



Ion-specifiek Telen

Optimalisatie van bemesting in de glastuinbouw door gebruik van een ion-specifieke meter

Tommaso Barbagli, Chris Blok, Nina Oud, Wilco Dijkstra, Margreet Schoenmaker

Rapport WPR-1250



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Referaat

In een vierjarig project van 2019 tot 2022 is via laboratoria en kweekexperimenten uitgebreid onderzoek gedaan naar ion-specifieke teelt. Bij CEW (Centrum voor Expertise Watertechnologie) is de ion-specifieke meter CE-Line getest met bemoedigende resultaten. Bij Wageningen University & Research, Business Unit Glastuinbouw, zijn de effecten van suboptimale nutriëntenconcentraties op wortelniveau gekwantificeerd. Demonstratieproeven bij Royal Pride en Kwekerij Lijntje hebben bijgedragen om de toepassing van ion-specifiek telen in de praktijk te ervaren. CE-line is voldoende nauwkeurig en betrouwbaar gebleken om in de praktijk te worden toegepast. Met meer informatie over de samenstelling van de drain kunnen telers met meer vertrouwen het drainwater recirculeren en lozing voorkomen. Dit draagt bij aan een vrijwel nullozing van nutriënten naar het oppervlaktewater. Dit project heeft ook aangetoond dat suboptimale nutriëntenconcentraties op wortelniveau kunnen leiden tot een potentieel groeiverlies van 3-4%. Door ion-specifiek gestuurde teelt konden telers deze risico's verminderen en de opbrengstvoordelen zien.

Abstract

In a four-year project from 2019 to 2022, ion-specific cultivation was extensively investigated through laboratories and cultivation experiments. At CEW (Centre of Expertise Water Technology), the ion-specific meter CE-Line was tested with encouraging results. At Wageningen University & Research, Greenhouse Horticulture Business Unit, the effects of sub-optimal nutrient concentration at the root level were quantified. Demonstration trials at Royal Pride and Kwekerij Lijntje have contributed to experiencing the application of ion-specific cultivation in practice. CE-line proved sufficient accuracy and reliability to be used in practice. With more information about the composition of the drain, growers can more confidently recirculate the drain water and prevent discharge. This will contribute to achieving a virtually zero discharge of nutrients into surface water. This project has also provided evidence that sub-optimal nutrient concentrations at the root level can lead to a potential growth loss of 3-4%. Through ion-specific driven cultivation growers could reduce these risks and see the benefits on yield.

Rapportgegevens

Rapport WPR-1250

Projectnummer: 3742 276400

DOI: <https://doi.org/10.18174/636764>

Dit project / onderzoek is mede tot stand gekomen door de bijdrage van:



Disclaimer

© 2023 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

P +31 (0)317 - 48 56 06

F +31 (0)10 - 522 51 93

glastuinbouw@wur.nl

Inhoud

Samenvatting	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Kennisvraag en doel	7
1.3 Aanpak	8
1.4 Organisatie	9
1.5 Technische inleiding	9
1.5.1 Inschatting en terugkoppeling van de watertoevoer naar de installatie	9
1.5.2 Schatting van de toevoer van voedingsstoffen naar de plant	9
1.5.3 Feedbackcontrole op de voedingstoevoer naar de plant	9
1.5.4 Ion-specifieke meetprincipes	10
1.5.5 Plantfysiologische achtergrond	11
1.5.6 Schatting van de kosten van suboptimale voeding	12
1.5.7 De meetinrichting als onderdeel van een meetcontrolecircuit	12
2 Materialen en methoden	13
2.1 WP1. Betrouwbaarheid van de meters	13
2.2 WP2. Labproeven zuurstofverbruik van wortels	13
2.2.1 Componenten van de opstelling	13
2.2.2 Controlemetingen	15
2.2.3 De verwerking van de waarnemingen	16
2.2.4 De zuurstofmeting	17
2.2.5 Berekening van de energiekosten voor suboptimale concentratieverhoudingen van mineralen	17
2.3 WP3. Semipraktijk test en software implementatie	18
2.3.1 Teeltomstandigheden en behandelingen in Bleiswijk	18
2.3.2 Software	20
2.3.3 Metingen en geëvalueerde parameters	20
2.4 WP4. Demonstratieproef in de praktijk	20
2.4.1 Cultivation at Royal Pride, Middenmeer	20
2.4.2 Demonstratieproef bij Kwekerij Lijntje, Moerkapelle	21
2.4.3 Software implementaties	21
2.4.4 Metingen en geëvalueerde parameters	21
2.5 Berekende parameters	21
3 Resultaten	23
3.1 WP1 - Betrouwbaarheid van de meters	23
3.2 WP2 - Labproeven zuurstofverbruik van wortels	23
3.2.1 Zuurstofverbruik	23
3.2.2 Vertraging door zuurstofoverdracht van lucht naar water	25
3.2.3 Effect van de voedingsoplossing op het energieverbruik	26
3.2.4 Berekening van de energiekosten voor suboptimale concentratieverhoudingen van mineralen	28
3.3 WP3 Semipraktijk test	28
3.3.1 Mini doseerunit	28
3.3.2 Gewasprestaties	28
3.4 WP4 Demonstratieproef in de praktijk	30
3.4.1 Resultaten in de praktijk	30
3.4.2 Fluctuaties in de drainput	30

3.4.3	Mening van de telers	31
3.4.4	Werking en verbeteringen aan ion-specifieke meter en software	32
3.4.5	CE-line nauwkeurigheid	35
4	Discussie	36
4.1	Invloed op emissie en opbrengst	36
4.2	CE-line prestaties (WP1, WP3, WP4)	36
4.3	Labproeven zuurstofverbruik van wortels (WP2)	37
4.4	Ion-specifieke teelten (WP3, WP4)	37
4.5	Data management aanpassingen (WP3, WP4)	38
5	Conclusies en aanbevelingen	40
5.1	Conclusies	40
5.2	Aanbevelingen	41
	Literatuur	43
	Bijlage 1 – Kalibratieprocedure van de zuurstofsensor	44
	Bijlage 2 – Een numeriek voorbeeld van de berekeningsstappen van het potentiële opbrengstverlies door suboptimale concentraties in de wortelzone	45
	Bijlage 3 - Proefopzet 2e proef Bleiswijk	47

Samenvatting

Het PPS-project ion-specifiek telen had tot **doel** de bemesting per fertigatie gift te optimaliseren en aan te tonen dat suboptimale bemesting productie kost.

Om dit doel te realiseren is het project opgedeeld in vier werkpakketten. **WP1**; testen en verbeteren van ion-specifieke meetinstrumenten. **WP2**; bewijzen dat afwijkende voedingsoplossingen productie kosten (via meting van zuurstofverbruik rond de wortels). **WP3**; een semipraktijk test van het meetinstrument. **WP4**; een praktijkteelt met als subdoel demonstratie van het meetinstrument voor telers.

De ion-specifieke meter CE-line is uitgebreid getest in een serie proeven bij Wageningen University & Research, in de kassen van de Business Unit Glastuinbouw in Bleiswijk. CE-line staat voor CE in line waarin CE de afkorting van Capillary Electrophoresis is. CE-line is ontwikkeld door de start-up en projectpartner The Sensor Factory (voortaan TSF) uit Heerenveen, Nederland. Inmiddels verkoop via CE-LINE.

Technisch laboratoriumonderzoek is uitgevoerd door partner CEW in Leeuwarden. Het Centre of Expertise Water Technology (CEW) is een leidend kennis- en innovatiecentrum voor toegepast onderzoek en productontwikkeling op het gebied van watertechnologie. Demonstratieproeven bij Royal Pride en Kwekerij Lijntje hebben gezorgd voor extra ervaring met de praktische toepassing van de meter.

Hoofdconclusie

Het apparaat heeft een voldoende nauwkeurigheid en betrouwbaarheid bereikt om in de praktijk te worden gebruikt. Met meer informatie over de samenstelling van de drain kunnen telers met meer vertrouwen het drainwater recirculeren en lozing voorkomen. Dit draagt bij aan het uiteindelijke doel om de emissie van nutriënten naar water terug te brengen tot nagenoeg nul. Met meer informatie over de samenstelling van het drainwater kunnen telers de blootstelling van planten aan suboptimale concentraties nutriënten in de matten verminderen, wat bewezen energie kost voor de plant. Laboratoriumproeven lieten zien dat het zuurstofverbruik door de wortels hoger is bij een suboptimale voedingsoplossing.

Hoofdconclusie WP1 - Betrouwbaarheid van de meters

CEW heeft de apparatuur van TSF gevalideerd. Hiervoor is Standaard Water gebruikt, Standaard Water is water met een vaste concentratie nutriënten, organische vervuiling en gewasbeschermingsmiddelen, representatief voor een realistische worst-case scenario voor een teelt op substraat (Van Ruijven et al., 2018). Uit de tests met ranges in concentratie, temperatuur, pH en EC blijkt dat de metingen grotendeels betrouwbaar zijn. Aan de randen van de bereiken treden echter soms afwijkingen op. Om de nauwkeurigheid voor drie elementen te verhogen, is besloten te werken met een temperatuurkamer om de temperatuur stabiel te houden en worden pH en EC wiskundig gecompenseerd.

Hoofdconclusie WP2 - Labproeven zuurstofverbruik van wortels

Uit de test is gebleken dat wanneer NO_3 gedeeltelijk (ongeveer 50% meq) werd vervangen door Cl, het zuurstofverbruik door de wortels gemiddeld 13% lager was. Vervanging van NO_3 door SO_4 (ongeveer 50% meq) resulteerde daarentegen in 20% meer zuurstofverbruik. Hieruit bleek dat suboptimale omstandigheden de plant meer energie kosten. Wanneer dit wordt geprojecteerd op alle voedingsstoffen, heeft dit project aanwijzingen opgeleverd dat onevenwichtigheden in de nutriëntensamenstelling op wortelniveau kunnen leiden tot een groeiverlies (tot 3-4%).

Hoofdconclusie WP3 – Semipraktijk test

Bij Wageningen University & Research in Bleiswijk zijn twee teelten met tomaat uitgevoerd. In beide gevallen was de opbrengst met een door CE-line gestuurde voedingsgift gelijk aan de opbrengst met een standaardgift. Door technische complicaties van het doseersysteem kon de strategie niet volledig worden doorgevoerd, maar toch bleek uit de gewasanalyses dat -bij gelijke opbrengst- de nitraatopname lager en de chloor opname wezenlijk hoger was in de door CE-line gestuurde behandeling. Voor de registratie van de gegevens en het maken van het bemestingsadvies was gebruik gemaakt van het bemestingsadviesprogramma "Bemesting Adviesbasis" (BAB). De BAB was verbonden met CE-line. Het dataplatform is niet gerealiseerd omdat het systeem in dit stadium nog niet volledig was geïmplementeerd en nog moest worden verbeterd.

Hoofdconclusie WP4 - Plantproeven bij telers

CE-line is verbeterd, zodat het gemakkelijk in het huidige watersysteem van een tuinbouwbedrijf kan worden opgenomen. CE-line kan bijna gelijktijdig twee monsters meten (idealiter gift en drain). CE-line kan de watermonsters verzamelen en zelfstandig de meting uitvoeren. CE-line kan de meting binnen 90% nauwkeurigheid uitvoeren. De softwaremodule BAB werd aangepast zodat het kwekersrecept gebruikt kon worden. Ook kon de teler zelf de orde van grootte van de door de BAB geadviseerde correctie bepalen. Ook is de mogelijkheid toegevoegd om een mix van drain (van verschillende gewassen) te gebruiken om de nieuwe voedingsoplossing te maken. Telers hebben ervaring opgedaan met ion-specifiek telen. De telers waren tevreden met het gerealiseerde systeem, maar beseften dat er meer stappen nodig zijn om tot 100% ion-specifiek telen te komen.

Verdere ontwikkeling

Voor toekomstig gebruik van ion-specifieke meters voor autonome fertigatie-systemen zijn nog een aantal technische verbeteringen mogelijk en grotendeels ook voorzien. Voorbeelden hiervan zijn automatische verdunning van de watermonsters, meting van micro-elementen, het verminderen van de behoefte aan menselijk onderhoud aan de meter en integratie van de meter in het mestdoseersysteem. Waar ion-specifieke meters autonoom de voeding aansturen is behoefte aan een beoordelingssysteem dat een aangepaste voedingsoplossing kan uitrekenen. Zo'n nutriëntenadviesstelsel (NRS) zal het brein zijn van een dergelijk systeem. In de praktijkexperimenten bleek dat telers behoefte hebben aan een NRS met meer gebruikersaanpassingen dan de huidige versie.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Nederlandse glastuinbouw staat voor de opgave om de emissie van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen drastisch terug te dringen, met als uiteindelijk doel nagenoeg nul emissie in 2027. Een belangrijke oorzaak van deze emissies is onvoldoende vertrouwen in de kwaliteit van de recirculerende voedingsoplossing. De kwaliteit van de voedingsoplossing wordt grotendeels bepaald door het evenwicht tussen de ionen in de voedingsoplossing. Deze balans kan worden ondermijnd door ophoping van ongewenste elementen en/of uitputting van essentiële elementen.

Al tientallen jaren wordt onderzoek gedaan naar ion-specifieke meetsystemen. Maar de technologie was nooit precies genoeg en/of praktisch toepasbaar (te duur, te onnauwkeurig, etc.) om op de markt te komen. Met ion-specifieke meters kunnen telers in beginsel veilig telen zonder lozing en wordt het huidige systeem van het sturen van drainmonsters, eens in de 7-21 dagen, deels vervangen door in-line metingen op de bedrijven.

Daarom heeft een consortium met meerdere bedrijven onder leiding van Glastuinbouw Nederland het initiatief genomen om de bemesting per fertigatie gift te optimaliseren en aan te tonen dat suboptimale bemesting productie kost. Dit werd bereikt door (1) bouwen en testen van een ion-specifiek meetinstrument; (2) meten van assimilatiekosten van afwijkende voedingsoplossingen (middels zuurstofverbruik van de wortels); (3) een semipraktijk test van het meetinstrument; en (4) een demonstratieteelt op een praktijkbedrijf.

Omdat ion-specifieke meting en regulering al eerder is bestudeerd, maar de mogelijke teeltvoordelen door ion-specifieke regulering nog geen wetenschappelijke basis hebben, wordt in de "Technische inleiding" ruim aandacht besteed aan achtereenvolgens:

- de inpassing van ion-specifiek meten in de teelttechniek (1.5.1-1.5.3);
- de ion-specifieke meetprincipes (1.5.4);
- de theorie over plantenfysiologische achtergrond van ionenopname door wortels (1.5.5-1.5.6).

1.2 Kennisvraag en doel

Het PPS-project ion-specifiek Telen ontwikkelt een nieuwe, nauwkeurigere manier van meten en doseren, waarmee de voedingssamenstelling van alle macro-elementen per uur kan worden aangepast aan de opname door de plant. Hierdoor wordt kweken zonder lozingen eenvoudiger en kan de groei van de plant beter gecontroleerd en geoptimaliseerd worden.

Het **doel** was om de bemesting per fertigatie gift te optimaliseren en aan te tonen dat suboptimale bemesting productie kost.

Om dit doel te realiseren is het project opgedeeld in vier werkpakketten. **WP1**: testen en verbeteren van ion-specifieke meetinstrumenten; **WP2**: bewijzen dat een afwijkende voedingsoplossing productie kost (via zuurstofverbruik van de wortels); **WP3**: een semipraktijk test van het meetinstrument; **WP4**: een praktijkteelt met als subdoelen demonstratie van het meetinstrument voor telers.

De **deliverables** van dit project waren:

1. Een ion-specifiek meetinstrument voor alle macro-elementen op basis van capillaire elektroforese. Dit product kan uiteindelijk via tuinbouwtoeleveranciers beschikbaar komen voor telers.
2. Een verwerkingsmodule voor de metingen, die de losse metingen van aanvoer en drainwater doorrekent en samenvoegt tot een bedrijfsbalans met daarin plantopname. Dit programma kan via commerciële dataplatforms in de tuinbouw aangeboden worden, zodat ook analysedata van laboratoria automatisch verwerkt kan worden.
3. Een verwerkingsmodule die het mogelijk maakt teeltstrategieën voor voeding te definiëren en door te voeren. Dit type programma kan via de procescomputers van telers werken of via dataplatforms aangeboden worden.
4. Aannemen of verwerpen van de hypothese dat het opnemen van voeding de plant energie kost en wel meer energie als de voedingsoplossing verder afwijkt van de door de plant gewenste voedingsoplossing. Deze kennis is van invloed op het omgaan met kleine afwijkingen in de voedingsoplossing rond de wortels. Kleine afwijkingen zijn afwijkingen die de plant zelf kan corrigeren zonder dat fysiologische afwijkingen ontstaan.

1.3 Aanpak

WP1. Betrouwbaarheid van de meters (in een vorig verslag, zie Hoogland & Barnier, 2019)

CEW, Centre of Expertise Water Technology, heeft de apparatuur van TSF, The Sensor Factory, gevalideerd. Hiervoor is Standaard Water (Van Ruijven et al., 2018) gebruikt, een 'realistische worst case' tuinbouwwater met alle voedingsstoffen, vervuiling en gewasbeschermingsmiddelen. Uit de tests met ranges in concentratie, temperatuur, pH en EC blijkt dat de metingen grotendeels betrouwbaar zijn. Aan de randen van de bereiken treden echter soms afwijkingen op. Om de nauwkeurigheid voor drie elementen te verhogen, is besloten te werken met een temperatuurkamer om de temperatuur stabiel te houden en zal voor pH en EC wiskundig worden gecompenseerd.

WP2. Labproeven zuurstofverbruik van wortels (gerapporteerd in dit verslag, ook in Oud et al., 2021)

Er is een laboratoriumopstelling gebouwd, waarmee het zuurstofverbruik van wortels kan worden gemeten. Voeding van wortels kost energie, die wordt geleverd door de verbranding van assimilaten met zuurstof. Daarom is het zuurstofverbruik van de wortels een maat voor de hoeveelheid assimilaten die de plant gebruikt voor de opname van voedingsstoffen. Deze assimilaten kunnen niet worden gebruikt voor bovengrondse groei, en dus geeft het zuurstofverbruik van de wortels, zoals hier aangenomen, aan hoeveel groei niet-optimale voeding kost. Deze proef toonde aan dat het handhaven van stabiele verhoudingen van voedingsstoffen in de voedingsoplossing extra zuurstofverbruik kan voorkomen. Dit bespaart uiteindelijk assimilaten voor de bovengrondse groei.

WP3. Het gebruik van CE-line in de semipraktijk test verbeteren (gerapporteerd in dit verslag)

De "CE-line"-meter is in verschillende omstandigheden getest in een vergelijkingsproef bij Wageningen University & Research in Bleiswijk in 2020 en 2021. De gegevens van CE-line werden gekoppeld aan de software Bemesting adviesbasis (BAB) voor voedingsadvies. Dit was de basis van een verwerkingsmodule voor de metingen, die de losse metingen van aanvoer en drainwater doorrekent tot een bedrijfsbalans met daarin plantopname.

WP4. Het gebruik van CE-line in de praktijk getest (gerapporteerd in dit verslag)

Een eerste demonstratieproef werd uitgevoerd bij Royal Pride in Middenmeer in 2021, een tweede demonstratieproef vond plaats bij Kwekerij Lijntje in Moerkapelle in 2022. Er is vastgelegd hoe de ion-specifieke metingen leiden tot een daadwerkelijke ion-specifieke dosering. De gegevens gingen van de TSF-meter naar WUR Glastuinbouw voor een digitaal bemestingsadvies. Dit voedingsadvies gaat vervolgens naar van Iperen (vloeibare voeding). Een liter recept gaat vervolgens naar de teler of eventueel direct naar de Priva bemestingsunit, die uiteindelijk de nieuwe voedingsoplossing doseert.

1.4 Organisatie

Het project is geïnitieerd door Glastuinbouw Nederland en WUR. De betrokken partners waren: Evert van der Werfhorst en Wilko Dijkstra van The Sensor Factory (TSF); Geerten van der Lugt (tuinbouwadvies); Kees van der Kruk en Marinus Michielsen (Priva) voor hardware en software van de voedingsinstallatie; René Solleveld en Bram van de Ende (Stolze) voor water installatietechniek; Dick Breugem (van Iperen) voor vloeibare meststoffen en dosering; Wilko Wisse (Lans, tot 2020) en Derek Bot (Royal Pride) als telers betrokken bij praktijkproeven. Chris Blok, Ellen Beerling, Tommaso Barbagli en Joseph Stoenner (WUR) en Bob Bijne en Länk Vaessen (CEW) waren verantwoordelijk voor de onderzoeken. Voor de bredere tuinbouw waren Margreet Schoenmakers (Glastuinbouw Nederland) en Cock van Schie (L.A. van Schie, namens Ondernemers klankbordgroep water, Stichting Kennis in je Kas) betrokken. Verder ontving het project substantiële financiering van Stichting Kennis in je Kas, Interpolis (Hagelunie) en de Topsector Tuinbouw en Uitgangsmaterialen, naast de geldelijke en in natura bijdragen van de betrokken bedrijven. Leo Oprel (LNV tot 2022) volgde de voortgang als agendalid van de BCO. Het uitvoerende deel van dit verslag is tot stand gekomen door het werk van Nina Oud en Aat van Winkel van WUR Glastuinbouw.

1.5 Technische inleiding

1.5.1 Inschatting en terugkoppeling van de watertoevoer naar de installatie

In de glastuinbouw wordt in veel teelten druppelfertigatie toegepast. Bij druppelfertigatie worden per plant meerdere keren per dag water en voeding toegediend. De hoeveelheid water wordt nauwkeurig afgestemd op de behoefte van de plant, door enerzijds de behoefte in te schatten en te controleren of de gift minus de drain overeenkomt met het beoogde doel, anderzijds wordt de plantbehoefte vooraf ingeschat met verdampingsmodellen op basis van klimaatmetingen door sensoren in en rond de kas. De feedbackcontrole op de juistheid van de gift bestaat uit metingen van de drainwaterkwaliteit (EC, pH), vaak aangevuld met litertellingen van gift en drain. Metingen van de water hoeveelheden worden vaak tot tientallen keren per dag geëvalueerd. Voor de toevoer van voedingsstoffen naar de plant is het controlesysteem aanzienlijk minder intensief.

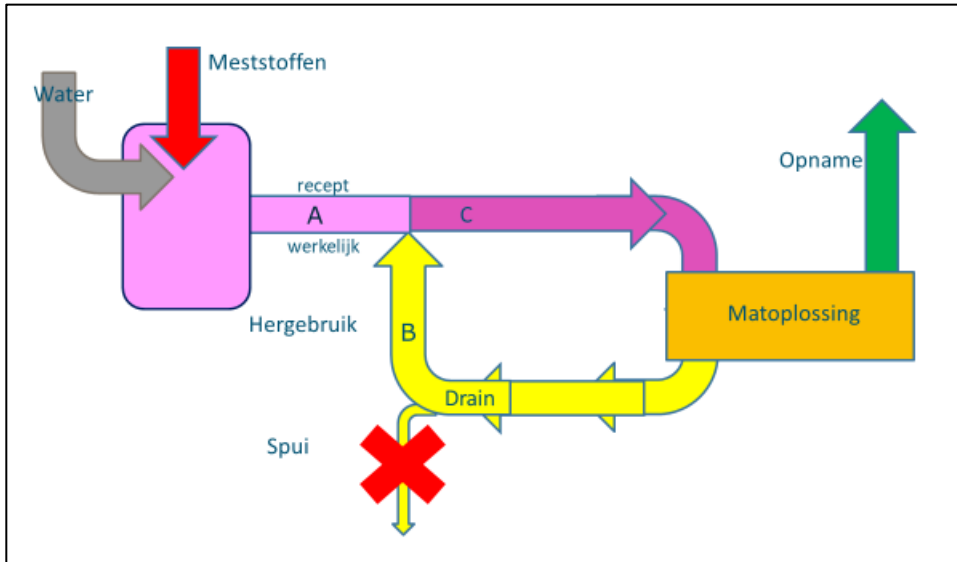
1.5.2 Schatting van de toevoer van voedingsstoffen naar de plant

Bij druppelfertigatie wordt de hoeveelheid voeding afgestemd op de behoefte van de plant door de samenstelling van de oplossing rond de wortels te meten. Dergelijke metingen worden meestal maar eens per 7-14 dagen uitgevoerd (en op het einde van de teelt nog minder vaak). Op basis van deze meting wordt de aanvoer van de voeding naar de plant aangepast. De levering van voedingsstoffen naar de plant is gebaseerd op een nutriënten adviesstelsel (NRS). Het meest bekende en best beschreven systeem staat bekend als de Bemesting Adviesbasis (BAB) Glastuinbouw en bestaat uit een tabellenboek voor substraatgewassen en een boek voor potplanten (Kreij et al., 1999; Straver et al., 1999). In de BAB staan recepten voor de teelt van vele planten en vele gewasstadia. De gegevens zijn gebaseerd op plantenanalyses en teeltproeven, grotendeels in de jaren 1978-2008 (Sonneveld en Voogt, 2008).

1.5.3 Feedbackcontrole op de voedingstoevoer naar de plant

In figuur 1.1 wordt de stroom Aanvul (A) gemengd met de stroom hergebruikt drainwater (B) om een voedingsoplossing (Aanvoer) voor de plant te vormen (C). Lozing (spui) wordt zoveel mogelijk vermeden. De plant neemt voeding op uit de mat en rond de wortels blijft een matoplossing achter. De aanvuloplossing en de matoplossing verschillen van elkaar omdat: a) Elementen als calcium, magnesium en borium moeilijk door de plant kunnen worden opgenomen en daarom in overmaat in de matoplossing aanwezig moeten zijn, b) De EC van de matoplossing vaak hoger is dan de EC van de voeding om de kwaliteit van de plant te verbeteren. De essentie van de terugkoppeling door de BAB is het vergelijken van de gemeten matoplossing (meestal een drainwatermeting) met de ideale matoplossing. De ideale matoplossingen voor vele gewassen en vele teeltstadia zijn vastgelegd in de BAB. Bij afwijkingen kan in de BAB worden opgezocht welke aanpassingen in de aanvuloplossing leiden tot een terugkeer van de matoplossing naar de gewenste waarden. Zowel de ideale matoplossingen als de grootte van de aanpassingen zijn gebaseerd op uitgebreide plantproeven (Sonneveld en Voogt, 2008).

In 2018 is de BAB omgezet in een computerprogramma, waardoor het systeem sneller en minder foutgevoelig is geworden. Dit programma werd binnen dit project gebruikt als hulpmiddel en bediend door de WUR om sneller gebruik te maken van de gegevens van de ion-specifieke meter CE-line. De koppeling van CE-line aan de BAB bood de unieke mogelijkheid om de eerste stap te zetten naar een autonoom fertigatie systeem. Deze automatisering is ook een noodzakelijke stap om de frequentie van de terugkoppeling te verhogen. De belangrijkste stap blijft echter de vervanging van het sturen van drainmonsters, die eens in de 7-14 dagen worden genomen, door het meten van de voedingsamenstelling van oplossingen inline op de bedrijven met een meetapparaat.



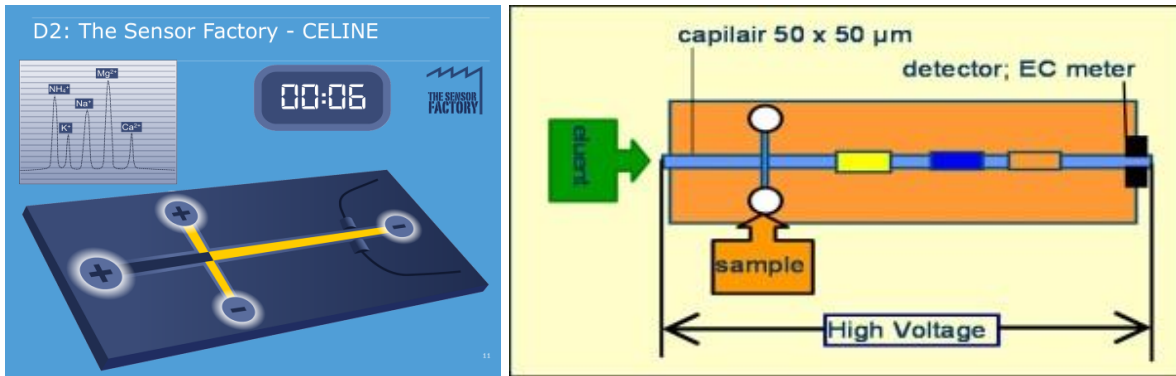
Figuur 1.1 Overzicht van de werking van de Bemesting Adviesbasis substraten. De stroom toegevoegde oplossing, genaamd Aanvul (A) wordt gemengd met de stroom hergebruikt drainwater, genaamd Drain (B) tot een voedingsoplossing voor de installatie, genaamd Aanvoer (C). Spui wordt zoveel mogelijk vermeden. De plant neemt voeding op uit de mat, en rond de wortels blijft een matoplossing achter. De gemeten matoplossing (meestal een drainwatermeting) wordt regelmatig vergeleken met de ideale matoplossing. De ideale matoplossingen voor vele gewassen en vele stadia staan in de BAB. Bij afwijkingen kan in de BAB worden opgezocht welke aanpassingen in de bijvoeding leiden tot een terugkeer van de matoplossing naar de gewenste waarden.

1.5.4 Ion-specifieke meetprincipes

In 2011 is een overzicht gegeven van de toen in beginsel beschikbare meetprincipes voor het bepalen van ionen in tuinbouwoplossingen (Blok et al., 2011). De CE-line maakt gebruik van de technologie die "Micro HPLC" of Capillaire Elektroforese wordt genoemd. Het principe werkt met een monster van de meetoplossing dat verdund met een draagvloeistof in zeer kleine kanaaltjes in een glasplaat van ongeveer 5 x 2 cm wordt gebracht. Door een spanningsverschil worden de ionen in hun bewegingen beïnvloed. De verschillende ionen bewegen daardoor met verschillende snelheden door de kanaaltjes. Aan het einde van de kanaaltjes bevindt zich een gevoelige EC-meter die de passage van de verschillende ionen ziet als pieken in de geleidbaarheid. De aanlooptijd van de piek geeft aan welk element het is, het oppervlak van de piek geeft de concentratie aan (Figuur 1.2). Uitdagingen voor deze technologie waren:

- de kanalen vervuilen snel met organische stoffen. Er is dus een uitgebreide voorfiltratie nodig.
- Er is ook een stabiele hoogspanning nodig.
- De apparatuur vereist specialistisch onderhoud.

Een sterk punt van het systeem is dat de het hart van de opstelling relatief goedkoop is.



Figuur 1.2 Grafische voorstelling van de capillaire elektroforese. Een monster wordt geïnjecteerd in een kanaal met een draagvloeistof. Over de meetweg staat een hoge spanning. Aan het eind van het kanaal bevindt zich een EC-meter die duur en piekgebied naar de software doorstuurt voor interpretatie.

1.5.5 Plantfysiologische achtergrond

Door het meetinterval voor de matoplossing te verkorten ontstaat kennis over de dynamiek per dag en kan de groei nauwkeuriger worden gevolgd. Dit is belangrijk om te voorkomen dat de kwaliteit van de groeiende cellen blijvend wordt aangetast en om te voorkomen dat de plant meer energie verbruikt dan nodig is voor de opname van voedingsstoffen. Bij een afwijkende verhouding van voedingselementen op de wortel zal een plant namelijk energie gebruiken om toch de juiste verhouding van elementen op te nemen. Voor calcium en kalium blijkt uit incidentele gegevens al dat de opnameverhouding over de dag fluctueert. In hoeverre sturing op groei en kwaliteit door aanpassing van voeding en waterdosering economisch interessant is, is niet duidelijk. Er zijn aanknopingspunten die aanleiding geven om te verwachten dat sturing van bovengrondse delen door dagelijkse aanpassingen van water- en voedingstoevoer mogelijkheden biedt:

- Kwaliteitsverlies door de verkeerde verhouding van K/Ca in de tomatenteelt (De Kreij, 2006).
- De vegetatieve sturing van het gewas door extra water te geven (Kierkels, 2010).
- De vegetatieve sturing van het gewas door het scheiden van start- en stoptijden.
- Beïnvloeding van de vegetatieve groei en de vruchtkwaliteit door een laag nitraatgehalte in combinatie met een hoge recirculatiesnelheid (Voogt en Sonneveld, 2004).
- Generatieve sturing van jonge tomatenplanten met een laag matwatergehalte (Kierkels, 2010).
- Verhoogde smaak door de EC te verhogen met macronutriënten of met NaCl.
- Het kaliumgehalte in verhouding tot andere kationen is belangrijk voor de smaak van tomaten.
- Een hogere weerbaarheid door controle van nitraat, calcium en silicium in komkommer, roos en andere gewassen.
- Beperkte N kan vegetatieve groei remmen zonder opbrengstverlies (meer generatief gewas, o.a. Hydrion-project)

Vaak is slechts ten dele bekend tot welke fysiologische processen de waargenomen effecten kunnen worden herleid. Om de effecten te begrijpen moeten ook de bovengrondse groeiomstandigheden integraal worden bekeken.

Uit overleg met L. Marcelis, P. de Visser, W. Voogt en C. Blok bleek dat er nog weinig harde bewijzen zijn voor groeivoordelen door het specifiek meten en sturen van ionen. In het Hydrion-project, niet gedocumenteerd, voerde Bob Veen een proef uit in watercultuur met continu 100%, 80% 60% van de nitraatbehoefte (Marcelis, mondeling). De planten werden minder vegetatief terwijl de opbrengst gelijk bleef, d.w.z. de energie voor de minder geproduceerde vegetatieve massa wordt niet omgezet in opbrengst, maar de balans verandert wel. In een substraatteelt leek hetzelfde resultaat te zijn gevonden met een niet-significante toename van de generatieve massa op korte termijn die zeer snel omsloeg in een afnemende generatieve massa. Dit gebeurde bij een nitraatvoorziening die voortdurend lager was dan de behoefte van de plant. Het nitraataanbod op het niveau van de behoefte was veel lager dan het huidige aanbod, meestal ongeveer de helft. De analyse met het hierbij gebruikte INTKAM-model richtte zich vooral op het bovengrondse klimaat. Het model werkte met drie organen, blad, stengel en vrucht. Deze hebben elk een N-gehalte. Het nitraattekort na een groeistap werd gelijkgesteld aan de N-behoefte. Uit validatie bleek dat de

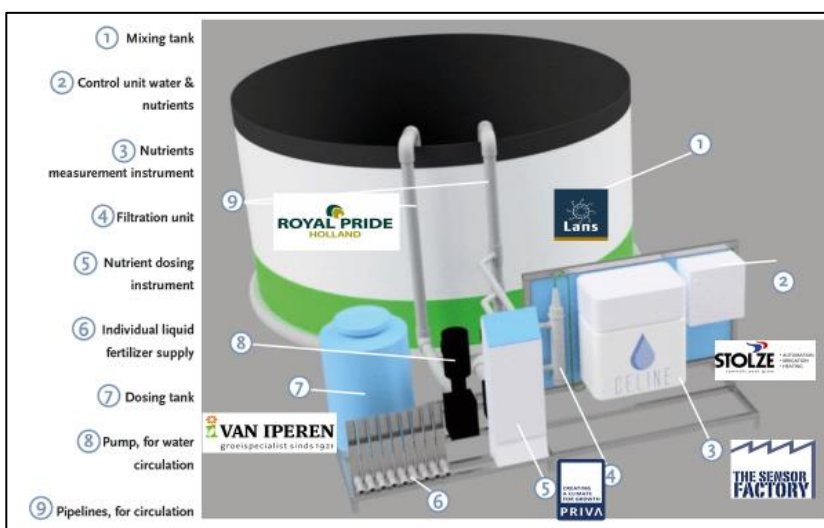
N-voorspelling niet altijd goed overeenkwam met de metingen. Een stijging van de nitraatconcentratie in het blad liet de opbrengst eerst snel toenemen, maar bereikte daarna een globaal stabiel traject waarin zich ook een normaal gewas bevindt. De omvang van het blad (bladoppervlak) liep min of meer parallel met het nitraatgehalte. De plant/wortelverhouding bleef echter toenemen met de nitraatconcentratie in het blad.

1.5.6 Schatting van de kosten van suboptimale voeding

De planten kunnen omgaan met suboptimale concentraties van elementen, maar in welke mate en tegen welke prijs is onbekend. Als bijvoorbeeld de elementen A en B in de juiste verhouding aanwezig zijn, zal de plant de juiste hoeveelheden A en B opnemen. Als A te hoog is en B te laag, zal de plant actief A wegpompen en tegelijkertijd B invoeren (antiport-proces). Of de plant zal een unipoort gebruiken om de vereiste specifieke hoeveelheid B op te nemen. In beide scenario's kost een actieve regeling de planten energie, meer dan in het geval van optimale concentraties. Onze hypothese is dat suboptimale concentratieverhoudingen leiden tot een hoger zuurstofverbruik door de verbranding van assimilaten om energie te produceren. Deze assimilaten (koolstofverbindingen) zijn dan niet meer beschikbaar voor de groei en de opbrengst van het gewas.

1.5.7 De meetinrichting als onderdeel van een meetcontrolecircuit

De ion-specifieke meter meet alleen de drainoplossing (en eventueel de aanvoer) en vervangt de analyses door de laboratoria. Voor een daadwerkelijke ion-specifieke dosering moet een ion-specifieke meetinrichting fysiek worden geïntegreerd met bestaande doseerapparatuur en een berekening van de gewenste aanvuloplossing (Figuur 1.3). Bovendien moeten de gegevens op gestandaardiseerde wijze worden uitgewisseld tussen het ion-specifieke meetapparaat, een elektronisch adviessysteem, een bemestingseenheid en het doseersysteem. Tenslotte moeten alle gegevens worden opgeslagen in een databank voor controle en overzicht. Om optimaal te profiteren van de nauwkeurige in-line metingen is gebruik gemaakt van de digitale Bemestingsadvies Basis 2.0, die onlangs door WUR Glastuinbouw is ontwikkeld in opdracht van de Club van 100 en Topsector T&U. Op basis van de meting werd op elk moment een gewas en stadium specifiek toeslagrecept berekend (dat wat vanuit de A/B-bak gedoseerd moest worden). Dat recept ging naar de bemestingseenheid en werd daar omgerekend naar kilogrammen of liters van de beschikbare meststoffen. Tenslotte werden deze getallen omgerekend naar het aantal slagen dat een motor of pomp moet draaien om de dosering voor het gebruikte type meststofunit te bereiken.



Figuur 1.4 In dit project worden de meetwaarden van het meetapparaat van TSF (3) doorgestuurd naar WUR Glastuinbouw waar op basis van het Bemestingsadvies Basis 2.0 het juiste recept in mmol/L wordt berekend. Dit wordt doorgestuurd naar Van Iperen die het recept omrekent naar een dosering in liters (6-7). Die gegevens gaan naar Priva die het literrecept weer omzet in instructie voor de doseerpompen van de bemester (4-5). Alle gegevens worden opgeslagen in een database die voor alle deelnemers toegankelijk is.

2 Materialen en methoden

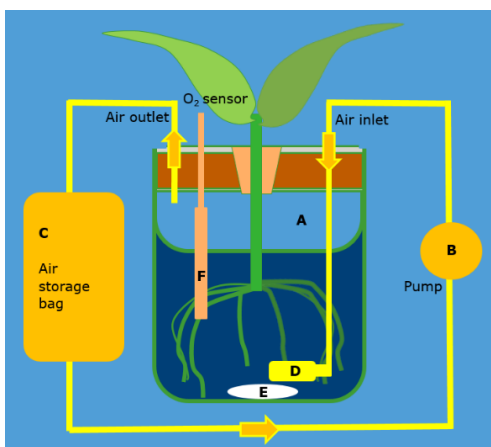
2.1 WP1. Betrouwbaarheid van de meters

De opzet voor de betrouwbaarheid van de meters is te vinden in het rapport van CEW (Centre of Expertise Water Technology) (Hoogland & Barnier, 2019).

2.2 WP2. Labproeven zuurstofverbruik van wortels

2.2.1 Componenten van de opstelling

Om het zuurstof verbruik te meten is een gesloten systeem gecreëerd. Deze bestaat uit: een vat met plant, een zuurstofsensor in het vat, een luchtvoorraadzak verbonden via een slangetje aan het vat en een peristaltische pomp (Figuur 2.1). De pomp zorgt ervoor dat de aanwezige lucht in het systeem wordt rondgepompt, zodat de heersende zuurstofconcentratie in het hele gesloten systeem aanwezig is. De deksel van het vat bevat meerdere doorgangen: in het midden een doorgang voor de plantenstengel, daarnaast doorgangen voor een lucht in- en uitgang naar de lucht voorraadzak en een doorgang voor de zuurstof sensor. Vanaf eind 2020 is ook een water in- en uitgang in de deksel gemaakt, verbonden aan een tweede peristaltische pomp, ter vervanging van het roerstaafje ter verbetering van waterbeweging. De ruimte tussen de stengel en deksel van de midden doorgang is afdicht met een kneedbare pasta (Terostat). Deze pasta is flexibel, waardoor de stengel kan groeien en luchtuitwisseling tussen binnen en buiten het gesloten systeem wordt voorkomen. De planten wortels bevinden zich in het vat, waar ook de zuurstof sensor (Sendot, Houten) hangt, die continu de zuurstofconcentratie meet in de voeding.



Figuur 2.1 Eén gesloten systeem met een vat en plant (A), luchtcirculatie via een peristaltische pomp (B), verbonden aan een lucht voorraadzak (C) en een bruissteentje (D). Een roersteentje (E) voor waterbeweging en een zuurstof sensor (F) in de voeding.

Punten van aandacht bij het ontwerp van de opstelling waren:

- a. De opstelling moet vooraf bewezen gasdicht zijn. Dit bewijs bestaat uit het instellen en meten van een kleine overdruk. Dit kan door een eenvoudige manometer aan te leggen en aan te sluiten op 1 van de doorvoeren van het vat. Er is besloten te werken met een overdruk van 2 cm waterkolom. Als na 24 uur de overdruk nog voor 50% bestaat, wordt de opstelling als lekdicht beschouwd.

De redenering is dat lucht onder normale omstandigheden onder een druk staat van 1 atmosfeer = 10^5 Pa = 100 kPa = 10^5 N per vierkante meter. 100 kPa komt overeen met de druk van 10 meter waterkolom; 10 meter water per vierkante meter is 10.000 kg per vierkante meter en dat is ongeveer 100.000 N per vierkante meter.

Twee cm water druk komt overeen met 0,2 kPa. Dat is 0,2% van de druk. Stel dat het systeem 3000 milliliter lucht bevat. Dan is de verandering door het drukverschil potentieel 6 mL. Er wordt een fout van 1 cm dus 3,0 mL geaccepteerd (0,9 mg zuurstof).

- b. De stengel van de groeiende plant wordt gedurende de teelt steeds dikker. Bovendien zal de stengel op dagbasis ook nog geregeld variëren. Een flexibele pasta moet ervoor zorgen dat de stengel deze bewegingen kan maken zonder dat er een gaslek ontstaat. De pasta moet goed gecontroleerd worden. Er is een niet plantgiftige pasta uit de auto-industrie gebruikt (Terostat-81).
- c. De plant verbruikt gemakkelijk 50 mg zuurstof per dag, waardoor het nodig is met een lucht/zuurstofbuffer te werken, in de vorm van een zak. Een groot voordeel van het werken met een - luchtdichte- zak is dat deze dient als drukbuffer: Verschillen in de druk van de buitenlucht zouden al snel tot lekkage kunnen leiden of bij bestaande kleine lekken tot veel gastransport. Doordat de het zakvolume zich aanpast aan de druk, gebeurt dat allemaal niet. Hetzelfde geldt voor het aanvoeren van de voedingsoplossing: ook deze kan het beste in een zak bewaard worden zodat het volume zich aan kan passen aan drukverschillen.

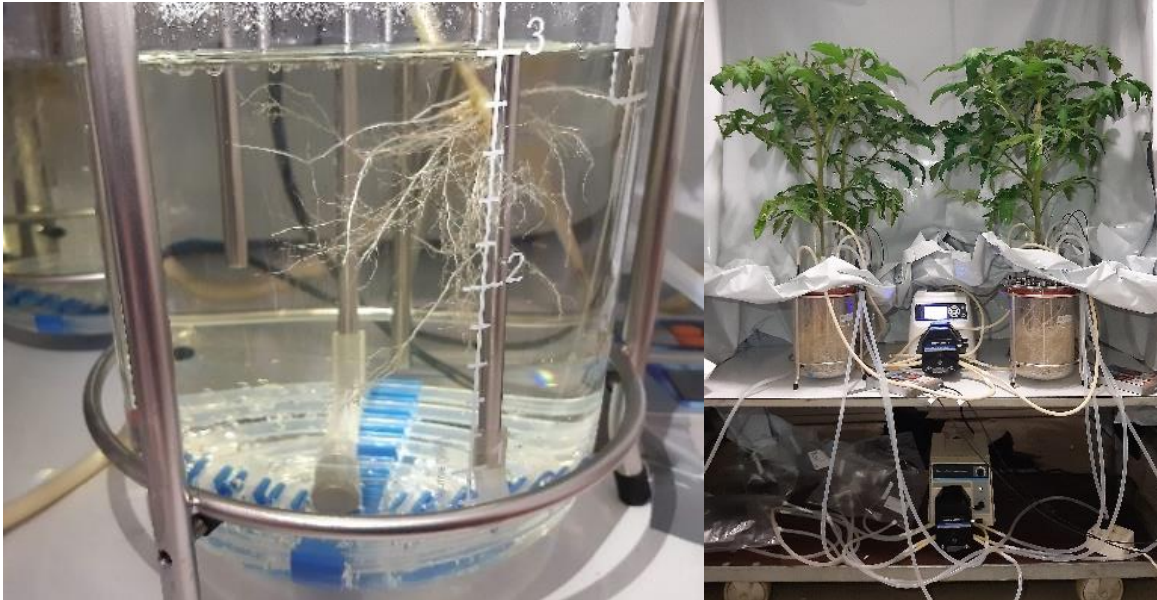
In elke test worden 2 voedingen vergeleken: een referentie voeding (Ref) en een alternatieve voeding (Alt). De Ref voeding komt overeen met een standaard voeding, optimaal in nutriëntenbehoefte van de plant. De Alt voeding wijkt iets af in NO_3 , Cl, SO_4 of K/Ca. In elke serie testen wordt een andere gedeeltelijke vervanging van een nutriënt bekeken.

De werkwijze is als volgt: Bij de start van een nieuwe test serie worden 2 vaten gevuld met Ref voeding en 2 vaten met Alt voeding, de planten worden in de vaten gezet, wortels hangen direct in de voeding, starten met verzadigde hoeveelheid zuurstof (lucht: 20,8% O_2 , water: max 9 mg/l O_2) in de vaten en in de luchtzak.

Na de lek test start Run1. De zuurstofconcentratie in de voeding wordt gevolgd gedurende 1 – 4 dagen. Om verstikking van de wortelomgeving uit te sluiten geldt dat wanneer de zuurstof concentratie in het water lager is dan 50% van de start concentratie (dus < 4,5 mg/l bij een startconcentratie van 9 mg/L), het systeem wordt geopend. Vervolgens wordt het waterverbruik genoteerd, de voeding eruit gehaald en het systeem weer verzadigd gebracht door buitenlucht door de vaten te laten stromen. Tot slot worden de vaten weer gevuld met nieuwe start voeding.

De vaten die de Ref voeding kregen in Run 1 krijgen nu in Run 2 de Alt voeding, terwijl de vaten met Alt voeding in Run 1 nu de Ref voeding krijgen. Na de lekttest wordt het systeem weer gesloten en de luchtzakken met zuurstofverzadigde lucht weer aangesloten. Run 2 start, en de zuurstof concentratie in elk vat wordt weer gevolgd. Op deze manier worden de Ref en Alt voeding een aantal keer wisselend tussen de vaten, tot maximaal Run 6, daarna zijn de planten te groot voor de opstelling. Elke plant krijgt dus afwisselend de Ref en Alt voeding aangeboden en het zuurstof verbruik in deze korte periodes wordt steeds berekend. Door een raaklijn te trekken van de daling in de zuurstof concentratie over de tijd kan het gemiddelde zuurstof verbruik per run per plant worden bepaald.

In 2019 en 2020 zijn verschillende series testen uitgevoerd met verschillende gewassen. Met paprika werd eerst het systeem getest op het meten van zuurstof. Met komkommer en tomaat zijn vervolgens de voedingstesten uitgevoerd. In de eerste serie testen werd een referentie voeding vergeleken met een voeding waarin een deel van NO_3 werd vervangen door Cl. In de tweede serie testen werd een deel van NO_3 door SO_4 vervangen. De door WUR-techniek gebouwde vaten zijn in 2021 vervangen door glazen luchtdicht afsluitbare vaten (inhoud 5L met 3 L voeding) (Applikon Biotechnology, Delft) en er is een spiraal onderin het vat toegevoegd ter verbetering van de waterbeweging in het vat in plaats van het roerstaafje (Figuur 2.2). In de eerste test werd het zuurstof verbruik van wortels gemeten tussen 2 K/Ca niveaus. In de tweede test werd vervanging van een deel NO_3 door Cl opnieuw uitgevoerd, als controle.



Figuur 2.2 Links, glazen vat met spiraal voor waterbeweging met klein wortelpruikje tijdens start van de test. Rechts, vooraanzicht van de opstelling. Vier gesloten systemen met ieder een vat met plant (totaal 4 vaten: links en rechts staan 2 vaten naast elkaar). Twee peristaltische pompen: de pomp naast de vaten pompt het water rond, de onderste pomp zorgt voor luchtcirculatie binnen elk systeem. De luchtzakken liggen naast de onderste pomp.

In de opstelling staat een plant in een gasdichte container waarin de wortels groeien in voedingsoplossing (afgeschermd met een licht ondoorlatende folie). Aan de cilinder verbonden zijn een luchtinlaat en een luchtuitlaat waarover met een pomp lucht gerecirculeerd wordt via een tweede cilinder of een luchtzak die dienen als luchtvoorraad. Verder zijn aan de cilinder met de plant een zuurstofmeter en een drukketer (manometer) verbonden. Ook kan er voeding worden aangevoerd vanuit een voedingsvoorraadzak.

2.2.2 Controlemetingen

Voor het starten van een meetrun en na het beëindigen van een meetrun werden een aantal waarden genoteerd in een overzichtstabel. Dit betrof:

- Eventueel: de druk voor en na het experiment. Dit heeft alleen zin als er geen flexibele zak wordt gebruikt als lucht of voedingsvoorraad.
- De start en stoptijd in minuten en de daaruit voortvloeiende run tijd.
- Het gebruikte lichtniveau in micromol PAR licht per seconde. Dit niveau werd zoveel mogelijk op 60 micromol/s gehouden voor de kop van de plant. Dit betekende dat de lichtbalken met een standaard rood/blauw spectrum steeds verder naar boven gehesen werden terwijl de plant groeide (Figuur 2.3).
- De lichtduur in minuten per dag.
- Het totale systeemvolume in mL van het gebruikte vat plus leidingen plus aangesloten zakken of cilinders.
- De pompsnelheid van de luchtpomp in mL/uur.

- De pompsnelheid van de luchtpomp in mg zuurstof per uur (voor directe vergelijking met de verbruikssnelheid).
- De geschatte wortelmasse aan begin en eind. Als voorbeeld wordt beschreven hoe de eerste meting van wortelmasse verliep: Op 22 Oktober is de wortelpruik van de paprikaplant, die sinds 12 September werd gebruikt, afgeknipt. Na uitlek was er 28.54 g aan wortelmasse, na volledig drogen aan de lucht 2.04 g en na drogen bij 105 °C was dat 1.78 g. Omdat bij wortels moeilijk is te bepalen wat het drooggewicht is, is ervoor gekozen te veronderstellen dat de wortel 10% droge stof bevatte. Het gekozen vers gewicht voor de wortelmasse werd zo 17.80 gram en omdat hierbij een klein stukje wortelhals zat is dat het uiteindelijke gewicht van de verse wortels afgerond naar 16.5 gram.
- De zoutwaarde (EC) van de gebruikte voedingsoplossing in dS/m (een cijfer achter de komma) aan begin en eind.
- De zuurwaarde (pH) van de gebruikte voedingsoplossing in pH-eenheden (een cijfer achter de komma) aan begin en eind.
- De waterstand van het vat in mm aan begin en eind.
- De waterstand van het vat in mL aan begin en eind.
- Gewicht van de voedingszak in gram aan begin en eind.
- Voedingsgebruik van het systeem in ml/d.
- Watergebruik van het systeem in ml/d.
- Start en Stoptijden van een eventuele lichtpuls in minuten.
- Controlemeting met de zuurstofsensoren voor en na voor 0-zuurstof en max-zuurstof (21%) (Figuur 2.3).
- Zuurstofverbruik tijdens de run in mg/u.



Figuur 2.3 Links, in deze configuratie staat een paprikaplant in een gasdichte container in een frame waaraan twee LED-lichtbalken met rood blauw licht hangen. De lichtopbrengst op verschillende hoogten is gemeten met een handmeter. Rechts, Sendot zuurstofmeter met optische electrode.

2.2.3 De verwerking van de waarnemingen

Voor het uitrekenen van het zuurstofverbruik is een spreadsheet gebruikt als getoond in Bijlage 1. In de spreadsheet worden eerst de basis data getoond voor zuurstofgehalten in lucht en water en de bijbehorende zuurstofwaarden in lucht en water. Vervolgens wordt berekend wat de hoeveelheden zuurstof in het lucht en waterdeel van het systeem zijn. Daarna volgt een theoretisch geschat verbruik van de geschatte hoeveelheid wortel wat gebruikt wordt om te berekenen hoe snel het systeem op 10%v/v zuurstof in de lucht uitkomt. Dat is nodig omdat de afspraak is dat niet onder de 10%v/v zuurstof in de lucht geteeld zal worden om de groeisnelheid niet onbedoeld te verlagen. Vervolgens wordt uitgerekend hoeveel zuurstof is verdwenen uit de lucht van het systeem en hoeveel uit de oplossing in het systeem. Samen levert dat de einduitkomst; het verbruik in het systeem.

2.2.4 De zuurstofmeting

Er is gebruik gemaakt van een optische zuurstofmeter (Figuur 2.3, FluoMini Pro O₂ | T sensor, Sendot research, Houten, the Netherlands). De nauwkeurigheid volgens de fabrikant is 0.2% O₂ bij >1% O₂ < 25% O₂ en 1°C voor temperatuur. Eigen kalibraties werden uitgevoerd door een nul meting met N₂ gas in demi water en een meting in het lab bij 20.8% O₂. De kalibratie procedure van de zuurstofsensoren staat in Bijlage 1

2.2.5 Berekening van de energiekosten voor suboptimale concentratieverhoudingen van mineralen

Er wordt een theoretische berekening gegeven waarmee het potentiële opbrengstverlies door het extra zuurstofverbruik door suboptimale concentraties in de wortelzone is ingeschat. Een numeriek voorbeeld van de berekeningsstappen is te zien in de Bijlage 2.

1. De BAB (Bemesting Advise Basis 1999) is gebruikt om de doelstellingen te definiëren. In dit voorbeeld zijn de tabellen voor tomaten in een gesloten systeem in steenwol gebruikt. De streefwaarde EC (ECt) is 3,7. De afvoermonsters, gemeten met de CE-line ionspecifieke meter, kwamen uit een 5 ha compartiment cherrytomaat (cv Robino, De Ruiter Seeds) van Royal Pride in Noord-Holland. Het drainagewater was: EC (4,3), in mmol/l NH₄ (0,0), K (15,9), Na (3,27), Ca (7,22), Mg (4,18), NO₃ (26,55), Cl (0,0), SO₄ (6,13), HCO₃ (0,4), PO₄ (3,87). De micro-elementen worden verondersteld zeer beperkt bij te dragen aan deze berekening en zijn daarom niet meegenomen. Elk element wordt vermenigvuldigd met een EC-factor (ECt/EC), zodat de omgezette concentraties kunnen worden vergeleken met de streefwaarden.

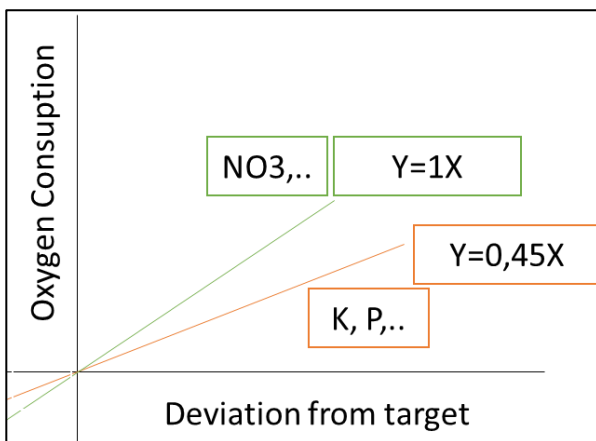
$$\text{Voor K: } 15,9 \cdot (3,7/4,3) = 13,8 \text{ mmolK/l}$$

2. De afwijking tussen de omgerekende concentratie en de streefwaarde wordt berekend als het verschil: doel – analyse. Het doel komt uit de BAB. Respectievelijk NH₄ (0,1), K (8), Na (1)*, Ca (10), Mg (4,5), NO₃ (23), Cl (1)*, SO₄ (6,8), HCO₃ (0,5), PO₄ (1).

$$\text{Voor K: } 8 - 13,8 = -5,8 \text{ mmolK/l}$$

3. De absolute waarde van de afwijking wordt gebruikt (er wordt dus aangenomen dat een positieve of negatieve afwijking van de doelstelling hetzelfde effect heeft). De absolute waarde van de afwijking wordt vermenigvuldigd met een zuurstofverbruiksfactor. De factor zuurstofverbruik geeft de hoeveelheid O₂ aan die planten verbruiken om zich aan te passen aan suboptimale omstandigheden (zie hierboven). De zuurstofverbruiksfactor is verondersteld 0,45 mmolO₂/mmol(x) voor alle kationen en P, Cl, HCO₃. Voor NO₃ en SO₄ wordt uitgegaan van 1,0 mmolO₂/mmol(x). Deze gegevens werden opgehaald uit (Bouma en De Visser, 1993; Cannell en Thornley, 2000). Er wordt uitgegaan van een lineaire correlatie tussen de afwijking en het zuurstofverbruik (Figuur 2.4).

$$\text{Voor K: } |-5,8| \cdot 0,45 = 2,6 \text{ mmolO}_2/\text{l}$$



Figuur 2.4 Correlatie tussen de afwijking van nutriënten in drainagewater van streefwaarden

-
4. Het zuurstofverbruik wordt omgerekend van een relatieve hoeveelheid naar een absolute hoeveelheid, vermenigvuldigd voor de wateropname. De gemeten wateropname voor dit voorbeeld was 1,4 l/m²/dag.

$$\text{Voor K: } 2,6 * 1,4 = 3,6 \text{ mmolO}_2/\text{m}^2$$

5. Het absolute zuurstofverbruik wordt omgezet in koolstof (C) verlies, uitgaande van de simpele correlatie 1:1 (de O₂/CO₂-stoichiometrie).

$$\text{Voor K: } 3,6 * 1/1 = 3,6 \text{ mmolC/m}^2$$

6. Het koolstofverlies wordt met verschillende stappen omgezet in opbrengstverlies.

6.1 Het koolstofverlies wordt omgezet van mol in grammen met het molecuulgewicht C (12 g/mol).

$$\text{Voor K: } 3,6 * 10^{-3} * 12 = 0,0432 \text{ g/m}^2$$

6.2 Het koolstofverlies wordt omgezet in biomassaverlies, uitgaande van een C-gehalte in de droge biomassa van 35% voor tuinbouwgewassen.

$$\text{Voor K: } 0,0432/35\% = 0,1234 \text{ g/m}^2$$

6.3 Het biomassaverlies wordt omgezet in opbrengstverlies door vermenigvuldiging met de droge oogstindex die werd verondersteld 60% te zijn voor dit cherrytomatengewas.

$$\text{Voor K: } 0,1234 * 60\% = 0,0740 \text{ g/m}^2$$

6.4 Het droge-opbrengstverlies wordt omgezet in vers opbrengstverlies door deling met het drogestofgehalte dat werd verondersteld 10% te zijn voor dit cherrytomatengewas.

$$\text{Voor K: } 0,0740/10\% = 0,74 \text{ g/m}^2$$

7. Deze berekening toont alleen getallen voor K. Als de berekening voor alle macro-elementen wordt uitgevoerd, bedraagt het totale verse opbrengstverlies 2,55 g/m². Uitgaande van een dagelijkse verse opbrengstwinst gelijk aan 170 g/m²/dag (gebaseerd op 40 kg/m² voor 240 productiedagen), is het potentiële dagelijkse opbrengstverlies voor deze dag:

$$2,55/170 = 1,5 \%$$

2.3 WP3. Semipraktijk test en software implementatie

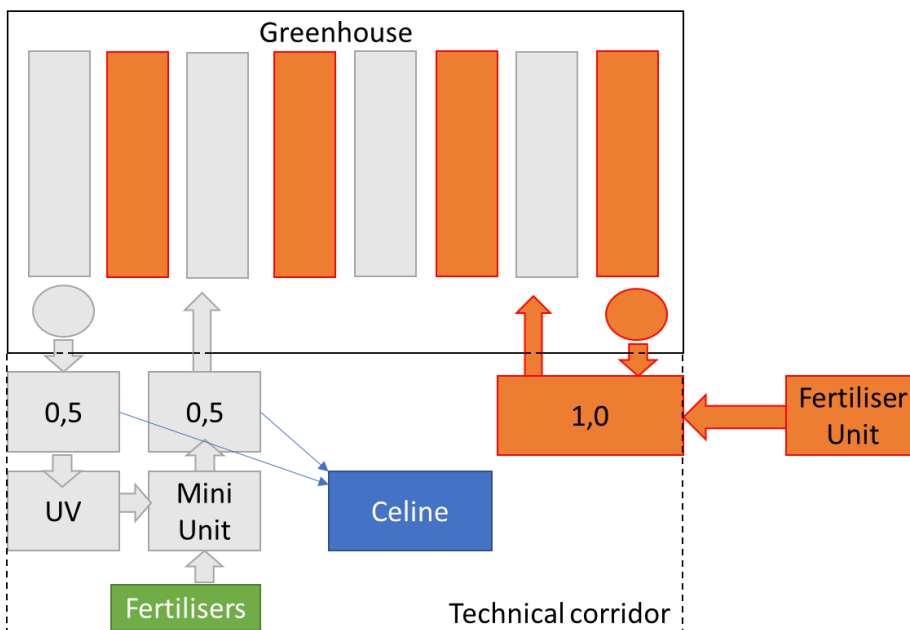
2.3.1 Teeltomstandigheden en behandelingen in Bleiswijk

De eerste ion-specifieke teelt is uitgevoerd in een kascompartiment van 120 m² bij Wageningen University & Research in Bleiswijk (Kas 8.07). Er werd gebruik gemaakt van tomaat cv Merlice. Drie planten met twee stengels werden geplant op steenwolmatten van 1 m. Er werd een plantdichtheid van 2,5 stengels/m² gebruikt. De klimaatomstandigheden werden aangehouden zoals standaard voor deze teelt. Het gewas werd beheerd volgens een standaardprotocol: twee keer per week vruchten oogsten, wekelijks bladeren plukken, stengels draaien en buigen en scheuten en bloemen snoeien. Het compartiment voorzag in twee afzonderlijke irrigatiesystemen, A en B. Het drainwater werd opgevangen in twee afzonderlijke putten. Systeem A werd gebruikt als referentiebehandeling, systeem B bediende de ion-specifieke teelt. In systeem A werd het drainwater rechtstreeks in een dagelijkse voorraadtank van 1 m³ gepompt. In deze tank werd verse voedingsoplossing geleverd door een gecentraliseerde bemestingseenheid wanneer het niveau in de tank lager was dan 0,3 m³. In systeem B werd het drainwater overgebracht naar een drainbuffertank van 0,5 m³. Vanuit de drainbuffer ging het drainwater door een UV-desinfectie-eenheid voordat het werd hergebruikt door een mini-bemestingsinjectie-eenheid (prototype van Priva) met een mengtankvolume van 100 L (Figuur 2.5). De mini-eenheid werd eerst gevuld met drainwater, vervolgens werd vers water toegevoegd om een streefwaarde voor de EC te bereiken, en uiteindelijk werden de meststoffen geïnjecteerd. Als voorraad meststoffen werd het voedingspakket van Van Iperen gebruikt. De gerealiseerde voedingsoplossing werd naar een dagelijkse voedingswateropslagtank van 0,5 m³ geleid (figuur 2.1). De ion-specifieke apparatuur CE-line werd nabij deze tanks geïnstalleerd.

In deze configuratie werden twee proeven uitgevoerd (1) van februari 2020 tot november 2020 en (2) van februari 2021 tot juni 2021. In de eerste proef (2020) werd CE-line (V.1) losgekoppeld van het watersysteem. Om de meter te bedienen werd een watermonster verzameld, verdund en handmatig in de CE-line geplaatst. In de tweede proef (2021) werd CE-line (V.2) uitgerust met pompen, filters en een verdunningskamer, zodat de meter het monster automatisch kon verzamelen, verdunnen en meten. CE-line verzamelde de monsters uit de giftank en de drainbuffertank van systeem B (Figuur 2.6). In beide proeven is voor de ion-specifieke teelt een iets ander recept gebruikt dan de referentie door 0.5 mmol/L NO₃ te vervangen door Cl (bij de referentie-EC van 1.6). De gebruikte voedingsoplossingen staan vermeld in Tabel 2.1. De voedingsoplossingen werden aangepast op basis van de gewasfase en de drainanalyse. Voor de referentiebehandeling gebeurde dit om de 14 dagen. Voor de ion-specifieke teeltbehandeling werd ernaar gestreefd dit dagelijks of om de twee dagen te doen. De aanpassingen aan de voedingsoplossing werden uitgevoerd volgens de aanbeveling van de Bemesting Adviesbasis (BAB) (zie 1.5.3).



Figuur 2.5 Het prototype van de mini-injectie-unit van Priva gebruikt in de semi-praktijkproef in Bleiswijk.



Figuur 2.6 Configuratie van het watersysteem in de kas in Bleiswijk (paden 2020 en 2021). De cirkels in de kas stellen de drainput (10 L) voor. In oranje systeem A (Referentie), in grijs systeem B (ion-Specifieke teelt). De getallen in de figuren drukken de volumes uit in m³.

Tabel 2.1 Voedingsoplossingen voor de referentiebehandeling en de Ion-Specifieke behandeling.

	EG	NH4	K	Ca	Mg	NO3	Cl	SO4	PO4	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
Referentie	2.6	1.6	10.6	4.5	1.6	17.5	0.0	2.4	2.0	15.0	10.0	5.0	20.0	1.0	0.5
ion-specifiek	2.6	1.6	10.6	4.5	1.6	16.7	0.8	2.4	2.0	15.0	10.0	5.0	20.0	1.0	0.5

2.3.2 Software

De Bemesting Advies Basis (BAB) ontving de gegevens van CE-line en werkte een voedingsadvies uit. Het nieuwe advies is geëvalueerd door een onderzoeker van WUR en daarna gebruikt om een nieuw recept te maken in systeem B (zie Figuur 2.6).

2.3.3 Metingen en geëvalueerde parameters

In de eerste proef in Bleiswijk bleek de mini-unit veel last te hebben van verstoppingen in het doseersysteem en het afregelen van de pH. Het kostte veel tijd deze storingen op te sporen en te verhelpen. Voor de eerste proef in Bleiswijk (2020) was het door de technische storingen van de mini-injectie-eenheid onmogelijk om het compartiment met twee wezenlijk verschillende behandelingen te laten werken. Daarom werden alleen monsters van de drain- en giftoplossing van behandeling A verzameld en vergeleken met de analyse van CE-line.

In de tweede proef (2021) werden voor elke behandeling (systeem A en B, zie Figuur 2.6) de volgende parameters geregistreerd. Het versgewicht van de opbrengst en het aantal vruchten werd geregistreerd op vier willekeurig gekozen plekken in de kas, die de proefeenheden vertegenwoordigden (zie bijlage 3 voor de proefopzet). Elke locatie omvatte 6 planten (12 stammen, rechts en links van de goot). Het aangevoerde (S) en afgevoerde (D) water voor elke behandeling werd in de kas gemeten op twee plaatsen per behandeling (1 plaat). De drainagesnelheid werd berekend als D/S. Watermonsters van gift en drainwater werden wekelijks verzameld en naar een laboratorium gestuurd om de nutriëntenconcentratie te bepalen. CE-line heeft dagelijks het drain- en gift water gemeten, behalve bij technische storingen.

Op basis van de analyse van het laboratorium voor A, en op basis van de metingen van CE-line voor B, werd de voedingsoplossing uiteindelijk aangepast volgens het advies van de Bemesting Adviesbasis (BAB) (zie 1.5.3). Aan het eind van proef 2 (2021) is de biomassa van drie planten per proefeenheid verzameld, gescheiden in stengels en bladeren en gemeten. Een monster van het verse materiaal (FW) werd gewogen en gedroogd in een oven bij 80 °C. Na droging werd het drooggewicht (DW) bepaald. Het droge stofgehalte (DM) werd bepaald als DW/FW. De droge biomassa werd naar een laboratorium gestuurd om het gehalte aan mineralen te bepalen.

2.4 WP4. Demonstratieproef in de praktijk

2.4.1 Cultivation at Royal Pride, Middenmeer

De eerste demonstratieproef van de ion-specifieke teelt in de praktijk is uitgevoerd bij Royal Pride (RP) in Middenmeer van juni 2021 tot november 2021. CE-line (V.2) bevond zich in de watertechnische ruimte van RP en was aangesloten op het watersysteem zodat er een monster van gift- en drainwater kon worden genomen. Het watermonster van de gift kwam uit de mengbak van het tomatencompartiment. De mengbak gebruikte een A- en een B-meststofvoorraad. De unit werd eerst bijgevuld met drainwater uit de drainsilo. Vervolgens met vers water tot een bepaalde EC. Als laatste bewerking gebruikte de unit oplossing van A en B om de uiteindelijke EC te bereiken. CE-line verzamelde het drainwatermonster uit de in deze ruimte aanwezige drainageput. Deze put verzamelde drainwater uit twee compartimenten van ongeveer 5 ha. In het ene compartiment stond op dat moment de tomatenteelt van de studie, cv Robinio (opgepot in januari 2021), maar in het andere stond komkommer (geen informatie geregistreerd). Daarom was het drainwater in de put, evenals het drainwater van de silo dat gebruikt werd om de nieuwe voedingsoplossing te maken, een mix van drainwater van twee verschillende gewassen. Vanaf september 2021 werd het voedingswatermonster voor CE-line vervangen door een drainmonster van alleen het tomatencompartiment.

Omdat een directe verbinding met CE-line vanwege de afstand niet mogelijk was, werd het monster handmatig door de teler verzameld en in de verdunningskamer van CE-line geplaatst. Zowel de klimaatbeheersing als het gewasonderhoud werd door de teler beheerd, en volgde daarom een standaardprotocol voor de tomatenteelt. De beide drainmetingen van CE-line werden uitgewerkt door WUR die met behulp van de BAB een nieuwe voedingsoplossing genereerde. Het nieuwe recept werd handmatig naar Van Iperen gestuurd die het omzette in een nieuw bemestingsrecept, en dit doorgaf aan de teler.

2.4.2 Demonstratieproef bij Kwekerij Lijntje, Moerkapelle

De laatste demonstratieproef was bij Kwekerij Lijntje (KL) in Moerkapelle van maart tot september 2022. KL teelde een 2.5 ha losse tomaat cv. Gerdica, verplant in januari 2022. CE-line (V.2) bevond zich bij KL in de watertechnische ruimte. CE-line verzamelde het voedingswatermonster uit de dagvoorraadsilo, en het drainwater uit de drainput. KL maakt gebruik van een injectie-unit (Priva). Het drainwater werd opgevangen in een dagvoorraad drainwater, ontsmet en hergebruikt door de unit. De unit werd eerst gevuld met drainwater, vervolgens werd vers water gebruikt om een doel-EC te bereiken en als laatste werden de enkelvoudige meststoffen geïnjecteerd om een doel-EC te bereiken. Zowel de klimaatregeling als het gewasonderhoud werd beheerd door de teler, en volgde een standaardprotocol voor de tomatenteelt. De draingegevens van CE-line werden uitgewerkt door WUR die met behulp van de BAB een nieuwe voedingsoplossing genereerde. Het nieuwe recept werd via een API (Application Programming Interface) gecommuniceerd met de Van Iperen bemestingscalculator (website applicatie), die het omzette in een nieuw bemestingsrecept en terug communiceerde naar WUR. Als laatste stap communiceerde WUR het meststoffenrecept naar de teler die het nieuwe recept in de Priva-computer voor de injectie-eenheid kon invoeren.

2.4.3 Software implementaties

De Bemesting Advies Basis (BAB) was de datasoftware die op CE-line was aangesloten. De BAB ontving de gegevens van CE-line en werkt een voedingsadvies opnieuw uit. De BAB werd aangepast aan de situatie van de teler. In het geval van Royal Pride, waar een mixdrain werd gebruikt om het nieuwe recept te maken, werd de software aangepast om te kunnen werken met zowel compartimentsdrain als een drain verzamelput. Bij Kwekerij Lijntje was de BAB via API gekoppeld aan de calculator van Van Iperen om met het specifieke bemestingspakket dat deze teler had een voedingsrecept te kunnen maken. Daarnaast werd de BAB aangepast zodat een specifiek telerrecept gebruikt kon worden. Als laatste werd het BAB-programma aangepast zodat een orde van grootte van de door de software voorgestelde aanpassing kon worden afgestemd op de wens van de teler en de Van Iperen-adviseur.

2.4.4 Metingen en geëvalueerde parameters

Bij Royal Pride (RP) en Kwekerij Lijntje (KL) werden naast de metingen van CE-line ook wekelijks handmatig monsters van drain- en voedingswater genomen en naar een laboratorium gestuurd om de nutriëntenconcentratie te bepalen. Voor RP werd het drainmonster alleen genomen uit het compartiment met tomaat. Tijdens de proef bij KL werd aanvullend op één dag om het uur (van 9.00 tot 16.00 uur) een monster van het drainwater uit de put genomen om de afwijking van de concentraties in de drainput te bestuderen. Op dezelfde dag werd om 12.00 uur ook een monster van de oplossing van een mat in de kas genomen.

2.5 Berekende parameters

Nauwkeurigheid van het laboratorium

Tijdens de eerste proef in Bleiswijk (2020) werden watermonsters gedurende enkele weken naar twee laboratoria gestuurd om de nauwkeurigheid van de labmeting, uitgedrukt als afwijking tussen twee laboratoriumanalyses (a), te evalueren. Deze werd berekend als:

$$\text{Als } L1 > L2; a = (L1 - L2) / L1$$

$$\text{Als } L1 < L2; a = (L2 - L1) / L2$$

Waarbij L1 en L2 de analyses van respectievelijk laboratorium 1 en 2 zijn.

CE-line nauwkeurigheid

Bij alle verschillende proeven kon de nauwkeurigheid van CE-line worden berekend, uitgedrukt als afwijking van de laboratoriumanalyse (d). Deze werd berekend als:

$$C = \text{Gemiddelde}(\text{Dag1}:\text{Dag7})$$

$$\text{Als } C > L, d = (C - L)/C$$

$$\text{Als } C < L, d = (L - C)/L$$

Waarbij d de afwijking was tussen de metingen van CE-line (C) en de laboratoriummeting (L). Aangezien de laboratoriummeting met enige vertraging binnenkwam (onregelmatig), werd besloten voor CE-line het gemiddelde van de week te nemen om een tijdseffect te voorkomen. De gegevens van CE-line konden ook van dag tot dag fluctueren vanwege technische storingen. Door het gemiddelde over 7 dagen te nemen, kon rekening worden gehouden met de weekinformatie en een eerlijke vergelijking met het laboratorium.

3 Resultaten

3.1 WP1 - Betrouwbaarheid van de meters

Uit de tests met ranges in concentratie, temperatuur, pH en EC blijkt dat de metingen grotendeels betrouwbaar zijn (Hoogland & Barnier, 2019). Aan de randen van de bereiken treden echter soms afwijkingen op. Om de nauwkeurigheid te verhogen, is besloten te werken met een temperatuurkamer om de temperatuur stabiel te houden en zal voor pH en EC wiskundig worden gecompenseerd. Meer informatie is te vinden in het rapport van CEW (Centre of Expertise Water Technology) (Hoogland & Barnier, 2019).

3.2 WP2 - Labproeven zuurstofverbruik van wortels

3.2.1 Zuurstofverbruik

De runs met de zuurstofmonitor toonden stabiele afnemende zuurstoflijnen. Dit komt overeen met de theoretische verwachtingen. De stabiliteit van de lijnen lijkt voldoende om te komen tot nauwkeurige schattingen van de effecten van de voedingsoplossing op het zuurstofgebruik.

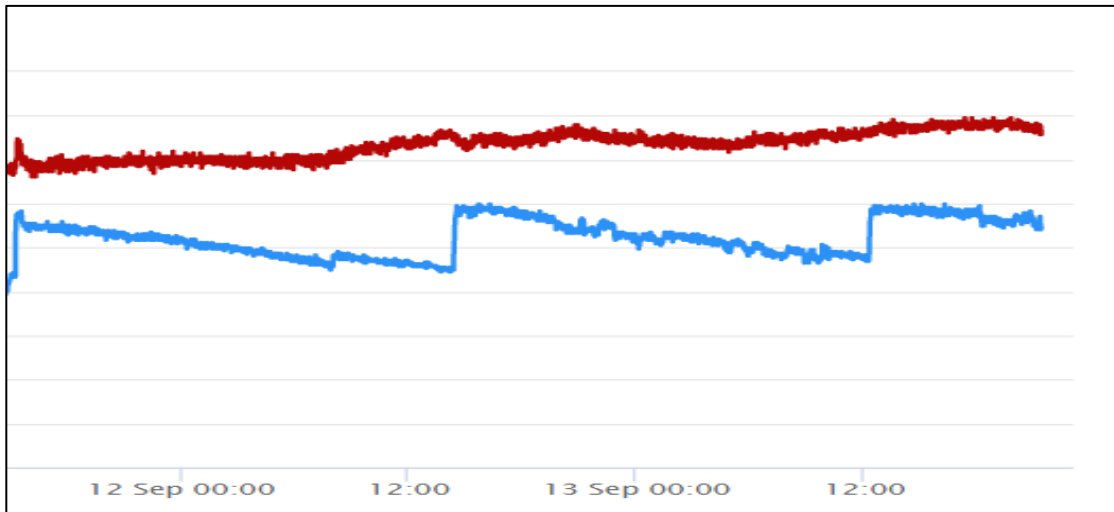
De te bereiken nauwkeurigheid wordt ingeschat op grond van de theorie dat wortels 10-15% van de door de plant aangemaakte assimilaten gebruiken. Van die 12% wordt 70-75% gebruikt voor het opnemen van elementen tegen de concentratie in, dus zo'n 9% van alle assimilaten. De verwachting is nu dat de behoefte aan assimilaten bij een voedingsverandering maximaal 30% hoger of lager kan uitvallen. Dat is 3% van het totale assimilaten aanbod. Het betekent dat de helling van de grafieken zoals gemeten in Figuur 3.1 maximaal 30% steiler of minder steil worden. Bij een verloop zoals in Figuur 3.1 lijkt een verschil van ongeveer 5% al meetbaar.

De helling van de zuurstofafname in Figuur 3.1 kan nauwkeuriger bestudeerd worden als grafieken gemaakt worden van de afwijkingen gecorrigeerd voor de gemiddelde helling of als grafieken gemaakt worden van de afgeleide van de helling. In het eerste geval wordt gewerkt volgens:

$$Y_n = X - aY \text{ waarbij } a \text{ de helling van de originele grafiek is } v$$

In het tweede geval:

$Y = dX/dY$ waarbij d staat voor het gemiddelde van een aantal (bijvoorbeeld 5) waarden voor en na het beschouwde punt (Y_n is de nieuwe Y waarde).



Figuur 3.1 Typisch verloop van het zuurstofverbruik (blauwe lijn) door de tijd. Daar waar de blauwe lijn omhoog springt, is de cilinder met de wortels geopend en is weer zuurstof tot het systeem toegetreden. De rode lijn geeft de temperatuur als gemeten door de sensor in de optische sensor van de zuurstofmeter.

Tabel 3.1 Eerste uitkomsten van metingen van zuurstofverbruik aan een paprikaplant met ongeveer 10 gram verse wortelmasa.

Datum	Zuurstofverbruik Mg/h	Bijzonderheid
11 Sept	2.0	1.0 L lucht 2.0 L water
12 Sept	2.7	1.0 L lucht 2.0 L water
13-14 Sept	2.8	4.0 L lucht 2.0 L water
18-22 Sept	3.3	4.0 L lucht 2.0 L water
25-30 Sept	4.4	4.0 L lucht 2.0 L water

Zoals was te verwachten neemt het zuurstofverbruik toe in de tijd (Tabel 3.1), visueel ongeveer evenredig aan de groei van de plant. Omdat het wortelgewicht nog niet bekend was, kon nog niet met zekerheid worden gemeten hoe hoog het verbruik per gram wortel was. Volgens de literatuur zou 0.2 mg/h/g FW wortel een plausibele uitkomst zijn. Dat zou voor de hier gebruikte plant overeenkomen met een gewicht aan verse wortels van 8 tot 20 gram wortels. Dat wortelgewicht lijkt redelijk te passen bij de visueel aanwezige wortelmasa (Figuur 3.2). Op 22 Oktober is de wortelpruik van de paprikaplant, die sinds 12 September werd gebruikt, afgeknipt. Na uitlek was er 28.54 g aan wortelmasa, na volledig drogen aan de lucht 2.04 g en na drogen bij 105 °C was dat 1.78 g. Omdat bij wortels moeilijk is te bepalen wat het drooggewicht is, is ervoor gekozen te veronderstellen dat de wortel 10% droge stof bevatte. Het gekozen vers gewicht voor de wortelmasa werd zo 17.8 gram en omdat hierbij een klein stukje wortelhals zat is dat het uiteindelijke gewicht van de verse wortels afgerond naar 16.5 gram.



Figuur 3.2 De wortelmassa van de paprikaplant vlak voor 22 Oktober.

3.2.2 Vertraging door zuurstofoverdracht van lucht naar water

Figuur 3.3 en 3.4 tonen een gelijktijdige meting van het zuurstofgehalte in de lucht boven de oplossing en van het zuurstofgehalte in de oplossing voor drie tijdstippen. Op tijdstip 1 en 2 is een luchtdoorvoersnelheid gebruikt van 25 mL/h over de oplossing. Op tijdstip 3 is de lucht met een borrelsteentje door de oplossing geleid, eveneens met luchtsnelheid 25 mL/h. In Figuur 3.3 is te zien dat het zuurstofgehalte in de lucht sneller daalt bij borrelen en dus het zuurstofverbruik uit de lucht hoger is dan zonder borrelen. Uit Figuur 3.4 volgt dat het zuurstofverbruik uit de vloeistof juist afneemt (zie ook Tabel 3.2). Dit betekent dat door borrelen (bewegen) van de vloeistof het transport van zuurstof uit de lucht naar de wortel sneller verloopt dus met een kleinere gradiënt in het water.

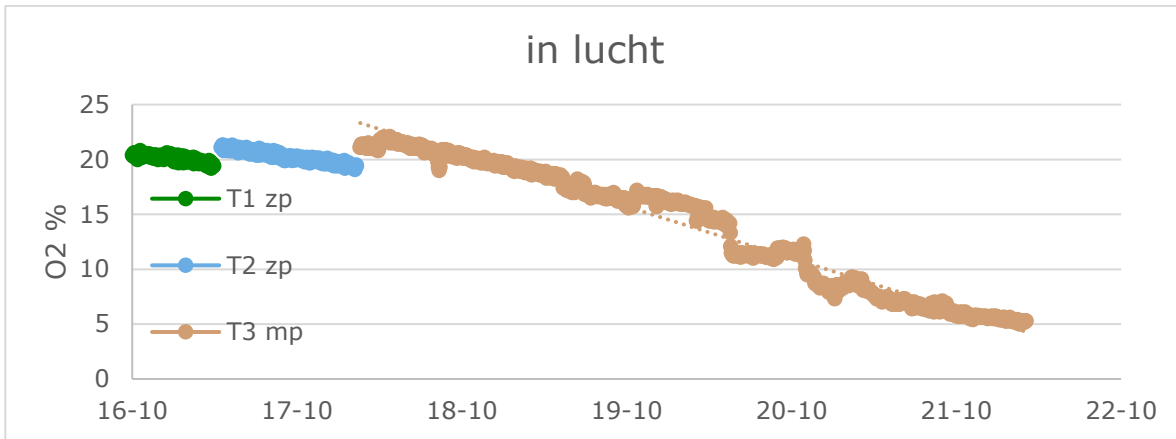
Meten van de zuurstof aanvoersnelheid. De lucht aanvoersnelheid van de pomp is afgelezen uit de tabel van de leverancier en is ook gemeten.

- De tabel van de leverancier gaf aan dat de luchtaanvoer voor een MasterFlex tube L/S25 (binnendiameter 19 mm) 1.7 ml/s bedraagt bij een pompsnelheid van 1 rpm (rotatie per minuut). De ingestelde rpm was 1 omwenteling per 4 seconden. Daaruit volgt een aanvoer van $\frac{1}{4} * 60 * 1.7 = 25.5$ ml/min.
- De meting bestond uit het opvangen van de uitstromende lucht in een omgekeerd bekglas onder water. Er werd 100 mL opgevangen in 225 seconden. Daaruit volgde een stroomsnelheid van $100 * \frac{60}{225} = 26.7$ mL/min.

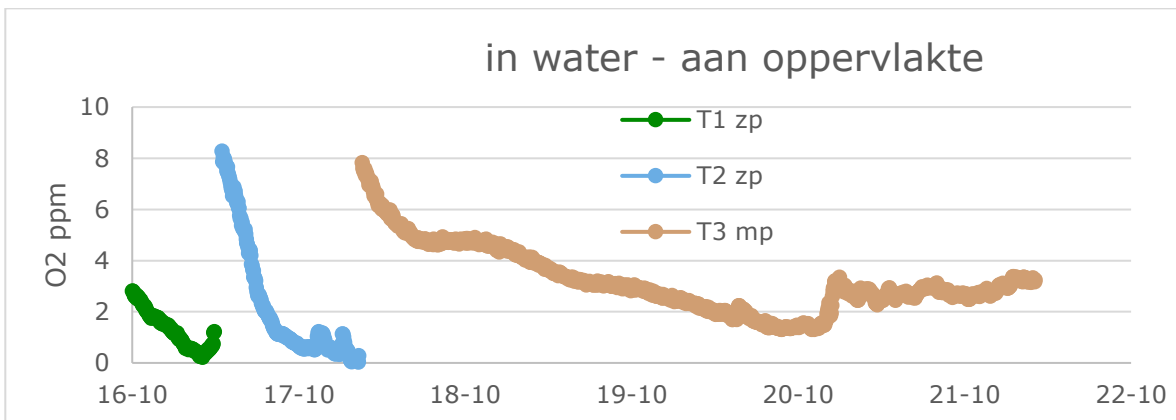
Deze hoeveelheid lucht komt overeen met een zuurstof aanvoer van 450 mg/h. Dit volgt uit (afgerond) $25 \text{ mL/min} * 60 \text{ min/h} * 21\%v/v * 1.43 \text{ mg/mL}$ (0.30 kg/m^3 zuurstof in lucht van 25 graden en 21%v/v zuurstof met dichtheid van pure zuurstof op 1.43 kg/m^3).

Tabel 3.2 Zuurstofverbruik uit lucht, uit water en totaal voor een wortelsysteem van paprika op T1 (16-10), T2 (17-10), en T3 (18-10/21-10). Op T1 en T2 is een luchtdoorvoersnelheid gebruikt van 25 mL/h over de oplossing. Op T3 is de lucht met een borrelsteentje door de oplossing geleid met luchtsnelheid 25 mL/h.

Waar	Eenheid	T1	T2	T3
Verbruik gemeten in lucht	mg/h	3.8	4.0	6.2
Verbruik gemeten in vloeistof	mg/h	0.29	1.12	0.09
Totaal systeem verbruik	mg/h	4.10	5.07	6.29



Figuur 3.3 Zuurstofverloop in de lucht van de wortelcilinder op 3 momenten in de tijd.



Figuur 3.4 Zuurstofverloop in de voedingsoplossing van de wortelcilinder op 3 momenten in de tijd.

Wat verontrustend is aan deze tweede meetreeks is:

1. Het totale verbruik in Tabel 2 is op T1 en T2 lager dan in de eerdere runs van voor 16 Oktober. Logisch zou zijn dat de grotere plant met een hogere belichting ook meer zuurstof zou verbruiken.
2. Logisch zou zijn dat de totale zuurstofconsumptie niet zo snel zou toenemen in de tijd omdat de groei over drie dagen niet kan leiden tot een 50% hoger zuurstofverbruik.
3. Daarbij neemt de totale verbruikssnelheid van de plant toe door inblazen van de zuurstof. Dit betekent dat de plant harder gaat groeien als meer zuurstof ingeblazen wordt. Klaarblijkelijk is er een verdelingsprobleem waardoor de plant zonder symptomen van groei problemen toch aanzienlijk langzamer groeit dan verondersteld.

3.2.3 Effect van de voedingsoplossing op het energieverbruik

Het aanpassen van de voedingsoplossing is erop gericht om het effect van een afwijkende voedingsoplossing op het energieverbruik van de wortels te meten. Daarbij mag geen voedingsoplossing gemaakt worden waardoor gebrek gaat ontstaan. Het effect moet vooral toe te schrijven zijn aan een verschil in het gemak van opnemen van noodzakelijke ionen. In eerste instantie is daarbij gekozen voor het deels vervangen van NO₃ door Cl ionen. Niet alleen is dit gemakkelijk te realiseren maar het opnemen van nitraat staat ook te boek als een van de grootste energiekosten van de plant (Albornoz and Lieth 2017; Albornoz and Lieth 2016, 2015). Vervolgens zijn testen uitgevoerd met gedeeltelijke vervanging van NO₃ door SO₄, en K door Ca ionen, en nogmaals NO₃ door Cl ionen (Tabel 3.3 in kleur aangegeven welke ionen verschillen tussen Ref en Alt voeding).

In zowel de testseries met komkommer als tomaat werd een hoger zuurstofverbruik in de vaten gemeten wanneer een hogere NO₃ concentratie aanwezig was (Ref voeding) vergeleken met wanneer een deel van het NO₃ door Cl was vervangen (Alt voeding) voor zowel komkommer (+17% hoger O₂ verbruik) als tomaat (+9% hoger O₂ verbruik) in 2019 en 2020 (Tabel 3.4). Deze test met NO₃/Cl werd herhaald in de nieuwe glazen vaten in 2021 waar ook een hoger zuurstof verbruik met de Ref voeding werd gemeten met tomaat (+7% hoger O₂ verbruik) (Tabel 3.4).

Zowel de NO₃/SO₄ als de K/Ca runs zijn uitgevoerd met tomatenplanten. De NO₃/SO₄ runs, waarin de NO₃ in de Alt voedingsoplossing voor een deel was vervangen door SO₄, lieten een hoger O₂ verbruik zien door de wortels vergeleken met de Ref voedingsoplossing, weergegeven als -22% lager O₂ verbruik in de Ref voedingsoplossing (Tabel 3.4), het tegenovergestelde effect vergeleken met de NO₃/Cl runs.

In de K/Ca runs, waarin de K in de Alt voedingsoplossing voor een deel was vervangen door Ca, resulterend in een lagere K/Ca verhouding (Ref: Start K/Ca = 0.9, Alt: Start K/Ca = 0.5) (Tabel 3.3), liet een hoger O₂ verbruik zien door de wortels vergeleken met de Ref voedingsoplossing, weergegeven als -11% lager O₂ verbruik in de Ref voedingsoplossing (Tabel 3.4)

Tabel 3.3 Reference (Ref) en Alternatieve (Alt) voedingsoplossingen.

jaar	Start oplossing	mS cm ⁻¹ EC	mmol L ⁻¹ NO ₃ ⁻	mmol L ⁻¹ Cl ⁻	mmol L ⁻¹ SO ₄ ²⁻	mmol L ⁻¹ K ⁺	mmol L ⁻¹ Ca ²⁺
2019/2020	Ref NO ₃ /Cl	2.6	16.9	<0.1	3	6.5	5.9
	Alt NO ₃ /Cl	2.6	7.3	10.4	2.4	6.2	6.2
2020	Ref NO ₃ /SO ₄	2.7	16.2	0.1	4.4	7.6	6.7
	Alt NO ₃ /SO ₄	2.7	8.5	0.1	9.9	8.4	6.9
2021	Ref K/Ca	3.2	18.8	0.2	5.0	7.1	8.1
	Alt K/Ca	3.2	18.9	0.2	5.8	5.0	10.3
2021	Ref NO ₃ /Cl	2.7	17.9	0.3	3.3	7.3	6.0
	Alt NO ₃ /Cl	2.7	8.8	8.7	3.0	7.45	5.9

Tabel 3.4 Verschil in O₂ verbruik van plantenwortels.

jaar/gewas	test	run	Ref vergeleken met Alt	gemiddelde
2019	NO ₃ / CL	R1 - R2	16%	
komkommer	NO ₃ / CL	R1 - R2	18%	17%
2020	NO ₃ / CL	R1 - R2	18%	
tomaat	NO ₃ / CL	R2 - R3	10%	
	NO ₃ / CL	R3 - R4	5%	
	NO ₃ / CL	R4 - R5	-4%	
	NO ₃ / CL	R5 - R6	16%	9%
2020	NO ₃ / SO ₄	R1 - R2	-33%	
tomaat	NO ₃ / SO ₄	R2 - R3	-20%	
	NO ₃ / SO ₄	R3 - R4	-12%	-22%
	NO ₃ / SO ₄	R3 - R4	-12%	-22%
2021	K / Ca	R1 - R2	-3%	
tomaat	K / Ca	R2 - R3	-16%	
	K / Ca	R3 - R4	-20%	
	K / Ca	R4 - R5	-7%	-11%
	K / Ca	R4 - R5	-7%	-11%
2021	NO ₃ / CL	R1 - R2	8%	
tomaat	NO ₃ / CL	R2 - R3	8%	
	NO ₃ / CL	R3 - R4	1%	
	NO ₃ / CL	R4 - R5	2%	
	NO ₃ / CL	R4 - R5	2%	
	NO ₃ / CL	R5 - R6	15%	7%

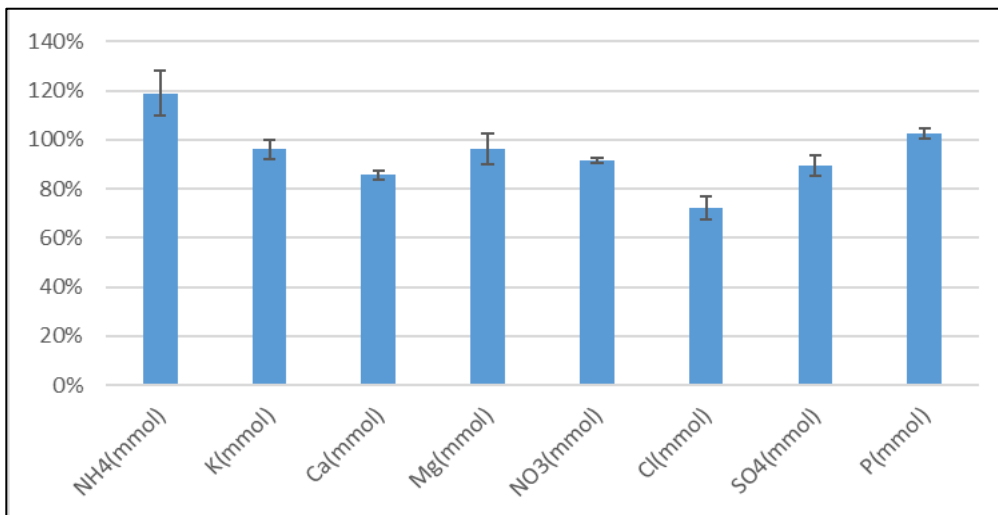
3.2.4 Berekening van de energiekosten voor suboptimale concentratieverhoudingen van mineralen

Volgens de berekeningsmethode zoals beschreven in 2.2.5 en in Bijlage 2, en met behulp van dataset drainsamenstelling van verschillende jaren van verschillende telers, werd een gemiddelde potentiële opbrengstwinst van 3-4% gevonden.

3.3 WP3 Semipraktijk test

3.3.1 Mini doseerunit

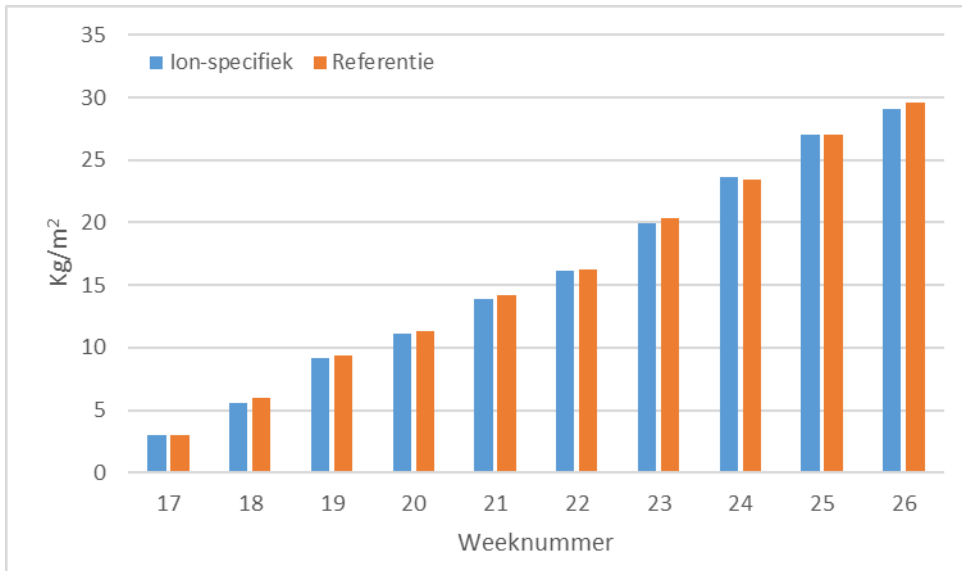
In de eerste proef in Bleiswijk werden geen verschillen in productie gevonden. De resultaten worden niet getoond omdat de problemen met de automatische dosering een te grote rol speelden. In de tweede proef in Bleiswijk was het wel mogelijk om voldoende goed ion-specifiek te doseren. Desalniettemin, had de mini doseerunit moeite om het gewenste recept te maken. Voor sommige elementen lag de afwijking binnen het geaccepteerde bereik van 10%, voor andere (NH₄, Cl) was de afwijking bijna 20% (Figuur 3.5). Bovendien raakten de doseerventielen van sommige elementen (voornamelijk MgSO₄) vaak verstopt.



Figuur 3.5 Mini doseerunit afwijking per element

3.3.2 Gewasprestaties

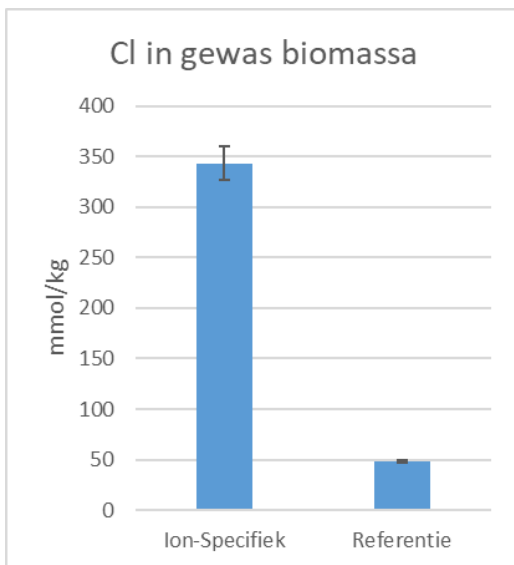
Er was geen significant verschil tussen beide behandelingen in opbrengst (Figuur 3.6), aantal vruchten, gemiddeld vruchtgewicht, verse plantbiomassa, droge stofgehalte (gegevens niet getoond). De groeiomstandigheden waren zeer vergelijkbaar tussen de twee behandelingen, de gemiddelde drainagesnelheid, drain EC en pH en het nutriëntengehalte zijn weergegeven in Tabel 3.5. Het chloridegehalte (Cl) in de gewas biomassa van de alternatieve oplossing van de ion-specifieke behandeling was significant hoger (340 mmol Cl/Kg) in vergelijking met de referentie (50 mmol Cl/Kg) (Figuur 3.7).



Figuur 3.6 Productie van de ion-specifieke teelt en een referentieteelt.

Tabel 3.5 Teeltparameters van een tomatengewas in twee behandelingen tijdens de 2^e proef in Bleiswijk tussen februari 2021 en juni 2021. EC uitgedrukt in ds/m, elementenconcentratie in mmol/l.

Behandeling	Drainage	pH	EC	K	Na	Mg	Ca	Cl	NO ₃	SO ₄	PO ₄
Referentie	28%	5.9	3.7	9.2	0.8	4.1	8.5	1.7	21.9	4.7	1.7
ion-specifiek	29%	5.1	3.8	10.6	0.9	3.7	8.5	2.1	22.7	4.1	2.9

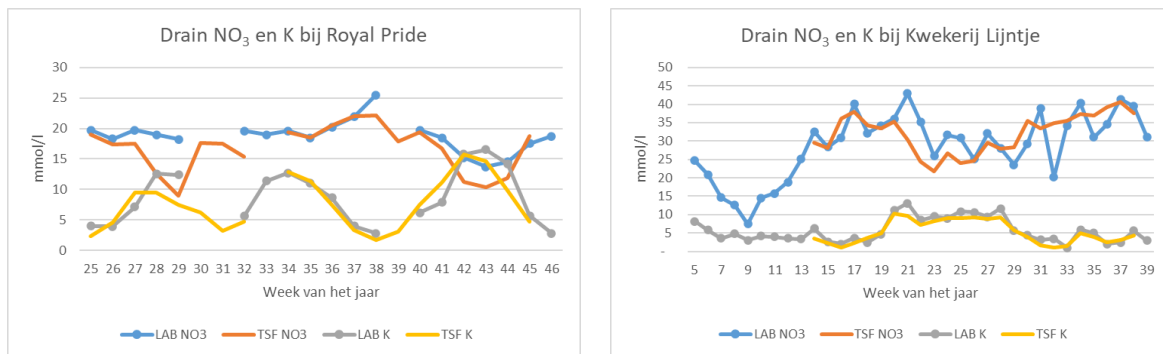


Figuur 3.7 Chloridegehalte (Cl) in de gewas biomassa van de ion-specifieke behandeling en de referentie.

3.4 WP4 Demonstratieproef in de praktijk

3.4.1 Resultaten in de praktijk

Figuur 3.8 zien hoe goed de gegevens van CE-line in praktijk de lijnen van het laboratorium volgen. Bovendien konden de telers dankzij de ion-specifieke meter CE-line een beter overzicht krijgen over de dynamiek van de afzonderlijke elementen in de tijd. Door de gemiddelde gegevens van de week weer te geven in plaats van het enkele datapunt van het laboratorium werden dagelijkse schommelingen in de grafieken gereduceerd (Figuur 3.8).



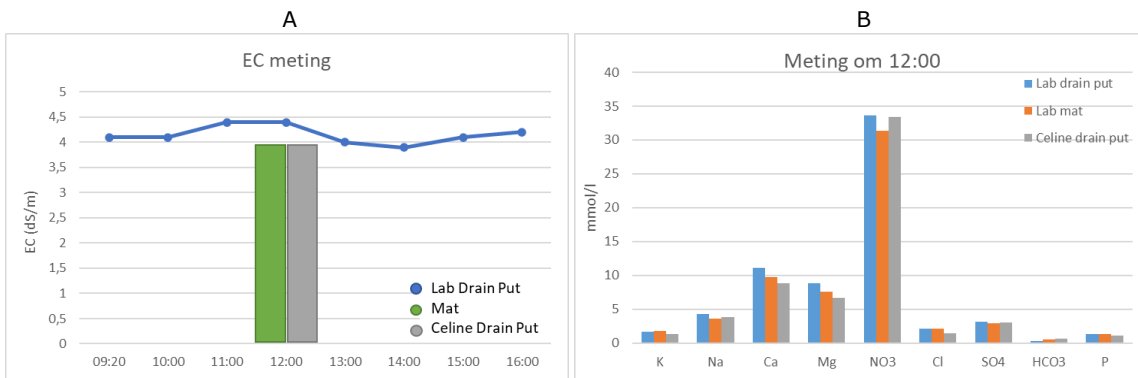
Figuur 3.8 Grafiek van de drainconcentratie van NO₃ en K (in mmol/L), tussen de laboratoriumanalyse (LAB) en de metingen van CE-line (TSF) bij respectievelijk Royal Pride (RP) links en Kwekerij Lijntje (KL) rechts. De gegevens voor TSF zijn het gemiddelde van de week. Voor LAB gaat het om één dag van de week.

3.4.2 Fluctuaties in de drainput

Op een zonnige dag in augustus werd, tijdens de laatste proef (Kwekerij Lijntje 2022), de nutriëntenconcentratie in de drainageput gedurende een hele dag (van 9.00 tot 16.00 uur) gecontroleerd door elk uur watermonsters te nemen die later door een laboratorium werden geanalyseerd. Op dezelfde dag voerde CE-line om 12.00 uur ook haar drainwatermeting uit. Op hetzelfde moment werd ook een monster genomen van een mat in de kas. Uit de resultaten bleek dat de EC-fluctuaties in de drainageput gedurende de dag beperkt bleven tot een $\pm 0,25$ dS/m (Figuur 3.9.A). De eerste uren van de ochtend stond de put nog vol met water van de avond ervoor. Het eerste "verse" drainwater kwam rond 10.00 uur binnen. Dit water had een hogere EC, wat waarschijnlijk een gevolg is van het gebrek aan drainwater van de eerste irrigatiecycli van de dag. Later op de dag, en overeenkomend met de fase van de hoogste straling (12:00-14:00) daalde de EC. Aan het eind van de dag nam de EC weer toe (Figuur 3.9.A).

Uit een vergelijking van de situatie om 12:00 uur blijkt dat het verschil tussen de mat en de drainmeting zeer beperkt was. Het drainwater was iets hoger dan de mat, wat kan worden verklaard. In de mat is er altijd een EC-gradiënt. Deze is vaak hoger aan de onderkant van de mat. Het drainwater komt voornamelijk uit dit deel van de mat. Dit verklaart de iets hogere EC in het drainwater dan in de mat.

De meting van het drainwater door CE-line kwam ook sterk overeen met die van het laboratorium, al lag de EC iets lager (0,4 ds/m). Dit kwam vooral door een lagere waarde van Ca en Mg in vergelijking met het laboratorium (Figuur 3.9.B). Ook moet worden opgemerkt dat CE-line de EC niet heeft gemeten. Het niveau in Figuur 3.9.A is berekend op basis van de macro-elementenconcentratie in Figuur 3.9.B met de vuistregel (som van de kation ladingen)/10=EC. De berekening van de EC met de vuistregel valt voor deze meststoffen vaak iets te hoog uit, daarom is het verschil tussen beide niet verbazend.



Figuur 3.9 (A) EC (dS/m) in de drainageput van een tomatenkas in de loop van een dag. Om 12:00 uur is ook het EC-niveau in de mat en het door de CE-line gemeten niveau in de put weergegeven (EC berekend op basis van de metingen van ionen). (B) Micro-element concentratie (mmol/L) om 12:00 in de drainput van een tomatenkas zoals gemeten door het laboratorium en de CE-line, en de concentratie in de mat zoals gemeten door het laboratorium.

3.4.3 Mening van de telers

Tijdens de teelt bij **Royal Pride** werd teler Derek Bot geïnterviewd door Glastuinbouw Waterproof en werd hem gevraagd naar de ervaringen met de ion-specifieke meter. Hij was er zeer tevreden over en zei: "We zien dagelijks wat de plant opneemt en kunnen sneller de bemesting bijsturen. Hierdoor besparen we op meststoffen, lozen we minder en geven de planten meer topkwaliteit vruchten. Dit heeft zeker toekomst." Gevraagd naar de terugverdientijd zegt de teler: "Dat verwacht ik wel, al heb ik nog geen idee wat zo'n unit moet kosten. Onze ervaringen zijn zeer positief, terwijl we er lang niet het maximale uit hebben gehaald. Door de grootte van de afdelingen en ons watersysteem is onze waterbuffer zo groot dat we maar drie keer per week konden bijsturen. Op basis van ion-specifieke metingen zouden we het watersysteem nu anders inrichten, zodat we dagelijks of misschien wel twee keer per dag kunnen bijsturen. Dan ben ik ervan overtuigd dat de voordelen die we nu al zien nog meer uitgesproken zullen zijn." De telers zagen concrete voordelen: "Deze voordelen zijn vooral een nauwkeurigere watergift en toevoer van voedingsstoffen, resulterend in een kleiner drainvolume en een minder ingrijpende aanpassing van de bemesting. Dit resulteert weer in een kleinere hoeveelheid lozingswater en besparingen op meststoffen en zuiveringskosten. 'Last but not least' zorgt een voedingsaanbod op maat ervoor dat de plant minder energie hoeft te steken in de opname van voedingsstoffen, waardoor er meer energie beschikbaar komt voor groei en vruchtontwikkeling. Een optimale balans zorgt ook voor kwaliteitswinst, zeker in periodes waarin de planten het moeilijker hebben of harder moeten werken. De fase tot aan de eerste oogst is het meest dynamisch, dan wil je er bovenop zitten. Met name de kaliumvoorziening en de K/Ca-balans verdienen de nodige aandacht. We zagen in het voorjaar en de zomer echt dat we door veelvuldig meten en bijsturen minder moeite hadden om de kwaliteit op het gewenste niveau te houden. In hete zomers, zoals in 2019 en 2020, kunnen kwaliteitsproblemen nog nadrukkelijker optreden. Daarnaast is het onvermijdelijk dat we hiermee meer kilo's gaan oogsten. Een objectieve vergelijking met andere afdelingen kan ik niet maken, maar dat zou een onontkoombare uitkomst moeten zijn. Wat ons betreft komt de doorontwikkelde CE-line binnenkort op de markt. Er valt echt geld te verdienen.

"Tijdens de teelt bij **Kwekerij Lijntje** werd teler Rob Oosterom geïnterviewd door Glastuinbouw Waterproof. Toen hem werd gevraagd naar de CE-line-meter, prees hij door te zeggen: "Doet zijn werk heel goed, maar wat veel moeilijker blijkt te zijn, is het automatiseren van de dagelijkse aanpassingen in mijn voedingsrecepten". Bij ion-specifiek telen ziet de teler dat "met een snel, nauwkeurig en betaalbaar analyseapparaat op je eigen bedrijf dat proces enorm kan versnellen en dat moet productiewinst opleveren." De belangrijkste zorg voor de teler is de stap naar automatisering. Teeltadviseur Dick Breugem van projectpartner Van Iperen legde uit waar het hiaat voor de automatisering zat. "Oosterom heeft een eigen visie op bemesten, die niet altijd overeenkomt met de BemestingsadviesBasis die Wageningen UR hanteert. Op basis van deze BAB en de analysegegevens die WUR van de teler ontvangt, stelt WUR telkens een nieuw bemestingsadvies op. Rob maakt zijn eigen recepten en daarom verschillen praktijk en BAB van elkaar. Dit komt door een andere kijk op hoe druppel- en drainwater eruit zou moeten zien. Om dichterbij elkaar te komen zijn steeds grotere correcties in het recept nodig. Zo zou het natuurlijk niet moeten zijn."

3.4.4 Werking en verbeteringen aan ion-specifieke meter en software

De eerste versie van de CE-line-ion-specifieke meter (Figuur 3.10.A) werd in dit project gebruikt voor de eerste proef in Bleiswijk (2020) en bestond uit drie modules, (1) de koelruimte waarin de referentieoplossingen stonden, (2) de module met de micro-elektroforeseapparatuur, (3) een computer die (2) aanstuurde en de metingen omzette in waardevolle gegevens (concentraties) (Figuur 3.10A). Deze versie vereiste nog een reeks handmatige handelingen die later in de tweede versie werden geautomatiseerd. Ook de stroom van de door CE-line gegenereerde gegevens werd in de tijd meer geautomatiseerd. Tabel 3.6 geeft een overzicht van de acties en de verbetering in de tijd. In de tweede versie zijn de verdunningsmodule en de filters (4) toegevoegd (Figuur 3.10.B). De verdunningsmodule werd gebruikt om de concentratie van de monsters te verlagen tot een EC (elektrische geleidbaarheid) die dicht in de buurt kwam van wat CE-line had gekalibreerd om te meten. Deze stap gebeurde voorheen handmatig door de EC te meten en het monster in een lab te verdunnen. Deze versie werd verder uitgerust met een tweede laptop bij Royal Pride en Kwekerij Lijntje waarop de Bemesting Adviesbasis draaide voor het berekenen van de gewenste aanpassingen aan de aanvulvoeding (Figuur 3.10.C en D). De telers konden met een gemengde drain werken, hun standaardrecept bepalen en de orde van grootte van de door de BAB voorgestelde aanpassing regelen. Een voorbeeld van het advies dat naar de teler wordt gestuurd is weergegeven in Figuur 3.11.



Figuur 3.10 CE-line ion-specifieke meter verschillende versies tijdens het project. **A)** proef 2020 Bleiswijk, **B)** proef 2021 Bleiswijk, **C)** proef 2021 Royal Pride, **D)** proef 2022 Kwekerij Lijntje.

Tabel 3.6. Verbetering van CE-line en de verwerking van de ion-specifieke gegevens naar een zo nodig aangepaste voedingsgift

n. Actie	Actie	2020	2021	2022	Toekomst
1	Monstername voor de ion-specifieke meter (CE-line in dit project)	Handmatig	Automatisch en mogelijk voor twee monsters. Gebaseerd op een kloktimer	-	Meerdere keren per dag.
2	Verdunning van het monster	Handmatig	Automatisch op basis van een vaste verdunningsfactor	Afzonderlijke vaste verdunningsfactor voor de twee monsters	Automatisch met een variabele verdunning op basis van EC-meting
3	Begin monstermeting	Handmatige start	Automatische start	-	Ook de micro-elementen meten
4	Verdunning en vervanging van de referentieoplossing	n.v.t.	Handleiding 1/maand	-	Gebruik van grotere buffers die 1/jaar vervanging mogelijk maken
5	Correctie van meetgegevens	Handmatig	Handmatig	Handmatig	Er is betere software nodig om de pieken van elk element om te zetten in bruikbare concentraties.
6	Uitwerking van meetgegevens door een nutriëntenaanbevelingssysteem (NRS) (in dit project de BAB)	Handmatig	Automatische gegevensverwerking. Handmatige controle van het nieuwe voedingsstoffenrecept	Automatische uitwerking met kwekersrecept mogelijk	Meer maatwerk door telers. De telers zouden de NRS lokaal kunnen hebben
7	Omzetting van voedingsstoffenrecept naar meststoffenrecept	Handmatig	Handmatig	Automatische API-verbinding tussen BAB-WUR en Van Iperen	Uitbreiden tot meerdere meststofpakketten naargelang wat de teler gebruikt
8	Mededeling van het nieuwe meststoffenrecept aan de telers	Handmatig	Handmatig	Handmatig	De teler moet het nieuwe recept op zijn eigen pc kunnen zien.
9	Mededeling van het nieuwe meststoffenrecept aan de bemestingseenheid	Handmatig	Handmatig	Handmatig	Het recept kan rechtstreeks door de NRS aan de eenheid worden meegedeeld.

date:	19-9-2022	
location:	Lijntje	
druppel EC:	3	ds/m
drain EC reuse:	2.5	ds/m

		color legend
Volume Drain reuse		61%
Volume bj Injectieunit		39%
druppel		100%

Celine (mmol/l)	Gift			Drain			Drain Reuse
	Date	9-9-2022	14-9-2022	9-9-2022	14-9-2022		14-9-2022
welput	latste	nieuwe	verschil	latste	nieuwe	verschil	nieuwe
Cl	1.5	1.5	0.0	0.6	0.7	0.1	0.4
NO3	25.6	25.5	0.0	40.4	37.6	-2.8	23.1
SO4	1.6	1.5	-0.1	1.2	1.1	-0.1	0.7
HCO3	0.4	0.4	0.0	0.6	0.5	-0.1	0.3
PO4	1.1	1.0	-0.1	0.9	0.8	-0.1	0.5
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
K	7.0	7.8	0.7	3.8	5.3	1.6	3.3
Na	2.7	2.6	-0.1	4.5	3.9	-0.6	2.4
Mg	4.9	4.7	-0.2	7.4	6.7	-0.7	4.1
Ca	6.8	6.5	-0.3	9.2	8.5	-0.8	5.2
EC	3.2	3.2		4.3	4.1		2.5

Injectieunit (ml/m3)	Date	0%BAB			30%BAB			Hoeveelheid
		9-9-2022	14-9-2022	verschil	9-9-2022	14-9-2022	verschil	
Welput		latste	nieuwe	verschil	latste	nieuwe	verschil	Rob
1	Salpeterzuur	1134	948	-187	1225	1069	-156	550
2	Kaliloog	703	624	-79	754	669	-84	510
3	Fosforzuur	106	145	39	106	110	5	110
5	Ammoniumnitraat	40	41	0	40	41	0	15
6	Bitterzout	1958	1978	21	1780	1844	64	800
7	Kalksalpeter	0	0	0	0	0	0	550
8	Magnesiumnitraat	0	0	0	0	0	0	5
9	Sporen							200
11	Calciumchloride	446	414	-32	521	506	-15	200
12	Ijzerchelkate	22	29	7	22	29	7	42
13	Zwavelzuur	0	0	0	0	0	0	

concentration added solution	Cl		3.5			4.3		1.7
	NO3		7.4			8.3		9.4
	SO4		4.3			4.0		1.7
	HCO3							
	PO4		1.2			0.9		0.9
	NH4		0.3			0.3		0.1
	K		8.3			8.9		6.8
	Na							
	Mg		4.3			4.0		1.7
	Ca		1.8			2.1		3.4
	EC		2.1			2.1		1.6

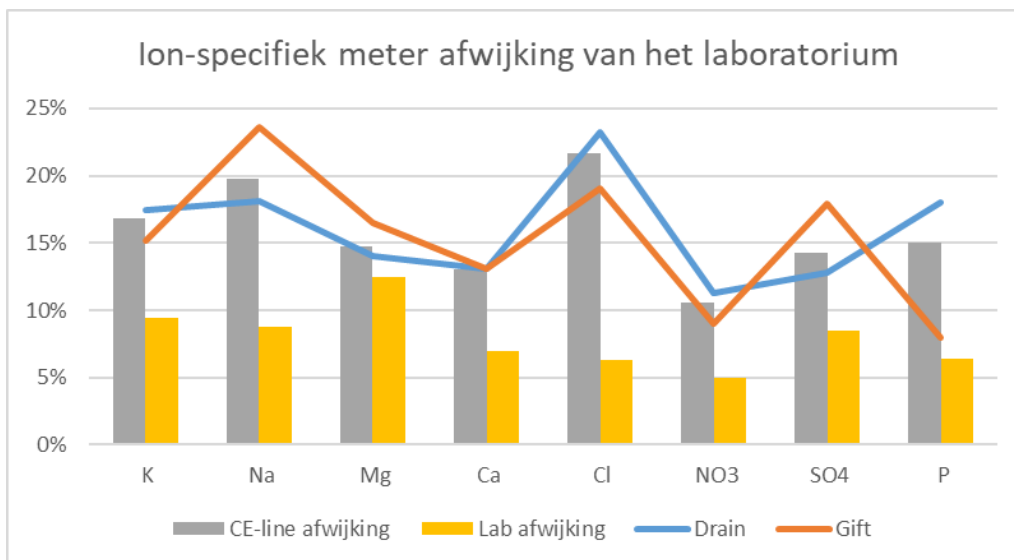
druppel	drip water (mmol/l)	0%BAB			30%BAB			Rob
	Cl		1.8			2.1		1.1
	NO3		26.0			26.3		26.7
	SO4		2.3			2.2		1.3
	HCO3		0.3			0.3		0.3
	PO4		1.0			0.9		0.9
	NH4		0.1			0.1		0.0
	K		6.4			6.7		5.9
	Na		2.4			2.4		2.4
	Mg		5.7			5.6		4.8
Ca		5.9			6.0		6.5	
EC		3.3			3.3		3.1	

Figuur 3.11. Een voorbeeld van het advies dat naar de teler wordt gestuurd.

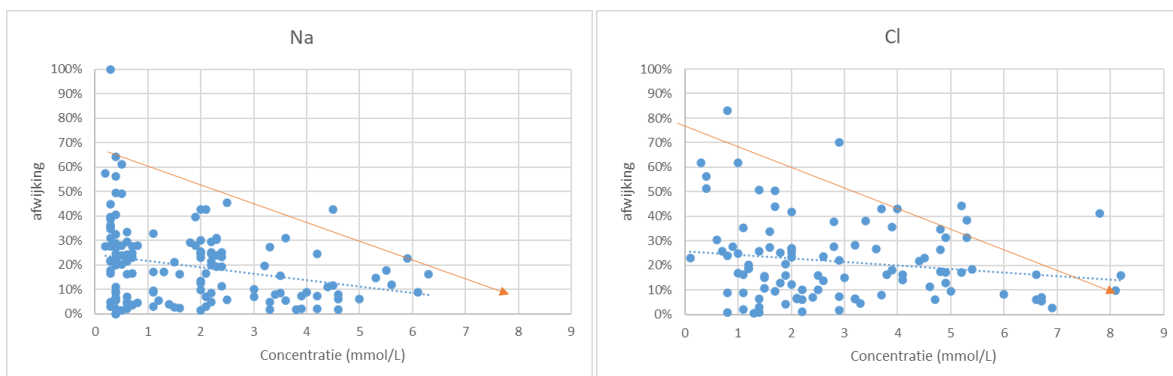
3.4.5 CE-line nauwkeurigheid

Vergelijking van de metingen van CE-line met laboratorium verzameld over WP3 en WP4, en gemiddeld werd 16% afwijking gevonden (zie 2.5 voor berekeningswijze) (in grijs balken in Figuur 3.12). Echter, bij een korte test werd de afwijking van metingen bij twee verschillende laboratoria gemiddeld op ongeveer 8% geschat. In figuur 3.12 is ook de laboratoriumafwijking per element weergegeven in geel balken. Als hiermee rekening wordt gehouden, kan de gemiddelde nauwkeurigheid voor CE-line worden geschat op 16% minus 8%, dus 8%.

De hoogste nauwkeurigheid werd gevonden voor NO_3 (slechts 11% afwijking). De grootste afwijking werd gevonden voor Cl en Na (ongeveer 20%). Er moet rekening mee worden gehouden dat Cl en Na vaak in lage concentraties werden aangetroffen (0 - 1 mmol/L). Dit beïnvloedde de nauwkeurigheid van CE-line. In feite werd voor deze twee elementen een negatieve trend gevonden tussen de concentratie van het element en de afwijking van de labresultaten (Figuur 3.13). Dit betekent dat hoe lager de concentratie, hoe groter de kans op een verschil tussen het door CE-line gegeven niveau en dat van het laboratorium. Opgemerkt moet worden dat het laboratorium ook een afwijking heeft die bij lagere waarden relatief meer invloed krijgt. Er is niet veel verschil gevonden tussen de nauwkeurigheid bij het meten van het drain- en het voedingswater. Het grootste verschil werd gevonden in P (in feite H_2PO_4), waarvan bekend is dat de waarde nogal gevoelig kan zijn voor de pH. De gift heeft een veel stabielere pH dan de drain. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de afwijking in de drainanalyse groter is dan in de gift.



Figuur 3.12. Ion-specifieke meter (CE-line) nauwkeurigheid uitgedrukt als afwijking van de laboratoriummetingen (lab 1 en lab 2). De globale balken (grijs) geven het gemiddelde aan tussen de afwijking voor drain- en giftmetingen.



Figuur 3.13. Correlatie van de afwijking tussen CE-line en het laboratorium in relatie tot de concentraties van de elementen. De concentratie van het laboratorium is gebruikt voor de x-as. De afwijking is hoger als de concentratie kleiner is.

4 Discussie

4.1 Invloed op emissie en opbrengst

De telers hoeven geen watersysteem te veranderen om de hierboven beschreven methode voor ion-specifiek telen te kunnen gebruiken. Met meer informatie over de samenstelling van de drain kunnen telers met meer vertrouwen het drainwater recirculeren en lozing voorkomen. Dit draagt bij aan het uiteindelijke doel om de emissie van nutriënten naar het water tot vrijwel nul terug te brengen. Met meer informatie over de samenstelling van het drainwater kunnen telers de blootstelling van planten aan suboptimale concentraties in de matten, wat de plant aantoonbaar energie kost, verminderen. De opbrengstwinst is in een proef moeilijk statistisch aan te tonen omdat de opbrengst lager kan zijn dan de minimaal geaccepteerde standaardfout (5%), maar telers kunnen dit in hun teelt ervaren. Daarnaast kunnen telers met meer informatie over de samenstelling van de drain luxe consumptie vermijden en besparen op meststoffen. Dit zou ook economisch voordeel kunnen opleveren voor telers, zeker met de nieuwe (hogere) mestkosten.

4.2 CE-line prestaties (WP1, WP3, WP4)

In dit project is CE-line uitgebreid getest en geobserveerd, onder andere door het werk van partner CEW. Op basis van deze resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken (Tabel 4.1):

- De nauwkeurigheid van de meter is hoog genoeg voor een professioneel gebruik in de praktijk. De gerealiseerde verbetering van de CE-line tot een gemiddelde afwijking van 8% voor de macronutriënten (wanneer ook rekening wordt gehouden met de afwijking van de laboratoria) is genoeg voor de tuinbouwmarkt.
- Verbeteringen tijdens het project hebben CE-line zelfstandiger gemaakt. CE-line kan de watermonsters verzamelen, verdund en zelfstandig de meting uitvoeren. Het aantal menselijke ingrepen is beperkt. Dit betreft: schoonmaken van de filters, bijvullen van referentieoplossingen, handmatige controle en kalibraties. In de toekomst kan het menselijke ingrijpen nog verder beperkt worden.
- De verdunning van de watermonsters was eerst gebaseerd op een constante EC. Dit leidde tot een lagere nauwkeurigheid. Wanneer de concentraties buiten een bepaald referentiebereik liggen, heeft de CE-line namelijk meer problemen om het juiste niveau te meten. Er is nu een dynamische verdunning op basis van de EC van het monster.
- Het meten van het drainwater in de drainput is niet raadzaam omdat het minder representatief is en gevoeliger voor schommelingen. Het meten van drainwater uit de voorraadsilo lijkt een betere oplossing. In deze proef bleek de afwijking binnen één dag in de put niet erg groot. Bemonstering op klokbasis om 12 uur lijkt daarom ook een optie omdat het voldoende representatief is voor het daggemiddelde.
- De in dit project gebruikte versie van CE-line heeft alleen de macro-elementen gemeten. Dit is voldoende voor een veilige teelt. Voor toekomstige versies zou het meten van de micro-elementen nog wat meerwaarde bieden voor professioneel gebruik. Deficiënties of toxiciteit als gevolg van micro-elementen kunnen net als afwijkingen in de macronutriënten een negatief effect hebben op de teelt.

Tabel 4.1 Belangrijkste ontwikkelingen binnen dit project. Inmiddels is er een commerciële versie op de markt, die een deel van de wensen in de laatste kolom al realiseert.

Bij aanvang	Na dit project	Wenselijk voor de toekomst
1 Monsternamen handmatig	Automatische monsternamen van twee monsters	Ook handmatig inbrengen van monsters mogelijk
2 Geen verdunning van het monster	Afzonderlijke vaste verdunningsfactor voor de twee monsters	Automatische variabele verdunning op basis van EC (al gerealiseerd)
3 Handmatige start van de meting	Automatische start	Ook de micro-elementen meten
4 1x/wk spoeloplossingen aanpassen/controleren	1x/maand	1x/jaar door grotere buffers en lager verbruik
5 Handmatig omzetten van recept in mmol/L naar recept in kg of liter per batch	Automatisch omzetten voor/door Van Iperen meststoffen	Uitbreiden tot meerdere meststofpakketten naargelang wat de teler gebruikt
6 Handmatig omrekenen drainagemeting naar aanpassingen in aanvoer	Automatisch	Er is behoefte aan commerciële uitwerking. Met ruimte voor maatwerk door telers

4.3 Labproeven zuurstofverbruik van wortels (WP2)

De zuurstofverbruikstesten onder afwijkende concentraties van een element A ten opzichte van element B (gemeten tegen de ideale verhouding op de wortels voor gemakkelijke opname van voedingsstoffen) toonden aan dat er meer zuurstof werd gebruikt onder suboptimale omstandigheden. Bij het vervangen van NO_3 door Cl was dit juist 7-12% lager. Dit zou bevestigen dat er vaak sprake is van een luxe consumptie van NO_3 door de planten terwijl al bekend was dat nitraatopname meer energie vraagt dan de opname van chloor. Hoge niveaus van SO_4 , ter vervanging van NO_3 , resulteerden ook in een hoger (+20%) zuurstofverbruik. In een theoretische berekening is aangetoond hoe zuurstofverbruik kan worden gerelateerd aan energieverlies en uiteindelijk aan opbrengstverlies. Ook in de praktijk komen vaak onevenwichtigheden in de samenstelling van de worteloplossing voor. Het gebruik van closed-loop irrigatiesystemen, wanneer de input niet overeenkomt met de output (opname door de plant), versnelt de vorming van deze suboptimale omstandigheden. Aan de hand van de data van een van de telers die in dit project is gevolgd, werd geschat dat dit zo'n 3-4% van de opbrengst zou kunnen kosten. Om die redenen lijkt ion-specifieke teelt de oplossing te bieden om dit verlies te voorkomen door een betere controle over de conditie in het wortelmilieu mogelijk te maken.

4.4 Ion-specifieke teelten (WP3, WP4)

Zowel bij het WUR-onderzoek als bij de telers bleek het nog te moeilijk om dagelijks kleine veranderingen in de aanvul-oplossing aan te brengen. Door ontwikkelproblemen met de doseerinstallaties, het meetapparaat en software werd bij WUR veel handmatig gecontroleerd en ook de deelnemende telers controleerden de voorgestelde aanpassingen handmatig. Daardoor werden aanpassingen meestal maar 1 of 2 keer per week doorgevoerd. De voordelen van de rust en consequente uitvoering door een volautomatische regeling zijn dus nog niet volledig benut.

Bij de eerste proef in Bleiswijk (2020) was het door afstelproblemen van de mini-injectie-unit nog niet mogelijk een realistische standaard en ion-specifieke behandeling uit te voeren. In de tweede proef (2021) werkte de mini-unit voldoende goed, maar het was wel nodig de gegevens handmatig te checken en ook het verversen van de spoeloplossingen voor CE-line was tijdrovend. Om risico's in de nacht en in het weekend te vermijden, werd in deze proef wel ion-specifiek gemeten, maar nog onregelmatig bijgestuurd.

Daarom zijn de referentiebehandeling en de ion-specifieke behandeling in de praktijk vrijwel op dezelfde manier uitgevoerd. Dit verklaart waarom de opbrengst ook erg op elkaar leek en het niet mogelijk was om eventuele winst van ion-specifieke teelt ten opzichte van traditioneel telen te zien.

Tijdens de demonstratieproef bij Royal Pride (2021) was het gebruik van één drainput voor meerdere afdelingen met verschillende gewassen gedurende enkele maanden een handicap. De software (BAB) en CE-line waren niet voorbereid op deze situatie. De software werd aangepast om deze optie te gebruiken. De CE-line hardware werd aangepast om in plaats van de aanvoeroplossing en drainageoplossing van één afdeling, nu de drainage oplossing van de beoogde afdeling te meten en de samenstelling van het water in de mengdrainput. Daarnaast werkte het A- en B-voorraadsysteem vertragend omdat de meststofvoorraad uiteraard gemaakt moest worden voordat een nieuwe oplossing kon worden toegepast. De teler had de indruk dat de BAB te grote aanpassingen voorstelde en verlaagde de aanpassingen dan ook tot in zijn ogen veilige waarden. Er is gemiddeld iets vaker dan 1 keer per week een aanpassing doorgevoerd.

Voor de tweede demonstratieproef bij Kwekerij Lijntje (2022) werd de BAB verder aangepast naar wensen van de teler (zie 3.4.4). Het standaardrecept van de teler werd gevolgd en het werd mogelijk in te stellen met welk percentage het advies van de BAB werd doorgevoerd (een demping door de gebruiker). Ondanks de aanpassingen, gaf de teler toch de voorkeur aan eigen aanpassingen die niet allemaal vooraf in regels te vatten bleken. De CE-line werd dus gewaardeerd, maar de via de BAB berekende adviezen nog niet omdat het verschil tussen het adviesrecept en het telerrecept nog te groot was.

4.5 Data management aanpassingen (WP3, WP4)

Aan het begin van het project zijn veel gegevens handmatig verwerkt (zie Tabel 3.6). Dit is in de loop der tijd verbeterd. De frequentie en duur van de irrigatie, alsmede de irrigatie EC en pH worden nu al op semi-autonome wijze geregeld door de klimaatcomputer en de bemestingseenheden. Maar om volledig autonome irrigatiesystemen (dus inclusief de voedingscorrecties) te realiseren, zijn de vereisten:

1. Regelmatige gegevens over de nutriëntenconcentratie in het drainwater en liefst ook de aanvoer (als controle).
2. Vertaling van deze informatie naar een nieuw meststoffenrecept in kg of L.
3. Uitvoering van de dosering.

Eis (1) is mogelijk opgelost met de introductie van ion-specifieke meters zoals CE-line. Eis (3) kan vrij gemakkelijk worden uitgevoerd door de bestaande units als het juiste recept in mmol/L bekend is (uit een berekening door een aanbevelingssysteem zoals de BAB). Eis (2) lijkt het moeilijkst op te lossen. Dat komt omdat meerdere partijen moeten samenwerken:

- (I) de ion-specifieke meter
- (II) het aanbevelingssysteem voor voedingsstoffen (NRS)
- (III) de wensen van de telers
- (IV) het door de teler gebruikte meststoffenpakket
- (V) de hardware/software van het door de teler gebruikte irrigatiesysteem.

(I) De ion-specifieke meter moet met hoge frequentie betrouwbare en accurate gegevens doorgeven aan het aanbevelingssysteem (II).

(II) Het aanbevelingssysteem moet zodanig worden uitgevoerd dat storingen in de gegevens (I) worden herkend en opgeheven.

(III) De wensen van de telers. In dit project werd de Bemesting Adviesbasis (BAB) gebruikt als aanbevelingssysteem (NRS). Zowel de teler bij Royal Pride (RP) als die bij Kwekerij Lijntje (KL) waren echter niet bereid het advies van de BAB direct op te volgen omdat het te ver afstaat van hun huidige strategie. Maatwerk voor de specifieke wensen van de teler (voorkeuren in receptuur, drainsamenstelling, mestpakket) was daarom noodzakelijk.

- Bij RP was de BAB nog niet gereed om maatwerk door de teler te accepteren.
- Voor de proef bij KL werd de BAB zo uitgevoerd dat het recept van de teler werd gebruikt. De logica achter de BAB stond echter nog steeds te ver af van de teler. De BAB werkt met een vast recept, in dit geval een Aanvul recept (A). Dat is niet het toegediende irrigatiewater, het toegediende irrigatiewater is namelijk de som van A plus drain (B). Wat de teler kan veranderen is alleen A (zie figuur 1.1). Op het aanvul-recept A worden meerdere correcties uitgevoerd (voor afwijkingen in drainagewater, gewasstadium, en ingangswater). De teler veranderde zijn recept A wekelijks, op basis van zijn ervaring en gevoel (waar geen duidelijke berekenbare regels voor te maken waren).

(IV) Het gebruikte meststoffenpakket.

Wanneer niet alle meststoffen beschikbaar zijn, of wanneer de verhoudingen in de meststoffen het niet mogelijk maken hetzelfde nutriëntenrecept te maken als door het aanbevelingssysteem wordt voorgesteld, worden door het meststoffenbedrijf (vaak door de adviseurs) kleine aanpassingen in het nutriëntenrecept aangebracht. De teler van KL bijvoorbeeld gebruikte geen H₂SO₄ (Zwavelzuur), waardoor alle SO₄ via MgSO₄ (Bitterzout) werd aangevoerd. Hiervoor moet meer Mg in het recept worden opgenomen. Dit ging meestal ten koste van K, en deze regel was in strijd met het aanbevelingssysteem. Daarom blijft het nodig dat een aanbevelingssysteem flexibel aangepast kan worden aan een bedrijfsspecifiek pakket meststoffen (stap 7 van Tabel 3.6).

(V) In dit project gebruikte de teler bij RP een A- en een B-voorraad. In sommige periodes van het jaar kunnen de voedingsverhoudingen zelfs gedurende 2-3 weken niet worden gewijzigd. Bij KL werd een injectie-eenheid van Priva gebruikt. In dit geval speelde de Priva-software ook een rol in de communicatie tussen het aanbevelingssysteem en de teler.

- Ten eerste gebruikt het mestbedrijf Van Iperen een andere eenheid (L/m³) dan Priva (mL/m³) om het mestrecept uit te drukken (tussen stap 7 en 8 van Tabel 3.6).
- Ten tweede berekent het aanbevelingssysteem rechtstreeks het Aanvul-recept met inachtneming van de gewenste telersparameters en dus met een EC gelijk aan ongeveer 0,6 dS/m. In het Priva systeem wordt een teler echter verzocht een recept in te vullen op een vaste EC-waarde (EC 1,6 dS/m; Figuur 4.1). De werkelijke hoeveelheid geïnjecteerde meststoffen kunnen de telers niet zien. Onderzoekers van WUR en Priva zijn erin geslaagd de ruwe informatie over de geïnjecteerde hoeveelheden te achterhalen en de totale EC kwam inderdaad overeen met de EC die dag na dag door het NRS werd berekend. Slechts bij een zeer volle drainsilo, wordt meer dan de ingestelde bijdrage uit drainwater gebruikt (2,5 dS/m in dit voorbeeld) om overlopen te voorkomen. Dit alles gebeurt zonder controle van de teler. Doordat de manier van rapporteren van de bemestingseenheid en het aanbevelingssysteem van elkaar afwijken, ontstaan misverstanden. In dit geval dacht de teler aan te vullen met EC 1.6 terwijl dat in werkelijkheid maar 0.6 dS/m was.

-SAMENSTELLING & ALARMGRENZEN-					
3			EC aanvoer	EC	pH
1	Te hoog alarm		5,0	4,0	14,0
2	Voedingsschema		1,4	3,0	
3	Gewenst		2,5	3,1	5,8
4	Te laag alarm		0,0	1,0	3,5

Figuur 4.1 Irrigatie-instelpunt bij Kwekerij Lijntje tijdens de demonstratieproef van 2022.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Het project had tot **doel** de bemesting per fertigatie gift te optimaliseren en aan te tonen dat suboptimale bemesting productie kost. Om dit doel te realiseren is het project opgedeeld in vier werkpakketten.

WP1: gericht op vaststellen van de betrouwbaarheid van de ion-specifieke meetinstrumenten.

WP2: gericht op aantonen assimilatiekosten van afwijkende voedingsoplossingen.

WP3: gericht op een semipraktijk test van het meetinstrument.

WP4: gericht op praktijkteelt met een software module om bemestingsstrategieën door te voeren en het demonstreren van het nut van ion-specifiek telen in de praktijk.

Hoofdconclusie WP1 - Betrouwbaarheid van de meters.

CEW, Centre of Expertise Water Technology, heeft de apparatuur van TSF, The Sensor Factory, gevalideerd. Hiervoor is Standaard Water gebruikt, Standaard Water is water met een vaste concentratie nutriënten, organische vervuiling en gewasbeschermingsmiddelen, representatief voor een realistische worst-case scenario voor een teelt op substraat. Uit de tests met ranges in concentratie, temperatuur, pH en EC blijkt dat de metingen grotendeels betrouwbaar zijn. Aan de randen van het bereik treden echter soms afwijkingen op. Om de nauwkeurigheid voor de elementen te verhogen, is besloten te werken met een temperatuurkamer om de temperatuur stabiel te houden en zal voor pH en EC wiskundig worden gecompenseerd.

Hoofdconclusie WP2 - Labproeven zuurstofverbruik van wortels.

Uit de test is gebleken dat wanneer NO_3 gedeeltelijk (ongeveer 50% meq) werd vervangen door Cl, het zuurstofverbruik door de wortels gemiddeld 13% lager was. Vervanging van NO_3 door SO_4 (ongeveer 50% meq) resulteerde daarentegen in 20% meer zuurstofverbruik. Hieruit bleek dat suboptimale omstandigheden de plant meer energie kosten. Wanneer geprojecteerd op alle voedingsstoffen, dit project heeft aanwijzingen opgeleverd dat onevenwichtigheden in de nutriëntensamenstelling op wortelniveau kunnen leiden tot groeiverlies (tot 3-4%).

Hoofdconclusie WP3 – Semipraktijk test

In Bleiswijk zijn twee teelten met tomaat uitgevoerd. In beide gevallen was de opbrengst met een door CE-line gestuurde voedingsgift gelijk aan de opbrengst met een standaardgift. Door technische complicaties van het doseersysteem kon de strategie niet volledig worden doorgevoerd maar toch bleek uit de gewasanalyses dat - bij gelijke opbrengst - de nitraatopname lager en de chloor opname wezenlijk hoger was in de door CE-line gestuurde behandeling. Voor de registratie van de gegevens en het maken van het bemestingsadvies is gebruik gemaakt van het bemestingsadviesprogramma "Bemesting Adviesbasis" (BAB). De BAB was verbonden met CE-line. Het dataplatform is niet gerealiseerd omdat het systeem in dit stadium nog niet volledig was geïmplementeerd en nog moest worden verbeterd.

Hoofdconclusie WP4 - Plantproeven bij telers.

CE-line is verbeterd zodat het gemakkelijk in het huidige watersysteem van een tuinbouwbedrijf kan worden opgenomen. CE-line kan bijna gelijktijdig twee monsters meten (idealiter gift en drain). CE-line kan de watermonsters verzamelen en zelfstandig de meting uitvoeren. CE-line kan de meting binnen de 90% nauwkeurigheid uitvoeren. De softwaremodule BAB werd aangepast zodat het kwekersrecept gebruikt kon worden. Ook kon de teler zelf de orde van grootte van de door de BAB geadviseerde correctie bepalen. Ook is de mogelijkheid toegevoegd om een mix van drain (van verschillende gewassen) te gebruiken om de nieuwe voedingsoplossing te maken. Telers hebben ervaring opgedaan met ion-specifiek telen. De telers waren tevreden met het gerealiseerde systeem maar beseften dat er meer stappen nodig zijn om tot 100% ion-specifiek telen te komen.

5.2 Aanbevelingen

WP1 - Nauwkeurigheid en robuustheid van CE-line

Voor het werken met macro-elementen in de praktijk voldoet het CE-line apparaat. Na afsluiten van het onderzoek met een prototype is een eerste praktijkserie op de markt gebracht met daarin onder andere de verbeteringen die uit het onderzoek voortkwamen. Op termijn wordt aanbevolen om ook een optie voor het meten van de zes micro-elementen te realiseren. Dit kan ook voor het werken met minder optimale waterkwaliteiten (internationaal) en voor het werken in vertical farms meerwaarde bieden. NB: Sinds enkele maanden vermarkt partner TSF de ion-specifieke meter via CE-line B.V. Het huidige apparaat bevat al veel van de aanbevelingen in dit verslag, o.a. een automatische verdunning naar een optimale meet-EC, metingen van spore-elementen en een lager verbruik van ijkvloeistoffen.

WP2 - Opbrengsteffect van ion-specifiek meten

In het onderzoek is aangetoond dat een suboptimale samenstelling van de voeding in de wortelomgeving leidt tot een tijdelijk hoger gebruik van zuurstof. Voor de praktijk is deze uitkomst wellicht voldoende.

Vanuit het onderzoek geeft dit aanleiding voor een groot aantal vervolgvragen waaronder:

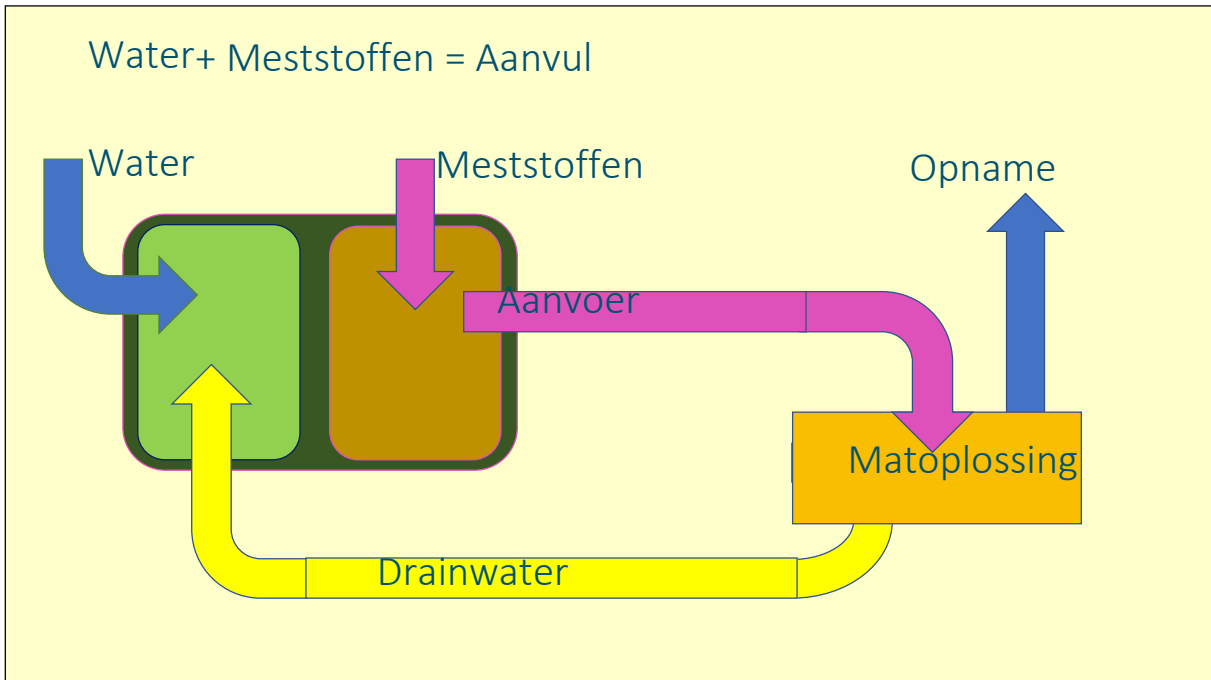
- Hoelang duurt dit effect / kan de plant zich aanpassen aan de afwijking?
- Hangt het effect samen met de meetbare dichtheid van bepaalde transportpoorten (eiwitstructuren) op het oppervlak van de wortelcellen?
- Hoe snel ontstaat een meetbaar suboptimale oplossing op het worteloppervlak in een groeimedium anders dan het hier gebruikte teeltmedium water?

WP3/WP4 - Semi-praktijk en praktijk teelten

CE-line kan nu ingezet worden in een omgeving met mengputten voor de opvang van drainwater uit verschillende afdelingen. Daarmee is het apparaat interessant geworden voor bedrijven waarin dit vrijwel onvermijdelijk voorkomt zoals opkweekbedrijven, potplantenteelt, en vertical farms met meer dan één gewas. De potentiële opbrengstwinst en controle over het gewas maken ion-specifieke meters interessant voor alle gewassen waar grote hoeveelheden water worden gebruikt en een kleine buffer aanwezig is in de substraten. Dit omvat snijbloemen en groenten zonder grond. Daarnaast maakt de potentiële automatisering van het systeem CE-line interessant voor alle glastuinbouwgewassen. Nu veel teelten veen vervangen door hernieuwbare groeimedia wordt het dynamisch doseren van NH_4 , NO_3 , K en SO_4 steeds belangrijker.

WP4 - Data-management

- Er is behoefte aan software die beter dan nu met de BAB in staat is wensen vanuit de telers om te zetten in consequente strategieën. De telers zullen daarbij moeten accepteren dat de software andere recepten toestaat dan die welke zij gewend zijn. Daarbij moet het mogelijk blijven dat telers de software overrulen. Tenslotte moet de software afwijkende situaties kunnen herkennen waarna deze worden gemeld aan de teler en tegelijk tijdelijk teruggeschakeld wordt op een veilige standaardgift.
- Het is nu onduidelijk of het aanbevelingssysteem onafhankelijk moet zijn van een specifiek meststoffenpakket, of dat het juist binnen elk verschillend meststoffenpakket aanwezig moet zijn. Het is aan te bevelen dat in een werkgroep te laten uitzoeken waarbij inbreng vanuit zowel de producenten van doseerinstallaties als vanuit adviesbedrijven gewenst is.
- Er zijn nu in de programma's van de automatiseerders informatiestappen die niet overeenkomen met de fysieke werkelijkheid van het maken van voedingsoplossingen. Als telers een juist beeld van de werking willen hebben is het aan te bevelen hier een standaard voor af te spreken. De standaard zou moeten zijn dat een minimaal aantal parameters gebruikt wordt die steeds overeenkomt met een herkenbare stap in het aanmaken van voedingsoplossingen (zie Figuur 5.1). Dit is in de procesindustrie zó gebruikelijk, dat de besturing daar vaak zelfs via schematische plaatjes van het proces verloopt.



Figuur 5.1 Irrigatie-instelpunt bij Kwekerij Lijntje tijdens de demonstratieproef van 2022.

Literatuur

- Albornoz F, Lieth JH (2015) Diurnal Macronutrients Uptake Patterns by Lettuce Roots under Various Light and Temperature Levels. *Journal of Plant Nutrition* 38 (13):2028-2043. doi:10.1080/01904167.2015.1009098
- Albornoz F, Lieth JH (2016) Daily macronutrient uptake patterns in relation to plant age in hydroponic lettuce. *Journal of Plant Nutrition* 39 (10):1357-1364. doi:10.1080/01904167.2015.1109110
- Albornoz F, Lieth JH (2017) N, P, K and S uptake response to various levels of CO₂ assimilation and growth rate in lettuce. *Journal of Plant Nutrition* 40 (6):773-783. doi:10.1080/01904167.2016.1187745
- Bezemer, J.; Voogt, W., 2008. Elke kubieke meter water van bron tot sloot in beeld (interview met Wim Voogt) - Met een nieuw rekenmodel kunnen telers hun waterbeheer optimaliseren. *Onder Glas* 5 (2). - p. 46 - 47.
- Blok, C. en Gérard, S., 2013. Wortelzuurstofgebruikbepaling van vermeerderde komkommer op steenwolkjes. *Acta Hort.* 1013:73-80.
- Blok, C., van Os, E., en Beerling, E., 2010. Recirculatie-efficiëntie. Recirculatieregeling en rangschikking van het effect. WUR Glastuinbouw, Bleiswijk, Nederland.
- Blok, C., Voogt, W., Khodabaks, R., en Warmenhoven, M. 2009. Demonstratie N-reductie. Praktijkproef met roos. WUR Glastuinbouw, Bleiswijk, Nederland.
- Hoogland, B., Barnier D. 2019. Nutrient management in greenhouses – Capillary Electrophoresis validation. CEW, 2019.0219
- Gutiérrez, M., Alegret, S., Cáceres, R., Casadesús, J., Marfá, O., en del Valle, M. 2008. Nutrient Solution Monitoring in Greenhouse Cultivation Employing a Potentiometric Electronic Tongue. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56:1810-1817.
- Holtman, W., van Duijn, B., Blaakmeer, A., en Blok, C., 2005. Optimalisatie van het zuurstofgehalte in wortelsystemen als effectief teeltinstrument. *Acta Hort.* 697:57-64.
- Kierkels, T. 2010. Bacteriën in watersysteem onderdrukken lang rozenproductie. Nitrificerende bacteriën zetten ammonium om in nitriet. *Onder Glas* 3:46-47.
- Kreijde, C. 2006. Verkleuring lichte vorm van waterziek. *G+F*:18-19.
- Kaderrichtlijn Water, 2000. Richtlijn 2000/60/EG. Brussel, 72p. www.kaderrichtlijnwater.nl
- Morard, P., Lacoste, L., en Silvestre, J., 2000. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. *Journal of plant nutrition* 23(8):1063-1078.
- Morard, P., Lacoste, L., en Silvestre, J., 2004. Effect of oxygen deficiency on mineral nutrition of excised tomato roots. *Journal of Plant Nutrition* 27:613-626.
- Morard, P. en Silvestre, J., 1996. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: a review. *Plant en bodem* 184:243-254.
- Oud N, Barbagli T, Blok C (2021) Root oxygen use as a measure for ion uptake from slightly different nutrient solutions. *Acta Hort* 1317:239-246. doi:10.17660/ActaHortic.2021.1317.27
- Smit, A. B., Dijkxhoorn, Y., Ruijs, M. N. A., van der Meer, R. W., Hammerstein, J. J. C. M., van Os, E. A., en Hietbrink, O. 2009. Minder mineralenverlies bij substraatteelt. Een economische analyse van opties. LEI, Wageningen UR.
- Van Ruijven, J. P. M., Van Os, E. A., Van der Staaij, M., Eveleens-Clark, B., & Beerling, E. A. M. (2018, August). Implementation of purification equipment for removal of plant protection products from horticultural discharge water. In XXX International Horticultural Congress IHC2018: II International Symposium on Soilless Culture and VIII International 1273 (pp. 145-152).
- Voogt, W., Garcia, N., Straver, N., en Van der Burg, N., 2006. Verlaging van het N-gehalte bij Roos. Onderzoek naar de mogelijkheden om rozen te telen met een permanent of tijdelijk lagere N-concentratie in het wortelmilieu om de N-emissie te verminderen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Naaldwijk, Nederland.
- Voogt, W., en Sonneveld, C. 2004. Interacties tussen Nitraat (NO₃) en Chloride (Cl) in Nutrient Solutions for Substrate Grown Tomato. *Acta Hort.* 644:359-368.
- Werkgroep Emissienormen. Implementatie van emissienormen voor stikstof in de glastuinbouw in substraatteelten. Beleidsnotitie, 2008.

Bijlage 1 – Kalibratieprocedure van de zuurstofsensor

Een 2-punts kalibratie in lucht werd uitgevoerd volgens de instructies van de Sendot meter. Eerst werd de temperatuur ingesteld die aanwezig is op het lab (21.8 °C), gevolgd door een 0% O₂ meting, waarbij een 5 L luchtzak gevuld werd met N₂ gas en gekoppeld werd aan een stukje slang waardoor precies de O₂ probe kon worden gestoken. Langzaam werd met de hand het N₂ gas uit de luchtzak geperst en langs de O₂ probe geleid. Wanneer het laagste punt werd bereikt en deze vrij stabiel bleef, nam de O₂ meter 3 metingen achter elkaar en werd dit als nieuwe 0% O₂ waarde beschouwd. Daarna volgde een 20.8% O₂ meting door de probe in de opstelling ruimte te bewegen. Hierbij werd de overgang van de probe naar de kabel vastgehouden en niet de probe zelf om zo temperatuur invloeden te beperken. Wanneer het hoogste O₂% werd bereikt en vrij stabiel bleef, werden weer 3 metingen door de O₂ meter genomen en werd deze waarde als 20.8% O₂ beschouwd.

Vervolgens werd de zojuist gekalibreerde sensor weer blootgesteld aan 0% en 20.8% O₂ op dezelfde wijze als tijdens de kalibratie. De O₂ sensoren maakten redelijk grote sprongen in O₂ niveau rondom 0% en 20.8%, daarom werd wanneer het laagste punt werd bereikt in de 0% O₂, de probe nog 30 seconden onder dezelfde condities gehouden en het laagste O₂% genoteerd, hetzelfde voor het hoogste O₂% op 20.8% O₂. Deze waardes werden samen met temperatuur en druk (mbar) genoteerd voor een meting in het vat en naderhand.

Bijlage 2 – Een numeriek voorbeeld van de berekeningsstappen van het potentiële opbrengstverlies door suboptimale concentraties in de wortelzone

Tabel 6.1 Een numeriek voorbeeld van de berekeningsstappen die zijn gebruikt om het potentiële opbrengstverlies als gevolg van afwijkingen van de drainagewateranalyse ten opzichte van de streefwaarde te berekenen.

Stappen	legende	Operatie	Eenheid
1) Correctie van de afvoeranalyse (x) naar een doel-EC (ECt)	ECt=3,7 ECX = 4,3 K = 15,9	$X*(ECt/ECx) = Xc$ $15,9*(3,7/4,3)=13,8$	mmol (X)/L
2) Berekening van de afwijking van een element X ten opzichte van de afvoerdoelwaarde (T)	Doel K = 8	$T - Xc = D$ $8 - 13,8 = -5,8$	mmol (X)/L
3) Omzetting van de afwijking (D) in zuurstofverbruik (o)	Zuurstoffactor ¹ (Van) = 0,45 (mmolO ₂ /mmol(x))	$ D *Van = o$ $5,8*0,45 = 2,6$	mmol O ₂ /L
4) Omzetting van concentratie naar absolute waarden (O) vermenigvuldiging voor de wateropname (W)	W = 1,4 (L/m ² /dag)	$o*W = O$ $2,6*1,4 = 3,6$	mmol O ₂ /m ²
5) Omzetting van zuurstofverlies in koolstofverlies (C) uitgaande van een verhouding van 1:1	Carbofactor (Cf) = 1/1	$O*Cf = C$ $3,6*1/1 = 3,6$	mmol C/m ²
6) Omzetting van koolstofverlies in vers opbrengstverlies (Y)	Koolstofmolair gewicht (c) = 12 g Koolstofbijdrage aan droge stof (C/DM) = 35% Oogstindex met droge stof (HI) = 60% Gehalte aan droge stof (DMf) = 10%	$\frac{c * 10^{-3} * C}{DM} * \frac{HI}{DMf} = Y$ $\frac{12 * 3,6 * 10^{-3}}{35\%} * \frac{60\%}{10\%} = 0,74$	g/m ²
7) Potentieel opbrengstverlies (YL) als de verhouding tussen de cumulatieve Y van elk element en de gemiddelde Opbrengstwinst (Yg)	Cumulatief opbrengstverlies ΣY = 2,55 g/m ² /dag Gemiddelde dagelijkse opbrengstwinst (Yg) = 170 (g/m ² /dag)	$\frac{\Sigma_{d=1}^n Y}{Yg} = YL$ $\frac{2,55}{170} = 1,5\%$	%

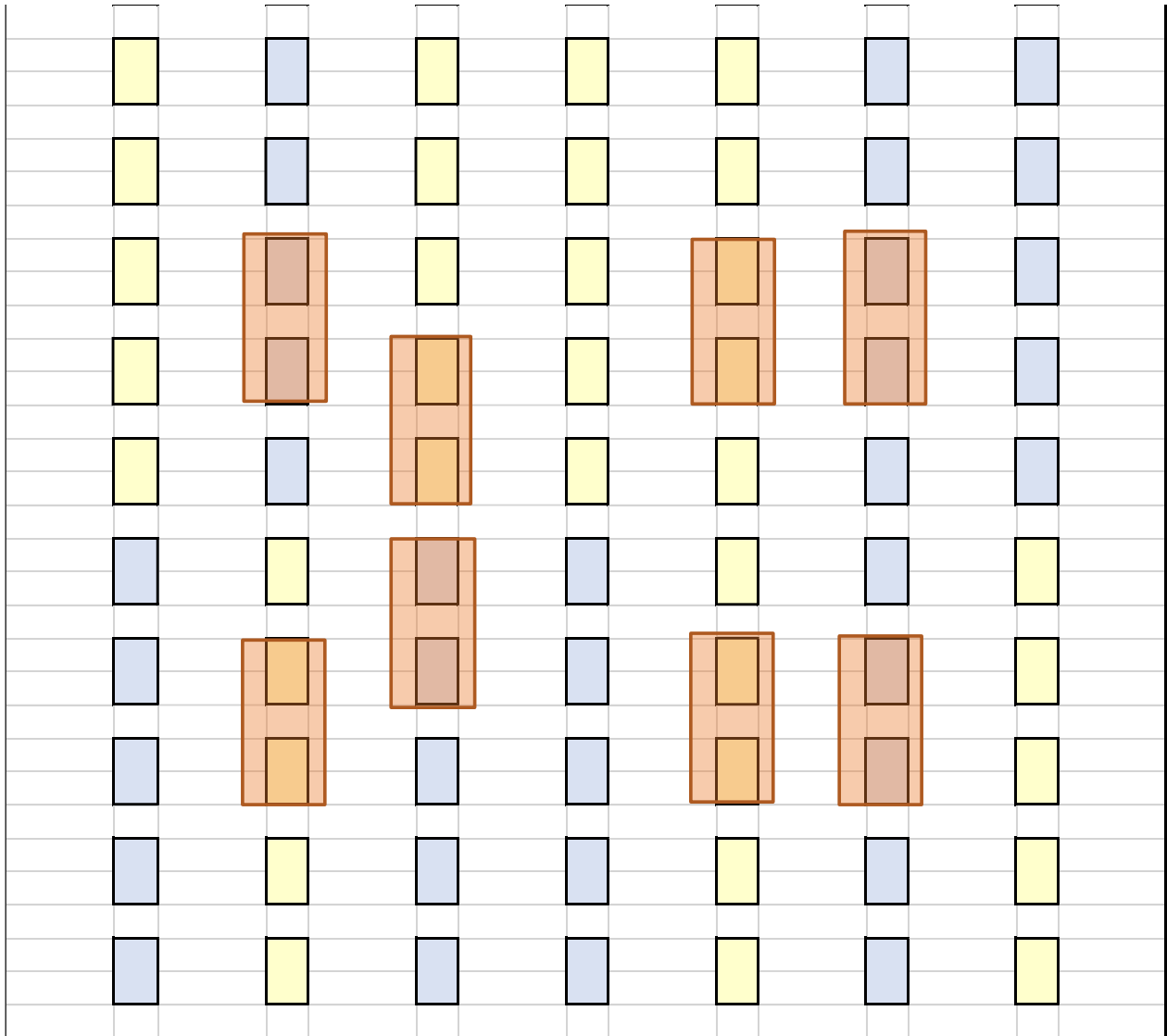
¹Zuurstoffactor = verbruikt mmol O₂ per 1 mmol afwijking van elk element van de streefwaarde, ontleend aan literatuur met bijvoorbeeld een factor 0,45 voor K en 1,0 voor NO₃.

²Voor elk element moet dezelfde berekening voor K worden herhaald. De som van stappen 1-6 van elk element voor de voorbeelddag is 9,6 g/m² vers opbrengstverlies. Zelfs toen de operatie werd opgeschaald naar 100 dagen data, werd de 4% gemiddeld ook bereikt.

Aannames:

- 1) Eén meting per dag wordt verondersteld representatief te zijn voor de hele dag. Drainwater wordt verondersteld representatief te zijn voor het wortelmilieu
- 2) De draintargetwaarden zoals gegeven door de BAB worden verondersteld de optimale groeiomstandigheden voor dit gewas te zijn
- 3) Het O₂-verbruik blijft lineair ten opzichte van de afwijking en verschilt niet tussen een positieve of verschilafwijking van de doelstelling. Het O₂-verbruik blijft constant in de tijd.
- 4) Een totale wekelijkse wateropname wordt gebruikt om uit te gaan van een dagelijkse wateropname binnen elke week
- 5) C:O₂-factor wordt verondersteld 1 te zijn
- 6) C/DM wordt verondersteld 35% te zijn.
- 7) De gemiddelde dagelijkse opbrengstwinst wordt berekend uitgaande van de gehele groeiperiode als bijdragend aan deze winst (niet alleen de generatieve fase).

Bijlage 3 - Proefopzet 2e proef Bleiswijk



Figuur 6.1. Proefopzet van de kasproef in Bleiswijk in 2021. De oppervlakte was 120 m². Twee behandelingen, in geel systeem A (referentie), in blauw systeem B (de ion-specifieke teelt). Elk vak stelt een plaat voor (1 meter). Elke plaat had 3 planten (in V-systeem). Het rode vierkant geeft de experimentele eenheden aan.

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
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-1250

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, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 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.