit kan deels aan de textuur liggen, aan de dichtheid of aan een combinatie van deze twee.

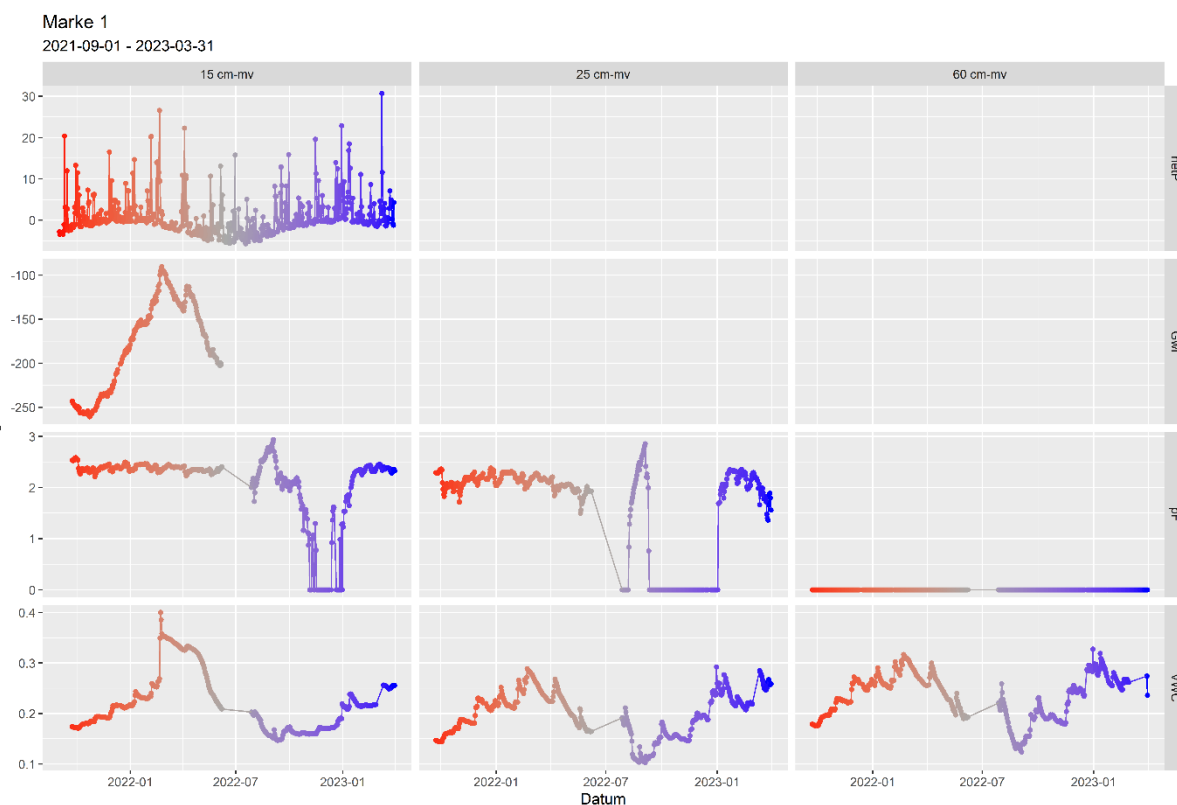


Figuur 24 Typische waterretentie karakteristieken van een aantal grondsoorten. De blauwe karakteristiek hoort bij een zandgrond. Geel omcirkeld is het steile gedeelte (zie tekst).

4. Resultaten en selectie van gegevens

In dit hoofdstuk worden de meetgegevens nogmaals onder de loep genomen, echter nu ligt de focus op bruikbaarheid voor verdere analyse en de constructie van waterretentie karakteristieken en hysteresis karakteristieken. Het construeren hiervan wordt in hoofdstuk 5 verder besproken.

4.1. De Marke, Hengelo

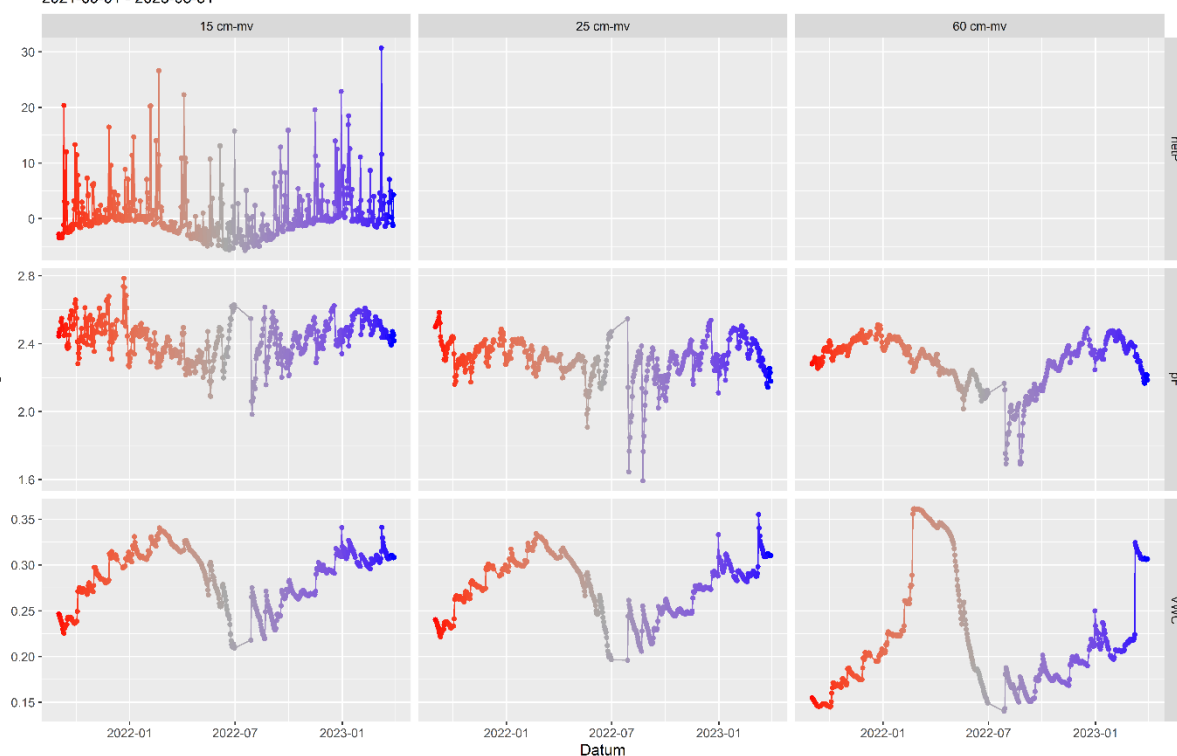


Figuur 25. Analyse van waterretentie voor De Marke 01.

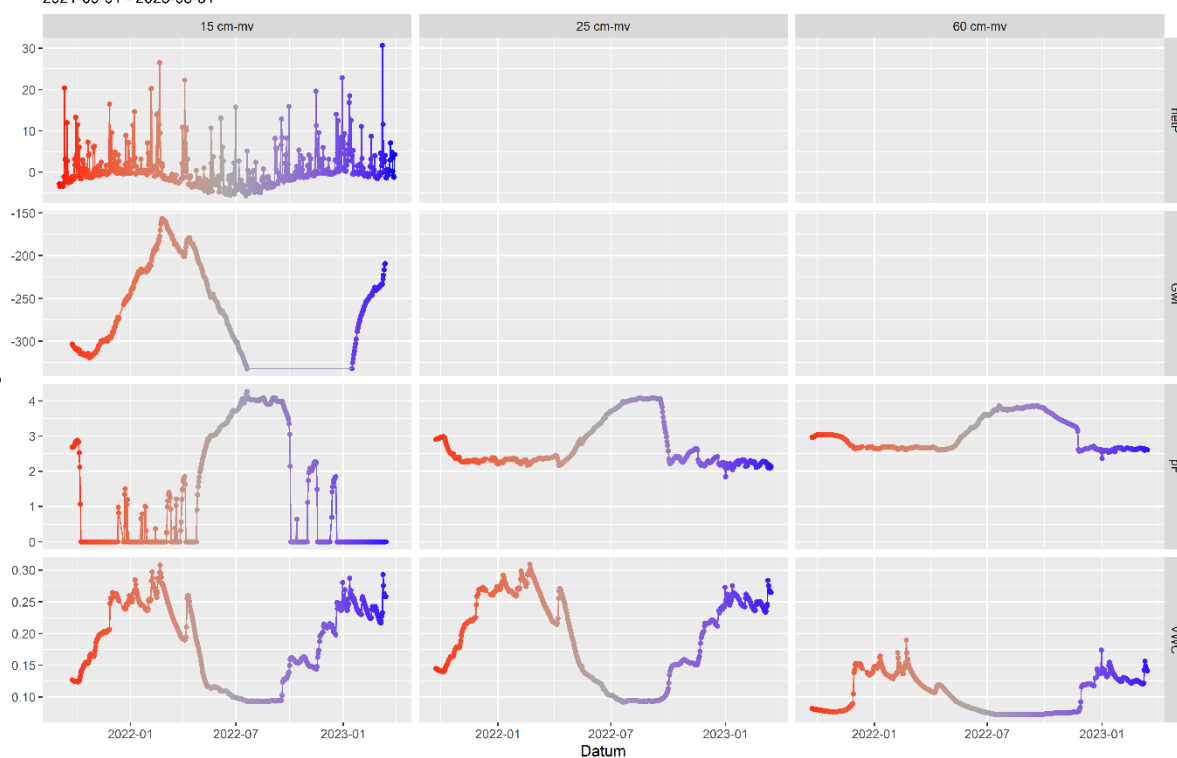
Voor de meetstation De Marke 01 is half februari 2021 het watergehalte op 15 cm-mv maximaal, namelijk circa 35%. De gemeten drukhoogte is dan circa pF 2.3. Bij deze drukhoogte is voor de bouwstenen B03 (sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand) en B04 (zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand) uit de Staringreeks (Heinen, 2020) een theta-s van 23 tot 27%. De pF waarde laat in augustus een toename zien. Wat duidt op een drogere situatie. Het verloop van de drukhoogte over de meetperiode lijkt echter niet een duidelijke link met het watergehalte te hebben.

Het is bekend dat bij deze FRT polymeer tensiometers de afwijking van de drukhoogten ± 350 hPa kan zijn (dus absoluut gezien 700 hPa). Vooral in het natte traject is deze afwijking erg groot. Het is sowieso opvallend dat voor Marke 1 op alle diepten de gemeten drukhoogten allemaal lager dan pF = 3 zijn. Oftewel echt droog wordt het in die periode op deze plek niet. Dit geldt ook voor Marke 2. Beide locaties zijn vanwege het relatief nat blijven minder geschikt voor het analyseren van hysteresis.

Marke 2
2021-09-01 - 2023-03-31



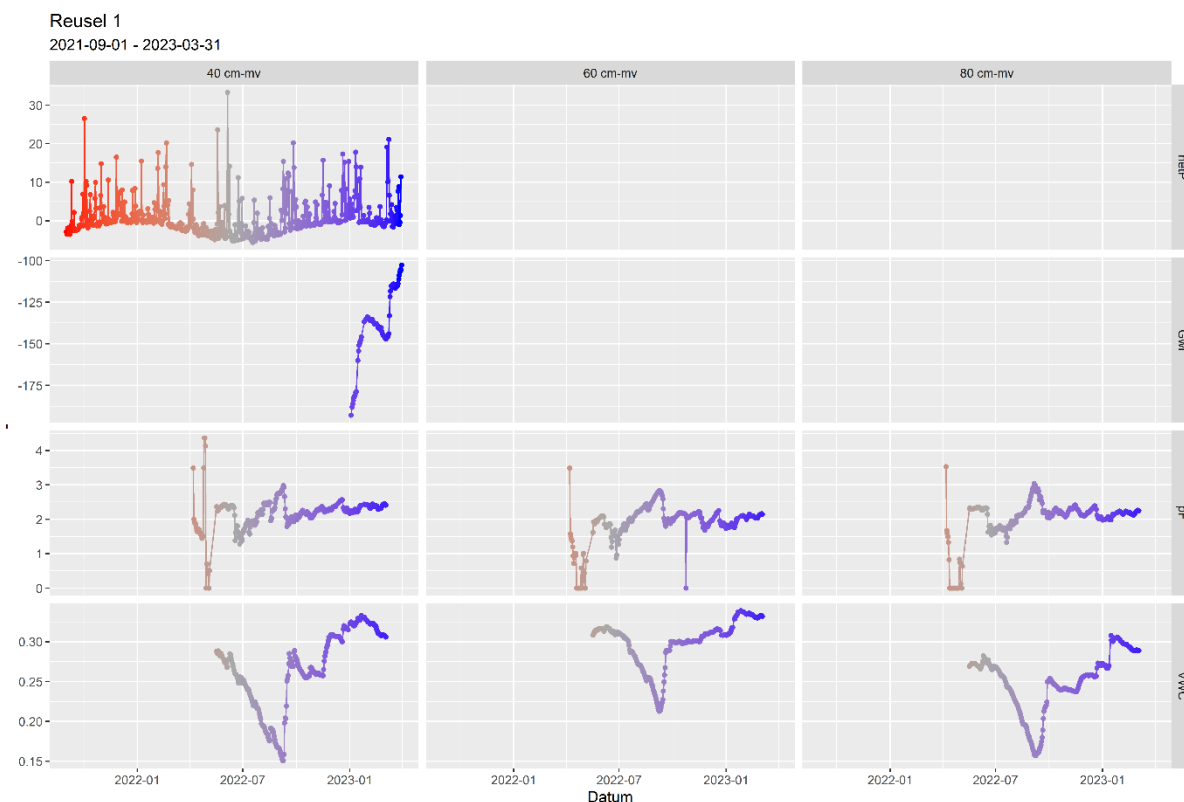
Marke 3
2021-09-01 - 2023-03-31



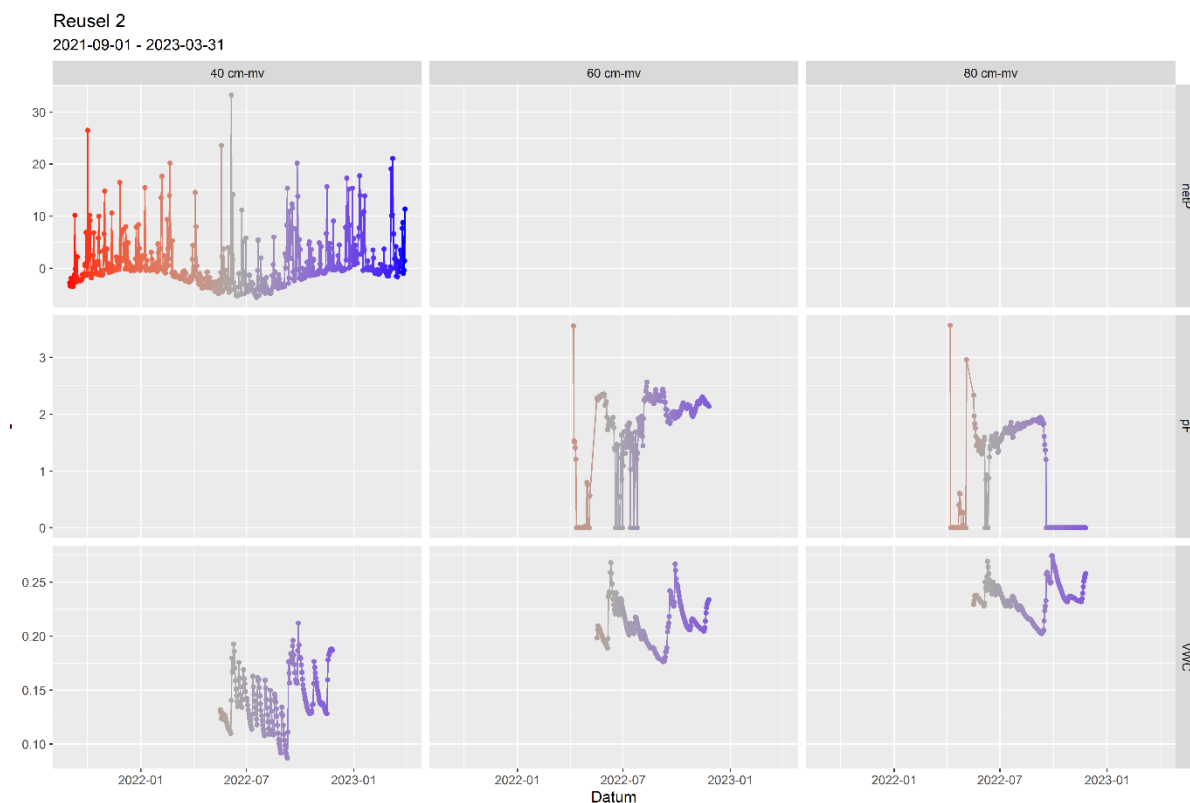
Alleen Marke 3 laat drukhoogten tot lager dan -1.000 hPa (ondiep). Dit is conform verwachting. Voor deze locatie is het wel opvallend dat het vochtgehalte ondiep in de zomer van 2022 niet reageert op neerslaggebeurtenissen. Dit kan fysisch wel zo zijn door bv. hydrofobie of een goed watervasthoudende toplaag, die alle neerslag buffert. Voor het watergehalte is het opvallend dat op 60 cm-mv het verzadigde watergehalte niet boven de 20% uitkomt.

Voor verdere analyse lijkt voor de Marke alleen locatie 3 consistente meetgegevens te leveren. Wellicht met een correctie van het basisniveau van de drukhoogtemetingen.

4.2. Reusel



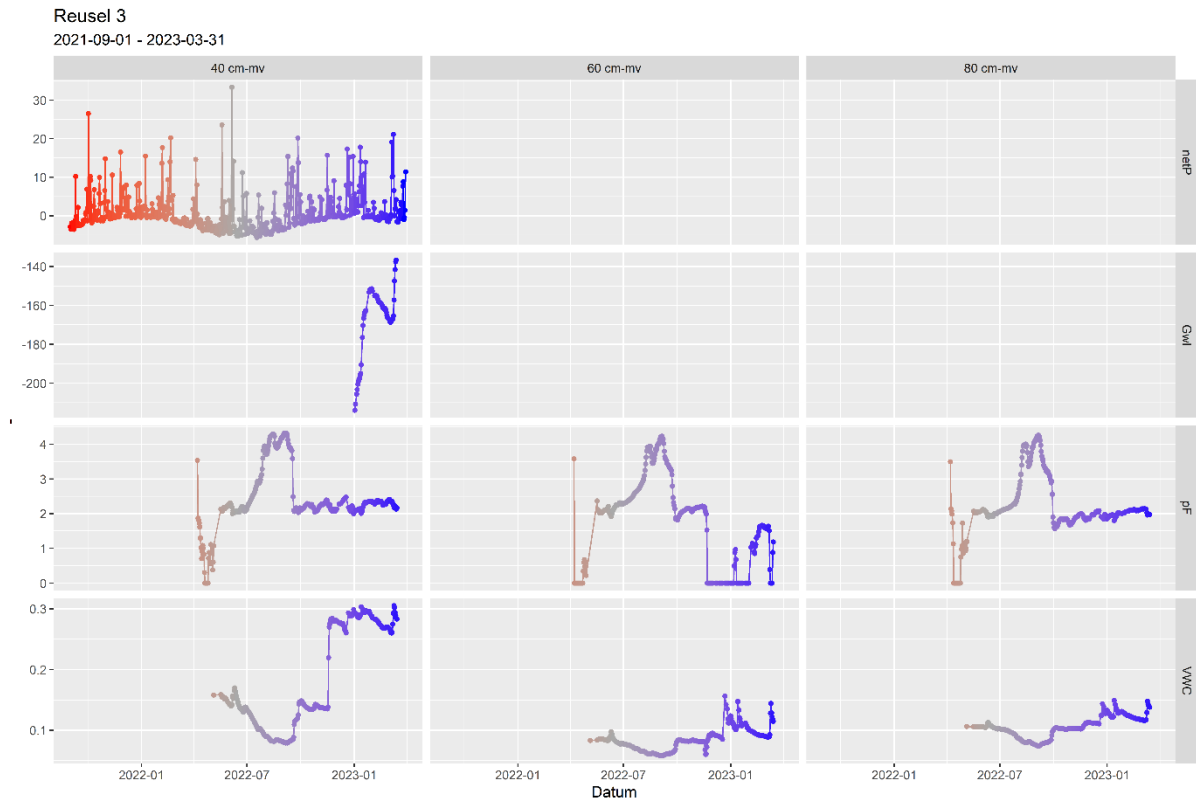
Voor Reusel 1 is tijdens de natte winterperiode van 2022/2023 het vochtgehalte op de 3 diepten maximaal. De pF waarde in die periode is dan nog rond de 2 (circa -100 hPa onderdruk), terwijl verwacht wordt dat die dan lager is. De grondwaterstand is dan maximaal -100 cm: als er geen grondwaterstroming is dan zou inderdaad de drukhoogte waarde aan maaiveld 2 zijn (-100 hPa), maar op 80 cm diepte zou de drukhoogte dan rond de 1 of lager moeten zijn en bij een neerslagoverschot nog zelfs lager. In de zomerperiode zijn duidelijk lagere watergehalten gemeten, waarbij de onderdruk niet heel veel negatiever wordt (tot circa pF = 3). Ook lijken de gemeten onderdrukken tot 1 juli 2022 te sterk te fluctueren.



Voor Reusel 2 zijn er verschillende opmerkingen te maken:

- De meetperiode is relatief kort circa half mei tot eind november 2022.
Voor de drukhoogte is die periode iets langer (vanaf circa 1 april 2022) maar de metingen in die periode lijken niet erg betrouwbaar.
- Drukhoogte:
 - o metingen reeks 1 (op 40 cm-mv) ontbreken.
 - o reeks 3 lijkt op eind meetperiode niet betrouwbaar.
 - o reeks 2 en 3 geven sterke fluctuaties aan, die meteorologisch niet verklaard kunnen worden.
- Watergehalte:
 - o Absolute niveaus op de drie diepten verschillen sterk en lijkt op het ondiepe niveau te laag.
 - o De meetreeksen op de drie diepten lopen wel synchroon.

De meetreeksen bevatten te veel gaten en zijn niet volledig en bovendien niet realistisch genoeg voor verdere interpretatie.

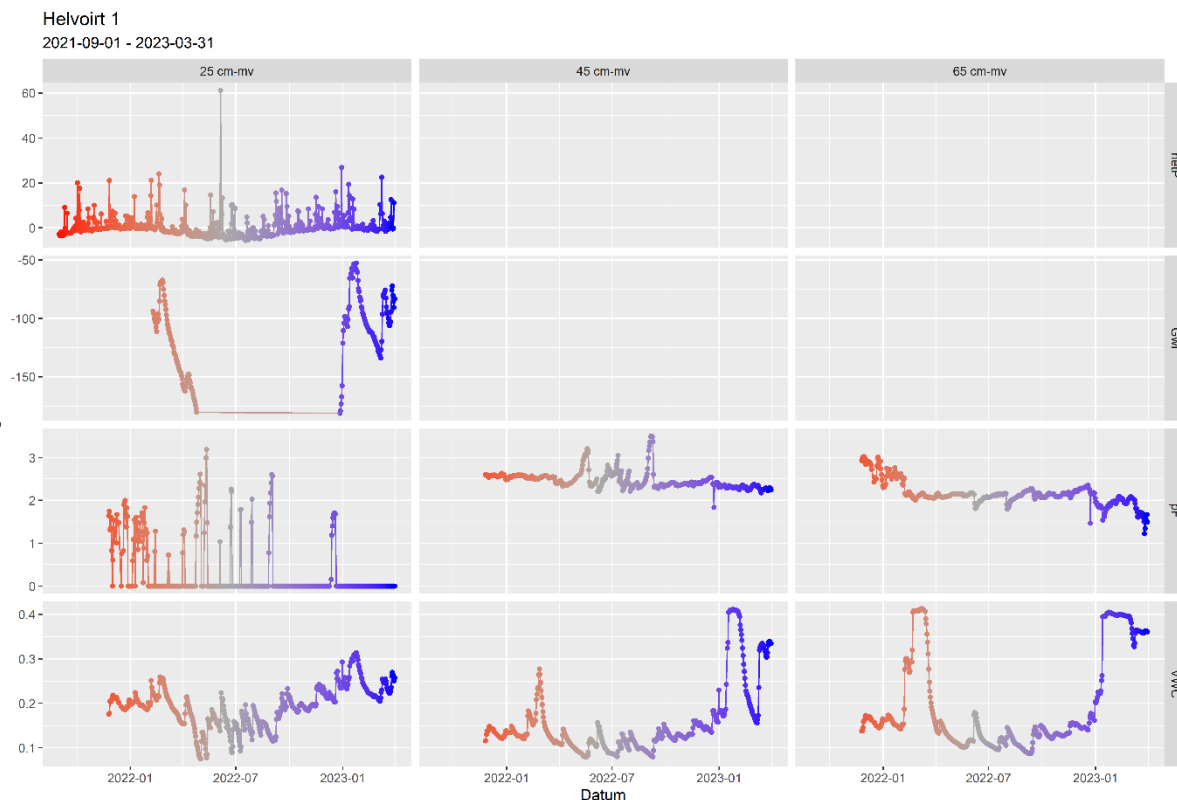


Reusel 3 zijn er verschillende opmerkingen te maken:

- Drukhoogte:
 - o reeks 3 lijkt op eind meetperiode niet betrouwbaar.
 - o reeks 2 en 3 geven sterke fluctuaties aan, die meteorologisch niet verklaard kunnen worden.
- Watergehalte:
 - o Ondiep is er half november een opvallende sprong. Deze sprong is in de drukhoogte niet te zien.
 - o Het maximum op het middeldiepe en diepe niveau is behoorlijk laag.

Mogelijk dat een deel van de gegevens gebruikt kan worden voor de analyse van hysteresis.

4.3. Helvoirt



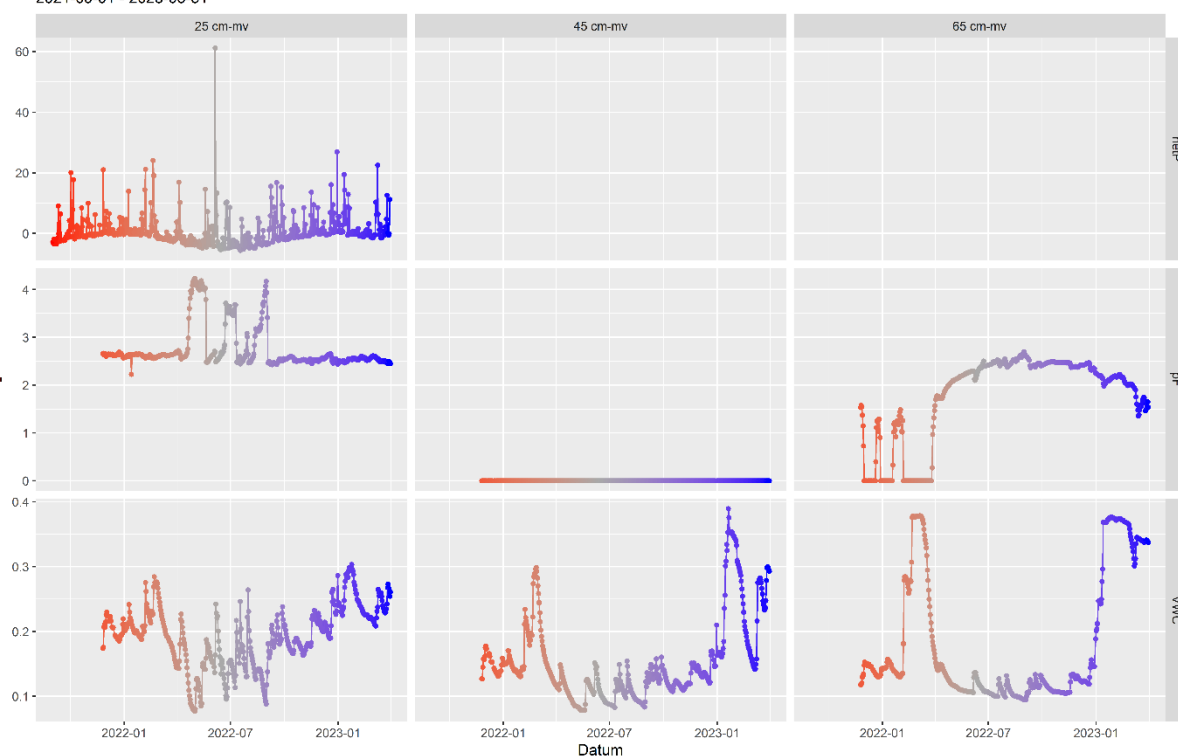
Voor Helvoirt 1 zijn er verschillende opmerkingen te maken:

- Drukhoogte:
 - reeks 1 is erg springerig en lijkt geen samenhang te vertonen met het gemeten vochtgehalte, het bevat bovendien veel 'nulwaarden'.
 - reeks 2 en 3 tonen een zekere offset en lijken net als 1 geen samenhang te vertonen met het vochtgehalte.
- Watergehalte:
 - Ondiep is er half november een opvallende sprong. Deze sprong is in de drukhoogte niet te zien.
 - Het maximum op het middeldiepe en diepe niveau is behoorlijk laag.

Deze gegevens lijken niet geschikt voor de analyse van hysteresis.

Helvoirt 2

2021-09-01 - 2023-03-31



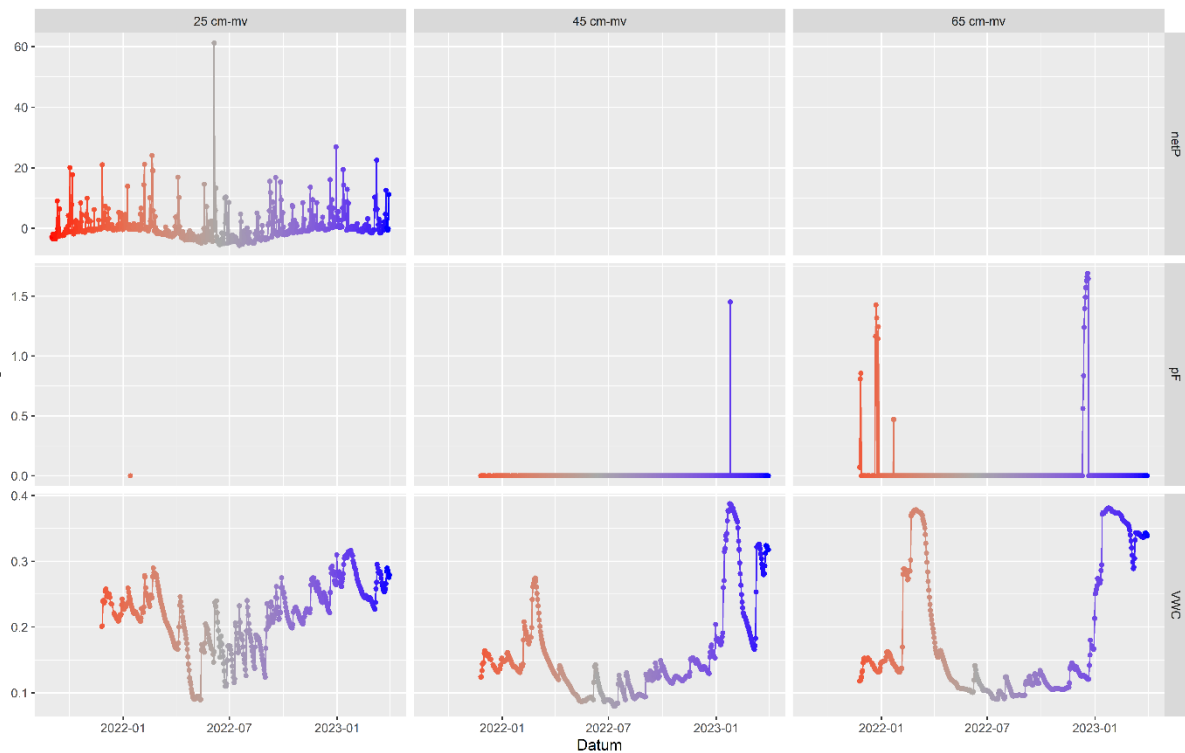
Voor Helvoirt 2 zijn er verschillende opmerkingen te maken:

- Drukhoogte:
 - o reeks 1 is erg springerig en lijkt geen samenhang te vertonen met het gemeten vochtgehalte
 - o reeks 2 is niet relevant vanwege permanente nulwaarden.
 - o reeks 3 lijkt geen samenhang te vertonen met het vochtgehalte. Al is op 1 jan 2023 bij het gemeten, bijna verzadigde, vochtgehalte de bijbehorende onderdruk te hoog.
- Watergehalte:
 - o Ondiep en middeldiep vertonen een plausibele fluctuatie.
 - o Op het diepe niveau lijkt de gemeten vochthoeveelheid tot circa 1 februari 2022 te laag.

Wellicht dat de gegevens op het diepe niveau geschikt voor verdere analyse zijn.

Helvoirt 3

2021-09-01 - 2023-03-31

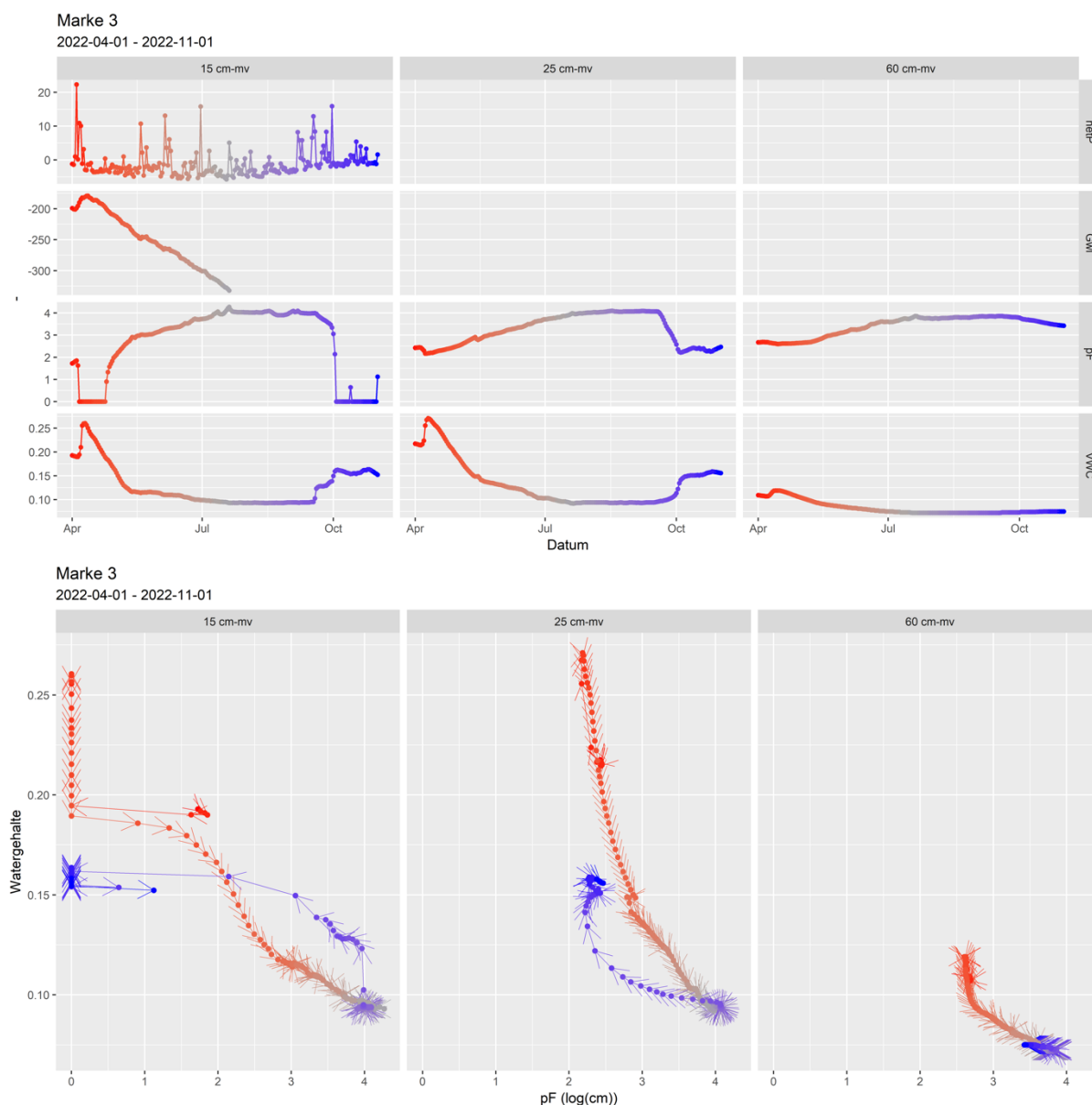


De gegevens van plek 3 van Helvoirt voor de drukhoogte ontbreken of geven geen goed beeld van het drukhoogteverloop en zijn dus niet bruikbaar.

5. Constructie van waterretentie- en hysteresekarakteristieken

Voor de locaties Marke 3 en Reusel 3 zijn de meetgegevens zoals hierboven is geconcludeerd het meest geschikt voor verdere interpretatie. Met de meetgegevens willen we inzicht krijgen in het effect van hysteresis op cycli van verdroging en vernatting. Daarom zijn de gegevens van de drukhoogte en het watergehalte als tijdlijnen tegen elkaar uitgezet.

Voor de Marke 3 zijn in het bovenste deel van de grafiek de meetgegevens in de tijd uitgezet, waarbij de kleur van rood via grijs naar blauw gaat lopende van links naar rechts. Deze kleuren zijn ook gebruikt in het onderste deel van de grafiek waarbij het watergehalte tegen de drukhoogte is uitgezet. Op 25 cm diepte is eerst de verdroging te zien (rood naar grijs) en vervolgens de vernatting (naar blauw), waarbij een zeker watergehalte bij een lagere drukhoogte wordt bereikt dan in de eerste verdrogingscyclus. Dit is een klassiek voorbeeld van hoe hysteresis werkt. Op de diepte van 15 cm is echter een atypisch geval te zien, waarbij de vernattingscurve boven de verdrogingscurve ligt. Dit kan te maken hebben met het feit dat de metingen van watergehalte qua locatie niet exact hetzelfde zijn. Voor het diepe niveau is vanwege de diepe ligging de variatie in watergehalte slechts beperkt en daardoor is hysteresis niet prominent terug te zien.

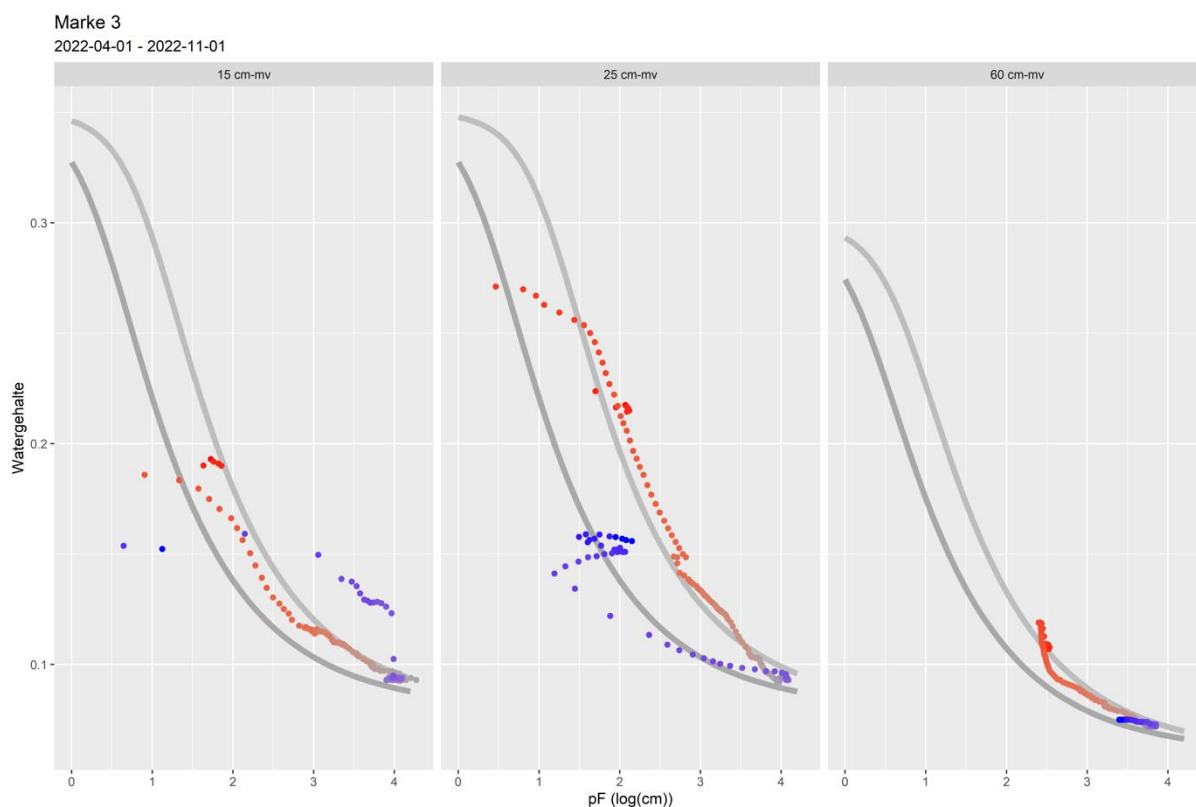


In de onderstaande figuur zijn “drying en wetting curves” toegevoegd om inzichtelijk te maken in welk gebied de hysteresis zich afspeelt. In de figuur boven is te zien dat op 25 en 60 cm diepte onderdrukken zijn gemeten die lager dan -200 hPa zijn. Dit geldt ook voor de winterperiode. Waarschijnlijk is hier sprake van een offset in de meetwaarde. Om hier rekening mee te houden is een correctie doorgevoerd, welke in de kolom “Offset” in de onderstaande tabel is opgenomen. Hierdoor verschuiven de meetpunten in de figuur in het bijzonder voor de lagere pF-waarden naar links.

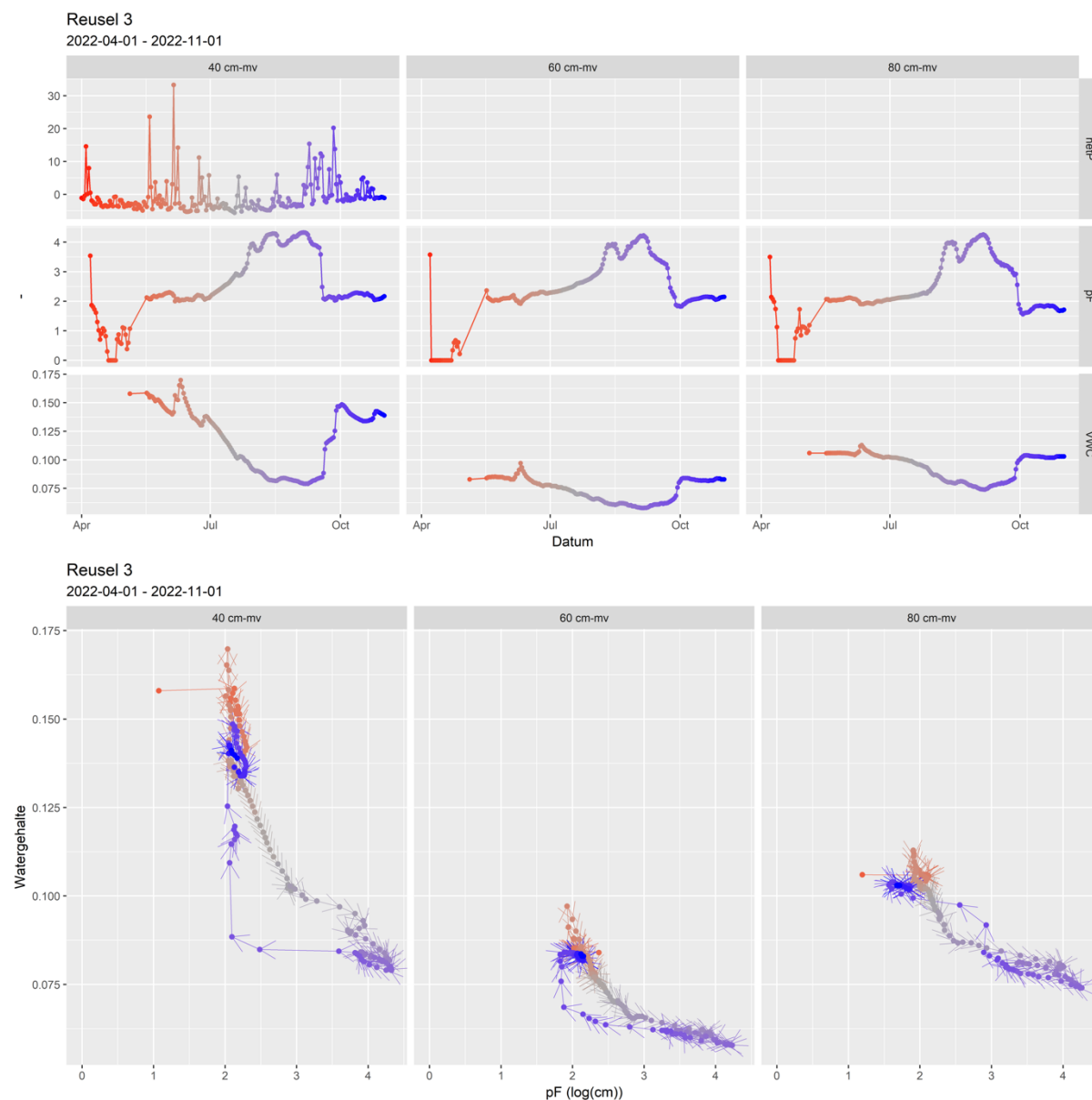
Tabel 2 Van Genuchten parameters voor de waterretentie karakteristieken van Marke 3 metingen.

Diepte (cm-mv)	Theta-r (cm ³ /cm ³)	Theta-s (cm ³ /cm ³)	Alpha (1/cm)	Npar (-)	Lpar (-)	Hysteresis factor (-)	Offset (cm)
15	0.08	0.35	0.12	1.397	0.295	4	0
25	0.08	0.35	0.06	1.397	0.295	8	90
60	0.06	0.30	0.20	1.397	0.295	3	150

Om het gebied met hysteresis te definiëren zijn factoren van 3 tot 6 gehanteerd.



Voor Reusel 3 lijkt hysteresis op 40 en 60 cm-mv herkenbaar, waarbij de vernatting op het laatste wel heel erg stijl lijkt te verlopen.



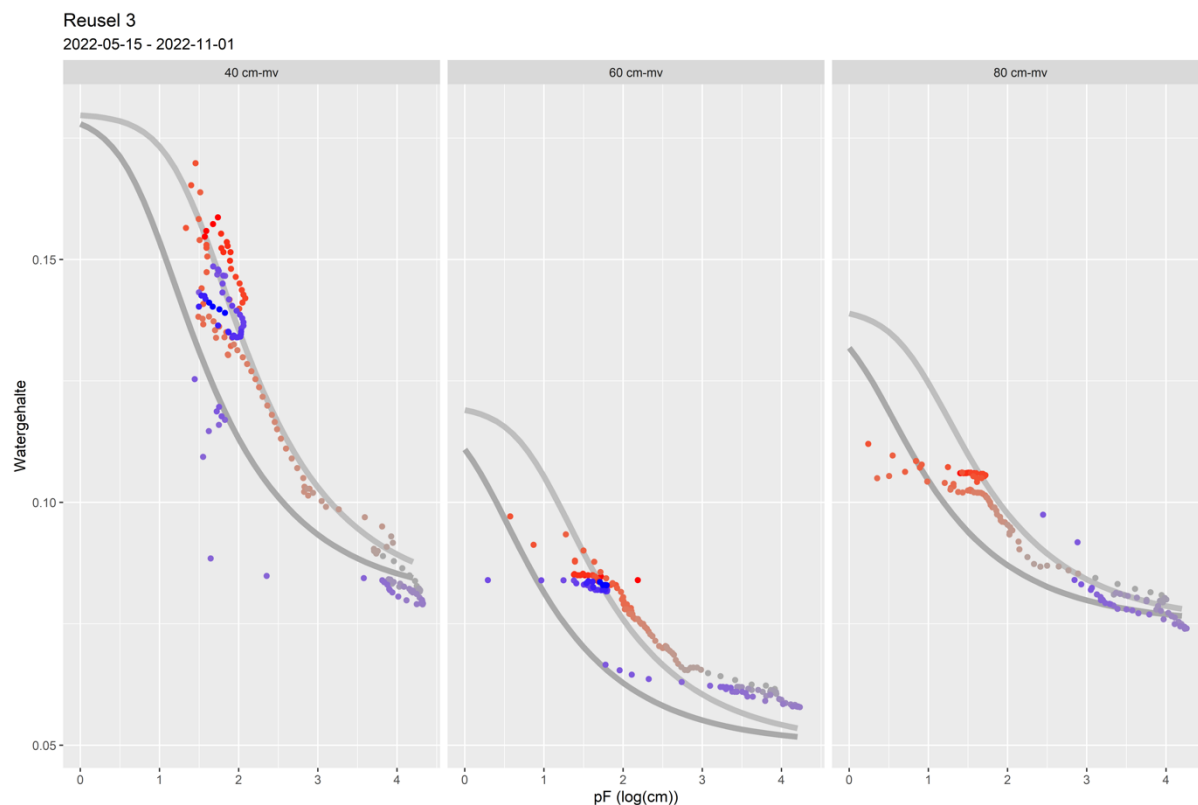
Figuur 26. De gemeten reeksen en hieruit geconstrueerde 'hysteresis curven' voor station Reusel 3.

In de onderstaande figuur zijn “drying en wetting curves” toegevoegd om inzichtelijk te maken in welk gebied de hysteresis zich afspeelt. In de figuur boven is te zien dat op alle meetdiepten zuigspanningen zijn gemeten die lager dan -50 hPa zijn. Dit geldt ook voor de winterperiode. Waarschijnlijk is hier sprake van een offset in de meetwaarde. Om hier rekening mee te houden is een correctie doorgevoerd, welke in de kolom “Offset” in de onderstaande tabel is opgenomen. Hierdoor verschuiven de meetpunten in de figuur in het bijzonder voor de lagere pF-waarden naar links.

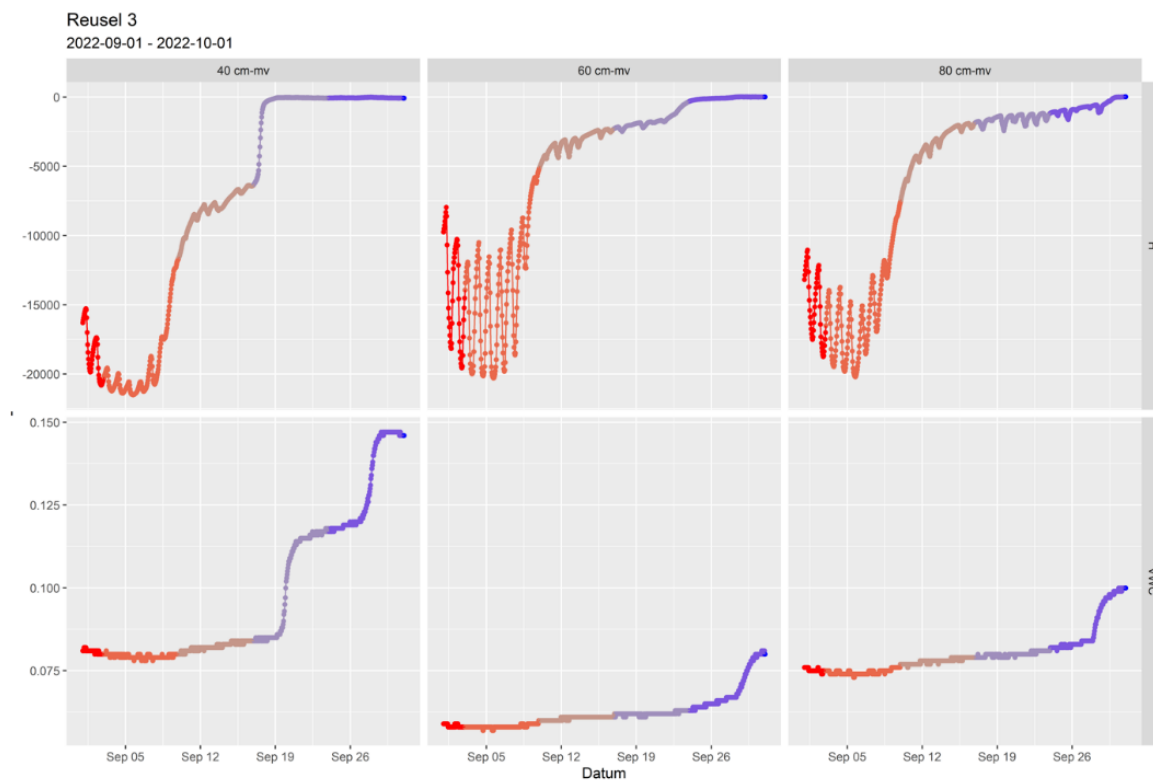
Tabel 3 Van Genuchten parameters voor de waterretentie karakteristieken van Reusel 3 metingen

Diepte (cm-mv)	Theta-r (cm ³ /cm ³)	Theta-s (cm ³ /cm ³)	Alpha (1/cm)	Npar (-)	Lpar (-)	Hysteresis factor (-)	Offset (cm)
15	0.08	0.18	0.04	1.397	0.295	4	80
25	0.05	0.12	0.12	1.397	0.295	6	80
60	0.075	0.14	0.14	1.397	0.295	5	80

Om het gebied met hysteresis te definiëren zijn factoren van 4 tot 6 gehanteerd.



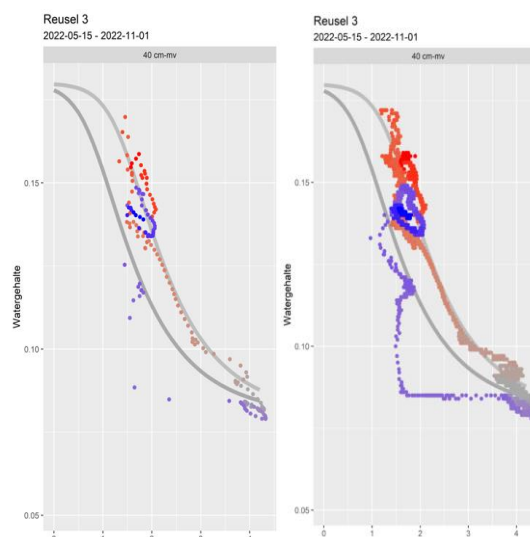
Figuur 28. Gestileerde hysteresis curven gemodelleerd rond bestaande watergehalte-drukhoogte meetpunten voor drie diepten voor station Reusel 3. De laag op 60 cm diepte vertoont zichtbaar een lagere verzadigd vochtgehalte waarde, wat duidt op verdichting (lagere porositeit). De laag op 80 cm diepte bevat deze verdichting ook, maar in mindere mate.



Figuur 27. Uurgegevens van statio Reusel 3 voor september 2022.

In Figuur 27 staan de uurgegevens van september 2022 weergegeven. Duidelijk is aan het begin van september het dagelijks verloop in gemeten drukhoogte, die niet aanwezig is in het watergehalte (dit is trouwens ook een motivatie om met daggemiddelde waarden te rekenen). Ook blijkt de smooth overgang in de metingen. Dit om het hoekige verloop in Figuur 29 te illustreren (links op basis van daggemiddelden en rechts op basis van uur gegevens). Het betreft de metingen van 16 september 2022 tot en met 21 september 2022.

Tenslotte is het de vraag of de verdichting van de tweede laag in de metingen zichtbaar is. Bij een verdichte laag is het poriëngehalte (de porositeit) lager dan bij een niet verdichte laag en daarmee ook het watergehalte bij verzadiging. In de onderstaande tabel links zijn de hoogste gemeten watergehalten weergegeven. Hierbij zijn de hoogste waarden met een groene kleur gemarkeerd en de laagste (wellicht verdichte) lagen met rood. Om de vergelijking visueel eenvoudiger te maken zijn per locatie de waarden uit de linker tabel lineair geschaald op laag 1, die de standaardwaarde 0.4 heeft gekregen; dit is dan de rechter tabel.



Figuur 29. Verschil in constructie van waterretentie curve met dag gemiddelden (links) en uur gegevens (rechts). Zie tekst.

In de rechter tabel zouden dan, onder voorwaarden, de verdichte lagen zichtbaar moeten worden in de vorm van substantieel lagere verzadigde vochtgehalten. Dit is duidelijk het geval bij Marke 3 laag 3, Reusel 3 laag 2 en 3. De voorwaarde die hierbij geldt is dat bij alle hoogst gemeten vochtgehalten in laag 1 deze verzadiging ook optreedt bij de 'verdichte' laag. Of dit daadwerkelijk het geval is, is niet aan te tonen.

Tabel 4 Hoogst gemeten watergehalten van alle meetstations [m^3/m^3], links de originele gemeten waarden en rechts de waarden rekenkundig lineair omgerekend naar een standaard waarde voor het verzadigde vochtgehalte in laag 1 van 0.4.

Locatie	Hoogst gemeten watergehalte		
	Laag 1	Laag 2	Laag 3
Marke 1	0.38	0.29	0.32
Marke 2	0.34	0.34	0.36
Marke 3	0.3	0.3	0.17
Reusel 1	0.33	0.34	0.31
Reusel 2	0.2	0.26	0.27
Reusel 3	0.3	0.14	0.14
Helvoirt 1	0.32	0.41	0.41
Helvoirt 2	0.3	0.35	0.38
Helvoirt 3	0.32	0.39	0.39

Locatie	Hoogst gemeten watergehalte		
	Laag 1	Laag 2	Laag 3
Marke 1	0.40	0.31	0.34
Marke 2	0.40	0.40	0.42
Marke 3	0.40	0.40	0.23
Reusel 1	0.40	0.41	0.38
Reusel 2	0.40	0.52	0.54
Reusel 3	0.40	0.19	0.19
Helvoirt 1	0.40	0.51	0.51
Helvoirt 2	0.40	0.47	0.51
Helvoirt 3	0.40	0.49	0.49

6. Analyse met SWAP

Interessant is om de situaties met en zonder verdichting na te spelen met een SWAP-simulatie. De resultaten in dit hoofdstuk zijn simulaties en hebben, afgezien van de neerslag gegevens, zijn niet gekalibreerd met de overige metingen op de drie locaties. De simulaties zijn een academische exercitie om effecten van verdichting op watergehalten en hysteresis in beeld te brengen.

Hysteresis is een fascinerend fenomeen. Hierbij is de weg van de vernatting anders dan die bij verdroging. De theorie geeft dan aan dat bij vernatting hetzelfde vochtgehalte wordt bereikt bij een minder grote onderdruk. Dit betekent bij neerslag dat deze minder snel in de bodem infiltreert, doordat in het infiltratiefront de Δh minder groot wordt (de doorlaatfactor is alleen van het vochtgehalte afhankelijk).

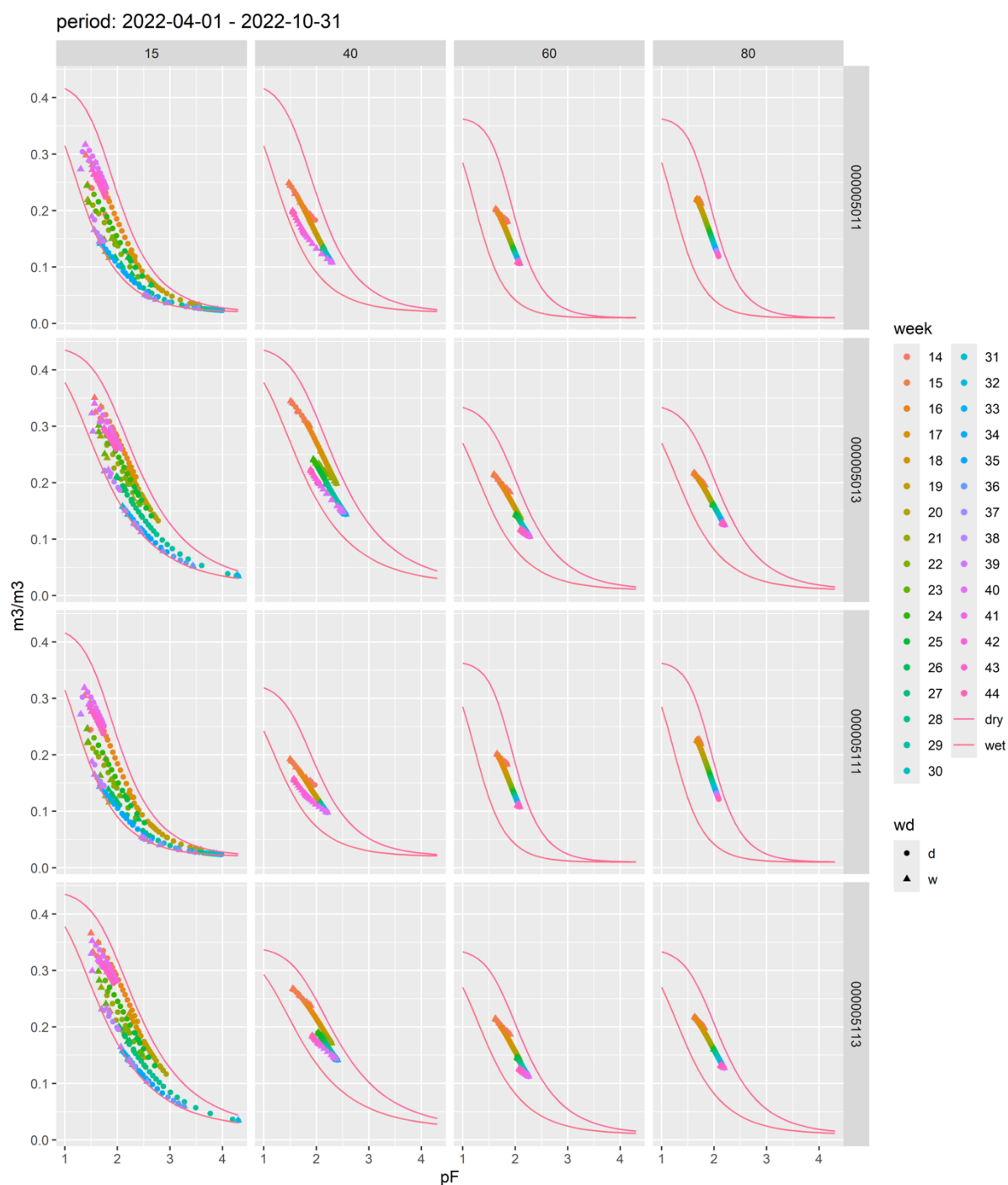
Een aantal zand-profielen is doorgerekend met als bovengrond Staringreeksprofielen: B01 en B03 met daaronder de bijbehorende ondergronden O01 en O03. Dit zijn fijn zandige profielen met een oplopend leemgehalte: B01/O01 is leemarm en B03/O03 is sterk leemig. Tevens is een variant doorgerekend met een verdichte tussenlaag (25 tot 40 cm-mv). Aangenomen is dat deze verdichte laag een 10% lager poriëngehalte heeft bij een 3 keer zo lage k-factor (water doorlatendheid) bij verzadiging. Tenslotte is uitgegaan van hysteresis met een factor 5.

In de onderstaande tabel is weergegeven hoe de relatie tussen watergehalte en pF-waarde op vier verschillende diepten verloopt (15, 40, 60, 80 cm-mv) in deze simulaties.

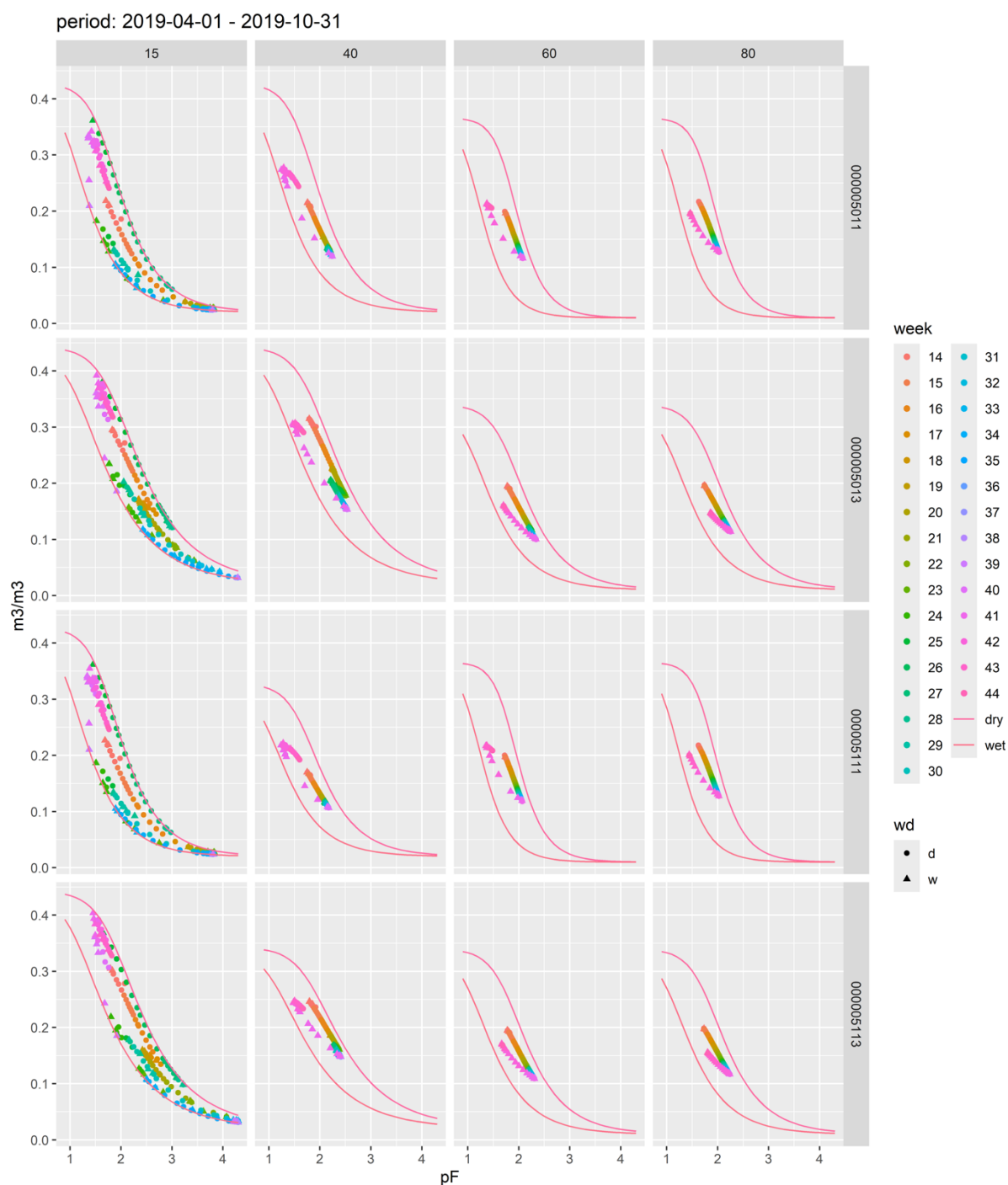
Tabel 5 Overzicht van de model runs, profiel benaming en gesimuleerde verdichting.

Variant	Profiel	Tussenlaag verdicht
00005011	B01 en O01	-
00005013	B03 en O03	-
00005111	B01 en O01	25-40 cm-mv
00005113	B03 en O03	25-40 cm-mv

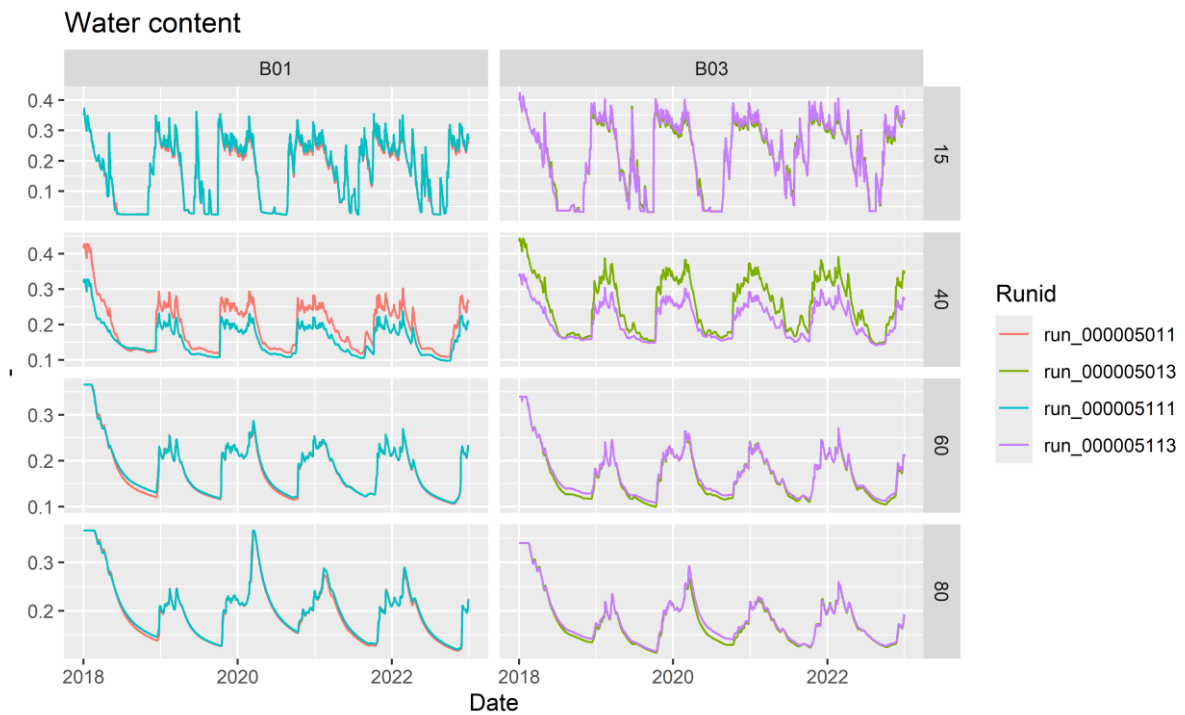
Uit deze figuur volgt inderdaad dat de invloed van hysteresis het grootst is op de ondiepere niveaus. Op deze diepte zijn de wisselingen in watergehalte het grootst. Hier zijn de resultaten voor het jaar 2022 gepresenteerd omdat dit het meetjaar is. Tevens is het figuur voor het jaar 2019 weergegeven om te laten zien dat ook op een diepere niveaus sprake van hysteresis kan zijn.



Figuur 30 Simulatie van pF en hysteresis curven voor omstandigheden zoals in tabel 5 zijn aangegeven. Periode 2022.



Figuur 31 Simulatie van pF en hysteresis curven voor omstandigheden zoals in tabel 5 zijn aangegeven. Periode 2019.



Figuur 32 Het gesimuleerde bodenvochtgehalte op verschillende diepte in het profiel bij verschillende simulatieruns. Bij een verdichte laag op 40 cm diepte daalt in de zomer het watergehalte iets minder in de lagen op 60 en 80 cm diepte dan bij afwezigheid van een verdichte laag op deze diepte.

Referenties

Heinen, M., G. Bakker, J.H.M. Wösten, 2020. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks – Update 2018. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2978.

Struyk, P., G. Oomen, C. ter Berg, N. van Eekeren, 2021. Diepere beworteling en meer droogtetolerantie : Grond diepmengen. V-focus : vakblad voor adviseurs in de dierlijke sector, 1-18, pp 32-35. SN 1574-1575. <https://edepot.wur.nl/539206>.