



Bodemvochtgehalte sensoren voor watermanagement in grondteelten

Onderzoek naar de mogelijkheid om via bodemvochtsensoren onder de bewortelde zone uitspoeling te kunnen meten of te signaleren

Wim Voogt, Jos Balendonck en Aat van Winkel

Rapport WPR-715



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Referaat

Onderzoek is gedaan naar de toepassing van vochtsensoren in het watermanagement bij grondgebonden teelten, met name om uitspoeling te kunnen signaleren en te voorkomen. Voor de toepassing is de DACOM Sensation, met sensoren op 15, 20 en een diepe sensor op 60 cm gekozen. Het meetsignaal bleek niet direct bruikbaar, hiervoor is een kalibratiemethode ontwikkeld. Bij de praktijktesten bij diverse teelten bleek dat een patroon van water alleen in de bovenste twee sensoren kon worden gevolgd. De diepe sensor bleek ongevoelig voor veranderingen, ook niet als er werkelijk uitspoeling werd gemeten in situaties waar een lysimeter aanwezig was.

Abstract

The application of soil moisture sensors to indicate leaching from the root zone was tested in several situations with soil grown greenhouse crops, with and without lysimeters. The integrated DACOM-Sensation, with sensors at 15, 25 and 60 cm depth was used in these tests. It appeared that the measuring signal was inaccurate, a conversion and calibration equation was developed to convert the signal to volumetric soil moisture contents. During the tests it appeared that the irrigation and infiltration into the top and subsoil could be followed, however the signal from the sensor at 60 cm was stable and it could not indicate any leaching, not even in case of situations with realistic leaching as derived from the lysimeters.

Rapportgegevens

Rapport WPR-715

Projectnummer: 3742202300

PT nummer: 15114 \

DOI nummer: 10.18174/466014

Thema: Water en Nutrienten

Dit project / onderzoek is mede tot stand gekomen door bijdragen van Stichting Programmafonds Glastuinbouw en Productschap Tuinbouw (tot 2016) en het ministerie van LNV

Disclaimer

© 2018 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw, Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Vochtsensoren	9
2.1	DACOM vochtsensor 'Sensation'	9
2.2	Evaluatie van de Sensation voor de glastuinbouw	10
2.2.1	Test Sensation voor een kasgrond	11
2.2.2	Kalibratie Sensation in twee stappen	13
2.2.3	Sensorkalibratie (stap 1)	14
2.2.4	Bodemkalibratie (stap 2)	16
2.3	Uitspoelingsmonitor	17
3	Resultaten en discussie	21
3.1	Praktijkvoorbeelden vochtsensoren en lysimeters	21
3.1.1	Chrysantenteelt	21
3.1.2	Lysianthus	23
3.1.3	Voorbeeld druppelbevloeiing: Alstroemeria	26
3.2	Praktijkvoorbeelden, zonder lysimeters	27
3.2.1	Radijs	27
3.2.2	Lelie	29
4	Discussie en conclusies	33
4.1	Interpretatie meetwaarden	33
4.2	Plaatsing en sensorkalibratie	33
4.3	De DACOM Sensation	34
4.4	Sensor onder de teeltlaag	34
4.5	Metten van uitspoeling	35
4.6	EC meting en verzouting	35
5	Conclusie en aanbevelingen	37
5.1	Conclusies	37
5.2	Aanbevelingen	38
	Literatuur	39

Samenvatting

Nadat in een vorig traject met telers de randvoorwaarden voor bodemvochtsensoren was besproken en er een keuze was gemaakt voor de DACOM-Sensation, zijn deze uitvoerig getest. Aanvankelijk bleek dat het meetsignaal zoals dat uit de sensoren kwam niet zonder meer bruikbaar was. Het Sensetion concept is namelijk gebaseerd op het bepalen van de verzadigingsgraad van een bodem als signaal voor berekenen. Voor toepassing in glastuinbouw is juist een sensor nodig die het daadwerkelijke vochtgehalte meet. Als eerste zijn daarom formules ontwikkeld om het meetsignaal te kunnen omrekenen. Daar zijn ook kalibraties voor uitgevoerd met behulp van een meetopstelling. Uiteindelijk kon het meetsignaal worden omgezet naar een werkelijk vochtgehalte. Omdat het ondoenlijk was dit voor alle bodemtypes en bedrijfsspecifieke situaties uit te voeren is er een "one fits all" berekening toegepast. De sensoren zijn vervolgens uitgetest in de praktijk op een aantal bedrijven met diverse teelten en bodemsituaties. Op een aantal bedrijven was ook een lysimeter aanwezig, zodat parallel aan de metingen van vochtgehalten op diverse diepten de uitspoeling kon worden gemeten. De resultaten laten zien dat het gietpatroon goed te volgen is in de bodem via de vochtsensoren op 15 en 20 à 25 cm. Ook kunnen trends worden gesignaleerd of de bodem natter wordt of juist uitdroogt. Herplaatsing van de sensoren is dan wel een spelbreker omdat de vochtgehalten vrijwel nooit op hetzelfde niveau terugkomen. Helaas vertonen de sensoren op 60 cm diepte bij de onderzochte bedrijven nauwelijks tot geen verandering in vochtgehalte. Ook niet of nauwelijks als er op grond van de waterbalans vrijwel zeker uitspoeling kon worden verwacht. Bij de situaties waar de werkelijke uitspoeling via de lysimeter kon worden gemeten, bleek deze uitspoeling niet te herkennen in het patroon van het meetsignaal van de sensor op 60 cm. Het lijkt er daarom op dat een sensor op 60 cm diepte niet geschikt is om uitspoeling te signaleren en om als waarschuwing te kunnen dienen. Voor bedrijven waar het grondwater zich op grotere diepten bevindt speelt dit wat minder, hoewel ook in die situaties de dynamiek vrij beperkt is en signalering van uitspoeling niet eenvoudig is op te merken uit de patronen van de vochtgehalten. De combinatie van sensoren met een bodemvochtmodel geven een beter beeld van de situatie, omdat hiermee overschotsituaties beneden de wortelzone kunnen worden berekend. Het is echter onder de gegeven praktische omstandigheden lastig om dit toe te passen omdat de omrekening naar absolute vochtgehalten en daarmee de onzekerheid van de uitkomst van een berekening vrij groot is. Daarbij komt dat met de "one-fits-all" omrekening naar vochtgehalten, de verschillen tussen een berekende waarde en de werkelijkheid, voor individuele bedrijven groot zijn, vanwege de bodemspecifieke parameters groot. Niettemin geven vochtsensoren in het algemeen de teler ondersteuning bij de dagelijkse planning van de watervraag. Vooral in de tweede teeltlaag, op ca 20 cm diepte zijn ze een belangrijke indicator voor het optreden van uit-/indrogging van de bodem en een signaal om de watervraag te starten. Om toch adequaat aan de zorgplicht te kunnen voldoen, verdient het aanbeveling om voor de praktijk een virtuele lysimeter te ontwikkelen, waarbij zowel de watervraag, wateraanbod als waterberging in de bodem wordt berekend. Eventueel kan dit worden aangevuld met (goede) vochtsensoren om het geheel te kunnen bewaken.

1 Inleiding

Bij de grondgebonden teelten is het onmogelijk de waterkringloop volledig te sluiten waardoor vaak sprake is van een bemestingoverschot én een beregeningsoverschot. Deze combinatie geeft een hoog risico van uitspoeling van nutriënten. Wat ook meespeelt is dat de bodem voor veel telers een 'black box' is. De processen die zich daarin afspelen zijn onzichtbaar en de parameters zijn moeilijk meetbaar. De watergift wordt daarom vaak gebaseerd op gevoel en ervaring.

In het kader van het 'Activiteitenbesluit Glastuinbouw' moeten bedrijven met grondgebonden teelten voldoen aan de "zorgplicht" om ongewenste emissies te minimaliseren (Infomil 2018). Dit betekent dat de water- en mestgift moet worden afgestemd op de gewasbehoefte.

Dit vereist verandering van bestaande uitgangspunten en werkwijzen in de teelt en ook de introductie van nieuwe technieken en strategieën voor watergeven en bemesten. De variatie aan gewassen en bedrijfsspecifieke omstandigheden (grondsoort, grondwaterstand) maakt dat er veel meer inspanning nodig is om de implementatie van deze nieuwe technieken en strategieën te bewerkstelligen. Bovendien is een langere tijd nodig om de variaties door seizoenen en klimaat beter te kunnen interpreteren.

In voorgaande projecten is veel ervaring opgedaan met lysimeters en bodemvochtsensoren (Voogt *et al.* 2012; Balendonck *et al.* 2012). Lysimeters zijn in de praktijk moeilijk te implementeren vanwege een aantal praktische en teeltkundige redenen en de relatief hoge kostprijs. Bodemvochtsensoren kennen deze nadelen niet of aanzienlijk minder. Telers willen daarom graag bodemvochtsensoren inzetten voor een effectiever watermanagement. Bovendien leveren vochtsensoren ook bruikbare informatie over de verzadigingsgraad van de bodem, waarmee dreigende zuurstof tekorten kunnen worden gesignaleerd. Dit kan bijdragen tot een beter teeltmanagement en een verbeterd teeltresultaat. Een nadeel van vochtsensoren is de complexe interpretatie van de meetdata en de vertaalslag naar watergeefstrategieën gericht op minimale uitspoeling. Met een lysimeter kan uitspoeling wél gekwantificeerd worden, maar het nadeel is dat de lysimeter traag reageert. Vochtsensoren daarentegen reageren direct op veranderingen in het vochtgehalte in de afzonderlijke bodemlagen, echter zijn niet direct geschikt om uitspoeling te meten. Wel kunnen ze waarschuwen voor gevaar van uitspoeling.

Uit het genoemde project emissie management is tevens gebleken dat geïntegreerde bodemvochtsensoren (op een meetpaal) veel gebruiksgemak hebben; tijdens grondbewerking zijn deze gemakkelijk tijdelijk weg te halen. Ook bleek dat de strategie van watergeven en bemesten bij grondgebonden teelten complex is. Factoren als het gewasstadium, grondsoort, hydrologie spelen mee. Bovendien is de watergift (beurtgrootte, frequentie) vaak verankerd in vaste patronen. Deze hangen enerzijds samen met teeltstrategie maar worden daarnaast ook in belangrijke mate door het gevoel bepaald. Om aan de emissiedoelstellingen c.q. zorgplicht te voldoen zal de teler zijn tot nu toe gebruikelijke werkwijze moeten aanpassen. Van groot belang is dan dat het "gevoel" van de teler overeenkomt met meetwaarden. Het is voor telers niet eenvoudig om alle interacties van bodem met vochtsensoren en het gedrag van de lysimeter te leren kennen. Dit is een leerproces en zal door ervaring vorm moeten krijgen. Het is van groot belang dat de gebruikte technieken, dus vochtsensoren, betrouwbaar zijn.

In een vorig traject is samen met de telers gezocht naar sensoren die enerzijds voldoen aan de algemene eisen van betrouwbaarheid en meetnauwkeurigheid en anderzijds aan de wensen en randvoorwaarden die telers stellen vanwege de toepasbaarheid in de praktijk (Voogt *et al.* 2015). In dit rapport worden de resultaten van de doorontwikkeling (met name de vertaling van het signaal naar vochtgehalte) en de toepassing in de praktijk besproken. Een belangrijke vraag vanuit de telers en telersvertegenwoordiging hierbij is, of met een vochtsensor op een diepte onder de teeltlaag, bijv. op 60 cm, uitspoeling kan worden gesignaleerd. Hiermee zou dan de functie van een lysimeter kunnen worden overgenomen. Voor een beschrijving van bedrijven en situaties wordt verwezen naar de eerdere rapporten: (Voogt *et al.* 2015).

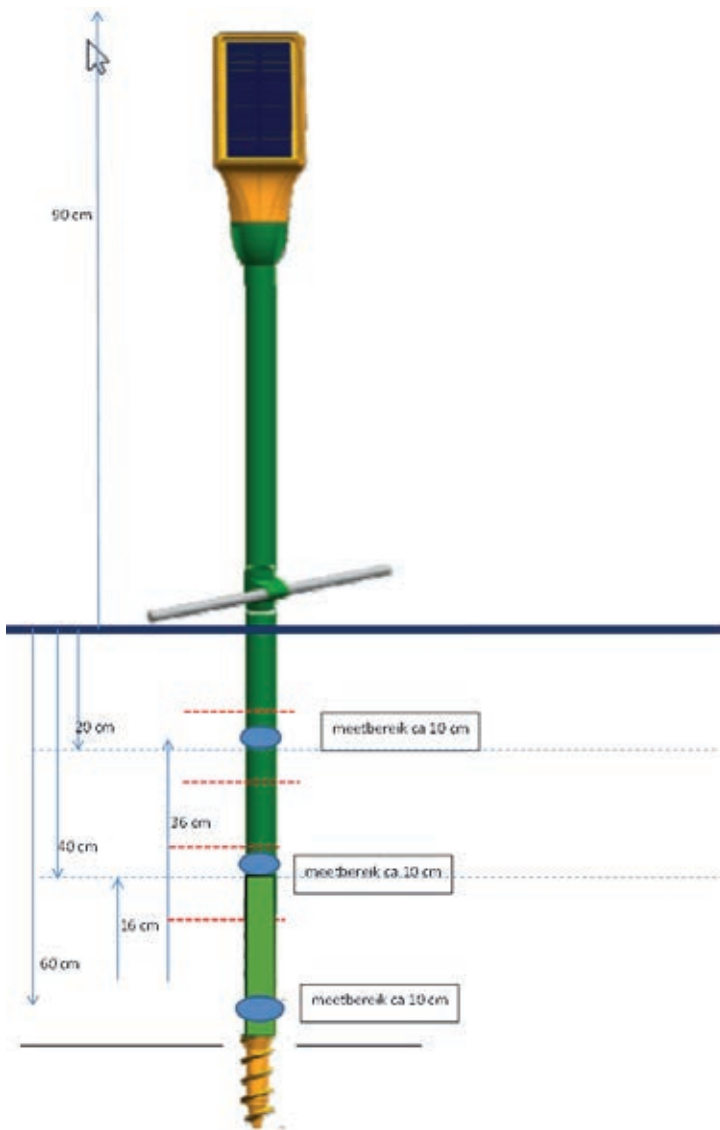
Een andere belangrijke vraag van telers is dat door het meer droog telen de kans op verzouting toeneemt, zeker in gebieden met 'zoute kwel'. Een sensor op 60 cm zou dan een EC verhoging kunnen signaleren, waardoor op tijd ingrijpen mogelijk is. Deze vraag is echter tijdens het project naar voren gekomen. De in dit project gekozen sensoren meten echter geen EC, waardoor er in dit project geen verder onderzoek naar is gedaan. Omdat de vraag wel leeft, wordt er bij de discussie en conclusie wel een paragraaf aan gewijd.

Tenslotte worden in het hoofdstuk conclusies een aantal aanbevelingen voor verdere ontwikkeling van het "gereedschap" voor telers om aan de eisen van de zorgplicht te kunnen voldoen.

2 Vochtsensoren

2.1 DACOM vochtsensor 'Sensation'

Bij aanvang van het project, en voor het onderzoek, is de keuze gemaakt om als bodemvocht meetsysteem de 'Sensation' van DACOM (Voogt *et al.* 2015) te gaan gebruiken. Dit systeem (of meetstok) bestaat uit een PVC buis van 1,42 meter, en bevat een drietal sensoren op verschillende diepten. De buis is voorzien van een boorkop, die in een voorgeboord gat op diepte kan worden geplaatst. De onderste sensor bevindt zich op 16 cm van de punt van de boor, de middelste op ca 35 cm en de sensor bevindt zich op 55 cm van de punt van de boor. De sensoren meten over een gemiddelde zone van 10 cm (zie tekening). De meetdiepte is afhankelijk van de diepte van indraaien. Bij normale plaatsing meet je op 15 cm, 35 cm en 60 cm diepte.



Figuur 2.1 Schematische weergaven van de Sensation, uitgevoerd met drie sensoren.

De sensor werkt volledig draadloos en verstuurt de meetdata naar de 'cloud', een DACOM databank waar de data opgevraagd kan worden. Het geïntegreerde communicatiegedeelte bestaat uit een zonnepaneel en een GPRS modem inclusief SIM kaart welke gemonteerd zijn boven op de meetstok. Het zonnepaneel en de communicatiemodule blijven bovengronds zichtbaar en moeten het liefst boven het gewas blijven om voldoende licht op te vangen. Om die reden heeft DACOM speciaal voor toepassing in de glastuinbouw de Sensation voorzien van een langere meetstok.

Standaard kan de Sensetion uitgelezen worden via een App op een SmartPhone of via een webapplicatie op de PC die de data van de DACOM database kan uitlezen. In het project is een software module ontwikkeld waarmee de data via een webserver bij Wageningen UR kon worden opgehaald en vervolgens na omrekening (zie verderop) werd doorgezonden naar het LetsGrow platform. Hiermee hadden telers en onderzoekers toegang tot de (voor bodemvochtgehalte gekalibreerde) meetgegevens.

De energie voor het uitvoeren van een meting en de communicatie werd geleverd door een accu. De accu wordt bijgeladen door het zonnepaneel in perioden van voldoende lichtopvang door de panelen. In principe zou de sensor daarmee enkele dagen moeten kunnen doormeten in geval van een donkere periode. In de praktijk bleek echter de datacommunicatie regelmatig uit te vallen doordat er structureel onvoldoende licht op de panelen viel, c.q. het stroomverbruik voor de communicatie te hoog was, in met name de donkere perioden in de wintermaanden.

2.2 Evaluatie van de Sensetion voor de glastuinbouw

Voor weergave van het vochtgehalte heeft DACOM op basis van ervaringen in de open teelten gekozen voor een benadering waarbij niet het vochtgehalte, maar juist de beschikbare hoeveelheid vocht in relatie tot de mate waarin de bodem het water kan vasthouden wordt weergegeven. Als referentie voor dit laatste kiest DACOM de veldcapaciteit (pF-waarde 2.0). Voor elke plaatsing moet het bodemtype worden gekozen aan de hand van eenvoudig beschikbare kenmerken (klei, zand, zavel etc.). Uit de meetwaarden wordt vervolgens het (onder-) verzadigingspercentage berekend aan de hand van standaard pF-curven. De gedachte daarbij is dat de teler dan snel bij een eventuele berekening inzicht krijgt in de "bijvulruimte".

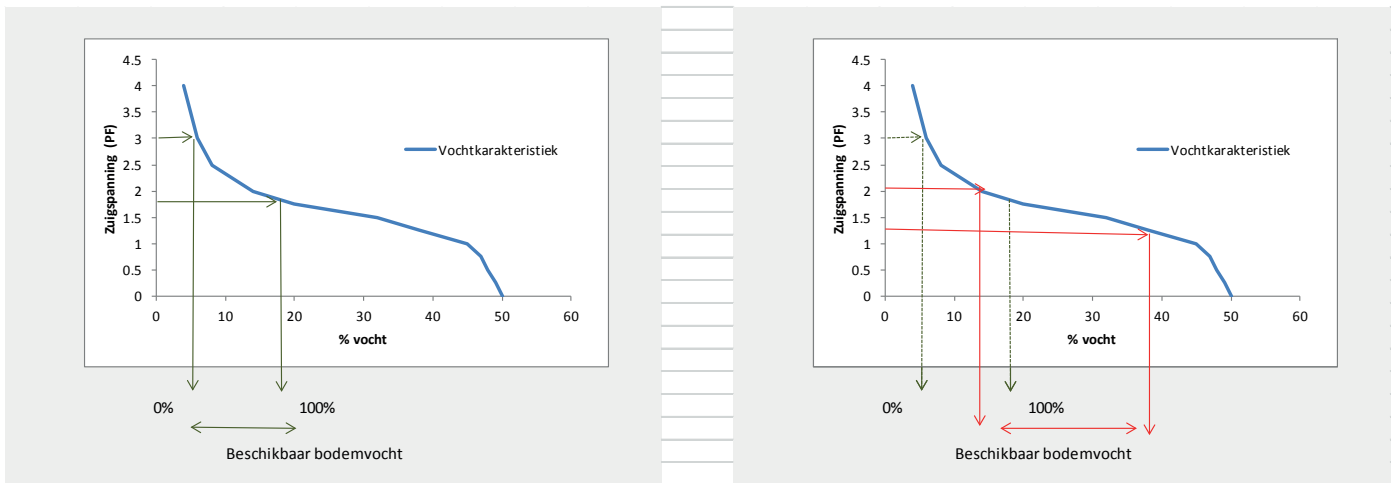
Uit voorgaand onderzoek blijkt echter dat bij kasgronden het vochniveau in de bodem nauwelijks dynamiek vertoont in de weergegeven data. Om dit te kunnen begrijpen is meer uitleg nodig van de werking en interpretatie zoals DACOM die gebruikt. Daartoe gebruiken we de waterrententiecure (pF-curve) welke de zuigspanning (in pF) relateert aan het volumetrisch vochtgehalte (in %) van de bodem.

In een volledig met water verzadigde grond is de pF 0. Door de zwaartekracht zal het water echter uit de grote poriën lopen tot een pF van 1,8 (voor zand) of 2,5 (voor klei) wat overeen komt met een grondwaterstand van 60 cm onder het maaiveld. We noemen dit de veldcapaciteit van een bodem.

Een pF van 4,2 (overeenkomend met ongeveer 160 m afstand van het maaiveld tot het grondwater) is het verwelkingspunt. Op dat moment kan de plant geen water meer opnemen uit de grond. De hoeveelheid voor de plant beschikbaar water bevindt zich dus tussen pF 1,8 (voor zand) en 2,5 (voor klei) (veldcapaciteit) en pF 4,2 (verwelkingspunt). In de praktijk kiest men voor het bijvulmoment een waarde van de pF die nog ruim vanaf het verwelkingspunt ligt, bijvoorbeeld rond pF 3.

In onderstaande grafieken is e.e.a. nader toegelicht (Figuur 2.2). Links is de situatie gegeven voor een typische situatie voor een buitenteelt met een zandgrond. Hierin zien we dat het werkgebied van de sensor het "beschikbare vocht" van 0-100% ligt tussen pF 3 (droog) tot pF 1.8 (verzadiging). Rechts, de situatie in een willekeurige glastuinbouwsituatie. Er wordt frequent water gegeven, de zuigspanning is vaak de onderkant van het traject (pF < 2), met in de bodem een zuigspanning van zelfs 1.5 of lager. De meetwaarden (volgens de DACOM kalibratie) kunnen dan oplopen tot ver boven de 40% tot wel 60-70%. Omdat de pF-curve voor dit werkgebied een vlakke curve heeft, zien we dan een vrij lage dynamiek.

Het komt er op neer dat in de glastuinbouw, voor de daar typisch gebruikte bodems en watergeefstrategieën de waarden van de DACOM sensoren altijd aan de bovenkant van het traject van 0-100% zitten, of zelfs er bovenuit, als er lagere zuigspanningen (pF < 2) heersen dan de ingestelde referentie.



Figuur 2.2 Typische pF-curven voor een teelt in de grond in de buiten situatie (links) en een kasteelt voor een zandgrond.

In de glastuinbouw wordt meestal boven veldcapaciteit geteeld. Ook zijn de gehanteerde standaard pF curven, ontwikkeld voor en afkomstig van de akkerbouw, niet representatief voor kasgronden. Dit zijn meestal lichte gronden met een hoog organische stof gehalte door de frequente aanvoer van organisch materiaal en het doorwerken van gewasresten. Ook zijn de bulkdichtheden aanzienlijk lager dan voor de akkerbouw situaties. Met andere woorden, de op deze wijze weergegeven waarden zijn niet bruikbaar voor het irrigatiemanagement in kasteelten. Daarom is besloten de Sensetion in een gecontroleerde proef nader onder de loep te nemen om te bezien of een andere weergave van de metingen door de Sensetion voor de glastuinbouw mogelijk is.

2.2.1 Test Sensetion voor een kasgrond

Als eerste is een test gedaan waarbij de Sensetion geplaatst is in een meetopstelling waarin verschillende zuigspanningen konden worden aangelegd. Zo konden verschillende vochtgehalten in-situ gerealiseerd worden en de ruwe DACOM meetwaarde (D_R) daarmee gecorreleerd worden. De bak is gevuld met een gehomogeniseerde standaard kasgrond (type fijn bollenzand). Er zijn drukhoogten van 0 (verzadiging) tot ca -3,5 m aangelegd, waarmee een groot bereik van verschillende vochtgehalten werd gerealiseerd.

De werkelijke gerealiseerde vochtgehalten werden bepaald door de pF-curve van de bodem te gebruiken voor vertaalslag van drukhoogte(D) naar bodemvochtgehalte. Daartoe is de pF-curve van dezelfde bodem ook bepaald met behulp van een pF-bak (zie Tabel 2.1).

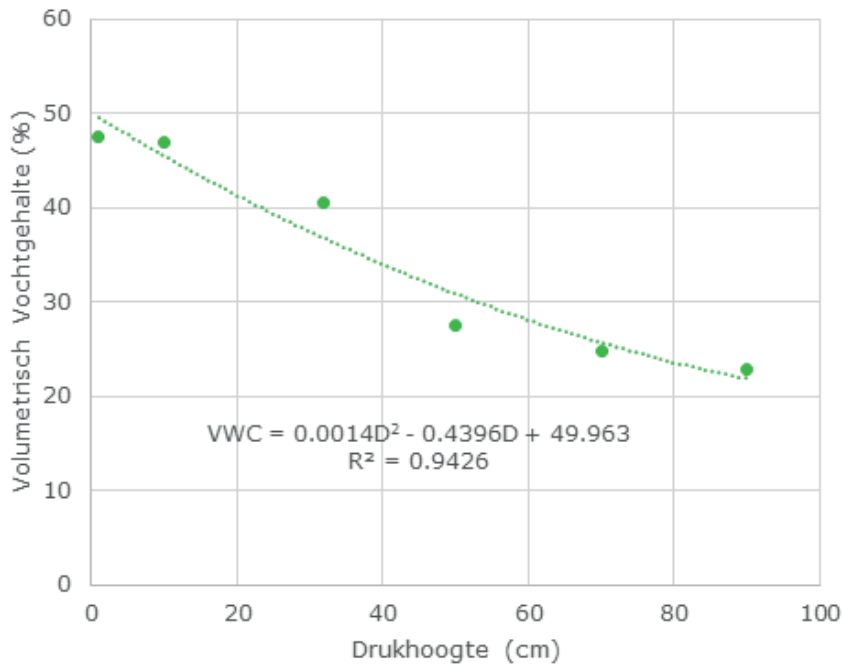
Tabel 2.1

Sensor kalibratie in een testbak met zand (pF-bak). Watergehalte (in %) bij verschillende drukhoogten (in cm.).

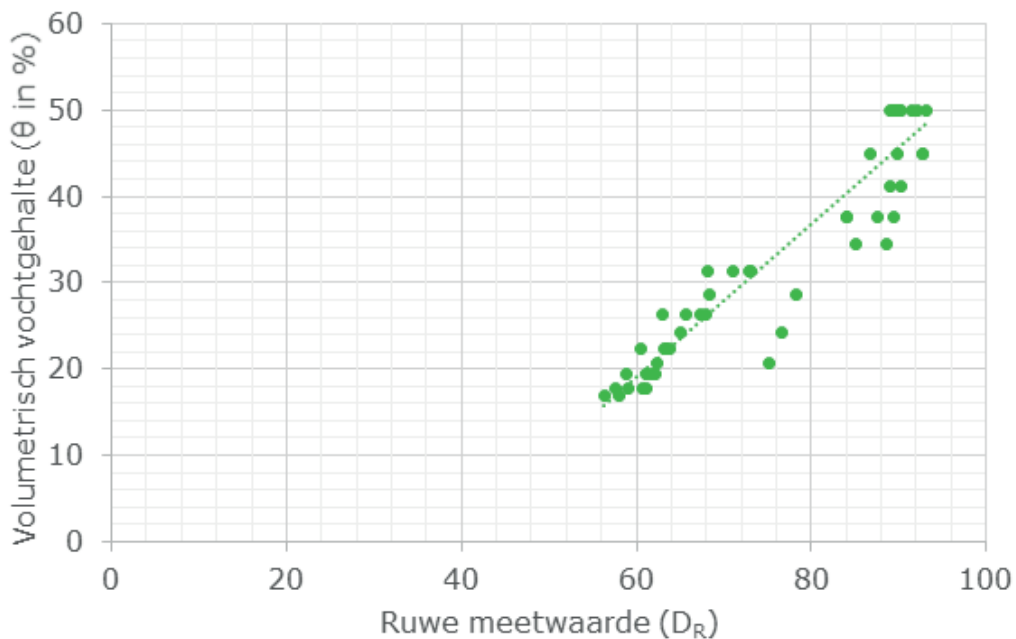
	-10 cm	-32 cm	-50 cm	-70 cm	-90 cm	Na her-verzadiging	Poriën volume
water	46.9	40.6	27.5	24.8	22.9	36.0	0.0
lucht	0.7	7.0	20.1	22.8	24.6	11.5	47.6
vast	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4	52.4
	10.0	32.0	50.0	70.0	90.0	2.5	1

De pF-curve is gefit met de volgende formule: $\theta = 0.0014 \cdot D_R^2 - 0.4396 \cdot D_R + 49.963$ (Zie Figuur 2.3).

Na de meting ontstond vervolgens de een kalibratiegrafiek voor de Sensetion voor fijn bollenzand (Zie Figuur 2.4).



Figuur 2.3 pF-curve met vochtgehalte (θ in %) versus drukhoogte (D in cm) voor het gebruikte fijne bollenzand.

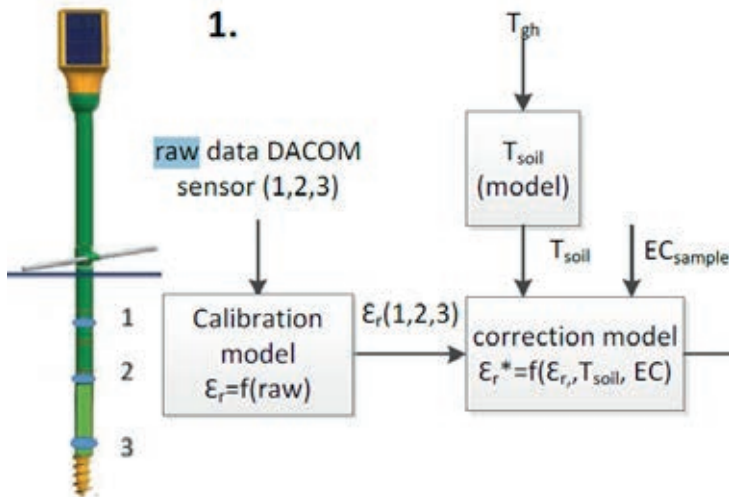


Figuur 2.4 Het volumetrisch vochtgehalte voor fijn bollenzand als functie van de ruwe meetwaarde.

In de Figuur 2.4 is inderdaad te zien dat de sensor hoge meetwaarden laat zien van 60-90, maar dat de bijbehorende werkelijke volumetrische vochtgehalten veel lager (15-50%) liggen. De lineaire trendlijn geeft aan: $\theta = 0.8911 D_R - 34.531$ ($R^2 = 0.8857$). Door de tweetraps kalibratie (pF-bak voor drukhoogte-vochtgehalte en meetbak voor ruwe meetwaarde-vochtgehalte) is er nogal wat spreiding, die mogelijk ontstaan is door het hysteresis effect in de pF-curve. Geconcludeerd is dat er een betere kalibratie gemaakt moet worden voor de Sensetation. Destijds (9 april 2015) is besloten om totdat er een betere kalibratie zou zijn, met deze lineaire vergelijking in Letsgrow gewerkt zou worden, ongeacht het bodemtype.

2.2.2 Kalibratie Sensetion in twee stappen

Om een voor de glastuinbouw bruikbare meetwaarde te verkrijgen is besloten een kalibratie uit te voeren waarmee de (ruwe) meetwaarden (D_r) van de sensor omgerekend kunnen worden in een volumetrisch vochtgehalte (θ).



Figuur 2.5 Schematische weergave van de sensor kalibratie.

Omdat het bodemvochtgehalte afhankelijk is van de gebruikte grondsoort, wordt de kalibratie doorgaans in twee stappen uitgevoerd (Zie Figuur 2.5). Bodemvochtgehalte sensoren worden vanuit de fabriek vaak gekalibreerd naar een sensor specifieke, maar bodemsoort onafhankelijke, grootte: diëlektrische permittiviteit (ϵ) genoemd (Stap 1). Voor de Sensetion is deze niet voorhanden, en zal dus gemaakt moeten worden.

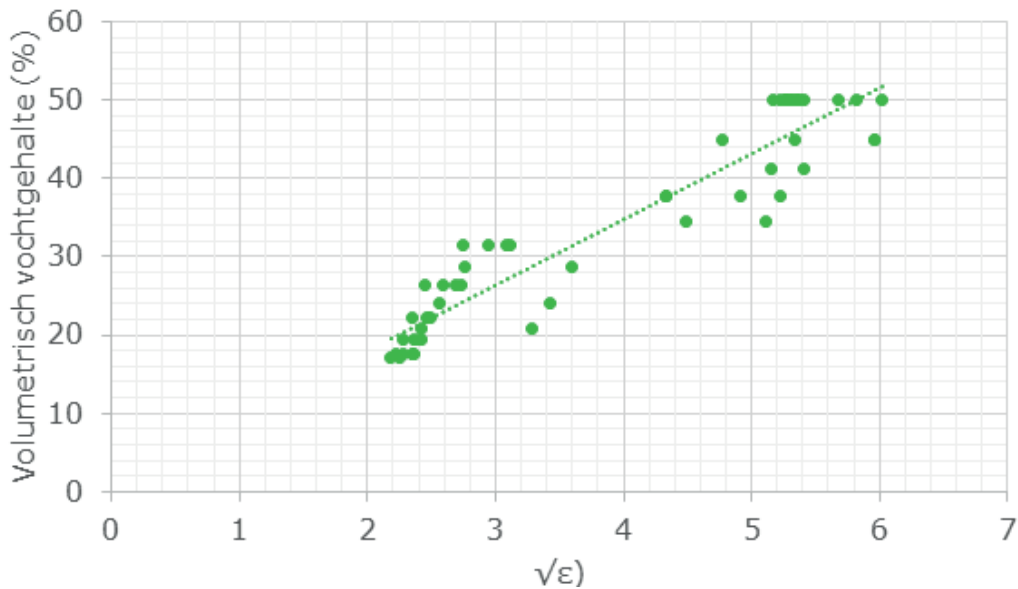
Uit informatie van DACOM was een kalibratie voor een zandgrond beschikbaar (Tekbox, Dacom, vertrouwelijk). Uit deze data is met behulp van de Topp-curve (een algemene kalibratie voor zandgronden) indirect een verband tussen ϵ en de ruwe meetwaarde bepaald:

$$\epsilon_d = e^{0.0488 \times DR} \quad (\text{Verg. 2.1}).$$

Op basis van deze grootte (ϵ_d) kan dan in een tweede stap het bijbehorende bodemvochtgehalte bepaald worden als de bodemsoort bekend is (Stap 2). Voor een aantal standaard bodemtypen zijn daarvoor kalibratiecurven voorhanden vanuit de literatuur. Het is bekend dat het vochtgehalte een lineaire verband vertoont met de vierkantswortel van ϵ . Om te toetsen of dat voor de Sensetion ook geldt zijn de data uit de eerste proef met fijn bollenzand gebruikt om $\sqrt{\epsilon}$ uit rekenen en weer te geven in een grafiek (Figuur 2.6). Het blijkt dat voor de Sensetion een redelijk goede soortgelijke relatie kan worden opgesteld ($R^2=0.89$). Op basis hiervan is een eerste formule afgeleid waarmee de meetwaarden konden worden omgerekend naar een bodemvochtgehalte:

$$\theta_{fbz} = 8.3479\sqrt{\epsilon_d} - 17.296 \quad (\text{Verg. 2.2})$$

waarin de permittiviteit is (een intermediaire waarde volgens Stap1 kalibratie) en is het vochtgehalte (in %) volgens de kalibratie uitgevoerd in Bleiswijk met Bollenzand uit Noord Holland. Vanaf 28 mei 2015 is vervolgens deze kalibratie gebruikt voor alle telers, ongeacht hun werkelijk bodemtype, en ongeacht de diepte van de sensoren.



Figuur 2.6 Relatie tussen de omgerekende ruwe meetwaarden van de Sensetion vochtsensoren ($\sqrt{\epsilon}$) en de werkelijke gemeten vochtgehalten (θ) in een testopstelling van gehomogeniseerde grond (fijn bollenzand) waar een reeks aan drukhoogten kon worden aangelegd.

Met deze kalibratie is een tijdje gewerkt als tussenoplossing, dit omdat hiermee nog geen bodemspecifieke kalibratie voor elke grondsoort te maken was. Omdat kasgronden anders zijn dan gronden voor de open teelt is tevens literatuuronderzoek gedaan omtrent hoe de bodemspecifieke kalibratie voor kasgronden uitgevoerd zou kunnen worden (Stap 2). Verder is in het gebruik geconstateerd dat ook de kalibratie voor permittiviteit mogelijk niet nauwkeurig genoeg was. Daarom is voorgenomen om een fabriekskalibratie van de Sensetion samen met DACOM uit te voeren (Stap 1).

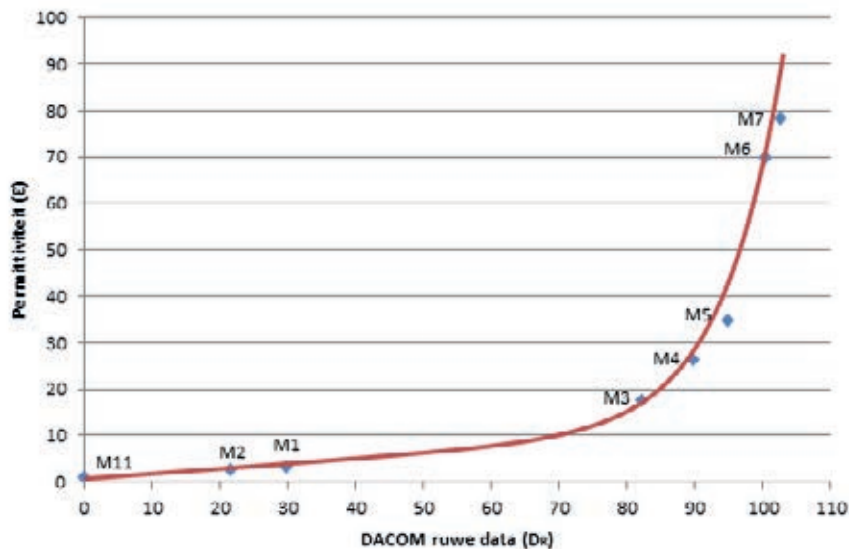
2.2.3 Sensorkalibratie (stap 1)

Voor de Sensetion is de eerste kalibratie (Stap 1) voor permittiviteit uitgevoerd (Vergouw, 2015¹).

Omdat de sensorkalibratie ook afhankelijk is van de temperatuur (T_{soil}) en de elektrische geleidbaarheid van het bodemwater moet er in het algemeen een correctie op de kalibratie worden uitgevoerd (zie Figuur 2.5). Omdat de Sensetion de temperatuur en de EC niet direct kan bepalen is zo'n correctie voor de Sensetion niet mogelijk en alleen via een indirecte omweg. De temperatuur van de bodem zou wel van de kastemperatuur (T_{gh}) afgeleid kunnen worden, en de bodem water EC (EC_{sample}) zou regelmatig via een bemonstering uitgevoerd kunnen worden. Omdat deze indirecte weg niet heel betrouwbaar is, en zeker ook bewerkelijk, is ook onderzocht in hoeverre de EC en T invloed hebben op het bodemvochtgehalte, om zo te bepalen of het een zinvolle correctie zou zijn. Uit dit onderzoek is geconcludeerd dat er wel degelijk effecten van EC en Temperatuur zijn op de gemeten vochtgehalten, maar dat de afwijkingen daardoor in de orde liggen van de fouten ten gevolge van andere oorzaken zoals de plaatsing van de sensoren en variaties in de bodemsoort. Om die reden is het extra werk en kosten om te corrigeren voor EC en temperatuur eigenlijk niet te rechtvaardigen, en daarom ook niet verder meegenomen in het vervolg.

Voor deze eerste stap is de sensor in een aantal vloeistoffen (motorolie, maisolie en enkele mengsels van 2-Isopropoxyethanol en gedeïoniseerd water) met bekende permittiviteit en geleidbaarheid geplaatst. Het resultaat van deze metingen is weergegeven in Figuur 2.7.

¹. Bastiaan Vergouw, 2016. Soil moisture sensor application in soil-bound greenhouse horticulture, MsC Thesis Wageningen University - Farm Technology, Wageningen, 7-10-2016 (Confidential).



Figuur 2.7 Sensorkalibratie voor de Sensetion. Het verband tussen de ruwe meetwaarde (D_R) en de permittiviteit (ϵ) voor verschillende kalibratie vloeistoffen (M1 – M7) en in lucht (M11), gemeten bij 25°C.

De meetpunten in de grafiek laten een gemengde relatie zien met een lineaire trend voor lage waarden van de permittiviteit ($\epsilon < 10$), en een exponentiële trend voor grotere waarden ($10 \leq \epsilon \leq 80$). Deze relatie kan weergegeven worden met de volgende formule:

$$\epsilon = a + bD_R + ce^{dD_R} . \quad (\text{Verg. 2.3})$$

De metingen zijn gebruikt om de parameters uit deze formule te schatten. Tijdens het project zijn verschillende fits gebruikt (zie Tabel 2.1). De eerste fit is gemaakt volgens Vergelijking 2.1. Vervolgens een fit met de kleinste kwadraten methode op de nieuwe data, en tenslotte een fit waarbij de afwijkingen t.o.v. de curve aan beide zijde van de curve in evenredige maten tot de fouten bijdragen (sMAPE norm). In Letsgrow is uiteindelijk gebruik gemaakt van de kleinste kwadraten kalibratie. De omrekening van de permittiviteit is daarbij via de volgende formule gedaan.

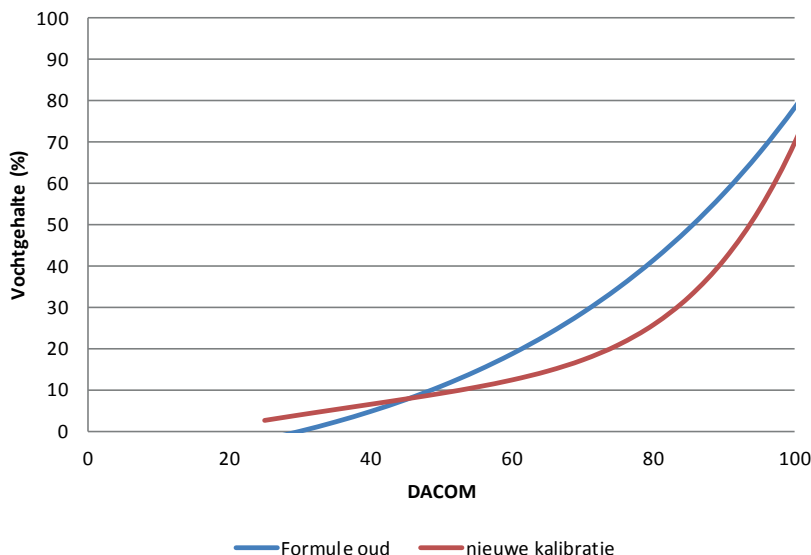
$$\epsilon = 0,9946 + 0,0803D_R + 0,0024e^{0,0993 D_R} \quad (\text{Verg 2.3})$$

Tabel 2.1

Regressie parameters met R^2 , RMSE en MAPE voor de vergelijking 2.1.

Parameter	Verbeterde Fit	Kleinste Kwadraten Fit	Eerste Fit (Balendonck, 2015)
a	0.9946	0.624065	1
b	0.0803	0.107483	0.045
c	0.0024	0.00061	0.0086
d	0.0993	0.113363	0.088
R^2	0.9788	0.9909	0.9874
RMSE	4.1229	2.7039	3.1753
MAPE (sMAPE ¹)	5.4% (5.6%)	11.5% (12.4%)	11.8% (12.7%)

De vertaling van een ruwe DACOM waarde tussen 20 en 100 leidt tot een watergehalte tussen 2 en 70%. Het probleem dat zich openbaarde was dat hogere waarden van DACOM (60-100) tot lagere watergehalte leidde dan de oorspronkelijk functie (nu 15-70%, eerst: 20-80%). Ook loopt de curve in het hogere traject veel steiler (zie Figuur 2.8). De berekende watergehalten vielen daarmee in de praktijk ook in acceptabelere drogere ranges. Kortom bij de overgang van de oude naar de nieuwe omrekeningsfunctie was er een sprong in de meetwaarden bij de telers.



Figuur 2.8 Verband tussen de gemeten ruwe meetwaarden van de Sensetion vochtsensoren met een berekend vochtgehalte met de aanvankelijk ontwikkelde kalibratiecurve (formule oud) en met de nieuw ontwikkelde kalibratiecurve (nieuwe kalibratie).

2.2.4 Bodemkalibratie (stap 2)

In voorgaande testen en evaluaties is ϵ de waarde van het meetsignaal (permittiviteit) en vervolgens het volumetrisch vochtgehalte θ (V/V) bepaald via een empirische formule. Dit brengt het gevaar met zich mee dat het gevoelig is voor de specifieke testomstandigheden en de dataset op basis waarvan de functie is bepaald. Veel beter zou zijn een model te ontwikkelen, waarbij op basis van een aantal kenmerken van de bodem en grondsoort een meer doelgerichte kalibratie kan worden gedaan. Er zijn daarvoor de volgende alternatieven:

1. Het toepassen van een "one-fits-all" kalibratie.
2. Een kalibratie voor een aantal veel voorkomende en karakteristieke tuinbouwgronden zou kunnen worden gedaan, waarbij dan elke teler een standaardcurve kan kiezen die het beste past.
3. Het ontwikkelen van een deterministisch model, waarbij op basis van kenmerken, zoals textuur, porositeit en bulkdichtheid de kalibratiecurve kan worden gefine-tuned. Het ontwikkelen van een dergelijk model is echter geen sinecure en is in het kader van dit project niet mogelijk. Bovendien doet zich het probleem voor dat de bijdrage van de organische stof in het geheel moeilijk voorspelbaar is, gezien de variatie aan bronnen en de dynamiek van afbraak. Ook zullen de effecten van de EC waarde van de bodemoplossing moeten worden meegenomen in dit geheel.
4. Voor elke grondsoort (telerspecifiek) zou op empirische wijze een kalibratie kunnen worden uitgevoerd. Hiervoor moet dan een standaardmethode worden ontwikkeld die bij elke teler voor hij de sensor daadwerkelijk gaat gebruiken zou moeten toepassen. Dit moet dan wel voor elke bodemlaag apart worden gedaan, omdat bodems niet homogeen zijn opgebouwd, bovendien qua dichtheid in de diepte sterk kunnen variëren. Omdat dit in-situ in de praktijk moet worden uitgevoerd en bovendien niet gemakkelijk door telers zelf kan worden gedaan lijkt deze methode niet uitvoerbaar. Bovendien zou voor elke (ver-)plaatsing een nieuwe kalibratie nodig zijn.

Het alternatief 1 is de oplossing gegeven volgens Vergelijking 2.2, en zoals die al toegepast is in Letsgrow tijdens de periode 2015-2016. In 2016-17 is literatuur en praktisch werk uitgevoerd (Vergouw², Max van den Hemel³) naar de mogelijkheden om de bodemspecifieke vochtgehalte kalibratie te verbeteren volgens de alternatieven 2 – 4. In het algemeen komt hieruit naar voren dat verbetering van de kalibratie wel degelijk mogelijk is, maar dat e.e.a. sterk samenhangt met de juistheid van de informatie die voor de kalibratie aangeleverd is. Dit vooral omdat de bodemsamenstelling veel dynamiek laat zien. Daarbij moet vermeld worden dat juist het aanleveren van deze data (grondsoort e.d.) in de praktijk extra tijd zal vergen en zeker extra kosten voor bemonstering en analyse.

Vanwege de complexiteit van de materie, de beperkte budgetten en tijd is gekozen voor de eerste optie ("one fits all"). Een overweging daarbij is, dat de meeste telers veel meer geïnteresseerd zijn in de trends dan in het absolute vochtgehalte. Voor het irrigatiemanagement, het voldoen aan de zorgplicht en het realiseren van nagenoeg 0-emissie is dit ook het meest belangrijk aspect aan de toepassing van vochtsensoren.

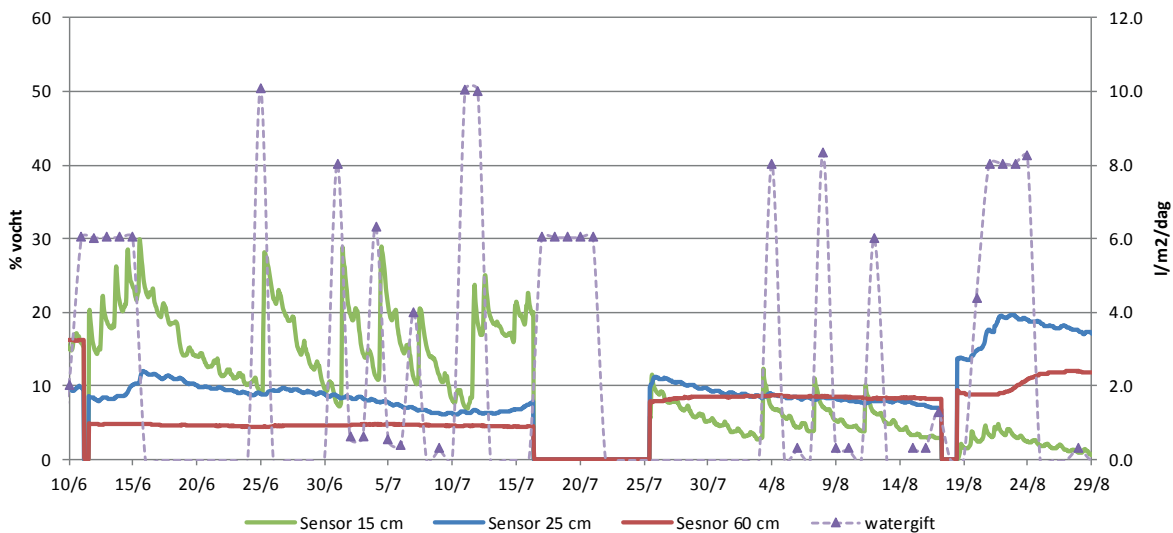
2.3 Uitspoelingsmonitor

In de situatie van goed werkende en betrouwbare vochtsensoren is de gedachte bij telers dat het theoretisch mogelijk zou moeten zijn om de uitspoeling te volgen. Immers het lijkt logisch dat een waterfront dat zijn oorsprong vindt in een gietbeurt en dat zich in de bodem naar beneden verplaatst, door middel van sensoren op een aantal diepten op zijn weg kan worden gevolgd. Indien dan vervolgens een sensor beneden de wortelzone wordt geplaatst, kan deze sensor detecteren of er daadwerkelijke uitspoeling plaatsvindt.

Bij deze gedachtegang zijn echter vanuit wetenschappelijk oogpunt wel de nodige kanttekeningen te plaatsen. Inderdaad blijkt uit het verloop in de tijd van het signaal van vochtsensoren dat gietbeurten vrijwel direct zichtbaar worden bij een sensor bovenin de teeltlaag en enige tijd later is dit zichtbaar bij een dieper geplaatste sensor en nog weer later bij een derde enzovoort. In Figuur 2.9 is het verloop van het vochtgehalte weergegeven tijdens een teelt. Het patroon verloopt grillig en hangt samen met de watergift, er is hier om de 3 tot 5 dagen berekend, en aan het einde van een teelt is er minder en soms een tijdlang niet berekend. De vochtgehalten in de bovenste laag (15 cm) vertonen het karakteristiek beeld van een vochtsensor die onder invloed staat van de watergift, met vrij scherpe pieken door het zich verplaatsende waterfront. De tweede sensor toont een wat meer afgevlakt patroon, dat in de tijd ook enigszins is verschoven. Het is duidelijk dat bij dit bodemtype (zandgrond), het water snel neerwaarts wordt getransporteerd. De watergiften zijn met 8 mm per ronde, met soms 3 ronden per etmaal ook fors te noemen. De kans is dus groot dat bij een berekening een flink deel van het water uitspoelt. Gezien het gedrag van de bovenste twee sensoren is het echter opvallend dat op 60 cm diepte geen sprake meer is van een herkenbaar patroon. Hoewel de sensor nog ruim boven het grondwater zit (verschil minimaal 40 cm), zal het op die diepte toch al dusdanig vochtig zijn dat aanvoer van vocht van boven weinig tot geen verandering in het absolute vochtgehalte, uitgedrukt als volume % laten zien. Bovendien zal door de demping van het bovenliggende bodempakket de eerdere pieken in waterflow sterk afvlakken. Hierbij moet ook bedacht worden dat als er een constante flow aan water langs komt, er geen verandering in vochtgehalte optreedt dus ook geen signaalverandering van een vochtsensor.

². Bastiaan Vergouw, 2016. Soil moisture sensor application in soil-bound greenhouse horticulture, MSc Thesis Wageningen University - Farm Technology, Wageningen, 7-10-2016 (Confidential).

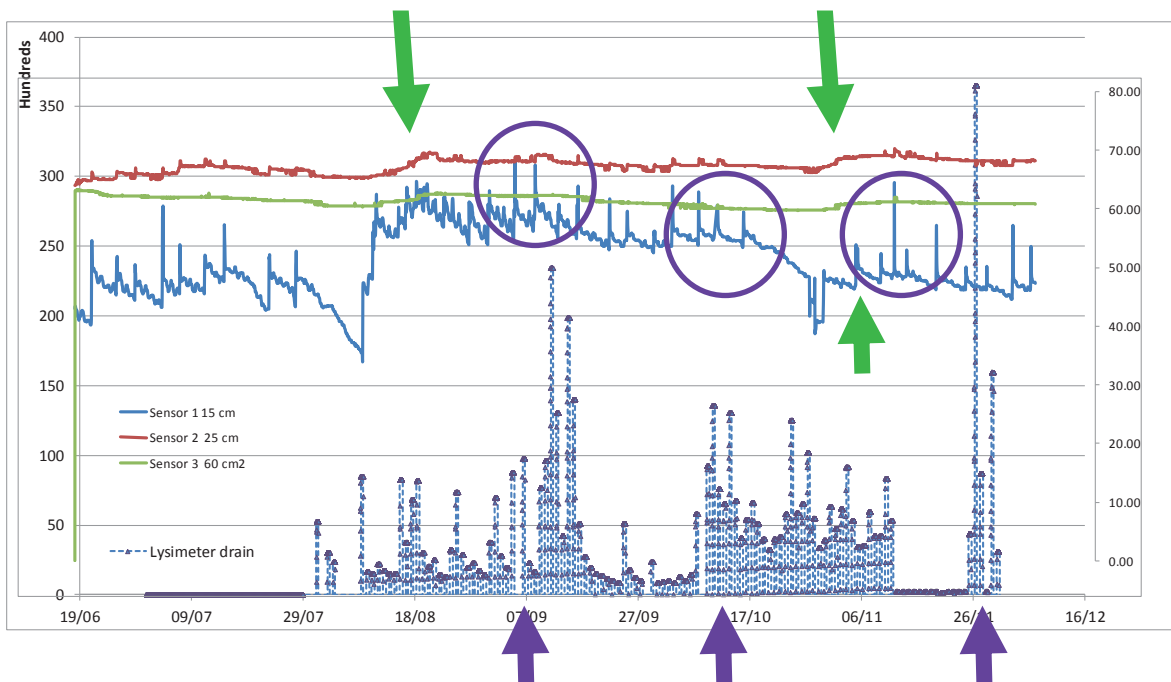
³. Max van den Hemel, 2017. Soil-specific determination of volumetric water content in soil-bound greenhouse horticulture, MSc Thesis Wageningen University - Farm Technology, Wageningen, 5-6-2017 (Confidential).



Figuur 2.9 Verloop van de vochtgehalten op drie diepten; resp. 15, 25 en 60 cm en de watgift gedurende enkele maanden bij een radijsbedrijf op zandgrond met grondwater op 2 – 3 meter diepte.

Verder valt in deze Figuur op dat het berekende niveau aan vocht in deze specifieke bodem zoals op de grafieken is weergegeven, erg laag is. Dit is tegenstrijdig met de werkelijkheid en geeft aan dat deze vochtsensoren een specifieke bodemkalibratie vereisen die ook nog per laag moet worden uitgevoerd.

Het verband tussen de patronen van vochtsensoren en de werkelijke uitspoeling is getoetst met een lysimeter. In Figuur 2.10 is het verloop van het vochtgehalte, gemeten met sensoren op drie diepten weergegeven, tegelijk met het verloop van de meting van de lysimeter op een bedrijf met chrysanten. Het valt op dat het patroon vrij grillig is, de watgiftten zijn wel duidelijk te herkennen in het verloop van de bovenste sensor. Ook de sensor in de tweede laag geeft soms nog een reactie te zien, maar die is over het algemeen zeer beperkt. De onderste sensor vertoont echter geen enkele dynamiek die direct samenhangt met de gift. Wel zijn er een aantal perioden te zien waarbij er een stijging is in alle drie de lagen. Dit is met groene pijlen aangegeven. Echter er is op die momenten geen stijging van de afvoer in de lysimeter te zien. Het patroon van de afvoer in de lysimeter is niet terug te voeren op enige reactie van de sensoren in de tweede en in de derde laag. Wel zijn er soms een paar momenten waarbij een sterke stijging in de eerste laag leidt tot een stijging van de afvoer van de lysimeter (paarse pijlen), maar dan wel enige dagen later, dit is met de paarse cirkels en pijlen aangeduid.



Figuur 2.10 Verloop van de vochtgehalten op drie diepten; resp. 15, 25 en 60 cm en de afvoer van drain in een lysimeter, op een chrysantenbedrijf in de periode augustus – eind november. Groene pijlen duiden momenten aan met stijging van het vochtgehalte in alle bodemlagen, de paarse pijlen en cirkels de momenten dat er sprake is van flinke drainafvoer in de lysimeter en voorafgaande stijging van het vocht in de eerste bodemlaag.

Omdat er weinig dynamiek is in de onderste bodemlaag en ook omdat er geen zichtbare correlatie bestaat tussen real-time data van de sensoren en de uitspoeling van de lysimeter is het niet goed mogelijk uitspoeling vast te stellen met de bodemvochtsensoren alleen. Een combinatie met een berekening kan hier wel goede diensten leveren. Aan de hand van een verdampingsberekening en de geregistreerde watergift kan een potentiële uitspoeling worden berekend. Als dit gecombineerd wordt met een goed bodemmodel, wat dan wel goed gekalibreerd moet zijn is het mogelijk de uitspoeling in te schatten. Dit is destijds ook al voorgesteld in de bodem-module van het emissie management systeem (Heinen *et al.* 2012).

Om te onderzoeken in hoeverre uitspoeling te voorspellen is aan de hand van metingen met meerdere sensoren is een nadere modelstudie uitgevoerd (Riepma⁴, 2016). Als uitgangspunt voor deze studie is het model van Heinen *et al.* (2012) gebruikt. Simulaties met kunstmatige vochtprofielen gemeten met 3 sensoren zijn uitgevoerd op basis waarvan gekeken is naar de voorspellende waarde van het model in relatie tot de onzekerheid van de vochtwaarden en modelparameters (on nauwkeurigheden in metingen en bodemtype).

Riepma concludeert dat het model in principe gebruikt kan worden om drain te voorspellen. Echter de studie laat ook zien dat onder praktische omstandigheden de toepassing niet zonder meer een accurate voorspellingen zal kunnen geven. De onzekerheden in de absolute vochtgehalten en de bodemspecifieke modelparameters zijn daarvoor te groot. Dit is eigenlijk een bevestiging wat in de praktijk waargenomen werd in de verschillende proeven. Kortom, om een goede voorspelling te doen zijn voor een specifiek bedrijf op zijn minst een aantal basale metingen nodig met betrekking tot de fysische eigenschappen van de bodem over een aantal lagen.

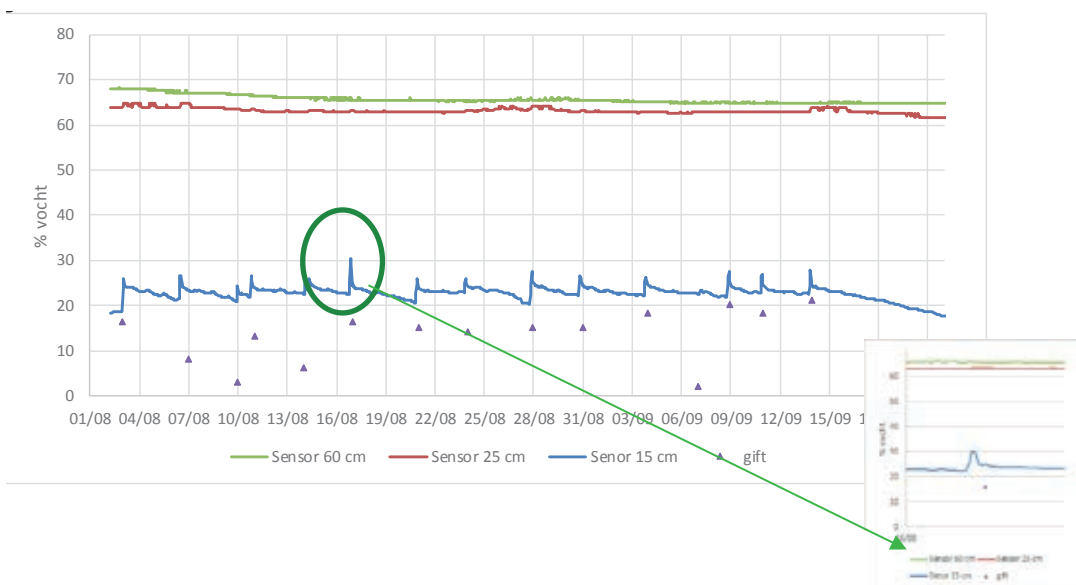
⁴ Riepma, 2016. Drainage prevention and indication in soil-bound greenhouse horticulture. MSc Thesis Wageningen University - Farm Technology, Wageningen, 21-12-2016.

3 Resultaten en discussie

3.1 Praktijkvoorbeelden vochtsensoren en lysimeters

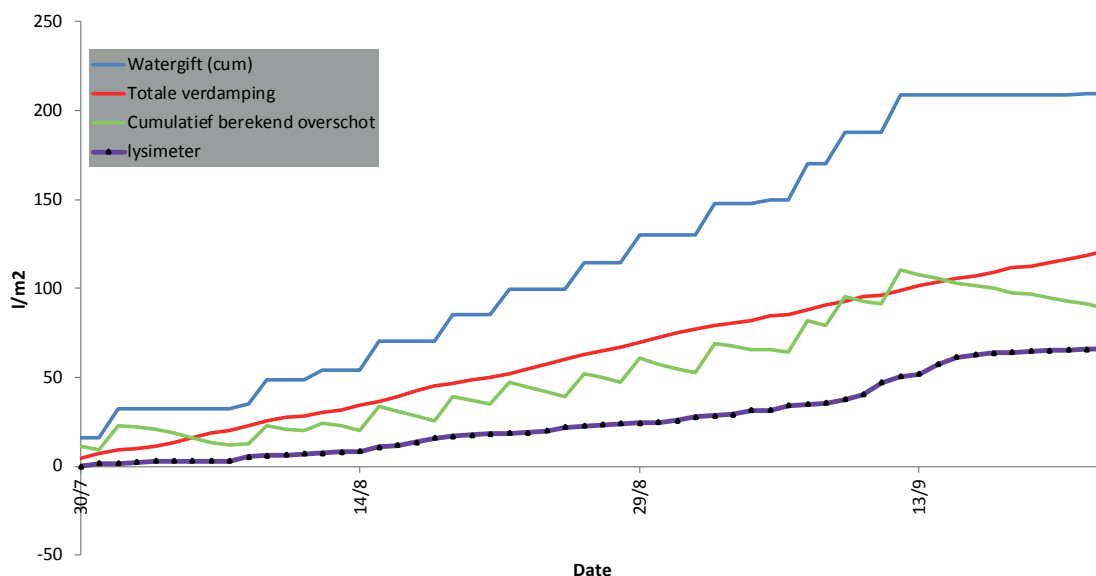
3.1.1 Chrysantenteelt

In het project deden twee bedrijven mee met een chrysantenteelt. Het eerste voorbeeld betreft een chrysantenbedrijf met matig zware klei, met een drainagesysteem op 90 cm, met ook een grondwaterstand op die diepte. Hier is ook een lysimeter aanwezig. De vochtgehalten vertonen een regelmatig verloop, het patroon van de gietbeurten is duidelijk te herkennen in de sensor op 15 cm (Figuur 3.1). Dit patroon is vrij algemeen voor een vochtsensor in een bodem na een gietbeurt met de regenleiding. De fluctuatie in vochtgehalte, zoals te zien in de sensoren op 15 cm diepte direct na een watergift (piek) is niet altijd evenredig is met de omvang van de watergift. Bij elke watergift stijgen de waarden plots zeer snel, daarna dalen ze, aanvankelijk zeer snel en vervolgens in een meer geleidelijke daling. Tussen twee gietbeurten liggen soms een aantal dagen, waarbij de vochtgehalten door wateronttrekking door de wortels dan langzaam verder dalen. Dit bedraagt meestal enkele procentpunten en weerspiegelt ook de wateropname door de wortels. Opvallend is dat er een gering golfpatroon zichtbaar is, dit zou een temperatuureffect kunnen zijn (zie verderop onder het voorbeeld van radijs). Aan het einde van de teelt neemt het vochtgehalte gestaag af, dit bedraagt ca 5% vocht. De sensoren op 20 en 60 cm vertonen geen directe fluctuatie die zou kunnen samenhangen met de watergiften. Er is op die diepte nauwelijks sprake van variatie in vochtgehalten. over de gehele teelt gezien is de variatie minder dan 1%.



Figuur 3.1 Vochtgehalten (% vocht) tijdens een volledige chrysantenteelt, gemeten met de Sensetion, op drie diepten, en de watergift (l/m^2) in het betreffende teeltvak, 16/8 als vergroting apart weergegeven.

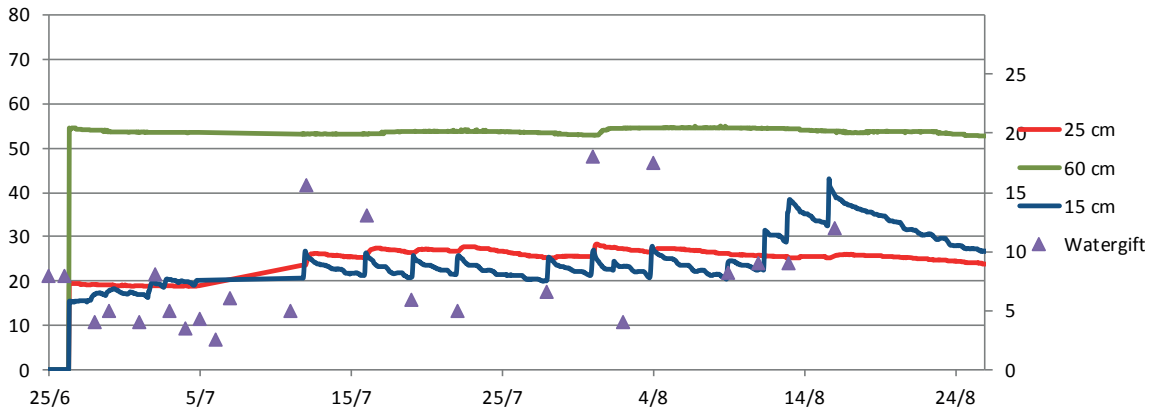
Over dezelfde teelt is ook de gift, opname, en verdamping geregistreerd, c.q berekend en is de drain in de lysimeter gemonitord (Figuur 3.2). Over deze gehele teelt gezien is er sprake van een overschot aan beregening. Vlak voor de fase dat er niet meer beregend wordt aan het einde van de teelt bedraagt dit zelfs 50%, over de gehele teelt genomen is dit 38%. Dit komt ook overeen met wat gemeten is in de lysimeter. Uit het verloop van de patronen van de vochtsensoren is dit overschot niet zichtbaar. De bovenste laag wordt niet natter, vlak voor elke nieuwe gietbeurt is het vochtgehalte min of meer terug op het vorige punt. De beide diepere sensoren vertonen geen enkele dynamiek en zijn constant op een hoog niveau. Met andere woorden er lijkt een constante flow van vocht te zijn naar de diepere bodemlagen c.q de drain, waarbij het vochtgehalte niet veranderd.



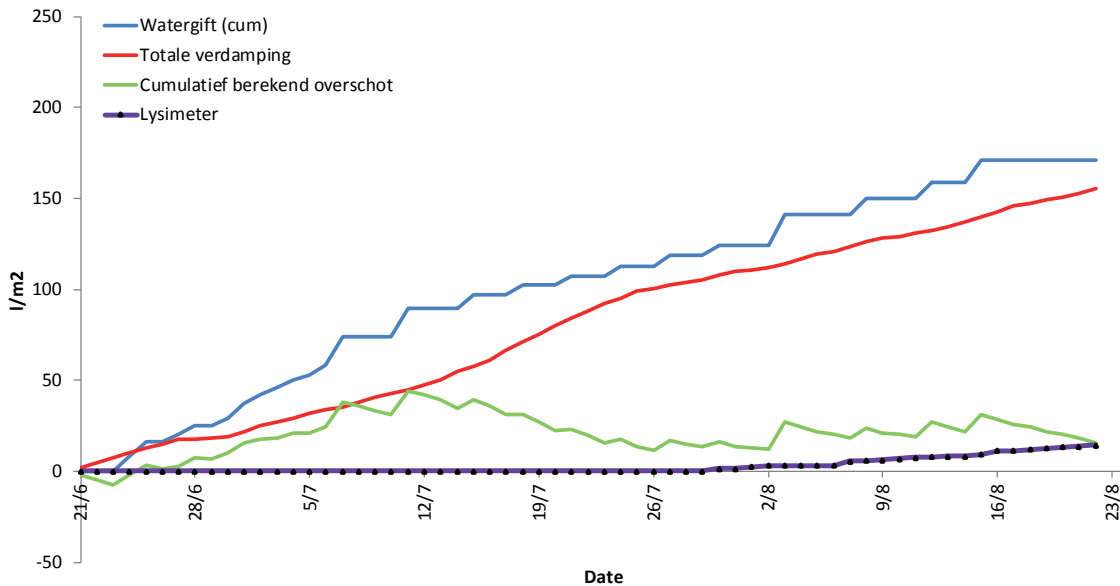
Figuur 3.2 Cumulatief verloop van watergift, berekende verdamping berekeningsoverschot en de gemeten uitspoeling in de lysimeter tijdens een chrysanten (als van Figuur 3.1), alles in l/m^2 .

Het tweede chrysantenbedrijf was op een zandgrond, weliswaar met een drainagesysteem, maar het grondwater zat geregeld dieper dan de drainage. Ook hier is het patroon van de gietbeurten duidelijk zichtbaar in het patroon van de bovenste sensor. Echter er is ook een dynamiek met eenzelfde patroon in de sensor op 25 cm diepte. Dit is bij het begin van de teelt nog niet duidelijk zichtbaar, echter vanaf 12/7, na een grotere gietbeurt, is dit duidelijk het geval. Opvallend is dat later in de teelt, in de periode van 10 – 15/8, vlak voor het ingaan van de fase zonder berekening, er een toename lijkt in vochtgehalte. Bij de 2^e sensor is er in die periode echter nauwelijks meer reactie te zien, er is eerder sprake van een geleidelijke daling van het vochtgehalte in die periode. De diepste sensor geeft soms ook een reactie te zien op een gietbeurt, maar dit is zeer beperkt en alleen bij een hoge watergift.

Het verloop van de cumulatieve gift, verdamping, berekeningsoverschot en drain in de lysimeter laat zien dat op dit bedrijf, in tegenstelling tot het vorige, een lager berekeningsoverschot heeft en ook veel minder netto uitspoeling (lysimeter) (Figuur 3.4). Het valt op dat het stijgende berekeningsoverschot in de periode 28/6 – 10/7 wel zichtbaar is in het verloop van de sensor op 25 cm (stijging vochtgehalte), maar niet op die van 60 cm. De geringe stijging vanaf 2/8 valt samen met een (geringe) daling van de vochtgehalten op 25 cm, terwijl er dan een klein piekje te zien is in de sensor op 60 cm. Dit heeft ongetwijfeld te maken met buffering van het vocht in de bodem (bergingsveranderingen). Hoewel er meer dynamiek te zien is in de sensoren op 25 cm en 60 cm lijkt er ook op dit bedrijf geen verband te zijn tussen veranderingen in meetwaarden van vochtsensoren en de gemeten uitspoeling, of een berekend berekeningsoverschot. Kortom, de sensoren op grotere diepten zijn niet zonder meer in staat uitspoeling te signaleren



Figuur 3.3 Vochtgehalten (% vocht) tijdens een volledige chrysantenteelt, gemeten met de Sensetion, op drie diepten, en de watergift (l/m^2) in het betreffende teeltvak.

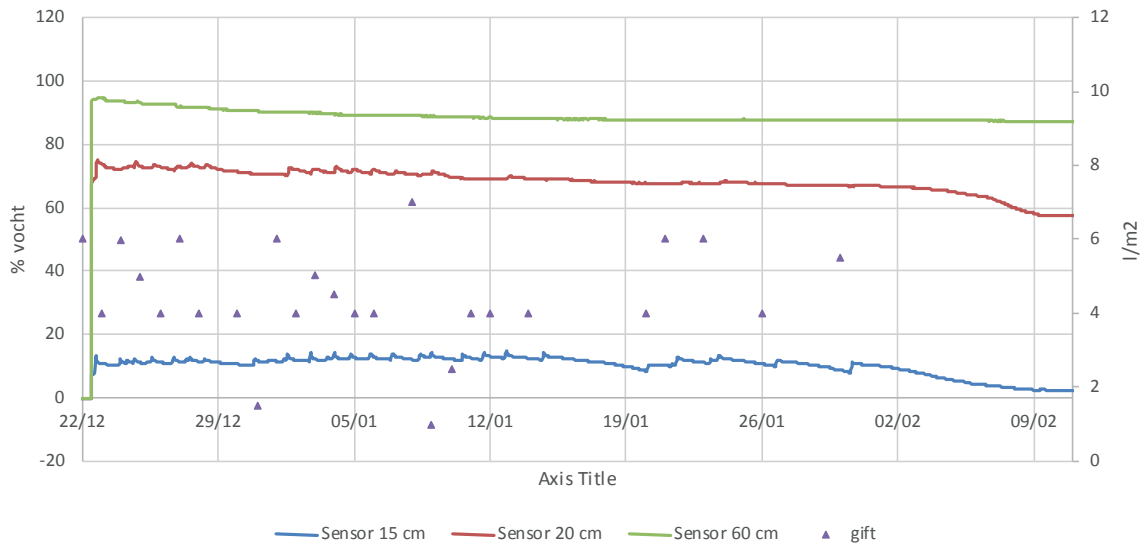


Figuur 3.4 Cumulatief verloop van watergift, berekende verdamping beregeningsoverschot en de gemeten uitspoeling in de lysimeter tijdens een teelt van chrysant (als van Figuur 3.3), alles in l/m^2 .

3.1.2 Lysianthus

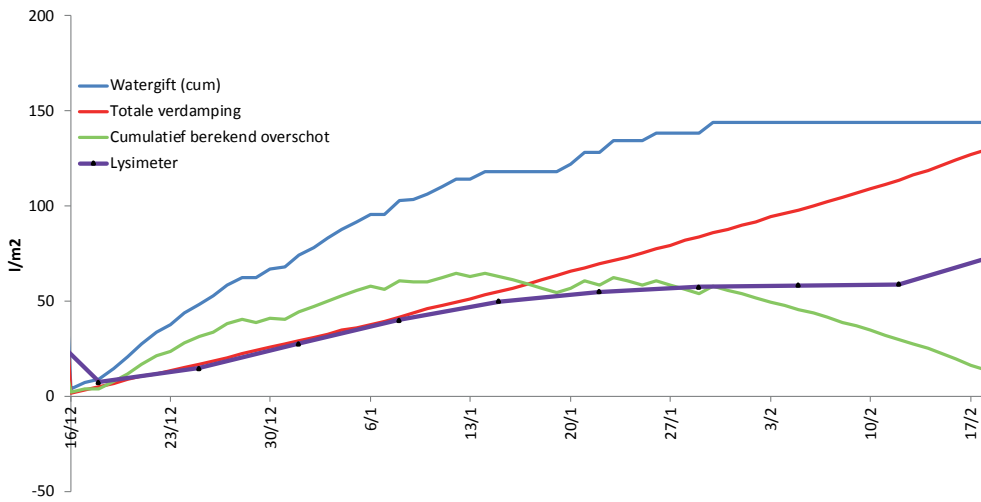
Het bedrijf met teelt van lysianthus betreft een vrij zware kleigrond met een drainage op 85 cm. Het drainagewater wordt hergebruikt. Het patroon van de vochtgehalten vertoont weinig dynamiek, wat ongetwijfeld ook samenhangt met de zeer frequente gietbeurten, van relatief beperkte omvang (Figuur 3.5). De pieken in de bovenste teeltlaag zijn gering, waarbij er wel enige dynamiek zichtbaar is bij de 2^e sensor. De diepste sensor reageert in het geheel niet. De periode zonder beregening aan het einde van de teelt geeft een geringe afname van de vochtgehalten, van enkele procentpunten, zowel bij de bovenste als de 2^e sensor. De vochtgehalten van de sensor op 15 cm zijn laag, vergeleken met de waarden die meestal worden teruggevonden. Wellicht dat meespeelt dat deze bovengrond zeer vaak bewerkt wordt, een hoog organische stofgehalte bevat en daardoor zeer luchtig is.

Op dit bedrijf is duidelijk sprake van uitspoeling, er is een beregeningsoverschot wat na 3.5 weken vanaf de start meer dan 50% bedraagt. Daarna daalt het, om op het einde van de teelt, door de vrij lange beregeningloze periode te dalen tot uiteindelijk minder dan 10% voor de gehele teelt. De uitspoeling wordt echter vooral in de eerste helft gerealiseerd en bedraagt in dat geval 33% (berekend op het hoogste punt). Ook hier is weer duidelijk dat het beregeningsoverschot of de daadwerkelijke uitspoeling niet worden gesignaleerd in het verloop van de vochtsensoren.



Figuur 3.5 Vochtgehalten (% vocht) tijdens een teelt van lysianthus, gemeten met de Sensetion, op drie diepten, en de watergift (l/m²) in het betreffende teeltvak.

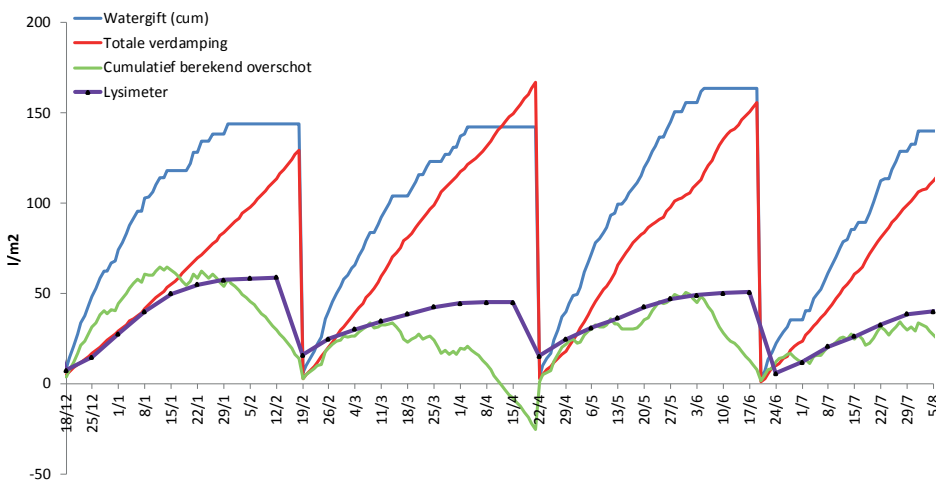
Dit effect is consistent voor alle teelten, zoals te zien is in Figuur 3.7 en 3.8, waar het verloop van de sensoren als ook van de waterstromen over een langere periode is weergegeven. Er is in alle teelten sprake van een beregeningsoverschot en van daadwerkelijk gemeten uitspoeling (lysimeter). Weliswaar komt het beregeningsoverschot netto uit op nul voor elke teelt, door het overschot halverwege de teelt is er toch fysieke uitspoeling. In geen van de gevallen is dit zichtbaar in de patronen van de onderste sensor. Wel de relatieve uitputting aan vocht aan het einde van elke teelt telkens duidelijk zichtbaar in de tweede laag.



Figuur 3.6 Cumulatief verloop van watergift, berekende verdamping berekeningoverschot en de gemeten uitspoeling in de lysimeter tijdens een teelt van lysianthus (als van Figuur 3.5), alles in l/m^2 .



Figuur 3.7 Vochtgehalten op drie dieptes tijdens vier opeenvolgende teelten van lysianthus, op drie dieptes. De sensoren zijn telkens na een teelt verwijderd en weer herplaatst vanwege het stomen.



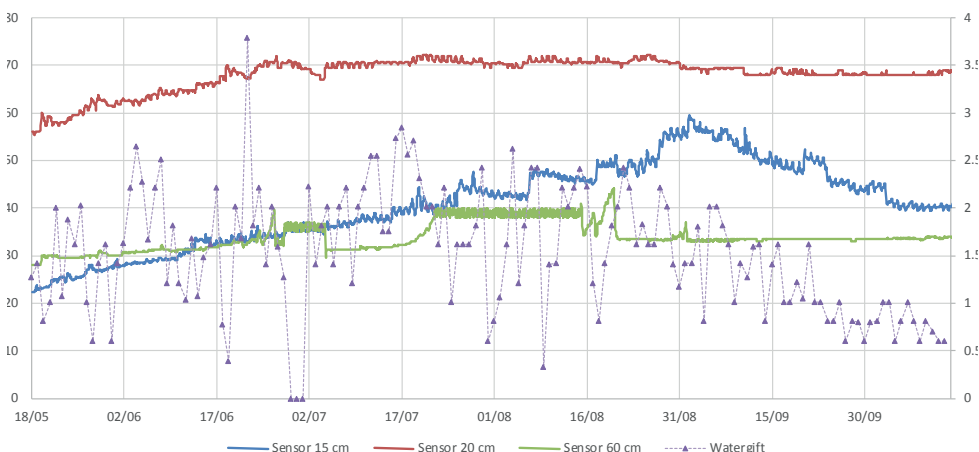
Figuur 3.8 Cumulatief verloop van de watergift, verdamping berekeningoverschot en de gemeten uitspoeling via de lysimeter tijdens vier teelten lysianthus (als van Figuur 3.5), alles in l/m^2 .

3.1.3 Voorbeeld druppelbevloeiing: Alstroemeria

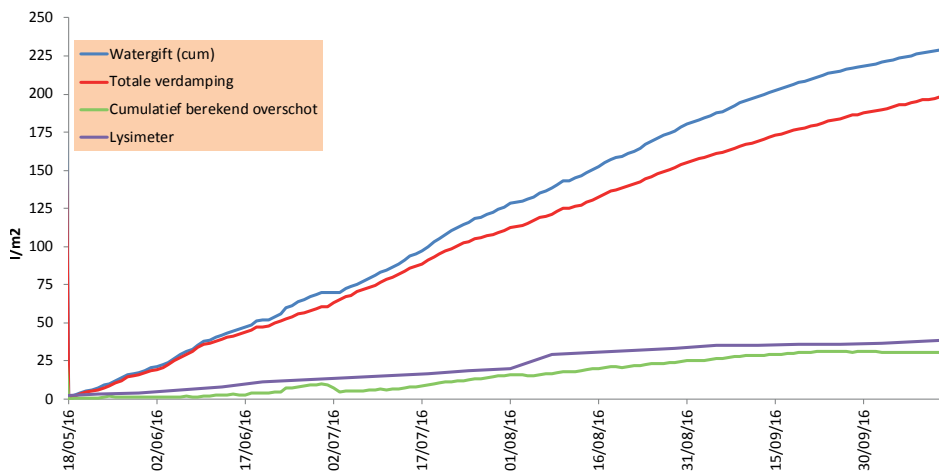
Het bedrijf met Alstroemeria staat op vrij zware kleigrond. De teelt staat voor een aantal jaren vast. De sensoren zijn geplaatst in een gewas wat ruim een jaar daarvoor geplant was. Er wordt geteeld in bedden, de sensoren zijn midden in het bed geplaatst. Het zonnepaneel stak niet boven het gewas uit, echter door de beperkte dichtheid aan bladeren en stengels werden geen problemen verwacht met de stroomvoorziening als gevolg van schaduwwerking. De watergift vond plaats via druppelbevloeiing. De beurtgrootte werd meestal niet veranderd, maar de frequentie werd gestuurd via de computer op basis van instraling en gebruik van schermdoeken en belichting. De meetresultaten van de Sensetions, geplaatst in het lysimetervak worden getoond (Figuur 3.9). De resultaten laten zien dat het globale verloop zeer constant is. Er is geen tot nauwelijks dynamiek te zien in het dagelijks verloop van de vochtgehalten, ook niet in de bovenste sensor. Dit in tegenstelling tot situaties met beregening waar een gietbeurt altijd tot flinke dynamische veranderingen in vochtgehalten van de bovenste teeltlaag leidt. Bij een situatie als deze is het wel gemakkelijker een lange-termijn trend te zien, omdat het beeld niet verstoord wordt door de individuele verschillen van afzonderlijke gietbeurten. Er is een vernatting van de teeltlaag in het begin van de getoonde periode te zien, ook in de tweede laag is dit goed zichtbaar. De onderste sensor blijft vrij constant, hoewel ook daar een lichte stijging is te zien in de eerste twee maanden.

In latere fasen van de teelt is er een aantal malen verandering in trends te zien, maar er is dan geen verandering in het verloop van de diepere sensoren. In de tweede helft van de periode vertoont de tweede laag een daling van het vochtgehalte, terwijl de bovenste sensor constant blijft.

Vergelijking van de patronen van de vochtsensoren met de watergift, verdamping, beregeningsoverschot en drain lysimeter (Figuur 3.10), geeft voor een deel een goede verklaring. Het cumulatieve beregeningsoverschot neemt in het begin langzaam toe, tegelijk met een lichte toename van de drain in de lysimeter. Het toenemen van het vochtgehalte bij de bovenste twee sensoren en ook de geringe stijging van de sensor op 60 cm diepte is dus terug te voeren op een beregeningsoverschot in die periode. Vanaf eind augustus lopen gift en verdamping parallel, neemt het overschot niet meer toe, en hiermee kan het dalen van het vochtgehalte in de tweede laag worden verklaard. Dat de bovenste sensor hier nauwelijks daling vertoont is op het eerste gezicht vreemd, maar zou kunnen samenhangen met de watergift via druppelaars. Hierdoor is de infiltratiesnelheid gering en deze gestage wateraanvoer naar die laag kan voldoende zijn voor de wateropname uit die laag. Door de diepe beworteling van dit gewas kan het zo zijn dat meer water aan de laag rond 25 cm diepte wordt onttrokken. Dat de diepe sensor geen daling laat zien, kan dan komen door de grote traagheid van het systeem, er is immers in die fase nog steeds ook een geringe hoeveelheid drainwater in de lysimeter.



Figuur 3.9 Vochtgehalten (% vocht) tijdens een gedeelte van teelt van alstroemeria, gemeten met de Sensetion, op drie diepten in het betreffende teeltvak en de totale watergift l/m²/dag, met druppelbevloeiing.



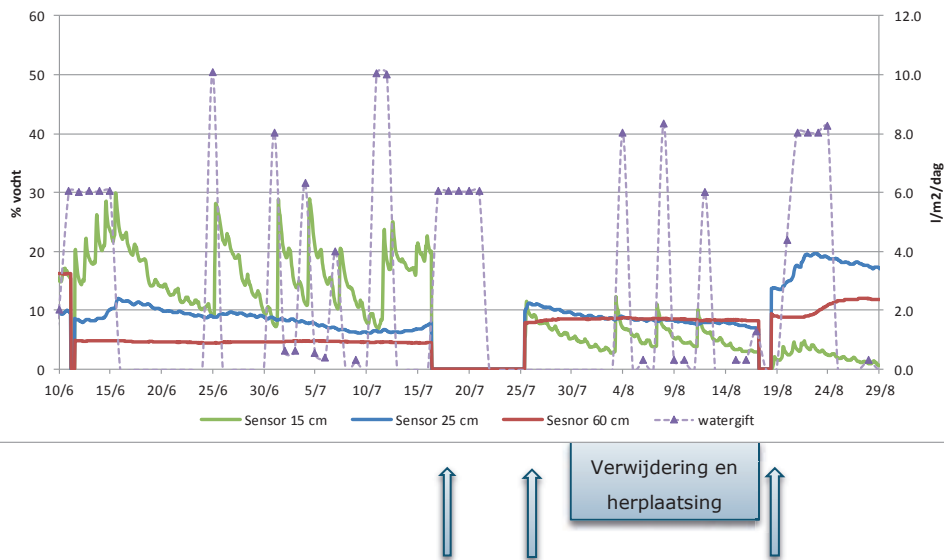
Figuur 3.10 Verloop van de cumulatieve watergift, cumulatieve verdamping, het cumulatieve berekeningsverschot en de cumulatieve gemeten drain van de lysimeter van het bedrijf met *Alstroemeria* over dezelfde periode als in Figuur 3.9.

3.2 Praktijkvoorbeelden, zonder lysimeters

3.2.1 Radijs

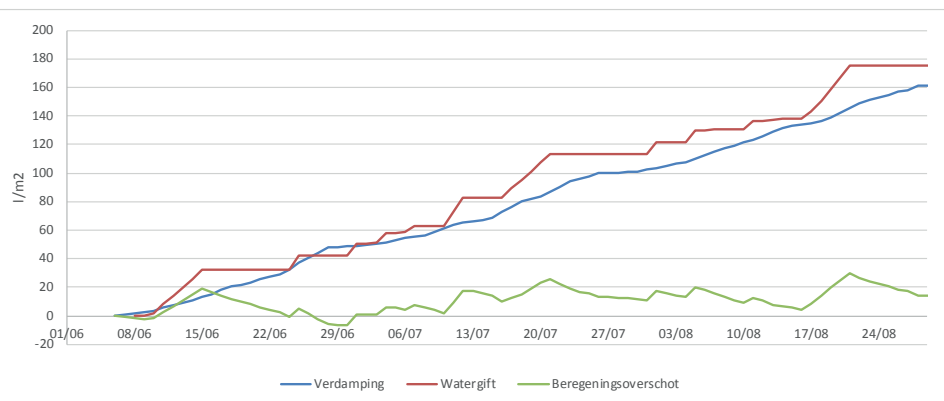
De bedrijven met radijsteelt staan op zandgrond. Kenmerkend voor deze teelt is de korte teeltduur en dat er berekening volgens een vrij typisch patroon wordt toegepast. Vanwege de korte teeltduur en de noodzakelijk grondbewerkingen en mechanische zaaien zouden de sensetions hinderlijk in de weg staan als ze in het teeltbed geplaatst worden. Er is daarom gekozen voor plaatsing tussen twee zaaibedden in, onder de goot. Daardoor konden ze permanent blijven staan. In Figuur 3.11 is een kenmerkend verloop van de vochtgehalten weergegeven van een van de bedrijven. Dit is een bedrijf met diep grondwater, zonder een drainagesysteem. Opvallend is de sterke fluctuatie van de bovenste sensor. Sowieso is er een patroon te zien wat duidelijk samenhangt met de watergift. Vooral bij teelt 3 en teelt 4 is dit zichtbaar. Bedacht moet worden dat het gietpatroon afwijkend is van andere teelten. Gebruikelijk is dat direct na zaaien een grote watergift wordt gedaan. Dit is ook bedoeld om de uitdroging van de bodem, ontstaan aan het einde van de vorige teelt aan te vullen. Daarna wordt er een aantal dagen niet beregend, tot het gewas goed aan de groei is, dan wordt er met een interval van drie – vijf dagen beregend, tot 10 – 14 dagen voor de oogst. De laatste fase wordt er niet meer beregend. Dit patroon is zichtbaar in Figuur 3.11.

Er is ook een fluctuatie te zien die op kortere intervallen werkt, er is sprake van een dagelijks patroon, waarbij de hoogste waarden midden op de dag worden bereikt en de laagste waarden vroeg in de ochtend. Het lijkt dus sterk op een temperatureffect. De verklaring is dat bij een radijsteelt op deze zandgrond, de temperatuur van de toplaag sterk de kastemperatuur volgt, maar ook door uitstraling 's nachts flink kan afkoelen. Dit kan twee effecten hebben, ofwel de temperatuur is van invloed op de sensorwaarde, of de temperatuur heeft effect op het vochtgehalte. Het eerste is mogelijk het geval. Wellicht niet direct de meetwaarde zelf, de sensor zelf is temperatuur gecorrigeerd, maar door het effect op de luchtspleet van de buis. Ook is er mogelijk nog een effect op de capillairen, dat door uitzetting of krimp als gevolg van de temperatuur de vochtgehalten veranderen. In het kader van dit project is er verder geen onderzoek aan dit fenomeen gedaan.



Figuur 3.11 Het verloop van de vochtgehalten in het bodemprofiel op een bedrijf met radijsteelt, met sensoren op drie diepten gedurende 3 maanden, met de watergift via beregening.

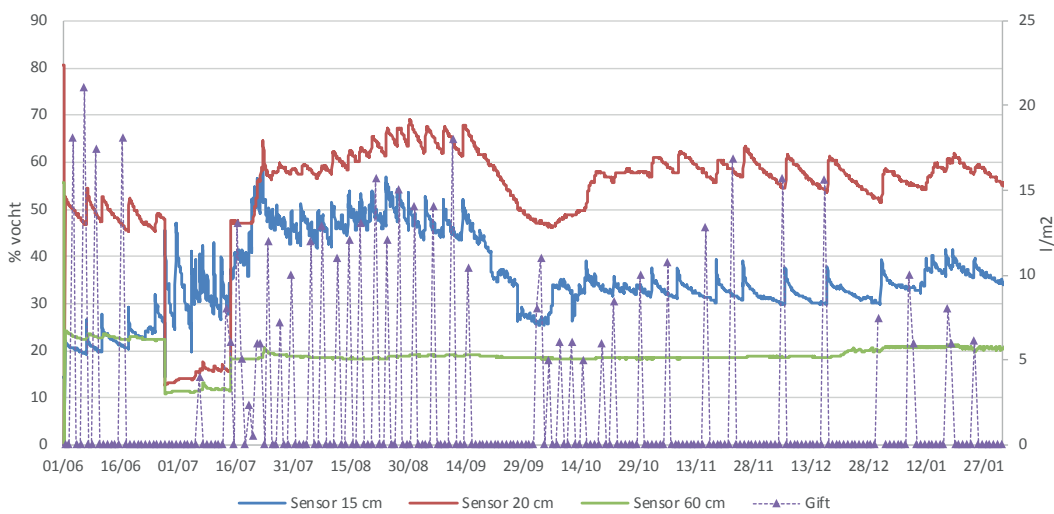
De sensoren in de diepere lagen vertonen enige dynamiek, met name de sensor op 30 cm geeft enige na-ijling van het gietpatroon, vooral bij de eerste gietbeurt van de teelt. De vertraging ten opzichte van de bovenste sensor lijkt een dag of drie te zijn. De dagelijkse fluctuatie is ook hier nog zichtbaar, echter in zeer geringe mate. De dynamiek is vrijwel afwezig bij de diepste sensor. Af en toe is wel enige verandering zichtbaar, maar die lijkt niet samen te hangen met het patroon van de sensoren hoger in het profiel. Er is een uitzondering, bij de laatste teelt in de Figuur is te zien dat het stijgende patroon van de bovenste sensor gevolgd wordt door de tweede sensor met een dag vertraging, de diepste sensor geeft ook een stijging te zien, na ca twee dagen. Op dit bedrijf was geen lysimeter geplaatst, zodat de werkelijk uitspoeling niet kon worden nagegaan.



Figuur 3.12 Verloop van de cumulatieve watergift, cumulatieve verdamping, en het cumulatieve beregeningsoverschot van het bedrijf met radijs over dezelfde periode als in Figuur 3.11.

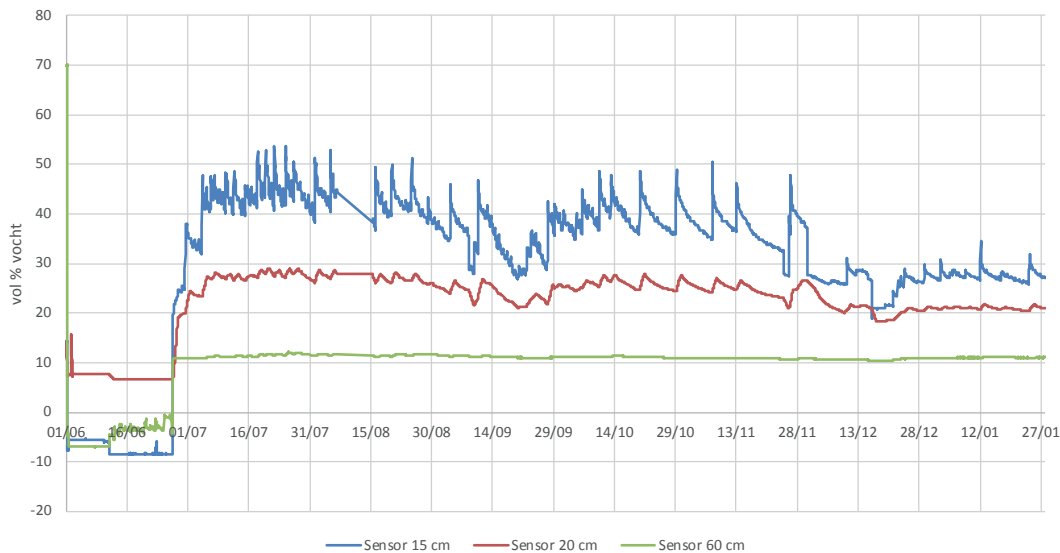
3.2.2 Lelie

Op het bedrijf met jaarrond lelieteelt zijn op meerdere plaatsen 'Sensetions' geplaatst. Het betreft hier een zandgrond met een grondwaterstand (draindiepte) van ca 100 cm. De watergift is via een regenleiding, na het planten van bollen wordt er regelmatig water gegeven, met een frequentie van om de 2-3 (zomer) en 5 – 7 dagen (winter) water gegeven. De Sensetions waren hier tussen de bedden (onder de goot) geplaatst. In Figuur 3.13 en 3.14 is van twee van de Sensetions de resultaten weergegeven. Het "zaagtand" patroon als gevolg van de dynamiek van watergeven gevolgd door uitdrogen is duidelijk zichtbaar bij beide units in de bovenste teeltlaag. De pieken zijn soms wel meer dan 10 procentpunten en lijken samen te hangen met de grootte van de gietbeurt. Er is verschil in patroon tussen beide sensetions, in Figuur 3.14 is er een grotere amplitude dan in Figuur 3.13. De sensor op 20 cm vertoont een gelijke dynamiek, maar de amplitude is duidelijk minder groot dan bij de bovenste sensor. Er zit een vertraging in van een aantal uur ten opzichte van de reactie op een watergift van de bovenste sensor (Figuur 3.15). In deze Figuur is ook te zien dat er voor de bovenste sensor een dag/nacht ritme is te zien in het 'vochtgehalte', zoals besproken in 3.2.1.



Figuur 3.13 Het verloop van de vochtgehalten in het bodemprofiel op een bedrijf met lelieteelt, met sensoren op drie diepten gedurende 3 maanden, met eveneens de watergift via berekening.

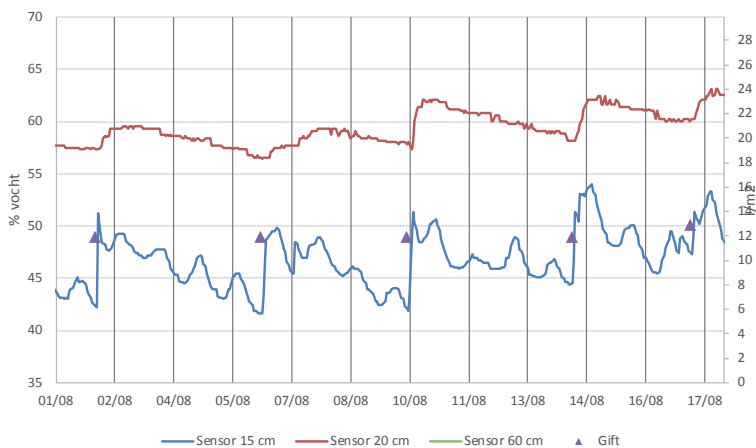
Opvallend is het grote verschil in niveau voor de sensor op 20 cm tussen de eerste en de tweede Sensetion. Zoals hierboven opgemerkt is het niet waarschijnlijk dat dit een werkelijk verschil in vochtgehalte betreft, maar dat dit wordt veroorzaakt door allerlei technische zaken die samenhangen met de sensor en de sensorunit en de plaatsing van de unit. Ook op dit bedrijf reageert de diepste sensor geheel niet op de watergift, er is nauwelijks enige dynamiek te zien. Het enige zichtbare is een lichte stijging van het 'vochtgehalte' vanaf half december. Dit heeft te maken met een gerichte actie om de grondwaterstand te verhogen op dit bedrijf.



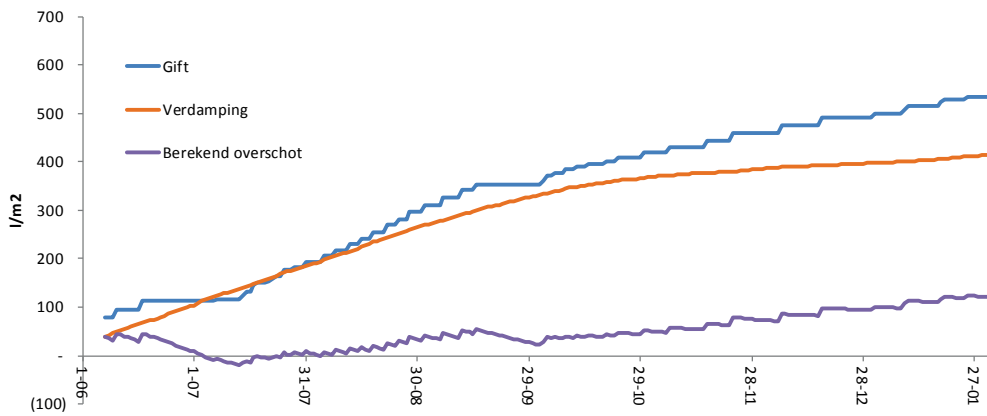
Figuur 3.14 Het verloop van de vochtgehalten in het bodemprofiel op een bedrijf met lelieteelt, met sensoren op drie diepten gedurende 3 maanden.

Het algemene patroon is dat er na de periode van stomen (half juli), waarbij de sensoren opnieuw zijn geplaatst, er na het planten eerst een vernatting heeft plaatsgevonden. Aan het einde van die teelt (half tot eind sept) is de watergift verminderd en een periode gestopt. Er is dan duidelijk sprake van uitdroging, te zien aan een daling in zowel de laag met de sensor op 15 als die op 20 cm diepte. Er is dan zelfs een (zeer geringe) daling van de sensorwaarde op 60 cm te zien (Figuur 3.13). Het valt op dat bij de daaropvolgende teelt (geen herplaatsing sensoren) de 'vochtgehalten' niet weer terug komen op het eerdere niveau. Bij de sensor op 20 cm diepte is dit wel enigszins het geval.

Voor dit bedrijf is ook een schatting gemaakt van de totale verdamping met het verdampingsmodel en is op basis van de watergift het doorlopende berekeningsoverschot berekend (Figuur 3.16). Volgens de modelberekening zou er een constant berekeningsoverschot zijn, uitgezonderd de periode voor het stomen en aan het einde van de teelt in sept. En bedraagt 23% over de weergegeven periode. Uit het verloop van de patronen van de sensoren in de eerste en de tweede bodemlaag leidt het geen twijfel

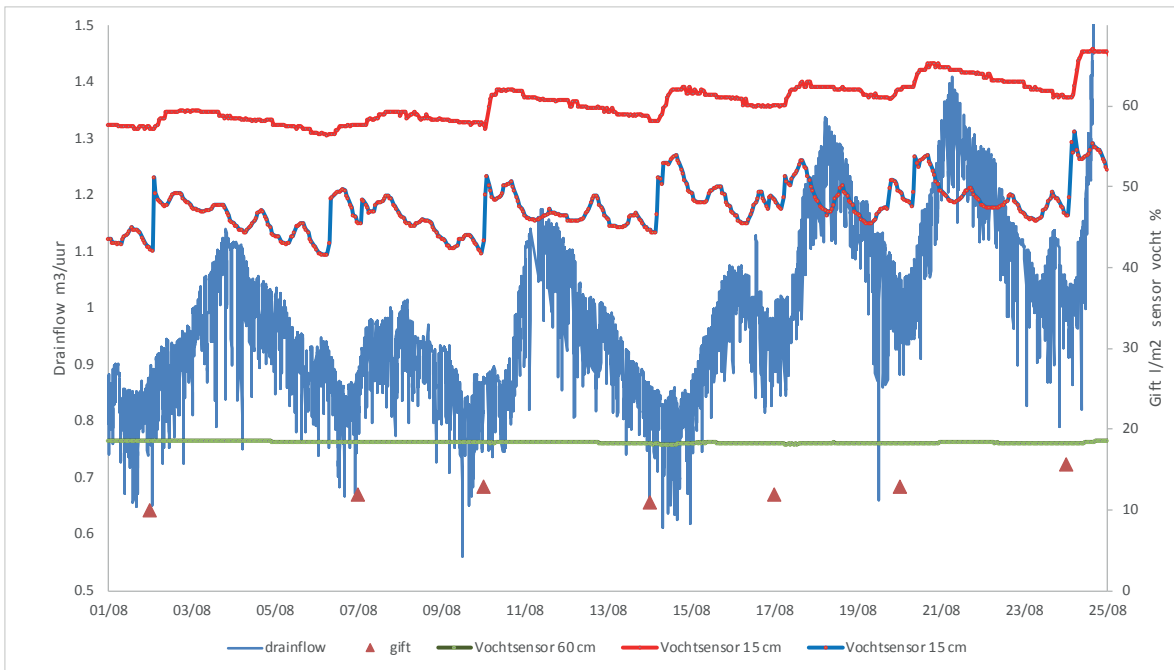


Figuur 3.15 Het verloop van de vochtgehalten in het bodemprofiel op een bedrijf met lelieteelt, data van Figuur 3.13, uitvergroet van de bovenste twee sensoren over een periode van twee weken.



Figuur 3.16 Verloop van de cumulatieve watergift, cumulatieve verdamping, en het cumulatieve berekeningsoverschot van het bedrijf met radijs over dezelfde periode als in Figuur 3.13.

dat dit berekeningsoverschot bij elke gietbeurt ook daadwerkelijk de zone tot 20 a 25 diepte bereikt. Uit de grootte van de pieken bij de sensor op 20 cm kan worden verondersteld dat dit vochtfront nog wel dieper zal gaan. Het is echter niet mogelijk dit vochtfront te volgen tot op 60 cm diepte, de sensor op die diepte geeft geen dynamiek te zien. Het is helaas niet mogelijk het gedrag van de sensoren te koppelen aan de werkelijke uitspoeling omdat er geen lysimeter aanwezig was op dit bedrijf. Echter vanwege een aanpalend project was op dit bedrijf een continue drainflow meter geplaatst op een hoofddrain van een bepaald gedeelte van de kas, waarmee het patroon van de drainageafvoer kon worden gevolgd. Voor details, zie het rapport Voogt, (2017). In Figuur 17 is het verloop van de gemeten drainflow weergegeven tezamen met de watergift als gietbeurt en het verloop van de drie vochtsensoren, over een bepaalde periode. Het is opvallend dat het patroon van de drainflow samenvalt met het patroon van de gietbeurten. Direct na, of tijdens een gietbeurt is er sprake van een piek in drainafvoer. Bedacht moet worden dat er meerdere kraanvakken zijn in het kasgedeelte dat draineert op deze afvoer. Meestal wordt er in een sequentie alle kraanvakken op dezelfde dag berekend, waarbij het betreffende kraanvak waarvan de gift is weergegeven eerder of later aan de beurt is, of om een bepaalde reden overgeslagen wordt. Ook de omvang van de gift kan per kraanvak verschillen. Niettemin is duidelijk dat het berekende positieve berekeningsoverschot op dit bedrijf tot uiting komt in de drainflow, dat er derhalve daadwerkelijk uitspoeling plaatsvindt, maar dat dit niet gereflecteerd wordt door de meting van de sensor op 60 cm diepte.



Figuur 3.17 Verloop van de drainflow in de onderbemalingsput als gemeten op het leliebedrijf in m³/uur (5 minuut interval) en de watergift in een bepaald kraanvak (l/m²). NB, de drainafvoer heeft betrekking op een groter oppervlak dan alleen het betreffende kraanvak.

4 Discussie en conclusies

4.1 Interpretatie meetwaarden

Bodemvochtsensoren kunnen een belangrijke rol spelen in het watermanagement op grondgebonden glastuinbouwbedrijven, zoals is gedemonstreerd in voorgaande projecten (Balendonck *et al.* 2012; Voogt *et al.* 2015). Sensoren reageren direct op veranderingen in het vochtgehalte in de verschillende bodemlagen. Ze geven de teler ondersteuning bij de dagelijkse planning van de watergift

De vochtgehalten vooral in de tweede teeltlaag, op ca 20 cm diepte zijn een belangrijke indicator voor het optreden van uit-/indroging van de bodem en kunnen zo een signaal functie hebben om een watergift te starten. Aan de hand van de grafieken van de metingen die een teler op zijn computer scherm krijgt kan hij vervolgens gaan sturen op de trends van het bodemvocht. Juist deze trends geven hem inzicht of de bodem vernat (stijgende trend) of juist uitdroogt (dalende trend), en ook in welke lagen dit gebeurt. Uit de gegeven voorbeelden uit de praktijk is duidelijk dat de grootte van de fluctuatie in vochtgehalte, zoals te zien in de sensoren op 15 en deels op 20 cm diepte direct na een watergift (piek) lang niet altijd evenredig is met de grootte van een watergift. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in de waterberging: het verschil tussen een werkelijk vochtgehalte en de maximale hoeveelheid vocht die een bodemlaag kan vasthouden. Dit is voor elke bodemtype verschillend en hangt samen met de vocht-onttrekking in de periode ervoor. Duidelijk is te zien dat bij elke watergift de waarden plots zeer snel stijgen, om daarna aanvankelijk zeer snel te dalen en vervolgens is een meer geleidelijke daling in te zetten (zie bijvoorbeeld Figuur 3.2). De snelle daling is duidelijk het gevolg van neerwaarts transport van het water dat bij de heersende drukhoogte (zuigspanning) niet kan worden vastgehouden door die bodemlaag. De geleidelijke daling daarna kan door wateropname door de plant komen, verdamping vanuit het bodemoppervlak, of door nog langzaam na-ijlen van het eerdere neerwaarts transport. Welk van deze processen verantwoordelijk is zonder aanvullende metingen niet te zeggen. Tussen twee gietbeurten liggen soms een aantal dagen, waarbij de vochtgehalten dan langzaam verder dalen. Dit bedraagt meestal enkele procentpunten en weerspiegelt ook de wateropname door de wortels. De trends worden gevormd uit het verloop in de tijd van de pieken, maar vooral de minimum waarden vlak voor elke gietbeurt. De teler zal op termijn gevoel moeten gaan krijgen welke vochtgehalten hij zal moeten aanhouden om te kunnen sturen. Dit is een leertraject.). Telers die ook een lysimeter hebben, zijn daarbij in het voordeel omdat zij een referentie vochtgehalte vinden om op te sturen door het eerste drainmoment na de start van een teelt op te zoeken door steeds grotere beurten te geven. Telers vinden zo de maximale watergift (beurtgrootte) waarbij geen uitspoeling plaatsvindt. Ze kunnen deze kennis dan vervolgens ook inzetten bij de andere teeltvakken waar geen lysimeter en sensoren staan. Complicerend daarbij is wel dat de teler zijn referentie vochtwaarde verliest zodra een sensor herplaatst is en dus weer opnieuw zal moeten leren. Voor alle sensoren blijft gelden dat ze niet stoombaar zijn en verwijderd moeten worden voor het stomen en diepe grondbewerking.

4.2 Plaatsing en sensorkalibratie

Sensoren moeten specifiek voor elk type bodem gekalibreerd worden. Alhoewel telers doorgaans hun bodem kennen en ook voor verschillende diepten kunnen indelen in verschillende typen zoals bijvoorbeeld zand, klei, zavel e.d., heeft de bodem toch vaak zo'n grote variabiliteit dat sensoren per locatie gekalibreerd moeten worden. Na het verwijderen van de sensoren voor grondbewerking en/of stomen is herkalibratie in principe nodig. In veel gevallen zal dit te tijdrovend zijn voor telers zodat deze moeten terugvallen op de kalibraties die eerder gedaan zijn of op standaard curven. Hoe meer aandacht voor de kalibratie des te nauwkeuriger zal het volumetrisch vochtgehalte zijn. Echter in bepaalde teelten vinden zeer regelmatig teeltwisselingen plaats en is herplaatsing nodig; het uitvoeren van kalibraties is tijdrovend en vraagt deskundigheid. Los hiervan weten we dat de variatie van het bodemvochtgehalte in een teeltvak, maar zeker in de gehele kas, erg groot kan zijn. Het is daarom maar zeer de vraag of het wel nodig is om het absoluut vochtgehalte te weten en een begrijpelijke keuze om de kalibratie achterwege te laten en te concentreren op de trends.

Sensoren moeten op een representatieve plek in het teeltvak worden geplaatst. De sensor op ca 15 en 25 cm diepte geven de teler de meeste informatie. In het onderzoek is ook gewerkt met een sensor op 60cm diepte, maar deze biedt weinig extra informatie, omdat er weinig of geen dynamiek in het watergehalte op deze diepte waarneembaar was.

4.3 De DACOM Sensetion

Voorafgaand aan dit project hadden telers hun eisen kenbaar gemaakt voor vochtsensoren. Telers willen robuuste en betrouwbare bodemvochtsensoren die direct afleesbaar zijn op de klimaatcomputer en het normale teeltproces niet verstoren. Een belangrijke eis was daarom dat deze draadloos zouden moeten zijn en daarbij ook nog gemakkelijk te plaatsen (Voogt *et al.* 2015). Van de beperkte keuzes die overbleven is de DACOM 'Sensation' gekozen in dit project. Daarbij moesten echter wat compromissen worden gesloten. In de eerste plaats was het meetsignaal niet ontwikkeld voor glastuinbouw toepassingen en daarom niet direct bruikbaar. Er kon een conversieregel worden ontwikkeld om het ruwe meetsignaal te vertalen naar een vochtgehalte. Een directe koppeling met de klimaatcomputer was ook niet mogelijk. Als tussenoplossing is ervoor gekozen de data op te halen van de DACOM server via een server bij WUR en de gegevens door te zenden naar Letsgrow, waarmee de grafieken op de PC van de teler bekeken kunnen worden. Een voordeel daarbij is dat de conversie in eigen beheer kan worden gehouden. Deze route is inmiddels ook beschikbaar voor telers, zonder tussenkomst van een WUR-server. Een ander compromis is dat bij de start van het project de Sensation module nog niet uitontwikkeld was. Daardoor kwamen er helaas een groot aantal technische mankementen naar voren. Tijdens de looptijd van het project konden deze niet opgelost worden. De belangrijkste daarvan was de constructie van de meetbuis, die tijdelijk in PVC was uitgevoerd maar doorontwikkeld zou worden als een glasvezelversterkte epoxy buis. Helaas bleek dit niet haalbaar, waardoor de Sensation sterk aan robuustheid tekort kwam. Ook de inpassingen (aansluiting) van de sensor in de meetbuis was niet ideaal, er was onder andere een luchtspleet aanwezig die verstoring van het signaal gaf. Ook bleek het zonnepaneel en het geheel van de powerunit met de combinatie van de zender/ontvanger van het GSM signaal dusdanig beperkte capaciteit in stroomvoorziening te hebben dat er vaak uitval was van het signaal. Ook de uploadfrequentie (1 maal per uur) bleek een forse beperking van deze sensor als geschikte sensor voor de glastuinbouw.

Al met al bleek dat deze sensor in de vorm waarin deze nu beschikbaar is niet te voldoen aan de eisen van telers en daarom niet geschikt.

4.4 Sensor onder de teeltlaag

De sensoren geplaatst op 60 cm diepte geven nauwelijks veranderingen van het vochtgehalte te zien, ook in die situaties waar er bij de bovenliggende sensoren een flinke respons is te zien op een watergift. Ook in eerder onderzoek waar sensoren dieper waren geplaatst werd dit fenomeen waargenomen (Voogt *et al.* 2000; Voogt *et al.* 2002). De reden dat er weinig dynamiek is heeft vooral te maken met het feit dat normaal gesproken de bodem in een teeltsituatie op een diepte van 60cm dicht bij de bijna verzadigde zone zit. Een passerend waterfront door uitspoeling zal dan weinig verandering in het watergehalte geven, omdat het watergehalte een relatieve waarde is; bij een hoog verzadiging-niveau is de verandering relatief gering. Voorbeeld: bij een uitspoeling van 1 mm (1 l/m^2), zal een bodemlaag bovenin, met daarin 20% vocht, (per bodemlaag van 10 cm is er per m^2 100 l volume dus 20 l water) een wijziging betekenen van $1/20 = 5\%$. Bij een laag onderin, met 50% vocht is dit (bodemlaag per 10 cm = 50 l water) slechts 2%. Dus wordt een uitspoeling van 1 mm niet meer opgemerkt door de sensor. Dit principe geldt voor elke sensor die een relatief vochtgehalte meet, en hangt dus niet direct samen met de geconstateerde tekortkomingen van de Sensation.

Vervolgens is er het verschijnsel van de dispersie. Omdat de porositeit van een bodem niet bestaat uit uniforme buisjes, maar uit een enorme verscheidenheid aan capillairen, verschillend in diameter en vorm, ontstaat er bij uitspoeling geen strak front, maar zal het water, naarmate het dieper doordringt steeds meer het karakter krijgen van een uitgerekt en zeer platte golf. Met andere woorden, uitgaande van bovengenoemd voorbeeld zal een overschot van 1 mm (20% verandering) op 10 cm diepte wellicht nog een piek vertonen van 10 – 15% die in enkele minuten langstrekt, op 60 cm is die 1 mm (2% verandering) veranderd in een golf die wellicht een piek heeft van 0.1% en in de loop van uren langs sijpelt.

In theorie zijn de situaties met diep(er) grondwater wat anders. Omdat de verzadigingsgraad op diepte van 60 cm minder groot zal zijn dan in situaties met een grondwaterstand rond diepte van de drainage (meestal 90 – 100 cm), zal de verandering in relatief vochtgehalte groter zijn en een signaal van uitspoeling kunnen worden opgemerkt. Echter in dit project waren er slechts enkele bedrijven met een grondwaterstand van > 1 a 2 m, maar ook hier bleek de dynamiek erg beperkt. Het fenomeen van de dispersie zal ook hier ertoe bijgedragen hebben dat er uiteindelijk weinig dynamiek zichtbaar was.

4.5 Meten van uitspoeling

Een van de belangrijke vragen voor dit project was of met een sensor onder de teeltlaag, uitspoeling naar de ondergrond kan worden gesignaleerd. De Sensation werd daarom uitgevoerd met een sensor op 55 a 60 cm diepte die dat mogelijk zou moeten maken. Uit de voorbeelden die in dit rapport zijn opgenomen blijkt echter dat dit niet of slechts in specifieke situaties mogelijk is. Plotselinge stijging van een vochtgehalte zijn een indicatie dat er op die plek meer water wordt aangevoerd dan afgevoerd. Een gietbeurt met de regenleiding is dan ook gemakkelijk te traceren door piekwaarden in het patroon van de bovenste sensor. Vaak is dit ook nog zichtbaar bij de sensor op 20 a 25 cm, zodat een logische conclusie is dat water zich verplaatst van de bovenste laag naar de tweede laag. Als dit ook bij de diepste sensor het geval zou zijn, zou je kunnen concluderen dat er waterverplaatsing tot beneden teeltlaag plaatsvindt, waarbij we voor het gemak even aannemen dat dit dan buiten bereik van de wortels komt. Echter in de getoonde voorbeelden is te zien dat die geschetste patroon bij de diepste sensor meestal niet aanwezig is. De voorbeelden waarbij een lysimeter aanwezig was laten verder zien dat in situaties waar daadwerkelijk uitspoeling plaatsvindt er geen reactie wordt gemeten met de diepste sensor. Ook in het voorbeeld van het leliebedrijf waar weliswaar geen lysimeter aanwezig is, maar waar wel de drainageflow gemeten werd, kon worden vastgesteld dat er een directe relatie ligt tussen een beregeningsactie en toename van de drainafvoer (dus uitspoeling vanuit de teeltlaag door beregening) maar waar er geen merkbare reactie was van de geplaatste sensoren op 60 cm diepte. Dit is op zich goed verklaarbaar, als de aanvoer van water uit boven liggende lagen vrijwel gelijk is aan de afvoer naar diepere lagen vindt er immers geen verandering in vochtgehalten plaats. In een kassituatie waarbij sprake is van gematigde watergiften is zo'n evenwichtssituatie goed mogelijk.

Om misverstanden te voorkomen: Het ontbreken van dynamiek bij de onderste sensor kan uiteraard ook duiden op 0-uitspoeling, bijvoorbeeld indien er 'op maat' water wordt gegeven. Het gaat hier in de discussie echter om de vraag óf er uitspoeling kan worden gemeten met een diepe sensor. Daarover kan dus geconcludeerd worden dat dit alleen in specifieke situaties het geval is. Het niet zien van enige dynamiek in het verloop van de onderste sensorwaarden kan dus voorkomen zowel bij veel uitspoeling, geen of zelfs een negatieve uitspoeling (capillaire opstijging).

Er is nog overwogen of een alternatieve, meer wiskundige analyse van de data nog iets zou kunnen toevoegen. Dit zou bijvoorbeeld kunnen met een impulsresponsie-analyse, waarbij dan berekend wordt in hoeverre een impuls (in dit geval de watergift) nog beantwoord wordt in de eerste, tweede of derde sensor (respons). (gebruikt in onder meer medische toepassingen (ECG hersenscans)). Door in dit geval de zeer beperkte dataresolutie (het aantal meetwaarden in de tijd) bleek dit geen begaanbare weg. Als laatste blijft over een methode om aan de hand van trendanalyse iets te zeggen over het verloop van de gehalten: wordt het droger of natter. Echter dit gegeven hoeft niets te zeggen over uitspoeling. Een vernatting van de diepste sensor kan namelijk ook komen door netto meer capillaire opstijging als gevolg van verminderde verdamping al of niet in combinatie met stijgend grondwater.

4.6 EC meting en verzouting

In de inleiding is gerefereerd aan de vrees dat droger telen tot verzouting kan leiden. Deze vrees is op zich reëel. In eerder onderzoek met de prototype van de uiteindelijk ontwikkelde lysimeter bleek bij een biologisch bedrijf waar sprake is van zoute kwel dat door droog telen de EC in de loop van enkele jaren op liep. Kanttekening hierbij is echter dat er op dit bedrijf ook periodiek sprake was van slecht gietwater en vooral ook een onbalans in mineralen aan- en afvoer. Niettemin is verzouting van de teeltlaag een potentieel gevaar bij teelten waar de uitspoeling teruggaat naar 0. Zodra er geen netto neerwaartse stroming meer is, kan er via capillaire opstijging, in combinatie met diffusie, transport van zouten (vooral Na, Cl, SO₄) uit de ondergrond ontstaan. Vooral naarmate de ondergrond een hoog zoutgehalte bevat (zoute kwel) kan dit op termijn verzouting geven.

Zou een sensor die EC kan meten een signalering kunnen geven voor dit probleem?

1. Er moet een sensor zijn die naast vocht ook EC kan meten. Al jaren wordt er gezocht naar een goede meting. In principe zou dit met een sensor die werkt met het meetprincipe van FD-meting wel kunnen. Er zijn echter de nodige beperkingen; een daarvan is dat de maximale EC die betrouwbaar gemeten kan worden met dit principe al in de buurt komt van EC's die gebruikelijk zijn in het bodemvocht (poriënwater) in glastuinbouw bodems. Voor dit rapport voert een bespreking hiervan te ver, daarom wordt verwezen naar diverse publicaties op dit gebied (Balendonck *et al.* 2005).
2. Als er sprake is van verzouting, moet de resolutie van de meting dusdanig zijn dat dit ook kan worden gesignaleerd. Het is de vraag of de meetnauwkeurigheid voldoende is om de kleine nuances in EC-stijging die capillair water met zich meebrengt.
3. Los van de EC stijging, is verzouting alleen een probleem als er over een langere periode (maanden) netto capillaire opstijging is. EC signalering alleen is dus onvoldoende, ook het vochttransport moet bekend zijn. Gezien de bovenstaande discussie over vochtmetingen, zal dit probleem via meting met vochtsensoren waarschijnlijk onvoldoende duidelijk worden. Er zal dus ook een idee moeten zijn over de waterbalans.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- De DACOM Sensetion, is qua concept een goed idee en voldoet aan de meeste randvoorwaarden van de telers. Echter, de Sensetion is niet robuust genoeg voor implementatie in de praktijk omdat deze te kort schiet op en aantal technische aspecten.
- Het standaard meetsignaal van de Sensetion is niet zonder meer bruikbaar. Een "one fits all" conversie naar vochtgehalte bleek voldoende robuust om te kunnen toepassen.
- De meetwaarden in de wortelzone, in de lagen 15 – 30 cm, bleken voor het volgen van het gietgedrag goed bruikbaar. Ook trends in het vochtgehalte zijn hiermee goed zichtbaar te maken.
- Herplaatsing van sensoren, zelfs in hetzelfde boorgat, geeft onherroepelijk andere waarden, Daardoor doorbreekt dit het patroon c.q. trends op hinderlijke wijze. Dit moet zoveel mogelijk worden voorkomen.
- Testen met het plaatsen van sensoren niet in het bed, maar onder de goot gaf bij chrysant en radijs goede en representatieve resultaten en is een bruikbaar alternatief voor plaatsing in de teeltstrook.
- De sensoren geplaatst op 60 cm diepte geven nauwelijks veranderingen van het vochtgehalte, een passerend front van uitspoeling wordt zodoende niet opgemerkt. Dit heeft te maken met de optredende dispersie (uitrekken van het vochtfront) en de beperkte relatieve veranderingen van het vochtgehalte. Het komt er dan in feite op neer dat er op een bepaalde diepte een evenwichtssituatie gaat ontstaan in de stroomsnelheid, waarbij de aanvoer van bovenaf gelijk wordt aan de afvoer naar diepere lagen. Uitspoeling – die er wel is - leidt dan dus niet tot een meetbare verandering in vochtgehalten.
- Ook bleek er (bij de in dit project onderzochte bedrijven) geen enkel verband tussen de meetwaarden van sensoren op 60 cm en het berekend beregeningsoverschot, en evenmin met een daadwerkelijk gemeten uitspoeling (lysimeter of drainage). Het ontbreken van dynamiek bij de onderste sensor kan uiteraard ook duiden op 0-uitspoeling, bijvoorbeeld indien er "op maat" water wordt gegeven. Gezien de resultaten kunnen geen eenduidige conclusie worden getrokken. Het niet zien van enige dynamiek in het verloop van de onderste sensorwaarden kan dus voorkomen zowel bij veel uitspoeling, geen of zelfs een negatieve uitspoeling (capillaire opstijging).
- Een sensor op deze diepte lijkt daarom niet direct geschikt als indicator voor uitspoeling. Voor de toepassing van een diep geplaatste sensor met als doel uitspoeling te signaleren, geldt in ieder geval dat deze op voldoende afstand van de verzadigde bodemlaag moeten worden geplaatst. Hoe groot deze afstand minimaal moet zijn is afhankelijk van een aantal bodemparameters en ook de resolutie van de sensor. Dit moet nog verder worden onderzocht.
- Het trendmatig volgen van de sensoren op drie niveaus geeft wel inzicht in de waterbeweging in de bodem. Wat dat betreft is er met de combinatie wel enig zicht te krijgen of er "verdroging" of "vernatting" van de bodem plaatsvindt. Deze informatie is echter onvoldoende om iets over de mate van uitspoeling te zeggen.
- Een bodemmodel dat gevalideerd is op accurate data voor bodemvochtgehalte op verschillende diepten geeft naar verwachting een beter beeld van de situatie. De in het onderzoek gebruikte sensoren bleken niet nauwkeurig genoeg om dit toe te kunnen passen. Er zijn nauwkeurigere sensoren beschikbaar, maar in het algemeen is het lastig om zelfs die bodemvochtgehaltesensoren robuust te kalibreren voor absoluut vochtgehalte. Vooral omdat die kalibratie afhankelijk is van het bodemtype en de sensorplaatsing welke van locatie tot locatie in de bodem sterk kan wisselen. In de praktijk zal daarom een voorspelling van de uitspoeling via een bodemmodel gevoed door sensor data een beperkte nauwkeurigheid hebben.
- Het streven naar 0-emissie kan aanleiding zijn voor verzouting. Om dit met sensoren te kunnen signaleren is een robuuste sensor nodig die EC waarden kan meten, maar kan niet zonder een combinatie met een waterbalans.

5.2 Aanbevelingen

Bodemvochtsensoren zijn op zich een goed hulpmiddel voor het managen van de watergift. Echter, zoals ook al eerder is aangetoond, en ook nu opnieuw is gebleken, met sensoren alléén, kan uitspoeling niet goed in beeld worden gebracht. Met alleen bodemvochtsensoren is het erg lastig om te komen tot minimale – of nul-emissie, wat in beginsel het achterliggende doel is van de 'zorgplicht'. Zonder extra informatie over de waterbalans is goed watermanagement op grondteeltbedrijven, waarmee kan worden voldaan aan de zorgplicht én voldoen aan randvoorwaarden vanuit teeltkundig oogpunt niet goed mogelijk. Echter, ook een modelmatige aanpak heeft zo zijn beperkingen, vanwege een aantal onzekerheden van parameters. De enige werkbare controle en borging van werkelijke uitspoeling is de robuuste lysimeter, waarbij dan voor de aansturing een watergeefmodel gebruikt kan worden en waarbij dan ter controle sensoren kunnen worden toegepast. Dit modulaire concept is destijds uitgewerkt in het project "ontwikkeling van een emissie management systeem" (Voogt *et al.* 2012)

Echter, er zijn nogal wat praktische bezwaren tegen de lysimeter, ook is de combinatie van de modules qua regeling gecompliceerd en duur. Er zijn daarom voor grondgebonden teelten praktisch hanteerbare oplossingen nodig, die binnen het bereik van elke teler liggen. Op grond van het onderzoek en de ervaringen van de afgelopen jaren worden voor de verdere ontwikkeling van het watermanagement voor grondgebonden telers om aan de zorgplicht te kunnen voldoen daarom de volgende aanbevelingen gedaan:

- Een grote stap kan worden gezet indien telers de watergift laten bepalen door een watergeefmodel. Dit model is gebaseerd op het WUR-verdampingsmodel met voornamelijk straling en enkele aanvullende parameters. In principe is dit watergeefmodel al in grote lijnen beschikbaar en op sommige klimaatcomputers zelfs al in de basis als algoritme aanwezig.
- Een volgende stap is om dit model te koppelen aan een bodemhydrologischmodel. Dit zal een simpel bodemhydrologischmodel moeten zijn wat niet al te veel rekentijd vergt en op elke PC (bedrijfscomputer) kan worden gedraaid. Om het model robuust te maken zijn voor individuele situaties (bedrijf, kas, afdeling) eenmalig een aantal bodemanalyses met fysische bepalingen nodig. Tezamen met het hiervoor genoemde watergeefmodel kan zo een **virtuele lysimeter** worden gecreëerd. Hiermee is een veel betere benadering van de uitspoeling te schatten dan met sensoren. Hiermee wordt niet alleen een moment van uitspoeling maar ook de hoeveelheid geschat.
- Een verdere optimalisatie is mogelijk door de virtuele lysimeter te combineren met vochtsensoren in de teeltlaag. Hiermee kan dan worden voorkomen dat een van de componenten in de virtuele lysimeter zorgt voor te grote afwijking van de werkelijkheid.
- Het concept van vochtsensoren op drie niveaus, waarbij er één vrij diep, namelijk onder de intensief bewortelde zone wordt geplaatst zou voor sommige situaties als uitspoelings- signalering kunnen werken. Hiervoor zal dan een aparte module met een algoritme moeten worden ontwikkeld die op basis van de (herhaalde) responsie van de sensoren op een watergift in de tijd kan uitrekenen of er daadwerkelijk uitspoeling plaatsvindt. Dit zal alleen kunnen werken als er voldoende onderlinge afstand is van de sensoren en dat de diepste sensor zich ook op een zekere afstand van de verzadigde zone bevindt. Welke criteria en afstanden dat zijn is voor nader onderzoek.
- Een dergelijke module kan wellicht ook wegzakkend of opkomend grondwater (bij resp. wegzijging en inzijging) signaleren.
- Parallel hieraan zou mogelijk als alternatief in sommige teelten (namelijk daar waar volvelds wordt geteeld en met toepassing van over-gewasberegening) een kleine lysimeter voor tussen de bedden, onder de goten kunnen worden toegepast. De randvoorwaarden en toepassingsmogelijkheden zullen echter eerst goed moeten worden doordacht en onderzocht.
- Om ook de risico's van verzouting tijdig te kunnen signaleren zouden sensoren die ook de EC kunnen meten kunnen worden toegepast. Echter ook hier is nog ontwikkeling nodig om de meetwaarden ook robuust te kunnen omrekenen naar een betrouwbare EC van het bodemvocht.

Literatuur

Balendonck, J., Bruins, M.A., Wattimena, M.R., Voogt, W. and Huys, A. (2005).

WET-sensor pore water EC calibration for three horticultural soils. *Acta Hort.* 691, 789-796.

Balendonck, J.; Voogt, W.; Winkel, A. van; Swinkels, G.L.A.M.; Janssen, H.J.J.; Heinen, M.; Dorland, H. van; Zwinkels, F., 2012.

Ontwikkeling emissie-managementsysteem grondgebonden teelt; bodemvochtsensoren en modulaire opbouw van het systeem, Rapporten GTB 1191. Wageningen : Wageningen UR Glastuinbouw.

Infomil 2018.

<https://www.infomil.nl/onderwerpen/landbouw/activiteitenbesluit/sectoren/glastuinbouw/activiteit-telen/lozingsvoorschriften-2/>

Voogt, W., J.A. Kipp, R. de Graaf and L. Spaans., 2000.

A fertigation model for glasshouse crops grown in soil. *Acta Hort*, 537, ISHS 2000, 495-502.

Voogt W., Assinck F., Balendonck J., Blom-Zandstra M., Heinen M, & De Zwart F. H. 2002.

Minimalisering van de uitspoeling bij teelten in kasgrond. Praktijkonderzoek Plant & omgeving, sector glastuinbouw, Naaldwijk, Rapport 543, 34 pp.

Voogt, W. Johan Steenhuizen en Aat van Winkel. 2011.

Verzouting bij de biologische kasteelt. Verslag van onderzoek naar zoutophoping en uitspoeling bij een biologisch teeltbedrijf 2009 – 2010, 19 pp.

Voogt, W., Balendonck, J., van Winkel, A., Janse, J., Swinkels G.J. 2015.

Emissie-management grondgebonden teelten, Monitoring water en meststoffen op praktijkbedrijven en ontwikkeling robuuste vochtsensor. Rapport GTB 1351, Wageningen UR Glastuinbouw 36 pp.

Voogt, W. , van Winkel, A. 2017.

Beperking kwel en inzijging in de drainage bij grondgebonden teelten. Rapport WPR 713, Wageningen Plant Research 26 pp.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-715

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.